

細孔容積分布密度関数に基づく
コンクリートの乾燥収縮モデル

下村 匠

細孔容積分布密度関数に基づく
コンクリートの乾燥収縮モデル

下村 匠

細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル

目次

第1章 序論	1
1. 1 本研究の背景と目的	1
1. 1. 1 構造物の機能とコンクリートの乾燥収縮	1
1. 1. 2 コンクリートの乾燥収縮の予測における技術的課題	2
1. 1. 3 本研究の背景としてのハイパフォーマンスコンクリート	3
1. 1. 4 本研究の目的	5
1. 2 本研究の方法論と既往の研究の概観	6
1. 2. 1 本研究の方法論	6
1. 2. 2 乾燥収縮の機構に関する研究	8
1. 2. 3 乾燥収縮予測式	9
1. 2. 4 数値解析による予測	10
1. 2. 5 数値シミュレーション	12
1. 3 本論文の構成	13
第1章の参考文献	14
第2章 細孔容積分布密度関数による コンクリートの組織構造のモデル化	18
2. 1 はじめに	18
2. 2 組織構造のモデル化の準備	19
2. 2. 1 コンクリート中の空隙径の分布	19
2. 2. 2 乾燥収縮におけるコンクリート中の空隙の機能	21
2. 2. 3 コンクリートの組織構造のモデル化の方針	22
2. 3 コンクリートの組織構造のモデルの定式化	22
2. 3. 1 細孔容積分布密度関数の定義	22
2. 3. 2 細孔容積分布密度関数の具体形	23
2. 3. 3 細孔組織の空間的構造	25
第2章の参考文献	26

第3章	コンクリート中の微視的現象のモデル化	27
3.1	はじめに	27
3.2	細孔組織中の水分の定常挙動	28
3.2.1	細孔組織中に存在する物質の相	28
3.2.2	気体相の基本的性質	28
3.2.3	液体相の基本的性質	30
3.2.4	気相と液相の力学的平衡	31
3.2.5	液状水と水蒸気の熱力学的平衡	32
3.3	細孔組織中の水分の非定常挙動	35
3.3.1	質量保存則	35
3.3.2	水蒸気の移動	37
3.3.3	液状水の移動	40
3.4	水分状態の変化にともなう組織の体積変化	42
3.4.1	毛管力に起因する応力	42
3.4.2	毛管力に起因する応力による組織の変形	45
	第3章の参考文献	47
第4章	材料レベルの特性の導出	50
4.1	はじめに	50
4.2	水分平衡特性	51
4.3	水分移動特性	54
4.4	体積変化特性	58
	第4章の参考文献	60
第5章	有限構造体の乾燥収縮挙動の予測	61
5.1	はじめに	61
5.2	境界条件	62
5.3	数値計算手法	64
	第5章の参考文献	68
第6章	提案手法の妥当性と適用範囲の検証	70
6.1	はじめに	70
6.2	実験方法	71

6. 2. 1	供試体および実験の手順	71
6. 2. 2	使用材料および配合	73
6. 2. 3	各供試体の実験条件	76
6. 3	解析方法	77
6. 3. 1	数値計算の方法	77
6. 3. 2	諸材料定数の同定の方法	80
6. 4	実験結果と解析結果	83
6. 4. 1	種々の条件に対する手法の適用性	83
6. 4. 2	同定された諸材料定数に関する検討	93
6. 5	提案モデルに基づく構造物の乾燥収縮予測フローの提案	100
6. 5. 1	予測フローの概要	100
6. 5. 2	材料定数値の決定方法	103
6. 5. 3	予測フローの実行例	107
	第6章の参考文献	110
	第7章 結論	112
	謝辞	116
	付録A. 記号の定義	117
	付録B. 数値解析プログラムのリスト	120
	付録C. 各供試体の実験結果および解析結果	128

第1章 序論

1. 1 本研究の背景と目的

1. 1. 1 構造物の機能とコンクリートの乾燥収縮

多孔材料であるコンクリートは、通常内部に水分を含んだ状態にある。環境の湿度変化あるいは水との直接の接触などにより、コンクリートの内部の含水状態は変化し、含水状態の変化にともない、コンクリートは体積変化を起こす。含水状態の変化にともなうコンクリートの体積変化過程のうち、工学上古くからとりわけ重要とされてきたのは、乾燥にともなう収縮である。乾燥収縮は、一般のあらゆるコンクリート構造物において起こり得る現象であり、ひびわれの発生、寸法変化、応力状態の変化をもたらすことにより、耐久性をはじめとする構造物の諸性能を、直接、間接に、場合によっては大きく低下させるからである。

構造物中に打設されたフレッシュコンクリートは、その後内部のセメントの水和反応が進行することにより、構造コンクリートへと成長する。他の建設材料にないコンクリート特有のこの過程は、強度、遮蔽性など、構造コンクリートとしての諸機能を支えるセメント硬化体組織が形成される過程であると同時に、多くの場合乾燥過程でもある。大気に曝されたコンクリートは環境の湿度と平衡する含水状態に向かうのであるが、材令初期のコンクリートには、通常の湿度のもとで平衡するよりも過剰な水分が含まれているからである。したがって、乾燥過程はあらゆる構造物中のコンクリートにとって不可避な過程であるといえる。

コンクリートは一般に、乾燥にともない収縮するという性質を有している。構造物中のコンクリートの体積変化は、多くの場合不都合な結果をもたらす。その最も顕著な点は、ひびわれの原因となることであろう。乾燥は表面より起こること、各表面の乾燥条件が異なることなどにより、構造物中のコンクリートは、部分により乾燥の状態が異なる。各部分は自由な体積変化を起こすことはできず、相互に拘束し合う結果となる。内部の鉄筋の存在、部材間の接合などにより、コンクリートの体積変化は外的にも拘束される。体積変化が拘束される結果、コンクリートには応力が導入され、しばしばひびわれが発生することとなる。等間隔に発生する比較的顕著なひびわれ、表面に発生する微細な亀甲模様のひびわれなど、乾燥収縮ひびわれはあらゆるコンクリート構造物に種々の形態で発生する可能性がある。ひびわれは、構造物の美観を損ない、遮蔽性を低下させるばかりでなく、鋼材への腐食物質の到達を容易にすることにより、構造物の耐久性をしばしば著しく低下さ

せるのである。また、ひびわれが発生しない場合であっても、コンクリートの体積変化に起因した構造物の寸法変化や変形は、構造物の使用性をはじめとする諸機能を損なうこととなる。プレストレストコンクリート構造では、乾燥収縮はクリープとともにプレストレスを減少させる主要な原因となっている。

以上に述べたように、コンクリートの乾燥収縮は構造物の諸性能と深く関わっており、多くの場合、性能を低下させる方向に作用する。それゆえ、乾燥収縮の予測、材料および構造設計における乾燥収縮の考慮、乾燥収縮を低減する材料の開発が工学上重要な課題となっている。本研究はこのうち、乾燥収縮の予測に主眼を置くものである。

1. 1. 2 コンクリートの乾燥収縮の予測における技術的課題

乾燥収縮を含め実構造物の種々の挙動に対し、精度が高く、適用範囲の広い予測を行うためには、一般に、用いる構成式（材料モデル）が種々の要因を反映し材料の挙動を適切に表現し得ること、および任意の条件下でその数値解を容易に求め得る手段が存在することが必要である。後者、すなわち数値計算の技術に関しては、近年ではもはや特別な困難を要する問題はなくなりつつある。有限要素法に代表される数値解法が、固体力学、流体力学上の種々の工学問題において、支配微分方程式の数値解を求める汎用的な方法として確立され[1.1]、コンクリート工学の分野でも、構造物の力学的挙動の解析[1.2]、コンクリートの水和熱に関わる熱伝導および熱応力解析[1.3]などに、著しい成果を挙げている。数値計算を実行する計算機は高性能化が進み、今日では大規模な計算が高速かつ容易に行えるようになっている[1.1]。解くべき支配方程式がおよそいかなる形式であっても、安定した数値解を高い精度で高速に得ることに関する技術的課題は、もはや克服されたとみてよいであろう。したがって、構造物の種々の挙動を予測する上での問題は、用いる材料モデルが材料の挙動を適切に表現し得るかどうかにかかっている。

予測に用いる材料モデルが材料の挙動を適切に表現するためには、材料モデルが現象の真実をより正確に記述するものでなければならないことは当然であるが、一方で、対象となる材料自身が、ある水準以上の信頼性を備えていなければならない。対象がコンクリートの場合、とりわけこの点は看過できない。構造物の挙動の予測に用いる材料モデルは、一般に、実験室の理想的な条件下での小型の供試体の挙動をもとに開発され、またモデル中の諸定数の値は、実験室において行われる材料試験の結果をもとに決定される。このような手順により導出された材料モデルを用いて実構造物の挙動を予測する際には、構造物中のコンクリートが均等質で、材料試験を行ったコンクリートとまったく等価な性質を有することが前提となる。金属材料などでは容易に満足されるこの前提条件は、コンクリート材料の場合、一般に容易に満足されるわけではない。

フレッシュコンクリートの状態で構造物中に投入された後、締固め、養生などの過程を経てはじめて構造材料となるコンクリートは、構造物中のすべての部位に均等質な状態で存在することが、必ずしも容易ではない。締固めの過程では、不十分な締固めによる充填不良、あるいは過度の締固めによる材料分離の生じる危険性を常に内包している[1.4]。施

工にともなう欠陥は、人為的な要素を含むため、定量評価を行うことがきわめて困難である[1.5]、また、フレッシュコンクリート時において、粉体や骨材などに拘束されない水を多量に含む配合のコンクリートは、打設後にブリージングが生じ、構造物中のコンクリートの均質性、等方性を損う結果となるが[1.6]、そのような性質はおのずと、コンクリートを品質の定量評価が困難な材料とならしめていることになる。耐久性に関わる実構造物中のコンクリートの挙動の予測という問題において、コンクリート特有のこれらの要因の存在が、従来克服し難い障壁として存在していたのである。材料の力学的特性をもとに荷重作用に対する構造物の挙動を定量評価し、安全な構造物を設計する構造設計においては、この問題に対し早くから現実的な対応をとる必要があった。限界状態設計法を採用している土木学会コンクリート標準示方書では、終局限界状態、疲労限界状態の検討において、供試体と構造物中との材料強度の差異などを配慮する材料係数の値を、鋼材では1.0（または1.05）を標準とするのに対し、コンクリートでは1.3を標準とすることで構造物中のコンクリートの品質の不確実性が考慮されている[1.7]。

しかしながらこの問題は、1988年に開発され、現在その普及が着実に進みつつあるハイパフォーマンスコンクリートにより、本質的に解決されたといつてよい[1.8]。ハイパフォーマンスコンクリートは、締固めを行わなくとも、構造物中のすべての部位に均等質なコンクリートを実現する。また、水粉体比がきわめて低く設定されていることから、ブリージングによる初期欠陥の発生が皆無である[1.9]。構造物中のコンクリートの品質から、施工にともなう不確定要因が原理的に排除され、また材料分離に起因する不均質性を考慮する必要がなくなるのである。

数値解析技術の著しい進歩、信頼性の高いハイパフォーマンスコンクリートの開発により、構造物レベルにおけるコンクリートの乾燥収縮挙動を予測するための技術的課題は、いかに現象を正しく表現し得る材料モデルを用いるかの一点に凝縮されつつある。逆に、優れた材料モデルを開発し、これを構造物レベルにおける乾燥収縮挙動の予測に適用する際の、技術的な土壌は十分に形成されているといえるのである。

1. 1. 3 本研究の背景としてのハイパフォーマンスコンクリート

締固め作業を行わなくとも、構造物中のすべての部位に均等質で緻密なコンクリートを実現するハイパフォーマンスコンクリートは、施工の改革をもたらすのみならず、実構造物中のコンクリートの品質の信頼性を高めることになる。実験室レベルの材料試験から、あるいは試験を行わなくとも使用材料と配合から、実構造物中のコンクリートの特性を評価し、適切な予測手法を用いることにより、供用環境下における構造物の耐久性能を精度よく定量評価することが、ハイパフォーマンスコンクリートを用いた場合不可能ではなくなる[1.10][1.11]。本研究は、コンクリートの乾燥収縮の予測手法の開発を目指すものである。乾燥収縮だけでなく、ひびわれ、炭酸化、腐食物質の侵入など、コンクリート構造物の種々の劣化現象に対し、適切な予測手法を持ったとき、これらに基づく構造物の合理的

な耐久性設計体系を構築することが可能となるが、そのような設計法はハイパフォーマンスコンクリートを用いた構造物に適用してこそ、意義が大きいのである。

ハイパフォーマンスコンクリートの材料配合設計においては、コンクリートの諸特性のうち、発熱および収縮に対する設計がきわめて重要となる。ハイパフォーマンスコンクリートの最大の特徴である締固め不要を達成するためには、一般に、粉体量が多く、セメントペーストの割合の大きい配合とする方が有利である。そのような方向に配合をシフトさせることは、コンクリート組織の緻密さを増大させることになるので、コンクリート強度、物質透過抵抗性などの性質に関しては有利となる。しかしながら一方で、セメントペーストの割合を大きくすることは、水和発熱、乾燥収縮、硬化収縮などの性質に関しては不利な方向に作用することとなる。ハイパフォーマンスコンクリートは、締固め不要であり、かつ初期欠陥抵抗性に優れ、長期的にも耐久であるコンクリートとして定義されている[1.8]。したがって、これらすべての要件を満足するハイパフォーマンスコンクリートの材料配合設計を合理的に行うには、締固め不要に対する設計のみならず、諸特性の中でもとりわけ発熱と収縮に対する設計が重要となるのである。

発熱および収縮に対するコンクリートの材料配合設計の方法としては、いかなる構造物においても安全となるように、単位セメント量、単位水量などの上限を設けておき、その範囲内で設計を行うことも考えられる。しかし、使用材料と配合の幅を広げ、経済的な設計を行うことを考えるならば、与えられた環境条件下において、対象とする構造物が要求される性能を満足すべくコンクリートの材料配合設計を行うことが必要である[1.10]。そのような材料配合設計を行うには、使用材料と配合からコンクリートの特性を定量評価し、コンクリートの特性と環境条件および構造物の形状、寸法などから構造物の挙動を定量評価し得る手法を持つことが必要である[1.11]。コンクリートの水和発熱に関しては、数値解析を駆使し、構造物の挙動を定量評価する手法の開発が試みられ、成功をおさめている[1.3]。同レベルの評価手法は、乾燥収縮に関しても必要となるのである。

構造物の耐久性能の定量評価が、ハイパフォーマンスコンクリートにより、可能になると同時にぜひ必要となるのである。

1. 1. 4 本研究の目的

以上に述べた背景のもと本研究では、コンクリートの乾燥収縮の予測のための材料モデルの開発を行う。以下の特徴を備えた乾燥収縮の予測手法の構築を可能ならしめる材料モデルの開発を目的とする。

- 1) コンクリートの使用材料, 配合, 養生条件の影響が考慮できる。
- 2) 構造物の形状, 寸法, 境界条件が現実に近い形で考慮できる。
- 3) 構造物が置かれる環境条件を現実に近い形で考慮できる。すなわち, 温度, 湿度の大きさ, 変動が考慮できる。
- 4) ひずみ, 応力, 水分状態などの物理量に関して, 構造物中の平均値だけでなく内部における分布とその経時変化を詳細に予測することができる。
- 5) 入力情報の簡便かつ合理的な同定が可能である。

上記の条件のうち 1), 2), 3) は, 実環境下における実構造物の乾燥収縮予測手法が満たさなければならない基本的な条件である。すなわち, コンクリートの種類, 構造物の種類, および実際に構造物が置かれる環境条件を考慮し得る手法でなければならない。条件 4) は, 構造物の内部の応力状態を知り, 乾燥収縮の影響を構造設計に反映させるために, また構造物の乾燥収縮ひびわれの予測へと発展させるために必要な条件である。条件 5) は, 提案する手法が実用的であるための条件である。予測に必要な入力情報, とりわけ材料の特性に関する情報が, コンクリートの配合, あるいは簡単な材料試験などにより特定し得る手法でないと現実的な予測に適さないからである。

構造物レベルのコンクリートの挙動を詳細に予測するためには, 計算機による数値計算が不可欠となることが予想される。開発する材料モデルを用いた予測手法は計算機の使用を前提とするが, 先述したように, 数値解析技術の発達した今日, このことは手法の簡便性を損なうものではないと考えられる。

また, 実構造物の乾燥収縮挙動を数値計算により予測する際の前提として, コンクリート自身が信頼性の高い材料でなければならないこと, ハイパフォーマンスコンクリートがその条件を満たすコンクリートであること, および今後ハイパフォーマンスコンクリートの普及が期待できることを指摘した。以上を考慮し本研究では, 主たる対象のコンクリートをハイパフォーマンスコンクリートとしたうえで, 構造物中へのコンクリートの充填不良による欠陥を考慮する必要がなく, コンクリートは等方的均等質な材料であるとみなし得るものと仮定する。したがって, 水粉体比が大きくブリージングの著しいコンクリートは, 本研究の対象からは除外される。また, 乾燥収縮に対する影響が通常の天然骨材と著しく異なる人工軽量骨材を用いたコンクリート[1.12]については, 今後本研究を進展させた段階において扱うこととし[1.13], 本論文では対象外とする。

以上の前提のもと, 本論文は, 上に掲げた目的の達成のための過程と, その成果の検証について述べたものである。

1. 2 本研究の方法論と既往の研究の概観

1. 2. 1 本研究の方法論

本研究は、コンクリートの乾燥収縮の予測のための材料モデルの開発を行い、提案モデルを用いた予測手法を提示するものである。同種の問題を対象とする研究分野における本研究の位置づけを明らかにするために、問題に対する方法論という観点から、本研究および既往の研究を概観する。本研究の主たる独自性は、用いる個々の仮定の詳細にあるのではなく、むしろ手法全体を構築する方法論にあると考えられるからである。

構造物レベルのコンクリートの乾燥収縮挙動を予測するという問題においてインプットとなる情報は、大きく分けて3種類となる。それらは、使用材料、配合、養生条件などコンクリートに関する条件、構造物の形状、大きさ、境界条件など構造物に関する条件、および温度、湿度など構造物の環境条件である。これらの情報をもとに、構造物の経時的な変形を算出する作業が乾燥収縮の予測であり、その方法が予測手法である。本研究は、この予測手法、および手法の核を成す材料モデルを提案するものである。

図 1.1 は、本研究において提案する乾燥収縮の予測手法の概要を模式的に示している。本手法は提案する材料モデルを用いて、任意の大きさと形状を持つコンクリート有限構造物の乾燥収縮挙動を予測する手法である。

材料モデルは、コンクリート組織中における水蒸気と液状水の微視的挙動、および水分と組織の相互作用を表現する微視的現象モデルと、それら微視的現象が展開される場であるコンクリートの微視的構造を表現する組織構造モデルより成る。使用材料、配合、養生条件などの違いによるコンクリートの種類は、組織構造モデルにより表現される。なお、既往の研究の方法論との比較を行う際に便利なように、コンクリート中の微視的現象のレベルをいま **LEVEL 1** とする[1.2]。

コンクリートの組織構造モデルと、微視的現象モデルを組み合わせることにより、有限構造物の乾燥収縮挙動を予測する際に必要な、コンクリート微小体積要素の特性が導かれる。それらは、コンクリート中の水蒸気と液状水の平衡関係を表す水分平衡特性、水分状態と水分拡散係数の関係を表す水分移動特性、および水分状態と収縮の関係を表す体積変化特性である。本研究では、コンクリートの微小体積要素の特性を、コンクリートの材料レベルの特性と呼ぶことにする。このレベルを **LEVEL 2** とする。

導出された材料レベルの特性を、対象とするコンクリート有限構造物の各構成部分に与え、構造物内部の水分の移動、および構造物の変形を、与えられた境界条件のもとで解析することにより、目標である構造物レベルのコンクリートの乾燥収縮挙動が予測される。このレベルを **LEVEL 3** とする。本手法では、構造物中の水分移動解析、構造物の応力解析には、有限要素法など計算機による数値解法を用いることを前提としている。構造物の形状、大きさ、境界条件など、構造物に関する条件、および温度、湿度などの環境条件は、この段階において与えることとなる。

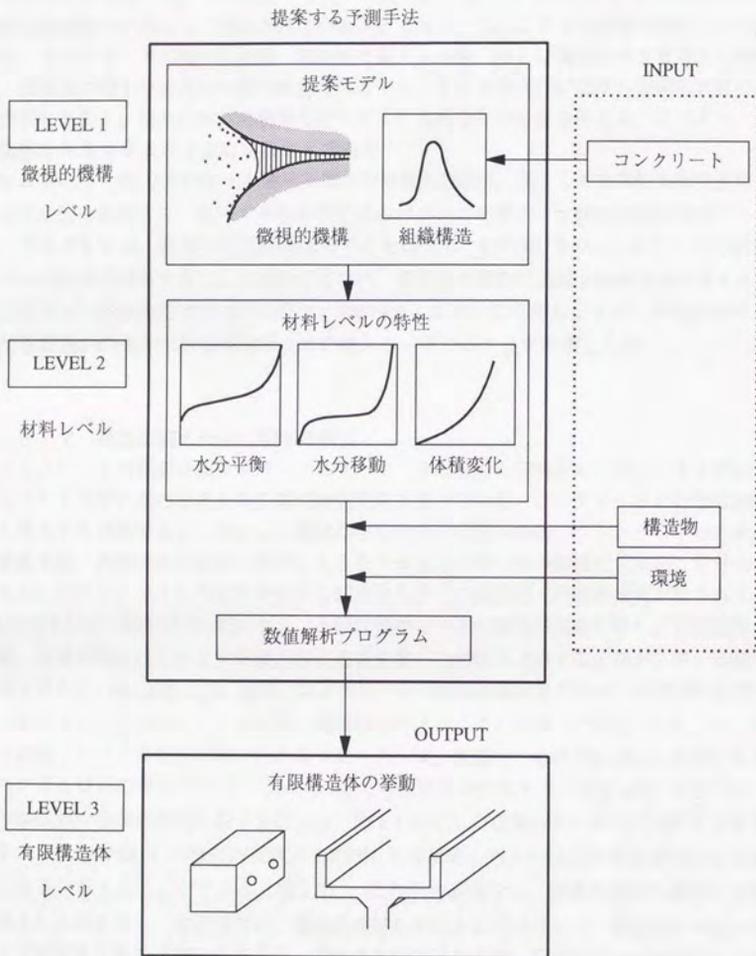


図 1.1 本研究の方法論

提案手法の特徴は、**LEVEL 1**のコンクリートの組織構造とコンクリート中の微視的現象の表現を出発点とし、この段階で与えた仮定が、一貫して**LEVEL 3**の有限構造体の乾燥収縮挙動の予測にまで継承されていることである。このような方法論を採ることの利点は、コンクリートに関する条件、構造物に関する条件、および環境条件などの入力情報が、実現象に即した合理的な形で考慮されること、手法の妥当性が現象の機構の表現のみに依存しており、個々の微視的現象モデルをより高度なものに置き換えることにより、手法全体を発展させることが可能なことである。

なお本研究では、**LEVEL 1**における個々の微視的機構は、主として古典的な力学法則、熱力学法則を基礎とし、各モデルの表現形式のバランスを考え、比較的簡潔な表現を与えた。それでもなお、複数の微視的現象モデルを統合し、**LEVEL 2**のコンクリートの材料レベルの特性を導出することは容易ではない。各微視的現象が展開される共通の場であるコンクリートの組織構造をモデル化し、**LEVEL 1**において与えたことが、手法全体を統一的な取扱いのもとに構築するうえでの鍵となっていることを強調したい。

1. 2. 2 乾燥収縮の機構に関する研究

コンクリートの乾燥収縮はクリープと並んで、その機構の解明がコンクリート工学およびセメント化学における古典的な基礎研究課題となっている。コンクリートの乾燥収縮現象を構成する現象である、セメント硬化体中の水分の微視的挙動、コンクリート中の水分の移動現象、内部の水分状態の変化にともなうセメント硬化体の体積変化現象、骨材の作用などについて、主として材料科学的な観点から多くの実験的、理論的研究がなされてきた[1.14][1.15][1.16][1.17][1.18]。セメント硬化体中の一連の微視的現象に対し、毛細管凝縮理論、吸着理論をはじめとする熱力学に基礎を置いた理論を適用する土壤が、早い時期に形成された[1.19][1.20][1.21]。現在、コンクリートの乾燥収縮現象のすべての側面を説明する理論を求めるには至っていないが、乾燥収縮のメカニズムは単一ではないこと、中・高湿度環境下における乾燥収縮の主たるメカニズムは、組織中の水の表面張力に起因する毛管力による材料の変形であることには、多くの研究者が合意している[1.15][1.17][1.22]。

乾燥収縮の機構の解明に関する研究は、図 1.1 に示した現象のレベル分けの考え方を適用すれば、**LEVEL 1**の微視的現象と**LEVEL 2**の材料レベルの特性の間を結びつける研究であると考えることができる(図 1.2)。これらの研究では、現象の実体の解明に主眼が置かれるのに対し、本研究では、微視的機構の表現を出発点として、構造物レベルの現象を予測することを目的としている。目的の方向は異なるが、両者は互いに補完すべき性格を持つ。現象の機構に関する知見は、本研究の手法の**LEVEL 1**の微視的現象モデルの基礎となり、構造物レベルのコンクリートの乾燥収縮挙動の予測に有効に活用される。逆に、構造物の挙動の予測という工学的な問題を考えたとき、乾燥収縮に関わる個々の微視的機構のうち何が重要であるかということは、微視的現象レベルと構造物レベルを結びつけた本研究より得られるのである。

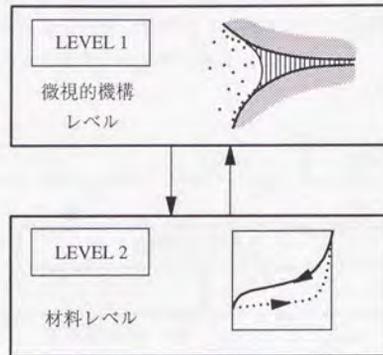


図 1.2 乾燥収縮の機構に関する研究

1. 2. 3 乾燥収縮予測式

構造物レベルのコンクリートの乾燥収縮に対する実用的な予測手法として、これまでに多数提案され、現在も広く用いられているのが、乾燥収縮予測式である[1.23][1.24]。代表的な乾燥収縮予測式として、ACIの予測式[1.25]、CEB/FIPの予測式[1.26]、Bazantらの予測式[1.27]、および阪田らの予測式[1.28]などがある。

乾燥収縮予測式は、使用材料、配合、養生条件などコンクリートに関する条件、構造物の形状、大きさなど構造物に関する条件、および温度、湿度など構造物の環境条件を入力すれば、断面の平均ひずみを時間の関数として与えるものである。入力条件が明瞭で、きわめて簡便かつ実用的な予測手法であるといえるが、構造物内の応力、ひずみ分布などの詳細な予測、複雑な境界条件、環境条件の考慮は、原理的にできない。また予測式の構築は基本的に、各影響因子を考慮する項の形式を決定し、多数の実験データに対し統計処理を行い係数を決定するという方法により行われる。したがって、現象のメカニズムの反映にはおのずと限界があり、予測式の構築、および適用範囲の拡張を行う際には、膨大な数の実験データが必要となる。しかしながら、現状では他に構造物レベルのコンクリートの乾燥収縮挙動を予測する実用的な予測手法が存在しないこと、詳細な予測を行ってもその結果を活用する設計体系が整備されていないことを考慮すれば、今後もこの種の予測式が活用されるものと思われる。

コンクリートに関する条件、構造物に関する条件、および環境条件から、構造物レベルのコンクリートの乾燥収縮を予測する手法という点では、本研究における提案手法と乾燥収縮予測式は同じである。しかしながら、方法論の点においては大きく異なっており、乾燥収縮予測式は、図 1.1 に示した入力情報と LEVEL 3 の有限構造体の乾燥収縮挙動を直接関係づけたものであると考えることができる (図 1.3)。

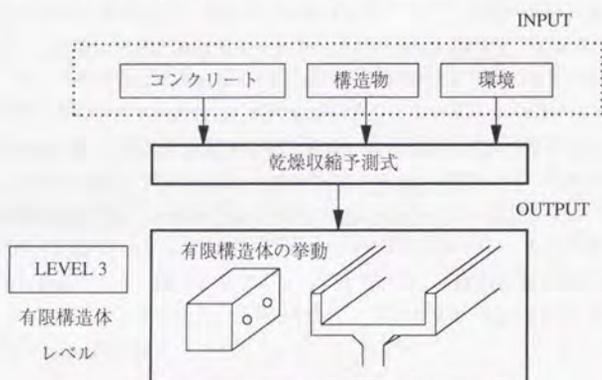


図 1.3 乾燥収縮予測式

1. 2. 4 数値解析による予測

コンクリート材料レベル (LEVEL 2) の特性を仮定することを出発点として、有限構造体 (LEVEL 3) の乾燥収縮挙動、あるいは関連する水分逸散挙動を、数値解析により予測する研究は、これまで比較的さかに行われている。

初期には、コンクリートの水分逸散現象を拡散方程式により取り扱う試みがなされた[1.29]。しかし、コンクリート中の水分移動現象を拡散現象としてとらえた場合、拡散係数が含水状態によって変化するため、非線形拡散現象として取り扱わなければならない。そのような観点からコンクリートの水分逸散現象の数値解析を行った研究では、Bazant らの研究が代表的である[1.30]。Bazant らは、水分逸散現象のメカニズムに関する考察をもとに、拡散係数と空隙湿度の関係を仮定し、数値解析による予測手法を示した。コンクリートの水分逸散現象の数値解析による予測を対象とした研究は多くの研究者により継続されているが、基本的に Bazant らと同様の方法によるものが多い[1.31][1.32][1.33][1.34]。

阪田らは、拡散係数と含水率の関係を仮定するのではなく、実験より導出する手法を呈示した[1.35]。同様のアプローチは、秋田らによってもなされた[1.36]。

材料レベルの特性を与え、コンクリート有限構造体の水分逸散現象だけでなく、これにともなう構造体の変形、応力の導入をも対象とした数値解析の手法が呈示されている[1.37][1.38][1.39][1.40][1.41]。牧角らは、構造体の乾燥収縮ひびわれ予測という観点から、応力解析とひびわれ発生条件に主眼を置いた研究を行っている[1.42]。滝口らは、乾燥にともなう収縮のみならず、水和発熱にともなう熱膨張をも考慮した応力解析の手法を示している[1.43]。滝口らの研究では、水和にともなうコンクリートの材料特性の変化をも考慮されており、この種の現象の数値解析を行ううえで、示唆的な研究であるといえる。

これらコンクリート有限構造体 (LEVEL 3) の乾燥収縮挙動、あるいは水分逸散挙動を数値解析により予測する研究は、図 1.4 に示すようにいずれも、コンクリートの材料レベル (LEVEL 2) の特性を仮定するか、あるいは供試体レベルの実験よりこれを導出し与えることが出発点となっている。したがって、それら材料レベル (LEVEL 2) の特性が示す非線形性や配合への依存性などが何に起因するかについては、コンクリート内部の微視的機構 (LEVEL 1) と定性的に関連づけられるに過ぎない。この点が本研究において提案する手法と大きく異なる点である。本研究では、微視的機構 (LEVEL 1) を出発点とし、材料レベル (LEVEL 2) の特性を経て、有限構造体 (LEVEL 3) の挙動までが、一貫してかつ定量的に結びつけられているのである。

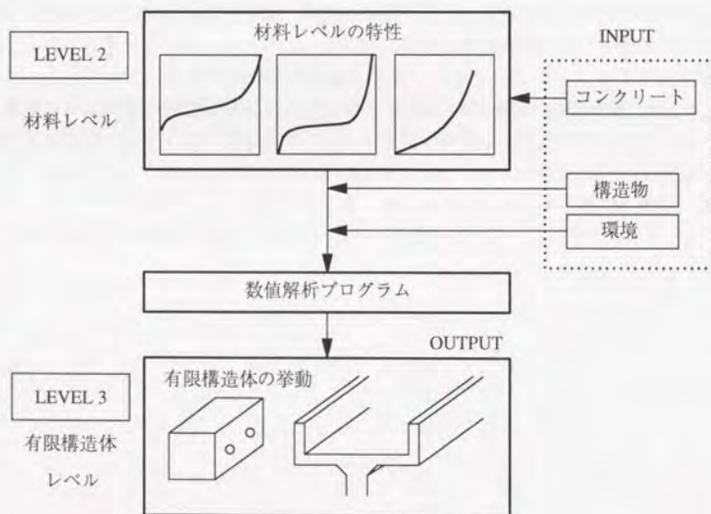


図 1.4 数値解析による予測

1. 2. 5 数値シミュレーション

近年、有限構造体レベルのコンクリートの種々の挙動の数値シミュレーションを行うことが試みられている。乾燥収縮、および関連する現象に対しても適用されている[1.44][1.45]。これらは、数値計算により有限構造体 (LEVEL 3) の挙動を予測するという点では、前小節において述べた数値解析による予測と同じであるが、現象をより現実に近い形で再現するために材料モデルが工夫されており、出発点の一部または全部が材料内部の微視的機構 (LEVEL 1) に置かれている。そのためしばしば、数値計算が複雑かつ大規模となるが、近年の計算機の発達で、これらのアプローチの急速な進歩を可能ならしめていることが特徴的である。

出発点が材料内部の微視的機構 (LEVEL 1) にあり、ターゲットとなる現象が有限構造体 (LEVEL 3) の挙動であるという点では、本研究の手法はこれらの手法と基本的に同様であるが、数値計算における簡便性において、本研究の手法は、材料レベルの特性 (LEVEL 2) を出発点とした場合と同程度であることが特徴である。

格らは、コンクリート中の骨材のランダムな配置が水分拡散および乾燥収縮の統計的変動に及ぼす影響を検討するため、粗骨材とモルタルおよびそれらの界面領域より成るコンクリート要素を用いた有限要素法による数値シミュレーションを行っている[1.46]。複合材料であるコンクリートの乾燥収縮挙動を合理的に予測するという観点からも、きわめて示唆に富む研究である。

水分拡散係数が示す含水量依存性、乾湿経路依存性、組織構造への依存性などを合理的かつ定量的に説明するため、コンクリートの組織構造と組織内部の水分の微視的挙動をモデル化し、コンクリート中の水分移動現象を数値シミュレーションにより予測する研究が、著者らおよび他の研究者らにより行われている[1.13][1.47][1.48][1.49][1.50]。

本研究と目的を同じくし、同様のアプローチを採る研究は、現時点では著者の知り得る限り見当たらない。しかし、有限構造体レベルのコンクリートの種々の挙動を数値シミュレーションにより予測するという研究分野は、今後ますます発展する方向にあり、乾燥収縮、および関連する現象に対しても適用される機会が増えるものと考えられる。

1. 3 本論文の構成

図 1.5 は、本論文の構成を模式的に示したものである。本第1章は序論であり、本研究の背景、目的、方法論について述べた。次章第2章から第6章は本論文の実質的な内容であって、乾燥収縮モデルの定式化、および提案モデルに基づくコンクリートの乾燥収縮挙動の予測について述べる。第2章、第3章では、提案モデルの核となる部分について述べる。すなわち第2章では、コンクリートの組織構造モデルの定式化について述べ、第3章では、乾燥収縮に関わるコンクリート中の微視的現象の機構のモデル化について述べる。第4章では、定式化した組織構造モデルと微視的現象モデルを組み合わせることにより、コンクリートの材料レベルの特性を導出する。第5章では、導出された材料レベルの特性を用いて、任意の条件下におけるコンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動を予測する方法について述べる。第6章では、種々の条件下における実験結果を提案手法により解析し、その結果をもとに手法の妥当性と適用範囲を検証する。また提案モデルに基づく、コンクリート構造物の乾燥収縮予測フローの提案を行う。第7章は結論であり、本研究で得られた結果をまとめる。

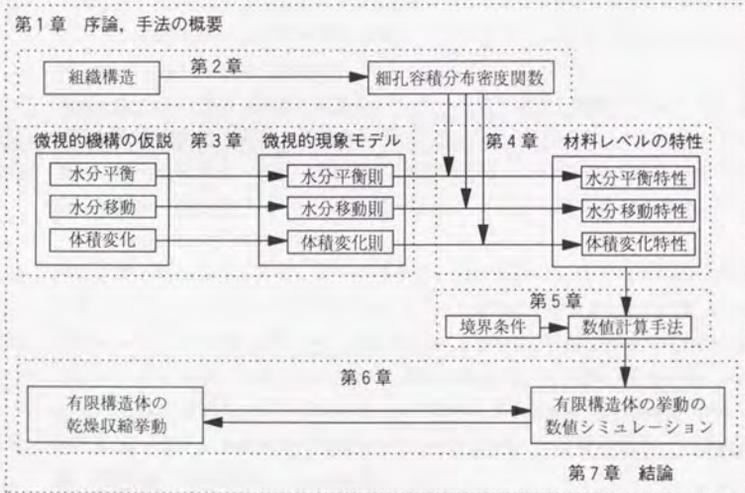


図 1.5 本論文の構成

第1章の参考文献

- 1.1) 矢川元基・吉村 忍：有限要素法，計算力学とCAEシリーズ 1，培風館，1991
- 1.2) 岡村 甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991
- 1.3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，1985
- 1.4) 國島正彦：密実なコンクリート構造物を実現する設計・施工方法に関する研究，東京大学学位論文，1988
- 1.5) 土木学会：コンクリート構造物の耐久設計指針（試案），コンクリート・ライブラリー 第65号，1989
- 1.6) 左東有次・下村 匠：締固め不要コンクリートを用いた部材における表面気泡が耐久性能に及ぼす影響，第3回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.245-250，1992.11
- 1.7) 土木学会：平成3年版 コンクリート標準示方書 [設計編]，1991
- 1.8) Ozawa,K., Kunishima,M., Maekawa,K. and Okamura,H. : High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structure, Proceedings of the Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, January 1989
- 1.9) 下村 匠・三島徹也・佐藤文則・前川宏一：沈下および収縮によるかぶりコンクリートの初期欠陥とRC部材の構造挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 12, No.1, pp.213-218, 1990.6
- 1.10) 岡村 甫・小沢一雅：締固め不要コンクリートの可能性と課題，コンクリート工学，Vol.30, No.2, pp.5-14, 1992.2
- 1.11) 下村 匠・福留和人・小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリートの乾燥収縮特性の評価，超流動コンクリートに関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.167-174, 1993.5
- 1.12) 國分正胤・小林正凡・岡村 甫・山本泰彦：軽量骨材コンクリートにおける問題点について，コンクリート・ライブラリー，土木学会，Vol.24, pp.1-13, 1969.10
- 1.13) Chaube,R.P., Shimomura,T. and Maekawa,K. : Multi Phase Water Movement in Concrete as a Multi Component System, Proceedings of the Fifth RILEM Int. Symp. on Creep and Shrinkage of Concrete, pp.139-144, Barcelona, September 1993
- 1.14) 田中弘文：セメント硬化体の組織と物性，多孔材料 - 性質と利用 - 近藤連一編，第13章，技報堂出版，pp.299-339, 1973
- 1.15) 岸谷孝一・馬場明生：建設材料の乾燥収縮機構，セメント・コンクリート，No.346, pp.30-40, 1975.12
- 1.16) Feldman,R.F. and Beaudoin,J.J. : Concrete Science, Heyden & Son, 1981
- 1.17) Young,J.F. : Physical Mechanisms and their Mathematical Descriptions, Mathematical

Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete Edited by Bazant,Z.P., Chapter 1,
John Wiley & Sons, pp.63-98, 1988

- 1.18) 三橋博三：高温下のコンクリートのクリープおよび乾燥収縮変形を表す合理的な構成則に関する研究，平成2年度科学研究費補助金研究成果報告書，1991.3
- 1.19) Powers,T.C.：The Thermodynamics of Volume Change and Creep, Materials and Structures, Vol.1, No.6, pp.487-507, November-December 1968
- 1.20) Feldman,R.F. and Sereda,P.J.：A Model for Hydrated Portland Cement Paste as Deduced from Sorption-Length Change and Mechanical Properties, Materials and Structures, Vol.1, No.6, pp.509-520, November-December 1968
- 1.21) Wittmann,F.H.：Surface Tension Shrinkage and Strength of Hardened Cement Paste, Materials and Structures, Vol.1, No.6, pp.547-552, November-December 1968
- 1.22) 近藤 実：硬化セメントペースト中の水の形態と水分の拡散を考慮した乾燥収縮の関係，セメント技術年報，Vol.12, pp.136-149, 1958
- 1.23) 阪田憲次：時間依存性材料特性—クリープ・乾燥収縮—，コンクリートの力学特性に関する調査研究報告，コンクリート・ライブラリー第69号，第8章，土木学会，pp.79-95, 1992
- 1.24) 阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測，コンクリート工学，Vol.31, No.2, pp.5-14, 1993.2
- 1.25) ACI Committee 209：Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects on Concrete Structures, ACI-SP-76, 1982
- 1.26) CEB-FIP：Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton (Draft), 1990
- 1.27) Bazant,Z.P., Kim,J.K. and Panula,L.：Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformation of Concrete：Part 1-Shrinkage, Materials and Structures, Vol.24, pp.327-345, 1991
- 1.28) 阪田憲次・綾野克紀：コンクリートの乾燥収縮予測式の提案，セメント・コンクリート論文集，No.43, pp.244-249, 1989
- 1.29) 原田 有・仕入豊和・椎名國雄：乾燥に伴うコンクリート部材の湿気勾配に関する研究，セメント技術年報，Vol.22, pp.297-301, 1968
- 1.30) Bazant,Z.P. and Najjar,L.J.：Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materials and Structures, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972
- 1.31) 永松静也・佐藤嘉昭：非線形拡散方程式によるコンクリートの脱水量の分布に関する研究，セメント技術年報，Vol.35, pp.162-165, 1981
- 1.32) 三橋博三・Wittmann,F.H.・Roelfstra,P.：高温下のコンクリートの水分拡散に関する理論的研究，セメント技術年報，Vol.41, pp.495-498, 1987
- 1.33) 橋田 浩・田中亨二・小池迪夫：打設直後からの乾燥途中におけるコンクリート

- の含水状態 仕上げ材下地としてのコンクリートの含水状態の検討 その1, 日本建築学会構造系論文報告集, No.412, pp.1-8, 1990.6
- 1.34) 滝口克己・堀田久人・森田修平: 若材令時より乾燥を受けるモルタルの含水量分布に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.434, pp.13-20, 1992.4
- 1.35) 阪田憲次・蔵本 修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, No.316, pp.145-152, 1981.12
- 1.36) 秋田 宏・藤原忠司・尾坂芳夫: モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動, 土木学会論文集, No.420, pp.61-69, 1990.8
- 1.37) Pickett, G.: Shrinkage Stress in Concrete, Journal of ACI, Vol.17, No.3, pp.165-195, January 1946
- 1.38) 永松静也・佐藤嘉昭: 若材令時から乾燥を開始したコンクリートの収縮ひずみの予測, セメント技術年報, Vol.36, pp.267-270, 1982
- 1.39) 田澤栄一・宮沢伸吾・山本哲也・斉藤幸治: 乾燥を受ける無筋コンクリートの自己応力について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.255-260, 1988.6
- 1.40) 下村 匠・陳 丙学・小沢一雅: 真空乾燥法によるコンクリートの乾燥収縮試験とその予測モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.391-396, 1991.6
- 1.41) 秋田 宏・藤原忠司・尾坂芳夫: 含水率分布にもとづいた乾燥収縮応力の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.403-408, 1991.6
- 1.42) 牧角龍憲・太田俊昭: 外的に線拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひびわれに関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.378, pp.137-146, 1987.2
- 1.43) 滝口克己・堀田久人・小坂橋裕一: 若材令コンクリートの熱及び乾燥による応力解析法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.396, pp.118-124, 1989.2
- 1.44) 谷川恭雄・森 博嗣: コンクリートの「施工設計法」の確立をめざして(続), セメント・コンクリート, No.551, pp.2-11, 1993.1
- 1.45) 目黒一郎: コンクリートの破壊解析への個別要素法の適用, コンクリート工学, Vol.31, No.5, pp.5-17, 1993.5
- 1.46) 椿 龍哉・下場和重・Das, M.K.: 乾燥によるコンクリートの変形と応力の数値シミュレーション, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.409-414
- 1.47) 下村 匠・小沢一雅: 細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.631-636, 1992.6
- 1.48) Quenard, D. and Sallee, H.: Water Vapour Adsorption and Transfer in Cement-Based Materials: A Network Simulation, Materials and Structures, Vol.25, No.153, pp.515-522, November 1992

- 1.49) Bentz,D.P. and Garboczi,E.J. : Modelling the Leaching of Calcium Hydroxide from Cement Paste: Effects on Pore Space Percolation and Diffusivity, *Materials and Structures*, Vol.25, No.153, pp.523-533, November 1992
- 1.50) Chaube,R.P., Shimomura,T. and Maekawa,K. : Analytical Modelling of the Effect of Aggregates on Water Transport in Concrete, *Proceedings of the JCI*, Vol.15, No.1, pp.1217-1222, June 1993

第2章 細孔容積分布密度関数による コンクリートの組織構造のモデル化

2.1 はじめに

温度、湿度などの環境条件、構造体の形状、寸法に関する条件、荷重、変位の拘束などの力学的境界条件がすべて同一であっても、使用材料、配合、材令、養生条件などコンクリートそのものを形成する条件が異なれば、コンクリートの挙動の多くは一般に異なる。本研究において対象とする乾燥収縮現象においても、これらの条件がコンクリートの挙動を大きく左右することは、よく知られた事実である。使用材料、配合、材令、養生条件が異なったときのコンクリートの挙動の違いを生じさせているのは、コンクリートの内部の組織構造の違いであるといえる。

内部の物質透過、体積変化、変形、破壊など、材料の巨視的な挙動は、材料内部の微視的な現象の集積であると考えることができる。コンクリートの組織構造が異なれば、組織内部における微視的現象が変化し、それらの所産として観察される巨視的な材料挙動が変化するものと解釈することができる[2.1][2.2]。したがって、使用材料、配合、材令、養生条件などが変化した場合の、コンクリートの挙動の変化を合理的に予測するためには、コンクリートの組織構造と材料内部において生じている微視的現象を定量的に評価することが必要である。

本研究は、コンクリートの乾燥収縮現象を、組織中において生じているいくつかの微視的現象の集積としてとらえ、それらをモデル化し、組み合わせることにより、コンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動を予測する手法を構築することを目的としている。本章では、微視的現象が展開される場所であるコンクリートの組織のモデル化を行う。指摘したように、乾燥収縮現象を構成する微視的現象の進行は、コンクリートの組織構造の特性により左右される。配合などの内的要因による乾燥収縮挙動の違いを予測し得るためには、コンクリートの組織構造の特徴を適切に表現するモデルが必要となるのである。

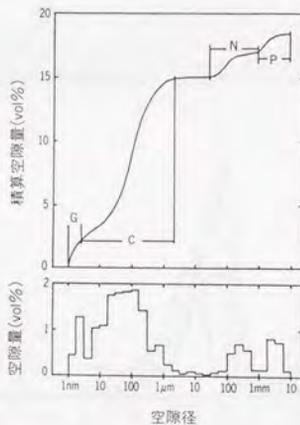
組織構造モデルには、乾燥収縮において組織の果たす機能の重要な側面を表現し得ること、組み合わせる用いる微視的現象モデルとの相互関係に優れていることが要求される。モデルの妥当性は、微視的現象モデルと組み合わせ、種々の条件下におけるコンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動を予測したときの精度と適用範囲、とりわけ使用材料、配合、材令、養生条件などの内的要因に対する適用範囲によって検証されることとなる。

2. 2 組織構造のモデル化の準備

2. 2. 1 コンクリート中の空隙径の分布

コンクリートの組織構造のモデル化の準備として、ここでは主として既往の研究に基づき、コンクリートの組織構造と乾燥収縮におけるその役割について概観し、モデル化すべき重要な側面を明確にする。

コンクリート中には、形状、大きさがきわめて多岐にわたる空隙が存在している[2.1][2.2]。コンクリート中の空隙の構造について、これまで種々の方法により、観察、測定が試みられている[2.3][2.4]。空隙構造の特性を評価する指標として、空隙の壁間距離（空隙径）に関する容積分布が用いられることが多い。内川らは、X線CT法、光学顕微鏡法、水銀圧入法（Hg-ポロシメーター法）、気体吸着法（多点式BET法）などの測定技術を併用することにより、コンクリート硬化体中の空隙の容積分布を広い範囲にわたり測定した貴重な結果を発表している（図2.1）[2.5]。内川らの測定結果によると、径の分布から見た場合コンクリート中の空隙は成因によって複数の分布を形成しており、とりわけ空隙径 10^5 [m]（ $=10[\mu\text{m}]$ ）近辺を境に比較的明瞭に2つのグループに大別されることがわかる。一方は空隙径が 10^5 [m]以上の範囲に見られるなだらかな分布であり、他方は空隙径が 10^5 [m]以下の範囲に明瞭なピークを形成している分布である。



P: エントラップドエア, N: エントレインドエア,
C: 毛細管空隙, G: ゲル空隙

図 2.1 コンクリート硬化体の空隙径分布[2.5]

内川らによれば、これら2つの空隙のグループは、その成因による区別にも一致していることとなる。すなわち、空隙径が 10^5 [m]以上の空隙は、主としてエントラップトエアおよびエントレインドエアであり、フレッシュコンクリート時より気体が存在していた場所（気体空隙）である。これらは独立した空隙としてコンクリート中に存在している。一方、空隙径が 10^4 [m]以下に分布を形成している空隙は、セメントの水和生成物の間、あるいは水和生成物中の空間であり、成因から分類すれば水和反応に費やされなかった水の占めていた場所（水隙）である。これらの空隙は個々の独立した空隙ではなく、さまざま形状の空隙が複雑に連結した空間構造を成していると考えられる。

コンクリート中の空隙のなかでも、とりわけセメントの水和反応にともない形成される空隙（水隙）は、その生成機構より、コンクリート中のセメントペーストの配合、コンクリートの材令、養生方法などによって大きく変化することが認められている[2.1][2.2]。図2.2は、水セメント比を変化させたモルタルの、空隙の容積分布を水銀圧入法により測定した結果である。水セメント比の変化に対応し、分布のピークを示す空隙径がシフトし、空隙容積も変化することがわかる。一方、エントラップトエアやエントレインドエアなどの空隙（気体空隙）は、混和剤量や、打ち込み方法などに依存するが、材令や養生方法に大きくは左右されるとは考え難い。

なお、前章において述べたように、著しいブリージングによる空隙（水隙）は、本研究においては考慮しないこととする。また、骨材中の空隙については、取扱いが困難であると考えられること、良質な天然骨材を用いた場合は、乾燥収縮に及ぼす影響が小さいと考えられることから、本研究では考慮しないこととする。

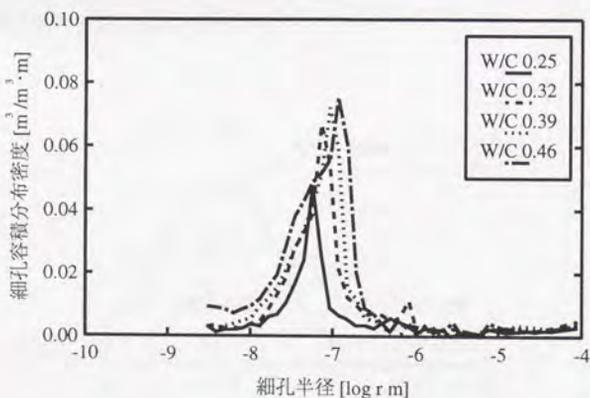


図 2.2 水銀圧入法により測定したモルタルの細孔容積分布

2. 2. 2 乾燥収縮におけるコンクリート中の空隙の機能

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート組織中の水分が環境の作用を受けて逸散し、これにともない組織が収縮する現象であると考えられる。水分の逸散過程では、コンクリート中の種々の空隙が、水分の存在場所および移動経路として機能することとなる。組織の収縮過程では、空隙中の水分と組織の間に作用する力が、現象の機構の上で重要となる[2.6]。また、空隙中の水分と組織の間に作用する力は、組織が水分を拘束する力と考えることもできるので[2.7]、水分の逸散過程にも大きく関与しているといえる。

空隙中の水分と組織の間に作用する力に関する機構の一部は、水の表面張力に起因する毛管力の立場から説明することができる[2.6]。毛管力の大きさは気液界面の形成される空間の壁間距離が小さいほど大きいため、径の小さい空隙では、水分と組織の間に作用する力に関する機構が卓越すると考えられる。一方、径の大きい空隙ほど、気液界面が存在しても発生する毛管力が小さく、水分を拘束する作用が小さい。そのため、水分の移動経路としての機能が卓越すると考えられる[2.6]。

以上に大別した乾燥収縮におけるコンクリート中の空隙の2つの機能、すなわち、水分と組織の間に作用する力を発生させる機能と、水分の移動経路としての機能は、空隙の種類によって明確に区分されているものではなく、空隙径の大きさおよび連結や屈曲の程度などに依存して、主たる機能が移行すると考えられる。コンクリート中の種々の空隙が乾燥収縮において果たす機能は、乾燥収縮のメカニズムの仮説と分離して考えることはできないため、研究者間でその解釈が完全には一致していないが、水分と組織の間に作用する力の発生に関与している空隙の径は 10^{-6} [m]より小さい範囲であること、水分の移動経路としての機能を持つ空隙の径は 10^{-7} [m]より大きい範囲であることは、多くの研究者に共通の認識である[2.2][2.6]。図 2.3 は、以上に考察したコンクリートの空隙構造と乾燥収縮におけるその機能の概略をまとめたものである。

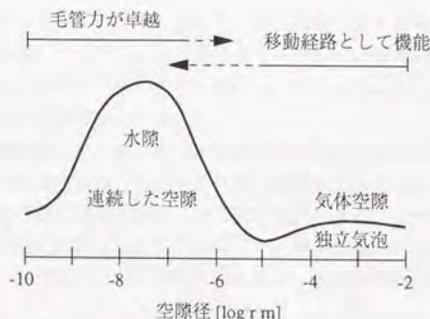


図 2.3 コンクリートの空隙構造とその機能

2. 2. 3 コンクリートの組織構造のモデル化の方針

本章では、コンクリート中の空隙組織の幾何構造のモデル化を行う。モデル化の目的は、次章において定式化する微視的現象モデルと組み合わせることによって、コンクリートの乾燥収縮特性を表現するためである。したがって、提案する組織構造モデルは、乾燥収縮において組織が果たす機能を適切に表現し得るものでなければならない。組織の果たす機能のすべての側面を統一的に表現し得ることが理想であるが、その困難さを考え、本研究では主として、水分と組織の間に作用する力を発生させる機能を適切に表現することに主眼を置き、モデル化を行う。指摘したように、この機能はコンクリートの水分の逸散過程とこれにともなう収縮過程の双方に深く関与していると考えられるからである。

モデル化の方針をこのように採ることで、コンクリート中の空隙組織の中でも、セメントペースト中の空隙（水隙）部分の構造の特徴を適切に表現することが重要性を帯びる。ただし、本方針に基づきモデル化を行った場合、空隙組織の持つ水分の移動経路としての機能を、同時に、かつ適切に表現することが困難となる。そこで、水分の移動経路としての機能の表現には、提案する組織構造モデルのみでは表現できない側面を、材料の特性を表現する係数として別に与える方法を採用することにす。この点に関しては、次章において述べる。

2. 3 コンクリートの組織構造モデルの定式化

2. 3. 1 細孔容積分布密度関数の定義

組織構造のモデル化の方針として、本研究では、コンクリートの組織構造の中でも、セメントペースト中の空隙（水隙）をモデル化の主たる対象とすることを述べた。提案する組織構造モデルの数学的表現の上では、前節において概観したような種々の空隙の区別はなされないが、表現される空隙がセメントペースト中の微小な空隙に対応したものであることを考慮して、モデルにより表現されるコンクリート中の空隙を細孔と呼ぶことにす。また、有限な大きさのコンクリート中において、細孔の織り成す空間組織を細孔組織と呼ぶことにす。細孔組織の特性を記述する変数として、細孔の壁間距離を考え、壁間距離の1/2を細孔半径あるいは単に半径と呼ぶことにし、 $r[m]$ と表記す。ここに、細孔半径 r は、その物理的意味より非負値をとる。

細孔中の水分の挙動に関して、細孔半径が重要な指標値になるのであれば、有限な大きさを持つコンクリートの細孔組織中の水分の平均的な挙動を論じる際、それぞれの半径を持つ細孔がどれだけの容積で存在するかという量が重要となる。なぜなら、空間容積はそこに存在し得る物質の量を決定するからであり、ここでの場合、ある挙動をする水分が、対象とするコンクリート中にどれだけ存在しているか、あるいは存在し得るかを表すことになるからである。

さまざまな半径を有した細孔より成る細孔組織がその内部に存在する、単位体積のコンクリートを考える。そのコンクリート中において、半径が $r[m]$ より大きくない細孔の容

積を累積した量は、半径 r の関数である。そこで、この関数を細孔容積累積分布関数と定義し、 $V_{(r)}$ [m^3/m^3]と表記する[2.8][2.9].

半径が 0 より小さい細孔は定義されないため、細孔容積累積分布関数は、次の条件を満足する。

$$V_{(0)}=0 \quad (2.1)$$

また、有限な大きさの半径を持つ細孔の累積容積は、単位体積中における総細孔容積 V_o [m^3/m^3] に一致することとなる。

$$V_{(\infty)}=V_o \quad (2.2)$$

定義した細孔容積累積分布関数 $V_{(r)}$ は、連続、かつ細孔半径 r に関して微分可能であると仮定する。細孔容積累積分布関数 $V_{(r)}$ を、細孔半径 r に関して微分することにより、半径が r [m] である細孔の容積の、細孔半径に関する分布密度を表す関数が得られる。この関数を細孔容積分布密度関数と定義し、 $dV_{(r)}/dr$ [$\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{m}$] と表記する[2.8][2.9].

細孔容積累積分布関数 $V_{(r)}$ は、式 (2.1),(2.2) で表される境界条件を常に満足するため、細孔容積累積分布関数 $V_{(r)}$ と細孔容積分布密度関数 $dV_{(r)}/dr$ は、1対1に対応することとなる。したがって、細孔容積分布を表現する関数としては、どちらか一方を考えればよい。関数を図示し、組織の緻密さを視覚的に検討することが容易なことから、本研究では、細孔容積分布を表現する関数として、主として細孔容積分布密度関数を用いることにする[2.10][2.11].

2. 3. 2 細孔容積分布密度関数の具体形

次に本研究において用いる細孔容積分布密度関数の具体的な関数形を決定する。関数の具体形を決める際に考慮すべきことは、まず、実際のコンクリートの空隙の容積分布のうち、モデル化の主たる対象であるセメントペースト中の空隙の容積分布の特徴を表現し得る関数形とすることである。また、次章において提案する微視的現象モデルと組み合わせる乾燥収縮に関わるコンクリートの材料レベルの特性を導出することを考慮すれば、数値計算に適した表現形式であることも重要である。本研究において提案する手法では、細孔容積分布密度関数が、材料モデルの核となり、複数の微視的現象モデルを結びつける重要な役割を担うのである。

以上を考慮し本研究では、細孔容積分布密度関数として次の関数形を採用する[2.8][2.9].

$$\frac{dV^{(r)}}{dr} = V_0 B C r^{C-1} \exp(-B r^C) \quad (2.3)$$

式(2.3)は、原始関数である細孔容積累積分布関数を次のように仮定することにより、その形式を決定したものである。

$$V^{(r)} = V_0 \{1 - \exp(-B r^C)\} \quad (2.4)$$

ここに、 B ; 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ
 C ; 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ
 である。

式(2.3)で表される関数は、 $r=0, \infty$ において 0 に漸近し、 $0 < r < \infty$ の範囲内においてひとつの極大値を持つ。式中に定数を2個含むので、関数の形状の自由度は2であり、パラメータ B, C を変化させることにより、細孔容積分布のピークを与える細孔半径、およびピークを中心とした分布のなだらかさが変化する。これは、コンクリート中の硬化セメントペーストの空隙構造が、コンクリートの配合や材令によって変化することを表現可能とするためである。

図 2.4 は、式(2.3)で表される細孔容積分布密度関数を示したものである。本図では細孔半径 r を常用対数に変換して描いてある。本論文では、以降も細孔容積分布密度関数を図示する際は、同様の方法によるものとする[2.10][2.11].

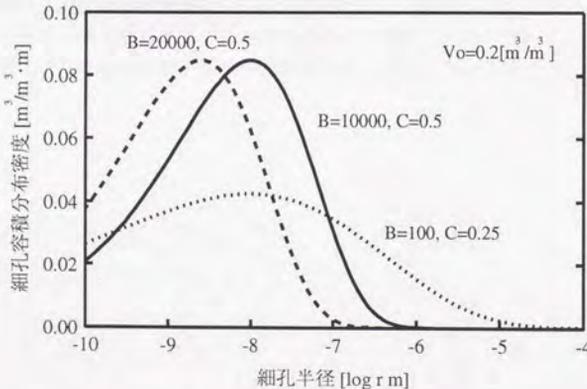


図 2.4 細孔容積分布密度関数

2. 3. 3 細孔組織の空間的構造

定義した細孔容積分布密度関数は、対象とするコンクリート単位体積中において、ある壁間距離を持つ空間がどれだけ存在するかを表現するものであり、細孔組織の連結や屈曲の程度など、空間的な構造までを表現するものではない。

セメントペースト中の微小な空隙（水隙）は、練混ぜ水に満たされていた空間にセメントの水和生成物が析出した際の、余剰な空間に他ならない。その成因から考えて、さまざまな形状と大きさの空間が複雑に入り組んだ構造を成しているであろう。空隙の幾何形状の屈曲の程度はきわめて大きい、大部分が連続した空間であると考えられる。また、有限な体積を考えた場合、空隙の構造は均質で等方的とみなし得るであろう。

以上の考察に基づき、細孔組織の空間的構造は以下のようにであると仮定する。

- 1)すべての空間部分は連続している。
- 2)等方的である。
- 3)均質である。

細孔の容積分布と、細孔組織の空間的構造に関する以上の仮定は、組織構造のモデル化の主たる目的が、組織と水分の間に作用する力の表現であることを考慮して設けたものである。組織が持つ、水分の移動経路としての機能を表現するためには、これらのみでは十分ではない。空間部分の連続のしかたが、具体的に規定されていないからである。組織中の水分の移動特性は、細孔の容積分布のみならず細孔組織の連結や屈曲の程度に依存すると考えられる。

この点に関し本研究では、細孔組織の連続のしかたを組織構造モデルに組み込むのではなく、それらの所産として現れる組織の平均的な水分移動抵抗性を、別に定義して与える方法を採用。この方針を採用した理由は、微視的現象の記述との兼ね合いからである。つまり、細孔組織の連続のしかたを表現したとしても、これに基づき組織の水分移動抵抗を導出するためには、適切な微視的現象モデルが必要となる。現時点では、このレベルから出発して、水分移動現象を表現することは困難であると判断したためである。

なお、組織の平均的な水分移動抵抗性の定式化は、次章において行う。

第2章の参考文献

- 2.1) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，セメント・コンクリート，No.549，pp.31-43，1992.11
- 2.2) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，セメント・コンクリート，No.550，pp.50-63，1992.12
- 2.3) 後藤誠史・大門正機・近藤連一：細孔径分布，多孔材料－性質と利用－近藤連一編，第3章，技報堂出版，pp.45-74，1973
- 2.4) 田中弘文：セメント硬化体の組織と物性，多孔材料－性質と利用－近藤連一編，第13章，技報堂出版，pp.299-339，1973
- 2.5) 内川 浩・宇智田俊一郎・羽原俊祐：X線CT，水銀圧入法及び気体吸着法によるコンクリート硬化体中の空隙径分布の測定，セメント技術年報，42，pp.208-211，1988
- 2.6) Young,J.F.：Physical Mechanisms and their Mathematical Descriptions，Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete Edited by Bazant,Z.P.，Chapter 1，John Wiley & Sons，pp.63-98，1988
- 2.7) 八幡敏雄：土壌の物理，東京大学出版会，1975
- 2.8) 陳 丙学：コンクリートの乾燥収縮予測モデル，東京大学修士論文，1991.3
- 2.9) 下村 匠・陳 丙学・小沢一雅：コンクリートの細孔構造と収縮特性，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.478-479，1991.9
- 2.10) 下村 匠・小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.631-636，1992.6
- 2.11) 下村 匠・小沢一雅・前川宏一：細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.435-440，1993.6

第3章 コンクリート中の微視的現象のモデル化

3.1 はじめに

本研究において提案する乾燥収縮モデルは、コンクリートの組織構造と組織中において展開されるいくつかの微視的現象を定式化し、組み合わせたものである。与えられた条件のもとでそれらを解くことにより、微視的現象の所産として観察されるコンクリートの巨視的な乾燥収縮挙動が予測されることとなる。本章では、乾燥収縮に関与するコンクリート組織中の微視的現象のモデル化を行う。

一般に現象を数値的に予測することとは、現象の機構あるいは法則を数理的に表現した方程式系に条件を入力し、解を得ることに他ならない。現象のモデル化とは、現象の機構に数学的表現を与えることに相当し、いかにモデル化を行うかが、提案する予測法の特徴の大部分を決定することとなる。現象のモデル化は通常、予測対象とする現象を細分化したレベルより行われる。個々の式が実現現象を妥当に表現し得るものでなければならないことは当然であるが、予測対象とする現象をいかに細分化したレベルをモデル化の出発点とするかもまた重要である[3.1]。すなわち、モデル化の出発点が予測対象とする現象に近いレベルであるほど、換言すればより巨視的なレベルであるほど、高い予測精度を実現することが容易となるが、適用範囲を広めることが困難となる。逆に、より微視的なレベルよりモデル化を行えば、高い予測精度を得ることが困難となるが、適用範囲に優れた予測手法を構築することが可能となる。なお出発点のレベルに関わらず、個々の構成式として、実現現象をより妥当に表現し得るものを用いることは、全体の予測精度と適用範囲の双方を高める方向に作用する。したがって、予測対象とする現象を明確にし、モデル化の出発点のレベルを適切に選び、個々の構成式にできる限り妥当なものを用いることが優れた予測手法構築の鍵となる。

本研究では、乾燥収縮現象を構成するコンクリート中の微視的現象として、コンクリート組織中における水蒸気と液状水の力学的および熱力学的平衡、水蒸気と液状水の移動、水分と組織の力学的な相互作用とそれに起因する組織の変形を考慮することにし、本章ではこれら微視的現象のモデル化を行う。

3. 2 細孔組織中の水分の定常挙動

3. 2. 1 細孔組織中に存在する物質の相

雰囲気およびコンクリート細孔組織中に存在する物質の相は、気体相と液体相であるとする。コンクリート細孔組織中では、各相の占める体積に関して、次の関係が成り立つ。

$$V_o = V_G + V_L \quad (3.1)$$

ここに、 V_o ; コンクリート単位体積中における総細孔容積[m³/m³]

V_G ; コンクリート単位体積中における気相の体積[m³/m³]

V_L ; コンクリート単位体積中における液相の体積[m³/m³]

である。実際には、氷など、固体の状態ではコンクリート中に存在する物質も有り得るが、対象とする現象が乾燥収縮であり、また取扱いが複雑になるのを避けるため、本研究では考慮しないものとする。

3. 2. 2 気体相の基本的性質

気体相は、水蒸気と乾燥空気との2成分より成る混合気体であるとする。ここで、水蒸気とは気体の状態で存在する水、乾燥空気とは水蒸気以外の気体という意味で用いている。気体相を構成する各成分の質量に関して、次の関係が成り立つ。

$$w_G = w_V + w_A \quad (3.2)$$

ここに、 w_G ; コンクリート単位体積中における気相の質量[kg/m³]

w_V ; コンクリート単位体積中における水蒸気の質量[kg/m³]

w_A ; コンクリート単位体積中における乾燥空気の質量[kg/m³]

である。また、各成分のモル数に関して、次の関係が成り立つ。

$$n_G = n_V + n_A \quad (3.3)$$

ここに、 n_G ; コンクリート単位体積中における気体の総モル数[mol/m³]

n_V ; コンクリート単位体積中における水蒸気のモル数[mol/m³]

n_A ; コンクリート単位体積中における乾燥空気のモル数[mol/m³]

であり、各成分の質量と次の関係にある。

$$n_G = \frac{w_G}{M_G}, \quad n_V = \frac{w_V}{M_W}, \quad n_A = \frac{w_A}{M_A} \quad (3.4)$$

ここに、 M_G ; 水蒸気と混合気体の平均分子量[kg/mol]

M_w ; 水の分子量[kg/mol]

M_A ; 乾燥空気の平均分子量[kg/mol]

である。

各気体の密度 (あるいは濃度) は、次のように表される。

$$\rho_G = \frac{w_G}{V_G}, \quad \rho_v = \frac{w_v}{V_G}, \quad \rho_A = \frac{w_A}{V_G} \quad (3.5)$$

ここに, ρ_G ; 気相の密度[kg/m³]

ρ_v ; 水蒸気の密度[kg/m³]

ρ_A ; 乾燥空気の密度[kg/m³]

である。式(3.2)の両辺を、コンクリート単位体積中における気相の体積 V_G で除することにより、各気体の密度の間の関係を得る。

$$\rho_G = \rho_v + \rho_A \quad (3.6)$$

考慮する気体はすべて理想気体であるとする。理想気体の状態方程式により、系の温度と各気体の圧力およびモル数の関係は以下のように表される。

$$p_G V_G = n_G RT \quad (3.7)$$

$$p_v V_G = n_v RT \quad (3.8)$$

$$p_A V_G = n_A RT \quad (3.9)$$

ここに, p_G ; 気相の全圧[Pa]

p_v ; 水蒸気の分圧[Pa]

p_A ; 乾燥空気の分圧[Pa]

R ; 気体定数[J/mol·K]

T ; 絶対温度[K]

である。式(3.4),(3.5)で表される関係を用い、状態方程式は次のように表すこともできる。

$$p_G = \rho_G \frac{RT}{M_G} \quad (3.10)$$

$$p_v = \rho_v \frac{RT}{M_w} \quad (3.11)$$

$$p_A = p_A \frac{RT}{M_A} \quad (3.12)$$

式(3.3)および式(3.7),(3.8),(3.9)より、各気体の圧力の関係を得る。

$$p_G = p_V + p_A \quad (3.13)$$

すなわち、水蒸気と乾燥空気の分圧の和は、気相の全圧に等しい。

3. 2. 3 液体相の基本的性質

液体相は、液状水のみから成るとする。液状水とは、液体の状態で存在する水という意味で用いている。液状水は、粘性と表面張力を持った非圧縮性流体であるとする。

$$\rho_L = \text{Const.} \quad (3.14)$$

ここに、 ρ_L ; 液状水の密度[kg/m³]
であり、次式により表される。

$$\rho_L = \frac{w_L}{V_L} \quad (3.15)$$

ここに、 w_L ; コンクリート単位体積中における液状水の質量[kg/m³]
である。

液状水は、存在場所に関わらず、その挙動が同一のメカニズムに支配されると仮定する。換言すれば、壁間距離が水の分子レベルの細孔中に存在する液状水も、壁間距離が十分に大きい空間に存在する液状水も、同一の物理的性質を持った物質であるとして扱えるものとする。これは、水分の挙動の取扱いに関する大きな仮定である。一般に粘性、表面張力などは、物質を流体として取り扱えるレベルにおいて定義される物性であり、固体表面への水分子の物理的、化学的な吸着など分子レベルの物質の挙動をより厳密に記述するには、別な概念によらなければならない[3.2]。また、コンクリート特有の問題として、硬化セメントペーストの細孔中の水分は、イオンの溶出などにより、もはや純物質としての水ではない[3.3]。純物質の水とは、その挙動が異なる可能性も否定はできない[3.4]。しかし、これらを精密にモデル化することは現時点では困難であること、予測対象とする現象が有限構造体のマクロな乾燥収縮挙動であることを考えたとき、これらを厳密に取り扱う利点は必ずしも大きくないと判断したことにより、本研究では上記の仮定を設けた。

3. 2. 4 気相と液相の力学的平衡

壁間距離が小さい空間に存在する液体は一般に、壁面への液体の付着力と液体分子相互の凝集力により、接触する気相との界面が曲面（メニスカス）を成す。液相と気相の界面が曲面を成すとき、界面をはさんでの液相と気相の圧力は等しくない。このことは、液体の表面張力を考慮することにより液体静力学的に説明される[3.5].

液相の圧力と気相の圧力に関し、境界面が球面でない場合の一般化された関係は、次の Laplace の式により表される[3.2][3.5].

$$p_G - p_L = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.16)$$

ここに、 p_G ; 気相の圧力[Pa]
 p_L ; 液相の圧力[Pa]
 γ ; 液体の表面張力[N/m]
 r_1, r_2 ; 界面の主曲率半径[m]

である。表面張力は、液体分子の極性などに起因するため、液体の種類に固有の値であり、また温度に依存する[3.5].

断面が円形の毛管では、液相と気相の界面は球面の一部を成す（図 3.1）。

$$r_1 = r_2 = \frac{r}{\cos \theta} \quad (3.17)$$

ここに、 r ; 毛管の半径[m]
 θ ; 液体の接触角[rad]

である。

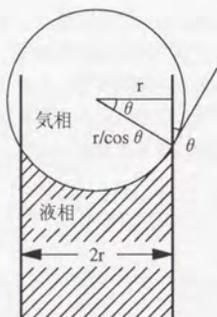


図 3.1 毛管における気液界面

液体と毛管壁面との接触角 θ は、液体の種類と毛管を形成する材料によって定まり、液体が水であり、毛管がガラス管である場合、通常 $\theta=0$ として扱われる[3.2][3.5]。したがって、毛管に存在する水に関する Laplace の式は次のように書くことができる。

$$p_G - p_L = \frac{2\gamma}{r} \quad (3.18)$$

式(3.18)により評価される液体の表面張力に起因した気液の圧力差は、一般に毛管力あるいは毛管張力と呼ばれる。式(3.18)は、その導出に用いた仮定より、断面が円形のガラス管に存在する水に適用し得るものであるが、本研究では、コンクリート細孔組織中の気相と液相（液状水）の圧力の関係にも適用し得るものと仮定する。すなわち、コンクリート細孔組織中において液状水と気体が共存し平衡状態にあるとき、液状水の圧力と気体の圧力の差は、気液界面の存在する細孔半径 r [m] を用いて、式(3.18)により表すことができるものとする。

液相および気相に接する固体壁は、それぞれの相から圧力を受けている。狭い空間に存在する液体と気体は、圧力が等しくないことを述べた。狭い空間を内部に持つ固体は、その内部に液体と気体が共存しているとき、液相に接する部分と気相に接する部分とは、異なった圧力を受けていることになる。このことは、気相と液相の圧力差を固体壁が保持していることに他ならない[3.6]。

3. 2. 5 液状水と水蒸気の熱力学的平衡

本研究では、コンクリート細孔組織中の液状水と水蒸気の熱力学的挙動のうち、主要な機構である平衡蒸発と平衡凝縮を考慮することとし、固体表面における物質の吸着、ぬれ[3.5]は考慮しないものとする。

まず細孔組織中の、ある半径を有した部分における局所的な平衡について考える。液相が液状水のみから成るものとする。気液界面が平面であれば、平衡状態では、気相中の水蒸気の分圧は飽和水蒸気圧に等しくなる。壁間距離の小さい空間では、気液界面は曲面を形成し、曲率によって平衡蒸気圧は変化する[3.5][3.6]。界面が球面の一部を成す円形毛管の場合、この関係は次の Kelvin の式により表される[3.5]。

$$\ln \frac{p_v}{p_{v0}} = - \frac{2\gamma M_w}{RT \rho_L r} \quad (3.19)$$

ここに、 p_v ; 水蒸気分圧[Pa]
 p_{v0} ; 飽和水蒸気圧[Pa]
 γ ; 液体の表面張力[N/m]
 M_w ; 水の分子量[kg/mol]

- R ; 気体定数[J/mol·K]
- T ; 絶対温度[K]
- ρ_L ; 液状水の密度[kg/m³]
- r ; 界面の曲率半径 (=毛管の半径) [m]

である。式(3.19)は、壁間距離の小さい空間に存在する水は、低い水蒸気圧と平衡することを示している。

コンクリート中の、半径が r [m] である細孔に気液界面が存在するとき、水蒸気の分圧の記述に、式(3.19)をそのまま適用することができるものと仮定する。さらに、相対湿度 p_v/p_{v0} を持った雰囲気のもとで平衡する、コンクリートの細孔組織中の水分状態は、その状態に至る経路によらず、Kelvin の式により規定される半径より小さい半径を持つ部分がすべて液状水に満たされた状態、ただひとつであるとする。すなわち式(3.19)より、

$$r_s = -\frac{2\gamma M_w}{RT\rho_L} \left(\ln \frac{p_v}{p_{v0}} \right)^{-1} \quad (3.20)$$

ここに、 r_s ; 液状水が存在する最大細孔半径[m]
であるとする。

図 3.2 は、ここで用いた仮定に基づき記述されるコンクリート細孔組織中の水蒸気と液状水の平衡を、模式的に表現したものである。ある相対湿度を持った雰囲気のもとで平衡しているコンクリートの細孔組織中では、式(3.20)により規定される半径 r_s より小さい半径の部分がすべて液状水に満たされた状態にある (図 3.2 (a))。いま、雰囲気の相対湿度が低下したとする。細孔組織中のすべての気液界面において液状水から水蒸気への蒸発が起これ、新しい相対湿度に対応する半径の部分に気液界面が形成された状態で平衡する (図 3.2 (b))。また、雰囲気の相対湿度が上昇した場合は、これと逆の過程をたどり、新しい平衡状態へと移行する。相対湿度が上昇した場合の平衡移動の過程では、気液界面において、水蒸気から液状水への凝縮が行われることとなる。

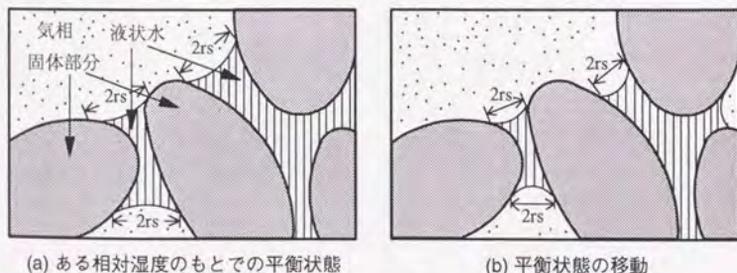


図 3.2 細孔組織中における水蒸気と液状水の平衡

以上に述べた平衡状態から次の平衡状態への移行は、いかなる状態から状態への移行であっても、確実に行われるものとする。つまり本研究では、平衡移動の過程は完全に可逆であるとして扱う。現実には、コンクリート中の水分状態の平衡移動過程は非可逆性を呈し、このことがコンクリートの乾燥過程と吸湿過程の統一的な取扱いを困難なものとする一因となっている[3.7][3.8]。実環境下におけるコンクリートの乾燥過程は、乾湿の繰り返しを含むため、乾湿の非可逆性を考慮した予測手法を構築することは重要な課題である。しかしながら、乾湿の非可逆性の機構は単一ではなく、水分子の細孔壁への吸脱着、ぬれ、細孔組織の変化、インクびん効果[3.6]などが複雑に関与していると考えられ、現時点では完全に解明されているとは言い難い。今後の実験的研究、および種々のメカニズムを仮定した解析的研究により明らかにすべき事項である。本研究では、平衡移動の過程は完全に可逆として扱うこととした。非可逆性の導入は今後の重要な課題である。

また、水蒸気と液状水の相変化（蒸発および凝縮）は瞬間的に起こると仮定する。換言すれば、有限な大きさを持つコンクリート中において、温度、圧力、水蒸気濃度などの状態量に空間的な勾配が存在し、移動が行われている非平衡状態であっても、十分に小さいが有限な体積要素中は常に平衡状態にあることを認める。これは一般に、局所平衡性の仮定と呼ばれ、非平衡系に対して熱力学を適用する足がかりとなる仮定である[3.9]。本仮定を置くことにより、有限な大きさを持つコンクリート中の水分状態の変化の速度は、水蒸気と液状水および熱エネルギーの移動現象の進行速度のみに依存することとなる。

3. 3 細孔組織中の水分の非定常挙動

3. 3. 1 質量保存則

一般に、非定常過程を定量的に予測することは、運動量、エネルギー、質量の移動に関して、速度則、保存則をもとに基礎方程式を導き、初期条件、境界条件のもとで、これらを解くことに他ならない[3.9][3.10]。現実には、運動量、エネルギー、質量の移動は、単独に起こることは少なく、多かれ少なかれ相互に影響しながら同時に進行するため、現象のより厳密な取扱いを行うには、連成問題として扱わなければならない。しかし、対象とする現象、境界条件によっては、相互作用の影響を無視し、単独な移動現象として取り扱っても十分な場合がある。変数の数が少なく、基礎方程式が簡易な形式である方が、解を求めるためには望ましいため、多くの場合何らかの簡略化が行われることとなる。

本研究において対象とする移動現象は、コンクリートの乾燥、すなわちコンクリート中の水分の移動現象のなかでも、とりわけ、大気中に置かれたコンクリート中の水分の移動である。ここでは、移動現象の一般式を示した上で、対象とする現象に応じた簡略化を行うという方法を必ずしも採るのではなく、当初から対象とする現象を念頭に置いた定式化を行う。しかし、乾燥収縮のみならず、コンクリートの種々の劣化挙動に関し合理的な予測手法を構築するためには、さまざまな条件下において生じるコンクリート中の水分および物質移動[3.11][3.12]、熱エネルギー移動と水分移動との連成[3.13][3.14][3.15][3.16]、化学反応と物質移動との連成[3.17]など、種々の非定常過程を定量的に取り扱わなければならない。このことを考えると、コンクリート中の移動現象に関し、より一般的な定式化を行うこともまた、きわめて重要な今後の課題であることに相違ない。

前節において、コンクリート細孔組織中の物質として、乾燥空気、水蒸気、液状水を考慮することを述べた。すべての物質の質量に関し、保存法則を適用する。物質の生成現象として、水蒸気から液状水への凝縮、液状水から水蒸気への蒸発を考慮する。なお、セメントの水和の進行にともなう水分の消費は、ここでは考慮しないことにする。セメントの水和反応は、水分を消費すると同時に組織の緻密化をもたらす、硬化体中の水分の移動しやすさを変化させることになる。したがって、この現象を取り扱うためには単に水分の消費を評価するだけでは不十分であり、水和反応、組織構造の変化、水分移動の連成問題としてとらえなければならない。この問題に対する取り組みは、今後の課題とする。

水蒸気と液状水に関し、質量保存則をそれぞれ書き下せば以下ようになる。

$$\frac{\partial w_v}{\partial t} = -\text{div}(J_v) + v \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -\text{div}(J_L) - v \quad (3.22)$$

ここに、 t ; 時間[s]

- w_v ; コンクリート単位体積中における水蒸気の質量[kg/m³]
- w_L ; コンクリート単位体積中における液状水の質量[kg/m³]
- J_v ; 水蒸気の質量流束[kg/m²·s]
- J_L ; 液状水の質量流束[kg/m²·s]
- ν ; 液状水から水蒸気への相変化速度[kg/m³·s]

である。

質量流束は、空間内の任意の点において、移動方向に垂直にとった単位断面積あたりを、単位時間を通しての質量として定義され、水蒸気、液状水に関してそれぞれ次のように表すことができる。

$$J_v = \rho_v v_v \quad (3.23)$$

$$J_L = \rho_L v_L \quad (3.24)$$

ここに、 ρ_v ; 水蒸気の密度[kg/m³]

ρ_L ; 液状水の密度[kg/m³]

v_v ; 水蒸気の数値[m/s]

v_L ; 液状水の速度[m/s]

である。密度はスカラー量であり、速度はベクトル量であるため、それらの積である流束はベクトル量である。

相変化速度は、空間内の任意の点において、単位体積あたり、単位時間に相変化する水の質量であり、本研究では液状水から水蒸気への相変化（蒸発）を正、水蒸気から液状水への相変化（凝縮）を負と定義する。式(3.21),(3.22)を、対象とするコンクリート構造体中において、時間と空間に関して解くことにより、各時間、各場所における水分の状態を知ることができる。ただし式(3.21),(3.22)は、質量保存則を一般的に表現したに過ぎない。右辺各項を具体的に評価可能とするために、数学的表現を与えることが本節の目的である。

なお、前節において述べたように、水蒸気と液状水の局所平衡性を仮定しているため、式(3.21),(3.22)中の相変化速度 ν は、新たに法則を与える必要がない。平衡関係を常に満足するように、各時間、各場所において相変化が行われることを仮定したことに他ならないからである。したがって、本節において行うべきことは、コンクリート中の水蒸気と液状水の移動に関し、現象を適切に表現し得る速度則を定式化することである。

3. 3. 2 水蒸気の移動

気相は水蒸気と乾燥空気との2成分より成るとした。ここで、対象とすべきは水蒸気の移動（運動）である。現象の機構の表現の検討に入る前に、水蒸気の運動と、乾燥空気の運動、および気相全体の運動との関連について検討する[3.9][3.18]。

混合気体を構成する成分気体の運動は、気相全体の運動と、気相内部での着目成分気体の運動とより成ると考えることができる。気相全体の運動を記述する量としてここでは、次式で定義される気相の質量中心速度を考える。

$$v_M = \frac{\rho_V v_V + \rho_A v_A}{\rho_V + \rho_A} \quad (3.25)$$

ここに、 v_M ; 気相の質量中心速度[m/s]
 ρ_V ; 水蒸気の密度[kg/m³]
 ρ_A ; 乾燥空気の密度[kg/m³]
 v_V ; 水蒸気の水蒸気速度[m/s]
 v_A ; 乾燥空気の速度[m/s]

である。固定座標に対する各成分気体の運動は、式(3.25)で表される気相の質量中心の運動と、気相の質量中心に対する着目成分の相対的な運動の組み合わせにより記述することができる。各成分気体の流束は結局、それぞれ次のように表される[3.9]。

$$J_V = \frac{\rho_V}{\rho_G} J_G + J_{VM} \quad (3.26)$$

$$J_A = \frac{\rho_A}{\rho_G} J_G + J_{AM} \quad (3.27)$$

ここに、 J_V ; 水蒸気の質量流束[kg/m²·s]
 J_A ; 乾燥空気の質量流束[kg/m²·s]
 J_G ; 気相全体の質量流束[kg/m²·s]
 J_{VM} ; 気相の質量中心に対する水蒸気の相対流束[kg/m²·s]
 J_{AM} ; 気相の質量中心に対する乾燥空気の相対流束[kg/m²·s]
 ρ_G ; 気相の密度[kg/m³]

である。式(3.26),(3.27)の右辺第1項の気相全体の運動は、対流、あるいは bulk による流れと呼ばれる流れであり、通常、Newton の第2法則に基づく運動量収支式を解くことにより評価される。右辺第2項の気相の質量中心に対する各成分気体の相対流束は、独立ではなく次の関係にある。

$$J_{VM} + J_{AM} = 0 \quad (3.28)$$

すなわち、 J_{VM} と J_{AM} はある方向に一方の成分気体が移動するとき、同質量の他方の成分気体が逆方向に移動する現象、つまり気相の各成分が混じり合う現象を表していることになる。この現象は、相互拡散あるいは単に拡散と呼ばれ、その速度則として、濃度勾配に比例した流束が生じるとする Fick の第1法則が一般に用いられる[3.9][3.18][3.19]。本問題における水蒸気と乾燥空気の相互拡散に、質量分率勾配を基準とした Fick の第1法則を適用すれば、次のようになる。

$$J_{VM} = -\rho_G D_{V0} \text{grad} \left(\frac{\rho_V}{\rho_G} \right) \quad (3.29)$$

ここに、 D_{V0} ; 水蒸気と乾燥空気の相互拡散係数[m²/s]

である。気体の相互拡散係数は通常、対象とする物質の種類（この場合、水蒸気と乾燥空気）、温度、圧力によって定まる定数である[3.20]。また、気体の相互拡散現象の機構が気体分子のランダムな分子運動であることは、拡散現象の持つ種々の性質が、気体の分子運動論に基づき妥当に説明されることにより明かである[3.19]。

混合気体の成分を成す水蒸気の移動は、気相全体の流れである対流と、他成分気体との相互拡散による流れとの和により記述されること、それぞれの流れの速度は一般に、対流は運動量収支式、拡散は Fick の第1法則によることを以上に述べた。続いて、対象とするコンクリート細孔組織中の水蒸気移動の速度則を、現象の考察に基づき定式化する。

コンクリート中では、気体は、狭く複雑に交錯し屈曲した細孔組織中を移動しなければならない。コンクリート細孔組織中は、自由な空間に比べ、気体の移動がきわめて困難であることは明かである。一般の大気の中に置かれたコンクリートを考えたとき、その内部を気体が対流により移動することは、起こり難いことであろう。通常起こり得る程度の大気の対流、つまり風が、コンクリートの表面から進入したとしても、ごく表面付近で運動エネルギーを失ってしまい、対流として内部に進入することは困難である。コンクリート中を気相全体が bulk で流れるのは、きわめて大きな圧力勾配をコンクリート中に発生させた場合に限られると考えられる。たとえば、コンクリート供試体の両面に接触させる気体の圧力を大きく変えることによって行う透気試験などはその例であり[3.21][3.22]、通常的环境下では自然には起こり得ない境界条件である。

以上の考察に基づき本研究では、コンクリート中の気体の移動として、対流による気相全体の移動は考慮しないことにする。すなわち、気相の質量中心は静止しているとの仮定を設ける。

$$v_M = 0 \quad (3.30)$$

このとき、気相全体の運動量は常に0となるので、運動量収支を考える必要はなくなる。

水蒸気の移動は、式(3.26),(3.30)より、次のように表される。

$$J_v = J_{VM} \quad (3.31)$$

すなわち、固定座標に対する水蒸気の運動は、乾燥空気との相互拡散による運動のみで表されることとなる。またこのとき、相互拡散現象の性質(式(3.28))より、乾燥空気の運動は水蒸気の運動と独立ではないので、考慮する必要はなく、水蒸気の運動のみを記述すればよいことになる。

コンクリート中の水蒸気の移動の主たるメカニズムが拡散であることは、現象の物理イメージに照らし合わせても妥当である。気体の拡散現象の実体が、衝突を繰り返す気体分子のランダムな運動であることを考えると、コンクリート細孔組織のように空間が狭く屈曲していても、十分に起り得ると考えられるからである。ただし、座標空間中のすべてが拡散に有効な空間でないこと、移動経路が狭く屈曲していることから、自由な空間に比べ、拡散速度が小さくなることもまた考えられる[3.19]。以上の考察に基づき本研究では、コンクリート細孔組織中の水蒸気の移動則として次式を採用する。

$$J_v = -K_v V_G D_{v0} \text{grad} p_v \quad (3.32)$$

ここに、 K_v ; 水蒸気移動に関する特性を表す材料係数

V_G ; コンクリート単位体積中における気相の体積[m³/m³]

である。なお、式(3.32)は、気相の密度に勾配がない場合の表現形式である。水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v は、考察したように、経路の狭さ、屈曲の影響を表している。これらの影響を、自由な空間における拡散速度に対する低減という形式で無次元の係数として表現しているため、 $0 < K_v < 1$ でなければならない。コンクリート単位体積中における気相の体積 V_G は、座標空間中において拡散に有効な空間を表現しており、細孔中において気相の占める部分すべてが拡散に有効であるという仮定に基づいている。前節において述べたように、気相の体積 V_G は総細孔容積から液相の体積を差し引いたものである。したがって、 V_G は細孔中の水分状態によって変化する量であり、次章において述べる水分平衡則により評価されることになる。

ところで、水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v は、コンクリートの組織構造によって決定される量であるが、前章において提案した組織構造モデルと独立に与えることにした。それは、提案した組織構造モデルは、細孔半径の容積分布を表すものであり細孔組織の屈曲の程度などの情報を含んでいないこと、移動則の表現(式(3.32))がすでに巨視的なレベルを出発点としており、細孔組織の幾何構造の具体的表現と組み合わせることに利点の少ない形式を採っていることによる。移動則の記述において、水蒸気が細孔組織の個々の部分をいかなる形態で移動するかを記述する立場を採り、組織構造のモデル化において組織の連結や屈曲の程度までをモデル化する立場を採り、はじめて、両者の効果的な結合が可能となるが、現段階ではそれは困難であると判断したのである。

3. 3. 3 液状水の移動

境界面がすべて大気に接するという条件のもとでのコンクリートの乾燥過程において、コンクリート中を水分が液状水の形態で移動するという事は、必ずしも明白な事実ではないと思われる。実験において、コンクリート中の水蒸気移動と液状水移動を区別して測定することは容易ではなく、著者の知る限り、そのような実験の報告例はない。つまり、乾燥過程においてコンクリート中を水分が液状水の形態で移動するという事は、立証されていないのである。しかし、液状水移動が乾燥過程においても生じていることは、実験結果から導出したコンクリート中の水分拡散係数は、飽水状態に近い状態では含水率が高いほど大きいという傾向を示す[3.7][3.23]という事実から推察される。この傾向は、コンクリート中の水分移動が水蒸気移動のみによって起こると考えた場合、説明することはできない。含水率が高いほど、水蒸気移動に有効な空間容積が小さいからである。すなわち、コンクリートが飽水状態に近い状態において、含水率が高いほど卓越する水分移動の成分が存在することになり、これが液状水移動であると考えられるのである[3.7][3.24]。したがって本研究では、液状水移動を考慮することにする。

乾燥過程におけるコンクリート中の液状水移動は、細孔組織が不飽和の状態において生じる現象であり、細孔組織が液状水で飽和した状態で行われる透水とは、現象の記述の上で区別すべきであると考えられる[3.6]。ここに不飽和状態とは、細孔組織中に気相と液相が共存している状態、換言すれば、気相と液相の界面が存在している状態である。前節において述べたように、コンクリート細孔組織中では、液体の表面張力のために気液界面を隔てて両相に圧力差が発生しており、これが不飽和状態における液状水の移動を特徴づけていると考えられるのである。

不飽和状態における細孔組織中の液状水移動は、式(3.18)で表される毛管力(すなわち、気相に対する液相の圧力低下)の勾配を駆動力として生じると考えることができる。次に、この駆動力が細孔組織中の液状水に、いかなる速度を生じさせるかを記述しなければならないが、それは流れの実体をどのような性質の流れととらえるかによるものである。まず、非常にゆっくりとした流れであることに相違ないであろう。そこで、流れが層流であると仮定する。次に、コンクリートの細孔組織中の、半径 r の部分における液状水の速度は、半径 r の円管内の層流の速度に、細孔組織の連結や屈曲の影響を乗じることにより表現できるものと[3.25]、次のような速度則を仮定する。

$$v_{L(r)} = -K_L \frac{r^2}{8\mu} \text{grad} \left(-\frac{2\gamma}{r_s} \right) \quad (3.33)$$

ここに、 $v_{L(r)}$; 半径 r の細孔における液状水の速度[m/s]

K_L ; 液状水移動に関する特性を表す材料係数

μ ; 液状水の粘性係数[Pa·s]

r_s ; 液状水が存在する最大細孔半径[m]

である。液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L は、細孔組織が複雑に連結、屈曲し

ていることがコンクリート中の液状水移動に及ぼす影響を、直円管における層流の速度に対する低減という形式で、無次元の係数として表現している、 $0 < K_L < 1$ でなければならない。なお、液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L は、水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_V と同様に、コンクリートの組織構造によって決定される量であるが、適用する移動モデルが異なるため、同じ値である必要はない。また、現段階では組織構造の情報から、組織中の物質移動に関する特性を直接導き出すことは困難であるので、 K_L は K_V と同様に、前章において提案した組織構造モデルと独立に与えることにする。しかし、本研究で行ったモデル化が妥当であるならば、これらの材料係数および組織構造モデルは、種々のケースについて同定を行った場合、高い相関を示すこととなる。

式(3.33)は、細孔組織中の半径 r の部分における液状水の速度を記述したものである。前章において定義した細孔容積分布密度の概念を用い、式(3.33)から細孔組織中の液状水流束を導く。まず、半径 r の細孔における液状水の流束の細孔半径に関する分布密度は次のように表される。

$$\frac{dJ_{L(r)}}{dr} = \rho_L \frac{dV_{(r)}}{dr} v_{L(r)} \quad (3.34)$$

ここに、 $dJ_{L(r)}/dr$; 半径 r の細孔における液状水の流束の分布密度 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{m}$] である。式(3.34)で表される流束の分布密度を、実際に液状水移動が生じている細孔について積分すれば、組織中の液状水流束を得ることができる。液状水の移動は液状水の存在している部分においてのみ起こる。前節において、仮定した細孔組織における水分平衡則より、液状水の存在する最大細孔半径がいかなる状態においても定まる。ここで、液状水の存在するすべての細孔において液状水移動が起こると仮定すれば、組織中の液状水流束は次のように表すことができる。

$$J_L = \int_0^{r_s} \left(\frac{dJ_{L(r)}}{dr} \right) dr \quad (3.35)$$

現実には、液状水の存在するすべての細孔が液状水移動に有効であるわけではないと考えられる。組織中の物質移動抵抗性は、 10^{-7} [m] 程度以上の径を持つ空隙の容積と関係が深いとの報告もある[3.3]。非常に狭い部分は、閉塞などにより移動経路として機能しないこと、あるいは固体壁と物質との相互作用により移動現象が起こりにくいこと、などがその理由と考えられる。しかし、本研究では液状水が存在しているすべての細孔を積分範囲とした。式(3.33)には、半径の小さい細孔ほど移動速度が小さいということが表現されており、 10^{-7} [m] 程度以下の範囲を積分範囲に含めても、評価される流束にはほとんど影響しないからである。

3. 4 水分状態の変化にともなう組織の体積変化

3. 4. 1 毛管力に起因する応力

コンクリートの乾燥収縮現象は、コンクリート中からの水分逸散現象と、水分の逸散にともなうコンクリートの収縮現象とに大別して考えることができる。本節では後者を対象とし、現象を表現する材料モデルの提案を行う。実環境下におけるコンクリートの乾燥収縮現象を合理的に予測するためには、乾燥にともなう収縮だけでなく、湿潤にともなう膨張、およびこれらの任意の組み合わせより成る過程を取り扱い得る論理を持たねばならない。このことを念頭に置いていることを明確にするため、ここでは、対象とする現象を水分状態の変化にともなう体積変化ということにする。

組織内部の水分状態の変化にともなう硬化セメントペーストの体積変化現象のメカニズムに関し、種々の説明がなされている[3.24][3.26][3.27][3.28][3.29]。それら既往の理論の多くに共通していることは、組織内部に存在する水分と組織の固体壁との間で行われる力の伝達、およびこの力による組織の変形という概念を用いていることである。主として水分と組織との間の微視的機構の解釈により、既往の理論はいくつかに分かれ、現象のすべての側面を統一的に説明し得る理論は未だ求められていないのが現状である[3.26]。現段階において、比較的有力である解釈は、中高湿度域における収縮は水の表面張力に起因した毛管力(毛細管張力)が関与したメカニズムによって生じ、低湿度域における収縮はセメントの水和生成物内の層間水の挙動と水和生成物の構造変化により生じるとする考え方である[3.24][3.26][3.29]。本研究では現象の基本的なとらえ方として、既往のアプローチにみられるように、水分状態の変化にともなう組織の体積変化を、組織内部に存在する水分と組織の固体壁との間で行われる力の伝達、およびこの力による組織の変形という概念を導入することにする。ここではまず、組織内部に存在する水分と組織の固体壁との間で伝達される力を定式化する。

コンクリート細孔組織中において液相(液状水)と気相が共存し平衡状態にあるとき、液状水の表面張力により液状水の圧力と気相の圧力は等しくなく、その差が Laplace の式を基本とした式(3.18)により表されると仮定した。

$$p_G - p_L = \frac{2\gamma}{r_s} \quad (3.36)$$

- ここに、 p_G ; 気相の全圧[Pa]
 p_L ; 液相の圧力[Pa]
 γ ; 液体の表面張力[N/m]
 r_s ; 液状水が存在する最大細孔半径[m]

である。液相、気相の圧力は、それぞれの相が接触している細孔壁に作用している。大気中に置かれた条件下では気体の圧力はコンクリートの外部からも等方的に同じ大きさで作用するので、気相の圧力を基準にとって考えると、気相と液相の圧力差に相当する圧力

が、細孔壁に作用していると考えることができる。式(3.36)より、細孔中の液状水の圧力は気相の圧力よりも低いので、細孔壁は液状水に接触している部分において、液状水から負の圧力(引張応力)を受けていることになる(図 3.3)。本研究では、この負圧による組織の収縮がコンクリートの乾燥収縮の主たるメカニズムであると考えられる立場を採る。コンクリートの乾燥収縮の機構を、硬化セメントペースト中に存在する水に起因した毛細管張力を基本として説明する理論は、古くから多くの研究者により研究がなされ、Powersにより熱力学的に体系化された[3.24][3.30][3.31]。現在では、中高湿度域における乾燥収縮の機構を説明する理論として広く支持されている[3.32][3.33]。既往の、より微視的なアプローチにも、毛細管張力の概念を導入しているものが多く[3.34][3.35]、毛細管張力がコンクリートの乾燥収縮現象において主要な役割を果たしていると考えられる立場をとる研究者は多い。本研究も、この考え方に基礎を置くものである。

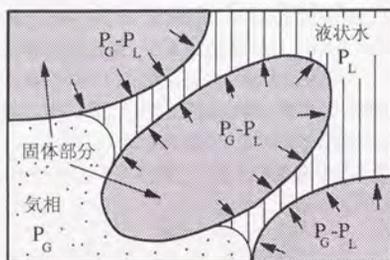


図 3.3 細孔壁が受ける圧力

式(3.36)は、コンクリートの細孔組織中の局所的な部分(いわば個々の細孔)における気相、液相、細孔壁の力の伝達を規定するものである。この関係から出発して、コンクリートの巨視的な収縮を表現することを考えた場合、発生する力とそれによる組織の変形について考えなければならない。力と変形の定量関係を、図 3.3 に示したような個々の細孔レベルにおいて与えることも可能であるが、その場合、変形している細孔としていない細孔を区別していることになり、個々の細孔の変形をどう組み合わせるかといった複雑な問題が生じる[3.26]。本研究では、力と変形の関係を個々の細孔において考えるのではなく、それらの集合である細孔組織において考えることにする。そのような方針をとったのは、前章において定義した組織構造モデル、および本章前節までに定式化した水分平衡、移動モデルと、モデル化のレベルが同程度となることを考慮したためでもある。

内部に細孔組織を有する単位体積のコンクリートを考える。内部の水分状態は、平衡状態にあるものとする。これまでに述べた仮定にしたがえば、このとき細孔組織中のある半

径 r_s の部分に気液界面が形成され、半径が r_s より大きくない細孔部分はすべて圧力の等しい液状水により満たされていることになる。また先述したように、液状水の圧力は式(3.36)に示される大きさだけ気相よりも低い状態にあり、液状水と接触している細孔壁は、気相と液相の圧力差に相当する負圧を受けていることになる。ここで、この負圧は、液状水と接触している部分において細孔壁を引張る方向に作用するため、個々の細孔は閉じる方向に変形していると仮定する。さらに、細孔の集合である細孔組織を内部に有したコンクリートの乾燥収縮は、この変形の集積が観察されたものと仮定する[3.26]。

このプロセスを巨視的にとらえると、材料を収縮させる作用が内的に発生し、この作用と材料の変形抵抗が平衡する状態になるまで収縮したと解釈することができる。ここに、材料を収縮させる作用とは、個々の細孔に発生している負圧の作用を、単位体積のコンクリート細孔組織中で集積し、平均化したものに相当し、単位体積中での分布はもはや考えないことにする。本研究では、この集積された負圧の作用とそれによる変形の関係を、応力と変形の関係と類似の取扱いをすることにする。すなわち、個々の細孔に発生する負圧の作用を細孔組織で集積し平均化した量を応力の次元を持つ量として評価し、これと弾性係数に相当する材料固有の変形抵抗とから、乾燥収縮を評価することにする。

個々の細孔に発生する負圧の作用を細孔組織で集積し平均化した量を、毛管力に起因する応力と呼ぶことにする。毛管力に起因する応力は、その大きさが、発生している毛管力(負圧)の大きさと、コンクリート単位体積中における作用面積に依存する性質を持つと考えることができる[3.24]。そこで、毛管力に起因する応力を次式により表現する。

$$\sigma_s = A_s \frac{2\gamma}{r_s} \quad (3.37)$$

ここに、 σ_s ; 毛管力に起因する応力[Pa]

A_s ; 毛管力の作用面積の影響を表す係数

である。毛管力は液状水と接触している細孔壁において作用するため、その作用面積の大きさは、単位体積中の液状水の量に依存する。液状水の量と作用面積の関係は、細孔組織の幾何構造を仮定し、導き出すこともできると考えられるが、式(3.37)により評価される応力が具体的な物理モデルに基づくものではないため、作用面積を厳密に評価する意義は大きくない。以上の理由から、 A_s を作用面積そのものではなく、作用面積の影響を表す係数と定義したのである。

本研究では、作用面積の影響を、コンクリート単位体積中に存在する液状水の体積(体積含水率に相当)により表現する[3.33][3.36][3.37]。

$$A_s = V_L \quad (3.38)$$

ここに、 V_L ; コンクリート単位体積中における液相の体積[m³/m³]

である。

なお、式(3.37)により評価される毛管力に起因する応力は、応力の次元を持つ量として定式化されているが、物体に外力を作用させたときに物体内部で伝達される応力と直接重ね合わせることは行わないものとする。毛管力に起因する応力、およびこれに対する材料の変形抵抗は、要素の乾燥収縮を予測するモデル内においてのみ定義することとし、コンクリート有限構造体の応力解析を行う際には、これらにより評価される乾燥収縮を、あらかじめ要素の初期ひずみとして扱う方法をとることにする。

3. 4. 2 毛管力に起因する応力による組織の変形

物体に力が作用し、変形する現象を取り扱う場合、一般に、作用する力と発生する変形の間を、物体固有の変形抵抗則によって結びつける方法がとられる。本研究では、コンクリートの乾燥収縮に関し同様の考え方を適用し、式(3.37)により評価される毛管力に起因する応力と、これに対する変形抵抗則から乾燥収縮を評価する方法をとる。

先述したように、毛管力に起因する応力と、外力により発生する応力とは生成機構が異なる。したがって、これらに対する材料の変形挙動は、厳密には同一ではないと考えられるが、どちらもセメント硬化体の変形特性である以上、ある程度近い性質のものであることが予想される。すなわち、弾塑性的な性質を有すること、経路依存性を有すること、瞬間性と時間依存性の変形成分を有することなどが予想される[3.28][3.32][3.38][3.39]。

毛管力に起因する応力は、個々の細孔においてではなく、単位体積のコンクリート細孔組織中において評価する方法をとった。したがって、毛管力に起因する応力による組織の変形を評価するには、細孔組織の平均的変形抵抗を考えなければならない。ただし、組織の平均的変形抵抗として記述する場合、複雑な表現形式を持ち、現象をよく表し得るものであっても、組織内部において起こっている微視的現象の実体に基づくものではないことに留意したい。

本研究では、物理的意味が明確な仮定の組み合わせにより全体を構成することを優先し、毛管力に起因する応力に対する材料の変形特性として、最も表現形式が単純な線形弾性を基本的に採用する[3.36][3.37]。

$$\epsilon_{sh} = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (3.39)$$

ここに、 ϵ_{sh} ; 乾燥収縮ひずみ

E_s ; 毛管力に起因する応力に対する弾性係数[Pa]

である。

毛管力に起因する応力による組織の変形の特性を弾性により与えた場合、実際の変形特性に含まれる種々の側面を平均的に含んだ値で、弾性係数を評価することになる。実際の変形特性に含まれると考えられる種々の側面のうち、時間依存性について、常にある範囲の応力履歴、換言すれば乾燥履歴を対象とするのであれば、弾性として扱うことから不都

合は生じないと考えられる。なぜなら、常に同程度の割合で現れる時間依存性変形の特性を含んで、弾性係数を評価すればよいからである。しかし、任意の乾燥履歴を精度よく扱うためには、時間の影響を考慮して、毛管力に起因する応力と乾燥収縮ひずみの関係を評価しなければならない。広い範囲の乾燥履歴を対象とする場合、本研究では、毛管力に起因する応力と乾燥収縮ひずみと時間の関係として次式を用いる[3.39]。

$$\frac{d\sigma_s}{d\varepsilon_{sh}} = E_0 \sigma_s^\alpha \left| \frac{d\sigma_s}{dt} \right|^\beta \quad (3.40)$$

ここに、 E_0 ; 基準となる接線剛性を表すパラメータ

α ; 接線剛性に対する応力の大きさの影響を表すパラメータ

β ; 接線剛性に対する応力増加速度の影響を表すパラメータ

である。式(3.40)で表される構成式は、モルタル供試体の乾燥収縮試験より得られた、乾燥時間と、本モデルにより供試体の逸散水量の測定結果から評価される毛管力に起因する応力と、測定された収縮ひずみの3者の関係を、乾燥速度の異なるケースにおいても統一的に表現し得るように作成した実験式である[3.39]。

第4章の参考文献

- 3.1) 岡村 甫・前川宏一：正負交番荷重を受ける鉄筋コンクリート壁の非線形解析，鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，第1章，技報堂出版，pp.1-25，1991
- 3.2) 荒井康彦・岩井芳夫編：界面物理化学，工学のための物理化学，第9章，朝倉書店，pp.112-126，1991
- 3.3) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，セメント・コンクリート，No.550，pp.50-63，1992.12
- 3.4) Chaube,R.P., Shimomura,T. and Maekawa,K. : Analytical Modelling for the Effect of Aggregates on Water Transport in Concrete, Proc. of the JCI, Vol.15, No.1, pp.1217-1222, June 1993
- 3.5) 小野 周：表面張力，物理学 One Point 9，共立出版，1980
- 3.6) 八幡敏雄：土壌の物理，東京大学出版会，1975
- 3.7) 秋田 宏・藤原忠司・尾坂芳夫：モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動，土木学会論文集，No.420，pp.61-69，1990.8
- 3.8) 橋田 浩・田中亨二・小池迪夫：不透湿な仕上げ層を施工した後のコンクリートの含水状態 仕上げ材下地としてのコンクリートの含水状態の検討・その2，日本建築学会構造系論文報告集，No.419，pp.21-29，1991.1
- 3.9) 平岡正勝・田中幹也：移動現象論，朝倉書店，1971
- 3.10) Bird,R.B., Stewart,W.E. and Lightfoot,E.N. : Transport Phenomena, John Wiley & Sons, 1960
- 3.11) CEB : Durable concrete structures, Thomas Telford, 1992
- 3.12) 丸屋 剛・Somnuk,T.・松岡康訓：コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究，土木学会論文集，No.442，pp.81-90，1992.2
- 3.13) 滝口克己・堀田久人・小坂橋裕一：若材令コンクリートの熱および乾燥による応力解析法，日本建築学会構造系論文集，No.396，pp.118-124，1989.2
- 3.14) Bories,S.・佐藤邦明・福原輝幸：多孔媒体の乾燥と熱および流体輸送連成モデルの検討，地下水学会誌，Vol.33，pp.73-84，
- 3.15) 沼尾達弥・三橋博三・福沢公夫：加熱乾燥を受けるコンクリートの水分逸散過程に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.441，pp.1-7，1992.11
- 3.16) 下村 匠・小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動および熱伝導の連成解析，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.850-851，1992.9
- 3.17) 佐伯竜彦・大賀宏行・長瀧重義：コンクリートの中性化の機構解明と進行予測，土木学会論文集，No.414，pp.99-108，1990.2

- 3.18) 国井大蔵・古崎新太郎：移動速度論，工学基礎講座23，培風館，1980
- 3.19) 小宮山宏：速度論，朝倉書店，1990
- 3.20) 村田二郎・荻原能男：拡散透過，多孔材料 一性質と利用一 近藤連一 編，第5章，技報堂出版，pp.107-132，1973
- 3.21) 長滝重義・氏家 勲・柳瀬 進：コンクリートの透気性に関する基礎的研究，セメント技術年報，Vol.38，pp.262-265，1984
- 3.22) 左東有次・下村 匠：締固め不要コンクリートを用いた部材における表面気泡が耐久性に及ぼす影響，第3回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.245-250，1992.11
- 3.23) 阪田憲次・蔵本 修：乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究，土木学会論文報告集，No.316，pp.145-152，1981.12
- 3.24) Young,J.F.：Physical Mechanisms and their Mathematical Descriptions，Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete Edited by Bazant,Z.P. Chapter 1, John Wiley & Sons, pp.63-98, 1988
- 3.25) 日野幹雄：明解水理学，丸善，1983
- 3.26) 岸谷孝一・馬場明生：建設材料の乾燥収縮機構，セメント・コンクリート，No.346，pp.30-40，1975.12
- 3.27) Feldman,R.F. and Beaudoin,J.J.：Concrete Science，Heyden & Son, 1981
- 3.28) 田中弘文：セメント硬化体の組織と物性，多孔材料 一性質と利用一 近藤連一 編，第13章，技報堂出版，pp.299-339，1973
- 3.29) 三橋博三：高温下のコンクリートのクリープおよび乾燥収縮変形を表す合理的な構成則に関する研究，平成2年度科学研究費補助金研究成果報告書，1991.3
- 3.30) 近藤 実：硬化セメントペースト中の水の形態と水分の拡散を考慮した乾燥収縮の関係，セメント技術年報，Vol.12，pp.136-149，1958
- 3.31) Powers,T.C.：The Thermodynamics of Volume Change and Creep, Materials and Structures, Vol.1, No.6, pp.487-507, November-December 1968
- 3.32) 長滝重義・米倉彦州夫：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの機構に関する考察，コンクリート工学，Vol.20，No.12，pp.85-95，1982.12
- 3.33) 後藤孝治・酒井公式・佐藤 健：セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤，セメント・コンクリート，No.442，pp.9-15，1983.12
- 3.34) Bazant,Z.P.：Thermodynamics of Hindered Adsorption and its Implications for Hardened Cement Paste and Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.2, pp.1-16, 1972
- 3.35) Ferraris,C.F. and Wittman,F.H.：Shrinkage Mechanisms of Hardened Cement Paste, Cement and Concrete Research, Vol.17, No.3, pp.453-464, 1987

- 3.36) 陳 丙学：コンクリートの乾燥収縮予測モデル，東京大学修士論文，1991.3
- 3.37) 下村 匠・陳 丙学・小沢一雅：コンクリートの細孔構造と収縮特性，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.478-479，1991.9
- 3.38) 福留和人・下村 匠：時間依存性変形を考慮したコンクリートの乾燥収縮モデル，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.944-945，1992.9
- 3.39) 田中哲也：乾湿にともなうコンクリートの体積変化における経路依存性，東京大学土木工学科卒業論文，1993.3

第4章 材料レベルの特性の導出

4.1 はじめに

本章では、第2章において定式化したコンクリートの組織構造モデルと、第3章において定式化したいくつかのコンクリート中の微視的現象モデルを組み合わせることにより、乾燥収縮に関わるコンクリートの材料レベルの特性、すなわち水分平衡特性、水分移動特性、体積変化特性を導出する。

コンクリートの種々の材料レベルの特性は、著しい非線形性、経路依存性、時間依存性、材令依存性など複雑な様相を呈することが知られている。与えられた環境下におけるコンクリート有限構造体の挙動を予測するためには、コンクリートの材料レベルの特性を何らかの方法で数理的に表現する必要がある。本研究では、コンクリートの材料レベルの特性に見られる複雑な特徴を直接表現するのではなく、材料内部の微視的現象のレベルをモデル化の出発点としている。そのような方法をとることにより、材料レベルの特性に見られる非線形性などが、メカニズムに立脚して表現されるのである[4.1][4.2]。コンクリート構造の挙動の予測において、コンクリートの配合、構造物の形状、寸法、環境などの諸条件の変化に対して、適用範囲の広い予測を行うには、現象のメカニズムに立脚した予測手法であることが不可欠である[4.3]。本研究は、コンクリートの乾燥収縮に関して、これを試みたのである[4.4]。

本研究において提案する予測モデルの特徴は、モデル全体を構成する個々の微視的現象モデルが、第2章および第3章に示したように、きわめて簡潔な形式となっていることである。個々の仮定は簡潔であるが、微視的現象の機構の仮定を組み合わせることにより、コンクリートの水分逸散挙動およびこれにともなう体積変化挙動を統一的に予測するひとつのシステムにまで昇華させた例は、著者の知り得る限り過去にない。本手法の構築に際しては、有限構造体の乾燥収縮挙動の予測に用いるという統一的な目的のもとに個々の微視的現象モデルを記述したこと、および微視的現象の展開される共通の場であるコンクリートの組織構造をモデル化し、複数の微視的現象モデルの組み合わせの際に有効に機能させていることが鍵となっていることを強調したい。

4. 2 水分平衡特性

コンクリートの細孔組織の、細孔半径 r [m] に関する細孔容積の分布は、次の細孔容積分布密度関数により表されるとした。

$$\frac{dV_{(r)}}{dr} = V_o B C r^{C-1} \exp(-B r^C) \quad (4.1)$$

細孔組織中に水蒸気と乾燥空気より成る気相と、液状水より成る液相が共存し、平衡状態にあるとき、水蒸気の分圧 p_v [Pa] (あるいは気相の相対湿度 p_v/p_{vo}) と気液界面が形成される細孔の半径 r_s [m] の関係は次式で表されるとした。

$$\ln \frac{p_v}{p_{vo}} = -\frac{2\gamma M_w}{RT \rho_L r_s} \quad (4.2)$$

平衡状態では、細孔組織中においてその半径が、式(4.2)により規定される半径 r_s [m] より小さい部分はすべて液状水により満たされているとした。また、細孔組織中に存在する物質の相は、気相と液相のみであるとした。このとき、細孔容積分布密度関数の定義により、コンクリート単位体積中に存在する液状水の体積 V_L [m³/m³]、および気相の体積 V_G [m³/m³] は、それぞれ次のように表される (図 4.1)。

$$V_L = \int_0^{r_s} \frac{dV_{(r)}}{dr} dr = V_{(r_s)} \quad (4.3)$$

$$V_G = \int_{r_s}^{\infty} \frac{dV_{(r)}}{dr} dr = V_o - V_{(r_s)} \quad (4.4)$$

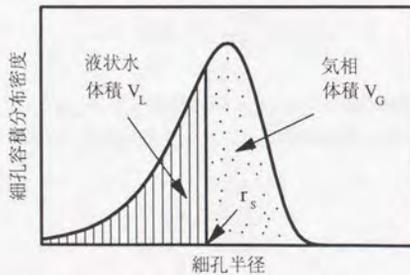


図 4.1 細孔組織中の水蒸気と液状水

以上により、相対湿度が与えられたときの、細孔組織における水蒸気と液状水の体積の関係が導かれたことになる。

次に、水蒸気と液状水の質量の関係を導く。コンクリート単位体積中に存在する液状水の質量 w_L [kg/m³]、および水蒸気の質量 w_V [kg/m³] は、それぞれ次のように表される。

$$w_L = \rho_L V_L \quad (4.5)$$

$$w_V = \rho_V V_G \quad (4.6)$$

液状水は非圧縮性であると仮定したので、その密度 ρ_L [kg/m³] は一定である。水蒸気の密度 ρ_V [kg/m³] は、状態方程式により圧力 p_V [Pa] と次のように関係づけられる。

$$p_V = \rho_V \frac{RT}{M_w} \quad (4.7)$$

また、液状水の圧力 p_L [Pa] と、気相の全圧 p_G [Pa] (通常は一定と仮定) とは、Laplace の式により次のように関係づけられる。

$$p_G - p_L = \frac{2\gamma}{r_s} \quad (4.8)$$

以上により、細孔組織中の水分の存在状態を規定する各量、すなわち水蒸気と液状水の温度、圧力、質量、体積がすべて関係づけられたことになる。本モデルの特徴は、液状水の存在する最大細孔半径 r_s [m] が、媒介変数として各量の関係づけに有効に機能していることである。用いた細孔容積分布密度関数の関数形、および個々の微視的現象モデルが単純な形式で表現されているので、各量が相互関係が、数値計算に適した陽な形で表現される。たとえば、相対液状水量 w_L/w_{LO} と相対湿度 p_V/p_{VO} の関係は、次のように書き下すことができる。

$$\frac{w_L}{w_{LO}} = 1 - \exp\left[-B \left\{ \frac{2\gamma M_w}{RT \rho_L} \left(\ln \frac{p_V}{p_{VO}} \right)^{-1} \right\}^c\right] \quad (4.9)$$

ここに相対液状水量 w_L/w_{LO} とは、液状水量 w_L [kg/m³] を飽水状態の液状水量 w_{LO} [kg/m³] により正規化した量である。飽水状態とは、細孔組織中のすべての空間が液状水に満たされた状態と定義する。

$$w_{LO} = \rho_L V_o \quad (4.10)$$

導出された平衡特性を、相対湿度 p_v/p_{v0} と相対液状水量 w_l/w_{l0} の関係について図示したのが図 4.2 である。図中には、岡島らによる実験結果[4.5]を、含水率を相対液状水量に変換しプロットしてある。

相対湿度と平衡するコンクリートの含水量の関係は、一般に、乾燥、吸湿の経路に依存することが知られている。本研究では、気液の平衡移動を毛細管凝縮のみにより表現したので、導出される水分平衡特性は完全に可逆となり、細孔容積分布密度関数の形状により一意的に定まることとなる(図 4.2)。水分平衡特性の経路依存性を表現するためには、固体壁への水分子の吸脱着、組織構造の幾何形状などに起因した非可逆なメカニズムを考慮しなければならない[4.6]。

提案手法の特徴は、微視的現象のメカニズムの仮定により構成されていることである。先駆的なアプローチを行っている本研究において重要なのは、個々の微視的現象モデルが精密であることよりも、むしろ手法全体のフレームが妥当であることであると考えたため、個々の仮定にはなるべく簡潔なものを用いた。個々の微視的現象モデルをより複雑で精密なものに置き換え、手法の精度と適用性を高めるのは、本研究を発展させた段階において行うことにした。

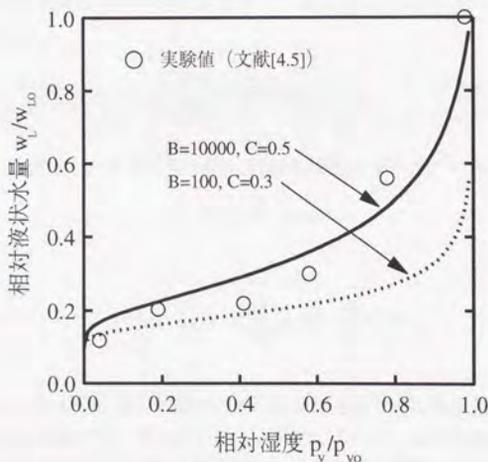


図 4.2 水分平衡特性

4. 3 水分移動特性

本研究では、コンクリート中の水分を水蒸気と液状水に区別して扱っている。水蒸気と液状水の移動、相変化を考慮すれば、それぞれの物質の質量に関する変化の式（質量保存則）は、次のように表現される。

$$\frac{\partial w_V}{\partial t} = -\text{div}(J_V) + v \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -\text{div}(J_L) - v \quad (4.12)$$

式(4.11)と式(4.12)を辺々加えることにより、水蒸気と液状水より成る水分全体についての変化の式を得ることができる。

$$\frac{\partial (w_V + w_L)}{\partial t} = -\text{div}(J_V + J_L) \quad (4.13)$$

ここで、単位体積中における水蒸気の質量 $w_V[\text{kg}/\text{m}^3]$ は、液状水の質量 $w_L[\text{kg}/\text{m}^3]$ に比べ、常に微小であり質量変化が無視できるものと仮定する。式(4.13)は、次のように書き換えることができる。

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -\text{div}(J_V + J_L) \quad (4.14)$$

第3章において定式化した水蒸気移動則、液状水移動則はそれぞれ次のようであった。

$$J_V = -K_V V_G D_{V0} \text{grad} \rho_V \quad (4.15)$$

$$J_L = \int_0^{r_s} \left[\rho_L \frac{dV}{dr} \left\{ -K_L \frac{r^2}{8\mu} \text{grad} \left(-\frac{2\gamma}{r_s} \right) \right\} \right] dr \quad (4.16)$$

これらの移動則は、ともに、細孔組織中の水分の状態を表す量の勾配基準で表現されているが、勾配を考える変数が統一されていない。前節において、各状態量間の関係はすでに定式化されている。そこで、これらの移動則を、水分状態を表現する主たる変数である液状水量勾配基準に書き直す。

$$J_v = -D_{V(w_s)} grad w_L \quad (4.17)$$

$$J_L = -D_{L(w_s)} grad w_L \quad (4.18)$$

ここに、 $D_{V(w_L)}$; 移動則を液状水量勾配基準で表したときの水蒸気拡散係数[m²/s]
 $D_{L(w_L)}$; 移動則を液状水量勾配基準で表したときの液状水拡散係数[m²/s]
 である。

液状水量勾配基準により表された水蒸気の移動則 (式(4.17)) と液状水の移動則 (式(4.18)) を、水分全体の質量保存式 (式(4.14)) に代入することにより次式を得る。

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = \text{div}(D_{(w_s)} grad w_L) \quad (4.19)$$

ここに、 $D_{(w_L)}$; 移動則を液状水量勾配基準で表したときの水分拡散係数[m²/s]
 であり、次のように定義される。

$$D_{(w_s)} = D_{V(w_s)} + D_{L(w_s)} \quad (4.20)$$

移動則を液状水量勾配基準で表したときの水蒸気の拡散係数 $D_{V(w_L)}$ [m²/s]、液状水の拡散係数 $D_{L(w_L)}$ [m²/s] は、前節において定式化した水分平衡特性 (各状態量間の関係) を用いることにより、状態量の関数として評価される。したがって式(4.20)より、水蒸気と液状水より成る水分全体に対する拡散係数 $D_{(w_L)}$ [m²/s] も状態量の関数として表され、これを用いることにより、コンクリート中の水分移動の基礎方程式として式(4.19)を用いることができる。すなわち、水蒸気と液状水の平衡関係を含めて、水分拡散係数 $D_{(w_L)}$ [m²/s] を評価することにより、コンクリート中の水分を単相とみなした場合と同様の数値解析手法を適用することができるのである。

以下に、移動則を液状水量勾配基準で表したときの水蒸気の拡散係数 $D_{V(w_L)}$ [m²/s]、液状水の拡散係数 $D_{L(w_L)}$ [m²/s] の、系の状態量の関数としての具体的な表現を導く[4.7]。式(4.15)、式(4.16)を、式(4.17)、式(4.18)のように書き換えたことより、水蒸気の拡散係数 $D_{V(w_L)}$ [m²/s]、液状水の拡散係数 $D_{L(w_L)}$ [m²/s] は、それぞれ次のように定義される。

$$D_{V(w_s)} = K_v V_G D_{V0} \frac{d\rho_v}{dw_L} \quad (4.21)$$

$$D_{L(w_s)} = \frac{K_L \rho_L}{8\mu} \int_0^{r_s} \left\{ r^2 \frac{dV(r)}{dr} \right\} dr \cdot \frac{d}{dw_L} \left(-\frac{2\gamma}{r_s} \right) \quad (4.22)$$

前節において定式化した水分平衡特性により、水蒸気、液状水の、温度、体積、圧力、質量の各状態量間の関係は既知となっている。系の各状態量間の関係を記述する際には、液状水の存在する最大細孔半径 r_s [m] を媒介変数として用いれば便利であるので、これを用いて式(4.21)、式(4.22)を書き換えればそれぞれ以下ようになる。

$$D_{V(w_v)} = K_V V_G D_{VO} \left(\frac{dw_L}{dr_s} \right)^{-1} \frac{dp_v}{dr_s} \quad (4.23)$$

$$D_{L(w_v)} = \frac{K_L \rho_L}{8\mu} \left(\frac{dw_L}{dr_s} \right)^{-1} \frac{2\gamma}{r_s^2} \int_0^{r_s} \left\{ r^2 \frac{dV(v)}{dr} \right\} dr \quad (4.24)$$

細孔容積分布密度関数を具体的に与えることにより、式(4.23)、式(4.24)は、最終的に以下のように表されることとなる。

水蒸気の拡散係数 $D_{V(w_v)}$ [m²/s] について、

$$D_{V(w_v)} = K_V D_{VO} 2\gamma p_{VO} \left(\frac{M_w}{RT\rho_L} \right)^2 \frac{1}{BCr_s^{C+1}} \exp\left(-\frac{2\gamma M_w}{RT\rho_L r_s}\right) \quad (4.25)$$

液状水の拡散係数 $D_{L(w_v)}$ [m²/s] については、積分項を含むため、次のような形式で示す。

$$D_{L(w_v)} = K_L \frac{\gamma}{4\mu} \frac{1}{r_s^{C+1} \exp(-Br_s^C)} \int_0^{r_s} \{ r^{C+1} \exp(-Br^C) \} dr \quad (4.26)$$

積分項は、数値積分を行うことにより値を求めることができるが、次の条件を満たすときには、解析的に積分を実行することができる。すなわち、

$$C = \frac{2}{n} \quad (n = \text{positive int.}) \quad (4.27)$$

のとき、液状水の拡散係数 $D_{L(w_v)}$ [m²/s] は次のように表される。

$$D_{L(w_v)} = K_L \frac{\gamma}{4\mu} \frac{1}{BCr_s^{C+1} \exp(-Br_s^C)} \left[\frac{\frac{2}{C}!}{B^{\frac{2}{C}}} \exp(-Br_s^C) \sum_{i=0}^{\frac{2}{C}-1} \left\{ \frac{\frac{2}{C}!}{C^i} \frac{r_s^{2-Ci}}{B^i} \right\} \right] \quad (4.28)$$

式(4.25)、式(4.28)は、系の状態量の陽的な関数として表現されているために、数値計算に適している。特に、式(4.28)において積分解が存在することは、計算時間の短縮を考えたとき、その意義がきわめて大きい。つまり本モデルは、微視的現象の機構の仮定の組み合わせにより構成されている一方で、それらの仮定の簡略化を行わずとも、有限構造体の

挙動の予測に適用することができるという特徴を有するのである。

本モデルにより評価される、水分拡散係数 $D_{(wL)}$ [m^2/s] の状態量依存性を図示したのが図 4.3 および 図 4.4 である。図 4.3 は、相対液状水量 w_L/w_{L0} との関係を示している。図 4.3 には阪田らによる実験値[4.8]の一例を、図 4.4 には Bazant らが仮定した特性曲線[4.9]の一例を、それぞれ重ねて示してある。Bazant らの手法は、微視的な機構を考察しながらも、定量的な取扱いに際しては、本曲線を仮定することを出発点としていることに対し、本手法は、微視的機構の仮定の組み合わせにより、本特性を導出していることが特徴である。本モデルでは、水分拡散係数の水分状態への依存性は細孔容積分布密度関数の形状、水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v 、液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L により決定される。

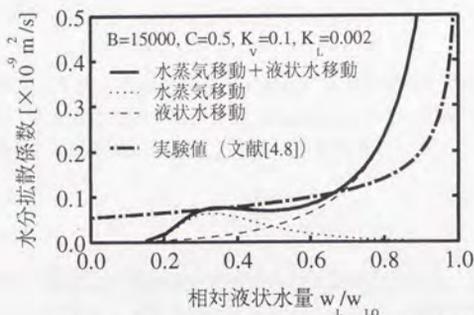


図 4.3 相対液状水量と水分拡散係数の関係

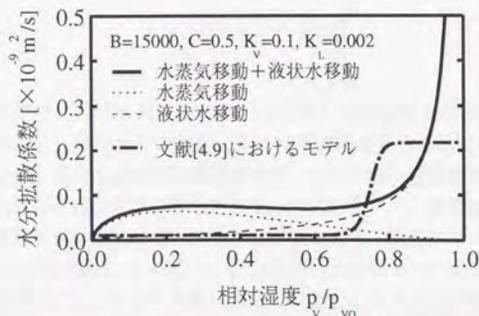


図 4.4 相対湿度と水分拡散係数の関係

4. 4 体積変化特性

液状水の表面張力に起因した細孔組織中の気相と液相の圧力差は、相対的に細孔組織の固体壁に作用する圧力とみなすことができる。本研究は、コンクリートの乾燥収縮の主たるメカニズムが、この作用に起因する組織の変形であるとして、現象を説明する立場をとる。この作用をコンクリート単位体積中で集積したものを毛管力に起因する応力 σ_s [Pa] と定義し、次式により評価する。

$$\sigma_s = A_s \frac{2\gamma}{r_s} \quad (4.27)$$

毛管力の作用面積の影響を表す係数 A_s は、コンクリート単位体積中の液状水の体積 V_L [m^3/m^3] により与える。

$$A_s = V_L \quad (4.28)$$

式(4.27)で評価される毛管力に起因する応力 σ_s [Pa] による組織の変形を考え、これを乾燥収縮であるとする。毛管力に起因する応力と、それによる変形（ひずみ）の関係を線形弾性により与えた場合、乾燥収縮ひずみ ϵ_{sh} は次式により表される。

$$\epsilon_{sh} = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (4.29)$$

第2章において与えた細孔容積分布密度関数の具体形を用いると、乾燥収縮ひずみ ϵ_{sh} は系の状態を表す量の関数として表現することができる。系の状態変数の代表値として、液状水が存在する最大細孔半径 r_s [m] を用いると、乾燥収縮ひずみ ϵ_{sh} は次のように表される。

$$\epsilon_{sh} = \frac{1}{E_s} (1 - \exp(-Br_s^c)) \frac{2\gamma}{r_s} \quad (4.30)$$

毛管力に起因する応力と、それによる変形（ひずみ）の関係を線形弾性により与えた場合、乾燥収縮ひずみ ϵ_{sh} は、水分の状態により一意的に定まることとなる。

なお本モデルにより導出される乾燥収縮特性は、材料の微小体積要素における内部の水分状態と非拘束状態の収縮ひずみの関係である。実験において、通常測定可能な乾燥収縮挙動は、供試体の平均逸散水量と平均ひずみの関係であり、本モデルにより導出される乾燥収縮特性そのものではない。なぜなら、供試体がいかに微小であっても、有限な大きさを持つ限り、乾燥過程においては、内部に水分の勾配が存在するために、水分状態の平均値を測定し得るに過ぎず、また変形に関しても、供試体の各部位が拘束し合った結果、実際に現れる変形を測定し得るに過ぎないからである。水分状態と、変形の双方に、不均一

分布の影響が含まれるために、これらが相殺し、結果的に実験値は無限小部分の水分状態と非拘束変形の関係と一致するとの考え方も示されている[4.10]。しかしながらこのことはあくまで経験的事実であり、理論的には構造体内部の水分状態の分布を予測し、体積変化特性を各部位に適用することにより各部位の非拘束収縮ひずみ成分を評価し、構造体の応力解析を行うことによりはじめて構造体の変形が評価されることになる。

本モデルにより導出される体積変化特性を、単位体積における飽水状態からの逸散水量と乾燥収縮ひずみの関係として図示したのが図 4.5 である。この関係は、単位体積中の総細孔容積 V_0 [m³/m³]、細孔容積分布密度関数の形状 (パラメータ B, C)、および毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s [Pa] に依存する。

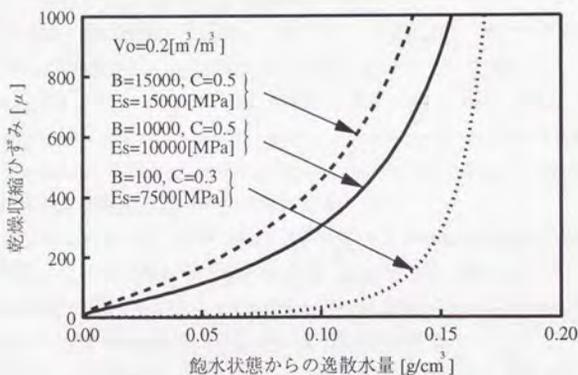


図 4.5 逸散水量と乾燥収縮ひずみの関係

本研究では基本的に、毛管力に起因する応力と、乾燥収縮ひずみの関係を線形弾性により与えることにするが、前章において述べたように、乾燥速度の影響を広い範囲で考慮する場合は、次式で表される実験式を用いる[4.11]。

$$\frac{d\sigma_s}{d\varepsilon_{sh}} = E_0 \sigma_s^\alpha \left| \frac{d\sigma_s}{dt} \right|^\beta \quad (4.31)$$

毛管力に起因する応力と乾燥収縮ひずみの関係に、式(4.31)の構成式を用いた場合、乾燥収縮ひずみは水分の状態のみでは定まらず、乾燥速度に依存することとなる。

第5章の参考文献

- 4.1) 下村 匠・小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.631-636，1992.6
- 4.2) 下村 匠・小沢一雅・前川宏一：細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.435-440，1993.6
- 4.3) 岡村 甫・前川宏一：正負交番荷重を受ける鉄筋コンクリート壁の非線形解析，鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，第1章，技報堂出版，pp.1-25，1991
- 4.4) 阪田憲次・池田 清・浜野隆司：コンクリートの乾燥収縮予測手法について，セメント技術年報，Vol.36，pp.263-266，1982
- 4.5) 岡島達雄・水谷章夫・河辺伸二・志村欣一・加知由次：コンクリートの等温吸脱着特性，第43回セメント技術大会講演集，pp.350-353，1989
- 4.6) Chaube,R.P., Shimomura,T. and Maekawa,K. : Multi Phase Water Movement in Concrete as a Multi Component System, Proceedings of the Fifth RILEM Int. Symp. on Creep and Shrinkage of Concrete, pp.139-144, Barcelona, September 1993
- 4.7) 八幡敏雄：土壌の物理，東京大学出版会，1975
- 4.8) 阪田憲次・蔵本 修：乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究，土木学会論文報告集，No.316，pp.145-152，1981.12
- 4.9) Bazant,Z.P. and Najjar,L.J. : Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materials and Structures, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972
- 4.10) 永松静也・佐藤嘉昭・大常好範：セメント硬化体の乾燥の程度と乾燥収縮ひずみの関係 乾燥条件の影響，日本建築学会構造系論文報告集，No.439，pp.13-21，1992.9
- 4.11) 田中哲也：乾湿にともなうコンクリートの体積変化における経路依存性，東京大学土木工学科卒業論文，1993.3

第5章 有限構造体の乾燥収縮挙動の予測

5.1 はじめに

前章において導出したコンクリートの材料レベルの特性，すなわち，水分平衡特性，水分移動特性，体積変化特性は，コンクリートの有限微小体積が有する特性として定義される。小型の供試体から実規模の構造物まで，ある形状と大きさを有する構造を有限構造体と呼ぶことにする。有限構造体を構成するコンクリートに，導出した材料レベルの特性，および材料の構成則（応力とひずみの関係）を与え，初期条件と境界条件のもとで，水分の移動と物体の変形に関する基礎方程式を解くことにより，コンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動を予測することができる[5.1][5.2]。

われわれが直接その挙動を観察し，諸量を測定し得るのは，ある形状，大きさを有し，ある初期条件，境界条件のもとにおかれた有限構造体についてのみである。提案した材料モデルの実現象に対する適用性を検証するには，提案モデルを用いて有限構造体の挙動の予測を行い，同条件下での実験結果と比較するという方法によらなければならない。また，コンクリートの特性を表現する材料モデルを開発することの重要な工学上の目的のひとつは，種々の条件下におかれたコンクリート構造物の挙動を適切に予測することに他ならない。つまり，提案する材料モデルは，種々の条件下におかれたコンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動の予測に適用し，適切な予測を行うことができはじめて，その工学的価値が明らかとなるのである。

コンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動を予測することは，与えられた初期条件と境界条件のもとでの，コンクリート中の水分の移動，構造体の変形に関する基礎方程式の解を求めることに帰着する。水分移動解析の結果として，各時間における構造体内部の水分の分布を得ることになり，得られた水分分布から各部位の乾燥収縮ひずみを評価し，各部位の乾燥収縮ひずみを初期ひずみとして構造体の応力解析を行うことにより，内部の応力分布，ひずみ分布，および構造体の変形を解として得ることになる。ひびわれの発生を予測するには，コンクリートのひびわれ発生条件を与え，得られた応力分布をもとにひびわれの発生を判定することになろう[5.2]。

移動現象の対象が物質（水分）であり，初期ひずみが乾燥収縮ひずみであるだけで，水分移動，乾燥収縮応力の問題は，熱伝導，熱応力問題と数学的な取扱いは同じである。これらの問題に関しては，基礎方程式の形式が特殊なものでなければ，任意の形状・大きさ

の構造体、任意の初期・境界条件に関して、数値計算により解を得る手法が、今日一般に確立されている[5.3][5.4][5.5][5.6].

本研究において提案した材料モデルは、いずれも既往の数値計算手法にそのまま適用できる形式となっており、有限構造体の挙動の予測を行う際に、特別な操作を行う必要はない。つまり、前章においてコンクリートの材料レベルの特性を導出した時点で、本研究の本質的な提案を終えたことになる。なお、先述したように、有限構造体の乾燥収縮挙動を予測するには、本研究において提案した材料レベルの特性に加えて、材料の構成則（応力とひずみの関係）が必要となるが、これに関する検討は、本研究の対象範囲外とする。乾燥収縮に起因する応力を適切に評価するためには、コンクリートの構成則をいかに取り扱うかがきわめて重要な問題であるが[5.7]、この問題は、本研究の延長線上の次の段階における課題としたい。

本章では、提案モデルを有限構造体に適用する際に必要な、水分の移動に関する境界条件の定式化、および数値計算の一般的方法について述べる。

5. 2 境界条件

コンクリート内部の水分の移動は、前章において定式化した移動則により評価される。有限な大きさ、ある形状を有したコンクリート構造の水分逸散挙動を予測するには、構造体と外部との境界における水分の移動則、すなわち水分移動に関する境界条件が与えられなければならない。一般の供用環境下に置かれたコンクリート構造が経験する水分移動に関する境界条件として、以下が考えられる。

- 1)ある相対湿度の大気に接する。
- 2)水分の出入りがない。
- 3)液状水に接する。

このうち、本研究では 1) および 2) を対象とする。

境界条件 1) は、陸上のコンクリート構造物が最も普通に経験する境界条件であり、乾燥、吸湿過程を扱う際には、必ず考慮しなければならないものである。境界条件 2) は、現実には、型枠に接する境界面などがこれにあたるが、そればかりでなく、構造体中の水分移動に関する対象面を境界とみなして数値計算を行うときにも現れる境界条件である。本研究では、重要性を考慮して、これらの 1) および 2) の境界条件を対象とすることにした。

境界条件 3) は、構造物の一部または全部が水中あるいは、飽水状態の地盤に接する場合に考慮しなければならない。また、一般の構造物であっても、降雨に曝される場合などを含んだ水分移動過程を予測するには、考慮する必要がある。本論文では、境界条件 3) については、対象としないことにするが、提案モデルは水分を水蒸気と液状水の2相に分けて取り扱っているため、このような境界条件を考慮することも可能である[5.8].

まず、境界条件 1) の、ある相対湿度の大気に接する場合の取扱い方について検討する。この場合の現象の実体を考えると、コンクリートの表面から水蒸気の入出りが行われるに相違ない。したがって、境界における水分流束を与えることが、境界条件に相当し、問題は水分流束をどのように評価するかに帰着する。コンクリートと雰囲気との境界近傍における、相対湿度（水蒸気分圧）の分布を模式的に示したのが 図 5.1 である。

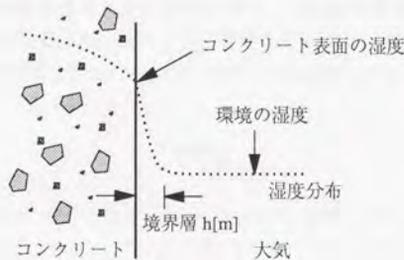


図 5.1 境界近傍における湿度分布

コンクリート内部の表面近傍の相対湿度は、ただちに雰囲気との相対湿度と等しくなるのではないと考えられる[5.9]. しかし同時に、圧力は連続して分布しなければならないので、現実には、コンクリート表面近傍の雰囲気との相対湿度が勾配を描いて分布することにより、その連続性が保たれていると考えられる[5.3]. 本研究では、この勾配によって生じる水分流束を境界条件として与える方法をとることとする。いま、表面近傍の相対湿度の勾配が、コンクリート表面より一定の距離 h [m] の領域に形成されていると仮定する[5.10][5.11]. 定式化した水分移動モデルと組み合わせる際の簡便性を考え、勾配をとる量として、水分の状態を表す主たる変数である液状水量を選び、次式により境界での水分流束を与える。

$$J_B \cdot n = k \frac{w_L - w_{LB}}{h} \quad (5.1)$$

- ここに、
- J_B ; 境界での水分流束[kg/m²·s]
 - n ; 外向き単位法線
 - k ; 水分勾配と水分流束の間の係数[m²/s]
 - w_L ; コンクリート表面の液状水量[kg/m³]
 - w_{LB} ; 雰囲気との相対湿度に平衡する液状水量[kg/m³]
 - h ; 境界層の厚さ[m]

である。

境界層の厚さ $h[m]$ は、コンクリート表面近傍の大気中の水蒸気分圧の分布を表すため、大気対流の状況など環境要因により決定される量である。一方、水分勾配と水分流動の間の係数 $k[m^2/s]$ は、コンクリートと大気の境界での水分の移動に対する、コンクリート表面の水分の状態の影響、および表面に存在する細孔、空隙の状況など組織構造の影響を表す量である。表面付近の含水率が高く、液状水の拘束される度合いが小さいほど、また、コンクリート表面の状態として、外部に対して開いている空隙が多いほど、蒸発、外部への逸散が容易に行われると考えられる。これらの影響を表現するのが係数 $k[m^2/s]$ である。類似の性質を持つ量として、前章までにコンクリート中の水分拡散係数を定式化した。そこで本研究では、境界での水分の移動に関しても、水分拡散係数がそのまま適用できるものと仮定する。

$$k = D_{(w_2)} \quad (5.2)$$

境界における水分の移動に関する速度係数が、内部での移動に関するそれと同様の形式で表現できる保証は、必ずしもない。定式化の段階において明らかのように、内部での水分の移動に関する速度係数である水分拡散係数は、水蒸気の移動と液状水の移動を合わせたものとして導かれた量であり、一方、境界における水分移動は、高含水時の表面付近の液状水の蒸発と、境界を通じての水蒸気移動であると考えられるからである。しかし、これらの現象は、実体こそ異なるが性質は似ていると考えられること、および、数値計算法への適用性を考慮して、ここでは以上のような形式で境界条件を与えることにした。大気に接する境界条件を、このような形式で与えることを、上記と別の観点から解釈すれば、コンクリート表面から境界層の厚さ $h[m]$ の点を環境との平衡点と仮定し、境界層を仮想的にコンクリート内部とみなしたとも考えることができる[5.9][5.12]。

次に、境界条件 2) の、水分の出入りがない場合は、次式により境界条件を与えればよいことは明白である。

$$J_B = 0 \quad (5.3)$$

5. 3 数値計算法

提案したモデルを有限構造体に適用し、与えられた初期条件と境界条件のもとで、時間と空間に関し解くことにより、有限構造体内部の水分の分布、乾燥収縮の分布、およびそれらの経時変化を解として得ることになる。さらに、構造体を形成する材料の構成則（応力とひずみの関係）が与えられれば、乾燥収縮による内部の応力とひずみの分布、および構造体の変形を経時的に知ることができる。構造体内部の物理量の移動問題を解き、得られた物理量の分布から各部分の体積変化成分を求め、これを初期ひずみとして構造体の応

力解析を行うという点では、この手順は熱応力解析とまったく共通である[5.4][5.6]。コンクリート構造に関しても、水和発熱に起因した温度ひびわれの予測において、熱伝導および熱応力解析が行われている[5.13]。数値計算技術の発達した今日、これらの具体的な計算に関しては、有限要素法に代表される数値計算法を用いて、計算機により数値解を求めることが実際的となっている[5.4][5.14]。ここでは、提案モデルを組み込んだ数値計算プログラムにより、コンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動を予測するフローの概略を示す。

図 5.2 は、提案モデルを組み込んだ数値計算プログラムにより、コンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動を予測するフローの概略である。数値計算手法として、計算対象領域を有限要素に分割する有限要素法、有限差分法（コントロールボリューム法）などを用いることを想定している。

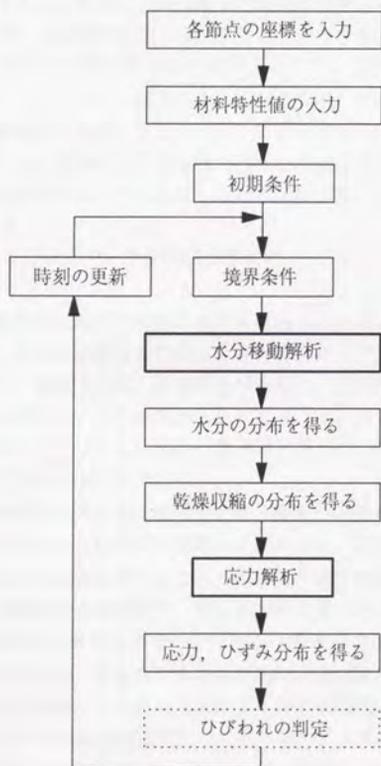


図 5.2 数値計算による有限構造体の乾燥収縮挙動の予測

まず、対象とする構造体の要素分割を行い、各節点の座標を入力する。対象構造の形状、大きさに関する情報は、各節点の座標という形でプログラムに入力される。

次に、コンクリートの特性に関する情報を入力する。提案した乾燥収縮モデルでは、材料の特性は、以下により表される。

- V_o ; コンクリート単位体積中における総細孔容積[m³/m³]
- B ; 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ
- C ; 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ
- K_v ; 水蒸気移動に関する特性を表す材料係数
- K_L ; 液状水移動に関する特性を表す材料係数
- E_s ; 毛管力に起因する応力に対する弾性係数[Pa]

これまで述べたように、提案モデルは以上の材料特性値から、コンクリートの水分平衡特性、水分移動特性、体積変化特性を導出することができる。つまり、以上の材料特性値を与えることは、これらの3つの材料特性を与えることに相当する。

提案モデルは、コンクリート構造体中の水分の分布、乾燥収縮の分布を経時的に予測するものである。構造体実際に生じる変形と応力分布を予測するには、評価された乾燥収縮を初期ひずみとして構造体の応力解析を行わなければならない。応力解析を行うには、材料の構成則が必要である。たとえば、これを線形弾性により与える場合、以下の材料特性値が必要である。

- E_c ; コンクリートの弾性係数[Pa]
- ν ; ポアソン比

本問題では、構造体の状態の時間的な変化を追跡することとなるので、時間ステップに区切り計算を行う。これらの材料特性値は、各計算ステップ、あるいは各部分において一定である必要はない。本論文では、材料特性が時間的、空間的に一定でないケースは取り扱わないが、たとえばセメントの水和反応にともなうコンクリートの材料特性の変化を表現するために、時間ステップごとに材料特性を変化させたり、構造体表面と内部で異なった材料特性を仮定することができる[5.15]。

つづいて初期条件を入力する。初期条件は、構造体内部の水分の分布、温度の分布、および応力の分布である。これらは、時刻 $t=0$ における、各要素の水分量、温度、応力として与えることとなる。提案モデルにより、要素内の水分状態を表す諸量の関係が定式化されているので、各要素の水分状態は、最も直接的な量である、コンクリート単位体積中の液状水量 w_l [kg/m³] に代表させることができる。温度については、本論文では時間的、空間的な変化は扱わないが、提案モデルの中で系の状態変数として機能するため、各要素について与える必要がある。もちろん現象のより高度な取扱い方として、温度を変数とし、水分と熱エネルギーの連成移動問題としてとらえることも考えられる[5.15][5.16]。

水分の移動に関する境界条件は、大気に接する境界面では大気の相対湿度を与え、対流状況に応じて表面の境界層の厚さ h [m] を与える。水分の出入りがない境界は、その旨を情報としてプログラムに認知させる。応力解析に必要な境界条件は、各境界面における、

表面力あるいは変位の拘束条件を与える。なお境界条件に関しても、時間ステップごとに変化させてもよい。

以上の準備が整ったら、各時間ステップごとに計算を行う。既知量である現在時刻における構造体の各状態量と材料特性を与え、数値計算により支配方程式を数値的に解き、時間刻み分だけ未来の各状態量を解として得る作業である。手順としては、まず、水分の移動を解き、新しい水分分布を求める。各要素の水分の状態が求まったら、提案モデルにより導かれる体積変化特性にこれを入力し、各要素の乾燥収縮を求める。続いて、各要素の乾燥収縮を初期ひずみとして構造体の応力解析を行い、応力とひずみの分布、および構造体の変形を求める。なお、この手順はコンクリート中の水分の移動とコンクリートの変形との相互作用が無視できるという仮定に基づくものである。圧縮応力によりセメント硬化体中の水分移動は大きく影響を受けるとの報告もあり[5.17]、現実にはこの仮定は常に適用できるものではないと思われる。今後の検討課題である。

新しい状態量がすべて求まったら、時刻を更新し、次の計算ステップへ移行する。以後同様の手順により、構造体の水分状態、応力状態と変形を経時的に求めることとなる。以上が、提案モデルを用いた、有限構造体の乾燥収縮挙動の予測フローの概要である。乾燥収縮ひびわれの予測を行う際には、コンクリートのひびわれ条件が材料特性として必要である。いま、ひびわれ条件を引張主応力に対する材料強度で与えたとしたら、計算結果として得られる各要素の応力と、材料強度の比較を行いひびわれの発生を判断するという手順が、各時間ステップに加わることとなる[5.2]。

以上、提案した乾燥収縮モデルを用いて、数値解析によりコンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動を予測する一般的な手法の概要について述べた。次章では、提案モデルを用いて、小型のコンクリート供試体の乾燥収縮挙動を解析するが、基本的にはここで述べた方法にしたがっている。実構造物も、小型の供試体も、ある形状と大きさを有した構造体という点では同じであり、提案手法は同じ論理でこれらを取り扱うのである。

コンクリートの組織構造、およびコンクリート中の微視的現象のモデル化より出発して、コンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動を定量的に予測する手法を示した段階で、本研究は予測手法の提案を終えたことになる。次章では、ここまで述べた提案の妥当性を検証する。

第5章の参考文献

- 5.1) 下村 匠・陳 丙学・小沢一雅：真空乾燥法によるコンクリートの乾燥収縮試験とその予測モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.391-396，1991.6
- 5.2) 下村 匠・福留和人・小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリートの乾燥収縮特性の評価，超流動コンクリートに関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.167-174，1993.5
- 5.3) 矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門，培風館，1983
- 5.4) 矢川元基・宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社，1985
- 5.5) 前川宏一・小沢一雅・國島正彦：複数の劣化因子から構成されるシステムの経時変化予測，コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.39-46，1988.4
- 5.6) 滝口克己・堀田久人・小板橋裕一：若材令コンクリートの熱及び乾燥による応力解析法，日本建築学会構造系論文報告集，No.396，pp.118-124，1989.2
- 5.7) 秋田 宏・藤原忠司・尾坂芳夫：含水率分布に基づいた乾燥収縮応力の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.403-408，1991.6
- 5.8) Chaube,R.P., Shimomura,T. and Maekawa,K. : Analytical Modelling of the Effect of Aggregates on Water Transport in Concrete, Proceedings of the JCI, Vol.15, No.1, pp.1217-1222, June 1993
- 5.9) 沼尾達弥・三橋博三・福沢公夫：加熱乾燥を受けるコンクリートの水分逸散過程に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.441，pp.1-7，1992.11
- 5.10) 平岡正勝・田中幹也：移動現象論，朝倉書店，1971
- 5.11) 国井大蔵・古崎新太郎：移動速度論，工学基礎講座23，培風館，1980
- 5.12) Bazant,Z.P. and Najjar,L.J. : Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materials and Structures, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972
- 5.13) マスコンクリートの温度応力研究委員会：マスコンクリート温度応力研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1985
- 5.14) マスコンクリートの温度応力研究委員会：マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム，日本コンクリート工学協会，1985
- 5.15) 下村 匠・小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動および熱伝導の連成解析，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.850-851，1992.9
- 5.16) 佐藤邦明・伊藤 洋・坂口雄彦：地下空間におけるコンクリート壁内の水分移動

に関する基礎研究, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第3部, pp.814-815,
1990.9

- 5.17) 沼尾達弥・三橋博三・福沢公夫: 硬化セメントペースト中の水分の逸散および移動に及ぼす圧縮応力の影響, 日本建築学会構造系論文報告集, No.443, pp.11-16, 1993.1

第6章 提案手法の妥当性と適用範囲の検証

6.1 はじめに

本章では、提案モデルの妥当性と適用範囲の検証を以下の方法により行う。

- 1) 使用材料, 配合, 養生, 乾燥環境, 供試体寸法の諸条件を変化させたモルタルおよびコンクリート供試体の乾燥収縮挙動を測定する実験を行う。
- 2) 提案モデルを組み込んだ数値解析プログラムを用いて, 一定の手順により, 実験結果に対してモデル内の材料定数値の同定(逆解析)を行う。
- 3) 以上の操作を種々の条件下の実験ケースについて行い, 得られた結果を次の2つの角度から検討する[6.1].
 - a) 材料定数値を適当に定めることにより, 提案手法は種々の条件下の実験結果を適切に再現することが可能であるか。
 - b) 一定の手順により同定した材料定数値は, それぞれに仮定した物理的意味に照らし合わせて妥当であるか。

現象のメカニズムに立脚し, 高い精度と広い適用範囲を実現する予測手法であるためには, 項目 a), b) の双方において適切であることが確認されなければならない。

ところで, これまで述べたように提案モデルは, コンクリートの組織構造モデル, および組織中におけるいくつかの微視的現象のモデルの組み合わせにより構成されている。最も直接的, かつ確実な検証の方法は, 個々の構成モデルを個別に実験により検証することであるが, 実験技術の点で現実的にはきわめて困難である。本研究では, 微視的現象の所産として観察される供試体の乾燥収縮挙動(乾燥時間と水分逸散量と収縮ひずみの関係)と, 仮定の組み合わせにより得られる計算結果とを比較することにより検証する方法をとった。本方法によっても, 種々の実験条件を適切に変化させることにより, 全体挙動に対する各微視的現象の感度が異なり, 個々の構成モデルの間接的な検証になると考えられるのである[6.2]。

任意の環境下におかれたコンクリート建造物の乾燥収縮挙動を予測する実用的な手法であるためには, 簡単な材料試験, あるいは使用材料, 配合, 養生条件を入力変数とした推定式から, 予測に必要な材料定数値を論理的に特定し得ることが必要である。本章では, 上述の方法により提案モデルの妥当性と適用範囲の検証を行った後, モデルを用いた建造物の乾燥収縮予測フローの一例を提案する。

6. 2 実験方法

6. 2. 1 供試体および実験の手順

検証実験は、使用材料、配合、養生、乾燥環境、供試体寸法の諸条件を変化させた34ケースについて行った。実験に用いた供試体は2種類であり、それらは図6.1に示す大きさ $4 \times 4 \times 16$ [cm]および $10 \times 10 \times 40$ [cm]の角柱供試体である。長さ変化測定用のコンタクトチップは、エポキシ系接着剤を用いて相対する側面2面に接着した。標点間の距離は、大きさ $4 \times 4 \times 16$ [cm]の供試体では10 [cm]、大きさ $10 \times 10 \times 40$ [cm]の供試体では30 [cm]とした。

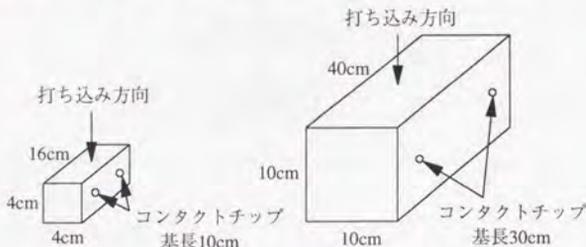


図 6.1 供試体の形状および寸法

供試体の作製から、養生、測定に至る実験の手順の概略を、図6.2に示す。所定の配合のコンクリートあるいはモルタルを練り混ぜ、練り上がり直後に単位体積重量を測定する。型枠に打設したら、ポリエチレンシートを用い、乾燥、吸湿を防ぐ。材令1ないし2日で型枠をはずし、供試体の重量を測定する。このときの測定重量と、練り上がり時に測定した単位体積重量とから、供試体の体積を求めておく。ふたたび、ポリエチレンシートで供試体を包み、乾燥開始時まで乾燥、吸湿しない状態に保つ。乾燥を開始する材令に達したら、供試体にコンタクトチップを接着し、所定の乾燥条件のもとで乾燥を開始する。以降適切な時間ごとに供試体の重量と長さ変化を測定する。重量測定には精度 0.1 [g]以上の電子てんびんを用い、長さ変化の測定には精度 $1/1000$ [mm]のコンタクトゲージを用いた。乾燥開始時の供試体長さを基準とし、長さ変化の測定値をひずみ（長さ変化率）に変換し、これを2側面について平均した値を供試体の平均ひずみとする。

乾燥条件は、真空乾燥と相対湿度約 60 [%]のもとでの乾燥の2種類とした。真空乾燥は、排気速度約 50 [l/min]の真空ポンプを接続した、容量約 20 [l]のガラス製デシケータを用いて行った[6.3][6.4]。相対湿度 60 [%]のもとでの乾燥は、空調設備のある室内または、恒温恒湿槽を用いた。なお、供試体の作製、養生、乾燥はすべて、温度約 20 [°C]のもとで行った。

乾燥収縮試験を終了した供試体は、原則として 110 [°C]の乾燥炉において2日以上乾燥させ、乾燥後の重量を測定した。

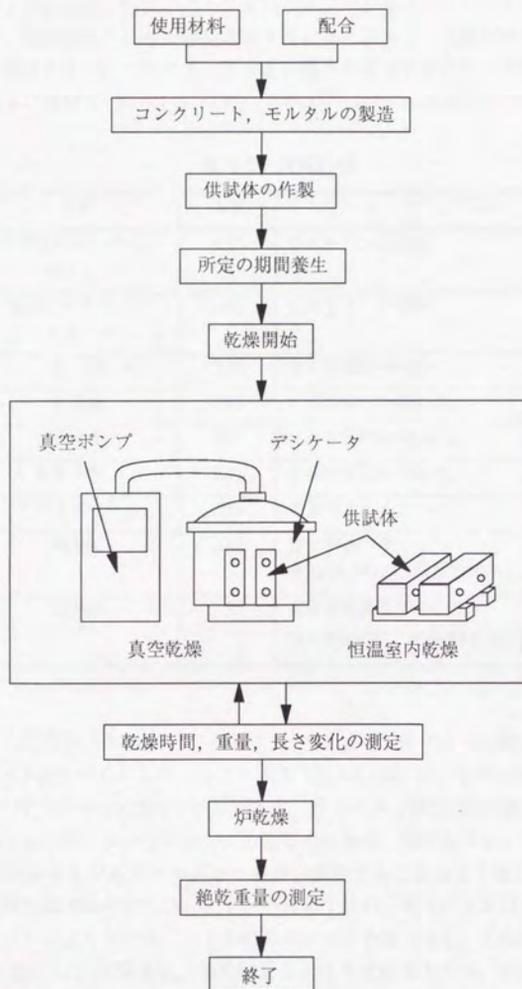


図 6.2 実験の手順

6. 2. 2 使用材料および配合

使用材料および配合は、提案手法のハイパフォーマンスコンクリートへの適用を念頭に置き選定した。使用材料として、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、石灰粉、高炉スラグ、フライアッシュなど種々の粉体を用いたことが特徴である。使用した粉体および骨材を表 6.1 に示す。なお、混和剤は配合表において示す。

表 6.1 使用材料

記号	名称	比重	物性ほか
MC	中庸熱ポルトランドセメント	3.17	日本セメント社製
C	普通ポルトランドセメント	3.15	住友セメント社製
L18	石灰粉	2.68	比表面積約18000[cm ² /g]
L7	石灰粉	2.67	比表面積約7000[cm ² /g]
L4	石灰粉	2.67	比表面積約4000[cm ² /g]
S6	高炉スラグ	2.91	比表面積約6000[cm ² /g]
FA	フライアッシュ	2.19	電発フライアッシュ
S	細骨材	2.62	富士川産川砂、 吸水率1.54[%]、実積率70[%]、FM3.01
G	粗骨材	2.71	青梅産硬質砂岩砕石2005、 吸水率0.6[%]、実積率61[%]、FM6.85

実験に使用したモルタルおよびコンクリートの配合を表 6.2 (a),(b),(c) に示す。配合は、大別すると3シリーズとなる。シリーズ 1 (表 6.2 (a)) は、粉体部分の配合を変化させた4種のハイパフォーマンスコンクリートと、水セメント比55[%]の普通コンクリートである。ハイパフォーマンスコンクリートの粉体の配合は、中庸熱ポルトランドセメントをベースに、石灰粉および高炉スラグを一定割合置換することにより変化させている。シリーズ 1 では練り混ぜはすべてコンクリートにより行い、モルタルを用いる場合はウェットスクリーニングによりコンクリート中のモルタル分を取り出し、これを用いた。シリーズ 2 (表 6.2 (b)) は、水粉体比、細骨材量を変化させたモルタル、シリーズ 3 (表 6.2 (c)) は、粗骨材量を変化させたモルタルおよびコンクリートである。

これら3シリーズ16種類の配合は、水粉体体積比は80~173[%] (重量比では25~55[%]) の範囲を、細骨材、粗骨材を合わせた骨材の体積割合は21~62[%]の範囲を網羅することになる。

表 6.2 実験に使用したモルタルおよびコンクリートの配合
(a) シリリーズ 1

配合名	V_w/V_p [%]	S/S_{lim} [%]	G/G_{lim} [%]	単位量 [kg/m ³]												作製供試体
				W	C	MC	L18	L7	L4	S6	S	G	Ad.1	Ad.2		
MS100コンクリート	100	65	50	172	—	513	28	—	—	—	—	828	827	1.5	0.006	MSC
MS100 mortar	100	65	0	247	—	738	40	—	—	—	—	1191	—	1.5	0.006	MS16, MS2, MS16, MSM
MS60L740コンクリート	100	65	50	172	—	308	17	184	—	—	—	828	827	1.5	0.003	L7C
MS60L740 mortar	100	65	0	247	—	443	24	265	—	—	—	1191	—	1.5	0.003	L72, L77, L7M
MS40L460コンクリート	100	65	50	172	—	205	11	—	276	—	—	828	827	1.5	0.002	L4C
MS40L460 mortar	100	65	0	247	—	295	16	—	397	—	—	1191	—	1.5	0.002	L42, L47, L4M
MS60S640コンクリート	100	65	50	172	—	308	17	—	—	200	828	827	1.5	0.003	—	
MS60S640 mortar	100	65	0	247	—	443	24	—	—	288	1191	—	1.5	0.003	S62, S67	
OPCコンクリート	173	73	56	165	300	—	—	—	—	—	927	924	0.25	0.0033	—	
OPC mortar	173	73	0	250	455	—	—	—	—	—	1407	—	0.25	0.0033	OP2, OP7	

備考)

1. 本シリリーズのモルタルはコンクリートをウェットキャストリングすることにより製造した。
2. 粗骨材最大寸法25[mm]。
3. 水和剤Ad.1はポゾリスSP8HS (ただしOPCではポゾリスNo.70) , Ad.2は変性アルキルカルボン酸系空気量調整剤 (ただしOPCではアルキルアリルスルホン系) , Ad.1, Ad.2の表中の数値の単位は、粉体の重量パーセント。
4. V_w/V_p は水粉体体積比を, S/S_{lim} は相対細骨材比を, G/G_{lim} は相対粗骨材比を, それぞれ示す。

(b) シリーズ 2

配合名	V_w/V_p [%]	S/S_{lim} [%]	G/G_{lim} [%]	単位量 [kg/m ³]				作製供試体
				W	MC	S	Ad.	
$S/S_{lim}=50, V_w/V_p=100$	100	50	0	325	1030	917	1.0	SP10, SP10S, SP10L
$S/S_{lim}=50, V_w/V_p=90$	90	50	0	308	1084	917	1.0	SP9
$S/S_{lim}=50, V_w/V_p=80$	80	50	0	289	1144	917	1.0	SP8
$S/S_{lim}=70, V_w/V_p=100$	100	70	0	255	808	1284	1.0	SP10
$S/S_{lim}=30, V_w/V_p=100$	100	30	0	395	1252	550	1.0	SP10

備考)

1. 混和剤Ad.はポソリスSP8HS, Ad.の表中の数値の単位は、粉体の重量パーセント。
2. V_w/V_p は水粉体積比を、 S/S_{lim} は相対細骨材比を、 G/G_{lim} は相対粗骨材比を、それぞれ示す。

(c) シリーズ 3

配合名	V_w/V_p [%]	S/S_{lim} [%]	G/G_{lim} [%]	単位量 [kg/m ³]							作製供試体
				W	C	S6	FA	S	G	Ad.	
$G/G_{lim}=0$	85	68	0	234	261	241	242	1231	0	1.0	G02, G07, G015, G015N
$G/G_{lim}=25$	85	68	25	198	220	203	204	1045	407	1.0	G252, G257, G2515
$G/G_{lim}=50$	85	68	50	161	180	166	166	862	813	1.0	G502, G507, G5015

備考)

1. 粗骨材最大寸法15[mm].
2. 混和剤Ad.は、ポソリスSP9HS, Ad.の表中の数値の単位は、粉体の重量パーセント。
3. V_w/V_p は水粉体積比を、 S/S_{lim} は相対細骨材比を、 G/G_{lim} は相対粗骨材比を、それぞれ示す。

6. 2. 3 各供試体の実験条件

各供試体の実験条件を表 6.3 に示す。養生条件は、すべてのケースについて打ち込み直後より乾燥開始時まで、供試体に水分の出入りがない状態に保ち、乾燥開始材令を変化させることにより制御した。乾燥開始材令は、材令16時間から34日の範囲で変化させた。

表 6.3 各供試体の実験条件

供試体名	配合名	供試体寸法[cm]	乾燥開始材令	乾燥条件
MS16	MS100モルタル	4×4×16	16時間	真空乾燥
MS2	MS100モルタル	4×4×16	2日	真空乾燥
MS7	MS100モルタル	4×4×16	7日	真空乾燥
MSM	MS100モルタル	4×4×16	7日	60[%RH] (恒温室)
MSC	MS100コンクリート	10×10×40	7日	60[%RH] (恒温室)
L72	MS60L740モルタル	4×4×16	2日	真空乾燥
L77	MS60L740モルタル	4×4×16	7日	真空乾燥
L7M	MS60L740モルタル	4×4×16	7日	60[%RH] (恒温室)
L7C	MS60L740コンクリート	10×10×40	7日	60[%RH] (恒温室)
L42	MS40L460モルタル	4×4×16	2日	真空乾燥
L47	MS40L460モルタル	4×4×16	7日	真空乾燥
L4M	MS40L460モルタル	4×4×16	7日	60[%RH] (恒温室)
L4C	MS60L460コンクリート	10×10×40	7日	60[%RH] (恒温室)
S62	MS60S640モルタル	4×4×16	2日	真空乾燥
S67	MS60S640モルタル	4×4×16	7日	真空乾燥
OP2	OPCモルタル	4×4×16	2日	真空乾燥
OP7	OPCモルタル	4×4×16	7日	真空乾燥
S5P10	S/S _{lim} 50, V _w /V _p 100	4×4×16	2日	真空乾燥
S5P9	S/S _{lim} 50, V _w /V _p 90	4×4×16	2日	真空乾燥
S5P8	S/S _{lim} 50, V _w /V _p 80	4×4×16	2日	真空乾燥
S7P10	S/S _{lim} 70, V _w /V _p 100	4×4×16	2日	真空乾燥
S3P10	S/S _{lim} 30, V _w /V _p 100	4×4×16	2日	真空乾燥
S5P10S	S/S _{lim} 50, V _w /V _p 100	4×4×16	34日	60[%RH] (恒温恒湿槽)
S5P10L	S/S _{lim} 50, V _w /V _p 100	10×10×40	34日	60[%RH] (恒温恒湿槽)
G02	G/G _{lim} 0	4×4×16	2日	真空乾燥
G07	G/G _{lim} 0	4×4×16	7日	真空乾燥
G015	G/G _{lim} 0	4×4×16	15日	真空乾燥
G015N	G/G _{lim} 0	4×4×16	15日	60[%RH] (恒温恒湿槽)
G252	G/G _{lim} 25	4×4×16	2日	真空乾燥
G257	G/G _{lim} 25	4×4×16	7日	真空乾燥
G2515	G/G _{lim} 25	4×4×16	15日	真空乾燥
G502	G/G _{lim} 50	4×4×16	2日	真空乾燥
G507	G/G _{lim} 50	4×4×16	7日	真空乾燥
G5015	G/G _{lim} 50	4×4×16	15日	真空乾燥

6. 3 解析方法

6. 3. 1 数値計算の方法

提案モデルを用いて角柱供試体の乾燥収縮挙動の数値シミュレーションを行う具体的な方法について示す。本論文における種々のケースについての計算は、すべて本方法によるものである。なお、ここで述べる計算方法を実行する数値計算プログラムのリストを付録として添付してあるので参照されたい。

供試体内部の水分の移動は、図 6.3 に示すように、供試体の形状を考慮し、長手方向 (z 方向) の移動を無視し、長手方向と直角な平面 (xy 平面) 内において2次元解析を行う。対称性を考慮し、断面の4分の1を解析対象に選ぶ。水分の移動の数値計算手法として有限差分法 (コントロールボリューム法) を用いる。空間の要素分割は、 x 方向 y 方向とも等分割とする。要素の1辺の大きさは、精度と計算速度を考慮し、大きさ $4 \times 4 \times 16$ [cm] の供試体では 4 [mm]、大きさ $10 \times 10 \times 40$ [cm] の供試体では 10 [mm] とする。時間きざみは不等分割とし、乾燥初期など水分の移動が顕著な場合には1時間程度、水分の移動が顕著でない場合は数日程度とする。時間に関する計算方法は陰解法を採用したため、求解における安定性を損なわずに、時間きざみを比較的自由に設定することが可能である [6.5]。

境界条件は、大気に接する境界では、モデルにより計算される雰囲気水の相対湿度に平衡する液状水量 w_{LB} [kg/m³] により与え、境界層の厚さは、 $h=0.75$ [mm] とする [6.6][6.7]。供試体中の対称面における分割により生じた境界は、水分の出入りが無い境界とする。境界層の厚さは、その物理的意味より雰囲気水の対流の状況により変化すべき量であると考えられるが、実験結果より直接、値を特定することが困難であるため、本研究ではすべてのケースについて一定値 $h=0.75$ [mm] と仮定することにした。

水分の移動を計算した結果、各要素の液状水量、つまり断面内の水分の分布を各時間ステップごとに得ることになる。実験において得られる水分の逸散に関する情報は、重量測定による供試体全体の水分逸散量、あるいは供試体体積が既知であるので単位体積あたりの水分逸散量である。実験結果と計算結果の比較は、次式により評価される供試体単位体積あたりの水分逸散量により行うことができる。

$$\Delta W_{(t)} = \frac{1}{V} \int_V (w_{L(x,y,t)} - w_{L(x,y,0)}) dV \quad (6.1)$$

ここに、 $\Delta W_{(t)}$; 時刻 t における供試体の単位体積あたりの水分逸散量 [kg/m³]
 V ; 供試体の体積 [m³]
 $w_{L(x,y,0)}$; 初期液状水量 [kg/m³]
 $w_{L(x,y,t)}$; 時刻 t における単位体積中の液状水量 [kg/m³]

である。

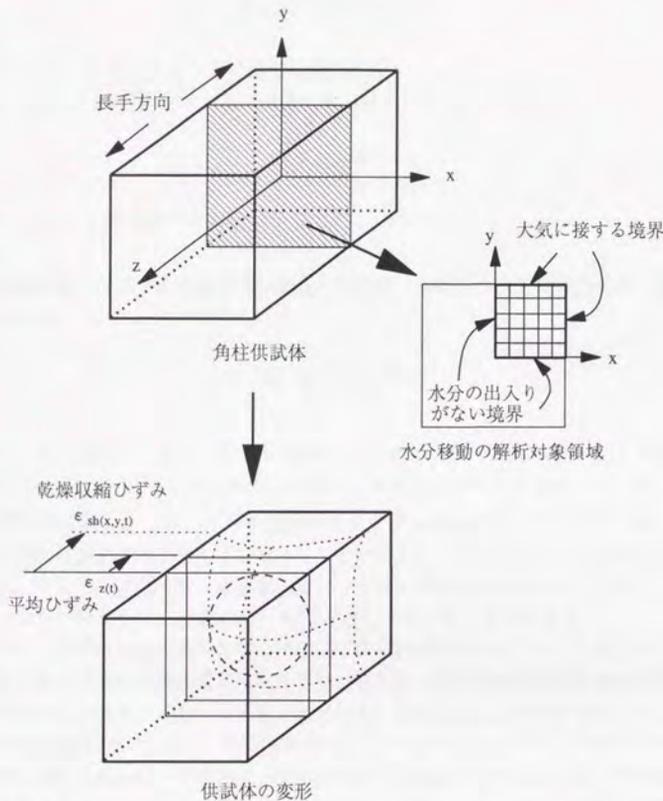


図 6.3 角柱供試体の挙動の計算方法

供試体の変形に関しては、本論文では角柱供試体の場合応力解析を行わず、以下に示す簡易的な方法により長手方向（z方向）の平均ひずみを評価する。いま角柱供試体の長手方向（z方向）の変形に関して、3次元的效果が無視でき、z方向の変形のみを考えればよいものとする。断面内の水分の不均一な分布のために各部分が拘束し合った結果、実際に現れるz方向のひずみは、断面内で一様に平均ひずみ $\epsilon_{z(t)}$ に等しいとすると、断面内の各部分(x,y)が受けているz方向の拘束応力 $\sigma_{z(x,y,t)}$ [Pa] は、各部分の乾燥収縮 $\epsilon_{sh(x,y,t)}$ を初期ひずみとして次のように表される。

$$\sigma_{z(x,y)} = E_c (\epsilon_{z(f)} - \epsilon_{sh(x,y)}) \quad (6.2)$$

ここに、 E_c ; コンクリートの弾性係数[Pa]
である。拘束は、内部拘束であるので応力が0でなければならない。

$$\int_A \sigma_{z(x,y)} dA = 0 \quad (6.3)$$

ここに、 A ; 供試体の断面積[m²]

である。

式(6.2),(6.3)より、以下の関係が導かれる。これは、コンクリートの弾性係数の値に関わらず成り立つ。

$$\epsilon_{z(f)} = \frac{1}{A} \int_A \epsilon_{sh(x,y)} dA \quad (6.4)$$

式(6.4)は、ここで述べた仮定に基づいた場合、各部分の非拘束乾燥収縮 $\epsilon_{sh(x,y)}$ を xy 断面内で平均することにより、 z 方向の平均ひずみ $\epsilon_{z(f)}$ が評価されることを示している。各部分の非拘束乾燥収縮 $\epsilon_{sh(x,y)}$ は、水分移動解析の結果得られる各部分の液状水量 $w_{L(x,y)}$ を、体積変化特性に適用することにより求めることができる。以上により、角柱供試体の乾燥収縮挙動、すなわち乾燥時間と重量変化量とひずみの関係を計算結果として得ることができる。これらの計算値は、実験における測定値と比較することができる。

ところで、角柱供試体の長手方向の平均ひずみの評価方法としては、上で述べた方法の他に、供試体の平均の逸散水量と平均ひずみの関係を、非拘束微小体積要素の逸散水量と乾燥収縮ひずみの関係と等しいと仮定する方法も、著者らおよび他の研究者らにより提案されている[6.4][6.8][6.9][6.10]。角柱供試体のように1方向の寸法が他の方向の寸法に比べて卓越する形状であれば、長手方向の乾燥収縮は、式(6.4)により求めても、供試体の平均の逸散水量より求めても、評価される結果は大きくは変わらない[6.8]。また、供試体の断面寸法をある範囲において変化させ、乾燥収縮試験を行った場合、供試体の平均逸散水量と平均ひずみの関係は、寸法によらずほぼ一定となる場合も実際にある[6.4]。

仮に、真の非拘束微小体積要素の逸散水量と乾燥収縮ひずみの関係が完全な線形であり、かつコンクリートが線形弾性体であるとした場合、供試体寸法および供試体内部の水分の分布形状によらず両者は一致することとなる。しかし実際には、これらの仮定は正しくなく、したがって平均の逸散水量と平均ひずみの関係がいかなる条件下においても一意的に定まるという保証はないのである。本研究では、平均の逸散水量と平均のひずみの関係が供試体寸法によらずほぼ一定となるのは、ある条件の範囲内における経験的事実に過ぎないと解釈し、それゆえ非拘束微小体積要素の逸散水量と乾燥収縮ひずみの関係を、供試体の平均挙動に直接適用しない立場をとった。

6.3.2 諸材料定数の同定の方法

提案モデルを用いて、供試体の乾燥収縮挙動の数値シミュレーションを行う際に必要な材料定数は以下の6定数である。

- V_0 ; コンクリート単位体積中における総細孔容積[m³/m³]
- B ; 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ
- C ; 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ
- K_V ; 水蒸気移動に関する特性を表す材料係数
- K_L ; 液状水移動に関する特性を表す材料係数
- E_S ; 毛管力に起因する応力に対する弾性係数[Pa]

定式化の段階で明かなように、それぞれの定数は明確な物理的意味を有している。また手法の特徴として、ひとつの微視的機構モデルが、供試体の乾燥収縮挙動の複数の側面に関与している場合がある。したがって、供試体の挙動から逆解析により諸定数の値を決定する際には、一定の手順にしたがい論理的に各定数の値を定める必要がある[6.1]。

本研究において行う計算では、すべての材料定数について、乾燥期間中の値の変化はないものとの仮定を置く。実際には、セメントの水和の進行、あるいは水分の逸散にともない、組織構造は変化すると考えられるが、簡単のためここでは本仮定を設けた。乾燥開始材令が早いケースなど乾燥期間中の組織の変化が著しい場合は、乾燥期間中の平均的な特性が導出されることになる。諸定数の同定は以下の手順により行った(図6.4)。

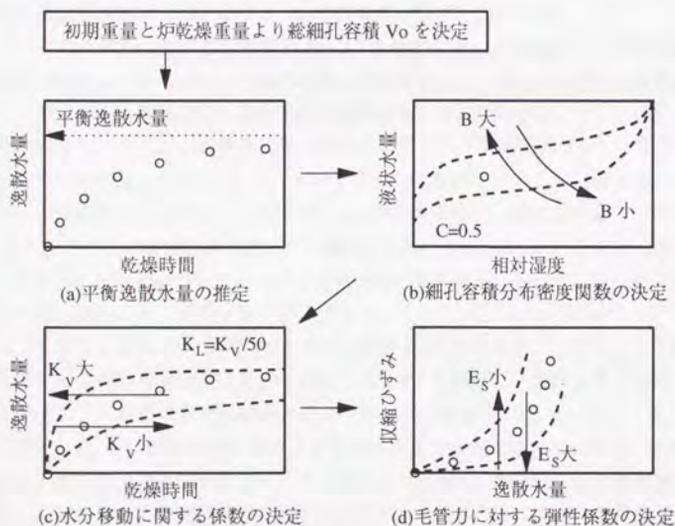


図 6.4 材料定数の同定の手順

まず、実験において実測した供試体の体積と、初期重量および炉乾燥後の重量とから単位体積中における総細孔容積 V_0 を決定する。炉乾燥を行っていない場合は、類似の条件の実験結果より推定する。

次に、細孔容積分布密度関数の形状に関するパラメータ B, C を決定する。細孔容積分布密度関数は、水分平衡特性、水分移動特性、体積変化特性のすべてに関与する。種々の決定の方法が考えられるが、ここでは、水分平衡特性より決定することとした。図 6.4 (a) に示すように、乾燥時間と逸散水量の測定結果から、与環境下における供試体の平衡逸散水量を読みとる。平衡に達するまで実験を行っていない場合は、外挿により推定する。平衡逸散水量から平衡液状水量を求める。これで、供試体のひとつの水分平衡点（相対湿度とこれに平衡する液状水量）が実験結果より定まったことになる。逸散水量から液状水量を求める際に、初期液状水量が必要となる。本研究において行った実験では、供試体は乾燥開始時まで乾燥、吸湿が生じない状態に保ったため、乾燥開始時を飽水状態（細孔のすべてが液状水により満たされた状態）と仮定した。また、真空乾燥の場合の境界条件は近似的に、相対湿度 1[%] として与えた。

水分平衡特性よりパラメータ B, C を決定するためには、水分平衡点が 2 点必要である。ひとつの平衡点を満足する B, C の組み合わせは無数にあるからである。そこで、細孔容積分布密度関数の形状の自由度をひとつ減らすことになるが $C=0.5$ と固定することにした。細孔容積の分布のなだらかさが固定され、パラメータ B を変化させることにより、分布のピークの位置のみが変化することとなる。以上により、図 6.4 (b) に示すように、得られた平衡点を満足するパラメータ B の値を定めることができる。

続いて、水分の移動に関する材料係数 K_v, K_L を決定する。この段階までに細孔容積分布密度関数が決定しているので、これらの係数を仮定すれば、供試体の水分逸散挙動を計算することができる。乾燥時間と逸散水量の実験結果と計算結果が近づくように、これらの係数を決定した。ただし、水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v と、液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L とは、それらの持つ物理的意味からも相関が高いことが予想される。簡便性をも考慮し、ここでは、2 つの係数を独立に変化させるのではなく、 $K_L=K_v/50$ とし、これらの係数を決定した（図 6.4 (c)）。 $K_L=K_v/50$ としたのは、検討の結果、この組み合わせが本研究において行ったすべての実験結果において、水分の逸散挙動を良好に追従し得ることが確認されたからである。

最後に、毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s を決定する。これまでに決定した諸定数を用いて供試体の水分逸散挙動を計算する。 E_s を仮定し、逸散水量と収縮ひずみの関係を計算し、計算結果が実験結果と近づくように決定する（図 6.4 (d)）。ここで留意したいのは、 E_s は、乾燥時間と収縮ひずみの関係より決定するのではなく、逸散水量と収縮ひずみの関係より決定するということである。水分の逸散挙動、水分の逸散にともなう収縮、これら双方の予測における誤差が相殺することにより、ひずみの予測値が実験値に近づくことを避けるためである。

なお、毛管力に起因する応力と乾燥収縮ひずみの関係に、乾燥速度の影響を考慮する場合、 E_s のかわりに、以下の3定数が必要となる[6.11][6.12].

- E_0 ; 基準となる接線剛性を表すパラメータ
- α ; 接線剛性に対する応力の大きさの影響を表すパラメータ
- β ; 接線剛性に対する応力増加速度の影響を表すパラメータ

これらの3定数の値を決定するためには、原理的には乾燥速度の異なる複数のデータが必要であるが、ここでは、 $\alpha=0.5$, $\beta=0.3$ と固定し、 E_0 を決定する方法をとった[6.12].

以上の手順により、実験結果である乾燥時間と供試体の逸散水量と収縮ひずみの関係から、モデル内の諸材料定数の値をすべて定めることができる。

本研究において、計算に用いた諸物理定数の値を、表 6.4 に示す。

表 6.4 計算に用いた物理定数の値

水の分子量 M_w [kg/mol]	0.01802
気体定数 R [J/mol·K]	8.31453
20[°C]における液状水の密度 ρ_L [kg/m ³]	1000
20[°C]における飽和水蒸気圧 p_{v0} [Pa]	2338
20[°C]における液状水の表面張力 γ [N/m]	0.0727
20[°C], 1[atm]における水蒸気と乾燥空気相互拡散係数 D_{v0} [m ² /s]	0.000022
20[°C]における液状水の粘性係数 μ [Pa·s]	0.00098

なお水蒸気と乾燥空気の相互拡散係数 D_{v0} [m²/s] は、圧力に依存する量であるが[6.13], 本研究では真空乾燥, 60[%RH] のもとでの乾燥, いずれの条件下においても表 6.4 の値を用いることにした。このことは、表面の境界層の厚さ h [m] を、真空乾燥, 60[%RH] のもとでの乾燥の双方において同一の値を仮定したこと、および真空乾燥の境界条件を相対湿度 i [%]として与えたことに関連している。真空乾燥試験における水分逸散現象では、実際には、急激な減圧によるコンクリート内部の気相全圧の勾配の形成、これに起因した対流による気相全体の移動、液状水の急激な蒸発、および蒸発熱による温度勾配が生じていると考えられ、厳密に取り扱うことは困難である。そこで本研究では、数値計算の上では、真空乾燥試験の環境条件を、近似的に、平衡逸散水量が等価な低湿度環境とみなすことにしたのである。

6. 4 実験結果と解析結果

6. 4. 1 種々の条件に対する手法の適用性

前節に述べた方法に基づき、各供試体の実験結果に対してモデル内の諸材料定数の同定操作を行った結果、すべてのケースについて各定数値を定めることができた。各供試体について得られた材料定数値を表 6.5 にまとめる。8供試体については、毛管力に起因する応力と乾燥収縮ひずみの関係として、乾燥速度の影響を考慮した構成式を用いた解析も行ったので、その場合の材料定数値についても記してある。

実験および解析結果をもとに、以下の2つの角度から手法の検証を行う。

- a) 材料定数を適当に定めることにより、種々の条件下の供試体の実験結果を適切に再現することが可能であるか。
- b) 一定の手順により同定した材料定数値は、それぞれに仮定した物理的意味に照らし合わせて妥当であるか。

本小節では、同定された諸材料定数値を提案モデルに入力し、各供試体の乾燥収縮挙動を計算し、種々の条件下において実験結果と計算結果との比較を行う。用いる諸材料定数値は、計算結果が実験結果に近づくように定めた組み合わせに他ならない。しかし、それらの値を用いて計算した結果が実験結果を良好に再現することは、精度のよい予測が可能であるための必要条件であることに変わりはない。

手法が種々の条件下における実験結果を良好に再現し得ることが確認されたならば、それが単に数値計算上の操作によるのではなく、適切な仮定に基づいた結果であることを確認する。この点に関しては、本小節において、各実験条件の変化と同定された諸材料定数の変化の関係として検討するほか、次小節において、すべてのケースの同定結果を用いて総合的に検討する。

各供試体の実験結果、および表 6.5 に示した材料定数値を用いて乾燥収縮挙動を計算した結果の詳細については、巻末に付録としてまとめて掲載する。ここでは、それらの中から以下の実験条件を変化させた代表的な6シリーズを選び、手法の適用性についての検討を行う。

- 解析例 1 : 配合条件 (水セメント比)
- 解析例 2 : 配合条件 (細骨材量)
- 解析例 3 : 配合条件 (粗骨材量)
- 解析例 4 : 養生条件 (乾燥開始材令)
- 解析例 5 : 供試体寸法
- 解析例 6 : 環境条件 (相対湿度)

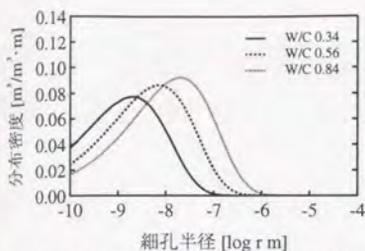
以上の条件は、いずれもコンクリート構造物の乾燥収縮において影響の大きい要因であり、実用的な予測手法であるためには、これらの条件を合理的に考慮し得るものでなければならぬ。

表 6.5 同定した材料定数値

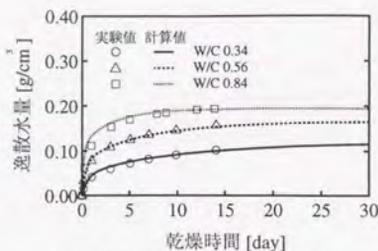
供試体名	総細孔容積 $V_0[\text{m}^3/\text{m}^3]$	ハ [*] ラメータ B	ハ [*] ラメータ C	水蒸気移 動係数 K_v	液状水移 動係数 K_L	弾性係数 $E_S[\text{MPa}]$	ハ [*] ラメータ E_0, α, β
MS16	0.228	8600	0.5	0.50	0.010	14000	————
MS2	0.204	12000	0.5	0.15	0.0030	14000	————
MS7	0.182	22200	0.5	0.10	0.0020	17000	2.5, 0.5, 0.3
MSM	0.182*	22200	0.5	0.030	0.00060	7000	2.5, 0.5, 0.3
MSC	0.127*	22200	0.5	0.040	0.00080	7000	————
L72	0.225	7600	0.5	0.25	0.0050	14000	————
L77	0.204	11800	0.5	0.12	0.0024	16000	3.0, 0.5, 0.3
L7M	0.204*	11800	0.5	0.050	0.0010	7000	3.0, 0.5, 0.3
L7C	0.141*	11800	0.5	0.050	0.0010	7000	————
L42	0.232	5000	0.5	0.30	0.0060	10000	————
L47	0.218	7100	0.5	0.20	0.0040	12000	2.5, 0.5, 0.3
L4M	0.218*	7100	0.5	0.050	0.0010	5000	2.5, 0.5, 0.3
L4C	0.151*	7100	0.5	0.050	0.0010	5000	————
S62	0.215	15400	0.5	0.18	0.0036	15000	————
S67	0.191	27700	0.5	0.080	0.0016	20000	————
OP2	0.209	9800	0.5	0.18	0.0036	13000	————
OP7	0.182	17000	0.5	0.12	0.0024	14000	————
SSP10	0.253*	15400	0.5	0.12	0.0024	14000	————
SSP9	0.232*	18500	0.5	0.11	0.0022	15000	————
SSP8	0.209*	19500	0.5	0.090	0.0018	15000	————
S7P10	0.198*	15400	0.5	0.12	0.0024	14000	————
S3P10	0.307*	15400	0.5	0.12	0.0024	14000	————
SSP10S	0.222*	28500	0.5	0.0075	0.00015	8000	————
SSP10L	0.222*	28500	0.5	0.0075	0.00015	8000	————
G02	0.192	9900	0.5	0.25	0.0050	12000	————
G07	0.162	19400	0.5	0.15	0.0030	15000	————
G015	0.145	24300	0.5	0.15	0.0030	20000	2.7, 0.5, 0.3
G015N	0.145*	24300	0.5	0.10	0.0020	8000	2.7, 0.5, 0.3
G252	0.166	9900	0.5	0.25	0.0050	12000	————
G257	0.142	19400	0.5	0.15	0.0030	15000	————
G2515	0.128	24300	0.5	0.15	0.0030	20000	————
G502	0.136	9900	0.5	0.25	0.0050	12000	————
G507	0.117	19400	0.5	0.15	0.0030	15000	————
G5015	0.106	24300	0.5	0.15	0.0030	20000	————

備考)

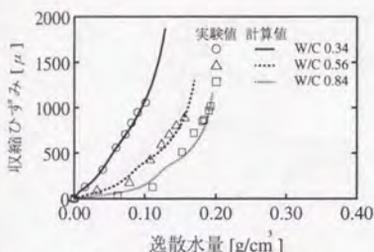
- * を付した総細孔容積は推定により求めた, 他は炉乾燥重量をもとに決定した.
- 細孔容積分布密度関数のパラメータ C は, すべての供試体について 0.5 とした.
- 水蒸気移動に関する係数 K_v と液状水移動に関する係数 K_L の間には, すべての供試体について $K_L = K_v/50$ なる関係を仮定した.



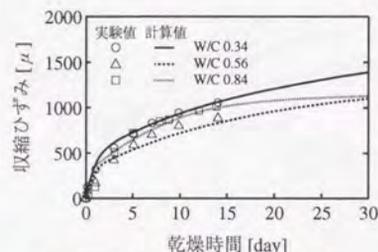
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係



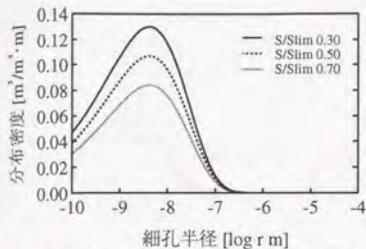
(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

(e) 計算に用いた材料定数値

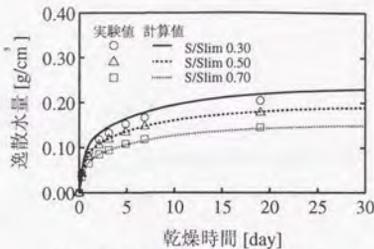
供試体名	水セメント 重量比	総細孔容積 $V_o[m^3/m^3]$	ハ'ラメータ B	ハ'ラメータ C	水蒸気移 動係数 K_v	液状水移 動係数 K_L	弾性係数 $E_s[MPa]$
MS7	0.34	0.182	22200	0.5	0.10	0.0020	17000
L77	0.56	0.204	11800	0.5	0.12	0.0024	16000
L47	0.84	0.218	7100	0.5	0.20	0.0040	12000

図 6.5 解析例 1 : 水セメント比の変化に対する適用性 (供試体 MS7, L77, L47)

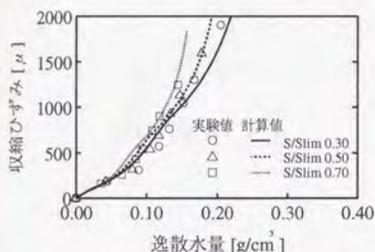
図 6.5 は、水セメント比が異なる場合についての実験結果、解析結果を示している。乾燥時間と逸散水量の関係 (図 (b))、逸散水量と収縮ひずみの関係 (図 (c))、およびそれらの所産として得られる乾燥時間と収縮ひずみの関係 (図 (d)) のすべてにおいて、計算結果は実験結果と良好に一致している。水セメント比の変化に応じて、同定される材料定数値はすべて変化するが、それらの変化の傾向はきわめて合理的である (図 (e))。すなわち、水セメント比が小さいほど緻密な細孔構造となり (図 (a))、組織内部の水分移動抵抗性が大きく、毛管力による変形に対する抵抗性も大きい結果となっている。



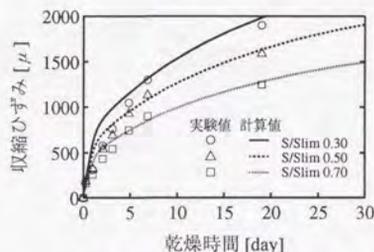
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係



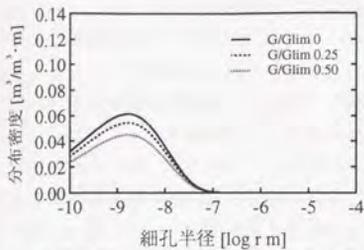
(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

(e) 計算に用いた材料定数値

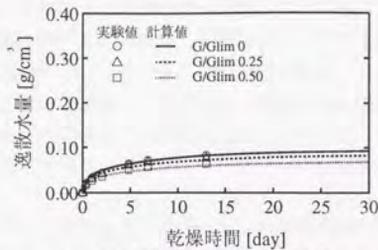
供試体名	相対細骨 材比S/S _{im}	総細孔容積 V _o [m³/m³]	パラメータ B	パラメータ C	水蒸気移 動係数K _v	液状水移 動係数K _l	弾性係数 E _s [MPa]
S3P10	0.30	0.307	15400	0.5	0.12	0.0024	14000
S5P10	0.50	0.253	15400	0.5	0.12	0.0024	14000
S7P10	0.70	0.198	15400	0.5	0.12	0.0024	14000

図 6.6 解析例 2 : 細骨材量の変化に対する適用性 (供試体 S3P10, S5P10, S7P10)

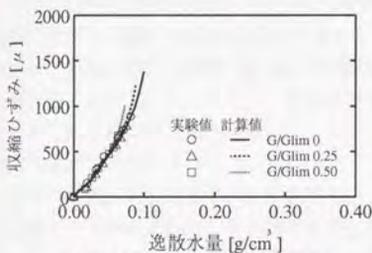
図 6.6 は、水セメント比が等しく細骨材量が異なるモルタルについての実験結果、および解析結果を示している。本ケースにおいても、モデルを用いた計算結果は実験結果と良好に一致している (図 (b),(c),(d))。水セメント比を一定とし、骨材量 (あるいは見方を換えればペースト量) を変化した場合の乾燥収縮挙動の違いは、本モデルでは主として単位体積中の総細孔容積を変化させることにより表現される (図 (a),(e))。セメントペースト部分の組成が同じであれば、水分移動抵抗性、毛管力に対する変形抵抗性が、骨材量によらず同一であるとしても、本ケースの場合、十分な予測精度が得られている。



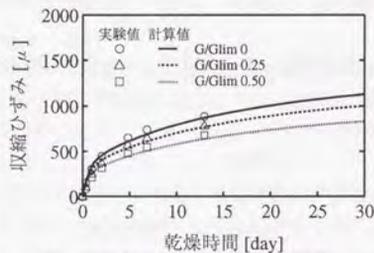
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係



(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

(e) 計算に用いた材料定数値

供試体名	相対粗骨材比G/G _{lim}	総細孔容積V _o [m ³ /m ³]	パラメータB	パラメータC	水蒸気移動係数K _v	液状水移動係数K _L	弾性係数E _s [MPa]
G015	0	0.145	24300	0.5	0.15	0.0030	20000
G2515	0.25	0.128	24300	0.5	0.15	0.0030	20000
G5015	0.50	0.106	24300	0.5	0.15	0.0030	20000

図 6.7 解析例 3 : 粗骨材量の変化に対する適用性 (供試体 G015, G2515, G5015)

図 6.7 は、モルタル部分の組成が同一で粗骨材量が異なるコンクリート (粗骨材量0はモルタル) の実験結果と解析結果を示している。計算結果は実験結果と良好に一致している。粗骨材量を変化させた本ケースにおいても、細骨材量を変化させたケースと同様に、単位体積中の総細孔容積を変化させることにより、骨材量の影響 (すなわちペースト量の影響) を考慮し得ることが示される (図 (a),(e))。

水セメント比が同一であれば、骨材量が変化しても細孔容積分布密度関数の形状が相似形を保つ (つまり総細孔容積 V_o のみ変化し、パラメータ B, C が変わらない) ことは、

硬化セメントペーストの組織構造の形成過程と骨材の相互作用が微小であることを意味している。第2章において述べたように、細孔容積分布密度関数として表現される主たる空隙は、セメントの水和反応により形成される硬化セメントペースト中の水隙である。セメントペーストの組織構造の形成過程に骨材が影響を及ぼさないとすれば、形成される硬化セメントペーストの組織構造は、水セメント比のみに依存することになる。それゆえ、コンクリート中では、細孔容積分布の形状は相似形を保ち、セメントペーストの体積割合に応じて総細孔容積が変化する結果となる。

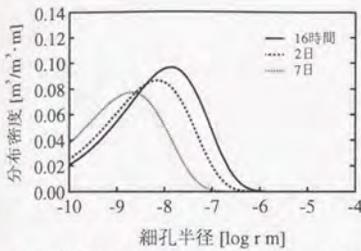
ただし、水セメント比が大きくなるにしたがい、硬化セメントペーストの組織構造の形成過程と骨材の相互作用が無視できなくなる可能性がある。水セメント比が大きい場合、骨材界面に形成される遷移帯空隙が顕著となり、この空隙がコンクリートの諸特性に大きな影響を及ぼす場合のあることが報告されている[6.14][6.15]。そのような場合、骨材量の影響は総細孔容積のみでは表現されない。

水分の移動に関する係数 K_v および K_L 、毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s を骨材量によらず一定としても、実験結果を十分な精度で再現し得ることは、直感的ではない。これらの定数値はセメントペーストと骨材を合わせたコンクリートの平均的な特性として定義されているからである。このことに関しては、次のように解釈する。

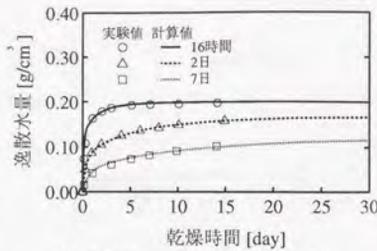
水分の移動に関する係数 K_v および K_L は、組織中における水分の移動経路の屈曲の程度を主として表している。骨材量が変化してもこれらの値が変化しないということは、セメントペースト中に骨材が存在することにより、経路が妨げられたり、新たな経路が形成されたりすることの影響が小さいことを示している。したがって、水セメント比が大きくブリージングの顕著な場合、骨材量が著しい多い場合、およびきわめて多孔質な骨材を用いた場合は、この限りではない可能性がある。

毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s は、セメントペーストの細孔壁に作用する毛管力の総和に対する、コンクリートの平均的な変形抵抗性を表している。ペーストの組成が同一のコンクリートとモルタルとでは、外力による変形から得られる材料の平均的な弾性係数は、大きくは変わらない値となることが一般に知られている。第3章において述べたように、外力によるコンクリートの変形と、細孔壁に作用する毛管力による変形とは同一の現象ではないが、性質の似た現象であると考えられることから、毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s が骨材量によらないことは不合理ではないと考えられる。またこのことは、実験結果において、逸散水量と収縮ひずみの関係が、骨材量によらず、ほぼひとつの曲線を描いていることから示唆される(図 6.6 (c), 図 6.7 (c))。ただし、これは使用する細骨材、粗骨材の種類を、良質な天然骨材に限った場合の議論である。

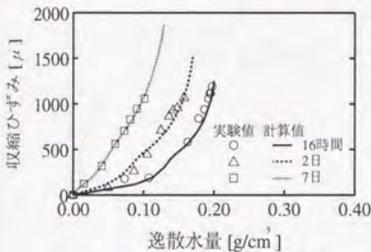
提案モデルでは、収縮を起こさせる毛管力の総和を、細孔中の液状水の圧力降下と単位体積中の液状水量に基づき評価している。液状水量は細孔容積分布密度関数により計算されるため、骨材量(ペースト量)の影響は、毛管力の総和を評価する際に考慮されていることになる。



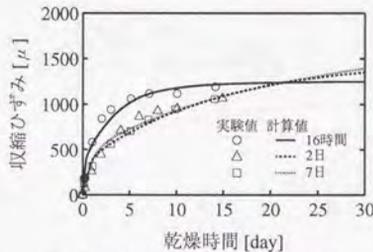
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係



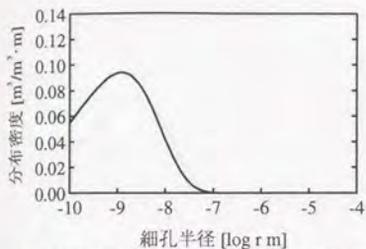
(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

(e) 計算に用いた材料定数値

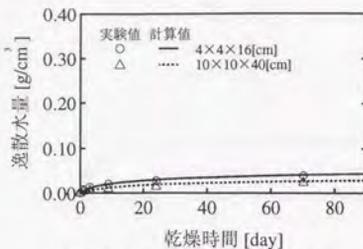
供試体名	乾燥開始 材令	総細孔容積 $V_o[m^3/m^3]$	パラメータ B	パラメータ C	水蒸気移 動係数 K_v	液状水移 動係数 K_l	弾性係数 $E_s[MPa]$
MS16	16時間	0.228	8600	0.5	0.50	0.010	14000
MS2	2日	0.204	12000	0.5	0.15	0.0030	14000
MS7	7日	0.182	22200	0.5	0.10	0.0020	17000

図 6.8 解析例 4 : 乾燥開始材令の変化に対する適用性 (供試体 MS16, MS2, MS7)

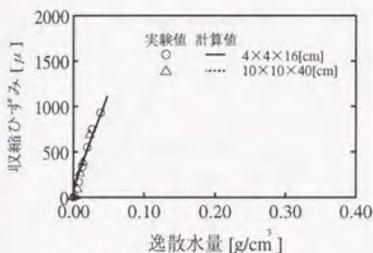
図 6.8 は、乾燥開始材令が異なるモルタルの実験結果と解析結果を示している。先述したように、ここでは材料定数の同定操作を容易にするため、いずれのケースについても乾燥期間中の材料特性は変化しないものと仮定した。そのような仮定に基づき同定した諸定数は、乾燥開始材令の早いケースほど組織構造が粗く、水分移動抵抗性が低く、毛管力に対する変形抵抗性が小さいという合理的な結果となっている (図 (a),(e))。この結果は、手法の妥当性を示すと同時に、乾燥期間中の組織構造の変化を考慮した乾燥収縮挙動の予測が、本手法を発展させた段階において可能であることを示唆するものである [6.16]。



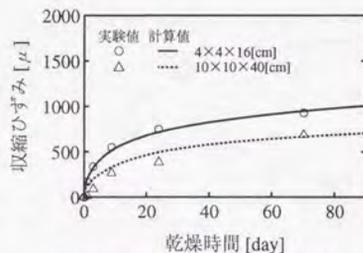
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係



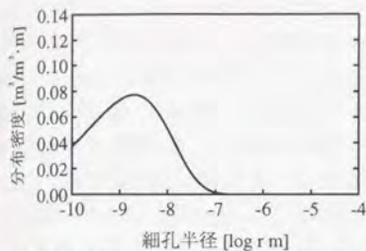
(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

(e) 計算に用いた材料定数値

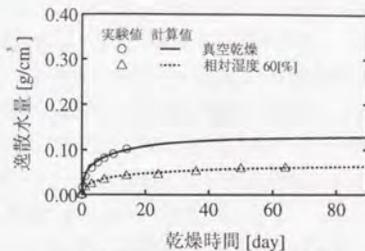
供試体名	供試体寸法 [cm]	総細孔容積 V_o [m³/m³]	ハラーメータ B	ハラーメータ C	水蒸気移動係数 K_v	液状水移動係数 K_L	弾性係数 E_s [MPa]
S5P10S	4×4×16	0.222	28500	0.5	0.0075	0.00015	8000
S5P10L	10×10×40	0.222	28500	0.5	0.0075	0.00015	8000

図 6.9 解析例 5 : 供試体寸法の変化に対する適用性 (供試体 S5P10S, S5P10L)

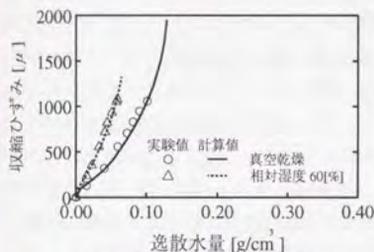
図 6.9 は、供試体寸法を変化させた場合の実験結果と解析結果である。諸材料定数は、双方の供試体について同じ値が同定された。これらの定数値を用いて計算した結果は、いずれの寸法の供試体についても実験結果と良好に一致している。提案手法では、対象構造体の形状と寸法に関する情報は、解析対象領域の節点座標として入力される。与えられた境界条件のもと、節点座標により認識された領域内において、水分移動解析と応力解析を行うことにより構造体の乾燥収縮挙動が予測されるのである。したがって、理論的には任意の形状と大きさの構造体に対して適用可能であり、ここでは2種類の寸法のケースについてのみであるが、その妥当性が検証されたことになる。



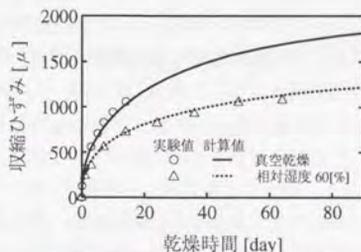
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係



(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

(e) 計算に用いた材料定数値

供試体名	環境条件	総細孔容積 V_0 [m³/m³]	パラメータ B	パラメータ C	水蒸気移動係数 K_v	液状水移動係数 K_L	パラメータ E_0, α, β
MS7	真空乾燥	0.182	22200	0.5	0.10	0.0020	2.5, 0.5, 0.3
MSM	60[%RH]	0.182	22200	0.5	0.030	0.00060	2.5, 0.5, 0.3

図 6.10 解析例 6 : 環境条件の変化に対する適用性 (供試体 MS7, MSM)

図 6.10 は、環境条件を変化させた場合についての実験結果と解析結果である。これらの供試体については、毛管力に起因する応力と乾燥収縮ひずみの関係を、線形弾性により与えた場合の解析と、乾燥速度の影響を考慮した構成式を用いた場合の解析の双方を行ったので、ここでは後者の解析結果について示す。

それぞれのケースについて計算結果が実験結果に一致するように定めた材料定数値のうち、水分の移動に関する材料係数 K_v と K_L が、真空乾燥と相対湿度 60[%] のもとでの乾燥とで異なっている (図 (e))。このことは、仮定した材料モデルが不適切であることを直ちに示すものではなく、以下に述べるように、解析を行う上で設けた仮定に起因して

いと解釈している。すなわち、1)セメントの水和にともなう乾燥期間中の組織構造変化がないものと仮定したこと、2)真空乾燥の環境条件を、平衡逸散水量がほぼ等価な、気相の全圧1[atm]、相対湿度1[%]として与えたこと、これらに起因する実現象との差異が、同定した材料係数に吸収されたと考えられる。特に、項目1)の考察が妥当であることは、乾燥開始材令が遅い場合(供試体 G015 と供試体 G015N)では、同定された水分の移動に関する材料係数 K_v および K_L が、真空乾燥のケース(G015)と相対湿度60[%]のもとでの乾燥のケース(G015N)とで近い値となっていることから示唆される。

図 6.10 (c) に示されるように、同一のモルタルを用い、同一の養生を行った供試体であっても、乾燥速度により逸散水量と収縮ひずみの関係は異なることが、実験結果に認められる。外力による変形と同様に、乾燥収縮においても、セメントペーストの変形が時間依存性成分を含むという仮説が、既往の研究[6.17][6.18]、および著者らの研究[6.11]において提唱されている。本仮説は、図 6.10 (c) に認められる実験結果の傾向を説明する有力な説であると考えられる[6.12]。この仮説に基づけば、毛管力に起因する応力と乾燥収縮ひずみの関係を時間に非依存の線形弾性とした構成式を用いて、本実験結果を統一的に表現することは原理的に不可能ということになる。実際、線形弾性モデルを用いて同定された弾性係数は、表 6.5 に示したように両ケースについて異なった値となっている。

毛管力に起因する応力と乾燥収縮ひずみの関係を、速度依存型の構成式により評価することにより、乾燥速度の異なる条件下での乾燥収縮挙動を統一的に表現することが可能となる。本論文において示した速度依存型の構成式[6.12]は、乾燥速度の異なる場合の逸散水量と収縮ひずみの関係の実験結果を適切に再現し得ることが確認される(図 6.10 (c))。

ただし、ここで用いた乾燥速度の影響を考慮した構成式は、本論文では、線形弾性モデルの適用限界を補うモデルとして位置づけるにとどめる。なぜなら、通常的环境湿度の変動の範囲では、乾燥速度の変化が本ケースに比べてはるかに小さく、単純な仮定に基づく線形弾性モデルを用いても十分な精度が得られると考えられるためである。

以上、諸条件を変化させた代表的な6シリーズの実験結果と解析結果を示し、提案手法は、モデル内の材料定数値を適切に定めることにより、種々の条件下の供試体の乾燥収縮挙動を十分な精度で再現し得ることを確認した。さらに、配合、養生などコンクリートに関する種々の条件の変化は、モデル内の諸材料定数を合理的に変化させることにより考慮されること、供試体寸法、環境条件についても合理的な形で考慮されることを確認した。

6.4.2 同定された諸材料定数に関する検討

提案手法は、計算に必要な材料定数値を適当に定めることにより、種々の条件下におけるコンクリート構造体の乾燥収縮挙動を適切に再現し得ることを、前小節において確認した。提案手法が真に妥当であることを示すためには、一連の実験結果と計算結果との間に認められた適合性が、偶然によるものではなく、適切な仮定に基づくことにより実現されていることを確認しなければならない。

提案モデルは、複数の仮定の組み合わせにより構成されている。それらはコンクリートの組織構造、コンクリート中の微視的現象に関するものであり、対象がきわめて微視的で測定が容易でない現象であるので、個々の仮定を実験により直接検証することは困難である。そこで本研究では、種々の条件下における実験結果より同定した諸材料定数の値の、絶対的な大きさ、相互関係、実験条件との関係を検討することにより、間接的に個々の仮定の妥当性を検証するという方法をとる。なお、諸材料定数と実験条件との関係については、前小節において一部検討済みである。本小節では、同定を行ったすべてのケースにおける材料定数を用いて総合的に検討する。

まず、細孔容積分布密度関数に関する検討を行う。細孔容積分布密度関数に関連する材料定数値は、以下の3個である。

V_0 ; コンクリート単位体積中における総細孔容積[m³/m³]

B ; 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ

C ; 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ

これらの定数のうち、総細孔容積 V_0 は基本的に、打ち込み直後の重量と炉乾燥後の重量とより決定した実測値である。一連の実験では、吸水率の低い良質の天然骨材を用いたので、モデル化の対象とした細孔すなわちセメントペースト中の水隙の容積を、ほぼ妥当に測定し得ているものと考えられる。

細孔容積分布密度関数の形状を決定するパラメータのうち、分布のなだらかさを決定するパラメータ C を 0.5 と固定し、パラメータ B を平衡液状水量より同定した。このようにして得られたパラメータ B の値の範囲は、前小節表 6.5 に示したように、全ケースについて 5000 から 30000 の間であり、10000 から 20000 近辺のケースが多い。細孔容積分布のピークを与える細孔半径は、 B 、 C の値の組み合わせにより決定され、 $C=0.5$ という条件下でのピークを与える細孔半径は、 $B=10000$ のとき 10^3 [m]、 $B=20000$ のとき 2.5×10^4 [m] となる (図 6.11)。

同定された細孔容積分布密度関数の妥当性を検討する際に参考となるのが、水銀圧入法、ガス吸着法などの測定技術により得られる細孔容積分布であろう。図 6.11 には、水銀圧入法により得られた代表的な細孔容積分布を示してある。これらと、同定された細孔容積分布密度関数とを比較すると、分布の形状は概ね同様であるが、分布のピークを与える細孔半径の大きさが異なっていることが認められる。すなわち、水銀圧入法により測定された結果ではピークを与える細孔半径が 10^3 [m] 近辺であるのに対し、同定された細孔容積分布のピークは、これより1から1.5オーダー程度小さい細孔半径の範囲にある。

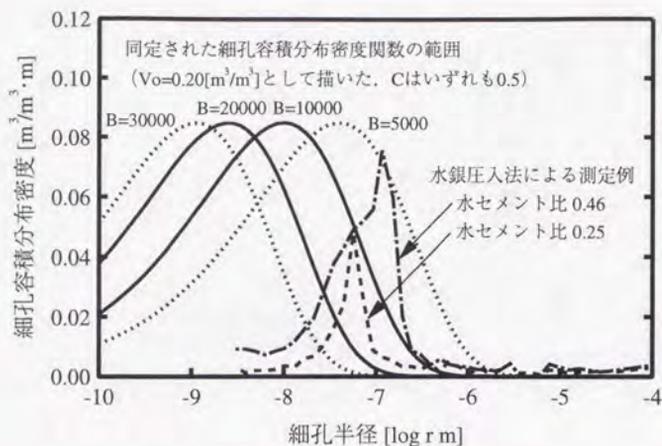


図 6.11 同定された細孔容積分布密度関数

水銀圧入法により測定された細孔容積分布と、本モデルにより同定された細孔容積分布
が細孔半径に関して、1から1.5オーダー程度シフトした結果が得られていることについて
は、以下のように解釈する。

両者の基礎となる理論が異なることから考察を行う。水銀圧入法では、流体の圧力と界面半径の関係（Laplace の式）に基づき、水銀の圧力と浸入体積の測定結果より細孔容積分布を導出しているのに対し、本手法では、蒸気圧と界面半径の関係（Kelvin の式）に基づき、水蒸気圧と凝縮した水の体積の関係より導出していることになる。すなわち両者はともに仮定に基づくものであり、いずれも実際の現象を完全に表し得るものではない。水銀圧入法では、測定する細孔の半径が小さいほど、水銀の圧力を高めなければならないため、測定が困難となること、水銀の浸入により、組織の変形、破壊を起こす可能性があること、閉塞により水銀の浸入できない細孔は測定されないことが指摘されている[6.19]。毛細管凝縮理論（Kelvin の式）に基づく方法では、固体表面の水分子の吸着層の厚さを考慮しない場合、吸着水を凝縮水として算入してしまうために、半径の小さい細孔容積を過大に評価してしまうことになる[6.19]。

したがって、水銀圧入法では、実際の細孔容積分布のうち、小さい半径の範囲の細孔が精密に測定されていない可能性があり、本手法により同定された細孔容積分布は、実際の細孔容積分布に比べ、小さい半径の範囲の細孔容積を過大に評価している可能性がある。以上の考察は、図 6.11 にみられる傾向を妥当に説明し得るものである。

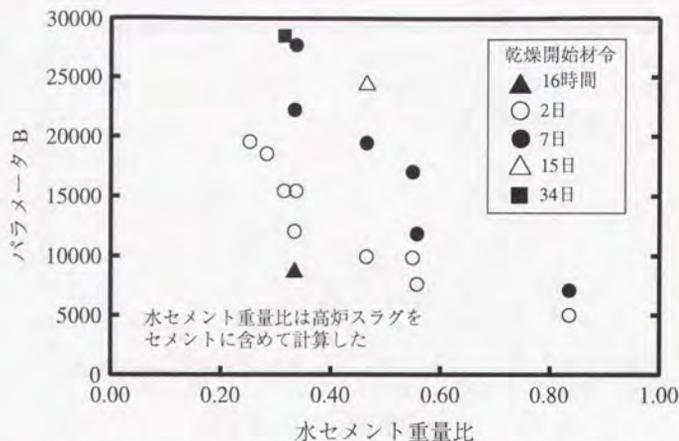


図 6.12 水セメント比および乾燥開始材令とパラメータBの関係

本モデルにおける細孔容積分布密度関数は、実際の細孔組織の幾何構造そのものを表現するものではなく、材料の挙動と、その現象の機構の仮定から導出される材料の特性に他ならない。ただしこの解釈は、水銀圧入法で得られた細孔容積分布についても、同様に成り立つものである。重要なのは微視的現象の機構の仮定であり、これらが実現象に忠実であるほど、同定される細孔容積分布は、実際の細孔組織の幾何構造に近づくことになる。

実験条件と、同定された細孔容積分布密度関数との関係についての検討する。変化させた実験条件のうち、硬化セメントペーストの細孔組織構造の形成に与える影響が大きいと考えられる水セメント比と乾燥開始材令を選び、同定されたパラメータ B との関係、すべてのケースについてプロットしたのが図 6.12 である。ここで、水セメント比は重量比であり、高炉スラグを用いた場合は、その重量をセメントの重量に含めて整理している。検討の結果、本整理を行った方が、すべての実験結果を妥当に説明し得ることが明らかとなったためであり、このことは高炉スラグの潜在水硬性を評価しているに他ならないと考えられる。図 6.12 には、水セメント比が小さいほど、また乾燥開始材令が遅いほど、同定されるパラメータ B が大きいこと、すなわち細孔容積分布が細孔半径の小さい方にシフトするという傾向が明確に現れている。これは、一般的な知見より予測される組織の緻密さの傾向と合致する、きわめて合理的な傾向である。

以上の考察より、本モデルにおいて用いた細孔容積分布密度関数は、実際の細孔容積分布そのものを忠実に表すものではないが、細孔組織の緻密さの傾向を合理的に表現するものであることが結論される。

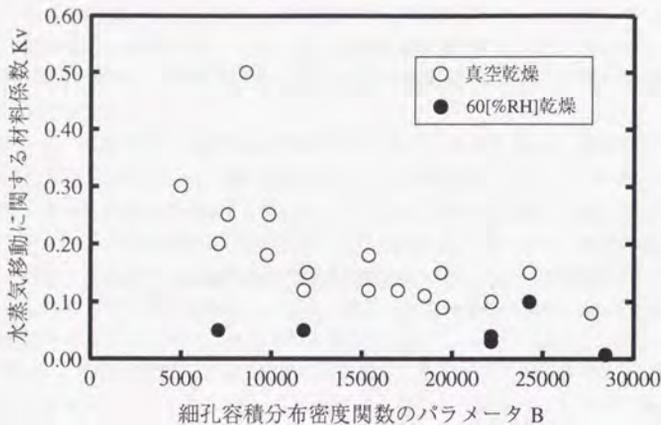


図 6.13 同定したパラメータBと係数Kvの関係

次に、水分の移動に関する特性を表す以下の2つの材料係数について検討する。

K_v ; 水蒸気移動に関する特性を表す材料係数

K_L ; 液状水移動に関する特性を表す材料係数

一連の同定操作では、これら2数を独立に扱うのではなく、 $K_L=K_v/50$ なる関係を仮定した。本仮定は、 $K_L=K_v/50$ なる条件のもとで描いた、コンクリート中の液状水量あるいは相対湿度と、コンクリートの見かけの水分拡散係数の関係（第4章において示した図 4.3 および図 4.4）が、既往の研究[6.7][6.20]において示されているこれらの関係の傾向と合致することをふまえたうえで、未知数の数を減らし同定操作を簡略化することを意図して設けた仮定である。図 4.3 および図 4.4 から予想されるように、液状水の移動が顕著であるのは、含水率が高い状態においてであり、それゆえ飽水状態からの供試体の水分逸散過程では、液状水移動に関する係数 K_L の影響が大きいのは、乾燥初期においてである。乾燥が進むにつれ、水蒸気移動が卓越するために、 K_L の影響は小さくなる。解析結果では、ほぼすべての供試体の水分逸散挙動を、乾燥初期からその後全乾燥期間にわたり適切に追従し得ていることより、 $K_L=K_v/50$ とした仮定は妥当であると考えられる。

実験条件と、同定された水蒸気移動に関する係数 K_v との関係について検討する。これまでの検討から、同定された細孔容積分布密度関数のパラメータ B と実験条件（水セメント比および乾燥開始材令）との相関が高いことが確認されているので（図 6.12）、ここでは、材料定数相互の関係を検討する意味からも、パラメータ B と係数 K_v との関係に

について検討する。同定されたパラメータ B と係数 K_v との関係をすべてのケースについてプロットしたのが図 6.13 である。なお本図では、環境条件に関して区別してプロットしてある。前小節において考察したように、定数の同定操作の際に設けた仮定に起因して、相対湿度60[%]のもとでの乾燥挙動より導出した係数 K_v は、真空乾燥の場合に比べて小さい値となるためである。

図 6.13 より、同定された組織構造の緻密さを表すパラメータ B と、組織内部の水蒸気移動抵抗性を表す係数 K_v は、強い相関を示すことがわかる。パラメータ B が大きいほど、すなわち細孔容積分布が細孔半径の小さい方にシフトするほど、水蒸気移動に関する係数 K_v が小さい（つまり水蒸気移動に対する抵抗性が大きい）という傾向が認められる。組織が緻密であるほど、組織内部の物質移動抵抗性が高いというこの傾向は、物理的意味に照らし合わせて合理的である。これは、仮定した水分移動モデル、および一連の同定操作が適切であることを示しているものと考えられる。

また係数 K_v と同様の定義による多孔体の屈曲度は、多くの多孔体の場合、0.1 から 0.7 程度となることが知られている[6.21]。本解析により得られた係数 K_v の値は、真空乾燥の実験結果より同定した場合では概ね 0.1 から 0.3 程度、相対湿度60[%]の場合では 0.05 程度となっており、値の大きさからも手法が適切であることが示唆される。

続いて、毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s について検討する。本係数に関しても、水分の移動に関する係数の場合と同様の方法、すなわちパラメータ B との相関を調べる方法により検討する。同定されたパラメータ B と弾性係数 E_s との関係をすべてのケースについてプロットしたのが図 6.14 である。本図においても、環境条件に関して区別してプロットしてある。図 6.14 より、同定されたパラメータ B と毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s は強い相関を示すこと、真空乾燥の場合と相対湿度60[%]のもとでの乾燥の場合とでは、同定される E_s の値が異なることがわかる。

同定されたパラメータ B と弾性係数 E_s の相互関係は、組織が緻密になるほど弾性係数の値が大きいという傾向を示し、水分の移動に関する係数の場合と同様、物理的意味に合致したきわめて合理的な関係である。これは、仮定した収縮モデル、および材料定数の同定操作が適切であることを示していると考えられる。

相対湿度60[%]のもとでの乾燥挙動より同定した弾性係数 E_s が、真空乾燥での乾燥挙動より同定した場合に比べて、その値が約1/3から1/2程度となっている理由は、前小節において述べたように、毛管力による組織の時間依存性変形の影響であると解釈している。毛管力に起因する応力と乾燥収縮ひずみの関係を線形弾性により与えた場合、時間依存性変形の影響が弾性係数の低下として評価されてしまうことになる。乾燥速度の早い真空乾燥と、それに比べて緩慢な相対湿度60[%]のもとでの乾燥とでは、観察される変形に含まれる時間依存性変形成分の割合が異なることとなる[6.11]。

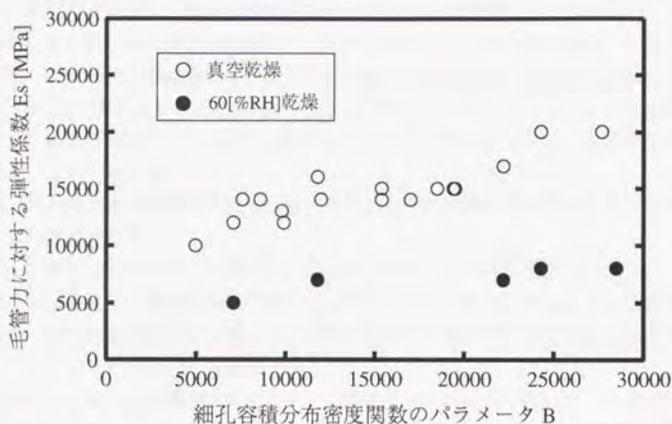


図 6.14 同定したパラメータBと係数Esの関係

時間依存性変形の影響を弾性係数の低下として評価した場合の低下割合が1/3から1/2程度になるということは、クリープ係数が1から2であることに相当し、一般のコンクリートのクリープ係数に近い値である[6.22]。毛管力に起因する応力による組織の変形と外力による変形とは、メカニズムが同一ではないと考えられるが、本側面では類似の性質を示したと解釈できる。

なお、水分の移動に関する係数の場合と同様、相対湿度60[%]のもとの乾燥と真空乾燥とで得られる弾性係数の差異の中には、乾燥期間中の組織構造の変化をないと仮定したことに起因する影響も含まれていることになる。この影響は、乾燥速度の緩慢な、相対湿度60[%]のもとの乾燥より得られる弾性係数を、大きく評価させる方向に作用しているはずである。それにもかかわらず、同定結果では、相対湿度60[%]のもとの乾燥より得られる弾性係数の方が、真空乾燥よりも小さい傾向となっているのは、時間依存性変形によるみかけの弾性係数の低下の方が、セメントの水和にともなう弾性係数の増進よりも卓越したためであると考えられる。

以上に考察したように、真空乾燥と相対湿度60[%]のもとの乾燥とで、同定される材料定数の値が異なっている理由は、水分の移動に関する係数の場合と、毛管力に起因する応力に対する弾性係数の場合とで、本質的に異なるものである。水分の移動に関する係数の場合は、同定操作に際して設けた仮定に起因しており、毛管力に起因する応力に対する弾性係数の場合は、線形弾性モデルの適用限界に起因していると考えている。

図 6.14 に示されるように、同定された、毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s の値は、真空乾燥の場合で概ね10000[MPa]から20000[MPa]程度となっている。これは、外力に対するコンクリートの静弾性係数の一般的な値の1/3から2/3程度である。この傾向は、コンクリートの乾燥収縮の機構を毛細管張力理論に基づき検討した既往の研究にも報告されている[6.23]。毛管力による作用を、材料に発生している平均的な応力として評価する際の仮定、および毛管力による変形と外力による変形とのメカニズムの本質的な違いなどが理由として考えられる。

以上、種々の実験結果より同定したモデル内の諸材料定数を総合的に検討した結果、以下のことが確認された。

- 1) 諸材料定数の値の大きさは、既往の知見に比較して妥当である。
- 2) 実験条件と諸材料定数の関係は、定数の物理的意味と照合して合理的である。
- 3) 諸材料定数間の相互関係は、組織の緻密さと諸材料特性の関係における物理イメージと照合して合理的である。

これらより、個々の微視的現象モデルは、現象のメカニズムを概ね妥当に表現したものであると考えられる。提案手法は、諸材料定数の値を適当に定めることにより、種々の条件下におけるコンクリート構造体の乾燥収縮挙動を適切に再現し得ることを前小節において確認している。このことと、本小節において考察した結果を合わせて考えると、提案手法は現象のメカニズムに立脚し、コンクリート構造体の乾燥収縮挙動を適切に予測し得る手法であることが結論される。

また、定式化した微視的現象モデル、および材料定数の同定の際に用いた仮定に関して、これらの適用限界に起因した以下の問題が存在することを考察した。

- 4) 細孔容積分布密度関数は、半径の小さい細孔の容積を過大に評価している可能性がある。
- 5) 乾燥期間中の組織の緻密化をないとした同定操作を行った場合、諸材料定数を過大あるいは過小に評価することになる。
- 6) 毛管力に起因した応力と乾燥収縮ひずみの関係を線形弾性により与えた場合、時間依存性変形の影響が弾性係数の低下として評価される。

しかしながら、これらは直ちに手法の適用性を否定するものではないと考えている。項目4)に関して、細孔容積分布密度関数は、微視的現象のメカニズムの仮定により逆算される材料特性として位置づけられているため、実際の組織構造とのずれそのものは、本質的な問題とはならない。また、微視的現象モデルを、より精密なものとするすることで、実際の組織構造に近づくことも指摘した。項目5)は、手法の妥当性を損なうものではない。項目6)は、微視的現象モデルを発展させることにより、解決可能な問題であると考えられる。

また実用的な予測に際しては、定数の補正を行うことにより対処することも可能である。

提案モデルが妥当であることが検証された時点で、本研究は主たる目的を達成し得たことになる。提案モデルの工学的な応用の一例として、本節において得た結果をもとに、モデルに基づく構造物の乾燥収縮予測フローの一例を、次節において提案する。

6. 5 提案モデルに基づく構造物の乾燥収縮予測フローの提案

6. 5. 1 予測フローの概要

提案する構造物の乾燥収縮予測フロー全体の概要を図 6.15 に示す。フロー全体は大きく分けて2つの部分より成る。前半 (PART 1) は、コンクリートの材料特性を決定する部分であり、後半 (PART 2) は、コンクリートの材料特性、構造物に関する条件 (形状、大きさ)、および環境条件 (力学的境界条件、温度、湿度) より構造物の乾燥収縮挙動を予測する部分である。PART 2 の、コンクリートの材料特性が既知となったとき、構造物の乾燥収縮挙動を予測する一般的方法については、第5章においてすでに示した。ここでは、PART 1 の、コンクリートの材料特性を決定する方法に焦点を絞る。

すでに述べたように、提案モデルでは、コンクリートの特性はいくつかの材料定数に集約される。PART 1 はそれらの定数を決定する部分である。本図では、材料定数を決定する方法を2通り示した。一方は材料試験を行った結果を利用する方法であり、もう一方は試験を行わずに使用材料、配合、養生から推定する方法である。

材料試験を行う方法では、所定の形状、大きさの供試体の、所定の条件のもとで乾燥収縮挙動を測定し、モデルを用いた逆解析により試験結果から材料定数を同定する。材料定数の同定は、先述した方法により行うことができる。本方法の妥当性については、前節においてすでに検討した。ただし本方法により諸材料定数を決定する場合、ある程度の期間が必要となることは避けられない。大きさ $4 \times 4 \times 16$ [cm]の供試体を用い、乾燥速度の速い真空乾燥法を用いる場合であっても、供試体の作製から、同定操作に必要なデータの採取の完了まで3週間程度を要することになり、大きさ $10 \times 10 \times 40$ [cm]の供試体を用い、相対湿度60[%]の恒温室内で乾燥させる場合では、数十日の期間を要することになる。なお前節において検討したように、提案モデルは骨材量の影響を合理的に考慮することが可能であるので、ブリージングが顕著でなく、骨材量が通常の範囲にあり、良質な天然骨材を用いたコンクリートに関しては、ウェットスクリーニングによりコンクリートから取り出したモルタルを用いて大きさ $4 \times 4 \times 16$ [cm]の供試体により試験を行った結果から、コンクリートの特性を推定することができる。

材料試験を行わない場合、コンクリートの材料特性を決定する因子である、使用材料、配合、養生から、材料定数の値を推定する方法をとる。この推定方法の提案が、本節の主題である。前節において、種々の条件下の実験結果より同定した諸材料定数を総合的に検討した結果、諸定数は実験条件と強い相関を示すことが確認された。この結果を利用すれば、ある条件の範囲では、試験を行わなくとも、諸定数の値を適切に推定する論理を構築することが可能であると考えられる。本節では、検証実験と一連の同定操作の結果得た知見をもとに、材料定数の値を推定するフロー、およびその具体的な内容を提案する。

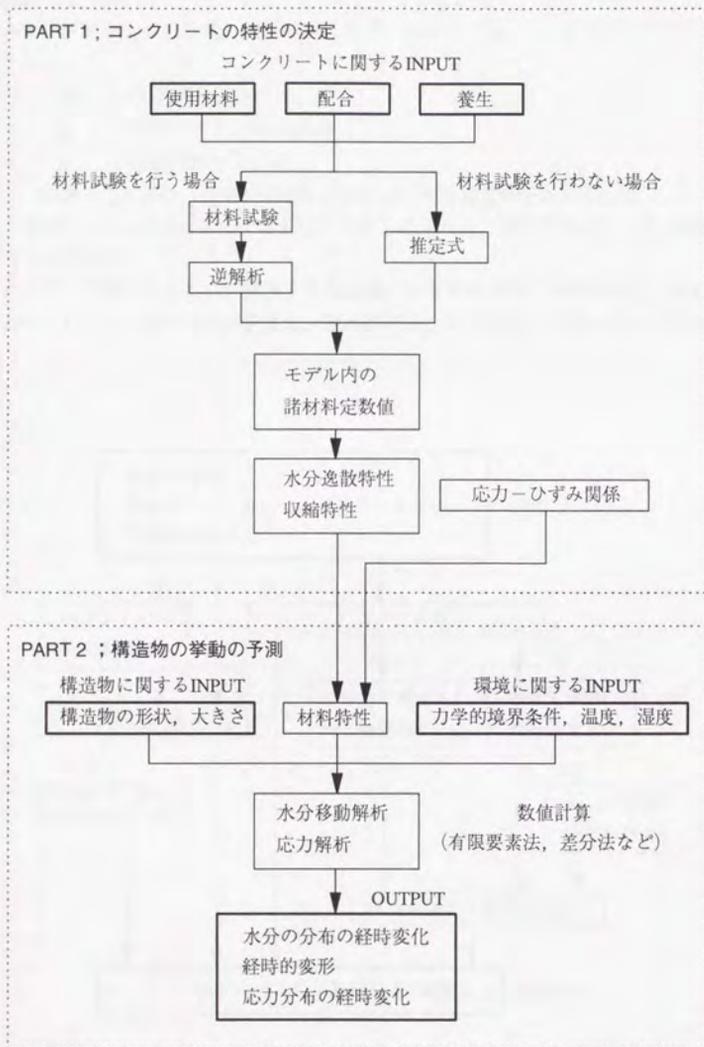


図 6.15 提案モデルに基づく構造物の乾燥収縮予測フロー

図 6.16 は、試験を行わない方法により諸材料定数を決定するフローの概略を示したものである。検討を行った結果、使用材料、配合、養生は、以下の3個の変数に代表させることにした。

- W ; 単位水量[kg/m³]
- C ; 単位セメント量[kg/m³]
- t_d ; 乾燥開始材令[day]

ただし、粉体として高炉スラグを使用する場合は、その重量をセメントに算入し、単位セメント量を計上するものとする。これは、先述したように、高炉スラグの潜在水硬性を評価するためである。

これらの入力変数をもとに、提案する推定式によりモデル内の材料定数を、図 6.16 に示したフローにしたがい順次決定する。次小節では、各推定式の内容について述べる。

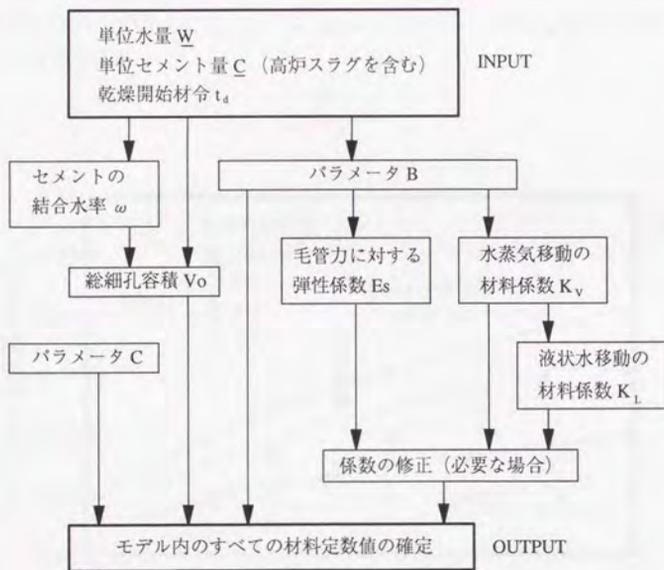


図 6.16 材料定数値の決定フロー

6.5.2 材料定数値の決定方法

セメントの重量結合水率 ω は、予測に直接必要な量ではないが、単位体積中の総細孔容積 V_o を決定する際の中間変数として用いている。ここでの結合水とは、相対湿度0[%]のもとでも逸散しない状態でコンクリート中に固定されている水と定義され、化学的結晶水、物理的に固定されている水などを区別しない。セメントの重量結合水率とは、単位体積あたりの結合水量の単位セメント量（高炉スラグを含む）に対する比である。検証実験では、実験の簡便性を考慮して、相対湿度0[%]ではなく、110[°C]の乾燥炉において逸散しない水として測定した。セメントの重量結合水率 ω は、乾燥開始材令と水セメント比をパラメータとした次式により推定する。

$$\omega = (0.061 + 0.054 \cdot \ln t_d) \cdot (W/C)^{0.5} \quad (6.5)$$

式(6.5)は、一連の検証実験において乾燥収縮試験後の炉乾燥重量を測定した結果より得たもので、実測値との対比は図6.17に示すようである。

単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]は、セメントの重量結合水率 ω 、単位水量 W [kg/m³]、高炉スラグを含めた単位セメント量 C [kg/m³]、液状水の密度 ρ_L [kg/m³]をもとに、次式により計算される。

$$V_o = \frac{W - \omega \cdot C}{\rho_L} \quad (6.6)$$

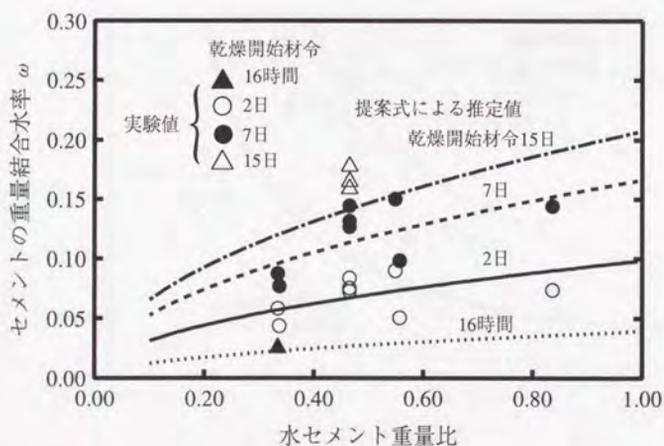


図 6.17 セメントの重量結合水率 ω の推定

細孔容積分布密度関数の形状を決定するパラメータ C は、一連の同定操作において、

$$C=0.5 \quad (6.7)$$

と固定した。本予測フローにおいてもこの値を採用する。

細孔容積分布密度関数の形状を決定するパラメータ B は、乾燥開始材令と水セメント比をパラメータとした次式により推定する。

$$B=(1880+2680 \cdot \ln t_d) \cdot (W/C)^{-1.2} \quad (6.8)$$

ただし式(6.8)中の B の値は、 $C=0.5$ のもとでの値である。式(6.8)も、検証実験とその同定結果をもとに作成したものである。式(6.8)により推定される値と、検証実験より同定した結果との対比を 図 6.18 に示す。式(6.8)は、乾燥開始材令が著しく早期である場合を除いて、同定結果を適切に推定し得ているといえる。本予測フローでは、組織の緻密さを表すパラメータ B の値をもとに、水分の移動特性を表す係数、および収縮に関する特性を表す係数を推定する方法を採っているので、パラメータ B の推定は重要である。

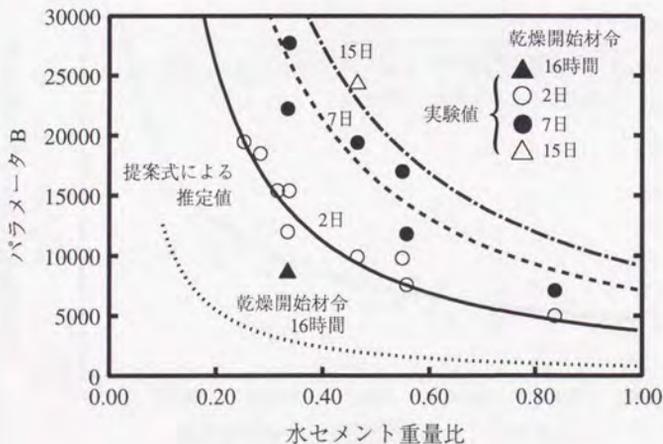


図 6.18 細孔容積分布密度関数のパラメータ B の推定

水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v は、組織の緻密さを表すパラメータ B と相関が高いことを前節において確認しているため、パラメータ B の関数として、次式により推定する。パラメータ B にはすでに、乾燥開始材令と水セメント比の影響が反映されているので（式(6.8)）、係数 K_v にも、これらの影響が反映されることとなる。

$$K_v = 120 \cdot B^{-0.69} \quad (6.9)$$

式(6.9)は、検証実験の結果のうち、真空乾燥を行ったケースについてのデータをもとに作成したものである。

式(6.9)により推定される値と、検証実験より同定した結果との対比を図 6.19 に示す。液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L は、一連の同定操作において、

$$K_L = K_v / 50 \quad (6.10)$$

とし、その妥当性についてはすでに検討した。ここでもこの関係を仮定する。

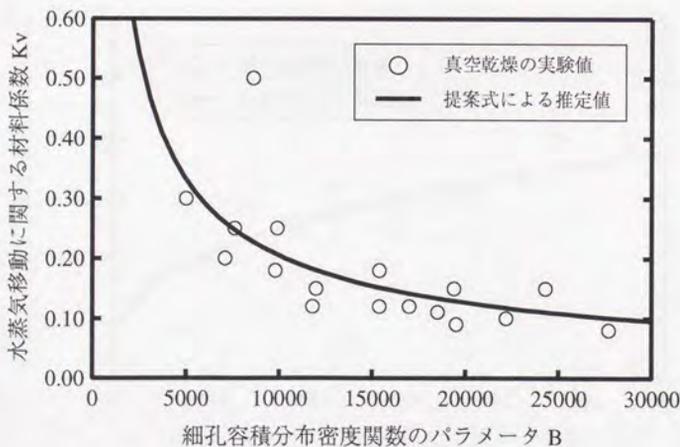


図 6.19 水蒸気移動に関する材料係数 K_v の推定

毛管力に起因する応力に対する弾性係数 E_s は、係数 K_V と同様に、パラメータ B の関数として、次式により推定する。

$$E_s = 580 \cdot B^{0.34} \quad (6.11)$$

ただし、式(6.11)中の E_s の単位は[MPa]である。式(6.11)も、検証実験の結果のうち、真空乾燥を行ったケースについてのデータをもとに作成したものである。式(6.11)により推定される値と、検証実験より同定した結果との対比を 図 6.20 に示す。

以上に示した式(6.5)から式(6.11)の計算を順次実行することにより、モデル内の材料定数値がすべて決定されることになる。

なお、式(6.9)、式(6.11)は、真空乾燥を行ったデータをもとに作成した式である。前節において考察したいくつかの理由により、通常の湿度範囲における乾燥収縮挙動を予測する際には、修正を行った方がよい。本予測フローでは、通常の湿度範囲における乾燥収縮挙動を予測する際、式(6.9)、式(6.10)により評価された係数 K_V 、 K_L をそれぞれ1/3倍し、式(6.11)により評価された弾性係数 E_s を1/2倍することを提案する。なお、この処理は材料試験により材料定数の値を決定する場合においても、試験方法が真空乾燥法である場合は行わなければならない。試験を行う環境が通常の湿度範囲であれば修正の必要はない。

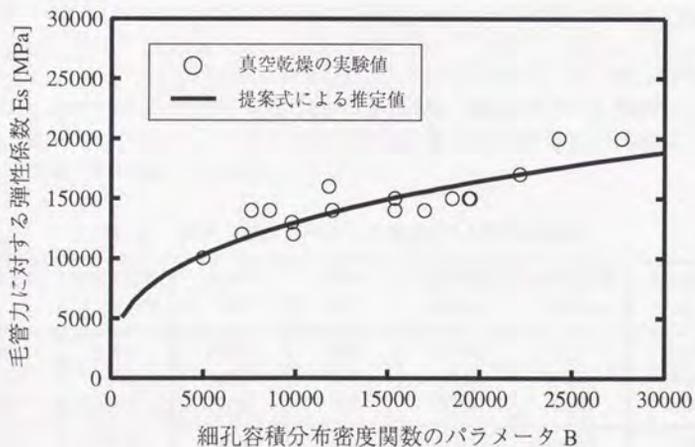


図 6.20 毛管力に対する弾性係数 E_s の推定

6. 5. 3 予測フローの実行例

提案した乾燥収縮予測フローに基づき、コンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動の予測を行った例を示す。適用例として用いたのは、本研究において行った検証実験の中から選んだ6ケースである。なお、これらのデータは予測フローを構築する際のものとなったものであるため、厳密な意味では検証とはならない。しかし提案予測フローが、大略妥当性を得たものであるかを確認することはできる。

予測フローの適用例として選んだ供試体、およびそれらの実験条件を表 6.6 に示す。これらの供試体は、条件が広い範囲をカバーするよう考慮して選んだものである。なお、条件の詳細については、実験方法について述べた節、あるいは付録を参照のこと。

表 6.6 供試体の実験条件

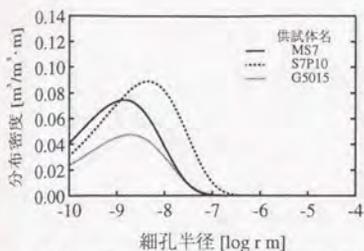
供試体名	単位水量 \underline{W} , 単位セメント量 \underline{C}	乾燥開始 材令 t_d [day]	供試体寸法 [cm]	環境条件	備考
MS7	$\underline{W}=247, \underline{C}=738$	7	4×4×16	真空乾燥	モルタル
S7P10	$\underline{W}=255, \underline{C}=808$	2	4×4×16	真空乾燥	モルタル
G5015	$\underline{W}=161, \underline{C}=346$	15	4×4×16	真空乾燥	高炉スラグ [*] 使用、コンクリート
L7C	$\underline{W}=172, \underline{C}=308$	7	4×4×16	60[%RH]	石灰粉使用、コンクリート
L4M	$\underline{W}=247, \underline{C}=295$	7	10×10×40	60[%RH]	石灰粉使用、モルタル
G015N	$\underline{W}=234, \underline{C}=502$	15	4×4×16	60[%RH]	高炉スラグ [*] 使用、モルタル

注) 高炉スラグを使用した場合、単位セメント量 \underline{C} は高炉スラグの重量を含めた値を記した。

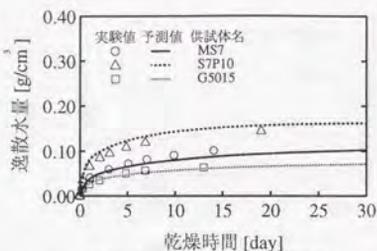
前小節において提案したフローにしたがい、単位水量、単位セメント量（高炉スラグを含む）、乾燥開始材令から、モデルを用いた計算に必要な材料定数値を各供試体について算定した結果、以下の値が得られた。

表 6.7 提案予測フローにより算定された材料定数値

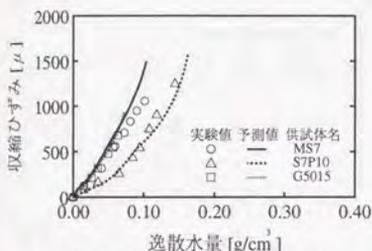
供試体名	総細孔容積 V_0 [m ³ /m ³]	ハ [*] ラメータ B	ハ [*] ラメータ C	水蒸気移動 係数 K_v	液状水移動 係数 K_L	弾性係数 E_s
MS7	0.176	26400	0.5	0.104	0.0021	18000
S7P10	0.210	14900	0.5	0.155	0.0031	14900
G5015	0.112	22900	0.5	0.115	0.0023	17200
L7C	0.134	14300	0.5	0.053	0.0011	7330
L4M	0.202	8780	0.5	0.075	0.0015	6220
G015N	0.163	22800	0.5	0.038	0.0008	8590



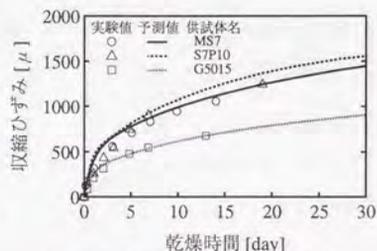
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係



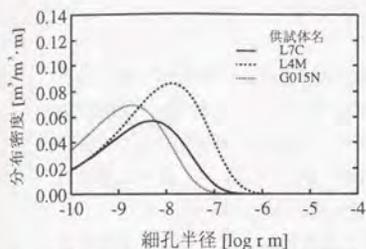
(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

図 6.21 提案予測フローによる供試体の乾燥収縮挙動の予測例

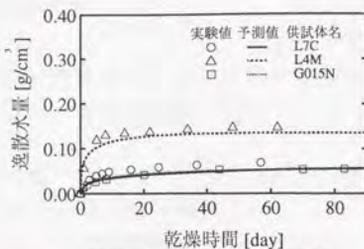
表 6.7 に示した材料定数値を用い、与えられた環境条件のもとでの供試体の乾燥収縮挙動を計算した結果を実験結果と重ねて示したのが、図 6.21 および 図 6.22 である。いずれの供試体に関しても、水分の逸散挙動、収縮挙動ともに、計算結果は実験結果と良好に一致している。このことは、材料定数値を算定するフローが適切であること、および提案した材料モデルが妥当であることの双方を示すものであると考えられる。

図 6.21 および 図 6.22 に示した6ケースは、使用材料、配合、養生（乾燥開始材令）、供試体寸法、環境条件がすべて変化するように検証実験の中から選んだものである。予測フローを構築するもととなったデータであるとはいえ、提案した予測フローはこれらの種々の条件の影響を、きわめて適切に反映し得ているといえる。

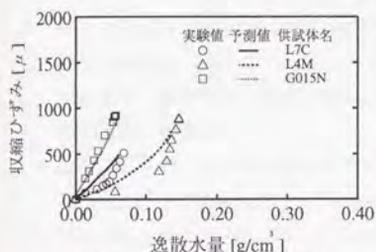
ここでは適用例として角柱供試体の実験結果を取り上げ、供試体の平均的な乾燥収縮挙動、すなわち供試体の逸散水量と平均ひずみにより予測結果との比較を行った。これまで述べたように提案予測手法はコンクリートの微小体積要素における水分の平衡特性、水分の移動特性、体積変化特性を経て、有限な大きさを持つコンクリート構造の乾燥収縮挙動を予測する方法を採っている。したがって、構造体内部の水分の分布、ひずみの分布を予測することができ、理論的には任意の形状、大きさの構造体に対して適用可能である。



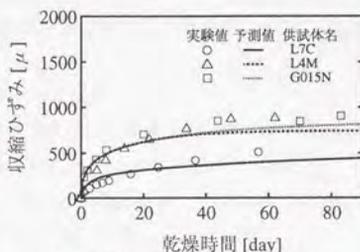
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係



(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

図 6.22 提案予測フローによる供試体の乾燥収縮挙動の予測例

本論文において示した、材料試験を行わずにモデル内の材料特性値を決定する方法は、使用材料、配合、養生条件と材料特性値とを、実験式により直接関係づけたものである。既往の乾燥収縮予測式が、基本的には、配合、部材寸法、環境条件などと部材の平均乾燥収縮ひずみとを関係づけた実験式であることを考えると、実験式として与えるレベルが、予測対象の現象からみて、より基礎的な領域に移ったに過ぎないと解釈することもできる。しかしながら、この違いはきわめて大きいと認識している。

試験を行わずに、使用材料、配合、養生条件から材料特性をより合理的に決定するためには、組織構造の形成過程をも予測の対象としなければならない。そのためには、コンクリート中のセメントの水和過程、これにともなうセメント硬化体組織の形成、水分の逸散過程を、相互作用を考慮しながら取り扱う必要がある[6.16]。これは、本研究を進展させる段階において、ぜひ取り組むべき課題であると考えている。

提案した乾燥収縮モデルが、現象の機構をほぼ妥当に表現し得た個々の仮定により構成されていること、良質な天然骨材を用い、フリージングの顕著でないコンクリートの単調な乾燥収縮現象を良好に予測し得ること、条件の入力および計算方法が簡便であり、実用的な乾燥収縮予測手法となり得ることを本章において示した。本研究は、当初に掲げた目的をほぼ達成し得たことになる。

第6章の参考文献

- 6.1) 下村 匠・福留和人・小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリートの乾燥収縮特性の評価，超流動コンクリートに関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学会，pp.167-174，1993.5
- 6.2) 出雲淳一・島 弘・岡村 甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学，Vol.25，No.9，pp.107-120，1987.9
- 6.3) 山中克夫・小沢一雅・國島正彦：コンクリート構造物の耐久性能の定量評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.487-492，1989.6
- 6.4) 下村 匠・陳 丙学・小沢一雅：真空乾燥法によるコンクリートの乾燥収縮試験とその予測モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.391-396，1991.6
- 6.5) 伊理正夫・藤野和建：数値計算の常識，共立出版，1985
- 6.6) 沼尾達弥・三橋博三・福沢公夫：加熱乾燥を受けるコンクリートの水分逸散過程に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.441，pp.1-7，1992.11
- 6.7) Bazant,Z.P. and Najjar,L.J. : Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materials and Structures, Vol.5, No.25, pp.3-10, 1972
- 6.8) 秋田 宏・藤原忠司・尾坂芳夫：含水率分布に基づいた乾燥収縮応力の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.403-408，1991.6
- 6.9) 永松静也・佐藤嘉昭・大常好範：セメント硬化体の乾燥の程度と乾燥収縮の関係乾燥条件の影響，日本建築学会構造系論文報告集，No.439，pp.13-21，1992.9
- 6.10) 下村 匠・小沢一雅・前川宏一：細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.435-440，1993.6
- 6.11) 福留和人・下村 匠：時間依存性変形を考慮したコンクリートの乾燥収縮モデル，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.944-945，1992.9
- 6.12) 田中哲也：乾湿にともなうコンクリートの体積変化における経路依存性，東京大学土木工学科卒業論文，1993.3
- 6.13) 国井大蔵・古崎新太郎：移動速度論，工学基礎講座23，培風館，1980
- 6.14) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，セメント・コンクリート，No.549，pp.31-43，1992.11
- 6.15) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，セメント・コンクリート，No.550，pp.50-63，1992.12
- 6.16) 下村 匠・小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動および熱伝導の連成解析，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.850-851，

1992.9

- 6.17) 田中弘文：セメント硬化体の組織と物性，多孔材料 ー性質と利用ー 近藤連一編，第13章，技報堂出版，pp.199-339，1973
- 6.18) 長滝重義・米倉亜州夫：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの機構に関する考察，コンクリート工学，Vol.20，No.12，pp.85-95，1982.12
- 6.19) 後藤誠史・大門正機・近藤連一：細孔径分布，多孔材料 ー性質と利用ー 近藤連一編，第3章，技報堂出版，pp.45-74，1973
- 6.20) 阪田憲次・蔵本 修：乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究，土木学会論文報告集，No.316，pp.145-152，1981.12
- 6.21) 小宮山宏：速度論，朝倉書店，1990
- 6.22) 阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測，コンクリート工学，Vol.31，No.2，pp.5-14，1993.2
- 6.23) 岸谷孝一・馬場明生：建設材料の乾燥収縮機構，セメント・コンクリート，No.346，pp.30-40，1975.12

第7章 結論

本研究では、耐久性をはじめとするコンクリート構造物の諸性能にとって、重要な影響要因であるコンクリートの乾燥収縮を予測する手法の開発を目的として行い、コンクリートの組織構造と組織中における微視的現象に立脚した乾燥収縮モデルの定式化、提案モデルの妥当性と種々の条件に対する適用性の検証、モデルを用いたコンクリート構造の乾燥収縮挙動の予測手法の提案を行った。本論文において述べた内容を章ごとにまとめ、本研究の結論とする。

第1章では、本研究の背景と目的、および本研究と既往の研究とのアプローチの相違点について述べた。コンクリートの乾燥収縮の予測は工学上の重要な問題であるが、現象のメカニズムに立脚した合理的な予測手法はこれまで皆無であった。しかしながら、数値計算技術の発達、ハイパフォーマンスコンクリートの登場により、優れた予測手法を開発し、構造物の乾燥収縮挙動の予測にこれを適用する土壌は十分整ったと考えられる。ハイパフォーマンスコンクリートは、締固め不要であること、低水粉体比ゆえ緻密で均等質であることから、構造物中のコンクリートを高品質かつ信頼性の高いものとしたのである。本研究は、乾燥収縮予測モデルの開発を目的としたが、ハイパフォーマンスコンクリートの登場は、本研究のひとつの大きな契機となっている。

本研究のアプローチと、既往の研究に見られるアプローチとの最大の違いは、方法論の違いにある。有限構造体の乾燥収縮挙動を予測する既往の多くの手法は、配合、構造物の形状、環境条件などの入力情報と予測目標である乾燥収縮挙動を、統計的に直接結びつけたもの、コンクリートの材料レベルの水分移動特性、収縮特性を仮定することを出発点としたものであるのに対し、本研究の手法は、コンクリート中の微視的現象のモデル化を出発点として、一貫したコンセプトのもと有限構造体の挙動の予測を可能としている。本手法によれば、配合、構造物の形状、環境条件などの入力情報が、現象に即して合理的な形で考慮される。本手法の実現には、コンクリートの組織構造をモデル化し、種々の微視的現象モデルの結合に有効に機能させたことが、ひとつの鍵となっている。

第2章では、乾燥収縮現象に関与する種々の微視的現象が展開される場であるコンクリートの組織構造のモデル化を行った。組織構造モデルは、種々の微視的現象モデルの橋渡しとして、提案モデル全体のなかで、きわめて重要な位置を占めるものである。乾燥収縮現象において、コンクリートの組織構造が果たす機能は、組織中の液状水に表面張力に起因した毛管力を発生させる作用、水分の移動経路としての機能であると考察した。このうち前者、すなわち毛管力を発生させる作用が、乾燥収縮現象において、とりわけ重要なメカ

リズムであると考えられること、この機能を担っているのはコンクリート中の空隙のうち、主として硬化セメントペースト中の水隙であることを考察し、この空隙および機能を有効に表現することに主眼を置いた組織構造モデルを提案した。本組織構造モデルは、コンクリート中の細孔の半径（壁間距離の1/2）と、その半径を有する細孔の容積の分布密度の関係を連続関数により表現したものである。これを細孔容積分布密度関数と定義した。細孔容積分布密度関数の具体形として、硬化セメントペーストの細孔組織構造の特徴をとらえ、かつ数値計算に適した簡潔な関数形を用いた。

第3章では、乾燥収縮現象に関与するコンクリート中の微視的現象をモデル化した。

まず、コンクリート細孔中の物質の相として、気相と液相の2相を考慮することとし、気相は水蒸気と乾燥空気より成る理想混合気体、液相は粘性と表面張力を持った非圧縮性流体である液状水とした。続いて、これらの物質の力学的および熱力学的平衡関係を定式化した。液状水の表面張力によって生じる細孔中の液相の圧力降下を、円形毛管に対するLaplaceの式により表現し、水蒸気分圧と気液界面の形成される細孔半径の関係をKelvinの式により表現した。

湿度環境下におけるコンクリートの乾燥過程では、コンクリート細孔組織中における水蒸気の移動は、濃度勾配を駆動力とした気相中の水蒸気と乾燥空気の相互拡散が主たるメカニズムであると考察し、その移動則をFickの第1法則を基礎として定式化した。また、不飽和状態におけるコンクリート中の液状水の移動は、表面張力に起因した液状水の圧力降下の空間的な勾配を駆動力とした多孔組織中の層流として表現した。

水分の逸散にともなうコンクリート組織の体積変化は、細孔組織中の液相と気相の圧力差が相対的に細孔壁に引張力として作用することにより生じる、材料の力学的変形であるとして表現した。

これらの種々の微視的現象モデルと、第2章において定式化した組織構造モデルとから、本乾燥収縮モデルは構成されるのである。個々の微視的現象モデルは、古典的な力学および熱力学法則に基づき、きわめて簡潔な表現としたが、組み合わせる有限構造体の乾燥収縮挙動の予測に用いるという統一的目的のもとに、各モデルの表現のレベルのバランスを考慮して定式化されていることが特徴である。

第4章では、コンクリートの組織構造モデルと微視的現象モデルを組み合わせることにより、有限構造体の乾燥収縮挙動を予測する際に必要なコンクリートの材料レベルの特性を導出した。それらは、相対湿度と平衡するコンクリート中の液状水量の関係である水分平衡特性、コンクリート中の水分状態とみかけの水分拡散係数の関係である水分移動特性、および水分状態と乾燥収縮ひずみの関係である体積変化特性であり、いずれもコンクリート微小体積要素の特性として導出される。数値解析によりコンクリートの乾燥収縮挙動の予測を試みた既往の多くの研究では、これらコンクリートの材料レベルの特性を仮定することを出発点としているのに対し、本研究では、同一の微視的現象モデルに基づき、かつそれらの一切の簡略化を行わずとも、簡易な数値計算により材料レベルの特性を導出することに成功したのである。このことが可能となったのは、種々の微視的現象が展開さ

れる共通の場であるコンクリートの組織構造を表現し、取り入れていることによるところが大きい。

第5章では、与えられた環境下におけるコンクリート有限構造体の乾燥収縮挙動を、提案モデルを用い実際に予測する際に必要な境界条件の定式化と、数値計算の一般の手順について示した。提案モデルは、有限要素法など一般に用いられている数値計算手法に、そのまま適用できる形式となっている。

第6章では、提案手法の妥当性と適用範囲の検証、ならびに本研究の成果の工学的な応用の一例として、モデルに基づくコンクリート構造の乾燥収縮予測フローを示した。

まず、種々の条件のもとで行ったモルタルおよびコンクリート供試体の実験結果を、提案手法を用いて逆解析し、それぞれのケースについてモデル内の諸材料定数値の同定を行った。検証実験は、使用材料、配合、養生、乾燥環境、供試体寸法を変化させた34ケースについて行い、それぞれの条件を以下の範囲で変化させている。使用材料と配合は、提案手法のハイパフォーマンスコンクリートへの適用を念頭に置き選定した。粉体に、普通ポルトランドセメント、中庸熟ポルトランドセメント、石灰粉、高炉スラグ、フライアッシュを組み合わせて用い、配合は、水粉体体積比は80~173[%] (重量比では25~55[%])の範囲で、細骨材、粗骨材をあわせた骨材量は体積割合で21~62[%]の範囲で変化させた。養生条件は、乾燥開始材令により制御し、材令16時間から34日の範囲で変化させた。環境条件は、きわめて乾燥速度の速い真空乾燥と、標準的な環境の相対湿度約60[%]の2種類とし、供試体寸法は4×4×16[cm]と10×10×40[cm]の2種類である。提案手法は、諸材料定数値を適切に与えることにより、これらの条件下の供試体の乾燥収縮挙動を良好に追従し得ることが明らかとなった。

次に、種々の実験結果より得られた諸材料定数値をもとに、手法を構成する個々の仮定が適切であるかについて検討した。

細孔容積分布密度関数は、組織の緻密さの大きな影響因子である水セメント比、乾燥開始材令との相関が強いことから、組織の緻密さの傾向を合理的に表現していることが明らかとなった。また、同定された細孔容積分布は、実際の細孔容積分布に比べ、半径の小さい細孔の容積を過大に評価していると考えられるが、このことに関して、その理由が毛細管凝縮理論のみに基づき細孔容積分布を同定したためであること、細孔容積分布密度関数は仮定に基づき材料挙動より導出される材料関数であり、実際の容積分布とのずれそのものは本質的な問題とはならないこと、同定の基礎理論である微視的現象モデルを精密なものとするにより実際の容積分布に近づくことを指摘した。

水蒸気の移動抵抗性は、組織が緻密であるほど大きいという明確な傾向を示した。これは、組織内部の物質移動現象の物理イメージに照らし合わせて合理的な傾向であり、水蒸気移動のモデル化が適切であることを示した。また飽水状態からの乾燥では、液状水移動が顕著であるのは乾燥初期においてであり、いずれのケースも乾燥初期の水分逸散挙動を良好に再現し得ていることから、液状水移動の取扱いが妥当であることを考察した。

毛管力に起因する応力に対する弾性係数は、組織が緻密であるほど大きいという明確な

傾向を示した。これは、物体に作用する力と変形の関係の物理イメージに照らし合わせて合理的な傾向であり、水分の逸散にともなう体積変化のモデル化が適切であることを示した。乾燥速度の速い真空乾燥と、通常的环境湿度（相対湿度60[%]）とでは、同定される弾性係数の値が異なることが明らかとなった。その理由は毛管力による時間依存性変形の影響を弾性係数の低下として評価しているためであると考察した。

以上のように、用いた個々の微視的現象モデルはいずれも、現象を概ね適切に表現したものであることを確認し、提案手法は、現象のメカニズムに立脚し、コンクリート構造体の乾燥収縮挙動を適切に予測し得る手法であると結論した。

手法の妥当性を検証した後、その工学的応用の一例を示す目的で、モデルに基づく構造物の乾燥収縮予測フローを示した。フローでは、材料試験を行わずに、乾燥収縮に関わるコンクリートの材料特性を特定する方法についても示した。本方法は、行った検証実験の逆解析結果をもとに作成したもので、単位水量、単位セメント量（高炉スラグを含める）、乾燥開始材令を入力パラメータとして、提案モデル内の材料定数値を決定する簡便な方法である。本研究において提案したモデルは、実用的な問題に対しても十分適用可能であり、コンクリート構造物の耐久性能の合理的な評価、設計体系を構築するための基礎となり得ることを示した。

謝辞

本論文を審査していただきました。主査前川宏一博士（東京大学工学部）、副査岡村甫博士（東京大学工学部）、副査友澤史紀博士（東京大学工学部）、副査魚本健人博士（東京大学生産技術研究所）、副査小沢一雅博士（東京大学工学部）、副査堀宗朗博士（東京大学工学部）に、深く感謝いたします。

岡村甫博士、前川宏一博士、小沢一雅博士には、研究を進めるすべての段階において、学術的知識のみならず、研究の方法論、研究者としての哲学について、多くの貴重なことを学ばせていただきました。友澤史紀博士、魚本健人博士、堀宗朗博士には、研究をまとめるにあたり、貴重な御示唆をいただきました。先生方には、感謝いたしますとともに、今後のより一層の進歩に向けて邁進することを誓う次第であります。

研究を進めるいずれかの段階で、ともに研究を行った、陳丙学氏（元東京大学大学院、現大韓民国鉄道庁）、山宮浩信氏（元東京大学受託研究員、現エヌエムビー）、中島啓行氏（元東京大学工学部学生、現富士銀行）、福留和人氏（元東京大学受託研究員、現間組）、西田德行氏（元東京大学受託研究員、現西松建設）、宇野洋志城氏（元東京大学受託研究員、現佐藤工業）、石田良平氏（元東京大学受託研究員、現熊谷組）、Chaubh Rajesh Prakash 氏（東京大学大学院）、田中哲也氏（元東京大学工学部学生、現日本道路公団）、鈴木俊広氏（東京大学大学院）、片山英治氏（元東京大学工学部学生、現川崎製鉄）、左東有次氏（元東京大学受託研究員、現富士ビー・エス）の諸氏に、ここにあらためて感謝の意を表します。特に、本論文に掲載した実験は、福留和人氏と共同で行ったものであり、氏の高い実験技術に負うところが大きいと考えています。また、水銀圧入法による細孔径分布の測定には、枝松良展氏（東京大学受託研究員、住友セメント）の御協力をいただきました。感謝いたします。

研究を進め、論文をまとめるすべての段階において、田畑和泉様、岸利治氏をはじめとする土木工学科コンクリート研究室の皆様、芳村みどり様をはじめとする総合試験所構造方面研究室の皆様には、絶大な御協力をいただきました。深く感謝いたします。

東京大学工学部土木工学科の先生方、職員の方々には、学生時代、また教職員として加えていただいてからも、常に暖かく接していただき、励ましの言葉をいただきました。著者がこれまで快適で充実した研究生活を送ることができたのは、土木工学科の皆様のおかげであると考えています。心より感謝いたします。

卒業論文を御指導いただいた堀井秀之博士（東京大学工学部）には、研究の魅力を著者にはじめて知らしめ、研究者の道を志す契機を与えていただきました。國島正彦博士（東京大学工学部）、上田多門博士（元東京大学工学部、現北海道大学）には、おりにふれ暖かい励ましの言葉をいただきました。先生方に深甚なる謝意を表します。

本論文は、多くの方々の御支援を得て、著者のこれまでの研究成果をまとめたものではありますが、研究の終点ではなく、むしろ出発点に過ぎません。より高い理想の実現を目指し、自分にしかできない方法で、学術研究を前進させることが、これまでお世話になった方々への最大の恩返しとなると考えています。

付録A. 記号の定義

r	; 細孔半径[m]
$V_{(r)}$; 細孔容積累積分布関数[m ³ /m ³]
$dV_{(r)}/dr$; 細孔容積分布密度関数[m ³ /m ³ ·m]
B	; 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ
C	; 細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ
V_o	; コンクリート単位体積における総細孔容積[m ³ /m ³]
V_G	; コンクリート単位体積における気相の体積[m ³ /m ³]
V_L	; コンクリート単位体積における液相の体積[m ³ /m ³]
w_G	; コンクリート単位体積における気相の質量[kg/m ³]
w_V	; コンクリート単位体積における水蒸気の質量[kg/m ³]
w_A	; コンクリート単位体積における乾燥空気の質量[kg/m ³]
n_G	; コンクリート単位体積における気体の総モル数[mol/m ³]
n_V	; コンクリート単位体積における水蒸気のモル数[mol/m ³]
n_A	; コンクリート単位体積における乾燥空気のモル数[mol/m ³]
M_G	; 水蒸気と混合気体の平均分子量[kg/mol]
M_w	; 水の分子量[kg/mol]
M_A	; 乾燥空気の平均分子量[kg/mol]
ρ_G	; 気相の密度[kg/m ³]
ρ_V	; 水蒸気の密度[kg/m ³]
ρ_A	; 乾燥空気の密度[kg/m ³]
p_G	; 気相の全圧[Pa]
p_V	; 水蒸気分圧[Pa]
p_{VO}	; 飽和水蒸気圧[Pa]
p_V/p_{VO}	; 相対湿度
p_A	; 乾燥空気分圧[Pa]
R	; 気体定数[J/mol·K]
T	; 絶対温度[K]
ρ_L	; 液状水の密度[kg/m ³]
w_L	; コンクリート単位体積における液状水の質量[kg/m ³]
w_{LO}	; 飽水時における液状水量[kg/m ³]
w_t/w_{LO}	; 相対液状水量
p_L	; 液相の圧力[Pa]

γ	; 液体の表面張力[N/m]
r_1	; 界面の主曲率半径[m]
r_2	; 界面の主曲率半径[m]
r	; 毛管の半径[m]
θ	; 液体の接触角[rad]
r_s	; 液状水が存在する最大細孔半径[m]
t	; 時間[s]
J_V	; 水蒸気の質量流束[kg/m ² ·s]
J_L	; 液状水の質量流束[kg/m ² ·s]
ν	; 液状水から水蒸気への相変化速度[kg/m ³ ·s]
v_V	; 水蒸気 velocity [m/s]
v_L	; 液状水 velocity [m/s]
v_A	; 乾燥空気 velocity [m/s]
v_M	; 気相の質量中心速度[m/s]
v_{VM}	; 気相の質量中心に対する水蒸気の相対速度[m/s]
v_{AM}	; 気相の質量中心に対する乾燥空気の相対速度[m/s]
J_{VM}	; 気相の質量中心に対する水蒸気の相対流束[kg/m ² ·s]
J_{AM}	; 気相の質量中心に対する乾燥空気の相対流束[kg/m ² ·s]
J_A	; 乾燥空気の質量流束[kg/m ² ·s]
J_G	; 気相全体の質量流束[kg/m ² ·s]
D_{VO}	; 水蒸気と乾燥空気の相互拡散係数[m ² /s]
K_V	; 水蒸気移動に関する特性を表す材料係数
$v_{L(r)}$; 半径 r の細孔における液状水 velocity [m/s]
K_L	; 液状水移動に関する特性を表す材料係数
μ	; 液状水の粘性係数[Pa·s]
$dJ_{L(r)}/dr$; 半径 r の細孔における液状水の流束の分布密度[kg/m ² ·s·m]
σ_s	; 毛管力に起因する応力[Pa]
A_S	; 毛管力の作用面積の影響を表す係数
e_{sh}	; 乾燥収縮ひずみ
E_S	; 毛管力に起因する応力に対する弾性係数[Pa]
E_0	; 基準となる接線剛性を表すパラメータ
α	; 接線剛性に対する応力の大きさの影響を表すパラメータ
β	; 接線剛性に対する応力増加速度の影響を表すパラメータ
$D_{V(wL)}$; 移動則を液状水量勾配基準で表したときの水蒸気拡散係数[m ² /s]
$D_{L(wL)}$; 移動則を液状水量勾配基準で表したときの液状水拡散係数[m ² /s]

- $D_{(wL)}$; 移動則を液状水量勾配基準で表したときの水分拡散係数[m²/s]
 h ; 勾配が形成される境界相の厚さ[m]
 W ; 単位水量[kg/m³]
 C ; 単位セメント量[kg/m³]
 t_d ; 乾燥開始材令[day]
 ω ; セメントの重量結合水率

付録B. 数値解析プログラムのリスト

```

1000 \DS.BAS*, A
1010 .....
1020 '
1030 '      <<< PROGRAM "DS.BAS" >>>
1040 '
1050 '      角柱供試体の乾燥収縮挙動のシミュレーション
1060 '
1070 '      MATERIAL MODELS ;
1080 '
1090 '      水分移動 ; 気液2相細孔構造モデル
1100 '      乾燥収縮 ; 細孔構造モデル
1110 '
1120 '      COMPUTATIONAL METHOD ;
1130 '
1140 '      水分移動 ; 2次元差分陰解法
1150 '      乾燥収縮 ; 平均含水量から平均ひずみを計算
1160 '
1170 '
1180 '      VERSION HISTORY ;
1190 '
1200 '      1990-1991 ; 線形弾性収縮モデル      by 陳 丙学 & 下村 匠
1210 '      1991-1992 ; 水蒸気拡散水分移動モデル by 下村 匠 & 下村 匠
1220 '      時間依存性収縮モデル      by 福留和人 & 下村 匠
1230 '      1992-1993 ; 気液2相移動水分移動モデル by 下村 匠 & 下村 匠
1240 '      修正時間依存性収縮モデル by 田中哲也 & 下村 匠
1250 '
1260 '      PROGRAMMED BY Takumi SHIMOMURA
1270 '
1280 '      1993.08.16
1290 '
1300 '
1310 '-----
1320 '      MAIN ROUTINE
1330 '-----
1340 '
1350 '      CONSOLE 0,25,0,1
1360 '      SCREEN 3,0,0,1
1370 '      CLS 1
1380 '
1390 '      GOSUB *PREPARE
1400 '      GOSUB *CAL.CON
1410 '      GOSUB *CONST
1420 '      GOSUB *MAT.CON
1430 '      GOSUB *INIT.CON
1440 '      GOSUB *BND.CON
1450 '      CLS 1
1460 '      GOSUB *AXIS
1470 '      GOSUB *MICRO.PORE
1480 '
1490 '      TIM=0:DTIM=DTIMI
1500 '      *ITERATION
1510 '      GOSUB *PLOT.RESULT
1520 '      GOSUB *CAL.W
1530 '      GOSUB *CAL.EPS
1540 '      TIM=TIM+DTIM:DTIM=DTIM*1.2
1550 '      IF TIM<TIMMAX THEN GOTO *ITERATION
1560 '
1570 '      GOSUB *PLOT.RESULT
1580 '      CLOSE #2
1590 '      SCREEN 3,0,0,1
1600 '      INPUT A
1610 '
1620 '      END
1630 '
1640 '-----
1650 '      SUB ROUTINES
1660 '-----
1670 '
1680 '      *PREPARE
1690 '
1700 '      COLOR 4:PRINT "角柱供試体の乾燥収縮のシミュレーション":COLOR 7
1710 '      INPUT "現在描いているグラフを消す (Y/N) ":G$

```

```

1720 IF G$="Y" OR G$="y" THEN CLS 2
1730 '
1740 INPUT "最大計算時間 [day] "; DMAX
1750 IF DMAX=0 THEN DMAX=120
1760 TIMMAX=3600*24*DMAX
1770 DTIMI=3600*2
1780 GOSUB *DISPLAY
1790 '
1800 INPUT "これから描くグラフの色番号 "; COL
1810 IF COL=0 THEN COL=2
1820 INPUT "実験データのファイル名 (プロットしない場合はリターン) "; D1$
1830 INPUT "実験・解析結果出力ファイル名 (作成しない場合はリターン) "; D2$
1840 IF D1$<>" " THEN GOSUB *TEST.DATA
1850 '
1860 RETURN
1870 '
1880 '-----
1890 '
1900 *CAL.CON
1910 '
1920 COLOR 5:PRINT "***** 供試体の断面 *****:COLOR 7
1930 PRINT " 4×4 (cm) ---> (1)"
1940 PRINT " 10×10 (cm) ---> (2)"
1950 PRINT " それ以外 ---> (0)"
1960 INPUT SX
1970 IF SX=1 THEN SIZE=4:DX=.00399
1980 IF SX=2 THEN SIZE=10:DX=.01
1990 IF SX=0 THEN GOSUB *SIZE
2000 '
2010 N=INT(SIZE/100/2/DX)
2020 DX=SIZE/100/2/N :要素の1辺の大きさ [m]
2030 NE=N*N :要素数
2040 '
2050 DIM W(N,N), ZSIG(N,N), ZEPS(N,N), K(NE,NE), X(NE), P(NE)
2060 '
2070 RETURN
2080 '
2090 '-----
2100 '
2110 *SIZE
2120 '
2130 INPUT "1辺の大きさ [cm] "; SIZE
2140 INPUT "要素の大きさ [cm] "; DX
2150 DX=DX/100
2160 IF DX=0 THEN DX=.01
2170 '
2180 RETURN
2190 '
2200 '-----
2210 '
2220 *CONST
2230 '
2240 RHOL=1000 :液状水の密度 [kg/m3]
2250 RG=8.31453 :気体定数 [J/mol·K]
2260 MW=18.02/1000 :水の分子量 [kg/mol]
2270 MU=.00098 :液状水の粘性係数 [Pa·s]
2280 DVO=.000022 :水蒸気と乾燥空気の相互拡散係数 [m2/s]
2290 '
2300 HH=.00075 :表面の境界層の厚さ [m]
2310 '
2320 RETURN
2330 '
2340 '-----
2350 '
2360 *MAT.CON
2370 '
2380 COLOR 5:PRINT "**** 材料定数の入力方法 ****:COLOR 7
2390 PRINT "配合・養生から推定 ---> (1)"
2400 PRINT "個々の定数値の入力 ---> (0)"
2410 INPUT MX
2420 IF MX=1 THEN GOSUB *MAT.CON1 ELSE GOSUB *MAT.CON0
2430 '
2440 RETURN
2450 '
2460 '-----
2470 '

```

```

2480 *MAT.CONO
2490 '
2500 COLOR 5:PRINT ***** 材料定数の入力 (リターンでデフォルト値) *****:COLOR 7
2510 '
2520 INPUT *総細孔容積 Vo [m3/m3] *;VO
2530 IF VO=0 THEN VO=.2
2540 '
2550 INPUT *細孔容積分布密度関数 V(x)=Vo(1-exp(-Br^C)) のパラメータ B *;BB
2560 IF BB=0 THEN BB=20000!
2570 CC=.5
2580 '
2590 INPUT *水蒸気移動の係数 KV *;KV
2600 IF KV=0 THEN KV=.1
2610 INPUT *液状水移動の係数 KL *;KL
2620 IF KL=0 THEN KL=KV/50
2630 '
2640 INPUT *乾燥速度依存型構成式を用いる (Y/N) *;ESS
2650 IF ESS='Y' OR ESS='y' THEN GOTO 2720
2660 INPUT *毛管力に対する弾性係数 ES [MPa] *;EEO
2670 IF EEO=0 THEN EEO=15000
2680 EEO=EEO*1E+06
2690 ALPHA=0 : BETA=0
2700 GOTO 2780
2710 '
2720 INPUT *パラメータ Eo *;EEO
2730 IF EEO=0 THEN EEO=2.7E+06
2740 INPUT *パラメータ α *;ALPHA
2750 IF ALPHA=0 THEN ALPHA=.5
2760 INPUT *パラメータ β *;BETA
2770 IF BETA=0 THEN BETA=.3
2780 '
2790 RETURN
2800 '
2810 -----
2820 '
2830 *MAT.CON1
2840 '
2850 COLOR 5:PRINT ***** 配合、養生の入力 (リターンでデフォルト値) *****:COLOR 7
2860 '
2870 INPUT *単位水量 W [kg/m3] *;UNITW
2880 IF UNITW=0 THEN UNITW=200
2890 INPUT *単位セメント量 C (高炉スラグを含める) [kg/m3] *;UNITC
2900 IF UNITC=0 THEN UNITC=500
2910 INPUT *乾燥開始材令 td [day] *;TD
2920 IF TD=0 THEN TD=7
2930 '
2940 OMEGA=(.061+.054*LOG(TD))*(UNITW/UNITC)^.5 ;セメントの重量結合水率 ω
2950 VO=(UNITW-OMEGA*UNITC)/RHOL ;総細孔量 Vo [m3/m3]
2960 '
2970 BB=(1880+2680*LOG(TD))*(UNITW/UNITC)^(-1.2) ;パラメータ B
2980 CC=.5 ;パラメータ C
2990 '
3000 KV=122*BB^(-.694) ;水蒸気移動の係数 KV
3010 KL=KV/50 ;液状水移動の係数 KL
3020 '
3030 EEO=578*BB^-.338*1E+06 ;毛管力に対する弾性係数 ES
3040 ALPHA=0
3050 BETA=0
3060 '
3070 RETURN
3080 '
3090 -----
3100 '
3110 *INIT.CON
3120 '
3130 WI=VO*RHOL*.9999 ;液状水量の初期値 [kg/m3]
3140 FOR I=1 TO N
3150 FOR J=1 TO N
3160 W(I,J)=WI
3170 NEXT J
3180 NEXT I
3190 '
3200 RETURN
3210 '
3220 -----
3230 '

```

```

3240 *BND.CON
3250 '
3260 COLOR 5:PRINT "環境条件 (リターンでデフォルト値)":COLOR 7
3270 INPUT "真空乾燥 (Y/N) ";SX$
3280 IF SX$="Y" OR SX$="y" THEN TT=20 : RHB=1 : GOTO 3360
3290 COEFF1=3 : KV=KV/COEFF1
3300 COEFF2=3 : KL=KL/COEFF2
3310 COEFF3=2 : EEO=EEO/COEFF3
3320 INPUT "温度 [C] ";TT
3330 INPUT "相对湿度 [%RH] ";RHB
3340 IF RHB<=0 THEN RHB=.001
3350 IF RHB>=100 THEN RHB=99.999
3360 '
3370 GOSUB *CAL.WB
3380 '
3390 RETURN
3400 '
3410 '-----
3420 '
3430 *MICRO.PORE
3440 '
3450 GOSUB *GRAPHO
3460 ZL=LLX
3470 FOR L=LLX TO LX STEP (LX-LLX)/400
3480 R=10*L
3490 DVDR=LOG(10)*VO*BB*CC*R^CC*EXP(-BB*R^CC)
3500 LINE (ZL,-ZVDR)-(L,-DVDR),COL
3510 ZL=L:ZDVDR=DVDR
3520 NEXT L
3530 '
3540 LOCATE 25,2:PRINT USING "Vo = ##### ";VO
3550 LOCATE 25,3:PRINT USING "B = ##### ";BB
3560 LOCATE 25,4:PRINT USING "C = ### ";CC
3570 LOCATE 25,5:PRINT USING "KV = ##### ";KV
3580 LOCATE 25,6:PRINT USING "KL = ##### ";KL
3590 LOCATE 25,7:PRINT USING "Es = ##### ";EEO/1E+06
3600 IF ALPHA<>0 THEN LOCATE 25,7:PRINT USING "Eo = ### ";EEO/1E+06
3610 IF ALPHA<>0 THEN LOCATE 25,8:PRINT USING "α = ### ";ALPHA
3620 IF ALPHA<>0 THEN LOCATE 25,9:PRINT USING "β = ### ";BETA
3630 '
3640 RETURN
3650 '
3660 '-----
3670 '
3680 *CAL.WB
3690 '
3700 GAMMA=(-.1544*TT+75.82)/1000 : 液状水の表面張力 [N/m]
3710 PVO=101325/760*4.6*10^(7.5*TT/(237.3+TT))* .995 : 飽和水蒸気圧 [Pa]
3720 RB=-2*GAMMA/LOG(RHB/100)*MW/RG/(TT+273)/RHOL
3730 WB=RHOL*VO*(1-EXP(-BB*RB^CC)) : 平衡液状水量 [kg/m3]
3740 '
3750 RETURN
3760 '
3770 '-----
3780 '
3790 *CAL.W
3800 '
3810 FOR I=1 TO NE
3820 FOR J=1 TO NE : K(I,J)=0 : NEXT J
3830 F(I)=0 : X(I)=0
3840 NEXT I
3850 '
3860 FOR I=1 TO N
3870 FOR J=1 TO N
3880 GOSUB *K.MATRIX
3890 GOSUB *F.VECTOR
3900 NEXT J
3910 NEXT I
3920 '
3930 GOSUB *SOLUTION
3940 '
3950 FOR I=1 TO N
3960 FOR J=1 TO N
3970 II=N*(I-1)+J
3980 W(I,J)=X(II)
3990 NEXT J

```

```

4000 NEXT I
4010 '
4020 WW=0
4030 FOR I=1 TO N
4040   FOR J=1 TO N
4050     WIJ=W(I,J)
4060     WW=WW+WIJ
4070   NEXT J
4080 NEXT I
4090 WW=WW/NE          : 単位体積あたりの液状水量 [kg/m3]
4100 '
4110 WLOSS=(WI-WW)/1000      : 単位体積あたりの逸散水量 [g/cm3]
4120 '
4130 RETURN
4140 '
4150 '-----
4160 '
4170 *K.MATRIX
4180 '
4190 D1=0:D2=0:D3=0:D4=0
4200 '
4210 IF I=1 THEN WH=(W(I-1,J)+W(I,J))/2 : GOSUB *CAL.D : D1=DV+DL
4220 IF J=1 THEN WH=(W(I,J-1)+W(I,J))/2 : GOSUB *CAL.D : D2=DV+DL
4230 IF I=N THEN WH=(W(I-1,J)+W(I,J))/2 : GOSUB *CAL.D : D3=DV+DL
4240 IF J=N THEN WH=(W(I,J+1)+W(I,J))/2 : GOSUB *CAL.D : D4=DV+DL
4250 IF I=N THEN WH=(W(I,J)+WB)/2 : GOSUB *CAL.D : DB= DV+DL
4260 IF J=N THEN WH=(W(I,J)+WB)/2 : GOSUB *CAL.D : DB= DV+DL
4270 '
4280 II=N*(I-1)+J
4290 '
4300 JJ=N*(I-2)+J
4310 IF I>1 THEN K(II,JJ)=D1
4320 '
4330 JJ=N*(I-1)+J-1
4340 IF J>1 THEN K(II,JJ)=D2
4350 '
4360 JJ=N*I+J
4370 IF I<N THEN K(II,JJ)=D3
4380 '
4390 JJ=N*(I-1)+J+1
4400 IF J<N THEN K(II,JJ)=D4
4410 '
4420 JJ=N*(I-1)+J
4430 K(II,JJ)=- (D1+D2+D3+D4+DX*DX/DTIM)
4440 IF I=N THEN K(II,JJ)=K(II,JJ)-DX/HH*DB
4450 IF J=N THEN K(II,JJ)=K(II,JJ)-DX/HH*DB
4460 '
4470 RETURN
4480 '
4490 '-----
4500 '
4510 *F.VECTOR
4520 '
4530 II=N*(I-1)+J
4540 '
4550 F(II)=-DX*DX/DTIM*W(I,J)
4560 IF I=N THEN F(II)=F(II)-DX/HH*DB*WB
4570 IF J=N THEN F(II)=F(II)-DX/HH*DB*WB
4580 '
4590 RETURN
4600 '
4610 '-----
4620 '
4630 *CAL.D
4640 '
4650 RSH=(-1/BB*LOG(1-WH/RHOL/VO))^ (1/CC)
4660 DWLDRS=RHOL*VO*BB*CC*RSH^ (CC-1) *EXP(-BB*RSH^CC)
4670 DPVDRS=PVO*2*GAMMA*MW/RG/(TT+273)/RHOL/RSH/RSH*EXP(-2*GAMMA*MW/RG/(TT+273)/
RHOL/RSH)
4680 DPVDWL=1/DWLDRS*DPVDRS
4690 DRHOVDWL=MW/RG/(TT+273)*DPVDWL
4700 VG=VO*EXP(-BB*RSH^CC)
4710 DV=KV*VG*DRHOVDWL*DVO*((TT+273)/293)^2
4720 '
4730 DL=KL/4/MU*GAMMA/EXP(-BB*RSH^CC)/RSH^1.5/BB/CC*(24/BB^4-(RSH^2+4/BB*RSH^1.5+
12/BB^2*RSH+24/BB^3*RSH^1.5+24/BB^4)*EXP(-BB*RSH^CC))

```

```

4740 '
4750 RETURN
4760 '
4770 '-----
4780 '
4790 *SOLUTION
4800 '
4810 FOR L=1 TO NE-1
4820   PIV=K(L,L)
4830   FOR J=L+1 TO NE : K(L,J)=K(L,J)/PIV : NEXT J
4840   F(L)=F(L)/PIV
4850   FOR I=L+1 TO NE
4860     Q=K(I,L)
4870     FOR J=L+1 TO NE : K(I,J)=K(I,J)-Q*K(L,J) : NEXT J
4880     F(I)=F(I)-Q*F(L)
4890   NEXT I
4900 NEXT L
4910 '
4920 X(NE)=F(NE)/K(NE,NE)
4930 '
4940 FOR L=NE-1 TO 1 STEP -1
4950   S=F(L)
4960   FOR J=L+1 TO NE : S=S-K(L,J)*X(J) : NEXT J
4970   X(L)=S
4980 NEXT L
4990 '
5000 RETURN
5010 '
5020 '-----
5030 '
5040 *CAL.EPS
5050 '
5060 EPS=0
5070 FOR I=1 TO N
5080   FOR J=1 TO N
5090     RSIJ=(-LOG(1-(W(I,J)/RHOL)/VO)/BB)^(1/CC)
5100     DELTAPIJ=2*GAMMA/RSIJ
5110     SIGIJ=DELTAPIJ*W(I,J)/RHOL
5120     DSIGIJ=SIGIJ-ZSIG(I,J)
5130     EELJ=EEO*(ABS(SIGIJ))^ALPHA*(ABS(DSIGIJ/DTIM))^BETA
5140     DEPSIJ=DSIGIJ/EELJ
5150     EPSIJ=ZEPS(I,J)+DEPSIJ
5160     ZEPS(I,J)=EPSIJ
5170     ZSIG(I,J)=SIGIJ
5180     EPS=EPS+EPSIJ
5190   NEXT J
5200 NEXT I
5210 EPS=EPS/NE
5220 '
5230 RETURN
5240 '
5250 '-----
5260 '
5270 *PLOT.RESULT
5280 '
5290 IF D2$<>" THEN PRINT #2,USING " ##.####,";TIM/24/3600,
5300 IF D2$<>" THEN PRINT #2,USING " ##.####,";WLOSS,
5310 IF D2$<>" THEN PRINT #2,USING " #####";EPS*1E+06
5320 GOSUB *GRAPH1
5330 LINE (ZTIM,-ZWLOSS)-(TIM,-WLOSS),COL
5340 GOSUB *GRAPH2
5350 LINE (ZTIM,-ZEPS)-(TIM,-EPS),COL
5360 GOSUB *GRAPH3
5370 LINE (ZWLOSS,-ZEPS)-(WLOSS,-EPS),COL
5380 ZWLOSS=WLOSS:ZEPS=EPS:ZTIM=TIM
5390 '
5400 RETURN
5410 '
5420 '-----
5430 '
5440 *DISPLAY
5450 '
5460 GOSUB *GRAPH0
5470 GOSUB *FRAME
5480 GOSUB *GRAPH1
5490 GOSUB *FRAME

```

:' 長手方向の平均ひずみ

```

5500 GOSUB *GRAPH2
5510 GOSUB *FRAME
5520 GOSUB *GRAPH3
5530 GOSUB *FRAME
5540 '
5550 RETURN
5560 '
5570 '-----
5580 '
5590 *GRAPH0
5600 '
5610 LX=-2
5620 LLX=-12
5630 LY=.1
5640 LLY=0
5650 '
5660 NX=5
5670 NY=4
5680 '
5690 WINDOW (LLX,-LY)-(LX,-LLY)
5700 VIEW ( 55, 25)-(300,175)
5710 '
5720 RETURN
5730 '
5740 '-----
5750 '
5760 *GRAPH1
5770 '
5780 LX=TIMMAX
5790 LLX=0
5800 LY=.25
5810 LLY=0
5820 '
5830 NX=4
5840 NY=5
5850 '
5860 WINDOW (LLX,-LY)-(LX,-LLY)
5870 VIEW (367, 25)-(612,175)
5880 '
5890 RETURN
5900 '
5910 '-----
5920 '
5930 *GRAPH2
5940 '
5950 LX=TIMMAX
5960 LLX=0
5970 LY=.002
5980 LLY=0
5990 '
6000 NX=4
6010 NY=4
6020 '
6030 WINDOW (LLX,-LY)-(LX,-LLY)
6040 VIEW (367,200)-(612,350)
6050 '
6060 RETURN
6070 '
6080 '-----
6090 '
6100 *GRAPH3
6110 '
6120 LX=.25
6130 LLX=0
6140 LY=.002
6150 LLY=0
6160 '
6170 NX=5
6180 NY=4
6190 '
6200 WINDOW (LLX,-LY)-(LX,-LLY)
6210 VIEW ( 55,200)-(300,350)
6220 '
6230 RETURN
6240 '
6250 '-----

```

```

6260 '
6270 *FRAME
6280 '
6290 FOR I=LLX TO LX STEP (LX-LLX)/NX
6300 LINE (I,-LY)-(I,-LLY),,,&HAAAA
6310 NEXT I
6320 FOR I=-LLY TO -LY STEP -(LY-LLY)/NY
6330 LINE (LX,I)-(LLX,I),,,&HAAAA
6340 NEXT I
6350 LINE (LLX,-LLY)-(LX,-LY),,B
6360 '
6370 RETURN
6380 '
6390 '-----
6400 '
6410 *AXIS
6420 '
6430 LOCATE 5,0:PRINT "DATA FILE ; ";D1$
6440 '
6450 LOCATE 5,11:PRINT "-12  -10  -8  -6 log10(r) (m) "
6460 LOCATE 2, 1:PRINT "0.10"
6470 LOCATE 2, 3:PRINT "(/m)"
6480 LOCATE 2, 6:PRINT "0.05"
6490 LOCATE 2,10:PRINT " 0"
6500 '
6510 TM-TIMMAX/3600/24
6520 LOCATE 45,11:PRINT USING "0  ##  ##  ##, (day)###";TM/4,TM/2,TM/4*3,TM
6530 LOCATE 41, 3:PRINT "0.20"
6540 LOCATE 39, 5:PRINT "(g/cm3)"
6550 LOCATE 41, 7:PRINT "0.10"
6560 LOCATE 41,10:PRINT " 0"
6570 '
6580 LOCATE 45,22:PRINT USING "0  ##  ##  ##, (day)###";TM/4,TM/2,TM/4*3,TM
6590 LOCATE 41,12:PRINT "2000"
6600 LOCATE 41,14:PRINT "(μ)"
6610 LOCATE 41,17:PRINT "1000"
6620 LOCATE 41,21:PRINT " 0"
6630 '
6640 LOCATE 6,22:PRINT "0  0.10  0.20 (g/cm3)"
6650 LOCATE 2,12:PRINT "2000"
6660 LOCATE 2,14:PRINT "(μ)"
6670 LOCATE 2,21:PRINT " 0"
6680 LOCATE 2,17:PRINT "1000"
6690 '
6700 RETURN
6710 '
6720 '-----
6730 '
6740 *TEST.DATA
6750 '
6760 OPEN D1$ FOR INPUT AS #1
6770 IF D2$<>" " THEN OPEN D2$ FOR OUTPUT AS #2
6780 INPUT #1,WEIGHT
6790 INPUT #1,VOLUME
6800 INPUT #1,DWINF
6810 INPUT #1,DSINF
6820 INPUT #1,DN
6830 FOR I=1 TO DN
6840 INPUT #1,DT,DW,DS
6850 IF D2$<>" " THEN PRINT #2,USING " ##.####,";DT,
6860 IF D2$<>" " THEN PRINT #2,USING " ##.####,";DW,
6870 IF D2$<>" " THEN PRINT #2,USING " #####";DS
6880 GOSUB *GRAPH1
6890 CIRCLE (DT*24*3600,-DW),LX/100,COL,,,F,
6900 GOSUB *GRAPH2
6910 CIRCLE (DT*24*3600,-DS/1E+06),LX/100,COL,,,F,
6920 GOSUB *GRAPH3
6930 CIRCLE (DW,-DS/1E+06),LX/100,COL,,,F,
6940 NEXT I
6950 GOSUB *GRAPH3
6960 CIRCLE (DWINF,-DSINF/1E+06),LX/100,COL
6970 CLOSE #1
6980 '
6990 RETURN
7000 '
7010 '-----

```

付録C. 各供試体の実験結果および解析結果

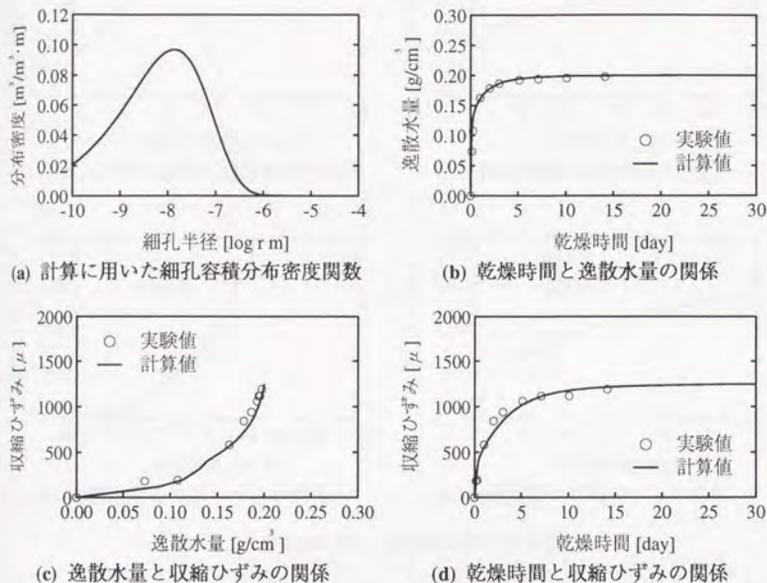
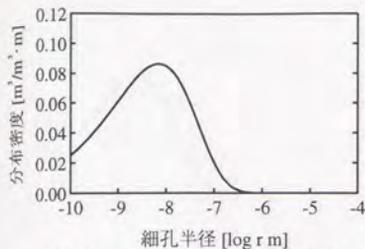


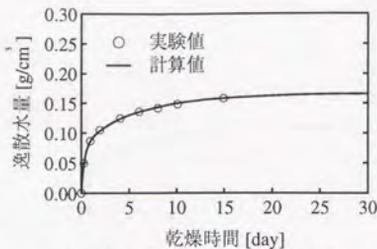
図 C.1 供試体 MS16 の実験結果と解析結果

表 C.1 供試体 MS16 の実験条件および計算に用いた材料定数値

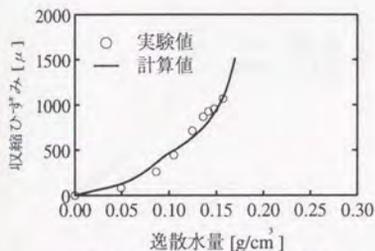
配合 [kg/m ³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
		247	738	40
配合名	MS100 モルタル		供試体寸法	4×4×16[cm]
乾燥開始材令	16時間		乾燥条件	真空乾燥
単位体積中の総細孔容積 V_o [m ³ /m ³]			0.228	
細孔容積分布密度関数のパラメータ B			8600	
細孔容積分布密度関数のパラメータ C			0.5	
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v			0.50	
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L			0.010	
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]			14000	



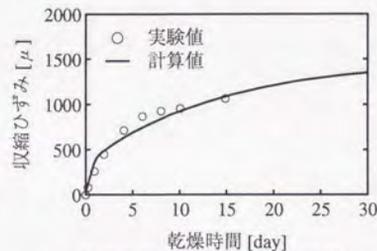
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

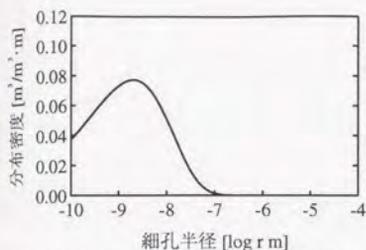


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

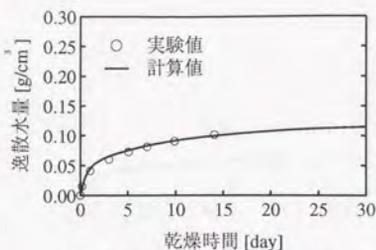
図 C.2 供試体 MS2 の実験結果と解析結果

表 C.2 供試体 MS2 の実験条件および計算に用いた定数値

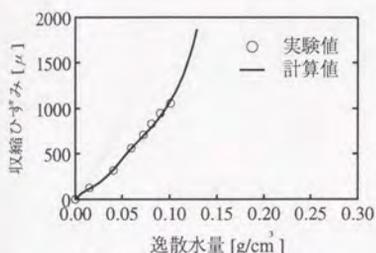
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
		247	738	40
配合名	MS100 モルタル		供試体寸法	4×4×16[cm]
乾燥開始材令	2日		乾燥条件	真空乾燥
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]			0.204	
細孔容積分布密度関数のパラメータ B			12000	
細孔容積分布密度関数のパラメータ C			0.5	
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v			0.15	
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L			0.0030	
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]			14000	



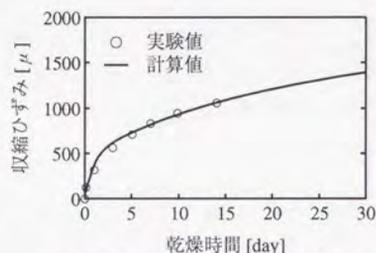
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

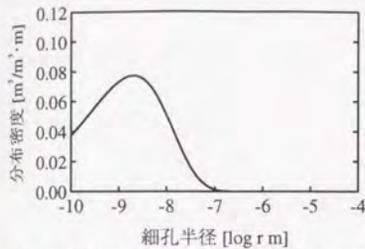


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

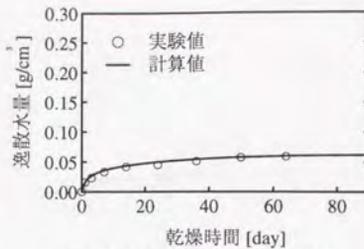
図 C.3 供試体 MS7 の実験結果と解析結果

表 C.3 供試体 MS7 の実験条件および計算に用いた定数値

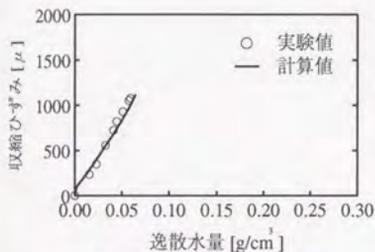
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
	247	738	40	1191
配合名 MS100 <small>モルタル</small>	供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令 7日	乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V_0 [m³/m³]		0.182		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		22200		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v		0.10		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L		0.0020		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]		17000		



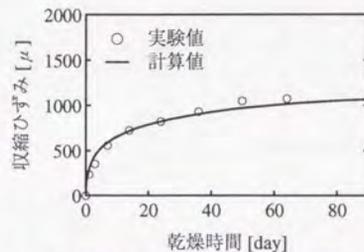
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

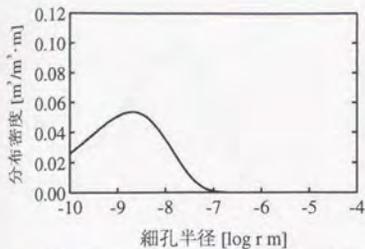


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

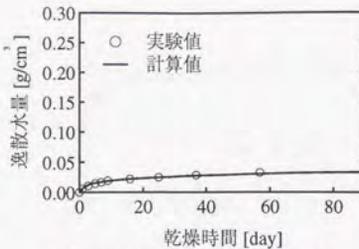
図 C.4 供試体 MSM の実験結果と解析結果

表 C.4 供試体 MSM の実験条件および計算に用いた定数値

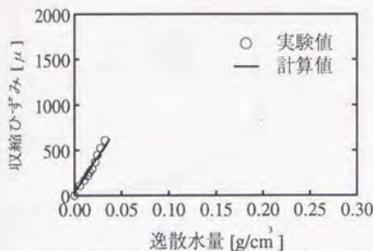
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
	247	738	40	1191
配合名	MS100 モルタル		供試体寸法	4×4×16[cm]
乾燥開始材令	7日		乾燥条件	60%RH (恒温室)
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]		0.182		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		22200		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v		0.030		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L		0.00060		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]		7000		



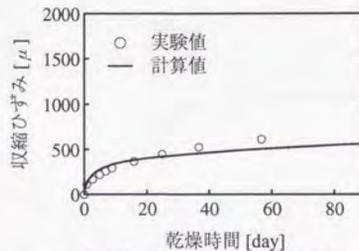
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

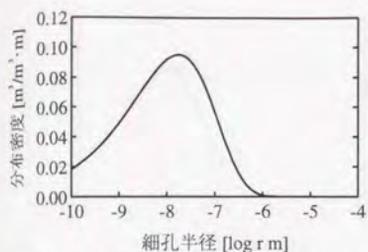


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

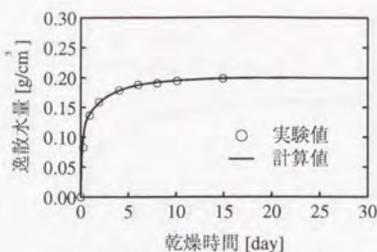
図 C.5 供試体 MSC の実験結果と解析結果

表 C.5 供試体 MSC の実験条件および計算に用いた定数値

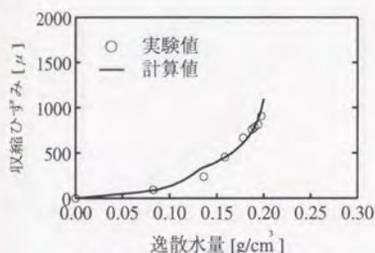
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材	粗骨材
	172	513	28	828	827
配合名	MS100 コンクリート		供試体寸法	10×10×40[cm]	
乾燥開始材令	7日		乾燥条件	60[%RH] (恒温室)	
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]			0.127		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B			22200		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C			0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v			0.040		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L			0.00080		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]			7000		



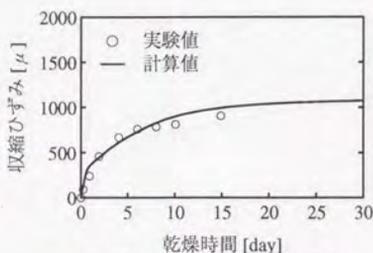
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

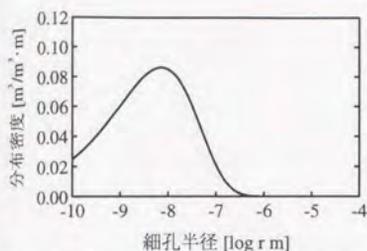


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

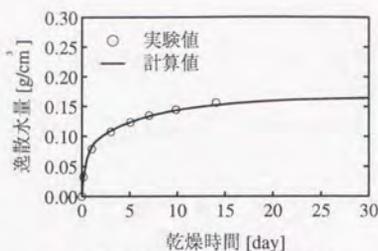
図 C.6 供試体 L72 の実験結果と解析結果

表 C.6 供試体 L72 の実験条件および計算に用いた定数値

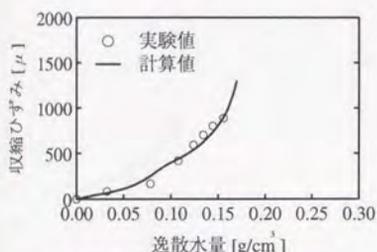
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
	247	443	289	1191
配合名 MS60L740 モルタル	供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令 2日	乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V_0 [m³/m³]		0.225		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		7600		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v		0.25		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L		0.0050		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]		14000		



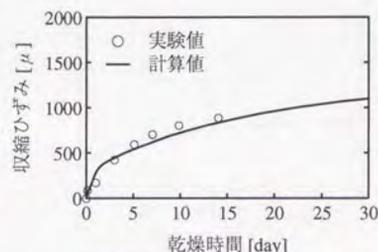
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

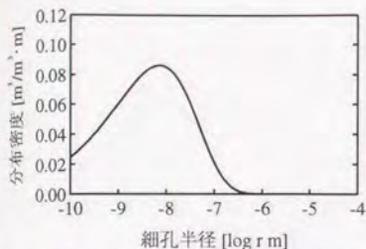


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

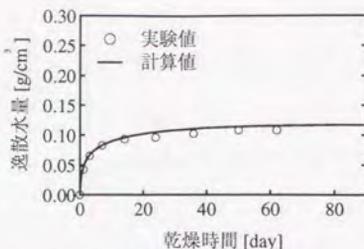
図 C.7 供試体 L77 の実験結果と解析結果

表 C.7 供試体 L77 の実験条件および計算に用いた定数値

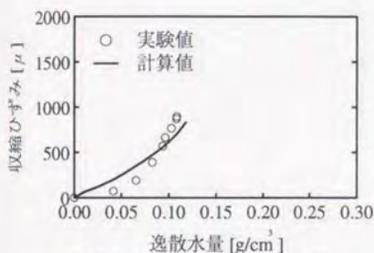
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
		247	443	289
配合名 MS60L740 モルタル	供試体寸法			4×4×16[cm]
乾燥開始材令 7日	乾燥条件			真空乾燥
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]		0.204		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		11800		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v		0.12		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L		0.0024		
毛管力に対する弾性係数 E_g [MPa]		16000		



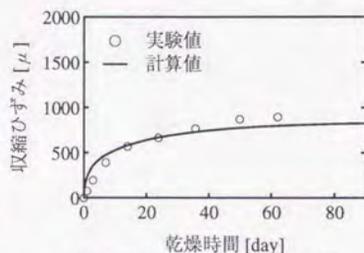
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

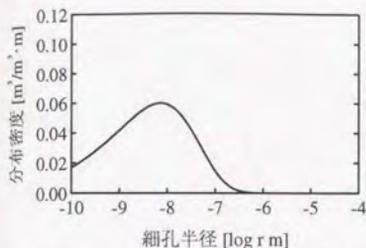


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

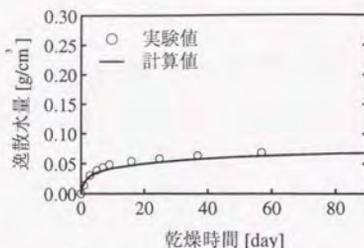
図 C.8 供試体 L7M の実験結果と解析結果

表 C.8 供試体 L7M の実験条件および計算に用いた定数値

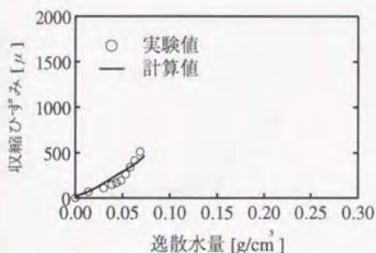
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
		247	443	289
配合名	MS60L740 モルタル		供試体寸法	4×4×16[cm]
乾燥開始材令	7日		乾燥条件	60[%RH]
単位体積中の総細孔容積 V_0 [m³/m³]		0.204		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		11800		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v		0.050		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L		0.0010		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]		7000		



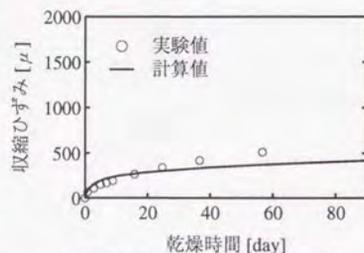
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

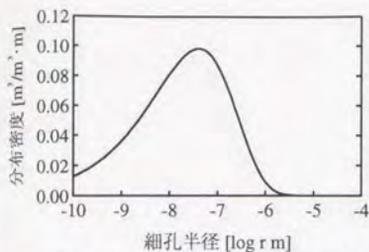


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

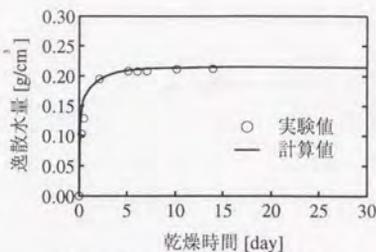
図 C.9 供試体 L7C の実験結果と解析結果

表 C.9 供試体 L7C の実験条件および計算に用いた定数値

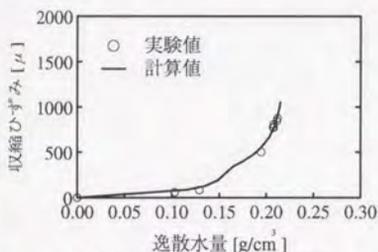
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材	粗骨材
	172	308	201	828	827
配合名	MS60L740 コンクリート		供試体寸法	4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	7日		乾燥条件	60[%RH] (恒温室)	
単位体積中の総細孔容積 V_0 [m³/m³]			0.141		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B			11800		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C			0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v			0.050		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L			0.0010		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]			7000		



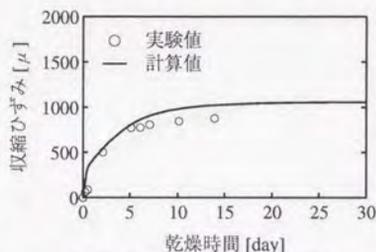
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

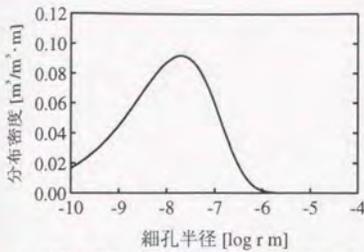


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

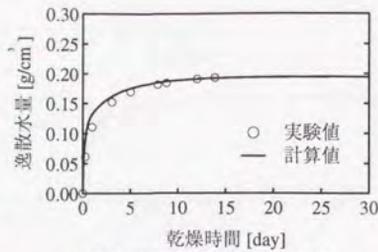
図 C.10 供試体 L42 の実験結果と解析結果

表 C.10 供試体 L42 の実験条件および計算に用いた定数値

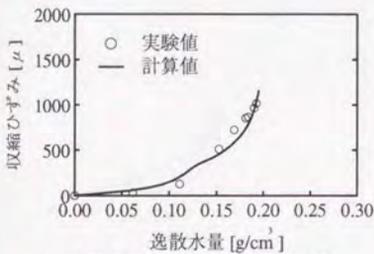
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
		247	295	413
配合名 MS40L460 <small>モルタル</small>	供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令 2日	乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]			0.232	
細孔容積分布密度関数のパラメータ B			5000	
細孔容積分布密度関数のパラメータ C			0.5	
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v			0.30	
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L			0.0060	
毛管力に対する弾性係数 E_g [MPa]			10000	



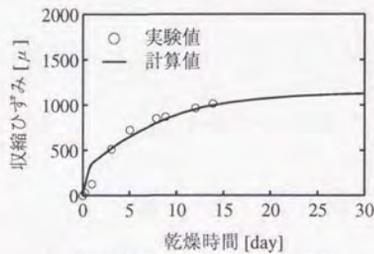
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

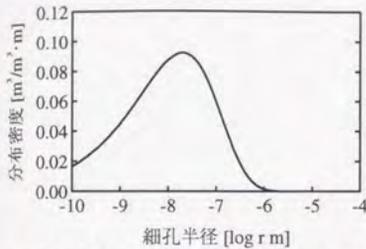


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

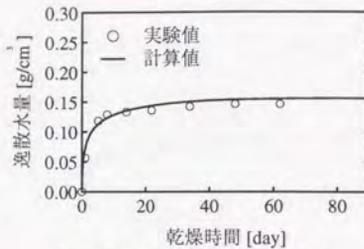
図 C.11 供試体 L47 の実験結果と解析結果

表 C.11 供試体 L47 の実験条件および計算に用いた定数値

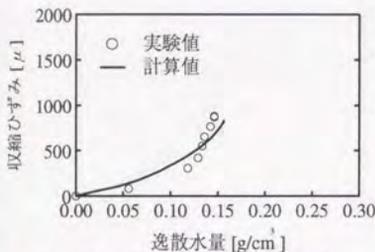
配合 [kg/m³]		水	セメント	石灰粉	細骨材
		247	295	413	1191
配合名	MS40L460 モルタル	供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	7日	乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]			0.218		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B			7100		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C			0.5		
水蒸気移動特性を表す材料係数 K_v			0.20		
液状水移動特性を表す材料係数 K_L			0.0040		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]			12000		



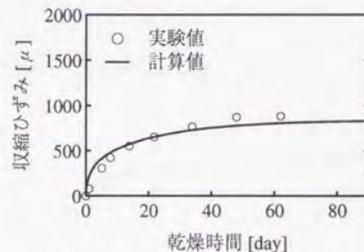
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

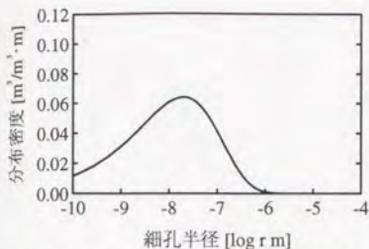


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

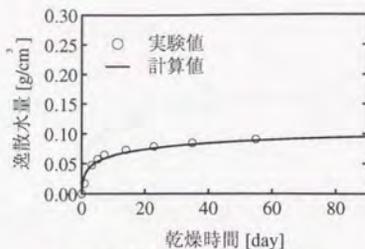
図 C.12 供試体 L4M の実験結果と解析結果

表 C.12 供試体 L4M の実験条件および計算に用いた定数値

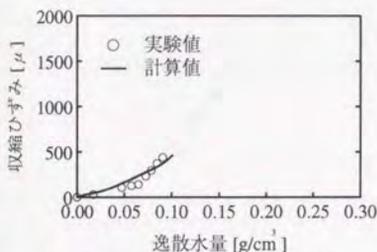
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
	247	295	413	1191
配合名	MS40L460 モデル		供試体寸法	4×4×16[cm]
乾燥開始材令	7日		乾燥条件	60[%RH] (恒温室)
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]			0.218	
細孔容積分布密度関数のパラメータ B			7100	
細孔容積分布密度関数のパラメータ C			0.5	
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v			0.050	
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L			0.0010	
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]			5000	



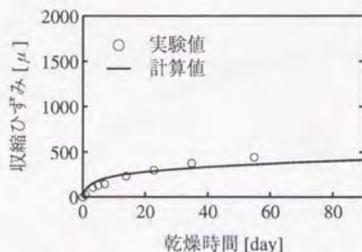
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

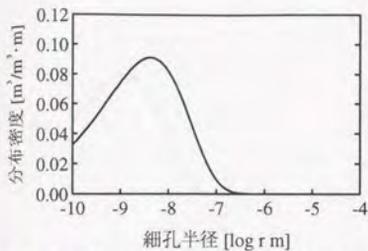


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

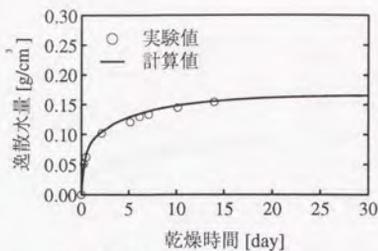
図 C.13 供試体 L4C の実験結果と解析結果

表 C.13 供試体 L4C の実験条件および計算に用いた定数値

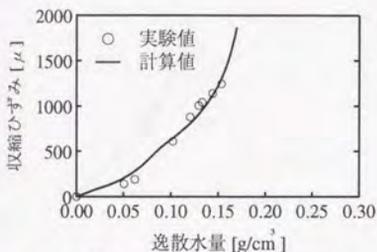
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材	粗骨材
		172	205	287	828
配合名	MS40L460 コンクリート		供試体寸法	10×10×40[cm]	
乾燥開始材令	7日		乾燥条件	60[%RH] (恒温室)	
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]	0.151				
細孔容積分布密度関数のパラメータ B	7100				
細孔容積分布密度関数のパラメータ C	0.5				
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v	0.050				
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L	0.0010				
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]	5000				



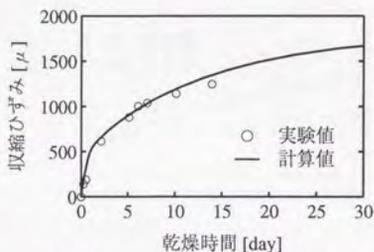
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

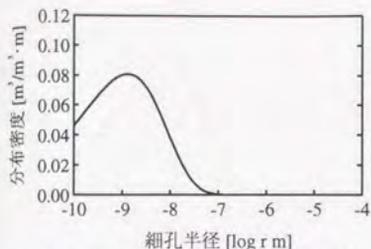


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

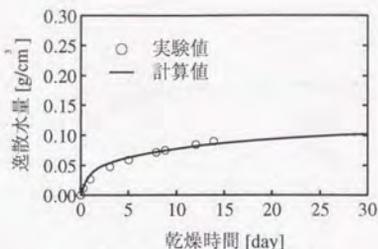
図 C.14 供試体 S62 の実験結果と解析結果

表 C.14 供試体 S62 の実験条件および計算に用いた定数値

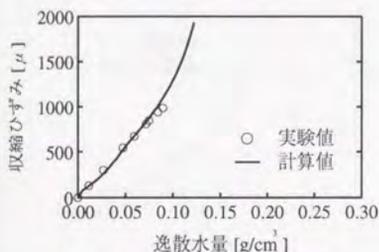
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	スラグ*	細骨材
	247	443	24	288	1191
配合名	MS60S640 モルタル		供試体寸法	4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	2日		乾燥条件	真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]			0.215		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B			15400		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C			0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v			0.18		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L			0.0036		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]			15000		



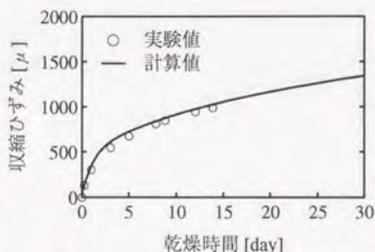
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

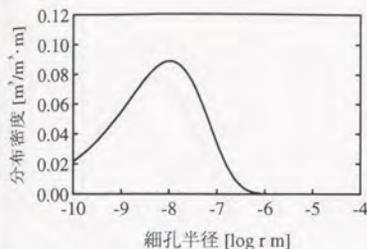


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

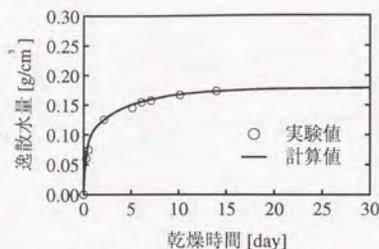
図 C.15 供試体 S67 の実験結果と解析結果

表 C.15 供試体 S67 の実験条件および計算に用いた定数値

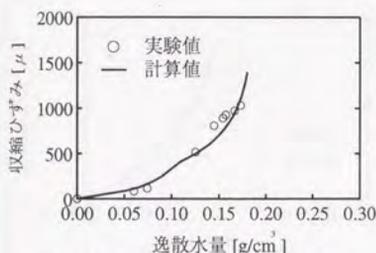
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	スラグ*	細骨材
	247	443	24	288	1191
配合名	MS60S640 モルタル		供試体寸法	4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	7日		乾燥条件	真空乾燥	
単体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]			0.191		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B			27700		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C			0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v			0.080		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L			0.0016		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]			20000		



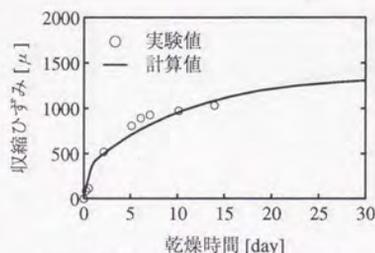
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

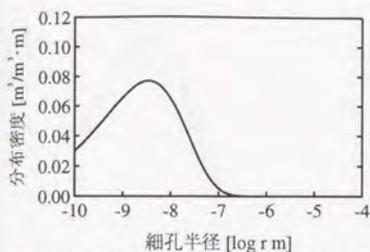


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

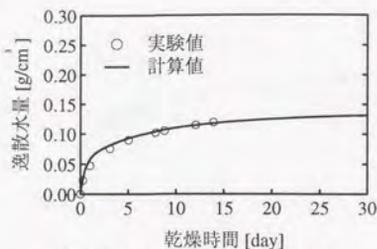
図 C.16 供試体 OP2 の実験結果と解析結果

表 C.16 供試体 OP2 の実験条件および計算に用いた定数値

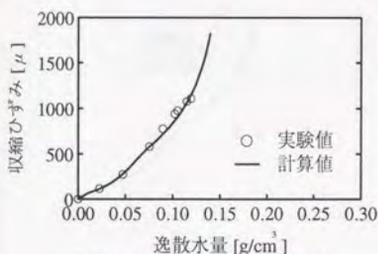
配合 [kg/m³]		水	セメント	細骨材
		250	455	1407
配合名	OPC モルタル	供試体寸法 4×4×16[cm]		
乾燥開始材令	2日	乾燥条件 真空乾燥		
単位体積中の総細孔容積 V_0 [m³/m³]		0.209		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		9800		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v		0.18		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_l		0.0036		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]		13000		



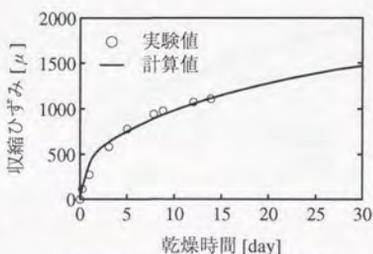
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

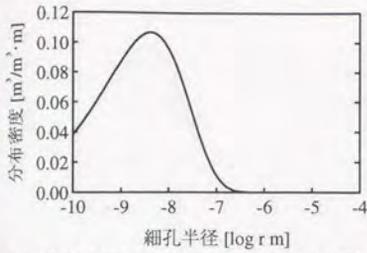


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

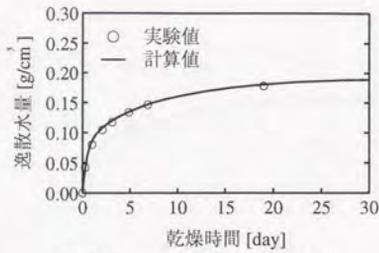
図 C.17 供試体 OP7 の実験結果と解析結果

表 C.17 供試体 OP7 の実験条件および計算に用いた定数値

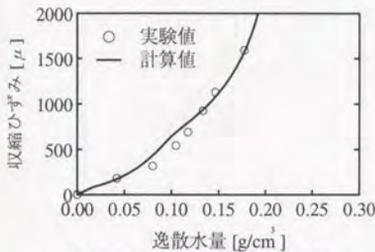
配合 [kg/m³]		水	セメント	細骨材
		250	455	1407
配合名	OPC モルタル	供試体寸法 4×4×16[cm]		
乾燥開始材令	7日	乾燥条件 真空乾燥		
単体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]		0.182		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		17000		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v		0.12		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L		0.0024		
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]		14000		



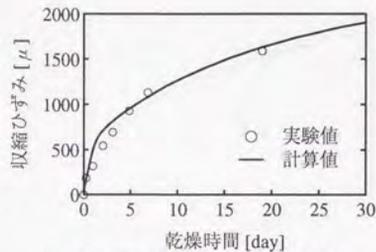
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

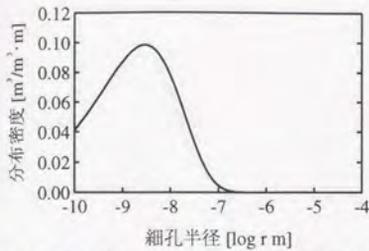


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

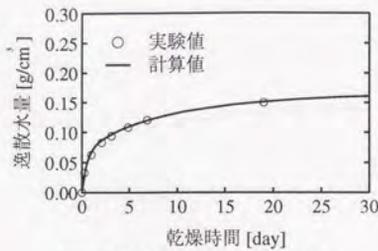
図 C.18 供試体 S5P10 の実験結果と解析結果

表 C.18 供試体 S5P10 の実験条件および計算に用いた定数値

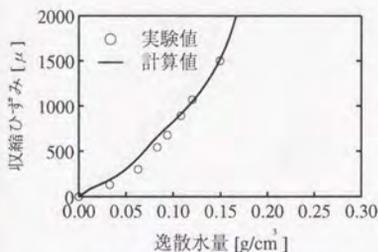
配合 [kg/m³]		水	セメント	細骨材
		325	1030	917
配合名	S/S _{min} =50, V _w /V _p =100	供試体寸法		4×4×16[cm]
乾燥開始材令	2日	乾燥条件		真空乾燥
単位体積中の総細孔容積 V ₀ [m³/m³]		0.253		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		15400		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v		0.12		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _l		0.0024		
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]		14000		



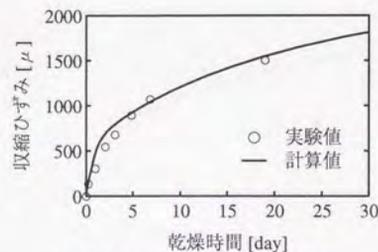
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

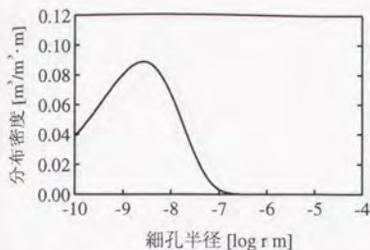


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

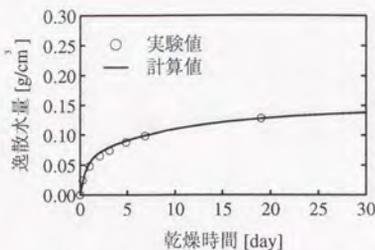
図 C.19 供試体 S5P9 の実験結果と解析結果

表 C.19 供試体 S5P9 の実験条件および計算に用いた定数値

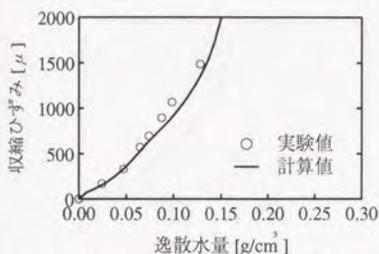
配合 [kg/m³]		水	セメント	細骨材
		308	1084	917
配合名	S/S _{lim} 50, V _w /V _p 90	供試体寸法 4×4×16[cm]		
乾燥開始材令	2日	乾燥条件 真空乾燥		
単体積中の総細孔容積 V _o [m³/m³]		0.232		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		18500		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v		0.11		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _L		0.0022		
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]		15000		



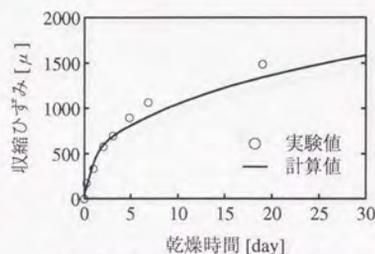
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

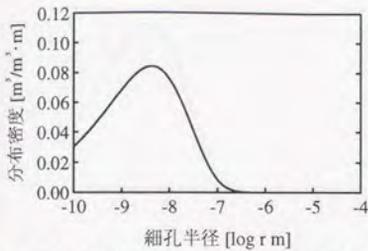


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

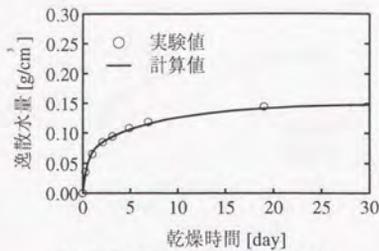
図 C.20 供試体 S5P8 の実験結果と解析結果

表 C.20 供試体 S5P8 の実験条件および計算に用いた定数値

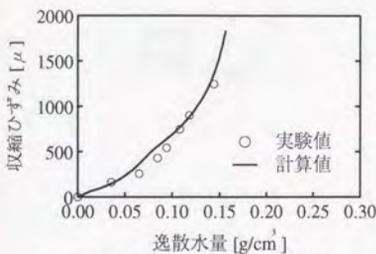
配合 [kg/m³]		水	セメント	細骨材
		289	1144	917
配合名	S/S _{lim} 50, V _w /V _p 80	供試体寸法 4×4×16[cm]		
乾燥開始材令	2日	乾燥条件 真空乾燥		
単位体積中の総細孔容積 V _o [m³/m³]		0.209		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		19500		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v		0.090		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _l		0.0018		
毛管力に対する弾性係数 E _g [MPa]		15000		



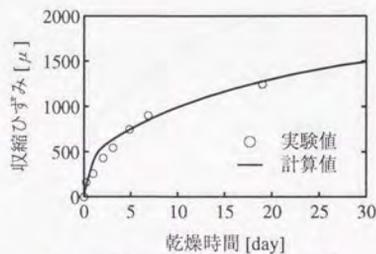
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

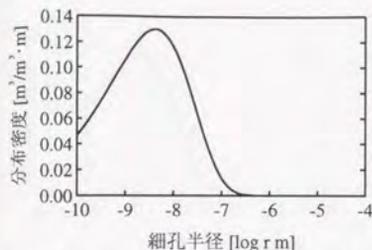


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

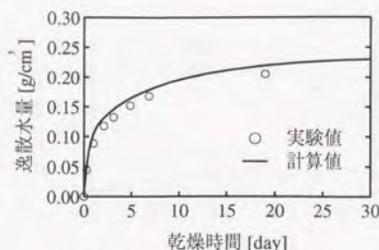
図 C.21 供試体 S7P10 の実験結果と解析結果

表 C.21 供試体 S7P10 の実験条件および計算に用いた定数値

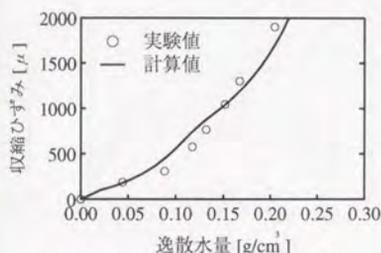
配合 [kg/m³]		水	セメント	細骨材
		255	808	1284
配合名	S/S _m 70,V _w /V _p 100	供試体寸法 4×4×16[cm]		
乾燥開始材令	2日	乾燥条件 真空乾燥		
単体積中の総細孔容積 V _o [m³/m³]		0.198		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		15400		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v		0.12		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _l		0.0024		
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]		14000		



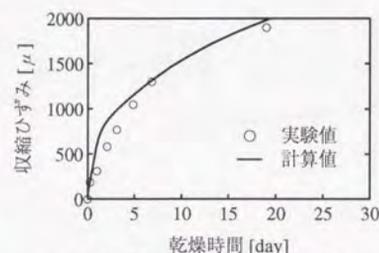
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

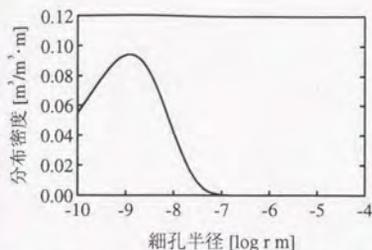


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

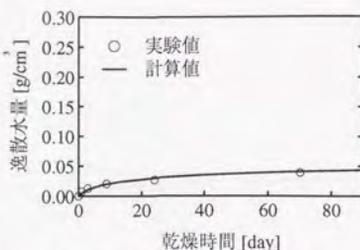
図 C.22 供試体 S3P10 の実験結果と解析結果

表 C.22 供試体 S3P10 の実験条件および計算に用いた定数値

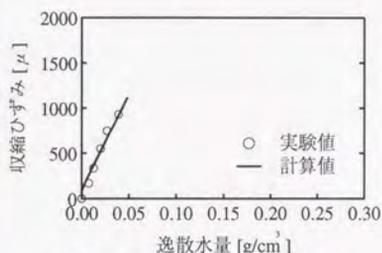
配合 [kg/m³]		水	セメント	細骨材
		395	1252	550
配合名	S/S _{im} 30, V _w /V _p 100	供試体寸法 4×4×16[cm]		
乾燥開始材令	2日	乾燥条件 真空乾燥		
単位体積中の総細孔容積 V _o [m³/m³]		0.307		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		15400		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v		0.12		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _L		0.0024		
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]		14000		



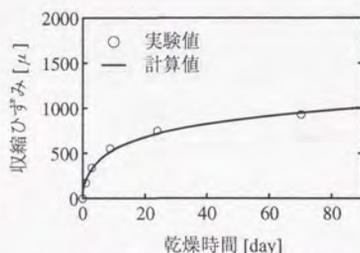
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

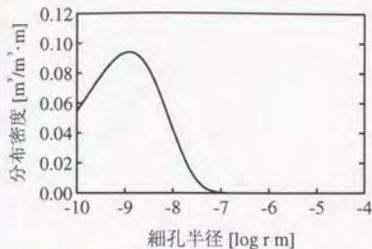


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

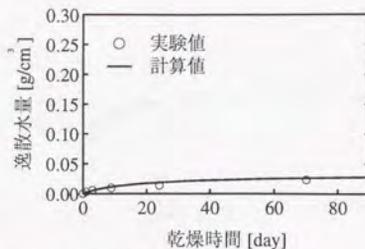
図 C.23 供試体 S5P10S の実験結果と解析結果

表 C.23 供試体 S5P10S の実験条件および計算に用いた定数値

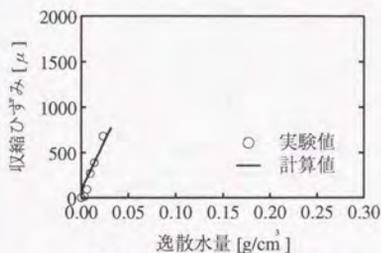
配合 [kg/m³]		水	セメント	細骨材
		325	1030	917
配合名	S/S _{lim} 50, V _w /V _f 100	供試体寸法 4×4×16[cm]		
乾燥開始材令	34日	乾燥条件 60[%RH] (恒温恒湿槽)		
単位体積中の総細孔容積 V ₀ [m³/m³]		0.222		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		28500		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v		0.0075		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _L		0.00015		
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]		8000		



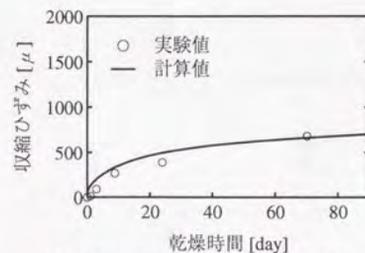
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

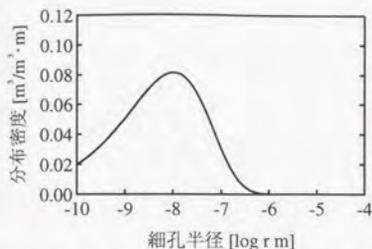


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

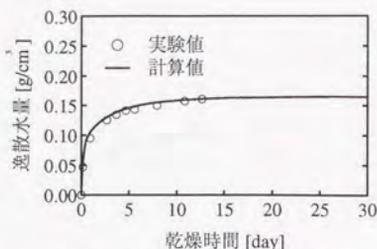
図 C.24 供試体 S5P10L の実験結果と解析結果

表 C.24 供試体 S5P10L の実験条件および計算に用いた定数値

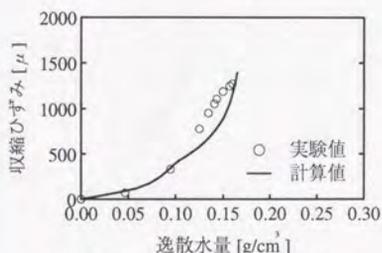
配合 [kg/m³]		水	セメント	細骨材
		325	1030	917
配合名	S/S _m 50, V _w /V _p 100	供試体寸法		10×10×40[cm]
乾燥開始材令	34日	乾燥条件		60[%RH] (恒温恒湿槽)
単位体積中の総細孔容積 V _o [m³/m³]		0.222		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		28500		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v		0.0075		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _l		0.00015		
毛管力に対する弾性係数 E _g [MPa]		8000		



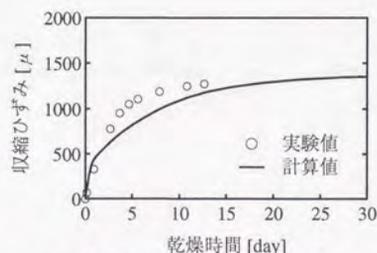
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

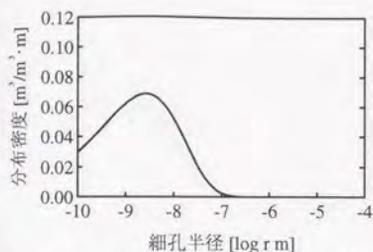


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

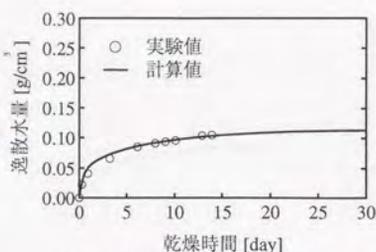
図 C.25 供試体 G02 の実験結果と解析結果

表 C.25 供試体 G02 の実験条件および計算に用いた定数値

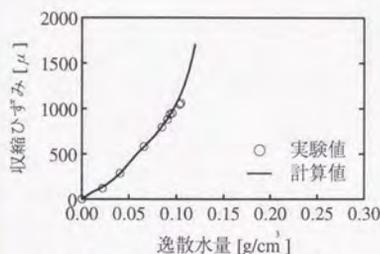
配合 [kg/m³]	水	セメント	スラク*	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		234	264	241	242	1231
配合名	G/G _{im} 0			供試体寸法	4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	2日			乾燥条件	真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V ₀ [m³/m³]				0.192		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B				9900		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C				0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v				0.25		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _l				0.0050		
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]				12000		



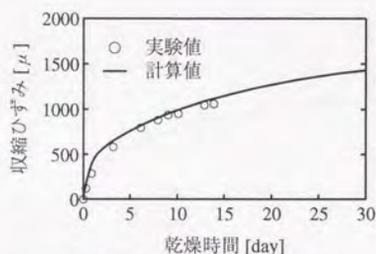
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

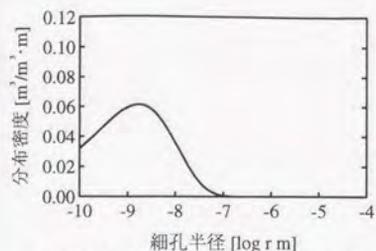


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

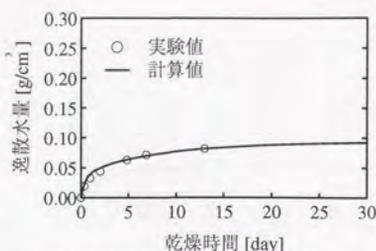
図 C.26 供試体 G07 の実験結果と解析結果

表 C.26 供試体 G07 の実験条件および計算に用いた定数値

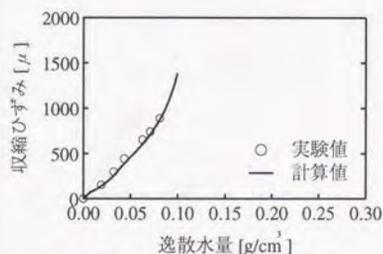
配合 [kg/m³]	水	セメント	スラグ	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		234	264	241	242	1231
配合名	G/G _{im} 0			供試体寸法	4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	7日			乾燥条件	真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V _o [m³/m³]					0.162	
細孔容積分布密度関数のパラメータ B					19400	
細孔容積分布密度関数のパラメータ C					0.5	
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v					0.15	
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _L					0.0030	
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]					15000	



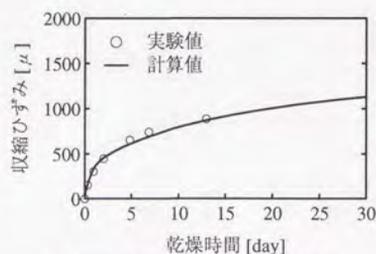
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

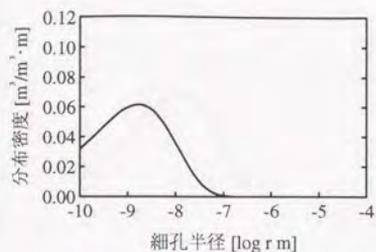


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

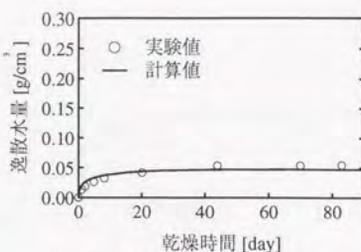
図 C.27 供試体 G015 の実験結果と解析結果

表 C.27 供試体 G015 の実験条件および計算に用いた定数値

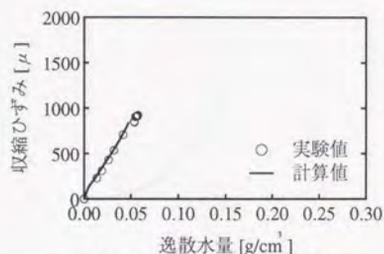
配合 [kg/m³]	水	セメント	スラグ	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		234	264	241	242	1231
配合名	G/G _{im} 0		供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	15日		乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]					0.145	
細孔容積分布密度関数のパラメータ B					24300	
細孔容積分布密度関数のパラメータ C					0.5	
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v					0.15	
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L					0.0030	
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]					20000	



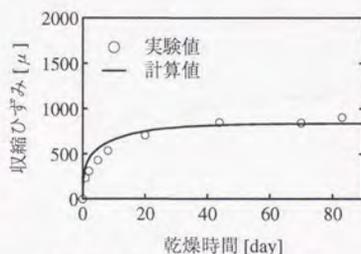
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

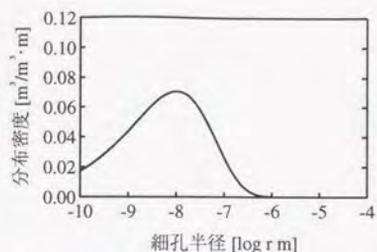


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

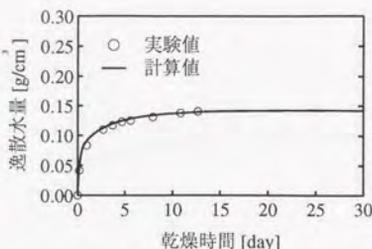
図 C.28 供試体 G015N の実験結果と解析結果

表 C.28 供試体 G015N の実験条件および計算に用いた定数値

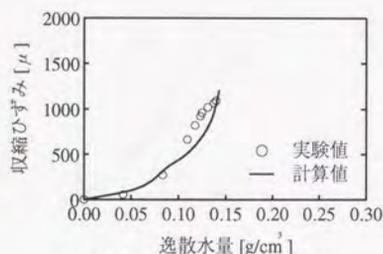
配合 [kg/m³]	水	セメント	スラック	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		234	261	241	242	1231
配合名	G/G _{lim} 0		供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	15日		乾燥条件		60[%RH] (恒温恒湿槽)	
単位体積中の総細孔容積 V _o [m³/m³]					0.145	
細孔容積分布密度関数のパラメータ B					24300	
細孔容積分布密度関数のパラメータ C					0.5	
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v					0.10	
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _L					0.0020	
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]					8000	



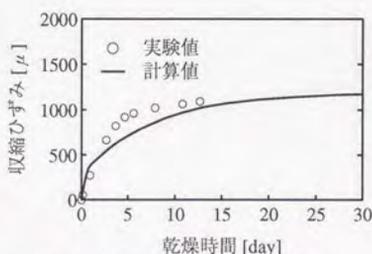
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

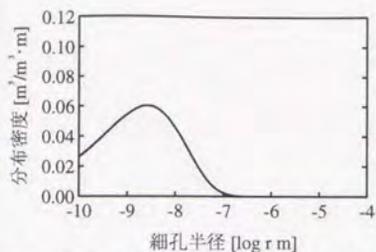


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

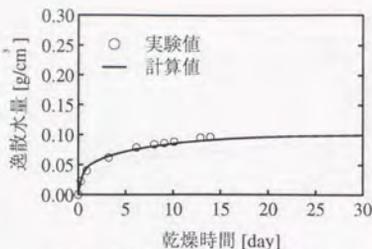
図 C.29 供試体 G252 の実験結果と解析結果

表 C.29 供試体 G252 の実験条件および計算に用いた定数値

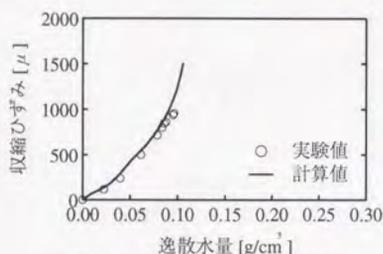
配合 [kg/m³]	水	セメント	スラグ	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		198	220	203	204	1045
配合名	G/G _m 25		供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	2日		乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V _o [m³/m³]					0.166	
細孔容積分布密度関数のパラメータ B					9900	
細孔容積分布密度関数のパラメータ C					0.5	
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v					0.25	
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _L					0.0050	
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]					12000	



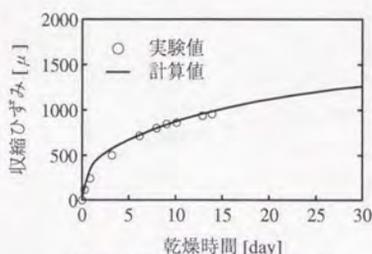
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

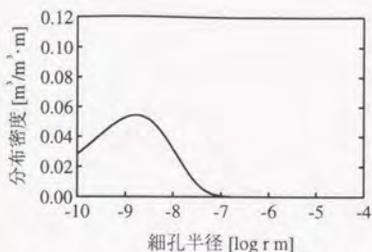


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

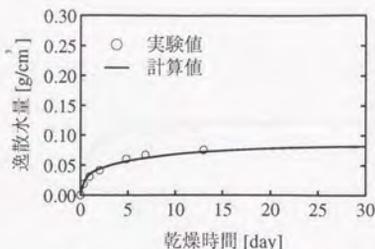
図 C.30 供試体 G257 の実験結果と解析結果

表 C.30 供試体 G257 の実験条件および計算に用いた定数値

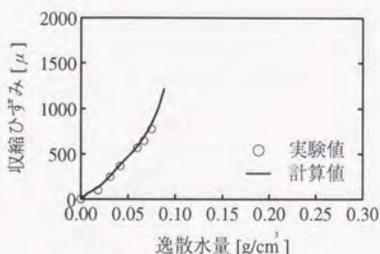
配合 [kg/m³]	水	セメント	スラグ	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		198	220	203	204	1045
配合名	G/G _{im} -25		供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	7日		乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V_p [m³/m³]					0.142	
細孔容積分布密度関数のパラメータ B					19400	
細孔容積分布密度関数のパラメータ C					0.5	
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v					0.15	
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L					0.0030	
毛管力に対する弾性係数 E_s [MPa]					15000	



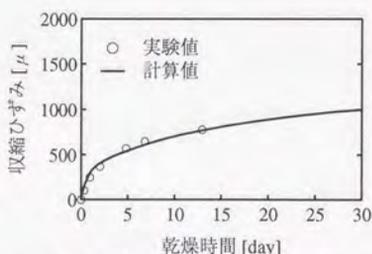
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

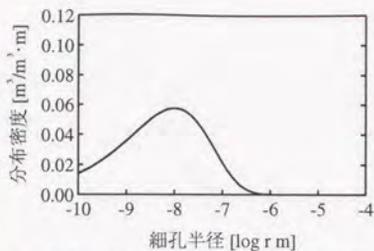


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

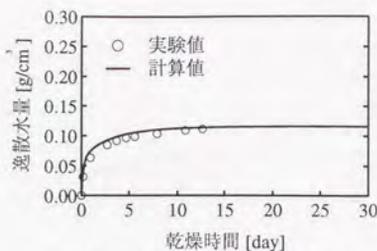
図 C.31 供試体 G2515 の実験結果と解析結果

表 C.31 供試体 G2515 の実験条件および計算に用いた定数値

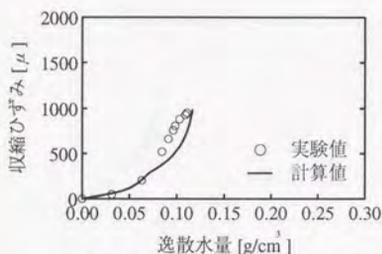
配合 [kg/m³]	水	セメント	スラグ	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		198	220	203	204	1045
配合名	G/G _{lim} 25		供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	15日		乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]				0.128		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B				24300		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C				0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v				0.15		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L				0.0030		
毛管力に対する弾性係数 E_g [MPa]				20000		



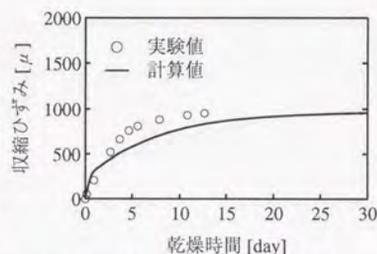
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

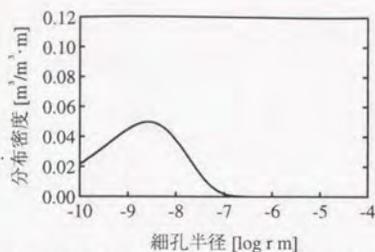


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

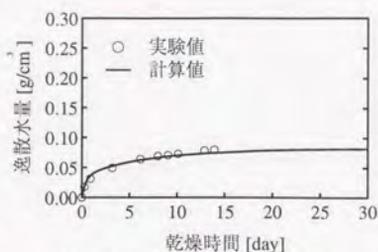
図 C.32 供試体 G502 の実験結果と解析結果

表 C.32 供試体 G502 の実験条件および計算に用いた定数値

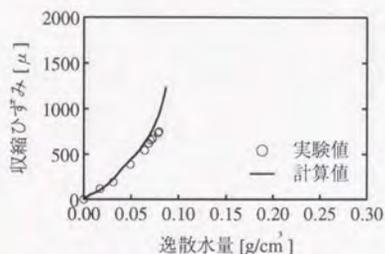
配合 [kg/m³]	水	セメント	スラク	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		161	180	166	166	862
配合名	G/G _{lim} 50		供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	2日		乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V ₀ [m³/m³]				0.136		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B				9900		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C				0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v				0.25		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _l				0.0050		
毛管力に対する弾性係数 E _g [MPa]				12000		



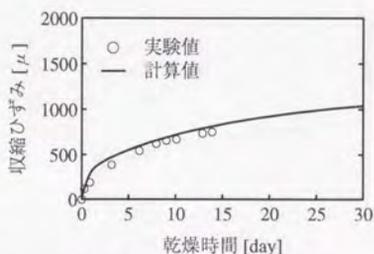
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

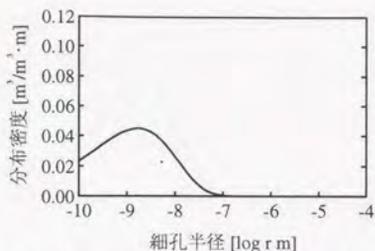


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

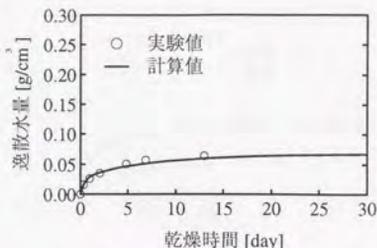
図 C.33 供試体 G507 の実験結果と解析結果

表 C.33 供試体 G507 の実験条件および計算に用いた定数値

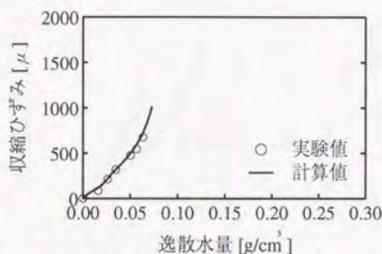
配合 [kg/m³]	水	セメント	スラク*	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		161	180	166	166	862
配合名	G/G _m -50		供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	7日		乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V _o [m³/m³]				0.117		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B				19400		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C				0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v				0.15		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _L				0.0030		
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]				15000		



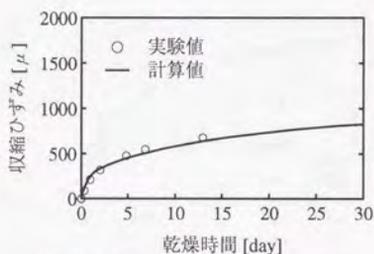
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

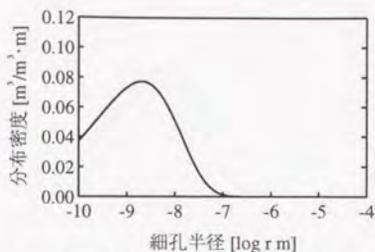


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

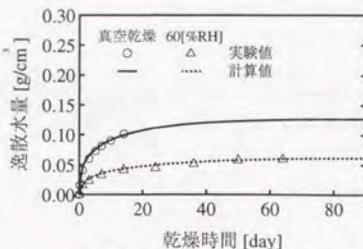
図 C.34 供試体 G5015 の実験結果と解析結果

表 C.34 供試体 G5015 の実験条件および計算に用いた定数値

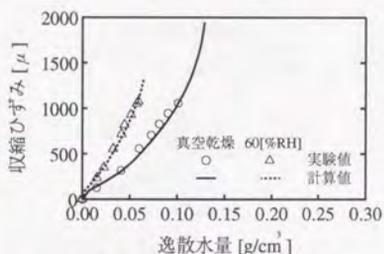
配合 [kg/m³]	水	セメント	スラグ	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		161	180	166	166	862
配合名	G/G _{lim} 50		供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	15日		乾燥条件		真空乾燥	
単位体積中の総細孔容積 V ₀ [m³/m³]				0.106		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B				24300		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C				0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v				0.15		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _L				0.0030		
毛管力に対する弾性係数 E _s [MPa]				20000		



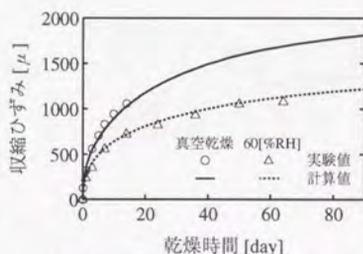
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

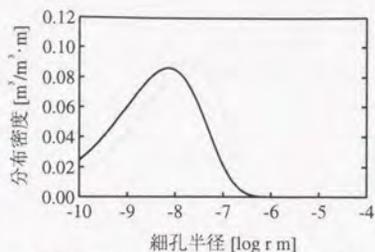


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

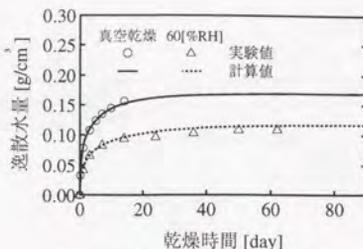
図 C.35 乾燥速度依存型構成式を用いた解析 (供試体 MS7, MSM)

表 C.35 供試体 MS7, MSM の実験条件および計算に用いた定数値

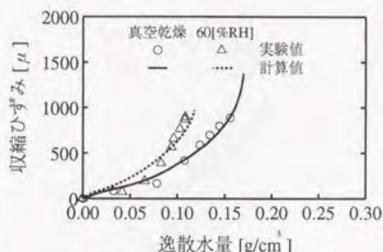
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
	247	738	40	1191
配合名	MS100 モルタル		供試体寸法	4×4×16[cm]
乾燥開始材令	7日		乾燥条件	真空乾燥 (MS7) 60[%RH] (MSM)
単位体積中の総細孔容積 V_o [m³/m³]		0.182		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		22200		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v		0.10 (MS7), 0.030 (MSM)		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L		0.0020 (MS7), 0.00060 (MSM)		
毛管力と乾燥収縮の関係式中の諸定数		$E_o=2.5, \alpha=0.5, \beta=0.3$		



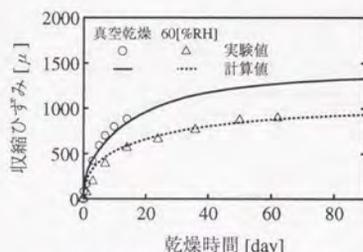
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

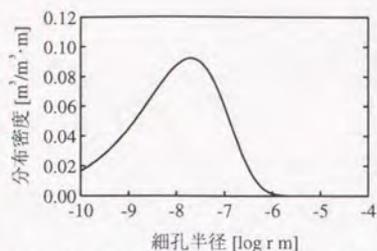


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

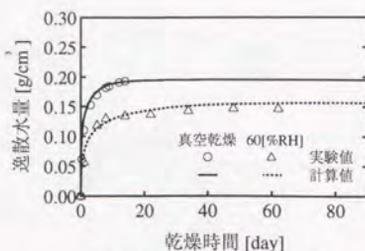
図 C.36 乾燥速度依存型構成式を用いた解析 (供試体 L77, L7M)

表 C.36 供試体 L77, L7M の実験条件および計算に用いた定数値

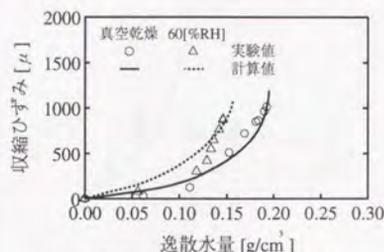
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
	247	443	289	1191
配合名 MS60L740 モルタル	供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令 7日	乾燥条件		真空乾燥 (L77) 60[%RH] (L7M)	
単位体積中の総細孔容積 V_0 [m³/m³]		0.206		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B		11800		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C		0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v		0.12 (L77), 0.050 (L7M)		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L		0.0024 (L77), 0.0010 (L7M)		
毛管力と乾燥収縮の関係式中の諸定数		$E_0=3.0, \alpha=0.5, \beta=0.3$		



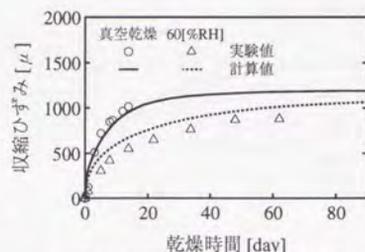
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

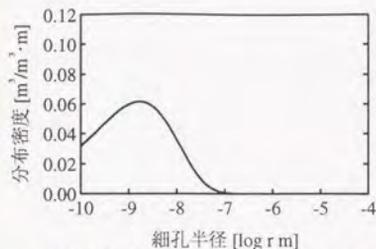


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

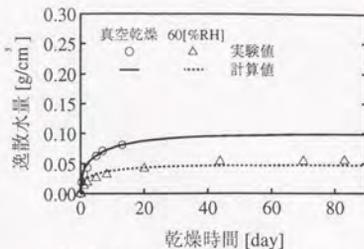
図 C.37 乾燥速度依存型構成式を用いた解析 (供試体 L47, L4M)

表 C.37 供試体 L47, L4M の実験条件および計算に用いた定数値

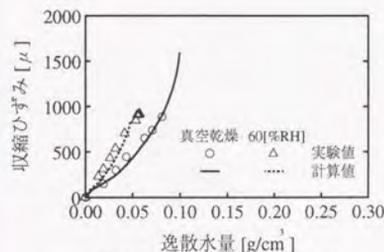
配合 [kg/m³]	水	セメント	石灰粉	細骨材
	247	295	413	1191
配合名 MS40L460 モルタル	供試体寸法		4×4×16[cm]	
乾燥開始材令 7日	乾燥条件		真空乾燥 (L47) 60[%RH] (L4M)	
単位体積中の総細孔容積 V_0 [m³/m³]	0.218			
細孔容積分布密度関数のパラメータ B	7100			
細孔容積分布密度関数のパラメータ C	0.5			
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v	0.20 (L47), 0.050 (L4M)			
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_L	0.0040 (L47), 0.0010 (L4M)			
毛管力と乾燥収縮の関係式中の諸定数	$E_0=2.5, \alpha=0.5, \beta=0.3$			



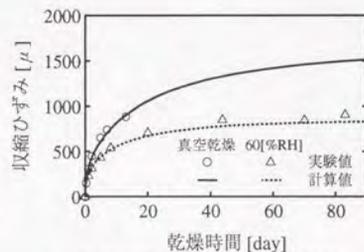
(a) 計算に用いた細孔容積分布密度関数



(b) 乾燥時間と逸散水量の関係



(c) 逸散水量と収縮ひずみの関係

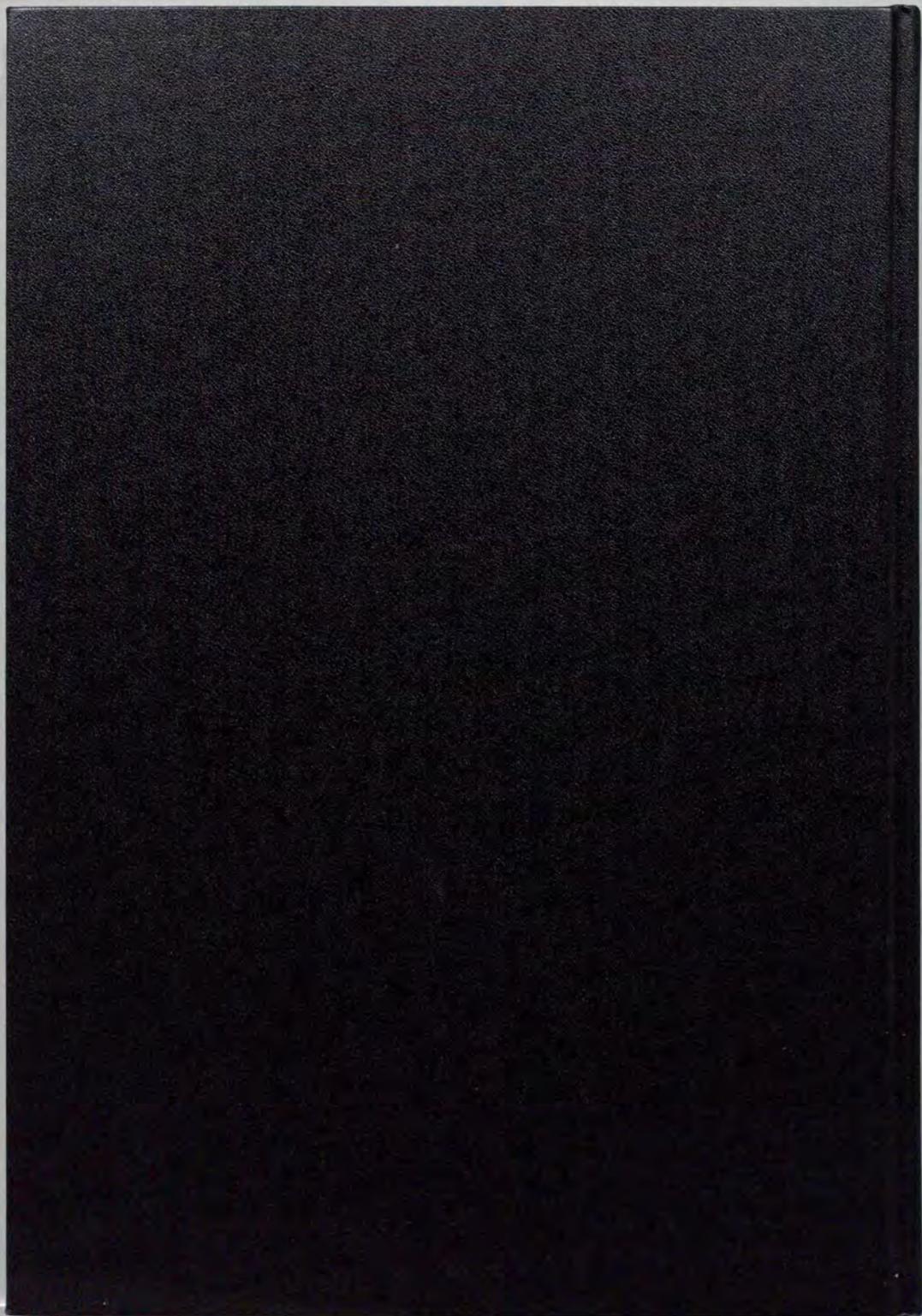


(d) 乾燥時間と収縮ひずみの関係

図 C.38 乾燥速度依存型構成式を用いた解析 (供試体 G015, G015N)

表 C.38 供試体 G015, G015N の実験条件および計算に用いた定数値

配合 [kg/m³]	水	セメント	スラグ	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
		234	261	241	242	1231
配合名	G/G _m 0			供試体寸法	4×4×16[cm]	
乾燥開始材令	15日			乾燥条件	真空乾燥 (G015) 60[%RH] (G015N)	
単位体積中の総細孔容積 V ₀ [m³/m³]				0.145		
細孔容積分布密度関数のパラメータ B				24300		
細孔容積分布密度関数のパラメータ C				0.5		
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K _v				0.15 (G015), 0.10 (G015N)		
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K _L				0.0030 (G015), 0.0020 (G015N)		
毛管力と乾燥収縮の関係式中の諸定数				E _σ =2.7, α=0.5, β=0.3		





Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Kodak Gray Scale

C Y M

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

© Kodak, 2007 TM, Kodak