

マスコンクリートのひび割れ特性と
その低発熱型セメント成分特性に
着目した評価方法

那 須 健 吾

マスコンクリートのひび割れ特性
とその低発熱型セメント成分特性
に着目した評価方法

那 須 清 吾

目次

I 目次	〈1〉
II 記号の一覧	〈4〉
III 図の一覧	〈5〉
IV 表の一覧	〈9〉
V 写真の一覧	〈10〉

I 目次

1	序論	
1. 1	序論	1
1. 2	既往の研究の展望	2
1. 3	論文の構成	5
2	マスコンクリートの温度応力ひびわれ現象の計測	
2. 1	明石海峡大橋主塔基礎の施工概要	7
2. 2	現場計測の概要	10
2. 3	現場計測結果と温度応力解析シミュレーション	13
2. 4	ひび割れ発生メカニズムに関する考察	15
3	現場計測結果に基づく物理定数に関する考察	
3. 1	温度変化と自由ひずみの関係および線膨張係数	20
3. 2	拘束ひずみと有効応力、有効弾性係数	22
3. 3	コンクリートのひずみ拘束率	26
4	現象再現試験によるひびわれ発生機構のシミュレーション	
4. 1	現場計測上の問題点	30
4. 2	現象再現試験の概要	30

4. 3	現象再現試験結果	3 4
4. 4	現象再現試験結果に基づくひび割れ現象評価	3 7
4. 5	自己収縮（反応収縮）現象の評価	4 1
5 温度応力解析に関する改善提案		
5. 1	物理定数の試験方法に関する提案	4 7
5. 2	温度応力解析方法に関する提案	5 2
6 低発熱型セメントに関する改善提案		
6. 1	耐ひび割れ性に着目したセメントの特性	5 6
6. 2	低発熱型セメントに対する提案	5 7
7 低発熱型セメントの試験練り		
7. 1	試験練り計画の概要	5 9
7. 1. 1	物理試験	
7. 1. 2	自己収縮（反応収縮）試験	
7. 2	物理試験結果とその評価	6 5
7. 3	自己収縮（反応収縮）試験結果とその評価	7 3
7. 3. 1	セメントペースト	
7. 3. 2	コンクリート	
8 低発熱型コンクリートの耐ひび割れ特性の要因分析		
8. 1	物理試験結果の温度応力解析による評価	7 7
8. 2	耐ひび割れ特性の要因分析の概要	8 5
8. 2. 1	ひび割れ感受性の要因分析方法	
8. 2. 2	自己収縮（反応収縮）特性の要因分析方法	
8. 3	ひび割れ感受性の要因分析結果	8 7
8. 3. 1	引張強度比と各説明変数の単相関について	
8. 3. 2	引張強度比と各説明変数の重相関について	

8. 4 自己収縮特性	9 8
8. 4. 1 自己収縮量と各説明変数の単相関について	
8. 4. 2 自己収縮量と各説明変数の重相関について	
9 耐ひび割れ特性の改善に関する検討	
9. 1 マスコンクリートの望ましい温度応力特性、物理特性	1 0 7
9. 2 低発熱型セメントの改善の方向性	1 0 9
10 耐ひび割れ特性の評価基準の提案	
10. 1 評価基準の基本構成	1 1 1
10. 2 ひび割れ感受性指数のモデル化	1 1 4
10. 3 自己収縮（反応収縮）量のモデル化	1 2 3
10. 4 耐ひび割れ性評価基準の検証	1 2 7
10. 4. 1 明石海峡大橋の計測結果に係る検証	
10. 4. 2 明石海峡大橋の計測結果でのひび割れ感受性指数モデルの検証	
10. 4. 3 明石海峡大橋の計測結果での自己収縮（反応収縮）モデルの検証	
11 結論	
11. 1 成果のまとめ	1 3 6
11. 2 今後の方向性	1 3 9

II 記号の一覧

$f'_{ck}(91)$: 材齢91日設計基準強度
w/c	: 水セメント比
s/a	: 細骨材率
w	: 水の単位立米当たり重量
c	: セメントの単位立米当たり重量
s	: 細骨材の単位立米当たり重量
G	: 粗骨材の単位立米当たり重量
K	: 断熱温度上昇量 (断熱温度上昇式)
α, β	: 断熱温度上昇特性 (断熱温度上昇式)
α_i	: 硬化中のコンクリートの単位温度変化に対する自由歪み (線膨張係数)
α_r	: 硬化中のコンクリートの単位温度変化に対する実歪み
K_i	: コンクリート拘束率 $[(\alpha_i - \alpha_r) / \alpha_i]$
G_{max}	: 粗骨材の最大寸法
ε_s	: コンクリートの発生応力をその材齢時の積算温度換算弾性係数で除した値 (応力に寄与する歪み)
ε_T	: コンクリートの温度変化に線膨張係数を乗じた値 (温度による歪み)
ε_r	: コンクリートの実歪み
I_{cs}	: ひび割れ感受性指数モデル
C_1, C_2	: ひび割れ感受性指数モデルを構成する変数
S_h	: セメントペーストの自己収縮 (反応収縮) 歪みモデル
S	: スラグ混合率
A	: エーライト混合率
B	: ビーライト混合率
$C(t), D(t)$: セメントペーストの自己収縮 (反応収縮) 歪みモデルの材齢を変数とする定数
α_s	: 自己収縮 (反応収縮) 歪みのコンクリート/セメントペースト換算率

III 図の一覧

- 図-2. 1 主塔基礎一般図
- 図-2. 2 (a) ブロック割平面図
- 図-2. 2 (b) 打設リフト割側面図
- 図-2. 3 計測機器の設置位置 (高さ)
- 図-2. 4 計測機器の配置図 (2 P 主塔基礎の例)
- 図-2. 5 温度応力解析モデル
- 図-2. 6 解析に用いたリフト毎の温度履歴
- 図-2. 7 温度応力解析による応力履歴の推定結果
- 図-2. 8 温度、応力、拘束ひずみ計測位置の例 (3 P 主塔基礎)
- 図-2. 9 温度、応力、拘束ひずみ計測結果の例 (3 P 主塔基礎)
- 図-2. 10 温度、拘束ひずみ、応力の各履歴の関係模式図
- 図-3. 1 2 P 主塔基礎現場計測による温度と自由ひずみ
- 図-3. 2 3 P 主塔基礎現場計測による温度と自由ひずみ
- 図-3. 3 3 P 主塔基礎現場計測による拘束ひずみと有効応力の関係
- 図-3. 4 2 P 主塔基礎の有効弾性係数算定結果
- 図-3. 5 3 P 主塔基礎の有効弾性係数算定結果
- 図-3. 6 3 P 主塔基礎現場計測による温度と実ひずみの関係
- 図-3. 7 2 P 主塔基礎の拘束率算定結果
- 図-3. 8 3 P 主塔基礎の拘束率算定結果
- 図-4. 1 現象再現試験装置の概要
- 図-4. 2 現場計測および現象再現試験の温度履歴 (3 P 主塔基礎)
- 図-4. 3 現場計測および現象再現試験のひずみ履歴 (3 P 主塔基礎)
- 図-4. 4 現場計測および現象再現試験の温度～実ひずみの関係 (3 P 主塔基礎)
- 図-4. 5 現場計測および現象再現試験の応力履歴 (3 P 主塔基礎)
- 図-4. 6 現場計測および現象再現試験の温度～応力の関係 (3 P 主塔基礎)
- 図-4. 7 現場計測および現象再現試験の温度履歴 (2 P 主塔基礎)

- 図-4. 8 現場計測および現象再現試験のひずみ履歴 (2 P主塔基礎)
- 図-4. 9 現場計測および現象再現試験の温度～実ひずみの関係 (2 P主塔基礎)
- 図-4. 10 現場計測および現象再現試験の応力履歴 (2 P主塔基礎)
- 図-4. 11 現場計測および現象再現試験の温度～応力の関係 (2 P主塔基礎)
- 図-4. 12 3 P現場計測における自己収縮 (反応収縮)
- 図-4. 13 3 P現象再現試験における自己収縮 (反応収縮)
- 図-4. 14 2 P現場計測における自己収縮 (反応収縮)
- 図-4. 15 2 P現象再現試験における自己収縮 (反応収縮) —a)
- 図-4. 16 2 P現象再現試験における自己収縮 (反応収縮) —b)
- 図-4. 17 2 P現象再現試験における自己収縮 (反応収縮) —c)
- 図-4. 18 3 P現象再現試験の拘束供試体における自己収縮 (反応収縮)
- 図-4. 19 2 P現象再現試験の拘束供試体における自己収縮 (反応収縮) —b)
- 図-4. 20 2 P現象再現試験の拘束供試体における自己収縮 (反応収縮) —c)
- 図-5. 1 1/3 強度圧縮割線弾性係数と引張割線弾性係数の関係
- 図-5. 2 圧縮接線弾性係数と引張割線弾性係数の関係
- 図-5. 3 材齢毎のクリープ係数
- 図-5. 4 材齢毎の単位クリープひずみ
- 図-5. 5 積算温度換算による引張割線弾性係数の比較 (2 P主塔基礎)
- 図-5. 6 積算温度換算による引張割線弾性係数の比較 (3 P主塔基礎)
- 図-5. 7 積算温度換算による割裂引張強度の比較 (2 P主塔基礎)
- 図-5. 8 積算温度換算による割裂引張強度の比較 (3 P主塔基礎)
- 図-5. 9 温度応力解析における物理定数の適用方法
- 図-7. 1 引張強度試験の治具
- 図-7. 2 クリープ試験方法
- 図-7. 3 線膨張係数試験装置
- 図-7. 4 コンタクトチップの張り付け要領 (コンクリート供試体の場合)
- 図-7. 5 圧縮強度試験結果
- 図-7. 6 割裂引張強度試験結果

- 図-7. 7 直接引張強度試験結果
- 図-7. 8 直接引張強度と割裂引張強度の関係
- 図-7. 9 圧縮弾性係数(1/3強度割線)試験結果
- 図-7. 10 引張弾性係数試験結果
- 図-7. 11 1/3圧縮強度割線弾性係数と引張弾性係数の関係
- 図-7. 12 圧縮接線弾性係数と引張弾性係数の関係
- 図-7. 13 クリープ試験結果
- 図-7. 14 断熱温度上昇試験結果
- 図-7. 15 セメントペーストの自己収縮試験結果(W/C=30%、養生温度=25°C)
- 図-7. 16 養生温度毎のコンクリートの自己収縮試験結果
- 図-8. 1 温度応力解析モデル
- 図-8. 2 (a) 温度解析および応力解析の結果(A、B、C社)
- 図-8. 2 (b) 温度解析および応力解析の結果(D、E、F社)
- 図-8. 2 (c) 温度解析および応力解析の結果(G、H、I社)
- 図-8. 2 (d) 温度解析および応力解析の結果(2P、3P)
- 図-8. 3 引張強度比 と スラグ混合率
- 図-8. 4 引張強度比 と クリンカー混合率
- 図-8. 5 引張強度比 と スラグ混合率 + エーライト混合率
- 図-8. 6 引張強度比 と スラグ粉末度
- 図-8. 7 引張強度比 と セメント粉末度
- 図-8. 8 引張強度比 と 断熱温度上昇特性K
- 図-8. 9 引張強度比 と 断熱温度上昇特性 α
- 図-8. 10 引張強度比 と 圧縮強度
- 図-8. 11 セメントペースト自己収縮量とスラグ混合率の関係
- 図-8. 12 セメントペースト自己収縮量と(スラグ混合率+エーライト混合率)の関係
- 図-8. 13 セメントペースト自己収縮量と(スラグ混合率+エーライト混合率+ビークライト混合率)の関係
- 図-8. 14 セメントペースト自己収縮量とスラグ粉末度の関係

- 図-8. 15 セメントペースト自己収縮量とセメント粉末度の関係
- 図-8. 16 セメントペーストの自己収縮量と引張強度比の関係
- 図-10. 1 コンクリートの耐ひび割れ性の評価方法
- 図-10. 2 材齢毎の引張強度比
- 図-10. 3 モデル式C (t)、D (t) の検証結果
- 図-10. 4 モデル式①による推定値と実測値の比較
- 図-10. 5 モデル式②による推定値と実測値の比較
- 図-10. 6 モデル式③による推定値と実測値の比較
- 図-10. 7 モデル式①' による推定値と実測値の比較
- 図-10. 8 モデル式③' による推定値と実測値の比較
- 図-10. 9 自己収縮（反応収縮）歪みの測定値と推定値との比較
(説明変数: $s \times g$ 混合率 + $1 - \text{ライト混合率} - \text{ビークライト混合率}$)
- 図-10. 10 コンクリート自己収縮（反応収縮）モデルによる歪みの経時変化
- 図-10. 11 現象再現試験結果とモデルによるシミュレーション結果の比較

IV表の一覧

- 表-2. 1 気中コンクリートの要求品質
- 表-2. 2 (a) 2P気中コンクリート示方配合
- 表-2. 2 (b) 3P気中コンクリート示方配合
- 表-2. 3 低発熱型セメントの品質
- 表-2. 4 温度応力解析条件
- 表-3. 1 現場計測に基づく線膨張係数
- 表-4. 1 3P主塔基礎の配合
- 表-4. 2 2P主塔基礎の配合
- 表-4. 3 現象再現試験・現場計測・温度応力解析結果の比較
- 表-6. 1 低発熱型セメントの改良案の概要
- 表-7. 1 低発熱型コンクリートの基本性状
- 表-7. 2 低発熱型コンクリートの基本配合
- 表-7. 3 試験項目および試験方法
- 表-7. 4 自己収縮試験に用いたセメントの概要
- 表-7. 5 コンクリートの実施配合
- 表-7. 6 実施配合およびフレッシュコンクリートの性状
- 表-7. 7 線膨張係数の試験結果
- 表-7. 8 セメントペーストの自己収縮試験結果 (W/D=30%、養生温度=25度)
- 表-7. 9 コンクリートの自己収縮試験結果
- 表-8. 1 コンクリートの材料定数
- 表-8. 2 外気温 (月平均)
- 表-8. 3 熱伝導解析結果 (第1リフト)
- 表-8. 4 温度応力解析結果 (第1リフト)
- 表-8. 5 最小ひび割れ指数 (第1リフト)
- 表-8. 6 改良型の低発熱型セメントの成分特性
- 表-8. 7 改良型の低発熱型セメントを用いたコンクリートの物理特性等

- 表-8. 8 重回帰分析結果(重相関係数)一覧表
- 表-8. 9 重回帰分析結果(材齢: 14日)
- 表-8. 10 重回帰分析結果(材齢: 28日)
- 表-8. 11 標準化偏回帰係数の材齢毎の比較
- 表-8. 11 重回帰分析結果(重相関係数)一覧表
- 表-8. 12 セメントペースト自己収縮量に対する重回帰分析結果
 ー説明変数: (スラグ混合率+エーライト混合率)、セメント粉末度
- 表-8. 13 セメントペースト自己収縮量に対する重回帰分析結果
 ー説明変数: スラグ混合率、スラグ粉末度
- 表-8. 14 セメントペースト自己収縮量に対する重回帰分析結果
 ー説明変数: スラグ混合率+エーライト混合率+ビークライト混合率、スラグ粉末度
- 表-10. 1 引張強度比(平均値)に対する重回帰分析結果(その1)
- 表-10. 2 引張強度比(平均値)に対する重回帰分析結果(その2)
- 表-10. 3 重回帰分析①の回帰式の2次元化
- 表-10. 4 重回帰分析②の回帰式の2次元化
- 表-10. 5 重回帰分析③の回帰式の2次元化
- 表-10. 6 単回帰分析結果
- 表-10. 7 補正係数の試算結果
- 表-10. 8 要求ひび割れ指数等の試算例
- 表-10. 9 ひび割れ指数の実測値とモデル式による推定式(要求値)の比較

V 写真の一覧

- 写真-4. 1 温度可変槽
- 写真-4. 2 調整計、強度試験養生水槽他
- 写真-4. 3 供試体の打設状況
- 写真-7. 1 直接引張試験の試験状況

平成10年4月5日に開通した明石海峡大橋は、平成7年1月17日の阪神淡路大震災にも耐え、現在、約3万台/日近い自動車交通を支えている。

この長大橋の2本の主塔を支える要となる基礎において発生した温度応力ひび割れ現象は、その後の解析で、構造上の問題とならないことが確認されたが、筆者はその構造物の重要性故に、原因を究明しておく必要性、構造物への影響を最小限に止めるためのセメントの改良の必要性を強く感じ、それが本研究につながった。

当時は、低発熱型セメントを用いていたこともあり、材齢初期に温度応力ひび割れが発生するとは考え難く、発見当初は乾燥ひび割れであると専門家からは説明された。しかし、コンクリートの専門家では無かった筆者が、実際にひび割れを観察して直感した結論は、何らかの原因でコンクリートが収縮し、ひび割れが発生しているということだった。また、ひび割れの状況から、コンクリートが固すぎるのではとの印象を得ていた。

筆者が専門家ではなかったために疑問を持ち、結果として、膨大な試験練り、物理試験等を考え、また、当時の本州四国連絡橋公団や工事関係者等がそれを許してくれたことが非常に大きい。

筆者は、本研究を取りまとめるにあたり、これら明石海峡大橋の主塔基礎の建設に携わり、ご協力を頂いた建設会社の関係者、セメントの改良に多大なご協力を頂いたセメント製造メーカーの関係者、多くの室内試験を実施するとともにご助言を頂いた広島大学の田澤先生に感謝するものであります。

また、論文の作成に際して多くのご助言とご指導を頂いた東京大学の岡村先生、本論文をまとめるに当たり貴重なご意見を頂いた東京大学の前川先生、魚本先生、藤野先生、國島先生、野口先生に感謝するものであります。

さらに、種々の面でご支援を頂いた建設省、本州四国連絡橋公団の関係者、利エックコンサルの三百田氏のほか、友人や家族にも感謝したい。

1 序論

1-1 序論

本州四国連絡道路の神戸淡路鳴門自動車道のうち、神戸市と淡路島を連絡する明石海峡大橋の基礎において採用された低発熱型セメントを用いたコンクリートは、単位セメント量 260 kg/m^3 において断熱温度上昇量が 25°C 以下（練り上がり温度 20°C ）と、従来の高炉B種セメントを用いたコンクリートから著しく改善されている上、91日材齢強度 24.0 kgf/cm^2 を確保したことにより、いわゆるマスコンクリートの温度応力ひび割れに関する問題は大きく改善され、従来見られた大きなマスコンクリートひび割れは見られなくなった。

コンクリートの耐ひび割れ性は、温度上昇特性の他、コンクリートの引張強度、弾性係数、クリープ係数、凝結完了時間等に依存しており、更にこれらは時間依存性、温度履歴依存性を有する。これらを総合して評価する方法としては、温度応力解析が有効であり、引張強度と発生応力の比であるひび割れ指数により評価するのが一般的である。しかし、実際には現場におけるマスコンクリートの温度応力発生機構は十分には解明されていない。また、温度応力解析においても、実際の現象に合った上記の各要因およびその時間および温度履歴依存性が、十分反映されているとは言えない。

低発熱型セメントを用いたコンクリートを施工した明石海峡大橋主塔基礎においては、温度、ひずみ、応力など各種の現場計測を実施し、現象を解明するとともに、温度応力ひび割れの防止対策に活用することを計画した。その結果、得られた現場計測データから、低発熱型セメントを用いたマスコンクリートの温度応力発生メカニズムについて確認することが出来た。

また、現場の計測からは説明出来ない現象については、現場におけるコンクリートの温度履歴や拘束状態などを忠実に再現した室内試験を実施することにより、その原因を検討することとした。

その結果、温度応力によるひび割れ現象が、温度応力解析において考慮されていないコンクリートのひび割れに対する感度（以降、ひび割れ感受性）、硬化する過程で反応によって生じる収縮（以降、自己収縮）の影響を受けること、温度応力解析において適用されている弾性係数、線膨張係数、クリープ係数等の物理定数の妥当性に疑問があることを確認した。そして、これらの結果に基づき従来の温度応力解析方法の

適用方法、物理試験方法及び、その評価方法を再検討し、より現実に近い温度応力解析方法を提案するとともに、現場計測結果を検証するための多様な成分の低発熱セメントによる試験練り、物理試験、自己収縮計測試験等により、マスコンクリートの耐ひび割れ性に影響を与える低発熱型セメントの物理特性や成分特性など諸特性について解明した。

まず、低発熱型セメントのスラグ、フライアッシュ、クリンカーの混合比率、粉末度、化学成分比率等が、耐ひび割れ性に与える影響を試験練り（各種物理試験、断熱温度上昇試験等を含む）により検討した。対象としたセメントは、明石海峡大橋主塔基礎で採用した2種類の低発熱型セメント及び、現場計測結果を受けてセメント製造メーカー9社により試製造された多様な物理特性と成分特性を有する低発熱セメント（9種類）である。また、検討する際に適用した配合は、明石海峡大橋主塔基礎におけるマスコンクリートの配合とした。

その結果、耐ひび割れ性が温度応力解析により得られたひび割れ指数だけで判断できるものではなく、低発熱型セメントの成分特性に依存するひび割れ感受性、自己収縮の特性が重要であることを指摘した。明確な特徴としては、セメント中のスラグの混合比率、スラグ粉末度が大きい程ひび割れに敏感であり、重回帰分析の結果、これらの特性の組み合わせとひび割れ感受性の相関が非常に高いこと、さらに、低発熱型セメントを用いたセメントペーストの自己収縮量を室内試験で計測した結果、自己収縮量についてもひび割れ感受性と同様、低発熱型セメントの成分特性（スラグ混入比率及びビーライト混入比率）に依存していることも判明した。

以上の結果を踏まえ、耐ひび割れ性を改善する上で低発熱型セメントの成分特性のあるべき方向性を示すとともに、今後種々のコンクリートに対応出来る様に、マスコンクリートの耐ひび割れ性の評価方法について提案、明石海峡大橋で確認された現象の解析に適用すること等により、その有用性について確認した。

1. 2 既往の研究の展望

低発熱型セメントを用いたマスコンクリートの温度、応力、歪み等の現場計測は、明石海峡大橋主塔基礎が初めての事例である。本州四国連絡橋公団においては、瀬戸大橋における多くのマスコンクリートの現場計測事例があるが、いずれも結果の解釈が非常に難しい。つまり、温度履歴と温度分布状況に基づき温度応力解析法で計算さ

れる応力が、現場計測で得られた発生応力と必ずしも一致しないことであり、計測機器にも精度上の問題があるとの指摘がある。

前者については、種々の問題点を指摘することができる。まず、1) 温度応力解析が想定している現象が、実際の現象を正確に再現したものではないこと、2) 解析において適用されるコンクリート強度、弾性係数、クリープ係数等が20℃標準養生による供試体の試験結果をそのまま用いているが、実際の温度履歴により、これらの物理特性は大きく異なることである。温度応力解析方法にはFEM(二次元、三次元)による方法、コンフェンセーションライン法等の簡易計算法もある。これらの計算方法及び、従来型セメントを使用したコンクリート構造物を前提とした場合、解析上の問題は少ないと言われており、コンクリート標準示方書で規定されているひびわれ指数との関係においても、実用的には十分正確であると言われている。つまり、汎用的に使用されているセメントの特性を対象とした場合、多少の実現象との相違点については、確立論的に求めるひび割れ指数を設定することで許容されると言える。しかし、低発熱型セメントを用いた明石海峡大橋主塔基礎の現場計測は、温度応力解析結果とは大きな相違点を示しており、従来の温度応力解析方法をそのまま適用できないことが考えられる。ただし、この点については既往の研究結果が無かった。

温度応力解析方法については、クリープ係数、コンクリート強度、弾性係数等のモデル化の違いで異なった結果が得られる。

クリープ係数を解析に導入する場合、1) 有効弾性係数による方法、2) ステップ毎の応力低減による方法がある。前者は、コンクリートの材令ステップ毎の弾性係数をクリープを考慮して低減し、重ね合わせることで発生応力を算出する方法であり、将来の応力変化を予め修正することから、実際の発生応力とは異なる。後者は、コンクリートの材令に応じた弾性係数による弾性解析で算出した応力を、時間ステップ毎の載荷荷重と仮定して、各時間ステップ毎に応力を低減する方法である。この場合のクリープ関数は所定材令の20℃標準養生の供試体に対してクリープ試験を実施して得た関数であり、各時間ステップ毎にクリープ関数を材令に応じて0点を修正したものを適用する。現象の再現性としては、後者が優れているが、時間ステップ毎に変化する応力状態下において時間ステップ毎の発生応力に対するクリープ現象が線形的に重ね得るかどうかは疑問である。また、クリープ関数を温度応力解析に用いる場合の関数モデルとしては現在CEBあるいは土木学会式があるが、いずれも7日材齢ある

いは28日材齢のクリープ試験の結果に基づきモデル化するのが一般的であり、若材齢、特に7日材齢より早い段階におけるクリープ特性を反映しているとは言えない。従って、明石海峡大橋で採用された低発熱型セメントを用いたコンクリートのように、物理特性の変化が大きい初期段階で強度発現が達成される場合、解析結果が実際の現象と大きく異なる可能性が高いことが予測される。

通常、温度応力解析で適用する弾性係数は、標準供試体の圧縮強度試験の $1/3$ 圧縮強度時の割線弾性係数を採用する場合が多い。また、引張強度も標準供試体の割裂引張試験の結果をそのまま採用しているケースが多い。しかし、温度応力を議論する際の応力レベルは $1/3$ 圧縮強度よりも小さいこと、ひずみ～応力関係は勾配が単調減少の非線形であることから、解析に用いている割線弾性係数は、実際に温度応力が発生する、ひずみ～応力関係の原点に近い接線弾性係数よりも小さいと考えられる。

引張強度についても、強度試験結果の評価上の問題点を指摘することが出来る。引張強度試験法には、割裂引張試験方法の他、種々の直接引張試験方法が提案されている。報告されている試験結果では、直接引張試験による引張強度は割裂引張試験による値よりも小さいという例が多い一方、供試体端部の幅を広げた直接引張試験においては、割裂引張強度よりもむしろ大きいという報告例もある。ただし、この例では供試体の寸法の関係上骨材寸法が小さいという条件もあり、単純に結果を評価することは困難である。割裂引張試験は試験方法が比較的簡易であることから、広く採用されている試験方法ではあるが、応力状態で強度が変化することが考えられる、セメントペーストと骨材の複合材料であるコンクリートの引張強度を、割裂引張強度で単純に代表させることには議論の余地がある。

コンクリートの耐ひびわれ特性を論じる際に、今まではあまり注目されてこなかった現象に自己収縮（反応収縮）がある。最近では、コンクリートが硬化してゆく過程で収縮する実験結果が多く報告されている。特にセメントペーストレベルでの自己収縮ひずみは 10 のマイナス 3 乗レベルと非常に大きいことも報告されている。自己収縮（反応収縮）は、拘束状態にあるコンクリートにあつては引張応力を増加させて、応力状態を引張応力側にシフトさせる効果がある。また、骨材とセメントペーストとの複合材料であるコンクリートにあつて、セメントペーストが収縮することは、コンクリート組織に残留応力、内部欠陥等を内在させることが考えられる。しかし、このような微細構造がコンクリートの引張強度、耐ひびわれに与える影響について報告した

事例は無い。

この様に非常に複雑な温度応力特性を有するコンクリートの温度応力による耐ひび割れ特性を直接評価する方法が提案されている。これは、昭和55年からJISとして制定する試みがなされた試験方法であり、実際の温度履歴を与えた供試体を、打ち込み時から直接引張状態で拘束し、ひび割れの発生を確認する方法である。温度応力解析によらずコンクリートの温度応力に対する耐ひびわれ性を判定する上で非常に有用であると考えられるが、厳密にマスコンクリートの温度履歴、拘束状態を再現した例は無い。

最後にセメントについてであるが、本州四国連絡橋公団では明石海峡大橋の基礎（マスコンクリート構造）を施工する為、低発熱型セメントが開発されている。従来用いられていた高炉B種と比較して格段に発熱を抑えたものであり、単位セメント量260kgで断熱温度上昇量を25℃以下に抑えている。この条件を満足する為に開発された低発熱型セメントは、発熱量を抑える為にクリンカー成分比率を小さく、スラグあるいはフライアッシュ成分比率を大きくしている。クリンカーを減らすことにより強度は低下するが、セメント全体の粉末度を大きくすることで初期強度及び最終強度を高めている。開発された低発熱型セメントは明石海峡大橋の特殊水中コンクリート、気中コンクリートに採用されており、また、国内でも多くの実績が出来つつある。ただし、耐ひびわれ性の面では高炉B種との優劣は不明であり、今後の研究が必要である。

1. 3 論文の構成

本研究の目的は、低発熱型セメントを用いたマスコンクリートの温度応力発生メカニズムを解明し、マスコンクリートに使用する場合の低発熱型セメントの耐ひび割れ性に着目した望ましい成分特性について提案するとともに、耐ひび割れ性を評価する手法を体系化することである。

第2章では、低発熱型セメントを用いたマスコンクリートの明石海峡大橋主塔基礎における現場計測内容について説明する。計測結果を温度応力解析でシミュレーションすることにより、温度応力発生機構、特に若材齢時のマスコンクリートのひび割れ発生メカニズムについて解明する。

第3章では、現場計測した温度、無応力ひずみ、実ひずみ、応力の経時変化に基づ

き、実際のマスコンクリート中の線膨張係数と自己収縮（反応収縮）、拘束ひずみと拘束率、有効弾性係数について説明し、従来の温度応力解析においては考慮されていない物理特性の時系列的変化に関する特徴について述べる。

第4章では、温度履歴、拘束率等の条件を、明石海峡大橋主塔基礎での計測結果と全て同一にした室内における現象再現試験を実施した結果を、現場計測結果と比較することにより、現場計測結果の妥当性について検証し、問題点を指摘する。

第5章では、全章迄の検討結果を踏まえて、従来の温度応力解析方法、解析に用いる物理定数の試験方法の問題点について考察し、温度応力解析方法の適用方法、試験方法についての改善について提案する。

第6章では、現場計測結果及び室内現象再現試験等の結果に基づき、耐ひび割れ性に着目したセメントの望ましい成分特性の仮説を設定し、その結果としての低発熱型セメントの改良案を示す。

第7章では、明石海峡大橋主塔基礎で採用した示方配合により、明石海峡大橋主塔基礎で採用した低発熱型セメント2種類および、セメント製造メーカー9社に試製造を依頼した低発熱型セメントの改良型について試験練りを実施し、物理特性、自己収縮（反応収縮）を評価した。

第8章では、前章における試験結果に基づき、耐ひび割れ性のセメント成分特性との関係において分析した。特に低発熱型セメントの3成分（クリンカー、スラグ、フライアッシュ）の混合比率、クリンカー成分とひび割れ感受性、自己収縮（反応収縮）との単相関分析、重回帰分析が実施された。

第9章では、耐ひび割れ性に着目した場合のマスコンクリートの望ましい物理特性、温度上昇特性、低発熱型セメントの成分特性、粉末度等について提案した。

第10章では、現場において低発熱型セメントを使用する場合を想定した、耐ひび割れ性（温度応力ひび割れ性）の評価基準（案）の提案をした。提案内容としては、評価基準において必要な試験練り項目及び内容、温度応力解析の実施方法、及び評価に際して必要となるひび割れ感受性指数、自己収縮量のモデル化である。

また、提案した自己収縮モデル、温度応力解析方法に基づき明石海峡大橋の現場計測で確認された現象をシミュレーションした。

第11章では、本論文が示した成果の意義について述べるとともに、今後の課題について述べた。

2 マスコンクリートの温度応力ひびわれ現象の計測

2. 1 明石海峡大橋主塔基礎の工事概要

明石海峡大橋主塔基礎の気中コンクリートでは、低発熱型セメントを使用したマスコンクリートを打設した。本論文における研究の対象は、図-2. 1の主塔基礎一般図における「気中コンクリート」部分であり、2基の主塔基礎（2P基礎、3P基礎）それぞれ89,100m³、84,400m³のコンクリートを、約1年の期間で打設した。

打設計画は図-2. 2 (a) に示すとおり、基礎の主要部分は平面積約5,000m²と巨大であることから7分割し、図-2. 2 (b) に示すとおり高さ方向に最大厚さ約1.5mに分割した。1回当たり最大約1,500m³/日の低発熱型コンクリートを約17日周期で順次施工した。

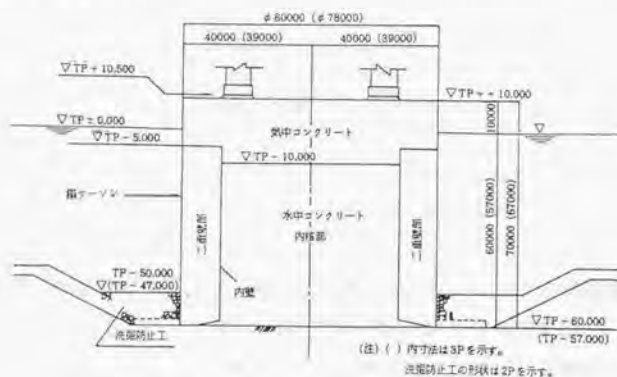


図-2. 1 主塔基礎一般図

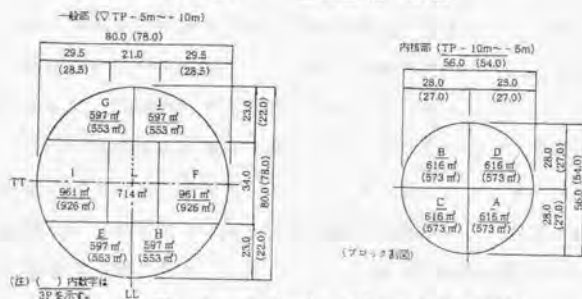


図-2. 2 (a) ブロック割平面図

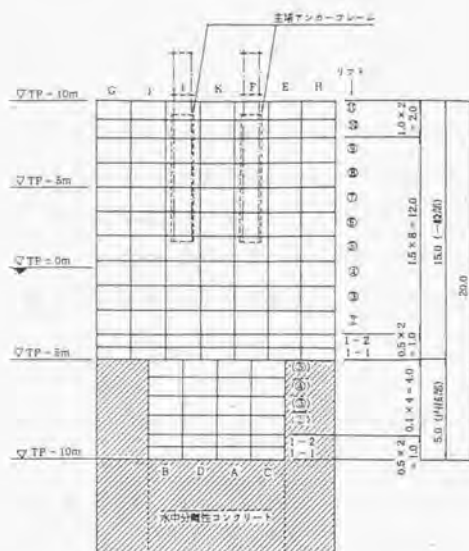


図-2. 2 (b) 打設リフト割側面図

打設計画策定に当たっては、リフト割計画、区分されたブロックの打設順序と打設時間間隔により平面ひずみ2次元有限要素法による温度応力解析を実施し、ひび割れ指数が1.5以上確保されることを条件とした。気中コンクリートは事前に施工された同じ低発熱型セメントを用いた水中不分離性コンクリート上に打設されており、解析に際しては温度分布を含めた境界条件に考慮された。結果として打設計画において確保されたひび割れ指数は若材齢時2.0程度、長期では1.5以上であり、土木学会の判定方法に従えば、ひび割れ発生確率は5%以下であった。

施工したコンクリートの要求品質は、表-2、1に示すとおりである。使用した示方配合及び低発熱型セメントの品質は、それぞれ表-2、2、表-2、3に示すとおりである。瀬戸大橋などそれ迄の本州四国連絡橋公団において施工された大規模マスコンクリート構造は、単位セメント量 280 kg/m^3 の高炉B種を用いたコンクリートにより施工されたが、断熱温度上昇量が 4.5°C と非常に大きく、いわゆる温度応力

ひび割れが発生していた。低発熱型セメントは、明石海峡大橋の各基礎が大規模コンクリート構造物であることから、コンクリートの圧縮強度を従来の高炉B種を用いたコンクリートと同等に確保しつつ、セメントの水和熱を抑えることにより温度応力ひび割れを抑制する目的で開発された。このセメントは、ポルトランドセメントの混合比率を小さくすることにより水和熱を抑え、高炉スラグ粉末あるいはフライアッシュを多量に混合した2成分系あるいは3成分系であり、初期強度及び長期強度を十分確保する為に各成分粉末度を高くして活性化させている。強度を高くする為に水セメント比も小さく設定されており、その為に高性能減水剤で流動化が図られている。高性能減水剤の使用により凝結が遅くなることから発生するブリージングは、粉末度の高い石粉を混入することで5%以下に抑えている。

表-2. 1 気中コンクリートの要求品質

コンクリートの種別	L-7
設計基準強度	$f'_{ok(91)} = 24.0 \text{ kg/cm}^2$
ベーススランプ	$5 \pm 1.5 \text{ cm}$
流動化後スランプ	$8 \pm 2.5 \text{ cm}$
空気量	$4 \pm 1 \%$
ブリージング率	5%以下
打設温度	20℃以下
断熱温度上昇量	25℃以下

表-2. 2 (a) 2P気中コンクリート示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤	
		W	C	石粉	S	G	SP9N	775S
53.8	40.0	140	260	30	710	1157	1.1%	2.5A

表-2. 2 (b) 3P気中コンクリート示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤	
		W	C	石粉	S	G	SP9N	775S
53.5	41.0	139	260	50	712	1126	1.4%	4.0A

表-2. 3 低発熱型セメントの品質

項 目		2 P	3 P
比 重		2.82	3.00
比表面積 (cm^2/g)		4.860	4.060
凝結 (時-分)	開 始	5-07	4-30
	集 結	7-42	6-47
安 定 性		良	良
圧 縮 強 度 (kg/cm^2)	3 日	62	63
	7 日	129	139
	28 日	280	269
	91 日	408	375
化学成分 (%)	強熱源量	0.6	1.4
	不溶残分	14.6	0.2
	酸化カルシウム	41.5	48.7
	酸化マグネシウム	2.8	4.2
	三酸化硫黄	1.3	2.0
	全灰分	0.50	0.42
水 和 熱 (cal/g)	7 日	37.9	40.4
	28 日	45.2	46.5
	91 日	57.3	50.6
成分の 混合比率 (%)	ポルトランドセメント	32	30
	高炉スラグ微粉末	48	70
	フライアッシュ	20	0

2. 2 現場計測の概要

主塔基礎の気中コンクリート施工に際しては、施工実績の無い低発熱型セメントを用いたマスコンクリートの温度応力解析、打設計画に必要な情報を得ることを目的として、温度、実ひずみ、無応力ひずみ、有効応力等の経時変化に関するデータを測定することとした。

計測上のポイントは、温度応力解析に必要な物理定数を得ること、解析上予測している温度、応力分布であるかを確認することにより、当初設定した温度応力解析上のコンクリートの物理定数、解析上の境界条件等を修正の上再解析し、施工計画に反映することである。

以下に測定項目とその内容について述べる。

① 気温測定

大気との接触により逸散する熱量を算定するための伝達係数を得る為に計測する。

主塔基礎上に設置された測定ボックス内の熱電対により常時計測する。

② 水温測定

気中コンクリートの平均水面以下の部分で、型枠を介して直接海水温度の影響を受ける $T \sim 5m \sim \pm 0m$ の範囲の伝達係数を得る。熱電対により計測する。

③ 水中コンクリート温度測定

温度応力解析を実施する為に必要な、気中コンクリートと接する水中コンクリートの境界条件を得る為、水中コンクリート温度の鉛直方向変化を熱電対で測定した。

④ 気中コンクリート温度測定

気中コンクリートの温度測定は、短期及び長期の温度変化及び分布を計測することを目的とする。短期的には、次のリフトが施工される迄の温度降下時に発生するリフト内鉛直方向の温度勾配を測定し、短期的な応力発生について検証する。長期的にはマスコンクリート構造全体の温度分布を測定し、長期的な応力発生を検証する。また、①と②において得た外部環境の気温データに基づき熱伝達係数を得る。

⑤ 気中コンクリートの応力、ひずみ測定

温度測定位置（鉛直方向）に部分的に有効応力計、ひずみ計を設置し、①～④における計測結果に基づく温度応力解析結果と比較し、その妥当性を検証する。

⑥ 自由ひずみの測定

気中コンクリートの2種類の示方配合に対してそれぞれ1箇所に無応力計を設置し、自由ひずみを測定することにより、マスコンクリート中の無応力状態の線膨張係数を算出した。

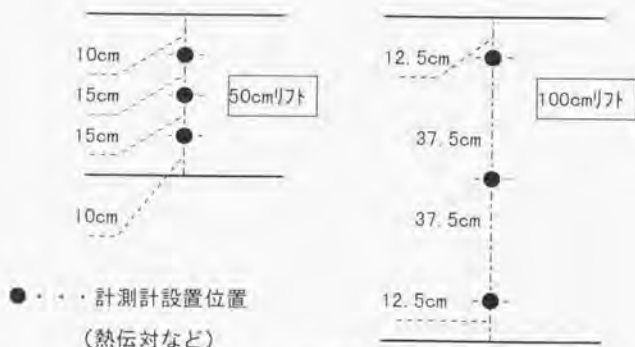


図-2.3 計測機器の設置位置 (高さ)

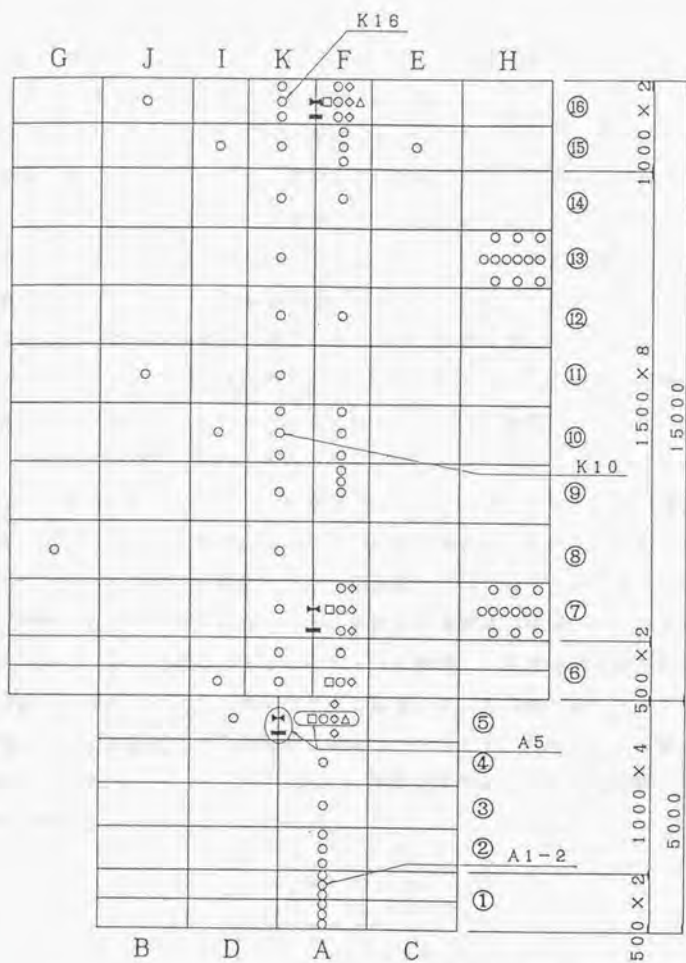


図-2. 4 計測機器の配置図 (2P主塔基礎の例)

2. 3 現場計測結果と温度応力解析シミュレーション

明石海峡大橋主塔基礎の気中コンクリートでは、従来問題とされていたマスコンクリートにおいて発生する幅の大きいひび割れは発生していない。しかし、若材齢時（7日～14日）には幅の小さいひび割れが発生するケースがあった。この幅の小さいひび割れが発生したリフトでは、典型的には温度が20℃程度上昇した後、8℃程度降下していた。打設ブロックの平面積がリフト高さと比較して大きいことから、3～5m幅の方向性の無い亀甲状のひび割れが、コンクリート表面に発生した。ひび割れ幅は概ね0.05～0.5mm程度と細いものであったが、良くあるコンクリート表面に乾燥が原因で発生する溝とは異なり鋭く、後の計測結果からコンクリートを厚さ方向に貫通していることが確認された。また、ひび割れ幅とひび割れの間隔から、ひび割れ発生時に開放された引張ひずみは概ね50マイクロ程度であることも判明した。これは、応力度に換算すると約15kgf/cm²に相当する。なお、事前の温度応力解析結果ではひび割れ指数は1.5以上が確保されており、後述するとおり現場の計測結果でも発生応力は小さく、若材齢時のひび割れは予測されるものではなかった。

図-2. 2 (b) のリフト割図の3P主塔基礎Kブロックの第②リフトで最初のひび割れが発見されたが、その前後のリフトを含めて温度応力解析（コンフェンセーションライン法）による現象のシミュレーションを実施し、原因説明を試みた。図-2. 5は、温度応力解析に用いた一次元モデルである。モデルの最下段リフト下面境界は現場計測どおり初期温度30℃の既施工気中コンクリート（層厚5m）と接しており、更にこの部分の気中コンクリート下面には、実測温度の40℃を等温境界として有する水中不分離性コンクリートがある仮定とした。

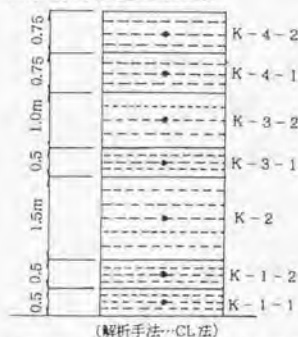


図-2. 5 温度応力解析モデル

また、表-2. 4には温度応力解析に用いた境界条件、物理定数等を示す。ここで、コンクリートの強度特性は試験練りから、境界条件は現場計測結果から、比熱・熱伝達率は現場計測結果と一致するような数値を、2次元温度解析で繰り返し計算により確認することにより得た。解析に際しては、図-2. 6に示す各打設リフト毎の実測温度履歴を再現することとし、現場における発生応力を推定することとした。

表-2. 4 温度応力解析条件

項 目		採 用 値
境界条件	外 気 温	実 測 値 (約25℃~30℃)
	表 面 の 潜 水 養 生	10 kcal/m ² ・hr・℃
	熱 伝 導 率 散 水 養 生	15 kcal/m ² ・hr・℃
	比 熱	0.27 kcal/kg・℃
熱物性	熱 伝 導 率	2.0 kcal/m ² ・hr・℃
	単 位 重 量	2.350 kg/m ³
	断 熱 温 度 K	26.0℃ (註)
	上 昇 式 α	0.76
その他	コンクリート打設温度	実 測 値 (18℃~19℃)
	内 核 部 コンクリート 温度	実 測 値 (30℃)
コンクリート物性	材 齢	3日 7日 28日 56日 91日 最終
	引張 (割裂) 強度 (kg/cm ²)	7.8 17.2 25.3 27.0 30.0 30.0
	弾性係数 (×10 ⁵ kg/cm ²)	1.61 2.35 2.87 3.00 3.10 3.30
	ク リ ー プ 係 数	0.17 0.31 0.71 0.90 1.00 1.15
	線 膨 張 係 数 (1/℃)	8.5 × 10 ⁻⁵
	ポ ア ソ ン 比	0.167

(註) 室内試験結果では25℃以下であるが、断熱状態に近い現場計測の実績により補正係数1.11を乗じた。

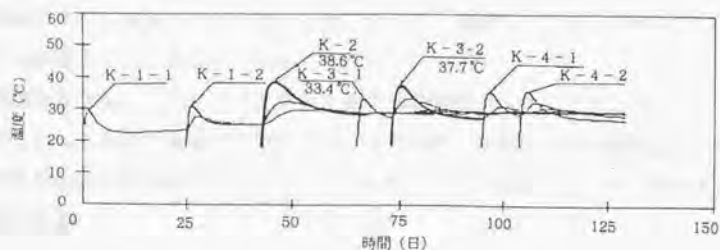


図-2. 6 解析に用いたリフト毎の温度履歴

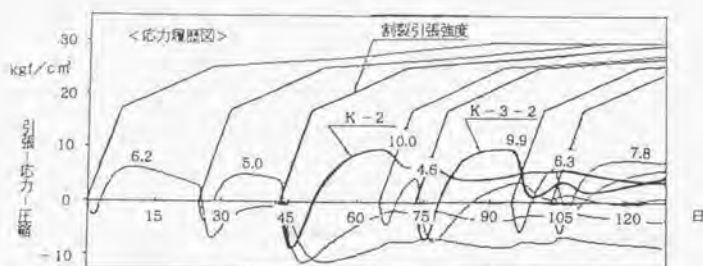


図-2. 7 温度応力解析による応力履歴の推定結果

図-2. 7はKブロック各リフトの温度応力履歴の推定結果であるが、着目したK-②リフトの最大発生引張応力は、別途実施した20℃標準養生供試体による割裂引張強度の約1/2（土木学会の方法が定義するひび割れ指数で2.0）であったことが判明した。従って、コンクリート標準示方書に従えばひび割れ発生確率は非常に小さいことになり、発生した現象とは矛盾することになるが、その原因としては次に上げる3点の何れかに問題があると推定した。

- ① 温度応力解析方法
- ② 温度応力解析に用いた物理定数の試験方法、あるいは適用方法
- ③ 現場計測方法

2. 4 ひび割れ発生メカニズムに関する考察

前節で述べた温度応力ひび割れ現象について、実際にひび割れが発生したリフトにおける計測データに基づき、考察した。

検討対象は図-2. 8に示す3P主塔基礎の層厚1mのリフトであり、リフト下面から30cmの位置に温度計（熱伝対）、ひずみ計、有効応力計を設置した。図-2. 9に若材齢時の計測結果を示す。ここで拘束ひずみとは、次式により計算された値であると定義した。

$$\langle \text{拘束ひずみ} \rangle = \langle \text{温度変化} \rangle \times \langle \text{線膨張係数} \rangle - \langle \text{計測された実ひずみ} \rangle$$



図-2. 8 温度、応力、拘束ひずみ計測位置の例 (3 P主塔基礎)

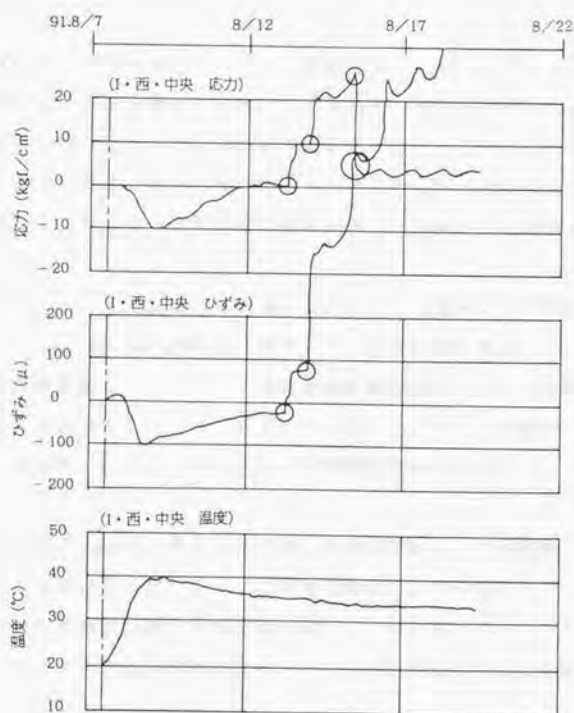


図-2. 9 温度、応力、拘束ひずみ計測結果の例 (3 P主塔基礎)

計測結果では、拘束ひずみ、応力共に材齢7日程度でひび割れが発生したと考えられる急激なひずみ或いは応力の変化が確認される。この現象が複数回認められるのは、計測装置の近傍でひび割れが複数回発生し、その都度ひずみ計、有効応力計が反応した為であると考えられる。また、応力、拘束ひずみが圧縮領域にあるにも関わらず、ひび割れが生じていることも特徴的であるが、これらについては図-2、10に示す模式図による説明が可能である。

以下にこの模式図に沿って、コンクリートの持つ断熱温度上昇特性、物理特性との関連において、現象を説明する。

① 温度上昇特性

温度上昇時に蓄積される圧縮応力は、コンクリートに応力が発生する程度に凝結した時点から最高温度に達するまでの温度上昇量によって決まる。よって、断熱温度上昇特性（断熱温度上昇量を含む）が同一で、凝結完了時間が遅いコンクリートがあると仮定すれば、程蓄積される圧縮応力は小さくなる。

明石海峡大橋主塔基礎で用いた低発熱型セメントを用いたコンクリートは、温度上昇速度が大きい上、凝結完了時間が遅い特徴があり、圧縮応力を蓄積する上では不利であると言える。

温度応力解析においては凝結完了時間が遅いことは考慮せず、材齢初期の弾性係数であっても、コンクリート打設時点（材零0日）のゼロ弾性係数、20度標準養生の供試体による圧縮試験時に計測した7日材零時の弾性係数、28日材齢時の弾性係数による線形近似の弾性係数モデルで仮定している。このため、凝結完了時間が遅い低発熱型セメントを用いたコンクリートの、材齢初期の弾性係数がゼロないしは小さいことを評価出来ない。

このため、温度応力解析で得られた温度上昇時の圧縮応力の蓄積量と比較して、低発熱型セメントを用いたコンクリートで実際に蓄積された圧縮応力が小さかったことが、コンクリートの耐ひび割れ性の評価を難しくしたと言える。

（図-2、10「(A) 温度の経時変化」、「(B) 拘束ひずみ」参照）

② クリープ効果

クリープにより圧縮応力は解放される。従って、見かけの拘束ひずみが圧縮領域に

ある段階で、実際に圧縮応力に寄与するひずみはゼロとなる。また、温度応力解析に通常用いられるクリープ係数は7日材齢の試験値であるが、若材齢時のクリープ係数は、これよりも大きいことが考えられる。更に、若材齢時はコンクリートが完全に凝結している（完全弾性体である）とは言えないので、クリープ現象の他、塑性流動が考えられ、見かけのクリープ効果を大きくしていることが考えられる。

温度応力解析では一般的に、7日材齢あるいは28日材齢のクリープ試験の結果に基づきクリープ係数をモデル化するのが一般的であり、若材齢時の解析結果が実際の現象と大きく異なることになる。

（図-2. 10「(C) クリープを考慮した有効拘束ひずみ」参照）

③ 弾性係数の成長

コンクリートの凝結反応が進むにつれて弾性係数は大きくなる。従って、仮に温度降下速度が一定であっても、材齢とともに弾性係数は大きくなることから、一定の温度降下量に対して、失う圧縮応力は材齢に伴ってより大きいものになる。これはコンクリート材料の組織そのものが凝結反応とともに変化しているからであり、これにより弾性係数が変化する。

そのため、ある時点までのコンクリートの累積発生応力自体に変化は生じていないと考えられるが、その時点以降のひずみの増減に対しては、応力発生速度が変化するものと考えられる。既に発生している応力に変化は無いと考える理由は、コンクリートの凝結反応に伴って温度変化以外の歪みが発生しない限り（ひずみが一定の場合）、拘束状態が変化しないと考えられるからである。

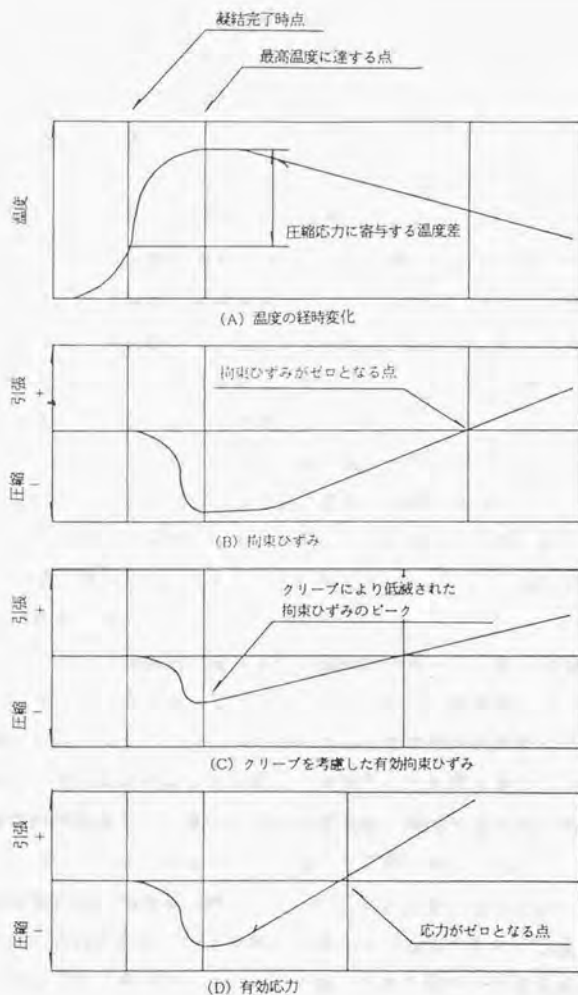


図-2. 10 温度、拘束ひずみ、応力の各履歴の関係模式図

3 現場計測結果に基づく物理定数に関する考察

現場計測結果から前章で推定した現象（温度応力発生メカニズム）を確認する為に、現場に熱伝対（温度の計測）、ひずみ計（実ひずみの計測）、有効応力計（実応力の計測）の他、無応力計（無応力の自由ひずみの計測）を設置し、観測データにより検証した結果を以降に述べる。

3.1 温度変化と自由ひずみの関係および線膨張係数

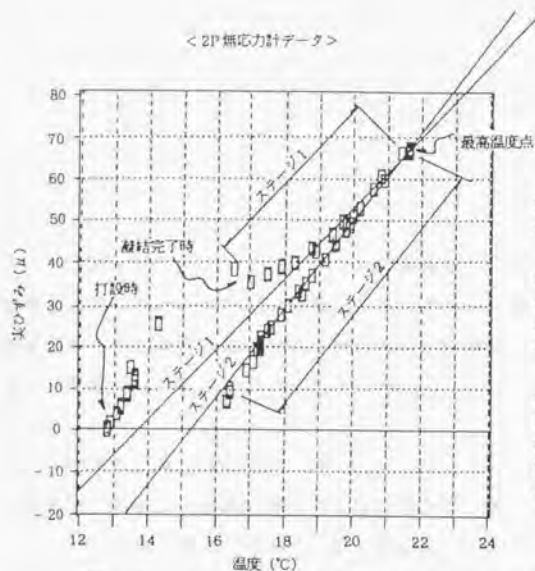
現場計測された無応力状態のマスコンクリート中のひずみと温度変化の関係の2P主塔基礎および3P主塔基礎の結果を図-3.1および図-3.2に示す。ここで、「自由ひずみ」とは現場打設コンクリート中の無応力計の中の軸方向拘束を受けないコンクリートで計測されたひずみであり、マスコンクリート中の無応力状態のコンクリートのひずみを示す（図-2.4参照）。

打設されたフレッシュなコンクリートの温度変化とひずみ変化は、観測リフト厚の違い（2P：50cm、3P：150cm）から温度上昇量が大きく違うこともあり、凝結完了時点前後とは異なる傾向を示す。2Pでは、凝結迄の温度上昇に対する自由ひずみの変化に明瞭な関係が認められないのに対して、3Pでは、温度変化と自由ひずみがほぼ線形関係を示す。

また、2P、3P共に凝結完了後は僅かに非線形であるが、概ね凝結完了時点からコンクリート温度が最高点に達するまで（ステージ1）、最高点に達した後に温度が降下する段階（ステージ2）には、それぞれ異なる直線関係を確認することが出来た。これらの温度～ひずみの直線関係の勾配は、他の要因の影響を受けていることも考えられるが、現場計測結果から計算される線膨張係数に相当するものである。

図-3.1、図-3.2に示すとおり、温度上昇時（ステージ1）の直線勾配（見かけの線膨張係数）が、温度降下時（ステージ2）と比較して小さいことが分かる。

これは、いわゆる自己収縮（反応収縮）を含んでいる為であり、温度上昇時（正のひずみ）には逆ひずみ（負のひずみ）として働くために見かけの線膨張係数が小さくなり、温度降下時（負のひずみ）には加算ひずみ（負のひずみ）として働くために、見かけの線膨張係数が大きくなっていると考えられる。この場合、無応力であることから、クリープの影響は受けていないと考えられる。（表-3.1参照）



(解説)

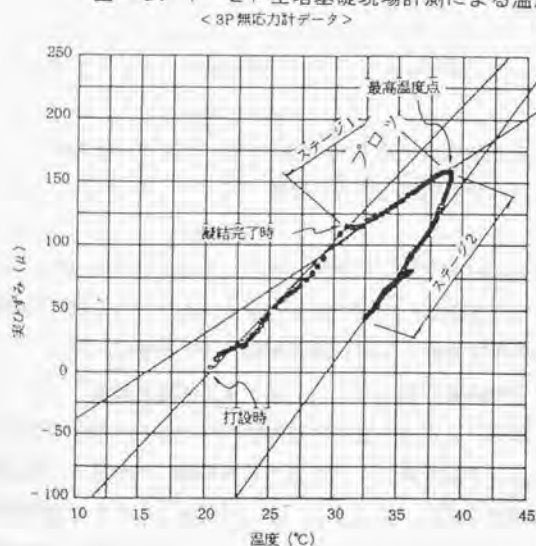
ステージ1: 温度上昇時

ステージ2: 温度降下時

凝結完了後から最高温度に達する迄の時期(ステージ1)の内、勾配が安定した時点以降の直線は、線膨張係数を代表すると考えられる。

同様に最高温度から温度が降下する過程(ステージ2)の直線勾配も同様であるが、ステージ1,2で勾配が異なるのは、硬化(反応)収縮の影響である。

図-3. 1 2P主塔基礎現場計測による温度と自由ひずみ



(解説)

ステージ1: 温度上昇時

ステージ2: 温度降下時

基本的には、2P主塔基礎における計測結果と現象は同じであるが、温度上昇量が相対的に大きいことから、温度上昇過程の内凝結完了の前後で、物性変化に起因すると考えられる明瞭な線膨張係数の変化が確認された。

図-3. 2 3P主塔基礎現場計測による温度と自由ひずみ

表-3. 1 現場計測に基づく線膨張係数

 $(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$

	3Pデータ	2Pデータ
ステージ1	7.0	8.6
ステージ2	14.5	10.6

また、別途実施した同じコンクリートの線膨張係数の計測では、短期間（2日間）で温度を上昇、降下させたが、温度上昇時と温度降下時で線膨張係数にあまり大きな変化が無いことが確認されており、試験期間が短期間であることから自己収縮（反応収縮）の影響が小さかったものと考えられる。

3. 2 拘束ひずみと有効応力、有効弾性係数

無応力計（自由ひずみを計測）およびひずみ計（実ひずみを計測）の計測結果を用いて得られた拘束ひずみ、有効応力計（実応力を計測）による計測結果の関係を図化した結果の例を図-3. 3に示す。ここで、説明のために以下の言葉を定義する。

拘束ひずみ：（拘束状態のコンクリートの実ひずみ）－（同じコンクリートの自由ひずみ）

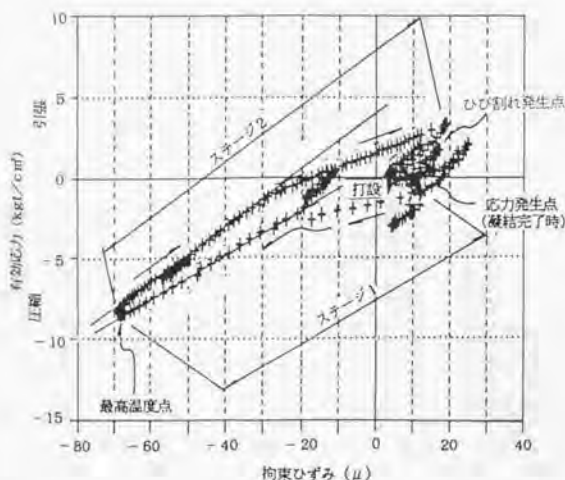
有効弾性係数： $\frac{\text{（有効応力計で計測された実応力の変分）}}{\text{（同じ時間における拘束ひずみの変分）}}$

コンクリート打設時点（拘束ひずみ0、有効応力0）から温度上昇とともに拘束ひずみが引張側に若干振れた後、圧縮に転じ、凝結完了とともに圧縮応力は発生している。ここで、凝結完了迄の初期段階において拘束ひずみが引張側に振れる原因は、コンクリートは塑性流動状態であり、この状態にある無応力計内のコンクリートは、無応力計の軸直角方向への体積膨張が拘束されることにより、無拘束の軸方向に流動し、結果として見かけの膨張率を大きくしている可能性はある。しかし、この凝結完了前の現象は温度応力には寄与しないことから、温度応力発現特性には考慮しなくても問題は無いと考えられる。

凝結完了後は、図-3. 3に示すとおり凝結完了後の材齢が大きくなるとともに、

温度上昇時（ステージ1）、最高温度以降の温度降下時（ステージ2）では拘束ひずみ～有効応力の関係はほぼ直線関係を示した。この直線関係の勾配は有効弾性係数に相当するものであり、温度上昇時（ステージ1）と温度降下時（ステージ2）では、温度降下時の有効弾性係数が大きいことが分かる。材齢に従って有効弾性係数が大きくなることは容易に推察されるが、温度上昇時から温度降下時に転じた前後で明らかな直線勾配の違いが認められることから、むしろ弾性係数の材齢に伴う変化よりも圧縮応力の増加時と減少時におけるクリープの影響の違いであると考えられる。このことは、有効応力が引張領域に転じて直線勾配が緩やかになり、明らかに有効弾性係数が小さくなったことでも分かる。

図-3. 4および図-3. 5はそれぞれ2P主塔基礎および3P主塔基礎の現場計測結果全てに対して有効弾性係数を算定した結果である。前述したとおり、材齢初期の段階で既に有効弾性係数が安定しており、 $2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ のレベルに達していることが分かる。特に3P主塔基礎では温度上昇時（ステージ1）と温度降下時（ステージ2）で有効弾性係数の差異が小さく、初期の温度上昇を大きくした低発熱型セメントを用いたコンクリートでは、弾性係数が初期段階で非常に大きいことが分かる。



（解説）

現場計測では、拘束状態に起因すると考えられる圧縮歪みが発生するが、応力は発生しない。凝結完了後は図中の矢印に示すとおり温度上昇過程（ステージ1）直線関係（弾性係数に相当）に移行する。

温度降下過程（ステージ2）でも矢印の方向に直線関係を示すが、応力状態が変化（引張領域に移行）した時点で、クリープ現象の影響と考えられる直線勾配変化が生じる。

図に示したひび割れ発生点移行は、図示された様にデータは迷走し、信頼性を失う。

図-3. 3 3P主塔基礎現場計測による拘束ひずみと有効応力の関係

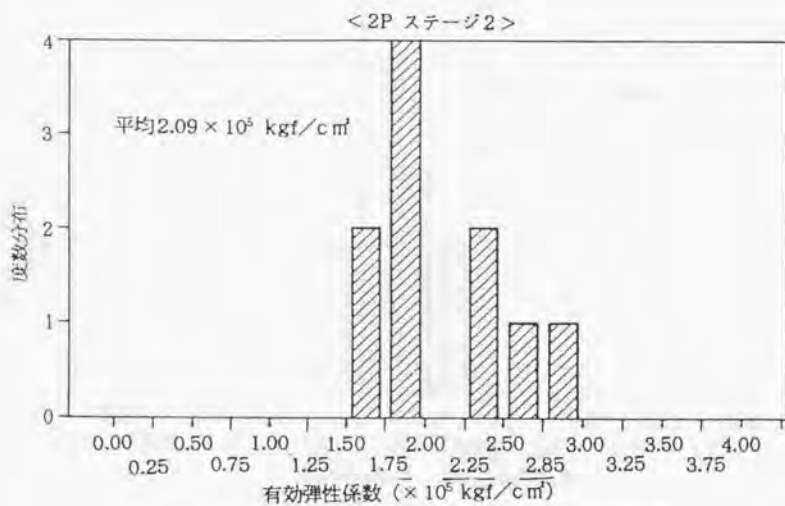
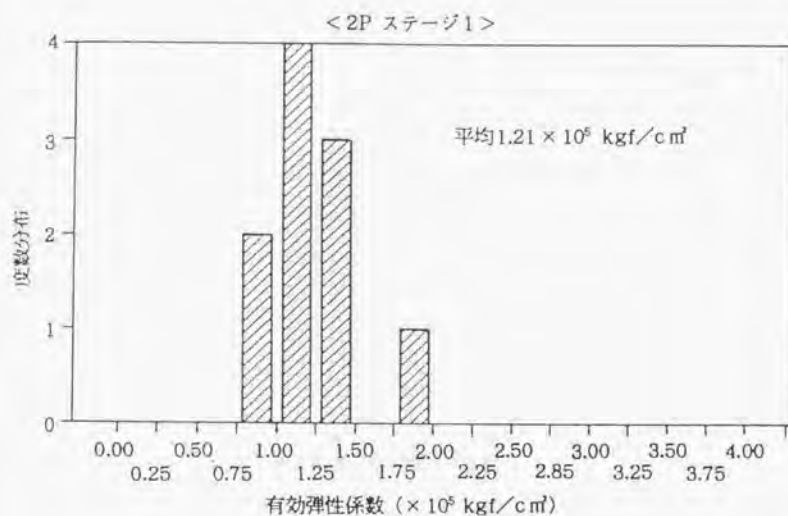


図-3. 4 2P主塔基礎の有効弾性係数算定結果

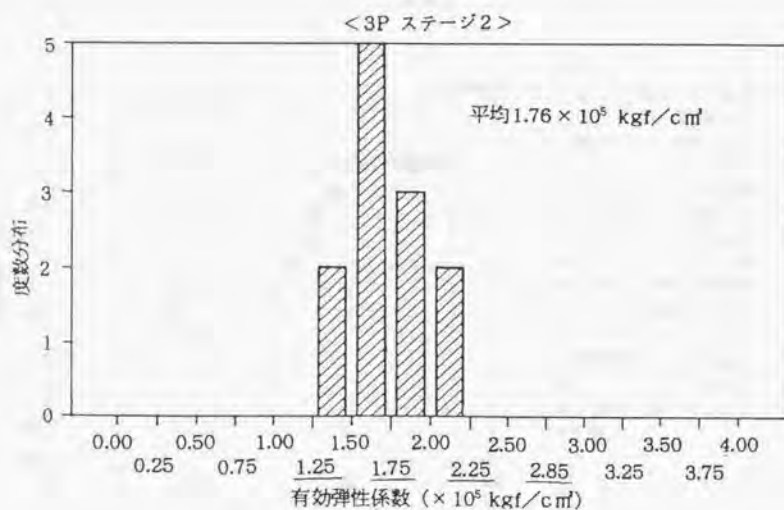
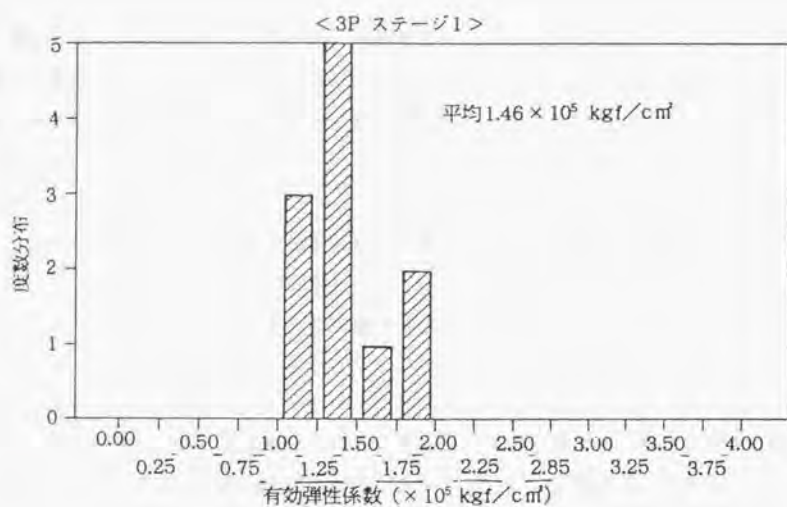


図-3. 5 3P主塔基礎の有効弾性係数算定結果

3. 3 コンクリートのひずみ拘束率

熱伝対（温度計）およびひずみ計の実測値を用いて、温度と実ひずみの関係から算定した単位温度変化当たりの実ひずみの変化率、無応力計による実測値と温度の関係から求めた線膨張係数により、次式で拘束率を算定した。

$$K_r = (\alpha_i - \alpha_r) / \alpha_i$$

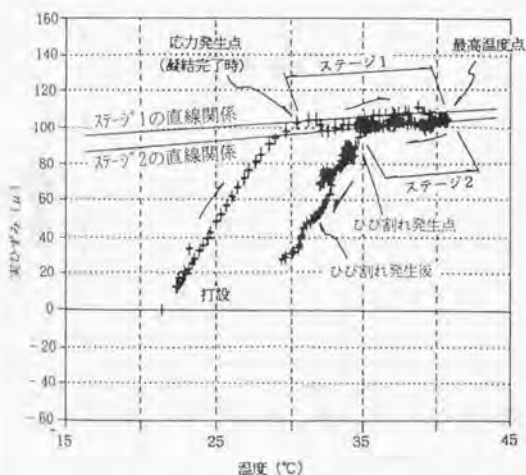
K_r : 拘束率

α_i : 無応力計により求めた単位温度変化に対するひずみ（自由ひずみ）
の変化率（線膨張係数）

α_r : ひずみ計より求めた単位温度変化に対するひずみ（実ひずみ）
の変化率

$\alpha_i - \alpha_r$: 拘束ひずみ

図-3. 6は、3P主塔基礎における温度と実ひずみの実測値の関係をグラフ化した例であるが、凝結完了後は温度上昇時（ステージ1）、温度降下時（ステージ2）共に実ひずみの変動が小さく、打設されたコンクリートのリフト全体の拘束率が高いことを示している。また、図-3. 7および図-3. 8は、それぞれ2P主塔基礎、3P主塔基礎の現場計測結果全てに対して拘束率を算定した結果である。



（解説）

打設（計測開始）から実歪みが概ね 100マイクロに達する迄は塑性流動が可能であるので、図中の矢印のとおり実歪みが増大するが、凝結完了時点以降は、温度上昇過程（ステージ1）および温度降下過程（ステージ2）ともにほぼ温度～実歪み関係は直線関係で、しかも実歪みは大きく変化しなかったことから、この計測事例では、凝結完了後はコンクリートがほぼ完全な拘束状態であったことが分かる。

図-3. 6 3P主塔基礎現場計測による温度と実ひずみの関係

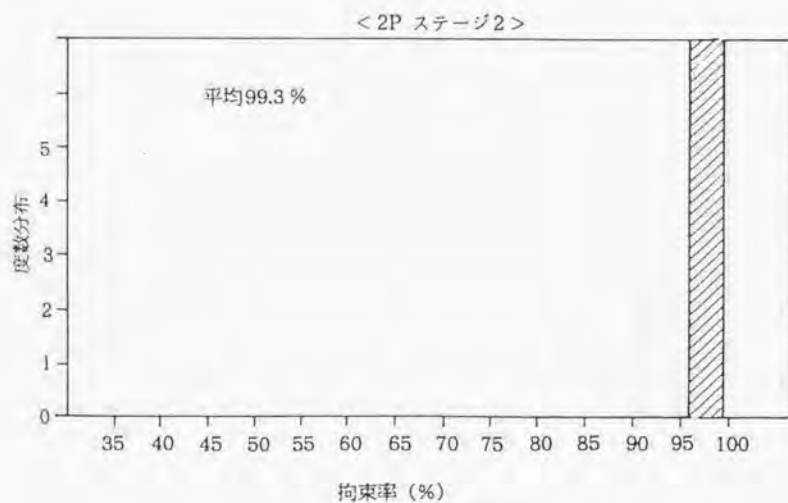
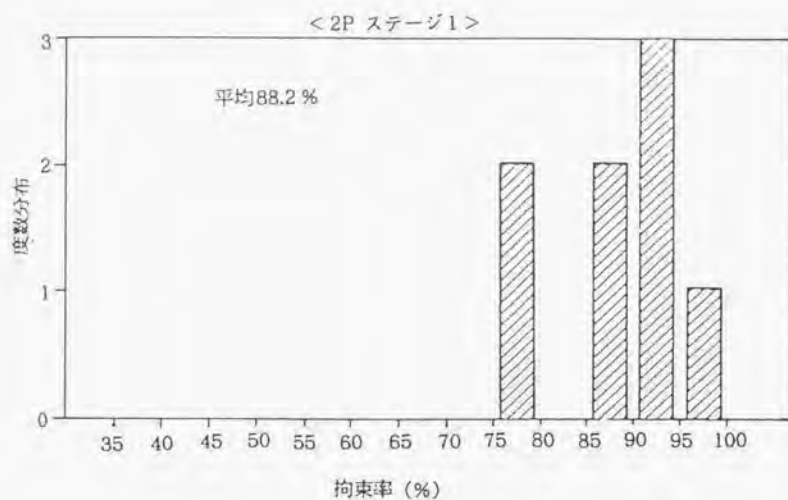


図-3. 7 2P主塔基礎の拘束率算定結果

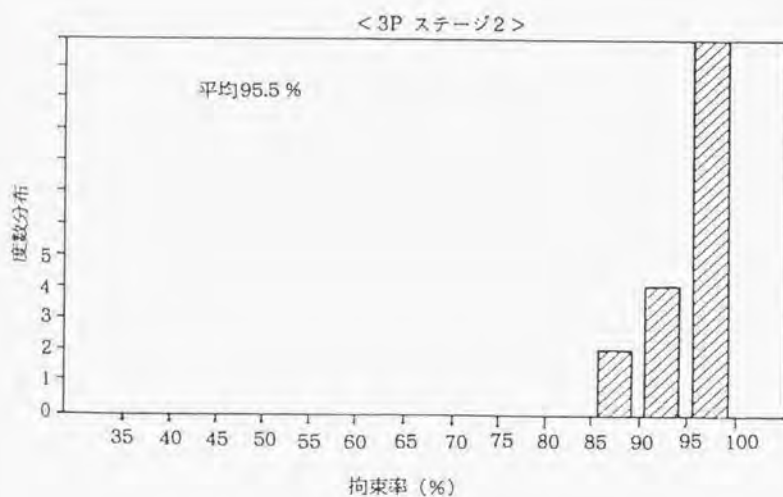
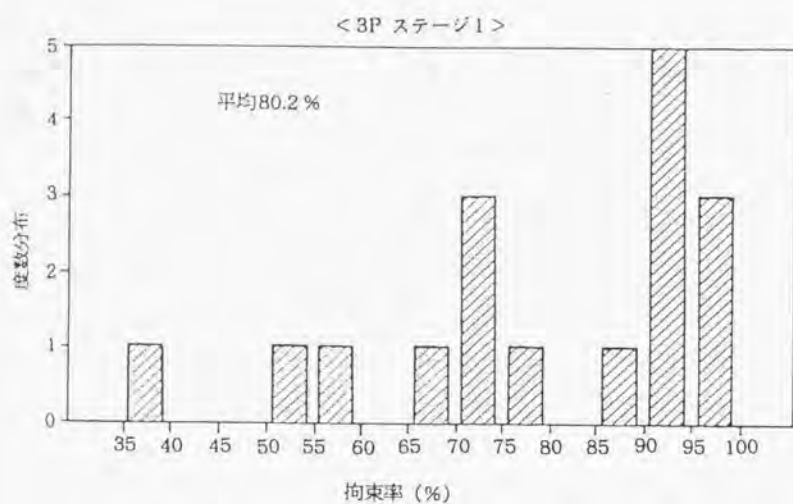


図-3.8 3P主塔基礎の拘束率算定結果

拘束率算定結果は、特に温度降下時（ステージ2）の拘束率が高い（100%近い）ことを示している。これは、第一に、リフト厚に対してリフト面積が相対的に大きいこと、第二に当該リフトの前リフトの材齢は3～4週間と若いにも関わらず、低発熱型セメントを用いたコンクリートの特徴として、既に十分強度発現が完了していることが原因として上げられる。

4 現象再現試験によるひび割れ発生機構のシミュレーション

4.1 現場計測上の問題点

前章までの中で示した計測結果等から、以下に示す事項が現場計測から判明した問題点として指摘することが出来る。

- ① 明石海峡大橋主塔基礎で適用された、CL法あるいは2次元有限要素法を用いた温度応力解析および、温度応力解析に用いる物理定数の測定あるいは算定方法では、特に低発熱型コンクリートの温度応力ひび割れ現象は予測することは出来なかった。
- ② 線膨張係数が温度上昇時と温度降下時で異なるのは、自己収縮（反応収縮）の影響である可能性がある。
- ③ 低発熱型コンクリートの温度降下時の拘束率は、打設するブロックの（リフト高さ／ブロック短辺）比率が最小で1／1.4の場合、ほぼ100%であった。
- ④ 現場計測で確認されたひび割れ現象は、非常に小さな応力レベルで発生しており、有効応力計の信頼性について確認する必要がある。

上記の問題点について、現場における温度応力ひび割れ現象を室内試験により再現すること（現象再現試験）により、確認することとした。試験方法は、昭和55年からJISとして制定することが試みられたものであり、次に試験方法を詳述する。

4.2 現象再現試験の概要

2P主塔基礎および3P主塔基礎で確認された温度応力ひび割れ現象が発生した、それぞれ1ケースについて室内現象再現試験で検証した。この試験において重要な点は、コンクリートを打設した時点からシミュレーション出来る点である。

下記に示す全ての物理的状態を現場計測結果得と同一条件とした拘束状態の供試体および、現場計測における無応力計内のコンクリートと同じく軸方向に無拘束状態の自由変形が可能な供試体を、試験器内に直接打設し、その直後から応力、ひずみ等を計測した。

- 1) 計測されたりフトにおける配合条件、セメント
- 2) 温度履歴
- 3) 拘束条件（拘束率）

(1) 試験方法

試験は「JIS原案 コンクリートの水和熱による温度ひび割れ試験方法(案)」に準じて、以下に示す方法により実施した。試験装置のシステムは図-4. 1に示すとおりである。

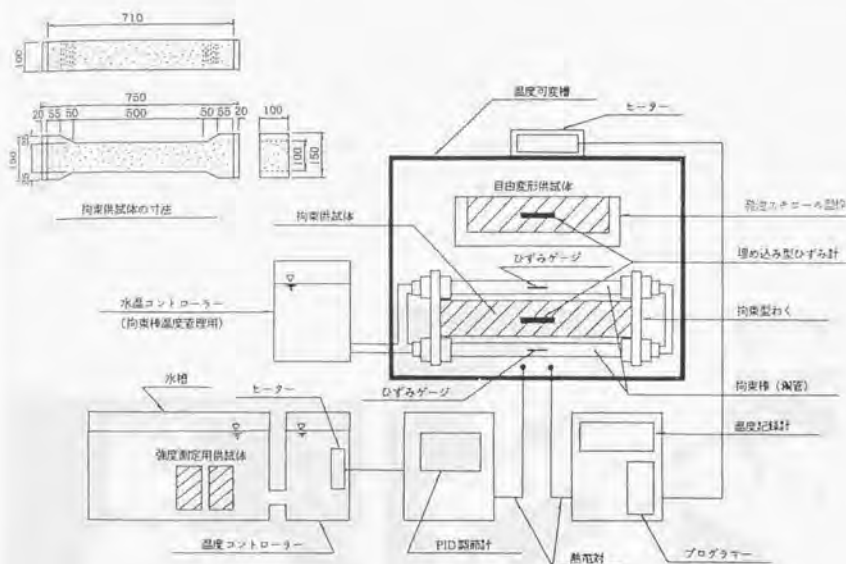


図-4. 1 現象再現試験装置の概要

- ① 現場計測で得られた温度履歴を、温度を任意に且つ連続的に設定出来る調整計(プログラマー)に予め入力し、ヒーター(ファン)を通して温度可変槽の内部温度を制御し、拘束供試体および自由変形供試体に現場計測結果の温度履歴を与えた。
- ② 拘束供試体は、温度可変槽内において4本の拘束棒(鋼管)とそれを定着する2枚の拘束型枠(拘束棒に入る力を支える2枚の反力鋼板であり、供試体の両端に接している)により拘束する。拘束棒内には水温コントローラーにより温度管理された水が通されており、現場計測で得られた拘束率を実現する為に、拘束棒のひずみを水温により調整した。また、拘束棒のひずみはひずみゲージで測定監視した。
- ③ PID調節計は、強度試験用供試体(圧縮および割裂引張強度試験)の養生水槽

内の水温を温度可変槽内の温度に追従させる為の温度制御装置である。これにより、温度可変槽内の供試体と同じ温度履歴を与えられた供試体を得られ、ひび割れ発生時に圧縮および割裂引張試験を実施し、強度等を確認することが出来た。

- ④ コンクリートのひずみは供試体内に埋め込んだひずみ計により計測した。また、応力は拘束棒で計測されたひずみを温度補正した値から直接算定した。

写真-4. 1は温度可変槽の内部（コンクリート打設前）である。拘束棒は温度可変槽内部の温度の影響を受けないように断熱材により保護されている。中央の拘束棒の間にあるケーブルは、供試体のひずみを測定する。また、写真-4. 2中央は調整計（プログラマー）、その左にはPID調節計およびそれに接続された強度試験用供試体の養生水槽である。写真4. 3は試験用のコンクリートが温度可変槽内の拘束型枠内に打設された直後の状態であり、直ちに各計測を始めている。



写真-4. 1 温度可変槽



写真-4. 2 調整計、強度試験養生水槽他



写真-4. 3 供試体の打設状況

(2) 試験条件

現象再現試験は、3P主塔基礎、2P主塔基礎においてひび割れが発生したリフトを対象に、表-4.1および表-4.2に示す配合によりそれぞれ1ケース実施した。対象としたリフトの層厚は3P主塔基礎が75cm、2P主塔基礎が150cmである。ここで、現場で使用した粗骨材の最大寸法(G_{max})は40mmであったが、拘束供試体の断面寸法が図-4.1に示すとおり100mm×150mmと小さいことから、最大寸法(G_{max})は20mmとし、粗骨材は体積のみを実際の配合と合わせた。また、拘束率については材齢によって変化するが、現場計測結果からはほぼ80~100%と非常に高く、特に最高温度到達後は100%に近いことから、拘束率の制御目標は100%とした。拘束棒はコンクリートの伸縮にともなう反力により伸縮しようとするが、拘束棒内の通水温度で逆ひずみを与えることによりこれを相殺し、コンクリート両端の拘束型枠の移動を止めることにより、拘束率100%(実ひずみゼロ)とすることに努めた。

W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混 和 剤	
		W	C	石 粉	S	G	SP9N	775S
53.8	40.0	140	260	30	710	1157	1.1%	2.5A

表-4.1 3P主塔基礎の配合

W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混 和 剤	
		W	C	石 粉	S	G	SP9N	775S
53.5	41.0	139	260	50	712	1126	1.4%	4 A

表-4.2 2P主塔基礎の配合

4. 3 現象再現試験結果

現象再現試験においては概ね拘束率、温度履歴等を現場計測結果に近い状態で制御することが出来た。また、試験結果からは現場計測結果と非常に類似した現象を得ることが出来た。以下に3P主塔基礎および2P主塔基礎の試験結果を現場計測結果と比較して説明する。

(3P主塔基礎試験結果：図-4. 2～図-4. 6)

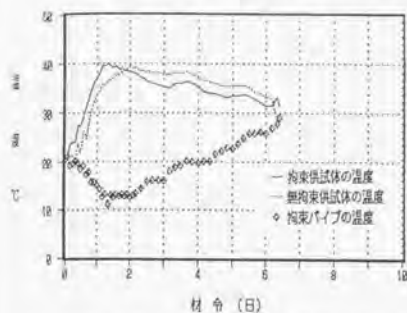
(2P主塔基礎試験結果：図-4. 7～図-4. 11)

(現象再現試験と現場計測の結果比較：表-4. 3)

(1) 3P主塔基礎現象再現試験結果

- ① 図-4. 2は実測温度に対する室内試験温度の追随性を示すが比較的良好であった。拘束棒の温度は、コンクリート温度上昇時(膨張時)にはそれに抵抗する為に温度を下げて収縮し、コンクリート温度降下時(収縮時)には逆に温度を挙げて膨張していることが分かる。
- ② 実ひずみは現場計測結果では凝結完了後はほぼ一定(拘束率100%)であるが、室内試験においては若干変動しており、概ね拘束率は90%となっているが、現場計測結果に近い状態を再現出来たと言える(図-4. 3および図-4. 4参照)。拘束率が若干低いことは、応力を緩和する方向に働いているが、ひび割れが発生した時間は、室内試験の方が現場計測結果と比較して若干遅れている程度で、概ね一致したと言える。
- ③ 自由変形供試体の実ひずみが、特に凝結完了前において現場計測結果と現象再現試験結果とで異なるが、これは現場では無応力計内のコンクリートはマスコンクリート内に埋め込まれており、計測軸方向の直角方向に拘束を受けているのに対して、現象再現試験では供試体の軸直角方向の拘束が小さいことによると考えられる。
- ④ 現場計測において信頼性に疑問が残った発生応力、特にひび割れ発生時の計測応力は、現場計測結果の 2.3 kgf/cm^2 に対して、現象再現試験結果では 12.7 kgf/cm^2 であり、後者の応力レベルがより現実的であると言える。応力が圧縮領域にある場合は両者は良く一致しており、マスコンクリートが硬化する過程において、引張領域における有効応力計の信頼性を更に検証する必要があると考える(図-4. 5および図-4. 6参照)。しかし、現象再現試験においてもひび割れ発生時の引張応力は割裂引張強度の64%でしかなかった。(表-4. 3参照)

<室内試験結果>



<現場計測結果>

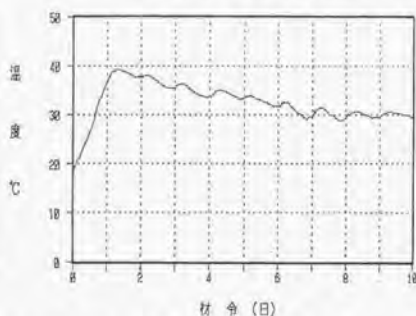


図-4. 2 現場計測および現象再現試験の温度履歴 (3P主塔基礎)

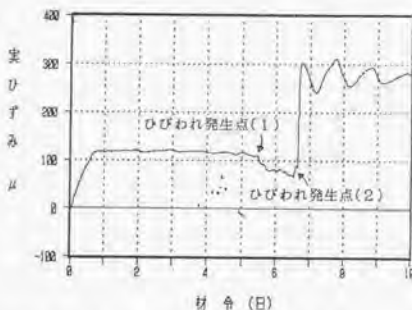
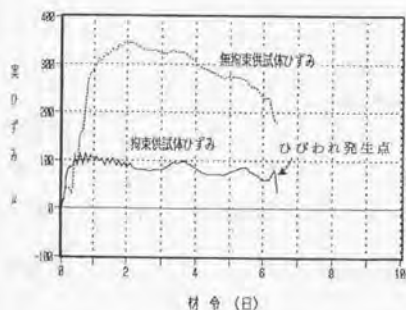


図-4. 3 現場計測および現象再現試験のひずみ履歴 (3P主塔基礎)

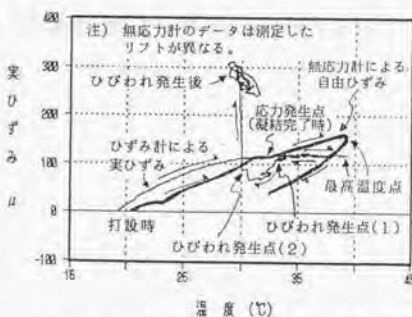
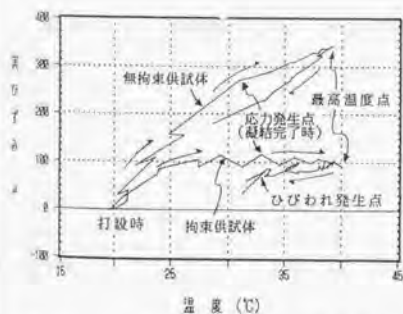
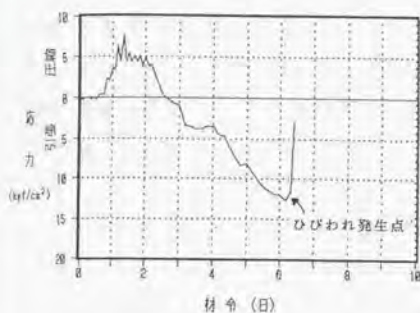


図-4. 4 現場計測および現象再現試験の温度～実ひずみの関係 (3P主塔基礎)

<室内試験結果>



<現場計測結果>

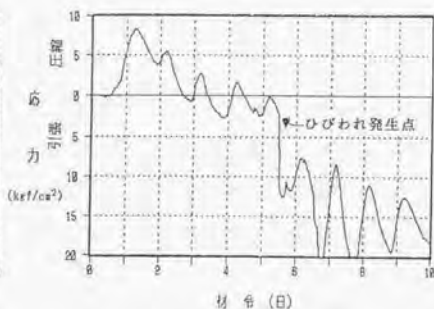


図-4. 5 現場計測および現象再現試験の応力履歴 (3 P主塔基礎)

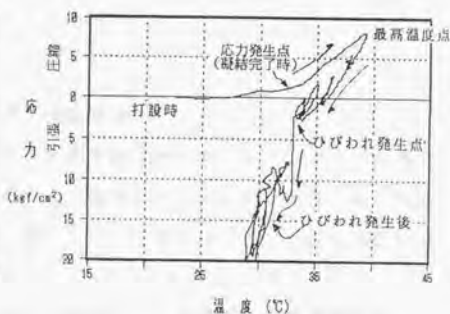
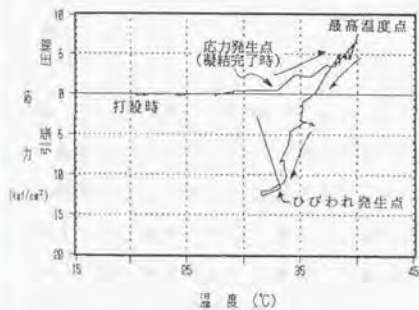


図-4. 6 現場計測および現象再現試験の温度～応力の関係 (3 P主塔基礎)

(2) 2P主塔基礎現象再現試験結果

2P主塔基礎を対象とした試験結果は、概ね3P主塔基礎を対象とした試験結果と同じく現場計測結果を良く再現するものであり、同様の特徴を有することが分かった。ここでは、特に2P主塔基礎としての特徴について述べる。

- ① 現象再現試験における実ひずみは3P主塔基礎における結果とほぼ同等であるが、現場計測結果より大きい。これは3P主塔基礎の計測リフトの層厚が75cmと薄いのに対して、2P主塔基礎の計測リフトの層厚は150cmであり、現場においては2P主塔基礎の現場計測の方がより計測軸直角方法の拘束が大きいことによると考えられる。(図-4.8および図-4.9参照)
- ② ひび割れ発生時の引張応力(16.2kg/cm²)は、3P主塔基礎の場合(12.7kg/cm²)と比較して大きい。これは、初期強度発現は3P主塔基礎で用いた低発熱型コンクリートの方が早いこととは逆の現象であり、初期強度発現のみが耐ひび割れ性を決定しないことを示唆している。(図-4.10および図-4.11参照)

4.4 現象再現試験結果に基づくひび割れ現象評価

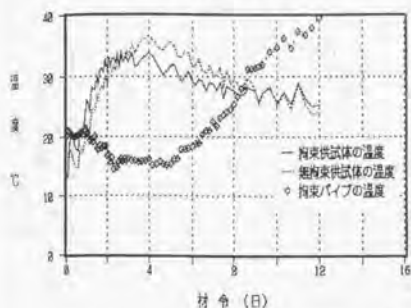
前節で述べたとおり、室内における現象再現試験は実際のマスコンクリート構造に起きる温度応力ひび割れ現象を、特に拘束率、温度履歴を合わせた場合に良く再現することは重要である。また、これらの試験により、現場計測において得られなかったひび割れ発生時応力を得ることも出来た。

表-4.3は現象再現試験の結果を現場計測結果および温度履歴・拘束率を合わせたC.L法による温度応力解析結果と比較した結果である。ここで、解析に用いた物理定数は下記1)~3)のルールで適用したが、その理由については次章で述べる。

- 1) 弾性係数、クリープ係数および強度を積算温度換算する。
- 2) 弾性係数は引張弾性係数を使用する。
- 3) 弾性係数、クリープ係数は凝結完了時点から発現させる。

解析におけるひび割れ発生時間は、現場計測における発生時間を適用したため、多少遅れて発生した現象再現試験と比較した場合、発生応力が小さい結果を与えているが、結果は現象再現試験、現場計測結果と概ね一致していると考えられ、今後温度応力ひび割れ現象を予測あるいは解明する上で非常に有用であると考えられる。

＜室内試験結果＞



＜現場計測結果＞

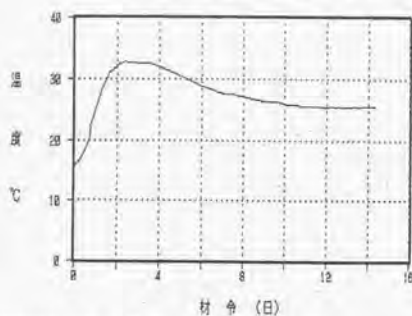


図-4. 7 現場計測および現象再現試験の温度履歴 (2P主塔基礎)

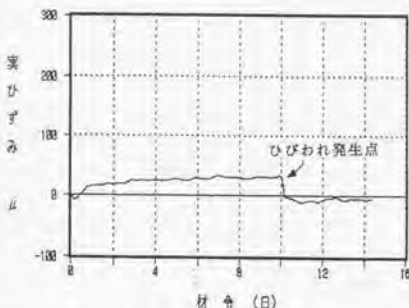
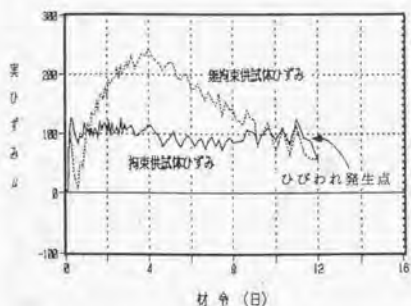


図-4. 8 現場計測および現象再現試験のひずみ履歴 (2P主塔基礎)

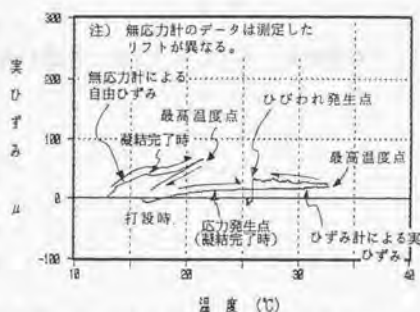
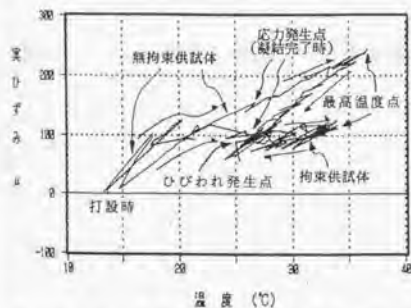
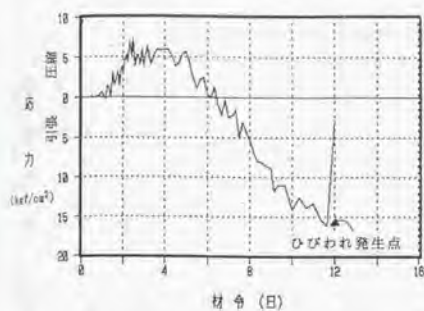


図-4. 9 現場計測および現象再現試験の温度～実ひずみの関係 (2P主塔基礎)

<室内試験結果>



<現場計測結果>

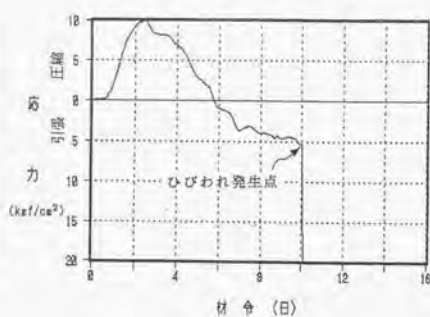


図-4. 10 現場計測および現象再現試験の応力履歴 (2P主塔基礎)

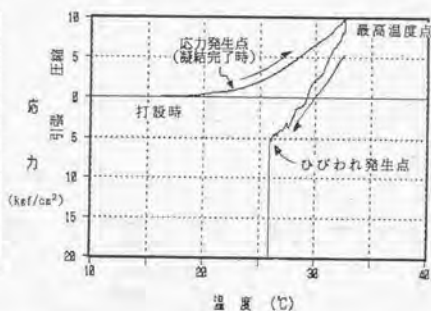
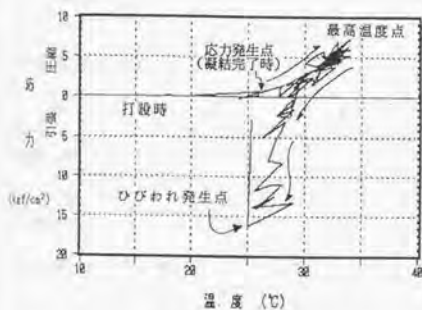


図-4. 11 現場計測および現象再現試験の温度～応力の関係 (2P主塔基礎)

表-4. 3 現象再現試験・現場計測・温度応力解析結果の比較

		3 P			2 P		
		室内試験	現場計測	解 析	室内試験	現場計測	解 析
最 高 温 度 (°C)		40.1	39.3	37.1	32.6	32.7	32.5
最大圧縮応力 (h)		32	31	42	59	58	52
発 生 時 期							
最大圧縮応力 (kgf/cm ²)		7.7	8.3	8.2	5.1	9.9	6.5
ひびわれ発生時期 (h)		150	132	132(仮定)	257	241	241(仮定)
ひびわれ発生時引張応力 (kgf/cm ²)		12.7	2.3	8.3	19.5	5.3	16.3
ひびわれ発生時引張強度 (割裂引張強度) (kgf/cm ²)		19.9	-----	-----	27.9	-----	-----
ひびわれ発生時圧縮強度 (kgf/cm ²)		201	-----	-----	241	-----	-----
ひびわれ発生時 温度降下量 (°C)		8.5	6.3	4.8	6.4	6.8	7.4
ひびわれ発生箇所		中央部から 10cmの箇所 貫通	-----	-----	中央部から 24cmの箇所 貫通	-----	-----
拘束率 (%)	昇温時	96.5	94.6	100.0	88.0	93.0	100.0
	降温時	86.0	97.4	100.0	74.0	100.0	100.0

現場の施工条件に合わせ、温度条件をシミュレーションした。リフトの現場の施工条件に合わせ、温度条件をシミュレーションした。リフトの現場の施工条件に合わせ、温度条件をシミュレーションした。

4. 5 自己収縮現象の評価

2 P、3 P主塔基礎における現場計測結果および現象再現試験結果に基づき、温度および応力以外に起因する歪み（自己収縮歪み、または反応収縮歪み）に着目して、分析した結果を以下に示す。ここで、分析対象としたひずみデータは以下の2種類に分類される。

- 1) 現場計測の内、歪み計測方向には自由に伸縮できる無応力計のひずみ計測データ、および室内における現象再現試験の無拘束供試体のひずみ計測データ
- 2) 室内における現象再現試験の拘束供試体のひずみ計測データ

1)からは、計測方向には拘束を受けていないコンクリートの自己収縮、2)からは、温度応力ひび割れ現象を起こす状態にある拘束状態のマスコンクリートの自己収縮を算出した。

(1) 無拘束状態のコンクリートの自己収縮（反応収縮）

現場打設のマスコンクリート内の無応力計および、現象再現試験時の無拘束供試体における自己収縮量（反応収縮量）を3 P主塔基礎で試算した結果が図-4. 12および図-4. 13、また、2 P主塔基礎で試算した結果が図-4. 14～4. 17である。ここで、2 P主塔基礎の無拘束供試体（現象再現試験時）においては、基本的配合を同一とした上で、以下に示す単位立米当たりの石粉および、高性能AE減水剤で調節した3ケースについて実験を行った。

- a) 石粉 100 kg/m^3 、スランプ 11 cm
- b) 石粉 50 kg/m^3 、スランプ 17 cm
- c) 石粉 50 kg/m^3 、スランプ 8 cm

また、自己収縮量（反応収縮量）は、下式により算出した。

$$(\text{自己収縮量}) = (\text{無応力状態の計測実ひずみ}) - (\text{温度変化}) \times (\text{線膨張係数})$$

ここで、計算に際しては以下の1)、2)仮定を設定した。

1) 線膨張係数は、別途試験練りの結果、骨材が同じ場合、セメントの種類による影響が小さいことから、別途実施した9種類の低発熱型セメントを用いたコンクリートにおける試験結果の平均 10.92×10^{-6} とした。

2) 無応力計および無拘束供試体の実ひずみは温度変化による自由ひずみと自己収縮（反応収縮）によるひずみの合計である。

その結果、自己収縮量（反応収縮量）のレベルは数10マイクロから100マイクロ台であり、温度応力の発生に大きな影響を与えるレベルであることが指摘できる。

3P主塔基礎に係る結果では、現場打設のマスコンクリート中の無応力計と現象再現

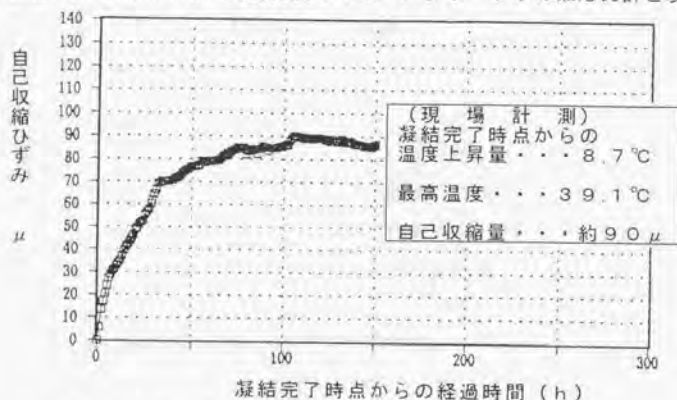


図-4. 12 3P現場計測における自己収縮（反応収縮）

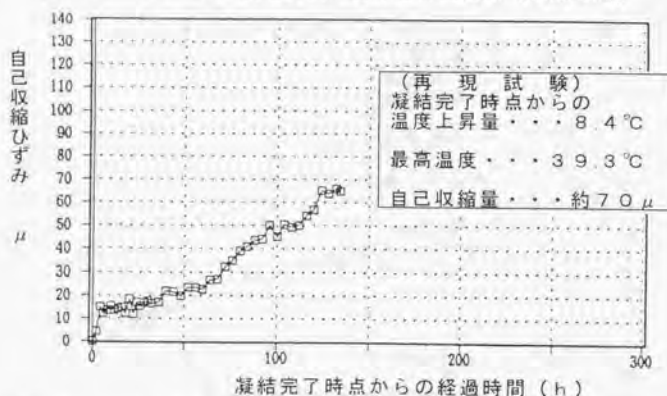
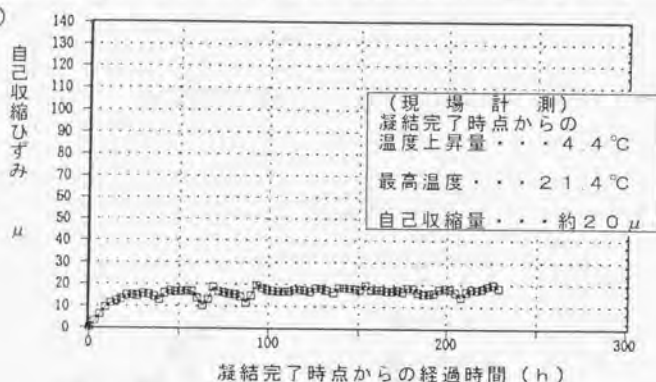


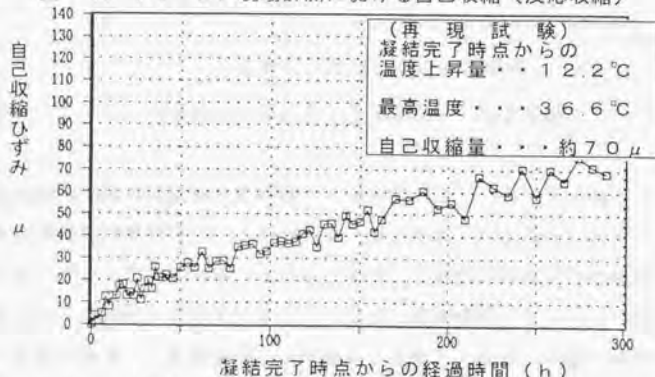
図-4. 13 3P現象再現試験における自己収縮（反応収縮）

試験における無拘束供試体での自己収縮（反応収縮）ひずみレベルはほぼ同じだが、時系列的な発現パターンは若干異なっており、ひずみの計測方向と異なる軸方向における拘束条件の違い等が影響している可能性がある。（図－4．12、4．13参照）

2P主塔基礎では、3P主塔基礎とは違い、現場打設のマスコンクリート中の無応力計と現象再現試験の無拘束供試体の結果が大きく異なった。これは、3P主塔基礎では温度上昇量がほぼ同じであったのに対して、2P主塔基礎では現場打設コンクリートの4.4℃に対して、現象再現試験では概ね12～13℃の上昇量であり、セメントの反応速度が異なったことが原因であると推察される。（図－4．14～図－4．17参照）



図－4．14 2P現場計測における自己収縮（反応収縮）



図－4．15 2P現象再現試験における自己収縮（反応収縮）――ケースa)



図-4. 16 2P現象再現試験における自己収縮（反応収縮）——ケースb)

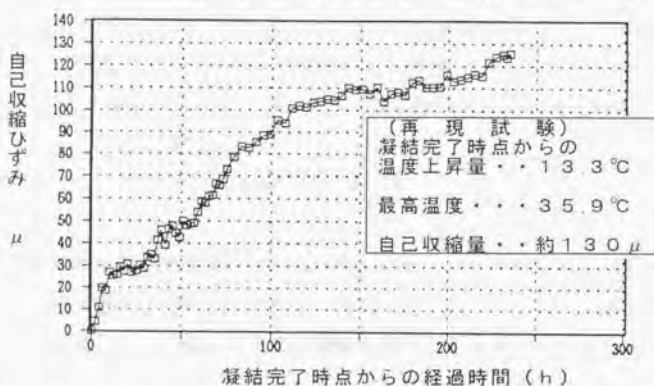


図-4. 17 2P現象再現試験における自己収縮（反応収縮）——ケースc)

2P主塔基礎の現象再現試験での結果からは、同一コンクリートであっても自己収縮量（反応収縮量）は変化することも解った。自己収縮（反応収縮）がセメントの反応の過程で生じることを考えれば、化学反応あるいは反応の過程での組織構造に何らかの影響を与える可能性がある拘束圧、スランプ、温度履歴、ブリージング等が、自己収縮量（反応収縮量）に影響を与える要因として考えられる。今回の実験では、石粉の量とスランプが異なる他、その結果としてブリージング量が異なったことも影響

したと考えられる。自己収縮（反応収縮）を温度応力解析において考慮する際には、セメント・コンクリートの差異の他、このような影響因子も影響することを勘案する必要がある可能性を示唆している。

（２）拘束状態のコンクリートの自己収縮（反応収縮）

現象再現試験における拘束供試体の試験結果に基づいて、自己収縮（反応収縮）ひずみを計算した結果が、図－４．１８～４．２０である。ここで、拘束供試体の自己収縮（反応収縮）ひずみは以下のように定義した。

自己収縮（反応収縮）歪み： $\varepsilon_s = \varepsilon_0 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$

ε_0 : 応力に寄与したひずみ。材齢毎にコンクリートに発生する応力を試験練りで得られた弾性係数を積算温度換算した値で除した結果のステップ毎の計算結果の累積値。

ε_1 : 温度によるひずみ。温度履歴に試験練りで得られた平均線膨張係数を乗する。

ε_2 : 拘束供試体で計測された実ひずみ

計算の結果得られた自己収縮量（反応収縮量）は５０マイクロ～１３０マイクロと無拘束供試体における算出結果とほぼ同じレベルであり、コンクリートの拘束状態に関わらず、自己収縮（反応収縮）は起きる現象であることを示している。

更に図－４．１８～４．２０から言えることは、実歪みが一定に保たれず、拘束状態が低い場合（図－４．１８および図－４．２０）には、拘束状態がほぼ１００％である場合（図－４．１９）と異なり、自己収縮（反応収縮）ひずみが徐々に大きくなっている。これは、引張応力状態のコンクリートが拘束状態にある場合、引張応力に寄与するコンクリートの自己収縮（反応収縮）ひずみを打ち消す方向にクリープ現象が寄与するためであると考えられる。

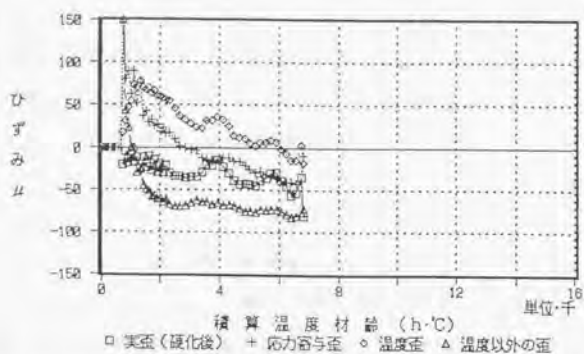


図-4. 18 3P現象再現試験の拘束供試体における自己収縮(反応収縮)

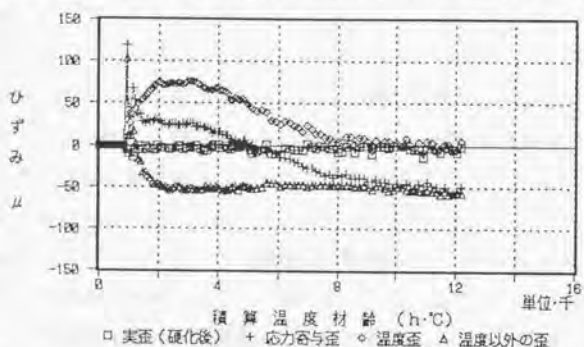


図-4. 19 2P現象再現試験の拘束供試体における自己収縮(反応収縮)――b)

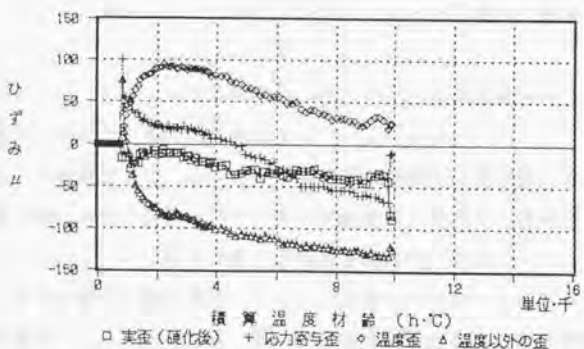


図-4. 20 2P現象再現試験の拘束供試体における自己収縮(反応収縮)――c)

5 温度応力解析に関する改善提案

温度応力解析により現場における温度応力ひび割れ現象を的確にシミュレーションするには、前章迄に確認した温度応力ひび割れ現象に影響を与える因子を考慮した温度応力解析手法の運用方法、物理試験方法とその評価方法の改善を行う必要があると考えられる。

5.1 物理定数の試験方法に関する提案

従来の温度応力解析に用いている物理定数の試験方法および評価方法に関する問題点。より現象に近い物理定数の決定方法について以下に述べる。

(1) 引張強度

① 問題点

現象再現試験の結果からも分かるとおり、ひび割れ発生応力が従来の割裂引張強度試験で得られた引張強度と比較して小さい傾向にあり、割裂強度試験の結果で耐ひび割れ性（ひび割れ指数）を評価することには限界がある。これについては、以下の様な理由が考えられる。

割裂強度試験によって得られた引張強度は、載荷方向の大きい圧縮応力とその直角方向の引張応力が同時に作用する応力状態における値である。一方、現場におけるマスコンクリートは水平方向に純引張応力に近い状態である。応力状態の異なるコンクリートの引張強度は一般的に異なることから、温度応力ひび割れの発生確率を土木学会で提案しているひび割れ指数で評価する場合、その結果の精度に影響を与えることになる。

W. F. Chenによれば、典型的なコンクリートの破壊基準面は注目している方向の強度は直角方向応力に依存して変化する。このことは、P. V. Ladeによっても実験によって確認されている。この応力状態の影響を強度評価に反映するには、割裂引張強度試験における供試体内部の応力状態を更に研究し、温度応力ひび割れが発生するマスコンクリートの応力状態との関連で定量的に定式化することが望まれる。

更に考慮しなければならない特性として、コンクリートがセメントペーストと骨材の複合材料であることが上げられる。割裂引張強度試験においては供試体中心線上に最大応力部が発生し、ここに存在する微細構造欠陥に対しては敏感に反応すると考え

られるが、中心部から外れた構造欠陥に対しては鈍感になる。しかし、純引張状態では全ての部分が同じ応力状態であると考えて良いことから、内部の微細構造欠陥に対してはより敏感である。つまり、欠陥がひび割れ発生の原因となる確率が大きくなり、結果としてひび割れ発生確率が大きくなる。

さらに、割裂引張強度試験においては引張強度として評価される応力方向と直交して圧縮応力が働いているが、このことにより荷重載荷方法（圧縮応力作用方向）に発生する載荷初期のマイクロクラックは骨材により拘束されて成長しない。このことは、従来から指摘されているところであり、試験初期には多くのマイクロクラックが発生し、荷重載荷が進むに従ってこれらが成長あるいは連結することにより破壊に至る。しかし、後述する供試体を直接引張る試験（直接引張試験）の観察結果では、供試体に破壊前のマイクロクラックの発生は認められず、突然破壊に至る。これは、純引張状態では骨材がマイクロクラックを拘束する効果は小さいので、最初のマイクロクラックが発生した時点で破壊に至る可能性が高くなると考えられる。

② 改善の方向性

ひび割れ発生確率（ひび割れ指数）を直接引張試験結果で評価するほうが実際には望ましいと考えられる。しかし、直接引張試験は試験方法が難しい上に基準化された方法が無いことから、割裂強度試験の結果を上記のひび割れに対する感度を考慮して補正することが考えられる。温度応力解析では、前述した自己収縮（反応収縮）も評価していないことから、これも考慮に入れた指標を検討し、要求ひび割れ指数を割り増す、あるいは内部欠陥等に起因するひび割れに対する感度を評価し、引張強度を補正することも考えられる。

供試体に内在する構造欠陥が引張強度に対して支配的である点は実際の現象と合うことから、将来において信頼性の高い直接引張試験方法が確立されれば、引張強度試験の方法を変更することも考えられる。

（２）弾性係数

① 問題点

従来、コンクリートの弾性係数は、圧縮強度試験時に供試体側面にひずみゲージを設置し、計測されたひずみと、載荷荷重と載荷面積から得られる平均応力で得られる応力～ひずみ関係における $1/3$ 圧縮強度ポイントにおける割線の勾配（ $1/3$ 強度

圧縮割線弾性係数)から得ている。しかし、一般的に1/3圧縮強度ポイントにおける応力～ひずみ関係は非線形になりつつあり、徐々に弾性係数が小さくなる応力レベルであり、温度応力ひび割れが発生するコンクリートの引張強度レベルの応力状態での弾性係数とは異なる。

② 改善の方向性

温度応力解析に用いる弾性係数は、その応力レベル依存性を考慮すれば、圧縮強度試験時の応力～ひずみ関係における原点からの接線勾配(圧縮接線弾性係数)あるいは、直接引張強度試験時における応力～ひずみ関係での割線勾配(引張割線弾性係数)を適用することが、応力レベルを考慮した場合に望ましいと考える。

図-5. 1および図-5. 2は3P主塔基礎の低発熱型セメントを用いたコンクリートで実施した試験結果である。引張割線弾性係数を1/3強度圧縮割線弾性係数と比較した場合、平均して $0.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 程度小さく、温度応力解析で計算される発生応力に大きい影響を与えることが分かる。また、引張割線弾性係数と圧縮接線弾性係数を比較すると、殆ど同レベルの数値を示しており、前述したとおり、両者の何れかを温度応力解析に採用することが望ましい。

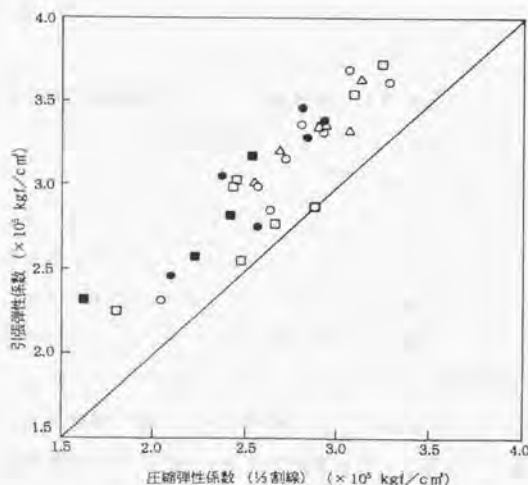


図-5. 1 1/3強度圧縮割線弾性係数と引張割線弾性係数の関係

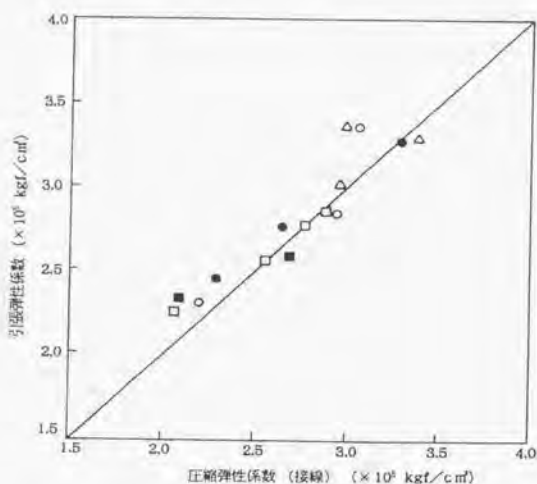


図-5. 2 圧縮接線弾性係数と引張割線弾性係数の関係

(3) クリープ係数

① 問題点

従来、温度応力解析に採用するクリープ係数は、7日あるいは28日材齢時の20℃標準養生供試体に対して、圧縮強度の1/3に相当する載荷荷重で計測された結果である。しかし、特に若材齢時のコンクリートは凝結反応が進んでいる段階であるので、材齢によるクリープ係数の違いは大きいことが予測される。また、コンクリート圧縮強度の1/3を載荷荷重とすることについても、弾性係数において指摘したとおり、温度応力ひび割れが問題とされる応力レベルは引張強度レベル以下であるので、応力レベルの違いがクリープ係数の計測結果に大きく影響することが予測される。

図-5. 3および図-5. 4は、若材齢のコンクリートの載荷材齢毎のクリープ係数を、2P、3P主塔基礎で用いた低発熱型セメントを用いたコンクリートで試験した結果であり、載荷載荷荷重についても引張強度レベル（載荷応力は10kgf/cm²）としている。

図-5. 3のクリープ係数の計測結果の内、3P主塔基礎における例では、40時

間材齢の結果と3日材齢の結果とでは、クリープ係数の数値レベルは大きく異ならないが、7日材齢のクリープ係数とは大きく異なる。2P主塔基礎の40時間材零の結果と3日材齢の結果は殆ど一致しており、3P主塔基礎と同様の結果となっている。

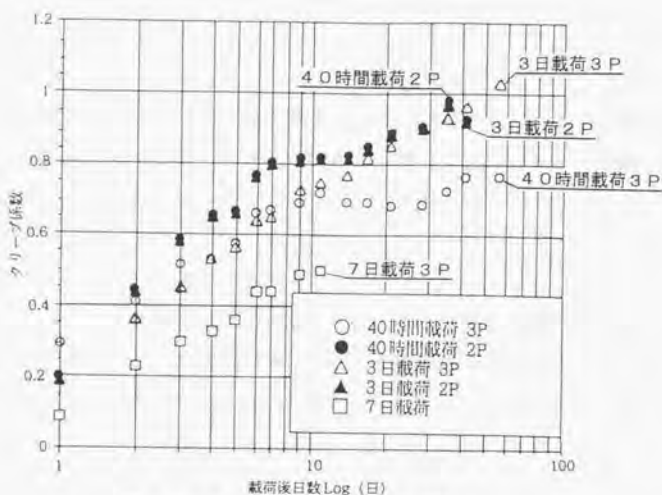


図-5. 3 材齢毎のクリープ係数

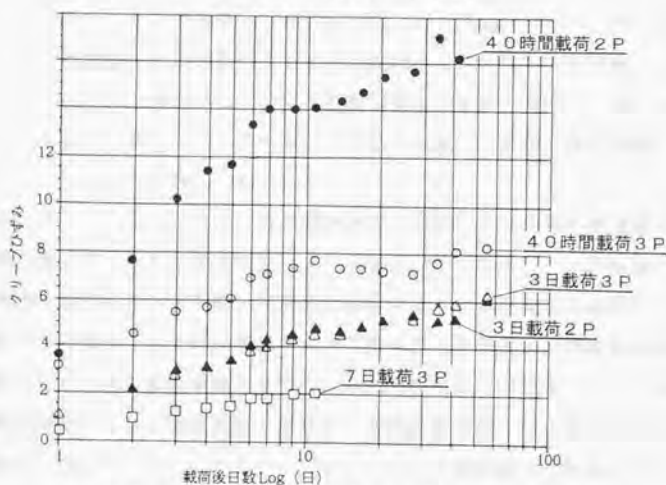


図-5. 4 材齢毎の単位クリープひずみ

図-5. 4に示す単位クリープひずみの計測結果でもクリープ係数と同様に材齢に従って小さくなる傾向があり、若材齢時のクリープ現象が温度応力に大きな影響を与えと考えられる。低発熱型セメントも用いたコンクリートでの温度応力解析においては、7日材齢のクリープ係数を用いることには疑問がある。

② 改善の方向性

図-5. 3の結果が示すとおり、クリープ係数は計測時点で大きくことなることから、可能な限り若材齢のクリープ試験を実施することが望ましい。また、載荷荷重についてもひび割れ発生応力レベルとすることがより現実に近いクリープ係数を得るためには必要であると考ええる。

5. 2 温度応力解析方法に関する提案

前節において述べたとおり、温度応力解析においては実際とは異なる物理定数を適用していることが多いが、その適用方法についても実際の現象と異なる。以下に前節で提案した試験方法により得られた物理定数の解析への適用方法について述べる。

(1) 物理定数の適用方法

① 問題点

従来の温度応力解析において適用される引張強度、弾性係数、クリープ係数等の物理定数は、20℃標準養生の供試体による試験結果であり、材齢のみを考慮して解析に適用している。しかし、強度等については積算温度との相関が良いことが一般的に知られており、温度の影響を考慮に入れない温度応力解析は、実際の温度履歴に合った現象解析となっていないとは考えられない。

図-5. 5～図-5. 8は、それぞれ引張割線弾性係数および割裂引張強度を、2P、3P主塔基礎で用いられた低発熱型セメントを用いたコンクリートで試験した結果である。弾性係数および引張強度を積算温度換算することの妥当性を確認する為に、20℃標準養生の供試体による試験結果を40℃標準養生を想定して積算温度換算し、40℃標準養生の供試体の試験結果と比較した。この比較から分かることは、積算温度換算した弾性係数および引張強度が、実際の温度履歴を経験した供試体の計測結果と比較して概ね一致していることである。つまり、20℃標準養生の試験結果をそのまま温度応力解析に適用することが不適切であることも示している。

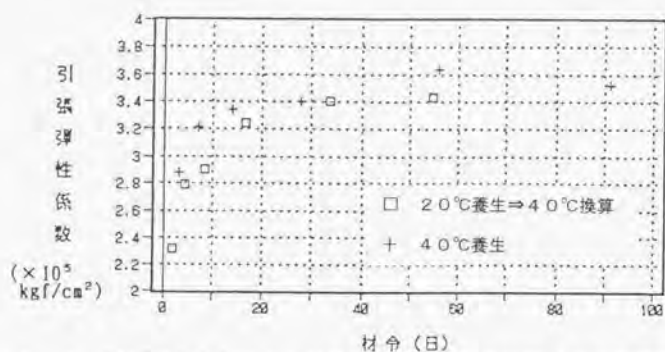


図-5.5 積算温度換算による引張割線弾性係数の比較 (2P主塔基礎)

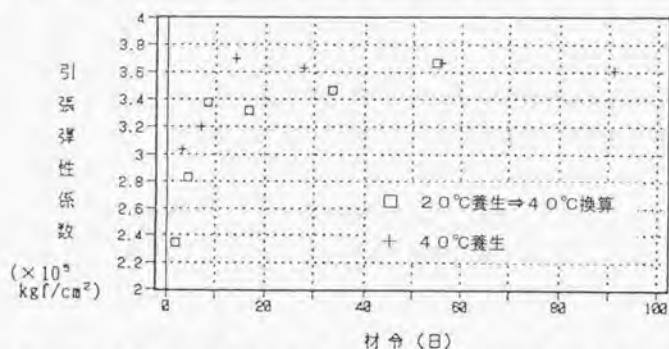
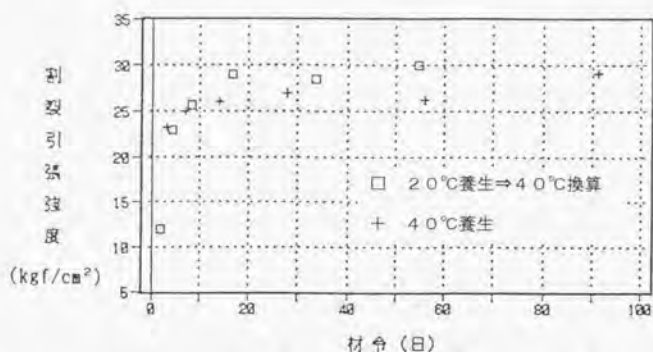


図-5.6 積算温度換算による引張割線弾性係数の比較 (3P主塔基礎)



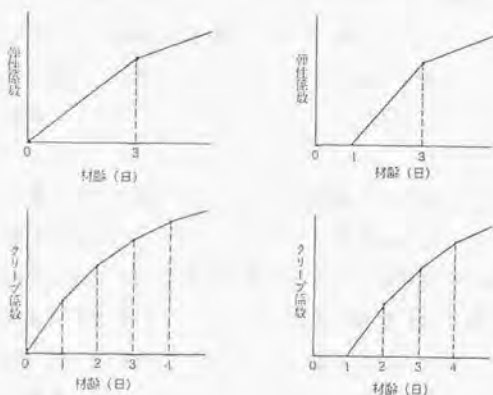
図-5.7 積算温度換算による割裂引張強度の比較 (2P主塔基礎)



図一五． 8 積算温度換算による割裂引張強度の比較（3 P 主塔基礎）

② 改善の方向性

- 1) 温度応力解析に用いる引張強度、弾性係数（引張割線弾性係数あるいは圧縮接線弾性係数）、クリープ係数等の物理定数については積算温度換算値を適用することが望ましい。
- 2) また、図一五． 9 参照に示すとおり、従来の温度応力解析ではコンクリートを打設した時点から弾性係数、クリープ係数等が有効に働くとしているが、実際の現



（従来の考え方）

（今回の提案）

図一五． 9 温度応力解析における物理定数の適用方法

象では凝結が完了する頃迄はコンクリートは塑性流動体であり、応力を発生することは無いと考えた方が妥当である。よって、現象を忠実に再現する為に引張接線弾性係数（或いは圧縮接線弾性係数）およびクリープ係数は凝結完了時点から発現させることとする方が望ましい。

（2）自己収縮（反応収縮）の解析への導入

① 問題点

前述したとおり現場計測結果および現象再現試験結果からは、自己収縮（反応収縮）の影響を考慮する必要があると考えられる。第3章および第4章の2P、3P主塔基礎における現場計測結果および現象再現試験結果からは、自己収縮量（反応収縮量）は数10マイクロから100マイクロ台であり、温度応力の発生に大きな影響を与えることが分かる。また、同一コンクリートであっても自己収縮量（反応収縮量）は拘束圧とクリープ現象、温度履歴、ブリージングその他の影響が考えられる。

② 改善の方向性

自己収縮（反応収縮）は、以下の2とおりの温度応力解析への導入が考えられる。

- 1) セメント成分特性等の依存性をモデル化し、自己収縮量（反応収縮量）を定量的に時間関数として温度応力解析に導入する。
- 2) コンクリート標準示方書で規定しているひび割れ指数を、自己収縮量（反応収縮量）を考慮したものとして設定する。

第4章で自己収縮（反応収縮）について計測結果から検証したとおり、自己収縮（反応収縮）現象はコンクリート内にあって、応力発現およびクリープ現象とは分離出来ない現象であることから、温度応力解析において定量的にその影響を評価する1)の方法が最適であると考え。ただし、自己収縮（反応収縮）量の定量的評価が困難な場合には、2)の方法で勘案せざるを得ないとする。

上記のいずれの方法においても、セメントあるいはコンクリートの自己収縮（反応収縮）をセメント成分等の指標によりモデル化する必要があり、多様なセメントを用いた試験練りによる自己収縮（反応収縮）の測定を実施することが必要であった。

6 低発熱型セメントに関する改善提案

6. 1 耐ひび割れ性に着目したセメントの特性

マスコンクリートの現場計測およびその室内現象再現試験の結果を解析してきたが、その成果に基づき、低発熱型セメントを用いたコンクリートにおける望ましい物理特性等を指摘し、その為に低発熱型セメントが持つべき特性について提案する。

(1) 断熱温度上昇特性

断熱温度上昇特性において最も議論の対象となるのは断熱温度上昇量 K 値であるが、低発熱型セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇特性の内、 K 値は単位セメント量 260 kg/m^3 で 25 度以下と低く抑えられており、問題は無いと考えられている。しかし、 α 値については十分小さく抑えられていないので発熱は早期に大きく、現場におけるコンクリートの温度上昇量はほぼ断熱状態に近くなる。低発熱型セメントを用いたコンクリートは凝結完了が遅いこともあり、凝結完了時点から最高温度到達迄の温度上昇量が小さく、圧縮応力の蓄積に寄与する温度差も小さくなる。

よって、 α 値を下げるにより引張強度発現が遅くなることも温度応力解析において勘案する必要があるが、可能な限り α 値を小さく抑えることが望ましい。

(2) 温度応力特性

コンクリートの弾性係数が早期に大きくなった場合、温度上昇時の圧縮応力発生も大きくすることが考えられるが、同時に温度降下時の発生引張応力も大きくする。現場における計測結果では、温度上昇時に想定される圧縮応力の内約 7 割についてはクリープにより低減されている一方、温度降下時にはクリープによる応力低減が殆ど確認されないことから、弾性係数が若材齢時にあまり早く大きくなることも問題であると考ええる。若材齢時の弾性係数が大きいことは、マスコンクリートを層状打設する場合の若材齢時の下層リフトによる外部拘束を大きくする上に、温度降下時のクリープによる応力低減が期待出来ないという面もある。

自己収縮（反応収縮）は温度応力解析では評価されていないが、コンクリートのひずみ（応力）発現に直接影響を与える。最近の研究では自己収縮（反応収縮）量はセメントの成分特性、特にスラグ混入率・クリンカー成分率（エーライト率）と関係が

あることが、ペーストレベルの実験で報告されている。よって、自己収縮（反応収縮）の小さいセメント成分特性を選択することが重要である。

自己収縮（反応収縮）はまた、収縮しない骨材との間にひずみを発生させることが考えられる。このことは、コンクリートの引張強度に直接影響を与えること、ひずみ差からくるせん断応力により、引張応力状態時のひび割れに対する感度（ひび割れ感受性）に影響を与えることが考えられるので、自己収縮（反応収縮）を考慮したセメント成分特性の選択は重要である。

6. 2 低発熱型セメントに対する提案

上記の考察結果に基づき、セメント製造各社の協力により以下の改良項目を提案した上で、改良型低発熱型セメントを試製造し、試験練りを実施した。

- 1) セメントクリンカーに占めるビーライト比率を大きくすることにより、初期の発熱を抑えるとともに、強度（弾性係数）発現をコントロールする。
- 2) セメントクリンカーのブレンを小さくして、初期の発熱および強度発現をコントロールする。
- 3) スラグ混入率を小さくすることにより、自己収縮（反応収縮）量を小さくする。
- 4) スラグ粉末度を小さくすることにより活性度を下げ、初期の発熱および強度発現をコントロールする。

上記の提案は、温度応力と引張強度発現のバランス（例えば、これらの比であるひび割れ指数）において議論されるべきであり、前節で述べた特性を満足する最良のセメント成分の組み合わせを決めることは難しいと考えられる。セメントの試製造については製造設備上の制約等もあり、製造各社で表-6. 1 に示すとおり多様な改良案が提案された。

表-6. 1 低発熱型セメントの改良案の概要

セメント メーカー	セメントの 略 号	比重	比表面積 (cm^2/g)	混合比率 (%)			クリンカー の種類	備 考
				クリンカー	ス ラ グ	フライアッシュ		
A 社	NS80	2.97	3680	20	80	—	普 通	・クリンカーを普通から中濃熱に変更
	MS75	3.00	3330	25	75	—	中濃熱	・二成分の混合比率を若干調整
B 社	MS70	3.00	4850	30	70	—	低 熱	・スラグ二成分系からフライアッシュ二成分系に変更
	MF25	2.90	3240	75	—	25	低 熱	・石膏の添加量を調整 (クリンカーは前同から低熱 (高バライト系))
C 社	MS62F18	2.81	4770	20	62	18	中濃熱	・クリンカーを普通から中濃熱に変更
	MS30F30	2.85	3900	40	30	30	低 熱	・二成分の混合比率を調整
D 社	MS50F27	2.73	5150	23	50	27	中濃熱	・クリンカーを中濃熱から高バライト系に変更
	MS30	3.10	4500	70	30	—	低 熱	・二成分からスラグ二成分系に変更
E 社	NS84	2.92	5920	16	84	—	普 通	・クリンカーを普通から中濃熱に変更
	MS75	2.96	3110	25	75	—	中濃熱	・スラグの粉末度を低減 (低) ・石膏の添加量を調整
F 社	NS54F30	2.70	4780	16	54	30	普 通	・クリンカーを普通から中濃熱 (高バライト系) に変更
	MS45F20	2.81	3880	35	45	20	中濃熱	・二成分の混合比率を調整 ・スラグの粉末度を低減 (低)
G 社	MS55F20	2.80	5070	25	55	20	中濃熱	・スラグの粉末度を低減 (低)
	MS55F20	2.80	3910	25	55	20	中濃熱	・石膏の添加量を調整
H 社	NS60F20	2.80	5000	20	60	20	普 通	・クリンカーを中濃熱から高バライト系に変更
	MS50F20	2.82	4420	30	50	20	低 熱	・二成分の混合比率を調整
I 社	MS60F22	2.79	5080	18	60	22	中濃熱	・スラグの粉末度を低減 (低) ・石膏の添加量を調整
	MS60F20	2.78	3400	20	60	20	中濃熱	・二成分の混合比率を若干調整
2 P	MS48F20	2.82	4860	32	48	20	中濃熱	
3 P	MS70	3.00	4850	30	70	—	低 熱	
A 社(新)	MS65	3.02	3510	35	65	—	低 熱	再改良

表中の上段 — 平成元年産サンプルセメント

表中の下段 — 平成6年度産サンプルセメント

7 低発熱型セメントの耐ひび割れ特性確認試験

前章で示した低発熱型セメントの改良型セメント（試作品）を評価するために、これらのセメントを用いたコンクリートの試験練り・各種室内試験を実施し、コンクリートの性状に関する基礎データを得た。なお、改善の程度を測る比較データを得る為に、明石海峡大橋主塔基礎において用いられた低発熱型セメントについても同様の試験練りを実施した。

また、温度応力解析において問題となる自己収縮（反応収縮）についても、低発熱型セメントペーストおよびコンクリートで確認し、セメント成分特性と自己収縮（反応収縮）特性の関係について検討することとした。

7.1 試験計画の概要

7.1.1 物理試験

(1) 使用材料および配合

試験練りに用いたコンクリートの基本性状・基本配合は表-7.1および7.2に示すとおりである。セメントの特性を確認する上で、配合の基本的項目（ W/C 、 s/a 、単位水量、単位セメント量、単位石粉量等）は統一することとした。また、セメントおよび石粉以外の材料については物理特性に与える影響が大きいことが予測されたので統一することとし、骨材は明石海峡大橋3P主塔基礎で使用されたもの、混和剤は高性能AE減水剤（SP9N）、補助AE剤（AE775S）を使用した。

実際の試験配合は、以上の条件のもと各セメントを用いた予備試験練りで基本性状を満足すべく決定した。

表-7.1 低発熱型コンクリートの基本性状

種 別	スランブ (cm)	空 気 量 (%)	ブリージング率 (%)
L-7	8 ± 2.5	4 ± 1.0	5.0 以下

(注) AE減水剤のみを使用した

スランブは5 ± 1.5 cm

表-7.2 低発熱型コンクリートの基本配合

種 別	骨材最大寸法 (mm)	最小単位セメント量 (kg/m ³)	最大水セメント比 (%)
L-7	40	260	55

(2) 試験項目および試験方法

試験練りにおいて実施した試験項目および試験方法は表-7、3に示すとおりである。練り上がり温度は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、供試体の養生条件は 20°C 標準養生とした。また、コンクリートの練り混ぜには100リットル程度の強制2軸練りミキサーを使用し、材料投入のタイミングおよび練り混ぜ時間は統一した。

表-7、3 試験項目および試験方法

試 験 項 目	試 験 方 法
スランプ	JIS A 1101
空 気 量	JIS A 1128
単位容積重量	JIS A 1116
ブリージング	JIS A 1123
凝 結	JIS A 6204 付属書-1
圧縮強度	JIS A 1108 供試体寸法： $\phi 15 \times 30\text{cm}$
引張強度（割製）	JIS A 1113 供試体寸法： $\phi 15 \times 30\text{cm}$
引張強度（直接）	（別掲） 供試体寸法： $\phi 12.5 \times 25\text{cm}$
弾性係数（圧縮）	ゲージ長70mm、4枚/本、1/3割線弾性係数
弾性係数（引張）	ゲージ長70mm、4枚/本、90%荷重時弾性係数
曲げ強度（3等分点）	JIS A 1106 供試体寸法： $15 \times 15 \times 53\text{cm}$
クリープ	（別掲） 供試体寸法： $15 \times 15 \times 53\text{cm}$
断熱温度上昇	空気循環式、 20°C
線膨張係数	材令7日で試験実施 約 $5^\circ\text{C}/\text{h}$ で $20^\circ\text{C} \rightarrow 60^\circ\text{C}$ （昇温）、 $60^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C}$ （降温）

（註）断熱温度上昇試験は、マルイ社製の空気循環方式により、各コンクリート14日試験を実施した。

試験項目の内、特に試験方法に関する基準が無く、かつ試験が難しいのが直接引張試験である。従来から試みられている直接引張試験における課題は、いかにして供試体に偏心の無い軸力を载荷し、供試体断面内になるべく均質な応力を発生させるかである。今回の実験に際しては種々の試行を実施した結果、図-7、1および写真-7、1に示す試験器を採用した。また、クリープ試験についても図-7、2に示す方法により実施した。これらの実施要領は以下に示すとおりである。

① 直接引張試験方法

- 1) 供試体への荷重载荷は万能試験機で行い、载荷速度は $25\text{kg}/\text{秒}$ （ $1.5\text{tf}/\text{分}$ ）程度を標準とする。
- 2) 供試体に接着される引張治具には、载荷時に偏心荷重による曲げモーメントが

作用しない様に球座を設け、ユニバーサルジョイントとした。

- 3) 供試体断面に均等に応力伝達する為に、上下の引張治具の厚さを50mmとした。
- 4) 引張治具と供試体の接着には、速硬化エポキシ系接着剤を使用した。
- 5) 供試体のひずみ測定には、圧縮試験において弾性係数を測定する場合と同様に、供試体中央部の側面にひずみゲージを4箇所設置することにより計測した。
- 6) 引張弾性係数は、直接引張試験により得られる平均応力と平均ひずみの関係から算出した。この際、引張弾性係数は最大応力の90%割線勾配として求めた。

② クリープ試験方法

- 1) 供試体はクリープ試験用（荷重載荷用）および乾燥収縮試験用（無載荷用）を各2体製作することとした。試験の結果得られたクリープ変形は、乾燥収縮量を補正した。
- 2) 試験開始材齢は3日とし、それ迄は20℃標準養生とした。また、試験中（荷重載荷後）は20±2℃、湿度65±5%の恒温恒湿室に保存した。
- 3) 載荷材齢は3日であるが、載荷応力は10kgf/cm²とし、供試体端部に取付られたナットを締め付け調節することにより一定に保った。また、導入応力は供試体応力の反力を受けている鉄筋に設置したひずみゲージにより管理した。

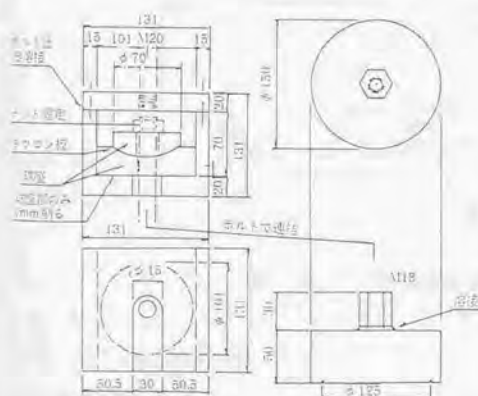


図-7. 1 引張強度試験の治具

写真-7. 1 直接引張試験の試験状況

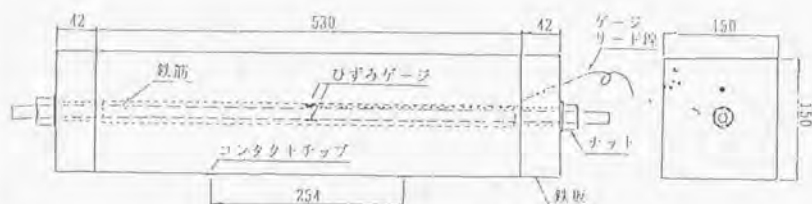


図-7. 2 クリープ試験方法

③ 線膨張係数試験方法

線膨張係数の試験装置の概要を図-7. 3に示す。

- 1) 角柱供試体中央部に埋め込み型ひずみ計を埋設し、恒温水槽中で水温を変えてコンクリートに温度変化を与え、コンクリート温度と内部ひずみの関係より線膨張係数を求める。
- 2) 試験実施材齢は7日とする。
- 3) 温度変化は約5度/時間で変化させ、20度と60度の間を昇降させる。ひずみ測定も温度変化5度毎とし、コンクリート温度が均一となった状態で行う。

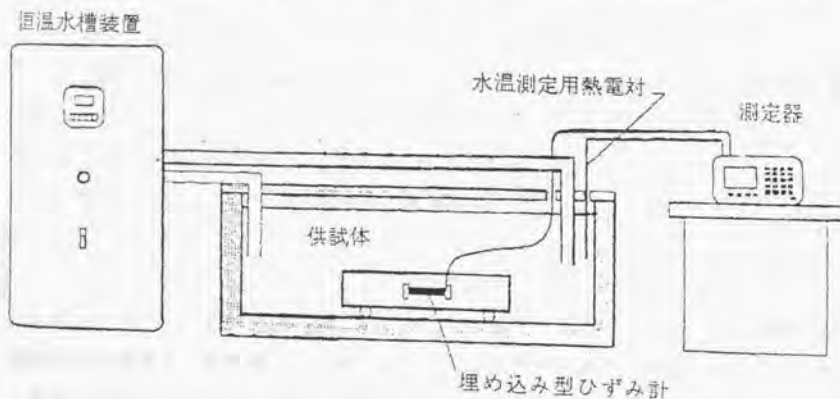


図-7. 3 線膨張係数試験装置

7. 1. 2 硬化収縮試験

(1) 使用材料

試験に用いたセメントは表-7. 4に示すとおりである。なお、表中のA社(新)

とは表-6. 1で示したA社の改良型セメントを再改良したセメントである。また、コンクリートに用いた骨材、混和剤は、「7. 1. 1 物理試験」において使用したものと同じとし、コンクリートの基本性状および基本配合は、表-7. 1と表-7. 2と同じとした。

表-7. 4 自己収縮試験に用いたセメントの概要

セメントメーカー 記号	略号	比重	比表面積 (cm^2/g)	混合比率(%)			クリソカー の種類
				クリソカー	スラーク	フライアッシュ	
A社(新)	MS65	3.02	3,510	35	65	—	低熱
B社	MF25	2.90	3,240	75	—	25	低熱
C社	MS30F30	2.85	3,900	40	30	30	低熱
D社	MS30	3.10	4,500	70	30	—	低熱
F社	MS45F20	2.81	3,880	35	45	20	中庸熱
G社	MS55F20	2.80	3,910	25	55	20	中庸熱
H社	MS50F20	2.82	4,420	30	50	20	低熱
I社	MS60F20	2.78	3,400	20	60	20	中庸熱

(2) 試験方法

自己収縮(反応収縮)試験は、セメントペーストおよびコンクリートの両方の状態で実施した。

① 供試体の仕様

それぞれの供試体寸法は以下に示すとおりの方体とした。

セメントペースト : $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$

コンクリート : $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$

セメントペーストの配合は、 $W/C=30\%$ とした。また、コンクリートの配合は、基本性状を確保する試験練りの結果、表-7. 5に示すとおり決定した。

供試体の製作に当たっては、打設後に表面仕上げを行い、水分の逸散を防ぐ為にポリ塩化ビニリテン系フィルムを仕上げ面に密着させ、さらに濡れむしろで覆い、その後養生条件 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $95 \pm 5\% \text{ R.H.}$ の室内に静置する。型枠は材齢2日で脱型し、ただちにアルミ箔粘着テープ(厚さ 0.05mm)で供試体全面をシールし、自己収縮測定用のコンタクトチップを図-7. 4に示す要領で張り付けた。これらの供試体は、各設定養生温度に達した水槽に静置した。

表-7. 5 コンクリートの実施配合

セメントメーカー	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤 (C×%)	
			水	セメント	石 粉	細骨材	粗骨材	SP9N	AE775S
A社(新)	53.8	41.0	140	260	30	745	1128	1.30	0.003
B社	53.8	41.0	140	260	30	740	1125	1.20	0.010
C社	53.8	41.0	140	260	30	740	1122	1.20	0.010
D社	53.8	41.0	140	260	30	748	1133	1.20	0.002
F社	53.8	41.0	140	260	30	738	1120	1.00	0.010
G社	53.8	41.0	140	260	30	738	1120	1.20	0.010
H社	53.8	41.0	140	260	30	738	1117	1.20	0.013
I社	53.8	41.0	140	260	30	738	1117	1.20	0.008

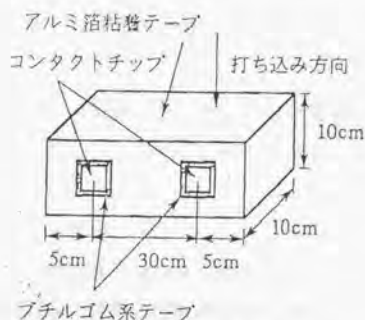


図-7. 4 コンタクトチップの張り付け要領 (コンクリート供試体の場合)

② 試験条件

セメントペーストについてはセメント成分の影響を確認することを目的として試験した。また、コンクリートについては、更に養生温度の違いについて以下に示す各材齢において確認することとした。

セメントペースト : 養生温度 = 25 度、

測定材齢 = 3 日、7 日、14 日、28 日、42 日

コンクリート : 養生温度 = 10 度、25 度、40 度

測定材齢 = 3 日、7 日、14 日、28 日

(注) 測定材齢は脱型した日 (材齢 2 日) を材齢 0 日とした材齢である。よって、

実際の打設後材齢は (測定材齢 + 2 日) となる。

② 自己収縮の計測方法

自己収縮量はコンタクトチップ間の距離変化で計測する。計測上の基準となるのはコンタクトチップが設置された供試体が養生槽の温度に達した時点に計測された、コンタクトチップ間距離（基準距離）である。前述の測定材齢日に達した供試体を水槽から出し、直ちに恒温室（ 20 ± 1 度、 $50 \pm 5\%$ R.H.）において計測し、基準距離との差により自己収縮距離を計算する。

7. 2 物理試験結果とその評価

（1）試験練り時のコンクリート性状

セメント製造各社に依頼した低発熱型セメントの改良型セメント（案）および明石海峡大橋 2P、3P 主塔基礎で採用した低発熱型セメントによる試験練り時の性状は、表-7. 6 に示すとおりであり、配合の基本条件を外れるケースは無かった。

① 凝結時間

セメントにより若干異なり、終結時間で最大 12 時間程度の差がある。しかし、改良したことで、改良前と比較して特に大きな変化は生じていない。

② ブリージング

低発熱型セメントを用いる場合、ブリージングを抑える為に石粉を 30 kg/m^3 混入しているが、セメント毎の特徴を考慮せずに統一配合としていることから、多少ブリージングの大きい場合がある。また、E社のセメントについては、E社の要望により石粉を使用していないので、やはり多少大きくなっている。

（2）物理試験結果

① 圧縮強度、引張強度

改良型セメント（案）では、セメント中のクリンカー比率を上げる一方、ピーライト成分比率を大きく、かつスラグ粉末度を小さくする傾向があった。その結果として若材齢時の強度は小さくなったものの、明石海峡大橋主塔基礎で採用されたコンクリートと比較しても、長期的には大きく強度が変化していないのが特徴である。

（図-7. 5 圧縮強度試験結果、

図-7. 6 割裂引張強度試験結果、

図-7. 7 直接引張強度試験結果 参照）

表-7. 6 実施配合およびフレッシュコンクリートの性状

セメント メーカー	R/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)							混和剤 (C%)		スラブ (cm)	空気量 (%)	単位容 積質量 (kg/t)	ブリージ ング率 (%)	凝結時間(h:m)		
			水	砂	石粉	細骨材	粗骨材	SPGN	AE775S	SPGN	AE775S					始	発	終 結
A 社	53.8	41.0	140	260	30	745	1128	3.38	0.008	1.30	0.008	8.5	3.8	2.301	4.8	9:15		16:05
B 社	53.8	41.0	140	260	30	740	1125	3.12	0.036	1.20	0.014	8.5	4.1	2.298	4.1	8:20		14:00
C 社	53.8	41.0	140	260	30	740	1122	3.12	0.026	1.20	0.010	9.0	4.6	2.283	4.5	13:10		22:50
D 社	53.8	41.0	140	260	30	748	1133	3.12	0.005	1.20	0.002	7.5	4.0	2.312	1.3	10:10		18:15
E 社	53.8	41.0	140	260	—	774	1128	3.30	0.008	1.50	0.003	7.5	3.9	2.297	4.9	11:50		23:30
F 社	53.8	41.0	140	260	30	738	1120	2.60	0.026	1.00	0.010	8.0	4.5	2.269	2.4	11:00		22:40
G 社	53.8	41.0	140	260	30	738	1120	3.12	0.026	1.20	0.010	9.0	4.0	2.283	1.9	14:00		20:45
H 社	53.8	41.0	140	260	30	738	1117	3.12	0.036	1.20	0.014	8.5	3.7	2.290	3.0	12:10		19:50
I 社	53.8	41.0	140	260	30	738	1117	3.12	0.018	1.20	0.007	9.0	3.6	2.289	4.3	16:50		26:30
3 P	53.8	40.0	140	260	30	713	1171	2.86	0.023	1.10	0.009	11.0	4.8	2.29	2.4	12:00		21:55
2 P	53.5	41.0	130	260	50	718	1137	2.86	0.070	1.10	0.027	10.0	4.8	2.30	3.5	14:30		24:30

注) 2P、3Pの単位容積質量、ブリージング率、凝結時間は
現場での配合決定時のデータである。

1>
社)



)

2>
社)



)

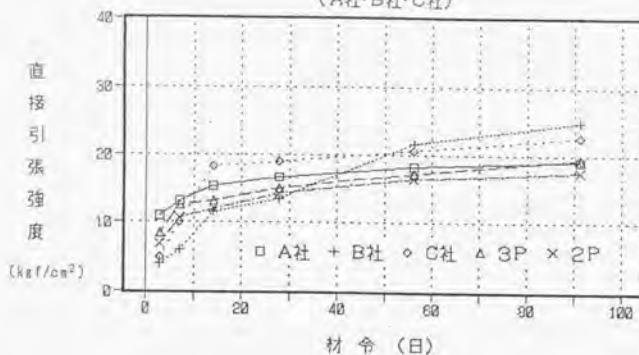
3>
社)



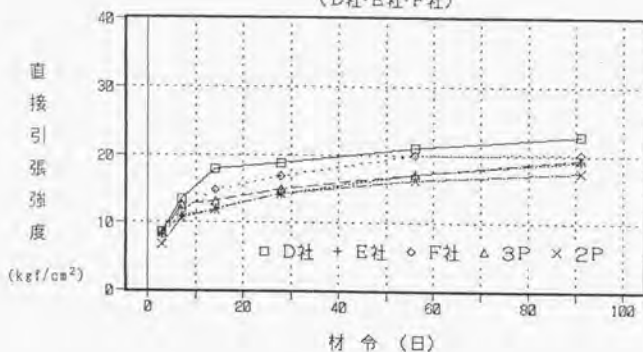
)

度試験結果

<直接(純)引張強度>
(A社・B社・C社)



<直接(純)引張強度>
(D社・E社・F社)



<直接(純)引張強度>
(G社・H社・I社)

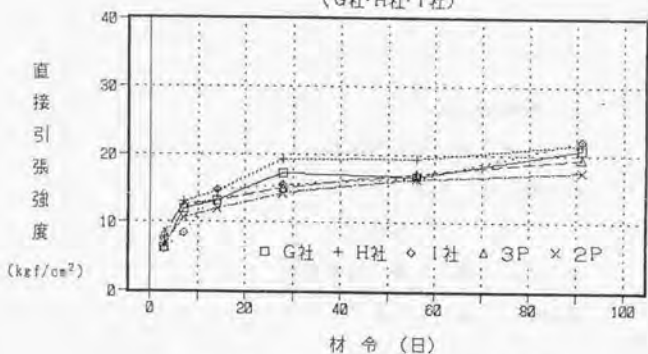


図-7. 7 直接引張強度試験結果

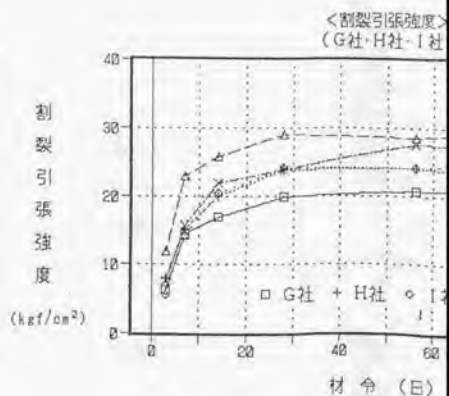
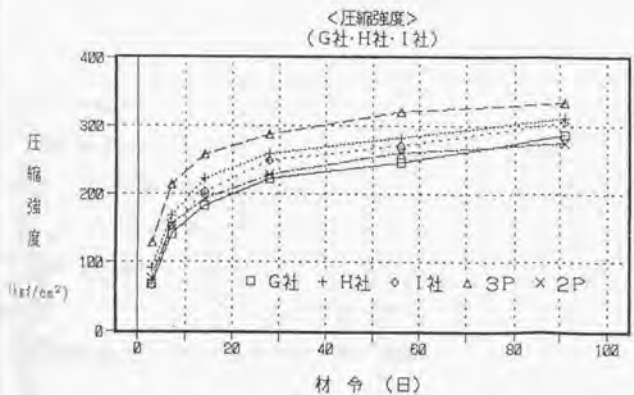
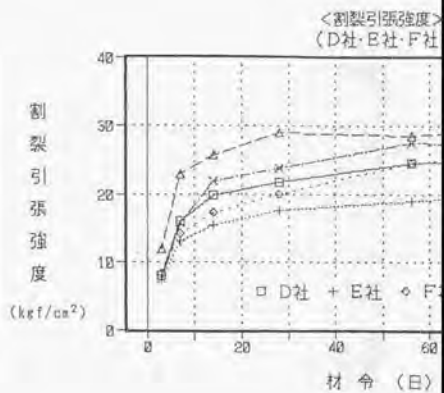
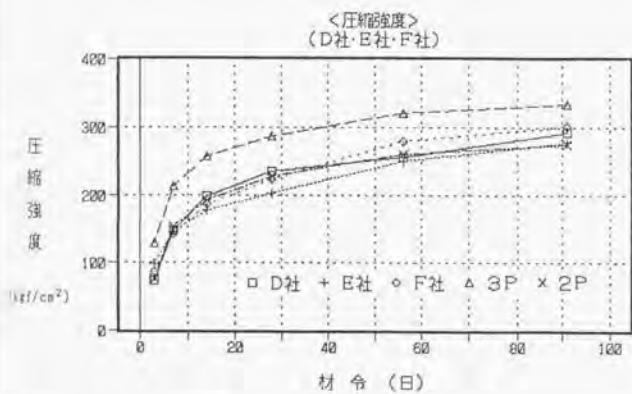
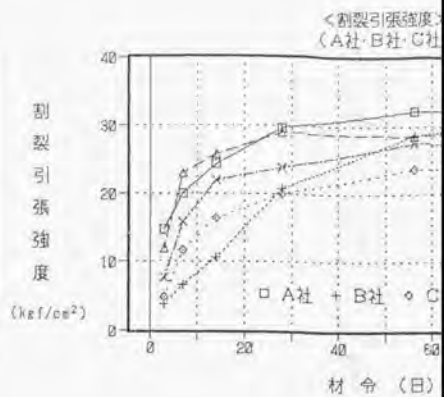
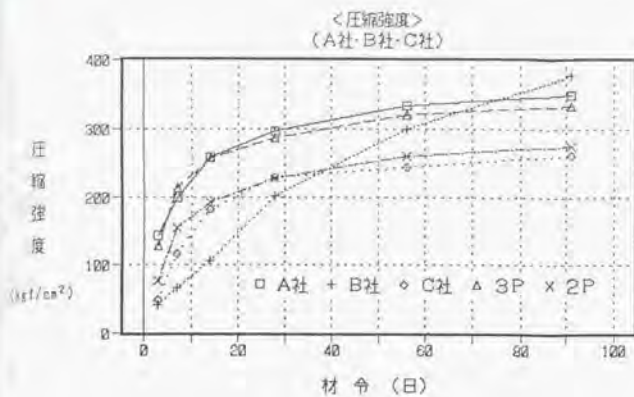
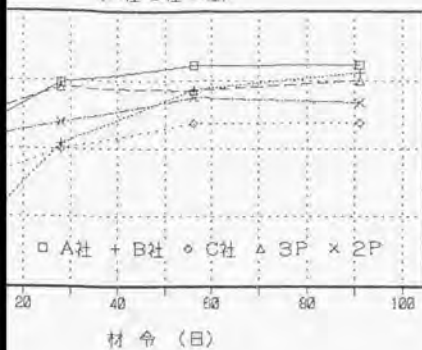


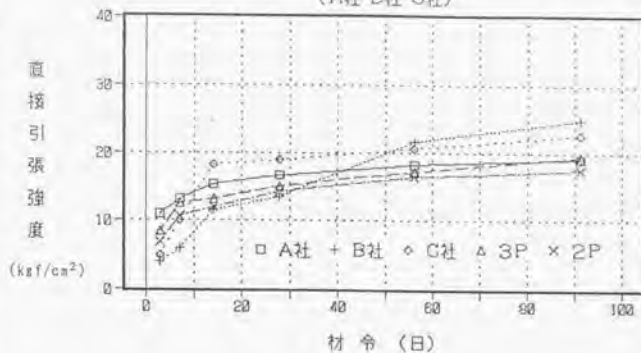
図-7. 5 圧縮強度試験結果

図-7. 6 割裂引張強度

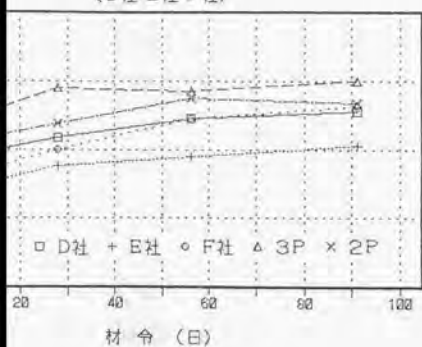
<割裂引張強度>
(A社・B社・C社)



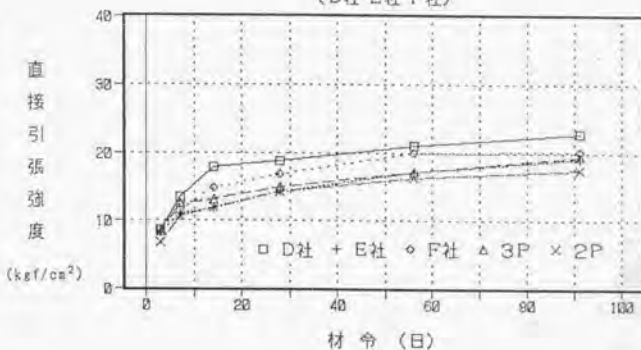
<直接(純)引張強度>
(A社・B社・C社)



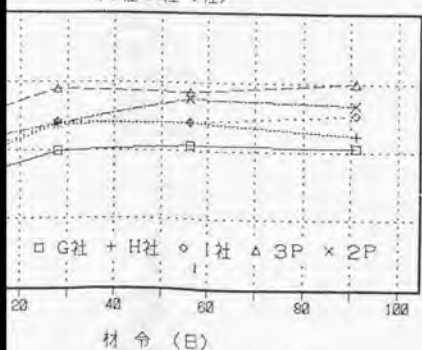
<割裂引張強度>
(D社・E社・F社)



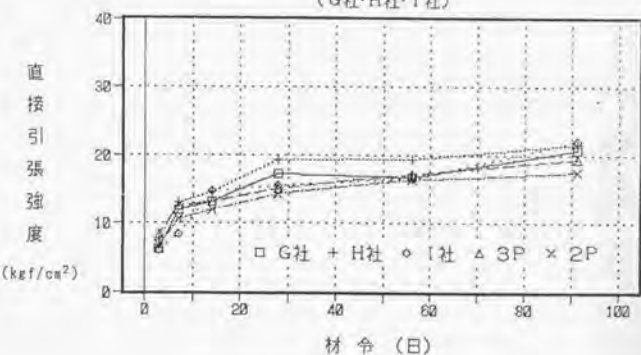
<直接(純)引張強度>
(D社・E社・F社)



<割裂引張強度>
(G社・H社・I社)



<直接(純)引張強度>
(G社・H社・I社)



7. 6 割裂引張強度試験結果

図-7. 7 直接引張強度試験結果

図-7. 8 は直接引張強度と割裂引張強度の関係を示すが、直接引張強度は大きなに従って相対的に割裂引張強度よりも小さくなる傾向を示している。これは前述したとおり割裂強度試験の場合、供試体の载荷方向の鉛直面内が最大引張応力となるのに対して、直接引張試験の場合、理想的には供試体全体が载荷方向に同一最大応力状態となる。よって、供試体に構造欠陥が存在する場合、直接引張試験の方が欠陥をきっかけとして破断する確率が高い。破壊形態においても、割裂強度試験では载荷方向には圧縮応力が働いている為に、初期に発生するマイクロクラックは骨材に拘束されることも割裂引張強度を大きくしていると考えられる。

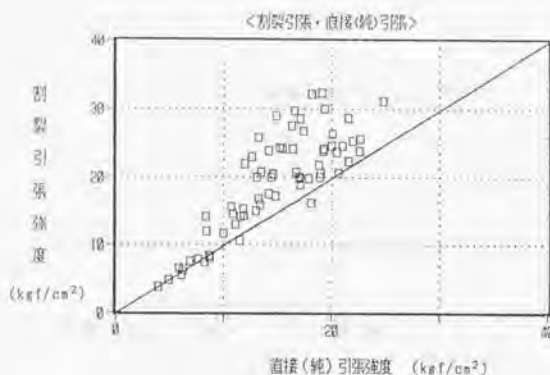


図-7. 8 直接引張強度と割裂引張強度の関係

② 弾性係数

圧縮強度試験時に計測された弾性係数は、圧縮強度の1/3点での圧縮割線弾性係数(1/3圧縮強度割線弾性係数)および原点における圧縮接線弾性係数である。一方、直接引張試験時に計測された弾性係数は、引張強度の9/10点での引張割線弾性係数(引張弾性係数)である。(図-7. 9、図-7. 10参照)

図-7. 11は1/3圧縮強度割線弾性係数と引張弾性係数の関係、図-7. 12は圧縮接線弾性係数と引張弾性係数の関係を示しているが、引張弾性係数と圧縮接線

弾性係数とはほぼ同等であるが、両者とも1/3圧縮強度割線弾性係数と比較して大きいことが分かる。これは、引張弾性係数と圧縮接線弾性係数を算出応力レベルが低く、応力～ひずみ関係が直線的であるのに対して、1/3圧縮強度割線弾性係数の応力レベルが大きく、応力～ひずみ関係は非線形になっている影響を受けていると考えられる。コンクリートの温度上昇時の圧縮応力レベルとひび割れ発生時の引張応力レベルを考えた場合、引張弾性係数あるいは圧縮接線弾性係数をコンクリートの弾性係数として評価する方が妥当であると考えられる。

③ 線膨張係数

表-7. 7は線膨張係数の試験結果である。明石海峡大橋主塔基礎における現場計測と異なり、温度上昇時と温度降下時の線膨張係数の差は小さい。これは、測定期間が短いことから自己収縮（反応収縮）の影響が小さかったためと考えられる。

表-7. 7 線膨張係数の試験結果

セメント メーカー	線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	昇降平均	昇温時	降温時
A 社	10.78	10.57	11.04
B 社	10.57	10.28	10.90
C 社	10.83	10.59	11.08
D 社	10.85	10.49	11.23
E 社	11.01	10.61	11.46
F 社	11.46	11.11	11.82
G 社	10.80	10.55	11.09
H 社	10.84	10.68	11.17
I 社	11.14	10.87	11.42

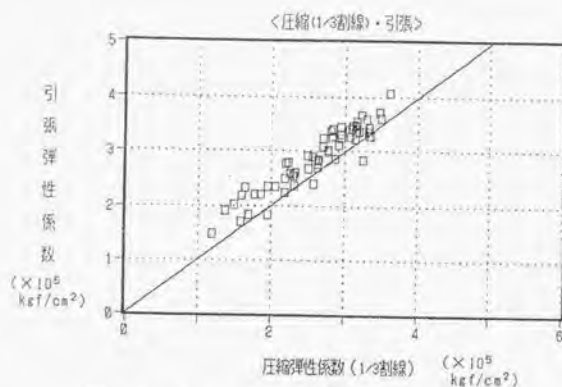


図-7. 1 1 1/3 圧縮強度割線弾性係数
と引張弾性係数の関係

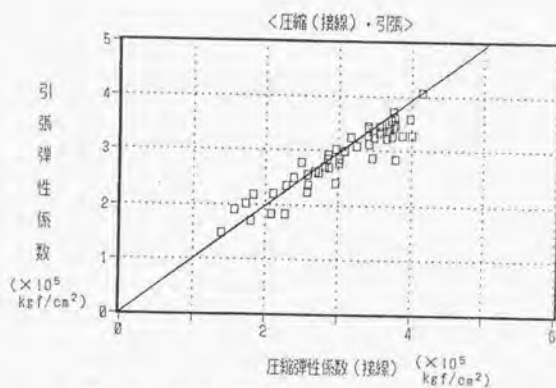
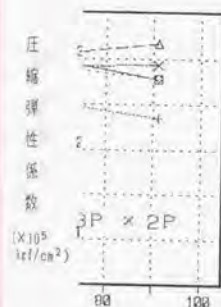


図-7. 1 2 圧縮接線弾性係数
と引張弾性係数の関係



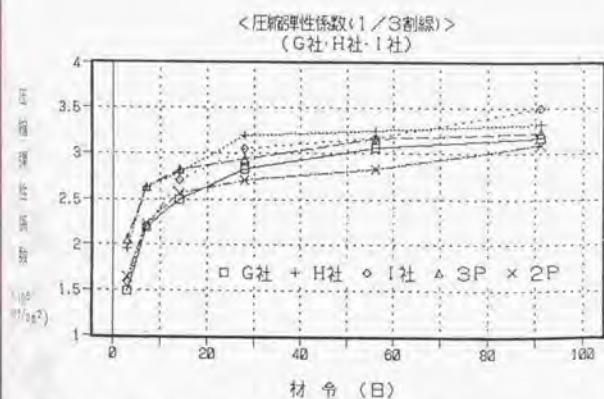
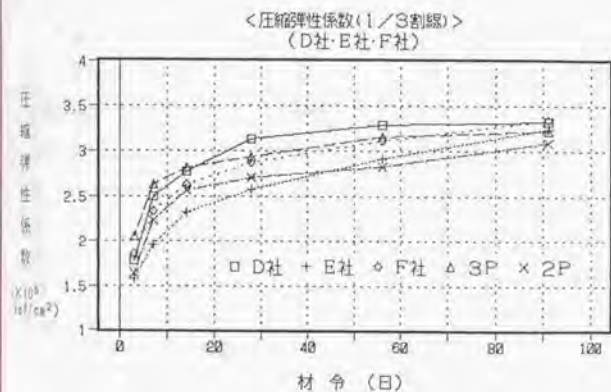
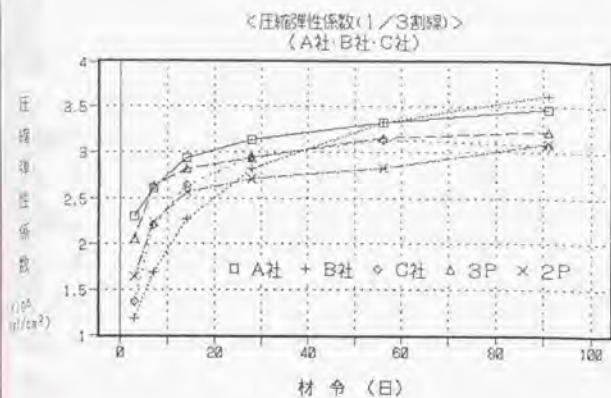


図-7. 9 圧縮弾性係数(1/3強度割線)試験結果

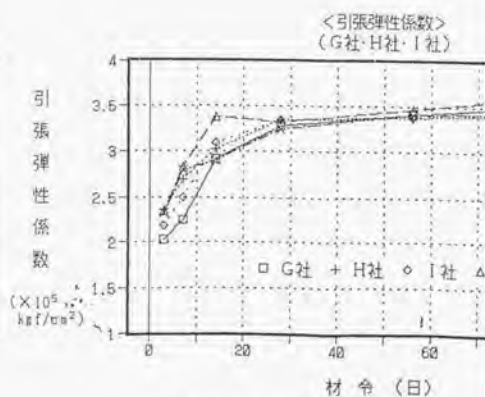
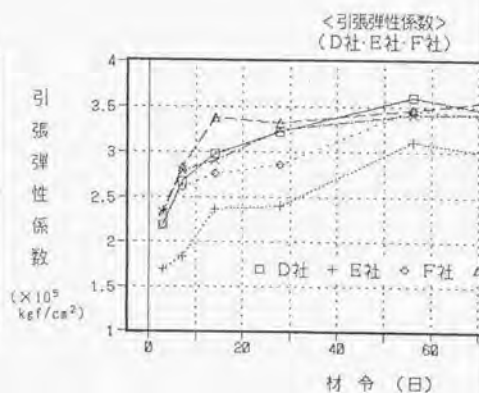
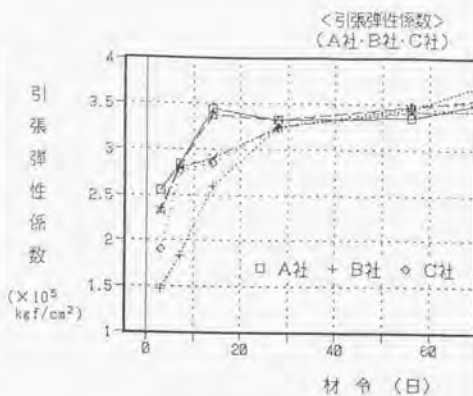
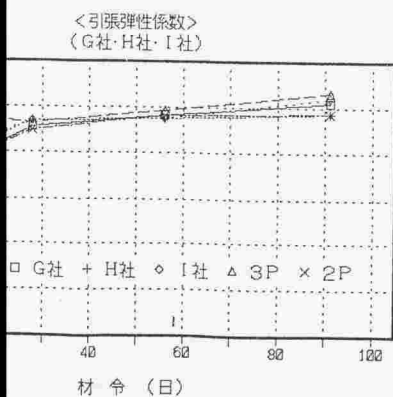
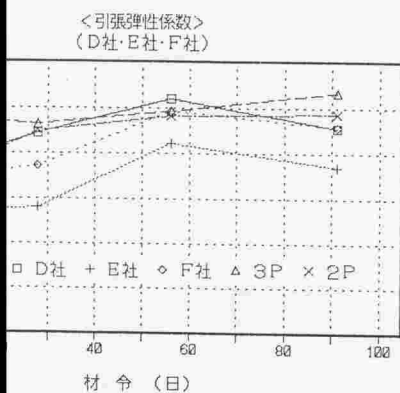
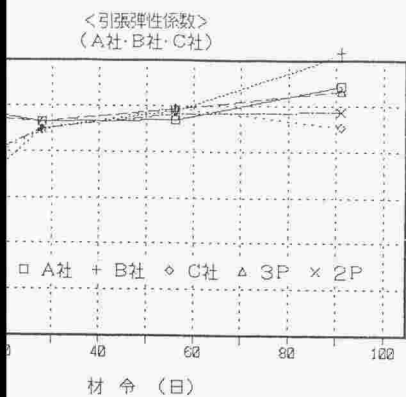


図-7. 10 引張弾性係数試験結果



10 引張弾性係数試験結果

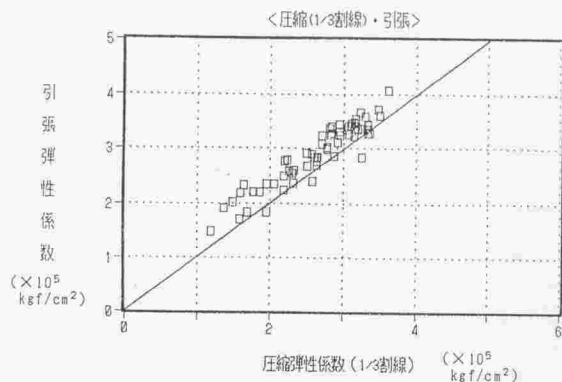


図-7. 11 1/3圧縮強度割線弾性係数
と引張弾性係数の関係

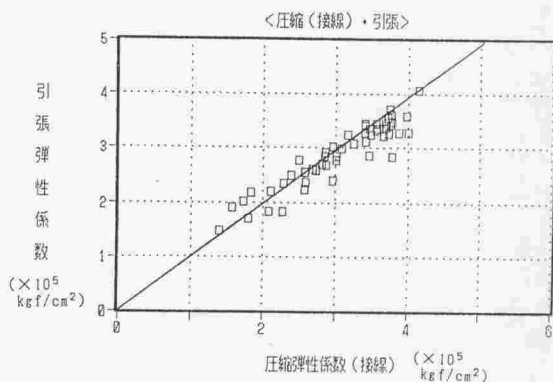


図-7. 12 圧縮接線弾性係数
と引張弾性係数の関係

④ クリープ係数

クリープ係数の測定結果は図-7. 13に示すとおりであり、図-7. 5に示した圧縮強度試験結果と合わせて比較すると、初期の強度発現が小さいコンクリートのクリープ係数は、概して大きいと言える。しかし、セメントの成分特性との明確な関係は確認されなかった。

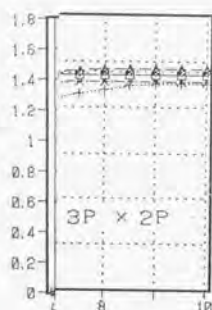
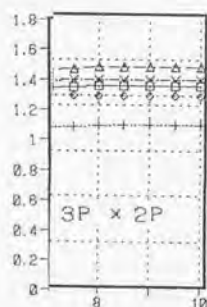
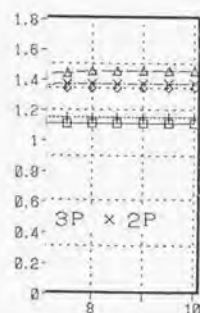
⑤ 断熱温度上昇特性

改良された低発熱型セメントによって差があるが、ほとんどの改良案で明石海峡大橋主塔基礎2P、3Pで採用された低発熱型セメントと比較して断熱温度上昇量Kは同等、温度上昇特性 α は小さくなっている。

図-7. 14に示す断熱温度上昇の時系列的履歴の計測結果から、低発熱型セメントの温度上昇はS字曲線を描くことが分かった。しかし、断熱温度上昇特性を表すため、従来から使用されている式-7. 1を用いた場合、材齢初期の低発熱型セメントの断熱温度上昇特性(S字曲線)が表現出来ないことから、計算値と実測値とで開きがあることが分かった。一方、式-7. 2を用いた場合はS字曲線の表現が可能であることから、計算値と実測値は良く一致しており、温度応力解析を行う場合には式-7. 2を採用することが望ましいと言える。

$$\text{コンクリート温度 } T = \{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (\text{式-7. 1})$$

$$\text{コンクリート温度 } T = \{1 - \exp(-\alpha t * \beta)\} \quad (\text{式-7. 2})$$

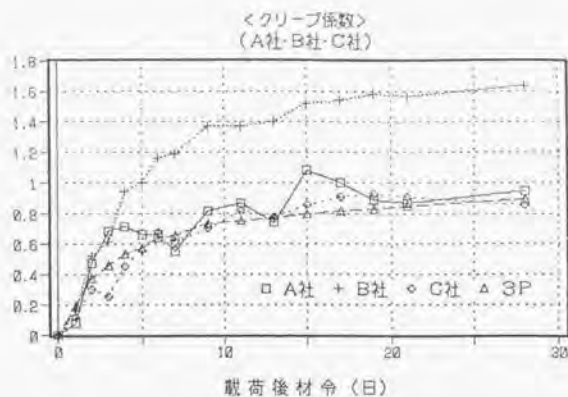
ク
リ
ー
プ
係
数ク
リ
ー
プ
係
数ク
リ
ー
プ
係
数< K、 α による断熱温度上昇解析結果 >

メイト	推定式 $T = K \{ 1 - \exp(-\alpha t) \}$			
メーカー	実験最大上昇(℃)	K(℃)	α	相関係数
A 社	23.6	24.0	0.828	0.980
B 社	22.6	22.1	0.477	0.987
C 社	23.9	24.4	0.508	0.995
D 社	22.1	22.2	0.843	0.995
E 社	17.8	18.0	0.573	0.985
F 社	21.0	21.5	0.521	0.989
G 社	18.5	18.9	0.539	0.990
H 社	19.1	19.5	0.702	0.978
I 社	22.4	23.0	0.578	0.988
3 P	24.2	24.3	0.728	0.989
2 P	22.8	22.9	0.669	0.989

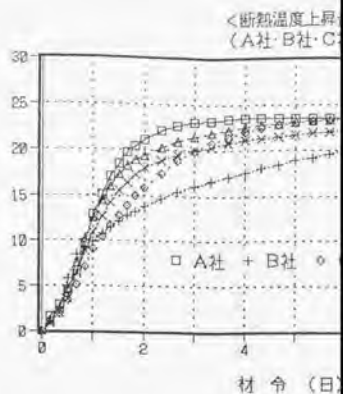
< K、 α 、 β による断熱温度上昇解析結果 >

メイト	推定式 $T = K \{ 1 - \exp(-\alpha t^\beta) \}$				
メーカー	実験最大上昇(℃)	K(℃)	α	β	相関係数
A 社	23.6	23.6	0.750	1.69	0.999
B 社	22.6	23.5	0.507	0.76	0.995
C 社	23.9	23.9	0.447	1.28	0.999
D 社	22.1	21.9	0.813	1.19	0.998
E 社	17.8	17.5	0.486	1.54	0.996
F 社	21.0	20.9	0.425	1.46	0.999
G 社	18.5	18.6	0.555	1.42	0.999
H 社	19.1	19.1	0.577	1.79	0.999
I 社	22.4	22.4	0.474	1.49	0.999
3 P	24.2	23.8	0.700	1.32	0.995
2 P	22.8	22.4	0.631	1.33	0.995

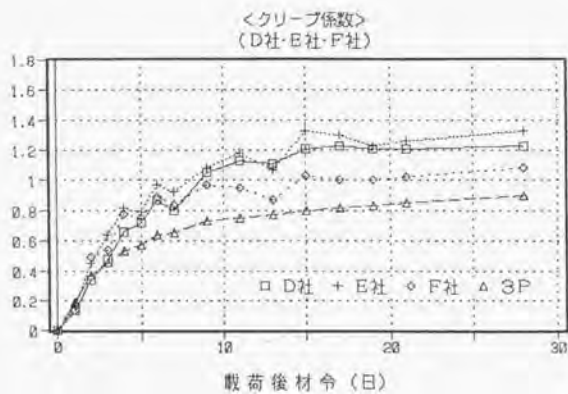
クリープ係数



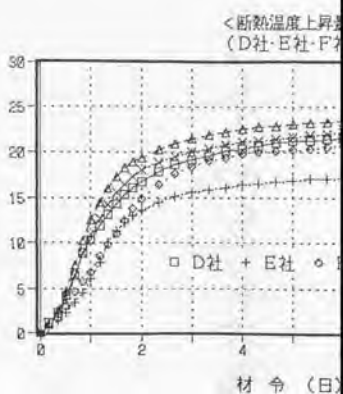
断熱温度上昇量
℃



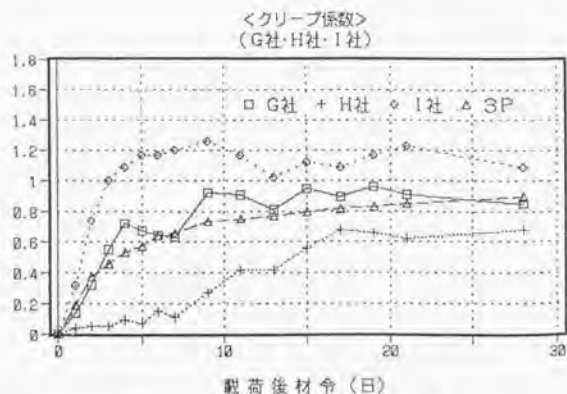
クリープ係数



断熱温度上昇量
℃



クリープ係数



断熱温度上昇量
℃

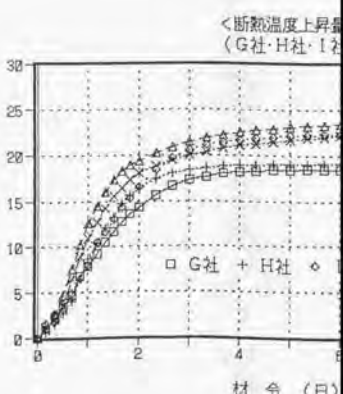
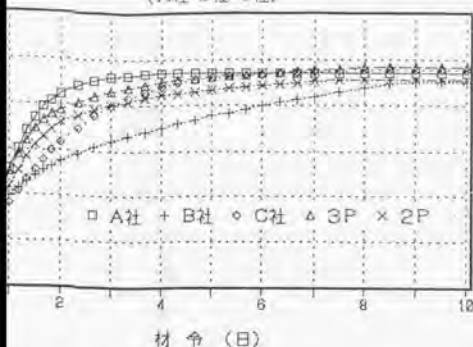
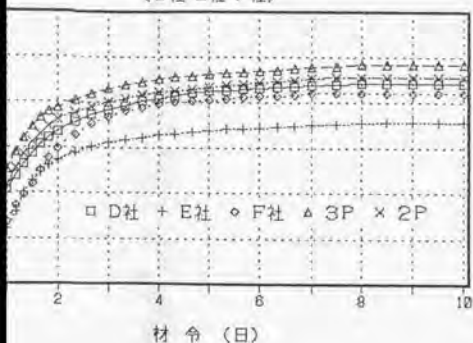


図-7. 13 クリープ試験結果

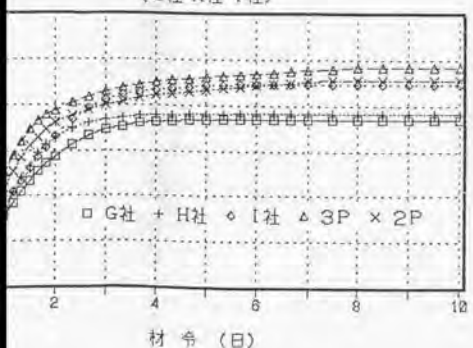
<断熱温度上昇量>
(A社・B社・C社)



<断熱温度上昇量>
(D社・E社・F社)



<断熱温度上昇量>
(G社・H社・I社)



<K、αによる断熱温度上昇解析結果>

社名 ノカ	推定式 $T = K \{ 1 - \exp(-\alpha t) \}$			
	実験値大上昇量(℃)	K(℃)	α	相関係数
A 社	23.6	24.0	0.828	0.980
B 社	22.6	22.1	0.477	0.987
C 社	23.9	24.4	0.508	0.995
D 社	22.1	22.2	0.643	0.985
E 社	17.8	18.0	0.573	0.965
F 社	21.0	21.5	0.521	0.989
G 社	18.5	18.9	0.639	0.990
H 社	19.1	19.5	0.702	0.978
I 社	22.4	23.0	0.578	0.988
3 P	24.2	24.3	0.728	0.989
2 P	22.8	22.9	0.669	0.989

<K、α、βによる断熱温度上昇解析結果>

社名 ノカ	推定式 $T = K \{ 1 - \exp(-\alpha t^\beta) \}$				
	実験値大上昇量(℃)	K(℃)	α	β	相関係数
A 社	23.6	23.6	0.750	1.69	0.999
B 社	22.6	23.5	0.507	0.76	0.995
C 社	23.9	23.9	0.447	1.28	0.999
D 社	22.1	21.9	0.613	1.19	0.998
E 社	17.8	17.5	0.486	1.54	0.996
F 社	21.0	20.9	0.425	1.46	0.999
G 社	18.5	18.6	0.555	1.42	0.999
H 社	19.1	19.1	0.577	1.79	0.999
I 社	22.4	22.4	0.474	1.49	0.999
3 P	24.2	23.8	0.700	1.32	0.995
2 P	22.8	22.4	0.631	1.33	0.995

図-7, 14 断熱温度上昇試験結果

7. 3 自己収縮試験結果とその評価

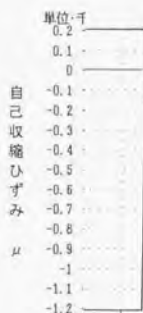
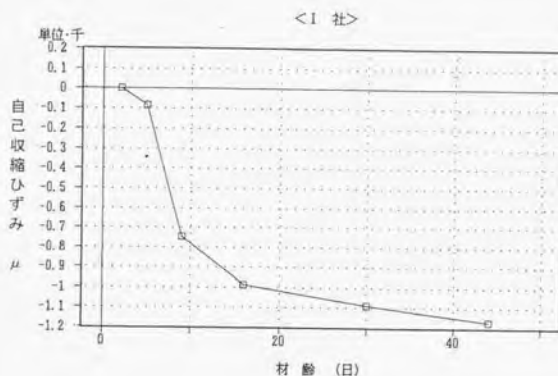
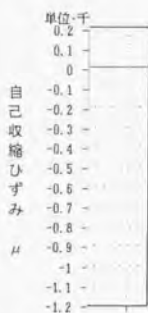
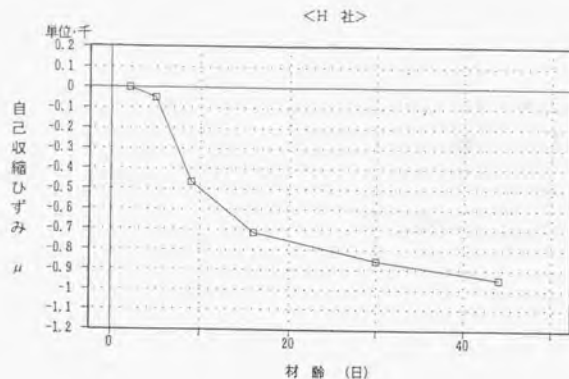
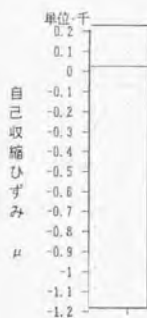
7. 3. 1 セメントペースト

表-7. 8はセメントペーストの自己収縮（反応収縮）試験の測定結果である。コンクリートの自己収縮（反応収縮）と考えられるひずみ量は、現場計測および室内試験の結果からは数10～百数10マイクロであることが分かっているが、セメントペーストでは、ひずみレベルが約10倍程度大きいことが分かる。また、セメントによって自己収縮（反応収縮）量が大きく異なることも分かる。成分特性との関係についての分析は、第8章で説明する。

セメントメーカー (記号)	硬化収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)					
	材齢 2 日	材齢 5 日	材齢 9 日	材齢 16 日	材齢 30 日	材齢 44 日
A 社(新)	0	-45	-453	-677	-820	-923
B 社	0	-17	-60	-112	-213	-282
C 社	0	+20	+53	-18	-95	-208
D 社	0	-5	-23	-112	-287	-425
F 社	0	-13	-212	-423	-543	-627
G 社	0	-157	-658	-905	-1065	-1173
H 社	0	-48	-465	-715	-855	-948
I 社	0	-85	-747	-988	-1088	-1172

注) マイナスが収縮を示す。

表-7. 8 セメントペーストの自己収縮試験結果 (W/C=30%、養生温度=25℃)



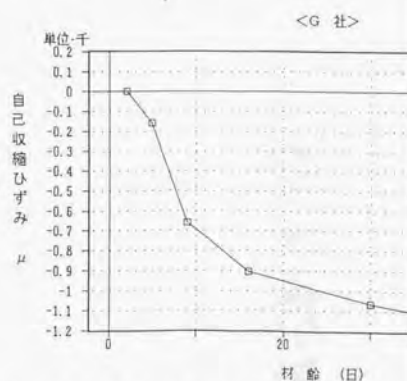
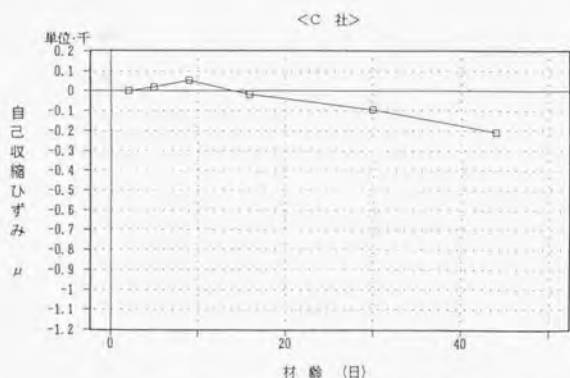
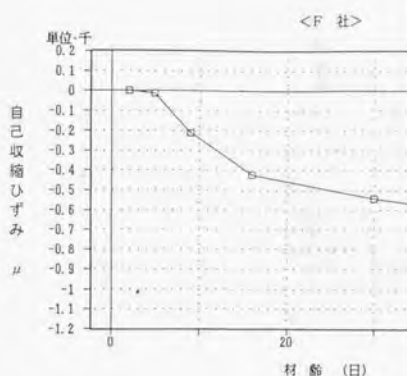
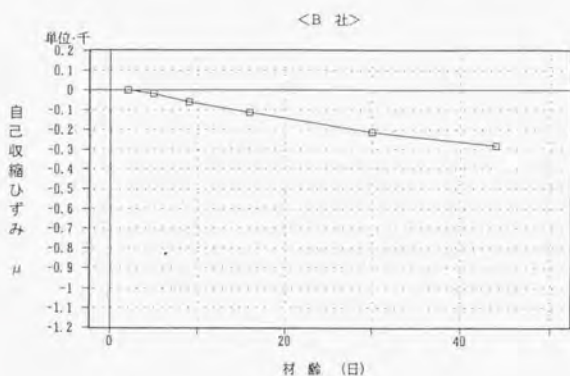
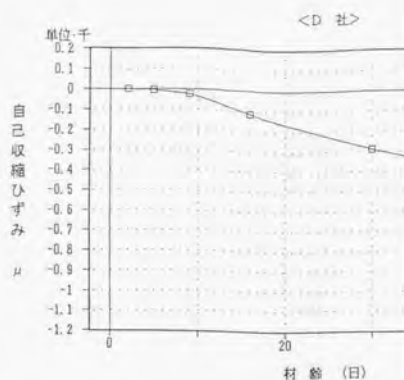
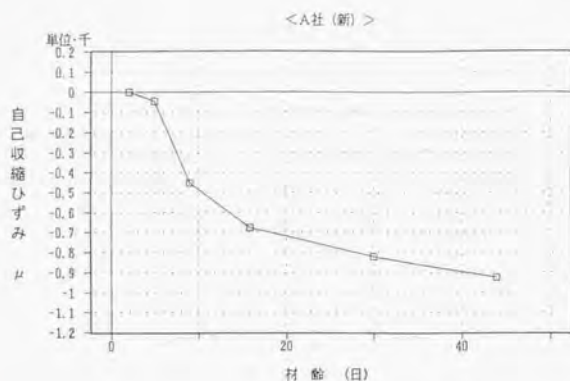
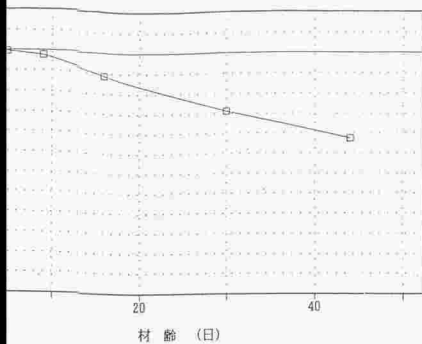
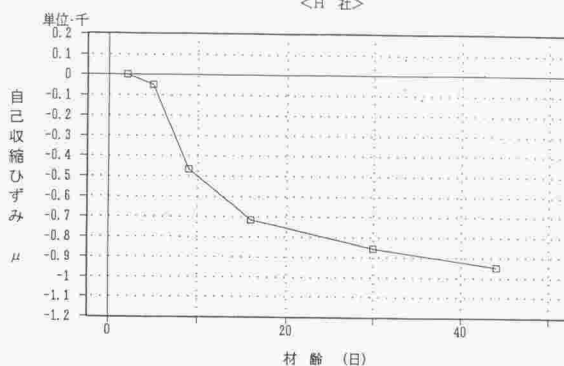


図-7. 15 セメントペーストの自己収縮試験結果 (W/C=30%、養生温度=25℃)

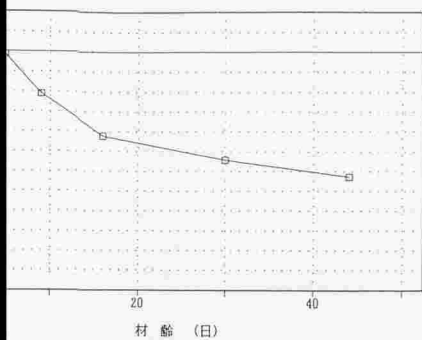
<D 社>



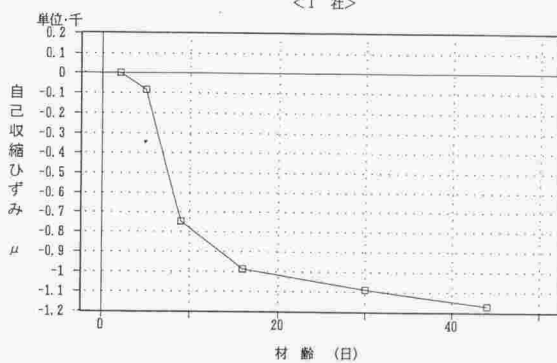
<H 社>



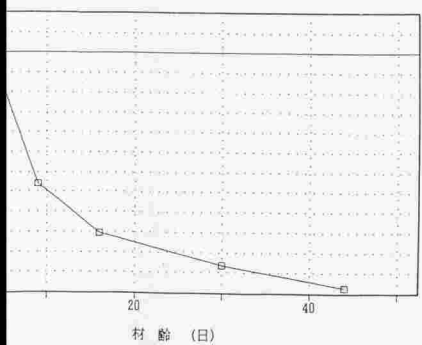
<F 社>



<I 社>



<G 社>



=30%、養生温度=25℃

7. 3. 2 コンクリート

コンクリートの自己収縮（反応収縮）量の測定結果を表-7. 9に示す。養生温度が高い程積算温度換算が大きく、自己収縮量（反応収縮量）が大きいと予測されたが、セメントペーストの場合と比較してひずみレベルが小さく、測定精度を確保することが困難であったことも考えられる他、試験中に養生水槽中で浸水した供試体もあり、個々のデータからは確認されなかった。

セメントメーカー (記号)	養生	硬化収縮ひずみ (×10 ⁻⁴)						備 考
	温度 (℃)	材 齢 2 日	材 齢 5 日	材 齢 9 日	材 齢 16 日	材 齢 30 日		
A 社(新)	10	0	+21	+48	+68	-22		
	25	0	+80	+94	+69	-17	供試体 1 本浸水(30日)	
	40	0	+22	+51	+64	-5		
B 社	10	0	+5	+23	+32	-32	供試体 1 本浸水(30日)	
	25	0	+7	-2	-21	-24		
	40	0	+4	+67	+40	-39		
C 社	10	0	+45	+113	+55	+30	供試体 1 本浸水(5日)	
	25	0	+1	+24	-40	0	供試体 1 本浸水(16日)	
	40	0	+18	+20	-74	-65		
D 社	10	0	-20	-14	-29	-58		
	25	0	-3	-24	-27	-28	供試体 1 本浸水(30日)	
	40	0	+3	-35	-65	-107		
F 社	10	0	+3	+33	-68	-50		
	25	0	-8	+2	-12	-22		
	40	0	+13	+23	-40	-17	供試体 1 本浸水(5日)	
G 社	10	0	+9	-15	-15	-33		
	25	0	-16	+31	-17	-28		
	40	0	+1	-33	-55	-82		
H 社	10	0	0	+4	-22	0	供試体 1 本浸水(16日)	
	25	0	+9	+33	+27	0		
	40	0	+7	-2	-29	-55		
I 社	10	0	+13	-8	-18	-2	供試体 1 本浸水(30日)	
	25	0	+42	+16	+2	+7		
	40	0	-6	-22	-56	-68		

表-7. 9 コンクリートの自己収縮試験結果

図-7. 16には、8社平均の自己収縮量の経時変化を養生温度毎を示した。前述したとおりの計測上の疑問点はあるが、平均値から言えることは、養生温度10℃、25℃と比較して、養生温度40℃の自己収縮量が多いことが分かる。このことはコンクリートの自己収縮は温度履歴依存性があることを示唆している。この現象を温度応力解析に応用するには、自己収縮の積算温度換算による導入も考えられる。

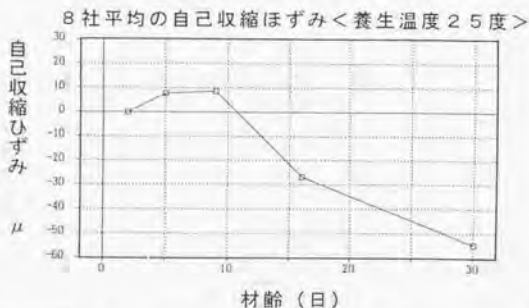
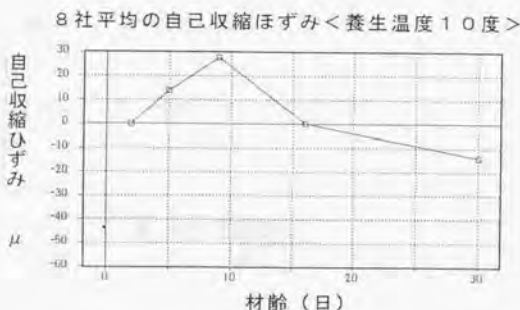
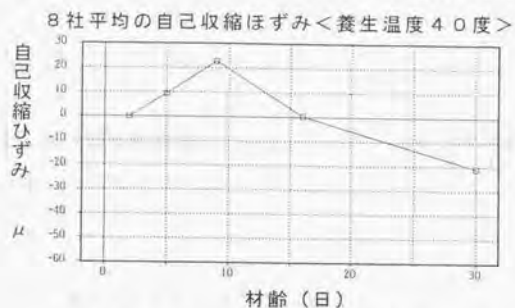


図-7. 16 養生温度毎のコンクリートの自己収縮試験結果

8 低発熱型コンクリートの耐ひび割れ特性の要因分析

8. 1 物理試験結果の温度応力解析による評価

コンクリートの耐ひび割れ性は、温度上昇特性、強度発現等を総合的に評価する必要がある。ここでは、温度応力解析により改良型（案）の低発熱型セメントを用いたコンクリートの耐ひび割れ特性を評価した。温度応力解析方法は、明石海峡大橋で適用した従来の解析方法および、第5章で示した改良案の2とおりとした。

（1）解析条件

解析条件は、明石海峡大橋主塔基礎の気中コンクリートの打設条件を想定し、実測結果に基づき物理定数等を決定した。

①解析モデル

図-8. 1に示すとおり、高さ1.5mのリフトを2週間毎に3リフト打設する。水平方向は断熱境界とし、鉛直下面には厚さ15.75m（上面は初期温度30℃の変温境界、下面は40℃の等温境界）のコンクリートを想定する。

②コンクリートの材料定数

解析に使用した材料定数は明石海峡大橋主塔基礎における計測結果に基づき表-8. 1に示すとおりとし、各コンクリートで共通とした。

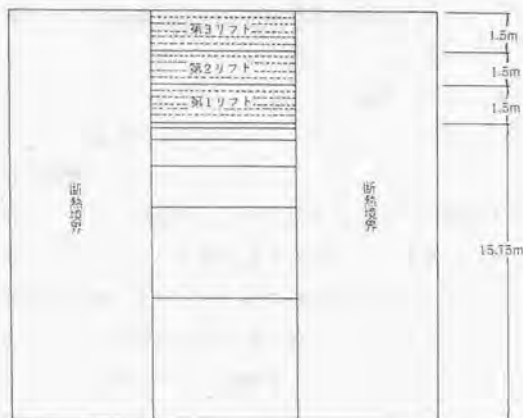


図-8. 1 温度応力解析モデル

表-8. 1 コンクリートの材料定数

比 熱 (kcal/kg・°C)	熱 伝 導 率 (kcal/m・hr・°C)	単位体積重量 (kg/m³)
0.270	2.30	2350

表-8. 2 外気温 (月平均)

5月	6月	7月
20°C	24°C	26°C

③外気温および打設温度

外気温は表-8. 2に示すとおり、明石海峡大橋主塔基礎で1991年5月～7月に観測された結果を採用した。また、コンクリートの打設温度は19°Cとした。

④境界条件

打設したコンクリート表面の熱伝達率は $10.0 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ とした。

⑤解析手法

温度応力解析は第5章において提案した解析方法および従来の解析方法の2通りで実施した。以下にその解析方法を示す。

<case 1 (従来解析方法)>

- 1) 弾性係数、クリープ係数および引張強度は同材齢の20°C標準養生供試体の試験結果を採用する。
- 2) 弾性係数は1/3圧縮強度割線弾性係数を採用する。
- 3) 弾性係数、クリープ係数は第5章・図-5. 9 (従来の考え方) に示すとおり、コンクリート打設直後から試験結果を直線近似した値を有し、温度上昇直後から応力が発生すると考える。

<case 2 (提案解析方法)>

- 1) 弾性係数、クリープ係数および引張強度は、20°C標準養生供試体の試験結果を温度応力解析における積算温度に合わせて換算した値を採用する。
- 2) 弾性係数は引張弾性係数 (= 圧縮割線弾性係数) を採用する。
- 3) 弾性係数、クリープ係数は第5章・図-5. 9 (今回の提案) に示すとおり、コンクリートを打設してから凝結完了する迄は、現場計測結果と同様に、応力が発生しないとして、凝結完了後時点迄はゼロとし、以降は積算温度換算した値を直線近似した値を採用した。

ここで、case 1、case 2で共通しているのは、断熱温度上昇特性であり、断熱温度上昇試験の実測データをそのまま使用している。また、凝結完了時間は便宜的に24時間とした。

(2) 改良結果の評価

改良型の低発熱型セメントを用いたコンクリートの温度応力解析結果を以下に示す。

1) 熱伝導解析結果 (第1リフト) : 表-8. 3

2) 温度応力解析結果 (第1リフト) : 表-8. 4

3) 最小ひび割れ指数 (第1リフト) : 表-8. 5

4) 温度解析および応力解析の結果

A、B、C社 : 図-8. 2 (a) 参照

D、E、F社 : 図-8. 2 (b) 参照

G、H、I社 : 図-8. 2 (c) 参照

2P、3P : 図-8. 2 (d) 参照

解析結果の評価は、明石海峡大橋主塔基礎2P、3Pで使用されたコンクリートとの比較において実施した。ここで、ひび割れ指数を算定する際に採用した引張強度は割裂引張強度および直接引張強度の2種類とした。

図-8. 2の温度応力解析結果で共通しているのは、発生応力(引張)が解析case 2(提案解析方法)の方が大きいことである。これは、case 1(従来解析方法)ではコンクリート打設後に本来発生しない圧縮応力を期待していたこと、case 2で採用している弾性係数が積算温度換算された有効材齢で評価されていることが原因であり、概ねcase 2による解析結果では、ひび割れ指数が小さくなっている。

表-8. 3は温度解析結果であるが、平均して改良型の低発熱型セメントを用いたコンクリートの第1リフトが最高温度に達してから第2リフトを打設する迄の温度降下量が、明石海峡大橋主塔基礎2P、3Pで使用された低発熱型セメントを用いたコンクリートよりも小さいことが分かる。表-8. 4は引張応力のピーク値を示しているが、総じて初期強度発現(引張強度、圧縮強度)の早いコンクリートほど値が大きい。よって、表-8. 5に示すとおり、ひび割れ指数も初期強度発現の大きいコンクリートほど小さくなっている。この傾向はひび割れ指数を直接引張強度で評価した場合に顕著であり、強度発現が早いコンクリートほど、割裂引張強度と直接引張強度の比が大きいことも意味している。

表-8. 3 熱伝導解析結果 (第1リフト)

セメントメーカー	A 社	B 社	C 社	D 社	E 社	F 社	G 社	H 社	I 社	3 P	2 P
ピーク温度 (°C)	37.9	31.7	35.4	34.4	32.1	34.2	33.0	34.5	35.7	36.3	35.3
ピーク発生時間 (hr)	51.0	73.0	76.0	59.0	60.0	68.0	65.0	55.0	66.0	52.0	53.0
次の打設までの 温度低下量 (°C)	12.1	5.4	9.4	8.7	7.0	8.8	8.3	9.2	10.0	10.2	9.4

表-8. 4 温度応力解析結果 (第1リフト)

セメントメーカー		A 社	B 社	C 社	D 社	E 社	F 社	G 社	H 社	I 社	3 P	2 P
ピーク 引張応力 (kgf/cm ²)	Case 1	18.2	6.9	12.3	13.1	7.0	10.0	10.2	12.9	11.8	16.8	13.1
	Case 2	26.5	13.4	19.2	20.6	12.3	15.6	15.7	18.9	20.1	26.6	20.7

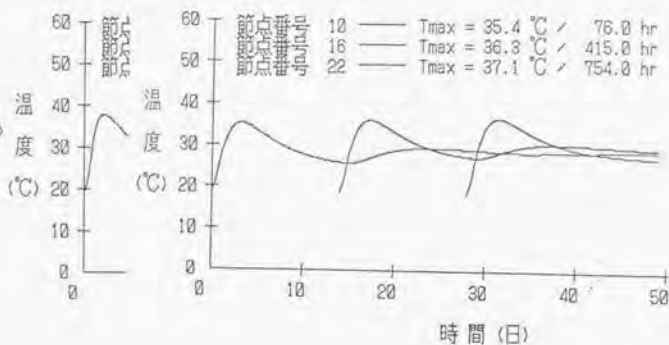
表-8. 5 最小ひび割れ指数 (第1リフト)

セメントメーカー			A 社	B 社	C 社	D 社	E 社	F 社	G 社	H 社	I 社	3 P	2 P
最 小 ひびわれ 指 数	Case1	割裂	1.36	1.68	1.36	1.52	2.24	1.74	1.67	1.57	1.75	1.54	1.68
		直接	0.84	1.69	1.48	1.37	1.73	1.49	1.31	1.14	1.24	0.79	0.93
	Case2	割裂	1.04	1.55	1.05	1.05	1.40	1.27	1.24	1.24	1.19	1.08	1.15
		直接	0.59	1.01	0.99	0.91	1.14	1.09	1.05	1.00	0.76	0.56	0.69

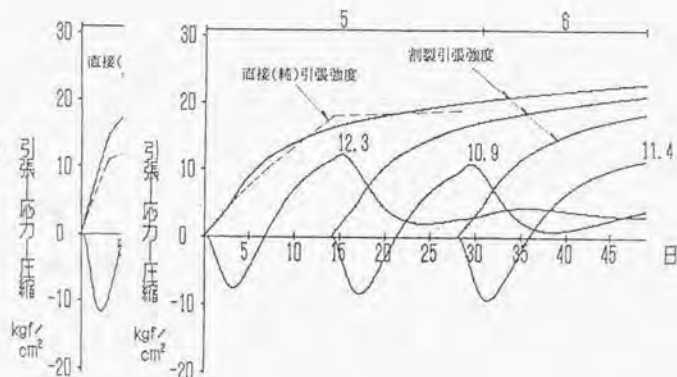
注) 2P、3Pの温度応力解析は、同一条件での線膨張係数のデータがない。
 しかし、9種類のセメントに対する試験結果から、線膨張係数にはセメント
 の影響は少ないと考えられるので、ここではその試験結果の値を参考として、
 2P、3Pとも $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を使用して解析を行った。

< C 社 >

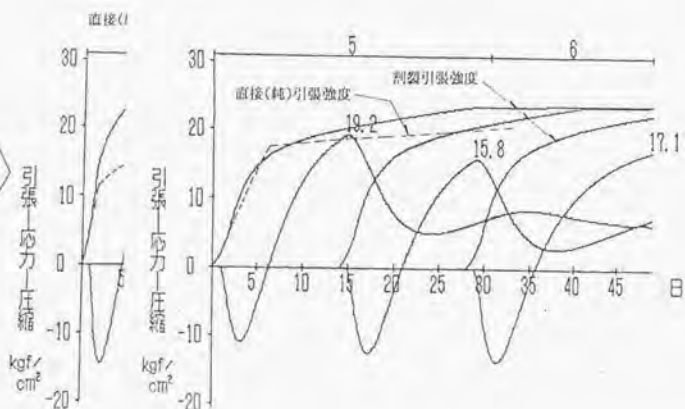
△温度履歴▽



△Case 1 応力履歴▽



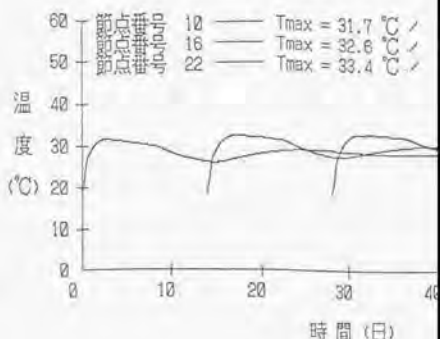
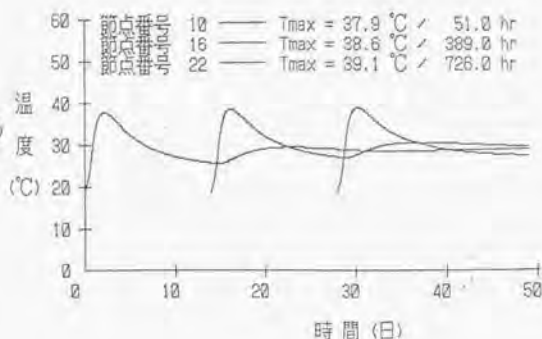
△Case 2 応力履歴▽



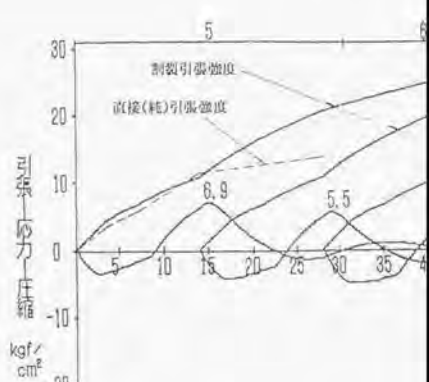
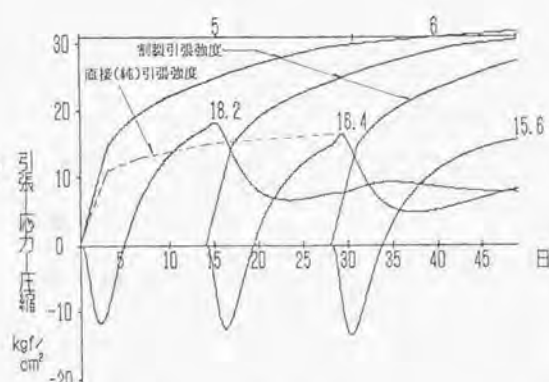
< A 社 >

< B 社 >

温度履歴



Case 1 応力履歴



Case 2 応力履歴

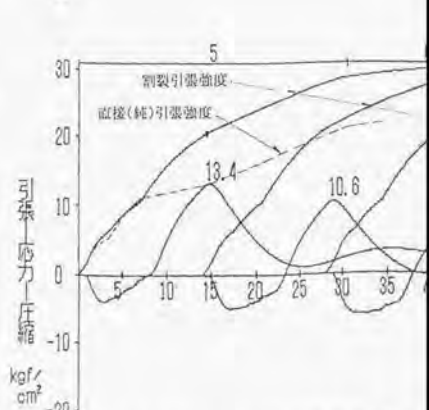
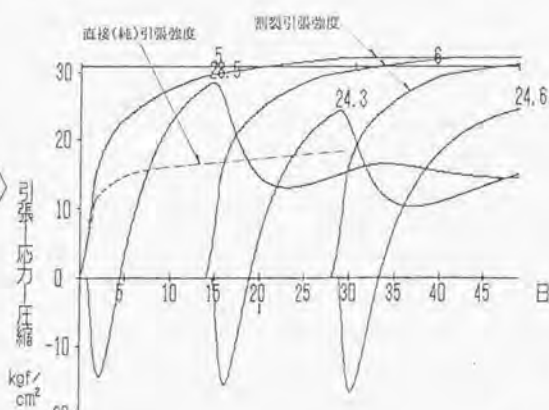


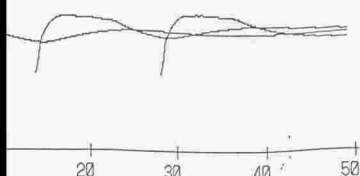
図-8. 2 (a) 温度解析および応力解析の結果

< B 社 >

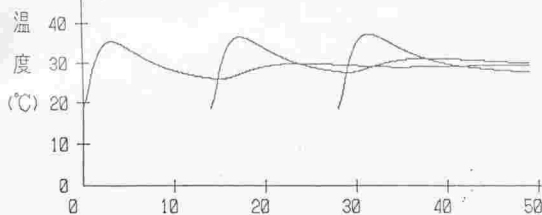
< C 社 >

10 — $T_{max} = 31.7^{\circ}\text{C}$ / 73.0 hr
 16 — $T_{max} = 32.6^{\circ}\text{C}$ / 412.0 hr
 22 — $T_{max} = 33.4^{\circ}\text{C}$ / 787.0 hr

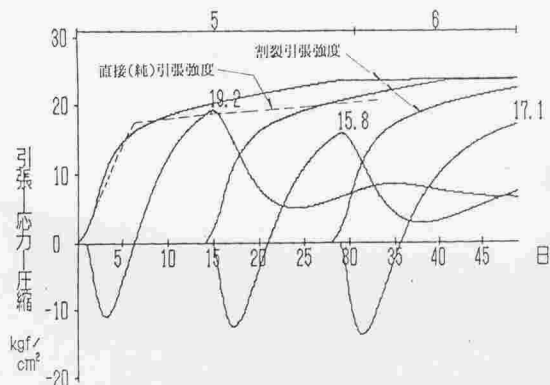
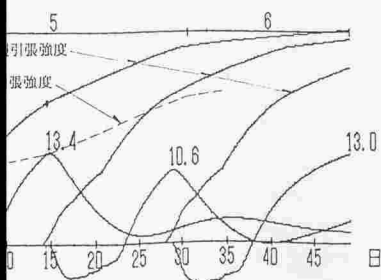
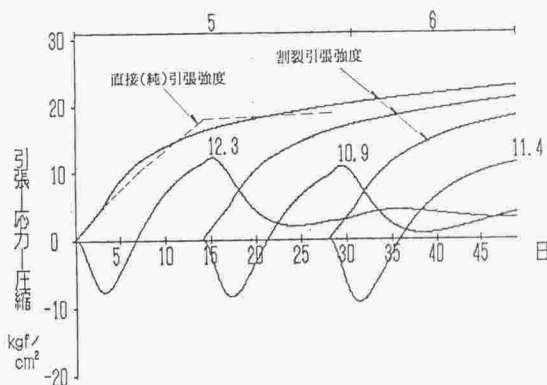
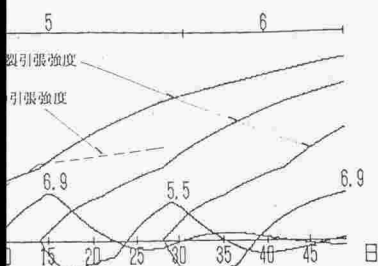
10 — $T_{max} = 35.4^{\circ}\text{C}$ / 76.0 hr
 16 — $T_{max} = 36.3^{\circ}\text{C}$ / 415.0 hr
 22 — $T_{max} = 37.1^{\circ}\text{C}$ / 754.0 hr



時間 (日)



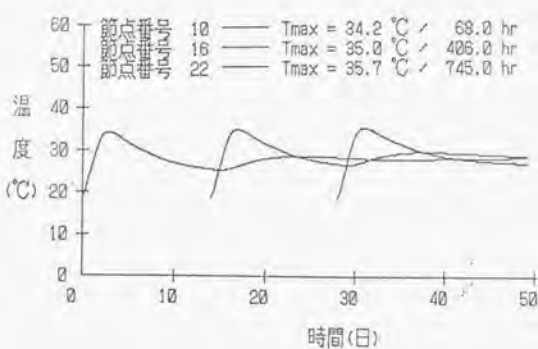
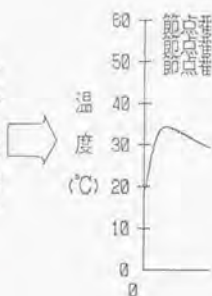
時間 (日)



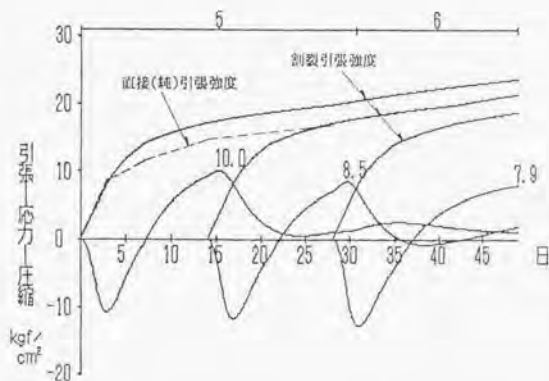
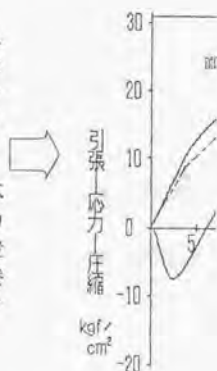
解析および応力解析の結果 (A、B、C 社)

< F 社 >

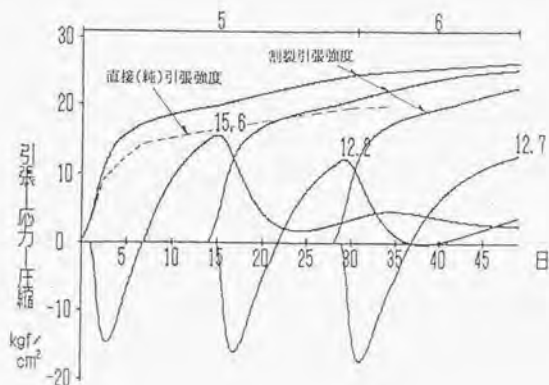
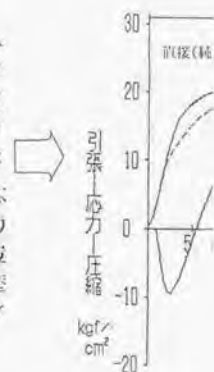
温度履歴



Case 1 応力履歴

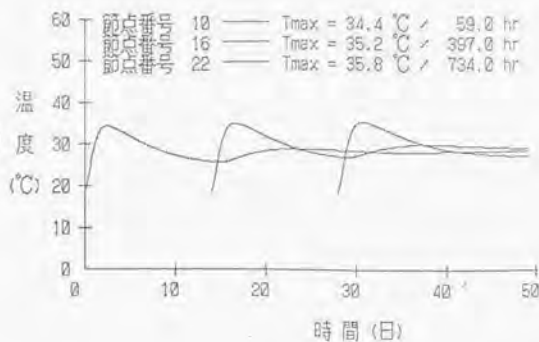


Case 2 応力履歴

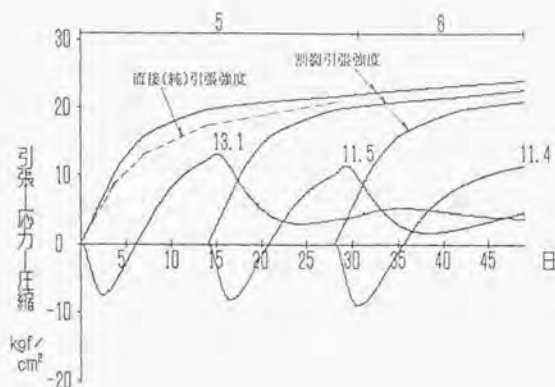


< D 社 >

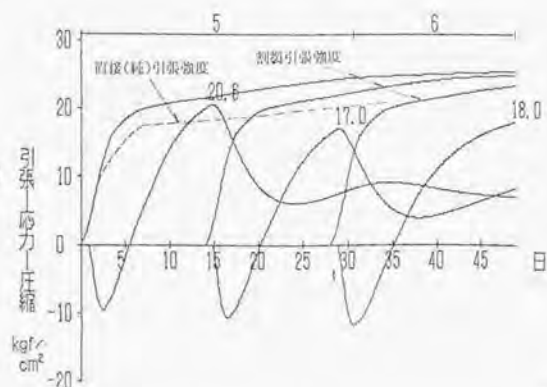
温度履歴



Case 1 応力履歴



Case 2 応力履歴



< E 社 >

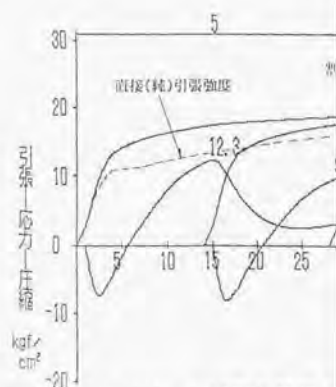
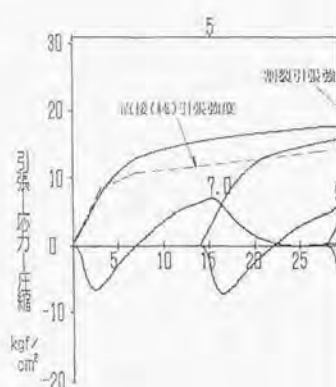
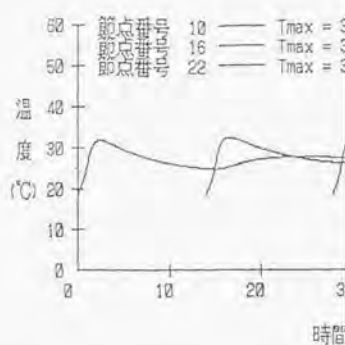
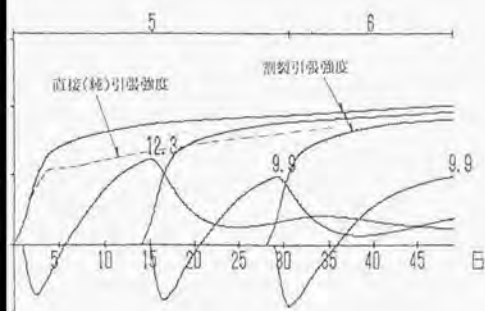
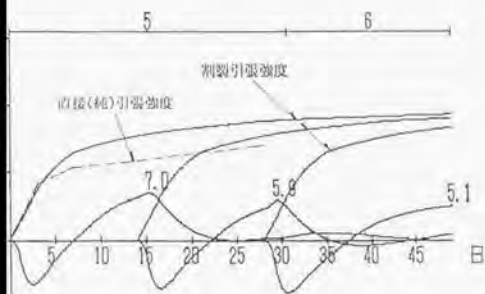
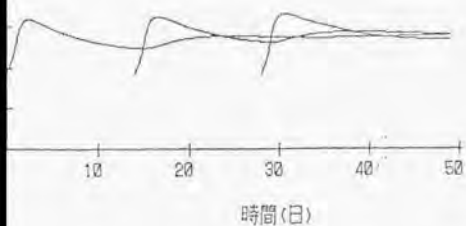


図-8.2 (b) 温度解析および応力解析の

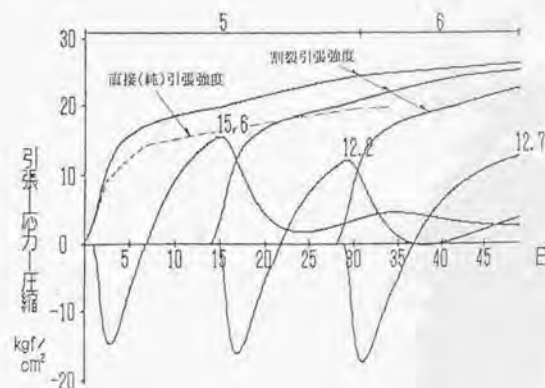
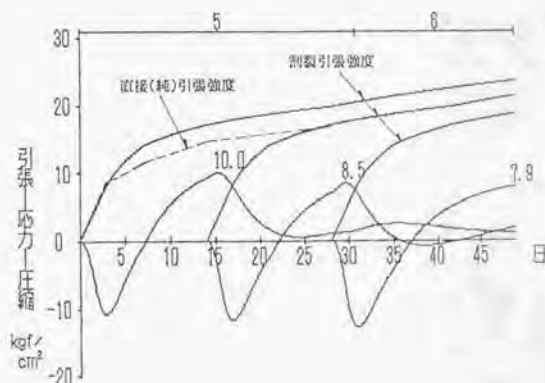
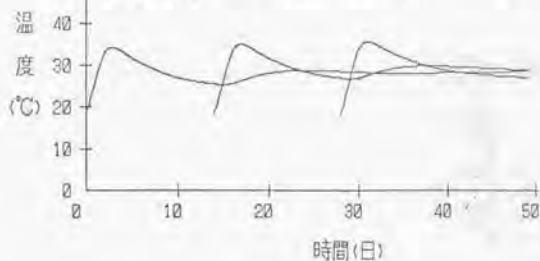
< E 社 >

10 — Tmax = 32.1 °C / 60.0 hr
 16 — Tmax = 32.7 °C / 398.0 hr
 22 — Tmax = 33.3 °C / 734.0 hr



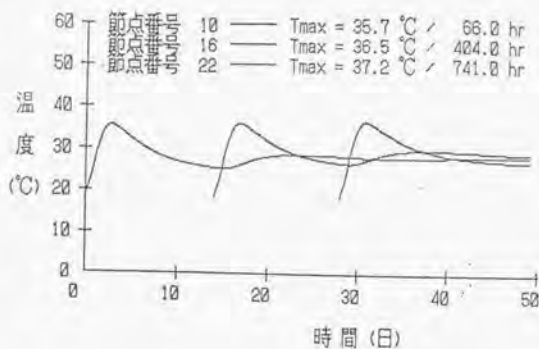
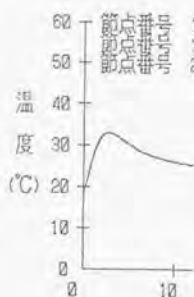
< F 社 >

10 — Tmax = 34.2 °C / 68.0 hr
 16 — Tmax = 35.0 °C / 406.0 hr
 22 — Tmax = 35.7 °C / 745.0 hr

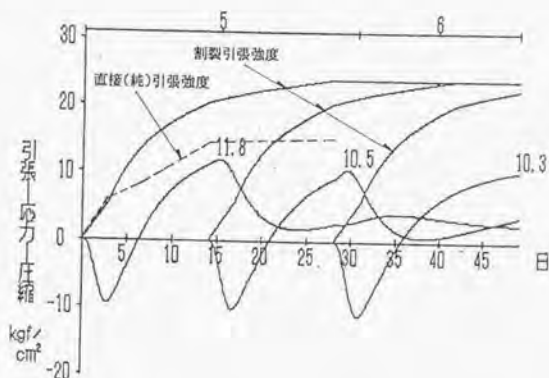
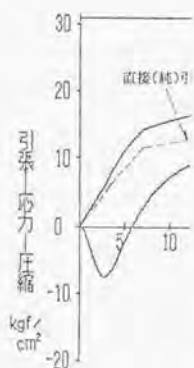


温度解析および応力解析の結果 (D、E、F 社)

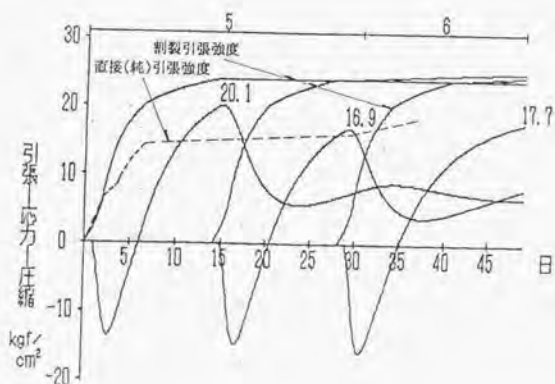
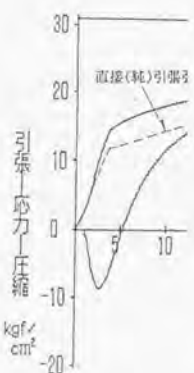
温度履歴



Case 1 応力履歴



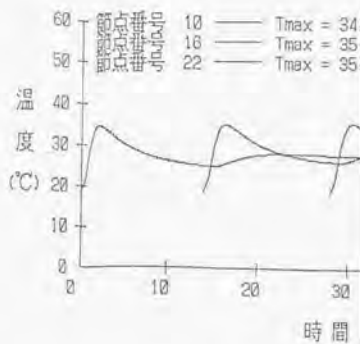
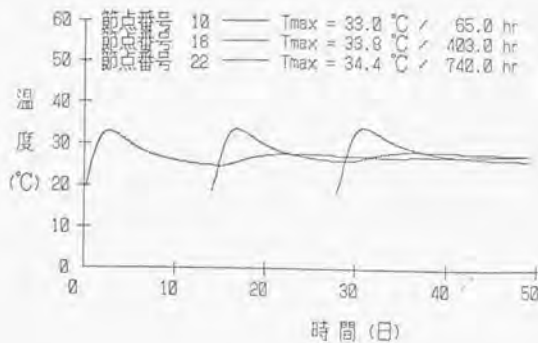
Case 2 応力履歴



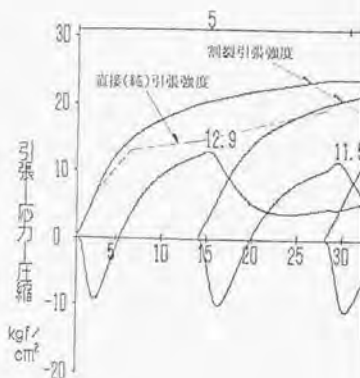
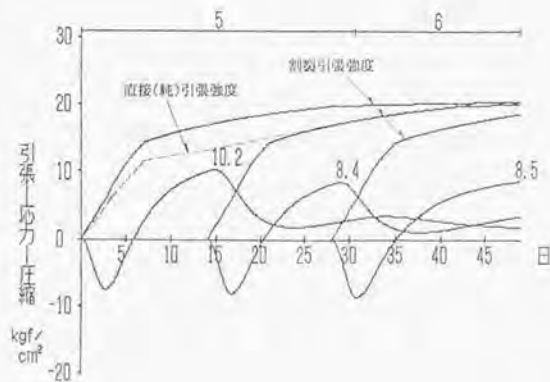
< G 社 >

< H 社 >

温度履歴
→



Case 1
→
応力履歴



Case 2
→
応力履歴

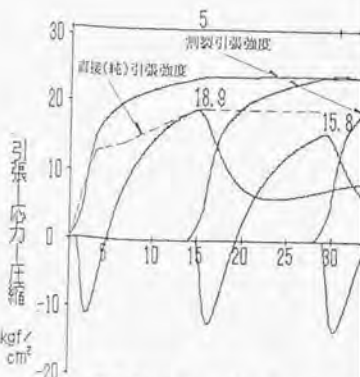
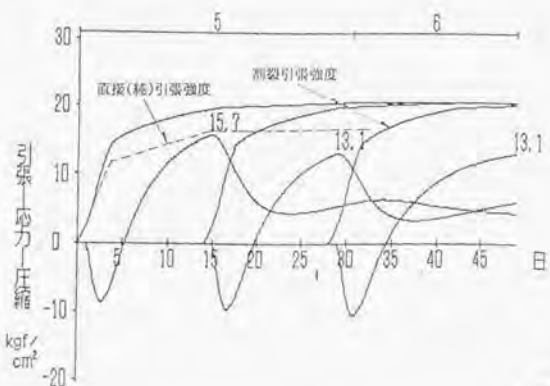
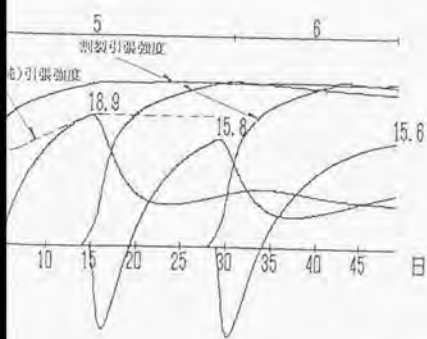
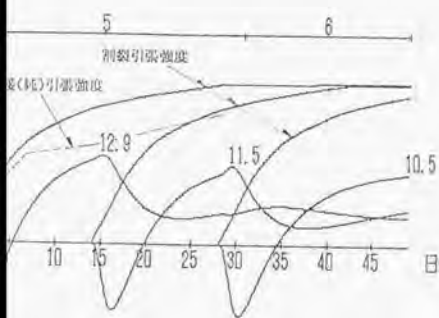
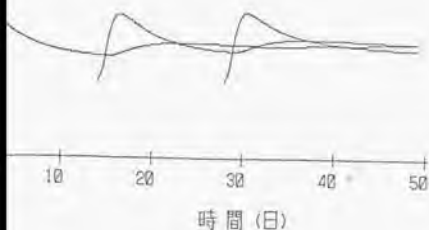


図-8. 2 (c) 温度解析および応力解析の結果

< H 社 >

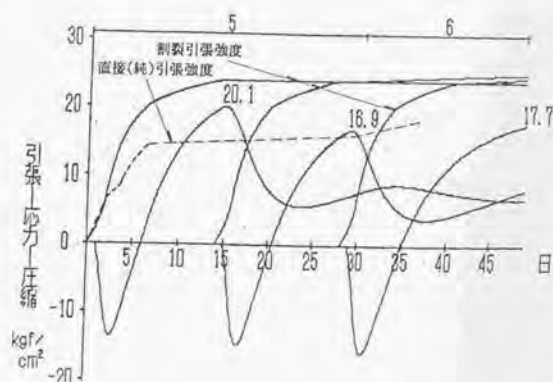
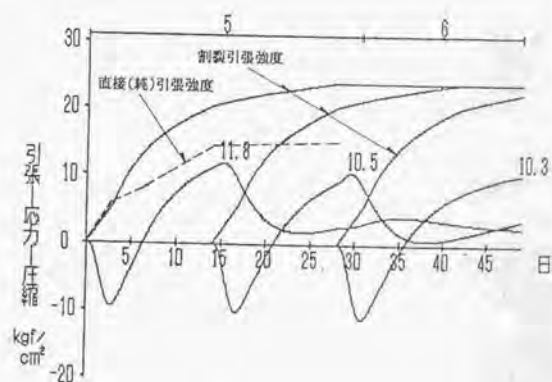
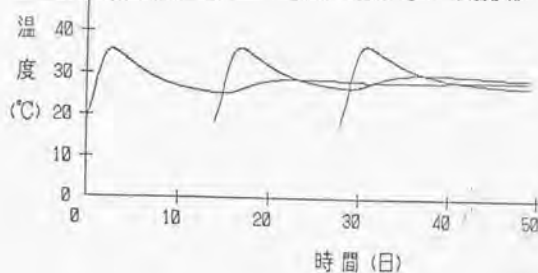
節点番号 10 — $T_{max} = 34.5^{\circ}\text{C}$ / 55.0 hr
 節点番号 16 — $T_{max} = 35.1^{\circ}\text{C}$ / 392.0 hr
 節点番号 22 — $T_{max} = 35.7^{\circ}\text{C}$ / 731.0 hr



変解析および応力解析の結果 (G、H、I 社)

< I 社 >

節点番号 10 — $T_{max} = 35.7^{\circ}\text{C}$ / 66.0 hr
 節点番号 16 — $T_{max} = 36.5^{\circ}\text{C}$ / 404.0 hr
 節点番号 22 — $T_{max} = 37.2^{\circ}\text{C}$ / 741.0 hr



△ 温度履歴 ▽



1 hr
1 hr
1 hr
温度
度
(°C)
50

△ Case 1 応力履歴 ▽



1
1
1
引張
11.5
応力
15 日
圧縮
kgf/cm²

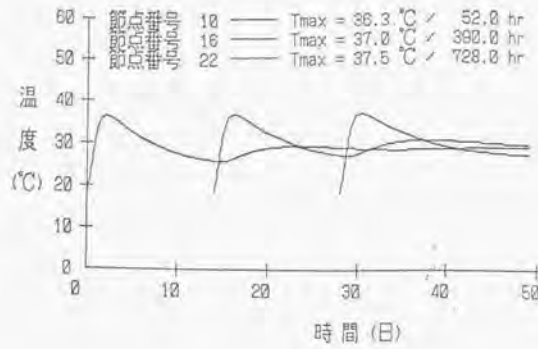
△ Case 2 応力履歴 ▽



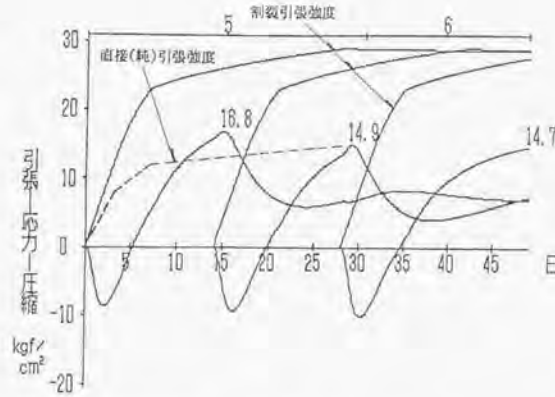
1
1
1
引張
17.3
応力
日
圧縮
kgf/cm²

< 3 P >

△温度履歴▽



△Case 1 応力履歴▽



△Case 2 応力履歴▽

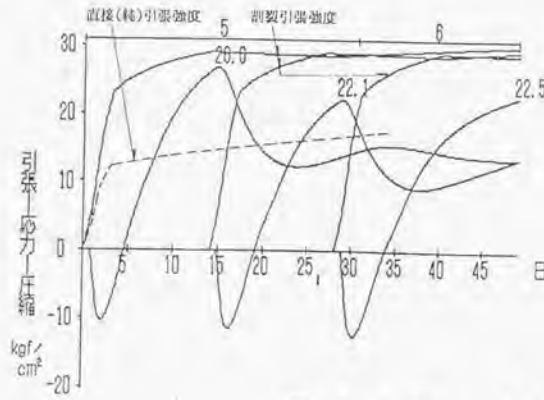
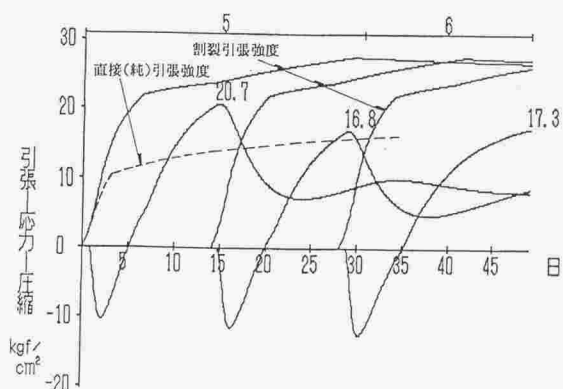
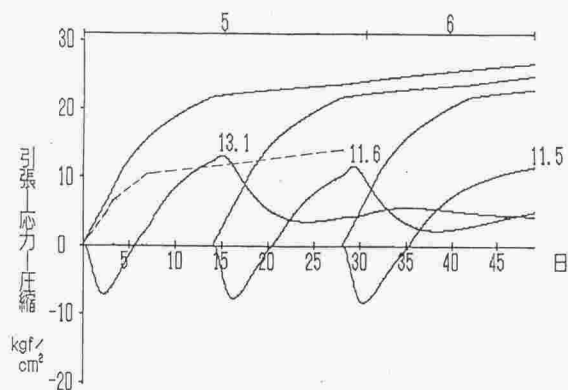
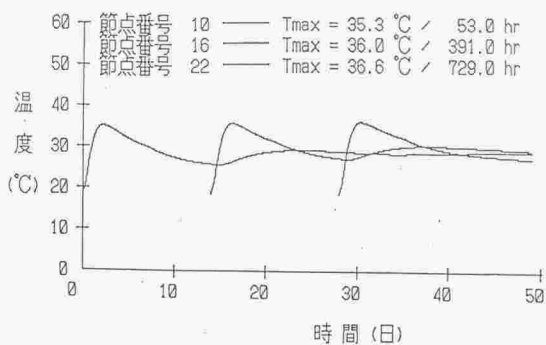


図-8. 2 (d) 温度解析および応力解析の結果

< 2 P >



8. 2 耐ひび割れ特性の要因分析の概要

第5章で述べたとおり、温度応力解析の結果を評価する上で、コンクリート内の構造欠陥に対する感度（ひび割れ感受性）、および自己収縮（反収縮）量を考慮に入れることが重要である。以下に第7章で説明した物理試験および自己収縮試験の結果の評価手順、方法について示す。

8. 2. 1 ひび割れ感受性の要因分析方法

ひび割れ感受性を割裂引張強度と直接引張強度の比（以下、引張強度比）で評価することとする。引張強度比で評価できると判断した理由は、第5章で述べたとおり、コンクリート内の全ての構造欠陥をきっかけとして直接引張強度試験では供試体が破壊するのに対して、割裂引張強度試験では供試体中心部の引張応力最大の部分で発生するマイクロクラックが骨材により拘束されて直ちに破壊には至らないことからである。直接引張試験の応力状態が実際のマスコンクリートのひび割れ発生状態に近いことから、引張強度比は割裂引張強度を補正する、あるいは温度応力解析で得られるひび割れ指数の指標の性格も有すると考えられる。

要因分析には、単相関分析および重回帰分析を用いた。分析に際しての目的変数を引張強度比、説明変数はセメント成分特性、温度上昇特性、コンクリートの物理特性とした。ここで、分析対象としたコンクリートの材齢、説明変数等は以下のとおりであり、重回帰分析の際にはデータ数（9社および明石海峡大橋のセメント2種類）を考慮して説明変数の組み合わせは2変数までとした。

1) 分析材齢：3日、7日、14日、28日、56日、91日

2) 目的変数：引張強度比

3) 説明変数：①スラグ混合率

②クリンカー混合率

③スラグ混合率 + エーライト混合率

④スラグ粉末度

⑤セメント粉末度

⑥断熱温度上昇特性K

⑦ " " " α

⑧圧縮強度

ここで、セメント中のエアライト混合率とは、以下の計算式により算出した。

$$(\text{エアライト混合率}) = (\text{クリンカー混合率}) \times (\text{クリンカー中のエアライト比率})$$

なお、ここに示した説明変数は、以下に示すことを考慮して選択した。

- ①スラグ混合率およびエアライト混合率は、自己収縮（反応収縮）量との関係が予測される。その場合、コンクリート中のセメントペーストが収縮する一方、収縮しない骨材との境界面において残留ひずみが発生し、コンクリート内の欠陥に対して敏感になる、あるいは微細組織において欠陥が発生する可能性がある。
- ②セメント粉末度およびスラグ粉末度はセメントの活性度との関係があり、セメントの反応過程においてセメントペーストの自己収縮に影響を与える、あるいは硬化する組織に影響を与える可能性がある。
- ③圧縮強度は、コンクリートの脆さとの関係が予測される。また、断熱温度上昇特性は、セメントペーストの反応に直接影響があり、材齢毎の圧縮強度との関連が大きい。

8. 2. 2 自己収縮特性の要因分析方法

第7章で示した自己収縮試験の結果の内、明確な特性が確認されるセメントペーストについて、ひび割れ感受性の場合と同様に単相関分析および重回帰分析を実施した。ここで、分析対象としたコンクリート材齢、説明変数等は以下のとおりであり、重回帰分析の際にはデータ数を考慮して説明変数の組み合わせは2変数までとした。

1) 分析材齢：9日、16日、30日、44日

2) 目的変数：自己収縮量

3) 説明変数：①スラグ混合率

②スラグ混合率 + エアライト混合率

③スラグ粉末度 + エアライト混合率 - ビーライト混合率

④スラグ粉末度

⑤セメント粉末度

ここで、セメント中のエアライト混合率は、以下の計算式により算出した。

$$(\text{エアライト混合率}) = (\text{クリンカー混合率}) \times (\text{クリンカー中のエアライト比率})$$

$$(\text{ビーライト混合率}) = (\text{クリンカー混合率}) \times (\text{クリンカー中のビーライト比率})$$

選定された説明変数は、何れもひび割れ感受性の要因分析での選定理由と同じであり、自己収縮量に直接影響することが考えられる。説明変数③において、セメントペースト中にあるビーライトの混合率を減じているのは、ビーライトがエーライトとは反対に、概ね材齢28日以降に反応し、初期には膨張する特性が報告されているからである。また、「(1) ひび割れ感受性の要因分析方法」において、自己収縮（反応収縮）とひび割れ感受性の関係について述べたが、併せて確認することとした。

8. 3 ひび割れ感受性の要因分析結果

表-8. 6には解析に用いた改良型（案）低発熱型セメントの成分特性、表-8. 7にはこれらを用いたコンクリートの物理試験結果等を示す。

表-8. 6 改良型の低発熱型セメントの成分特性

セメント メーカー	クリンカー 混合率 (%)	スラグ 混合率 (%)	フライアッシュ 混合率 (%)	セメント 粉末度 (cm ² /g)
A 社	25	75	0	3330
B 社	75	0	25	3240
C 社	40	30	30	3900
D 社	70	30	0	4500
E 社	25	75	0	3110
F 社	35	45	20	3680
G 社	25	55	20	3910
H 社	30	50	20	4420
I 社	20	60	20	3400
3 P	30	70	0	4850
2 P	32	48	20	4860
A社(新)	35	65	0	3510

(注) 1. 上記の内容の他に解析情報として、エーライト混合率、ビーライト混合率、スラブ混合率がある。

2. セメント粉末度は、クリンカー、スラグ、フライアッシュを混合した時の値である。

表-8. 7 改良型の低発熱型セメントを用いたコンクリートの物理特性等

セメント メーカー	引張 強度比 (3日)	引張 強度比 (7日)	引張 強度比 (14日)	引張 強度比 (28日)	引張 強度比 (56日)	引張 強度比 (91日)	圧縮強度 (3日) (kgf/cm ²)	圧縮強度 (7日) (kgf/cm ²)	圧縮強度 (14日) (kgf/cm ²)	圧縮強度 (28日) (kgf/cm ²)	圧縮強度 (56日) (kgf/cm ²)	圧縮強度 (91日) (kgf/cm ²)	K (℃)	α
A 社	1.34	1.52	1.59	1.79	1.63	1.69	143	198	258	297	333	350	24.0	0.828
B 社	0.98	1.12	0.93	1.53	1.32	1.25	41	66.5	107	201	320	378	22.1	0.477
C 社	1.00	1.16	0.90	1.06	1.15	1.05	49.4	117	181	223	244	261	24.4	0.508
D 社	0.94	1.19	1.11	1.15	1.17	1.12	73.9	147	199	235	255	292	22.2	0.643
E 社	0.90	1.17	1.31	1.24	1.11	1.08	99.1	146	177	202	250	277	18.0	0.573
F 社	0.98	1.22	1.16	1.18	1.23	1.31	87	141	186	223	279	301	21.5	0.521
G 社	1.02	1.20	1.28	1.16	1.23	1.00	67.2	140	181	221	245	286	18.9	0.639
H 社	1.04	1.18	1.39	1.23	1.25	1.03	92.1	167	221	258	292	311	19.5	0.702
I 社	0.91	1.70	1.39	1.56	1.46	1.15	65.9	152	202	248	270	306	23.0	0.578
S P	1.43	1.82	1.95	1.95	1.67	1.55	128	213	257	296	321	334	24.3	0.728
Z P	1.12	1.47	1.82	1.67	1.69	1.53	77.2	153	192	226	260	275	22.9	0.669
A社(新)	0.93	1.36	1.31	1.41			67.4	150	200	231			21.5	0.495

8. 3. 1 引張強度比と各説明変数の単相関について

図-8. 3～図-8. 10には、引張強度比と各説明変数の単相関を示した。各説明変数で共通しているのは、若材齢時に相関が高い場合でも、材齢が進むに従って小さくなる点である。しかし、個々の説明変数には以下に示す特徴があり、耐ひび割れ性を評価する上では有用である。特にスラグ混合率あるいはクリンカー混合率は材齢の関係なく有用である。しかし、単独では客観的な指標とはならないことも分かった。

①スラグ混合率

スラグ混合率は30～40%を選定領域として、これ以下の場合には引張強度比が相対的には小さくなり、ひび割れに対して鈍感であると言える。ただし、単独で明確な指標あるいは基準となる様な傾向とまでは言えない。(図-8. 3参照)

②クリンカー混合率

スラグ混合率の場合とは反対に、クリンカー混合率は概ね40%以上ある場合には、材齢に関わらず、相対的に引張強度比は小さくなる。つまり、ひび割れに対して鈍感であると言える。(図-8. 4参照)

③スラグ混合率 + エーライト混合率

混合率が大きくなると引張強度比が大きくなる傾向はあるが、材齢が進むに従ってその傾向は明確でなくなる。(図-8. 5参照)

④スラグ粉末度、セメント粉末度

スラグおよびセメント粉末度は、単独では引張強度比との有意な相関は認められない。スラグ混合率あるいはクリンカー混合率が引張強度比に与える影響が支配的であるためであると考えられる。(図-8. 6および図-8. 7参照)

⑤断熱温度上昇特性 K 、 α

説明変数 K 、 α と引張強度比の関係は、スラグ混合率と引張強度比の関係のような明確な関係ではないが、何れも説明変数と引張強度比には正の相関が認められた。 K はコンクリート強度、 α は材齢初期のコンクリート強度に対して正の相関が考えられるが、次に述べる圧縮強度と引張強度比の関係と概ね同じ傾向を示した。(図-8. 8および図-8. 9参照)

⑥圧縮強度

若材齢時においては、圧縮強度が小さい程引張強度比が小さく、ひび割れに対して鈍感であると言える。特に7日材齢においては圧縮強度が 140 kg/cm^2 よりも大きくなるとひび割れに対して敏感となる傾向が顕著である。(図-8. 10参照)

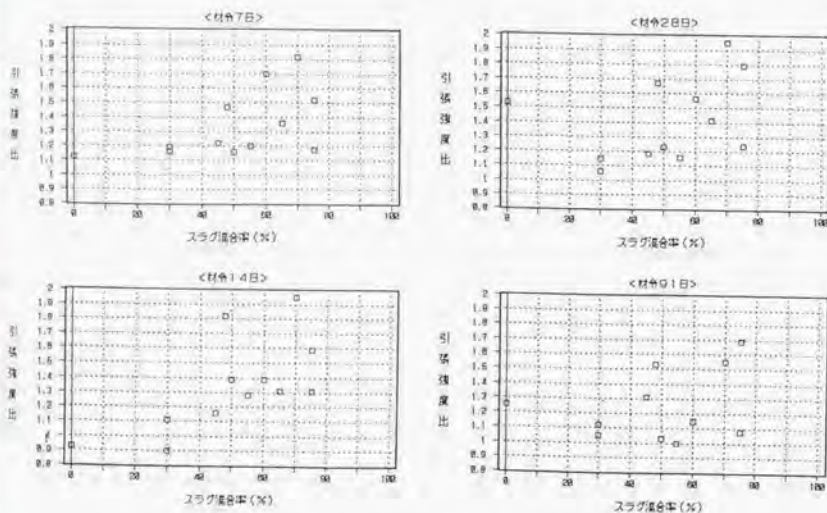


図-8. 3 引張強度比 と スラグ混合率

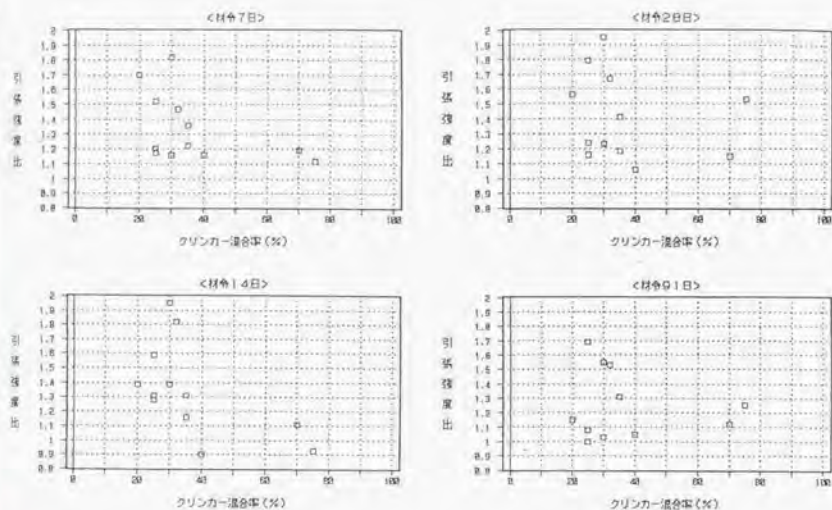


図-8. 4 引張強度比 と クリンカー混合率

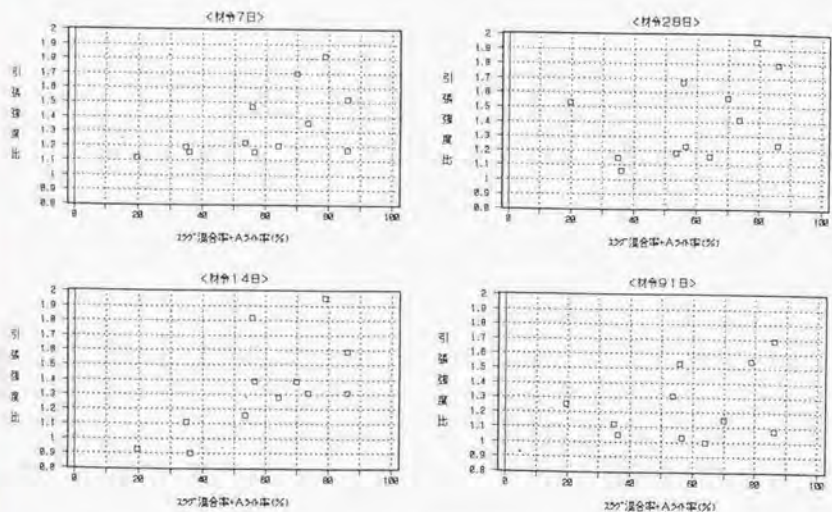


図-8. 5 引張強度比 と スラグ混合率 + エーライト混合率

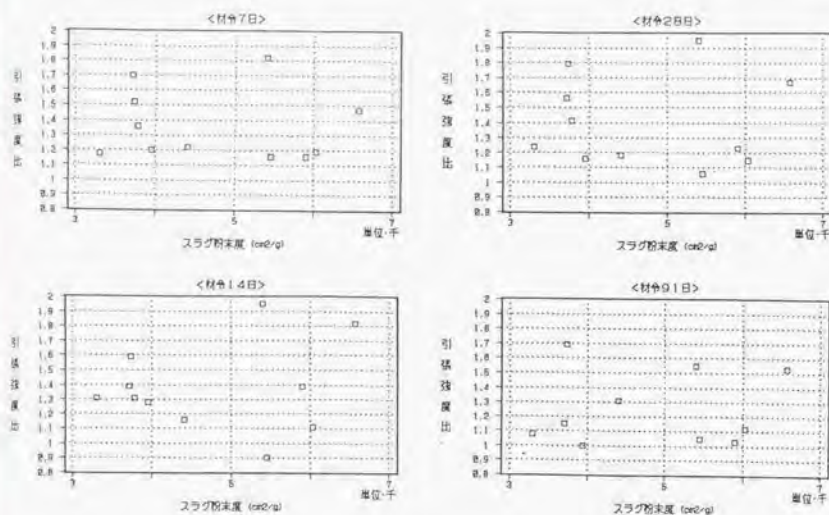


図-8.6 引張強度比 と スラグ粉末度

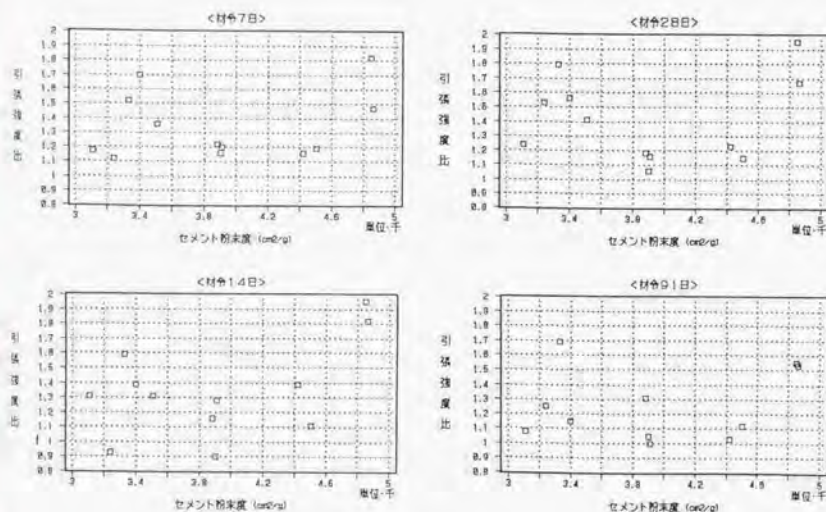


図-8.7 引張強度比 と セメント粉末度

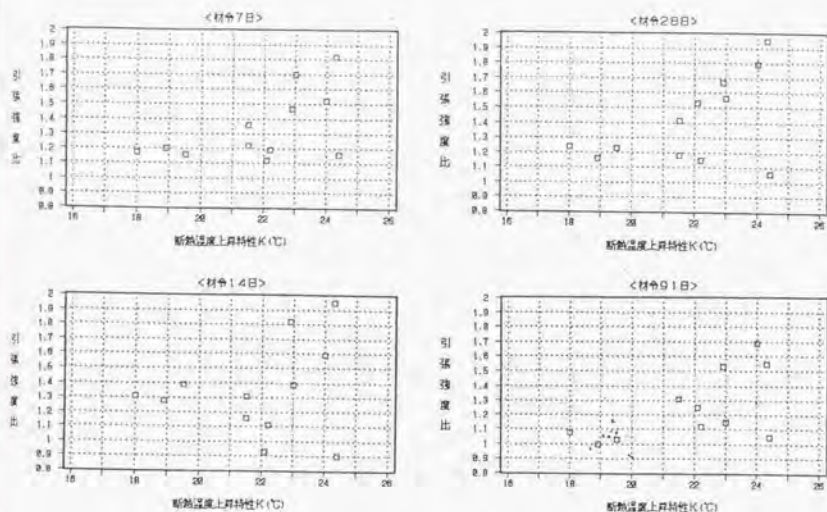


図-8.8 引張強度比 と 断熱温度上昇特性K

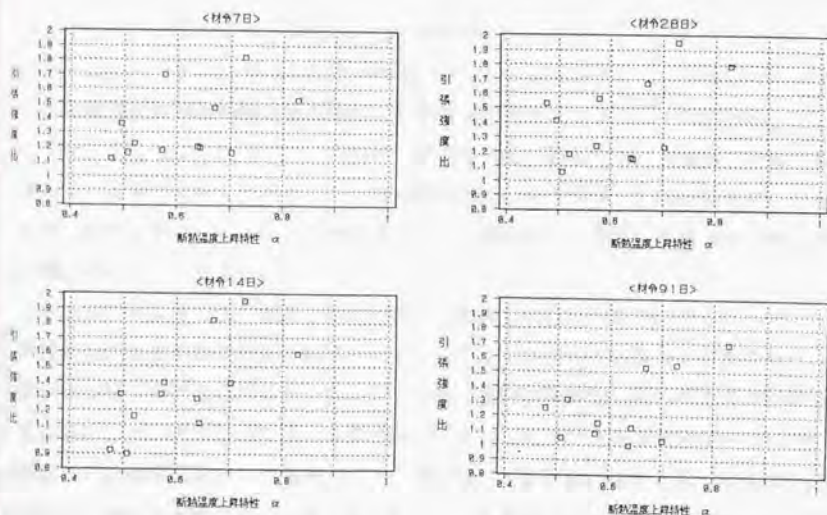


図-8.9 引張強度比 と 断熱温度上昇特性 α

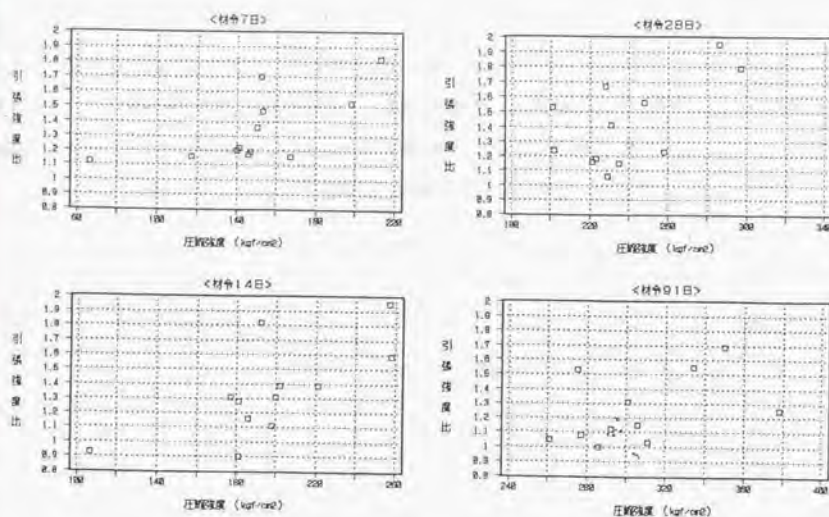


図-8. 10 引張強度比 と 圧縮強度

8. 3. 2 引張強度比と各説明変数の重回帰について

表-8. 6, 8, 7 で示した低発熱型セメントの成分特性とそれを用いたコンクリートの物理試験等の結果を重回帰により評価した結果について以下に述べる。

「8. 2」で述べたとおり、物理的に意味のあると考えられる変数全ての組み合わせについて解析を試みた。ただし、重回帰分析において採用した説明変数は、サンプルデータ数が少ないことから2変数までとし、基本的には同種の性格を持つ説明変数の組み合わせは避けることとした。

表-8. 8はその内、有意な関係があると認められた説明変数の組み合わせと、その材齢毎の重回帰係数の算出結果である。ここで、B社の改良型の低発熱型セメントについてはスラグを混合していないことから、説明変数の組み合わせでスラグ混合率を選択したケースについては、B社を除くこととした。「スラグ混合率+エーライト混合率」を説明変数として選択したケースでは、B社を含む場合と除く場合の2通りについて解析を実施した。B社を除いたケースを実施したもう1つの理由は、B社を含めた重回帰分析を実施した場合に、得られた回帰式によるB社の引張強度比が1を

大きく下回り、現実的でない上に、重回帰分析の結果そのものに影響を与える可能性があったからである。また、表-8、9、表-8、10はそれぞれ材齢14日および28日の重回帰分析結果の内、有意な結果が認められた説明変数の組み合わせ数例（表-8、8中の①～⑩）を選択して、重回帰係数、寄与率（＝重回帰係数の2乗）、回帰式、およびこれによるセメント毎の引張強度比の予測結果を示した。

表-8、8 重回帰分析結果（重相関係数）一覧表

（単位：％）

説明変数		目的変数 Y (引張強度比)						備 考
X 1	X 2	材令3日	材令7日	材令14日	材令28日	材令56日	材令91日	
スラグ混合率+アラウト率	セメント粉末度	60.1	64.4	① 68.8	⑥ 45.5	53.5	41.5	
スラグ混合率+アラウト率	スラグ粉末度	72.0	61.7	93.6	82.7	74.3	64.6	B社除く
スラグ混合率+アラウト率	セメント粉末度	74.0	66.0	② 84.9	⑦ 81.8	72.8	61.2	B社除く
スラグ混合率+アラウト率	α	75.7	59.7	③ 70.5	⑧ 53.7	60.6	55.8	
スラグ混合率+アラウト率	圧縮強度	79.5	68.5	74.8	62.1	67.4	59.1	
スラグ混合率	セメント粉末度	55.7	60.6	84.3	36.8	47.9	35.7	
スラグ混合率	スラグ粉末度	71.4	61.0	④ 92.7	⑤ 81.9	72.8	63.1	B社除く
スラグ混合率	セメント粉末度	73.6	65.3	94.3	81.3	71.8	60.1	B社除く
スラグ混合率	α	75.7	58.5	⑤ 79.2	⑨ 51.2	60.8	56.1	
スラグ混合率	圧縮強度	80.0	68.3	73.7	60.8	67.9	60.3	
α	圧縮強度	79.2	69.6	75.1	60.8	71.6	66.2	

前項において述べたとおり全般的な特徴として、材齢が進むに従って重相関係数は小さくなるが、説明変数の組み合わせによってその傾向には差異がある。

① 圧縮強度を説明変数として選択した3ケースでは、材齢初期において重相関係数が大きく、圧縮強度が大きいほど引張強度比が大きい（ひび割れ感受性が高い）ことが分かる。しかし、共通的に言える傾向として、どの組み合わせであっても、材齢が進むに従って重相関係数が小さくなることである。これは、クリンカー中のピーライトおよびフライアッシュなどの材齢初期には反応しないが、材齢が進むにつれて反応を始め、強度に寄与することで、材齢初期に圧縮強度が小さかったコンクリートも、大きかったコンクリートとの差異が無くなり、圧縮強度が重相関に寄与しなくなる為であると考えられる。この傾向は、単相関の解析結果で確認したのと同様に、断熱温度上昇特性 α を説明変数として選択した組み合わせにおいても確認できる。

② 単相関の分析結果において有意な関係が認められたスラグ混合率を説明変数とし

て選択した組み合わせでは重相関係数が大きい。さらに、下記1)、2)の組み合わせにおいては、スラグを混合していないB社を除いた場合に重相関係数が大きくなる事が分かる。これらの説明変数の組み合わせは、3)、4)の組み合わせを含めて、全ての組み合わせの中でも重相関係数が最も高い。表-8. 9、表-8. 10の14日材齢、18日材齢の重回帰分析結果からは、下記1)~3))の組み合わせでは、引張強度比の実測値と回帰式に基づく理論値は比較的良く一致することが分かる。

1) (スラグ混合率+エーライト混合率) と セメント粉末度

2) スラグ混合率 と スラグ粉末度

3) (スラグ混合率+エーライト混合率) と スラグ粉末度

4) スラグ混合率 と セメント粉末度

③ また、上記の説明変数の組み合わせ(1)~3))は「混合率と粉末度」のパターンとなっているが、混合率と粉末度を代表する説明変数の標準化偏回帰係数の比率を材齢毎に算出した結果は、表-8. 11に示したとおりである。

重相関係数の大小は、各説明変数の組み合わせが目的変数を説明する割合の大きさを表し、材齢によって変動していることは、表-8. 8で示したとおりである。しかし、標準化偏回帰係数の比が材齢によって変動が小さいことには別の意味がある。つまり、比が一定であることは各説明変数が目的変数(引張強度比)の説明に対する寄与率が一定であり、この説明変数の組み合わせがひび割れ感受性を評価する上で安定した指標であることを意味する。表8. 11の結果からは、「スラグ混合率 と スラグ粉末度」の組み合わせが、重相関係数と標準化偏回帰係数の比の両面から、有用な指標となることがわかる。

表-8. 11 標準化偏回帰係数の材齢毎の比較

ケース	説明変数		標準化偏回帰係数	b1とb2の比率(b1/b2)					備考
				7日	14日	28日	56日	91日	
(1)	X1	スラグ混合率+エーライト率	b1	1.82	1.24	2.10	1.11	1.56	
	X2	セメント粉末度	b2						
(2)	X1	スラグ混合率+エーライト率	b1	1.73	1.26	1.53	1.10	1.36	B社 除く
	X2	セメント粉末度	b2						
(3)	X1	スラグ混合率	b1	1.46	1.12	1.45	1.21	1.32	B社 除く
	X2	スラグ粉末度	b2						

: 14日)

析 ③	分 析 ④	分 析 ⑤
(材令14日)	引張強度比 (材令14日)	引張強度比 (材令14日)
Σ	スラグ混合率+Aライト率	スラグ混合率
Σ	断熱温度上昇特性 α	断熱温度上昇特性 α
B社データ除く)	n=12	n=12
	0.632	0.627
	0.795	0.792
0.0253*X2-106.48	Y=0.617*X1+152.058*X2+4.504	Y=0.588*X1+149.758*X2+13.108

	値
スラグ混合	1.19436
スラグ粉末	0.94626

	値
b1	A+スラグ 0.40826
b2	α 0.51118

	値
b1	スラグ混合 0.40492
b2	α 0.50345

y	yhat	e
強度比	理論値	残差
159	158.714	0.28536
90	90.5367	-9.5367
111	114.196	-3.1969
131	147.563	-16.563
116	107.130	8.86990
128	118.511	9.48880
139	150.422	-17.422
139	123.822	15.1771
195	189.295	5.70454
182	168.806	13.1936
131	136.970	-5.9700

		y	y hat.	e
		強度比	理論値	残差
1	A 社	159	183.485	-24.485
2	B 社	93	89.0707	3.92928
3	C 社	90	103.967	-13.967
4	D 社	111	123.816	-12.816
5	E 社	131	144.710	-13.710
6	F 社	116	116.683	-0.6834
7	G 社	128	141.168	-13.168
8	H 社	139	146.181	-7.1811
9	I 社	139	135.472	3.52749
10	J P	195	183.774	11.2258
11	Z P	182	140.595	41.4046
12	A社(新)	131	125.073	5.92856

		y	yhat	e
		強度比	理論値	残差
1	A 社	159	181.179	-22.179
2	B 社	93	84.5428	8.45718
3	C 社	90	106.813	-16.813
4	D 社	111	127.031	-16.031
5	E 社	131	142.990	-11.990
6	F 社	118	117.574	-1.5748
7	G 社	128	141.122	-13.122
8	H 社	139	147.619	-8.6191
9	I 社	139	134.925	4.07467
10	J P	195	183.265	11.7348
11	Z P	182	141.501	40.4980
12	A 社(新)	131	125.433	5.56851

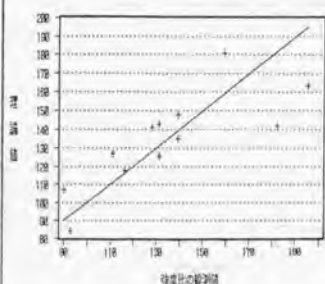
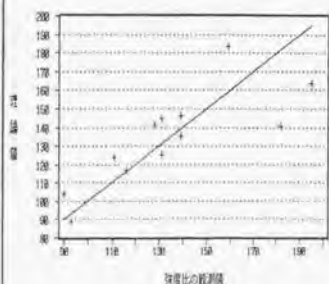
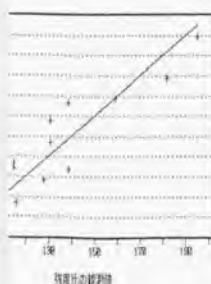

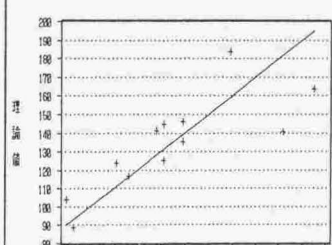
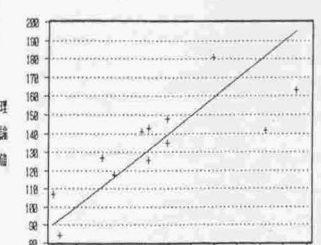


表-8.9 重回帰分析結果(材齢:)

分 析 NO.		分 析 ①		分 析 ②		分																																																																																																																																																																																																													
分 析 条 件	目的変数 Y	引張強度比 (材令14日)		引張強度比 (材令14日)		引張強度比 (材令14日)																																																																																																																																																																																																													
	説明変数 X1	スラグ混合率+Aライト率		スラグ混合率+Aライト率		スラグ混合率																																																																																																																																																																																																													
	説明変数 X2	セメント粉末度		セメント粉末度		スラグ粉末度																																																																																																																																																																																																													
	採用 \bar{r}^2 -法数 n	n=12		n=11 (B社データ除く)		n=11 (B社データ除く)																																																																																																																																																																																																													
分 析 結 果	寄与率(決定係数)	0.789		0.901		0.859																																																																																																																																																																																																													
	重相関係数	0.888		0.949		0.927																																																																																																																																																																																																													
	回 帰 式	Y=1.133*X1+0.0310*X2-54.178		Y=1.665*X1+0.0430*X2-137.65		Y=2.276*X1+0.0430*X2-137.65																																																																																																																																																																																																													
	標準化偏回帰係数	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>A+スラグ 0.74948</td></tr><tr><td>b2</td><td>セメント粉末度 0.60307</td></tr></table>			値	b1	A+スラグ 0.74948	b2	セメント粉末度 0.60307	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>A+スラグ 0.96907</td></tr><tr><td>b2</td><td>セメント粉末度 0.86225</td></tr></table>			値	b1	A+スラグ 0.96907	b2	セメント粉末度 0.86225	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>A+スラグ 0.96907</td></tr><tr><td>b2</td><td>セメント粉末度 0.86225</td></tr></table>			値	b1	A+スラグ 0.96907	b2	セメント粉末度 0.86225																																																																																																																																																																																										
	値																																																																																																																																																																																																																		
b1	A+スラグ 0.74948																																																																																																																																																																																																																		
b2	セメント粉末度 0.60307																																																																																																																																																																																																																		
	値																																																																																																																																																																																																																		
b1	A+スラグ 0.96907																																																																																																																																																																																																																		
b2	セメント粉末度 0.86225																																																																																																																																																																																																																		
	値																																																																																																																																																																																																																		
b1	A+スラグ 0.96907																																																																																																																																																																																																																		
b2	セメント粉末度 0.86225																																																																																																																																																																																																																		
分 析 結 果	理論値と残差	<table><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>強度比</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>159</td><td>146.558</td><td>12.4417</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>93</td><td>88.4251</td><td>4.5748</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>80</td><td>107.583</td><td>-17.583</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>111</td><td>124.980</td><td>-13.980</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>131</td><td>139.733</td><td>-8.7333</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>116</td><td>126.686</td><td>-10.686</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>128</td><td>139.626</td><td>-11.626</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>139</td><td>147.083</td><td>-8.0833</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>139</td><td>130.375</td><td>8.62403</td></tr><tr><td>10</td><td>J社</td><td>185</td><td>185.440</td><td>0.55907</td></tr><tr><td>11</td><td>K社</td><td>162</td><td>159.670</td><td>2.3293</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td>131</td><td>137.868</td><td>-6.8689</td></tr></table>			y	yhat	e		強度比	理論値	残差	1	A社	159	146.558	12.4417	2	B社	93	88.4251	4.5748	3	C社	80	107.583	-17.583	4	D社	111	124.980	-13.980	5	E社	131	139.733	-8.7333	6	F社	116	126.686	-10.686	7	G社	128	139.626	-11.626	8	H社	139	147.083	-8.0833	9	I社	139	130.375	8.62403	10	J社	185	185.440	0.55907	11	K社	162	159.670	2.3293	12	A社(新)	131	137.868	-6.8689	<table><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>強度比</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>159</td><td>148.806</td><td>10.1938</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>90</td><td>80.0838</td><td>9.0838</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>90</td><td>80.0838</td><td>9.0838</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>111</td><td>114.067</td><td>-3.0673</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>131</td><td>139.340</td><td>-8.3407</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>116</td><td>118.193</td><td>-2.1931</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>128</td><td>137.132</td><td>-9.1321</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>139</td><td>146.754</td><td>-7.7543</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>139</td><td>124.846</td><td>14.1539</td></tr><tr><td>10</td><td>J社</td><td>185</td><td>202.040</td><td>-17.0409</td></tr><tr><td>11</td><td>K社</td><td>162</td><td>164.153</td><td>-2.1539</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td>131</td><td>135.572</td><td>-4.5725</td></tr></table>			y	yhat	e		強度比	理論値	残差	1	A社	159	148.806	10.1938	2	B社	90	80.0838	9.0838	3	C社	90	80.0838	9.0838	4	D社	111	114.067	-3.0673	5	E社	131	139.340	-8.3407	6	F社	116	118.193	-2.1931	7	G社	128	137.132	-9.1321	8	H社	139	146.754	-7.7543	9	I社	139	124.846	14.1539	10	J社	185	202.040	-17.0409	11	K社	162	164.153	-2.1539	12	A社(新)	131	135.572	-4.5725	<table><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>強度比</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>159</td><td>148.806</td><td>10.1938</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>90</td><td>80.0838</td><td>9.0838</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>90</td><td>80.0838</td><td>9.0838</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>111</td><td>114.067</td><td>-3.0673</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>131</td><td>139.340</td><td>-8.3407</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>116</td><td>118.193</td><td>-2.1931</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>128</td><td>137.132</td><td>-9.1321</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>139</td><td>146.754</td><td>-7.7543</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>139</td><td>124.846</td><td>14.1539</td></tr><tr><td>10</td><td>J社</td><td>185</td><td>202.040</td><td>-17.0409</td></tr><tr><td>11</td><td>K社</td><td>162</td><td>164.153</td><td>-2.1539</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td>131</td><td>135.572</td><td>-4.5725</td></tr></table>			y	yhat	e		強度比	理論値	残差	1	A社	159	148.806	10.1938	2	B社	90	80.0838	9.0838	3	C社	90	80.0838	9.0838	4	D社	111	114.067	-3.0673	5	E社	131	139.340	-8.3407	6	F社	116	118.193	-2.1931	7	G社	128	137.132	-9.1321	8	H社	139	146.754	-7.7543	9	I社	139	124.846	14.1539	10	J社	185	202.040	-17.0409	11	K社	162	164.153	-2.1539	12	A社(新)	131	135.572	-4.5725
		y	yhat	e																																																																																																																																																																																																															
	強度比	理論値	残差																																																																																																																																																																																																																
1	A社	159	146.558	12.4417																																																																																																																																																																																																															
2	B社	93	88.4251	4.5748																																																																																																																																																																																																															
3	C社	80	107.583	-17.583																																																																																																																																																																																																															
4	D社	111	124.980	-13.980																																																																																																																																																																																																															
5	E社	131	139.733	-8.7333																																																																																																																																																																																																															
6	F社	116	126.686	-10.686																																																																																																																																																																																																															
7	G社	128	139.626	-11.626																																																																																																																																																																																																															
8	H社	139	147.083	-8.0833																																																																																																																																																																																																															
9	I社	139	130.375	8.62403																																																																																																																																																																																																															
10	J社	185	185.440	0.55907																																																																																																																																																																																																															
11	K社	162	159.670	2.3293																																																																																																																																																																																																															
12	A社(新)	131	137.868	-6.8689																																																																																																																																																																																																															
	y	yhat	e																																																																																																																																																																																																																
	強度比	理論値	残差																																																																																																																																																																																																																
1	A社	159	148.806	10.1938																																																																																																																																																																																																															
2	B社	90	80.0838	9.0838																																																																																																																																																																																																															
3	C社	90	80.0838	9.0838																																																																																																																																																																																																															
4	D社	111	114.067	-3.0673																																																																																																																																																																																																															
5	E社	131	139.340	-8.3407																																																																																																																																																																																																															
6	F社	116	118.193	-2.1931																																																																																																																																																																																																															
7	G社	128	137.132	-9.1321																																																																																																																																																																																																															
8	H社	139	146.754	-7.7543																																																																																																																																																																																																															
9	I社	139	124.846	14.1539																																																																																																																																																																																																															
10	J社	185	202.040	-17.0409																																																																																																																																																																																																															
11	K社	162	164.153	-2.1539																																																																																																																																																																																																															
12	A社(新)	131	135.572	-4.5725																																																																																																																																																																																																															
	y	yhat	e																																																																																																																																																																																																																
	強度比	理論値	残差																																																																																																																																																																																																																
1	A社	159	148.806	10.1938																																																																																																																																																																																																															
2	B社	90	80.0838	9.0838																																																																																																																																																																																																															
3	C社	90	80.0838	9.0838																																																																																																																																																																																																															
4	D社	111	114.067	-3.0673																																																																																																																																																																																																															
5	E社	131	139.340	-8.3407																																																																																																																																																																																																															
6	F社	116	118.193	-2.1931																																																																																																																																																																																																															
7	G社	128	137.132	-9.1321																																																																																																																																																																																																															
8	H社	139	146.754	-7.7543																																																																																																																																																																																																															
9	I社	139	124.846	14.1539																																																																																																																																																																																																															
10	J社	185	202.040	-17.0409																																																																																																																																																																																																															
11	K社	162	164.153	-2.1539																																																																																																																																																																																																															
12	A社(新)	131	135.572	-4.5725																																																																																																																																																																																																															
果	Y~Yhat散布図																																																																																																																																																																																																																		

注) 引張強度比の値は100倍値を用いて計算を行っている。

回帰分析結果（材齢：14日）

分 析 ③		分 析 ④		分 析 ⑤																																																																																																																										
引張強度比（材令14日）		引張強度比（材令14日）		引張強度比（材令14日）																																																																																																																										
スラグ混合率		スラグ混合率+Aライト率		スラグ混合率																																																																																																																										
スラグ粉末度		断熱温度上昇特性 α		断熱温度上昇特性 α																																																																																																																										
n=11（B社データ除く）		n=12		n=12																																																																																																																										
0.859		0.632		0.627																																																																																																																										
0.927		0.795		0.792																																																																																																																										
Y=2.276*X1+0.0253*X2-106.48		Y=0.617*X1+152.058*X2+4.504		Y=0.588*X1+149.758*X2+13.108																																																																																																																										
<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>スラグ混合率1.19436</td></tr><tr><td>b2</td><td>スラグ粉末度0.94626</td></tr></table>			値	b1	スラグ混合率1.19436	b2	スラグ粉末度0.94626	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>A+スラグ0.40826</td></tr><tr><td>b2</td><td>α0.51118</td></tr></table>			値	b1	A+スラグ0.40826	b2	α 0.51118	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>スラグ混合率0.40492</td></tr><tr><td>b2</td><td>α0.50345</td></tr></table>			値	b1	スラグ混合率0.40492	b2	α 0.50345																																																																																																							
	値																																																																																																																													
b1	スラグ混合率1.19436																																																																																																																													
b2	スラグ粉末度0.94626																																																																																																																													
	値																																																																																																																													
b1	A+スラグ0.40826																																																																																																																													
b2	α 0.51118																																																																																																																													
	値																																																																																																																													
b1	スラグ混合率0.40492																																																																																																																													
b2	α 0.50345																																																																																																																													
<table><tr><th>e</th></tr><tr><th>残差</th></tr><tr><td>10.1938</td></tr><tr><td>-0.0838</td></tr><tr><td>-3.0673</td></tr><tr><td>-8.3407</td></tr><tr><td>-2.1931</td></tr><tr><td>-9.1321</td></tr><tr><td>-7.7543</td></tr><tr><td>14.1539</td></tr><tr><td>-7.0499</td></tr><tr><td>17.8464</td></tr><tr><td>-4.5725</td></tr></table>		e	残差	10.1938	-0.0838	-3.0673	-8.3407	-2.1931	-9.1321	-7.7543	14.1539	-7.0499	17.8464	-4.5725	<table><tr><th>y</th><th>yhat</th><th>e</th></tr><tr><th>強度比</th><th>理論値</th><th>残差</th></tr><tr><td>1 A社</td><td>159</td><td>158.714</td><td>0.28536</td></tr><tr><td>2 B社</td><td>93</td><td>89.5367</td><td>-3.1909</td></tr><tr><td>3 C社</td><td>90</td><td>89.5367</td><td>-9.5367</td></tr><tr><td>4 D社</td><td>111</td><td>114.196</td><td>-3.1909</td></tr><tr><td>5 E社</td><td>131</td><td>147.593</td><td>-16.593</td></tr><tr><td>6 F社</td><td>116</td><td>107.130</td><td>8.86990</td></tr><tr><td>7 G社</td><td>128</td><td>118.511</td><td>9.48880</td></tr><tr><td>8 H社</td><td>139</td><td>156.422</td><td>-17.422</td></tr><tr><td>9 I社</td><td>139</td><td>123.822</td><td>15.1771</td></tr><tr><td>10 3P</td><td>195</td><td>189.295</td><td>5.70454</td></tr><tr><td>11 2P</td><td>182</td><td>168.806</td><td>13.1936</td></tr><tr><td>12 A社(新)</td><td>131</td><td>136.970</td><td>-5.9700</td></tr></table>		y	yhat	e	強度比	理論値	残差	1 A社	159	158.714	0.28536	2 B社	93	89.5367	-3.1909	3 C社	90	89.5367	-9.5367	4 D社	111	114.196	-3.1909	5 E社	131	147.593	-16.593	6 F社	116	107.130	8.86990	7 G社	128	118.511	9.48880	8 H社	139	156.422	-17.422	9 I社	139	123.822	15.1771	10 3P	195	189.295	5.70454	11 2P	182	168.806	13.1936	12 A社(新)	131	136.970	-5.9700	<table><tr><th>y</th><th>yhat</th><th>e</th></tr><tr><th>強度比</th><th>理論値</th><th>残差</th></tr><tr><td>1 A社</td><td>159</td><td>183.485</td><td>-24.485</td></tr><tr><td>2 B社</td><td>93</td><td>89.0707</td><td>3.92928</td></tr><tr><td>3 C社</td><td>90</td><td>103.987</td><td>-13.987</td></tr><tr><td>4 D社</td><td>111</td><td>123.816</td><td>-12.816</td></tr><tr><td>5 E社</td><td>131</td><td>144.710</td><td>-13.710</td></tr><tr><td>6 F社</td><td>116</td><td>116.883</td><td>-0.6834</td></tr><tr><td>7 G社</td><td>128</td><td>141.168</td><td>-13.168</td></tr><tr><td>8 H社</td><td>139</td><td>146.181</td><td>-7.1811</td></tr><tr><td>9 I社</td><td>139</td><td>135.472</td><td>3.52749</td></tr><tr><td>10 3P</td><td>195</td><td>163.774</td><td>31.2258</td></tr><tr><td>11 2P</td><td>182</td><td>140.595</td><td>41.4046</td></tr><tr><td>12 A社(新)</td><td>131</td><td>125.073</td><td>5.92856</td></tr></table>		y	yhat	e	強度比	理論値	残差	1 A社	159	183.485	-24.485	2 B社	93	89.0707	3.92928	3 C社	90	103.987	-13.987	4 D社	111	123.816	-12.816	5 E社	131	144.710	-13.710	6 F社	116	116.883	-0.6834	7 G社	128	141.168	-13.168	8 H社	139	146.181	-7.1811	9 I社	139	135.472	3.52749	10 3P	195	163.774	31.2258	11 2P	182	140.595	41.4046	12 A社(新)	131	125.073	5.92856
e																																																																																																																														
残差																																																																																																																														
10.1938																																																																																																																														
-0.0838																																																																																																																														
-3.0673																																																																																																																														
-8.3407																																																																																																																														
-2.1931																																																																																																																														
-9.1321																																																																																																																														
-7.7543																																																																																																																														
14.1539																																																																																																																														
-7.0499																																																																																																																														
17.8464																																																																																																																														
-4.5725																																																																																																																														
y	yhat	e																																																																																																																												
強度比	理論値	残差																																																																																																																												
1 A社	159	158.714	0.28536																																																																																																																											
2 B社	93	89.5367	-3.1909																																																																																																																											
3 C社	90	89.5367	-9.5367																																																																																																																											
4 D社	111	114.196	-3.1909																																																																																																																											
5 E社	131	147.593	-16.593																																																																																																																											
6 F社	116	107.130	8.86990																																																																																																																											
7 G社	128	118.511	9.48880																																																																																																																											
8 H社	139	156.422	-17.422																																																																																																																											
9 I社	139	123.822	15.1771																																																																																																																											
10 3P	195	189.295	5.70454																																																																																																																											
11 2P	182	168.806	13.1936																																																																																																																											
12 A社(新)	131	136.970	-5.9700																																																																																																																											
y	yhat	e																																																																																																																												
強度比	理論値	残差																																																																																																																												
1 A社	159	183.485	-24.485																																																																																																																											
2 B社	93	89.0707	3.92928																																																																																																																											
3 C社	90	103.987	-13.987																																																																																																																											
4 D社	111	123.816	-12.816																																																																																																																											
5 E社	131	144.710	-13.710																																																																																																																											
6 F社	116	116.883	-0.6834																																																																																																																											
7 G社	128	141.168	-13.168																																																																																																																											
8 H社	139	146.181	-7.1811																																																																																																																											
9 I社	139	135.472	3.52749																																																																																																																											
10 3P	195	163.774	31.2258																																																																																																																											
11 2P	182	140.595	41.4046																																																																																																																											
12 A社(新)	131	125.073	5.92856																																																																																																																											
																																																																																																																														

28日)


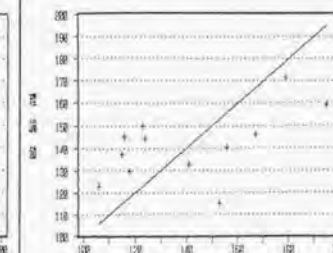
⑧	分 析 ⑨	分 析 ⑩
分8日)	引張強度比 (材令28日)	引張強度比 (材令28日)
析	スラグ混合率+Aライト率	スラグ混合率
条	断熱温度上昇特性 α	断熱温度上昇特性 α
件一タ除く)	n=12	n=12
	0.288	0.262
	0.537	0.512
*X2-56.794	Y=0.284*X1+107.588*X2+58.174	Y=0.131*X1+121.240*X2+60.145
分	値	値
混合1.07444	b1 A+スラグ 0.20911	b1 スラグ混合 0.10015
粉末0.70332	b2 α 0.40223	b2 α 0.45327
比	y y hat e	y y hat e
理論値 残差	強度比 理論値 残差	強度比 理論値 残差
79 161.859 17.1407	1 A社 179 171.703 7.29667	1 A社 179 170.334 8.66561
06 103.244 2.75586	2 B社 153 115.036 37.9633	2 B社 153 117.976 35.0235
15 113.860 1.10951	3 C社 106 123.082 -17.062	3 C社 106 125.655 -19.655
24 153.782 -29.782	4 D社 115 137.273 -22.273	4 D社 115 142.023 -27.023
18 113.972 4.02797	5 E社 124 144.268 -20.268	5 E社 124 139.417 -15.417
16 125.712 -8.7126	6 F社 118 129.406 -11.406	6 F社 118 129.192 -11.192
23 151.505 -28.505	7 G社 116 145.115 -29.115	7 G社 116 144.805 -28.805
56 131.307 24.6923	8 H社 123 149.789 -26.789	8 H社 123 151.790 -28.790
85 182.328 12.6710	9 I社 156 140.201 15.7987	9 I社 156 138.063 17.9362
67 159.803 7.19650	10 3 P 185 158.869 8.1305	10 3 P 185 157.556 8.4431
41 142.582 -1.5828	11 2 P 167 145.978 21.0219	11 2 P 167 147.528 19.4717
	12 A社(新) 141 132.294 8.70524	12 A社(新) 141 128.654 12.3457
身		
原比の観測値	強度比の観測値	強度比の観測値

表-8. 10 重回帰分析結果 (材齢

分 析 NO.		分 析 ⑥		分 析 ⑦		分																																																																																																																																																																																																													
分 析 条 件	目的変数 Y	引張強度比 (材令28日)		引張強度比 (材令28日)		引張強度比 (材令28日)																																																																																																																																																																																																													
	説明変数 X 1	スラグ混合率+Aライト率		スラグ混合率+Aライト率		スラグ混合率																																																																																																																																																																																																													
	説明変数 X 2	セメント粉末度		セメント粉末度		スラグ粉末度																																																																																																																																																																																																													
	採用データ数 n	n=12		n=11 (B社データ除く)		n=11 (B社データ除く)																																																																																																																																																																																																													
分 析 結 果	寄与率(決定係数)	0.207		0.670		0.671																																																																																																																																																																																																													
	重 相 関 係 数	0.455		0.818		0.819																																																																																																																																																																																																													
	回 帰 式	Y=0.595*X1+0.0096*X2+68.118		Y=1.507*X1+0.0302*X2-74.995		Y=2.000*X1+0.0100*X2-74.995																																																																																																																																																																																																													
	標準化偏回帰係数	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>A+スラグ 0.43741</td></tr><tr><td>b2</td><td>セメント粉末度 0.20788</td></tr></table>			値	b1	A+スラグ 0.43741	b2	セメント粉末度 0.20788	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>A+スラグ 0.89757</td></tr><tr><td>b2</td><td>セメント粉末度 0.61935</td></tr></table>			値	b1	A+スラグ 0.89757	b2	セメント粉末度 0.61935	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>A+スラグ 0.89757</td></tr><tr><td>b2</td><td>セメント粉末度 0.61935</td></tr></table>			値	b1	A+スラグ 0.89757	b2	セメント粉末度 0.61935																																																																																																																																																																																										
	値																																																																																																																																																																																																																		
b1	A+スラグ 0.43741																																																																																																																																																																																																																		
b2	セメント粉末度 0.20788																																																																																																																																																																																																																		
	値																																																																																																																																																																																																																		
b1	A+スラグ 0.89757																																																																																																																																																																																																																		
b2	セメント粉末度 0.61935																																																																																																																																																																																																																		
	値																																																																																																																																																																																																																		
b1	A+スラグ 0.89757																																																																																																																																																																																																																		
b2	セメント粉末度 0.61935																																																																																																																																																																																																																		
分 析 結 果	理論値と残差	<table><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>強度比</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>179</td><td>151.271</td><td>27.7280</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>153</td><td>110.866</td><td>42.1336</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>106</td><td>127.023</td><td>-21.023</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>115</td><td>132.138</td><td>-17.138</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>124</td><td>149.156</td><td>-25.156</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>118</td><td>137.178</td><td>-19.178</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>116</td><td>143.767</td><td>-27.767</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>123</td><td>144.271</td><td>-21.271</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>156</td><td>142.312</td><td>13.6873</td></tr><tr><td>10</td><td>3P</td><td>185</td><td>161.547</td><td>23.4529</td></tr><tr><td>11</td><td>2P</td><td>187</td><td>147.955</td><td>39.0442</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td>141</td><td>145.510</td><td>-4.5108</td></tr></table>			y	yhat	e		強度比	理論値	残差	1	A社	179	151.271	27.7280	2	B社	153	110.866	42.1336	3	C社	106	127.023	-21.023	4	D社	115	132.138	-17.138	5	E社	124	149.156	-25.156	6	F社	118	137.178	-19.178	7	G社	116	143.767	-27.767	8	H社	123	144.271	-21.271	9	I社	156	142.312	13.6873	10	3P	185	161.547	23.4529	11	2P	187	147.955	39.0442	12	A社(新)	141	145.510	-4.5108	<table><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>強度比</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>179</td><td>155.126</td><td>23.8739</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>153</td><td>110.866</td><td>42.1336</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>106</td><td>97.0036</td><td>8.99637</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>115</td><td>113.463</td><td>1.53692</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>124</td><td>148.483</td><td>-24.483</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>118</td><td>122.615</td><td>-4.6157</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>116</td><td>139.492</td><td>-23.492</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>123</td><td>143.742</td><td>-20.742</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>156</td><td>132.831</td><td>23.1683</td></tr><tr><td>10</td><td>3P</td><td>185</td><td>190.023</td><td>-4.97674</td></tr><tr><td>11</td><td>2P</td><td>187</td><td>155.641</td><td>31.3582</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td>141</td><td>141.577</td><td>-0.5770</td></tr></table>			y	yhat	e		強度比	理論値	残差	1	A社	179	155.126	23.8739	2	B社	153	110.866	42.1336	3	C社	106	97.0036	8.99637	4	D社	115	113.463	1.53692	5	E社	124	148.483	-24.483	6	F社	118	122.615	-4.6157	7	G社	116	139.492	-23.492	8	H社	123	143.742	-20.742	9	I社	156	132.831	23.1683	10	3P	185	190.023	-4.97674	11	2P	187	155.641	31.3582	12	A社(新)	141	141.577	-0.5770	<table><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>強度比</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>179</td><td>155.126</td><td>23.8739</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>153</td><td>110.866</td><td>42.1336</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>106</td><td>97.0036</td><td>8.99637</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>115</td><td>113.463</td><td>1.53692</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>124</td><td>148.483</td><td>-24.483</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>118</td><td>122.615</td><td>-4.6157</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>116</td><td>139.492</td><td>-23.492</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>123</td><td>143.742</td><td>-20.742</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>156</td><td>132.831</td><td>23.1683</td></tr><tr><td>10</td><td>3P</td><td>185</td><td>190.023</td><td>-4.97674</td></tr><tr><td>11</td><td>2P</td><td>187</td><td>155.641</td><td>31.3582</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td>141</td><td>141.577</td><td>-0.5770</td></tr></table>			y	yhat	e		強度比	理論値	残差	1	A社	179	155.126	23.8739	2	B社	153	110.866	42.1336	3	C社	106	97.0036	8.99637	4	D社	115	113.463	1.53692	5	E社	124	148.483	-24.483	6	F社	118	122.615	-4.6157	7	G社	116	139.492	-23.492	8	H社	123	143.742	-20.742	9	I社	156	132.831	23.1683	10	3P	185	190.023	-4.97674	11	2P	187	155.641	31.3582	12	A社(新)	141	141.577	-0.5770
		y	yhat	e																																																																																																																																																																																																															
		強度比	理論値	残差																																																																																																																																																																																																															
	1	A社	179	151.271	27.7280																																																																																																																																																																																																														
2	B社	153	110.866	42.1336																																																																																																																																																																																																															
3	C社	106	127.023	-21.023																																																																																																																																																																																																															
4	D社	115	132.138	-17.138																																																																																																																																																																																																															
5	E社	124	149.156	-25.156																																																																																																																																																																																																															
6	F社	118	137.178	-19.178																																																																																																																																																																																																															
7	G社	116	143.767	-27.767																																																																																																																																																																																																															
8	H社	123	144.271	-21.271																																																																																																																																																																																																															
9	I社	156	142.312	13.6873																																																																																																																																																																																																															
10	3P	185	161.547	23.4529																																																																																																																																																																																																															
11	2P	187	147.955	39.0442																																																																																																																																																																																																															
12	A社(新)	141	145.510	-4.5108																																																																																																																																																																																																															
	y	yhat	e																																																																																																																																																																																																																
	強度比	理論値	残差																																																																																																																																																																																																																
1	A社	179	155.126	23.8739																																																																																																																																																																																																															
2	B社	153	110.866	42.1336																																																																																																																																																																																																															
3	C社	106	97.0036	8.99637																																																																																																																																																																																																															
4	D社	115	113.463	1.53692																																																																																																																																																																																																															
5	E社	124	148.483	-24.483																																																																																																																																																																																																															
6	F社	118	122.615	-4.6157																																																																																																																																																																																																															
7	G社	116	139.492	-23.492																																																																																																																																																																																																															
8	H社	123	143.742	-20.742																																																																																																																																																																																																															
9	I社	156	132.831	23.1683																																																																																																																																																																																																															
10	3P	185	190.023	-4.97674																																																																																																																																																																																																															
11	2P	187	155.641	31.3582																																																																																																																																																																																																															
12	A社(新)	141	141.577	-0.5770																																																																																																																																																																																																															
	y	yhat	e																																																																																																																																																																																																																
	強度比	理論値	残差																																																																																																																																																																																																																
1	A社	179	155.126	23.8739																																																																																																																																																																																																															
2	B社	153	110.866	42.1336																																																																																																																																																																																																															
3	C社	106	97.0036	8.99637																																																																																																																																																																																																															
4	D社	115	113.463	1.53692																																																																																																																																																																																																															
5	E社	124	148.483	-24.483																																																																																																																																																																																																															
6	F社	118	122.615	-4.6157																																																																																																																																																																																																															
7	G社	116	139.492	-23.492																																																																																																																																																																																																															
8	H社	123	143.742	-20.742																																																																																																																																																																																																															
9	I社	156	132.831	23.1683																																																																																																																																																																																																															
10	3P	185	190.023	-4.97674																																																																																																																																																																																																															
11	2P	187	155.641	31.3582																																																																																																																																																																																																															
12	A社(新)	141	141.577	-0.5770																																																																																																																																																																																																															
果	Y~Yhat散布図																																																																																																																																																																																																																		

注) 引張強度比の値は100倍値を用いて計算を行っている。

重回帰分析結果（材齢：28日）

分 析 ⑧		分 析 ⑨		分 析 ⑩																																																																																																																																																																																																										
引張強度比（材令28日）		引張強度比（材令28日）		引張強度比（材令28日）																																																																																																																																																																																																										
スラグ混合率		スラグ混合率+Aライト率		スラグ混合率																																																																																																																																																																																																										
スラグ粉末度		断熱温度上昇特性 α		断熱温度上昇特性 α																																																																																																																																																																																																										
n=11（B社データ除く）		n=12		n=12																																																																																																																																																																																																										
0.671		0.288		0.262																																																																																																																																																																																																										
0.819		0.537		0.512																																																																																																																																																																																																										
Y=2.000*X1+0.0184*X2-56.794		Y=0.284*X1+107.588*X2+58.174		Y=0.131*X1+121.240*X2+60.145																																																																																																																																																																																																										
<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>スラグ混合1.07444</td></tr><tr><td>b2</td><td>スラグ粉末0.70332</td></tr></table>			値	b1	スラグ混合1.07444	b2	スラグ粉末0.70332	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>A+スラグ0.20911</td></tr><tr><td>b2</td><td>α0.40223</td></tr></table>			値	b1	A+スラグ0.20911	b2	α 0.40223	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>スラグ混合0.10015</td></tr><tr><td>b2</td><td>α0.45327</td></tr></table>			値	b1	スラグ混合0.10015	b2	α 0.45327																																																																																																																																																																																							
	値																																																																																																																																																																																																													
b1	スラグ混合1.07444																																																																																																																																																																																																													
b2	スラグ粉末0.70332																																																																																																																																																																																																													
	値																																																																																																																																																																																																													
b1	A+スラグ0.20911																																																																																																																																																																																																													
b2	α 0.40223																																																																																																																																																																																																													
	値																																																																																																																																																																																																													
b1	スラグ混合0.10015																																																																																																																																																																																																													
b2	α 0.45327																																																																																																																																																																																																													
<table><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>強度比</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>179</td><td>161.859</td><td>17.1407</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>153</td><td>113.890</td><td>1.10951</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>106</td><td>103.244</td><td>2.75586</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>115</td><td>153.782</td><td>-29.782</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>124</td><td>113.972</td><td>4.02797</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>118</td><td>125.712</td><td>-9.7128</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>123</td><td>151.505</td><td>-28.505</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>156</td><td>131.307</td><td>24.6923</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>195</td><td>182.328</td><td>12.6710</td></tr><tr><td>10</td><td>3P</td><td>167</td><td>159.803</td><td>7.19650</td></tr><tr><td>11</td><td>2P</td><td>141</td><td>142.592</td><td>-1.5928</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>		y	yhat	e		強度比	理論値	残差	1	A社	179	161.859	17.1407	2	B社	153	113.890	1.10951	3	C社	106	103.244	2.75586	4	D社	115	153.782	-29.782	5	E社	124	113.972	4.02797	6	F社	118	125.712	-9.7128	7	G社	123	151.505	-28.505	8	H社	156	131.307	24.6923	9	I社	195	182.328	12.6710	10	3P	167	159.803	7.19650	11	2P	141	142.592	-1.5928	12	A社(新)				<table><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>強度比</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>179</td><td>171.703</td><td>7.29687</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>153</td><td>115.036</td><td>37.9633</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>106</td><td>123.062</td><td>-17.062</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>115</td><td>137.273</td><td>-22.273</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>124</td><td>144.268</td><td>-20.268</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>118</td><td>129.406</td><td>-11.406</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>116</td><td>145.115</td><td>-29.115</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>123</td><td>149.789</td><td>-26.789</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>156</td><td>140.201</td><td>15.7987</td></tr><tr><td>10</td><td>3P</td><td>195</td><td>158.869</td><td>36.1305</td></tr><tr><td>11</td><td>2P</td><td>167</td><td>145.978</td><td>21.0219</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td>141</td><td>132.294</td><td>8.70524</td></tr></table>		y	yhat	e		強度比	理論値	残差	1	A社	179	171.703	7.29687	2	B社	153	115.036	37.9633	3	C社	106	123.062	-17.062	4	D社	115	137.273	-22.273	5	E社	124	144.268	-20.268	6	F社	118	129.406	-11.406	7	G社	116	145.115	-29.115	8	H社	123	149.789	-26.789	9	I社	156	140.201	15.7987	10	3P	195	158.869	36.1305	11	2P	167	145.978	21.0219	12	A社(新)	141	132.294	8.70524	<table><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>強度比</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>179</td><td>170.334</td><td>8.66581</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>153</td><td>117.976</td><td>35.0235</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>106</td><td>125.655</td><td>-19.655</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>115</td><td>142.023</td><td>-27.023</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>124</td><td>139.417</td><td>-15.417</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>118</td><td>129.192</td><td>-11.192</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>116</td><td>144.805</td><td>-28.805</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>123</td><td>151.790</td><td>-28.790</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>156</td><td>136.063</td><td>17.9362</td></tr><tr><td>10</td><td>3P</td><td>195</td><td>157.556</td><td>37.4431</td></tr><tr><td>11</td><td>2P</td><td>167</td><td>147.528</td><td>19.4717</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td>141</td><td>128.654</td><td>12.3457</td></tr></table>		y	yhat	e		強度比	理論値	残差	1	A社	179	170.334	8.66581	2	B社	153	117.976	35.0235	3	C社	106	125.655	-19.655	4	D社	115	142.023	-27.023	5	E社	124	139.417	-15.417	6	F社	118	129.192	-11.192	7	G社	116	144.805	-28.805	8	H社	123	151.790	-28.790	9	I社	156	136.063	17.9362	10	3P	195	157.556	37.4431	11	2P	167	147.528	19.4717	12	A社(新)	141	128.654	12.3457
	y	yhat	e																																																																																																																																																																																																											
	強度比	理論値	残差																																																																																																																																																																																																											
1	A社	179	161.859	17.1407																																																																																																																																																																																																										
2	B社	153	113.890	1.10951																																																																																																																																																																																																										
3	C社	106	103.244	2.75586																																																																																																																																																																																																										
4	D社	115	153.782	-29.782																																																																																																																																																																																																										
5	E社	124	113.972	4.02797																																																																																																																																																																																																										
6	F社	118	125.712	-9.7128																																																																																																																																																																																																										
7	G社	123	151.505	-28.505																																																																																																																																																																																																										
8	H社	156	131.307	24.6923																																																																																																																																																																																																										
9	I社	195	182.328	12.6710																																																																																																																																																																																																										
10	3P	167	159.803	7.19650																																																																																																																																																																																																										
11	2P	141	142.592	-1.5928																																																																																																																																																																																																										
12	A社(新)																																																																																																																																																																																																													
	y	yhat	e																																																																																																																																																																																																											
	強度比	理論値	残差																																																																																																																																																																																																											
1	A社	179	171.703	7.29687																																																																																																																																																																																																										
2	B社	153	115.036	37.9633																																																																																																																																																																																																										
3	C社	106	123.062	-17.062																																																																																																																																																																																																										
4	D社	115	137.273	-22.273																																																																																																																																																																																																										
5	E社	124	144.268	-20.268																																																																																																																																																																																																										
6	F社	118	129.406	-11.406																																																																																																																																																																																																										
7	G社	116	145.115	-29.115																																																																																																																																																																																																										
8	H社	123	149.789	-26.789																																																																																																																																																																																																										
9	I社	156	140.201	15.7987																																																																																																																																																																																																										
10	3P	195	158.869	36.1305																																																																																																																																																																																																										
11	2P	167	145.978	21.0219																																																																																																																																																																																																										
12	A社(新)	141	132.294	8.70524																																																																																																																																																																																																										
	y	yhat	e																																																																																																																																																																																																											
	強度比	理論値	残差																																																																																																																																																																																																											
1	A社	179	170.334	8.66581																																																																																																																																																																																																										
2	B社	153	117.976	35.0235																																																																																																																																																																																																										
3	C社	106	125.655	-19.655																																																																																																																																																																																																										
4	D社	115	142.023	-27.023																																																																																																																																																																																																										
5	E社	124	139.417	-15.417																																																																																																																																																																																																										
6	F社	118	129.192	-11.192																																																																																																																																																																																																										
7	G社	116	144.805	-28.805																																																																																																																																																																																																										
8	H社	123	151.790	-28.790																																																																																																																																																																																																										
9	I社	156	136.063	17.9362																																																																																																																																																																																																										
10	3P	195	157.556	37.4431																																																																																																																																																																																																										
11	2P	167	147.528	19.4717																																																																																																																																																																																																										
12	A社(新)	141	128.654	12.3457																																																																																																																																																																																																										
																																																																																																																																																																																																														

8. 4 自己収縮特性

第7章・表-7. 8で示したセメントペーストの自己収縮（反応収縮）特性の試験結果の単相関についての検討結果、および重回帰分析結果について以下に示す。

8. 4. 1 自己収縮量と各説明変数の単相関について

図-8. 11～図-8. 15は引張強度比と各説明変数の材齢毎の単相関を示している。以下にその特徴について述べる。

①スラグ混合率

9日～44日のいずれの材齢においても、スラグ混合率が30～40%を超えるとセメントペースト自己化収縮ひずみが大きくなる傾向がある。この傾向は、スラグ混合率と引張強度比の関係において見られた特徴と一致しており、セメントペーストの自己収縮がコンクリート微細組織に影響を与えていることが推察される。

②スラグ混合率 + エーライト混合率

9日～44日のいずれの材齢においても、スラグ混合率と同様に（スラグ混合率+エーライト混合率）が40%を超えた場合に自己収縮ひずみが次第に大きくなることが分かる。

③スラグ粉末度 + エーライト混合率 - ビーライト混合率

9日～44日のいずれの材齢においても、（スラグ混合率+エーライト混合率）の場合と同様な傾向があり、混合率の算出結果が0%程度以下の場合には自己収縮が小さい（一定）であることが確認できる。（スラグ混合率+エーライト混合率）の場合と異なる点は、ビーライト混合率が大きいこと、つまりビーライト混合率が大きい場合に自己収縮量が小さいことを、この説明変数では評価できることである。

④スラグ粉末度

スラグ粉末度が大きい場合、セメントが活性化することにより自己収縮量が大きくなることが想定されたが、実験結果では有意な傾向を示していないと考えられる。これは、単相関レベルではスラグ混合率などの他の要因との相関がより大きいためであると考えられる。

⑤セメント粉末度

スラグ粉末度と同様に、単独の説明変数としては自己収縮量との有意な関係は認められなかった。

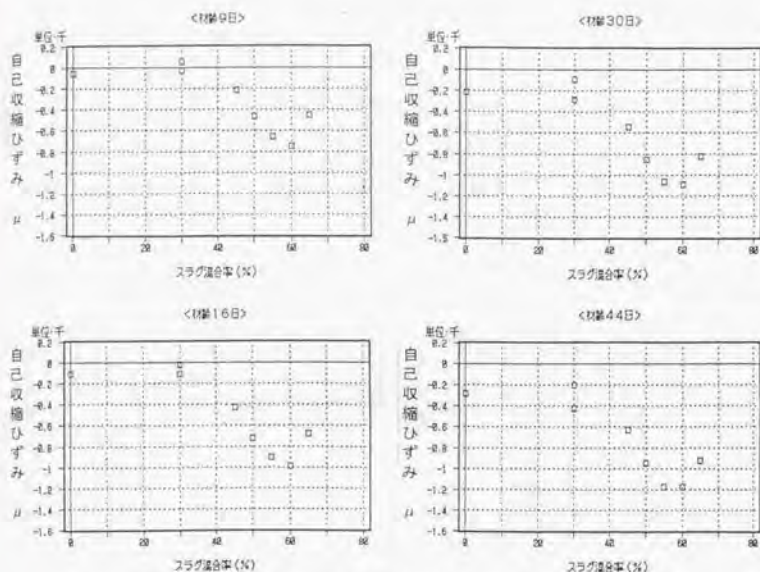


図-8. 11 セメントペースト自己収縮量とスラグ混合率の関係

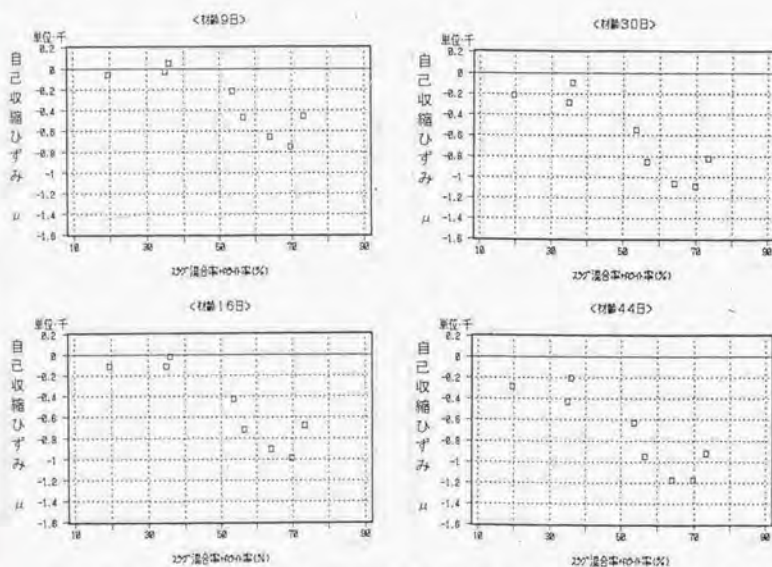


図-8. 12 セメントペースト自己収縮量と（スラグ混合率+フライ灰混合率）の関係

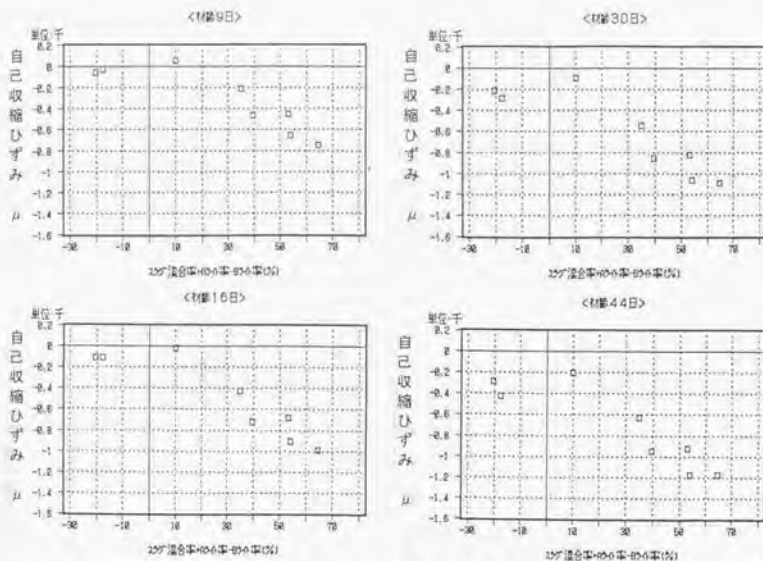


図-8. 13 セメントペースト自己収縮量と（スラグ混合率+エーライット混合率+ビークライット混合率）の関係

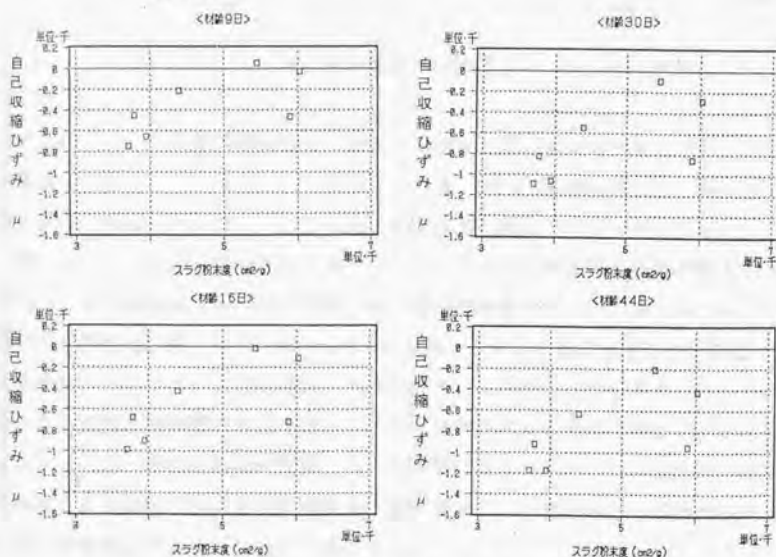


図-8. 14 セメントペースト自己収縮量とスラグ粉末度の関係

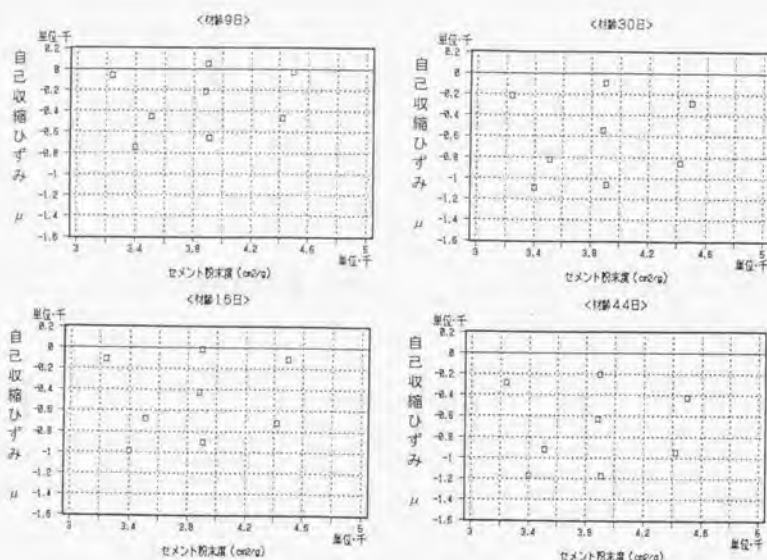
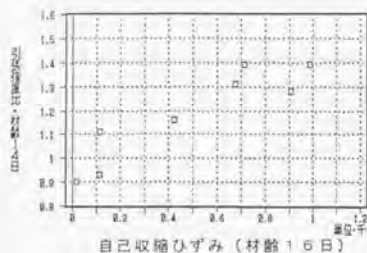


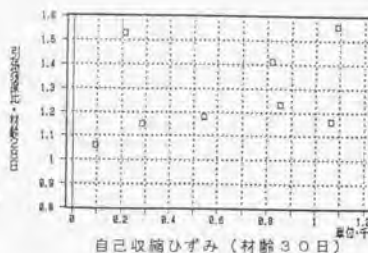
図-8. 15 セメントペースト自己収縮量とセメント粉末度の関係

以上のとおり、材齢に関係なく一貫した特徴が認められる点が異なるが、スラグ混合率および（スラグ混合率＋エーライト混合率）では、引張強度比との単相関で得られた特徴と類似した結果が、自己収縮（反応収縮）量についても得られた。

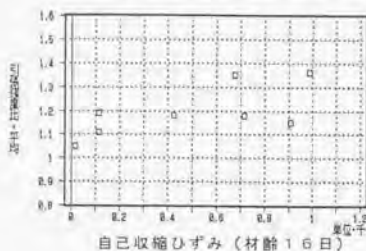
図-8. 16は、引張強度比とセメントペースト自己収縮量の相関を図化した結果である。引張強度比における重回帰分析で重相関係数が大きかった14日および28日の引張強度比、および全材齢（3, 7, 14, 28, 56, 91日）の引張強度比の平均値と、材齢16日および30日の自己収縮量との関係を示している。この結果からは、セメントペーストの自己収縮量と引張強度比には正の相関が認めらるが、前述したとおり、セメントペーストの自己収縮が骨材～ペースト間に残留ひずみ（セン断応力）が発生している、あるいはこれにより微細構造欠陥が発生しているため、ひび割れ感受性あるいは引張強度比が大きくなったと考えられる。



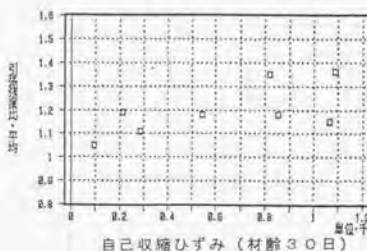
(a) 材齢16日の自己収縮ひずみと
材齢14日の引張強度比の関係



(b) 材齢30日の自己収縮ひずみと
材齢28日の引張強度比の関係



(c) 材齢16日の自己収縮ひずみと
全材齢の引張強度比平均の関係



(d) 材齢30日の自己収縮ひずみと
全材齢の引張強度比平均の関係

図-8. 16 セメントペーストの自己収縮量と引張強度比の関係

8. 4. 2 自己収縮量と各説明変数の重相関について

重回帰分析は下記に示すとおり、成分混合率と粉末度の異なる2説明変数の組み合わせにより実施した。ここで、説明変数の組み合わせは、引張強度比（ひび割れ感受性）の要因分析において得られた寄与率の高い組み合わせを参考に、表-8. 11に示すケースを選定した。以下にその解析結果について述べる。

- | | | | | |
|------------------------------|---|---|---|----------|
| ①スラグ混合率 |] | X |] | ④スラグ粉末度 |
| ②スラグ混合率 + エーライト混合率 | | | | ⑤セメント粉末度 |
| ③スラグ粉末度 + エーライト混合率 - ビーライト混合 | | | | |

表-8. 11は、各説明変数の組み合わせの材齢毎の重回帰分析における重相関係数を示した。引張強度比で重相関係数が高かった上記説明変数の組み合わせ「①と④」、

表-8. 1 1 重回帰分析結果（重相関係数）一覧表

（単位；％）

説明変数		目的変数 Y（セメントペーストの硬化収縮）				備考
X 1	X 2	材齢 9 日	材齢 16 日	材齢 30 日	材齢 44 日	
スラグ混合率 +A ライト率	セメント粉末度	① 86.7	② 89.1	③ 88.8	④ 89.4	
スラグ混合率	スラグ粉末度	⑤ 88.5	⑥ 90.1	⑦ 89.8	⑧ 89.2	B 社 除く
スラグ混合率 +A ライト率-B ライト率	セメント粉末度	⑨ 88.4	⑩ 91.0	⑪ 89.4	⑫ 89.4	

（注）表中の①～⑫は、表-8. 1 2～表-8. 1 4に示す各説明変数、および材齢の組み合わせの重回帰分析の各ケースを示す。

「②と⑤」、および「③と⑧」のケースでは、自己収縮でも重相関係数が高いことが分かった。また、セメントペーストの自己収縮量の場合は、材齢に関わらず重相関係数が高い点で、引張高度比における解析結果と異なった。

表-8. 1 2～1 4で示した算出結果の特徴は、成分混合率と粉末度の標準化偏回帰係数が1桁オーダーで異なり、前者が後者よりも大きいことである。つまり、重回帰式において粉末度が自己収縮量を説明する度合いは、成分混合率と比較して非常に小さいと言える。従って、セメントペーストの自己収縮量に対しては、スラグ混合率、（スラグ混合率+エーライト混合率）、および（スラグ混合率+エーライト混合率-ビーライト混合率）を単独でも評価指数として採用出来ると考えられる。

回帰分析結果

合率)、セメント粉末度

分 析 ③	分 析 ④																																																																																																																
ストース自己収縮(材齢30日)	セメントース自己収縮(材齢44日)																																																																																																																
スラグ混合率+Aライト率	スラグ混合率+Aライト率																																																																																																																
メント粉末度	セメント粉末度																																																																																																																
$r=8$	$n=8$																																																																																																																
789	0.880																																																																																																																
888	0.894																																																																																																																
$8.180 \times X_1 - 0.0286 \times X_2 - 195.51$	$Y = 18.216 \times X_1 + 0.00362 \times X_2 - 222.3$																																																																																																																
【標準化偏回帰係数】	【標準化偏回帰係数】																																																																																																																
<table border="1"> <tr> <th></th> <th>値</th> </tr> <tr> <td>b1</td> <td>A+スラグ 0.88522</td> </tr> <tr> <td>b2</td> <td>メント粉末度 -0.0332</td> </tr> </table>		値	b1	A+スラグ 0.88522	b2	メント粉末度 -0.0332	<table border="1"> <tr> <th></th> <th>値</th> </tr> <tr> <td>b1</td> <td>A+スラグ 0.89454</td> </tr> <tr> <td>b2</td> <td>メント粉末度 0.00424</td> </tr> </table>		値	b1	A+スラグ 0.89454	b2	メント粉末度 0.00424																																																																																																				
	値																																																																																																																
b1	A+スラグ 0.88522																																																																																																																
b2	メント粉末度 -0.0332																																																																																																																
	値																																																																																																																
b1	A+スラグ 0.89454																																																																																																																
b2	メント粉末度 0.00424																																																																																																																
【理論値と残差】	【理論値と残差】																																																																																																																
<table border="1"> <tr> <th></th> <th>y</th> <th>y hat</th> <th>e</th> </tr> <tr> <th></th> <th>ストース</th> <th>理論値</th> <th>残差</th> </tr> <tr><td>1 A 社</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2 B 社</td><td>213</td><td>65.2994</td><td>146.700</td></tr> <tr><td>3 C 社</td><td>95</td><td>347.986</td><td>-252.36</td></tr> <tr><td>4 D 社</td><td>287</td><td>310.223</td><td>-23.223</td></tr> <tr><td>5 E 社</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6 F 社</td><td>543</td><td>664.289</td><td>-121.28</td></tr> <tr><td>7 G 社</td><td>1065</td><td>856.138</td><td>208.861</td></tr> <tr><td>8 H 社</td><td>855</td><td>707.016</td><td>147.983</td></tr> <tr><td>9 I 社</td><td>1088</td><td>976.172</td><td>111.827</td></tr> <tr><td>10 S P</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>11 Z P</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12 A 社(新)</td><td>820</td><td>1038.47</td><td>-218.47</td></tr> </table>		y	y hat	e		ストース	理論値	残差	1 A 社				2 B 社	213	65.2994	146.700	3 C 社	95	347.986	-252.36	4 D 社	287	310.223	-23.223	5 E 社				6 F 社	543	664.289	-121.28	7 G 社	1065	856.138	208.861	8 H 社	855	707.016	147.983	9 I 社	1088	976.172	111.827	10 S P				11 Z P				12 A 社(新)	820	1038.47	-218.47	<table border="1"> <tr> <th></th> <th>y</th> <th>y hat</th> <th>e</th> </tr> <tr> <th></th> <th>ストース</th> <th>理論値</th> <th>残差</th> </tr> <tr><td>1 A 社</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2 B 社</td><td>282</td><td>144.657</td><td>137.342</td></tr> <tr><td>3 C 社</td><td>208</td><td>447.616</td><td>-239.61</td></tr> <tr><td>4 D 社</td><td>425</td><td>429.753</td><td>-4.753</td></tr> <tr><td>5 E 社</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6 F 社</td><td>627</td><td>764.506</td><td>-137.50</td></tr> <tr><td>7 G 社</td><td>1173</td><td>957.707</td><td>215.292</td></tr> <tr><td>8 H 社</td><td>948</td><td>824.755</td><td>123.244</td></tr> <tr><td>9 I 社</td><td>1172</td><td>1081.51</td><td>10.486</td></tr> <tr><td>10 S P</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>11 Z P</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12 A 社(新)</td><td>923</td><td>1127.49</td><td>-204.49</td></tr> </table>		y	y hat	e		ストース	理論値	残差	1 A 社				2 B 社	282	144.657	137.342	3 C 社	208	447.616	-239.61	4 D 社	425	429.753	-4.753	5 E 社				6 F 社	627	764.506	-137.50	7 G 社	1173	957.707	215.292	8 H 社	948	824.755	123.244	9 I 社	1172	1081.51	10.486	10 S P				11 Z P				12 A 社(新)	923	1127.49	-204.49
	y	y hat	e																																																																																																														
	ストース	理論値	残差																																																																																																														
1 A 社																																																																																																																	
2 B 社	213	65.2994	146.700																																																																																																														
3 C 社	95	347.986	-252.36																																																																																																														
4 D 社	287	310.223	-23.223																																																																																																														
5 E 社																																																																																																																	
6 F 社	543	664.289	-121.28																																																																																																														
7 G 社	1065	856.138	208.861																																																																																																														
8 H 社	855	707.016	147.983																																																																																																														
9 I 社	1088	976.172	111.827																																																																																																														
10 S P																																																																																																																	
11 Z P																																																																																																																	
12 A 社(新)	820	1038.47	-218.47																																																																																																														
	y	y hat	e																																																																																																														
	ストース	理論値	残差																																																																																																														
1 A 社																																																																																																																	
2 B 社	282	144.657	137.342																																																																																																														
3 C 社	208	447.616	-239.61																																																																																																														
4 D 社	425	429.753	-4.753																																																																																																														
5 E 社																																																																																																																	
6 F 社	627	764.506	-137.50																																																																																																														
7 G 社	1173	957.707	215.292																																																																																																														
8 H 社	948	824.755	123.244																																																																																																														
9 I 社	1172	1081.51	10.486																																																																																																														
10 S P																																																																																																																	
11 Z P																																																																																																																	
12 A 社(新)	923	1127.49	-204.49																																																																																																														

表-8. 12 セメントペースト自己収縮量に

—説明変数: (スラグ)混合率+

分 析 NO.		分 析 ①	分 析 ②																																																																																																																
分 析 条 件	目的変数 Y	セメントペースト自己収縮(材齢9日)	セメントペースト自己収縮(材齢16日)																																																																																																																
	説明変数 X 1	スラグ混合率+Aライト率	スラグ混合率+Aライト率																																																																																																																
	説明変数 X 2	セメント粉末度	セメント粉末度																																																																																																																
	採用 \bar{r} - t 数 n	n=8	n=8																																																																																																																
分 析 結 果	寄与率(決定係数)	0.752	0.795																																																																																																																
	重 相 関 係 数	0.867	0.891																																																																																																																
	回 帰 式	$Y=13.453 \times X1 - 0.0944 \times X2 - 1.453$	$Y=17.665 \times X1 - 0.0718 \times X2 - 129.8$																																																																																																																
	標準化偏回帰係数	<table><tr><td colspan="2">【標準化偏回帰係数】</td></tr><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1 (A+スラグ)</td><td>0.64586</td></tr><tr><td>b2 (セメント粉末度)</td><td>-0.1417</td></tr></table>	【標準化偏回帰係数】			値	b1 (A+スラグ)	0.64586	b2 (セメント粉末度)	-0.1417	<table><tr><td colspan="2">【標準化偏回帰係数】</td></tr><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1 (A+スラグ)</td><td>0.66167</td></tr><tr><td>b2 (セメント粉末度)</td><td>-0.0656</td></tr></table>	【標準化偏回帰係数】			値	b1 (A+スラグ)	0.66167	b2 (セメント粉末度)	-0.0656																																																																																																
【標準化偏回帰係数】																																																																																																																			
	値																																																																																																																		
b1 (A+スラグ)	0.64586																																																																																																																		
b2 (セメント粉末度)	-0.1417																																																																																																																		
【標準化偏回帰係数】																																																																																																																			
	値																																																																																																																		
b1 (A+スラグ)	0.66167																																																																																																																		
b2 (セメント粉末度)	-0.0656																																																																																																																		
	理論値と残差	<table><tr><td colspan="4">【理論値と残差】</td></tr><tr><td></td><td>y セ/収縮</td><td>yhat 理論値</td><td>e 残差</td></tr><tr><td>1 A 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2 B 社</td><td>60</td><td>-45.288</td><td>105.288</td></tr><tr><td>3 C 社</td><td>-53</td><td>114.312</td><td>-167.31</td></tr><tr><td>4 D 社</td><td>23</td><td>42.8177</td><td>-19.817</td></tr><tr><td>5 E 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>6 F 社</td><td>212</td><td>350.276</td><td>-138.27</td></tr><tr><td>7 G 社</td><td>656</td><td>450.038</td><td>167.961</td></tr><tr><td>8 H 社</td><td>465</td><td>342.297</td><td>122.702</td></tr><tr><td>9 I 社</td><td>747</td><td>518.255</td><td>130.744</td></tr><tr><td>10 S P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>11 Z P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>12 A 社(新)</td><td>453</td><td>654.230</td><td>-201.29</td></tr></table>	【理論値と残差】					y セ/収縮	yhat 理論値	e 残差	1 A 社				2 B 社	60	-45.288	105.288	3 C 社	-53	114.312	-167.31	4 D 社	23	42.8177	-19.817	5 E 社				6 F 社	212	350.276	-138.27	7 G 社	656	450.038	167.961	8 H 社	465	342.297	122.702	9 I 社	747	518.255	130.744	10 S P				11 Z P				12 A 社(新)	453	654.230	-201.29	<table><tr><td colspan="4">【理論値と残差】</td></tr><tr><td></td><td>y セ/収縮</td><td>yhat 理論値</td><td>e 残差</td></tr><tr><td>1 A 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2 B 社</td><td>112</td><td>-18.617</td><td>130.617</td></tr><tr><td>3 C 社</td><td>18</td><td>225.703</td><td>-207.70</td></tr><tr><td>4 D 社</td><td>112</td><td>163.132</td><td>-51.132</td></tr><tr><td>5 E 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>6 F 社</td><td>423</td><td>534.512</td><td>-111.51</td></tr><tr><td>7 G 社</td><td>905</td><td>719.605</td><td>185.394</td></tr><tr><td>8 H 社</td><td>715</td><td>552.216</td><td>162.783</td></tr><tr><td>9 I 社</td><td>968</td><td>656.730</td><td>129.269</td></tr><tr><td>10 S P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>11 Z P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>12 A 社(新)</td><td>677</td><td>914.415</td><td>-237.41</td></tr></table>	【理論値と残差】					y セ/収縮	yhat 理論値	e 残差	1 A 社				2 B 社	112	-18.617	130.617	3 C 社	18	225.703	-207.70	4 D 社	112	163.132	-51.132	5 E 社				6 F 社	423	534.512	-111.51	7 G 社	905	719.605	185.394	8 H 社	715	552.216	162.783	9 I 社	968	656.730	129.269	10 S P				11 Z P				12 A 社(新)	677	914.415	-237.41
【理論値と残差】																																																																																																																			
	y セ/収縮	yhat 理論値	e 残差																																																																																																																
1 A 社																																																																																																																			
2 B 社	60	-45.288	105.288																																																																																																																
3 C 社	-53	114.312	-167.31																																																																																																																
4 D 社	23	42.8177	-19.817																																																																																																																
5 E 社																																																																																																																			
6 F 社	212	350.276	-138.27																																																																																																																
7 G 社	656	450.038	167.961																																																																																																																
8 H 社	465	342.297	122.702																																																																																																																
9 I 社	747	518.255	130.744																																																																																																																
10 S P																																																																																																																			
11 Z P																																																																																																																			
12 A 社(新)	453	654.230	-201.29																																																																																																																
【理論値と残差】																																																																																																																			
	y セ/収縮	yhat 理論値	e 残差																																																																																																																
1 A 社																																																																																																																			
2 B 社	112	-18.617	130.617																																																																																																																
3 C 社	18	225.703	-207.70																																																																																																																
4 D 社	112	163.132	-51.132																																																																																																																
5 E 社																																																																																																																			
6 F 社	423	534.512	-111.51																																																																																																																
7 G 社	905	719.605	185.394																																																																																																																
8 H 社	715	552.216	162.783																																																																																																																
9 I 社	968	656.730	129.269																																																																																																																
10 S P																																																																																																																			
11 Z P																																																																																																																			
12 A 社(新)	677	914.415	-237.41																																																																																																																
	Y~Yhat散布図																																																																																																																		

注) 自己収縮ひずみの値はプラスを収縮側としている。

ペースト自己収縮量に対する重回帰分析結果

変数：（スラグ混合率+Aライト混合率）、セメント粉末度

分 析 ②	分 析 ③	分 析 ④
ペースト自己収縮(材齢16日)	セメントペースト自己収縮(材齢30日)	セメントペースト自己収縮(材齢44日)
混合率+Aライト率	スラグ混合率+Aライト率	スラグ混合率+Aライト率
粉末度	セメント粉末度	セメント粉末度
	n=8	n=8
	0.789	0.880
	0.888	0.894
$*X1-0.0718*X2-129.83$	$Y=18.180*X1-0.0286*X2-195.51$	$Y=18.216*X1+0.00362*X2-222.3$

標準化偏回帰係数

	値
b1 A+スラグ	0.68167
b2 セメント粉末度	-0.0856

【標準化偏回帰係数】

	値
b1 A+スラグ	0.88522
b2 セメント粉末度	-0.0332

【標準化偏回帰係数】

	値
b1 A+スラグ	0.89454
b2 セメント粉末度	0.00424

残差

	y	y hat	e
	収縮	理論値	残差
1	112	-18.317	130.317
2	18	225.703	-207.70
3	112	163.132	-51.132
4	423	534.512	-111.51
5	905	719.605	185.394
6	715	552.216	162.783
7	988	858.730	129.269
8	877	914.438	-237.41

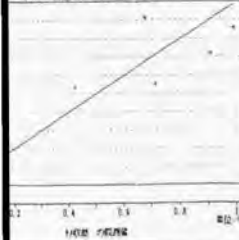
【理論値と残差】

		y	yhat	e	
		収縮	理論値	残差	
1	A 社				
2	B 社		213	66.2994	146.700
3	C 社		95	347.386	-252.38
4	D 社		287	310.223	-23.223
5	E 社				
5	F 社		543	664.289	-121.28
7	G 社		1065	856.138	208.861
8	H 社		855	707.016	147.983
9	I 社		1088	978.172	111.827
10	3 P				
11	2 P				
12	A 社 (新)		820	1038.47	-218.47

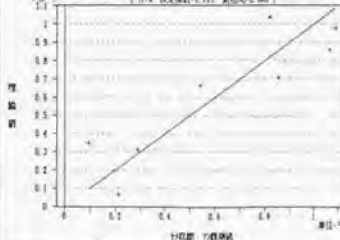
【理論値と残差】

		y	y hat	e
		収縮	理論値	残差
1	A 社			
2	B 社	282	144.657	137.342
3	C 社	208	447.616	-239.61
4	D 社	425	429.753	-4.753
5	E 社			
6	F 社	627	764.506	-137.50
7	G 社	1173	957.707	215.292
8	H 社	948	824.755	123.244
9	I 社	1172	1061.51	110.489
10	S P			
11	Z P			
12	A 社 (新)	923	1127.49	-204.49

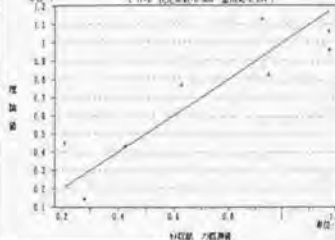
(n=8 決定係数=0.785 調整R=0.681)



(n=8 決定係数=0.791 調整R=0.688)



(n=8 決定係数=0.890 調整R=0.894)



分析結果

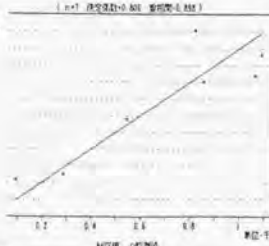
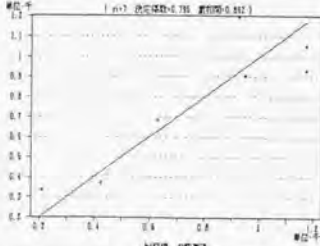
分 分 析 ⑦		分 分 析 ⑧																																																																																																																	
分 ①-④自己収縮(材齢30日)		セメント①-④自己収縮(材齢44日)																																																																																																																	
析 混合率		スラグ混合率																																																																																																																	
条 粉末度		スラグ粉末度																																																																																																																	
件 (B社データ除く)		n=7 (B社データ除く)																																																																																																																	
0.6		0.796																																																																																																																	
0.8		0.892																																																																																																																	
73*X1+0.0543*X2-917.59		Y=27.284*X1+0.0570*X2-794.05																																																																																																																	
分 【標準化偏回帰係数】		【標準化偏回帰係数】																																																																																																																	
<table border="1"> <tr><th colspan="2">値</th></tr> <tr><td>b1</td><td>スラグ混合率0.00786</td></tr> <tr><td>b2</td><td>スラグ粉末0.14463</td></tr> </table>		値		b1	スラグ混合率0.00786	b2	スラグ粉末0.14463	<table border="1"> <tr><th colspan="2">値</th></tr> <tr><td>b1</td><td>スラグ混合率0.01038</td></tr> <tr><td>b2</td><td>スラグ粉末0.15597</td></tr> </table>		値		b1	スラグ混合率0.01038	b2	スラグ粉末0.15597																																																																																																				
値																																																																																																																			
b1	スラグ混合率0.00786																																																																																																																		
b2	スラグ粉末0.14463																																																																																																																		
値																																																																																																																			
b1	スラグ混合率0.01038																																																																																																																		
b2	スラグ粉末0.15597																																																																																																																		
析 【と残差】		【理論値と残差】																																																																																																																	
<table border="1"> <tr><th></th><th>y</th><th>y hat</th><th>e</th></tr> <tr><th></th><th>①収縮</th><th>理論値</th><th>残差</th></tr> <tr><td>A 社</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>B 社</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>C 社</td><td>95</td><td>217.763</td><td>-122.76</td></tr> <tr><td>D 社</td><td>287</td><td>249.282</td><td>37.7172</td></tr> <tr><td>E 社</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F 社</td><td>543</td><td>580.290</td><td>-37.290</td></tr> <tr><td>G 社</td><td>1065</td><td>835.561</td><td>229.438</td></tr> <tr><td>H 社</td><td>855</td><td>801.669</td><td>53.3300</td></tr> <tr><td>I 社</td><td>1088</td><td>962.382</td><td>125.617</td></tr> <tr><td>3 P</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2 P</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>A 社(新)</td><td>820</td><td>1106.04</td><td>-286.04</td></tr> </table>			y	y hat	e		①収縮	理論値	残差	A 社				B 社				C 社	95	217.763	-122.76	D 社	287	249.282	37.7172	E 社				F 社	543	580.290	-37.290	G 社	1065	835.561	229.438	H 社	855	801.669	53.3300	I 社	1088	962.382	125.617	3 P				2 P				A 社(新)	820	1106.04	-286.04	<table border="1"> <tr><th></th><th>y</th><th>y hat</th><th>e</th></tr> <tr><th></th><th>①収縮</th><th>理論値</th><th>残差</th></tr> <tr><td>1 A 社</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2 B 社</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3 C 社</td><td>208</td><td>335.227</td><td>-127.22</td></tr> <tr><td>4 D 社</td><td>425</td><td>368.298</td><td>56.7012</td></tr> <tr><td>5 E 社</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6 F 社</td><td>627</td><td>684.618</td><td>-57.618</td></tr> <tr><td>7 G 社</td><td>1173</td><td>831.800</td><td>241.199</td></tr> <tr><td>8 H 社</td><td>948</td><td>806.569</td><td>141.4307</td></tr> <tr><td>9 I 社</td><td>1172</td><td>1054.55</td><td>117.453</td></tr> <tr><td>10 3 P</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>11 2 P</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12 A 社(新)</td><td>923</td><td>1194.94</td><td>-271.94</td></tr> </table>			y	y hat	e		①収縮	理論値	残差	1 A 社				2 B 社				3 C 社	208	335.227	-127.22	4 D 社	425	368.298	56.7012	5 E 社				6 F 社	627	684.618	-57.618	7 G 社	1173	831.800	241.199	8 H 社	948	806.569	141.4307	9 I 社	1172	1054.55	117.453	10 3 P				11 2 P				12 A 社(新)	923	1194.94	-271.94
	y	y hat	e																																																																																																																
	①収縮	理論値	残差																																																																																																																
A 社																																																																																																																			
B 社																																																																																																																			
C 社	95	217.763	-122.76																																																																																																																
D 社	287	249.282	37.7172																																																																																																																
E 社																																																																																																																			
F 社	543	580.290	-37.290																																																																																																																
G 社	1065	835.561	229.438																																																																																																																
H 社	855	801.669	53.3300																																																																																																																
I 社	1088	962.382	125.617																																																																																																																
3 P																																																																																																																			
2 P																																																																																																																			
A 社(新)	820	1106.04	-286.04																																																																																																																
	y	y hat	e																																																																																																																
	①収縮	理論値	残差																																																																																																																
1 A 社																																																																																																																			
2 B 社																																																																																																																			
3 C 社	208	335.227	-127.22																																																																																																																
4 D 社	425	368.298	56.7012																																																																																																																
5 E 社																																																																																																																			
6 F 社	627	684.618	-57.618																																																																																																																
7 G 社	1173	831.800	241.199																																																																																																																
8 H 社	948	806.569	141.4307																																																																																																																
9 I 社	1172	1054.55	117.453																																																																																																																
10 3 P																																																																																																																			
11 2 P																																																																																																																			
12 A 社(新)	923	1194.94	-271.94																																																																																																																
結																																																																																																																			
果																																																																																																																			
																																																																																																																			

表-8. 13 セメントペースト自己収縮量に
—説明変数：スラグ混合率、スラグ粉末度

分 析 NO.		分 析 ⑤	分 析 ⑥																																																																																																																
分 析 条 件	目的変数 Y	セメントペースト自己収縮(材齢9日)	セメントペースト自己収縮(材齢16日)																																																																																																																
	説明変数 X 1	スラグ混合率	スラグ混合率																																																																																																																
	説明変数 X 2	スラグ粉末度	スラグ粉末度																																																																																																																
	採用データ数 n	n=7 (B社データ除く)	n=7 (B社データ除く)																																																																																																																
分 析 結 果	寄与率(決定係数)	0.783	0.812																																																																																																																
	重 相 関 係 数	0.885	0.901																																																																																																																
	回 帰 式	$Y=20.540 \times X_1 + 0.0151 \times X_2 - 696.92$	$Y=26.591 \times X_1 + 0.0347 \times X_2 - 888.$																																																																																																																
	標準化偏回帰係数	<table><tr><th colspan="2">【標準化偏回帰係数】</th></tr><tr><th></th><th>値</th></tr><tr><td>b1 スラグ混合率</td><td>0.92439</td></tr><tr><td>b2 スラグ粉末度</td><td>0.05028</td></tr></table>	【標準化偏回帰係数】			値	b1 スラグ混合率	0.92439	b2 スラグ粉末度	0.05028	<table><tr><th colspan="2">【標準化偏回帰係数】</th></tr><tr><th></th><th>値</th></tr><tr><td>b1 スラグ混合率</td><td>0.97376</td></tr><tr><td>b2 スラグ粉末度</td><td>0.09385</td></tr></table>	【標準化偏回帰係数】			値	b1 スラグ混合率	0.97376	b2 スラグ粉末度	0.09385																																																																																																
【標準化偏回帰係数】																																																																																																																			
	値																																																																																																																		
b1 スラグ混合率	0.92439																																																																																																																		
b2 スラグ粉末度	0.05028																																																																																																																		
【標準化偏回帰係数】																																																																																																																			
	値																																																																																																																		
b1 スラグ混合率	0.97376																																																																																																																		
b2 スラグ粉末度	0.09385																																																																																																																		
理論値と残差		<table><tr><th colspan="4">【理論値と残差】</th></tr><tr><th></th><th>y 自己収縮</th><th>y hat 理論値</th><th>e 残差</th></tr><tr><td>1 A 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2 B 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>3 C 社</td><td>-53</td><td>0.72454</td><td>-54.724</td></tr><tr><td>4 D 社</td><td>23</td><td>0.4985</td><td>12.5014</td></tr><tr><td>5 E 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>6 F 社</td><td>212</td><td>293.941</td><td>-81.941</td></tr><tr><td>7 G 社</td><td>658</td><td>492.534</td><td>165.465</td></tr><tr><td>8 H 社</td><td>465</td><td>419.333</td><td>45.6669</td></tr><tr><td>9 I 社</td><td>747</td><td>591.604</td><td>155.395</td></tr><tr><td>10 3 P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>11 2 P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>12 A 社(新)</td><td>453</td><td>695.363</td><td>-242.36</td></tr></table>	【理論値と残差】					y 自己収縮	y hat 理論値	e 残差	1 A 社				2 B 社				3 C 社	-53	0.72454	-54.724	4 D 社	23	0.4985	12.5014	5 E 社				6 F 社	212	293.941	-81.941	7 G 社	658	492.534	165.465	8 H 社	465	419.333	45.6669	9 I 社	747	591.604	155.395	10 3 P				11 2 P				12 A 社(新)	453	695.363	-242.36	<table><tr><th colspan="4">【理論値と残差】</th></tr><tr><th></th><th>y 自己収縮</th><th>y hat 理論値</th><th>e 残差</th></tr><tr><td>1 A 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2 B 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>3 C 社</td><td>18</td><td>97.8900</td><td>-79.8</td></tr><tr><td>4 D 社</td><td>112</td><td>118.013</td><td>-6.01</td></tr><tr><td>5 E 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>6 F 社</td><td>423</td><td>460.317</td><td>-37.3</td></tr><tr><td>7 G 社</td><td>905</td><td>710.610</td><td>194.3</td></tr><tr><td>8 H 社</td><td>715</td><td>645.315</td><td>69.68</td></tr><tr><td>9 I 社</td><td>988</td><td>835.293</td><td>152.7</td></tr><tr><td>10 3 P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>11 2 P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>12 A 社(新)</td><td>677</td><td>870.617</td><td>-193.</td></tr></table>	【理論値と残差】					y 自己収縮	y hat 理論値	e 残差	1 A 社				2 B 社				3 C 社	18	97.8900	-79.8	4 D 社	112	118.013	-6.01	5 E 社				6 F 社	423	460.317	-37.3	7 G 社	905	710.610	194.3	8 H 社	715	645.315	69.68	9 I 社	988	835.293	152.7	10 3 P				11 2 P				12 A 社(新)	677	870.617	-193.
【理論値と残差】																																																																																																																			
	y 自己収縮	y hat 理論値	e 残差																																																																																																																
1 A 社																																																																																																																			
2 B 社																																																																																																																			
3 C 社	-53	0.72454	-54.724																																																																																																																
4 D 社	23	0.4985	12.5014																																																																																																																
5 E 社																																																																																																																			
6 F 社	212	293.941	-81.941																																																																																																																
7 G 社	658	492.534	165.465																																																																																																																
8 H 社	465	419.333	45.6669																																																																																																																
9 I 社	747	591.604	155.395																																																																																																																
10 3 P																																																																																																																			
11 2 P																																																																																																																			
12 A 社(新)	453	695.363	-242.36																																																																																																																
【理論値と残差】																																																																																																																			
	y 自己収縮	y hat 理論値	e 残差																																																																																																																
1 A 社																																																																																																																			
2 B 社																																																																																																																			
3 C 社	18	97.8900	-79.8																																																																																																																
4 D 社	112	118.013	-6.01																																																																																																																
5 E 社																																																																																																																			
6 F 社	423	460.317	-37.3																																																																																																																
7 G 社	905	710.610	194.3																																																																																																																
8 H 社	715	645.315	69.68																																																																																																																
9 I 社	988	835.293	152.7																																																																																																																
10 3 P																																																																																																																			
11 2 P																																																																																																																			
12 A 社(新)	677	870.617	-193.																																																																																																																
Y ~ Yhat 散布図																																																																																																																			

注) 自己収縮ひずみの値はプラスを収縮側としている。

ペースト自己収縮量に対する重回帰分析結果

変数: スラグ混合率、スラグ粉末度

分 析 ⑥	分 析 ⑦	分 析 ⑧
ペースト自己収縮(材齢16日)	セメントペースト自己収縮(材齢30日)	セメントペースト自己収縮(材齢44日)
混合率	スラグ混合率	スラグ混合率
粉末度	スラグ粉末度	スラグ粉末度
(B社データ除く)	n=7 (B社データ除く)	n=7 (B社データ除く)
2	0.806	0.796
1	0.898	0.892
$1 \times X1 + 0.0347 \times X2 - 888.92$	$Y = 27.973 \times X1 + 0.0543 \times X2 - 917.59$	$Y = 27.284 \times X1 + 0.0570 \times X2 - 794.05$

【標準化偏回帰係数】

	値
b1 スラグ混合率	0.93736
b2 スラグ粉末度	0.09385

【標準化偏回帰係数】

	値
b1 スラグ混合率	1.00786
b2 スラグ粉末度	0.14463

【標準化偏回帰係数】

	値
b1 スラグ混合率	1.01038
b2 スラグ粉末度	0.15597

【残差】

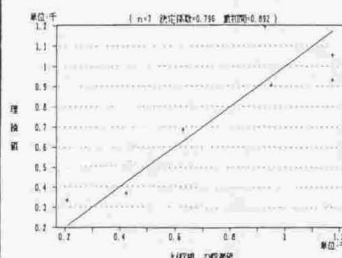
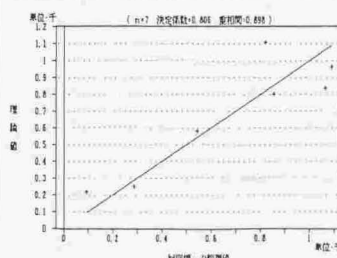
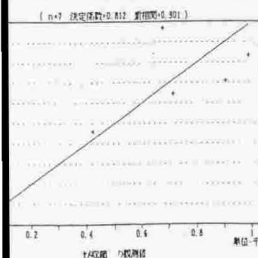
	y 自己収縮	yhat 理論値	e 残差
1 A社			
2 B社			
3 C社	18	97.8900	-79.890
4 D社	112	118.013	-6.0139
5 E社			
6 F社	423	460.317	-37.317
7 G社	905	710.610	194.389
8 H社	715	645.315	69.6849
9 I社	988	835.235	152.764
10 J社			
11 K社			
12 A社(新)	677	870.617	-293.61

【理論値と残差】

	y 自己収縮	yhat 理論値	e 残差
1 A社			
2 B社			
3 C社	85	217.763	-122.76
4 D社	287	249.282	37.7172
5 E社			
6 F社	543	580.290	-37.290
7 G社	1065	835.561	229.438
8 H社	855	801.669	53.3300
9 I社	1088	962.382	125.617
10 J社			
11 K社			
12 A社(新)	820	1106.04	-286.04

【理論値と残差】

	y 自己収縮	yhat 理論値	e 残差
1 A社			
2 B社			
3 C社	208	335.227	-127.22
4 D社	425	368.298	56.7012
5 E社			
6 F社	627	584.618	-57.618
7 G社	1173	931.800	241.199
8 H社	948	906.569	41.4307
9 I社	1172	1054.59	117.463
10 J社			
11 K社			
12 A社(新)	923	1194.94	-271.94



スラグ 粉末度

分 析 ⑪		分 析 ⑫	
分 析 条 件	目 己収縮(材齢30日)	セメントペースト自己収縮(材齢44日)	
	説+ Aライト率-Bライト率	スラグ混合率+ Aライト率-Bライト率	
	説1度	セメント粉末度	
	採	n=8	
分 析 結 果	寄	0.798	
	重	0.894	
	回+0.0526×X2+125.78	Y=10.694×X1+0.0840×X2+105.27	
	偏回帰係数]	【標準化偏回帰係数】	
	標 値	標 値	
	A+スラグ-B0.90191	b1 A+スラグ-B0.90301	
	B+粉末度0.06105	b2 B+粉末度0.09843	
	Y yhat e	【理論値と残差】	
	収縮 理論値 残差	収縮 理論値 残差	
	213 78.4171 134.582	1 A 社 282 160.953 121.046	
	95 438.235 -343.235	2 B 社 208 539.900 -331.90	
	287 173.122 113.877	3 C 社 425 295.162 129.837	
	543 704.275 -161.27	4 D 社 527 803.964 -176.96	
	1065 911.678 153.321	5 E 社 1173 1011.27 161.725	
	855 782.635 72.3648	6 F 社 948 899.084 48.9355	
	1088 996.653 91.3460	7 G 社 1172 1079.63 92.3699	
	820 880.981 -60.981	8 H 社 923 968.040 -45.040	
		9 I 社 1172 1079.63 92.3699	
		10 S P	
		11 2 P	
		12 A 社(新)	
	Y	理論値	
	収縮	理論値	
	213 78.4171 134.582	1 A 社 282 160.953 121.046	
	95 438.235 -343.235	2 B 社 208 539.900 -331.90	
	287 173.122 113.877	3 C 社 425 295.162 129.837	
	543 704.275 -161.27	4 D 社 527 803.964 -176.96	
	1065 911.678 153.321	5 E 社 1173 1011.27 161.725	
	855 782.635 72.3648	6 F 社 948 899.084 48.9355	
	1088 996.653 91.3460	7 G 社 1172 1079.63 92.3699	
	820 880.981 -60.981	8 H 社 923 968.040 -45.040	
		9 I 社 1172 1079.63 92.3699	
		10 S P	
		11 2 P	
		12 A 社(新)	

表-8. 14 セメントペースト自己収縮量に対する

—説明変数: スラグ混合率+Aライtrate-Bライtrate

分 析 NO.		分 析 ⑨	分 析 ⑩																																																																																																																								
分 析 条 件	目的変数 Y	セメントペースト自己収縮(材齢9日)	セメントペースト自己収縮(材齢16日)																																																																																																																								
	説明変数 X 1	スラグ混合率+Aライtrate-Bライtrate	スラグ混合率+Aライtrate-Bライtrate																																																																																																																								
	説明変数 X 2	セメント粉末度	セメント粉末度																																																																																																																								
	採用 \hat{r} -t数 n	n=8	n=8																																																																																																																								
分 析 結 果	寄与率(決定係数)	0.782	0.828																																																																																																																								
	重相関係数	0.884	0.910																																																																																																																								
	回 帰 式	$Y=8.069 \times X1-0.0330 \times X2+227.67$	$Y=10.600 \times X1+0.0089 \times X2+170.7$																																																																																																																								
	標準化偏回帰係数	<table><tr><td colspan="2">【標準化偏回帰係数】</td></tr><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1 A+スラグ</td><td>-80.87437</td></tr><tr><td>b2 セメント粉末度</td><td>-0.0495</td></tr></table>	【標準化偏回帰係数】			値	b1 A+スラグ	-80.87437	b2 セメント粉末度	-0.0495	<table><tr><td colspan="2">【標準化偏回帰係数】</td></tr><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1 A+スラグ</td><td>-80.91171</td></tr><tr><td>b2 セメント粉末度</td><td>0.01057</td></tr></table>	【標準化偏回帰係数】			値	b1 A+スラグ	-80.91171	b2 セメント粉末度	0.01057																																																																																																								
【標準化偏回帰係数】																																																																																																																											
	値																																																																																																																										
b1 A+スラグ	-80.87437																																																																																																																										
b2 セメント粉末度	-0.0495																																																																																																																										
【標準化偏回帰係数】																																																																																																																											
	値																																																																																																																										
b1 A+スラグ	-80.91171																																																																																																																										
b2 セメント粉末度	0.01057																																																																																																																										
	理論値と残差	<table><tr><td colspan="4">【理論値と残差】</td></tr><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>収縮</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1 A 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2 B 社</td><td>50</td><td>-42.585</td><td>102.585</td></tr><tr><td>3 C 社</td><td>-53</td><td>179.617</td><td>-232.617</td></tr><tr><td>4 D 社</td><td>29</td><td>-52.897</td><td>85.897</td></tr><tr><td>5 E 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>6 F 社</td><td>212</td><td>380.794</td><td>-168.79</td></tr><tr><td>7 G 社</td><td>558</td><td>534.328</td><td>123.671</td></tr><tr><td>8 H 社</td><td>465</td><td>400.490</td><td>64.5098</td></tr><tr><td>9 I 社</td><td>717</td><td>635.082</td><td>111.917</td></tr><tr><td>10 3 P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>11 2 P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>12 A 社(新)</td><td>453</td><td>540.270</td><td>-87.270</td></tr></table>	【理論値と残差】					y	yhat	e		収縮	理論値	残差	1 A 社				2 B 社	50	-42.585	102.585	3 C 社	-53	179.617	-232.617	4 D 社	29	-52.897	85.897	5 E 社				6 F 社	212	380.794	-168.79	7 G 社	558	534.328	123.671	8 H 社	465	400.490	64.5098	9 I 社	717	635.082	111.917	10 3 P				11 2 P				12 A 社(新)	453	540.270	-87.270	<table><tr><td colspan="4">【理論値と残差】</td></tr><tr><td></td><td>y</td><td>yhat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>収縮</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1 A 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2 B 社</td><td>112</td><td>-15.112</td><td>127.112</td></tr><tr><td>3 C 社</td><td>18</td><td>311.393</td><td>-293.39</td></tr><tr><td>4 D 社</td><td>112</td><td>24.1722</td><td>87.8277</td></tr><tr><td>5 E 社</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>6 F 社</td><td>423</td><td>574.618</td><td>-151.61</td></tr><tr><td>7 G 社</td><td>905</td><td>777.870</td><td>127.129</td></tr><tr><td>8 H 社</td><td>715</td><td>628.705</td><td>66.2944</td></tr><tr><td>9 I 社</td><td>988</td><td>889.575</td><td>104.424</td></tr><tr><td>10 3 P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>11 2 P</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>12 A 社(新)</td><td>677</td><td>764.776</td><td>-87.776</td></tr></table>	【理論値と残差】					y	yhat	e		収縮	理論値	残差	1 A 社				2 B 社	112	-15.112	127.112	3 C 社	18	311.393	-293.39	4 D 社	112	24.1722	87.8277	5 E 社				6 F 社	423	574.618	-151.61	7 G 社	905	777.870	127.129	8 H 社	715	628.705	66.2944	9 I 社	988	889.575	104.424	10 3 P				11 2 P				12 A 社(新)	677	764.776	-87.776
【理論値と残差】																																																																																																																											
	y	yhat	e																																																																																																																								
	収縮	理論値	残差																																																																																																																								
1 A 社																																																																																																																											
2 B 社	50	-42.585	102.585																																																																																																																								
3 C 社	-53	179.617	-232.617																																																																																																																								
4 D 社	29	-52.897	85.897																																																																																																																								
5 E 社																																																																																																																											
6 F 社	212	380.794	-168.79																																																																																																																								
7 G 社	558	534.328	123.671																																																																																																																								
8 H 社	465	400.490	64.5098																																																																																																																								
9 I 社	717	635.082	111.917																																																																																																																								
10 3 P																																																																																																																											
11 2 P																																																																																																																											
12 A 社(新)	453	540.270	-87.270																																																																																																																								
【理論値と残差】																																																																																																																											
	y	yhat	e																																																																																																																								
	収縮	理論値	残差																																																																																																																								
1 A 社																																																																																																																											
2 B 社	112	-15.112	127.112																																																																																																																								
3 C 社	18	311.393	-293.39																																																																																																																								
4 D 社	112	24.1722	87.8277																																																																																																																								
5 E 社																																																																																																																											
6 F 社	423	574.618	-151.61																																																																																																																								
7 G 社	905	777.870	127.129																																																																																																																								
8 H 社	715	628.705	66.2944																																																																																																																								
9 I 社	988	889.575	104.424																																																																																																																								
10 3 P																																																																																																																											
11 2 P																																																																																																																											
12 A 社(新)	677	764.776	-87.776																																																																																																																								
	Y~Yhat散布図																																																																																																																										

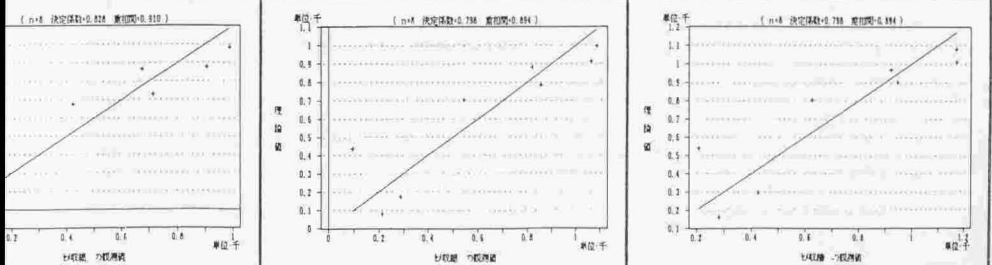
注) 自己収縮ひずみの値はプラスを収縮側としている。

ト自己収縮量に対する重回帰分析結果

スラグ混合率+エアライト混合率+セメント粉末度

分 析 ⑩	分 析 ⑪	分 析 ⑫																		
スラグ自己収縮(材齢16日)	セメントペースト自己収縮(材齢30日)	セメントペースト自己収縮(材齢44日)																		
率+Aライト率-Bライト率	スラグ混合率+Aライト率-Bライト率	スラグ混合率+Aライト率-Bライト率																		
粉末度	セメント粉末度	セメント粉末度																		
	n=8	n=8																		
	0.798	0.798																		
	0.894	0.894																		
$*X1+0.0089*X2+170.74$	$Y=10.748*X1+0.0526*X2+125.78$	$Y=10.694*X1+0.0840*X2+105.27$																		
【標準化偏回帰係数】	【標準化偏回帰係数】	【標準化偏回帰係数】																		
<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1 A+スラグ-BD.91171</td><td></td></tr><tr><td>b2 スラグ粉末度0.01057</td><td></td></tr></table>		値	b1 A+スラグ-BD.91171		b2 スラグ粉末度0.01057		<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1 A+スラグ-BD.90191</td><td></td></tr><tr><td>b2 スラグ粉末度0.06105</td><td></td></tr></table>		値	b1 A+スラグ-BD.90191		b2 スラグ粉末度0.06105		<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1 A+スラグ-BD.90501</td><td></td></tr><tr><td>b2 スラグ粉末度0.09843</td><td></td></tr></table>		値	b1 A+スラグ-BD.90501		b2 スラグ粉末度0.09843	
	値																			
b1 A+スラグ-BD.91171																				
b2 スラグ粉末度0.01057																				
	値																			
b1 A+スラグ-BD.90191																				
b2 スラグ粉末度0.06105																				
	値																			
b1 A+スラグ-BD.90501																				
b2 スラグ粉末度0.09843																				

【残差】				【理論値と残差】				【理論値と残差】			
セ/収縮				セ/収縮				セ/収縮			
y	yhat	e		y	yhat	e		y	yhat	e	
理論値	残差			理論値	残差			理論値	残差		
1 A 社	112	-15.112	127.112	1 A 社	213	78.4171	134.582	1 A 社	282	160.953	121.046
2 B 社	18	811.393	-293.39	2 B 社	95	438.235	-343.23	2 B 社	208	539.900	-331.90
3 C 社	112	24.1722	87.8277	3 C 社	287	173.122	113.877	3 C 社	425	295.162	129.837
4 D 社	423	574.618	-151.61	4 D 社	543	704.275	-161.27	4 D 社	627	803.964	-176.96
5 E 社	905	777.870	127.129	5 E 社	1065	911.678	153.321	5 E 社	1173	1011.27	161.725
6 F 社	715	628.705	86.2944	6 F 社	855	782.635	72.3648	6 F 社	948	899.064	48.9355
7 G 社	988	889.575	104.424	7 G 社	1088	996.653	91.3460	7 G 社	1172	1079.63	92.3609
8 H 社				8 H 社				8 H 社			
9 I 社				9 I 社				9 I 社			
10 J 社				10 J 社				10 J 社			
11 K 社				11 K 社				11 K 社			
12 L 社				12 L 社				12 L 社			
(新)	677	764.776	-87.776	12 A 社(新)	820	880.981	-60.981	12 A 社(新)	923	968.040	-45.040



9 耐ひび割れ特性の改善に関する提案

前章までの検討結果を総合して、マスコンクリートの望ましい物理特性、および低発熱型セメントの改善の方向性について述べる。

9.1 マスコンクリートの望ましい温度上昇特性、物理特性

マスコンクリートの温度応力に対する耐ひび割れ特性を総合的に評価するには、適切な方法による温度応力解析を実施し、ひび割れ指数で評価することが望ましい。しかし、実際には前述したとおり、従来の温度応力解析の適用手法では温度応力を適切に評価できていないことから、望ましいコンクリートの物理特性、温度上昇特性が議論できていなかったとともに、コンクリートが施工される場所での気候条件、施工条件等も十分に議論されてきたとは言えない。また、本来ならば最適なコンクリートの物理特性、温度上昇特性は、気候条件、施工条件によって異なっても良い。以下にこのことを念頭に置いた望ましい特性を示す。

(1) 温度上昇特性

低発熱型セメントを用いたコンクリートの場合、断熱温度上昇量 K は 2.5°C 以下と設定しており、従来のコンクリート(セメント)と比較して十分に低いレベルであると言える。しかし、本州四国連絡橋公団の基準では、断熱温度上昇特性 α 値については $0.4 \sim 0.8$ となっており、特に制約となるような条件とはなっていない。望ましい断熱温度上昇特性を規定する場合に、特に考慮すべき条件は施工条件である。つまり、施工されるマスコンクリートの平面寸法、リフト打設される場合にはそのリフト厚さと打設サイクルタイムである。これらの条件により、同一コンクリートであっても放熱条件が異なり、最高温度および温度履歴が異なる。

一般的には打設サイクルが短い場合には、 α 値が大きいと初期の発熱が大きいことから、打設リフト間の放熱が大きくなり良いと考えら、逆に α 値が小さい場合には次のリフトを打設してからの発熱が大きくなる。しかし、 α 値が大き過ぎる場合には、単に最高温度を大きくするだけであり、強度発現も早くなることから、ひび割れ現象を時間的に短縮して発生させただけとなる可能性がある。一方、打設サイクルが長い場合は、 α 値が小さいことが、打設サイクルが長く放熱期間も長いことを利用する上で良い。また、このことは初期強度発現を抑えることにもなり、初期に発生する応力を抑え、クリープによる応力緩和をより期待できることとなる。

多くの低発熱型セメントでは α 値は0.6~0.8程度であり、最高温度に達するのは打設後2~5日であった。よって、初期の大きく放熱する期間も打設後2日から10日程度であり、明石海峡大橋主塔基礎の場合のような17日サイクルの打設の場合には、更に α 値を小さくする余地があったと考える。また、前述したとおり、低発熱型セメントを用いたコンクリートは、 α 値が大きいにも関わらず凝結完了が遅いことも問題であり、凝結完了時点の上昇温度量も大きく、このことから α 値はより小さいことが望ましい。これについては、強度発現を良くするため単位当たりの減水剤を多くしたため、凝結が遅くなったことも考えられ、温度応力特性を考える上で配合にも配慮する必要があることを示している。

(2) 物理特性

コンクリートの温度応力特性は、温度上昇特性とコンクリートの物理特性によって決まる。物理特性は温度上昇特性と密接な関係があり、断熱温度上昇特性 α 値が大きい場合は強度発現も早い。よって、一般的に弾性係数も初期に大きくなり、クリープも小さい。

明石海峡大橋主塔基礎で採用した低発熱型セメントを用いたコンクリートのように K 値が小さく、 α 値が大きい場合、早期に最高温度に達する上、温度上昇時には強度（弾性係数）が小さく、クリープ係数が大きい。また、温度降下時には弾性係数が既に十分大きく、クリープによる応力緩和が期待出来ないの、結果として若材齢時に温度応力が大きくなる。また、弾性係数が大きいことは、コンクリート自体がひび割れを生じさせる発端としての微細構造の欠陥、あるいは極部ひずみ（応力）に対して敏感となっていることが考えられる。

温度応力ひび割れの発生確率は、基本的には温度応力解析により算出される発生応力と引張強度の関係で評価されるが、温度降下時にもクリープ（塑性流動を含む）により温度応力の低減が期待できることが重要であり、コンクリート内の構造において初期に反応した部分と塑性流動が可能な未反応部分あるいは反応が完了していない部分が混在した状態が望ましい。クリープが期待でき、塑性流動が可能なコンクリートの場合には、コンクリート内構造欠陥、極部ひずみ（応力）にも鈍感であり、後者については緩和することが考えられる。

9. 2 低発熱型セメントの改善の方向性

低発熱型セメントに限らず、コンクリートの温度応力ひび割れ特性に影響のあるセメントの成分特性を考察する際の指標としては、前述の温度上昇特性、物理特性の他に、ひび割れ感受性、自己収縮（反応収縮）特性が考えられる。以下にこれらに注目した場合の望ましいセメント成分特性について述べる。

（1）ひび割れ感受性

低発熱型セメントを用いたコンクリートのひび割れ感受性に関して判明した結果は、

①スラグ混合率が30～40%を越えた場合には、あるいはクリンカー混合率が60%以下となった場合には、ひび割れ感受性が大きくなる傾向にある。

②ひび割れ感受性を説明する指標としては、以下の組み合わせが有用である。

- ・スラグ混合率+エーライト混合率、セメント粉末度
- ・スラグ混合率+エーライト混合率、スラグ粉末度
- ・スラグ混合率、スラグ粉末度

②に示した説明変数の組み合わせが、ひび割れ感受性と良い重相関を示していることから、得られた回帰式をパラメータとして、セメント成分特性を評価することも有用である。また、ひび割れ感受性（引張強度比）が自己収縮量（反応収縮量）と良い相関を示しているが、自己収縮量（反応収縮量）と上記②の各混合率は良い単相関を示しており、ひび割れ感受性および自己収縮量（反応収縮量）の両者を評価する上で有用である。

（2）自己収縮（反応収縮）特性

低発熱型セメントを用いたコンクリートの自己収縮（反応収縮）量は、前章の結果からも分かるとおり、セメント成分特性によって大きく異なる。解析結果によると、ひび割れ感受性の場合と同じく、単相関、重相関ともに良い結果が得られているが、次の点でひび割れ感受性の場合と異なる。

①以下に示す成分指標に対して良い正の単相関を示している。つまり、下記に示す指標が小さいほうが、自己収縮量が小さい。

- ・スラグ混合率
- ・スラグ混合率+エーライト混合率
- ・スラグ混合率+エーライト混合率-ピーライト混合率

②重回帰分析では、上記の成分指標と成分粉末度を合わせた重相関が良い結果を示しているが、粉末度の寄与率が小さい。

以上のことから、自己収縮（反応収縮）特性については上記成分特性単独で判定することが出来る考える。

以上に示したひび割れ感受性および自己収縮特性にとって望ましい成分特性は、必ずしも構造物の規模、施工計画、および施工条件を考慮した温度応力解析の結果において、ひび割れが発生し難い物理特性、温度応力特性を与える成分特性の組み合わせでない場合があるので、温度応力解析により確認する必要がある。ただし、同様の温度特性および物理特性を有するコンクリートでは一般的に望ましい成分特性である。

10 耐ひび割れ特性の評価基準の提案

10.1 評価基準の基本構成

コンクリートの耐ひび割れ特性を評価する上でセメント成分を選択する際には、配合条件、構造条件、施工計画、および施工条件によって評価基準を変える必要があり、本来それぞれのケース毎に異なった最適成分特性を選択することが望ましい。

図-10.1はここで提案する評価基準の基本構成であり、図中にある番号（手順）に従って基本的考え方について述べる。

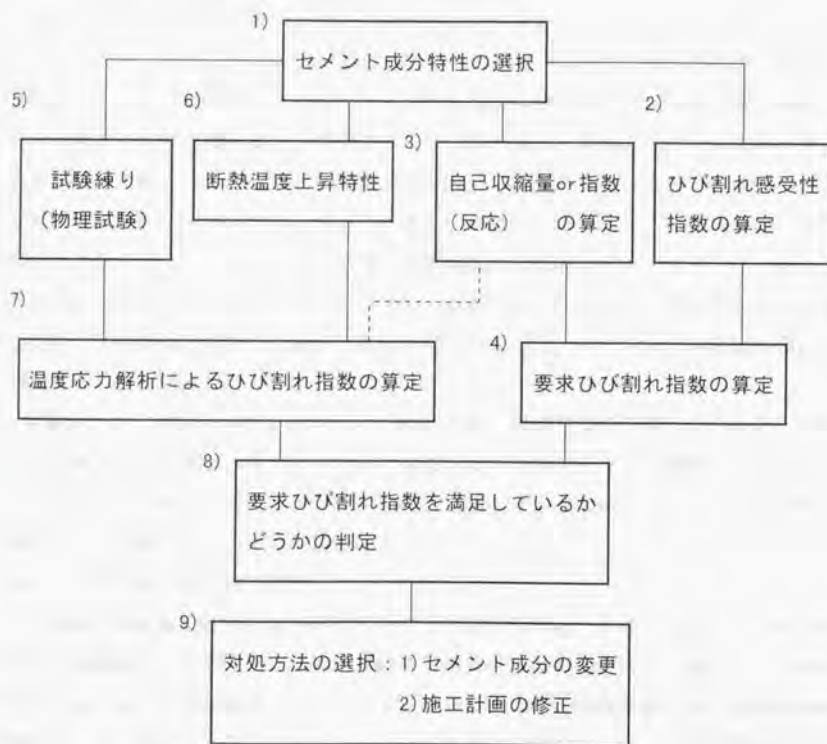


図-10.1 コンクリートの耐ひび割れ性の評価方法

1) セメント成分特性の選択

前章で示したとおり、コンクリートのひび割れ感受性および自己収縮量（反応収縮量）は、セメント成分特性に基づいて評価出来ることから、第一段階として設計基準強度、示方配合等も考慮にいたした上で、セメント成分特性を決定することになる。

選択に際しては、マスコンクリートではない限り、あるいは施工条件が厳しくない場合には、ひび割れ感受性および反応収縮量を小さくするために、強度発現上無理なセメント成分特性を選択する必要は無い。以上は定性的な判断によるセメント成分特性の選択であるが、この段階では本研究で得られた低発熱型セメントの成分特性に関する定量的な成果を参考とすることも可能であると考ええる。

例えば明石海峡大橋で用いられた低発熱型セメントおよび示方配合によるコンクリートのように、特定の示方配合および特定のタイプのセメントに関する実験結果があれば、以降に述べるモデル化によりひび割れ感受性指数および自己収縮（反応収縮）量を定量的に予測出来るので、要求されるひび割れ指数と温度応力解析による解析上のひび割れ指数との比較により、強度発現特性、温度上昇特性を含めた最適セメント成分特性の選択が可能である。従って、事前に複数のセメントについて試験練りの上、第7章の表-7. 3で示した物理試験、断熱温度上昇試験、および「7. 1. 2」で示した自己収縮（反応収縮）試験を実施し、後述するひび割れ感受性指数あるいは自己収縮（反応収縮）量のモデル化を事前に実施した上で、セメント成分特性の選択を実施することが望ましい。

現段階では、セメント成分特性とひび割れ感受性および自己収縮（反応収縮）特性との関係は、明石海峡大橋で使用された低発熱型セメントにおいて確認されているだけであるので、今後多様なセメントについて同様の研究が進み、セメントの種類毎の参考となる指標が増えることが望まれる。

2) ひび割れ感受性指数の算定

ひび割れ感受性指数は、基本的にモデル化が考えられる。後述するとおり、ひび割れ感受性指数は、引張強度比の重回帰分析の結果得られた回帰式を採用することが考えられる。従って低発熱型セメントおよび明石海峡大橋の示方配合を用いる場合を除いては、1) で述べた複数のセメントによる事前の試験練り、および物理試験等を行い、使用を予定しているセメントの種類のために、引張強度比のモデル化を行うことが必要である。

ここで述べたひび割れ感受性指数は、温度応力解析に反映する場合には、要求ひび割れ指数として適用することが考えられる。

3) 自己収縮（反応収縮）量あるいは指数の算定

自己収縮（反応収縮）量あるいは指数は、基本的にはモデル化が考えられる。温度応力解析で自己収縮（反応収縮）量を定量的に直接評価する場合には、後述するセメント成分特性を指標とする定量的モデルをそのまま採用出来ると考える。ただし、これには、明石海峡大橋で実施した各種試験が必要であることから、要求ひび割れ指数に含めて評価することが考えられる。

4) 要求ひび割れ指数の算定

次に、ひび割れ感受性および自己収縮（反応収縮）特性を評価するために、次項以降に述べるひび割れ感受性指数および自己収縮（反応収縮）量あるいは指数がモデル化出来ることを前提として、要求されるひび割れ指数、あるいは温度応力解析において考慮すべき自己収縮（反応収縮）量を決定する。

$$(\text{要求ひび割れ指数}) = (\text{自己収縮指数}) \times (\text{ひび割れ感受性指数}) \times (\text{安全率})$$

ここで、（自己収縮指数）は、温度応力解析において自己収縮（反応収縮）量が定量的に考慮された場合には、（要求ひび割れ指数）には考慮しない。また、（安全率）は（自己収縮指数）および（ひび割れ感受性指数）のモデル化における不確定性（モデル値のばらつき等）により決定すべきであるとする。

5) 試験練り（物理試験）

試験練りについては、採用するセメントの複数の成分特性に対して、表-7. 3で示した一般的物理試験の他に、自己収縮（反応収縮）試験を実施する必要がある。また、物理試験の中の直接引張試験は、ひび割れ感受性指数のモデルとして、直接引張強度と割裂引張強度の比である「引張強度比」を試算する上で必要となる。

6) 断熱温度上昇試験

表-7. 3で示した試験を実施し、温度解析に摘要する。

7) 温度応力解析によるひび割れ指数の算定

一方、試験練りによる物理試験および断熱温度上昇試験の結果に基づいて温度応力解析を実施した上で、解析上のひび割れ指数（解析ひび割れ指数）を算定する。解析

方法は、第5章で提案した温度応力解析方法を用いることとする。

8) 要求ひび割れ指数を満足しているかどうかの判定

(解析ひび割れ指数)が(要求ひび割れ指数)よりも常に大きいことをもってひび割れが発生しないことを確認する。

土木学会のコンクリート標準示方書・施工編に示されているひび割れ指数は、温度応力解析で算出される発生応力と割裂引張強度との比としている。この場合のひび割れ指数は、ひび割れ感受性、自己収縮(反応収縮)、解析上の精度等の他、解析に用いる物理定数等において温度履歴を考慮していないなど、全ての要素を勘案した値であることを前提としている。しかし、ここで提案している要求ひび割れ指数は、ひび割れ感受性および自己収縮(反応収縮)を考慮にいれて、使用するセメント毎に設定する点で従来のひび割れ指数と異なる。温度応力解析方法の改善とともに、ここに提案する評価方法で考慮していないのは、主に解析精度だけである。

9) 対処方法の選択

(解析ひび割れ指数)が(要求ひび割れ指数)よりも小さい場合には、基本的なコンクリート強度等の条件を確認した上で、セメント成分特性を変更するか、あるいは温度応力が発生しにくい施工計画への変更が考えられる。

10. 2 ひび割れ感受性指数のモデル化

(1) モデルの設定方法

前章迄の議論で、引張強度比(割裂引張強度と直接引張強度の比)がセメント成分特性による重回帰分析結果において良好な重相関が得られること、また強度試験上の特徴から、引張強度比はコンクリートのひび割れ感受性を計る上での指標となることを述べた。

図-10.2は、第7章における試験練りを実施した改良型低発熱セメントを用いたコンクリートの引張強度比の材齢毎のデータである。引張強度比が大きいコンクリートでは、28日材齢迄は強度発現とともに引張強度比が僅かに大きくなる傾向があるが、材齢28日以降は逆に小さくなることも確認される。また、引張強度比が小さいコンクリートでは、材齢7日以降は大きくならない傾向があり、材齢7日以降のデータでは、いずれの場合も引張強度比は定量的に安定していると判断される。よって、引張強度比をひび割れ感受性指数としてモデル化するに際しては、評価手法の過度の複雑

化を避けるために、便宜的に全材齢の平均値でコンクリート毎のひび割れ感受性を代表させることが考えられる。

モデル化の手法としては、前章までの議論で引張強度比と有意な関係が認められた下記に示した①、②のセメント成分特性の組み合わせ、および自己収縮（反応収縮）特性と有意な関係が認められた③のセメント成分特性により重回帰分析を実施し、その回帰式をモデルとして検証することとした。

- ① （スラグ混合率+エーライト混合率）、セメント粉末度
- ② スラグ混合率、スラグ粉末度
- ③ （スラグ混合率+エーライト混合率-ピーライト混合率）、セメント粉末度

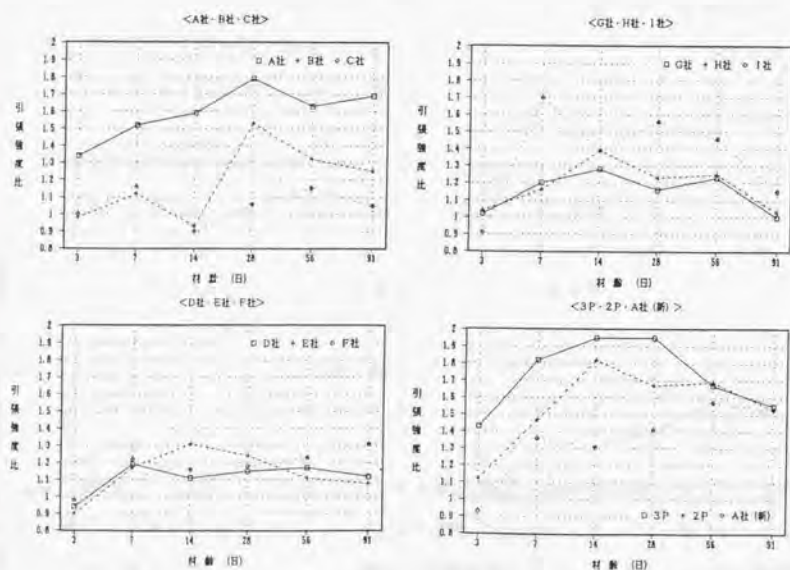


図-10.2 材齢毎の引張強度比

表-10.1は上記①、②、③のセメント成分特性を対象に、セメント製造9社の試製造セメント10種、および明石海峡大橋で採用したセメント2種を対象に解析した

結果である。ここで、②の解析においては、B社のセメントにはスラグが使用されていないことから、B社を除く11種類のセメントを対象とした結果となっている。また、表-10. 2は①、③においてもB社を除いた解析結果である。

B社（スラグ混合率0%）のセメントを除外した結果では、重相関係数が0.8前後あり、有意な結果が得られたことが分かる。また、全てのケースにおいて、残差（重回帰直線と実験データの乖離）が概ね0.2程度に収まっている。この残差の原因としては以下のことが考えられる。

- 1) 重回帰分析は、説明変数と目的変数の関係を線形近似出来ることを仮定している。
- 2) 解析データの元となるコンクリート強度試験等の結果に本来バラツキがある。
- 3) 解析に考慮していないセメント成分特性が存在する可能性は否定出来ない。

更に解析結果から、セメント成分比率と粉末度の引張強度比に対する標準化偏回帰係数の比は、1.23~1.49と安定しており、特に第8章における解析の結果同様に安定した結果を得た説明変数の組み合わせ（スラグ混合率、スラグ粉末度）における比1.12~1.46とほぼ同様の値を示していると言える。

標準化偏回帰係数の比率（成分混合率÷粉末度）

① （スラグ混合率+エーライト混合率）、セメント粉末度	: 1.49
② スラグ混合率、スラグ粉末度	: 1.40
③ （スラグ混合率+エーライト混合率-ピーライト混合率）、 セメント粉末度	: 1.39
①' ①のケース、ただしB社を除く場合	: 1.28
③' ③のケース、ただしB社を除く場合	: 1.23

なお、表10. 1、10. 2において重回帰分析の結果、実測の引張強度比 Y と回帰式により推定された引張強度比 \hat{Y} の関係をグラフ化しているが、回帰式が3次元空間上の回帰平面であり、 $Y \sim \hat{Y}$ の関係が説明変数（ X_1 、 X_2 ）による位置情報に關係なく図化されているため、回帰式の信頼性を視覚的に検証することとした。

重回帰分析による回帰式は平面方程式であり、説明変数（ X_1 、 X_2 ）の位置情報を保ちつつ回帰平面を側面から見る（視覚的に直線として認識する）ために必要な X_1 、 X_2 軸の回転変換を行った。

○回帰式の平面方程式: $A \cdot X_1 + B \cdot X_2 + Y + C = 0$

○ X_1 、 X_2 軸の回転角度を θ 、新座標を $(\overline{X_1}, \overline{X_2})$ とすると、

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{X_1} \\ \overline{X_2} \end{pmatrix}$$

これを、以下のとおり変換し、

$$\begin{pmatrix} \overline{X_1} \\ \overline{X_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix}$$

回帰式の平面方程式に代入すると、

$$A \cdot (\cos \theta \cdot \overline{X_1} - \sin \theta \cdot \overline{X_2}) + B \cdot (\sin \theta \cdot \overline{X_1} + \cos \theta \cdot \overline{X_2}) + Y + D = 0$$

本式を $\overline{X_1}$ 、 $\overline{X_2}$ により再整理すると、

$$(A \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta) \cdot \overline{X_1} + (-A \cdot \sin \theta + B \cdot \cos \theta) \cdot \overline{X_2} + Y + D = 0$$

ここで、 $\overline{X_1}$ に乘じられている定数を0とすることにより得られる θ により座標変換し、三次元空間内で、横軸を $\overline{X_1} = \cos \theta \cdot X_1 + \sin \theta \cdot X_2$ 、縦軸を \hat{Y} とした関係を図化する。

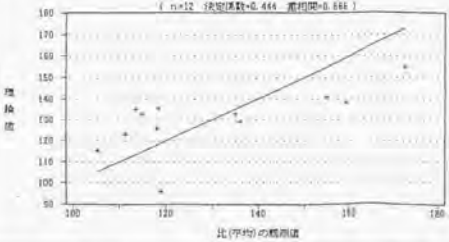
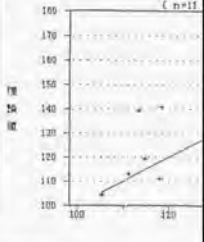
分析①、分析②、分析③において図化した結果を、表10.3、10.4、10.5に示す。

$Y \sim \hat{Y}$ で示した関係では、回帰直線に対して偏りが見られるが、説明変数(X_1 、 X_2)の位置情報を保持した $\overline{X_1} \sim \hat{Y}$ で示した関係では、プロットされたデータが回帰直線に対して妥当な分散傾向を示しており、重回帰分析とこれによる回帰式には妥当性があることが確認出来る。

分 析		分 析 ③																																																																				
分 析 条 件	目的多	引張強度比の平均																																																																				
	説明多	スラグ混合率+Aライト率-Bライト率																																																																				
	説明多	セメント粉末度																																																																				
	採用テ	n = 12																																																																				
分 析 結 果	寄与率	0.418																																																																				
	重 相	0.646																																																																				
	回	Y=0.379*X1+0.0146*X2+57.717																																																																				
	標準化	<div> 【標準化偏回帰係数】 <table border="1"> <tr> <th></th> <th>値</th> </tr> <tr> <td>b.1</td> <td>A+スラグ-B 0.57763</td> </tr> <tr> <td>b.2</td> <td>セメ粉末度 0.41566</td> </tr> </table> </div>		値	b.1	A+スラグ-B 0.57763	b.2	セメ粉末度 0.41566																																																														
	値																																																																					
b.1	A+スラグ-B 0.57763																																																																					
b.2	セメ粉末度 0.41566																																																																					
理 論 値	<div> 【理論値と残差】 <table border="1"> <tr> <th></th> <th>y</th> <th>y hat</th> <th>e</th> </tr> <tr> <th></th> <th>比(平均)</th> <th>理論値</th> <th>残差</th> </tr> <tr><td>1</td><td>A 社</td><td>159</td><td>135.707</td><td>23.6258</td></tr> <tr><td>2</td><td>B 社</td><td>119</td><td>97.4177</td><td>21.4155</td></tr> <tr><td>3</td><td>C 社</td><td>105</td><td>118.540</td><td>-13.207</td></tr> <tr><td>4</td><td>D 社</td><td>111</td><td>116.848</td><td>-5.5147</td></tr> <tr><td>5</td><td>E 社</td><td>114</td><td>132.585</td><td>-19.085</td></tr> <tr><td>6</td><td>F 社</td><td>118</td><td>127.671</td><td>-9.6715</td></tr> <tr><td>7</td><td>G 社</td><td>115</td><td>135.372</td><td>-20.538</td></tr> <tr><td>8</td><td>H 社</td><td>118</td><td>137.381</td><td>-18.998</td></tr> <tr><td>9</td><td>I 社</td><td>136</td><td>131.858</td><td>4.30846</td></tr> <tr><td>10</td><td>J 社</td><td>173</td><td>152.682</td><td>20.1505</td></tr> <tr><td>11</td><td>Z 社</td><td>155</td><td>143.469</td><td>11.5300</td></tr> <tr><td>12</td><td>A 社(新)</td><td>135</td><td>129.181</td><td>5.98505</td></tr> </table> </div>			y	y hat	e		比(平均)	理論値	残差	1	A 社	159	135.707	23.6258	2	B 社	119	97.4177	21.4155	3	C 社	105	118.540	-13.207	4	D 社	111	116.848	-5.5147	5	E 社	114	132.585	-19.085	6	F 社	118	127.671	-9.6715	7	G 社	115	135.372	-20.538	8	H 社	118	137.381	-18.998	9	I 社	136	131.858	4.30846	10	J 社	173	152.682	20.1505	11	Z 社	155	143.469	11.5300	12	A 社(新)	135	129.181	5.98505
	y	y hat	e																																																																			
	比(平均)	理論値	残差																																																																			
1	A 社	159	135.707	23.6258																																																																		
2	B 社	119	97.4177	21.4155																																																																		
3	C 社	105	118.540	-13.207																																																																		
4	D 社	111	116.848	-5.5147																																																																		
5	E 社	114	132.585	-19.085																																																																		
6	F 社	118	127.671	-9.6715																																																																		
7	G 社	115	135.372	-20.538																																																																		
8	H 社	118	137.381	-18.998																																																																		
9	I 社	136	131.858	4.30846																																																																		
10	J 社	173	152.682	20.1505																																																																		
11	Z 社	155	143.469	11.5300																																																																		
12	A 社(新)	135	129.181	5.98505																																																																		
	<div> セメント成分の要因分析用の全データ (n=12 決定係数=0.418 重相関=0.646) </div>																																																																					
Y~Y																																																																						

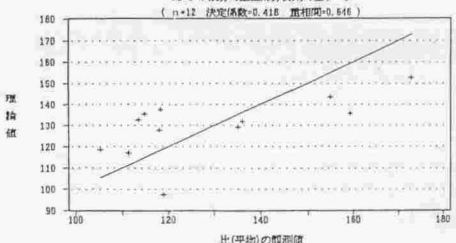
注)

表-10. 1 引張強度比（平均値）に対する重回帰

分 析 NO.		分 析 ①	分																																																																																																																																																																										
分 析 条 件	目的変数 Y	引張強度比の平均	引張強度比の平均																																																																																																																																																																										
	説明変数 X 1	スラグ混合率+Aライト率	スラグ混合率																																																																																																																																																																										
	説明変数 X 2	セメント粉末度	スラグ粉末度																																																																																																																																																																										
	採用データ数 n	n = 12	n = 11 (B社データ)																																																																																																																																																																										
分 析 結 果	寄与率(決定係数)	0.444	0.657																																																																																																																																																																										
	重相関係数	0.666	0.811																																																																																																																																																																										
	回 帰 式	$Y=0.617 \times X_1+0.0140 \times X_2+38.272$	$Y=1.494 \times X_1+0.014$																																																																																																																																																																										
	標準化偏回帰係数	<table><tr><th colspan="3">【標準化偏回帰係数】</th></tr><tr><th></th><th></th><th>値</th></tr><tr><td>b 1</td><td>A+スラグ</td><td>0.58720</td></tr><tr><td>b 2</td><td>セメント粉末度</td><td>0.39904</td></tr></table>	【標準化偏回帰係数】					値	b 1	A+スラグ	0.58720	b 2	セメント粉末度	0.39904	<table><tr><th colspan="3">【標準化偏回帰係数】</th></tr><tr><th></th><th></th><th>値</th></tr><tr><td>b 1</td><td>スラグ混合率</td><td>0.811</td></tr><tr><td>b 2</td><td>スラグ粉末度</td><td>0.587</td></tr></table>	【標準化偏回帰係数】					値	b 1	スラグ混合率	0.811	b 2	スラグ粉末度	0.587																																																																																																																																																		
【標準化偏回帰係数】																																																																																																																																																																													
		値																																																																																																																																																																											
b 1	A+スラグ	0.58720																																																																																																																																																																											
b 2	セメント粉末度	0.39904																																																																																																																																																																											
【標準化偏回帰係数】																																																																																																																																																																													
		値																																																																																																																																																																											
b 1	スラグ混合率	0.811																																																																																																																																																																											
b 2	スラグ粉末度	0.587																																																																																																																																																																											
理 論 値 と 残 差	<table><tr><th colspan="4">【理論値と残差】</th></tr><tr><th></th><th>y</th><th>y hat</th><th>e</th></tr><tr><th></th><th>比(平均)</th><th>理論値</th><th>残差</th><th></th></tr><tr><td>1</td><td>A 社</td><td>159</td><td>138.121</td><td>21.2121</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>B 社</td><td>119</td><td>95.7979</td><td>23.0354</td><td></td></tr><tr><td>3</td><td>C 社</td><td>105</td><td>115.251</td><td>-9.9160</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>D 社</td><td>111</td><td>122.995</td><td>-11.662</td><td></td></tr><tr><td>5</td><td>E 社</td><td>114</td><td>135.032</td><td>-21.532</td><td></td></tr><tr><td>6</td><td>F 社</td><td>118</td><td>125.714</td><td>-7.7140</td><td></td></tr><tr><td>7</td><td>G 社</td><td>115</td><td>132.680</td><td>-17.846</td><td></td></tr><tr><td>8</td><td>H 社</td><td>118</td><td>135.270</td><td>-16.937</td><td></td></tr><tr><td>9</td><td>I 社</td><td>136</td><td>129.101</td><td>7.06526</td><td></td></tr><tr><td>10</td><td>3 P</td><td>173</td><td>154.953</td><td>17.8802</td><td></td></tr><tr><td>11</td><td>2 P</td><td>155</td><td>140.679</td><td>14.1200</td><td></td></tr><tr><td>12</td><td>A 社(新)</td><td>135</td><td>132.866</td><td>2.29820</td><td></td></tr></table>		【理論値と残差】					y	y hat	e		比(平均)	理論値	残差		1	A 社	159	138.121	21.2121		2	B 社	119	95.7979	23.0354		3	C 社	105	115.251	-9.9160		4	D 社	111	122.995	-11.662		5	E 社	114	135.032	-21.532		6	F 社	118	125.714	-7.7140		7	G 社	115	132.680	-17.846		8	H 社	118	135.270	-16.937		9	I 社	136	129.101	7.06526		10	3 P	173	154.953	17.8802		11	2 P	155	140.679	14.1200		12	A 社(新)	135	132.866	2.29820		<table><tr><th colspan="4">【理論値と残差】</th></tr><tr><th></th><th>y</th><th>y hat</th><th>e</th></tr><tr><th></th><th>比(平均)</th><th>理論値</th><th>残差</th><th></th></tr><tr><td>1</td><td>A 社</td><td>159</td><td>138.121</td><td>21.2121</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>B 社</td><td>119</td><td>95.7979</td><td>23.0354</td><td></td></tr><tr><td>3</td><td>C 社</td><td>105</td><td>115.251</td><td>-9.9160</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td>D 社</td><td>111</td><td>122.995</td><td>-11.662</td><td></td></tr><tr><td>5</td><td>E 社</td><td>114</td><td>135.032</td><td>-21.532</td><td></td></tr><tr><td>6</td><td>F 社</td><td>118</td><td>125.714</td><td>-7.7140</td><td></td></tr><tr><td>7</td><td>G 社</td><td>115</td><td>132.680</td><td>-17.846</td><td></td></tr><tr><td>8</td><td>H 社</td><td>118</td><td>135.270</td><td>-16.937</td><td></td></tr><tr><td>9</td><td>I 社</td><td>136</td><td>129.101</td><td>7.06526</td><td></td></tr><tr><td>10</td><td>3 P</td><td>173</td><td>154.953</td><td>17.8802</td><td></td></tr><tr><td>11</td><td>2 P</td><td>155</td><td>140.679</td><td>14.1200</td><td></td></tr><tr><td>12</td><td>A 社(新)</td><td>135</td><td>132.866</td><td>2.29820</td><td></td></tr></table>	【理論値と残差】					y	y hat	e		比(平均)	理論値	残差		1	A 社	159	138.121	21.2121		2	B 社	119	95.7979	23.0354		3	C 社	105	115.251	-9.9160		4	D 社	111	122.995	-11.662		5	E 社	114	135.032	-21.532		6	F 社	118	125.714	-7.7140		7	G 社	115	132.680	-17.846		8	H 社	118	135.270	-16.937		9	I 社	136	129.101	7.06526		10	3 P	173	154.953	17.8802		11	2 P	155	140.679	14.1200		12	A 社(新)	135	132.866	2.29820	
	【理論値と残差】																																																																																																																																																																												
	y	y hat	e																																																																																																																																																																										
	比(平均)	理論値	残差																																																																																																																																																																										
1	A 社	159	138.121	21.2121																																																																																																																																																																									
2	B 社	119	95.7979	23.0354																																																																																																																																																																									
3	C 社	105	115.251	-9.9160																																																																																																																																																																									
4	D 社	111	122.995	-11.662																																																																																																																																																																									
5	E 社	114	135.032	-21.532																																																																																																																																																																									
6	F 社	118	125.714	-7.7140																																																																																																																																																																									
7	G 社	115	132.680	-17.846																																																																																																																																																																									
8	H 社	118	135.270	-16.937																																																																																																																																																																									
9	I 社	136	129.101	7.06526																																																																																																																																																																									
10	3 P	173	154.953	17.8802																																																																																																																																																																									
11	2 P	155	140.679	14.1200																																																																																																																																																																									
12	A 社(新)	135	132.866	2.29820																																																																																																																																																																									
【理論値と残差】																																																																																																																																																																													
	y	y hat	e																																																																																																																																																																										
	比(平均)	理論値	残差																																																																																																																																																																										
1	A 社	159	138.121	21.2121																																																																																																																																																																									
2	B 社	119	95.7979	23.0354																																																																																																																																																																									
3	C 社	105	115.251	-9.9160																																																																																																																																																																									
4	D 社	111	122.995	-11.662																																																																																																																																																																									
5	E 社	114	135.032	-21.532																																																																																																																																																																									
6	F 社	118	125.714	-7.7140																																																																																																																																																																									
7	G 社	115	132.680	-17.846																																																																																																																																																																									
8	H 社	118	135.270	-16.937																																																																																																																																																																									
9	I 社	136	129.101	7.06526																																																																																																																																																																									
10	3 P	173	154.953	17.8802																																																																																																																																																																									
11	2 P	155	140.679	14.1200																																																																																																																																																																									
12	A 社(新)	135	132.866	2.29820																																																																																																																																																																									
Y ~ Yhat 散布図	<p>セメント成分の重回帰分析用の全データ (n=12 決定係数=0.444 重相関=0.666)</p> 		<p>セメント成分の重回帰分析用の全データ (n=11 決定係数=0.657 重相関=0.811)</p> 																																																																																																																																																																										

注) 引張強度比の値は100倍値を用いて計算を行っている。

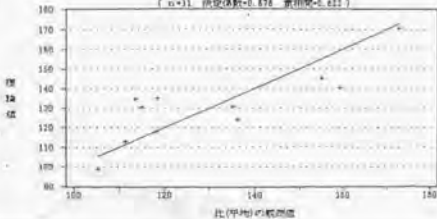
平均値) に対する重回帰分析結果 (その1)

分 析 ②	分 析 ③																																																																																																																																								
引張強度比の平均	引張強度比の平均																																																																																																																																								
スラグ混合率	スラグ混合率+Aライト率-Bライト率																																																																																																																																								
スラグ粉末度	セメント粉末度																																																																																																																																								
n = 11 (B社データ除く)	n = 12																																																																																																																																								
0.657	0.418																																																																																																																																								
0.811	0.646																																																																																																																																								
$Y=1.494 \times X_1+0.0149 \times X_2-21.913$	$Y=0.379 \times X_1+0.0146 \times X_2+57.717$																																																																																																																																								
【標準化偏回帰係数】	【標準化偏回帰係数】																																																																																																																																								
<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>スラグ混合1.05969</td></tr><tr><td>b2</td><td>スラグ粉末0.75556</td></tr></table>		値	b1	スラグ混合1.05969	b2	スラグ粉末0.75556	<table><tr><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b1</td><td>A+スラグ-B0.57763</td></tr><tr><td>b2</td><td>セメント粉末度0.41566</td></tr></table>		値	b1	A+スラグ-B0.57763	b2	セメント粉末度0.41566																																																																																																																												
	値																																																																																																																																								
b1	スラグ混合1.05969																																																																																																																																								
b2	スラグ粉末0.75556																																																																																																																																								
	値																																																																																																																																								
b1	A+スラグ-B0.57763																																																																																																																																								
b2	セメント粉末度0.41566																																																																																																																																								
【理論値と残差】	【理論値と残差】																																																																																																																																								
<table><tr><td></td><td>y</td><td>y hat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>比(平均)</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A 社</td><td>159</td><td>145.988</td><td>13.3445</td></tr><tr><td>2</td><td>B 社</td><td>105</td><td>104.297</td><td>1.03613</td></tr><tr><td>3</td><td>C 社</td><td>111</td><td>112.959</td><td>-1.6257</td></tr><tr><td>4</td><td>D 社</td><td>114</td><td>119.417</td><td>-25.917</td></tr><tr><td>5</td><td>E 社</td><td>118</td><td>111.025</td><td>6.97406</td></tr><tr><td>6</td><td>F 社</td><td>115</td><td>119.245</td><td>-4.4119</td></tr><tr><td>7</td><td>G 社</td><td>118</td><td>140.897</td><td>-22.563</td></tr><tr><td>8</td><td>H 社</td><td>136</td><td>123.131</td><td>13.0356</td></tr><tr><td>9</td><td>I 社</td><td>173</td><td>163.309</td><td>9.52363</td></tr><tr><td>10</td><td>3 P</td><td>155</td><td>147.915</td><td>7.08479</td></tr><tr><td>11</td><td>2 P</td><td>135</td><td>131.646</td><td>3.52036</td></tr><tr><td>12</td><td>A 社(新)</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>		y	y hat	e		比(平均)	理論値	残差	1	A 社	159	145.988	13.3445	2	B 社	105	104.297	1.03613	3	C 社	111	112.959	-1.6257	4	D 社	114	119.417	-25.917	5	E 社	118	111.025	6.97406	6	F 社	115	119.245	-4.4119	7	G 社	118	140.897	-22.563	8	H 社	136	123.131	13.0356	9	I 社	173	163.309	9.52363	10	3 P	155	147.915	7.08479	11	2 P	135	131.646	3.52036	12	A 社(新)				<table><tr><td></td><td>y</td><td>y hat</td><td>e</td></tr><tr><td></td><td>比(平均)</td><td>理論値</td><td>残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A 社</td><td>159</td><td>135.707</td><td>23.6258</td></tr><tr><td>2</td><td>B 社</td><td>119</td><td>97.4177</td><td>21.4155</td></tr><tr><td>3</td><td>C 社</td><td>105</td><td>118.540</td><td>-13.207</td></tr><tr><td>4</td><td>D 社</td><td>111</td><td>116.848</td><td>-5.5147</td></tr><tr><td>5</td><td>E 社</td><td>114</td><td>132.585</td><td>-19.085</td></tr><tr><td>6</td><td>F 社</td><td>118</td><td>127.671</td><td>-9.6715</td></tr><tr><td>7</td><td>G 社</td><td>115</td><td>135.372</td><td>-20.538</td></tr><tr><td>8</td><td>H 社</td><td>118</td><td>137.331</td><td>-18.998</td></tr><tr><td>9</td><td>I 社</td><td>136</td><td>131.858</td><td>4.30846</td></tr><tr><td>10</td><td>3 P</td><td>173</td><td>152.682</td><td>20.1505</td></tr><tr><td>11</td><td>2 P</td><td>155</td><td>143.469</td><td>11.5300</td></tr><tr><td>12</td><td>A 社(新)</td><td>135</td><td>129.181</td><td>5.98505</td></tr></table>		y	y hat	e		比(平均)	理論値	残差	1	A 社	159	135.707	23.6258	2	B 社	119	97.4177	21.4155	3	C 社	105	118.540	-13.207	4	D 社	111	116.848	-5.5147	5	E 社	114	132.585	-19.085	6	F 社	118	127.671	-9.6715	7	G 社	115	135.372	-20.538	8	H 社	118	137.331	-18.998	9	I 社	136	131.858	4.30846	10	3 P	173	152.682	20.1505	11	2 P	155	143.469	11.5300	12	A 社(新)	135	129.181	5.98505
	y	y hat	e																																																																																																																																						
	比(平均)	理論値	残差																																																																																																																																						
1	A 社	159	145.988	13.3445																																																																																																																																					
2	B 社	105	104.297	1.03613																																																																																																																																					
3	C 社	111	112.959	-1.6257																																																																																																																																					
4	D 社	114	119.417	-25.917																																																																																																																																					
5	E 社	118	111.025	6.97406																																																																																																																																					
6	F 社	115	119.245	-4.4119																																																																																																																																					
7	G 社	118	140.897	-22.563																																																																																																																																					
8	H 社	136	123.131	13.0356																																																																																																																																					
9	I 社	173	163.309	9.52363																																																																																																																																					
10	3 P	155	147.915	7.08479																																																																																																																																					
11	2 P	135	131.646	3.52036																																																																																																																																					
12	A 社(新)																																																																																																																																								
	y	y hat	e																																																																																																																																						
	比(平均)	理論値	残差																																																																																																																																						
1	A 社	159	135.707	23.6258																																																																																																																																					
2	B 社	119	97.4177	21.4155																																																																																																																																					
3	C 社	105	118.540	-13.207																																																																																																																																					
4	D 社	111	116.848	-5.5147																																																																																																																																					
5	E 社	114	132.585	-19.085																																																																																																																																					
6	F 社	118	127.671	-9.6715																																																																																																																																					
7	G 社	115	135.372	-20.538																																																																																																																																					
8	H 社	118	137.331	-18.998																																																																																																																																					
9	I 社	136	131.858	4.30846																																																																																																																																					
10	3 P	173	152.682	20.1505																																																																																																																																					
11	2 P	155	143.469	11.5300																																																																																																																																					
12	A 社(新)	135	129.181	5.98505																																																																																																																																					
セメント成分の重回帰分析用の全データ (n=11 決定係数=0.857 重相関=0.811)	セメント成分の重回帰分析用の全データ (n=12 決定係数=0.418 重相関=0.646)																																																																																																																																								
																																																																																																																																									

分 析 N	
分 析 条 件	目的変数
	説明変数
	説明変数
	採用 γ^*
分 析 結 果	寄与率(決
	重 相 関
	回 帰
	標準化偏
	理 論 値
	$Y \sim Y_{ha}$

注) 引

表-10. 2 引張強度比(平均値)に対する重回帰分析結果(その2)

分 析 NO.		分 析 ①'																																																																																																																																									
分 析 条 件	目的変数 Y	引張強度比の平均	引張強度比の平均																																																																																																																																								
	説明変数 X 1	スラグ混合率+Aライト率	スラグ混合率+Aライト率																																																																																																																																								
	説明変数 X 2	セメント粉末度	セメント粉末度																																																																																																																																								
	採用データ数 n	n=11 (B社データ除く)	n=11 (B社データ除く)																																																																																																																																								
分 析 結 果	寄与率(決定係数)	0.678	0.608																																																																																																																																								
	重相関係数	0.823	0.780																																																																																																																																								
	回 帰 式	$Y=1.116 \cdot X_1 + 0.0253 \cdot X_2 - 39.971$	$Y=0.657 \cdot X_1 + 0.001 \cdot X_2 - 39.971$																																																																																																																																								
	標準化偏回帰係数	<table><tr><th colspan="3">【標準化偏回帰係数】</th></tr><tr><td></td><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b 1</td><td>A+スラグ</td><td>0.87791</td></tr><tr><td>b 2</td><td>セメント粉末度</td><td>0.68494</td></tr></table>	【標準化偏回帰係数】					値	b 1	A+スラグ	0.87791	b 2	セメント粉末度	0.68494	<table><tr><th colspan="3">【標準化偏回帰係数】</th></tr><tr><td></td><td></td><td>値</td></tr><tr><td>b 1</td><td>A+スラグ</td><td>0.87791</td></tr><tr><td>b 2</td><td>セメント粉末度</td><td>0.68494</td></tr></table>	【標準化偏回帰係数】					値	b 1	A+スラグ	0.87791	b 2	セメント粉末度	0.68494																																																																																																																
【標準化偏回帰係数】																																																																																																																																											
		値																																																																																																																																									
b 1	A+スラグ	0.87791																																																																																																																																									
b 2	セメント粉末度	0.68494																																																																																																																																									
【標準化偏回帰係数】																																																																																																																																											
		値																																																																																																																																									
b 1	A+スラグ	0.87791																																																																																																																																									
b 2	セメント粉末度	0.68494																																																																																																																																									
理 論 値 と 残 差		<table><tr><th colspan="4">【理論値と残差】</th></tr><tr><td></td><td>y 比(平均)</td><td>y hat 理論値</td><td>e 残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>159</td><td>140.228</td><td>19.1049</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>105</td><td>98.8389</td><td>6.49441</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>111</td><td>112.785</td><td>-1.4518</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>114</td><td>134.664</td><td>-21.164</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>118</td><td>117.753</td><td>0.24683</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>115</td><td>130.342</td><td>-15.509</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>118</td><td>134.981</td><td>-16.647</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>136</td><td>123.917</td><td>12.2487</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>173</td><td>170.521</td><td>2.31169</td></tr><tr><td>10</td><td>3P</td><td>155</td><td>145.082</td><td>9.91795</td></tr><tr><td>11</td><td>2P</td><td>135</td><td>130.717</td><td>4.44890</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	【理論値と残差】					y 比(平均)	y hat 理論値	e 残差	1	A社	159	140.228	19.1049	2	B社	105	98.8389	6.49441	3	C社	111	112.785	-1.4518	4	D社	114	134.664	-21.164	5	E社	118	117.753	0.24683	6	F社	115	130.342	-15.509	7	G社	118	134.981	-16.647	8	H社	136	123.917	12.2487	9	I社	173	170.521	2.31169	10	3P	155	145.082	9.91795	11	2P	135	130.717	4.44890	12	A社(新)				<table><tr><th colspan="4">【理論値と残差】</th></tr><tr><td></td><td>y 比(平均)</td><td>y hat 理論値</td><td>e 残差</td></tr><tr><td>1</td><td>A社</td><td>159</td><td>140.228</td><td>19.1049</td></tr><tr><td>2</td><td>B社</td><td>105</td><td>98.8389</td><td>6.49441</td></tr><tr><td>3</td><td>C社</td><td>111</td><td>112.785</td><td>-1.4518</td></tr><tr><td>4</td><td>D社</td><td>114</td><td>134.664</td><td>-21.164</td></tr><tr><td>5</td><td>E社</td><td>118</td><td>117.753</td><td>0.24683</td></tr><tr><td>6</td><td>F社</td><td>115</td><td>130.342</td><td>-15.509</td></tr><tr><td>7</td><td>G社</td><td>118</td><td>134.981</td><td>-16.647</td></tr><tr><td>8</td><td>H社</td><td>136</td><td>123.917</td><td>12.2487</td></tr><tr><td>9</td><td>I社</td><td>173</td><td>170.521</td><td>2.31169</td></tr><tr><td>10</td><td>3P</td><td>155</td><td>145.082</td><td>9.91795</td></tr><tr><td>11</td><td>2P</td><td>135</td><td>130.717</td><td>4.44890</td></tr><tr><td>12</td><td>A社(新)</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	【理論値と残差】					y 比(平均)	y hat 理論値	e 残差	1	A社	159	140.228	19.1049	2	B社	105	98.8389	6.49441	3	C社	111	112.785	-1.4518	4	D社	114	134.664	-21.164	5	E社	118	117.753	0.24683	6	F社	115	130.342	-15.509	7	G社	118	134.981	-16.647	8	H社	136	123.917	12.2487	9	I社	173	170.521	2.31169	10	3P	155	145.082	9.91795	11	2P	135	130.717	4.44890	12	A社(新)			
	【理論値と残差】																																																																																																																																										
	y 比(平均)	y hat 理論値	e 残差																																																																																																																																								
1	A社	159	140.228	19.1049																																																																																																																																							
2	B社	105	98.8389	6.49441																																																																																																																																							
3	C社	111	112.785	-1.4518																																																																																																																																							
4	D社	114	134.664	-21.164																																																																																																																																							
5	E社	118	117.753	0.24683																																																																																																																																							
6	F社	115	130.342	-15.509																																																																																																																																							
7	G社	118	134.981	-16.647																																																																																																																																							
8	H社	136	123.917	12.2487																																																																																																																																							
9	I社	173	170.521	2.31169																																																																																																																																							
10	3P	155	145.082	9.91795																																																																																																																																							
11	2P	135	130.717	4.44890																																																																																																																																							
12	A社(新)																																																																																																																																										
【理論値と残差】																																																																																																																																											
	y 比(平均)	y hat 理論値	e 残差																																																																																																																																								
1	A社	159	140.228	19.1049																																																																																																																																							
2	B社	105	98.8389	6.49441																																																																																																																																							
3	C社	111	112.785	-1.4518																																																																																																																																							
4	D社	114	134.664	-21.164																																																																																																																																							
5	E社	118	117.753	0.24683																																																																																																																																							
6	F社	115	130.342	-15.509																																																																																																																																							
7	G社	118	134.981	-16.647																																																																																																																																							
8	H社	136	123.917	12.2487																																																																																																																																							
9	I社	173	170.521	2.31169																																																																																																																																							
10	3P	155	145.082	9.91795																																																																																																																																							
11	2P	135	130.717	4.44890																																																																																																																																							
12	A社(新)																																																																																																																																										
Y~Yhat散布図	<div>セメント成分の重量比分析用のデータ (n=11, 相関係数=0.823, 決定係数=0.678)</div> 																																																																																																																																										

注) 引張強度比の値は100倍値を用いて計算を行っている。

帰分析結果 (その2)

分 析 ③'

引張強度比の平均

スラグ混合率 + A ライト率 - B ライト率

セメント粉末度

$n = 11$ (B社データ除く)

0.608

0.780

$Y = 0.657 * X_1 + 0.0251 * X_2 + 1.605$

【標準化偏回帰係数】

	値
b 1	A + スラグ - B
b 2	セメ粉末度

【理論値と残差】

	y	y hat	e
	比(平均)	理論値	残差
1 A社	159	135.988	23.3444
2 B社			
3 C社	105	106.142	-0.8096
4 D社	111	103.089	8.24352
5 E社	114	130.626	-17.126
6 F社	118	121.960	-3.9601
7 G社	115	135.290	-20.456
8 H社	118	138.579	-20.245
9 I社	136	129.308	6.65821
10 J社	173	165.076	7.75667
11 K社	155	149.119	5.88007
12 A社(新)	135	124.650	10.5159

セメント成分の重回帰分析用の全データ
($n = 11$ 使用回数: 0.608 重相関: 0.780)

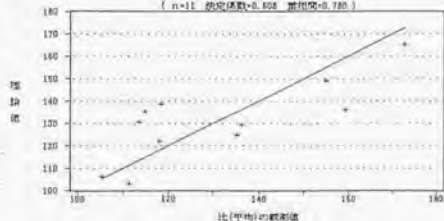


表-10.3 重回帰分析①の回帰式の2次元化

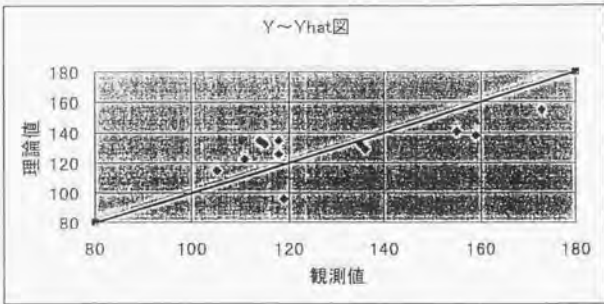
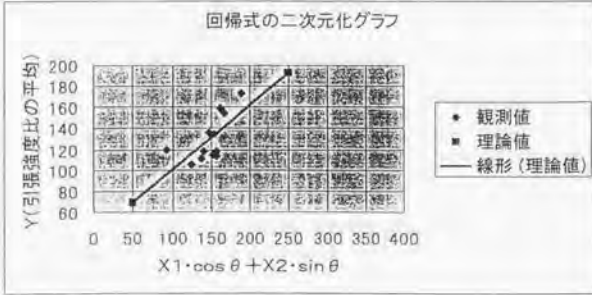
	分 析 ①
目的変数 Y	引張強度比の平均
説明変数 X 1	スラグ混合率+エーライト率
説明変数 X 2	セメント粉末度
採用データ数 n	n = 12
寄与率(決定係数)	0.444
重相関係数	0.666
回帰式	$Y = 0.617 \cdot X1 + 0.0140 \cdot X2 + 38.272$
Y ~ Yhat 散布図	
回帰式 二次元化グラフ	

表-10.4 重回帰分析②の回帰式の2次元化

	分析 ②
目的変数 Y	引張強度比の平均
説明変数 X 1	スラグ混合率
説明変数 X 2	スラグ粉末度
採用データ数 n	n = 11 (B社データ除く)
寄与率(決定係数)	0.657
重相関係数	0.811
回帰式	$Y = 1.494 \cdot X_1 + 0.0149 \cdot X_2 - 21.913$
Y ~ Yhat 散布図	<p>Y ~ Yhat 図</p>
回帰式 二次元化グラフ	<p>回帰式の二次元化グラフ</p>

表一〇・五 重回帰分析③の回帰式の２次元化

	分 析 ③
目的変数 Y	引張強度比の平均
説明変数 X 1	スラグ混合率+エーライト率-ビーライト率
説明変数 X 2	セメント粉末度
採用データ数 n	n = 12
寄与率(決定係数)	0.418
重相関係数	0.646
回帰式	$Y = 0.379 \cdot X1 + 0.0146 \cdot X2 + 57.717$
Y ~ Yhat 散布図	<p>Y ~ Yhat 図</p>
回帰式 二次元化グラフ	<p>回帰式の二次元化グラフ</p>

以上の結果から、重回帰分析解析で得られた重回帰式には有意性が認められることから、ここに重回帰式を用いたモデル化（案）を以下に提案した。ここで、各重回帰式で0.2を加えているのは、前述の解析上の誤差等を考慮する為である。

<ひび割れ感受性指数モデル I_{cs}>

$$\textcircled{1} : I_{cs} = (0.62C_1 + 0.014C_2 + 38) / 100 + 0.2$$

C₁ : スラグ混合率+エーライト混合率

C₂ : セメント粉末度

$$\textcircled{1}' : I_{cs} = (1.12C_1 + 0.025C_2 - 40) / 100 + 0.2$$

C₁ : スラグ混合率+エーライト混合率

C₂ : セメント粉末度

$$\textcircled{2} : I_{cs} = (1.49C_1 + 0.015C_2 - 22) / 100 + 0.2$$

C₁ : スラグ混合率

C₂ : スラグ粉末度

$$\textcircled{3} : I_{cs} = (0.38C_1 + 0.015C_2 + 57) / 100 + 0.2$$

C₁ : スラグ混合率+エーライト混合率-ビーライト混合率

C₂ : セメント粉末度

$$\textcircled{3}' : I_{cs} = (0.66C_1 + 0.025C_2 + 2) / 100 + 0.2$$

C₁ : スラグ混合率+エーライト混合率-ビーライト混合率

C₂ : セメント粉末度

10.3 自己収縮（反応収縮）量のモデル化

自己収縮（反応収縮）現象を評価する方法としては、直接自己収縮（反応収縮）量を定量的にモデル化して温度応力解析に反映する方法、自己収縮（反応収縮）指数として評価しひび割れ感受性指数とともに要求ひび割れ指数で評価する方法である。この内、後者については、10.1で実施した現象再現試験と温度応力解析に基づき算出した結果を分析する必要がある。しかし、現時点では正確に実施された現象再現試験のケース数が少なく、解析が困難であることから、ここでは自己収縮（反応収縮）試験の結果に基づいてモデル化出来る前者を実施した。

第7章で説明したセメントペーストの自己収縮（反応収縮）試験の結果に基づき、セメントペーストの自己収縮（反応収縮）量をモデル化し、コンクリートのモデルに

換算した。

(1) セメントペースト自己（反応）収縮量のモデル化

前章までの検討の結果、セメントペーストの自己収縮（反応収縮）量は、以下に示す成分特性とほぼ同様の良い相関を示すことを確認している。

- ① スラグ混合率
- ② スラグ混合率＋エーライト混合率
- ③ スラグ混合率＋エーライト混合率－ビーライト混合率

モデル化に際しては上記成分特性の内、ビーライトの初期に膨張する特性も考慮して、成分特性③を採用することとした。また、第8章の図-8. 11～8. 13は、上記特性値が小さい領域での非線形性を示唆しているが、データ数が少ないことから、自己収縮（反応収縮）量と成分特性とは線形関係にあると仮定した。

表-10. 6は材齢毎の単回帰分析結果である。回帰式は、成分混合率に依存する項および定数項より成り立っている。ここで、材齢毎の定数項は成分混合率を0%とした場合の基礎的自己収縮（反応収縮）量という意味がある。また、成分混合率に依存する項に係る係数が材齢が進むに従ってほぼ一定となっていることから、材齢が進むに従って、自己収縮（反応収縮）量は成分混合率によって決定され、増加しない傾向を示している。

表-10. 6 単回帰分析結果

材齢	セメントペーストの自己収縮歪み回帰式
5日	$S_h = 12.9 + 1.13 \times (S + A - B)$
9日	$S_h = 98.6 + 8.15 \times (S + A - B)$
16日	$S_h = 205.5 + 10.58 \times (S + A - B)$
30日	$S_h = 331.2 + 10.62 \times (S + A - B)$
44日	$S_h = 433.7 + 10.50 \times (S + A - B)$

注) S_h : 材齢毎のセメントペーストの自己収縮歪み (μ)

ただし、養生温度は25度のデータ

S : スラグ混合率 (%)

A : エーライト混合率 (%)

B : ビーライト混合率 (%)

成分混合率毎、材齢毎の自己収縮（反応収縮）量をモデル化する為に、表-10. 6で示した回帰式の定数項およびセメント成分混合率に係る係数を、モデル化が容易な関数形式で表現した上で、回帰分析で定数を決定すると以下のとおりとなる。

セメントペーストの自己収縮モデル：

$$Sh(t) = C(t) + D(t) \times (S + A - B) \quad (\text{単位：}\mu)$$

ここで、

・ $C(t)$ ：表-10. 6で示した材齢毎の回帰式の定数項で以下の式による。

$$C(t) = 158.5 \times \ln[M(t) - 1440] - 1254.9 \quad (\text{単位：}\mu)$$

・ $D(t)$ ：表-10. 6で示した材齢毎の回帰式の成分特性（変数）に係る係数で、以下の式による。

$$D(t) = 10.6 \times (1 - 2.106 \times e^{-0.00082298 \times [M(t) - 1440]}) \quad (\text{単位：}\mu)$$

・ $M(t)$ ：積算温度による材齢

(単位：時・°C)

・ S ：スラグ混合率

(単位：%)

・ A ：エーライト混合率

(単位：%)

・ B ：ビーライト混合率

(単位：%)

なお、上記モデル $C(t)$ 、 $D(t)$ で、回帰分析の結果得られた値を表-10. 7の値と比較した結果を図-10. 3に示す。

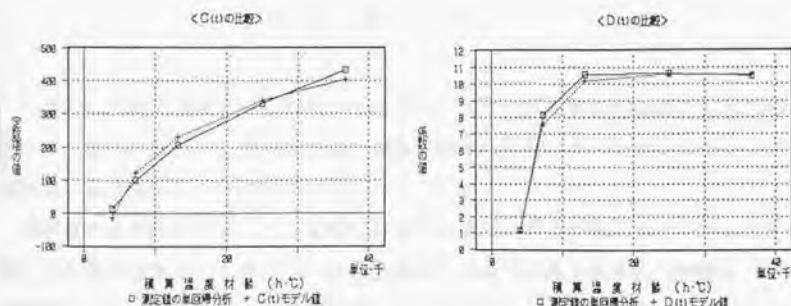


図-10. 3 モデル式 $C(t)$ 、 $D(t)$ の検証結果

(2) コンクリートの自己収縮（反収縮）量のモデル化

セメントペーストの自己収縮（反収縮）モデルを、コンクリートのモデルに変換する為に、以下に示す変換比率式を設定した。

$$(\text{コンクリートの自己収縮歪み}) = (\text{セメントペーストの自己収縮歪み}) \times \alpha$$

ここに、 α ：換算の為に補正係数

上記 α を決定する方法は、以下の3とおりの方法が考えられる。表-10.5は、下記の方法により補正係数 α を試算した結果である。

- ①コンクリートとセメントペーストの自己収縮試験で得られたひずみ比とする。
- ②現象再現試験の無拘束供試体で得られた自己収縮歪みと、モデル式によるセメントペースト自己収縮ひずみの比とする。
- ③セメントペーストが、コンクリートの全体体積に占める割合とする。

表-10.7 補正係数の試算結果

方法①	方 法 ②						方法③
	2 P (1)	2 P (2)	2 P (3)	3 P	A 社 (新)	F 社	
0.08	0.24	0.13	0.15	0.11	0.13	0.12	0.09

注1) 方法③は12種類のセメントの平均値

(L-7配合：単位セメント量=260kg/m³)

得られた補正係数の大小について、セメントペーストの自己収縮（反収縮）モデルが、個々のセメントの特性を過大あるいは過小評価している可能性はあるが、試算結果からは8～24%程度であった。

現時点では今後更にデータの蓄積が必要であるが、ここでは、自己収縮（反収縮）する部分のセメントペーストと、温度および応力による以外には収縮しない骨材で構成されるコンクリートの体積比率である方法③による算出方法が簡単である上、他の方法と比較して安定した結果を出すことから、モデル化には最も採用しやすい方法であると考えられる。

10. 4 耐ひび割れ性評価基準の検証

「10. 1～10. 3」で構築した耐ひび割れ性の評価方法について、明石海峡大橋の主塔基礎で用いた低発熱型セメントを用いたコンクリートなど、実際のデータにより検証した。

10. 4. 1 明石海峡大橋の計測結果に係る検証

表-10. 8は、明石海峡大橋の主塔基礎における計測結果を室内の現象再現実験で検証した結果に基づき、各指数を逆算した例である。ここで、温度応力解析は、第5章で提案した方法に基づき、全ての物理定数は積算温度換算されている。また、それぞれの指数を算定する為の引張強度も積算温度換算値をもちいるなど、新たに提案した温度応力解析方法を適用した。

	3 P		2 P (k-s(c))		備 考
	試 験	解 析	試 験	解 析	
① 最 高 温 度 (℃)	40.1	37.1	32.6	32.5	
② ひびわれ発生時期 (h)	159	同 左	257	同 左	
③ ひびわれ発生時引張応力 (kgf/cm ²)	12.7	10.0	18.5	19.0	
④ 拘 束 率 (%) (昇温時、降温時平均)	91.3	100.0	81.0	100.0	
⑤ 拘束率補正した引張応力 (kgf/cm ²)	13.9	10.0	24.1	19.0	③/④
⑥ ひびわれ発生時 積算温度換算 割裂引張強度 (kgf/cm ²)	21.2	----	27.1	----	
⑦ ひびわれ感受性指数	1.67		1.39		⑥/⑤
⑧ 硬 化 収 縮 指 数	1.39		1.37		⑥試験 ⑤解析
⑨ 要 求 ひ び 割 れ 指 数	2.32		1.90		⑦×⑧

表-10. 8 要求ひび割れ指数等の試算例

ひび割れ感受性指数は、ひび割れ発生時の積算温度換算された割裂引張強度とひび割れ発生時に計測された引張応力との比⑦として試算した。また、自己収縮指数は、試験の結果得られた引張応力と温度応力解析で得られた引張応力との比⑧、要求ひび割れ指数⑨は、ひび割れ感受性指数⑦および自己収縮指数⑧の積として試算した。

この結果からは、主塔基礎3Pで用いられたコンクリートの方が、主塔基礎2Pと比較して必要であったひび割れ感受性および要求ひび割れ指数が大きかったことを示している。また、試算した要求ひび割れ指数は2.32～1.90といずれのケースにおいても、明石海峡大橋主塔基礎で要求していた1.5よりも大きい。

10. 4. 2 明石海峡大橋の計測結果でのひび割れ感受性指数モデルの検証

さらに、ひび割れ感受性指数モデルについてはその妥当性を、現象再現試験の結果とモデルによる計算値とを比較することで検証した。ここで、現象再現試験におけるひび割れ発生時における実測値に基づく「ひび割れ感受性指数」は下記の式により算出した。

$$(\text{ひび割れ感受性指数}) = (\text{積算温度換算した} 20^{\circ}\text{C 標準養生供試体の割裂引張強度}) \\ \div (\text{現象再現試験におけるひび割れ発生時の引張応力})$$

表-10. 9は、「10. 2」で提案したひび割れ指数のモデル式により求めた結果を実測値と比較した結果である。また、図-10. 4～10. 8は、これらの結果を図化した結果である。

ひび割れ感受性の推定に係る不確定性要因を考慮した定数0. 2を含まないモデルでは、概ねモデル式による推定値と実測値が一致している。また、定数0. 2を含んだモデルによる推定式では、概ね実測値以上の値が得られ、要求ひび割れ感受性指数を求める推定式としては、安全側の結果が得られることが分かり、モデル式はそれぞれ限られたデータからは有用であると言える。

しかし、現時点では現場計測結果を含めて十分な検証データが得られていないことから、これ以上の評価は困難である。今後はより正確な現場計測技術の確立とともに、計測データの量的蓄積が必要であると考えられる。

なお、明石海峡大橋の2P主塔基礎および3P主塔基礎の室内現象再現試験で試算したひび割れ感受性指数は表-10. 8に示したとおり1. 39～1. 67であり、表-10. 9の示したひび割れ感受性指数モデル①～③による試算値1. 61～1. 91よりも小さいことから、安全側の耐ひび割れ性の評価が得られたと言える。

表-10.9 ひび割れ感受性指数の実測値とモデル式による推定式(要求値)の比較

セメント メーカー	現象再現試験	モデル①	モデル②	モデル③	モデルで0.2を考慮しない場合		
					モデル①	モデル②	モデル③
B 社	0.91	1.16	----	1.17	0.96	----	0.97
		----		----	----		----
C 社	1.02	1.35	1.24	1.39	1.15	1.04	1.19
		1.19		1.26	0.99		1.06
D 社	1.13	1.43	1.33	1.37	1.23	1.18	1.17
		1.33		1.23	1.13		1.03
F 社	1.38	1.46	1.31	1.48	1.26	1.11	1.28
		1.38		1.42	1.18		1.22
3 P	1.57	1.75	1.83	1.73	1.55	1.63	1.53
		1.91		1.85	1.71		1.65
2 P	1.39	1.61	1.68	1.63	1.41	1.48	1.43
		1.65		1.69	1.45		1.49
A社(新)	1.50	1.58	1.52	1.49	1.38	1.32	1.29
		1.51		1.45	1.31		1.25

注) モデル①と③の上段: B社データを考慮の場合

下段: B社データを除く場合

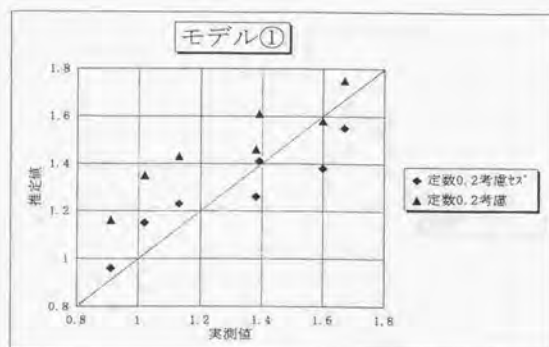


図-10.4 モデル式①による推定値と実測値の比較

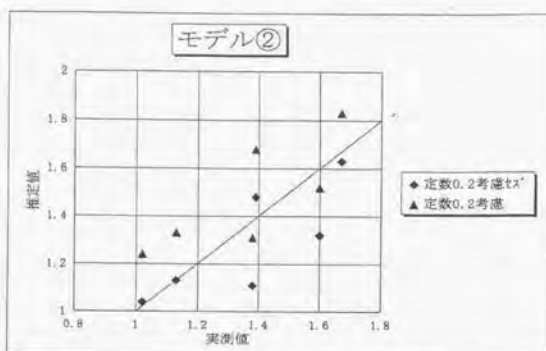


図-10.5 モデル式②による推定値と実測値の比較

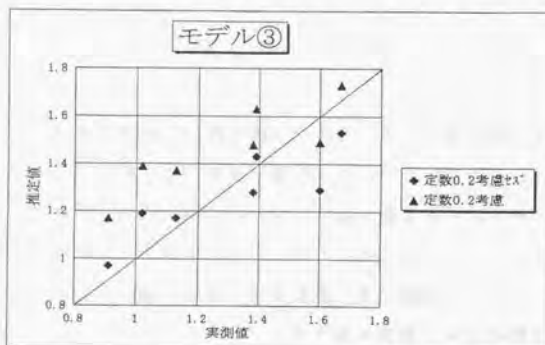


図-10.6 モデル式③による推定値と実測値の比較

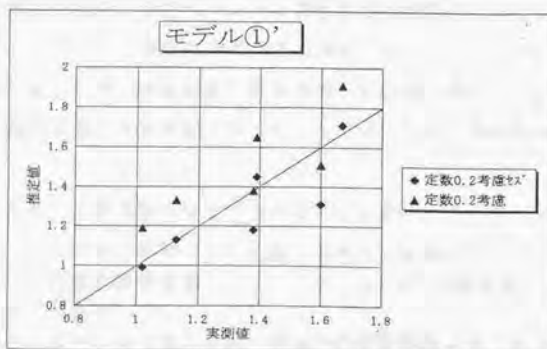
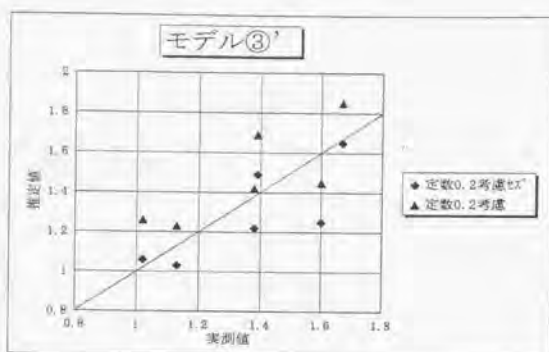


図-10.7 モデル式①'による推定値と実測値の比較



図一10.8 モデル式③'による推定値と実測値の比較

10.4.3 明石海峡大橋の計測結果での自己収縮（反応収縮）モデルの検証

コンクリートの自己収縮（反応収縮）量のモデルによる算定方法は、10.3で示したとおり、セメントペーストの自己収縮（反応収縮）量をセメント成分特性および積算温度材齢に基づくモデル式で求め、セメントペーストがコンクリート全体に占める割合 α により、コンクリートの自己収縮（反応収縮）量に換算した。

図一10.9は、「10.3」のセメントペースト自己収縮（反応収縮）量モデル式に基づいて、セメントペースト8種類の室内自己収縮（反応収縮）試験の結果をシミュレーションした結果である。C社については問題を残す結果となっているが、他の7社については概ね100マイ加程度の差はあるものの、セメントペーストレベルの比較結果としては良く自己収縮（反応収縮）量を予測していると考えられる。

次に、明石海峡大橋の主塔基礎で用いたコンクリートの、現象再現試験で得られた応力履歴をシミュレーションした。

シミュレーションの前提条件は以下のとおりとした。

- ①セメントペーストの自己収縮（反応収縮）量あるいは歪みを、「10.3」のモデル式で算定する。その際の説明変数（パラメータ）は[スラグ混合率+エーライト 混合率-ビーライト混合率]とする。
- ②コンクリートの自己収縮（反応収縮）歪みへの換算係数 α は、セメントペーストのコンクリート体積に占める割合0.09を採用する。

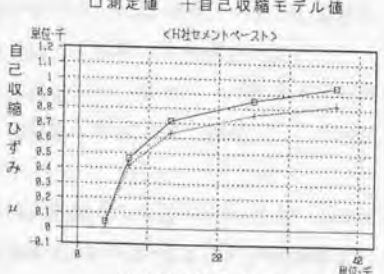
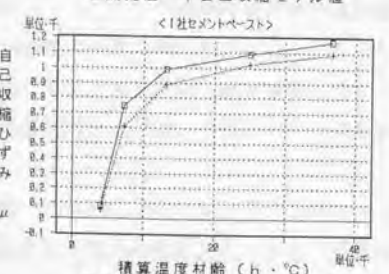
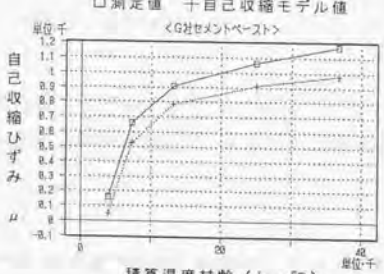
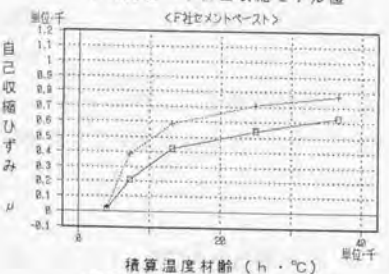
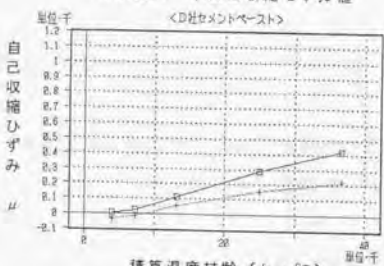
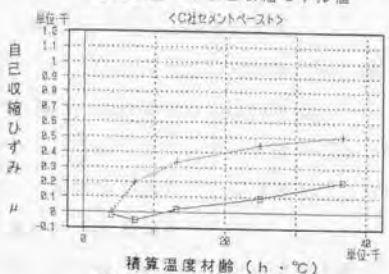
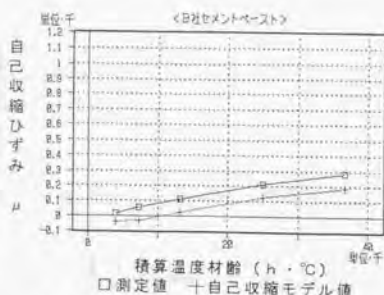
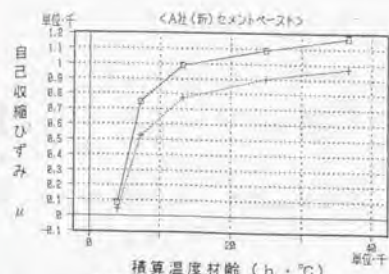


図-10.9 自己収縮（反応収縮）歪みの測定値と推定値との比較

(説明変数: スラグ混合率+エーラット混合率-ピーライト混合率)

これらの条件で得られたコンクリートの自己収縮（反応収縮）歪みのモデル式を用いて、以下に示す要領で、応力履歴をシミュレーションする。

- ①現象再現試験における計測温度履歴に基づき、積算温度材齢に伴う温度変化による歪みの変化を算出する。
- ②自己収縮（反応収縮）歪みモデル式に基づき、積算温度材齢に伴う自己収縮（反応収縮）歪みの変化を算出する。
- ③コンクリートに発生する積算温度材齢に伴う歪みを、上記温度歪みと自己収縮（反応収縮）歪みの合計で算出する。
- ④ ③で求めたコンクリート歪みに基づき、拘束率を100%と想定した場合の応力を、積算温度換算した弾性係数により求める。この際の発生応力は、時間ステップ毎の応力変化増分である。
- ⑤発生応力増分を算出した積算温度毎に、積算温度におけるクリープ関数（積算温度換算されたクリープ関数）を求め、発生応力増分の経時変化をクリープ関数に基づき算出する。
- ⑥ ⑤で求めた発生応力増分毎のクリープを考慮した時系列的変化（関数）を重ね合わせるにより、コンクリート内の発生応力の時系列的変化（経時変化）を求める。

図-10.10は、明石海峡大橋2P、3P主塔基礎で採用された低発熱型セメントを用いたコンクリートの現象再現試験の温度履歴に基づき、上記の方法で求めた温度歪み、自己収縮（反応収縮）歪み、およびこれらを合計した全歪みの時系列的変化を示している。なお、自己収縮（反応収縮）モデル式においてコンクリートが膨張する段階の自己収縮（反応収縮）ひずみ（この場合は、膨張）については、考慮しないこととした。

図-10.11は、図-10.10のコンクリート歪みの経時変化に基づき、前述の要領により算出した応力の経時変化、および現象再現試験における発生応力の実測経時変化を比較して示している。なお、シミュレーションでは拘束率100%を前提としているため、現象再現試験の結果も拘束率の逆数を乗ずることにより、100%に換算することとした。

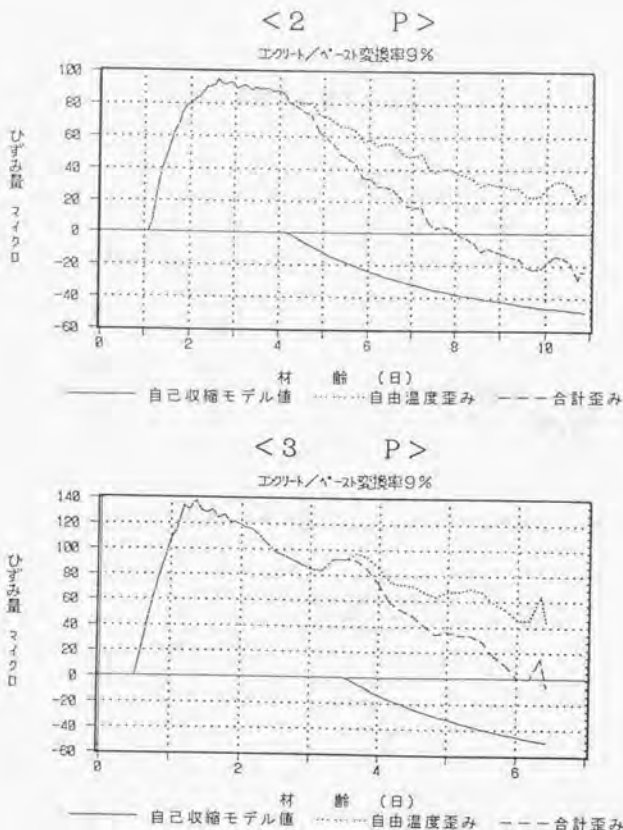


図-10. 10 コンクリート自己収縮（反応収縮）モデルによる歪みの経時変化

2P、3P主塔基礎の結果は共に、コンクリートが圧縮応力領域にある材齢まではシミュレーションが良く試験結果と一致していることが分かる。また、2P主塔基礎では、引張応力領域においても比較的良くシミュレーションと試験結果が一致している。これに対して、3P主塔基礎ではシミュレーション結果が試験結果よりも大きな引張応力を与えている。

以上に示すとおり、自己収縮（反応収縮）モデルによるシミュレーションの2ケースの結果だけでは、モデルの妥当性を立証したとは言えない。しかし、現象のシミュレーションには有効な手段であると言える。

今後は、このような計測結果のシミュレーションの実例を増やすことにより、さらに信頼性を高めるとともに、改良の可能性を追求する必要があると考える。

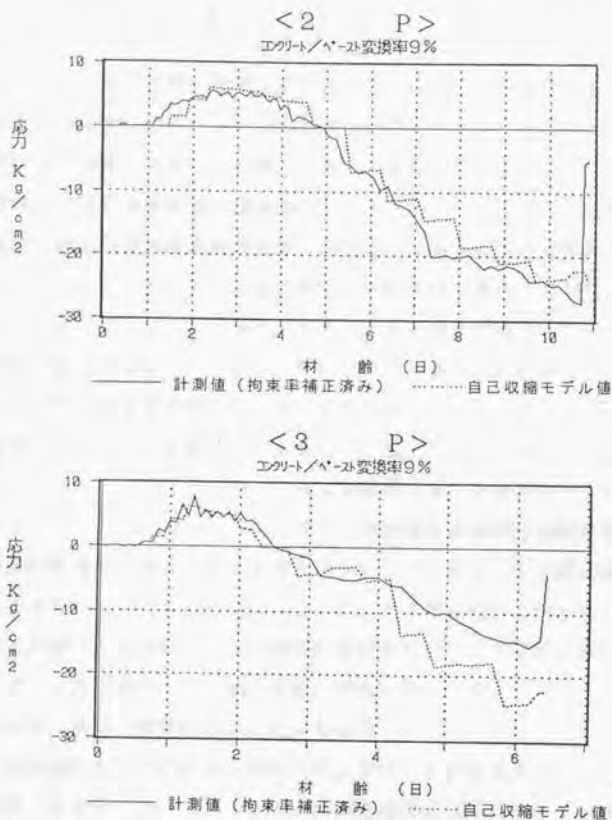


図-10. 11 現象再現試験結果とモデルによるシミュレーション結果の比較

1 1 結論

1 1. 1 成果のまとめ

低発熱型セメントを用いたコンクリートの温度応力ひび割れと、コンクリートの物理特性、セメントの成分特性、温度上昇特性の関係について、明石海峡大橋の基礎工における現場計測結果、およびセメント製造メーカーに依頼したセメントの改良の試みとその試験練り結果を分析した結果、大きな成果が得られた。

第一の成果は、明石海峡大橋主塔基礎のマスコンクリートにおける温度、応力、歪みの計測結果、および室内現象再現試験の結果から、温度応力ひび割れの発生メカニズムを解明したことである。また、室内現象再現試験が温度応力ひび割れ現象を良く再現することを確認した。これにより、応力・ひずみ等を把握するなど、温度応力ひび割れ現象を具体的に確認し、温度応力解析方法および自己収縮等との関連でセメント成分特性の改善の方向性を見いだしたことである。

現状の低発熱型セメントを用いたコンクリートは、セメント成分に占めるクリンカー成分比率を小さくしていることから、強度を確保することを目的としてセメントの活性度を大きくしている。従って、コンクリート強度および弾性係数は早期に大きくなり、若材齢時の外部拘束を大きくするとともに、コンクリートが最高温度に達した後に降下する時期においてクリープによる引張応力低減が殆ど期待出来ない場合が多い。明石海峡大橋の主塔基礎における現場計測結果からも、温度降下時における拘束率は100%に近いことが分かっている。また、弾性係数が大きいことは、コンクリート内部の構造欠陥に対して敏感になることにもなる。

従って、耐温度応力ひび割れ性に優れたコンクリートを評価するには、温度応力発現特性に影響を与えるコンクリート強度、若材齢時の塑性流動性、クリープ特性、ひび割れに対する感度を総合的に温度応力解析において評価する必要がある、コンクリート強度発現特性を温度上昇特性、施工条件を勘案してコントロールすることが望ましい。

第二の成果は、多様な成分特性を有するセメントによる試験練りと物理試験により、コンクリートのひび割れ感受性および自己収縮特性がセメント成分特性に対する依存性を有することを確認したことである。さらに、これらのセメント成分特性をコンクリートのひび割れ感受性指数および自己収縮特性としてモデル化したことである。

コンクリートのひび割れに対する感度（以下、ひび割れ感受性）は、コンクリートの割裂引張強度と直接引張強度の比（以下、引張強度比）で評価することが出来ることが分かった。

また、割裂引張強度試験においては供試体が破壊に至る過程でマイクロクラックが載荷方向の圧縮応力により骨材に拘束されることが分かっているのに対して、直接引張強度試験においては、マイクロクラックの発生から直ちに破断に至ることを確認した。

特に割裂引張強度と直接引張強度の比（引張強度比）には、特にセメント成分特性との関連において以下の特徴が試験結果からは認められた。

- ①セメント成分に占めるスラグ比率が小さい程、引張強度比が小さい（ひび割れ感受性が小さい）。逆に、クリンカー比率が大きい程、引張強度比が大きい。
- ②成分比率と粉末度の2種類の指標を組み合わせた重回帰分析の結果では、下記の組み合わせが、引張強度比を説明する上で有用である。

1) スラグ成分比率 と スラグ粉末度

2) (スラグ+エーライト)成分比率 と セメント粉末度

3) " " 成分比率 と スラグ粉末度

つまり、これらの説明変数の組み合わせによる回帰式（予測式）で、引張強度比は予測可能であることを示した。また、上記の組み合わせの中で、それぞれの説明変数の寄与率の比の変動が小さいのは、1)の組み合わせであった。

さらに、明石海峡大橋主塔基礎の現場での無応力計による計測歪みの結果からは、コンクリートには自己収縮（反応収縮）が存在することが確認された。計測結果では、自己収縮（反応収縮）ひずみは数10マイクロから100マイクロであり、温度応力発生に大きな影響があることが分かった。

石粉をコンクリート1m³当たり30kgブレミックスしたセメントペースト供試体での自己収縮（反応収縮）測定結果では、材齢44日において約200マイクロから1200マイクロと低発熱型セメント毎のばらつきが大きいことが分かったが、ひび割れ感受性（あるいは引張強度比）の場合と同様に、下記に示すセメント成分特性との有意な関係があることが分かった。

- ①材齢に関わらず、スラグ混合比率が40%を越えると自己収縮（反応収縮）が大きくなる。
- ②材齢に関わらず、（スラグ混合比率+エーライト比率）が40%を越えると自己

収縮（反応収縮）ひずみが大きくなる。

③ピーライト比率が大きいセメントは自己収縮が小さい。

④ひび割れ感受性と自己収縮（反応収縮）特性とは、同じセメント成分特性による影響を受ける。特に、ひび割れ感受性と自己収縮（反応収縮）量との相関が良いことから、コンクリート微細構造が自己収縮（反応収縮）ひずみの影響を受けて構造欠陥をより多く内包し、コンクリートを割れやすくしていることが考えられる。

⑤自己収縮（反応収縮）量を良く説明出来るセメント成分特性は、以下に示すとおりである。

1) スラグ混合率

2) スラグ混合率＋エーライト混合率

3) スラグ混合率＋エーライト混合率－ピーライト混合率

第三の成果は、温度応力ひび割れ現象を具体的に把握した成果に基づき、温度応力解析方法を改善したこと、使用する物理特性の試験方法あるいは適用方法を改善したこと、さらに、第二の成果であるモデル化とともに、温度応力現象のシミュレーションの再現性を高めたことである。

温度応力ひび割れの発生メカニズムを解明した成果に基づき、温度応力解析方法の運用方法、解析に必要な物理試験方法等を、以下のように改善することを提案した。

①弾性係数、クリープ係数、引張強度等の物理試験方法およびその評価方法を、

実際のコンクリートで発生している応力レベルや材齢等に近い条件で実施する。

②解析に用いる各種物理定数は、積算温度換算値を適用する。

③温度応力解析に、自己収縮（反応収縮）ひずみを定量的に導入する。

低発熱型セメントに限らず、マスコンクリート構造物の温度応力ひび割れの防止、およびその的確な予測には、セメント成分に着目したひび割れ感受性（要求ひび割れ指数）、および自己収縮（反応収縮）ひずみの評価が、温度応力解析には必要である。

また、温度応力ひび割れをより精度良くコントロールするには、構造物寸法、施工条件等が許容する自己収縮（反応収縮）ひずみ、およびひび割れ感受性の範囲でセメント成分を選択することが望ましい。

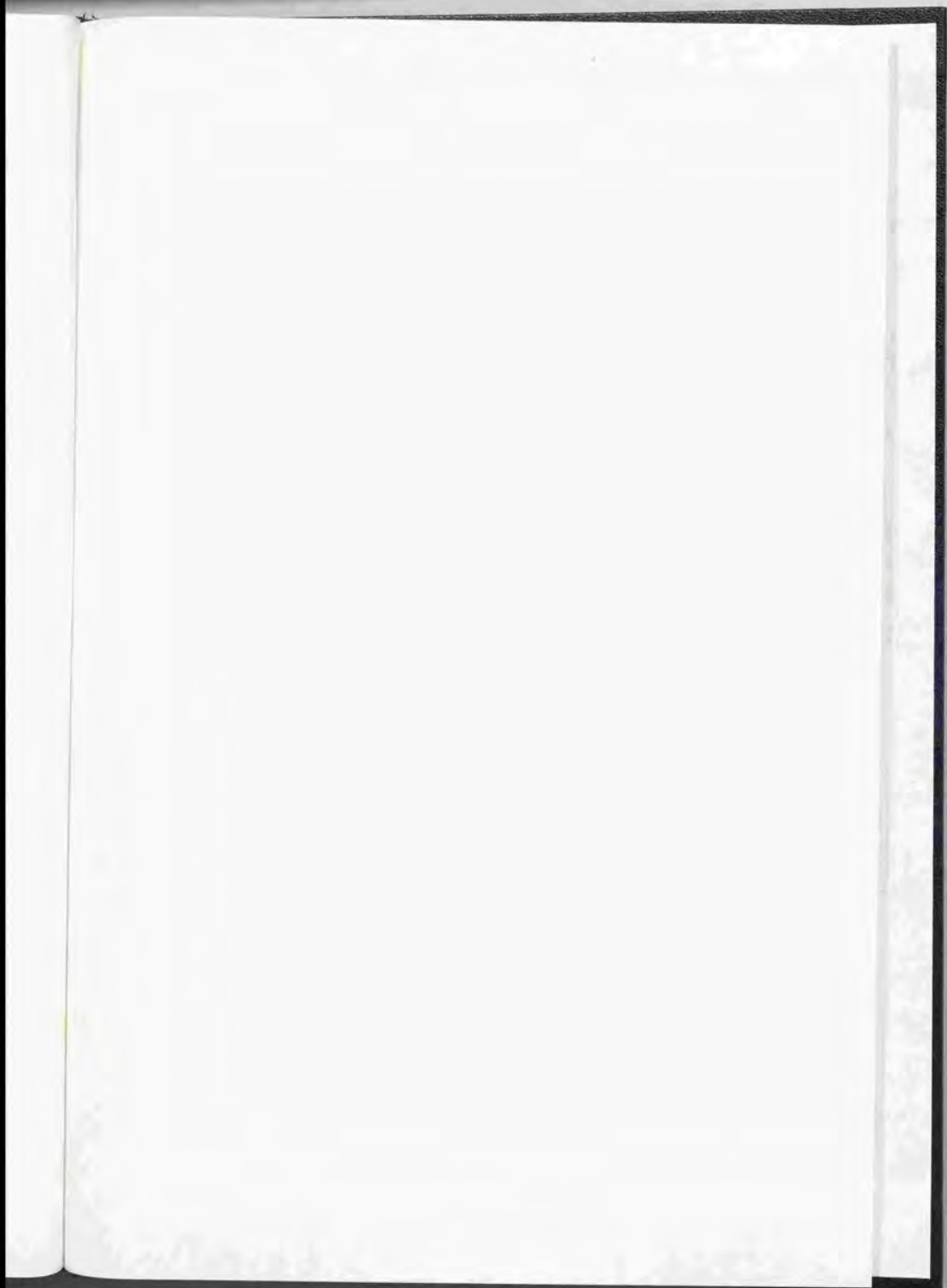
11.2 今後の方向性

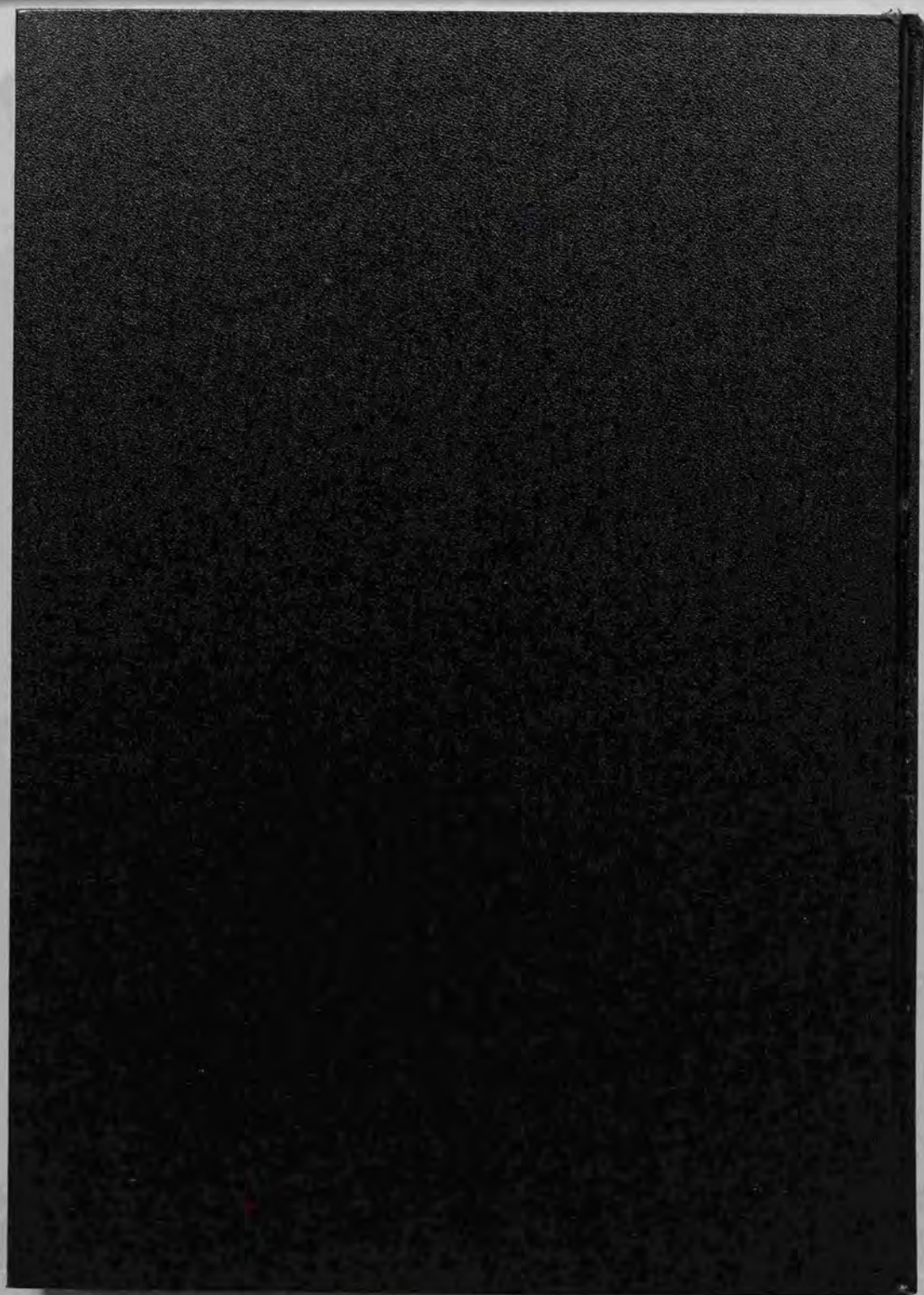
本論文では、低発熱型セメントを用いたコンクリートについて研究し、使用するセメント成分特性の温度応力発生メカニズム、およびひび割れ感受性に与える影響について解明した。また、上記結果を利用した温度応力解析による耐ひび割れ特性の評価手法について述べた。

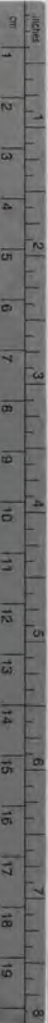
今後は、今回提案したコンクリートの耐ひび割れ特性の評価方法を、計測および解析事例を蓄積することにより、その信頼性をより高める必要があると考える。

また、この方法は低発熱型セメントを用いたコンクリートおよび特定の配合において検討したが、同様の手法は他のセメントおよび配合にも適用可能な基準であることを確認すべく、他セメントおよび配合による試験練り、現象再現試験、現場計測、および温度応力解析を実施して検証することが重要である。

セメント成分特性について言えば、今回得られたひび割れ感受性、自己収縮特性との関係が、他のセメントおよび配合において普遍であることを確認することが期待される。これにより、今回得られた成果を普遍的に有効利用する可能性が開けると考える。







Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

