

博士論文

膨張材併用軽量コンクリートの道路橋床版への
適用に向けた実験的研究

岸田 政彦

Masahiko KISHIDA

論文の内容の要旨

論文題目 膨張材併用軽量コンクリートの道路橋床版への適用に向けた実験的研究

Experimental study on application of lightweight concrete
with expansive additive to Road Bridge deck slabs

岸田 政彦

土木分野の現場打ちコンクリートとして軽量コンクリートは一般的でないが、道路橋床版に軽量 RC 床版を使用することができれば、上部工の死荷重低減に伴い下部工に対する耐震上の負荷軽減効果が極めて大きく、橋梁全体として大幅なコスト削減が期待できる。しかし、相対的に単位水量が大きくスランプが 20cm 程度のコンクリートを使用する建築分野では軽量コンクリートが一般的に使用され相当数の施工実績があるものの、相対的に単位水量が小さくスランプが 8~12cm 程度のコンクリートを使用している土木分野では、施工時のポンプ圧送の困難さから軽量コンクリートはほとんど使用されていないのが現状である。

旧首都高速道路公団は、上記のような軽量 RC 床版のメリットにいち早く着目し、試行錯誤を繰り返しながら 1964 (昭和 39) 年から 1974 (昭和 49) 年にかけて高速道路の上部工に軽量 RC 床版を積極的に採用した実績を有する。しかし、工事規模の大型化によりポンプ圧送による施工が必要となったものの軽量コンクリートの一般的な配合ではポンプ圧送を行うことができないという施工上の課題に直面した。また、舗装を切削して補修しようとする軽量 RC 床版のかぶり部分も合わせて切削してしまうことや伸縮継ぎ手の補修の際に床版端部の軽量コンクリートが必要以上に欠けてしまうという課題から、軽量 RC 床版の使用を取り止めた経験を有している。なお、当時の床版の厚さは 14~16 cm 程度と現在に比べて相当に薄いものであった。

折しも 2008 年 8 月に首都高速道路 5 号池袋線下り車線で走行中のタンクローリーが熊野町ジャンクション内のカーブで横転して炎上するという事故が発生し、床版のコンクリートを打ち替える必要が生じたが、当該箇所の床版は軽量 RC 床版であったことから、下部工の支持力や耐震上の制約から打ち替えるコンクリートに軽量コンクリートを採用せざるを得ない状況であり、耐久性にも配慮して収縮補償目的で膨張材を混和した軽量コンクリートがポンプ圧送で打設された。この際、打ち替えられた軽量 RC 床版と共に、火災による損傷を受けていない近隣の既設軽量 RC 床版の状況を確認した。その結果、30 年以上経過した軽量 RC 床版の健全性が再認識された。一方、岸らは 2006 年当時に、軽量骨材と膨張材を併用して積極的にケミカルプレストレスを導入した部材は温度ひび割れ抑制効果が極めて高いことを明らかにしていた。以上の状況を背景に、軽量コンクリートに膨張材を併用し、再び軽量コンクリートの道路橋床版への有効活用に向けた研究開発の機運が高まり、首都高速道路株式会社 (以下、首都高) において、ケミカルプレストレスを導入した膨張材併用軽量 RC 床版の開発を目指すこととなった。膨張材併用軽量 RC 床版はコンクリート材料として細骨材と粗骨材に人工軽量骨材を用いる軽量コンクリート 2 種を使用するため普通 RC 床版と比較すると約 2 割の軽量化が可能であるが、膨張材併用軽量 RC 床版を採用するためにはいくつかの課題がある。

まず一つ目の課題として、軽量コンクリートは、同じ圧縮強度の普通コンクリートと比較した場合、引張強度とせん断強度が低いため、軽量 RC 床版は耐疲労性が劣ることが報告されている。その

ため、軽量RC床版を適用するためには、普通RC床版と同等の耐疲労性を付与できる技術の開発が必要となる。一方、コンクリートの初期ひび割れ対策として用いられる膨張材を普通RC床版に混和することで耐疲労性が向上することが報告されている。そこで本研究では、軽量コンクリートの耐疲労性の弱点を補う材料として膨張材に着眼し、軽量コンクリートと膨張材を併用することにより現行の道路橋示方書で設計した普通RC床版と同等の耐荷力と耐疲労性を有する軽量RC床版の開発を第1の目的とした。

二つ目の課題として、軽量コンクリートは、「コンクリートのポンプ施工指針」で圧送に困難が予想されるケースと位置付けられている。更に、本研究で開発する軽量RC床版に用いる軽量コンクリート2種は土木分野での実績はほとんどない。そのため、普通コンクリートと同等の圧送性を確保するため、圧送が困難となる影響要因と機構について検討を行い、年間を通して安定的に圧送できる施工条件（配合設計、練り混ぜ機構、ポンプ車の選定等）を明確化することを第2の目的とした。

更に三つ目の課題として、全国展開を視野に入れた場合には寒冷地への適用が必要となる。軽量骨材は製造過程で飽水処理されるため凍結時に軽量骨材内部の水分が凍結することから普通コンクリートと比較すると耐凍害性が劣ることが知られている。そこで、コンクリート中の空気量と軽量骨材の含水状態に着眼し、凍結融解試験を実施することで耐凍害性を確保する方策を見出し、寒冷地にも適用できる軽量RC床版の開発を第3の目的とした。

以上、本研究では上述した3つの目的を達成することで、コスト削減に寄与することができ、全国的に年間を通して建設可能であり、また、普通RC床版と同等の耐疲労性を有する膨張材併用軽量RC床版の開発を目指した。

以下に、本論文を構成する各章の概要ならびに得られた知見と成果を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を示し、これまで基礎研究として実施された配合、硬化特性、膨張特性および小型供試体を用いた耐疲労性に関する検討の結果を示した。

第2章では膨張材併用軽量RC床版を首都高速道路の横浜北線（新設路線）へ採用することを目的として耐疲労性と圧送性の検討を行った。耐疲労性の検討では、現行の道路橋示方書で設計し、水粉体比を37%、単位水量を $165\text{kg}/\text{m}^3$ 、20型膨張材を標準混和量の1.5倍である $30\text{kg}/\text{m}^3$ 混和した実床版を模擬した供試体（床版厚さ25cm）を作製し、国立研究開発法人土木研究所の載荷方式で輪荷重走行試験を実施した。その結果、破壊回数、床版のたわみおよびひび割れ密度等から総合的に判断すると現行の道路橋示方書で設計した普通RC床版と同等の耐疲労性を有することが確認できた。ただし、膨張材併用軽量RC床版の小型供試体（床版厚さ16cm）では普通RC床版の33倍の耐疲労性を示していた。これは、供試体寸法の違いによる膨張特性の差に起因していると推察されるため、実床版に20型膨張材を標準混和量の1.5倍である $30\text{kg}/\text{m}^3$ 混和する場合には、床版厚さ方向の配筋に工夫が必要であることが示唆された。また、圧送性の検討では、水粉体比を37%、単位水量を $165\text{kg}/\text{m}^3$ 、20型膨張材を標準混和量の1.5倍である $30\text{kg}/\text{m}^3$ 混和したコンクリートを用いて横浜北線における実施工で最も厳しい条件（水平換算距離151m）にてポンプ圧送試験を実施した。その結果、連続らせん羽根ミキサで練り混ぜた膨張材併用軽量コンクリートは水平換算距離151mの条件で圧送できる条件を明らかにできなかった。また、軽量コンクリートの圧送性を低下させる原因はコンクリート中に残存する強固で不飽和な凝集体であることが示唆された。そこで、横浜北線への採用にあたり、耐疲労性への対応として床版の厚さ方向への膨張ひずみを抑制するために床版厚さ方向に鉄筋を追加配置し、圧送性への対応として足場の改造により配管延長を短くすることで適用した。横浜北線に膨張材併用軽量RC床版を採用した結果、耐疲労性については20型膨張材の最適な混和量の設定が課題として抽出された。また、圧送性については配管を伴ったとしても年間を通して安定的に圧送できる施工条件の明確化が課題として抽出された。

第3章では、膨張材併用軽量RC床版を首都高速道路の横浜北線へ採用した際に抽出された20型膨張材の最適混和量の設定を目的とし、実床版を模擬した供試体を用いた膨張性試験を実施した。膨張性試験では水粉体比を37%、単位水量を $170\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリートに20型膨張材を $15\text{kg}/\text{m}^3$ ～ $30\text{kg}/\text{m}^3$ 混和し水平2方向および鉛直方向の膨張特性を把握した。その結果、同量の膨張材を混和し

た場合、軽量コンクリートの膨張ひずみは、骨材の剛性と骨材界面の摩擦係数の違いにより普通コンクリートの膨張ひずみより大きくなることを明らかにした。また、軽量骨材の内部養生効果によりその膨張ひずみは持続することを明らかにした。また、膨張材を標準混和量以上混和した場合には、床版の厚さ方向に 1000μ 以上の大きな膨張ひずみが発生することも確認した。よって、次章で実施する耐疲労性の検討には 20 型膨張材を標準混和量 ($20\text{kg}/\text{m}^3$) 混和した供試体を用いることとした。

第 4 章では、第 3 章の結果を踏まえて標準混和量を混和した膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性と膨張材併用軽量コンクリートの圧送性の検討を実施した。耐疲労性の検討では、第 2 章と同様に輪荷重走行試験を実施した。なお、使用したコンクリートは、水粉体比を 37%、単位水量を $170\text{kg}/\text{m}^3$ 、20 型膨張材を標準混和量である $20\text{kg}/\text{m}^3$ 混和した。その結果、破壊回数、床版のたわみおよびひび割れ密度等から総合的に判断すると現行の道路橋示方書で設計した普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有することが確認できた。また、圧送性の検討では、第 2 章と同様にポンプ圧送試験を実施した。使用した膨張材併用軽量コンクリートの配合は単位水量を第 2 章より $5\text{kg}/\text{m}^3$ 増やして $170\text{kg}/\text{m}^3$ とし、20 型膨張材を標準混和量である $20\text{kg}/\text{m}^3$ 混和した。圧送性が低下すると言われている夏季と冬季にポンプ圧送試験を実施した結果、圧送できることを確認した。このことから年間を通して安定的に圧送できる施工条件を明らかにした。また、本研究で数多く実施した軽量コンクリートのポンプ圧送試験結果を整理し、加圧ブリーディング試験結果である脱水率とブリーディング試験結果であるブリーディング率を用いて軽量コンクリートの圧送性を評価できる指標を提案した。

第 5 章では、膨張材併用軽量 RC 床版の寒冷地への適用を目指して空気量や軽量骨材の含水状態を変化させて凍結融解試験を行った。その結果、現場打ちを想定した 37%の水粉体比であっても、細骨材と粗骨材の両方を低含水品とすれば普通 RC 床版と同等の耐凍害性が確保できることを確認した。また、プレキャスト製品を想定した 25.8%の水粉体比であれば、粗骨材のみを低含水品とすれば細骨材は表乾状態の市販品を用いても普通 RC 床版と同等の耐凍害性が確保できることを明らかにした。その機構として、元々飽水状態であった細骨材中の水分が自己乾燥状態となるペースト部に吸い出されて細骨材中が不飽和になるためと推察した。

第 6 章では、今回開発した膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性について考察した。軽量コンクリート 2 種に 20 型膨張材を標準混和量である 20kg 混和することで鉛直方向の膨張ひずみにより内部が損傷するマイナスの要素が限定的でケミカルプレストレス効果により押し抜きせん断耐力が大きくなるプラスの要素が作用することで、普通 RC 床版と同等の耐疲労性となることを確認した。また、膨張材併用軽量 RC 床版と普通 RC 床版、合成床版、PC 床版および鋼床版の 5 ケースの経済性について検討を行った結果、膨張材併用軽量 RC 床版が最も経済的であり、他の床版と比較して 3~4%程度のコスト削減効果があることを明らかにした。最後に普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有し、かつ、全国的に年間を通して建設可能な膨張材併用軽量 RC 床版の諸元について整理し、実用化にあたっての要点をまとめた。

第 7 章では、本研究により得られた知見をまとめている。

膨張材併用軽量コンクリートの道路橋床版への適用に向けた実験的研究

目 次

第1章 序論

1. 1	研究の背景	1
1. 2	本研究の目的	2
1. 3	首都高における軽量床版の歴史	3
1. 3. 1	過去に首都高速道路で施工された軽量床版	3
1. 3. 2	首都高初の軽量床版（三宅坂 J C T）	3
1. 4	膨張材併用軽量 RC 床版の研究	6
1. 4. 1	膨張材併用軽量 RC 床版の着眼点と開発のコンセプト	6
1. 4. 2	軽量コンクリートと膨張材に関する既往の研究	6
1. 4. 3	技術的課題の抽出	7
1. 5	膨張材併用軽量 RC 床版に関する既往の研究	8
1. 5. 1	コンクリートの配合	8
1. 5. 2	コンクリートの硬化特性	8
1. 5. 3	膨張材併用軽量コンクリートの膨張特性	10
1. 5. 4	膨張材の使用効果の持続性	11
1. 5. 5	膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性（日本大学工学部）	14
1. 6	本論文の構成	25

第2章 首都高速横浜北線への採用

2. 1	はじめに	28
2. 2	膨張材を標準混和量以上混和した膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性	28
2. 2. 1	概要	28
2. 2. 2	供試体および試験方法	28
2. 2. 3	試験結果および考察	31
2. 2. 4	まとめ	38
2. 3	単位水量をパラメータとした膨張材併用軽量コンクリートの圧送性	39
2. 3. 1	概要	39
2. 3. 2	検討ケース	39
2. 3. 3	使用材料	39
2. 3. 4	コンクリート配合	40
2. 3. 5	練混ぜ	40
2. 3. 6	試験項目および試験方法	41
2. 3. 7	試験結果および考察	42
2. 3. 8	まとめ	44
2. 4	混和剤とミキサをパラメータとした膨張材併用軽量コンクリートの圧送性	44
2. 4. 1	概要	44
2. 4. 2	検討ケース	44
2. 4. 3	使用材料	45
2. 4. 4	コンクリート配合	46
2. 4. 5	練混ぜ	46

2. 4. 6	試験項目および試験方法	47
2. 4. 7	試験結果および考察	48
2. 4. 8	まとめ	53
2. 5	横浜北線への採用	53
2. 5. 1	採用区間の概要	54
2. 5. 2	膨張材併用軽量RC床版の設計	55
2. 5. 3	膨張材併用軽量RC床版の施工	55
2. 5. 4	まとめ	57
2. 6	横浜北線への採用により抽出された克服すべき課題	58
2. 7	第2章のまとめ	58
第3章 膨張材併用軽量RC床版の膨張特性		
3. 1	はじめに	60
3. 2	膨張特性に関する検討	60
3. 2. 1	試験概要	60
3. 2. 2	試験方法	61
3. 2. 3	試験結果および考察	63
3. 3	膨張コンクリートの膨張機構に関する既往の研究	66
3. 3. 1	細田による研究	66
3. 3. 2	酒井による研究	68
3. 4	膨張材を混和した軽量コンクリートの膨張特性に関する考察	69
3. 4. 1	膨張ひずみ	69
3. 4. 2	RC床版供試体の膨張ひずみと小型供試体の膨張ひずみとの違い	70
3. 4. 3	骨材の剥離現象	70
3. 5	膨張ひずみの持続性に関する検討	71
3. 5. 1	使用材料およびコンクリート配合	71
3. 5. 2	試験方法	71
3. 5. 3	試験結果および考察	72
3. 6	第3章のまとめ	79
第4章 膨張材併用軽量RC床版の一般化に向けた検討		
4. 1	はじめに	81
4. 2	最適量の膨張材を混和した膨張材併用軽量RC床版の耐疲労性	81
4. 2. 1	概要	81
4. 2. 2	供試体および試験方法	82
4. 2. 3	試験結果および考察	84
4. 2. 4	まとめ	90
4. 3	年間を通して圧送可能な膨張材併用軽量コンクリートの圧送性	91
4. 3. 1	概要	91
4. 3. 2	検討ケース	91
4. 3. 3	使用材料	92
4. 3. 4	コンクリート配合	92
4. 3. 5	練混ぜ	93
4. 3. 6	試験項目および試験方法	93
4. 3. 7	試験結果および考察	95

4. 3. 8	まとめ	101
4. 4	第4章のまとめ	102
第5章 膨張材併用軽量RC床版の耐凍害性		
5. 1	はじめに	104
5. 2	試験概要	104
5. 2. 1	使用材料および配合	104
5. 2. 2	試験方法	107
5. 3	試験結果および考察	108
5. 3. 1	フレッシュ性状	108
5. 3. 2	圧縮強度	108
5. 3. 3	静弾性係数	109
5. 3. 4	凍結融解試験	110
5. 3. 5	気泡間隔係数試験	113
5. 4	軽量コンクリート2種の耐凍害性	113
5. 5	第5章のまとめ	115
第6章 今回開発した膨張材併用軽量RC床版の要点		
6. 1	はじめに	117
6. 2	膨張材を混和しない軽量RC床版の耐疲労性	117
6. 2. 1	概要	117
6. 2. 2	供試体および試験方法	117
6. 2. 3	試験結果および考察	120
6. 2. 4	まとめ	126
6. 3	異なる载荷パターンによる膨張材併用軽量RC床版の耐疲労性	127
6. 3. 1	概要	127
6. 3. 2	供試体および試験方法	127
6. 3. 3	試験結果および考察	129
6. 3. 4	まとめ	134
6. 4	今回開発した床版の耐疲労性	135
6. 4. 1	ケミカルプレストレスによるせん断破壊面の増加	135
6. 4. 2	膨張材混和量の調整による床版内部の損傷の軽減	136
6. 4. 3	まとめ	137
6. 5	膨張材併用軽量RC床版のコスト削減効果	138
6. 5. 1	概要	138
6. 5. 2	検討ケース	138
6. 5. 3	検討条件	139
6. 5. 4	単価設定	142
6. 5. 5	検討結果	143
6. 5. 6	首都高速横浜北線（新横浜出入口）におけるコスト削減規模	145
6. 5. 7	まとめ	146
6. 6	第6章のまとめ	146
6. 7	今回開発した膨張材併用軽量RC床版の要点	147
第7章 結論		
		149

第1章 序論

1.1 研究の背景

土木分野の現場打ちコンクリートとしては軽量コンクリートの使用は一般的でないが、橋梁上部工に軽量 RC 床版を使用することができれば、上部工の死荷重低減に伴う下部工への耐震上の負荷軽減効果が極めて高く、橋梁全体として大幅なコスト削減が期待できる。しかし、相対的に単位水量が大きくスランプが 20cm 程度のコンクリートを使用する建築分野では軽量コンクリートが一般的に使用され相当数の施工実績があるものの、相対的に単位水量が小さくスランプが 8~12cm 程度のコンクリートを使用してきた土木分野では、施工時のポンプ圧送の困難さから軽量コンクリートはほとんど使用されていないのが現状である。

旧首都高速道路公団は、上記のような軽量 RC 床版のメリットにいち早く着目し、試行錯誤を繰り返しながら 1964 (昭和 39) 年から 1974 (昭和 49) 年にかけて高速道路の上部工に軽量 RC 床版を積極的に採用した実績を有する。しかし、工事規模の大型化によりポンプ圧送による施工が必要となったものの軽量コンクリートの一般的な配合ではポンプ圧送を行うことができないという施工上の課題に直面した。また、舗装を切削して補修しようとする軽量 RC 床版のかぶり部分も合わせて切削してしまう可能性があることや伸縮継ぎ手の補修の際に床版端部の軽量コンクリートが必要以上に欠けてしまうという課題から、軽量 RC 床版の使用を取り止めた経験を有している。なお、当時の床版の厚さは 14~16 cm 程度と現在に比べて相当に薄いものであった。

折しも 2008 年 8 月に首都高速道路 5 号池袋線下り車線で走行中のタンクローリーが熊野町ジャンクション内のカーブで横転して炎上するという事故が発生し、床版のコンクリートを打ち替える必要が生じたが、当該箇所の床版は軽量 RC 床版であったことから、下部工の支持力や耐震上の制約から打ち替えるコンクリートも軽量コンクリートを採用せざるを得ない状況であり、耐久性にも配慮して収縮補償目的で膨張材を混和した軽量コンクリートがポンプ圧送で打設された。この際、打ち替えられた軽量 RC 床版の確認と共に、火災により損傷を受けていない近隣の既設軽量 RC 床版の状況を確認した。その結果、30 年以上経過した軽量 RC 床版の健全性が再認識された。一方、岸らは 2006 年当時に、軽量骨材と膨張材を併用して積極的にケミカルプレストレスを導入した部材は温度ひび割れ抑制効果が極めて高いことを明らかにしていた¹⁾。以上の状況を背景に、膨張材を併用し、再び軽量コンクリートの道路橋床版への有効活用に向けた研究開発の機運が高まり、首都高速道路株式会社 (以下、首都高) において、ケミカルプレストレスを導入した膨張材併用軽量 RC 床版の開発を目指すこととなった。

本研究の膨張材併用軽量 RC 床版とは、細骨材と粗骨材に人工軽量骨材 (写真 1-1) を使用する軽量コンクリート 2 種を用いたコンクリートに膨張材を混和しケミカルプレストレスの効果により耐疲労性の向上を図ったものである。軽量骨材の使用により、単位重量は 20.0 kN/m^3 程度におさえられ、普通 RC 床版の 24.5 kN/m^3 に比べ、約 20% の床版重量軽減が図ることができる特徴を有する。



写真 1-1 人工軽量骨材

1.2 本研究の目的

本研究では普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有し、年間を通して全国的に建設可能な膨張材併用軽量 RC 床版の開発を主目的として、その目的を達成するために以下に示す3つの目的を設定した。

【第1の目的】

軽量 RC 床版の耐疲労性上の弱点を補う材料として既往の報告²⁾において普通 RC 床版への混和により耐疲労性の向上効果が確認されている膨張材の使用に着眼し、軽量コンクリートと膨張材を併用することにより現行の道路橋示方書で設計した普通 RC 床版と比べて同等以上の耐荷力と耐疲労性を有する膨張材併用軽量 RC 床版の開発を行う。

【第2の目的】

本研究で開発する膨張材併用軽量 RC 床版に用いるコンクリートは軽量コンクリート2種であり、土木分野での実績はほとんどないことから、ポンプ圧送試験を実施し、圧送が困難となる影響要因と機構について検討を行い、年間を通して圧送可能な施工条件（配合設計、練り混ぜ機構、ポンプ車の選定等）の明確化を行う。

【第3の目的】

軽量コンクリート2種のコンクリート中の空気量と軽量骨材の含水状態に着目し凍結融解試験を実施することで耐凍害性の改善方法を見出し、寒冷地へ適用できる膨張材併用軽量 RC 床版の開発を行う。

膨張材併用軽量 RC 床版の実用化および全国展開をするためにはいくつかの課題がある。まずは耐疲労性である。軽量コンクリートは同じ圧縮強度の普通コンクリートと比較した場合、引張強度とせん断強度が劣ることが分かっており、耐疲労性も劣る。そのため、普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有する床版を構築できる技術の研究が必要となる。コンクリートの初期に発生するひび割れ対策として膨張材を混入する事例は多くみられるが、Peiris らの研究により膨張材を混和して作製した床版が、膨張材を混和しない床版に比べ、高い耐疲労性を持つことが輪荷重走行試験により確認されている²⁾。また、Lin らの研究により、膨張材と軽量骨材を組み合わせることで温度応力を低減し、初期に発生するひび割れを抑制する効果が確認されている¹⁾。ここに至り、軽量コンクリートの耐疲労性上の弱点を補う材料として膨張材の使用に着眼し、軽量コンクリートとの組合せにより現行の道路橋示方書に準拠した普通床版と同等以上の耐荷力と耐疲労性を有する膨張材併用軽量 RC 床版の開発を第1の目的とした。

次に施工面である。軽量コンクリートは、「コンクリートのポンプ施工指針」で圧送に困難が予想されるケースと位置付けられており、施工前に圧送試験を行うなどして圧送性について十分な事前検討を行うこととされている³⁾。そのため、普通コンクリートと同様に施工できる軽量コンクリートの圧送技術の構築が必要となる。本研究の膨張材併用軽量コンクリートは軽量コンクリート2種であり、土木分野での実績はほとんどないことから、ポンプ圧送試験を実施し、圧送が困難となる影響要因と機構について検討を行い、年間を通して圧送可能な膨張材併用軽量床版の構築技術の開発を第2の目的とした。

最後に、膨張材併用軽量 RC 床版を全国展開する場合には寒冷地への適用も考えられる。軽量骨材は製造過程で軽量骨材内部の空隙を水分で満たした状態にするプレソーキングを実施していることから普通コンクリートと比較すると耐凍害性に劣ることがわかっている⁴⁾。そのため、普通 RC 床版と同等の耐凍害性を有する床版を構築できる技術の研究が必要となる。耐凍害性の改善方法として、コンクリート中の空気量と軽量骨材の含水状態に着目し凍結融解試験を実施することで耐凍害性の改善方法を見出し、寒冷地へ適用できる膨張材併用軽量 RC 床版の開発を第3の目的とした。

1. 3 首都高における軽量床版の歴史

1. 3. 1 過去に首都高速道路で施工された軽量床版

首都高速道路における軽量 RC 床版（2種、膨張材なし）は、1970年代～1980年代にかけて実績がある。当時の設計で、厚さ16cm程度で建設された床版もあり、舗装の打替え時にかぶり部分まで切削され、鉄筋の腐食および耐荷力に問題があったこと、伸縮装置補修時のはつり工事で床版端部が必要以上に欠けること等、補修工事の施工性に課題が出た。また、軽量コンクリートはポンプ圧送性が悪いため、現在ではほとんど使用されていない。近年の施工実績として、2008年8月に発生した高速5号池袋線におけるタンクローリー火災事故で被災した床版は、1980年代前半に建設された軽量 RC 床版であり、再度軽量 RC 床版を用いて復旧された。軽量コンクリートの施工性に関してポンプ圧送時における脱水が問題視されていたが、近年においてはポンプ車の性能向上、混和剤の発達やプレソーキング技術等により施工性が改善されており、5号線の火災復旧においては軽量コンクリート1種であるが施工上の不具合等はなかった。現在までに約580,000m²(45km)の軽量 RC 床版が施工されており、昭和46年以前の設計基準で設計された床版に対しては耐荷力不足を補うために主桁間に縦桁や鋼板による補強が実施され、床版厚さが20cm未満の床版に対しては耐疲労性を補うために床版下面に炭素繊維による補強が実施されている。これまでに損傷により打替えられた軽量 RC 床版はない。

1. 3. 2 首都高初の軽量床版（三宅坂 JCT）^{5),6)}

首都公団4号線425工区（三宅坂 JCT）は図1-1、1-2に示す通り、幅員12～15mの扇型であり、しかも脚を建てる位置が非常に制限された。構造は箱桁を2本並列した形でありながら、その中の1本は3径間連続ラーメン（スパン約14.0m）で、他の桁は3本の横ばりで支えられている弾性支承の連続桁である。しかもこの連続径間の両端にある横方向ラーメン上で、一方の桁はその真下に柱があり、他の桁は柱から5～7m離れて、横ばりを通じて、荷重を伝達する構造となっている。この2本の桁を一体の構造物として作用させるには、死荷重を軽減し横ばりにたわみ差を生じさせないことが必要であった。1962年10月、首都高において軽量コンクリートの研究に着手した。軽量コンクリートの物性については、全国の大学とか研究所で研究、実験が進み多くのデータが発表⁷⁾されていたので、首都高は高架橋の床版に使用することを念頭に置き、単位重量の少ない軽量コンクリート2種を使用した床版の載荷試験、練り混ぜ試験、施工性の試験を行った。

1964年5月～6月に三宅坂において首都高で初の軽量床版が施工された（写真1-2）。床版用コンクリートの設計条件は $\sigma_{28}=270\text{kg/cm}^2$ 、単位重量 $=1.6\text{t/m}^3$ （RCとして 1.9t/m^3 ）、スランプ6cmであった。この床版は15cm厚であったので、ハンチを無視しても床版だけで重量が 90kg/m^2 （上部重量の約15%）減少したことから、前記のような構造形式が可能となった。なお、当時は生コンクリートの使用ができず、パン形強制練りミキサ（山中式 JET コンクリートミキサ YG500）を使用し、現場練りコンクリートを作り、1日平均33m³、合計134m³施工した。

その後、6号線、7号線で床版のほかフーチングにも使用されたが、軽量コンクリートの施工量が増大したため、ポンプ輸送について、相当大掛かりな実験をしたが、スランプ8～12cmでは全て失敗した。（建築の軽量コンクリートはスランプが20cmであったため全てポンプで施工されるようになっていた。）

425工区（三宅坂 JCT）の現在の状況を写真1-3に示す。写真1-4のように耐荷力を向上させる対策として平成9年に床版下面に鋼板による補強がなされ、現在も供用している。

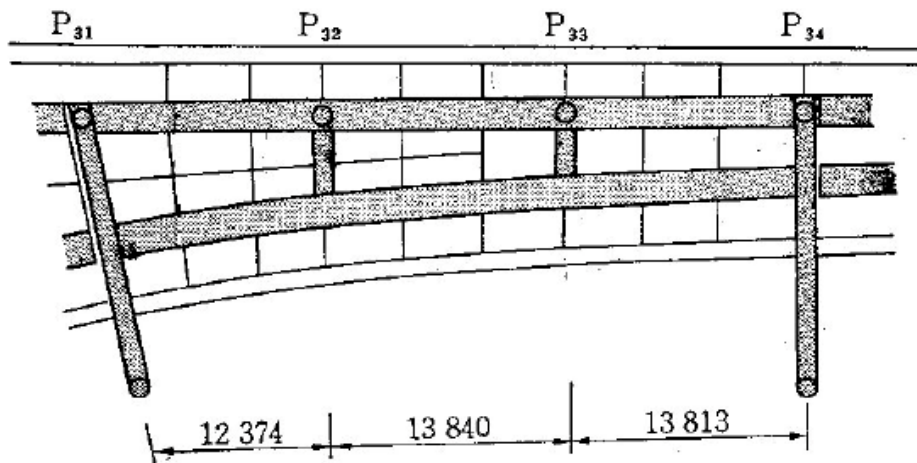


图 1-1 425 工区平面图

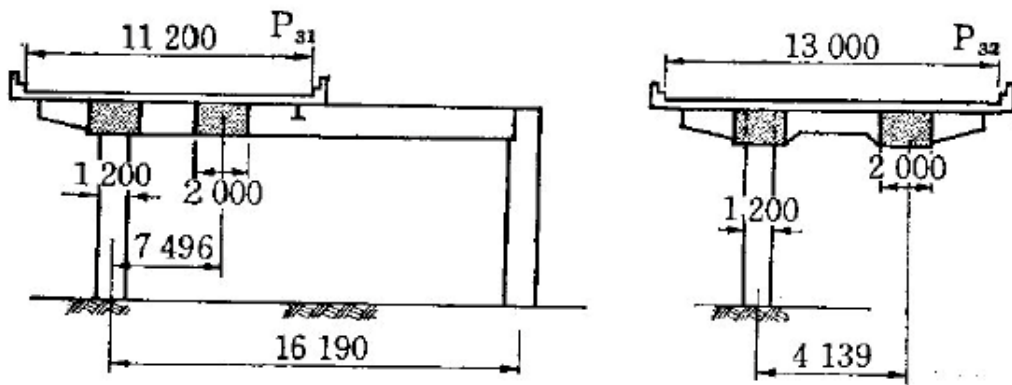


图 1-2 425 工区断面图

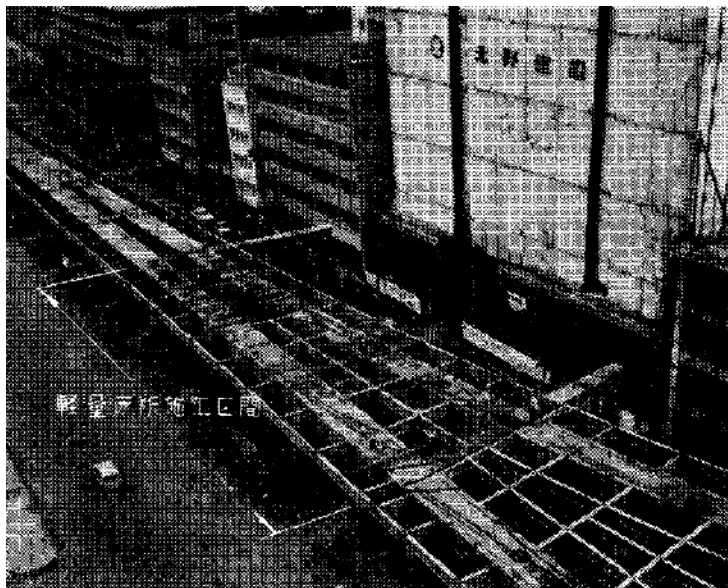


写真 1-2 425 工区施工状况



写真 1-3 現在の三宅坂 J C T



写真 1-4 軽量床版の補強状況（全面鋼板補強）

1. 4 膨張材併用軽量 RC 床版の研究

1. 4. 1 膨張材併用軽量 RC 床版の着眼点と開発のコンセプト

膨張材併用軽量 RC 床版は、首都高速道路・東京大学・日本大学ほかで共同開発した床版であり、細骨材・粗骨材ともに軽量骨材を使用し、膨張材を混和し、ケミカルプレストレスを与えた鉄筋コンクリート床版である。

本研究の膨張材併用軽量RC床版とは、以下の要求性能を備えていることを基本とする。

- ・普通RC床版と同様な設計方法で設計ができる。【設計】
- ・普通RC床版と同様の耐荷力を有する。【耐荷性】
- ・移動輪荷重による繰り返し走行試験により、普通RC床版と同等以上の耐疲労性を有する。
【耐疲労性】
- ・使用材料の特徴を踏まえた施工を行うことで、普通RC床版と同様な施工が行える。
【施工性】
- ・供用後において、普通RC床版と同様に問題なく維持管理が行える。【維持管理性】

軽量骨材の使用により、単位重量は20.0kN/m³程度におさえられ、普通RC床版に比べ、約20%の重量軽減が図れる。従って、膨張材併用軽量RC床版の開発のコンセプトは、以下のとおりである。

- ・床版の死荷重軽減効果により、上部工の鋼材重量が減少でき、コスト縮減と橋梁下部工の耐震性の向上が期待できる。
- ・保全分野においても、床版の打ち換えや拡張工事などに活用できる。

1. 4. 2 軽量コンクリートと膨張材に関する既往の研究

まず、軽量コンクリート2種に関する既往の研究であるが、軽量RC床版の耐疲労性は、軽量コンクリートの一軸圧縮強度が、普通コンクリートと比較して同等の場合、引張強度やせん断強度が小さくなるため、普通RC床版に比べ、同等の設計基準強度では、耐疲労性が劣ることが報告されている^{8), 9)}。

一方で、軽量骨材は、ポーラスで保水性に優れるという特性を有するため、通常の骨材を用いたコンクリートに比べ部材の中心軸に沿う乾燥収縮は小さくなることが確認されている¹⁰⁾。また、内部養生効果により良好な水和が促進され、その結果として品質が高い密実なコンクリートになることが報告¹¹⁾されていることから、軽量コンクリートの耐疲労性上の弱点を補うことができれば、軽量でかつ品質の良いコンクリートとして、用途が広がるものと考えた。松井らは、2000年に軽量コンクリート1種を使用した床版に、鋼繊維を混入することで、普通RC床版と同等以上の耐疲労性が得られることを輪荷重走行試験により確認した¹²⁾。なお、このときの両者の圧縮強度は、普通RC床版が36N/mm²、鋼繊維入り軽量RC床版が46~51N/mm²であった。また、それまでの軽量骨材に比べ、さらに密度の小さい高性能軽量コンクリートに鋼繊維を混入することで、普通RC床版と同等以上の耐疲労性を有することを確認し¹³⁾、上部工死荷重の大幅な軽量化技術として期待が高まった。しかし、その後、高性能軽量コンクリートが流通量と製造コストの関係から2010年には製造が中止されたため、実用化されるには至らなかった。軽量コンクリート2種のポンプ圧送は骨材の圧力吸水により困難であり¹⁴⁾、耐凍害性は総水量、空気量および軽量骨材の含水状態の調整により改善が可能であると報告されている⁴⁾。次に膨張材に関する既往の研究であるが、コンクリートの初期に発生するひび割れ対策として膨張材を混和する事例が多くみられるが、Peirisらの研究²⁾により膨張材を混和して作製した普通RC床版の供試体は、混和しない供試体に比べ、高い耐疲労性を持つことが輪荷重走行試験により確認されている。膨張材の使用による圧送性と耐凍害性への影響はない¹⁵⁾。また、膨張材と軽量コンクリートを併用した既往の研究として、Linらの研究¹⁾によれば、膨張材と軽量骨材を併用することで温度応力を低減し、初期に発生するひび割れを抑制する効果が確認されている。ここに至り、軽量コンクリートの耐疲労性上の弱点を補う材料として膨張材の使用に着目し、軽量コンクリートとの組合せにおいても、その効果が期待できると考え、膨張材併用軽量RC床版の開発に至った。

1. 4. 3 技術的課題の抽出

膨張材併用軽量RC床版は、全く新しい技術のため、実用化を図っていくためには、技術的な課題の解決が必要である。ここでは、首都高速道路の横浜北線への採用に向けての課題と全国展開を含む今後の実用化に向けての課題という2つの観点に基づき、表1-1に整理した。

表 1-1 膨張材併用軽量RC床版の技術的課題の抽出

		横浜北線への採用に向けての課題	今後の実用化に向けての課題
①性能評価に関する課題	材料特性に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> 硬化特性の把握（圧縮強度，弾性係数，引張強度，せん断強度） 膨張材混和の有無による性状の違いの把握 膨張特性の把握（打継目部） ケミカルプレストレスの持続性の把握 床版の厚さ方向への膨張ひずみの把握 	
	輪荷重走行試験に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> 膨張材併用軽量RC床版と普通RC床版の耐疲労性の比較 	
	寒冷地へ適用に関する課題		<ul style="list-style-type: none"> 軽量コンクリート2種の耐凍害性の把握
②設計に関する課題			<ul style="list-style-type: none"> ケミカルプレストレスを考慮した床版の設計方法の確立
③施工に関する課題	材料に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> スランプ，単位水量の設定 	<ul style="list-style-type: none"> 軽量コンクリート2種の安定供給 膨張材の温度依存に対する配慮
	施工方法に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> 膨張材併用軽量コンクリートの圧送性の把握 縦断勾配への対応 現場における施工の手引きなどのマニュアルの作成 	
④維持管理に関する課題		<ul style="list-style-type: none"> 普通RC床版とは劣化傾向が異なることから，膨張材併用軽量床版の劣化傾向を考慮した点検等による維持管理手法の検討 	

1. 5 膨張材併用軽量RC床版に関する既往の研究

軽量コンクリート2種に膨張材を混和したコンクリートの硬化特性、膨張特性及び使用効果の持続性を把握することを目的として各種要素試験を実施している。

1. 5. 1 コンクリートの配合

表1-2に膨張材併用軽量RC床版に使用するコンクリート供試体に用いたコンクリートの配合を示す。膨張材は、混和によって得られるコンクリートの膨張率が 250×10^{-6} となるように、20型膨張材の標準混和量の1.5倍である 30kg/m^3 混和することとした。これは、指針¹⁵⁾に従えば、普通骨材を使用したケミカルプレストレストコンクリートに相当する膨張量である。膨張材の多量混和に伴って生じる恐れのあるコンクリートの割裂破壊を生じさせないために、配合の決定にあたっては、強度特性や膨張特性に配慮しつつ、繰返し予備試験を実施して決定した^{16), 17)}。なお、軽量コンクリートのせん断強度が普通コンクリートに比べて小さいことで耐疲労性の低下が生じることを防止するため、軽量コンクリートのせん断強度が圧縮強度 30N/mm^2 の普通RC床版のせん断強度と同等となるよう、軽量コンクリートの圧縮強度が 47N/mm^2 となる水結合材比40%を用いた。単位水量は、建築工事における軽量コンクリートの実績から 180kg/m^3 とし、使用した人工軽量骨材はプレソーキング処理を行なった。

表 1-2 コンクリートの配合および使用材料

W/(C+Ex) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP C×%
		W	C	Ex	SL	GL	
40	46.8	180	420	30	541	558	0.5

種類	材料
セメント (C)	普通ポルトランドセメント
膨張材 (Ex)	石灰系 低添加タイプ 標準使用量 20kg/m^3
細骨材 (SL)	軽量細骨材 (人工軽量骨材)
粗骨材 (GL)	軽量粗骨材 (人工軽量骨材)
減水剤 (SP)	高機能型AE減水剤

1. 5. 2 コンクリートの硬化特性

表1-3にコンクリートの材齢28日における材料特性一覧を示す。供試体の養生条件は、7日間湿潤養生の後、養生シートにより急激な乾燥を防止した。また、JIS A 6206参考-2「膨張コンクリートの拘束養生による圧縮強度試験方法」に準じ、試験を行う直前に脱枠を行った。

表1-3 コンクリートの材料特性

単位体積質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (k N/mm ²)
1,731	38.1	15.0
割裂引張強度 (N/mm ²)	曲げ引張強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)
3.13	4.00	4.62

コンクリートの圧縮強度は、28日養生までの積算温度が不足したため、結果的に 47N/mm^2 より小さな 38.1N/mm^2 となった。静弾性係数（JIS A 1141）、割裂引張強度（JIS A 1114）、せん断強度（JCI-SF6）について、各要素試験の結果と既往の研究¹⁸⁾における普通コンクリートデータとの比較を図1-3～図1-5に示す。これによると、同程度の圧縮強度の普通コンクリートに対して、静弾性係数は50%程度、せん断強度は15%程度低い、割裂引張強度は同程度であった。せん断強度は、圧縮強度 30N/mm^2 の普通コンクリートと同程度となることを目指したが、本試験結果では、圧縮強度が目標値に対して不足したため、せん断強度が若干小さい値に留まった。なお、せん断強度試験の概念図を図1-6に示す。

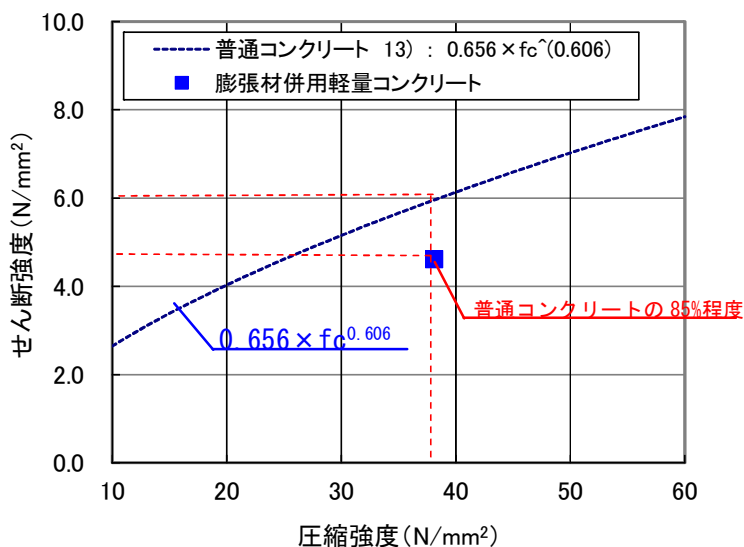


図 1-3 圧縮強度とせん断強度の関係

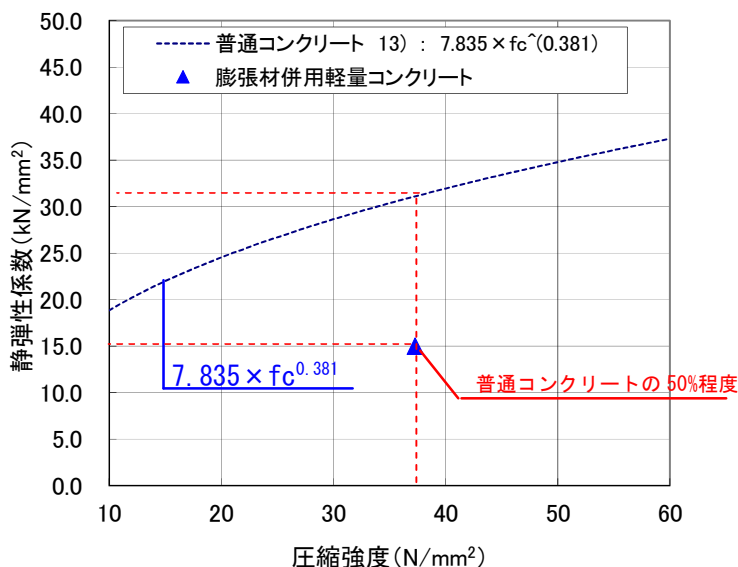


図 1-4 圧縮強度と弾性係数の関係

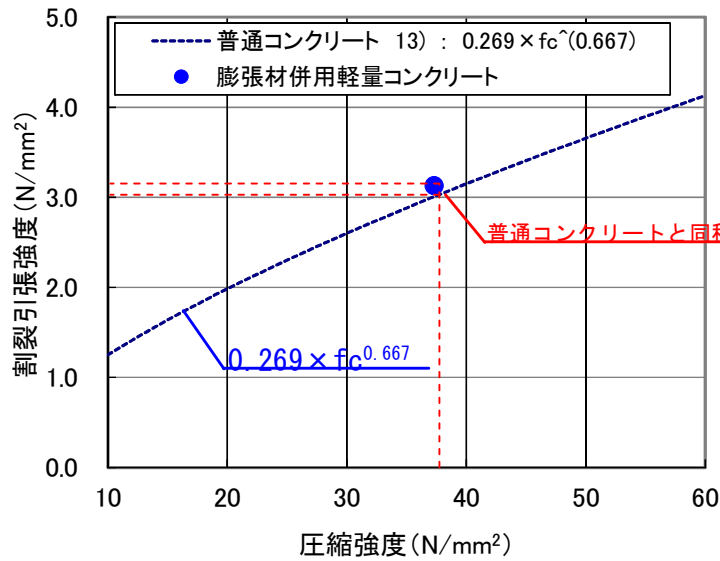


図 1-5 圧縮強度と割裂引張強度の関係

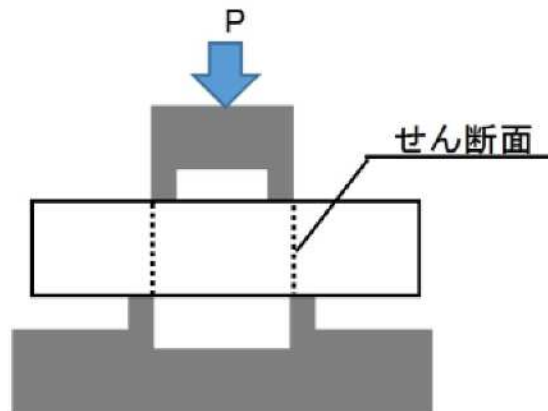


図 1-6 せん断試験 (JCI-SF6)

1. 5. 3 膨張材併用軽量コンクリートの膨張特性

(1) 自由膨張試験

膨張量の計測については、供試体が自由に膨張できるように、100mm×100mm×400mm の角柱の供試体の型枠下面にテフロン板を敷いたうえで、供試体中央部にコンクリート埋込みゲージを配置し、材齢 28 日までの膨張量を計測した。表 1-4 に試験ケース及び配合を示す。軽量コンクリートに膨張材を 30kg/m³ 混和した供試体 (軽量 Ex30) は、夏季と冬季の 2 回作製し、計測を行ったが、主な配合は変えていない。また、骨材による膨張量の違いを確認するため、膨張材を使用しない軽量コンクリート供試体 (軽量 Ex0) 及び普通コンクリートに膨張材を 30kg/m³ 混和した供試体 (普通 Ex30) についても試験を行った。

表 1-4 試験ケース及びコンクリートの配合

	水結合 材比	単位重量 (kg/m ³)						
	$\frac{W}{C+Ex}$	W	C	Ex ^{※1}	S _L ^{※2}	G _L ^{※2}	S ^{※3}	G ^{※3}
軽量Ex30 (夏)	40%	180	420	30	559	564	-	-
軽量Ex30 (冬)					541	558	-	-
軽量Ex0 (夏)			450	-	559	584	-	-
普通Ex30 (夏)	55%	166	272	30	-	-	818	1037

※1.膨張材は、低添加タイプ (標準使用量 20kg/m³)

※2.軽量骨材 (S_L, G_L) は、表-1と同じ

※3.普通骨材 (S, G) は、粗骨材は砕石、細骨材は砕砂を使用

(2) 試験結果

図 1-7 に自由膨張試験結果を示す。膨張材を混和した軽量コンクリートについて、夏季の供試体と冬季の供試体では、膨張量の発現速度は異なるものの、28 日時点では同等となった。また、軽量コンクリートと普通コンクリートでは、同量の膨張材を使用した場合でも、普通コンクリートに比べて軽量コンクリートの方が、膨張量大きい。この理由としては、普通コンクリートにない軽量コンクリートの特徴として、軽量骨材の剛性が普通骨材より小さいため、コンクリートの膨張作用を阻害しない働きが発生したことおよび軽量コンクリートの内部養生効果により、自己収縮作用の一部を打ち消す作用が働いたためと考えられる。

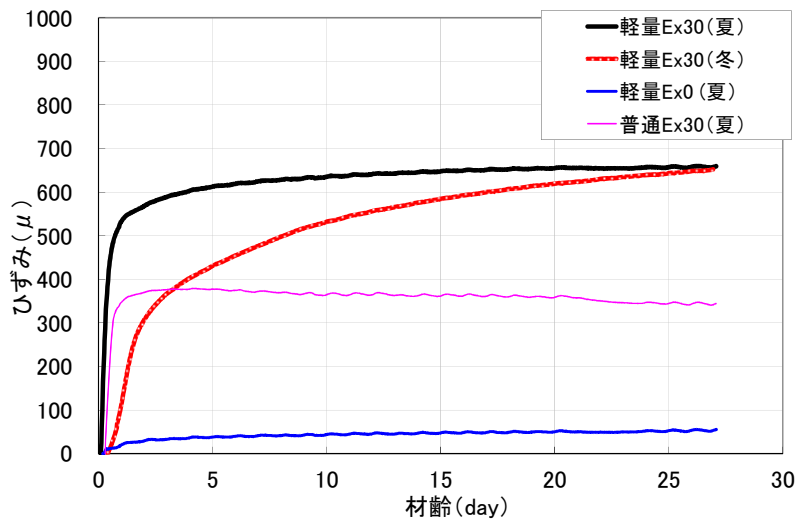


図 1-7 自由膨張試験結果

1. 5. 4 膨張材の使用効果の持続性

(1) 拘束膨張試験概要

膨張材の使用効果の持続性について、普通コンクリートに関しては、辻らの基礎研究¹⁹⁾において、材齢1年半までの試験期間において確認されている。また、中本らは、膨張コンクリートの長期材齢における性質の確認実験²⁰⁾として、曲げ強度を測定することで膨張材の使用効果残存の有無を間接的に確認している。本研究においてもこれに倣い、100mm×100mm×400mmの角柱の供試体の曲げ強度試験を実施した。また、長期におけるコンクリートの膨張量及び収縮量は、拘束膨張試験 (JIS A 6202) のB法を用いて測定した。なお、長さ変化率の基長は、標準器と拘束器具のゲージプラグ

間の長さの差から求めた。表 1-5 に試験ケースを示す。拘束膨張試験については、材齢 1 年までは、保管条件を恒温 (20℃)・恒湿 (60%) の環境下とし、試験は、材齢 1 日、7 日、14 日、21 日、28 日、91 日、150 日、180 日、1 年で実施した。その後、暴露環境を模擬した屋外の雨水がかからない保管箱に移し、材齢 2 年まで測定を行うこととした。曲げ強度試験については、材齢 28 日以降、同じ暴露環境を模擬した保管箱に移し、91 日、150 日、180 日、1 年、2 年で行った。なお、曲げ強度と長さ変化率の確認を行うために同様の暴露条件及び材齢にて拘束膨張試験を行うこととした。

表 1-5 膨張材の使用効果の持続性試験

試験方法		ケース		試験環境	
曲げ強度試験	JIS A 1106	(1)	軽量Ex30	暴露環境 (28日以降)	
拘束膨張試験	JIS A 6202 B法	(2)	軽量Ex30	1年迄	1年以降
		(3)	軽量Ex0	恒温・	暴露
		(4)	普通Ex30	恒湿条件	環境

(2) 試験結果

図 1-8 に拘束膨張試験結果を示す。材齢 1 年 (365 日) 時点において、表 1-5 に示すケース (2) の軽量 Ex30 とケース (3) の軽量 Ex0 の差は、150 μ 程度の差となっている。材齢 2 年 (720 日) 時点の結果で長さ変化率が膨張側に移行したのは、供試体の保管庫の一部が破損し、供試体に雨水がかかり吸水膨張したためであるが、各供試体間に生じた長さ変化率の差異は大きくは変わっていない。

図 1-9 に、曲げ強度試験結果の推移を示す。ここで、グラフにプロットした長さ変化率 (暴露条件) は、表 1-5 に示すケース (1) の材齢 28 日以降暴露した供試体の長さ変化率を示すが、前述と同様に保管庫の破損により供試体に雨水がかかり吸水膨張が生じている。

曲げ強度は、材齢 28 日～180 日の間で、一時的に低下するものの、材齢 180 日～1 年の間において、再増加が見られる。この理由として、既往のケミカルプレストレストコンクリートの報告²⁾を踏まえて考察すると、膨張材の膨張作用により、一時的に骨材界面に剥離が生じたが、その後の収縮作用により、剥離が解消されたためと考えられる。材齢 1 年の時点において、曲げ強度の回復があったことから、膨張材の使用効果は持続していると考えられるが、保管庫の破損による供試体の吸水膨張により、材齢 1～2 年のデータが、参考とならない。

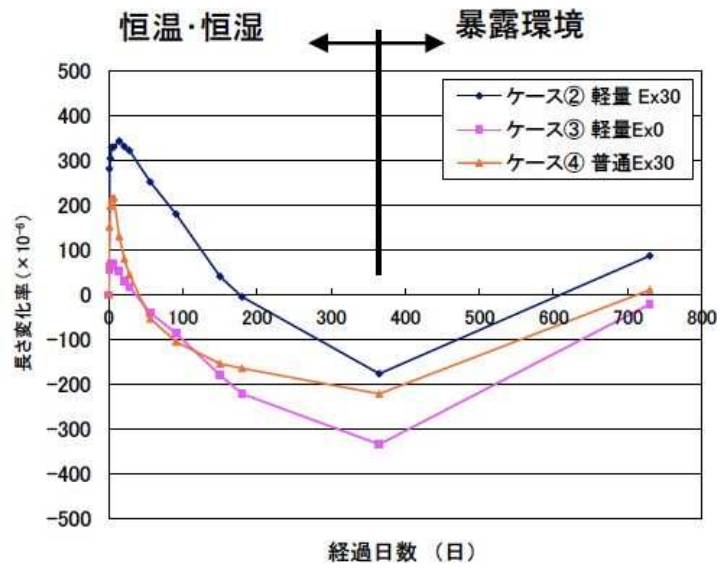


図 1-8 拘束膨張試験結果

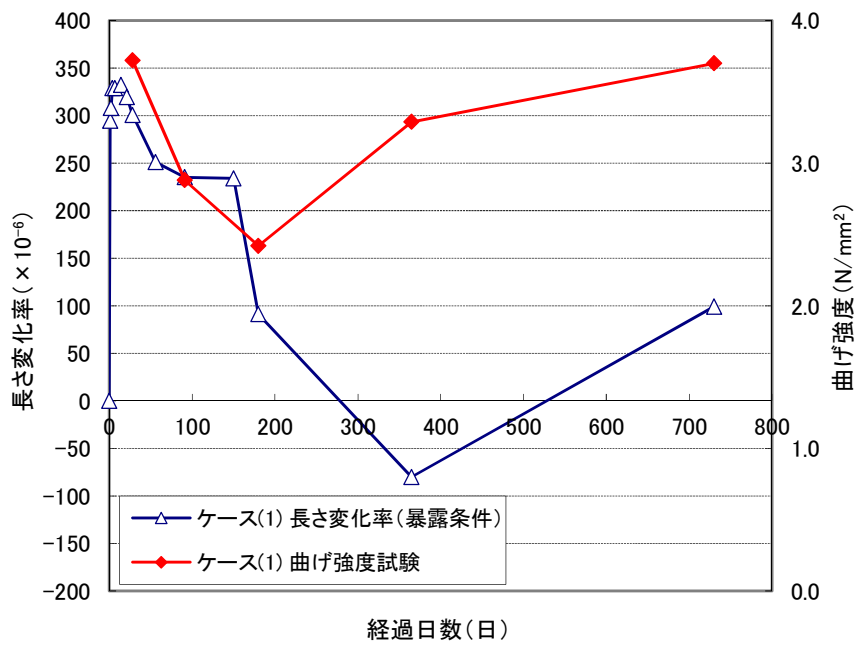


図 1-9 曲げ強度試験結果 (軽量 Ex30 暴露試験)

1. 5. 5 膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性（日本大学工学部）

(1) 試験の目的

膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性を実際に近い形で確認するため、道路橋床版上の輪荷重を模擬した輪荷重走行試験を実施した。以下に、輪荷重走行試験の着眼点を示す。

- ①軽量コンクリート2種を使用した RC 床版の耐疲労性
- ②普通コンクリートに膨張材を混和し、ケミカルプレストレストコンクリートとした床版の耐疲労性
- ③軽量コンクリート2種を使用した RC 床版に膨張材を混和し、ケミカルプレストレストコンクリートとした床版の耐疲労性
- ④軽量コンクリート2種を使用した RC 床版に膨張材を混和した床版の水の影響を考慮した耐疲労性

(2) 試験供試体

図 1-10 に供試体の形状及び寸法を示す。供試体は、日本大学工学部にて作製した。供試体の寸法は 3,000mm×2,000mm×160mm の複鉄筋 RC 版であり実物大の床版と比較すると小型である。主鉄筋と配力筋には各々 D16 と D13 を用い、主鉄筋のかぶり厚は上面、下面ともに 30mm とした。表 1-6 に試験供試体のケース、配合、表 1-7 にコンクリートの材料特性を示す。ケース (a) ~ (d) の粗骨材、細骨材の各単位量及び使用材料は、表 1-4 と同じである。普通 RC 床版の実験結果 (e) 及び (f) は、子田ら²²⁾によるものである。材料特性は、圧縮強度のみ試験開始時の材齢の結果を示し、その他は、材齢 28 日における物性値を示す。なお、各供試体の作製時期は、表中の (a) については冬季、(b) ~ (d) については夏季であり、(b) の供試体は水の影響を確認するため、水張り条件で試験を行った。静弾性係数の小さい軽量コンクリートを用いた実構造物の場合、たわみ振幅を小さく抑えるために配筋諸元が変化する場合もあるが、ここではコンクリートの特性が床版の耐疲労性に及ぼす影響を抽出する目的で、すべての供試体で同一形状、同一配筋とした。供試体作製時に、鉄筋には図 1-11 に示す様にひずみゲージを設置した。また、床版内には、コンクリートひずみゲージを埋め込み、コンクリート膨張量を測定した。供試体の養生条件は、7 日間湿潤養生の後、急激な乾燥を防止するために養生シートを敷いた。材齢 28 日で脱枠を行った後、輪荷重走行試験を開始するまでの間、供試体の乾燥を防ぐため、封緘養生を行った。

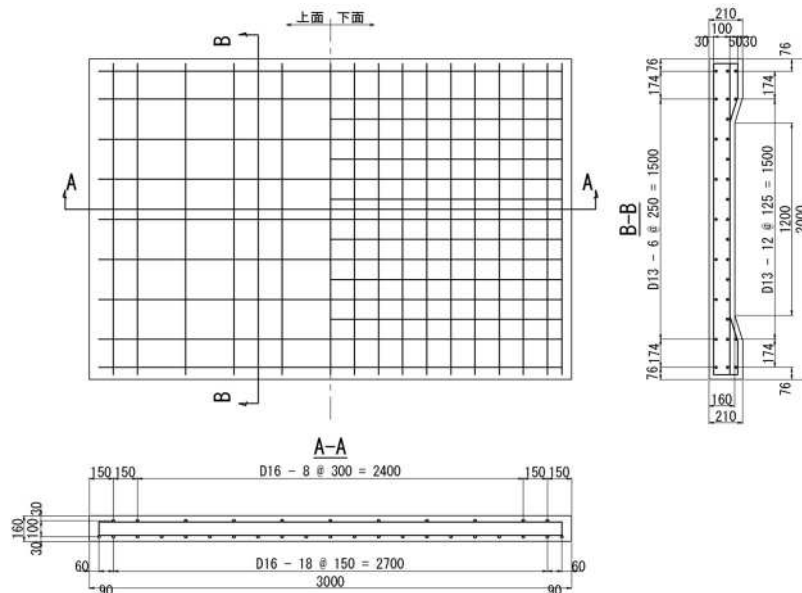


図 1-10 試験供試体

表 1-6 試験ケース，供試体の配合

	ケース名		W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			載荷状態	打設時期
					W	C	Ex		
膨張材併用軽量RC床版	軽量Ex床版-d	(a)	40	46.8	180	420	30	気中	冬
	軽量Ex床版-w	(b)	40	46.8	180	420	30	水張り	夏
軽量RC床版	軽量床版-d	(c)	40	46.8	180	450	0	気中	夏
膨張材併用普通RC床版	普通Ex床版-d	(d)	55	45.2	166	272	30	気中	夏
普通RC床版 ²²⁾	普通床版-d	(e)	66	48.0	174	264	0	気中	-
	普通床版-w	(f)	65	47.0	173	267	0	水張り	-

表 1-7 材料特性

	ケース名		圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)
膨張材併用軽量RC床版	軽量Ex床版-d	(a)	38.1(42日)	3.13	4.00	4.62
	軽量Ex床版-w	(b)	41.5(87日)	2.77	3.72	4.19
軽量RC床版	軽量床版-d	(c)	43.7(65日)	2.40	3.45	4.81
膨張材併用普通RC床版	普通Ex床版-d	(d)	41.1(176日)	2.70	4.70	5.73
普通RC床版 ²²⁾	普通床版-d	(e)	33.2(405日)	-	-	-
	普通床版-w	(f)	37.7(170日)	-	-	-

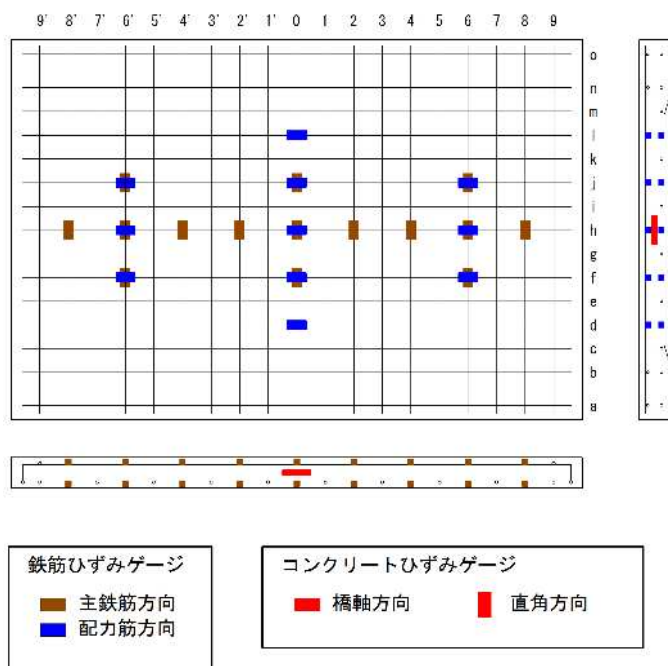


図 1-11 鉄筋ゲージ位置

(3) 床版コンクリートの膨張量

図 1-12 に各鉄筋が配置された拘束条件下の床版供試体におけるコンクリート膨張量の推移を示す。膨張材併用軽量 RC 床版における膨張量は、夏季作製の供試体では、冬季作製の供試体に比べ小さくなり、図 1-7 に示す自由膨張試験結果と異なる結果となった。

この差異は、セメントおよび膨張材の水和反応速度に対する温度の影響、並びに供試体の拘束条件の違いに起因するものと推察される。自由膨張試験においては、供試体が拘束されないため、膨張材の膨張量がほぼ供試体全体の膨張量として計測され、セメントの水和速度に拘わらず、夏と冬の両供試体において、最終的に同等の膨張量となるものと考えられる。一方、床版供試体においては、鉛直方向に鉄筋が存在せず拘束されていないため、上下方向へ膨張作用の逸散が生じやすい。夏季では反応の温度依存性により、相対的にセメントの硬化反応よりも膨張材の反応の方が先行してしまうため、やはり相対的に拘束の効いた水平方向よりも拘束効果が弱い鉛直方向に膨張力が逃げやすくなってしまい、結果的に水平方向の膨張量計測値が小さくなったものと考えられる。なお、膨張材を混和していない軽量 RC 床版と膨張材を混和した普通 RC 床版では、自由膨張試験結果と同様の傾向であった。

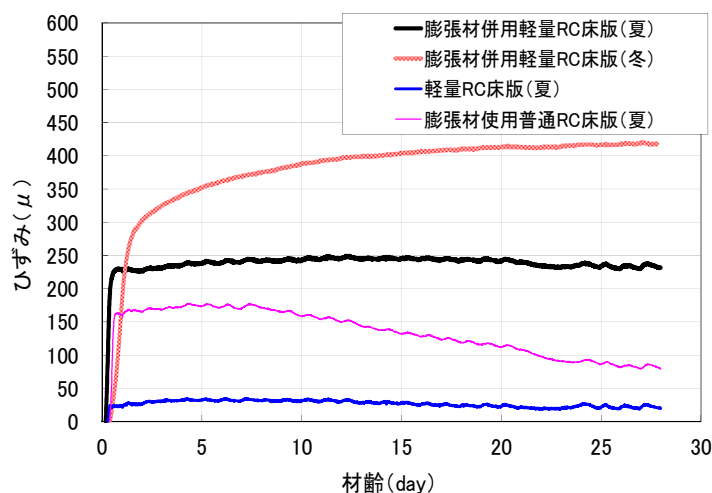


図 1-12 床版コンクリートの膨張量の推移

(4) 輪荷重走行試験

写真 1-5 に、試験に使用した輪荷重走行試験機を示す。供試体の支持条件は、比較する普通コンクリート供試体と同一条件とし、長辺方向の 2 辺を単純支持、短辺方向の 2 辺は弾性支持とした。輪荷重の走行範囲は、供試体中央部から前後 1m の計 2m の範囲で、載荷幅は 0.3m である。

輪荷重及び段階載荷の方法は、図 1-13 に示すように、試験期間の都合から初期荷重を 98.0kN、10 万回ごとに 29.4kN ずつ増加させる計画とした。この載荷方式は、試験を終えている普通コンクリート供試体（初期荷重を 98.0kN、20 万回ごとに 29.4kN ずつ増加）とは異なるが、後述する方法に従い等価繰返し回数に換算することにより比較評価が可能となる。また、98.0kN 等価繰返し回数で比較すると、25 万回を超えた時点で、普通コンクリート供試体より走行回数が大きくなるため、それ以降は 5 万回ごとに 29.4kN ずつ増加させる方式に変更した。

また、床版上面における水張りについては、走行 10 万回を与えた後に、図 1-14 に示すように床版上面に 2,200mm×1,500mm の範囲の土手を作製し、5mm 程度の水を 7 日間湛水させた後、同範囲に布を敷き詰めて保水させることにより湛水状態を維持しつつ輪荷重走行試験を実施した。なお、本実験における破壊の判定は、活荷重たわみが急増した回数とした。



写 1-5 輪荷重走行試験機（日本大学工学部）

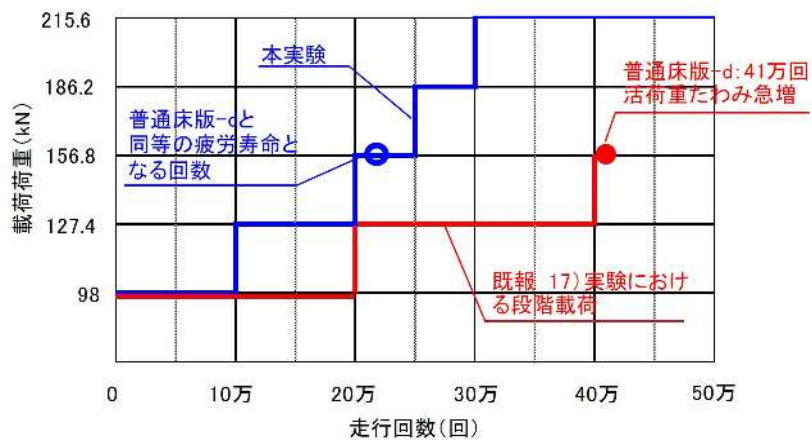


図 1-13 階段載荷方法

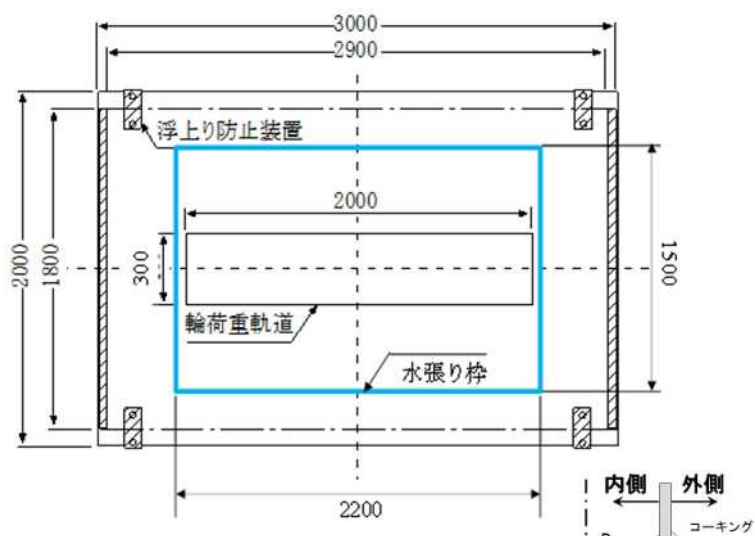


図 1-14 水張り試験概要図

(5) 試験結果

a) 等価繰返し走行回数

同一サイズの供試体で実施した普通 RC 床版との比較について、異なる段階荷重方法により荷重を階段状に変化させていることから、破壊までの荷重回数で耐疲労性を検討することは困難である。

過去に日本大学工学部で実施した輪荷重走行試験の結果²²⁾において確認した松井らの提案²³⁾する大阪大学の輪荷重走行試験機の S-N 関係式を式 2-1 に示す。マイナー則を用いて整理できることが確認されていることから、同式を用いて、基準荷重荷重 $P_0=98.0\text{kN}$ の一定荷重とした時の換算破壊回数を算定した。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m n_i \quad (\text{式2-1})$$

N_{eq} : 基準荷重 P_0 に換算した等価繰返し走行回数

P_i : 実際に荷重した荷重 (kN)

P_0 : 基準荷重 (本研究では98.0kN)

n_i : 荷重 P_i の走行回数

m : 12.76でS-N曲線の傾きの逆数

図 1-15 に走行回数の比較、図 1-16~19 に 98.0kN 等価繰返し回数—活荷重たわみ曲線の比較を示す。図 1-16~19 に示すとおり、それぞれの供試体の耐疲労性に関して、以下の傾向が認められた。

軽量コンクリート2種を使用した軽量RC床版は、圧縮強度を大きくした影響もあり、耐疲労性は普通RC床版と同程度となった。初期のたわみは、軽量コンクリートのヤング率が小さいため、普通RC床版より大きくなっている。また、膨張材を混和し、ケミカルプレストレストコンクリートとした普通RC床版は、膨張材を使用しない普通RC床版と比較して耐疲労性は80倍程度となった。初期のたわみは小さく、膨張材の混入により、初期の収縮ひび割れの発生が抑制され、引張抵抗力が向上したためと考えられる。

一方、軽量コンクリート2種を使用し、かつ膨張材を混和しケミカルプレストレストコンクリートとした膨張材併用軽量RC床版は、普通RC床版と比較すると耐疲労性は30倍程度となった。さらに、水の影響を受けた場合、温度の影響により床版に導入されたケミカルプレストレスが小さい条件であったが、同様の水張り条件で実施した普通RC床版と比べ、耐疲労性は15倍程度となった。また、図1-15に示す通り、換算した等価繰返し換算回数ではなく、実際の走行回数で比較しても、参考として記した同様の段階荷重で試験を行った普通RC床版の走行回数を全ての床版で上回る結果を得た。

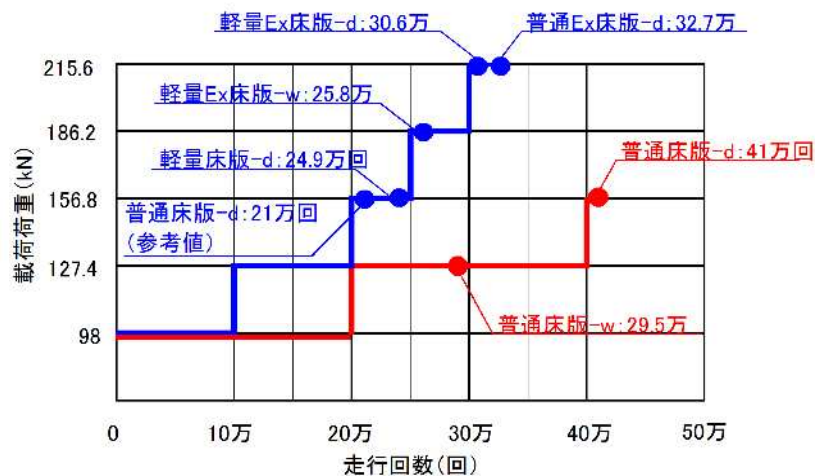


図 1-15 走行回数の比較

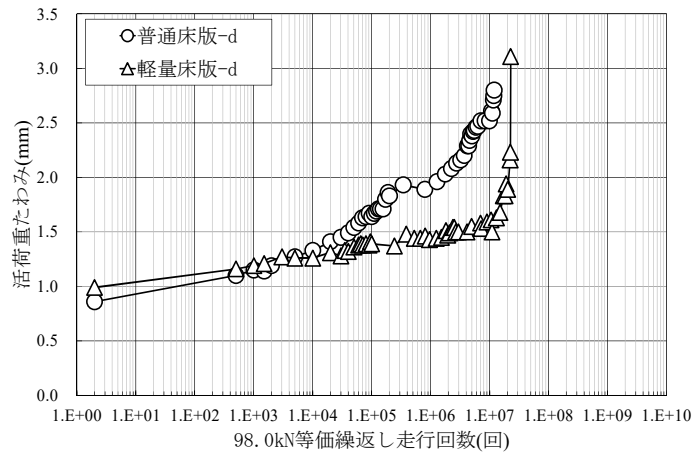


図 1-16 98.0kN 等価繰返し回数-活荷重たわみ曲線 (普通床版-d・軽量床版-d)

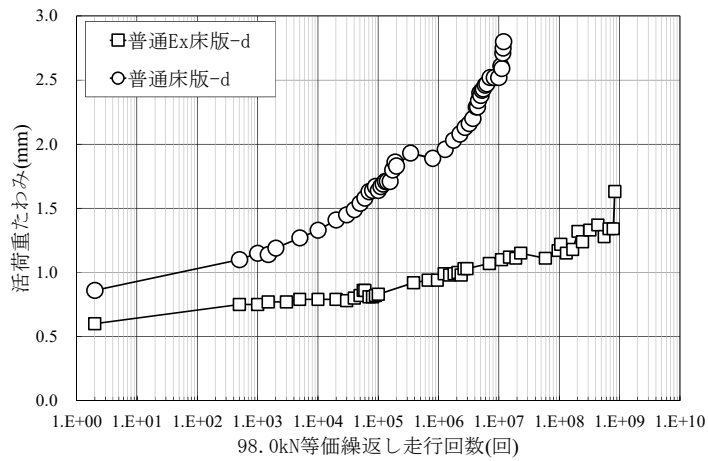


図 1-17 98.0kN 等価繰返し回数-活荷重たわみ曲線 (普通Ex床版-d・普通床版-d)

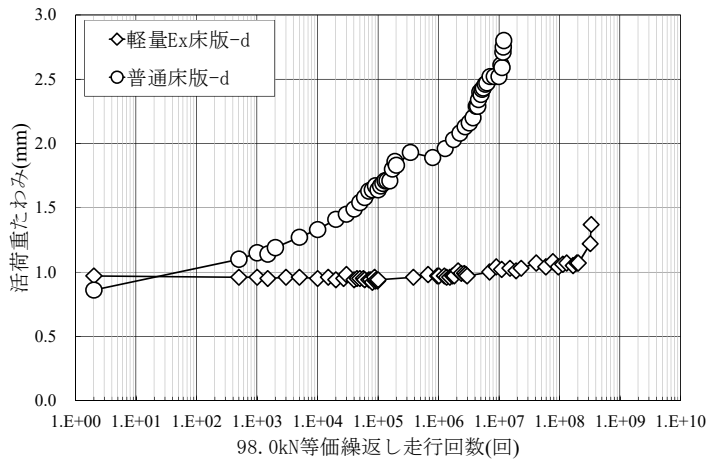


図 1-18 98.0kN 等価繰返し回数-活荷重たわみ曲線 (軽量Ex床版-d・普通床版-d)

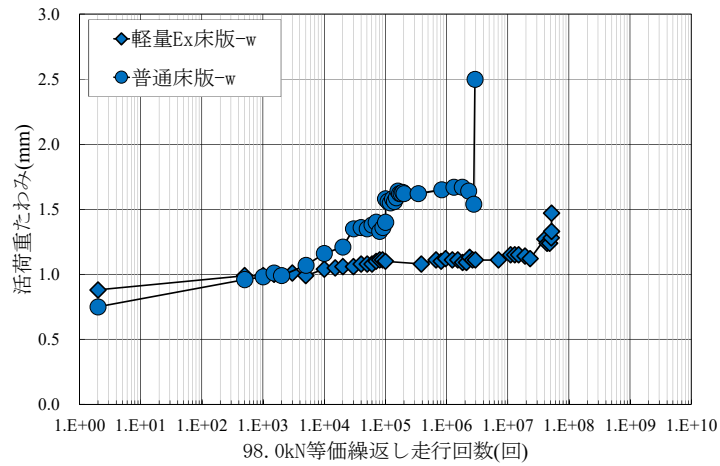


図1-19 98.0kN 等価繰返し回数-活荷重たわみ曲線（軽量 Ex 床版-w・普通床版-w）

b) ひび割れ発生状況

図1-20～図1-22に、気中条件における普通RC床版、膨張材併用軽量RC床版および膨張材不使用の軽量RC床版の、走行回数20万回時点（98.0kN等価繰返し走行回数：普通RC床版=20万回，膨張併用軽量RC床版及び膨張材を使用していない軽量床版=290万回）におけるひび割れ発生状況を示す。普通RC床版に比べて、等価繰返し走行回数で15倍程度の差があるにも拘らず，膨張材が混和された供試体のひび割れが少なく，輪荷重軌道直下に軽微なひび割れが確認されるのみである。軽量RC床版のひび割れ発生状況は，普通RC床版に比較的近く，両者は，膨張材の有無により差が生じていると考えられる。なお，計測したひび割れは，目視で確認されたものである。

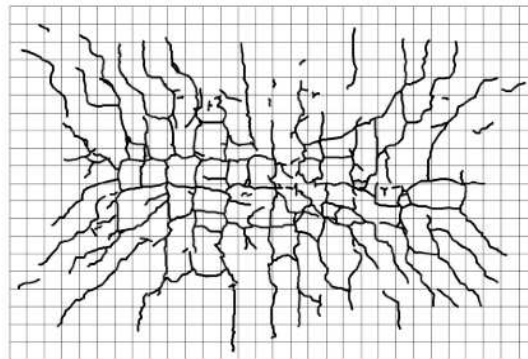


図1-20 普通RC床版ひび割れ

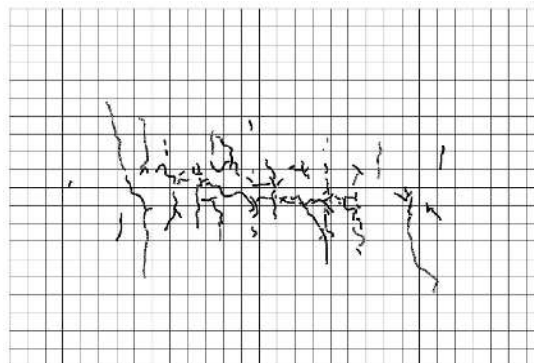


図1-21 膨張材併用軽量RC床版ひび割れ

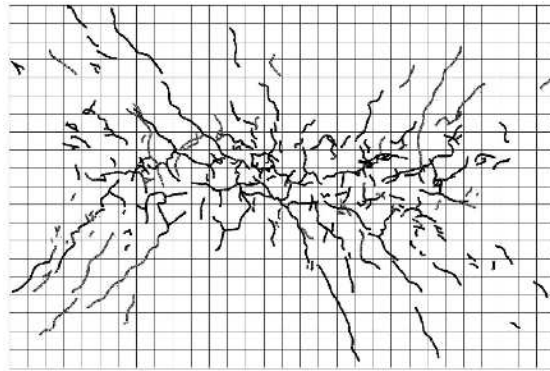


図 1-22 膨張材不使用の軽量 RC 床版ひび割れ

c) ひび割れ密度

図 1-23 にひび割れ密度と 98.0kN 等価繰返し荷重走行回数との関係を示す。ひび割れ密度は、床版中央の 1,600mm×1,200mm の範囲に発生したひび割れ長さを計測した。膨張材を併用した供試体は、普通（気中）、軽量（気中、水張）全てにおいて下方に凸状のカーブを示し、膨張材を使用していない供試体に比べ、走行回数の増加に対するひび割れ発生が抑えられることが確認できる。特に、初期においてほとんどひび割れが発生しない点が、普通 RC 床版と大きく異なる。

また、膨張材を使用していない軽量 RC 床版は、98.0kN の等価繰返し回数が比較的小さいときは、普通 RC 床版に比べ、ひび割れ発生密度は小さいが、最終的には、同一の 98.0kN 等価繰返し回数で同程度のひび割れ発生となった。試験初期段階で、ひび割れ発生が少ない要因としては、内部養生の効果により脱型後の初期ひび割れが少ないこと、弾性係数が小さいために鉄筋が引張応力を負担する率が大きいこと、圧縮強度が大きかったこと等が考えられるが、膨張材が混入されていないために、走行回数が増加するに従い、普通 RC 床版の結果に近づいていったと考えられる。

膨張材併用軽量 RC 床版における水張りの場合は、気中と比べてひび割れ密度の増加は類似の軌跡をたどるが、ひび割れ密度が小さい状態で終局に至っている。これは、膨張材によりひび割れが生じにくくなり、水分の侵入がある程度抑制されているものの、水の侵入が始まると急激に耐疲労性が低下するためと考えられる。

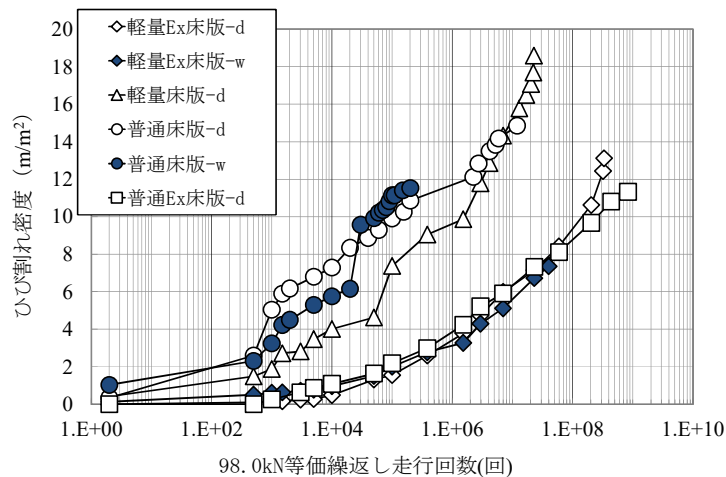


図 1-23 98.0kN 等価繰返し回数-ひび割れ密度曲線

d) 切断面の損傷状況

図1-24および図1-25に、気中条件における膨張材併用軽量RC床版を版中央で4分割に切断した断面のひび割れ図を示す。橋軸方向に切断した主鉄筋切断面では、既報²⁴⁾の普通RC床版と同様に圧縮側の配力鉄筋に沿って水平ひび割れが発生していることが確認された。一方で、床版下面側については、普通RC床版に比べて発生したひび割れが少ない。これは、膨張材によるケミカルプレストレスの影響で、引張抵抗力が向上したためと考えられる。なお、層状の複数のひび割れや軽量骨材を貫通するひび割れ(写真1-6)など、軽量骨材を使用した影響と思われる現象も確認された。

一方、橋軸直角方向に切断した配力筋切断面においては、普通RC床版の押抜きせん断の破壊面は載荷ブロック端から45度に近いが、膨張材併用軽量RC床版では、45度より水平に近い勾配となり、破壊面が不明瞭となっている。

写真1-7に膨張材併用軽量RC床版(水張条件)の切断面の状況、写真1-8に供試体上面の破壊状況を示す。床版上面には、水平ひび割れが発生しているが、水の影響を受けた普通RC床版に認められる砂利化は認められず、写真のようにブロック状に分割するような特殊な破壊形態を示した。これは、普通骨材ではモルタルに比べて骨材の強度が高く、骨材界面に輪走行作用に伴う水圧が発生し、モルタル分との分離が発生するのに対し、軽量骨材では骨材界面が弱点とはならず、軽量骨材そのものが破断するためと思われる²⁵⁾。

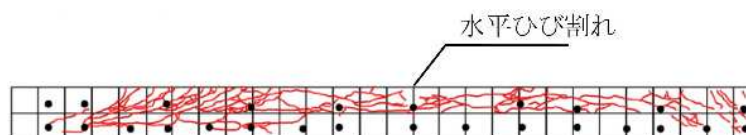


図 1-24 膨張材併用軽量 RC 床版のひび割れ図 (主鉄筋切断面)

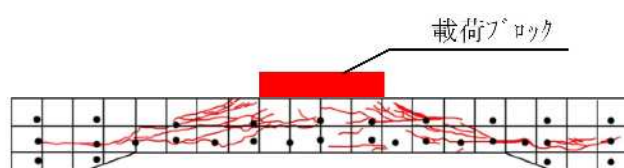


図 1-25 膨張材併用軽量 RC 床版のひび割れ図 (配力筋切断面)

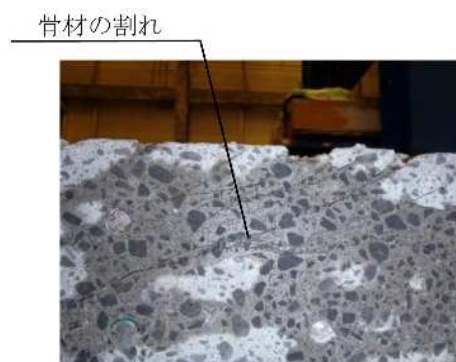


写真 1-6 骨材の割れ状況 (膨張材併用軽量 RC 床版)

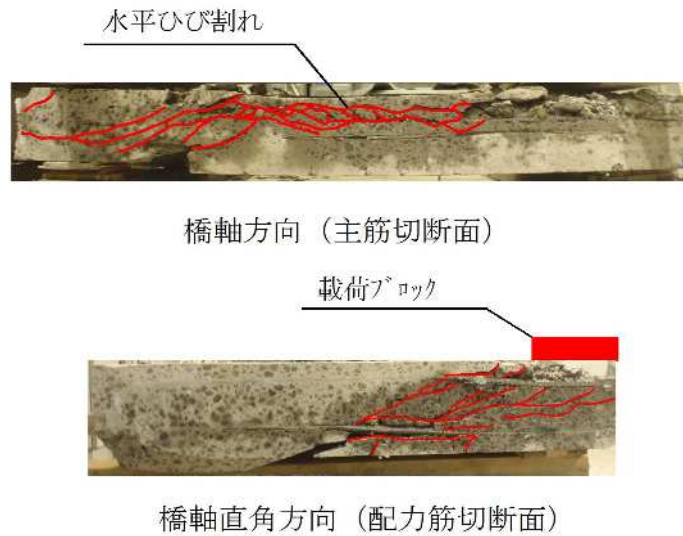


写真 1-7 水張条件の切断面（膨張材併用軽量 RC 床版）



写真 1-8 供試体上面破壊状況（膨張材併用軽量 RC 床版）

e) 中立軸の推移

図 1-26 に、主要な走行回数において測定した主鉄筋の引張ひずみと圧縮ひずみから求めた中立軸、全断面有効時の中立軸及びコンクリートの引張強度を無視して計算から求めた中立軸を示す。同じ膨張材を混和した気中条件と水張り条件の 2 つの試験における初期の中立軸の位置が測定誤差によりずれているが、いずれも、走行回数の増加に従って、引張無視の計算値近傍に漸近する傾向を示す。膨張材併用軽量 RC 床版（気中条件）が、引張無視の計算値の付近から終局に至るまでの走行回数が多いのに対して、膨張材を使用しない軽量 RC 床版は、引張無視の計算値近傍に漸近した後、比較的少ない走行回数で終局に至っている。膨張材併用軽量 RC 床版（水張り条件）は、気中条件に比べると、終局に至るまでの回数が少なくなっている。普通 RC 床版（水張り条件）のデータがないため比較ができないが、水の影響により、床版上面部のブロック状の破壊により上面側の有効断面を失い、終局に至っている可能性がある。

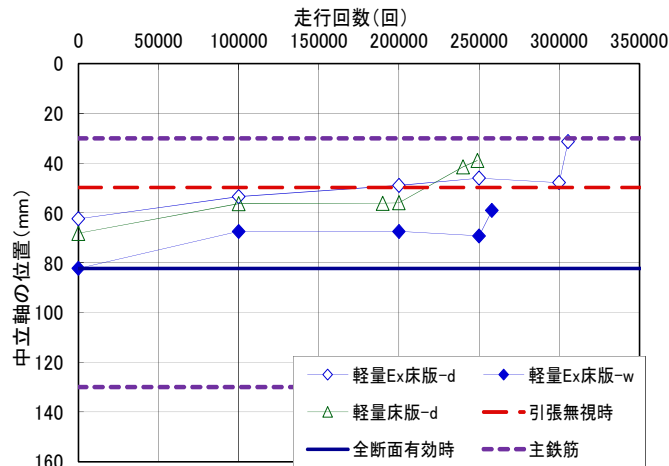


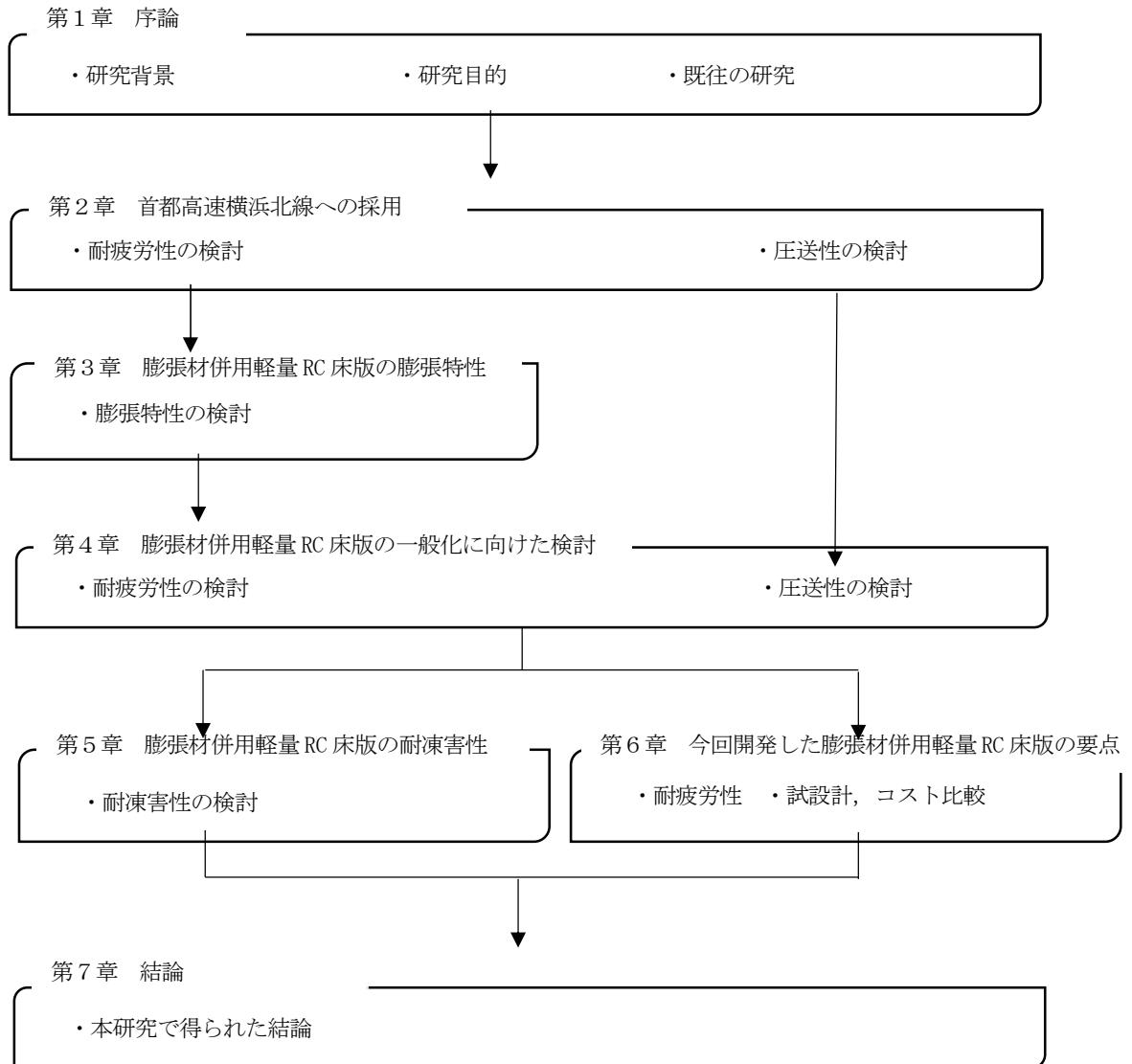
図 1-26 98.0kN 等価繰返し回数-中立軸関係

(6) まとめ

- 1) 軽量コンクリート 2 種を使用した軽量RC床版 (圧縮強度=44N/mm²) は, 普通RC床版 (圧縮強度=33N/mm²) と概ね同程度の98.0kN等価繰返し走行回数となり, 同程度の耐疲労性を有する結果となった.
- 2) 膨張材を混和し, ケミカルプレストレストコンクリートとした普通RC床版 (圧縮強度=41N/mm², 水結合材比=55%) は, 普通RC床版と比較して80倍程度の98.0kN等価繰返し走行回数となり, 高い耐疲労性を示した. 膨張材の混和による効果として, ケミカルプレストレスによりコンクリートの引張抵抗力が向上し, 繰返し載荷荷重に対してひび割れが生じにくくなったと考えられる.
- 3) 軽量コンクリート 2 種を使用し, かつ膨張材を混和しケミカルプレストレストコンクリートとした膨張材併用軽量RC床版 (圧縮強度=38N/mm², 水結合材比=40%) は, 普通RC床版と比較すると, 30倍程度の98.0kN等価繰返し走行回数となり, 高い耐疲労性を示した. (2)と同様に, 膨張材の混和による効果として, ケミカルプレストレスによりコンクリートの引張抵抗力が向上し, 繰返し載荷荷重に対してひび割れが生じにくくなったと考えられる.
- 4) 軽量コンクリート 2 種を使用し, かつ膨張材を混和しケミカルプレストレストコンクリートとした膨張材併用軽量RC床版は, 水の影響を考慮した場合においても, 温度の影響により床版に導入されたケミカルプレストレスが小さい条件であったが, 同様の水張り条件で実施した普通RC床版と比べ, 15倍程度の高い耐疲労性となった. これは, 膨張材によりひび割れが生じにくくなり, 水分の侵入とそれに伴う劣化がある程度抑制されたためと考えられる.

以上より, 膨張材併用軽量RC床版はそのフレッシュ性状及び硬化性状を適切に管理することにより, 普通RC床版より優れた耐疲労性を有することが確認された. 十分に実用化の可能性があるのでから引き続き実床版を模擬した供試体を用いた耐疲労性の検討を実施する.

1. 6 本論文の構成



【第1章の参考文献】

- 1) Lin, Z. and Kishi, T. : Cracking resistance of expansive concrete mixed with lightweight aggregate, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 28, No. 1, pp. 647-652, (2006)
- 2) Peiris, A., Onishi, H., Manabe, H. and Matsui, S. : Wheel load running test to investigate effect of expansive agents on fatigue durability of RC decks, コンクリート工学論文集, Vol.28, No.2, pp.865-870, (2006)
- 3) コンクリートポンプ施工指針[2012年版], コンクリートライブラリー135, 土木学会, (2012)
- 4) 岩清水隆ほか: 高強度人工軽量コンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.7, No.1, pp.69-72, (1985)
- 5) 宮崎昭二, 大内雅博, 猪俣俊司, 星川明男: 軽量コンクリートの道路床版への応用一施工前の試験一, 土木施工, 山海堂, (1964)
- 6) 宮崎昭二, 大内雅博, 高岡司郎: 軽量コンクリートの道路床版への応用一施工について一, 土木施工, 山海堂, (1964)
- 7) 構造用軽量コンクリートシンポジウム論文集, 日本ACI, (1964)
- 8) 原田良紀, 浜田純夫, 松尾栄治, 津田久嗣: 軽量床版の押抜きせん断耐力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.715-720, (2000)
- 9) 藤井伸介, 松井繁之, 藤木英一: SFLRCの道路橋床版への適用性に関する輪荷重走行試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.739-744, (2000)
- 10) 國分正胤, 小林正几, 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24, 土木学会, pp.1-13, (1969)
- 11) 五十嵐心一, 川村満紀, 神崎暁史: 軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.399-404, (2002)
- 12) 松井繁之, 藤井伸介, 安松敏雄, 藤木英一: 人工軽量骨材コンクリートの道路橋床版への適用性に関する基礎的研究, 第2回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.95-100, (2000)
- 13) 森大介, 丸井浩, 藤井伸介, 松井繁之: 鋼繊維補強をした高性能軽量コンクリート床版の疲労耐久性に関する実験, 第2回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.107-112, (2000)
- 14) ALA CONCRETE (技術情報・建築編), 人工軽量骨材 (A L A) 協会
- 15) 膨張コンクリート設計施工指針, コンクリートライブラリー75, 土木学会, (1993)
- 16) 保坂綱鎮, 津野和宏, 磯部龍太郎, 倉内英敏, 杉山彰徳: 膨張材を多量添加した軽量 II 種コンクリートの性状把握, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, pp1057-1058, (2011)
- 17) 杉山彰徳, 津野和宏, 磯部龍太郎, 竹下永造, 石川寛範: 膨張材添加軽量コンクリートの力学的性能, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, pp1059-1060, (2011)
- 18) 東山浩士, 水越睦視, 松井繁之, 小田憲司: 軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐力の評価とその実用性に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.16, No.1, pp.45-54, (2005)
- 19) 辻幸和, 岡村甫: 膨張コンクリートによる鋼合成桁床版の改善に関する基礎研究, コンクリート工学論文集, Vol.20, No.2, pp.73-87, (1982)
- 20) 中本啓介, 石川敏之, 岡田幸児, 細見雅生, 佐久間隆司: 長期計測による連続合成桁へのケミカルプレストレス適用に関する研究, 構造工学会論文集, Vol.47A, pp.1501-1508, (2001)
- 21) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : “Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete”, SPON Press, (2003)
- 22) 子田康弘, 齊藤卓也, 岩城一郎: 輪荷重走行試験による材料劣化を受けた道路橋 RC 床版の耐疲労性評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.9, pp.145-150, (2009)

- 23) 松井繁之：橋梁の寿命予測 - 道路橋 RC 床版の疲労寿命予測 - ，安全工学, Vol. 30, No. 6, pp. 432-440, (1991)
- 24) Gebreyouhannes, E., Kishi, T. and Maekawa, K. : Shear Fatigue Response of Cracked Concrete Interface, Journal of Advanced Concrete Technology , Vol6, No2, (2008)
- 25) 日本道路協会：道路橋示方書 I 共通編, II 鋼橋編, (2012)

第2章 首都高速横浜北線への採用

2. 1 はじめに

膨張材併用軽量 RC 床版は、細骨材・粗骨材ともに人工軽量骨材を使用した軽量コンクリート 2 種に、膨張材を混和し、ケミカルプレストレスを与えた鉄筋コンクリート床版である。膨張材併用軽量 RC 床版の特徴としては、普通 RC 床版に比べて軽量であることから上部構造の重量軽減が図れることが挙げられる。この特徴により、新設橋梁の場合には上部工の鋼材重量が減少できるため、コスト縮減や耐震性の向上が期待できることや、保全分野においても、床版の打ち換えや拡幅工事などに有用な技術であると考えられる。しかしながら、膨張材併用軽量 RC 床版は実橋梁において使用されたことのない新技術であったことから、横浜北線に採用するにあたり、性能評価、設計、施工や維持管理に関する技術的な課題の解決が必要であった。

本章では、膨張材併用軽量 RC 床版の横浜北線への採用に向けて整理した技術的課題のうち、2. 2 で輪荷重走行試験により検討した耐疲労性について、2. 3 でポンプ圧送試験により検討した圧送性（施工性）について述べる。

なお、様々な検討の結果、技術的な課題が概ね解決できたことから、2017 年 3 月に開通した高速神奈川 7 号線横浜北線の一部区間（新横浜出入口）に膨張材併用軽量 RC 床版を採用した。

2. 2 膨張材を標準混和量以上混和した膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性

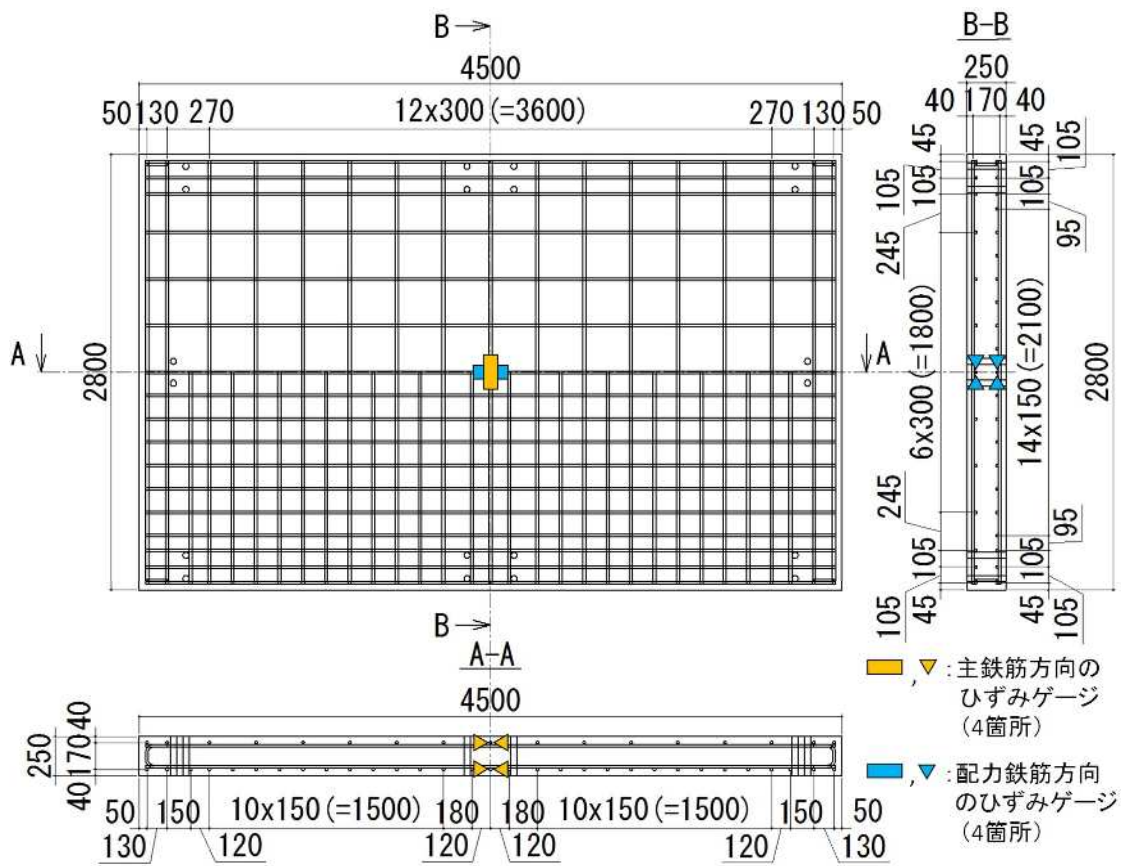
2. 2. 1 概要

軽量コンクリートを道路橋床版へ適用することで、鋼桁を含めた橋梁上部構造全体の軽量化が期待できる。一方で軽量コンクリートは、骨材の特性から同等の設計基準強度の普通コンクリートに比べてせん断強度が低下し、耐疲労性が劣ることが知られている^{1),2)}。そこで、軽量コンクリートの初期ひび割れ低減と耐疲労性の向上策として、膨張材を併用した軽量 RC 床版の採用に向けて検討を行った。まず、床版厚を 160mm とした小型供試体を用いて輪荷重走行試験を実施しており、普通 RC 床版と比較して耐疲労性が格段に優れることを確認した^{2),3)}。そして、実施工を想定して打継目を有する供試体を用いて輪荷重走行試験を実施し、打継目の耐疲労性に問題がないことを確認した⁴⁾。さらに、その供試体が輪荷重の繰返し载荷によって押抜きせん断破壊した後に、部分打ち替えて補修を行い、再び輪荷重走行試験を実施して部分打ち替え部の耐疲労性にも問題がないことを確認した⁵⁾。本節では、実床版を模擬した供試体を用いて、道路橋示方書⁶⁾で耐疲労性の確認手法として提案される土木研究所が所有する輪荷重走行試験機を使用して階段状荷重漸増载荷^{7),8)}を実施した。同試験方法で検証された 100 年以上の耐疲労性がある普通 RC 床版⁷⁾との相対比較により実物大の軽量 RC 床版の耐疲労性について検討を行った。

2. 2. 2 供試体および試験方法

(1) 供試体

供試体は 2,800mm×4,500mm×250mm の複鉄筋 RC 床版であり、その形状および寸法を図 2-1 に示す。供試体の外形寸法は、図 2-1 付表および表 2-1 に示す平成 8 年の道路橋示方書⁶⁾に準拠した既往の研究の普通 RC の供試体⁷⁾（供試体名：RC8n-1, RC8n-2, RC8n-3）と同一とした。主鉄筋は D19 を上段 300mm 間隔、下段 150mm 間隔とした。配力鉄筋は D16 を上段 300mm 間隔、下段 150mm 間隔とした。



付表

供試体名	外形寸法(mm)	主鉄筋		配力鉄筋	
		径	間隔(mm)	径	間隔(mm)
軽量RC	2800x4500x250	D19	150(300)	D16	150(300)
RC8n-1					125(250)
RC8n-2					
RC8n-3					

()内は圧縮側鉄筋の値

図 2-1 供試体諸元

表 2-1 普通 RC の実験結果⁷⁾

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	破壊時荷重 (kN)	破壊時走行回数 (回)
RC8n-1	33.1	27.9	392	489,555
RC8n-2	38.4	25.7	334	394,122
RC8n-3	37.4	26.5	392	520,000*未破壊

(2) 使用材料

試験に用いた軽量コンクリートの示方配合を表 2-2 に示す。普通ポルトランドセメントを用いて、粗骨材、細骨材とも人工軽量骨材の軽量コンクリート 2 種とした。20 型膨張材を初期収縮補償に必要な量 20kg/m^3 の 1.5 倍の 30kg/m^3 を添加した。なお、コンクリート膨張率は、既往の研究結果^{2),3),4)}から品質管理基準値を定めており、拘束膨張試験 (B 法) (JIS A 6202) で材齢 7 日において 300×10^{-6} 以上とした。設計基準強度は 40N/mm^2 で、せん断強度が設計基準強度 27N/mm^2 の普通コンクリートと同等となるようにした。コンクリートは実機ミキサで練混ぜを行った。スランブはコンクリート標準示方書⁹⁾を参考にポンプ圧送性が良好とされる 18cm とし、空気量は現場条件が耐凍害性を考慮する必要がない場所であるため、普通コンクリートと同等の 4.5% とした。供試体のフレッシュコンクリートの性状は、スランブ 20cm、空気量 4.5%、単位体積質量 $1,768\text{kg/m}^3$ 、コンクリート温度 18°C であった。凝結試験で終結を確認した後から湿潤養生とし、材齢 28 日の物性試験結果を確認後、材齢 33 日に脱型し、その後は気中養生とした。輪荷重走行試験の開始材齢は、試験機借用の都合上 171 日とした。

表 2-2 軽量コンクリートの示方配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						(g/m^3)	
		W	C	Ex* ¹	SL	GL	SP* ²	AE	DF
37	45	165	415	30	569	596	2.7	5	1.3

*1: 低添加型膨張材, *2: 高性能 AE 減水剤

(3) 試験方法

輪荷重走行試験の実施は、土木研究所が所有する試験機を借用して行った。写真 2-1 に輪荷重走行試験機を示す。供試体の支持条件は、長辺方向の 2 辺を単純支持 (支持支間 2,500mm) とし、短辺方向の 2 辺は弾性支持とした。輪荷重走行の範囲は幅 500mm で橋軸方向の移動距離 3,000mm とした。載荷荷重は、文献 7) の方法と同様の図 2-2 に示す階段状漸増載荷とした。載荷荷重は試験期間を短縮することを考慮して決定されたもので、初期荷重は過去の観測結果から求められた軸重頻度分布⁸⁾の最大値軸重 328kN の輪重 164kN にほぼ相当する 157kN であり、そこから走行回数 4 万回ごとに 19.6kN ずつ荷重を増加させ、最大荷重は初期荷重の約 2.5 倍の 392kN である。走行回数は最大 52 万回を想定した。本実験方法は、同条件下で実施した過去の試験結果との相対関係の評価としては有効であると考えられている⁶⁾。

輪荷重走行による床版の劣化状況の把握は、たわみ、ひずみの計測値とひび割れ観察で行った。試験の終了条件は、床版が損傷して総たわみが急増する挙動を示した時期とした (総たわみの制限値 10 mm)。



写真 2-1 輪荷重走行試験機 (土木研究所)

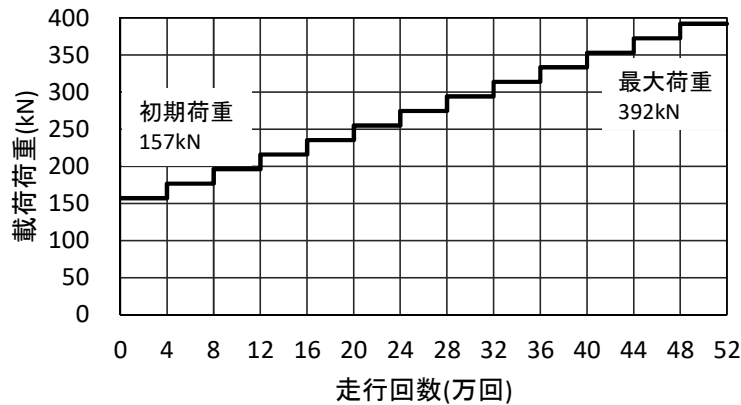


図 2-2 階段状漸増載荷

2. 2. 3 試験結果および考察

(1) 物性試験結果

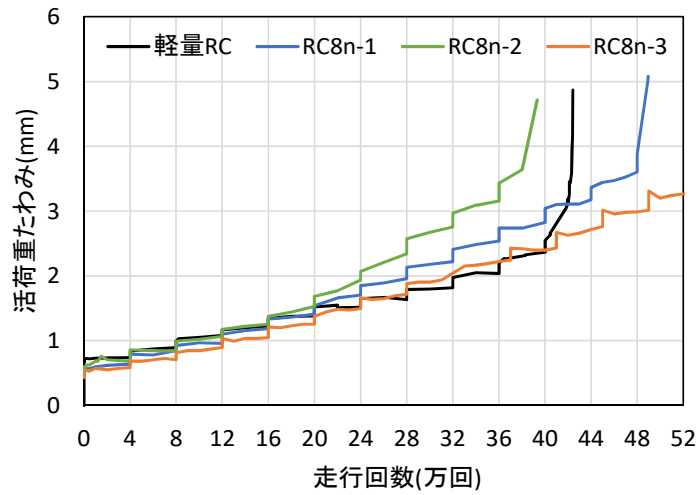
硬化コンクリートの物性値を表 2-3 に示す。材齢 28 日で設計基準強度 40N/mm^2 を上回った。拘束膨張試験結果は材齢 7 日で 351×10^{-6} であり、期待した膨張材の効果が得られた。

表 2-3 硬化コンクリートの物性値

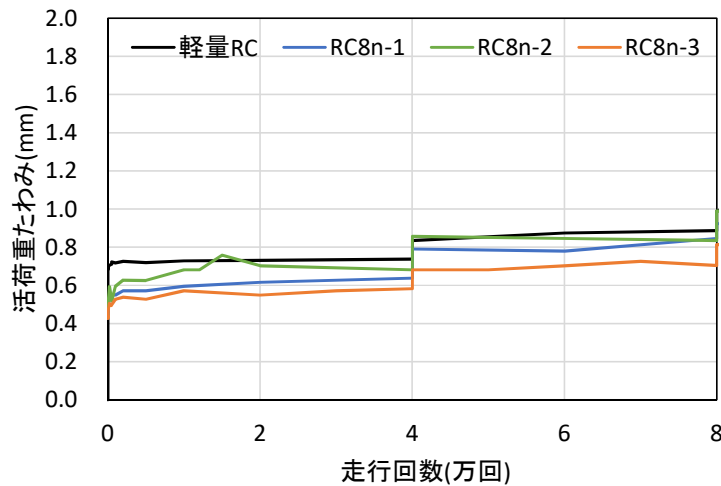
供試体名	材齢(日)	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	割裂引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	せん断強度 (N/mm^2)
軽量RC	28	44.3	15.7	3.1	5.0	5.4
	173	49.1	17.7	3.3	4.9	5.6

(2) 活荷重たわみと走行回数の関係

走行回数と活荷重たわみの関係を図 2-3 に示す。活荷重たわみは、静的に載荷を行った際の総たわみから除荷時の残留たわみを差し引いた値とした。軽量 RC と普通 RC の供試体の活荷重たわみの変化を比べると、走行開始直後は軽量 RC の方が大きい。走行回数 20 万回程度までに普通 RC 床版とほぼ同じとなり、載荷終了直前では軽量 RC が小さくなる傾向であった。走行開始時の軽量 RC のたわみが大きいのは静弾性係数が普通 RC 床版に比べて小さいためと考えられる。軽量 RC のたわみの増加が比較的遅いのは膨張材添加によるケミカルプレストレスの効果で初期の収縮ひび割れの発生の抑制と引張抵抗力が向上したことが考えられる。軽量 RC は、走行回数 40 万回以降にたわみが急増して走行回数 424,190 回（輪荷重 353kN）で試験を終了した。軽量 RC の破壊時の走行回数は、普通 RC の供試体 RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置することがわかる。なお、普通 RC の試験結果にはばらつきがあり⁷⁾、軽量 RC でもばらつきが生じるものと考えられる。よって、軽量 RC の耐疲労性については破壊時の走行回数のみで判断せず、(3) 以降の検討を実施して総合的に判断する。



(a) 軽量 RC と普通 RC の実験結果



(b) 走行回数 0~8 万回の範囲を拡大
図 2-3 活荷重たわみと走行回数の関係

(3) 載荷荷重と強度補正した走行回数の関係

ここでは供試体によって生じるコンクリート強度のばらつきを、設計基準強度に合わせて簡易的に換算して、載荷荷重と強度補正した走行回数の関係を算出した。本検討において比較対象としたのは、軽量RCと普通RCの供試体の中で破壊した実験結果が得られているRC8n-1とRC8n-2とした。軽量RCと普通RCの設計基準強度は、それぞれ40N/mm²と24N/mm²である。強度補正した走行回数は、以下に示す方法(式2-1~2-5)により算出した。

- 1) 走行回数より 157kN 基準の等価繰り返し回数を算出
- 2) 強度補正係数 α を算出

$$\alpha = P_{sx} / P_{sxe} \quad \text{式 2-1}$$

ここに、 P_{sx} ：設計値の押抜きせん断強度¹⁰⁾、 P_{sxe} ：物性試験値を用いた押抜きせん断強度。式 2-2 および式 2-3 は軽量コンクリート 1 種を対象とした提案式¹⁰⁾である。

$$P_{sx} = 2B(\alpha_{cv} \cdot f_{cv} x_m + \alpha_t \cdot f_t C_m) \quad \text{式 2-2}$$

$$P_{sxe} = 2B(\alpha_{cv} \cdot f_{cve} x_m + \alpha_t \cdot f_{te} C_m) \quad \text{式 2-3}$$

ここに、 B : はり幅 ($=b+2d_d$), b : 載荷幅 (mm), d_d : 引張側配力筋有効高さ (mm), x_m : 主鉄筋に直角な断面の引張コンクリートを無視したときの中立軸の高さ (mm), C_m : 引張側主鉄筋のかぶり高さ (mm), α_{cv} , α_t : 軽量コンクリートの低減係数¹⁰⁾ $\alpha_{cv}=0.785$, $\alpha_t=0.703$, f_{cv} , f_t : 設計値のコンクリートのせん断強度, 設計値のコンクリートの引張強度 (N/mm^2), f_{cve} , f_{te} : 物性試験値のコンクリートのせん断強度, 物性試験値のコンクリートの引張強度 (N/mm^2). 普通 RC の P_{s3} , P_{sxe} も同様の計算式で算出した. ただし, $\alpha_{cv}=\alpha_t=1.0$, f_{cv} , f_t は文献 11) による.

3) 強度補正係数 α を考慮した $P_\theta=157\text{kN}$ 基準の等価繰り返し回数 N_{eqs} を算出

$$N_{eqs} = \sum_{i=1}^n \left(\alpha \frac{P_i}{P_\theta} \right)^m n_i \quad \text{式 2-4}$$

ここに、 P_i : 輪荷重 (kN), n_i : 走行回数, m : S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 $m=12.76^{10)}$

4) 強度補正を考慮した走行回数 N_s を算出

$$N_s = 1 / \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_\theta} \right)^m N_{eqs} \quad \text{式 2-5}$$

算出した結果を図 2-4 に示す. 軽量 RC の算出結果は RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置した. 強度補正した軽量 RC の走行回数は 350,504 回であり, RC8n-1 の 357,029 回に近い結果であった.

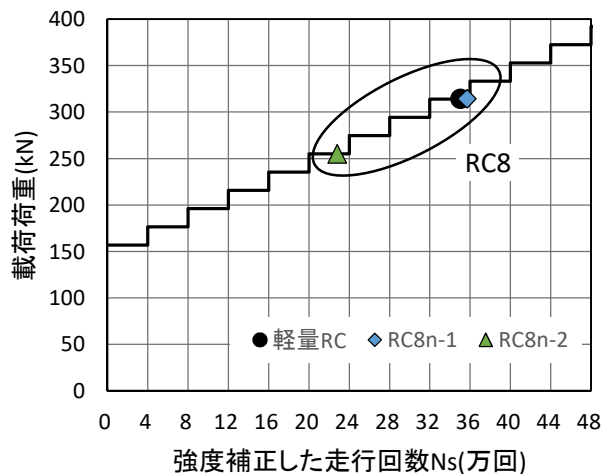


図2-4 載荷荷重と強度補正した走行回数の関係

(4) 中立軸の推移

図 2-1 に示す鉄筋ひずみゲージの計測値の平均から計算した中立軸位置の推移を図 2-5 に示す. 主鉄筋ひずみから計算した中立軸は, 全断面有効の計算値に近い値から始まり, 走行回数の増加とともに上方へ移動した. 走行回数 12 万回からたわみが急増する 40 万回以前までは微小に変化するものの安定していることがわかる. 配力鉄筋ひずみから計算した中立軸は, 初期の段階から 20 万回以前までは主鉄筋ひずみから計算した中立軸より上方に位置し安定していた. その後, ひずみゲージ付近に内部からひび割れが発生し, 計測値に影響を及ぼしたと予想され, 28 万回まで大きく変化し, 32 万回から引張無視側に上昇した. 38 万回以降は下段配力鉄筋のひずみゲージが計測不能となった. 軽量 RC は 38 万回頃に下段配力鉄筋近傍で耐荷力に大きく影響を及ぼす損傷が発生し始め, 荷重が上がった 40 万回には損傷が拡大し, 以降たわみが急増したものと考えられる.

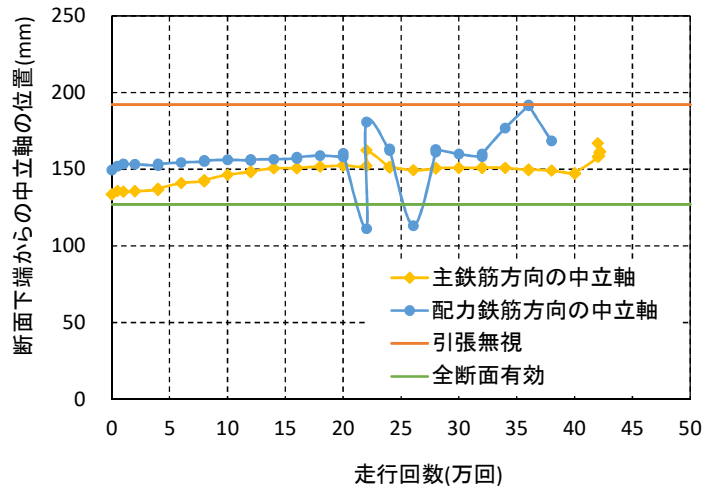
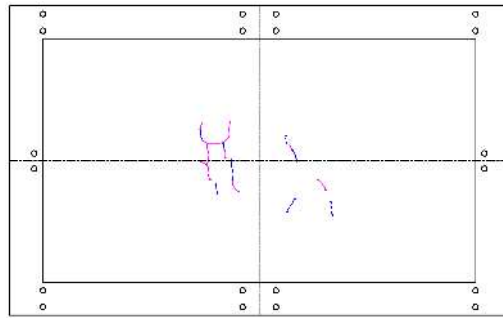


図 2-5 中立軸の距離と走行回数の関係

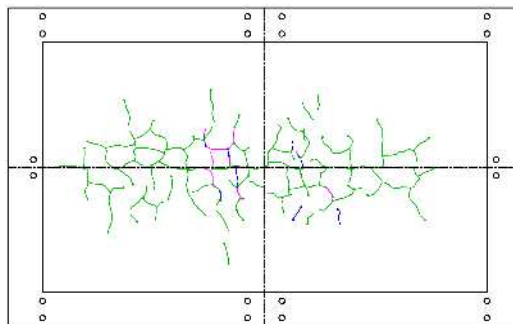
(5) ひび割れ分布

本実験結果のひび割れ分布を図 2-6 に示す。ひび割れの発生は供試体下面の広範囲にほぼ均等に分散しており、床版が一体の構造物として機能していることがわかる。また、本実験結果は文献 11) に示される 4 段階に大別される道路橋 RC 床版のひび割れ損傷過程に当てはめると、一方向ひび割れ (段階 I) が 5,000 回走行, 二方向ひび割れ (段階 II) が 50,000 回走行, 亀甲状ひび割れ (段階 III) が 300,000 回走行に相当することがわかる。陥没破壊 (段階 IV) に関しては、これに至る前に実験を終了したが、試験を終了した 424,190 回走行の状況に近似する。したがって、本実験は普通 RC の実構造の疲労損傷と同様の損傷過程を再現しており、実物大の軽量 RC の破壊性状は基本的に普通 RC と同様のものであると考えられる。なお、文献 2) で示した床版厚 160mm の軽量 RC の破壊性状はひび割れの範囲が狭く、本実験結果とは破壊性状が異なっており、ひび割れ分布に違いが生じた原因は今後の課題とする。また、以降に普通 RC と軽量 RC の破壊性状が異なっている点を示す。

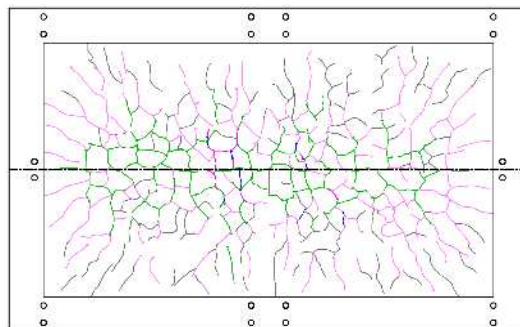
図 2-7 に軽量 RC の床版下面のひび割れ密度と走行回数の関係を示す。ひび割れ密度の算出は格子密度法によって行った。ひび割れ密度の使用限界は $10.0\text{m}^2/\text{m}^2$ であり¹¹⁾、本実験結果はほぼ線形で増加し、使用限界値を超えたところでひび割れ密度が急上昇し実験を終了したことがわかる。図 4-8 にひび割れ密度比と寿命比の関係を示す。ここで N_f は、表 2-1 に示す破壊時走行回数である。文献 11) を参考に普通 RC の傾向を示すが、 N/N_f = 約 0.5~1.0 の間でひび割れ密度の増加が停留し、走行回数に対するたわみの増加率が微小に変化するが一定のままである。この段階でひび割れの開閉に加え、上下方向へのずれおよび水平方向へのずれが顕著となり、ひび割れ面の摩擦によるひび割れの幅の拡大、角落ちが発生し、最終的な破壊は、ひび割れのずれが拡大し床版が版としての連続性を喪失せん断破壊となる。一方、軽量 RC はひび割れ密度の増加が停留せず、写真 2-2 に示すように終局状態でも普通 RC で見られる下面ひび割れのずれはほとんど生じなかった。供試体を橋軸直角方向に切断した断面のひび割れ分布を観察した結果を図 2-9 に示す。軽量 RC は上面にひび割れが比較的多く発生した橋軸方向の中央から 800mm 離れた断面を示し、普通 RC のひび割れ分布は供試体 RC8n-1 のもので橋軸方向の中央付近の断面である。軽量 RC では圧縮側の水平ひび割れが層状に数多く分布する特徴が見られる。軽量 RC に下面ひび割れのずれが生じなかった原因は、コンクリート内部 (配力鉄筋内側) にもひび割れが複数発生したため、下面ひび割れのずれが生じずにたわみが増加したものと考えられる。内部ひび割れが増加し進展すると、圧縮側と引張側の内部の多数のひび割れが連結し、版としての連続性を喪失しひび割れ密度の増加の停留が起こる前にたわみが増加したと考えられる。ひび割れ密度の増加は軽量 RC の疲労損傷と関連しており、床版の維持管理の指標としてひび割れ密度を使うことが可能と考えられる。また、軽量 RC に生じたひび割れは、写真 2-3 に示すように軽量骨材を貫通する割れが生じていることがわかる。この破壊性状は、既往の研究結果²⁾と同様の傾向である。コンクリート内部に多数の水平ひび割れが発生した原因は、膨張材によるケミカルプレストレスの影響と軽量骨材の強度が低い影響が考えられる。



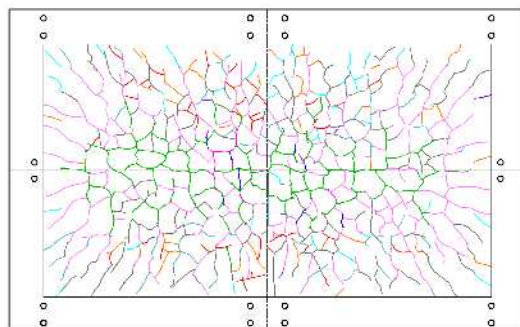
(a) 5,000回走行



(b) 50,000回走行



(c) 300,000回走行



(d) 424,190回走行

図 2-6 供試体下面のひび割れ分布

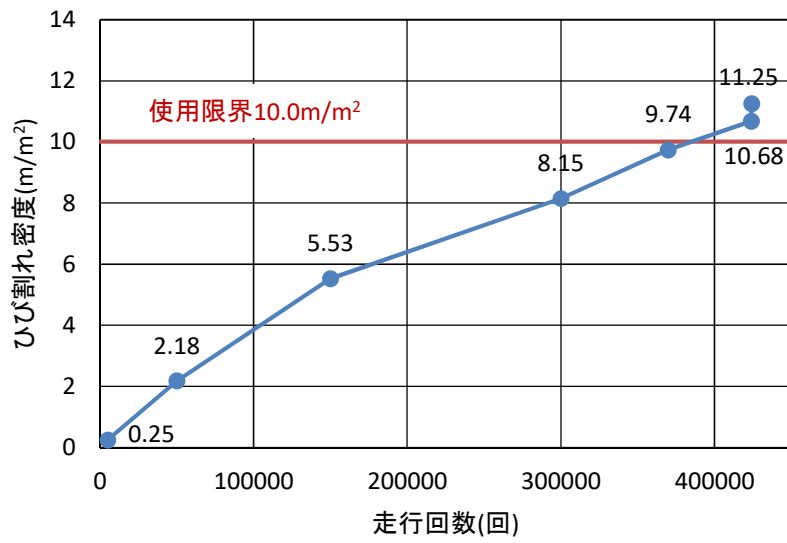


図 4-7 床版下面のひび割れ密度と走行回数の関係

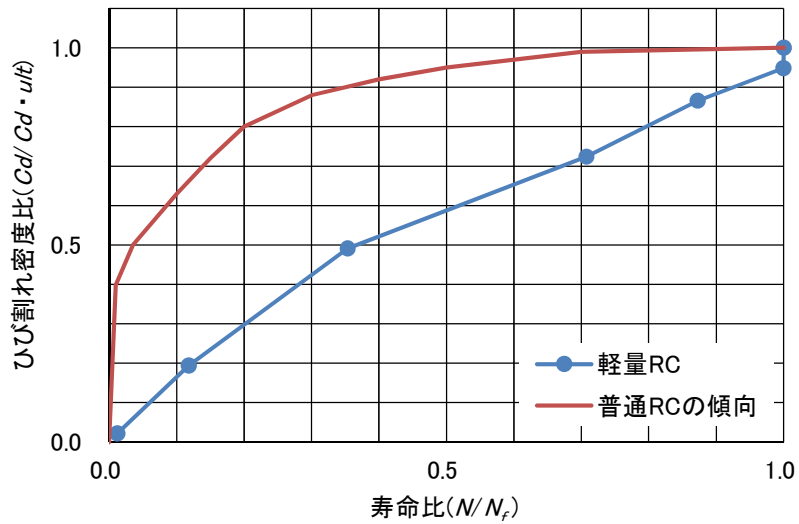


図 2-8 ひび割れ密度比と寿命比の関係

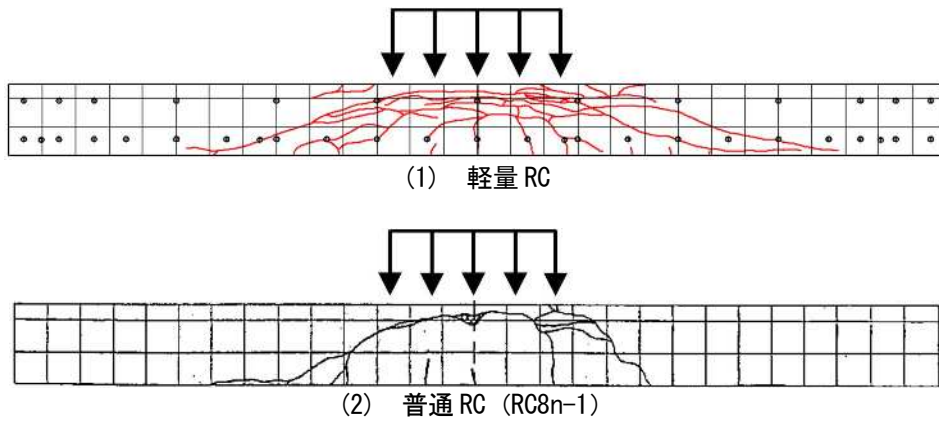


図 2-9 供試体断面のひび割れ分布

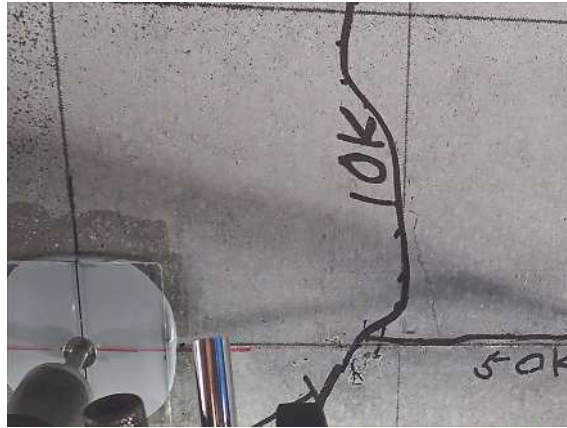


写真 2-2 支間中央部下面のひび割れ（軽量 RC）

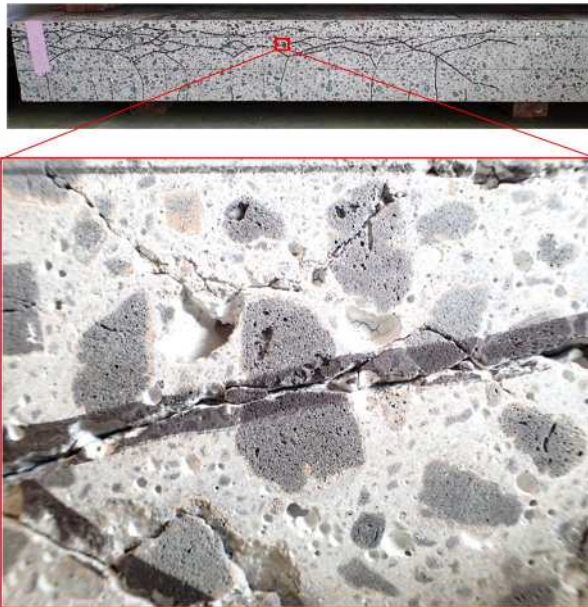
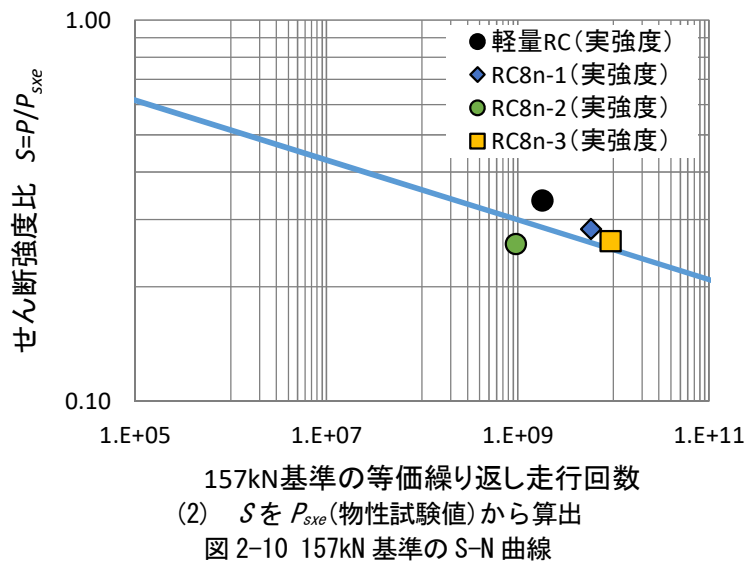
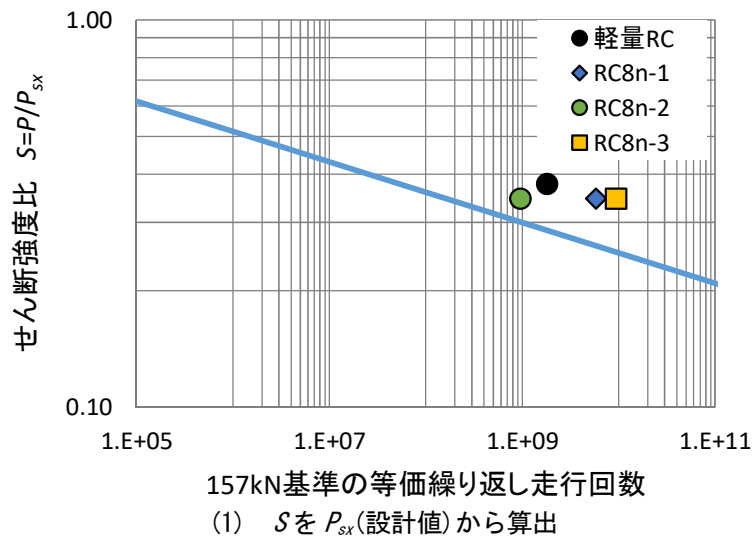


写真 2-3 軽量骨材を貫通する割れ

(6) S-N 曲線

軽量 RC と普通 RC の輪荷重走行試験結果を載荷荷重 157kN 基準の S-N 曲線にプロットしたものを図 2-10 に示す。S-N 曲線は文献 11) の松井理論式とした。図中の縦軸に示す P_{sx} 、 P_{sxe} は、それぞれ式 2-2、式 2-3 より算出した。軽量 RC の実験結果はせん断強度比 S を P_{sx} 及び P_{sxe} で算出した場合のどちらも普通 RC の S-N 曲線よりも右方に位置していることから、耐疲労性に優れることがわかった。ただし、せん断強度比 S を P_{sxe} (物性試験値) から算出した場合は、RC8n-2 のプロットが S-N 曲線よりも低く位置していることがわかる。



2. 2. 4 まとめ

本節では、軽量 RC を用いて国土交通省が過去に行った輪荷重走行試験と同様の階段状漸増載荷を実施することで、現行の道路橋示方書の規定の基となった普通 RC との相対比較により耐疲労性の検討を行った。

以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 活荷重たわみと走行回数の関係より、軽量 RC は破壊時の走行回数が RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置した。また、物性試験の結果から強度補正した走行回数を換算した場合も、RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置した。
- (2) 中立軸位置の推移より、軽量 RC は 38 万回頃に下段配力鉄筋近傍で耐力に大きく影響を及ぼす損傷が発生し始め、荷重が上がった 40 万回には損傷が拡大し、以降たわみが急増したものと考えられる。
- (3) 軽量 RC は圧縮側の水平ひび割れが層状に数多く分布する特徴が見られた。また、軽量 RC では下面ひび割れのずれがほとんど生じなかった。これはコンクリート内部でひび割れが複数発生したため、外面ひび割れのずれが生じずたわみが増加したものと考えられる。

- (4) 軽量 RC の破壊に至るメカニズムとしては、内部ひび割れが増加し進展すると、圧縮側と引張側の内部の多数のひび割れが連結し、版としての連続性を喪失したわみが増加したと考えられる。
- (5) 床版下面のひび割れ密度の増加は、床版の疲労損傷と関連しており、維持管理の指標として使うことが可能と考えられる。
- (6) 軽量 RC は松井理論式の普通 RC の S-N 曲線よりも右方に位置し、耐疲労性に優れることが分かった。

以上より、総合的に判断すると、膨張材併用軽量 RC 床版は普通 RC 床版と同程度の耐疲労性を有していると考えられる。

2. 3 単位水量をパラメータとした膨張材併用軽量コンクリートの圧送性（事前検討）

2. 3. 1 概要

軽量コンクリートは、「コンクリートのポンプ施工指針」¹²⁾で圧送に困難が予想されるケースと位置付けられており、施工前に圧送試験を行うなどして圧送性について十分な事前検討を行うこととされている。特に、今回の膨張材併用軽量コンクリートは粗骨材・細骨材ともに軽量骨材を用いた軽量コンクリート2種であり、土木分野での実績はほとんどないことから、土木用コンクリートとしての軽量コンクリート2種の圧送性を確認することとした。

土木学会「コンクリート標準示方書[施工編]」⁹⁾ではコンクリートの単位水量の上限は 175kg/m³と定められていることから、今回採用する軽量コンクリートの単位水量は、圧送できる範囲内で可能な限り少なくすることを目指した。そこで、事前の検討として 175kg/m³、170kg/m³、165kg/m³の3水準の配合を試験練りにより選定し、ポンプ圧送試験を実施することで詳細検討に用いる単位水量を選定することとした。

2. 3. 2 検討ケース

本節（事前検討）では、膨張材併用軽量コンクリートのポンプ圧送が可能な単位水量を確認するために、単位水量を 175kg/m³（ケース 1）、170kg/m³（ケース 2）、および 165kg/m³（ケース 3）の3配合について圧送性の検討を行った。

2. 3. 3 使用材料

膨張材併用軽量コンクリートの使用材料を表 2-4 に、軽量骨材の物性値を表 2-5 に示す。軽量骨材は3ロットを用い、フレコンバックによる袋詰めにてプラントへ搬入した。どの軽量骨材も、製造時にプレソーキングを実施しており、プラントでは十分にプレウェットしている。

表 2-4 使用材料

使用材料	記号	銘柄	密度 (g/cm ³)
水	W	水道水	1.00
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16
膨張材	EX	石灰系膨張材	3.16
細骨材	SLA	人工軽量細骨材	—
粗骨材	GLA	人工軽量粗骨材	—
AE 減水剤	AD	リグニンスルホン酸塩ポリカルボン酸系化合物	—
AE 剤	AE	樹脂酸系界面活性剤	—

表 2-5 軽量骨材の物性値

		絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材	SLA-1	1.73	1.95	13.0	2.54
	SLA-2	1.73	1.95	12.6	2.57
	SLA-3	1.72	1.93	12.4	2.66
粗骨材	GLA-1	1.30	1.70	30.6	6.27
	GLA-2	1.28	1.65	29.3	6.25
	GLA-3	1.30	1.69	29.6	6.44

2. 3. 4 コンクリート配合

コンクリート配合を表 2-6 に示す。軽量コンクリートの設計基準強度は、普通コンクリート 27N/mm² と同等のせん断強度を得るために 40N/mm² と設定し、材令 28 日で設計基準強度を確保するために W/(C+H-EX) (以下、W/B) = 37% とした。使用する骨材は、コンクリート重量を軽くし上部工重量を削減するために細骨材 (以下、SLA)、粗骨材 (以下、GLA) とともに軽量骨材を使用している。また、ケミカルプレストレス効果により高耐久化を図るために低添加タイプの膨張材 (以下、EX) を標準添加量よりも多い 30kg/m³ 添加した。スランプは「コンクリート標準示方書[施工編]」⁹⁾ を参考に一般にポンプ圧送性が良好である 18cm とした。空気量は現場条件が耐凍害性を考慮する必要がない場所であるため、普通コンクリートと同等の 4.5%⁹⁾ とし、運搬時間 60 分を想定して混和剤量により調整を行った。

表 2-6 コンクリート配合

	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (P×%)	
	W	C	EX	SLA-1 ^{**}	GLA-1 ^{**}	AD	AE
ケース 1	175	443	30	554	588	1.1	0.0005
	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (P×%)	
	W	C	EX	SLA-2 ^{**}	GLA-2 ^{**}	AD	AE
ケース 2	170	429	30	562	581	1.1	0.0005
	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (P×%)	
	W	C	EX	SLA-3 ^{**}	GLA-3 ^{**}	AD	AE
ケース 3	165	415	30	564	603	0.7	0

※：軽量骨材の単位量は表乾質量で表記。

2. 3. 5 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、3m³ の連続らせん羽根ミキサを用いて、練混ぜ量を 2.5m³ として計 5m³ のコンクリートを製造した。練混ぜ手順はセメント、膨張材、細骨材および粗骨材を投入し、1秒後にケース 1 では 25 秒、ケース 2 およびケース 3 では 35 秒練混ぜて排出した。なお、練混ぜ前に軽量骨材の含水率を測定し、含水率と吸水率の差により練混ぜ水量を補正して練混ぜを行った。軽量骨材の含水率測定結果を表 2-7 に示す。

表 2-7 軽量骨材の含水率測定結果

	含水率 (%)	吸水率 (%)	補正率 (%)
SLA-1	11.6	13.0	-1.4
SLA-2	14.6	12.6	2.0
SLA-3	14.9	12.4	2.5
GLA-1	29.6	30.6	-1.0
GLA-2	30.3	29.3	1.0
GLA-3	30.1	29.6	0.5

2. 3. 6 試験項目および試験方法

コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に関する試験項目を表 2-8 に示す。コンクリートのフレッシュ性状に関する試験項目は、スランプ、空気量、加圧ブリーディングとした。また、ポンプ圧送試験は、レディミクストコンクリート工場より施工現場までトラックアジテータ車により運搬し、60 分経過後コンクリートポンプ車にて圧送した。圧送試験における配管図を図 2-10 に示す。配管径は 5B 管 (12.5cm) とし、配管長は実施工での最大圧送延長と同じ水平換算距離で 151m となるように配管した。コンクリートポンプ車は、最大設計吐出量 124m³/h、最大吐出圧力 7.0N/mm²、最大油圧 29.4N/mm² の油圧ピストン式コンクリートポンプ車を使用した。圧送性の評価は、圧送時の状況と筒先のコンクリート性状にて行った。

表 2-8 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101 「コンクリートのスランプ試験方法」に準拠
空気量	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法・空気室圧力方法」に準拠
コンクリート温度	JIS A 1156 「フレッシュコンクリートの温度測定方法」に準拠
供試体作成	JIS A 1132 「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠
加圧ブリーディング	JSCE-F-1147 「加圧ブリーディング試験方法」に準拠
圧縮強度	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠 (材齢 7 日, 14 日, 28 日および 91 日)

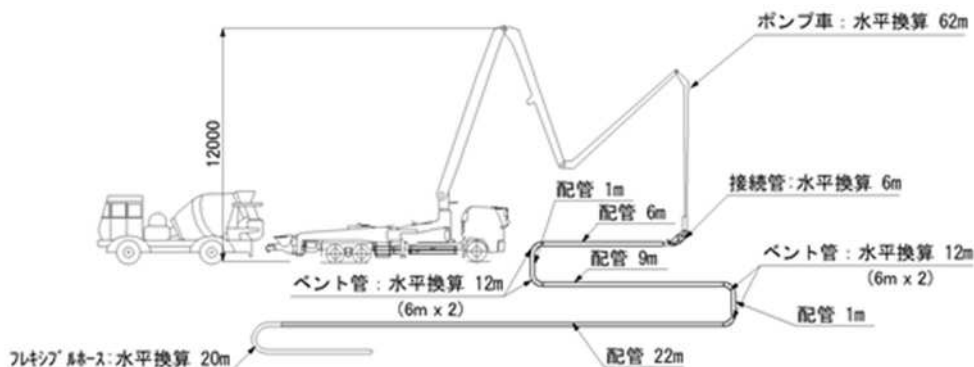


図 2-10 配管系統図

2. 3. 7 試験結果および考察

(1) コンクリートのフレッシュ性状

各ケースのフレッシュ試験結果を表 2-9 に示す。各ケースの圧送前のスランプ、空気量とも、目標スランプ(18cm±2.5cm)、目標空気量(4.5%±1.5%)の範囲内であった。各ケースのスランプの経時変化を図 2-11 に、空気量の経時変化を図 2-12 に示す。圧送前にスランプが、目標スランプ(18cm±2.5cm)の範囲内であることを確認し、圧送試験を開始した。スランプは、ケース 3 において圧送前後で若干低下したものの、ケース 1 およびケース 2 は変化が小さかった。空気量は、ケース 1 およびケース 3 において圧送前後で低下し、ケース 2 において圧送前後で増加した。また、ケース 2 では出荷時から圧送前で大きな低下があった。

表 2-9 フレッシュ試験結果

	測定時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	コンクリート温度(°C)
ケース 1	出荷時	23.5	7.4	1735	29.0
	圧送前	20.0	6.0	1761	30.0
	圧送後	21.5	3.1	1816	31.0
ケース 2	出荷時	20.5	5.6	1752	26.0
	圧送前	20.0	2.9	1801	24.0
	圧送後	20.5	4.6	1769	24.0
ケース 3	出荷時	19.0	5.5	1759	21.0
	圧送前	17.5	4.9	1770	21.0
	圧送後	15.5	3.7	1793	21.0

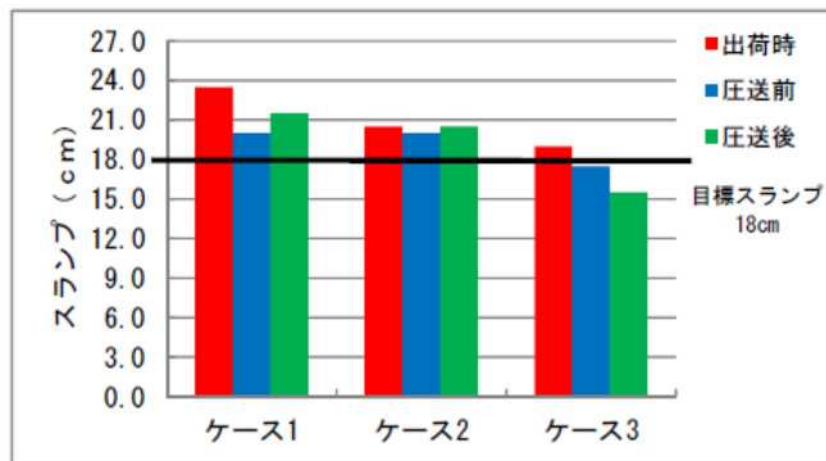


図 2-11 スランプの経時変化

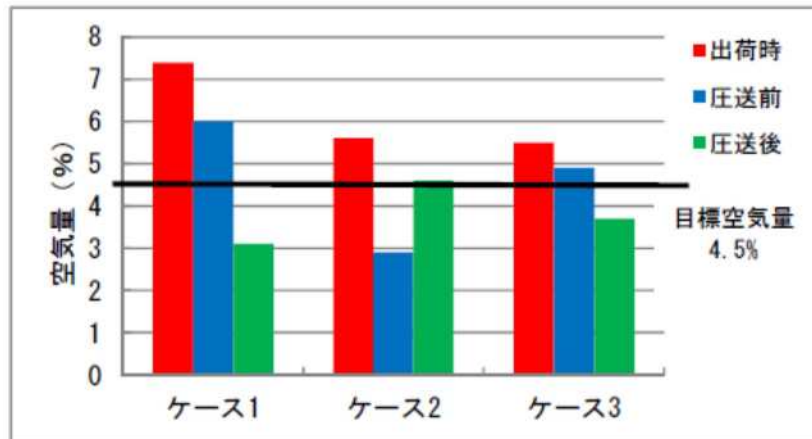


図 2-12 空気量の経時変化

(2) 圧送性

ケース1およびケース2については、筒先のコンクリート性状は良好であり圧送性は問題なかった。ケース3については、圧送途中でテーパー部において閉塞した。軽量コンクリートの閉塞の原因としては、一般には軽量骨材の圧力吸水が主たる原因と考えられているが、軽量骨材はプラントで十分にプレウェッティングされていたことから、軽量骨材の圧力吸水以外の原因が存在するのではないかと考えた。単位水量が $165\text{kg}/\text{m}^3$ と少ないことに加え、軽量骨材が軽いことにより衝撃力にも依存するコンクリートの練混ぜ効率が低下することで、コンクリート内に水で飽和していない凝集体が多く残存していたのではないかと考えた。その結果、ベント管やテーパー管を含む配管内を圧送される過程でその凝集体がせん断を受けて分散したことにより、圧送に必要な水が奪われて圧送性が著しく低下した可能性があると考えた。なお、テーパー部を取り除きポンプ圧送を再開すると閉塞なく圧送することができた。

(3) 加圧ブリーディング試験結果

軽量コンクリートの圧送性を評価するために加圧ブリーディング試験を実施した。圧送前のコンクリートを用いた加圧ブリーディング試験結果を図 2-13 に示す。いずれのケースも圧送性が良好な範囲内にある¹²⁾。単位水量が少ないほど脱水量は少なくなると思われたが、ケース3の脱水量がケース2の脱水量より多い結果となった。その原因は、単位水量 $170\text{g}/\text{m}^3$ の軽量コンクリートは練混ぜが不十分であったため、コンクリート内に水で飽和していない凝集体が残存していたことから脱水が阻害されたのではないかと考えた。

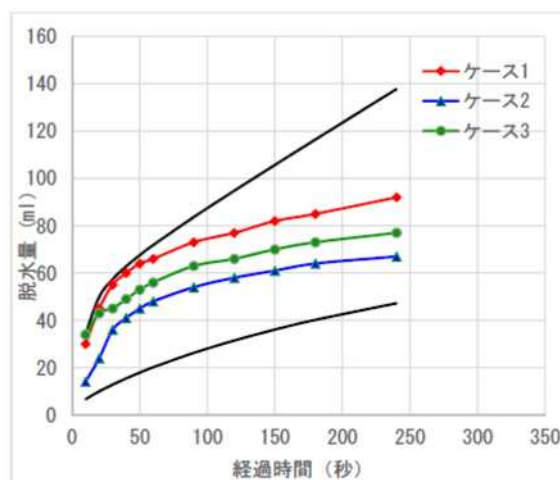


図 2-13 加圧ブリーディング試験結果

2. 3. 8 まとめ

- (1) 単位水量 $175\text{kg}/\text{m}^3$ と $170\text{kg}/\text{m}^3$ の配合については、水平換算距離で 151m のポンプ圧送が閉塞や材料分離を起こすことなく圧送できることを確認した。
- (2) 単位水量 $165\text{kg}/\text{m}^3$ の配合については、流動に必要な液相が少ない配合であることに加えて、コンクリート内に残存する不飽和な凝集体が圧送中に分散することで圧送に必要な水が減少したことにより、テーパー部で閉塞した可能性がある。

2. 4 混和剤とミキサをパラメータとした膨張材併用軽量コンクリートの圧送性（詳細検討）

2. 4. 1 概要

本節では、事前検討でテーパー管において閉塞が発生したもののテーパー管の変更や混和剤の変更等により圧送性を改善できる可能性があるかと判断した $165\text{kg}/\text{m}^3$ を検討の対象とした。

2. 4. 2 検討ケース

今回の検討ケースを表 2-10 に示す。混和剤は分散性能の異なる AE 減水剤（高機能タイプ）（以下、AD）と高性能 AE 減水剤（以下、SP）の 2 種類を、ミキサは練混ぜ効率が異なると考えられる連続らせん羽根ミキサと二軸強制練りミキサの 2 種類を使用した。ケース 1 は閉塞が発生した組合せである。ケース 2 は混和剤のみ SP に変更した組合せであり、ケース 3 は混和剤を SP に変更した上で、ミキサも二軸強制練りミキサに変更した組合せである。混和剤の種類とミキサの種類が、フレッシュ性状と圧送性の改善にどの程度寄与するかを検討した。なお、連続らせん羽根ミキサとは、練混ぜの障害となるシャフトをなくしたミキサで、羽根はらせん形状である。左ねじれ連続らせん羽根と右ねじれ連続らせん羽根で 1 組の連続羽根を形成しており、2 組の連続羽根は 180° 対称で並列に設けられている。低水セメント比の高強度コンクリートに対する練混ぜ効率が特に高いと言われている。連続らせん羽根形状の例を写真 2-4 に、連続らせん羽根ミキサと二軸強制練りミキサの仕様を表 2-11 に示す。

表 2-10 検討ケース

	混和剤	ミキサ
ケース 1	AD	連続らせん羽根ミキサ
ケース 2	SP	連続らせん羽根ミキサ
ケース 3	SP	二軸強制練りミキサ



写真 2-4 連続らせん羽根形状の例

表 2-11 使用したミキサーの仕様

	連続らせん羽根ミキサ	二軸強制練りミキサ
公称容量	3.3 m ³	3.25 m ³
電動機	37×4 KW	45×2 KW
回転数	31 min ⁻¹	26 min ⁻¹

2. 4. 3 使用材料

膨張材併用軽量コンクリートの使用材料を表 2-12 に、軽量骨材の物性値を表 2-13 に示す。

軽量骨材は製造日の異なる 3 ロット分を用いた。ケース 1 で使用する SLA-1, GLA-1 はフレコンバックによる袋詰めにて、ケース 2 で使用する SLA-2, GLA-2 およびケース 3 で使用する SLA-3, GLA-3 はダンプトラックにてプラントへ搬入した。どの軽量骨材も、製造時にプレソーキングを実施しており、また、プラントでは十分にプレウェットニングしている。混和剤はコンクリート工場に常備されているものを使用した。

表 2-12 使用材料

項目	詳細
水 (W)	上水道水
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
膨張材 (EX)	石灰系膨張材 (密度 3.16g/cm ³)
細骨材 (SL)	人工軽量細骨材
粗骨材 (GL)	人工軽量粗骨材
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系化合物
AE 減水剤 (AD)	リグニンスルホン酸塩ポリカルボン酸系化合物
AE 剤 (AE)	樹脂酸系界面活性剤
空気調整剤 (DF)	ノニオン系界面活性剤

表 2-13 軽量骨材の物性値

		絶乾重量 (g/cm ³)	表乾重量 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材	SLA-1	1.67	1.90	11.5	2.73
	SLA-2	1.68	1.94	15.8	2.67
	SLA-3	1.69	1.91	13.0	2.67
粗骨材	GLA-1	1.30	1.69	29.7	6.31
	GLA-2	1.27	1.68	32.4	6.43
	GLA-3	1.26	1.62	28.7	6.42

2. 4. 4 コンクリート配合

(1) ケース 1

コンクリート配合を表 2-14 に示す。単位水量は 165kg/m³ である。軽量コンクリートの設計基準強度は、普通コンクリート 27N/mm² と同等のせん断強度を得るために 40N/mm² と設定し、材齢 28 日で設計基準強度を確保するために事前に試験練りを行った上で W/(C+H-EX) (以下、W/B) を 37% とした。スランプは「コンクリート標準示方書[施工編]」⁹⁾ を参考に、一般に圧送性が良好である 18cm とした。空気量は現場条件が耐凍害性を考慮する必要がない場所であるため、普通コンクリートと同等の 4.5%³⁾ とした。運搬時間は 60 分と想定して、試験練りにより混和剤の添加率を決定した。

(2) ケース 2 および ケース 3

基本的にケース 1 の配合と同じであるが、混和剤を AD から SP に変更した。

表 2-14 コンクリート配合

	単位量(kg/m ³)					混和剤(P×%)			
	W	C	EX	SLA	GLA	AD	SP	AE	DF
ケース 1	165	415	30	555	603	1.1	—	0.01	0.003
ケース 2				569	598	—	0.5	0.00038	0.05
ケース 3				558	577	—	0.5	0.0075	0.05

2. 4. 5 練混ぜ

(1) 連続らせん羽根ミキサ

ケース 1 および 2 のコンクリートは、3m³ の連続らせん羽根ミキサを用いて、練混ぜ量を 2.5m³ として計 5m³ のコンクリートを製造した。練混ぜ手順は材料一括投入後 60 秒練混ぜて排出した。なお、練混ぜ前に軽量骨材の含水率を測定し、含水率と吸水率の差により練混ぜ水量を補正して練混ぜを行った。軽量骨材の含水率測定結果を表 2-15 に示す。

(2) 二軸強制練りミキサ

ケース 3 のコンクリートは、3m³ の二軸強制練りミキサを用いて、練混ぜ量を 2.5m³ として計 5m³ のコンクリートを製造した。練混ぜ手順は、細骨材、膨張材を投入後、1秒後に水と混和剤を、5秒後にセメントを、9秒後に粗骨材を投入し合計で 60 秒間練混ぜて排出した。なお、ケース 1 および 2 と同様に練混ぜ水量を補正して練混ぜを行った。ちなみに、連続らせん羽根ミキサ、二軸強制練りミキサともに、通常のコンクリートの製造は 25 秒の練混ぜ後に排出して出荷しているが、今回検討対象とした膨張材併用軽量コンクリートの製造では、25 秒の練混ぜでは練混ぜ中のミキサの負荷電流値が一定にならず、練混ぜ後の性状が安定していないと判断し、練混ぜ時間を 60 秒に延長して検討を行った。

表 2-15 軽量骨材の含水率測定結果

	①含水率(%)	②吸水率(%)	①-② 補正(%)
SLA-1	13.8	11.5	2.3
SLA-2	19.1	15.8	3.3
SLA-3	17.3	13.0	4.3
GLA-1	30.2	29.7	0.5
GLA-2	35.4	32.4	3.0
GLA-3	29.8	28.7	1.1

2. 4. 6 試験項目および試験方法

コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に関する試験項目を表 2-16 に示す。品質管理は、スランプが「コンクリート標準示方書[施工編]」⁹⁾を参考に圧送前で 18cm と設定されていることから圧送前に行った。なお、スランプ試験と空気量試験は各回 1 回実施し、圧送後とは、筒先を目視観察し、先送りモルタルからコンクリートに変わったことを確認した後に、サンプルを採取した。また、圧送試験は、レディミクストコンクリート工場より施工現場までトラックアジテータ車により運搬し、60 分経過後にコンクリートポンプ車にて圧送した。圧送試験における配管図を図 2-14 に示す。配管径は 5B 管 (125mm) とし、配管長は実施工での最大圧送延長と同じ水平換算距離で 151m となるように配管した。ブームからの配管として、接続管より先は、地表面で配管を行った。なお、試験ヤードの広さの制限から、ブームを図-1 のように折り曲げ、配管はベント管を使用し、試験ヤード内に収まるように配管した。ケース 1 は、最大理論吐出量 124m³/h、最大吐出圧力 7.0N/mm²、最大油圧 29.4N/mm² の油圧ピストン式コンクリートポンプ車を、ケース 2 および 3 は最大理論吐出量 160m³/h、最大吐出圧力 8.5N/mm²、最大油圧 35.3N/mm² の油圧ピストン式コンクリートポンプ車を使用した。圧送速度は低速（吐出圧力 3N/mm² 程度）で行った。また、閉塞しかけた際は、圧力を最大吐出圧力付近まで上げて、復旧を試みた。圧送の中断は、圧送性の確認後に、試験体打設等の段取り替えに伴い発生する。圧送性の評価は、閉塞の有無と筒先のコンクリート性状にて行った。

表 2-16 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101 「コンクリートのスランプ試験方法」に準拠
空気量	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法・空気室圧力方法」に準拠
コンクリート温度	JIS A 1156 「フレッシュコンクリートの温度測定方法」に準拠
供試体作成	JIS A 1132 「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠
ブリーディング	JIS A 1123 「コンクリートのブリーディング試験方法」に準拠
加圧ブリーディング	JSCE-F-1147 「加圧ブリーディング試験方法」に準拠
圧縮強度	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠（材齢 7 日, 14 日, 28 日および 91 日）

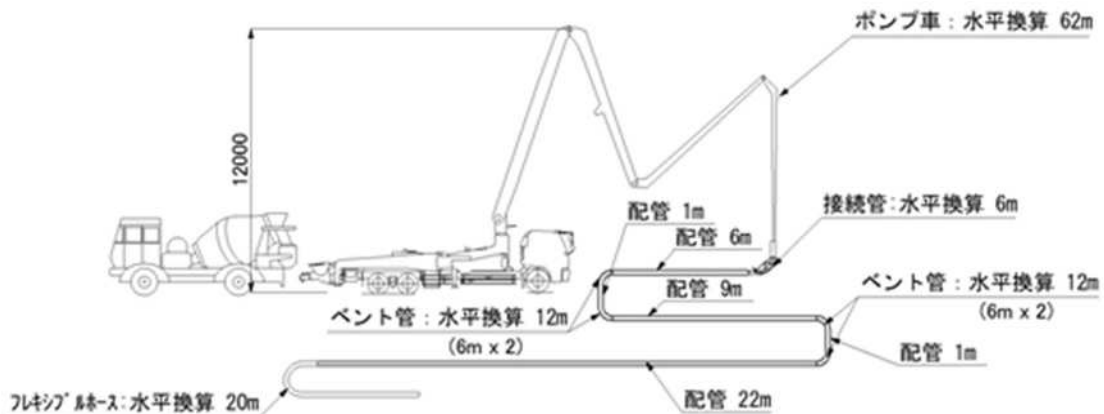


図 2-14 配管系統図

2. 4. 7 試験結果および考察

(1) コンクリートのフレッシュ性状

各ケースのフレッシュ試験結果を表 2-17 に示す。各ケースの圧送前のスランプ、空気量とも、目標スランプ(18cm±2.5cm)、目標空気量(4.5%±1.5%)の範囲内であった。スランプの経時変化を図 2-15 に、空気量の経時変化を図 2-16 に示す。特異な傾向として、ケース 1 のスランプが出荷時から圧送前までに約 10cm も増加した。なお、試験練り時においても同様にスランプが製造後 60 分で目標スランプとなる傾向を確認していたことから、圧送試験時においても出荷してから施工現場において再度スランプを確認することとした。出荷時と荷卸ろし時でスランプが大きく異なった理由は、出荷時には AD の性能が十分に発揮されていなかったが、運搬中に AD の性能が徐々に発揮されてスランプが後伸びしたためではないかと考えた。また、ケース 1 で使用したミキサは連続らせん羽根ミキサである。あまり普及していないミキサであるが、高強度コンクリートでは練混ぜ時間が短く生産性がよいミキサと言われている。練混ぜとは、「練り」と「混ぜ」の組合せと言われる。ここでは、「練り」とは、ミキサの羽根が回転することによりコンクリートにせん断力が加わり、セメント粒子の凝集体を分散して練混ぜ水と均質に一体化させることであり、「混ぜ」とは、コンクリートを構成する全ての材料を巨視的に均一にすることと捉えている。連続らせん羽根ミキサの「混ぜ効率」は、水セメント比の大小および骨材の種類にかかわらず極めて高いと考えられるが、普通強度レベルかつ軽量骨材を使用した今回のコンクリートでは「練り効率」が高くなかったものと考えた。通常のコンクリートの製造でも連続らせん羽根ミキサの練混ぜは短時間で終了することから、連続らせん羽根ミキサの「練り効率」は、使用材料の重さにも依存しており、軽量コンクリートでは「練り効率」が低下したために、AD では凝集体の分散が十分に進まなかったのではないかと考えた。ケース 2 および 3 では、混和剤を SP に変更したことから、同じ練混ぜ時間で強固な凝集体の分散がある程度良好に進んだために、出荷時から圧送前までのスランプの後伸びがなかったと考えられる。このことから、AD の分散性に比べて、SP の分散性の方が優れていると考えられる。

スランプは一般的に圧送前後で 2cm 程度低下する⁹⁾と言われているが、ケース 2 のスランプは圧送前後で約 6cm 増加し、空気量も約 6%増加した。スランプが伸びた理由は、圧送により凝集体の分散が一段と進んだ可能性や、空気量が増加したことが考えられる。また、空気量が伸びた理由は、先送りモルタルの代わりに試験的に使用したコンクリート誘導モルタル化剤が残存して試験サンプルに混入した可能性も否定できない。なお、コンクリート誘導モルタル化剤は、主成分がシリカヒュームであり、筒先のコンクリート廃棄量を減らすことを目的にケース 2 のみに使用した。コンクリート誘導モルタル化剤の圧送量は 0.144m³ である。空気量は、いずれのケースにおいても圧送前後で伸びる傾向にあり、ホッパー内で空気を巻き込んだ可能性や配管内での何らかのメカニズムにより空気量が増加した可能性等が考えられる。圧送による空気量の増加量が把握されていることから、これを参考にして、今回は施工では実施工前に再度実機で試験練りのみを行い、出荷時の空気量を抑え気味にする等の対処を行う必要があると考えている。

表 2-17 フレッシュ試験結果

	測定時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	コンクリート温度 (°C)
ケース 1	出荷時	9.0	3.6	1785	16.0
	圧送前	19.5	5.3	1753	16.0
	圧送後	18.5	5.3	1753	16.0
ケース 2	出荷時	21.0	6.1	1747	17.0
	圧送前	20.5	5.9	1752	16.0
	圧送後	27.0	12.4	1630	16.0
ケース 3	出荷時	19.0	3.6	1762	15.0
	圧送前	20.5	5.6	1724	16.0
	圧送後	22.5	7.6	1688	18.0

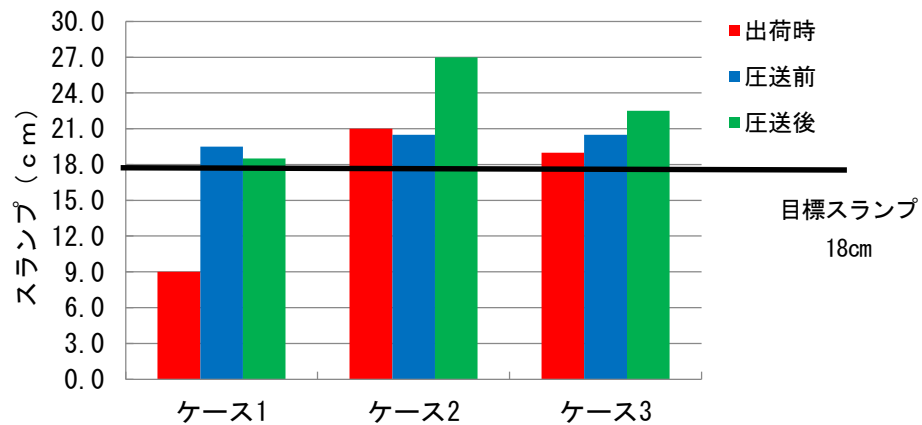


図 2-15 スランプの経時変化

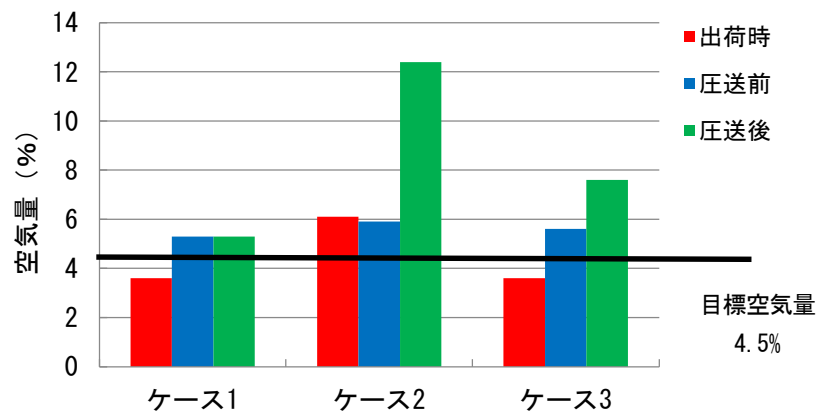


図 2-16 空気量の経時変化

(2) 硬化コンクリートの圧縮強度

圧送前に採取した供試体の圧縮強度を図 2-17 に、その他の供試体採取時期を含む全ての圧縮強度試験結果を表 2-18 に示す。品質管理に用いる圧送前の圧縮強度は、いずれのケースでも材齢 28 日で設計基準強度の 40N/mm^2 を上回る結果となった。ただし、ケース 2 およびケース 3 の圧送後の圧縮強度は、材齢 28 日で設計基準強度の 40N/mm^2 を下回った。これは、圧送前後で空気量が大きく変化したためと考えられる。空気量が変化した理由については、ホッパー内で空気を巻き込んだ可能性や配管内での何らかのメカニズムにより空気量が増加した可能性を含めて、さらに検討が必要である。

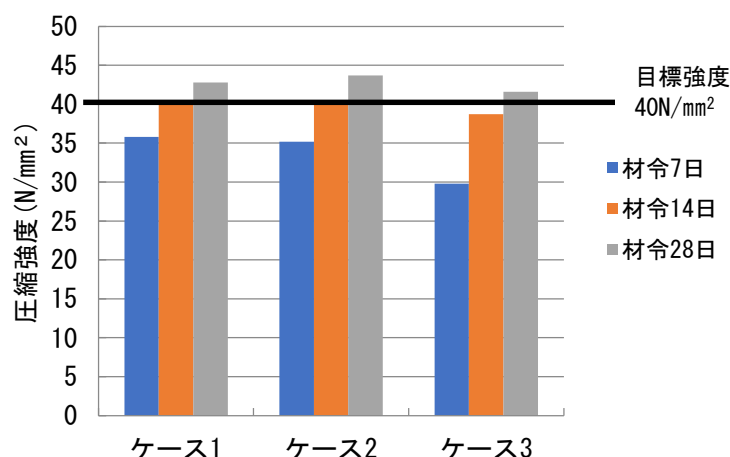


図 2-17 圧縮強度試験結果（圧送前）

表 2-18 圧縮強度試験結果

	供試体採取時期	圧縮強度(N/mm ²)		
		材齢 7 日	材齢 14 日	材齢 28 日
ケース 1	出荷時	39.9	44.6	46.8
	圧送前	35.8	40.0	42.8
	圧送後	36.7	39.4	42.0
ケース 2	出荷時	36.9	38.4	46.7
	圧送前	35.2	40.1	43.7
	圧送後	21.8	26.8	36.6
ケース 3	出荷時	34.0	42.1	42.1
	圧送前	29.8	38.7	41.6
	圧送後	29.8	31.2	37.1

(3) 圧送性

(a) ケース 1

連続してコンクリートを圧送している間は閉塞を生じることなく圧送できたが、段取り替えのために 20 分程度圧送を中断した後に圧送を再開したところ閉塞が発生した。軽量コンクリートの閉塞の原因としては、一般には軽量骨材の圧力吸水が主たる原因と考えられているが、軽量骨材はプラントで十分にプレウェッティングされていたことから、軽量骨材の圧力吸水以外の原因が存在するのではないかと考えた。圧送の一時中断によりコンクリートの状態が変化したことも考えられるが、出荷時から圧送前までのスランプの大きな変化が凝集体の分散の進行に伴うものと考えられたことから、閉塞の主たる原因は、コンクリート内に残存する強固な凝集体¹³⁾ではないかと考えた。その強固な凝集体の大きさはセメント粒子複数個が固まりあったレベルあり、内部に水を含まないセメント粒子の塊と考えられている。閉塞のメカニズムとしては、ベント管やテーパ管を含む配管内を圧送される過程で配管壁面との摩擦により凝集体がせん断を受けて分散し、水に触れていなかった部分が露出すると共に自由水が減少することで圧送性が著しく低下した可能性がある。

(b) ケース 2

ケース 1 では出荷時から圧送前までのスランプが約 10cm 後伸びしたことから、練混ぜ中に凝集体の分散が十分に進行することを期待して、混和剤を SP に変更した。また、ケース 1 の圧送試験での閉塞の原因をコンクリート中の残存していた不飽和で強固な凝集体の分散による自由水(余剰水)の減少ではないかと考えたが、混和剤を SP に変更することで、強固な凝集体を分散させて圧送中の閉塞の解消にもある程度の効果をもたらすことを期待した。筒先のコンクリートの性状は良好であり、圧送途中で 30 分程度圧送を中断しても、閉塞することはなかった。しかし、圧送中断直後の配

管内のコンクリートはブームの頂点から筒先への高低差による重力がかかっているにもかかわらず、コンクリートはほとんど流れることはなかった。このことから、圧送に大きな支障はなかったものの配管内では強固な凝集体がせん断を受けて分散してコンクリート中の自由水が減少し、圧送に必要な水が不足気味になるという本研究で想定している現象が生じていたものと考えている。ポンプ圧送作業者からも、配管内のコンクリートは閉塞寸前の状態と思われるとのコメントがあった。混和剤を SP に変更したことで凝集体の分散はある程度進んだものの、強固な凝集体を十分に解消するまでには至らなかったものと考えている。なお、少量の SP の使用で十分なスランブが確保できることから、スランブと空気量の制約上、SP は標準使用量に比べてかなり少ない量しか入れられなかった。よって、使用するミキサを変更し、引き続き検討を行うこととした。

(c) ケース 3

ケース 2 で行った混和剤の SP への変更だけでは、圧送性の改善効果は限定的であったことから、ミキサを連続らせん羽根ミキサから二軸強制練りミキサに変更した。二軸強制練りミキサは一般的に使用されているミキサで、骨材の重さによらずに羽根の回転作用のみでコンクリートに十分なせん断力を加えることができるものと考えた。すなわち、水セメント比の高い普通強度レベルのコンクリートで、かつ軽量骨材を用いた場合であってもある程度十分な「練り効率」が得られ、強固な凝集体を少なくすることができるのではないかと考えた。筒先のコンクリート性状は良好であり圧送性は問題なかった。また、圧送途中で 30 分程度圧送を中断したが、閉塞は生じなかった。圧送中の配管内のコンクリートの状況も良好であった。ミキサを二軸強制練りミキサに変更したことにより、骨材の重さに頼ることなく十分な練り効率が得られて、閉塞の原因となった強固な凝集体が減少したものと考えている。

(4) 加圧ブリーディング試験結果

軽量コンクリートの圧送性を評価するために加圧ブリーディング試験を実施した。圧送前のコンクリートを用いた加圧ブリーディング試験結果を図 2-15 に示す。いずれのケースも、参考文献 12) に示された圧送性が良好な範囲内であった。ただし、すべてのケースの単位水量が同じであることから脱水量はほぼ同じ結果になると思われたが、ケース 1 の脱水量はケース 2 および 3 の脱水量に比べてかなり少ない結果となった。ケース 1 の脱水量がほぼ同配合の他の 2 つの配合に比べてかなり少なくなった原因については、連続らせん羽根ミキサと AD の組合せでは、残存していた凝集体がかなり大きくかつ強固であった可能性が高いと考えている。強固かつ比較的大きな凝集体が多数残存していたとすれば、加圧ブリーディング試験の状況でも、粉体の圧密は進まずに、自由水が多かったにもかかわらず脱水が阻害されたのではないかと考えた。

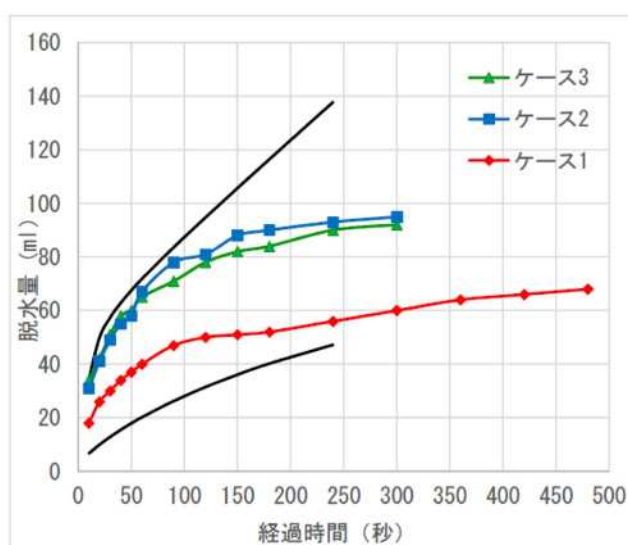


図 2-18 加圧ブリーディング試験結果

(5) ブリーディング試験結果

コンクリート中の自由水の把握を通して、閉塞の一因と考えられるコンクリート内に残存する強固で不飽和な凝集体の量の傾向を把握できないかと考え、ブリーディング試験を実施した。強固で不飽和な凝集体の存在を指摘した既往の研究では、このような凝集体が存在すると遠心分離によって浮き水として採取した自由水が増加するとしている¹³⁾。しかし、この手法で自由水を取得するには遠心分離装置が必要なことから、より簡易で実務的な方法でコンクリート中の自由水を測定することはできないかと考えた。一連の検討では多くの室内試験練りを実施しており、同一配合のコンクリートに対して、室温や練混ぜ時間を変化させたところ、練混ぜ具合が悪いとブリーディング量が多くなるという傾向を確認していたことから、練混ぜ具合が悪いと不飽和な凝集体が多く残存し、その結果、ブリーディング量も多くなるものと考えた。出荷時のコンクリートを用いたブリーディング試験結果を図2-19に示す。ただし、ケース1のみ圧送試験時に試験を実施しなかったため、後日同配合のコンクリートを同じミキサで製造して追加で試験を行った。このため、この値は参考値として取り扱うこととした。参考値ではあるが、最も強固で不飽和な凝集体が多く残存していると考えた。

ケース1のブリーディング量は、当初の予想に反してそれほど多くなかった。なお、追加で試験を実施したコンクリートのスランプは、練混ぜ直後の17.5cmに対して60分経過後は19cmであり、圧送試験時と同様の傾向を示さなかった。このことから、圧送試験時と追加試験時の練混ぜ直後のコンクリート性状は必ずしも同じではなく、圧送試験時のコンクリートは追加試験時に比べて凝集体が多く残存していたと考えられた。したがって、圧送試験時にブリーディング量を測定していれば追加試験時よりも更に少なくなっていた可能性もあると考えられる。

ケース2のブリーディング量は、閉塞したケース1のブリーディング量（参考値）よりかなり多い結果となった。混和剤をSPに変更することで、凝集体をケース1より少なくできて、その結果、自由水（余剰水）は少なくなると考えていたが、逆にケース1よりも多い結果となった。

ケース3のブリーディング量は、閉塞したケース1や圧送性に劣ったケース2のブリーディング量より少ない結果となった。これは、混和剤をSPに変更することに加え、ミキサを変更したことで、強固で不飽和な凝集体がかなり少なくなったためと考えている。

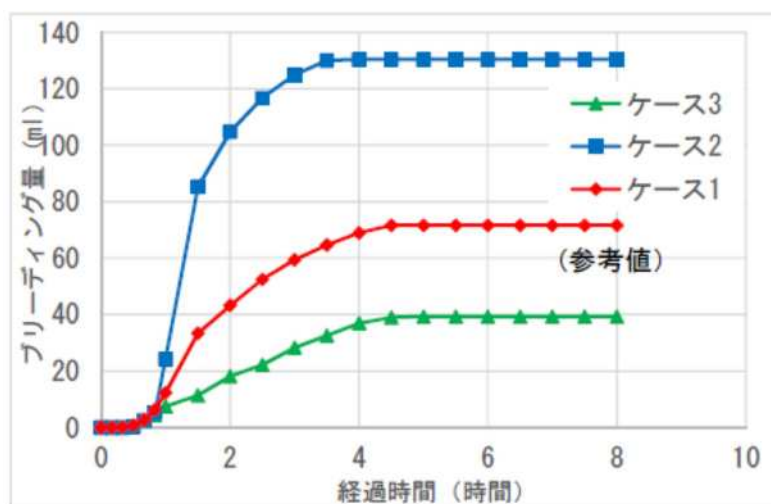


図2-19 ブリーディング試験結果

ケース 1 は混和剤 AD と連続らせん羽根ミキサの組合せであり、一番練り具合が悪いと考えたことから、当初は強固で不飽和な凝集体が最も残存し、ブリーディング量も一番多くなるものと考えていた。しかし、実際にはケース 1 のブリーディング量はケース 2 よりかなり少なくなった。ケース 1 では、練混ぜ直後のスランプがかなり小さかったことから、練り具合が極端に悪く、結果として、凝集体の粒度分布がケース 2 よりもはるかに悪く、重力だけでは粉体（凝集体）等の固相があまり圧密されずにブリーディング水が浮き上がれない状況が生じたものと考えた。そのように考える根拠の一つとして、加圧ブリーディングの傾向が挙げられる。前節で論じたように、単位水量が同じであるにもかかわらずケース 1 の加圧ブリーディングの脱水量はケース 2 に比べてかなり少なくなった。加圧ブリーディング試験のような圧密状況下では、ケース 2 で残存していた凝集体はある程度うまく圧密できて脱水量が多くなったのに対して、ケース 1 での凝集の程度は加圧した状況下においても粉体の圧密が進まないほどに強固であったものと考えた。

2. 4. 8 まとめ

- (1) 事前検討にて選定した単位水量 $165\text{kg}/\text{m}^3$ の配合において、水平換算距離が 151m で実施したポンプ圧送試験において閉塞や材料分離を起こすことなく圧送できる条件を確認した。
- (2) 連続らせん羽根ミキサで練混ぜた軽量コンクリートの圧送性は相対的に劣ることを確認した。これは、軽量骨材の密度が小さいために不飽和で強固な凝集体が解砕されず、コンクリート中に残存したためと考えた。
- (3) 連続らせん羽根ミキサで軽量コンクリートを練混ぜる場合、混和剤は AD より SP の方が圧送性は改善される。ただし、所要のスランプを得るための SP の使用量は極めて少なく済むため、圧送性の観点から SP の使用量を更に増やすということを容易に行うことはできなかった。
- (4) 軽量コンクリートを二軸強制練りミキサで練混ぜることで、圧送性は大幅に改善される。これは、二軸強制練りミキサの羽根の回転によりコンクリートにせん断力が伝達されることにより不飽和で強固な凝集体が解砕され、大幅に少なくなったためであると考えられる。混和剤として AD を使用しても圧送性を改善できる可能性があるが、本研究の範囲内では確認していない。

2. 5 横浜北線への採用

高速神奈川 7 号横浜北線は、神奈川県横浜市の交通ネットワークの骨格を形成する「横浜環状道路」の北側区間に位置し、「横浜港北ジャンクション」から「生麦ジャンクション」を繋ぐ総延長約 8.2km の自動車専用道路である。供用後は、横浜新都心周辺から羽田空港および東京都心部への広域的な交通利便性向上が期待される首都高速道路の新規路線である。

本路線の中で、新横浜出入口の西側にある大熊川トラス橋梁までの鋼桁区間（図 2-20）において、膨張材併用軽量 RC 床版を採用した。



図 2-20 膨張材併用軽量床版施工箇所（位置図）

2. 5. 1 採用区間の概要

採用した区間の概要は以下のとおりであり、概要図を図 2-22～24 に示す。

- 橋梁形式：鋼 2 径間連続 RC 床版箱桁橋（外回り①）
- 鋼 4 径間連続 RC 床版箱桁橋（外回り②）
- 鋼 3 径間連続 RC 床版箱桁橋（内回り）
- 鋼 4 径間連続 RC 床版鉸桁橋（D ランプ）

上部工鋼重：1,266 t

床版面積：4,598 m²（4 橋とも膨張材併用軽量床版）

床版コンクリート体積：1,268 m³

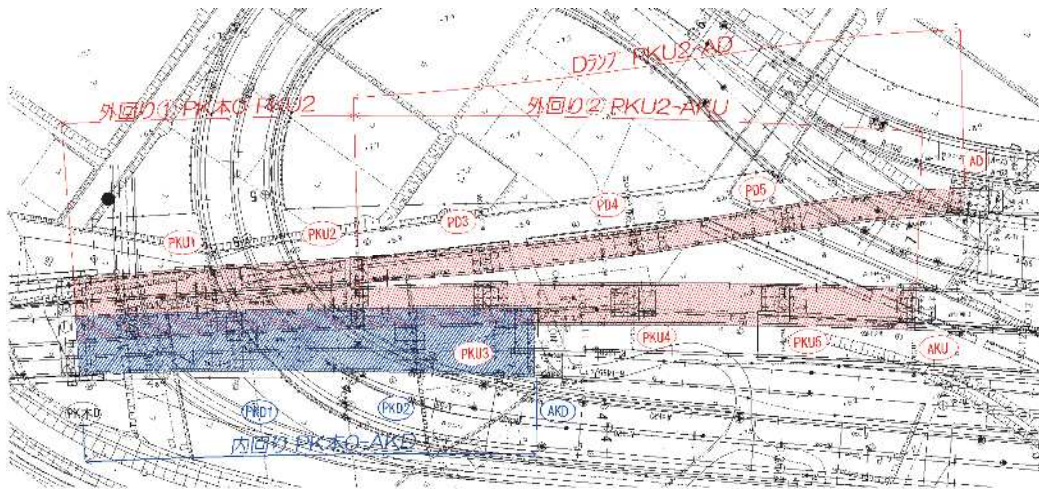


図 2-22 膨張材併用軽量床版施工箇所（平面図）

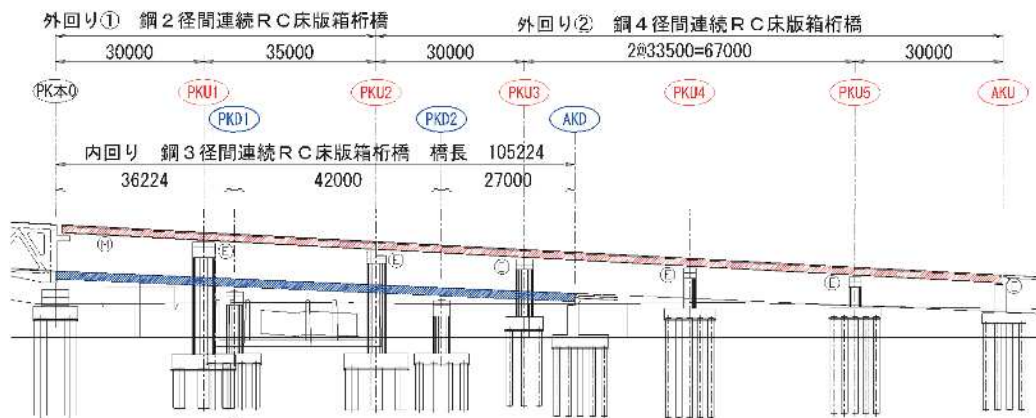


図 2-23 膨張材併用軽量床版施工箇所（側面図）

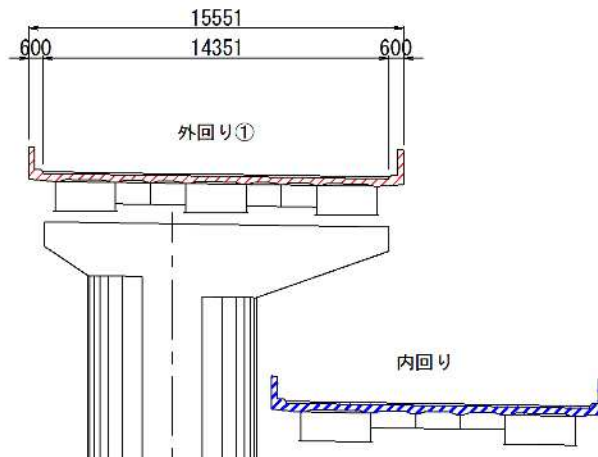


図 2-24 膨張材併用軽量床版施工箇所（断面図）

2. 5. 2 膨張材併用軽量 RC 床版の設計

膨張材併用軽量床版の設計において、床版死荷重の算出用の単位重量は 20.0 kN/m^3 を用いた。この値は、膨張材併用軽量床版に関する実験データに基づき、更に鉄筋の重量を考慮して決定した。

また、鉄筋の重ね継手長を決定するコンクリートの許容付着応力度は、コンクリート標準示方書（設計編）¹⁴ を参考にして、70%に低減した。膨張材併用軽量床版（設計基準強度 40 N/mm^2 ）の許容付着応力度は 1.4 N/mm^2 となるが、普通 RC 床版（設計基準強度 27 N/mm^2 ）の場合、 1.7 N/mm^2 となる。そのため、鉄筋の継手長は普通 RC に比べて 1.22 倍と長くなる。

なお、その他の設計方法については、通常の普通 RC 床版と全く同じである。

2. 5. 3 膨張材併用軽量 RC 床版の施工

実施工にあたり二軸強制練りミキサで出荷できるプラントを探したものの、対応してもらえないプラントがなかったため、連続らせん羽根ミキサのプラントからの出荷となった。よって、閉塞のリスクを最小限にするために、実施工では配管は行わず、ポンプ車から直接打設を行った。表 2-19 に実工事におけるコンクリートの配合、表 2-20 に予め設定したコンクリートの品質管理基準を示す。コンクリート膨張率は、ケミカルプレストレストコンクリートの定義に従い、拘束膨張試験（JIS A 6202-付属書）における測定値の 200×10^{-6} 以上とした。また、実床版の膨張量は、膨張材併用軽量床版内にコンクリートひずみゲージ及び鉄筋ひずみゲージを配置し、計測を行った。図 2-25 に膨張量のデータを示すが、輪荷重走行試験供試体で測定した膨張量と同程度の膨張ひずみが発生していることを確認した。このため、実橋において施工された床版も、前述の輪荷重試験に用いた供試体と同等以上の耐疲労性を持つものと考えられる。写真 2-5 にポンプ打設の状況を示す。打込みについては、暑中コンクリートとしての施工とならないことを基本とし、日平均気温が 25°C 以下で打設できる時期、3 月～5 月で工程調整を行った。膨張材併用軽量床版に限らず、コンクリート打設後の材齢初期の養生が重要である。急激な乾燥防止のために水和反応に必要な水の供給を十分に行い、養生期間は 28 日を目安とし、次工程に影響がない範囲でできるだけ長く養生を行った。

表 2-19 コンクリートの配合

W/B (%)	単位量 (kg/m^3)						
	W	C	Ex	SL	GL	SP	DF (g/m^3)
37	165	415	30	572	609	3.12	1.6

表2-20 コンクリートの品質管理基準

項目	試験・検査方法	管理基準	時期・回数・頻度
フレッシュコンクリートの状態	目視	ワーカビリディーが良く、品質が均質で安定していること	打込み当初 および 打込み中随時
スランプ	JIS A 1101	18.0±2.5cm	荷下ろし時 毎日最初の運搬車から 5台目まで運搬車ごと、 その後の運搬車5台ごと 最低1回
空気量	JIS A 1116 JIS A 1118 JIS A 1128	4.5±1.5%	
塩化物イオン量	JIS A 1154 または 簡易塩分測定器	0.3kg/m ³ 以下	1回/日
圧縮強度	JIS A 1108	40N/mm ² 1回の試験結果が85%以上 3回の試験結果の平均値以上	荷下ろし時 材齢7日用3本/回 材齢28日用3本/回 150m ³ ごとに1回 同一構造物の同一コンクリートにつき最低3回 1径間で最低1回
コンクリート膨張率	JIS A 6202 (A法)	200×10 ⁻⁶ 以上	荷下ろし時測定値のうち 最大値1日1配合当たり1回 (3供試体平均値)

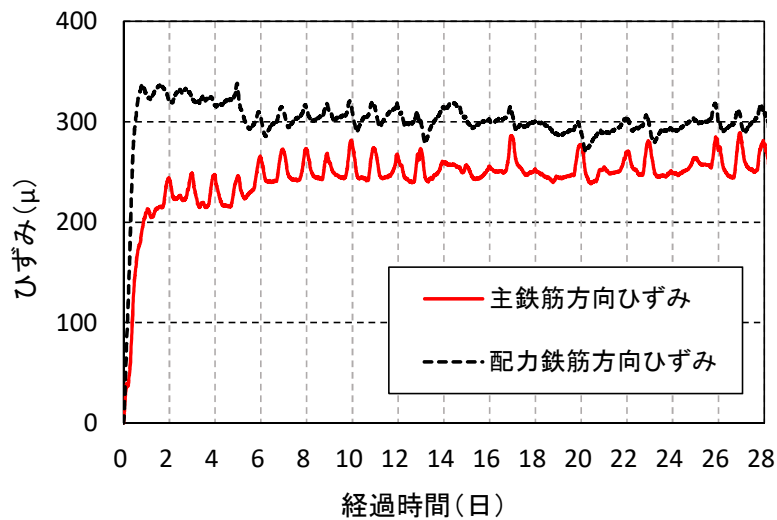


図 2-25 膨張ひずみ測定データ



写真 2-5 打設状況

なお、最終打設日となった5月25日は打設中に外気温が25℃を超えたため、コンクリート温度の上昇を極力抑えるために、床版表面に遮光シート（写真2-6）を全幅員にわたり設置し養生を行った。さらに、ミストファンを用いて床版の表面温度が上がらないようにして養生を行った。



写真 2-6 遮光シート設置状況

2. 5. 4 まとめ

写真2-7に完成状況写真を示す。本節では、採用した膨張材併用軽量RC床版の設計と施工について述べた。普通RC床版と同等の耐疲労性を有する膨張材併用軽量RC床版をポンプ圧送時の閉塞のリスクを低減するためにブームから直接打設等の対応を図り、現場施工を行った。



写真 2-7 完成状況

2. 6 横浜北線への採用により抽出された克服すべき課題

横浜北線への採用に向けての検討および実施工により実用化に向けて克服すべき課題を抽出した。

耐疲労性では、実床版を模擬した供試体を用いた輪荷重走行試験を行った結果、普通 RC 床版と同程度の耐疲労性を有することは確認できた。ただし、小型供試体を用いた試験結果と比較して明らかに劣る結果となった。膨張材の混和量を標準混和量の 1.5 倍の $30\text{kg}/\text{m}^3$ として試験を行なったが、実床版サイズの膨張特性の把握が不十分であったことにより耐疲労性が予想より劣る結果となったと可能性がある。そこで、膨張材の混和量と膨張ひずみの関係を把握した上で、実床版における適切な混和量を設定することが課題として抽出された。

圧送性としては、実施工にあたり数多くのポンプ圧送試験を行ったものの、単位水量 $165\text{kg}/\text{m}^3$ では確実に圧送できる配合にたどり着くことができなかった。また、今回は春季の施工であったため、配管を行わないことにより施工は完了したわけであるが、夏季や冬季の施工は春季と比較すると圧送条件は厳しくなる。実用化に向けては年間を通して確実に施工できることが必要となることから、年間を通して確実に圧送できる条件の明確化が課題として抽出された。

2. 7 第 2 章のまとめ

膨張材併用軽量床版の横浜北線への採用に向けて実施した輪荷重走行試験では、実床版を模擬した供試体は小型供試体と比べて耐疲労性が劣ることを確認したが、道路橋示方書にて設計された普通 RC 床版と比較すると同程度の耐疲労性であった。道路橋 RC 床版の配筋は水平方向と比較すると床版厚さ方向は極めて少ない特徴がある。膨張材を混和した場合、当然 3 方向へ膨張することから、床版厚さ方向の膨張ひずみへの対応が必要である。第 3 章では、実床版を模擬した供試体の膨張特性について検討した結果を、また、第 4 章では膨張特性を把握した上で実床版における最適な膨張材を混和した膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性について検討した結果を述べる。なお、実床版を模擬した供試体の耐疲労性が小型供試体よりの耐疲労性が異なる理由については研究の範囲外とした。

ポンプ圧送試験では混和剤やミキサを変化させて圧送性の検討を行った結果、圧送性を低下させる原因はコンクリート中に残存する凝集体ではないかと推測することができた。膨張材併用軽量床版を実用化するためには年間を通して圧送できる条件を明確にすることが必要である。第 4 章では、年間を通して圧送できる条件を明確化するために行った検討結果について述べる。

横浜北線の施工にあたっては、床版厚さ方向の膨張ひずみへの対応策として縦筋を 0.07% 追加配置し、また、圧送性を低下させる凝集体への対応策として配管を行わずに圧送ができるように、足場の改良を行なった。様々な検討および対応を行った結果、膨張材併用軽量 RC 床版を横浜北線へ採用した。

【第2章の参考文献】

- 1) 二羽淳一郎, 岡本享久, 前堀伸平: 高品質軽量コンクリートの構造部材への適用, コンクリート工学, Vol. 38, No. 12, pp. 3-9, (2000)
- 2) 磯部龍太郎, 津野和宏, 岩城一郎, 岸利治, 中澤治郎: 膨張材と軽量骨材を併用した道路橋RC床版の耐疲労性に関する研究, 土木学会論文集E2, Vol. 71, No. 2, pp. 191-202, (2015)
- 3) 小野泰英, 子田康弘, 岩城一郎, 井上治郎, 磯部龍太郎: ケミカルプレストレスを導入した道路橋軽量RC床版の疲労耐久性評価, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, pp. 589-560, (2012)
- 4) 中川浩志, 磯部龍太郎, 前島拓, 春日井俊博, 水口知樹: 打継目を有する膨張材併用軽量コンクリートを用いたRC床版の疲労耐久性, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集, pp. 275-276, (2013)
- 5) 岸田政彦, 副島直史, 春日井俊博, 池末和隆, 前島拓, 宮井大輔: 部分打ち換えで補修した軽量RC床版の疲労耐久性, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, pp. 53-54, (2014)
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書 I 共通編, II 鋼橋編, (2012)
- 7) 国土技術政策総合研究所: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国総研資料第28号, (2002)
- 8) 国土技術政策総合研究所ほか: 道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究, 国総研資料第472号, (2008)
- 9) コンクリート標準示方書 施工編, 土木学会, (2012)
- 10) 東山浩士, 水越睦視, 松井繁之, 小田憲司: 軽量コンクリートを用いたRC床版の押抜きせん断耐力の評価とその実用性に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol. 16, No. 1, pp. 45-54, (2005)
- 11) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, pp. 9-60, 森北出版, (2007)
- 12) コンクリートポンプ施工指針[2012年版], コンクリートライブラリー135, 土木学会, (2012)
- 13) 永峯秀則, 岸利治: 遠心浮き水量と変形性との規則性に基づくモルタル中の自由水に関する研究, 土木学会論文集E, Vol. 62, No. 4, pp. 882-892, (2006)
- 14) コンクリート標準示方書 設計編, 土木学会, (2012)

第3章 膨張材併用軽量 RC 床版の膨張特性

3. 1 はじめに

膨張材併用軽量 RC 床版を横浜北線へ採用した際に、耐疲労性と圧送性に関して克服すべき課題が抽出された。本章では、道路橋 RC 床版に膨張材併用軽量コンクリートを適用した際の膨張特性の把握を目的として、軽量コンクリート2種（粗骨材、細骨材ともに軽量骨材）と膨張材を併用した膨張材併用軽量 RC 床版について、各要素試験を行うとともに、膨張材の混和量によりコンクリートおよび鉄筋の膨張ひずみがどのように変化するかについて検討を行った。また、道路橋 RC 床版の配筋は、水平方向（橋軸方向、橋軸直角方向）の鉄筋量と比較して鉛直方向（床版厚さ方向）の鉄筋量が極端に少ない特徴を有している。そのために、実床版の配筋を再現した RC 床版供試体を作製し、供試体内部の各方向（橋軸、橋直および鉛直方向）における膨張ひずみの測定を行うことで、配筋の違いにより膨張ひずみがどのような影響を受けるのかについて検討を行った。なお、発現した膨張ひずみの持続性についても併せて確認した。

3. 2 膨張特性に関する検討

3. 2. 1 試験概要

(1) 使用材料

本節で用いた使用材料を表 3-1 に示す。膨張材は JIS A 6202 「コンクリート用膨張材」で示される 20 型膨張材である石灰系膨張材を用いた。20 型膨張材とは、普通コンクリート 1m³ 中に 20kg 混和することで、JIS A 6202 に準拠した方法による長さ変化率で収縮補償となる 150~250×10⁻⁶ 程度の膨張率を得ることができる膨張材である。また、粗骨材と細骨材は人工軽量骨材と普通骨材を使用した。

表 3-1 使用材料

使用材料	記号	産地または品名	密度(g/cm ³)
水	W	水道水	1.00
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16
膨張材	Ex	石灰系膨張材	3.16
細骨材	S1	山砂 千葉県産	2.57(表乾)
	S2	石灰砕砂 栃木県産	2.70(表乾)
	S _L	人工軽量細骨材	1.89(表乾)~1.90(表乾)
粗骨材	G	石灰碎石 2005 栃木県佐野市	2.70(表乾)
	G _L	人工軽量粗骨材	1.65(表乾)~1.71(表乾)
混和剤	AD	AE 減水剤	-
	SP	高性能 AE 減水剤	-
	AE	空気連行剤	-

(2) 試験ケース

試験ケースを表 3-2 に示す。普通コンクリートを 2 水準と軽量コンクリート 2 種を 5 水準の合計 5 水準にて膨張性試験を実施した。

表 3-2 試験ケース

膨張材混和量 コンクリート種別	0kg	15kg	20kg	25kg	30kg
	普通コンクリート	—	—	N-Ex20	—
軽量コンクリート 2 種	L2-Fx0	L2-Fx15	L2-Fx20	L2-Fx25	L2-Fx30

(3) コンクリート配合

コンクリート配合を表 3-3 に示す。軽量コンクリートのせん断強度は普通コンクリートに比べて小さいことから、せん断強度が圧縮強度 27N/mm² の普通コンクリートと同等になるように設計基準強度は 40N/mm² とし、水結合材比は 37% とした。普通コンクリートの設計基準強度は 27N/mm² とし、水結合材比は 53.5% とした。単位水量は 170kg/m³ とした。膨張材の混和量は、軽量コンクリートでは混和量に対する膨張量について不明確な点が多いことから、15kg/m³、20 kg/m³、25 kg/m³、30 kg/m³ と変化させた。軽量コンクリートと比較するために普通コンクリートは標準混和量の 20 kg/m³ と標準混和量の 1.5 倍の 30 kg/m³ の 2 段階とした。コンクリートは、容量 500L のパン型ミキサで 300L 分練り混ぜた。コンクリートのスランブは 18.0±2.5cm、空気量は 4.5±1.5% となるように混和剤で調整した。

表 3-3 コンクリート配合

ケース名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								AD (P×%)	SP (P×%)	AP (P×%)
			W	C	Ex	S1	S2	SL	G	GL			
N-Ex30	53.5	45.3	170	288	30	558	251	-	1010	-	1.0	-	0.003
N-Ex20	53.5	45.3	170	298	20	558	251	-	1010	-	1.0	-	0.001
L2-Ex30	37.0	48.5	170	429	30	-	-	587	-	564	0.6	-	-
L2-Ex25	37.0	48.5	170	434	25	-	-	587	-	564	0.6	-	-
L2-Ex20	37.0	48.5	170	439	20	-	-	587	-	564	0.6	-	-
L2-Ex15	37.0	48.5	170	444	15	-	-	587	-	564	0.6	-	-
L2-Ex0	37.0	48.5	170	459	-	-	-	589	-	545	-	1.0	-

3. 2. 2 試験方法

(1) フレッシュ性状および小型供試体

実施したコンクリートの試験項目および試験方法を表 3-4 に示す。拘束膨張率は JIS A 6202 附属書 2 の A 法により測定した。なお、養生方法は材齢 28 日まで水中養生とした。

表 3-4 コンクリート試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	目標値
スランブ試験	JIS A 1101	18±2.5cm
空気量試験	JIS A 1128	4.5±1.5%
圧縮強度試験	JIS A 1108	40N/mm ²
静弾性係数試験	JIS A 1149	
割裂引張強度試験	JIS A 1113	
曲げ強度試験	JIS A 1106	
2面せん断試験	JCI-SF6	4.8N/mm ² 程度
拘束膨張試験	JIS A 6202 附属書 2 (A 法)	
膨張試験	—	

(2) RC 床版供試体

道路橋床版を模擬した RC 床版供試体 (1000mm×1000mm×250mm) を作製し、打込み後から各種ひずみを測定した。供試体の配筋条件は、実橋の標準設計に準拠した。供試体の配筋図を図 3-1, 2 に示す。RC 床版供試体の端部の膨張挙動は複雑であるため床版厚さの 2 倍の範囲外の中心部で計測を行うこととした。供試体の内部には橋軸方向、橋軸直角方向の鉄筋ひずみゲージのほか図 3-1 中に「a」で示した供試体中央部に図 3-3 に示した JIS A 6202 (A 法) に示される試験方法を模擬した上下に端板のついた拘束棒を配置し、拘束棒のひずみを測定して鉛直方向の鉄筋ひずみとした。鉄筋比は高速道路高架橋の鉛直方向の鉄筋比 0.09% に近い 0.1% とした。また、コンクリート埋込型ゲージを供試体の橋軸方向、橋軸直角方向および鉛直方向の 3 方向に配置した。コンクリート埋込型ゲージではひずみと温度を測定した。RC 床版供試体による計測は、日本コンクリート工学会「超流動コンクリート研究委員会」報告書 (II) に準拠して行った。本試験の計測間隔は材齢 7 日までは 10 分間隔、それ以降は 30 分間隔で測定した。床版供試体は 7 日まで湿潤養生の後、室温 20℃, RH60% の部屋に静置とし、材齢 28 日まで測定を実施した。

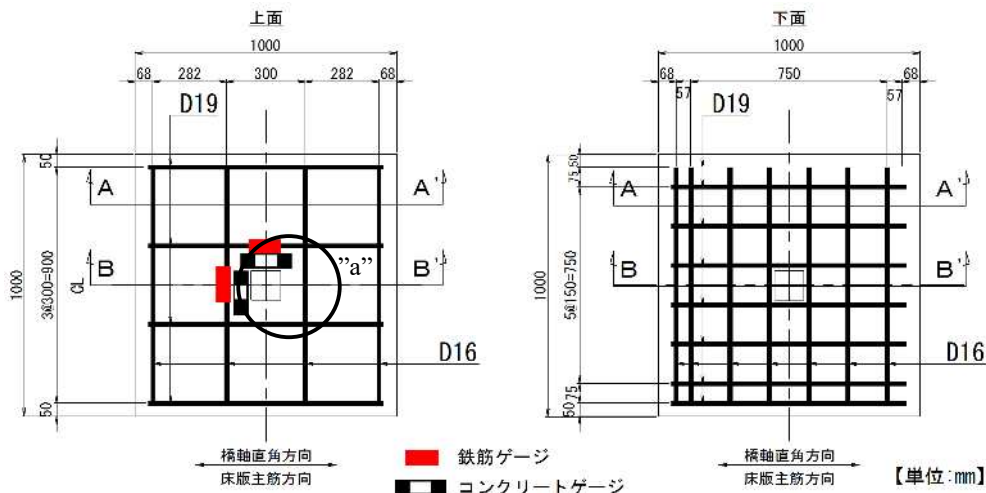


図 3-1 RC 床版供試体 配筋図 (その 1)

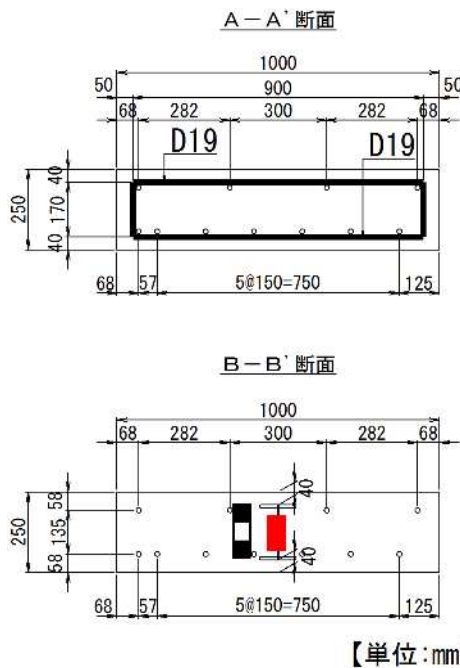


図 3-2 RC 床版供試体 配筋図 (その 2)

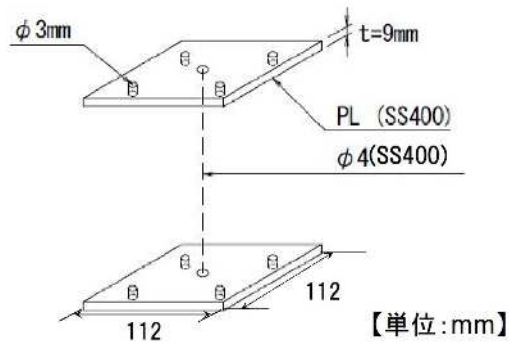


図 3-3 鉛直方向長さ変化率測定用拘束棒

3. 2. 3 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状の測定結果を表 3-5 に示す。いずれも目標値内に収まったことを確認した。

表 3-5 フレッシュ性状

配合名	試験時	スランプ (cm)	空気量 (%)		コンクリート 温度 (°C)
			圧力法	質量法	
N-Ex30	出荷時	13.0	5.9	-	12
	現着時	11.0	5.8	-	14
N-Ex20	出荷時	12.0	5	-	12
	現着時	10.0	4.8	-	14
L2-Ex30	出荷時	22.0	-	5.8	13
	現着時	20.5	-	4.9	14
L2-Ex25	出荷時	21.5	-	7.2	13
	現着時	20.5	-	5.6	14
L2-Ex20	出荷時	19.5	-	6.6	14
	現着時	19.5	-	5.9	14
L2-Ex15	出荷時	20.5	-	7.1	14
	現着時	20.5	-	5.9	15
L2-Ex0	出荷時	20.5	-	5.5	14
	現着時	20.0	-	5.2	16

(2) 小型供試体の強度特性

小型供試体の試験項目のうち、圧縮強度および性弾性係数の材齢 28 日における測定結果を表 3-6 に示す。圧縮強度について、普通、軽量ともに所定の設計基準強度を超える結果であった。軽量については、膨張材混入量 0kg が最も高く、続いて 30kg, 20kg となり、ケミカルプレストレスなどの膨張材量の混入量による大きな差は見られなかった。静弾性係数について、普通、軽量ともに膨張材混入量による差はあまり見られなかった。また、普通が 33kN/mm² 程度に対し、軽量が 17~18kN/mm² と普通と比べて 55%程度であった。これは、軽量骨材自身の強度に起因するものであり、既往の文献のとおり結果であった。割裂引張強度について、普通が 3.2N/mm² 程度に対し、軽量では 2.7~3.5N/mm² という結果であった。設計基準強度は軽量のほうが高いが、骨材自身の強度も起因し、普通と同等の強度となっていると推察される。また、軽量の強度のばらつきは圧縮強度のばらつきと同等であった。曲げ強度について、普通が 4.9N/mm² 程度に対し、軽量では 3.9~4.9N/mm² という結果であった。軽量について、膨張材混入量 0kg が最も高いという傾向は先述の圧縮や曲げ強度試験と同等である。せん断強度について、普通が 5.6N/mm² 程度に対し、軽量では 4.2~5.0N/mm² という結果であった。

表 3-6 強度関連項目の結果 (単位: N/mm²)

配合名	圧縮強度	静弾性係数	割裂引張強度	曲げ強度	せん断強度
N-Ex30	36.5	33.3	3.22	4.81	5.62
N-Ex20	38.6	33.3	3.24	4.96	5.73
L2-EX30	51.3	17.6	2.69	4.26	4.21
L2-EX25	45.0	16.8	3.25	4.05	4.55
L2-EX20	49.0	17.3	2.86	4.28	4.45
L2-EX15	47.6	17.4	2.84	3.92	4.27
L2-EX0	53.1	18.3	3.47	4.91	4.98

(3) A 法による拘束膨張供試体の長さ変化

小型供試体の試験項目のうち、拘束膨張供試体の長さ変化の測定結果を表 3-7、図 3-4 に示す。

本研究で用いた膨張材は、普通コンクリートにおいて 20kg/m³ 混和することで収縮補償コンクリートとなる膨張率を得られるように材料設計されているものである。土木学会「膨張コンクリート設計施工指針」で収縮補償コンクリートとされる材齢 7 日での膨張の範囲は 150~250 μ であり、ケミカルプレストレス用コンクリートとされる材齢 7 日での膨張の範囲は 200~1000 μ である。普通コンクリート配合の材齢 28 日での膨張ひずみは、Ex30 で 389 μ 、Ex20 で 198 μ であり、Ex30 がケミカルプレストレス導入相当、Ex20 が収縮補償相当の膨張ひずみであった。一方、軽量コンクリート配合の材齢 28 日での膨張ひずみは、Ex30 で 370 μ であり、Ex20 で 220 μ であり、普通コンクリート配合と軽量コンクリート配合を比較すると同量の膨張材混和量の場合、膨張ひずみに大きな差は見られなかった。

表 3-7 拘束膨張試験 (A 法) 試験結果

配合名	項目	材齢 (日)							
		0	1	2	6	7	15	28	
L2-Ex30	膨張量 ($\times 10^{-6}$)	0	174	225	345	354	367	370	
L2-Ex25		0	116	156	250	255	266	268	
L2-Ex20		0	87	126	203	209	218	220	
L2-Ex15		0	49	70	128	134	137	137	
配合名	項目	材齢 (日)							
		0	1	3	5	6	7	14	28
N-Ex30	膨張量 ($\times 10^{-6}$)	0	119	321	355	362	368	381	389
N-Ex20		0	53	138	163	171	180	193	198
L2-Ex0		0	0	2	11	17	20	24	30

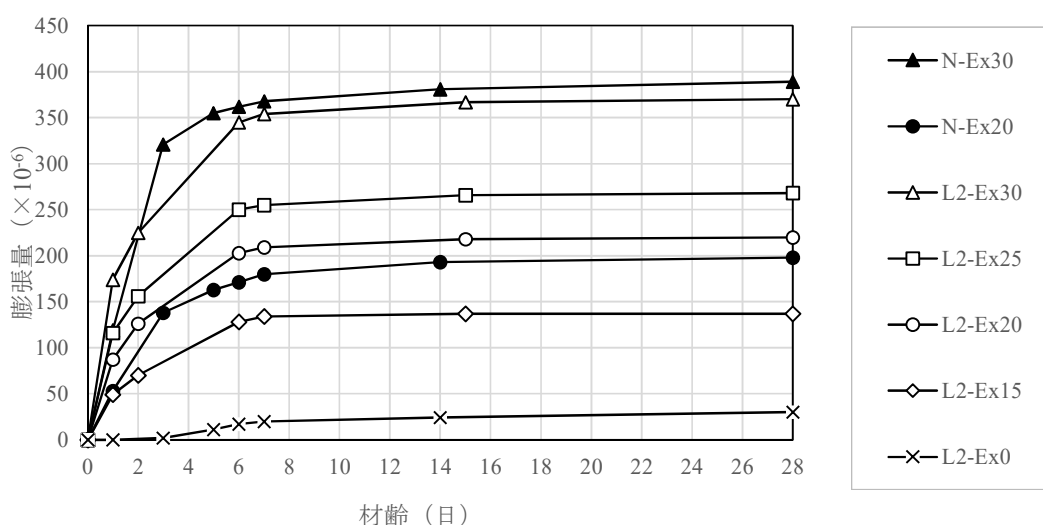


図 3-4 拘束膨張供試体の長さ変化率

(4) RC 床版供試体の膨張ひずみ (水平方向 (コンクリート膨張ひずみ))

図 3-5 に各ケースの材齢 28 日時点でのコンクリートの膨張ひずみ (主筋方向) を示す。普通コンクリート配合では Ex30 で 246μ 、Ex20 で 131μ であった。一方、軽量コンクリート配合では Ex30 で 487μ 、Ex25 で 404μ 、Ex20 で 329μ 、Ex15 で 271μ であった。この結果から、普通コンクリート配合と軽量コンクリート配合を比較した場合、普通コンクリート配合の Ex30 (246μ) と同等なのは、軽量コンクリート配合の Ex15 (271μ) となり、軽量コンクリート配合の場合、少ない膨張材混和量で普通コンクリート配合と同等の膨張ひずみが得られることが確認された。

(5) RC 床版供試体の膨張ひずみ (鉛直方向 (鉛直ひずみ測定用拘束板の測定結果))

図 3-5 に各ケースの材齢 28 日時点での鉄筋ひずみを示す。鉛直方向の鉄筋の膨張ひずみは、拘束棒による測定であるが、普通コンクリート配合では Ex30 で 882μ 、Ex20 で 243μ であった。軽量コンクリート配合では、Ex30 で 1095μ 、Ex20 で 329μ であった。鉛直方向は、水平方向に比べて鉄筋比が小さいため、水平方向に比べて大きな膨張ひずみが発生したものと考えられる。

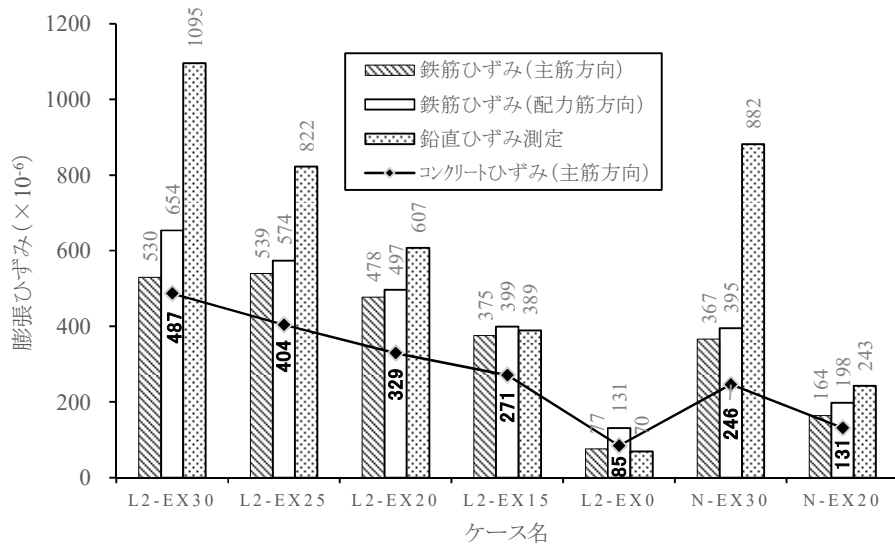


図 3-5 RC 床版供試体の膨張ひずみ

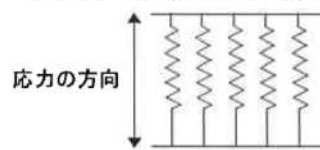
3. 3 膨張コンクリートの膨張機構に関する既往の研究

3. 3. 1 細田による研究¹⁾

(1) 微小構成要素と初期ひずみのばらつき

一軸引張応力下のコンクリートを応力方向に並列に配置した微小構成要素でモデル化した場合、普通コンクリートは、セメントの水和反応とともにほぼ均質な微小構成要素が徐々に形成される。ただし、膨張コンクリートは、膨張材の水和による膨張性生成物が周囲を押し広げるために微小構成要素に乱れが生じ、強制的に初期ひずみにばらつきがもたらされる。微小構成要素に引張外力が作用した場合は、微小構成要素が破断する。しかし、膨張コンクリートの場合、微小構成要素にばらつきがあるため、同時に破断が生じず、若材齢時では、セメントの水和反応が載荷時間中にも起こっている可能性が考えられ、セメントの水和によって新たな微小構成要素が形成される。(図 3-6 参照)

一軸方向の微小構成要素 (普通コンクリート)



(膨張コンクリートの場合)

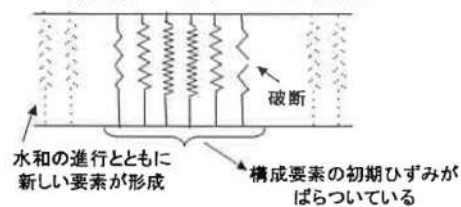


図 3-6 微小構成要素の初期ひずみのばらつき (概念図)

(2) 膨張コンクリートにおける軸直交圧縮力の導入

軸方向と軸直交方向のイメージを図 3-7 に示す。一軸方向に鋼材で膨張を拘束した場合と拘束しなかった場合における軸直交方向ひずみの計測の結果、図 3-8 に示すとおり拘束をした方の膨張ひずみが小さくなることを確認した。なお、自由膨張供試体では、軸方向と軸直交方向の変形がほぼ等しいことも確認していることから、一軸方向に鋼材で膨張を拘束した場合、軸直交方向ひずみは軸方向ひずみより小さくなることを明らかにした。つまり、膨張コンクリートは、少なくとも一軸に鋼材で拘束をしておけば、それと直交する方向は自由膨張とならず、膨張が拘束されることで圧縮応力が蓄積されることとなる。

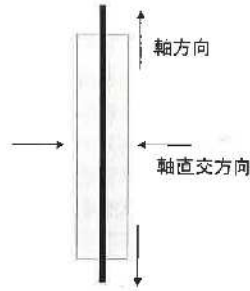


図 3-7 軸方向と軸直交方向のイメージ

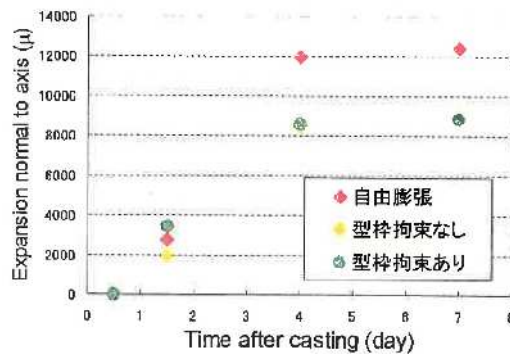


図 3-8 軸方向の鋼材による拘束によって抑制される軸直交方向の変形

(3) 軸直交圧縮力による骨材に及ぼす影響

骨材が存在する膨張コンクリートでは、骨材界面に引張荷重が作用すると剥離が徐々に生じる。しかし、ペーストマトリックス部には軸方向圧縮力により圧縮力が作用する。膨張コンクリートでは骨材が存在することによって界面が弱点となると考えられるが、図 3-9 に示すとおり軸方向圧縮力が作用することでペーストマトリックスとがっちりとかみ込まれた骨材は、軸直交方向の膨張エネルギーに対して大きな拘束となり膨張を抑制する効果がある。

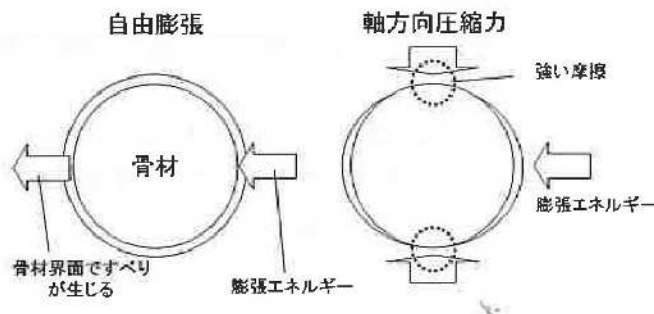
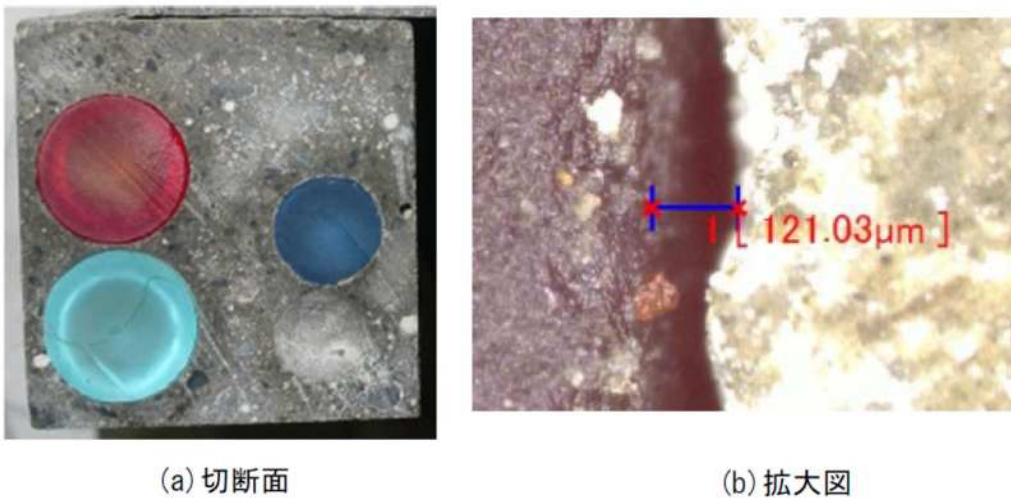


図 3-9 軸方向圧縮力による界面の摩擦の効果

3. 3. 2 酒井による研究²⁾

(1) 膨張コンクリート内の骨材界面に生じる剥離現象

骨材の代わりにビー玉を膨張モルタル中に混入した模擬コンクリートを作製した。鋼製型枠中に打設し、さらに上面に鉄板を設置し、これを万力で固定することで3次元的な拘束を与え、材齢7日で拘束を解除して切断し、切断面の観察を行った。図3-10に示すとおりビー玉のほぼ全周にわたって剥離が生じていることを確認した。これは、5円玉を熱膨張させた場合に中央の孔の径が増加するメカニズムと同様に、ビー玉の界面付近のペーストが膨張したことにより骨材界面に剥離が生じるものと考えられた。また、粗骨材を用いた膨張コンクリートの場合では、図3-11に示すとおり無拘束条件においても剥離しないことも確認し、玉砂利を用いた場合では、拘束条件下においても肉眼で確認できる剥離が一部確認したことから、剥離挙動は骨材の形状に依存することを明らかにした。



(a) 切断面

(b) 拡大図

図 3-10 ビー玉を混入した膨張モルタルの切断面



図 3-11 無拘束膨張コンクリートの切断面

(2) コンクリート中の粗骨材のひずみ測定

内部にひずみゲージを貼り付けた粗骨材を混入した膨張コンクリートを用いて、鋼製型枠で三次元的に拘束された円柱供試体および一軸拘束供試体を作製し、粗骨材のひずみ計測を行った。図3-11に計測結果を示すとおりいずれの供試体においても粗骨材に引張ひずみが発生していることを明らかにした。

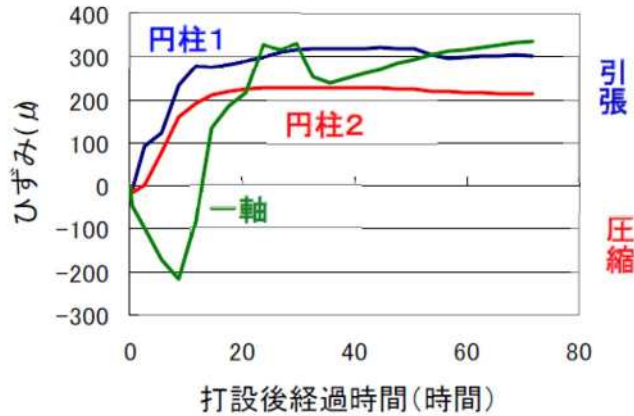


図3-11 膨張コンクリート中の粗骨材のひずみ

(3) 膨張作用による鉄筋への影響

モルタル要素の中央に鉄筋要素を配置したモデルと、その周囲にさらに粗骨材要素を配置したモデルにより数値解析を行い、粗骨材の有無による鉄筋界面の剥離への影響について検討を行った。図3-12に示すとおり鉄筋のみを配置したモデルでは鉄筋の界面全周に沿って剥離が生じたのに対し、粗骨材を追加配置したモデルでは鉄筋界面の剥離が抑制されていた。これは、鉄筋と同じサイズオーダーの粗骨材が周囲に存在することで、鉄筋周りの均質な膨張が乱されること、また粗骨材が拘束体として働くために、局所的な剥離に留まったものと考えた。

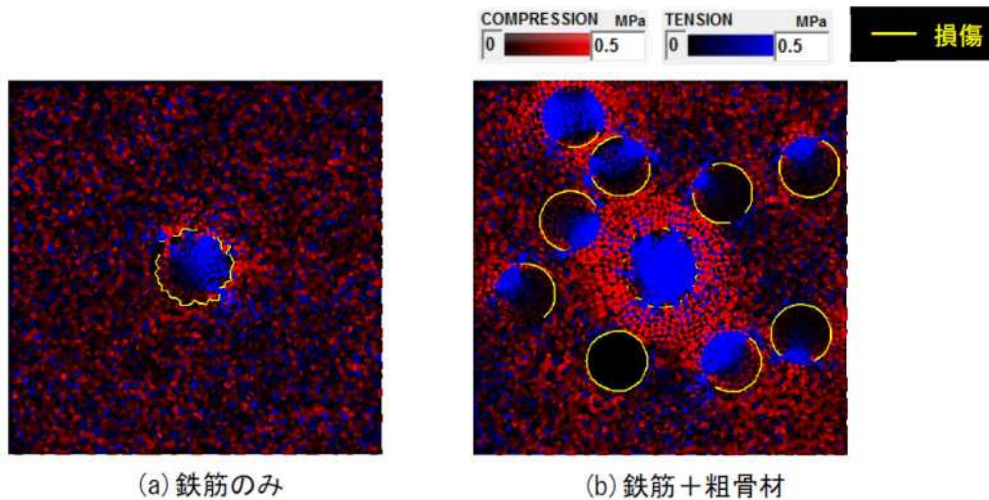


図3-12 応力・損傷分布

3. 4 膨張材を混和した軽量コンクリートの膨張特性に関する考察

3. 4. 1 膨張ひずみ

膨張コンクリートは膨張を拘束することによりプレストレスが導入される。細田は、一軸方向に鉄筋を配置すると軸方向にケミカルプレストレスが作用するとともに、ケミカルプレストレスによりペーストマトリックスと骨材界面に摩擦力が生じるため軸直交方向の膨張が拘束され圧縮力（軸

直交圧縮力)が導入されることを明らかにしている。すなわち、ケミカルプレストレスによりペーストマトリックスと骨材がかみ込むことで、骨材が膨張を拘束する膨張拘束体となる。また、酒井によると粗骨材中にゲージを貼付した粗骨材を用いて三次元的に拘束した条件下において膨張コンクリートのひずみ計測をしたところ、粗骨材に引張ひずみが発生することを明らかにしている。すなわち、粗骨材は膨張拘束体であるとともに、骨材自体が膨張体ともなるということである。軽量骨材は普通骨材と比較すると、圧縮強度と弾性係数が約半分である。よって、軽量骨材は膨張拘束体として作用するもの、引張力が作用した場合には普通骨材より伸びやすいことは明らかである。

更に、水とセメント粒子と膨張材粒子から構成されるセメントペーストは骨材等の壁面の近傍においてセメント粒子間を埋める水の占める割合(水結合材比)が局所的に増えたため水和組織が粗になる領域(遷移帯)が形成される。普通骨材と比較して軽量骨材の表面の凹凸は小さく滑らかであるため、水和組織はより粗になることで、骨材界面の摩擦力(拘束力)は小さくなると考えられる。ペーストマトリックスの膨張力は、骨材との摩擦力(拘束力)によって拘束されることから、この摩擦力(拘束力)の度合いによって、ペーストマトリックスの膨張力は影響すると考えた。

すなわち、軽量骨材を用いた膨張コンクリートは普通骨材を用いた膨張コンクリートと比較すると同量の膨張材を混和した(同等の膨張力を与えた)場合、軽量骨材を用いた膨張コンクリートの方が膨張ひずみは大きくなる。

なお、細田が明らかにした軸直交圧縮力は無限に作用するわけではなく、有効範囲は約5 cmとされている。実際の道路橋 RC 床版の厚さは25 cmと厚いことから、鉄筋近傍の RC ゾーンと鉄筋から離れた無筋ゾーンが存在している可能性がある。道路橋 RC 床版の中心部の無筋ゾーンは自由膨張する可能性があるため注意が必要である。

3. 4. 2 RC 床版供試体の膨張ひずみと小型供試体の膨張ひずみとの違い

軽量骨材を用いた膨張コンクリート(以下、L-Ex)と普通骨材を用いた膨張コンクリート(N-Ex)を用いて RC 床版供試体と小型供試体の両方で膨張ひずみの計測を行った。同量の膨張材を混和した場合、RC 床版供試体では L-Ex の方が N-Ex より大きな膨張ひずみが発生するものの小型供試体では L-Ex と N-Ex は同等の膨張ひずみが発生することが確認された。小型供試体と比べて RC 床版供試体は水平2方向に鋼材による拘束があることから L-Ex より N-Ex の方がより拘束の影響を受けることから膨張ひずみに差が出たものと推察される。

3. 4. 3 骨材の剥離現象

酒井は、膨張モルタルに骨材の代わりにビー玉を混入し三次元的に拘束を与えた40×40×160 mmの供試体を作製し、材齢7日で拘束を解除して切断した面の観察を行った。その結果、ビー玉のほぼ全周にわたって剥離が生じていることを確認した。また、実際の粗骨材を使用した膨張コンクリートを用いて100×100×600mmの供試体を作製し、24時間後に脱型して水中無拘束養生し、材齢7日で切断した面の観察を行った。その結果、明確な剥離がないことも確認した。実際の粗骨材を使用した膨張コンクリートに三次元的に拘束を与え、材齢7日で拘束を解除して切断した面の観察を行ったとしても剥離が発生しないことは明らかである。ビー玉と粗骨材の違いは形状と表面の滑らかさである。ビー玉は形状が丸く、表面が滑らかであることから付着力が小さいことから剥離現象が顕著になったと考えられる。なお、型枠によりコンクリートの膨張は抑制され圧縮力が作用するが、脱型することによって型枠による圧縮力(拘束力)が解放されてしまう。すなわち、型枠撤去時にペーストマトリックスと骨材の界面には引張力が作用するため、付着力が小さいビー玉周りには剥離が生じ、付着力が大きい粗骨材周りには剥離が生じなかったと考えられる。

磯部らは20型の膨張材を30 kg混和した軽量コンクリートを用いて100×100×400 mmの供試体を作製し、材齢28日、91日、150日、180日および360日で曲げ強度を測定した³⁾。養生条件としては材齢28日まで水中養生、その後、屋外の雨水がかからない保管箱内で暴露した。その結果、曲げ強度は材齢28日~180日の間で一時的に低下し、材齢180日~1年の間で再増加することを確認している。そのメカニズムとして酒井の研究を引用し、材齢28日~180日の間の強度低下は膨張材の膨張作用により一時的に骨材界面に剥離が生じたためとし、また、その後の強度増加は収縮作用により剥離が解消されたためと考察している。軽量骨材は普通骨材と比較すると形状は丸く、表面も滑らかであることから普通骨材より剥離しやすいと考えられる。

3. 5 膨張ひずみの持続性に関する検討

3. 5. 1 使用材料およびコンクリート配合

(1) 使用材料用

本節で用いた使用材料を表 3-8 に示す。膨張材は JIS A 6202 「コンクリート用膨張材」で示される 20 型膨張材であるエトリングイト・石灰複合系膨張材を用いた。20 型膨張材とは、普通コンクリート 1m³中に 20kg 混和することで、JIS A 6202 に準拠した方法による長さ変化率で収縮補償となる 150~250×10⁻⁶程度の膨張率を得ることができる膨張材である。また、粗骨材と細骨材はともに人工軽量骨材の軽量コンクリート 2 種とした。

表 3-8 使用材料

項目	詳細
水(W)	上水道水
セメント(OPC)	普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm ³)
膨張材(EX)	エトリングイト・石灰複合系膨張材(20型)(密度3.08g/cm ³)
細骨材(SL)	人工軽量細骨材(絶乾密度1.62g/cm ³ F.M.2.75 吸水率27.5%)
粗骨材(GL)	人工軽量粗骨材(絶乾密度1.30g/cm ³ Gmax:15mm 吸水率25.6%)
減水剤(SP)	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸塩系)
AE助剤(AE)	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

(2) コンクリート配合

コンクリート配合を表 3-9 に示す。軽量コンクリートのせん断強度は普通コンクリートに比べて小さいことから、せん断強度が圧縮強度 27N/mm²の普通コンクリートと同等になるように設計基準強度は 40N/mm²とし、水結合材比は 37%とした。単位水量は 170kg/m³とした。また、使用した人工軽量骨材はプレソーキング処理を行い、練り混ぜの際の含水率は細骨材が 14.8%、粗骨材が 27.3%であり、表 3-8 の吸水率となるように配合補正した。膨張材は、混和量が膨張材併用軽量 RC 床版の長さ変化率およびケミカルプレストレスに与える影響を検討するため、普通コンクリートの収縮補償の膨張率となる混和量 20kg/m³よりも少ない混和量 (EX-15) と多い混和量 (EX-25 および EX-30) の 3 配合を検討した。コンクリートは、容量 500L のパン型ミキサで 300L 分練り混ぜた。コンクリートのスランプは 18.0±2.5cm、空気量は 4.5±1.5%となるように SP および AE を調整した。

表 3-9 コンクリート配合

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	OPC	EX	SL	GL	SP (B×%)	AE (B×%)
EX-15	37.0	48.5	170	444	15	502	428	0.50	0.10
EX-25				434	25			0.50	0.05
EX-30				429	30			0.30	0.03

3. 5. 2 試験方法

(1) フレッシュ性状および小型供試体

コンクリートのフレッシュ性状および小型供試体の試験項目と準拠した試験方法を表 3-10 に示す。供試体の打込みは室内にて行うが、温度制御はできないので環境温度を計測した。拘束膨張試験を除く供試体については、RC 床版供試体と同じ環境条件で養生し、試験直前の 28 日まで型枠存置とする。型枠は鋼製型枠を使用し、打込み面への拘束は実施していない。なお、打込み面の養生方法は材齢 14 日まで湿布養生とし、その後、気中養生とした。拘束膨張供試体は、打込み翌日に脱型後、材齢 7 日まで 20℃水中養生、材齢 7 日以降は 20℃60%R.H.にて乾燥養生を行い、材齢 3, 7, 14, 21, 28, 56, 91 日で長さ変化率を測定した。

表 3-10 コンクリート試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	目標値
スランプ	JIS A1101	18.0±2.5cm
空気量	JIS A1128	4.5±1.5%
コンクリート温度	JIS A1156	—
圧縮強度	JIS A1108	40N/mm ²
静弾性係数	JIS A1149	—
割裂引張強度	JIS A1113	—
曲げ強度	JIS A1106	—
2面せん断強度	JCI-SF6	4.8N/mm ² 程度
拘束膨張率	JIS A6202(B法)	—

(2) RC 床版供試体

RC 床版供試体の諸元は 3. 2 と同様に作製した (図 3-1~図 3.3 参照)。なお、供試体の打込みは室内にて行うが、温度制御はできないので環境温度を同時に計測した。RC 床版供試体による計測は、日本コンクリート工学会「超流動コンクリート研究委員会」報告書 (II) に準拠して行った。本試験の計測間隔は材齢 7 日までは 10 分間隔、それ以降は 30 分間隔で測定した。に準拠して行った。本試験の計測間隔は材齢 7 日までは 10 分間隔、それ以降は 30 分間隔で測定した。供試体の養生は高架橋床版の実施工の工程を踏まえ、急激な乾燥を防ぐため材齢 14 日まで湿布養生を実施した。また、材齢 14 日以降は実際の高架橋床版を模擬し、打込み面だけ乾燥を受けるように型枠存置で室内にて気中養生を行った。

3. 5. 3 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状の測定結果を表 3-11 に示す。打込み当日 (2017 年 7 月 7 日) の試験室内の気温は 25℃程度であったが、試験を実施したすべての配合において、目標のフレッシュ性状を満足した。

表 3-11 フレッシュ性状

記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	練り上がり温度 (°C)
EX-15	18.0	6.0	27.0
EX-25	20.0	5.8	26.0
EX-30	20.5	6.0	26.0

(2) 小型供試体の強度特性

小型供試体の試験項目のうち、強度関係の項目の材齢 28 日における測定結果を表 3-12 に示す。設計基準強度 (40N/mm²) および 27N/mm² の普通コンクリートのせん断強度 (4.8N/mm² 程度) を発現していることを確認した。なお、普通コンクリートのせん断強度は東山らにより推定された算出式⁴⁾を用いて算出した。

表 3-12 強度関連項目の結果 (単位: N/mm²)

項目	記号		
	EX-15	EX-25	EX-30
圧縮強度	54.1	62.0	55.2
割裂引張強度	3.68	2.62	3.05
曲げ強度	5.14	5.65	5.05
2面せん断強度	6.88	6.85	6.43
静弾性係数	1.98×10 ⁴	2.09×10 ⁴	1.99×10 ⁴

(3) 拘束膨張供試体の長さ変化

小型供試体の試験項目のうち、拘束膨張供試体の長さ変化の測定結果を図 3-13 に示す。なお、図中に示した「A」の範囲は、土木学会「膨張コンクリート設計施工指針」⁵⁾で収縮補償コンクリートとされる材齢 7 日での膨張の範囲 ($150\sim 250\times 10^{-6}$) である。

本研究で用いた膨張材は、普通コンクリートにおいて $20\text{kg}/\text{m}^3$ 混和することで収縮補償コンクリートとなる膨張率を得られるように材料設計されているものである。これに対し、膨張材混和量が $15\text{kg}/\text{m}^3$ の EX-15 で 250×10^{-6} を超える膨張率を示しており、普通コンクリートに比べて大きな膨張率を示した。これは、既往の研究³⁾と同じ傾向であり、軽量骨材の剛性が普通骨材よりも小さいため、コンクリートの膨張作用を阻害しない働きが発生したことと、軽量コンクリートの内部養生効果により、自己収縮の一部を打ち消す作用が働いたためと考えられる。

また、膨張材混和量が $25\text{kg}/\text{m}^3$ の EX-25 および $30\text{kg}/\text{m}^3$ の EX-30 は材齢 7 日の膨張率は $400\sim 500\times 10^{-6}$ を示しており、土木学会「膨張コンクリート設計施工指針」⁵⁾に示されるケミカルプレストレス用のコンクリート ($200\sim 1000\times 10^{-6}$) となる領域の膨張率を示している。

材齢 7 日以降の乾燥養生開始から材齢 21 日までは、長さ変化率はほぼ横ばいとなる。これは軽量骨材の内部養生効果によるものと考えられる。その後、材齢 28 日から材齢 91 日にかけて連続して乾燥養生を続けていることや、供試体の単位体積当たりの表面積が大きいなどの影響により内部養生効果が薄れ、収縮傾向に転じるが、膨張材の混和量が最も小さい EX-15 においても材齢 91 日で膨張を維持していることを確認した。

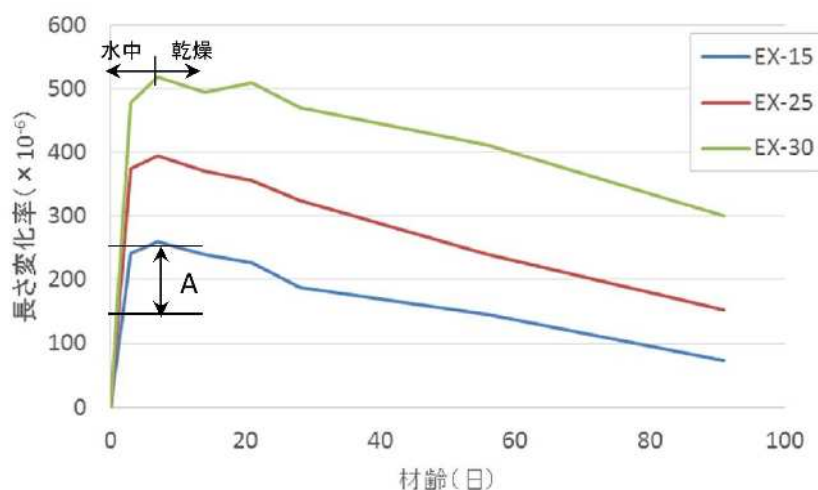


図 3-13 拘束膨張供試体の長さ変化率

(4) RC 床版供試体内部の温度

打込みから 122 日までの RC 床版供試体内部のコンクリート温度および気温の測定結果を図 3-14 に、材齢 3 日まで拡大したものを図 3-15 に示す。全ての配合でコンクリートの打込み直後からコンクリートの温度が上昇し、おおよそ 70°C 程度の値となっている。コンクリートの温度上昇は打込みから半日程度でピークを示しており、その後緩やかに下降している。温度上昇の傾きはほぼ同等であり、最高到達温度は膨張材の混和量が多いほど大きくなる傾向にある。最高到達温度については、EX-15 で約 65°C 、EX-25 と EX-30 は両方とも約 70°C であった。その後、材齢 3 日程度ではほぼ気温と同程度でその後は気温に伴った温度変化となっている。

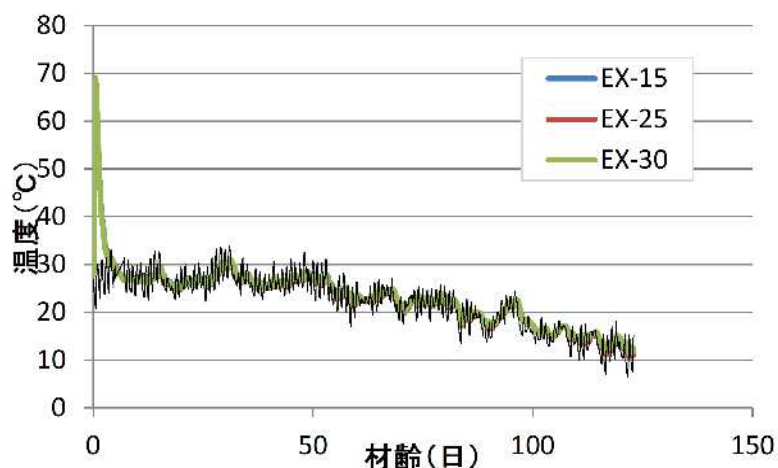


図 3-14 コンクリート内部の温度

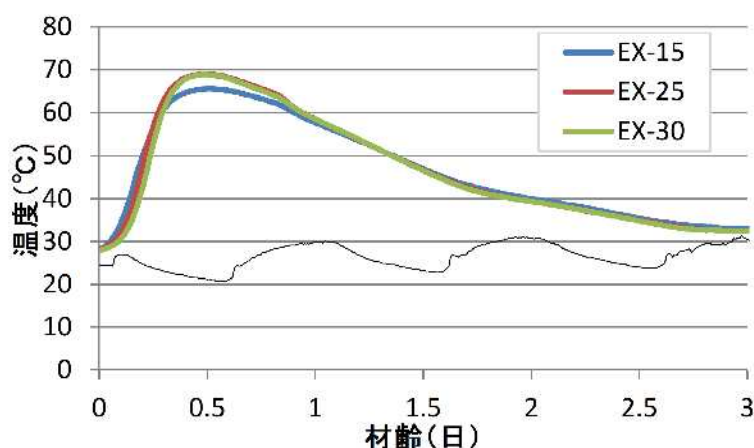


図 3-15 コンクリート内部の温度 (材齢 3 日まで)

(5) RC 床版供試体の橋軸と橋軸直角方向の鉄筋ひずみ

打込みから 122 日までの RC 床版供試体の鉄筋ひずみについて、橋軸方向の測定結果を図 3-16 に、橋軸直角方向の測定結果を図 3-17 に示す。鉄筋ひずみは全ひずみを示している。なお、橋軸方向の EX-25 の材齢 80 日から 90 日にかけてのデータは不安定となったため、結果から割愛した。鉄筋ひずみは全て引張側を示しており、EX-30 が最も大きい。膨張材の混和量が多いものほど引張ひずみが大きい傾向を示している。引張ひずみは材齢 10 日でいったん横ばいとなり、その後、漸増する傾向を示している。供試体打込みから脱型せずに材齢 2 週間まで湿布養生を行い、以降も脱型せずに湿布のみを取り外して材齢 120 日が経過しているが、引張ひずみは維持されている。これは軽量骨材をプレソーキングしてコンクリートを打込みしているため、湿布養生完了後も継続的に軽量骨材から水分が供給され、膨張が維持されているものと考えられる。橋軸方向に比べて橋軸直角方向の引張ひずみがやや小さいのは鉄筋比が橋軸直角方向の方が大きいこと（橋軸直角方向 1.3%、橋軸方向 0.9%）であると考えられる。

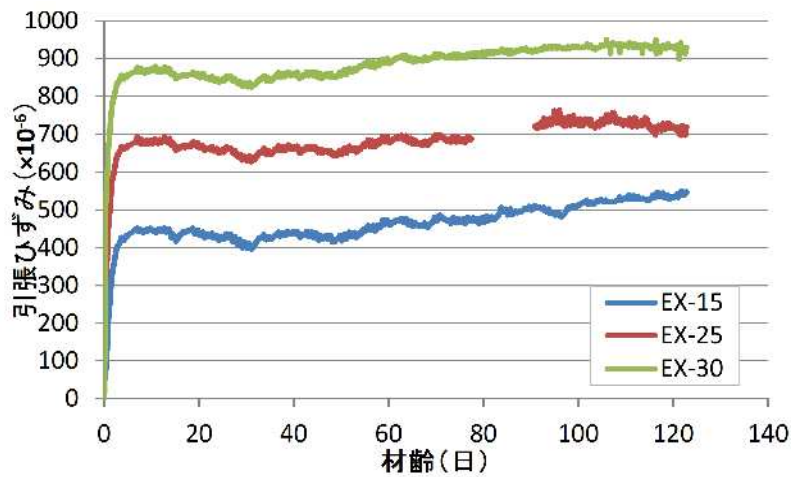


図 3-16 橋軸方向の鉄筋ひずみ

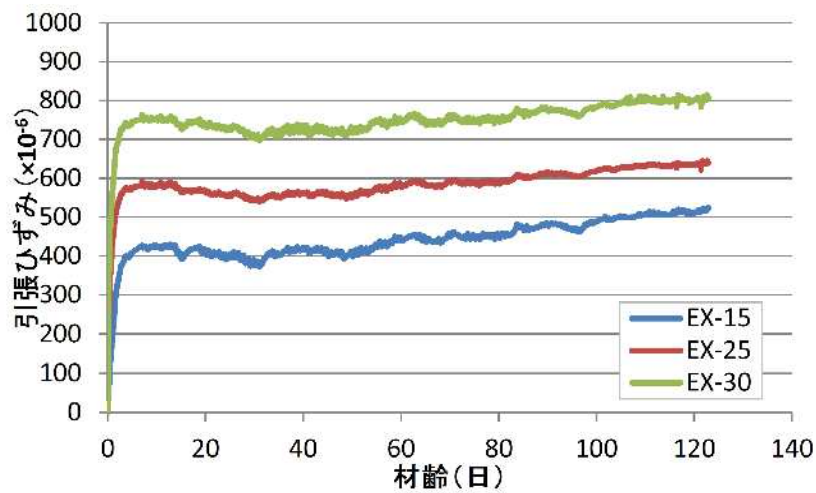


図 3-17 橋軸直角方向の鉄筋ひずみ

(6) RC 床版供試体の鉛直方向の鉄筋ひずみ

打込みから 122 日までの RC 床版供試体に埋設した鉛直方向の鉄筋ひずみについて、図 3-18 に示す。鉄筋ひずみは全ひずみを示している。EX-25 および EX-30 では、鉛直方向の拘束棒の鉄筋比が 0.1% であることから橋軸および橋軸直角方向の鉄筋ひずみと比べて大きい値を示した。最もひずみが大きい EX-30 でおおよそ 1500×10^{-6} となった。ただし、EX-15 の鉛直方向の引張ひずみは橋軸方向および橋軸直角方向の引張ひずみと同等であった。鉄筋ひずみの経時的な変化については、材齢 120 日時点においても緩やかではあるが膨張する傾向を示している。これは、軽量骨材から水分が供給され続けていることにより、その水分と膨張材が反応し、乾燥収縮を上回る膨張が生じていることからであると考えられる。

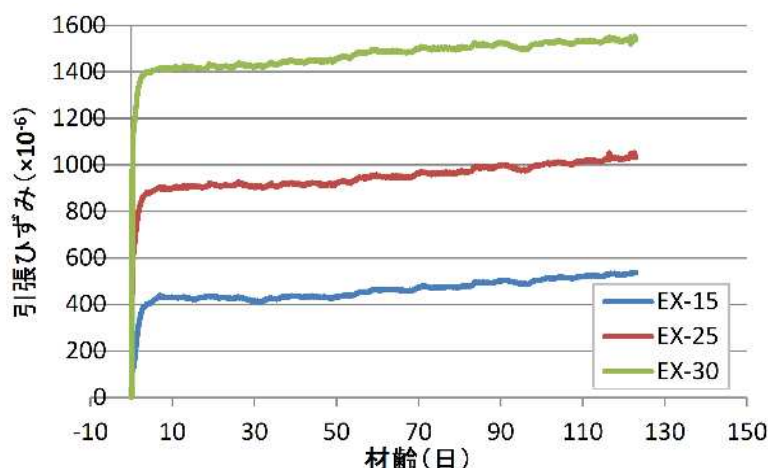


図 3-18 鉛直方向の鉄筋ひずみ

(7) RC 床版供試体の橋軸方向と橋軸直角方向のコンクリートひずみ

打込みから 122 日までの RC 床版供試体のコンクリートひずみについて、橋軸方向の測定結果を図 3-19 に、橋軸直角方向の測定結果を図 3-20 に示す。なお、コンクリートひずみはメーカー推奨の計算方法⁶⁾により温度変化による熱膨張成分を除去した値である。計算式は以下の通りである。

$$\varepsilon = C_e \times \varepsilon_i + (C_\beta - \gamma) \times \Delta t \quad \dots (1)$$

- ε : コンクリートひずみ (×10⁻⁶)
- C_e : 校正係数 (×10⁻⁶/1×10⁻⁶)
- ε_i : 初期値からのひずみ変化 (×10⁻⁶)
- C_β : 補正係数 (×10⁻⁶/°C)
- γ : コンクリートの線膨張係数 (10×10⁻⁶/°C)
- Δt : 外気温との温度差 (°C)

橋軸方向および橋軸直角方向のコンクリートひずみについては、鉄筋ひずみと同じ傾向が見られる。鉄筋ひずみに比べてコンクリートひずみの方が、やや小さい傾向にあるのは、鉄筋ひずみは、下面側に比べて鉄筋量が少ない上面側に配置された鉄筋のひずみを計測しているのに対して、コンクリートひずみは中心部を計測しているからである。床版のコンクリートひずみは、型枠による拘束や拘束鉄筋の影響で下面側から表面部にかけて漸増すると推定される。RC 床版供試体のコンクリートひずみの経時的な変化については材齢 120 日を超えても材齢初期に導入された膨張を維持しており、収縮はほとんど見られない。なお、普通骨材を用いた膨張コンクリートを用いて RC 床版供試体を作製し膨張ひずみを測定した既往の研究では、材齢 10 日以降収縮が起きることが確認されている。⁷⁾ よって、膨張材併用軽量コンクリートを用いた RC 床版供試体は軽量骨材の内部養生効果により乾燥収縮が抑制されたと考えられる。一方、図 3-4 に示したように、10×10×40cm の拘束供試体の長さ変化の結果では、材齢 91 日になると乾燥収縮と考えられる傾向を示す結果となっている。これは軽量骨材により水分が供給されるが、供試体サイズが RC 床版供試体より小さく、単位体積当りの表面積が大きいことから、乾燥の影響を受けやすかったと考えられる。したがって、膨張材併用軽量 RC 床版では、実構造物レベルの大きさでは、軽量骨材の内部養生効果により、乾燥収縮の影響を受けにくいため、長期にわたって膨張ひずみおよびそれに伴って導入された圧縮応力を維持できる可能性を示していると考えられる。この点については、コンクリートのクリープの影響なども考えられることから、測定は継続している。

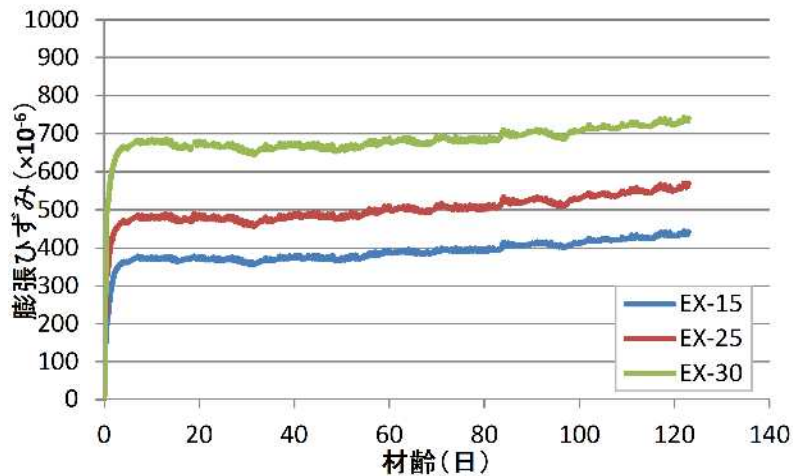


図 3-19 橋軸方向のコンクリートひずみ

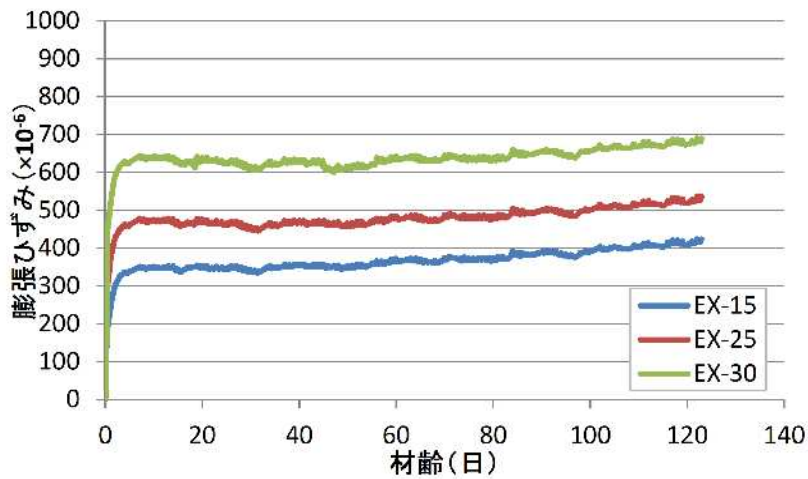


図 3-20 橋軸直角方向のコンクリートひずみ

(8) RC 床版供試体の鉛直方向のコンクリートひずみ

打込みから 122 日までの RC 床版供試体の鉛直方向のコンクリートひずみについて測定結果を図 3-21 に示す。鉛直方向のコンクリートひずみは鉛直方向の鉄筋ひずみよりも大きな値を示した。この点については、コンクリートひずみの初期値のとり方など、まだ未解明な部分があると考えている。RC 床版供試体の鉛直方向には拘束する鉄筋がほとんどなく、ほぼ自由膨張と考えられる。最もひずみの大きい EX-30 で約 2300×10^{-6} と大きな膨張ひずみを示している。この点について、現時点で RC 床版供試体の外観での変化は特に認められないが、最終的にコア等を採取して微細な水平ひび割れなどの変状が見られないかどうかの確認が必要である。

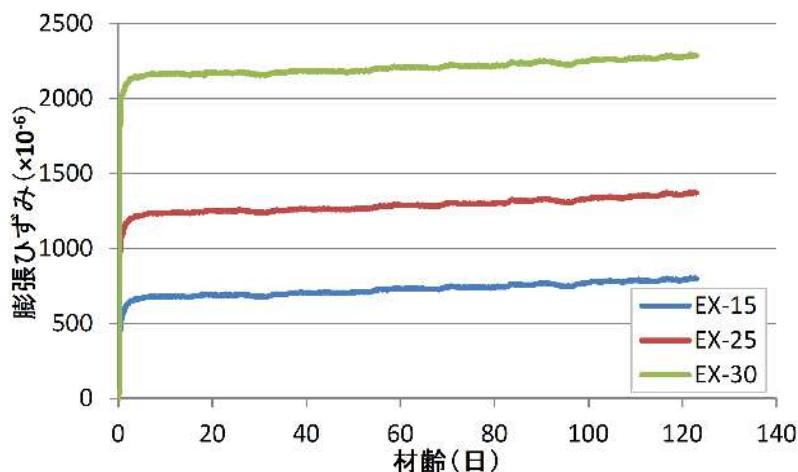


図 3-21 鉛直方向のコンクリートひずみ

(9) RC床版供試体に導入されるケミカルプレストレス

使用した鉄筋の材質 SD345 の弾性係数を 200kN/mm^2 とし、鉄筋の拘束により供試体断面全体に均一に圧縮応力が導入されていると仮定して、供試体の橋軸直角方向に導入される圧縮応力について材齢 120 日まで概略算出した結果を図 3-22 に示す。なお、圧縮応力は計測した鉄筋ひずみに鉄筋のヤング係数と供試体断面における拘束鉄筋比を掛けて算出した。

供試体の中心付近の橋軸直角方向において、供試体断面全体に均一に応力が導入されていると仮定の上であるが、本研究の範囲ではおおよそ $1.0\sim 2.0\text{N/mm}^2$ 程度の圧縮応力が導入されていると考えられる。また、膨張材混和量と材齢 28 日時点で導入される圧縮応力および鉛直方向のコンクリートひずみとの関係を図 3-23 に示す。膨張材混和量と供試体に導入される圧縮応力は正の相関関係となり、導入される応力は鉄筋比により異なるが膨張材混和量と導入される圧縮応力との関係は類似の傾向が認められ、かつ鉄筋比が大きくなるほど応力は大きくなった。例えば、耐疲労性向上の観点から橋軸直角方向に 1.2N/mm^2 の圧縮応力を導入したいと想定した場合には、膨張材混和量は 20kg/m^3 とすればよいこととなり、その混和量では、鉛直方向のコンクリートひずみは 1000×10^{-6} 以下となることも確認できた。このように、膨張材混和量を決める際に、ケミカルプレストレスの導入量と、同時に、鉛直方向の自由膨張ひずみを制御したい時に有効に使用できる可能性がある。今回は、夏場を実施した試験結果である。導入される圧縮応力は季節変動があると考えられることから、想定する圧縮応力を導入するために必要な混和量は今後明らかにする必要がある。

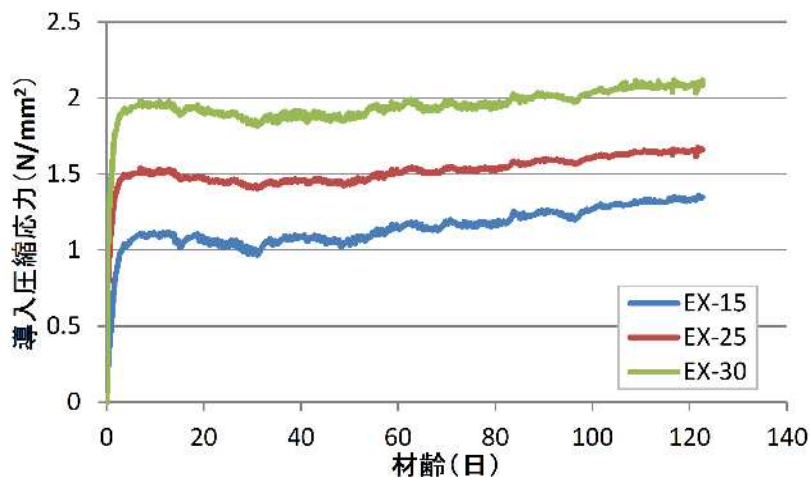


図 3-22 橋軸直角方向に導入される圧縮応力

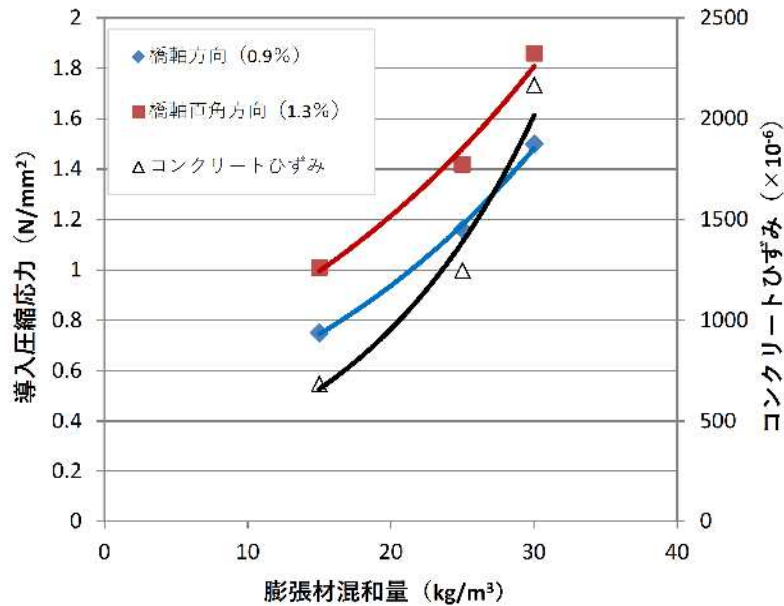


図 3-23 膨張材混和量と導入圧縮応力および鉛直方向のコンクリートひずみの関係

3. 6 第3章のまとめ

本章で得られた結論を以下に示す。

- (1) 軽量コンクリート2種は、普通コンクリートにおける収縮補償の膨張率となる混和量を混和することでケミカルプレストレス用コンクリートに相当する膨張ひずみが発生することを確認した。理由としては、普通骨材と比較して軽量骨材の剛性が小さいことと軽量骨材界面の摩擦力が小さいことからセメントペーストの膨張力を阻害しなかったためであると考えられる。
- (2) RC 床版供試体を用いた本試験で得られた膨張材混和量とコンクリートひずみの関係から、RC 床版供試体で計測したコンクリートひずみは、全てにおいてEX-30が最も大きい傾向を示した。配合にかかわらず膨張ひずみは試験開始から10日でほぼ収束し、その後も膨張ひずみは維持されている。これは普通コンクリートと膨張材を併用した膨張材併用普通RC床版とは異なる傾向であり、軽量骨材の内部養生効果によるものと考えられる。
- (3) RC床版供試体は10×10×40cmの拘束供試体と異なり、材齢120日でもほとんど収縮が見られなかった。これは、軽量骨材の内部養生効果と、単位体積当りの表面積が小さい実構造物サイズであったことから乾燥の影響を受けにくかったと考えられる。
- (4) 夏場の温度条件において実験を行った結果、軽量コンクリート2種に膨張材を20kg/m³混和すれば橋軸直角方向に1.2N/mm²相当の圧縮応力が導入できることを確認した。

以上のことから、実用化に向けて実施する耐疲労性の検討には膨張材を標準混和量である20kg/m³を混和した供試体を用いて耐疲労性の検討を行うこととした。

【第3章の参考文献】

- 1) 細田暁：微視的機構に着目した膨張コンクリートのひび割れ抵抗性およびひび割れ後の軟化性状に関する研究とRC部材への適用，東京大学学位論文，(2001)
- 2) 酒井雄也：ケミカルプレストレストコンクリートの特徴的挙動メカニズムの解明とその知識化による膨張コンクリートの効果的な活用に向けた検討，東京大学学位論文，(2011)
- 3) 磯部龍太郎，津野和宏，岩城一郎，岸利治，中澤治郎：膨張材と軽量骨材を併用した道路橋RC床版の耐疲労特性に関する研究，土木学会論文集E2，Vol. 71，No. 2，pp. 191-202，(2015)
- 4) 東山浩士，水越睦視，松井繁之，小田憲司：軽量コンクリートを用いたRC床版の押抜きせん断耐荷力の評価とその実用性に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol. 16，No. 1，pp. 45-54，(2005)
- 5) 膨張コンクリート設計施工指針，コンクリート・ライブラリー75，土木学会，(1993)
- 6) (株)東京測器研究所：ひずみ計の取扱方法
http://www.tml.jp/solution/data/embedment_straingauge_1.pdf
- 7) 岸本真輝，真鍋英規，大西弘志，AbheethaPERIS：膨張材を適用した鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性，プレストレストコンクリート技術協会 第15回シンポジウム論文集，pp. 309-312，(2006)

第4章 膨張材併用軽量 RC 床版の一般化に向けた検討

4. 1 はじめに

膨張材併用軽量 RC 床版を横浜北線（新設路線）に採用するに際し実施した検討結果より、新たに克服しなければならない課題が抽出された。

まず、耐疲労性であるが、ケミカルプレストレスを導入するために標準混和量 20kg/m^3 の 20 型膨張材を 30kg/m^3 混和した膨張材併用軽量 RC 床版を用いて輪荷重試験を実施した結果、床版厚 16cm の小型供試体では普通 RC 床版の 30 倍程度の高い耐疲労性となったものの、床版厚 25cm の実床版を模擬した供試体では普通 RC 床版と同等の耐疲労性となった。実床版サイズの膨張特性の把握が不十分であったことから、第 3 章で検討した膨張材併用軽量 RC 床版に対する適切な混和量を踏まえて、標準混和量の 20kg/m^3 を混和した供試体の耐疲労性について検討した結果を行なった。検討結果を 4. 2 で述べる。

次に、圧送性であるが、単位水量 165kg/m^3 のコンクリート配合を採用した結果、ポンプ圧送試験で水平換算距離 151m の圧送を行うにはかなりの困難が伴った。特に、生コン協組の指定により実施工でコンクリートを供給したプラントは、連続らせん羽根ミキサ（通称、シャフトレスミキサ）を使用しており、このミキサによって製造した軽量コンクリートは特にポンプ圧送が困難であった。実際の施工ではコンクリート配管を用いずに、コンクリートポンプ車のブームの先端から直接打込みを行うことで対処した（水平換算距離 65m）。一般に、軽量骨材は圧力吸水が大きいためにポンプ圧送性に劣ると理解されているが、軽量骨材は製造過程での十分なプレソーキングと生コンプラントでの十分なプレウェッティングにより十分に吸水した状態であり、軽量骨材の圧力吸水がポンプ圧送性低下の主因とは考えられなかった。試験的に二軸強制練りミキサを使用するプラントで製造した同種の膨張材併用軽量コンクリートのポンプ圧送性試験を実施したところ水平換算距離 151m の圧送を行っても支障は生じなかった。以上のことから、水セメント比の低い高強度コンクリートや超高強度繊維補強コンクリート (UFC) の製造効率に優れているとされる連続らせん羽根ミキサは、骨材密度が小さい軽量コンクリートの製造では、“混ぜ効率”は高いものの“練り効率”は低く、内部が水に接触していないセメント粒子の強凝集体がコンクリート内部に多く残存していることが、ポンプ圧送時の流動性低下の原因であると考えられた。これらの問題に対処すべく、混和剤を AE 減水剤から高性能 AE 減水剤 (SP) に変更して一定の改善効果が得られることを確認したが、気温が低い冬季施工では、標準添加量を下回る量の SP 使用量でも十分なスランプが確保できてしまい、結果として材料分離を伴わずに SP 添加量を増やすことが困難となり、ポンプ圧送性を更に改善することは困難であった。生産性を向上させるためにはポンプ圧送を前提とした軽量コンクリートの施工が必要であることから、冬季におけるセメント粒子の凝集構造を練混ぜ方法と圧送方法の変更等により解決する必要があるといえる。そこで、軽量コンクリートとミキサの組合せや季節をパラメータとして、例えば、凝集体が残存した場合でも年間を通して圧送可能なコンクリートの施工条件を明確化する検討を行った。検討結果を 4. 3 で述べる。

4. 2 最適量の膨張材を混和した膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性

4. 2. 1 概要

膨張材を混和したコンクリートは当然 3 方向に膨張する。ただし、道路橋床版には水平方向と比較して厚さ方向に鉄筋がほとんど配置されない特徴を有していることから、道路橋床版に膨張材を混和する場合には床版の厚さ方向の膨張に注意が必要となる。第 3 章での検討の結果、軽量 RC 床版においては普通コンクリートでは収縮補償相当、すなわち、JIS A 6202 に準拠した方法による長さ変化率 $150\sim 250\times 10^{-6}$ 程度の膨張率を得ることができる膨張材の混和量 (20kg/m^3) で、 250×10^{-6} 以上の膨張ひずみが発現することが確認できた¹⁾。

本節では、軽量コンクリート 2 種に 20 型膨張材を普通コンクリートの標準混和量である 20kg/m^3 混和して作製した実物大供試体（以下、軽量 RC-20）を用いて道路橋示方書²⁾で耐疲労性の確認手法として提案されている土木研究所が所有する輪荷重走行試験機を

用いた階段状荷重漸増載荷^{3),4)}を実施し、同試験方法で検証された100年以上の耐疲労性がある普通RC床版³⁾(以下、普通RC)および第2章で示した20型膨張材を30kg/m³混和した軽量RC床版(以下、軽量RC-30)と相対比較することで耐疲労性について検討を行った。

4. 2. 2 供試体および試験方法

(1) 供試体

供試体は2,800mm×4,500mm×250mmの複鉄筋RC床版であり、その形状および寸法を図4-1に示す。供試体の外形寸法は、表4-1および表4-2に示す過去の軽量RC床版の実験で用いた供試体⁵⁾(供試体名：軽量RC-30)および平成8年の道路橋示方書²⁾に準拠した既往の研究の普通RCの供試体³⁾(供試体名：RC8n-1, RC8n-2, RC8n-3)と同一とした。主鉄筋はD19を上段300mm間隔、下段150mm間隔とした。配力鉄筋はD16を上段300mm間隔、下段150mm間隔とした。

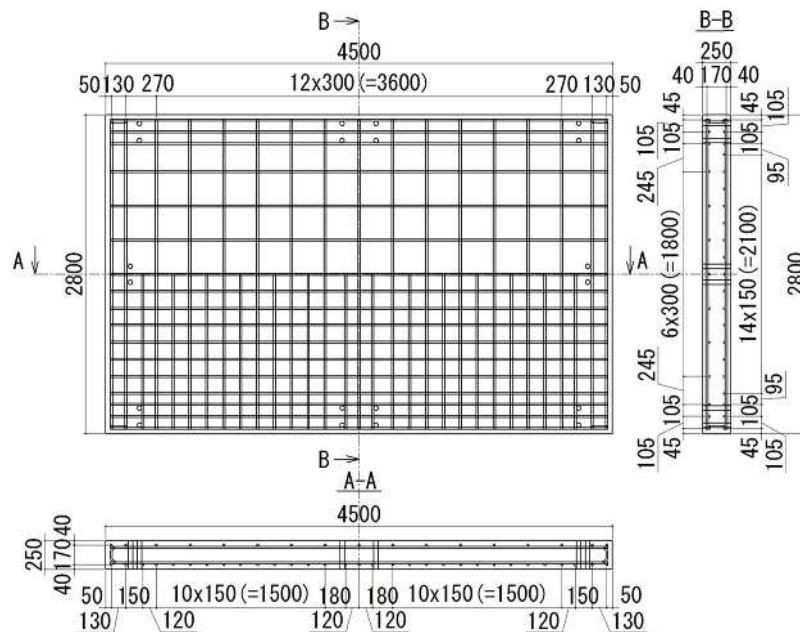


図4-1 供試体概要図

表4-1 供試体諸元

供試体名	外形寸法 (mm)	主鉄筋		配力鉄筋	
		径	間隔 (mm)	径	間隔 (mm)
軽量RC-20	2800 × 4500 × 250	D19	150 (300)	D16	150 (300)
軽量RC-30					125 (250)
RC8n-1					
RC8n-2					
RC8n-3					

()内は圧縮側鉄筋の値

表4-2 既往の実験結果^{5),7)}

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	破壊時荷重 (kN)	破壊時走行回数 (回)
軽量RC-30	49.1	17.7	353	424, 190
RC8n-1	33.1	27.9	392	489, 555
RC8n-2	38.4	25.7	334	394, 122
RC8n-3	37.4	26.5	392	520, 000*未破壊

(2) 使用材料

試験に用いた軽量コンクリートの配合を表 4-3 に示す。普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）を用いて、粗骨材（絶乾密度：1.29g/cm³，最大寸法：15mm，吸水率：29.0%），細骨材（絶乾密度：1.65g/cm³，吸水率：15.0%）とも人工軽量骨材の軽量コンクリート 2 種とした。いずれも水セメント比は 37%とした。軽量 RC-20 にはエトリングライト・石灰複合系の低添加型膨張材を 20kg/m³ 混和した。この混和量は，夏季に実施した軽量 RC 床版の膨張特性の検討において橋軸直角方向に 1.2N/mm² の圧縮応力を導入できることを確認した混和量である。なお，配合上の単位容積質量は，1,793kg/m³である。一方，軽量 RC-30 には石灰系の低添加型膨張材を普通コンクリートの標準混和量である 20kg/m³ の 1.5 倍（30kg/m³）と，消泡剤を 0.05%混和している。設計基準強度は 40N/mm² で，せん断強度が設計基準強度 27N/mm² の普通コンクリートと同等となるようにした。コンクリートは実機ミキサで練り混ぜを行った。スランプはコンクリート標準示方書⁶⁾を参考にポンプ圧送性が良好とされる 18cm とし，空気量は現場条件が耐凍害性を考慮する必要がない場所であるため，普通コンクリートと同等の 4.5%とした。軽量 RC-20 のフレッシュコンクリートの性状は，スランプ 20.5cm，空気量 4.7%，コンクリート温度 24℃，材齢 28 日の単位体積質量は 1,830kg/m³であった。凝結試験で終結を確認した後から湿潤養生とし，材齢 28 日の物性試験結果を確認後，材齢 29 日に脱型し，その後は気中養生とした。輪荷重走行試験の開始は，試験機の都合上材齢 78 日とした。

表 4-3 軽量コンクリートの配合

供試体名	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AD (P×%)	AE ^{*4} (P×%)
		W	C	Ex ^{*1}	SL	GL		
軽量RC-20	48.6	170	439	20	513	424	1.1 ^{*2}	0.001
軽量RC-30	45.0	165	415	30	555	603	0.6 ^{*3}	0.001

*1:低添加型膨張材 *2:AE減水剤標準型(I種) *3:高性能AE減水剤 *4:AE剤(I種)

(3) 試験方法

輪荷重走行試験の実施は，IHI インフラシステムが所有する試験機を用いて行った。写真 4-1 に輪荷重走行試験機を示す。供試体の支持条件は，長辺方向の 2 辺を単純支持（支持支間 2,500mm）とし，短辺方向の 2 辺は弾性支持とした。輪荷重走行の範囲は幅 500mm で橋軸方向の移動距離 3,000mm とした。載荷荷重は，文献 3) の方法と同様の図 4-2 に示す階段状荷重漸増載荷とした。輪荷重走行による床版の劣化状況の把握は，たわみ，ひずみの計測値とひび割れ観察で行った。試験の終了条件は，床版が損傷して総たわみが急増する挙動を示した時期とした（総たわみの制限値 10mm）。



写真 4-1 輪荷重走行試験機 (IHI インフラシステム)

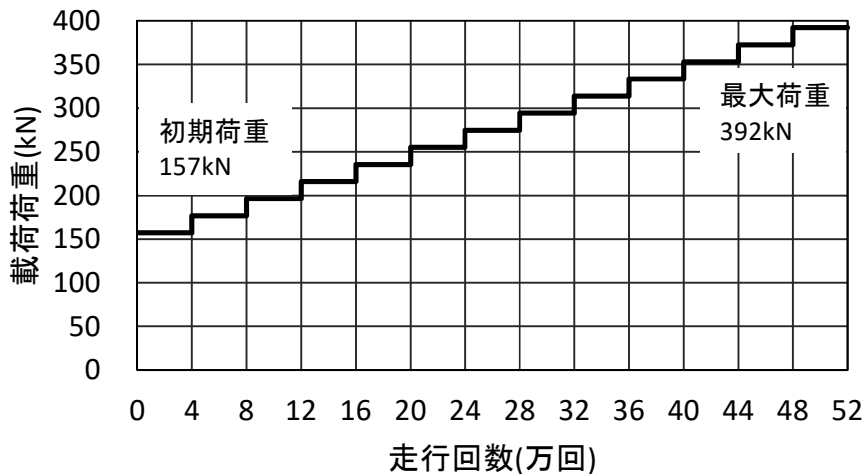


図 4-2 階段状荷重漸増載荷

4. 2. 3 試験結果および考察

(1) 物性試験結果

硬化コンクリートの物性値を表 4-4 に示す。材齢 28 日の圧縮強度は 56N/mm^2 であり、設計基準強度 40N/mm^2 を上回った。試験開始材齢において、圧縮強度、割裂引張強度、せん断強度は軽量 RC-20 の方が大きくなっている。この理由としては、軽量コンクリート 2 種を用いた実験結果⁷⁾と同様に、標準混和量より多く膨張材を混和した場合には鋼製モールドを使用したとしても供試体長手方向が無拘束状態となるため、混和量を 30kg/m^3 より 20kg/m^3 の方が強度は大きくなったと推察される。

表 4-4 硬化コンクリートの物性値

供試体名	材齢 (日)	圧縮 強度 (N/mm^2)	静弾性 係数 (kN/mm^2)	割裂引 張強度 (N/mm^2)	せん断 強度 (N/mm^2)	見掛け 密度*1 (kg/m^3)
軽量RC-20	78	58.1	20.0	3.6	7.1	1830
軽量RC-30	173	49.1	17.7	3.3	5.6	1813

*1:材齢28日の値を記載

なお、せん断試験は JCI-SF6 に準拠して実施した。また、式 (1) を用いて算出⁸⁾した橋軸直角方向のケミカルプレストレス σ_{cp} の推移を図 4-3 に示す。ケミカルプレストレス量は 1.2N/mm^2 に届かず、軽量 RC-30 の約半分のケミカルプレストレス量となった。この理由としては、本供試体の作製が秋であったため、膨張材の温度依存特性によって、膨張量が小さくなったものと推察される。

$$\sigma_{cp} = \varepsilon \cdot E_s \cdot p \quad (1)$$

ε : 上下段鉄筋ひずみの計測値の平均

E_s : 鉄筋のヤング係数

p : 拘束鉄筋比 (配筋より 1.146%)

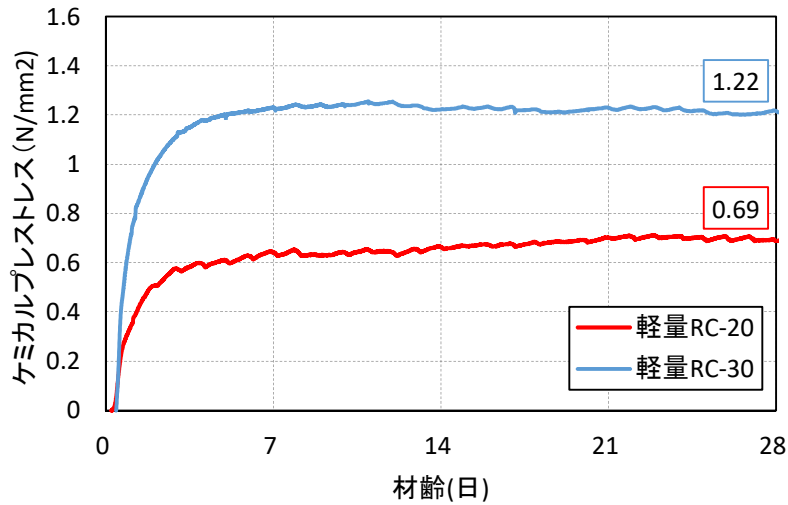


図 4-3 ケミカルプレストレスの推移

著者らが夏季に実施した軽量コンクリート 2 種の膨張特性試験の結果との対比を図 4-4 に示す。膨張材混和量と季節において導入される圧縮応力の関連については、今後の検討としたい。

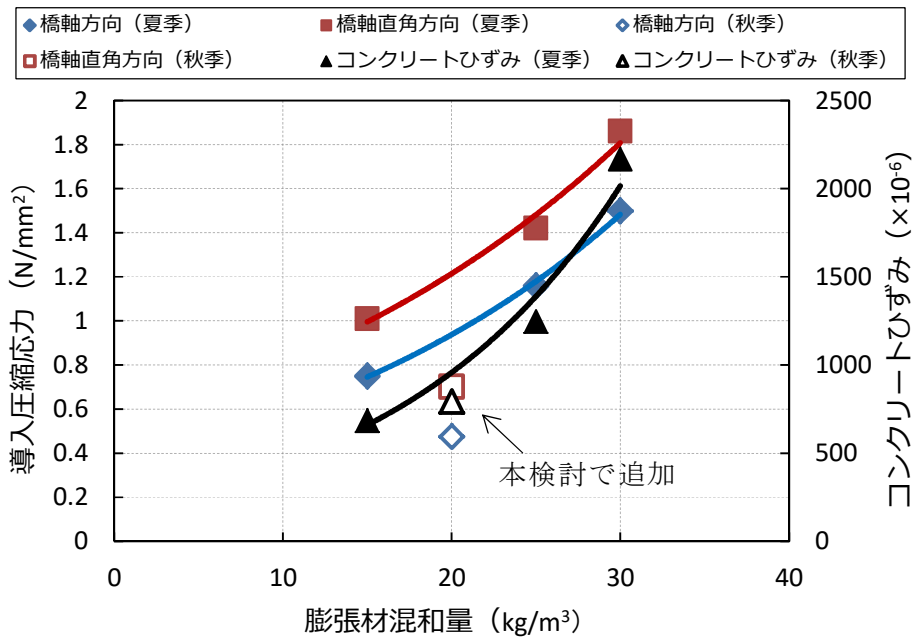


図 4-4 膨張材混和量と導入圧縮応力および鉛直方向のコンクリートひずみの関係

(2) 活荷重たわみと走行回数の関係

走行回数と活荷重たわみ (157kN) (以下、活荷重たわみは全て 157kN での値を示す) の関係を図 4-5 に示す。活荷重たわみは、静的に 157kN 荷重を行った際の総たわみから除荷時の残留たわみを差し引いた値とした。軽量 RC-20 のたわみは、走行開始直後は普通 RC より大きくなるが、走行回数 20 万回以降で大小関係が逆転し、軽量 RC-20 のたわみが小さくなる傾向であった。この傾向は軽量 RC-30 と同様であり、軽量コンクリートの静弾性係数が普通コンクリートより小さいため走行開始時の軽量 RC のたわみが大きくなるが、膨張材の混和によるケミカルプレストレスの効果で初期ひび割れが抑制されることと引張

抵抗力が向上することによりたわみの増加が普通 RC より遅くなるためである。軽量 RC-20 は、走行回数 40 万回以降にたわみが急増して走行回数 440,814 回（輪荷重 372kN）で試験を終了した。軽量 RC-30 と比較するとたわみが急増するタイミング、破壊時の走行回数（424,190 回）はほぼ同じであり、いずれも普通 RC の供試体 RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置することがわかる。この結果から、軽量 RC-20 に導入された圧縮応力は、軽量 RC-30 と比べて約半分しか導入されなかったが、圧縮応力としては十分であったと考えられる。なお、普通 RC の試験結果と同様に、軽量 RC の試験結果にもばらつきがあると考えられるため、軽量 RC の耐疲労性について破壊時の走行回数のみで判断せず、(3) 以降の検討を実施して総合的に判断した。

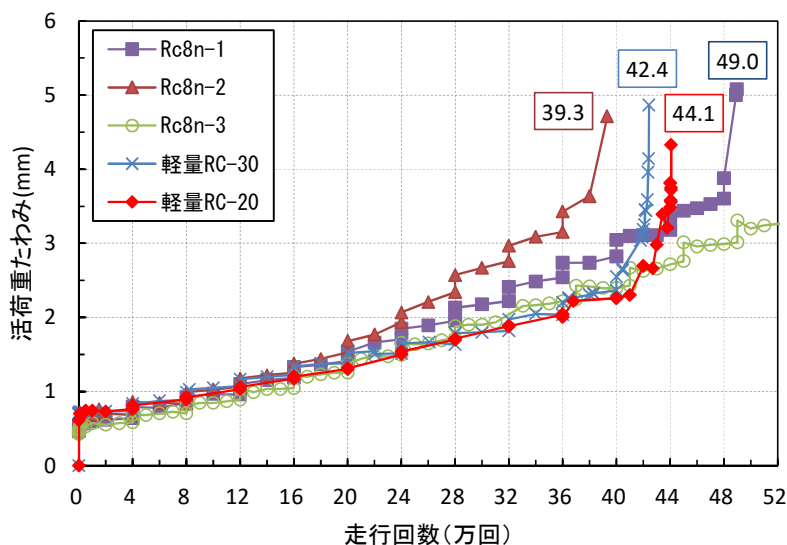


図 4-5 活荷重たわみと走行回数の関係

(3) 載荷荷重と強度補正した走行回数の関係

ここでは 2. 2 と同様に試験開始時の実強度と設計基準強度との比から走行回数を補正して、載荷荷重と強度補正した走行回数の関係を算出した。算出した結果を図 4-6 に示す。軽量 RC-20 の走行回数は RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置した。強度補正した軽量 RC-20 の走行回数は 313,743 回であった。

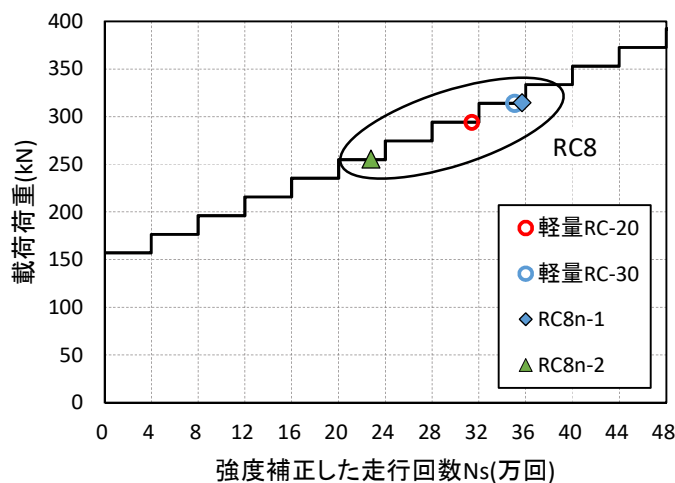


図 4-6 載荷荷重と強度補正した走行回数の関係

(4) 中立軸の推移

供試体中央の上下段の主鉄筋に設置した鉄筋ひずみゲージの計測値の平均から計算した中立軸の推移を図 4-7 に示す。軽量 RC-20 は、普通 RC (RC8n-1) とは傾向が異なり、載荷開始とともに約 15mm 上方へ移動したのちたわみが急増する 440,000 回以前までは微少に変化するもののほぼ一定の値で推移した。軽量 RC-30 と比較するとやや小さい値で推移するが、概ね同じ傾向を示した。

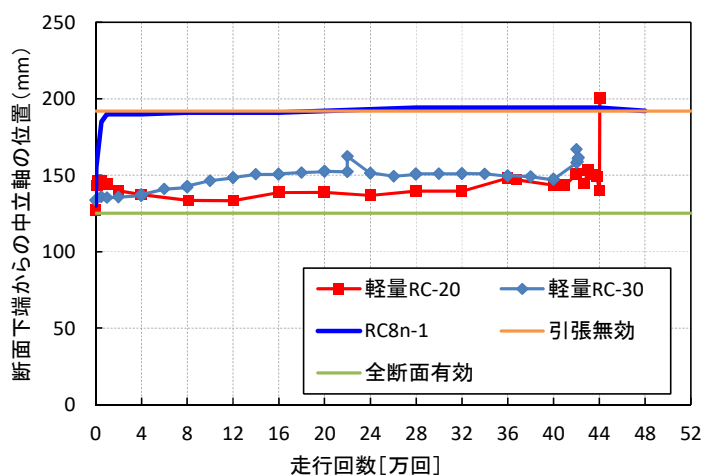


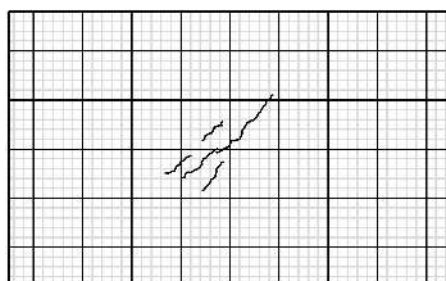
図 4-7 中立軸の位置と走行回数の関係

(5) ひび割れ分布

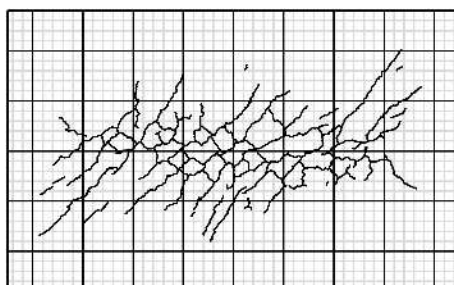
本実験のひび割れ分布を図 4-8 に示す。ひび割れの発生は供試体下面にほぼ均等に分散しており、床版が一体構造として機能していることがわかる。この分布は、普通 RC と違いがない。また、本実験結果は文献 9) に示される 4 段階に大別される道路橋 RC 床版のひび割れ損傷過程に当てはめると、一方向ひび割れ (段階 I) が 80,000 回、二方向ひび割れ (段階 II) が 240,000 回、亀甲状ひび割れ (段階 III) が 320,000 回に相当することがわかる。陥没破壊 (段階 IV) に関しては、これに至る前に実験を終了したが、実験を終了した 440,814 回走行の状況に近似する。したがって、本実験は普通 RC の実構造の疲労損傷と同様の損傷過程を再現しており、実物大の軽量 RC の破壊性状は基本的に普通 RC と同様のものであると考えられる。図 4-9 に軽量 RC の床版下面のひび割れ密度と走行回数の関係を示す。ひび割れ密度の算出は、全床版面に対して格子密度法によって行った。ひび割れ密度の使用限界は $10.0\text{m}^2/\text{m}^2$ であり⁹⁾、本実験結果はほぼ線形で増加し、実験終了時にひび割れ密度がほぼ使用限界値と一致した。普通 RC のひび割れ密度は試験開始直後から大きく増加し、その後緩やかに増加して $10\text{m}^2/\text{m}^2$ 付近で破壊に至ることから、傾向は異なるものであった。軽量 RC-20 のひび割れ密度はほぼ一定の増加率で漸増する傾向となった。走行回数 8 万回までひび割れ密度が増加しなかったが、その要因としては、軽量骨材の内部養生効果により脱型後の初期ひび割れが少なかったこと、軽量コンクリートの弾性係数が小さいために鉄筋が引張応力を負担する割合が大きかったこと等が考えられる。なお、走行回数 32 万回付近でひび割れの上下方向のずれが発生し、走行回数 36 万回付近でひび割れ部に角落ちが発生、走行回数 42 万回付近で段差を伴うひびわれ (写真 4-2) が発生し、最終的にせん断破壊に至った。

供試体を中央で橋軸直角方向および橋軸方向に切断した断面のひび割れ分布を観察した結果を図 4-10 に示す。同図は、比較のため、軽量 RC-30 および走行回数が同等であった普通 RC (RC8n-1) を並列させて示している。橋軸直角方向は、軽量 RC-20 及び軽量 RC-30 は、普通 RC と比べてひび割れの角度がやや緩やかとなっている。軽量 RC-20 と軽量 RC-30 は、ともに、上鉄筋付近に層状に複数のひび割れの発生が認められる。これは、普通 RC

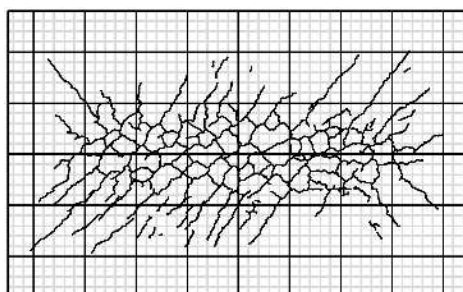
には見られないことから、軽量 RC 床版の特徴であると考えられ、考察については今後の検討としたい。橋軸方向は、軽量 RC-20、軽量 RC-30 および普通 RC の全てに共通し、輪荷重の走行範囲全体の上面鉄筋に沿って水平ひび割れが発生しており、鉄筋コンクリート床版に共通した破壊形態と推察される。



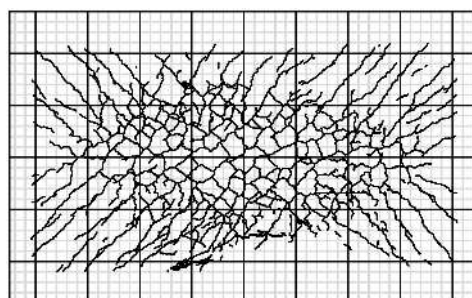
(a) 段階 I : 80,000回走行



(b) 段階 II : 240,000回走行



(c) 段階 III : 320,000回走行



(d) 段階 IV : 440,814 回走行

図 4-8 供試体下面のひび割れ分布

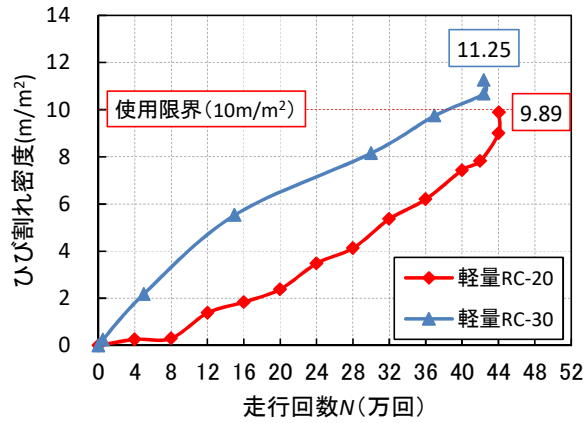


図 4-9 床版下面のひび割れ密度と走行回数との関係

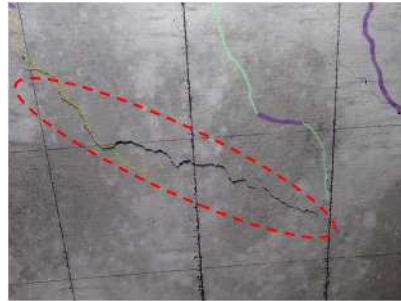


写真 4-2 段差を伴うひび割れ (軽量 RC-20)

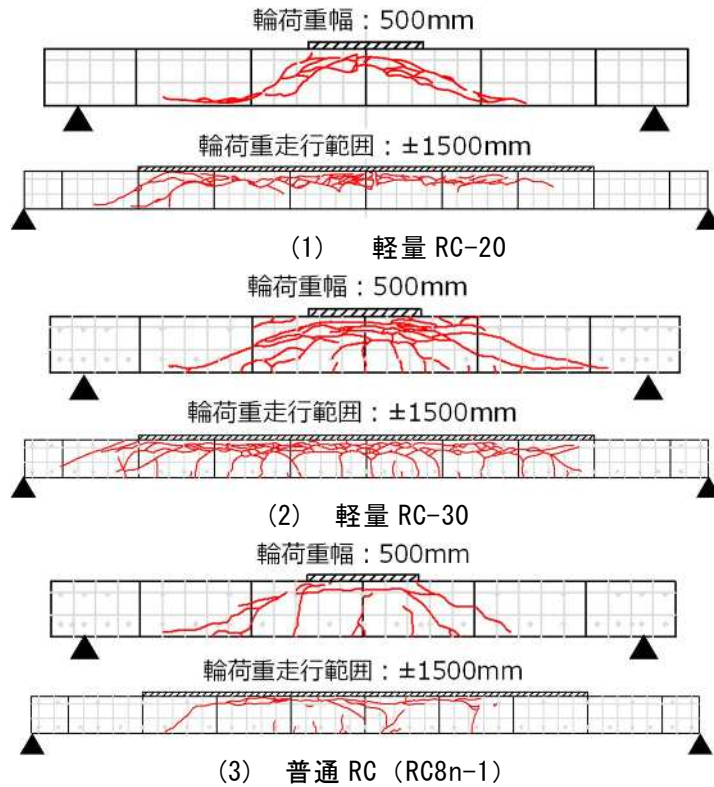


図 4-10 供試体断面のひび割れ分布
(上段: 橋軸直角方向, 下段: 橋軸方向)

(6) S-N 曲線

軽量 RC と普通 RC の輪荷重走行試験結果を載荷荷重 157kN 基準の S-N 曲線にプロットしたものを図 4-11 に示す。S-N 曲線は文献⁹⁾の松井理論式とした。図中の縦軸に示す P_{sxe} は、式 2-3 より算出した。軽量 RC の 2 体の実験結果はせん断強度比 S を P_{sxe} で算出した場合のどちらもほぼ同じ位置にプロットされており、同等の耐疲労性を有することが確認できる。また、普通 RC の S-N 曲線よりも右方に位置していることから、耐疲労性に優れることがわかった。

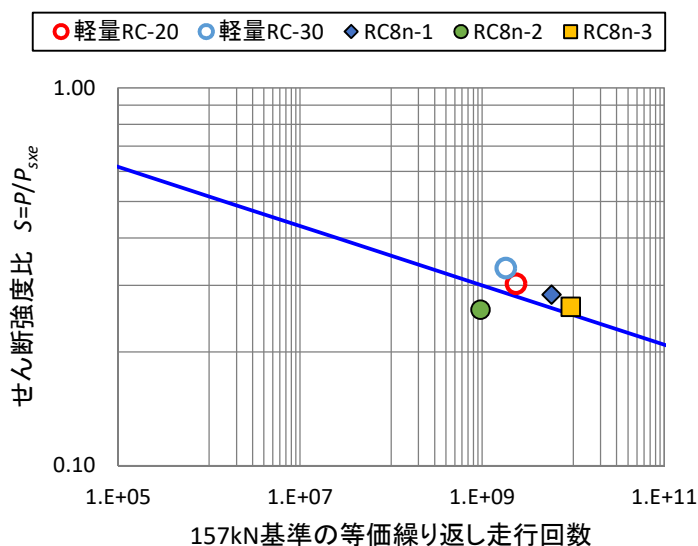


図 4-11 157kN 基準の S-N 曲線

4. 2. 4 まとめ

本節では、軽量 RC-20 を用いて輪荷重走行試験（階段状荷重漸増載荷：土研式）を実施し、普通 RC および軽量 RC-30 との相対比較により耐疲労性の検討を行った。

以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 活荷重たわみと走行回数の関係より、軽量 RC-20 の破壊時の走行回数は軽量 RC-30 とほぼ同等であり、RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置した。また、物性試験の結果から強度補正をした走行回数に換算しても軽量 RC-30 とほぼ同等であり、RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置した。
- (2) 本研究にて作製した軽量 RC-20 に導入された圧縮応力は、軽量 RC-30 と比べて約半分しか導入されなかったが、破壊時の走行回数が普通 RC および軽量 RC-30 と同等であったことから、圧縮応力としては十分であったと考えられる。
- (3) 軽量 RC の中立軸の推移は載荷開始とともに約 15mm 上方へ移動するが、その後たわみが急増する 440,000 回以前までは微少に変化するもののほぼ一定の値で推移した。これは、軽量 RC-30 と概ね同じである。
- (4) 軽量 RC-20 の損傷進展過程は普通 RC と同様に、ひびわれの上下方向のずれ、角落ちが発生して最終的な破壊に至った。
- (5) 軽量 RC-20 供試体を切断した断面のひび割れ分布の特徴としては、特に橋軸直角方向について、ひび割れの角度が普通 RC よりやや緩やかなこと、上鉄筋付近に層状に水平ひびわれが発生することであり、これは軽量 RC 床版のひび割れ分布の特徴であると考えられる。
- (6) 軽量 RC-20 は松井理論式の普通 RC の S-N 曲線よりも右方に位置し、耐疲労性に優れることがわかった。

以上より、総合的に判断すると、軽量 RC-20 は軽量 RC-30 と同程度の耐疲労性を有して

おり、また、普通 RC とも同程度の耐疲労性を有していると考えられる。よって、軽量コンクリート 2 種に膨張材を普通コンクリートの標準混和量を(20kg/m³)混和すれば普通 RC と同程度の耐疲労性を有することを確認できたと考えられる。

4. 3 年間を通して圧送可能な膨張材併用軽量コンクリートの圧送性

4. 3. 1 概要

現場汎用性を重視した膨張材併用軽量床版について、単位水量の少ない土木用の配合でも確実に圧送できる技術を構築することを目的として、ポンプ圧送試験を実施した。既往の研究⁵⁾により軽量コンクリートの圧送性を低下させる原因を内部が、水に接触していないセメント粒子の凝集体の残存と考えていることから、これらを加味しても、年間を通して圧送可能な施工条件について検討を行った。

4. 3. 2 検討ケース

年間を通して圧送可能な膨張材併用軽量コンクリートのポンプ圧送の実現に向けて、試験時期として夏季と冬季に試験を実施した。

膨張材は、市場性の高い2タイプ(石灰系膨張材及びエトリンガイド石灰複合系膨張材)を網羅し、また単位水量も170kg/m³、168kg/m³、165kg/m³と、パラメトリックに変更させ、表4-5に示す合計9ケースで圧送試験を行った。

表4-5 圧送試験のケース

検討ケース	試験時期	膨張材 [※] 種類	膨張材 混和量	単位水量
A: HEx-15-170-w	2017年2月 (冬季)	HEx	15kg/m ³	170kg/m ³
B: HEx-15-165-w				165kg/m ³
C: PC-15-170-s	2017年9月 (夏季)	PC	15kg/m ³	170kg/m ³
D: PC-20-170-s			20kg/m ³	
E: HEx-15-170-s		HEx	15kg/m ³	
F: PC-20-170-w	2018年12月 (冬季)	PC	20kg/m ³	170kg/m ³
G: PC-20-165-w				165kg/m ³
H: HEx-20-168-w		HEx	20kg/m ³	168kg/m ³
I: HEx-20-165-w				165kg/m ³

※HEx：太平洋マテリアル社製，PC：デンカ社製

4. 3. 3 使用材料

本研究で用いたコンクリートの使用材料を表4-6に示す。

表4-6 使用材料

使用材料	記号	産地または品名
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 太平洋セメント社製
膨張材	HE _x	ハイパーエクスパン 太平洋マテリアル社製
	PC	デンカパワーCSA タイプS デンカ社製
細骨材	S _L	人工軽量骨材 メサライト 日本メサライト工業社製
粗骨材	G _L	人工軽量骨材 メサライト 日本メサライト工業社製
混和剤	AD ₁	フローリック SV10 フローリック社製
	AD ₂	ヤマソー09NLR-P 山宋化学社製
	SP	フローリック SF500S フローリック社製
	AE ₁	マスターエア 101 BASF ジャパン社製
	AE ₂	マスターエア 202 BASF ジャパン社製

4. 3. 4 コンクリート配合

本研究で用いたコンクリートの配合条件を表4-7に、設計基準強度とフレッシュ性状の目標値を表4-8に示す。軽量コンクリートは、設計基準強度40N/mm²、W/B=37%と設定し、粗骨材及び細骨材ともに人工軽量骨材を使用した。また、耐疲労性の向上を目的として、20型膨張材を混和した。フレッシュ性状について、目標スランプは、軽量コンクリートであることから圧送性を加味し18±2.5cmとした。目標空気量は、普通コンクリートと同等の4.5±1.5%とした。目標スランプと目標空気量となるようにSP、ADおよびAEを調整した。

表4-7 配合条件

検討ケース	膨張材種類	単位量 (kg/m ³)						AD ₁ (P×%)	AD ₂ (P×%)	SP (P×%)	AE ₁ (P×%)	AE ₂ (P×%)
		W	C	EX		S _L	G _L					
				HE _x	PC							
A: HEx-15-170-w	HEx	170	444	15	—	574	554	0.6	—	—	0.003	—
B: HEx-15-165-w	HEx	165	430	15	—	583	563	—	—	0.5	0.001	—
C: PC-15-170-s	PC	170	444	—	15	512	424	—	1.2	—	—	0.011
D: PC-20-170-s	PC	170	439	—	20	512	424	—	1.2	—	—	0.011
E: HEx-15-170-s	HEx	170	444	15	—	512	424	—	1.2	—	—	0.011
F: PC-20-170-w	PC	170	439	—	20	512	426	—	0.49	—	—	—
G: PC-20-165-w	PC	165	426	—	20	520	431	—	0.65	—	—	—
H: HEx-20-168-w	HEx	168	434	20	—	515	428	—	0.67	—	—	—
I: HEx-20-165-w	HEx	165	425	20	—	520	432	—	0.67	—	—	—

表4-8 設計基準強度とフレッシュ性状の目標値

設計基準強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)
40	18.0±2.5	4.5±1.5

4. 3. 5 練混ぜ

(1) 船橋レミコン (北千葉工場)

ケース A および B のコンクリートは、3m³ の二軸強制練りミキサを用いて、1 バッチの練混ぜ量を 2.5m³ として計 5m³ のコンクリートを製造した。練混ぜ手順は、細骨材を投入後、2 秒後に水、混和剤、セメントおよび膨張材を、5 秒後に粗骨材を投入し合計で 60 秒間練混ぜて排出した。なお、練混ぜ前に軽量骨材の含水率を測定し、含水率と吸水率の差により練混ぜ水量を補正して練混ぜを行った。

(2) 晴海小野田レミコン

ケース C~I のコンクリートは、5m³ の二軸強制練りミキサを用いて、1 バッチの練混ぜ量を 2m³ として計 4m³ のコンクリートを製造した。練混ぜ手順は、水と混和剤を投入後、細骨材、セメント、膨張材、粗骨材の順に投入し合計で 70 秒間練混ぜて排出した。なお、ケース A および B と同様に練混ぜ水量を補正して練混ぜを行った。

4. 3. 6 試験項目および試験方法

試験項目及び試験方法を表4-9及び表4-10、ポンプ圧送試験における配管条件を図4-12に示す。配管条件は、水平換算距離は約150mとし、より圧送条件としては厳しくなるよう、テーパ管（実長3mを想定）を設置し、ポンプ車の基圧および過年度閉塞の多いテーパ管直前についても計測を実施するため、圧力計を設置した。また、圧送前後に試料を採取し、フレッシュ性状の確認を行った。圧送試験状況を写真4-3、写真4-4に示す。

表 4-9 試験項目および試験方法 (フレッシュ性状)

試験項目	試験方法	備考
スランプ試験	JIS A 1101	出荷時, 圧送前, 筒先
空気量試験	JIS A 1116	出荷時, 圧送前, 筒先
コンクリート温度	JIS A 1156	出荷時, 圧送前, 筒先
ブリーディング試験	JIS A 1123	圧送前
加圧ブリーディング試験	JSCE-F502	圧送前, 筒先
配管内圧力測定	—	ブーム付近, テーパー付近

表4-10 試験項目および試験方法 (硬化物性)

試験項目	試験方法	備考
圧縮強度試験 (材齢 28 日)	JIS A 1108	出荷時, 圧送前, 筒先

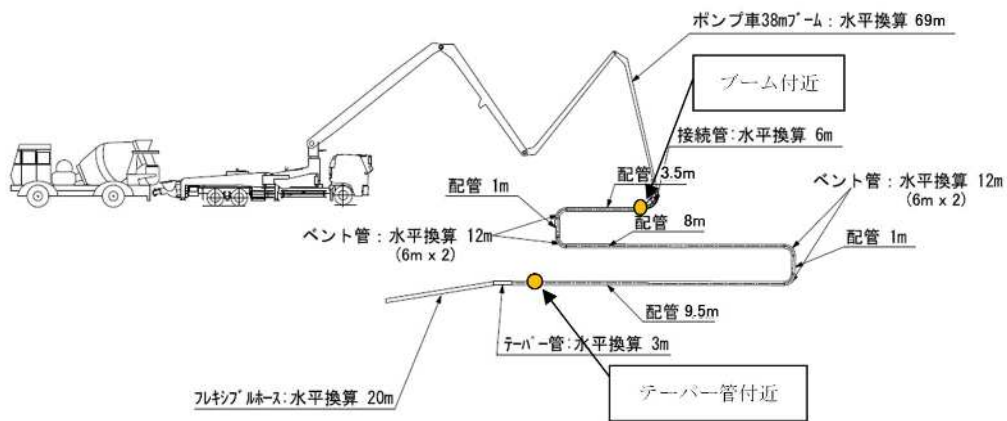


図4-12 圧送試験の配管条件



写真4-3 圧送試験状況 (a) 配管状況



写真4-4 圧送試験状況 (b) 圧力計の設置状況

4. 3. 7 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状試験結果一覧を表 4-11 に示す。ケース B は、出荷時、圧送前、筒先で性状が大きく変化した。

表4-11 フレッシュ性状試験結果

検討ケース	実施時期	スランプ ^{※1} (cm)	空気量 ^{※1} (%)	CT ^{※1} (°C)	
A: HEx-15-170-w	2017. 2 (冬季)	21.5	4.7	13	
		20.0	4.5	15	
		15.0	3.6	15	
18.0		5.0	13		
B: HEx-15-165-w		25.5	6.4	13	
		13.0	1.9	15	
	C: PC-15-170-s	2017. 9 (夏季)	22.0	4.0	31
20.5			3.7	31	
20.5			4.7	31	
D: PC-20-170-s	22.0		5.2	30	
	20.5		3.9	32	
	22.5		5.2	31	
E: HEx-15-170-s	2018. 12 (冬季)		22.5	5.4	31
			20.5	5.4	32
			21.0	4.7	32
F: PC-20-170-w		21.5	4.9	19	
		19.0	4.2	18	
		19.0	4.7	16	
G: PC-20-165-w		20.5	4.4	20	
		19.0	4.9	18	
		17.5	3.8	18	
H: HEx-20-168-w		21.0	4.1	19	
		18.0	3.9	18	
		17.0	4.2	17	
I: HEx-20-165-w	21.0	4.7	20		
	19.5	5.2	18		
	19.5	3.6	16		

※1：上段は出荷時，中段は圧送前，下段は筒先を示す。

(2) ポンプ圧送試験結果

圧送試験結果一覧を表4-12に示す。9回の実施のうち1ケースだけ圧送不可（ケースB）であった。筒先の状況として、圧送性に問題なかった検討ケースのうち、写真4-5にケースFの状況を示す。

表4-12 圧送試験結果

検討ケース	実施時期	圧送結果	備考
A: HEx-15-170-w	2017年2月 (冬季)	○	※1
B: HEx-15-165-w		×	
C: PC-15-170-s	2017年9月 (夏季)	○	※2
D: PC-20-170-s		○	
E: HEx-15-170-s		○	
F: PC-20-170-w	2018年12月 (冬季)	○	
G: PC-20-165-w		○	
H: HEx-20-168-w		○	
I: HEx-20-165-w		○	

※1：船橋レミコン（北千葉工場）強制2軸ミキサ

※2：晴海小野田レミコン，強制2軸ミキサ



写真4-5 圧送状況（筒先）ケースF

(3) ブリーディング試験結果

ブリーディング試験結果一覧を表 4-13 に示す。ケース A のブリーディング率は高かったが、圧送性に問題はなかった。

表 4-13 ブリーディング試験結果

検討ケース	実施時期	ブリーディング率 (%)	備考
A: HEx-15-170-w	2017 年 2 月 (冬季)	1.45	※1
B: HEx-15-165-w		0.34	
C: PC-15-170-s	2017 年 9 月 (夏季)	0.34	※2
D: PC-20-170-s		0.32	
E: HEx-15-170-s		0.56	
F: PC-20-170-w	2018 年 12 月 (冬季)	0.59	
G: PC-20-165-w		0.59	
H: HEx-20-168-w		0.30	
I: HEx-20-165-w		0.23	

※1：船橋レミコン（北千葉工場）強制 2 軸ミキサ

※2：晴海小野田レミコン，強制 2 軸ミキサ

(4) 加圧ブリーディング試験結果

加圧ブリーディング試験結果一覧を表 4-14 に示す。圧送性にも問題があったケース B は、加圧ブリーディング最終脱水量が極端に少ない。図 4-14 に示す通りケース B は、土木学会のポンプ圧送指針⁹⁾に示される圧送が可能な範囲を外れる結果であった。実際においてもケース 2 では閉塞が生じたため、試験結果は妥当であるとも判断できる。

表4-14 加圧ブリーディング試験結果

検討ケース	実施時期	加圧ブリーディング最終脱水量 (ml)	備考
A: HEx-15-170-w	2017 年 2 月 (冬季)	93	※1
B: HEx-15-165-w		39	
C: PC-15-170-s	2017 年 9 月 (夏季)	74	※2
D: PC-20-170-s		71	
E: HEx-15-170-s		80	
F: PC-20-170-w	2018 年 12 月 (冬季)	93	
G: PC-20-165-w		88	
H: HEx-20-168-w		88	
I: HEx-20-165-w		85	

※1：船橋レミコン（北千葉工場）強制 2 軸ミキサ

※2：晴海小野田レミコン，強制 2 軸ミキサ

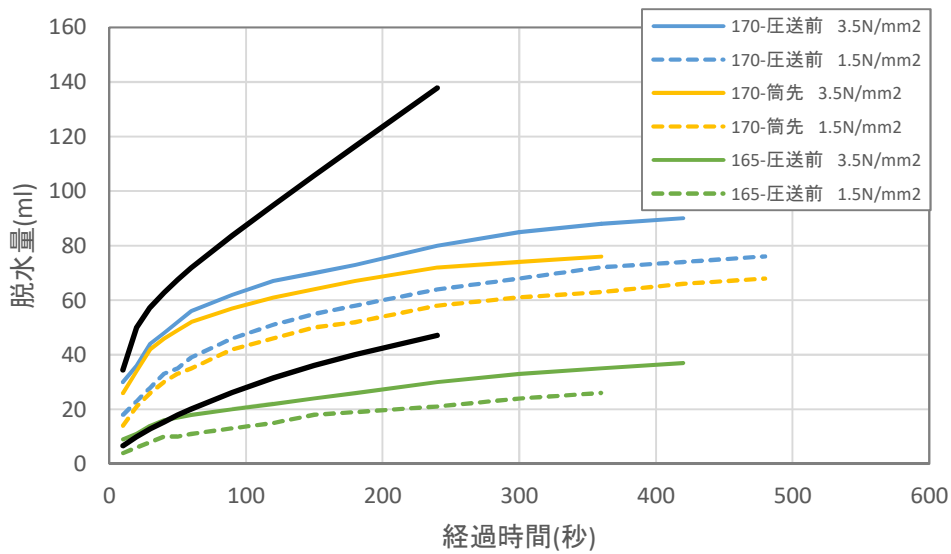


図4-13 加圧ブリーディング試験結果（ケースA, ケースB）

(5) 配管圧力測定結果

代表として、圧送性に問題があったケース B の経過時間と管内圧力の関係を図 4-14 に、圧送性に問題がなかったケース A の経過時間と管内圧力の関係を図 4-15 に示す。圧送性に問題がなかったケース A に比べ、閉塞が生じたケース B は、コンクリートが外に排出されづらいため、圧送開始直後からブームおよびテーパの管内圧力が上昇し、ポンプ車圧力は 3 分間で 7.6MPa に急上昇している。閉塞しなかったすべてのケースにおいて、このような事象は発生しなかった。

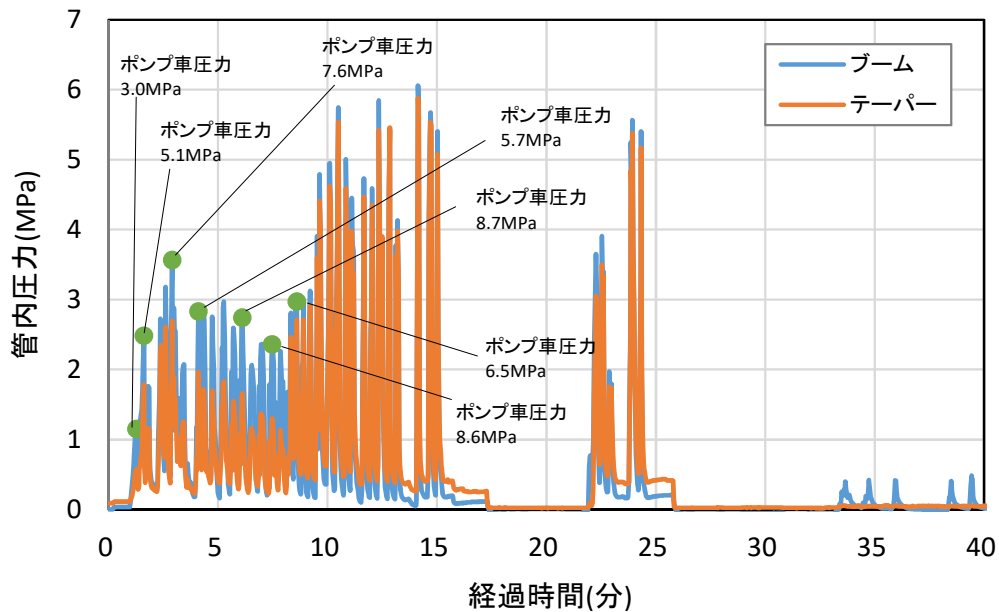


図4-14 管内閉塞をおこしたケースBの圧力図

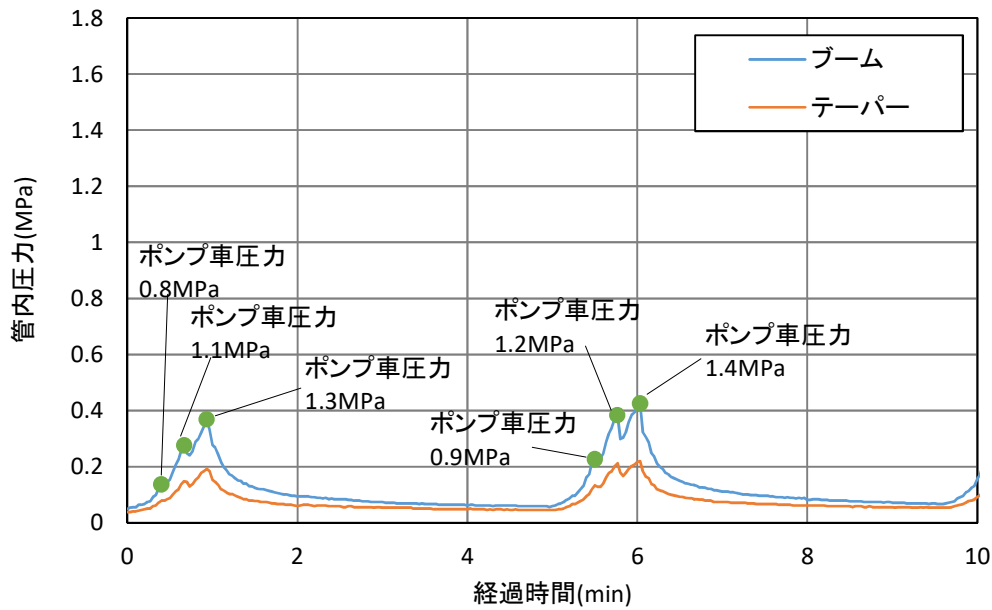


図4-15 圧送性に問題のないケースAの圧力図

(6) 圧送性指標案の提案

本研究で実施した全11ケースの加圧ブリーディング試験結果を図4-16に示す。ケース1とケース2は圧送が可能な範囲に入っているものの、実際の圧送試験では圧送不可または困難な結果となったケースである。コンクリートのポンプ施工指針に記載のある簡易的な圧送性評価手法である加圧ブリーディング試験結果では軽量コンクリートの練り具合が加味できないため軽量コンクリートの圧送性を判断することは困難であると考えた。

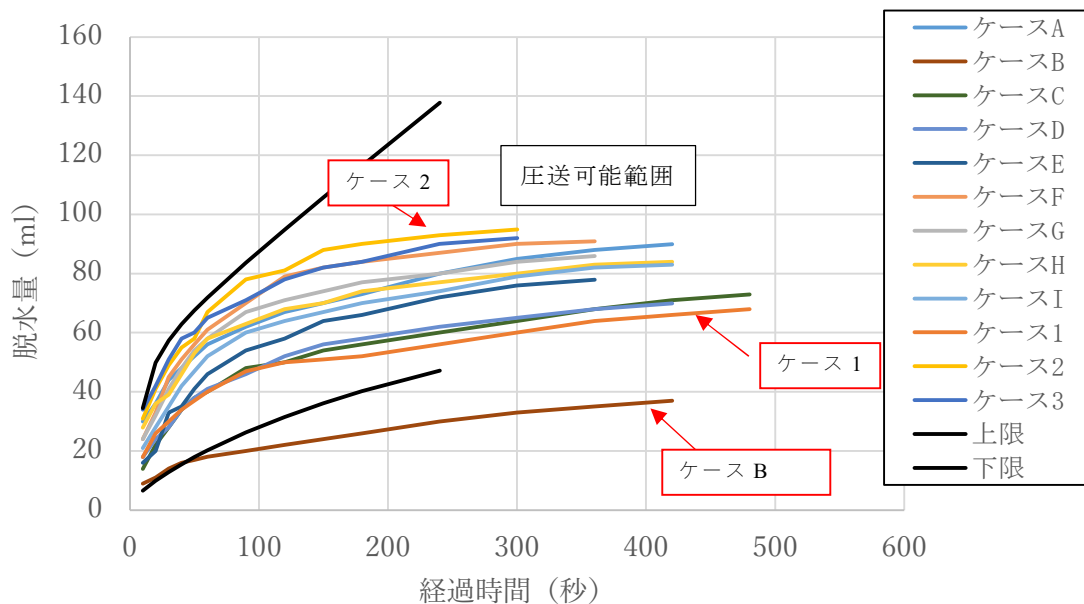


図4-16 加圧ブリーディング試験結果

そこで、加圧ブリーディング試験から得られる最終脱水率にブリーディング試験によるブリーディング率を加えた2軸で評価することにより評価する指標を考えた。なお、加圧ブリーディング試験とはコンクリート中に絞り出せる水がどの程度あるかを確認する指標であり、ブリーディング試験とはコンクリート中を自由に移動できる水がどの程度あるかを確認する指標である。今回、ブリーディング試験を軽量コンクリートに残存する粉体の凝集状態や練り混ぜ状況を確認する指標として活用することとした。

膨張材併用軽量コンクリートの加圧ブリーディング試験から得られる最終脱水率を縦軸に、ブリーディング試験によるブリーディング率を横軸とし、圧送試験の良否結果と重ね合わせた結果をプロットしたものを図4-17に示す。ケースA～ケースIの試験結果に加えて第2章で述べたケース1～ケース3の試験結果も重ね合わせた。

なお、ブリーディング率 (Br) は式4-1により算出し、最終脱水率は式4-2により算出し、算出結果を表4-15に示す。

$$Br = \frac{V \times \rho_w}{W_s} \times 100 \quad \dots \text{式4-1}$$

$$W_s = \frac{W}{C} \times S \times 1000 \quad \dots \text{式4-2}$$

$$\text{最終脱水率} = \frac{\text{最終脱水量}}{\text{試料中の水量}} \times 100(\%) \quad \dots \text{式4-3}$$

Br: ブリーディング率

V: 最終時まで累計したブリーディングによる水の容積 (cm³)

ρ_w : 試験温度における水の密度* (g/cm³)

W_s: 試料中の水量 (g)

W: コンクリートの単位水量 (kg/m³)

C: コンクリートの単位容積質量 (kg/m³)

S: 試料の質量 (kg)

試料中の水量: 1m³当りのコンクリート水量×試料の質量/1m³当りのコンクリートの質量

※水の密度は、20℃で0.9982g/cm³である。

これによると、ブリーディング率は小さく、最終脱水率が一定の脱水率(約25%)以上となれば、圧送性は良好となることが確認できた。軽量コンクリートでは、強固で不飽和な凝集体が残存することで圧送性は低下すると考えられる。凝集体の残存量が多い場合は、ブリーディング試験結果のブリーディング率は大きく、加圧ブリーディング試験結果の脱水率は小さくなると考えられる。よって、ブリーディング試験結果のブリーディング率が小さくなり、加圧ブリーディング試験結果の脱水率が大きくなる場合に、圧送性は良好になる。ただし、今回の試験結果において加圧ブリーディング試験結果の脱水率が大きくても圧送性が不良となるケースやブリーディング試験結果のブリーディング率が小さくても圧送性が不良となるケースがあったことから、加圧ブリーディング試験結果にブリーディング試験結果を追加して2軸で評価することが必要となる。この指標案を活用すれば、圧送性試験を行わなくとも、最終脱水率(加圧ブリーディング試験結果)とブリーディング率(ブリーディング試験結果)から、軽量コンクリートの圧送性は概略把握することが可能であると考えた。

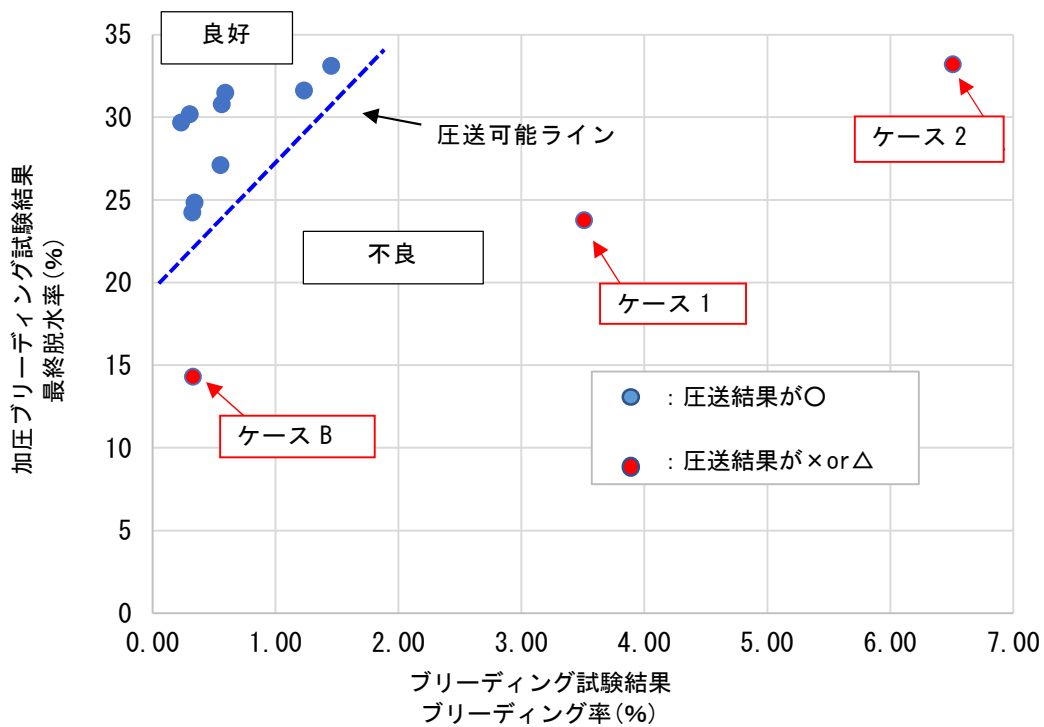


図4-17 圧送性指標案

表4-15 ブリーディング率と最終脱水率算出結果

検討ケース	ブリーディング率 (%)	最終脱水率 (%)
A: HEx-15-170-w	1.45	33.12
B: HEx-15-165-w	0.34	14.3
C: PC-15-170-s	0.34	27.13
D: PC-20-170-s	0.32	24.86
E: HEx-15-170-s	0.56	24.26
F: PC-20-170-w	0.59	31.5
G: PC-20-165-w	0.59	30.8
H: HEx-20-168-w	0.30	30.2
I: HEx-20-165-w	0.23	29.7
1: HEx-30-165	3.51	23.77
2: HEx-30-165	6.51	33.19
3: HEx-30-165	1.23	31.63

4. 3. 8 まとめ

夏季と冬季の両方でポンプ圧送試験を実施した結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 最小の単位水量 ($W=165 \text{ kg/m}^3$) からわずかに $+5 \text{ kg/m}^3$ の $W=170 \text{ kg/m}^3$ とすることによって、所要の圧送性を確保できることを確認した。これにより膨張材併用軽量コンクリートについて、単位水量の少ない土木用の配合でも確実に圧送できる施工条件を明確化することができた。
- (2) 膨張材併用軽量コンクリートの過去の圧送性試験から、加圧ブリーディング試験から得られる最終脱水率を縦軸に、ブリーディング試験から得られるブリーディング率を横軸にプロットすることで、軽量コンクリートの練り具合を加味できる圧送性指標案を提案できた。

4. 4 第4章のまとめ

膨張材併用軽量床版を横浜北線に採用することで抽出された新たに克服しなければならない課題に対して検討を行った結果を以下に示す。

まず、耐疲労性であるが、軽量 RC-20 を用いて輪荷重走行試験（階段状荷重漸増載荷：土研式）を実施し、普通 RC (RC-8) および軽量 RC-30 と相対比較することにより、軽量 RC-20 は軽量 RC-30 と同程度の耐疲労性を有しており、また、普通 RC (RC-8) と同程度の耐疲労性を有していると考えられる。よって、軽量コンクリート2種に膨張材を普通コンクリートの標準混和量 (20kg/m^3) を混和すれば普通 RC と同程度の耐疲労性を有することを確認できた。

次に、圧送性であるが、夏季と冬季の両方でポンプ圧送試験を実施した結果、横浜北線で施工した軽量コンクリートの単位水量 ($W=165\text{kg/m}^3$) からわずかに $+5\text{kg/m}^3$ の $W=170\text{kg/m}^3$ とすることで、閉塞することなく圧送できることを確認した。これにより膨張材併用軽量コンクリートについて、単位水量の少ない土木用の配合でも確実に圧送できる施工条件を明確化することができた。また、膨張材併用軽量コンクリートの過去の圧送性試験から、加圧ブリーディング試験から得られる最終脱水率を縦軸に、ブリーディング試験から得られるブリーディング率を横軸にプロットすることで、圧送性試験を行わなくとも、圧送性を評価できる指標案が提案できた。

【第4章の参考文献】

- 1) 岸田政彦, 田嶋仁志, 宮口克一, 中澤治郎: 膨張材を混和した軽量RC床版の膨張特性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 261-266, (2018)
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書 I 共通編, II 鋼橋編, (2012)
- 3) 国土技術政策総合研究所: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国総研資料第 28 号, (2002)
- 4) 国土技術政策総合研究所 他: 道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究, 国総研資料第 472 号, (2008)
- 5) 岸田政彦, 副島直史, 池末和隆, 春日井俊博: 膨張材併用軽量RC床版の輪荷重走行試験による耐疲労性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 1387-1392, (2016)
- 6) コンクリート標準示方書 施工編, 土木学会, (2012)
- 7) 杉山彰徳, 津野和宏, 磯部龍太郎, 竹下永造, 石川寛範: 膨張材添加軽量コンクリートの力学的性能, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, pp1059-1060, (2011)
- 8) 膨張コンクリート設計施工指針, コンクリートライブラリー75号, 土木学会, (1993)
- 9) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, pp. 9-60, 森北出版, (2007)

第5章 膨張材併用軽量RC床版の耐凍害性

5.1 はじめに

膨張材併用軽量RC床版に使用する軽量骨材は、圧送性という課題を克服するために、製造過程で軽量骨材内部の空隙を水分で満たした状態にするプレソーキングを実施している。そのため、膨張材併用軽量RC床版は圧送性という課題を克服した反面、コンクリート硬化後も軽量骨材内部に水分が存在するため、コンクリートが凍結融解作用を受けると、軽量骨材自体が凍結膨張し、コンクリート硬化体を内側から損傷させてしまう。そのため、寒冷地への適用に当たっては耐凍害性を克服する必要があった。これまで、軽量コンクリートの耐凍害性の研究は主に軽量コンクリート1種（粗骨材のみ軽量骨材）に対して行われており、耐凍害性の改善方法として、含水率5%以下の低含水状態の軽量骨材を使用するのがよいと考えられてきた¹⁾。また、富配合の高強度軽量コンクリート1種では、空気量や気泡間隔係数の確保は必ずしも耐凍害性を改善する方法にならないと考えられてきた²⁾。今回はこれまであまり検討されてこなかった軽量コンクリート2種（粗骨材、細骨材ともに軽量骨材）に対して行ったものであり、本技術の寒冷地への適用性を検討するために、耐凍害性の改善方法として、コンクリート中の空気量と軽量骨材の含水状態に着目した。本章では、膨張材併用軽量床版の寒冷地での適用を目指して、軽量コンクリート2種を用いた凍結融解試験結果から、耐凍害性の改善方法を見出し、その方法により耐凍害性が改善した要因について検討した結果を述べる。

5.2 試験概要

5.2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

表5-1に、使用材料の詳細を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（OPC、ブレン比表面積：3,360 cm²/g）、膨張材には現場打ち配合としてエトリンガイト・石灰複合系膨張材（PC）を、プレキャスト製品配合としてエトリンガイト系膨張材（CS）をそれぞれ用いた。また、骨材は細骨材、粗骨材ともに膨張性頁岩を焼成した人工軽量骨材を用い、プレウェッティング状態の軽量細骨材（SL）と軽量粗骨材（GL）、また、軽量骨材の骨材中の飽水度による耐凍害性への影響を確認するため、低含水状態の軽量細骨材（SL-D）と軽量粗骨材（GL-D）を使用した。なお、低含水状態の軽量粗骨材は、製造過程においてプレソーキングを省略することで含水率を1.7%に、低含水状態の軽量細骨材は製造後に軽量骨材を乾燥させることにより含水率を0%に調整した。練混ぜ水には上水道水（W）を用い、混和剤には分散性の異なる2種類のポリカルボン酸系の高性能AE減水剤（現場打ち用途：SP①、プレキャスト製品用途：SP②）と、アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤のAE剤（AE）を用いた。また、コンクリートの空気量を増加させる対策として、空気の代替となる中空微小球を用いた（MS）。図5-1に示す人工軽量骨材の密度は絶対密度で表記しており、試験に使用した際の含水率は軽量細骨材で20.5%、軽量粗骨材で30.5%である。

表 5-1 使用材料と物理的特性

略記	種類	使用材料	密度 (g/cm ³)
W	水	上水道水	1.00
C	セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
PC	膨張材	エトリンガイト・石灰複合系	3.10
CS		エトリンガイト系	2.95
SL	細骨材	人工軽量細骨材 (プレウエッティング品)	1.62
SL-D		人工軽量細骨材 (低含水产品)	1.62
GL	粗骨材	人工軽量粗骨材 (プレウエッティング品)	1.30
GL-D		人工軽量粗骨材 (低含水产品)	1.30
MS	混和剤	中空微小球	0.13
SP①		高性能 AE 減水剤	—
SP②		高性能 AE 減水剤	—
AE		AE 助剤	—

(2) コンクリート配合

表5-2に、コンクリート配合を示す。表中W/Bは水結合材比、s/aは細骨材比である。本技術は、現行の道路橋示方書で設計された普通RC床版と同等の耐疲労性を有する床版（現場打ち配合）と現行の道路橋示方書で設計された普通RC床版より優れた耐疲労性を有する床版（プレキャスト製品配合）の2種類の開発を行ったことから、本検討にはW/Bの異なる2種類の配合を用いた。現場打ち配合は、W/Bを37%とし、単位水量は圧送性を確保するために170 kg/m³とした（配合No.1～6）。セメントペースト側の耐凍害性を改善させることを目的として、空気量を通常よりも多い6.0±1.5%に調整した配合を加えた。なお、空気量を増加させる方法として、AE助剤による方法以外に空気の代替となる中空微小球を用いる方法に対しても行った。中空微小球は、空気量を6.0%相当とするために空気量1.5vol.%相当分（1.95kg/m³）を混和した。膨張材を用いた配合では、エトリンガイト・石灰複合系膨張材を標準混和量程度（20kg/m³）混和した。これは、膨張材混和に伴う耐凍害性への影響について確認するために行った。プレキャスト製品配合は、W/Bを25.8%とした（配合No.7～10）。膨張材を用いた配合では、開発中のプレキャスト製品に倣いエトリンガイト系膨張材を標準混和量の1.5倍（45kg/m³）混和した。プレキャスト製品配合も、現場打ち配合と同様に膨張材混和に伴う耐凍害性への影響について確認するために行った。いずれのケースにおいても、軽量骨材の含水状態に着目し、プレウェットング状態の軽量骨材と、低含水状態の軽量骨材の2種類を用いた。コンクリートの練混ぜには、公称容量55Lの強制2軸ミキサを用いた。

表5-2 軽量コンクリートの配合

No.	ケース	W/B (%)	s/a (%)	空気量 (%)	(kg/m ³)								
					W	OPC	PC	CS	SL	SL-D	GL	GL-D	MS
1	L	37	48.5	4.5±1.5	170	459	—	—	503	—	428	—	—
2	L-Air 6.0	37	48.5	6.0±1.5	170	459	—	—	503	—	428	—	—
3	L-MS 1.5	37	48.5	4.5±1.5	170	459	—	—	503	—	428	—	1.95
4	L-GD	37	48.5	4.5±1.5	170	459	—	—	503	—	—	428	—
5	L-GD+Ex	37	48.5	4.5±1.5	170	439	20	—	503	—	—	428	—
6	L-GD+SD	37	48.5	4.5±1.5	170	459	—	—	—	503	—	428	—
7	L2	25.8	48.5	4.5±1.5	155	600	—	—	480	—	409	—	—
8	L2-MS 1.5	25.8	48.5	4.5±1.5	155	600	—	—	480	—	409	—	1.95
9	L2-GD	25.8	48.5	4.5±1.5	155	600	—	—	480	—	—	409	—
10	L2-GD+Ex	25.8	48.5	4.5±1.5	155	555	—	45	480	—	—	409	—

(3) 養生方法

現場打ち配合は、材齢14日まで20℃で型枠存置し、上面は湿布等で乾燥を防ぐように養生した。材齢14日で脱型後、材齢28日まで20℃・60%R.H.で気乾養生した。プレキャスト製品配合は、図5-1に示す養生パターンにて蒸気養生を施した後、現場打ち配合と同様に、材齢14日まで20℃で型枠存置し、上面は湿布等で乾燥を防ぐように養生した。材齢14日で脱型後、材齢28日まで20℃・60%R.H.で気乾養生した。

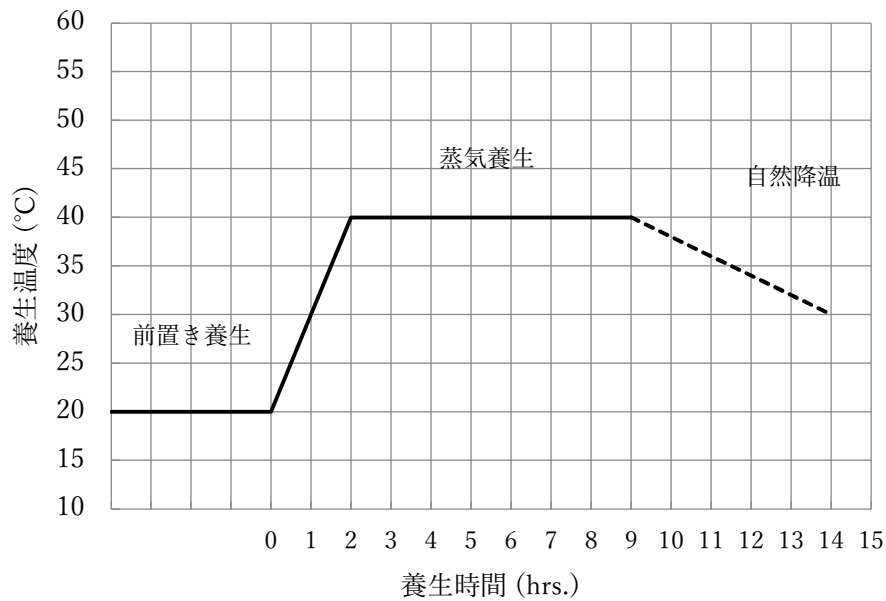


図 5-1 蒸気養生パターン

5. 2. 2 試験方法

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の目標値は、現場打ち配合は、スランプ：18.0±2.5cm，空気量：4.5±1.5%（L-Air 6.0 配合のみ，空気量：6.0±1.5%），プレキャスト製品配合は，スランプ：21.0cm 以上，空気量：4.5±1.5%とした。なお，空気量の測定は，単位容積質量試験方法（JIS A 1116）で実施した。また，コンクリートの練り上がり温度は，JIS A 1156 に準じて測定した。

(2) 圧縮強度

JIS A 1108 に準拠し，φ100×200 mm のコンクリートを用いた。現場打ち配合は材齢 28 日で，プレキャスト製品配合は蒸気養生後，材齢 1 日および 28 日で，圧縮強度を測定した。圧縮強度の目標強度は，40N/mm²以上とした。

(3) 静弾性係数

JIS A 1149 に準拠し，φ100×200 mm のコンクリートを用いた。圧縮強度試験と同様に，現場打ち配合は材齢 28 日で，プレキャスト製品配合は蒸気養生後，材齢 1 日および 28 日で圧縮強度を測定した。

(4) 凍結融解試験

JIS A 1148 A 法 水中凍結融解試験法に準拠し，100×100×400 mm のコンクリートを用いた。凍結融解の 1 サイクルは，コンクリートの中心温度が-18～5℃となるようにし，試験の終了時期は，JIS A 1148 に準じて 300 サイクル終了まで，もしくは，相対動弾性係数が 60%以下になった時のサイクルとした。

(5) 気泡間隔係数

ASTM C457 に準拠し，φ100×200 mm のコンクリートを用いた。現場打ち配合は材齢 28 日で，プレキャスト製品配合は蒸気養生後，材齢 28 日で気泡間隔係数を測定した。

5. 3 試験結果および考察

5. 3. 1 フレッシュ性状

表 5-3 に各コンクリートのフレッシュ性状を示す。スランプと空気量は、いずれの配合も、設定した目標値を満足する結果となった。

表 5-3 コンクリートのフレッシュ性状

No.	ケース	SP① (B×%)	SP② (B×%)	AE (B×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
1	L	0.35	—	0.90	16.0	4.6	20.8
2	L-Air 6.0	0.30	—	0.10	16.0	5.3	21.5
3	L-MS 1.5	0.35	—	0.01	16.0	4.5	21.9
4	L-GD	0.46	—	0.10	19.0	4.9	21.6
5	L-GD+Ex	0.50	—	0.01	16.5	4.6	22.0
6	L-GD+SD	1.20	—	0.15	15.5	4.4	23.0
7	L2	—	1.08	1.00	21.0	4.2	23.0
8	L2-MS 1.5	—	1.60	1.00	70×75*	4.7	23.0
9	L2-GD	—	2.35	1.20	28.0	4.5	23.4
10	L2-GD+Ex	—	2.40	1.00	67×69*	4.9	23.3

5. 3. 2 圧縮強度

図 5-2 に現場打ち配合、図 5-3 にプレキャスト製品配合の圧縮強度試験結果をそれぞれ示す。現場打ち配合に着目すると、材齢 28 日の圧縮強度は 49~53 N/mm² 程度であった。空気の代替となる中空微小球を 1.5vol.%相当分混和した場合や軽量骨材の含水状態に関わらず、いずれの配合も圧縮強度は同等程度であった。次に、プレキャスト製品配合について見ると、圧縮強度は、材齢 1 日で 41~48 N/mm² 程度、材齢 28 日で 48~58 N/mm² 程度であった。いずれの配合も、目標強度の 40N/mm² を上回る結果となった。ただし、現場打ち配合とは異なりプレキャスト製品配合では中空微小球を混和した配合の圧縮強度が大きくなる結果となった。

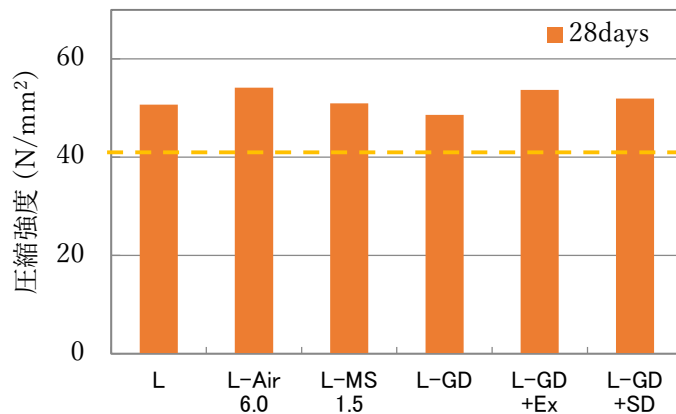


図 5-2 現場打ち配合の圧縮強度

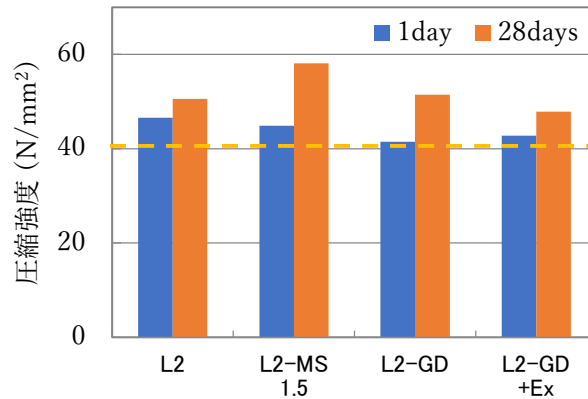


図 5-3 プレキャスト製品配合の圧縮強度

5. 3. 3 静弾性係数

図 5-4 に現場打ち配合、図 5-5 にプレキャスト製品配合の静弾性係数試験結果をそれぞれ示す。現場打ち配合に着目すると、材齢 28 日の静弾性係数は 15~19 kN/mm² 程度であった。いずれの配合においても静弾性係数は同等程度であった。中空微小球や軽量骨材の含水状態による静弾性係数への影響は小さいと考えられる。また、プレキャスト製品配合について見ると、静弾性係数は材齢 1 日で 15~18 kN/mm² 程度、材齢 28 日で 15~21 kN/mm² 程度で推移していた。圧縮強度と同様に、プレキャスト製品配合では中空微小球を混和した配合の静弾性係数が大きくなる結果となった。

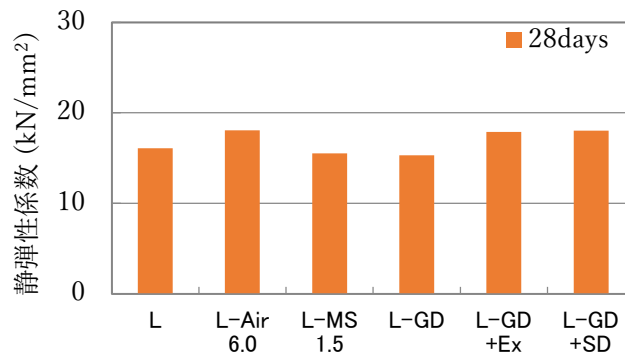


図 5-4 現場打ち配合の静弾性係数

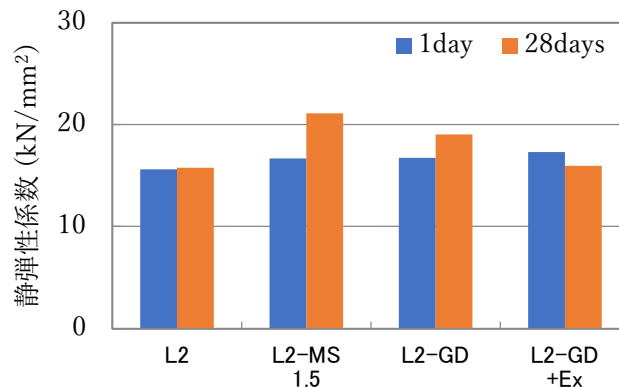


図 5-5 プレキャスト製品配合の静弾性係数

5. 3. 4 凍結融解試験

(1) 相対動弾性係数

図5-6に現場打ち配合、図5-7にプレキャスト製品配合における凍結融解試験の相対動弾性係数測定結果を示す。まずは、現場打ち配合について述べる。現場打ち配合のベースとなるL配合では、60サイクル経過時点で相対動弾性係数が60%を下回る結果となった。軽量コンクリートの耐凍害性が劣ることは、既往の知見と一致する²⁾。コンクリートの空気量を増加させる方法に着目すると、空気量が通常よりも多い6.0%相当とした配合(L-Air6.0, L-MS1.5)は、AE助剤や中空微小球といった空気量の調整方法に関わらず、ベースのL配合と比較して改善効果は小さい結果となった。次に、軽量骨材の骨材中の飽水度を下げる方法に着目すると、軽量粗骨材のみ低含水状態の軽量骨材を用いた配合(L-GD, L-GD+Ex)では、ベースのL配合に比べて、耐凍害性がわずかに改善される程度に留まった。これに対して、軽量粗骨材と軽量細骨材ともに低含水状態の軽量骨材を用いた配合(L-GD+SD)では、300サイクル終了時点においても相対動弾性係数の低下が認められず、耐凍害性の著しい改善が認められた。これは、低含水状態の軽量粗骨材に加えて、軽量細骨材も低含水状態にすることで軽量骨材が保有する水分を排除した影響と推察される。現場打ち配合の耐凍害性を改善させる方法としては、コンクリートの空気量を増やすよりも、軽量骨材の骨材中の飽水度を下げることが支配的であることが確認された。

次に、プレキャスト製品配合について述べる。プレキャスト製品配合のベースとなるL2配合は、90サイクル経過時点で相対動弾性係数が60%を下回る結果となった。コンクリートの空気量を増加させる方法として中空微小球を混和した配合(L2-MS1.5)に着目すると、耐凍害性の改善は認められるが、150サイクル経過時点には相対動弾性係数が60%を下回り、その改善効果は小さい結果となった。これに対し、低含水状態の軽量粗骨材を使用した配合(L2-GD, L2-GD+Ex)は、300サイクル終了時点においても相対動弾性係数が60%以上を保持しており、耐凍害性の改善が認められた。プレキャスト製品配合の耐凍害性を改善させる方法としても、コンクリートの空気量を増やすよりも、軽量骨材の骨材中の飽水度を下げることが支配的であることが確認された。

一般にセメントの完全水和に必要な水量はセメント質量に対して約40%であり、25%程度がセメントと化学的に結合し、残り15%がゲル水として吸着されると言われている³⁾。よって、コンクリートのW/Bが約40%以下であれば、水和しないセメントが残存する可能性が高いと考えられる。今回の配合は全てW/Bが40%以下であることから、コンクリート中の水量は不足していると言える。ただし、今回は軽量骨材を使用していることから、練混ぜ水の不足部分を骨材から吸い出した水分で補うことが可能である⁶⁾。ここで、5配合の水量について表5-4に示す。細骨材が保有する水分は骨材の絶乾重量に対し含水量で15.5%、低含水量品で0%、粗骨材が保有する水は骨材の絶乾重量に対して含水量で29.5%、低含水量品で1.7%を用いて算出した。また、コンクリートが必要としている水分は、セメントの完全水和に必要な水量としてセメント質量に対して40%を用いて算出した。本試験の開始時は材齢28日であり、ある程度の水和反応が終了していると考えられることから軽量骨材中の水分も必要量はセメントペースト側に供給されていると考えられる。耐凍害性が良好であったNo.6はセメントの水和に必要な水分を、練混ぜ水でほぼ補えるため、軽量粗骨材と軽量細骨材を低含水状態にすれば、軽量骨材中に水分が残存しないことから、耐凍害性が改善したと考えられる。また、耐凍害性が良好であったNo.9はセメントの水和に必要な水分を練混ぜ水で補うことができないため、軽量粗骨材のみを低含水状態にすれば、粒径の小さい軽量細骨材からセメントペースト部に水分が供給され、軽量細骨材の含水率が低下することから、耐凍害性が改善したと考えられる。なお、本試験では実施していないが、低水結合材比の軽量コンクリート2種の場合、軽量粗骨材と軽量細骨材の両方を低含水状態にすれば、軽量骨材中に水分が残存しないことから、耐凍害性は改善できると推察される。膨張材を混和した配合(L-GD+Ex, L2-GD+Ex)においては、膨張材を混和しない配合(L-GD, L2-GD)といずれも明確な差がなかったことから、膨張材混和の有無による耐凍害性への影響は小さいと考えられる。

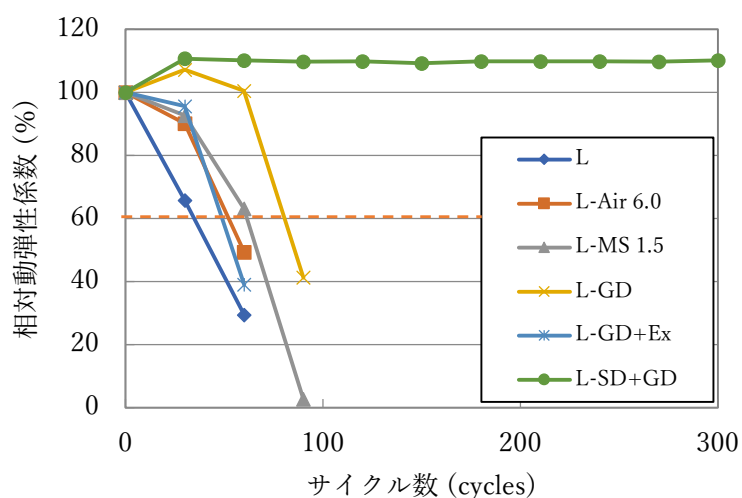


図 5-6 現場打ち配合の相対動弾性係数の推移

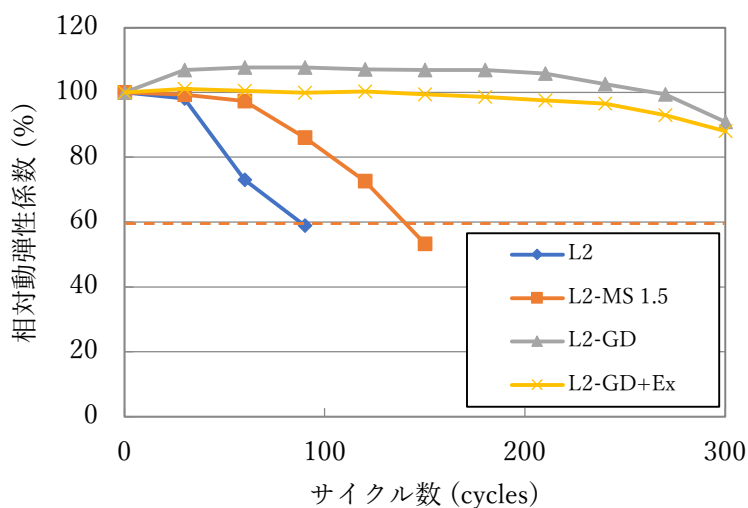


図 5-7 プレキャスト製品配合の相対動弾性係数の推移

表 5-4 軽量コンクリートが保有する水分量

No.	ケース	W/B (%)	(kg)				凍結融解試験結果
			水	完全水和に必要な水	SL 中の水	GL 中の水	
1	L	37	170	184	78	126	NG
4	L-GD	37	170	184	78	7	NG
6	L-GD+SD	37	170	184	0	7	OK
7	L2	25.8	155	240	74	120	NG
9	L2-GD	25.8	155	240	74	7	OK

(2) 質量減少率

図 5-8 に現場打ち配合, 図 5-9 にプレキャスト製品配合における凍結融解試験の質量減少率測定結果を示す. いずれの配合においても, サイクル数の増加に伴い, 質量減少率がマイナスに転じる(質量増加)傾向を示した. これは, 軽量コンクリートの吸水と凍結融解作用によって生じる微細ひび割れへの吸水による影響であり, 凍結融解作用によるスケーリングの質量減少分よりも, 吸水による質量増加分が上回った結果と推察される. プレキャスト製品配合と現場打ち配合, いずれの場合においても, 低含水状態の軽量骨材を使用した配合はベースの配合(L, L2)に比べて, 質量増加傾向が緩やかとなった. これは, 低含水状態の軽量骨材を用いることで, 凍結融解作用に伴うコンクリート表面および内部に発生したひび割れへの吸水を抑制した影響と推察される.

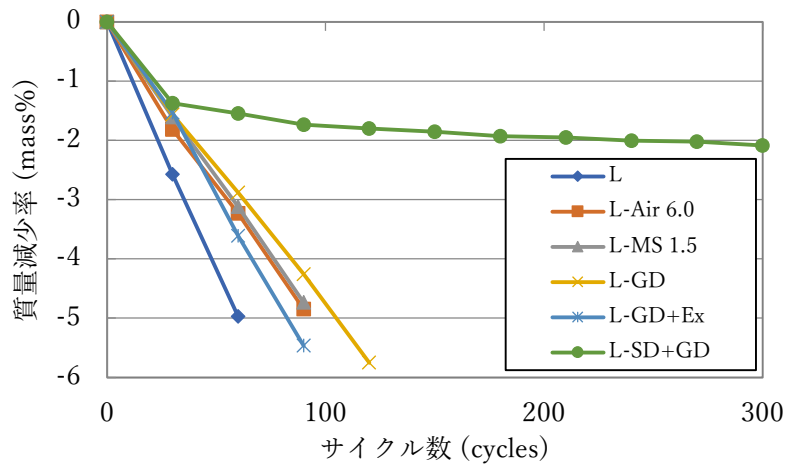


図 5-8 現場打ち配合の質量減少率

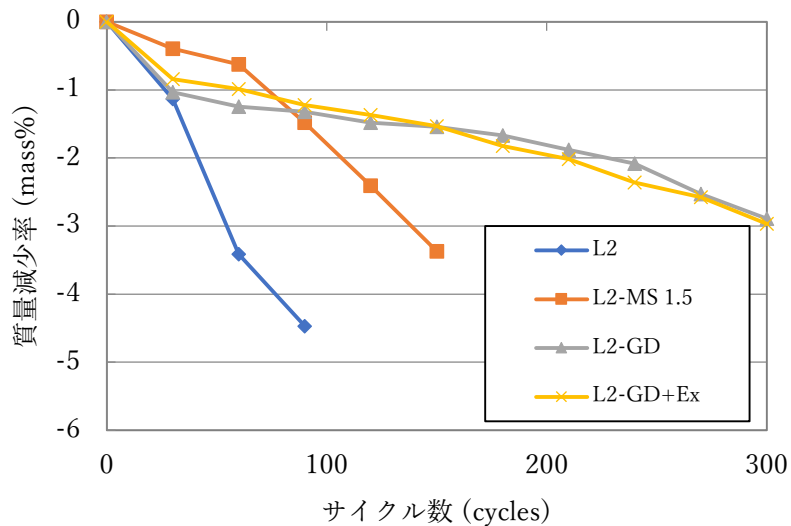


図 5-9 プレキャスト製品配合の質量減少率

5. 3. 5 気泡間隔係数試験

図 5-10 に気泡間隔係数を示す。軽量コンクリートの気泡間隔係数は、いずれの配合も 400～600 μm 程度となった。一般に、気泡間隔を 250 μm 以下とすることが耐凍害性の改善に有効とされている⁹⁾が、本試験において、空気量を増やす配合を数種類試みたが耐凍害性を改善させることはできなかった。ただし、耐凍害性が改善した配合 (L-GD+SD, L2-GD, L2-GD+Ex) の気泡間隔係数は、それ以外の配合と同等以上であるにも関わらず、耐凍害性が改善していることから、軽量コンクリートにおいては気泡間隔係数と耐凍害性の関係性は普通コンクリートと比較して小さいことを確認した。なお、空気量を増加させる方法により気泡間隔は短くなっているが、リニアトラバース法の測定精度により気泡間隔係数が改善できなかったのではないかと考えられる

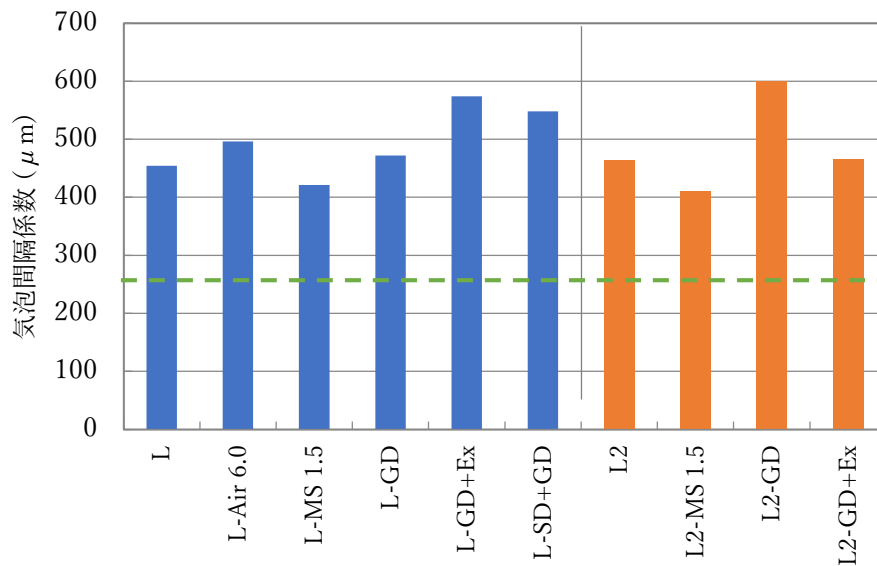


図 5-10 気泡間隔係数結果

5. 4 軽量コンクリート2種の耐凍害性

耐久性指数と軽量骨材含水係数の関係性として、図 5-11 に現場打ち配合を、図 5-12 にプレキャスト製品配合をそれぞれ示す。軽量骨材含水係数は、軽量コンクリート2種の耐凍害性に関する既往の研究⁹⁾を参考に作成した式 [1] を用いて算出し、耐久性指数は式 [2]⁷⁾を用いて算出した。

$$\Omega = (1 - s/a) \times \left(\frac{M_{GL}}{W_{GL}} \right) + s/a \times \left(\frac{M_{SL}}{W_{SL}} \right) \quad [1]$$

ここに Ω : 軽量骨材含水係数 :

s/a : 細骨材率 :

M_{GL} : 軽量粗骨材含水率 :

M_{SL} : 軽量細骨材含水率 :

W_{GL} : 軽量粗骨材吸水率 :

W_{SL} : 軽量細骨材吸水率 :

$$D.F = \frac{(P \times N)}{M} \times 100 \quad [2]$$

ここに D.F : 耐久性指数 (%)

P : 凍結融解 N サイクルにおける
相対動弾性係数 (%)

N : P が特定の値 (60%) となるまでの
サイクル数あるいは試験を終了する
サイクル数 (回)

M : 試験を終わらせる特定のサイクル数
(300 回)

それぞれのグラフを見ると軽量骨材含水係数が小さいほど、耐久性指数が向上する傾向が確認された。No. 1 (L), No. 2 (L-Air 6.0) と No. 3 (L-MS 1.5) および No. 7 (L2) と No. 8 (L2-MS 1.5) の違いは空気量の対策の有無である。空気量を増やす方法では耐久性指数の差は 5~10%しか改善されておらず、軽量コンクリート 2 種の場合、空気量による方法によりセメントペースト側の耐凍害性を改善したとしても、軽量コンクリート 2 種の耐凍害性の改善は確認できなかった。

次に、No.1 (L), No.4 (L-GD) と No.6 (L-GD+SD) および No.7 (L2) と No.9 (L2-GD) は軽量骨材の含水状態の差である。No. 1 (L) と No. 4 (L-GD) の差は 10%ほどの改善にとどまったものの、No.1 (L) と No.6 (L-GD+SD) の差は 104%の改善があり、W/B が 37%とやや小さい水結合材比の場合には軽量粗骨材と軽量細骨材ともに低含水状態の骨材とし、耐凍害性を低下させる要因である軽量骨材内部の水分を排除する必要があることで、耐凍害性は改善することを確認した。一方、No. 7 (L2) と No. 9 (L2-GD) の差は 70%の改善があった。プレキャスト製品配合の場合、軽量細骨材が含水晶であるため、耐凍害性を低下させる要因は残っているが、W/B が 25.8%と極端に小さく、セメントペーストの水和に必要な水分が不足していたために、軽量細骨材中の水分を相当量セメントペーストに供給することで水和が行われ、軽量細骨材の含水率は低含水に近い状態となったことと、内部養生効果により緻密なセメント硬化体が形成されたことから耐凍害性が確保されたと考えられる。以上の結果から、軽量コンクリート 2 種の場合には、軽量骨材中の飽水度が耐凍害性の支配的要因であることを確認した。

本研究では、適用場所を想定していないため基本的に JIS の試験方法を参考にした。軽量骨材は骨材中の水分による内部養生効果⁴⁾や暴露されると軽量骨材中の水分が放出することが知られている。このため、施工が秋冬でなくて、一定期間の乾燥を経験した上で、表層しか凍結融解しないような現実に近い環境条件であれば、今回の試験結果とは異なる試験結果となるため、寒冷地への適用にあたっては環境条件も踏まえた検討が必要と考えている。

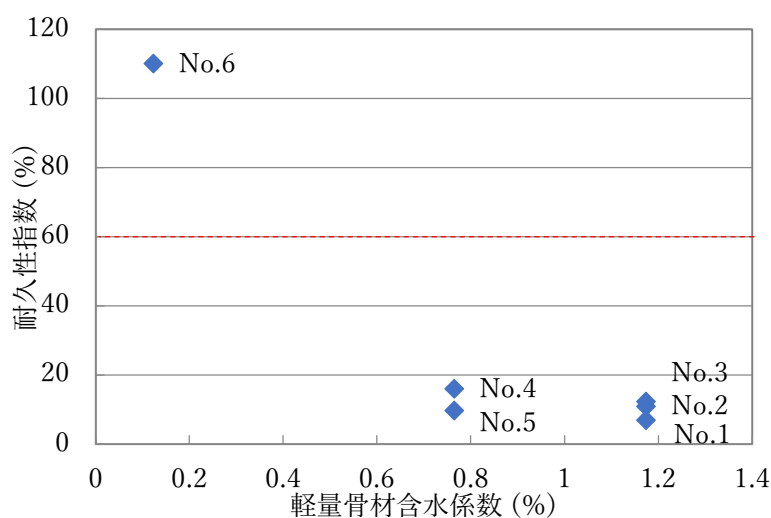


図 5-11 現場打ち配合の耐久性指数と軽量骨材含水係数との関係

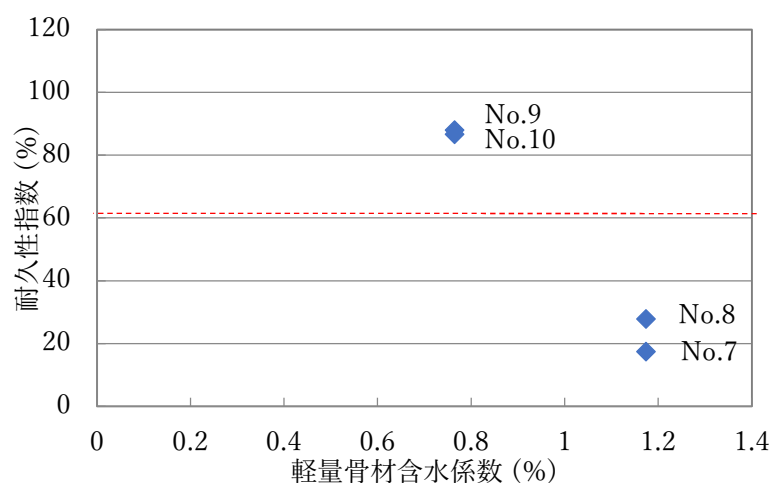


図 5-12 プレキャスト製品配合の耐久性指数と軽量骨材含水係数との関係

5. 5 第 5 章のまとめ

軽量コンクリート 2 種を用いた道路橋床版の耐凍害性について 2 種類の配合を用いて凍結融解試験を実施した結果、以下の結論を得た。

- 1) 軽量コンクリート 2 種の耐凍害性は、セメントペースト部における損傷の影響よりも、軽量骨材中に存在する水の凍結による損傷の影響の方がはるかに大きく先行して進行すると考えられる。
- 2) W/B が 37% では、軽量細骨材と軽量粗骨材の両方を低含水状態とし、軽量骨材内部の水分を排除することで耐凍害性を確保できることを確認した。
- 3) W/B が 25.8% のように低水結合材比の場合には、軽量粗骨材のみを低含水品とすれば、軽量細骨材は含水品であっても耐凍害性は確保できることを確認した。
- 4) 軽量細骨材は粒形が小さいため、比較的容易に水分が排出することに加えて、低水結合材比の場合、水和に必要な水分が不足している。このため、軽量細骨材中の水分が自己乾燥状態にあるペースト部に供給されることで、軽量細骨材の含水率が低下し、耐凍害性が改善されたと推察される。なお、今回の効果は、内部養生効果と表裏一体の関係にある効果であることに留意する必要がある。

【第5章の参考文献】

- 1) 橋大介, 今井實: 高強度軽量コンクリートの耐凍害性改善方法について, 土木学会論文集, No. 496/V-24, pp. 51-60, (1994)
- 2) 笠井芳夫: 軽量コンクリート, 技術書院, (2002)
- 3) コンクリート技術の要点 '16, 公益社団法人 日本コンクリート工学会, pp. 10-11, (2016)
- 4) コンクリートの耐久性 第二版, 一般社団法人 セメント協会, pp. 181-184, (2003)
- 5) 石清水隆, 嵩英雄, 吉岡保彦, 今井豊和: 高強度人工軽量コンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 7, No. 1, pp. 69-72, (1985)
- 6) 橋大介, 今井実, 岡田武二: 乾燥が高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 7, No. 1, pp. 73-76, (1985)
- 7) 五十嵐心一, 川村満紀, 神崎暁史: 軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 399-404, (2002)

第6章 今回開発した膨張材併用軽量 RC 床版の要点

6.1 はじめに

軽量骨材と最適量の膨張材を併用することで普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有する膨張材併用軽量 RC 床版を構築できることを確認した。最適量の膨張材を混和することで軽量 RC 床版内部にどのような力学環境が作り出され、普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有する床版を構築できたのかを膨張材を混和しない軽量 RC 床版および膨張材を標準混和量の 1.5 倍混和した軽量 RC 床版と比較することで検証を行った。また、最適量の膨張材を混和した膨張材併用軽量 RC 床版を用いて階段状荷重漸増載荷で破壊に至った荷重より低い荷重レベルで階段載荷から一定載荷に切り替えた場合に、耐疲労性がどのような影響を受けるかについて検証した。次に、今回開発した膨張材併用軽量 RC 床版を適用した道路橋の試設計を行うことで、他の床版構造と比べてどの程度の優位性を有するのかも検証を行った。最後に、今回開発した膨張材併用軽量床版の要点について整理した。

6.2 膨張材を混和しない軽量 RC 床版の耐疲労性

6.2.1 概要

軽量コンクリート 2 種に膨張材を 20kg 混和した供試体と 30kg 混和した供試体を用いて輪荷重走行試験を実施した結果、破壊に至る走行回数に明確に差が生じなかったことから軽量床版の耐疲労性を左右する要因として押抜きせん断耐力によるのではないかと考えた。本節では、軽量コンクリート 2 種の設計基準強度を $40\text{N}/\text{mm}^2$ に合わせて作製した実物大供試体（以下、軽量 RC-0）を用いて道路橋示方書¹⁾で耐疲労性の確認手法として提案されている土木研究所が所有する輪荷重走行試験機を用いた階段状荷重漸増載荷^{2),3)}を実施し、同試験方法で検証された 100 年以上の耐疲労性がある普通 RC 床版²⁾（以下、普通 RC）および第 2 章で示した 20 型膨張材を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 混和した軽量 RC 床版（以下、軽量 RC-30）、第 4 章で示した 20 型膨張材を $20\text{kg}/\text{m}^3$ 混和した軽量 RC 床版（以下、軽量 RC-20）と相対比較することで耐疲労性について検討を行った。

6.2.2 供試体および試験方法

(1) 供試体

供試体は $2,800\text{mm} \times 4,500\text{mm} \times 250\text{mm}$ の複鉄筋 RC 床版であり、その形状および寸法を図 6-1 に示す。供試体の外形寸法は、表 6-1 および表 6-2 に示す過去の軽量 RC 床版の実験で用いた供試体⁴⁾（供試体名：軽量 RC-30, 軽量 RC-20）および平成 8 年の道路橋示方書¹⁾に準拠した既往の研究の普通 RC の供試体²⁾（供試体名：RC8n-1, RC8n-2, RC8n-3）と同一とした。主鉄筋は D19 を上段 300mm 間隔、下段 150mm 間隔とした。配力鉄筋は D16 を上段 300mm 間隔、下段 150mm 間隔とした。

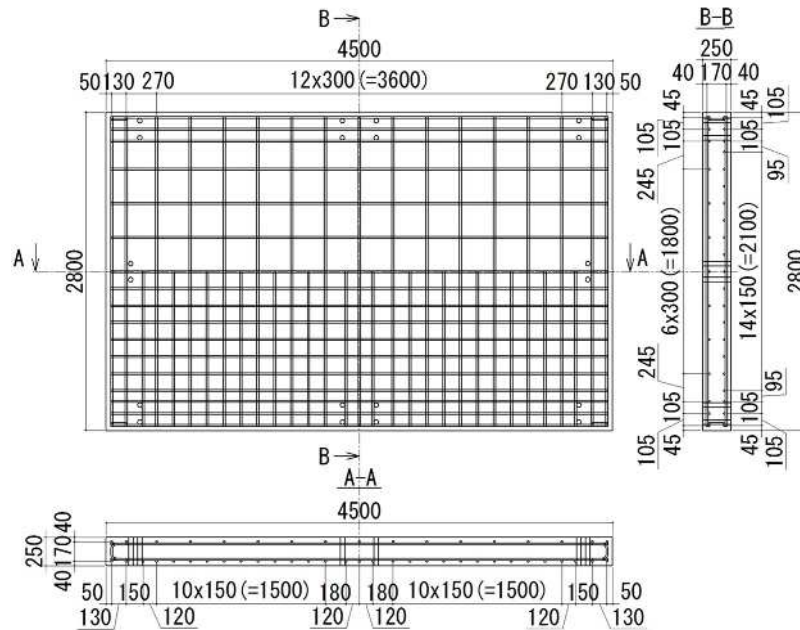


図 6-1 供試体概要図

表 6-1 供試体諸元

供試体名	外形寸法 (mm)	主鉄筋		配力鉄筋	
		径	間隔 (mm)	径	間隔 (mm)
軽量RC-0	2800 × 4500 × 250	D19	150 (300)	D16	150 (300)
軽量RC-20					
軽量RC-30					
RC8n-1				D16	125 (250)
RC8n-2					
RC8n-3					

()内は圧縮側鉄筋の値

表 6-2 既往の実験結果^{5),7)}

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	破壊時荷重 (kN)	破壊時走行回数 (回)
軽量RC-20	58.1	20.0	372	440, 800
軽量RC-30	49.1	17.7	353	424, 190
RC8n-1	33.1	27.9	392	489, 555
RC8n-2	38.4	25.7	334	394, 122
RC8n-3	37.4	26.5	392	520, 000*未破壊

(2) 使用材料

試験に用いた軽量コンクリートの配合を表 6-3 に示す。普通ポルトランドセメント (密度 : 3.16g/cm³) を用いて、粗骨材 (絶乾密度 : 1.29g/cm³, 最大寸法 : 15mm, 吸水率 : 28.0%), 細骨材 (絶乾密度 : 1.65g/cm³, 吸水率 : 15.0%) とともに人工軽量骨材の軽量コンクリート 2 種とした。いずれも水セメント比は 37%とした。なお、配合上の単位容積質量は、1,774kg/m³である。設計基準強度は 40N/mm²で、せん断強度が設計基準強度 27N/mm²の普通コンクリートと同等となるようにした。コンクリートは実機ミキサで練り混ぜを行った。スランプはコンクリート標準示方書⁵⁾を参考にポンプ圧送性が良好とされる 18cm とし、空気量は現場条件が耐凍害性を考慮する必要がない場所であるため、普通コンクリートと同等の 4.5%とした。軽量 RC-0 のフレッシュコンクリートの性状は、スランプ 19.0cm, 空気量 4.0%, コンクリート温度 22℃, 材齢 28 日の単位体積質量は 1,830kg/m³であ

った。凝結試験で終結を確認した後から湿潤養生とし、材齢 28 日の物性試験結果を確認後、材齢 29 日に脱型し、その後は気中養生とした。輪荷重走行試験の開始は、試験機の都合上材齢 78 日とした。

表 6-3 軽量コンクリートの配合

供試体名	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AD ^{*2} (P×%)	AE ^{*3} (P×%)
		W	C	Ex ^{*1}	SL	GL		
軽量RC-0	48.6	170	459	-	513	424	1.1	0.001
軽量RC-20	48.6	170	439	20	513	424	1.1	0.001
軽量RC-30	45.0	165	415	30	555	603	0.6	0.001

*1:低添加型膨張材 *2:AE減水剤標準型 (I 種) *3:AE剤 (I 種)

(3) 試験方法

輪荷重走行試験の実施は、IHI インフラシステムが所有する試験機を用いて行った。写真 6-1 に輪荷重走行試験機を示す。供試体の支持条件は、長辺方向の 2 辺を単純支持 (支持支間 2,500mm) とし、短辺方向の 2 辺は弾性支持とした。輪荷重走行の範囲は幅 500mm で橋軸方向の移動距離 3,000mm とした。載荷荷重は、文献 2) の方法と同様の図 6-2 に示す階段状荷重漸増載荷とした。輪荷重走行による床版の劣化状況の把握は、たわみ、ひずみの計測値とひび割れ観察で行った。試験の終了条件は、床版が損傷して総たわみが急増する挙動を示した時期とした (総たわみの制限値 10mm)。



写真 6-1 輪荷重走行試験機 (IHI インフラシステム)

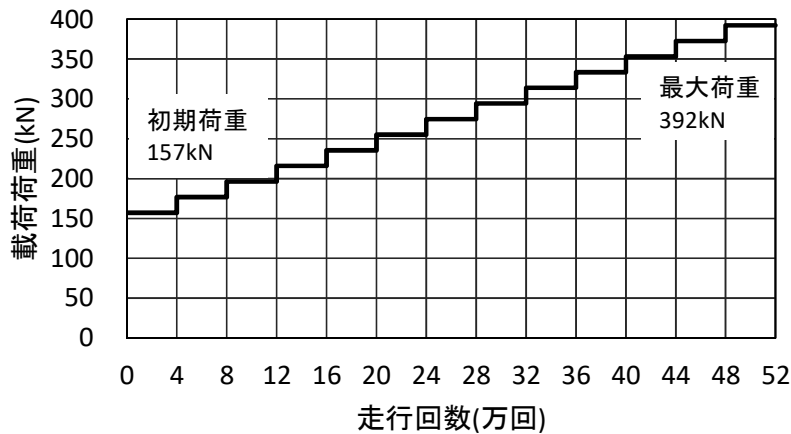


図 6-2 階段状荷重漸増載荷

6. 2. 3 試験結果および考察

(1) 物性試験結果

硬化コンクリートの物性値を表 6-4 に示す。材齢 28 日の圧縮強度は 56.9N/mm²であり，設計基準強度 40N/mm²を上回った。

表 6-4 硬化コンクリートの物性値

供試体名	材齢 (日)	圧縮 強度 (N/mm ²)	静弾性 係数 (kN/mm ²)	割裂引張 強度 (N/mm ²)	せん断 強度 (N/mm ²)	見掛け 密度 ^{*1} (kg/m ³)
軽量RC-0	78	56.9	18.1	3.2	6.7	1830
軽量RC-20	78	58.1	20.0	3.6	7.1	1830
軽量RC-30	173	49.1	17.7	3.3	5.6	1813

*1: 材齢28日の値を記載

なお，せん断試験は JCI-SF6 に準拠して実施した。また，式 6-1 を用いて算出⁶⁾した橋軸直角方向のケミカルプレストレス σ_{cp} の推移を図 6-3 に示す。膨張材を混和していないためケミカルプレストレス量はほぼ 0N/mm²である。

$$\sigma_{cp} = \varepsilon \cdot E_s \cdot \rho$$

式 6-1

ε : 上下段鉄筋ひずみの計測値の平均

E_s : 鉄筋のヤング係数

ρ : 拘束鉄筋比 (配筋より 1.146%)

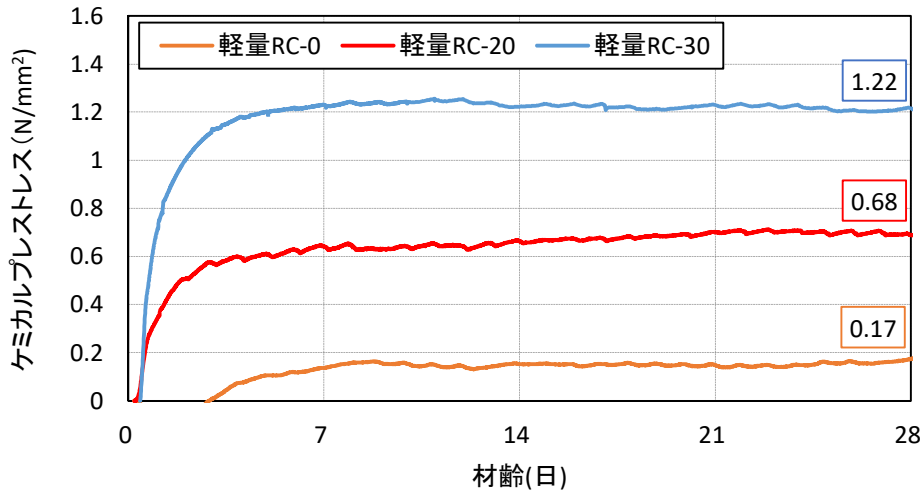


図 6-3 ケミカルプレストレスの推移

著者らが夏季に実施した軽量コンクリート 2 種の膨張特性試験の結果との対比を図 6-4 に示す。膨張材を混和していないことから導入圧縮応力と鉛直方向のコンクリートひずみはともに 0 に近い値となっている。

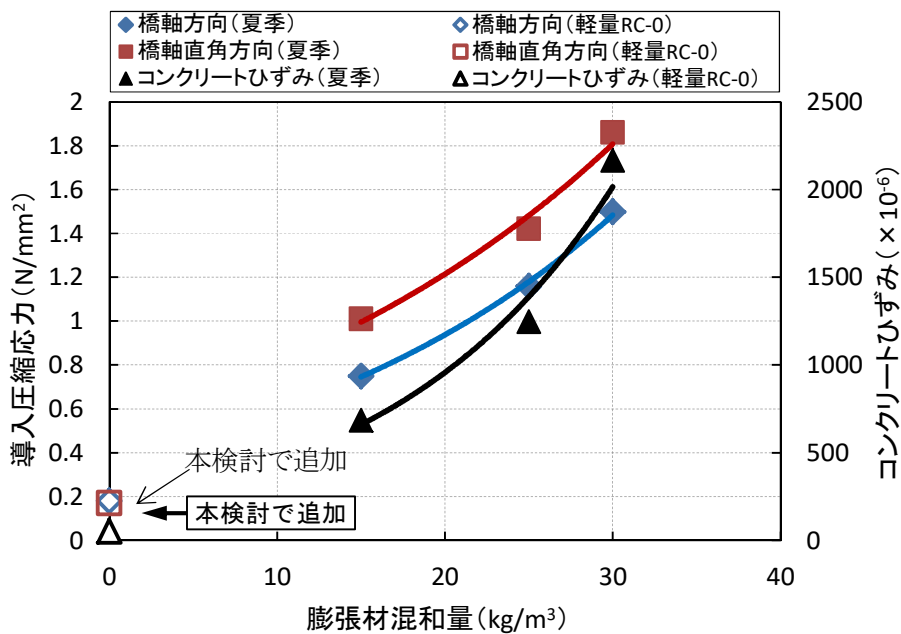


図 6-4 膨張材混和量と導入圧縮応力および鉛直方向のコンクリートひずみの関係

(2) 活荷重たわみと走行回数との関係

走行回数と活荷重たわみ (157kN) (以下、活荷重たわみは全て 157kN での値を示す) の関係を図 6-5 に示す。活荷重たわみは、静的に 157kN 荷重を行った際の総たわみから除荷時の残留たわみを差し引いた値とした。軽量 RC-0 のたわみの増加の傾向は、膨張材を混和したケースよりも大きく、走行回数 280,000 回 (輪荷重 275kN) を超えるとたわみが急増して走行回数 322,067 回 (輪荷重 314kN) で試験を終了した。軽量 RC-20 および軽量 RC-30 と比較するとたわみが急増するタイミング、破壊時の走行回数は明らかに早い。この結果から、膨張材の混和により軽量 RC 床版の耐疲労性は左右されると考えられる。なお、普通 RC の試験結果と同様に、軽量 RC の試験結果にもばらつき

があると考えられるため、軽量RCの耐疲労性について破壊時の走行回数のみで判断せず、(3)以降の検討を実施して総合的に判断した。

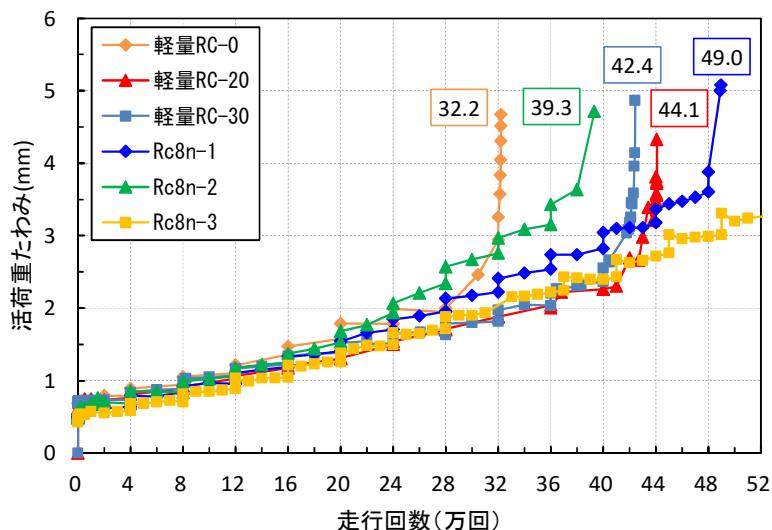


図 6-5 活荷重たわみと走行回数の関係

(3) 載荷荷重と強度補正した走行回数の関係

ここでは4. 2と同様に試験開始時の実強度と設計基準強度との比から走行回数を補正して、載荷荷重と強度補正した走行回数の関係を算出した。算出した結果を図6-6に示す。軽量RC-0の算出結果はRc8n-1より手前に位置したが、RC8の耐疲労性の範囲内である。なお、強度補正した軽量RC-0の走行回数は212, 952回であった。

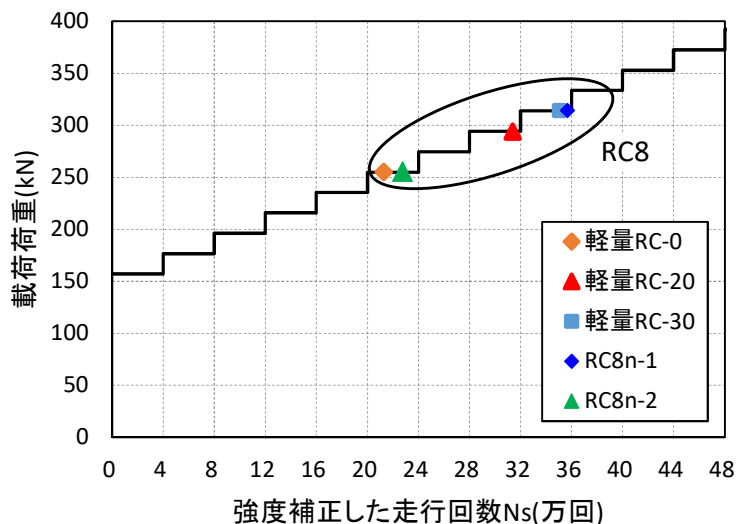


図 6-6 載荷荷重と強度補正した走行回数の関係

(4) 中立軸の推移

供試体中央の上下段の主鉄筋に設置した鉄筋ひずみゲージの計測値の平均から計算した中立軸の推移を図 6-7 に示す。軽量 RC-0 は、普通 RC (RC8n-1) とは傾向が異なり、荷重開始とともに約 20mm 上方へ移動したのちたわみが急増する 280,000 回以前までは微少に変化するもののほぼ一定の値で推移した。280,000 万回までは軽量 RC-20 および軽量 RC-30 と概ね同じ傾向を示した。

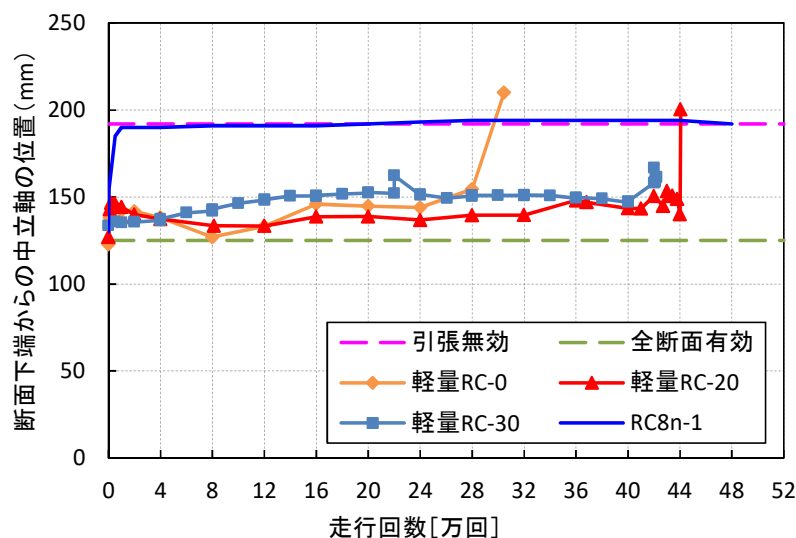
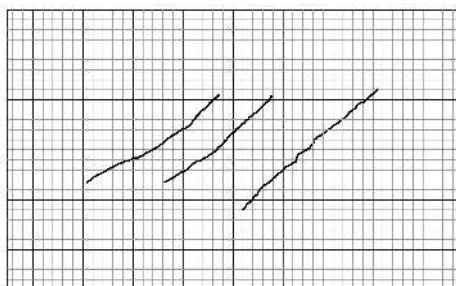


図 6-7 中立軸の位置と走行回数の関係

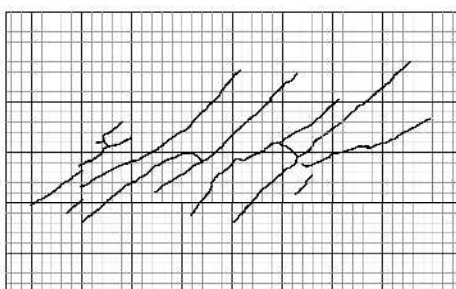
(5) ひび割れ分布

本実験のひび割れ分布を図 6-8 に示す。ひび割れの発生は供試体下面にほぼ均等に分散しており、床版が一体構造として機能していることがわかる。この分布は、普通 RC と違いがない。また、本実験結果は文献 7) に示される 4 段階に大別される道路橋 RC 床版のひび割れ損傷過程に当てはめると、一方向ひび割れ (段階 I) が 1,000 回、二方向ひび割れ (段階 II) が 40,000 回、亀甲状ひび割れ (段階 III) が 160,000 回に相当することがわかる。陥没破壊 (段階 IV) に関しては、供試体上面の荷重板近傍ひび割れが発生したため、これにより上面荷重板近傍から下面までひび割れが到達し、押抜きせん断破壊に至ったものと判断して 322,067 回で実験を終了した。したがって、本実験は普通 RC の実構造の疲労損傷と同様の損傷過程を再現しており、実物大の軽量 RC の破壊性状は基本的に普通 RC と同様のものであると考えられる。図 6-9 に軽量 RC の床版下面のひび割れ密度と走行回数の関係を示す。ひび割れ密度の算出は、全床版面に対して格子密度法によって行った。ひび割れ密度の使用限界は $10.0\text{m}^2/\text{m}^2$ であり⁷⁾、本実験結果はほぼ線形で増加し、実験終了時にひび割れ密度は使用限界値より小さい値であった。普通 RC のひび割れ密度は試験開始直後から大きく増加し、その後緩やかに増加して $10\text{m}^2/\text{m}^2$ 付近で破壊に至ることから、傾向は異なるものであった。軽量 RC-0 のひび割れ密度はほぼ一定の増加率で漸増する傾向となった。走行回数 24 万回付近でひび割れ部に角落ちが発生、走行回数 28 万回付近で段差を伴うひびわれ (写真 6-2) が発生し、最終的にせん断破壊に至った。

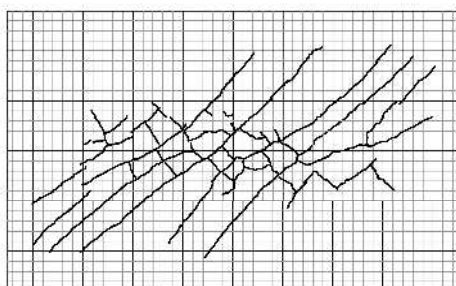
供試体を中央で橋軸直角方向および橋軸方向に切断した断面のひび割れ分布を観察した結果を図 6-10 に示す。同図は、比較のため、普通 RC (RC8n-1) を並列させて示している。橋軸直角方向は、普通 RC と比べてひび割れの角度は同等となっている。軽量 RC-0 は、上鉄筋付近に層状に複数のひび割れの発生が認められる。これは、普通 RC には見られないことから、軽量 RC 床版の特徴であると考えられ、考察については今後の検討としたい。橋軸方向は普通 RC の全てに共通し、輪荷重の走行範囲全体の上面鉄筋に沿って水平ひび割れが発生しており、鉄筋コンクリート床版に共通した破壊形態と推察される。



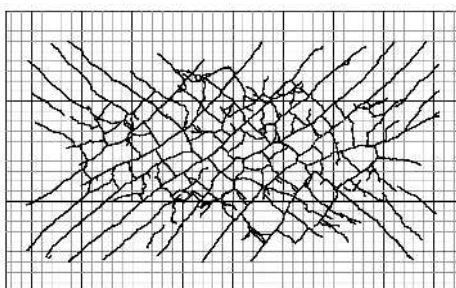
(a) 段階Ⅰ : 1,000回走行



(b) 段階Ⅱ : 40,000回走行



(c) 段階Ⅲ : 160,000回走行



(d) 段階Ⅳ : 322,067 回走行

図 6-8 供試体下面のひび割れ分布

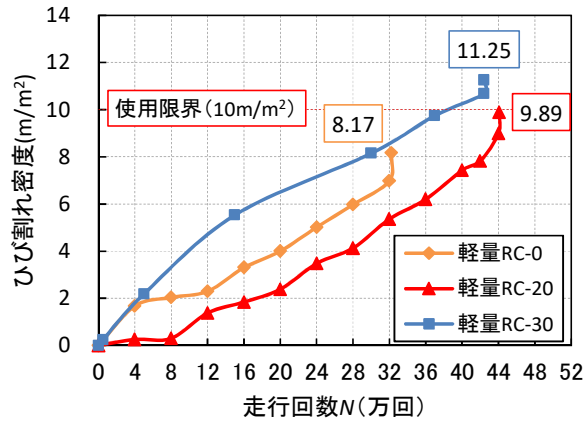


図 6-9 床版下面のひび割れ密度と走行回数の関係



写真 6-2 段差を伴うひび割れ (軽量 RC-0)

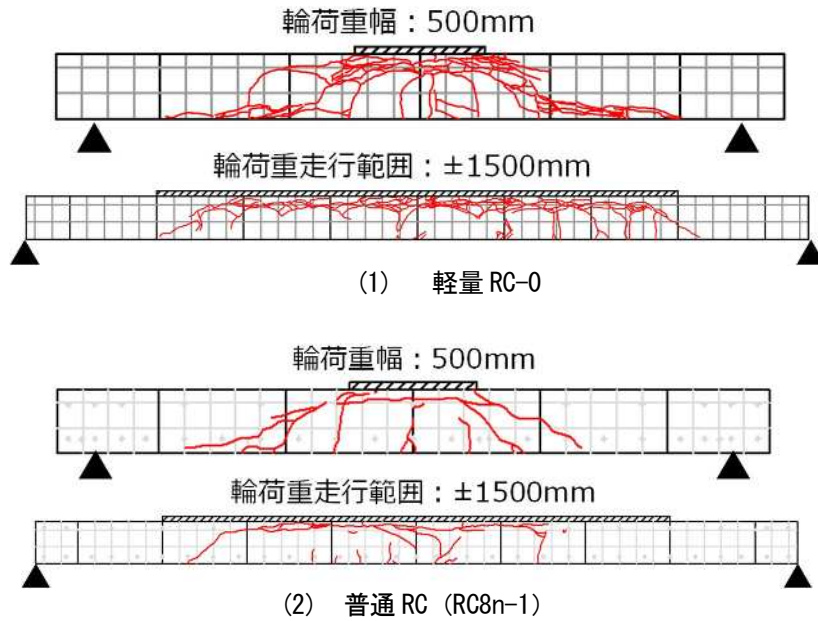


図 6-10 供試体断面のひび割れ分布
(上段：橋軸直角方向，下段：橋軸方向)

(6) S-N 曲線

軽量 RC と普通 RC の輪荷重走行試験結果を載荷荷重 157kN 基準の S-N 曲線にプロットしたものを図 6-11 に示す。S-N 曲線は文献⁷⁾の松井理論式とした。図中の縦軸に示す P_{sxe} は、式 2-3 より算出した。軽量 RC-0 の実験結果は、普通 RC の S-N 曲線よりも左方に位置していることから、普通 RC 床版と比較すると耐疲労性が劣ることが分かった。

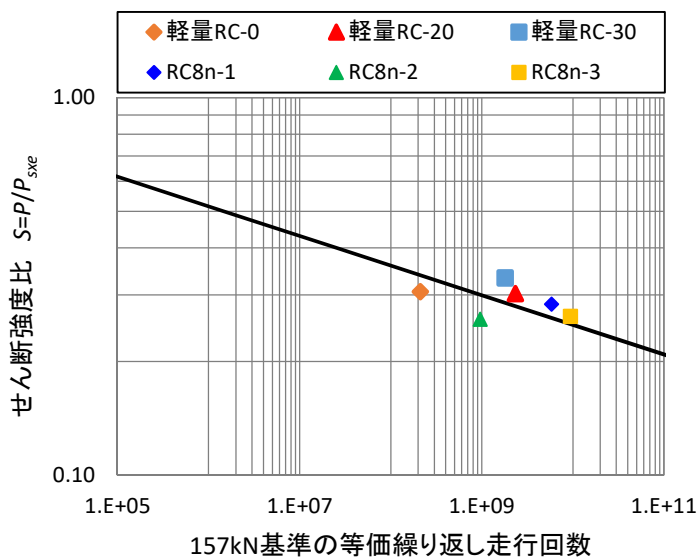


図 6-11 157kN 基準の S-N 曲線

6. 2. 4 まとめ

本研究では、軽量 RC-0 を用いて輪荷重走行試験（階段状荷重漸増載荷：土研式）を実施し、普通 RC、軽量 RC-20 および軽量 RC-30 との相対比較により耐疲労性の検討を行った。

以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 活荷重たわみと走行回数との関係より、軽量 RC-0 の破壊時の走行回数は軽量 RC-20、軽量 RC-30 および普通 RC と比べて明らかに劣る。
- (2) 本研究にて作製した軽量 RC-0 に導入された圧縮応力は、ほぼ導入されなかった。
- (3) 軽量 RC の中立軸の推移は載荷開始とともに約 20mm 上方へ移動するが、その後たわみが急増する 280,000 回以前までは微少に変化するもののほぼ一定の値で推移した。これは、軽量 RC-20 および軽量 RC-30 と概ね同じである。
- (4) 軽量 RC-0 の損傷進展過程は普通 RC と同様に、ひびわれの上下方向のずれ、角落ちが発生して最終的な破壊に至った。
- (5) 軽量 RC-0 供試体を切断した断面のひび割れ分布の特徴としては、ひび割れの角度が普通 RC と同等であること、また、上鉄筋付近に層状に水平ひびわれが発生することは軽量 RC 床版のひび割れ分布の特徴であると考えられる。
- (6) 軽量 RC-0 は松井理論式の普通 RC の S-N 曲線よりも左方に位置し、耐疲労性に劣ることがわかった。

以上より、総合的に判断すると、軽量 RC-0 は軽量 RC-20 および軽量 RC-30 より耐疲労性が劣ることが分かった。軽量コンクリート 2 種には膨張材を混和しなければ普通 RC と同程度の耐疲労性を有する床版にはならないことが明らかになった。

6. 3 異なる荷重パターンによる膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性

6. 3. 1 概要

RC 床版供試体を用いた輪荷重走行試験では、最終的に輪荷重による押抜きせん断破壊により終局を迎える。輪荷重走行試験の荷重方法としては一般的に道路橋示方書¹⁾で耐疲労性の確認手法として提案されている土木研究所が所有する輪荷重走行試験機を用いた階段状荷重漸増荷重^{2),3)}が用いられる。本節では第4章で確認した軽量 RC-20 の破壊荷重より低いレベルで階段荷重から一定荷重に切り替えることで押抜きせん断破壊に至らない（破壊しない）のではないかと考え検証を行うこととした（以下、軽量 RC-20'）。なお、試験結果は第4章で示した 20 型膨張材を 20kg/m³ 混和した軽量 RC 床版（以下、軽量 RC-20）と相対比較することで耐疲労性について検証を行った。

6. 3. 2 供試体および試験方法

(1) 供試体

供試体は 2,800mm×4,500mm×250mm の複鉄筋 RC 床版であり、その形状および寸法を図 6-12 に示す。供試体の外形寸法は、表 6-5 および表 6-6 に示す過去の軽量 RC 床版の実験で用いた供試体⁴⁾（供試体名：軽量 RC-20）および平成 8 年の道路橋示方書¹⁾に準拠した既往の研究の普通 RC の供試体²⁾（供試体名：RC8n-1, RC8n-2, RC8n-3）と同一とした。主鉄筋は D19 を上段 300mm 間隔、下段 150mm 間隔とした。配力鉄筋は D16 を上段 300mm 間隔、下段 150mm 間隔とした。

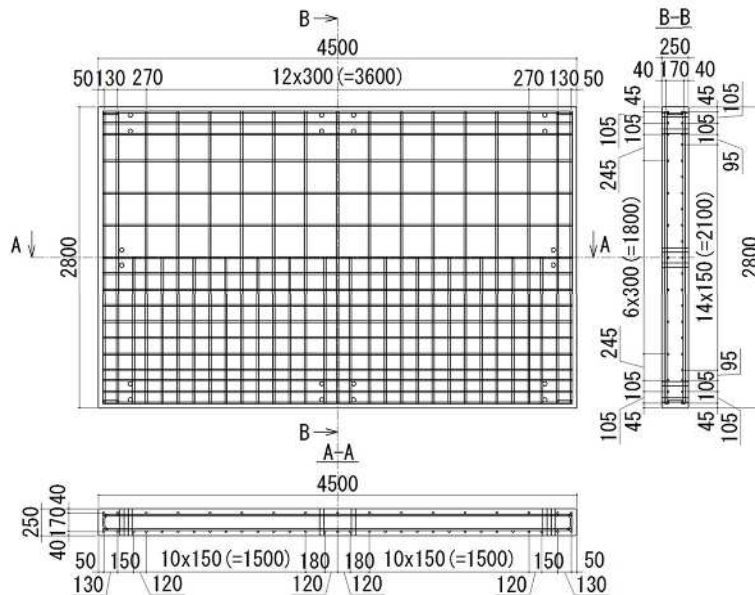


図 6-12 供試体概要図

表 6-5 供試体諸元

供試体名	外形寸法 (mm)	主鉄筋		配力鉄筋	
		径	間隔 (mm)	径	間隔 (mm)
軽量 RC-20	2800 × 4500 × 250	D19	150 (300)	D16	150 (300)
軽量 RC-20'					125 (250)
RC8n-1					
RC8n-2					
RC8n-3					

()内は圧縮側鉄筋の値

表 6-6 既往の実験結果^{5),7)}

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	破壊時荷重 (kN)	破壊時走行回数 (回)
軽量RC-20	58.1	20.0	372	440,800
RC8n-1	33.1	27.9	392	489,555
RC8n-2	38.4	25.7	334	394,122
RC8n-3	37.4	26.5	392	520,000*未破壊

(2) 使用材料

試験に用いた軽量コンクリートの配合を表 6-7 に示す。普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）を用いて、粗骨材（絶乾密度：1.29g/cm³，最大寸法：15mm，吸水率：28.0%），細骨材（絶乾密度：1.65g/cm³，吸水率：15.0%）とも人工軽量骨材の軽量コンクリート 2 種とした。いずれも水セメント比は 37%とした。なお，配合上の単位容積質量は，1,793kg/m³である。設計基準強度は 40N/mm²で，せん断強度が設計基準強度 27N/mm²の普通コンクリートと同等となるようにした。コンクリートは実機ミキサで練り混ぜを行った。スランプはコンクリート標準示方書⁵⁾を参考にポンプ圧送性が良好とされる 18cm とし，空気量は現場条件が耐凍害性を考慮する必要がない場所であるため，普通コンクリートと同等の 4.5%とした。軽量 RC-20' のフレッシュコンクリートの性状は，スランプ 20.0cm，空気量 3.7%，コンクリート温度 20℃，材齢 28 日の単位体積質量は 1,830kg/m³であった。凝結試験で終結を確認した後から湿潤養生とし，材齢 28 日の物性試験結果を確認後，材齢 29 日に脱型し，その後は気中養生とした。輪荷重走行試験の開始は，試験機の都合上材齢 78 日とした。

表 6-7 軽量コンクリートの配合

供試体名	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AD* ² (P×%)	AE* ³ (P×%)
		W	C	Ex* ¹	SL	GL		
軽量RC-20	48.6	170	439	20	513	424	1.1	0.001
軽量RC-20'								

*1:低添加型膨張材 *2:AE減水剤標準型 (I 種) *3:AE剤 (I 種)

(3) 試験方法

輪荷重走行試験の実施は，IHI インフラシステムが所有する試験機を用いて行った。供試体の支持条件は，長辺方向の 2 辺を単純支持（支持支間 2,500mm）とし，短辺方向の 2 辺は弾性支持とした。輪荷重走行の範囲は幅 500mm で橋軸方向の移動距離 3,000mm とした。載荷荷重は，文献 2) の方法と異なり図 6-13 の通り 32 万回までは階段式漸増載荷方式（土研方式）で試験を実施し，32 万回以降は 314kN で一定載荷とした。なお，土研方式での走行回数 52 万回に相当する走行回数としては，等価繰返し回数により算出した結果，土研方式 32 万回走行後，一定載荷において 104 万回まで走行させることとした。輪荷重走行による床版の劣化状況の把握は，たわみ，ひずみの計測値とひび割れ観察で行った。試験の終了条件は，床版が損傷して総たわみが急増する挙動を示した時期とした（総たわみの制限値 10mm）。

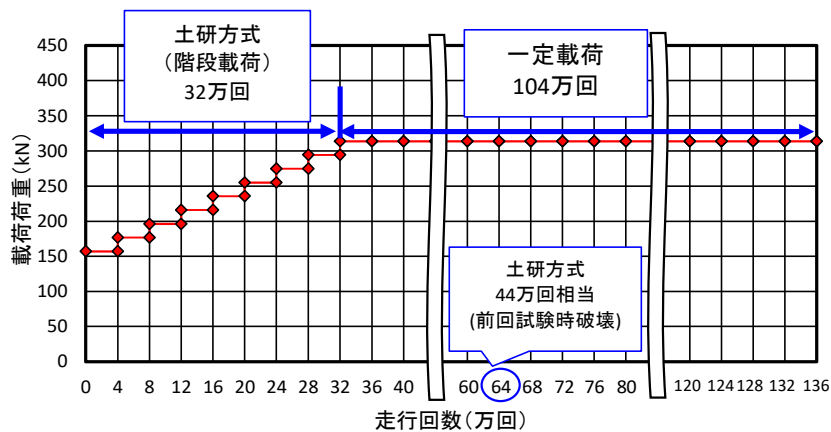


図 6-13 階段状荷重漸増載荷（土研方式）＋一定載荷

6. 3. 3 試験結果および考察

(1) 物性試験結果

硬化コンクリートの物性値を表 6-8 に示す。材齢 28 日の圧縮強度は 59.4N/mm^2 であり、設計基準強度 40N/mm^2 を上回った。なお、せん断試験は JCI-SF6 に準拠して実施した。また、式 6-1 を用いて算出⁸⁾した橋軸直角方向のケミカルプレストレスは軽量 RC-20 とほぼ同じ傾向で推移していることを確認した。

表 6-8 硬化コンクリートの物性値

供試体名	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	割裂引張強度 (N/mm^2)	せん断強度 (N/mm^2)	見掛け密度 ^{*1} (kg/m^3)
軽量 RC-20	78	58.1	20.0	3.6	7.1	1830
軽量 RC-20'	78	62.6	19.3	3.5	7.3	1837

*1: 材齢 28 日の値を記載

(2) 活荷重たわみと走行回数の関係

実走行回数と活荷重たわみ (157kN) (以下、活荷重たわみは全て 157kN での値を示す) の関係を図 6-14 (1) に示す。活荷重たわみは、静的に 157kN 載荷を行った際の総たわみから除荷時の残留たわみを差し引いた値とした。軽量 RC-20' のたわみの増加の傾向は、走行回数 320,000 回から 314kN で一定載荷したものの、走行回数 400,000 回を超えるとたわみが急増して軽量 RC-20 より少ない走行回数 (431,039 回) で試験を終了した。また、軽量 RC-20' は実走行回数 360,000 回以降の載荷荷重が土研方式と異なることから、土研方式の試験結果と比較するために松井理論式⁷⁾に従って 360,000 回以降を土研方式に換算した走行回数 (以降、換算走行回数) を算出し、活荷重たわみ (157kN) との関係を図 6-14 (2) に示した。軽量 RC-20' の走行回数は軽量 RC-20 と比べて明らかに少ないことが分かる。なお、載荷パターンとして軽量 RC-20 における階段載荷でたわみが急増した荷重 (333kN) より小さい荷重レベルで一定載荷としたことから押抜きせん断破壊が起こらないと予想したが予想とは異なる結果となった。

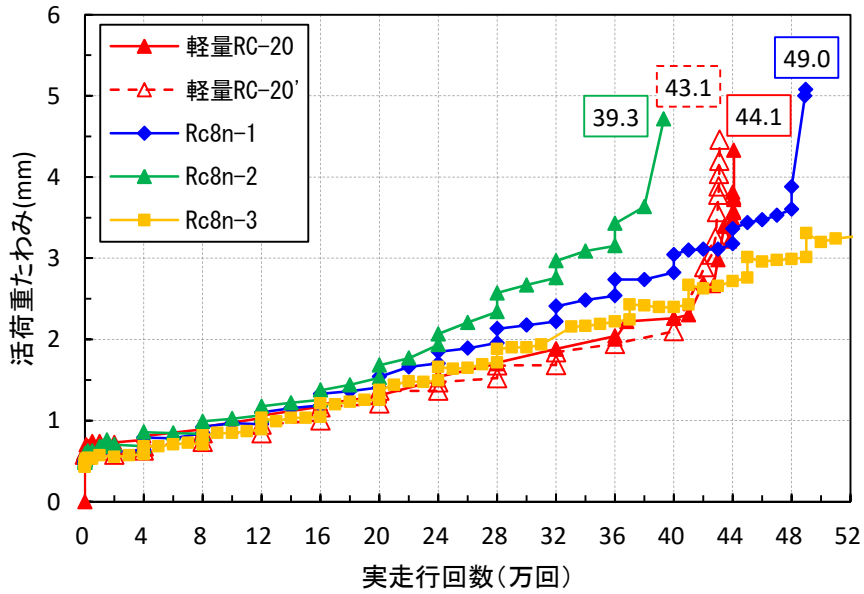


図 6-14(1) 活荷重たわみと走行回数(実走行回数)

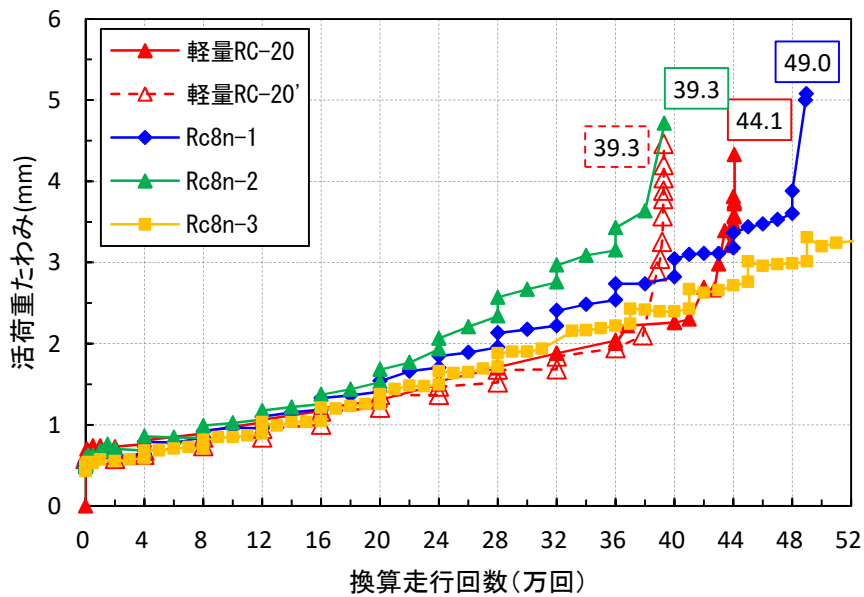


図 6-14(2) 活荷重たわみと走行回数(階段载荷換算)

(3) 載荷荷重と強度補正した走行回数の関係

ここでは4. 2と同様に試験開始時の実強度と設計基準強度との比から走行回数を補正して、載荷荷重と強度補正した走行回数の関係を算出した。算出した結果を図6-15に示す。軽量RC-20'の算出結果は軽量RC-20より手前に位置したが、RC8の耐疲労性の範囲内である。なお、強度補正した軽量RC-20'の走行回数は246, 101回であった。

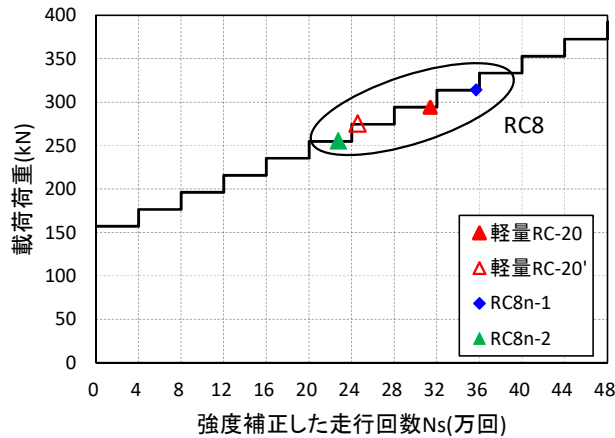


図 6-15 載荷荷重と強度補正した走行回数の関係

(4) 中立軸の推移

供試体中央の上下段の主鉄筋に設置した鉄筋ひずみゲージの計測値の平均から計算した中立軸の推移を図 6-16 に示す。軽量 RC-20' は、走行回数は 360,000 回までは圧縮側有効と全断面有効の間をおよそ一定で推移した。以降は値が急増し、圧縮側有効よりも高い位置を示した。360,000 万回で床版内部に損傷が発生したことが示唆された。

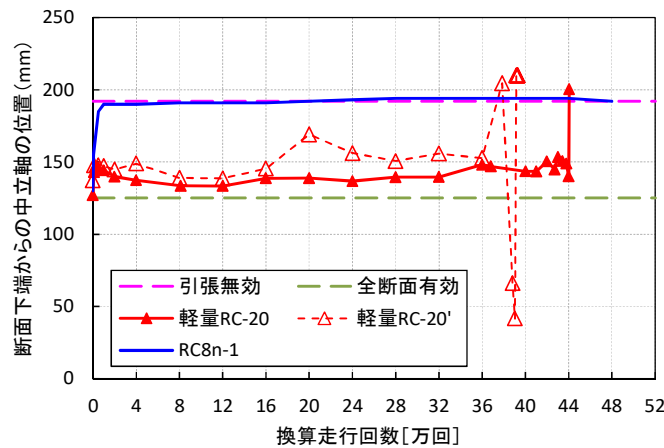


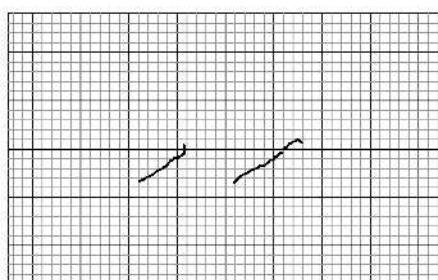
図 6-16 中立軸の位置と換算走行回数の関係

(5) ひび割れ分布

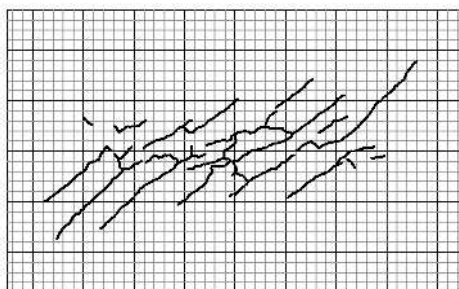
本実験のひび割れ分布を図 6-17 に示す。ひび割れの発生は供試体下面にほぼ均等に分散しており、床版が一体構造として機能していることがわかる。この分布は、普通 RC と違いがない。また、本実験結果は文献 7) に示される 4 段階に大別される道路橋 RC 床版のひび割れ損傷過程に当てはめると、一方向ひび割れ (段階 I) が 80,000 回、二方向ひび割れ (段階 II) が 240,000 回、亀甲状ひび割れ (段階 III) が 320,000 回に相当することがわかる。陥没破壊 (段階 IV) に関しては、供試体上面の載荷板近傍ひび割れが発生したため、これにより上面載荷板近傍から下面までひび割れが到達し、押抜きせん断破壊に至ったものと判断して 431,039 回で実験を終了した。したがって、本実験は普通 RC の実構造の疲労損傷と同様の損傷過程を再現しており、実物大の軽量 RC の破壊性状は基本的に普通 RC と同様のものと考えられる。図 6-18 に軽量 RC の床版下面のひび割れ密度と走行回数の関係を示す。ひび割れ密度の算出は、全床版面に対して格子密度法によって行った。ひび割れ密度の使用限界は 10.0m^2 であり⁷⁾、本実験結果はほぼ線形で増加し、実験終了時にひび割れ密度は使用限界値より小さい値であった。普通 RC のひび割れ密度は試験開始直後から大きく

増加し、その後緩やかに増加して 10m^2 付近で破壊に至ることから、傾向は異なるものであった。軽量 RC-20' のひび割れ密度はほぼ一定の増加率で漸増する傾向となった。走行回数 36 万回付近でひび割れ部に角落ちが発生、走行回数 40 万回付近で段差を伴うひびわれ（写真 6-3）が発生し、最終的にせん断破壊に至った。

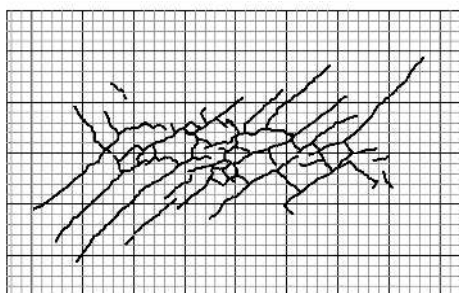
供試体を中央で橋軸直角方向および橋軸方向に切断した断面のひび割れ分布を観察した結果を図 6-19 に示す。同図は、比較のため、軽量 RC-20 を並列させて示している。橋軸直角方向は、軽量 RC-20 と比べてひび割れの角度は同等となっている。軽量 RC-20' は、軽量 RC-20 と同様に上鉄筋付近に層状に複数のひび割れの発生が認められる。これは、軽量 RC 床版の特徴であると考えられ、考察については今後の検討としたい。橋軸方向は軽量 RC-20 と同様に、輪荷重の走行範囲全体の上面鉄筋に沿って水平ひび割れが発生しており、鉄筋コンクリート床版に共通した破壊形態と推察される。



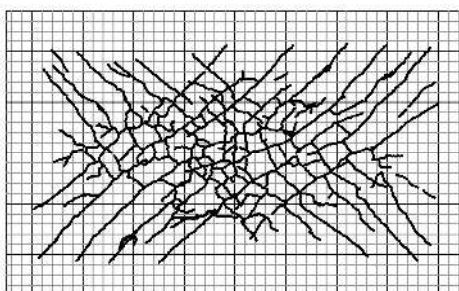
(a) 段階Ⅰ：80,000回走行



(b) 段階Ⅱ：240,000回走行



(c) 段階Ⅲ：320,000回走行



(d) 段階Ⅳ：431,039回走行

図 6-17 供試体下面のひび割れ分布

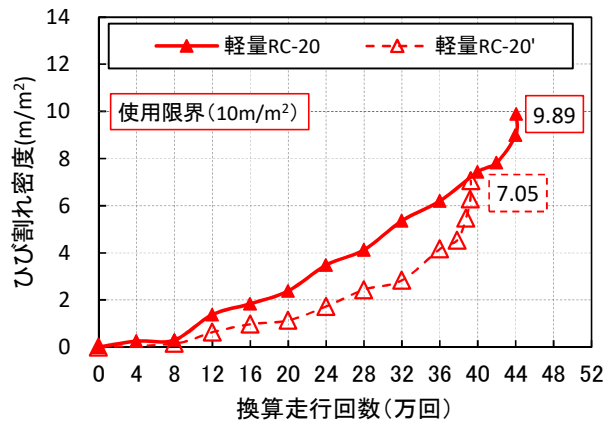


図 6-18 床版下面のひび割れ密度と換算走行回数との関係



写真 6-3 段差を伴うひび割れ (軽量 RC-20')

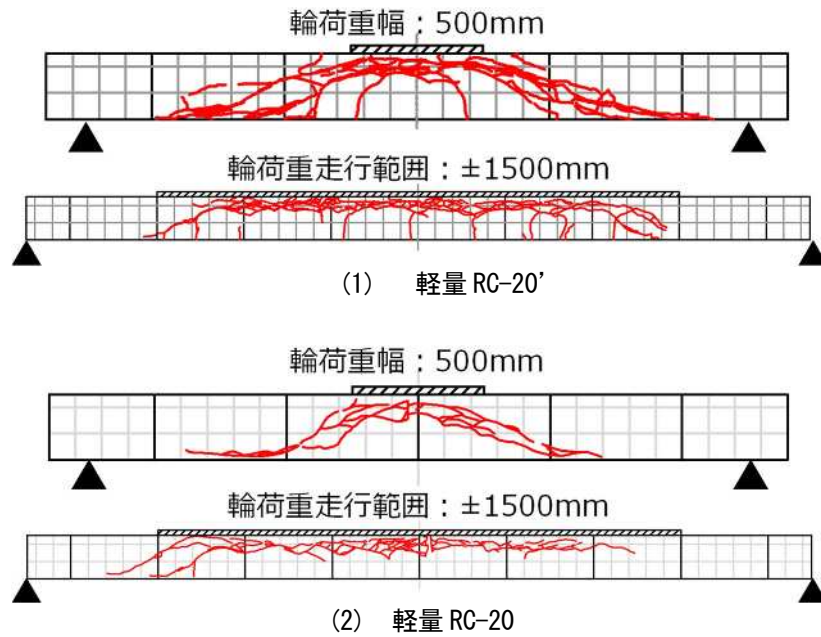


図 6-19 供試体断面のひび割れ分布
(上段：橋軸直角方向，下段：橋軸方向)

(6) S-N 曲線

軽量 RC と普通 RC の輪荷重走行試験結果を載荷荷重 157kN 基準の S-N 曲線にプロットしたものを図 6-20 に示す。S-N 曲線は文献⁷⁾の松井理論式とした。図中の縦軸に示す P_{sxe} は、式 2-3 より算出した。軽量 RC-20' の実験結果は、普通 RC の S-N 曲線よりも左方に位置していることから、普通 RC 床版と比較すると耐疲労性がやや劣ることが分かった。

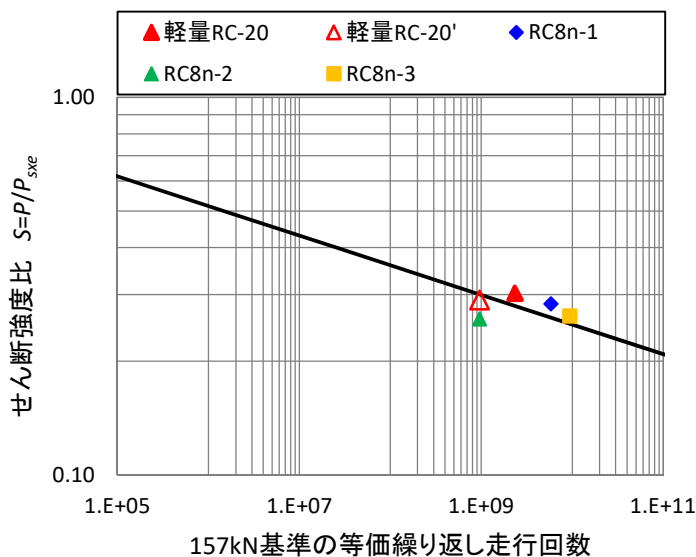


図 6-20 157kN 基準の S-N 曲線

6. 3. 4 まとめ

本研究では、軽量 RC-20' を用いて輪荷重走行試験（階段状荷重漸増載荷＋一定載荷）を実施し、普通 RC および軽量 RC-20（階段状荷重漸増載荷：土研式）との相対比較により耐疲労性の検証を行った。

以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 膨張材を 20 kg 混和した実物大供試体において階段載荷により押抜きせん断破壊に至った荷重より低い荷重レベルで階段載荷から一定載荷に切り替えを行ったとしても、押抜きせん断破壊による破壊となった。
- (2) 膨張材を 20 kg 混和した実物大供試体で階段状荷重漸増載荷（土研式）を行った場合と階段状荷重漸増載荷＋一定載荷を行った場合では、ほぼ同等の走行回数で破壊した。ただし、換算走行回数では軽量 RC-20 と比較すると明らかに劣る結果となった。
- (3) 本試験結果から軽量 RC の試験結果についても、土研で実施した RC-8n シリーズの試験結果と同様にばらつきがあることが示唆された。

6. 4 今回開発した床版の耐疲労性

6. 4. 1 ケミカルプレストレスによるせん断破壊面の増加

膨張材を混和しないケース（以下、軽量 RC-0）と膨張材を 20kg 混和したケース（以下、軽量 RC-20）と膨張材を 30kg 混和したケース（以下、軽量 RC-30）の 3 種類について供試体中央で橋軸直角方向に切断した断面のひび割れ分布を図 6-21 に示す。それぞれのひび割れ分布図から読み取った破壊面の角度を整理し、膨張材混和量の違いによる破壊面角度の比較表を表 6-9 に示す。

膨張材を混和することで PC 床版の内部と同様な力学環境を作り出せることから、破壊面の角度が緩くなる。また、混和量を多くすれば破壊面の角度はさらに緩くなることを確認した。そのため、せん断抵抗面積が広がることから、結果として押抜きせん断耐力は大きくなり、耐疲労性は向上すると考えられる。

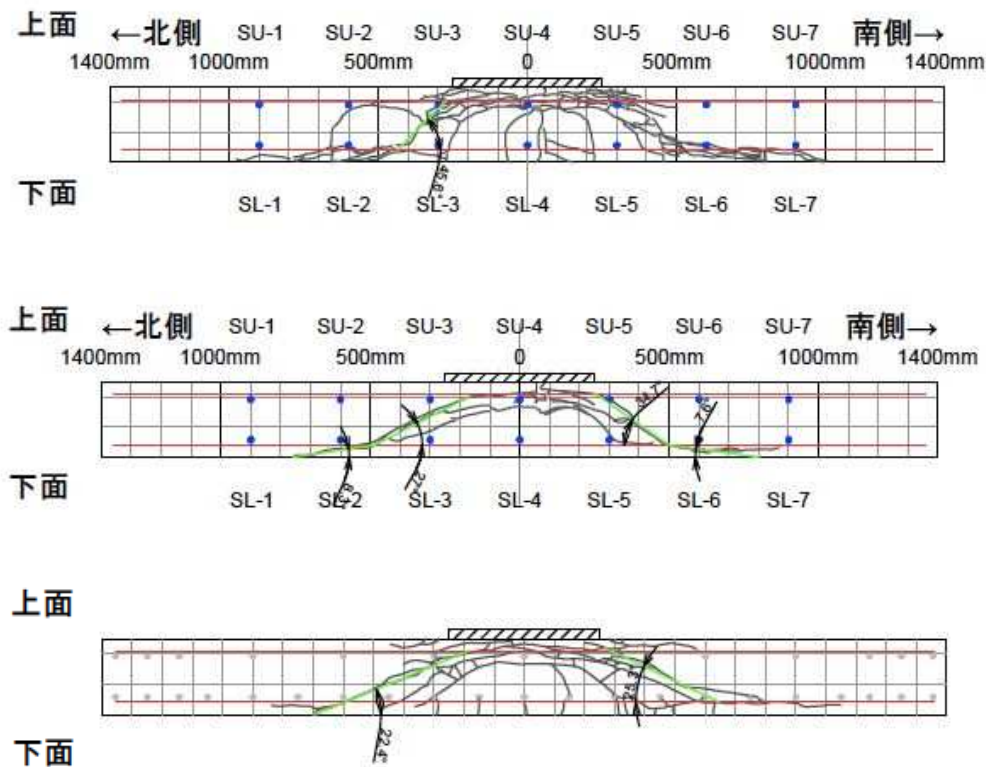


図 6-21 ひび割れ分布
(上段：軽量 RC-0，中段：軽量 RC-20，下段：軽量 RC-30)

表 6-9 膨張材混和量の違いによる破壊面角度の比較

ケース	破壊面角度
RC-0 (梅)	45.6°
RC-20 (松')	31°
RC-30 (YK)	23°

6. 4. 2 膨張材混和量の調整による床版内部の損傷の軽減

軽量 RC-0 の 1,000 回走行後の供試体上面と側面のひび割れ観察結果を図 6-22 に、軽量 RC-20 の 2,000 回走行後の供試体上面と側面のひび割れ観察結果を図 6-23 に、軽量 RC-30 の試験開始前の供試体上面と側面のひび割れ観察結果を図 6-24 に示す。軽量 RC-0 および軽量 RC-20 の供試体側面には、ひび割れは発生していないものの、軽量 RC-30 は走行開始前にかかわらずひび割れが発生していた。第 3 章の膨張ひずみ結果から推測すると、軽量 RC-30 の供試体は鉛直方向に 3000μ 程度の膨張ひずみが発生していたと示唆され、床版内部にも損傷（クラック）が発生していたと考えられる。

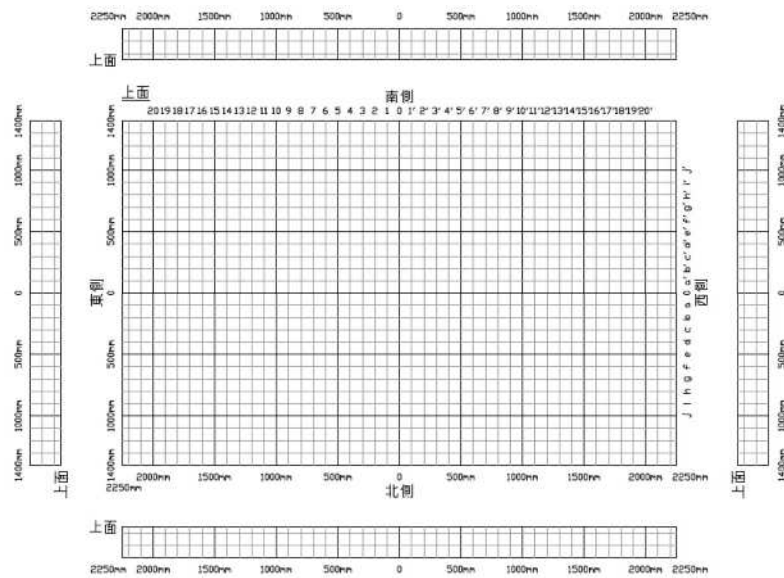


図 6-22 ひび割れ観察結果（軽量 RC-0）

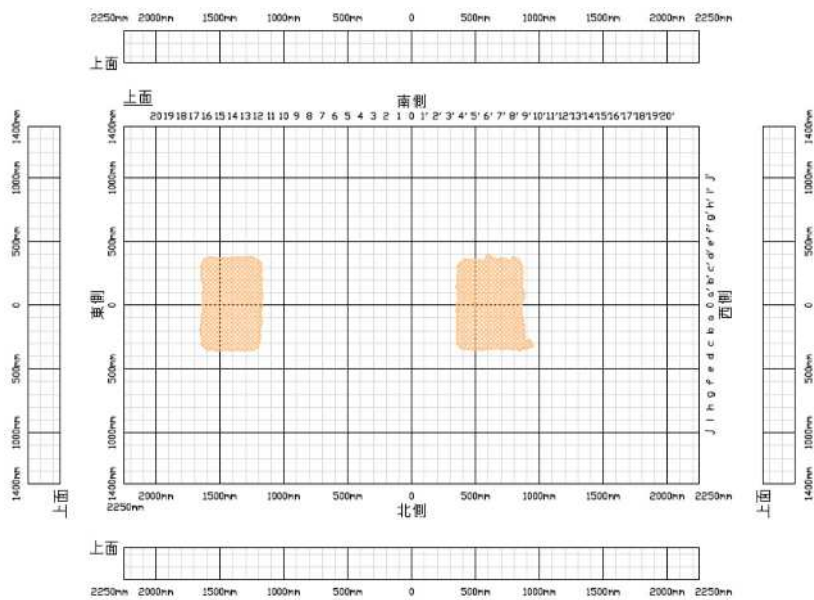


図 6-23 ひび割れ観察結果（軽量 RC-20）

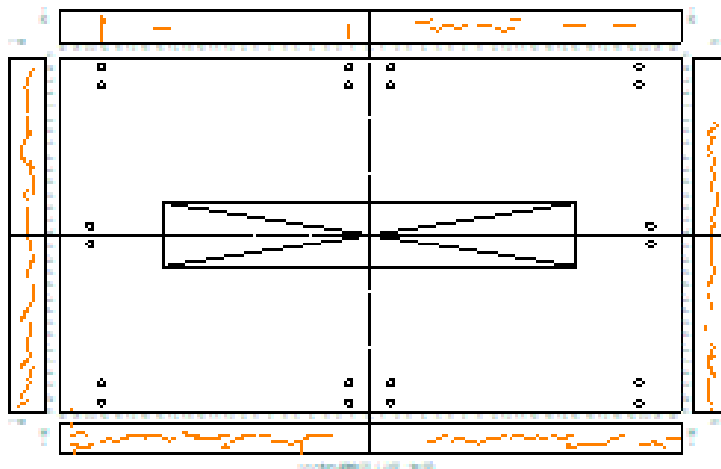


図 6-24 ひび割れ観察結果（軽量 RC-30）

6. 4. 3 まとめ

今回開発した床版の耐疲労性について以下のとおり整理した。

- 1) 軽量 RC-0 は鉛直方向の膨張ひずみにより内部が損傷を受けるマイナスの要素はないものの、膨張ひずみによるケミカルプレストレス効果による押抜きせん断耐力が大きくなるプラスの要素もない。軽量 RC-0 のせん断強度は普通コンクリート ($27\text{N}/\text{mm}^2$) のせん断強度 ($4.83\text{N}/\text{mm}^2$) 以上発現していたものの、破壊面の角度が普通 RC 床版と同等では、軽量骨材の強度が普通骨材と比べて弱いため普通 RC 床版より耐疲労性が劣る結果となった。
- 2) 軽量 RC-30 は膨張ひずみによるケミカルプレストレス効果により押抜きせん断耐力が大きくなる。プラスの要素があるものの、鉛直方向の膨張ひずみにより内部が損傷を受けるマイナスの要素との綱引きの結果、普通 RC 床版と同等の耐疲労性となったと考えられる。
(小型供試体は床版厚さが 16cm と薄かったため、マイナスの要素が限定的であったと考えられる。)
- 3) 軽量 RC-20 は軽量 RC-30 から膨張材を減らすことで鉛直方向の膨張ひずみにより内部が損傷するマイナスの要素が限定的で、ケミカルプレストレス効果により押抜きせん断耐力が大きくなるプラスの要素が作用することで、今回開発した膨張材併用軽量 RC 床版（軽量 RC-20）は普通 RC 床版と同等の耐疲労性となったと考えられる。

6.5 膨張材併用軽量RC床版のコスト削減効果

6.5.1 概要

今回開発した膨張材併用軽量RC床版と他の床版構造を適用した道路橋（4径間連続鈹桁橋を想定）の試設計を行い、今回開発した膨張材併用軽量RC床版のコスト削減効果優について検証した。

6.5.2 検討ケース

上部工の橋種は、鋼連続鈹桁を基本として、以下の床版を用いた5ケースでの上下部工の経済性を検討する。なお、いずれも支間45m、4径間の橋長180mの橋梁とする。

- 第1案 : 鈹桁橋(多主桁) (普通RC床版)
- 第2案 : 少数鈹桁橋(合成床版)
- 第3案 : 少数鈹桁橋(PC床版)
- 第4案 : 鋼床版鈹桁橋
- 第5案 : 鈹桁橋(多主桁) (膨張材併用軽量RC床版)

第2案 少数鈹桁橋(合成床版) および第3案 少数鈹桁橋(PC床版) は、従来形式の鈹桁ではなく、近年使用頻度が増加している合理化桁(少数鈹桁)として検討を行った。各案における上部工断面は首都高基準に準拠し設定した。設定した断面を図6-25に示す。

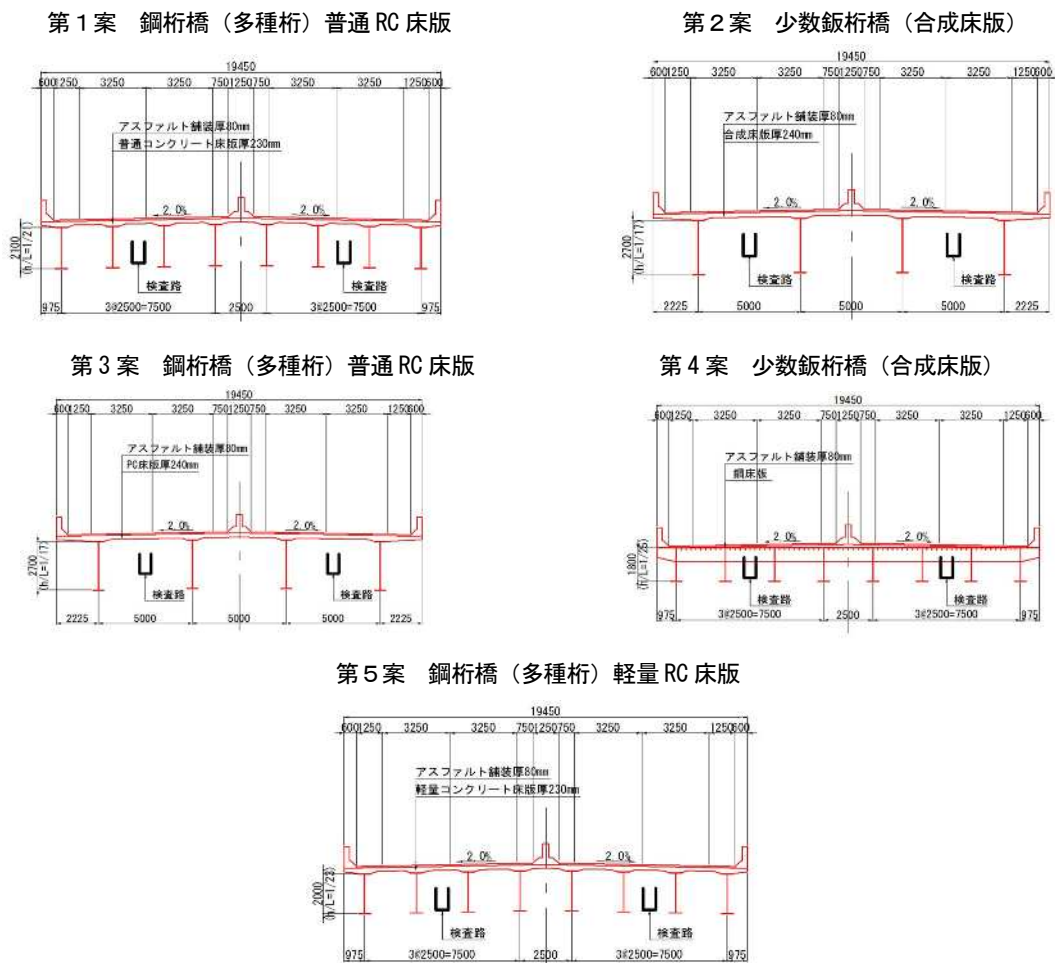


図6-25 検討上部工断面図

6.5.3 検討条件

検討を行うにあたり設定した基本条件を表 6-10 に、上部構造に関する設計条件を表 6-11、表 6-12 に、耐震設計に関する設計条件を表 6-13 に、附属物に関する設計条件を表 6-14 に、下部構造に関する設計条件を表 6-15 に、基礎構造に関する設計条件を表 6-16 に示す。

表 6-10 基本条件

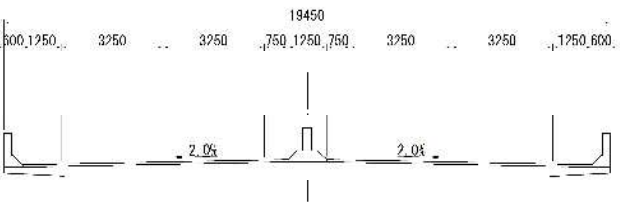
項目	設計条件
道路規格	第 2 種第 2 級
幅員	路肩 : 1.25m, 車道 : 3.25m 
橋長	L = 180.0m
支間割	44.3m + 2@45.0m + 44.3m の 4 径間
軽量コンクリート使用条件	上部工 : 床版に使用 下部工 : 使用しない
単位体積重量	普通 RC 24.5kN/m ³ 軽量 RC 20.0kN/m ³
平面線形	R = ∞
横断勾配	i = 2.0% 拌み勾配
設計活荷重	B 活荷重
設計水平震度	K _h =0.25 (A2 地域 II 種地盤想定)

表 6-11 上部構造に関する設計条件(1)

項目	設計条件	
一般	構造形式	第 1 案 鋼 4 径間連続鈹桁橋(多主桁)(普通 RC 床版) 第 2 案 鋼 4 径間連続少数鈹桁橋(合成床版) 第 3 案 鋼 4 径間連続少数鈹桁橋(PC 床版) 第 4 案 鋼 4 径間連続鋼床版鈹桁橋 第 5 案 鋼 4 径間連続鈹桁橋(多主桁)(軽量 RC 床版)
	橋 長	各案とも 180.0m
	適用基準	・道路橋示方書・同解説 (H29.11) ・道路橋示方書・同解説 (H24.3) ・首都高基準 (H27.7)
荷重条件	舗 装	22.5 kN/m ³ (t=80mm : 表層 40mm, 基層 40mm)
	床 版	軽量 RC : 20.0 kN/m ³ (t=230mm)
	防護柵	8.80kN/m
	温度変化	基準温度+10°C, 変化範囲-10°C~+40°C
	活荷重	B 活荷重
	雪荷重	無し

表 6-12 上部構造に関する設計条件(2)

項目		設計条件
材料条件	コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> 普通床版：24N/mm² 軽量床版：40N/mm² 地覆：24N/mm²
	鉄筋	SD345
	鋼材	重防食塗装 <ul style="list-style-type: none"> 41mm 以上は降伏点一定鋼の使用を検討 40K 鋼は 25mm まで、それ以上は 50K 鋼を検討
基本計画	桁高	第 1 案 鋼 4 径間連続鈹桁橋(多主桁)(普通 RC 床版) ： 2.1m(桁高支間比=1/21)
		第 2 案 鋼 4 径間連続少数鈹桁橋(合成床版) ： 2.7m(桁高支間比=1/17)
		第 3 案 鋼 4 径間連続少数鈹桁橋(PC 床版) ： 2.7m(桁高支間比=1/17)
		第 4 案 鋼 4 径間連続鋼床版鈹桁橋 ： 1.8m(桁高支間比=1/25)
第 5 案 鋼 4 径間連続鈹桁橋(多主桁)(軽量 RC 床版) ： 2.0m(桁高支間比=1/23)		
ブロック長	最大部材長：L=12.0m	
架設工法	TC ベント架設	

表 6-13 耐震設計に関する設計条件

項目		設計条件
支承	結合条件	固定・可動支承(タイプB) 多点固定(端部可動, 中間視点部固定)
	種類	ゴム支承
落橋防止システム	落橋防止構造	設置
	横変位拘束構造	設置

表 6-14 附属物に関する設計条件

項目		設計条件
伸縮装置	形式	二次製品(鋼製フェイスプレート)
防護柵	種別	SB 種
	形式	壁高欄
検査路	上部工検査路	設置する(設計荷重として考慮する)
標識・照明装置		設置しない

表 6-15 下部構造に関する設計条件

項目		設計条件
一般	橋脚形式	張出式橋脚 (矩形)
	適用基準	<ul style="list-style-type: none"> ・道路橋示方書・同解説 (H29. 11) ・道路橋示方書・同解説 (H24. 3) ・首都高基準 (H27. 7)
材料条件	コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> ・橋脚 $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ ・均し $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$
	鉄筋	SD345
	上載土	$\gamma=18\text{kN/m}^3$
基本形状	部材寸法	はり長：3.0m を上限 はり幅：上部工端部主桁より 1m 確保した幅とする 柱高：10cm ラウンド 底版厚：10cm ラウンド 底版幅：10cm ラウンド
配筋方針	最大部材長	$L_{\text{max}}=12.0\text{m}$
	柱主鉄筋量	<ul style="list-style-type: none"> ・最大：D51, @150, 2 段 ・最小：D16, @250, 1 段
	底版主鉄筋量	<ul style="list-style-type: none"> ・最大：D32, @125, 1 段 ・最小：D16, @250, 1 段
	かぶり	<ul style="list-style-type: none"> ・柱：主筋中心から 150mm ・底版上面：上側主筋中心から 150mm ・底版下面：下側主鉄筋面から 250mm
施工方法		オープン掘削

表 6-16 基礎構造に関する設計条件

項目		設計条件
杭基礎	基礎形式	場所打ち杭 $\phi 1200\text{mm}$
	杭長	$L = 35.0\text{m}$
地盤条件 検討モデル		

6.5.4 単価設定

(1) 設定単価一覧

経済比較における単価について、各種積算基準に準じて整理を行った。表 6-17 に設定単価を示す。

表 6-17 設定単価一覧表

細目	規格	単位	単価 (千円)	根拠資料	概要
上部工					
鋼材費					
SM520C-H	40<t≤100	t	145.00	建設物価2019.2	
SM490YB	16<t≤40	t	136.00	建設物価2019.2	
SM490YA	t≤16	t	133.00	建設物価2019.2	
SM400A	t≤32	t	120.50	建設物価2019.2	
SS400		t	118.30	建設物価2019.2	
H型鋼		t	90.00	建設物価2019.2	
購入品費					
	HTB	t	240.0	鋼橋上部工基本計画検討資料H16.12	
	支承	kN	1.0	鋼橋上部工基本計画検討資料H16.12	
	伸縮装置	m	357.0	建設物価2019.2	移動量200mm 材料のみ
工場塗装	外面塗装	m ²	11.0	土木施工単価19'冬	塗装面積は、デザインデータブックより、鋼重当りの塗装面積を、少数鉄桁：10.5m ² /t、従来鉄桁：15.0m ² /t、鋼床版鉄桁：16.0m ² /tと設定する
輸送費					
桁架設工	少数鉄桁(合成床版)	t	85.0	橋梁架設工事の積算に準じて算出	
	従来鉄桁(軽量RC床版)	t	100.0	橋梁架設工事の積算に準じて算出	
	鋼床版鉄桁	t	72.0	橋梁架設工事の積算に準じて算出	
	少数鉄桁(PC床版)	t	85.0	橋梁架設工事の積算に準じて算出	
	従来鉄桁(普通RC床版)	t	100.0	橋梁架設工事の積算に準じて算出	
床版工	合成床版	m ²	35.0	メーカーヒアリング	t=240mm 防水工含
	軽量床版	m ²	28.6	ヒアリングの軽量コン単価より算出	t=230mm 防水工含
	鋼床版	m ²	3.1	建設物価2019.2	防水工のみ
	PC床版	m ²	40.0	メーカーヒアリング	t=240mm 防水工含
	普通RC床版	m ²	25.0	鋼橋上部工基本計画検討資料H16.12	t=230mm 防水工含
壁高欄	RC	m	35.0	橋梁架設工事の積算に準じて算出	剛性防護柵(直壁)
伸縮装置	設置	m	38.0	土木施工単価19'冬	
舗装工	アスファルト舗装	m ²	3.0	橋梁架設工事の積算に準じて算出	
下部工					
コンクリート	少数鉄桁(合成床版)	m ³	51.6	赤本に準じて算出	主鉄筋D35+D32 170kg/m ³
	従来鉄桁(軽量RC床版)	m ³	47.6	赤本に準じて算出	主鉄筋D32+D29 150kg/m ³
	鋼床版鉄桁	m ³	52.9	赤本に準じて算出	主鉄筋D35+D32 170kg/m ³
	少数鉄桁(PC床版)	m ³	50.1	赤本に準じて算出	主鉄筋D32+D32 155kg/m ³
	従来鉄桁(普通RC床版)	m ³	48.4	赤本に準じて算出	主鉄筋D32+D32 155kg/m ³
基礎工	場所打杭φ1200	m	70.0	赤本に準じて算出	
土工		m ³	0.5	赤本に準じて算出	
仮締切	切梁式	m ²	200.0	赤本に準じて算出	
足場工		掛m ²	4.1	赤本に準じて算出	
支保工		空m ³	5.2	赤本に準じて算出	

(2) 軽量床版の単価設定

1) 軽量コンクリートの単価

軽量コンクリート単価は協会ヒアリングより、以下の考えで 34,400 円/m³ とする。

- ・ 軽量コンクリート 2 種(気乾比重 1.65t/m³) 40-18-15N AE 減水剤使用 ¥30,000 円/m³
- ・ 膨張材(太平洋マテリアル社製 太平洋ハイパーエクспан) 材料費 ¥2,400 円/m³(20kg/m³ 混和を想定)
- ・ 膨張材投入費 ¥40,000 円/日 (数量に関係なく、膨張材使用として 1 日の打設毎に発生)
※一日の打設量によるが、数百～数千円/m³の投入費が発生と予想

以上より、

30,000 円 (軽量コン単価) + 2,400 (膨張材単価) + 2,000 円 (膨張材投入費)

≒ 34,400 円/m³

2) 軽量床版の単価設定方法

軽量床版は開発途中のものであり、業者ヒアリングによる単価設定は困難と想定されるため、普通 RC 床版の単価設定の考え方をもとに、軽量床版の単価を設定する。

鋼橋上部工基本計画検討資料 H16.12 に、普通 RC 床版の直接工事費は 24,500 円/m² であると記載されている。

(1) RC床版
RC床版費は次式により算出する。

$$\underline{RC床版費 = 全幅員橋面積(m^2) \times 全幅員橋面積m^2当り床版費(直接工事費)(円/m^2)}$$

全幅員橋面積m²当り床版費(直接工事費) (円/m²)

床版形式	全幅員橋面積m ² 当り床版費(直接工事費)		
	最高値	平均値	最低値
RC床版	26,600	24,500	22,800

床版厚を 250mm と想定した場合、単位体積当りの単価は 100,000 円/m³ となる。普通コンクリートの単価を 10,000 円程度と想定した場合、軽量コンクリートとの差額を考慮すると、軽量床版の単価は単位体積当りでは 125,400 円/m³、単位面積当たりでは 28,600 円/m² となる。

以上のことから、本業務では軽量床版の単価を 28,600 円/m² として経済比較を行う。

6.5.5 検討結果

(1) 上部鋼反力

各検討ケースの算出した上部工反力を表 6-18 に、比較したグラフを図 6-26 に示す。第 4 案の鋼床版が最も軽く、続いて鈹桁 (軽量 RC 床版)、鈹桁 (普通 RC 床版)、少数鈹桁 (PC 床版)、少数鈹桁 (合成床版) の順に反力増となった。第 5 案の軽量 RC 床版は第 1 案の普通 RC 床版と比較して 7% の反力減となった。なお、幅員等の道路条件に変更はないため、活荷重は解析上の数値のズレ程度で全案とも同値である。

表 6-18 上部工反力比較

ケース	単位	第1案 鈹桁橋(多主桁) (普通RC床版)	第2案 少数鈹桁橋 (合成床版)	第3案 少数鈹桁橋 (PC床版)	第4案 鋼床版 鈹桁橋	第5案 鈹桁橋(多主桁) (軽量RC床版)
死荷重 反力	kN	9880.8 (1.00)	10699.5 (1.08)	10102.4 (1.02)	8022.6 (0.81)	8948.7 (0.91)
活荷重 反力	kN	3329.9	3338.6	3338.6	3350.1	3330.3
合計 反力	kN	13210.7 (1.00)	14038.1 (1.06)	13440.9 (1.02)	11372.7 (0.86)	12279.0 (0.93)

※上記は中間橋脚である P2 橋脚の反力を示す

※ () 内の数字は第1案を基本とした反力の比率を示す。

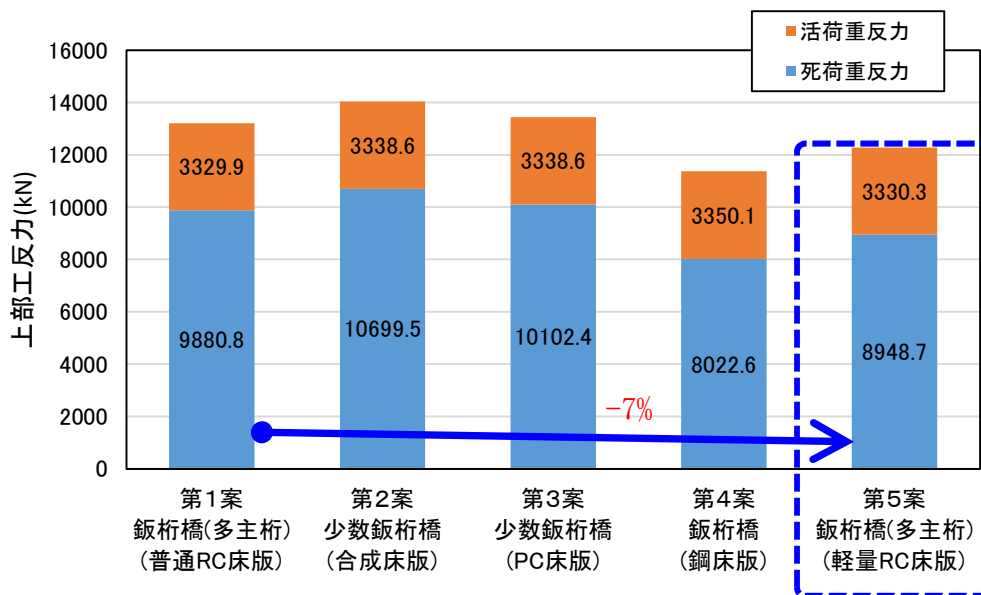


図 6-26 上部工反力比較グラフ

(2) 基礎構造

各検討ケースの算出した基礎構造を表 6-19 に示す。第5案の今回開発した床版構造は杭本数が最も少なくなることが確認できた。

表 6-19 基礎構造比較

	第1案 鈹桁橋(多主桁) (普通RC床版)	第2案 少数鈹桁橋 (合成床版)	第3案 少数鈹桁橋 (PC床版)	第4案 鋼床版 鈹桁橋	第5案 鈹桁橋(多主桁) (軽量RC床版)
上部工鋼重 (t)	703	601	592	1,500	667
下部工 コンクリート (m3)	1,245	1,306	1,306	1,088	1,245
杭本数 (本)	20	22	22	20	18

(2) 概算工事費

各検討ケースの算出した概算工事費を表 6-20 に、比較したグラフを図 6-27 に示す。第 5 案の今回開発した床版が最も経済的であることが確認できた。

表 6-20 概算工事費比較

ケース	第 1 案 鉸桁橋(多主桁) (普通 RC 床版)	第 2 案 少数鉸桁橋 (合成床版)	第 3 案 少数鉸桁橋 (PC 床版)	第 4 案 鉸桁橋 (鋼床版)	第 5 案 鉸桁橋(多主桁) (軽量 RC 床版)
上部工概算工事費	856,509 (1.00)	760,507 (0.88)	778,706 (0.91)	1,512,589 (1.77)	841,395 (0.98)
下部工概算工事費	1,504,859 (1.00)	1,625,295 (1.08)	1,609,623 (1.07)	1,456,190 (0.97)	1,457,691 (0.97)
合計	2,361,368 (1.00)	2,385,802 (1.01)	2,388,329 (1.01)	2,968,799 (1.26)	2,299,086 (0.97)

※単位は千円

※ () 内の数字は第 1 案を基本とした概算工事費の比率を示す。

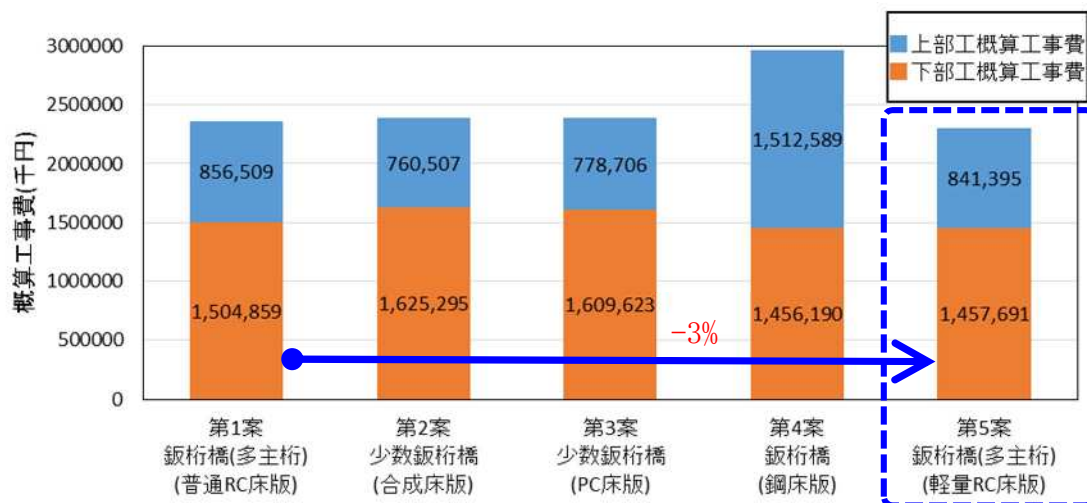


図 6-27 概算工事費比較グラフ

6.5.6 首都高速横浜北線(新横浜出入口)におけるコスト削減規模

首都高速横浜北線(新横浜出入口)の当初設計は普通 RC 床版であったことから、設計変更により軽量 RC 床版を採用した。軽量 RC 床版を採用することによるコスト削減規模(実績)について整理した。

(1) 主な変更要因

1) コスト増加要因

- ・普通コンクリートを軽量コンクリートに変更することで、材料費が約 3 倍高くなる。
- ・軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて鉄筋との付着力が弱いことから、重ね継手長と付着長が長くなるため鉄筋量が増える。

2) コスト削減要因

- ・普通コンクリートから軽量コンクリートに変更することで、約 20% 床版重量が軽くなるため、桁重量が軽くなり、下部工設計反力も小さくなる。

3) その他

- ・設計方法としては変わらないため、床版厚さ(コンクリート量)は変わらない。

(2) コスト削減規模 (YK13 工区 (2) ~YK21 工区上部工事)

1) 前提条件

- ・下部工は上部概算・下部実施設計の成果で施工中。(軽量床版を考慮できていない)
- ・上部工は普通RC床版で概算設計済み。
- ・RC床版の材料は普通コンクリートで計上。

2) 算出結果

- ・上部工重量が約10%削減されることにより、コストは総工事費に対して9%削減された。
- ・コンクリート材料費が35,000円/m³(経費込17,000円/m³⇒52,000円/m³)高くなることにより、コストは総工事費に対して4.9%増額された。
- ・鉄筋量の増加に伴い、コストは総工事費に対して0.8%増額された。
- ・よって、コストは総工事費に対して3.3%削減された。

(3) まとめ

下部工事は施工済みであったため、軽量RC床版の採用による上部工反力の軽減効果を下部構造に反映させることができなかったが、上部工事のみでも総工事費に対して3.3%の削減規模であった。

6.5.7 まとめ

膨張材併用軽量床版の適用性に関する検討結果について、以下の結果を得た。

- (1) 今回検討した5案について最適桁高の検討を行った結果、合成床版およびPC床版は桁高2700mm、普通RC床版は2100mm、軽量RC床版は2000mm、鋼床版は1800mmが最適桁高であるという結果が得られた。
- (2) 上部工反力は、橋長180m、支間長45m、直線線形という条件下において、軽量RC床版を用いた多主鈹桁は、普通RC床版と比べて全体死荷重で9%程度軽量になる結果が得られた。また、鋼床版鈹桁との比較では、鋼床版鈹桁のほうが死荷重は10%程度軽量になる結果が得られた。
- (3) 下部工形状は、鋼床版鈹桁のケースが、柱寸法が小さくなることや杭本数が少なくなることから、1基当たりの工費が最も経済的であった。軽量RC床版のケースにおいても、少数鈹桁のケースと比較して多少杭本数が少なくなる傾向も見られた。
- (4) 橋梁全体での経済性比較結果について、多主鈹桁(軽量RC床版)が最も経済性に優れる結果であった。少数鈹桁橋(合成床版)や少数鈹桁橋(PC床版)、多主鈹桁(普通RC床版)との差は3~4%程度であった。

6.6 第6章のまとめ

今回開発した膨張材併用軽量床版の耐疲労性は軽量コンクリート2種に適量の膨張材を混和することで、鉛直方向の膨張ひずみにより内部が損傷するマイナスの要素を少なくでき、また、ケミカルプレストレス効果により押抜きせん断耐力が大きくなるプラスの要素を作用させることで、普通RC床版と同等の耐疲労性が得られる結果となったと考えられる。

また、膨張材併用軽量床版と他の床版構造との優位性に関する検討の結果、少数鈹桁橋(合成床版)や少数鈹桁橋(PC床版)、多主鈹桁(普通RC床版)と比べて上部工反力を軽減できることから杭本数を少なくでき、コスト削減が可能である。多主鈹桁(普通RC床版)と比較すると3~4%程度のコスト削減が可能である。

6.7 今回開発した膨張材併用軽量 RC 床版の要点

膨張材は混和量が多い場合に、床版の鉛直方向に大きな膨張ひずみが発生することが課題として挙げられたが、混和量を変化させた膨張性試験を実施した結果、軽量コンクリートに対して 20 型膨張材を標準混和量だけ混和することでケミカルプレストレスが導入することが確認できた。併せて床版厚 25cm の実物大の輪荷重走行試験を実施したところ、普通 RC 床版と比較して同等の耐疲労性を有することが確認できた。以上のことから、通常の床版配筋に対して 20 型膨張材を標準混和量だけ混和することで普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有し、かつ 9 % 程度軽量化できる床版が開発できた。また、軽量コンクリートの圧送性については、軽量骨材の圧力吸水やミキサの形式によってはコンクリート内に強固で不飽和な凝集体が残存することで、閉塞による圧送の困難さが課題となっていたが、夏季と冬季の両方でポンプ圧送試験を実施した結果、最小の単位水量 ($W=165 \text{ kg/m}^3$) からわずかに $+5 \text{ kg/m}^3$ の $W=170 \text{ kg/m}^3$ とすることによって、問題なく圧送できることが確認できた。以上のことから、どの種類の膨張材を使用しても年間を通して安定して圧送できる汎用的な施工技術を開発することができた。なお、ポンプ圧送は困難であるが、軽量骨材として低含水量品を使用することにより耐凍害性も付加することも可能である。

本研究により得られた実用化にあたっての要点は以下の通りである。

【今回開発した軽量床版の実用化にあたっての要点】

- ・コンクリートの種類 : 普通ポルトランドセメント
- ・骨材 : 細骨材・粗骨材ともに人工軽量骨材
- ・水粉体結合比 (W /B) : 37%
- ・細骨材率 (s/a) : 48.6%
- ・単位水量 : 170 kg/m^3
- ・設計基準強度 : 40 N/mm^2
- ・スランプ : $18 \text{ cm} \pm 2.5 \text{ cm}$
- ・空気量 : $4.5\% \pm 1.5\%$
- ・床版の配筋 : 床版の一般的な配筋
- ・耐凍害性※ : 軽量細骨材と軽量粗骨材に低含水量品を使用

※ポンプ圧送は難しいため、バケット打ちによる施工が必要。

【第6章の参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編，(2012)
- 2) 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国総研資料第28号，(2002)
- 3) 国土技術政策総合研究所 他：道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究，国総研資料第472号，(2008)
- 4) 岸田政彦，副島直史，池末和隆，春日井俊博：膨張材併用軽量RC床版の輪荷重走行試験による耐疲労性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38，No. 2，pp. 1387-1392，(2016)
- 5) コンクリート標準示方書 施工編，土木学会，(2012)
- 6) 膨張コンクリート設計施工指針，コンクリートライブラリー75，土木学会，(1993)
- 7) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，pp. 9-60，森北出版，(2007)

第7章 結論

本研究では普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有し、かつ、全国的に年間を通して圧送可能な膨張材併用軽量 RC 床版の開発を主目的として、その目的を達成するために以下に示す第 1、第 2、第 3 の目的について検討を行った。

【第 1 の目的（耐疲労性）】

軽量 RC 床版の耐疲労性上の弱点を補う材料として膨張材に着眼し、軽量コンクリートと膨張材を併用することにより現行の道路橋示方書で設計した普通 RC 床版と比べて同等以上の耐荷力と耐疲労性を有する膨張材併用軽量 RC 床版の開発を行う。

【第 2 の目的（圧送性）】

本研究で開発する膨張材併用軽量 RC 床版に用いるコンクリートは軽量コンクリート 2 種であり、土木分野での実績はほとんどないことから、ポンプ圧送試験を実施し、圧送が困難となる影響要因と機構について検討を行い、年間を通して圧送可能な施工条件（配合設計、練り混ぜ機構、ポンプ車の選定等）の明確化を行う。

【第 3 の目的（耐凍害性）】

軽量コンクリート 2 種のコンクリート中の空気量と軽量骨材の含水状態に着目し凍結融解試験を実施することで耐凍害性の改善方法を見出し、寒冷地へ適用できる膨張材併用軽量床版の開発を行う。

本研究において得られた結論は以下のとおりである。

第 2 章では膨張材併用軽量 RC 床版を首都高速道路の横浜北線（新設路線）へ採用することを目的として耐疲労性と圧送性の検討を行った。主な成果と課題は以下のとおりである。

【耐疲労性】

- (1) 20 型の膨張材を 30kg/m^3 混和した膨張材併用軽量 RC 床版は活荷重たわみと走行回数の関係より、破壊時の走行回数が RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置した。また、物性試験の結果から強度補正した走行回数を換算した場合も、RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置した。
- (2) 膨張材併用軽量 RC 床版は圧縮側の水平ひび割れが層状に数多く分布する特徴が見られた。また、下面ひび割れは鉛直方向のずれがほとんど生じなかった。これはコンクリート内部でひび割れが複数発生していたため、下面ひび割れの鉛直方向のずれが生じずに床版たわみが増加したものと考えられる。
- (3) 膨張材併用軽量 RC 床版の破壊に至るメカニズムとしては、内部ひび割れが増加し進展した結果、圧縮側と引張側の内部の多数のひび割れが連結し、版としての連続性を喪失したわみが増加したと考えられる。
- (4) 膨張材併用軽量 RC 床版は松井理論式の普通 RC 床版の S-N 曲線よりも右方に位置していることから、耐疲労性に優れることが分かった。

【圧送性】

- (1) 事前検討にて選定した単位水量 165kg/m^3 の配合において水平換算距離が 151m で実施したポンプ圧送試験において閉塞や材料分離を起こすことなく圧送できる条件を確認した。
- (2) 連続らせん羽根ミキサで練混ぜた軽量コンクリートの圧送性は相対的に劣ることを確認した。これは、軽量骨材の密度が小さいために不飽和で強固な凝集体が解砕されず、コンクリート中に残存したためと考えた。
- (3) 連続らせん羽根ミキサで軽量コンクリートを練混ぜる場合、混和剤は AE 減水材（高機能タイプ）より高性能 AE 減水材の方が圧送性は改善される。ただし、所要のスランプを得るための高性能 AE 減水材の使用量は極めて少なく済むため、圧送性の観点から高性能 AE 減水材の使用量を更に増やすということを容易に行うことはできなかった。

- (4) 軽量コンクリートを二軸強制練りミキサで練混ぜることで、圧送性は大幅に改善される。これは、二軸強制練りミキサの羽根の回転によりコンクリートにせん断力が伝達されることにより不飽和で強固な凝集体が解砕され、大幅に少なくなったためであると考えられる。

首都高速道路の横浜北線への採用に向けての検討および実施工により実用化に向けて克服すべき課題が抽出された。耐疲労性では、実床版を模擬した供試体を用いて輪荷重走行試験を行った結果、普通 RC 床版と同程度の耐疲労性を有することは確認できたが、小型供試体を用いた試験結果と比較して明らかに劣る結果となった。膨張材の混和量は標準混和量の 1.5 倍である 30kg/m^3 を混和して供試体を用いて試験を行なったが、実床版サイズにおける膨張特性の把握が不十分であったことから耐疲労性が予想より劣る結果となった可能性がある。そこで、膨張材の混和量と膨張ひずみの関係を把握した上で、実床版における適切な混和量を設定することが課題として抽出された。圧送性としては、実施工に向けて数多くのポンプ圧送試験を行ったものの、確実に圧送できる施工条件にたどり着くことができなかった。また、今回は春季の施工であったため、配管を省略することにより施工は完了したわけであるが、夏季や冬季の施工は春季と比較すると圧送条件は厳しくなる。実用化に向けては年間を通して確実に施工できることが必要となることから、年間を通して確実に圧送できる施工条件の明確化が課題として抽出された。

第 3 章では膨張材併用軽量 RC 床版を首都高速道路の横浜北線へ採用した際に新たに抽出された実床版における 20 型膨張材の最適な混和量をの設定するために、各要素試験を行うとともに、膨張材の混和量によりコンクリートおよび鉄筋の膨張ひずみがどのように変化するか、また、供試体内部の各方向（橋軸、橋直および鉛直方向）における膨張ひずみが配筋によりどのような影響を受けるのかについて検討を行った。主な成果と課題は以下のとおりである。

【膨張特性】

- (1) 軽量コンクリート 2 種は、普通コンクリートにおける収縮補償の膨張率となる混和量を混和することでケミカルプレストレス用コンクリートに相当する膨張ひずみが発生することを確認した。理由としては、普通骨材と比較して軽量骨材の剛性が小さいことと軽量骨材界面の摩擦力が小さいことからセメントペーストの膨張力を阻害しなかったためであると考えられる。
- (2) RC 床版供試体を用いた本試験で得られた膨張材混和量とコンクリートひずみおよび導入圧縮応力(ケミカルプレストレス力)の関係から RC 床版供試体で計測したコンクリートひずみは、全てにおいて EX-30 が最も大きい傾向を示した。配合にかかわらず膨張ひずみは試験開始から 10 日でほぼ収束し、その後も膨張ひずみは維持されている。これは普通コンクリートと膨張材を併用した膨張材併用普通 RC 床版とは異なる傾向であり、軽量骨材の内部養生効果によるものと考えられる。
- (3) RC 床版供試体は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の拘束供試体と異なり、材齢 120 日でもほとんど収縮が見られなかった。これは、軽量骨材の内部養生効果と、単位体積当りの表面積が小さい実構造物サイズであったことから乾燥の影響を受けにくかったと考えられる。
- (4) 夏場の温度条件において実験を行った結果、軽量コンクリート 2 種に 20 型膨張材を標準混和量である 20kg/m^3 混和すれば橋軸直角方向に 1.2N/mm^2 相当の圧縮応力が導入できることを確認した。

第 4 章では第 3 章の結果を踏まえて 20 型膨張材を標準混和量である 20kg/m^3 混和した膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性と膨張材併用軽量コンクリートの圧送性の検討を実施した。主な成果と課題は以下のとおりである。

【耐疲労性】

- (1) 20 型膨張材を標準混和量である 20kg/m^3 混和した膨張材併用軽量 RC 床版 (以下、軽量 RC-20) の破壊時の走行回数は標準混和量の 1.5 倍である 30kg/m^3 混和した膨張材併用軽量 RC 床版 (以下、軽量 RC-30) とほぼ同等であり、また、普通 RC 床版である RC8n-1 と RC8n-2 の間に

位置した。物性試験の結果から強度補正をした走行回数に換算しても軽量 RC-30 とほぼ同等であり、また、RC8n-1 と RC8n-2 の間に位置した。

- (2) 軽量 RC-20 に導入された圧縮応力は、軽量 RC-30 と比べて約半分しか導入されなかったが、破壊時の走行回数が普通 RC および軽量 RC-30 と同等であった。
- (3) 軽量 RC-20 供試体を切断した断面のひび割れ分布の特徴としては、特に橋軸直角方向について、ひび割れの角度が普通 RC 床版よりやや緩やかなこと、上鉄筋付近に層状に水平ひびわれが発生することであり、これは軽量 RC 床版のひび割れ分布の特徴であると考えられる。
- (4) 軽量 RC-20 は松井理論式の普通 RC の S-N 曲線よりも右方に位置し、耐疲労性に優れることがわかった。

【圧送性】

- (1) 最小の単位水量 ($W=165 \text{ kg/m}^3$) からわずかに $+5 \text{ kg/m}^3$ の $W=170 \text{ kg/m}^3$ とすることによって、所要の圧送性を確保できることを確認した。これにより膨張材併用軽量コンクリートについて、単位水量の少ない土木用の配合でも確実に圧送できる施工条件を明確化することができた。
- (2) 膨張材併用軽量コンクリートの過去の圧送性試験から、加圧ブリーディング試験から得られる最終脱水率を縦軸に、ブリーディング試験から得られるブリーディング率を横軸にプロットすることで、軽量コンクリートの練り具合を加味できる圧送性指標を提案できた。

膨張材併用軽量 RC 床版を横浜北線に採用した際に抽出した克服しなければならない課題に対して引続き検討した結果、実用化できることを確認した。まず、耐疲労性であるが、軽量コンクリート 2 種に 20 型膨張材を普通コンクリートの標準混和量である 20 kg/m^3 混和すれば普通 RC 床版と同程度の耐疲労性を有することを確認できた。次に、圧送性であるが、夏季と冬季の両方でポンプ圧送試験を実施した結果、膨張材併用軽量コンクリートは単位水量の少ない土木用の配合でも単位水量 ($W=165 \text{ kg/m}^3$) からわずかに $+5 \text{ kg/m}^3$ の $W=170 \text{ kg/m}^3$ とすることによって、所要の圧送性を確保できる施工条件を明確化することができた。

第 5 章では膨張材併用軽量 RC 床版の寒冷地への適用を目指して空気量や軽量骨材の含水状態を変化させて凍結融解試験を行った。主な成果と課題は以下のとおりである。

【耐凍害性】

- (1) 軽量コンクリート 2 種の耐凍害性は、セメントペースト部における損傷の影響よりも、軽量骨材中に存在する水の凍結による損傷の影響の方がはるかに大きく先行して進行すると考えられる。
- (2) W/B が 37% では、軽量細骨材と軽量粗骨材の両方を低含水状態とし、軽量骨材内部の水分を排除することで耐凍害性を確保できることを確認した。
- (3) W/B が 25.8% のように低水結合材比の場合には、軽量粗骨材のみを低含水产品とすれば、軽量細骨材は含水产品であっても耐凍害性は確保できることを確認した。
- (4) 軽量細骨材は粒形が小さいため、比較的容易に水分が排出することに加えて、低水結合材比の場合、水和に必要な水分が不足している。このため、軽量細骨材中の水分が自己乾燥状態にあるペースト部に供給されることで、軽量細骨材の含水率が低下し、耐凍害性が改善されたと推察される。なお、今回の効果は、内部養生効果と表裏一体の関係にある効果であることに留意する必要がある。

第 6 章では今回開発した膨張材併用軽量 RC 床版の耐疲労性および試設計を行うことによりコスト削減効果について評価を行った。主な成果と課題は以下のとおりである。

【耐疲労性】

- (1) 軽量 RC-0 は鉛直方向の膨張ひずみにより内部が損傷を受けるマイナスの要素はないものの、膨張ひずみによるケミカルプレストレス効果により押抜きせん断耐力が大きくなるプラスの要素もない。軽量 RC-0 のせん断強度は普通コンクリート (27 N/mm^2) のせん断強度 (4.83 N/mm^2) 以上発現していたものの、破壊面の角度が普通 RC 床版と同等では、軽量骨材の強度が普通骨材と比べて弱いいため普通 RC 床版より耐疲労性が劣る結果となった。

- (2) 軽量 RC-30 は膨張ひずみによるケミカルプレストレス効果により押抜きせん断耐力が大きくなる。プラスの要素があるものの、鉛直方向の膨張ひずみにより内部が損傷を受けるマイナスの要素との綱引きの結果、普通 RC 床版と同等の耐疲労性となったと考えられる。
(小型供試体は床版厚さが 16cm と薄かったため、マイナスの要素が限定的であったと考えられる。)
- (3) 軽量 RC-20 は軽量 RC-30 から膨張材を減らすことで鉛直方向の膨張ひずみにより内部が損傷するマイナスの要素が限定的であり、ケミカルプレストレス効果により押抜きせん断耐力が大きくなるプラスの要素が作用することで、今回開発した膨張材併用軽量 RC 床版（軽量 RC-20）は普通 RC 床版と同等の耐疲労性となったと考えられる。
- (4) 上部工反力は、橋長 180m, 支間長 45m, 直線線形という条件下において、膨張材併用軽量 RC 床版を用いた多主鈹桁は、普通 RC 床版と比べて全体死荷重で 9%程度軽量になる。また、鋼床版鈹桁との比較では、鋼床版鈹桁のほうが死荷重は 10%程度軽量になる。
- (5) 橋梁全体でコスト比較を行った結果、多主鈹桁（膨張材併用軽量 RC 床版）が最も経済性に優れる結果であった。少数鈹桁橋（合成床版）や少数鈹桁橋（PC 床版）、多主鈹桁（普通 RC 床版）との差は 3~4%程度であった。

本研究で明らかになった成果を目的ごとに以下のとおり整理した。

【第 1 の目的（耐疲労性）】

軽量コンクリート 2 種と膨張材との併用による道路橋床版の耐疲労性の検討事例はこれまでにはなかった。本研究により軽量コンクリートに 2 種に 20 型膨張材を標準混和量である 20 kg/m³ を併用することで十分なパフォーマンスが得られる道路橋床版が開発できた。

【第 2 の目的（圧送性）】

横浜北線に軽量 RC 床版を採用するにあたり検討会を立ち上げた。その過程で軽量コンクリート 2 種の単位水量を 170 kg/m³ とすればミキサの種類によらず圧送可能であることが確認でき、施工性の観点で問題のない施工条件を明確にすることができた。

【第 3 の目的（耐凍害性）】

CART 採択時に全国展開を想定した軽量 RC 床版の開発を要望されたことから研究を開始した。研究の結果、低水セメント比配合では粗骨材のみ低含水量を用いれば耐凍害性は改善できることが確認でき、軽量コンクリート 2 種を用いた軽量 RC 床版の耐凍害性の改善策を見出すことができた。

本研究により、普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有し、かつ、全国的に年間を通して施工可能な膨張材併用軽量 RC 床版を開発することができた。今後、膨張材併用 RC 床版が全国的に施工されることを期待したい。

謝 辞

東京大学 岸利治教授には、本研究の遂行にあたり、膨張材併用軽量RC床版の横浜北線への採用に向けて立ち上げた「膨張材併用軽量コンクリートに関する検討会」の委員や横浜北線への採用後、実用化に向けて応募し採択された「生産性向上とライフサイクルの削減に資する膨張材併用軽量床版の研究開発」の研究代表者として、また、論文作成の過程におきましては、論文審査の主査として、終始懇切丁寧なご指導を賜りました。ここに深い感謝の意を表すとともに、厚く御礼申し上げます。

また、論文審査の段階で副査として、有益なご助言、ご指導賜りました、横浜国立大学 前川宏一教授、東京大学 石田哲也教授、横浜国立大学 細田暁教授、東京大学 酒井雄也准教授には、厚く御礼申し上げます。

本研究の内容につきましては、「膨張材併用軽量コンクリートに関する検討会」におきまして、岸利治教授、日本大学 岩城一郎教授、大内雅博氏、秋元泰輔氏らにお忙しい中、多くの時間を割いて頂き、膨張材併用軽量コンクリートの基礎研究の段階から横浜北線における膨張材併用軽量RC床版の施工に至るまで並々ならぬご指導、ご助言を賜りました。深く感謝いたします。更に、横浜北線への採用後は、本技術の実用化に向けて、国土交通省道路局が設置する新道路技術会議における技術研究開発制度により、国土交通省国土技術政策総合研究所から委託された「生産性向上とライフサイクルの削減に資する膨張材併用軽量床版の研究開発」におきまして、岸利治教授、岩城一郎教授、東京大学 鎌田知久助教にご指導、ご助言を賜りました。深く感謝いたします。

そして、このような特別な研究業務に携われる機会を与えていただいた首都高速道路株式会社に感謝するとともに、本研究を進めるにあたり、ご理解、ご支援をいただいた大島健志代表取締役専務執行役員、土橋浩執行役員、鶴田和久局長、田嶋仁志部長、高橋三雅本部長、川田成彦部長ら諸先輩の方々、また、研究に深い理解を示し、共に研究を推し進めた磯部龍太郎氏、内海和仁氏、副島直史氏ら数多くの方々に深く感謝いたします。特に田嶋仁志部長には、研究開発の段階や論文執筆の段階で数々のご指導、ご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

なお、本研究における実験の遂行、データ整理、各種解析、膨張材併用軽量RC床版技術資料（案）の作成等におきましては、群馬大学 辻幸和名誉教授、国土館大学 津野和宏教授、中澤治郎氏、土屋智史氏、春日井俊博氏、北村耕一氏、五十嵐数馬氏、宮口克一氏、成川史春氏、肥後康秀氏ら多くの関係諸氏の方々に、並々ならぬご援助、ご協力をいただきました。ここに、心より敬意を表し、厚く御礼申し上げます。

最後に、本論文の完成を心待ちにしながら、令和2年1月22日に永眠した父に、この論文を捧げるとともに、常に温かく見守ってくれた母、筆者の論文執筆を応援してくれた長男 隆之介、次男 陵汰、いつも筆者を励まし、サポートしてくれた妻 由香に深く感謝の意を表し、本論文の謝辞といたします。