

道路政策の質の向上に資する技術研究開発  
成果報告レポート  
No. 29-6

研究テーマ

生産性向上とライフサイクルコストの削減に資する  
膨張材併用軽量床版の研究開発

研究代表者：東京大学教授	岸 利治
共同研究者：日本大学教授	岩城 一郎
東京大学助教	鎌田 知久
首都高速道路技術センター 審議役	田嶋 仁志
首都高速道路（株）課長	白鳥 明
首都高速道路（株）課長代理	内海 和仁
首都高速道路（株）課長	岸田 政彦

令和元年 7 月

新道路技術会議

## 目 次

研究概要（様式 3 を挿入） .....	1
第 1 章 はじめに .....	3
第 2 章 膨張材併用軽量コンクリートの膨張特性 .....	4
第 3 章 圧送性確保のための検討 .....	10
第 4 章 「松」の耐疲労性に関する検討 .....	15
第 5 章 「松」の耐疲労性に関する検討 .....	21
第 6 章 凍結融解抵抗性に関する検討 .....	27
第 7 章 膨張材併用軽量床版のコスト縮減効果 .....	34
第 8 章 まとめ .....	37
参考文献 .....	38

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 29 年度採択)**  
**研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.29-6	生産性向上とライフサイクルコストの削減に資する膨張材併用軽量床版の研究開発	東京大学 教授 岸 利治

生産性向上とライフサイクルコストの削減に資する膨張材併用軽量床版を実用化するため、耐疲労性と圧送性の検討を研究目的として、実物大供試体を用いた輪荷重走行試験と、夏季と冬季のポンプ圧送試験および凍結融解試験を実施して、膨張材併用軽量床版の研究開発を行った。

### 1. 研究の背景・目的

生産性向上とライフサイクルコストの削減に資する膨張材併用軽量コンクリート床版の研究開発を目的に、膨張材の混和量を調整した膨張材併用軽量コンクリート床版に関して、輪荷重走行試験による耐疲労性の検討、圧送性に関する試験による施工性の検討および耐凍害性の検討を実施し、膨張材併用軽量コンクリート床版のメリットを確実に引き出せる膨張材併用軽量コンクリートの仕様と床版の構造細目(床版厚、縦筋等)を明らかにすることを目標とした。橋梁上部構造の床版に軽量コンクリートを使用することができれば、上部構造の死荷重低減に伴う下部構造の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。

### 2. 研究内容

平成 29 年度には膨張材併用軽量コンクリートに膨張材を標準量程度使用するだけでケミカルプレストレスを導入することが可能であり、普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有する現場汎用性を重視した床版のメニューを開発した(これを床版「松」と称する)。また、平成 30 年度には前年度の結果を踏まえ、膨張材量を増やしてケミカルプレストレスを積極的に導入し、かつ低水セメント比として高強度化を図ることで自己治癒性能も期待できるコンクリート仕様とすると共に、床版厚を薄くして縦筋を配置することにより更なる軽量化と高耐久化を図った最上級メニューとしての床版「松」を開発した。耐疲労性に関する検討では実物大供試体を用いた輪荷重走行試験を、圧送性確保のための検討では水平換算距離約 150m を想定したポンプ圧送試験を、また、耐凍害性に関する検討では JIS による凍結融解試験を実施した。

### 3. 研究成果

#### 「松」(現場汎用性重視上級床版)

①単位水量の少ない土木用の配合で軽量コンクリートをポンプ圧送により確実に施工する技術を構築した。

②床版鉛直方向に対する過大膨張を抑制しつつ、橋軸、橋軸直角方向に耐疲労性向上に資するケミカルプレストレスを導入可能な最適な膨張材量を膨張試験により確認した。

③過去に土木研究所が実施した普通 RC 床版の輪荷重走行試験結果と同等の耐疲労性を有することを確認した。(図-1 参照)

④通常の軽量コンクリート 2 種では、空気量を増加させても耐凍害性の改善は認められず、使用する軽量粗骨材と軽量細骨材の骨材中の飽水度を事前に下げておくことで、耐凍害性が改善することを確認した。(図-2 参照)

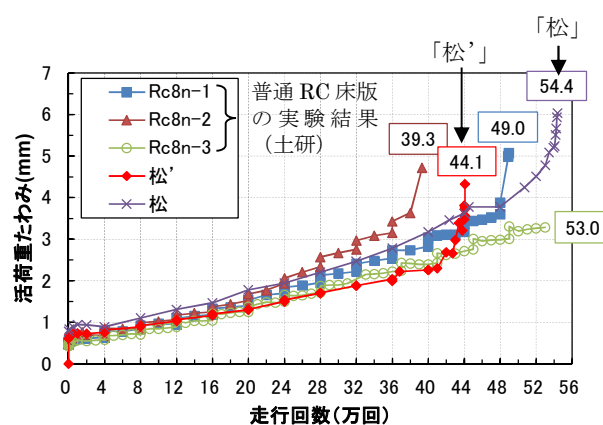


図-1 輪荷重走行試験結果

「松」は普通 RC 床版と同程度の耐疲労性を有する現場打ちコンクリート床版であり、後述する「松」に比べると施工費が安価であり、軽量コンクリートを活用した軽量化によって、上下部工の製作・施工コストを低減することができる汎用性を重視した軽量コンクリート床版である。

## 「松」(最上級プレミアム床版)

①過去に土木研究所が実施した普通 RC 床版の輪荷重走行試験結果と比較して優れた耐疲労性を有することを確認した。

(図-1 参照)

②通常の軽量コンクリート2種では空気量を増加させても耐凍害性の改善は認められないが、水分を含む通常の軽量細骨材を用いても、軽量粗骨材が低含水状態であれば、軽量細骨材中の水分が低水セメント比のペースト部に供給されて軽量細骨材の含水率が低下することで、耐凍害性が改善されることを凍結融解試験結果から明らかにした。(図-3 参照)

「松」は、鉛直方向への拘束鉄筋配置と収縮補償を超えた膨張材使用のマッチングによってもたらされた3次元ケミカルプレストレス効果によって、普通 RC 床版と比較して厚さを3cm薄くした床版であっても、普通 RC 床版を上回る耐疲労性を有する最上級プレミアム床版である。

### 4. 主な発表論文

#### 1. 圧送性に関する検討

内海和仁、岸田政彦、田中伸幸、村松達也、岸利治、鎌田知久：年間を通して圧送可能な軽量コンクリート2種の配合検討、土木学会年次講演会2019

#### 2. 耐疲労性に関する検討

岸田政彦、田嶋仁志、北村耕一、岸利治：膨張材を混和した軽量 RC 床版の耐疲労性に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.41、No.2、2019、pp715-720(2019)

### 5. 今後の展望

首都高速道路内においては、パイロット工事等を計画し、実施可能であれば、必要に応じて、施工データ収集等を行う。また、本技術は全国的に適用可能と判断されるため、コスト削減に資する新技術として橋梁形式の選定段階で比較案に挙がるよう、橋梁設計エンジニア（事業者、建設コンサルタント協会など）へのPR活動（NETISへの登録、新技術の審査証明を含む）を実施する。さらに、本技術の海外への展開も可能ではないかと考えている。床版へのケミカルプレストレスの導入は、膨張材を混和するだけの追加作業で実施でき、機械式のプレストレスと比較すると高度な品質管理を必要としないため、軽量骨材と膨張材が手配できれば、海外でも容易に高耐久な床版を製作できる。なお、国内で製作したプレキャスト製品を海外へ輸出する場合でも、製品が軽量であるため、輸送コストは安く抑えられる。

### 6. 道路政策の質の向上への寄与

本技術を適用した場合、軽量化による上部工鋼桁及び下部工・基礎工がコンパクトになることによって生まれるコスト削減効果に加え、下部構造に対しての荷重制限が厳しい箇所や既設床版が軽量床版で施工されている箇所、および1971（昭和46）年以前の基準で床版厚が薄い箇所などの大規模更新・大規模修繕に貢献できる。さらに、昨今「国土強靱化（ナショナル・レジリエンス）」が推進される中で、大規模地震への震災対策として、床版の死荷重の低減効果（「松」においては2割減、「松」においては3割減）を有効活用することで、実質的に補強工事が困難な既設の基礎構造物の耐震性の向上を図ることも可能である。また、最上級プレミアム床版である「松」は、特殊な技術が必要とされる緊張作業を用いないため、鉄筋コンクリートが扱えるプレキャスト工場であれば製造が可能であり、製品生産を短期間に大量に行えるメリットは、そのまま生産性の向上と現場工期短縮につながる。

なお、「松」は、試算では、従来形式の床版を用いた場合から7%のコスト削減が可能であると期待されることから、この新技術の活用促進を図ることで、道路行政の質の向上に大いに貢献できる。

### 7. ホームページ等

査読付き論文への投稿や、国内外の学会発表などに積極的に参加し、研究成果を継続的に発信している。

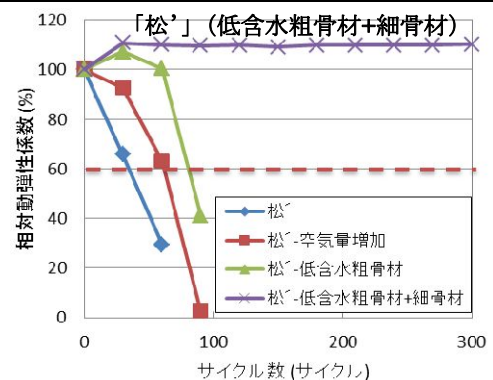


図-2 凍結融解試験結果 床版「松」

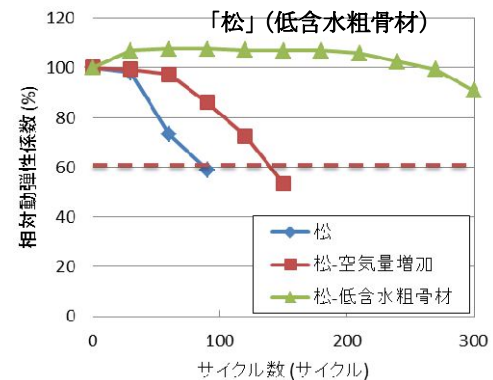


図-3 凍結融解試験結果 床版「松」

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の背景及び目的

旧首都高速道路公団では、軽量コンクリートのメリットにいち早く着目し、1964（昭和 39）年から積極的に道路床版へ採用した実績があるが、骨材の吸水特性からポンプ施工が難しく、省力化施工になじまないこと等を理由に次第に減少していった。

近年の施工実績としては、2008（平成 20）年 8 月に首都高速道路 5 号池袋線の熊野町付近で発生した火災事故により被災した床版が 1975（昭和 50）年頃に建設された軽量コンクリート床版であり、再度軽量コンクリート床版を用いて復旧された。この際、被災箇所近傍の軽量コンクリート床版（厚さ 22cm 程度）は、ほとんどクラックも生じておらず、健全であることが確認された。

上記のような背景もあり、高耐久化かつコスト削減効果を期待して、ケミカルプレストレスを導入した膨張材併用軽量コンクリート床版の開発に着手した（耐疲労性、圧送性等の試験を実施）<sup>1)</sup>。

その結果、特定の条件下においてはケミカルプレストレスを導入した膨張材併用軽量コンクリート床版を適用できることを確認できたため、2015（平成 27）年 3 月に首都高速横浜北線にてパイロット施工を実施した<sup>2)</sup>。このパイロット施工を通じて、実用化に向けて克服すべき課題を抽出した。

膨張材併用軽量床版の実用化は、床版の軽量化と耐疲労性の向上により、補修・補強を含む道路橋の生産性向上とライフサイクルコストの削減に資するものと考えている。

## 1.2 研究により期待される具体的な成果及び成果による道路政策への貢献

### (1) 研究により期待される具体的な成果

軽量骨材と膨張材を併用することで、初期に発生するひび割れ防止対策、または、ケミカルプレストレスの導入等により、軽量でかつ高耐久な床版の実用化を目指した。

### (2) 成果による道路政策への貢献

本技術を適用することにより、下部構造に対して

荷重の制限が厳しい箇所や既設床版が軽量床版で施工されている箇所や 1971（昭和 46）年以前の基準で床版厚が薄い箇所の大規模更新、大規模修繕に貢献できる。（単位体積重量は普通 RC 床版の 80%）

また、新規構造物に適用した場合、軽量コンクリートの採用に伴う床版の死荷重の低減により、コスト削減効果が期待できる。

## 1.3 研究の目標と達成時期

開発を想定している軽量床版のシリーズを表-1 に示す。研究着手段階では、グレード順で「松」、「竹」、「梅」（「梅」は、首都高で実施）の 3 種類の枠組み、幅広い用途での活用を考えていたが、「竹」に相当する膨張材を標準添加量程度（量の目安：一般には収縮補償程度とされる混和量で低添加型タイプ 20kg/m<sup>3</sup>）混和した場合でも床版供試体にケミカルプレストレスが導入されることによって、輪荷重走行試験において普通 RC 床版と同等の耐久性が確認されたことから、「竹」を「松」＝単位膨張材混和量 20kg/m<sup>3</sup>）として扱うこととした。さらに、平成 30 年度は、高耐久仕様の「松」ケースの開発に着手し、更なる軽量化と高耐久化を図った床版の開発を目指した。また、圧送性に関する検討は、現場汎用性を重視した床版「松」を対象、凍害に対する抵抗性に関する検討は「松」と「松'」を対象とし、生産性向上とライフサイクルコストの削減に資する膨張材併用軽量床版の技術を構築する。

表-1 開発を想定している軽量床版のシリーズ

	年度ごと研究経緯	開発名称
H29 年度	膨張材を標準量程度の混和することで、ケミカルプレストレスが導入でき、普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有する床版を開発した。	現場汎用性重視上級床版「松'」
H30 年度	H29 年度の結果を踏まえ、膨張材量をさらに増やし、ケミカルプレストレスを積極導入、かつ低水セメント比の自己治癒性能も期待できるコンクリートを用い、更なる軽量化と高耐久化を図った床版を開発した。	最上級プレミアム床版「松」

## 第2章 膨張材併用軽量コンクリートの膨張特性

### 2.1 概説

軽量RC床版の実用化を目的として、軽量コンクリート2種（粗骨材，細骨材ともに軽量骨材）を使用し，かつ膨張材を併用した道路橋RC床版（以下，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評価を行った。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，実構造物の配筋を再現した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がどのような影響を受けるのかについても評価を行い，膨張材併用軽量RC床版の膨張特性について実験的に検討を行った。

### 2.2 試験概要

#### (1) 使用材料およびコンクリート配合

##### ① 使用材料

本検討で用いた使用材料を表-2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ガイト・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1m<sup>3</sup>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<sup>-6</sup>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-2 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3.1g/cm <sup>3</sup> )
膨張材(EX)	エトリンガイト・石灰複合系膨張材(20型)(密度3.00g/cm <sup>3</sup> )
細骨材(S)	人工軽量細骨材(絶乾密度1.62g/cm <sup>3</sup> P.M.2.75 吸水率27.5%)
粗骨材(G)	人工軽量粗骨材(絶乾密度1.30g/cm <sup>3</sup> 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/mm<sup>2</sup>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/mm<sup>2</sup>とし，水結合材比は37%とした。単位水量は，175kg/m<sup>3</sup>以下で，ポンプ圧送できることを確認した170kg/m<sup>3</sup>とした（第3章を参照）。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-2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/m<sup>3</sup>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。

##### (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試験の項目と準拠した試験方法を表-4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，次節で示す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℃

表-3 コンクリート配合

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

表-4 コンクリート試験項目及び試験方法

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 <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup> 程度
拘束膨張率	JIS A6202(B法)	—

水中養生，材齢7日以降は20°C60%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。

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-1，図-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-1 中に「a」で示した供試体中央部に図-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。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。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。

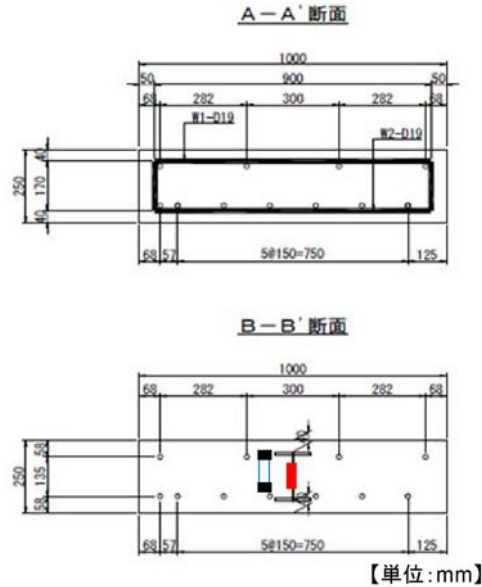


図-2 RC 床版供試体 配筋図 (その 2)

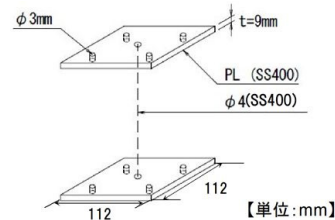


図-3 鉛直方向長さ変化率測定用拘束棒

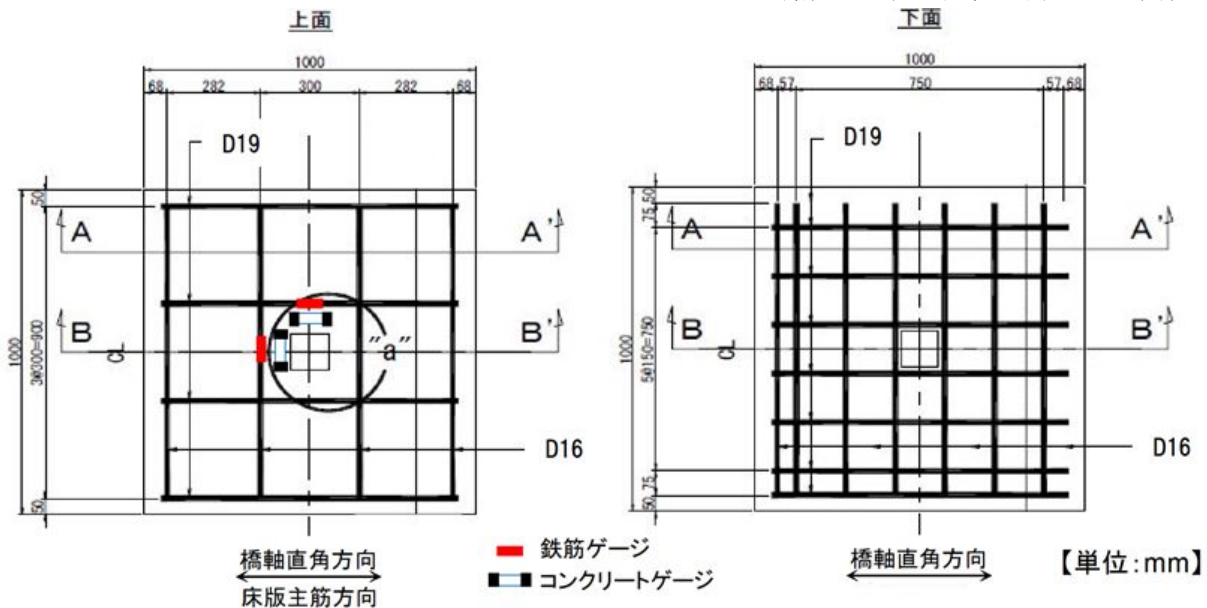


図-1 RC 床版供試体 配筋図 (その 1)

## 2.3 試験結果

### (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-5に示す。打込み当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。

### (2) 小型供試体の強度物性

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-6に示す。設計基準強度(40N/mm<sup>2</sup>)および27N/mm<sup>2</sup>の普通コンクリートのせん断強度(4.8N/mm<sup>2</sup>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<sup>3)</sup>を用いて算出した。

### (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-4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」<sup>4)</sup>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(150~250×10<sup>-6</sup>)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20kg/m<sup>3</sup>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15kg/m<sup>3</sup>のEX-15で250×10<sup>-6</sup>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<sup>7)</sup>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、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25kg/m<sup>3</sup>のEX-25および30kg/m<sup>3</sup>のEX-30は材齢7日の膨張率は400~500×10<sup>-6</sup>を示しており、土木学会「膨張コンクリート設計施工指針」<sup>4)</sup>に示されるケミカルプレストレス用のコンクリート(200~1000×10<sup>-6</sup>)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。

### (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-5に、材齢3日まで拡大したものを図-6に示す。

表-5 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

表-6 強度関連項目の結果 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

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 <sup>4</sup>	2.09×10 <sup>4</sup>	1.99×10 <sup>4</sup>

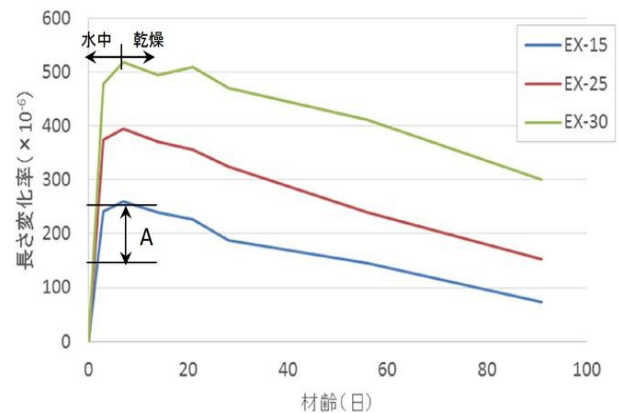


図-4 拘束膨張供試体の長さ変化率

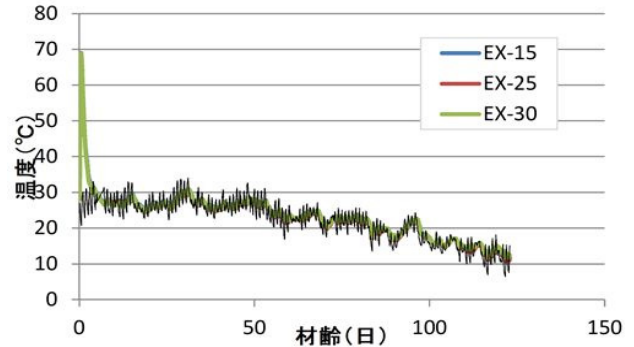


図-5 コンクリート内部温度

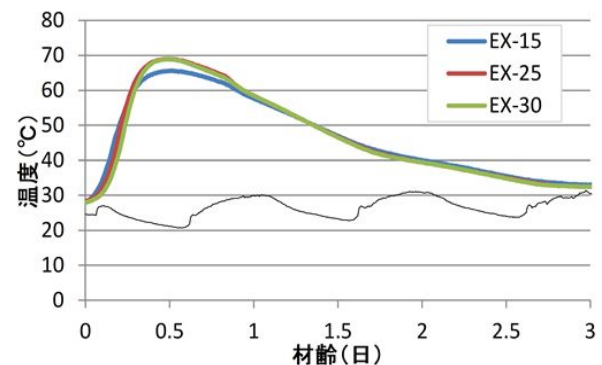


図-6 コンクリート内部温度 (材齢3日まで)



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℃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℃、EX-25 と EX-30 は両方とも約 70℃であった。その後、材齢 3 日程度で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。

## (5) RC 床版供試体の鉄筋ひずみ

### ① 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-7 に、橋軸直角方向の測定結果を図-8 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ため（橋軸直角方向 1.3%、橋軸方向 0.9%）であると考えられる。

### ② 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-9 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  $1500 \times 10^{-6}$  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程度であった。

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。

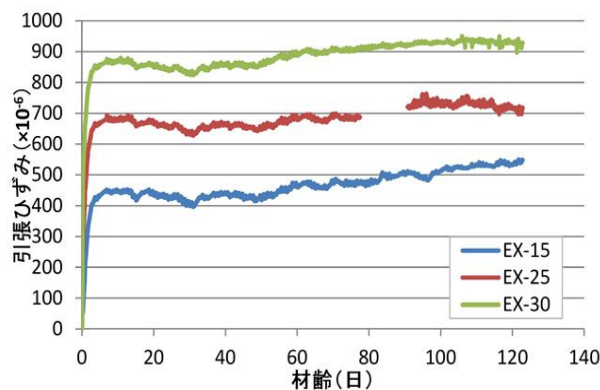


図-7 橋軸方向の鉄筋ひずみ

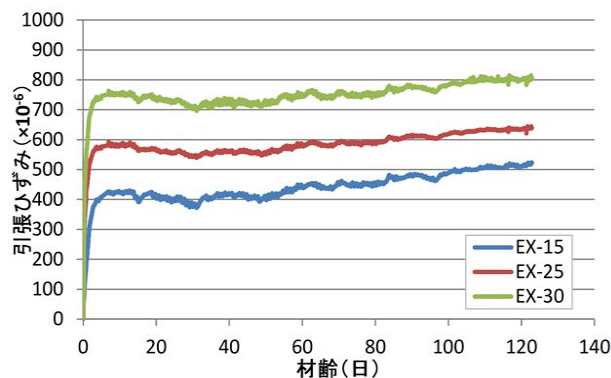


図-8 橋軸直角方向の鉄筋ひずみ

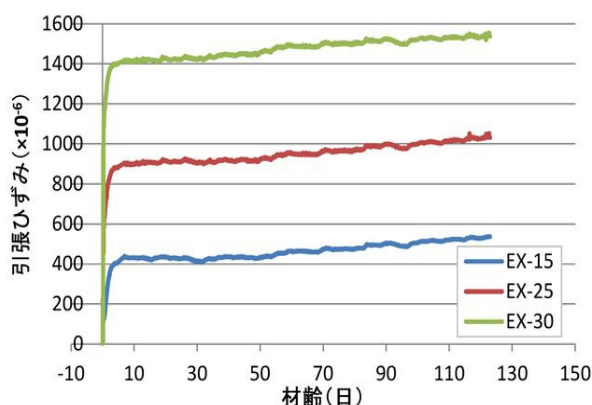


図-9 鉛直方向の鉄筋ひずみ

## (6) RC 床版供試体のコンクリートひずみ

### ① 橋軸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-10 に、橋軸直角方向の測定結果を図-11 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により温度変化による熱膨張成分を除去した値である。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。一方、図-4に示したように、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 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と、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。

## ② 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-12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 $2300 \times 10^{-6}$ 大きな膨張ひずみを示している。

## (7) RC床版供試体に導入される圧縮応力

使用した鉄筋の材質SD345の弾性係数を $200\text{kN/mm}^2$ 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-13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-14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 $1.2\text{N/mm}^2$ 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 $20\text{kg/m}^3$ 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 $1000 \times 10^{-6}$ 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

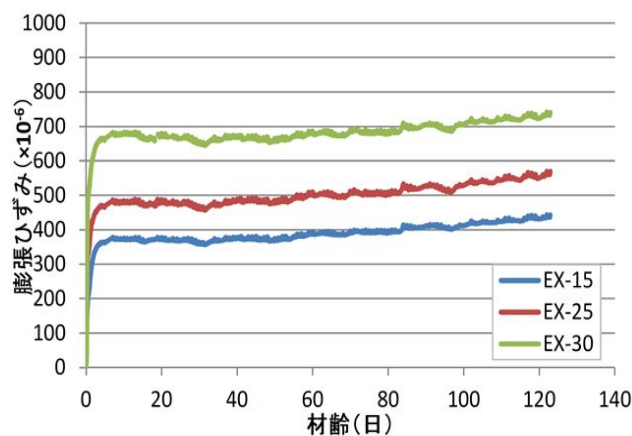


図-10 橋軸方向のコンクリートひずみ

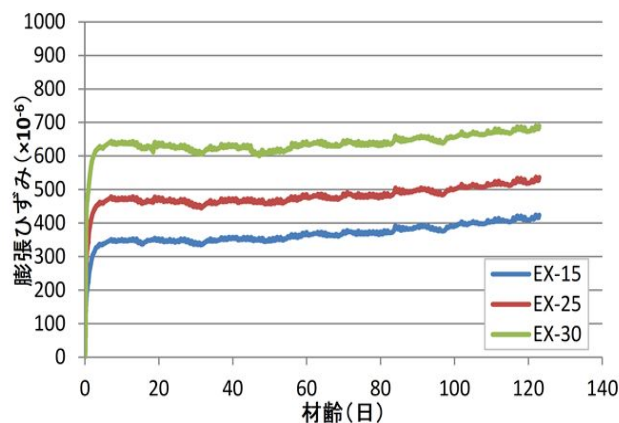


図-11 橋軸直角方向のコンクリートひずみ

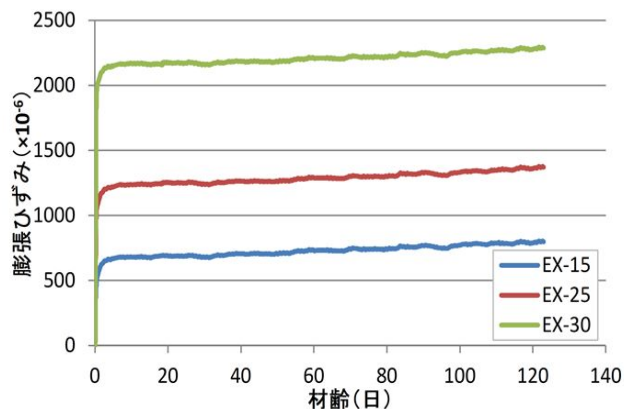


図-12 鉛直方向のコンクリートひずみ

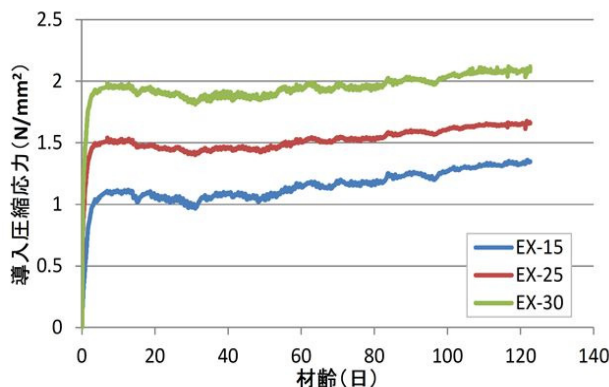


図-13 橋軸直角方向に導入される圧縮応力

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、別途検討の必要がある。

### 2.3 まとめ

- (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より少ない  $15\text{kg/m}^3$  の膨張材を混和することで  $250 \times 10^{-6}$  を超える膨張ひずみを示しており、普通コンクリートに比べて大きな膨張ひずみとなることを確認した。
- (2). RC 床版供試体を用いた本実験で、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）の関係を示した。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種に膨張材を  $20\text{kg/m}^3$  混和すれば橋軸直角方向に  $1.2\text{N/mm}^2$  相当の圧縮応力が導入できることを確認した。

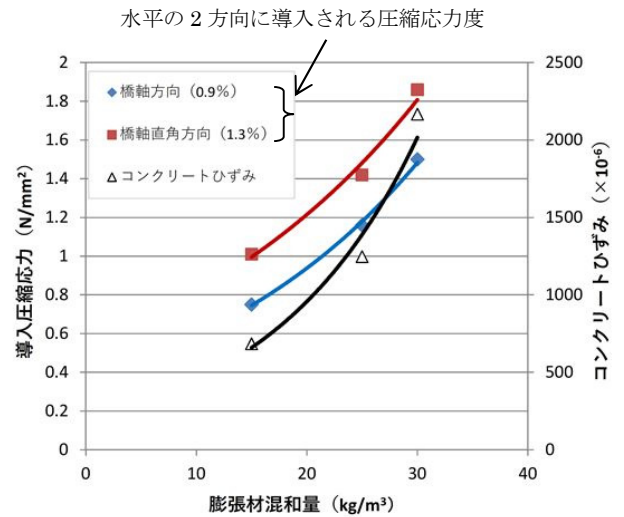


図-14 膨張材混和量と導入圧縮応力および橋軸直角方向に導入される圧縮応力

## 第3章 圧送性確保のための検討

### 3.1 概説

現場汎用性を重視した膨張材併用軽量コンクリート床版「松'」について、単位水量の少ない土木用の配合でも確実に施工す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<sup>5)</sup>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強凝集体が残存するために生じる現象と考えた。これらを加味して、実施工において、冬季・夏季問わずに圧送管の筒先で打設可能なフレッシュ性状が安定して保つことができる配合について、混和剤仕様など含めて検討した。

### 3.2 試験方法

#### (1) 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 $170\text{kg/m}^3$ 、 $168\text{kg/m}^3$ 、 $165\text{kg/m}^3$ と、パラメトリックに変更させ、表-7に示す合計9ケースで圧送試験を行った。

#### (2) 配合条件

本研究で用いたコンクリートの使用材料を表-8、配合条件を表-9、設計基準強度とフレッシュ性状の目標値を表-10に示す。

軽量コンクリートは、設計基準強度 $40\text{N/mm}^2$ 、 $W/B=37\%$ 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、耐久性向上を目的として、ケミカルプレストレス効果を期待し、低添加タイプの膨張材を混和した。

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ポンプ圧送性を加味し $18\pm 2.5\text{cm}$ とした。目標空気量は、普通コンクリートと同等の $4.5\pm 1.5\%$ 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-7 圧送性試験のケース

検討ケース	試験時期	膨張材 <sup>※</sup> 種類	膨張材混和量	単位水量
1.HEX-15-170-w	2017/2/1 (冬季)	HEX	15kg/m <sup>3</sup>	170kg/m <sup>3</sup>
2.HEX-15-165-w				165kg/m <sup>3</sup>
3.PC-15-170-s	2017年9月 (夏季)	PC	15kg/m <sup>3</sup>	170kg/m <sup>3</sup>
4.PC-20-170-s				
5.HEX-15-170-s		HEX	15kg/m <sup>3</sup>	
6.PC-20-170-w	2018年12月 (冬季)	PC	20kg/m <sup>3</sup>	170kg/m <sup>3</sup>
7.PC-20-165-w				165kg/m <sup>3</sup>
8.HEX-20-168-w		HEX	20kg/m <sup>3</sup>	168kg/m <sup>3</sup>
9.HEX-20-165-w				165kg/m <sup>3</sup>

表-8 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	HEX	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	SL	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	GL	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 <sub>1</sub>	フローリックSV10 フローリック社製
	AD <sub>2</sub>	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 <sub>1</sub>	マスターエア101 BASFジャパン社製
	AE <sub>2</sub>	マスターエア202 BASFジャパン社製

表-10 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 <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)
40	18.0±2.5	4.5±1.5

表-9 配合条件

検討ケース	膨張材種類	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						AD <sub>1</sub>	AD <sub>2</sub>	SP	AE <sub>1</sub>	AE <sub>2</sub>
		W	C	EX		SL	GL	(P×%)	(P×%)	(P×%)	(P×%)	(P×%)
				HEx	PC							
1.HEx-15-170-w	HEx	170	444	15	—	574	554	0.6	—	—	0.003	—
2.HEx-15-165-w	HEx	165	430	15	—	583	563	—	—	0.5	0.001	—
3.PC-15-170-s	PC	170	444	—	15	512	424	—	1.2	—	—	0.011
4.PC-20-170-s	PC	170	439	—	20	512	424	—	1.2	—	—	0.011
5.HEx-15-170-s	HEx	170	444	15	—	512	424	—	1.2	—	—	0.011
6.PC-20-170-w	PC	170	439	—	20	512	426	—	0.49	—	—	—
7.PC-20-165-w	PC	165	426	—	20	520	431	—	0.65	—	—	—
8.HEx-20-168-w	HEx	168	434	20	—	515	428	—	0.67	—	—	—
9.HEx-20-165-w	HEx	165	425	20	—	520	432	—	0.67	—	—	—

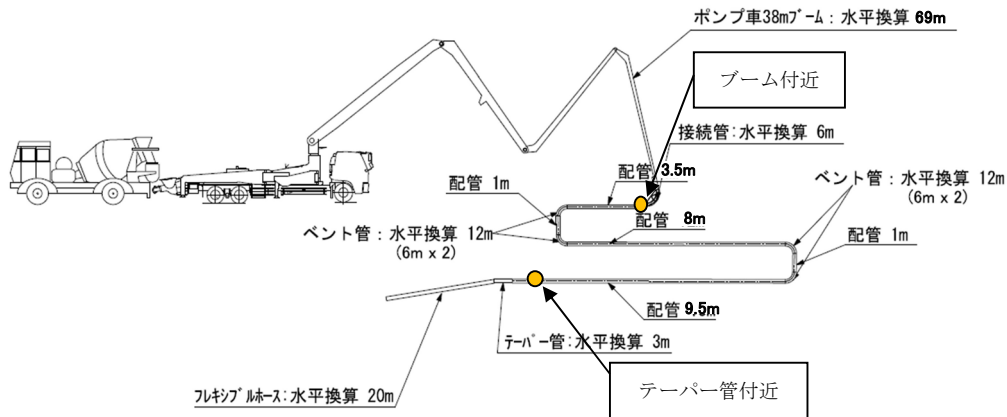


図-15 圧送試験の配管条件

(3) 試験項目および試験方法

試験項目及び試験方法を表-11 及び表-12, ポンプ圧送試験における配管条件を図-15 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-1 に示す。

表-11 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
スランブ試験	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-付近

表-12 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



写真-1 圧送試験状況

### 3.3 試験結果

#### (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-13に示す。ケース2について、出荷時、圧送前、筒先で性状が大きく変化した。

#### (2) ポンプ圧送試験結果

圧送試験結果一覧を表-14に示す。9回の実施のうち1ケースだけ圧送不可（ケース2）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-2にケース6の状況を示す。



写真-2 圧送状況（筒先）ケース6

表-13 フレッシュ性状試験結果

検討ケース	実施時期	膨張材種類	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				スランプ (cm)※1	空気量 (%)※1	C T (°C)※1
			W	C	EX				
					HEx	PC			
1.HEx-15-170-w	2017.2 (冬季)	HEx	170	444	15	-	21.5	4.7	13.0
20.0							4.5	15.0	
15.0							3.6	15.0	
2.HEx-15-165-w	2017.2 (冬季)	HEx	165	430	15	-	18.0	5.0	13.0
25.5							6.4	13.0	
13.0							1.9	15.0	
3.PC-15-170-s	2017.9 (夏季)	PC	170	444	-	15	22.0	4.0	31.0
20.5							3.7	31.0	
20.5							4.7	31.0	
4.PC-20-170-s	2017.9 (夏季)	PC	170	439	-	20	22.0	5.2	30.0
20.5							3.9	32.0	
22.5							5.2	31.0	
5.HEx-15-170-s	2017.9 (夏季)	HEx	170	444	15	-	22.5	5.4	31.0
20.5							5.4	32.0	
21.0							4.7	32.0	
6.PC-20-170-w	2018.12 (冬季)	PC	170	439	-	20	21.5	4.9	19.0
19.0							4.2	18.0	
19.0							4.7	16.0	
7.PC-20-165-w	2018.12 (冬季)	PC	165	426	-	20	20.5	4.4	20.0
19.0							4.9	18.0	
17.5							3.8	18.0	
8.HEx-20-168-w	2018.12 (冬季)	HEx	168	434	20	-	21.0	4.1	19.0
18.0							3.9	18.0	
17.0							4.2	17.0	
9.HEx-20-165-w	2018.12 (冬季)	HEx	165	425	20	-	21.0	4.7	20.0
19.5							5.2	18.0	
19.5							3.6	16.0	

※1：上段は出荷時，中段は圧送前，下段は筒先

表-14 圧送試験結果

検討ケース	実施時期	膨張材種類	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				圧送結果	備考
			W	C	EX			
					HEx	PC		
1.HEx-15-170-w	2017年2月 (冬季)	HEx	170	444	15	-	○	※1
2.HEx-15-165-w		HEx	165	430	15	-	×	
3.PC-15-170-s	2017年9月 (夏季)	PC	170	444	-	15	○	※2
4.PC-20-170-s		PC	170	439	-	20	○	
5.HEx-15-170-s		HEx	170	444	15	-	○	
6.PC-20-170-w	2018年12月 (冬季)	PC	170	439	-	20	○	
7.PC-20-165-w		PC	165	426	-	20	○	
8.HEx-20-168-w		HEx	168	434	20	-	○	
9.HEx-20-165-w		HEx	165	425	20	-	○	

※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

### (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-15 に示す。ケース 1 が多いが、圧送性に問題はなかった。

### (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-16 に示す。圧送性にも問題があったケース 2 は、加圧ブリーディング量が極端に少ない。ケース 2 は、土木学会のポンプ圧送指針<sup>6)</sup>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、順当な試験結果であるとも判断できる。

### (5) 配管圧力測定結果

代表として、圧送性に問題があった単位水量 165kg/m<sup>3</sup> のケース 2 と、同じ時期に実施したケース 1 について、経過時間と管内圧力の関係を図-16 及び図-17 に示す。圧送性に問題がなかった図-17 に比べ、閉塞が生じたケース 2 は、コンクリートが外に排出されないため、圧送開始直後からポンプ車圧力が上昇、3分間で 3.0MPa から 7.6MPa に急上昇している。今回実施し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。

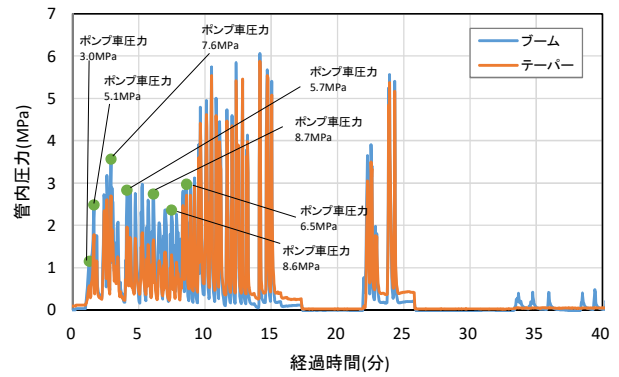


図-16 管内閉塞をおこしたケース 2 の圧力図

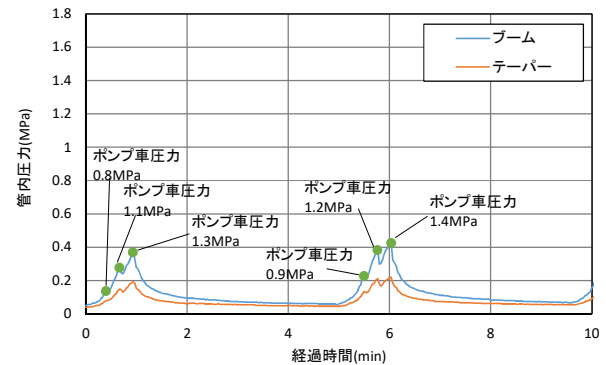


図-17 圧送性に問題のないケース 1 の圧力図

表-15 ブリーディング試験結果

検討ケース	実施時期	膨張材種類	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				ブリーディング率 (%)	備考
			W	C	EX			
					HEx	PC		
1.HEx-15-170-w	2017年2月 (冬季)	HEx	170	444	15	—	1.45	※1
2.HEx-15-165-w		HEx	165	430	15	—	0.34	
3.PC-15-170-s	2017年9月 (夏季)	PC	170	444	—	15	0.34	※2
4.PC-20-170-s		PC	170	439	—	20	0.32	
5.HEx-15-170-s		HEx	170	444	15	—	0.56	
6.PC-20-170-w	2018年12月 (冬季)	PC	170	439	—	20	0.59	
7.PC-20-165-w		PC	165	426	—	20	0.59	
8.HEx-20-168-w		HEx	168	434	20	—	0.3	
9.HEx-20-165-w		HEx	165	425	20	—	0.23	

表-16 加圧ブリーディング試験結果

検討ケース	実施時期	膨張材種類	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				加圧ブリーディング最終脱水量(ml)	備考
			W	C	EX			
					HEx	PC		
1.HEx-15-170-w	2017年2月 (冬季)	HEx	170	444	15	—	93	※1
2.HEx-15-165-w		HEx	165	430	15	—	39	
3.PC-15-170-s	2017年9月 (夏季)	PC	170	444	—	15	74	※2
4.PC-20-170-s		PC	170	439	—	20	71	
5.HEx-15-170-s		HEx	170	444	15	—	80	
6.PC-20-170-w	2018年12月 (冬季)	PC	170	439	—	20	93	
7.PC-20-165-w		PC	165	426	—	20	88	
8.HEx-20-168-w		HEx	168	434	20	—	88	
9.HEx-20-165-w		HEx	165	425	20	—	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

### 3.4 試験結果の考察

図-18に本研究結果及び過去の膨張材併用軽量コンクリートの圧送性試験の結果<sup>9)</sup>について、ブリーディング率を横軸に、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プロットし、圧送性の良否結果を重ねた。

これによると、ブリーディング率が小さいが、加圧した状態では一定の脱水率となる状況が、圧送性が良好となっている。逆にブリーディング率が大きさに比して、加圧した状態で脱水率が小さくなる状況は、圧送性が低下すると考えられる。

すなわち、このように、その都度、圧送性試験を行わなくとも、ブリーディング量と加圧ブリーディング試験の結果から、現場における圧送性を概略把握することが可能であると考えられる。

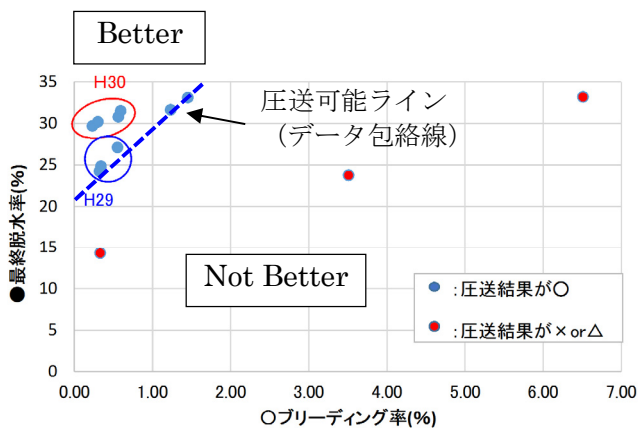


図-18 圧送性指標図

### 3.5 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、耐久性等に影響することなく問題なく圧送できることを確認し打設性に対する汎用性を確保できた。
- (2). 圧送性 NG を除き、フレッシュ性状について、スランプは、出荷時、圧送前、筒先と若干のロスが生じたものの、変化は小さい。空気量は、出荷時から空気量が増減したものの、いずれのケースも目標の  $4.5 \pm 1.5\%$  以内であり、変化は小さい結果であった。
- (3). 膨張材併用軽量コンクリートの過去の圧送性試験から、ブリーディング率を横軸に、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プロットすることで、その都度、圧送性試験を行わなくとも、ブリーディング量と加圧ブリーディング試験の結果から、現場における圧送性確保のための指標が得られることが確認された。



# 第4章 「松」の耐疲労性に関する検討

## 4.1 概説

「松」の開発において、軽量コンクリートに低添加型の膨張材を普通コンクリートの標準混和量である $20\text{kg/m}^3$ 混和して作製した実物大供試体（以下、軽量RC-20）を用いた輪荷重走行試験を実施し、普通RCおよび軽量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 試験概要

### (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-19に示す。供試体の外形寸法は、表-17および表-18に示す過去の軽量RC床版の実験で用いた供試体<sup>7)</sup>（供試体名：軽量RC-30）および道路橋示方書<sup>8)</sup>に準拠した既往の研究の普通RCの供試体<sup>9),10)</sup>（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。

### (2) 使用材料

実験に用いた軽量コンクリートの配合を表-19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。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 $20\text{kg/m}^3$ 混和した。この混和量は、第2章で示した夏季に実施した膨張材を混和した軽量RC床版の膨張特性の検討において耐疲労性向上の観点から橋軸直角方向に $1.2\text{N/mm}^2$ の圧縮応力を導入できると想定した場合の混和量である。一方、軽量RC-30には石灰系の低添加型膨張材を初期収縮補償に必要な量である $20\text{kg/m}^3$ の1.5倍（ $30\text{kg/m}^3$ ）混和している。設計基準強度は $40\text{N/mm}^2$ で、せん断強度が設計基準強度 $27\text{N/mm}^2$ 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り混ぜを行った。スランプはコンクリート標準示方書<sup>11)</sup>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 $24^\circ\text{C}$ 、材齢28日の単位体積質量は $1,830\text{kg/m}^3$ 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。

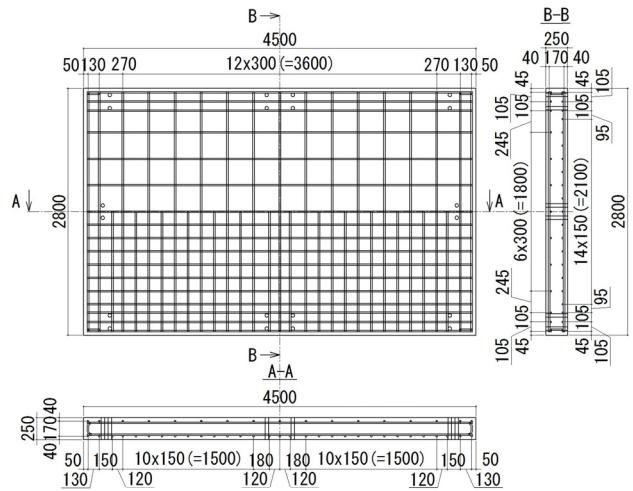


図-19 供試体概要図

表-17 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-18 既往の実験結果<sup>7),9)</sup>

供試体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	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

表-19 軽量コンクリートの配合

供試体名	s/a (%)	単位置量 (kg/m <sup>3</sup> )					AD (P×%)	AE*4 (P×%)
		W	C	Fx*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-2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 9)の方法と同様の図-20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-3 輪荷重走行試験機

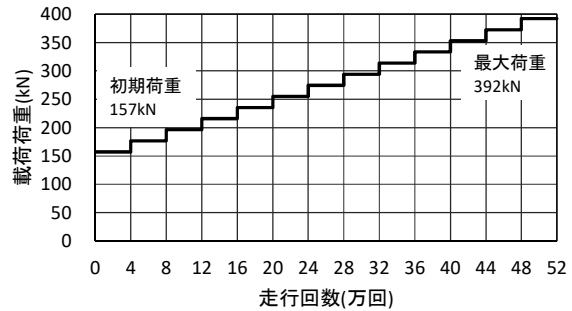


図-20 階段状荷重漸増載荷<sup>9)</sup>

## 4.3 試験結果

### (1) 物性試験結果

硬化コンクリートの物性値を表-20に示す。材齢28日で設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup>を上回った。輪荷重走行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<sup>12)</sup>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<sup>3</sup>より 20kg/m<sup>3</sup>の方が強度は大きくなったと推察される。なお、せん断試験は JCI-SF6 に準拠して実施した。

表-20 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 <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	見掛け密度*1 (kg/m <sup>3</sup> )
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

また、式 (1) を用いて算出<sup>4)</sup>した橋軸直角方向のケミカルプレストレス  $\sigma_{cp}$  の推移を図-21に示す。想定したケミカルプレストレス量である 1.2N/mm<sup>2</sup>には届かず、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。

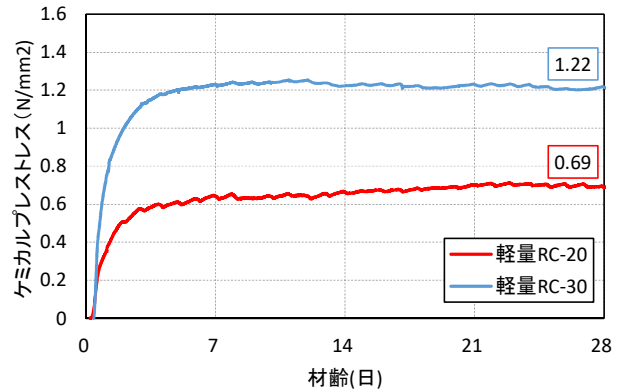


図-21 ケミカルプレストレスの推移

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

- $\varepsilon$ : 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%)

本報告書第2章に示した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-22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係については、今後の検討としたい。

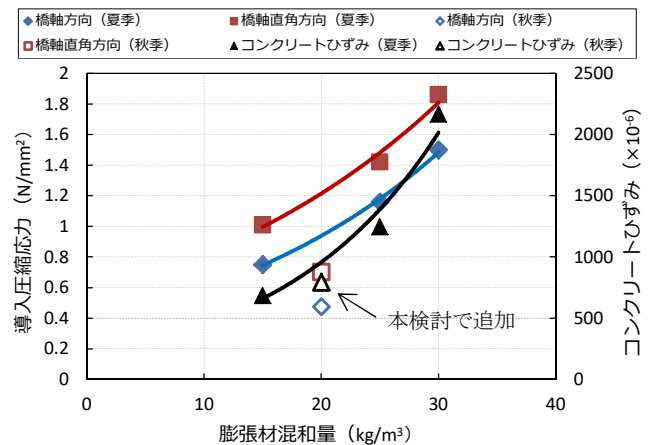


図-22 膨張材混和量と導入圧縮応力および鉛直方向のコンクリートひずみの関係

## (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の関係を図-23 に示す。なお、活荷重たわみは、静的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ている。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り、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 より遅くなることが確認できた。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は破壊時の走行回数のみで判断せず、以降の検討を実施して総合的に判断する。

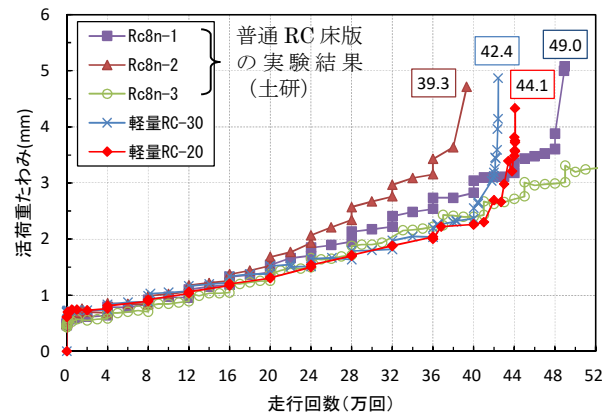


図-23 活荷重たわみと走行回数の関係

ここに、 $B$ : はり幅 ( $=b+2d_d$ ) (mm),  $b$ : 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),  $\alpha_{cv}$ ,  $\alpha_t$ : 軽量コンクリートの低減係数<sup>9)</sup>  $\alpha_{cv}=0.785$ ,  $\alpha_t=0.703$ ,  $f_{cv}$ ,  $f_t$ : 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  $P_{sx}$ ,  $P_{sxe}$  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<sup>3)</sup>による。

- 強度補正係数  $\alpha$  を考慮した  $P_0=157kN$  基準の等価繰返し回数  $N_{eqs}$  を算出

$$N_{eqs} = \sum_{i=1}^n \left( \alpha \frac{P_i}{P_0} \right)^m n_i \quad (5)$$

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  $m=12.76^{13)}$

- 強度補正を考慮した走行回数  $N_s$  を算出

$$N_s = 1 / \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^m N_{eqs} \quad (6)$$

算出した結果を図-24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-20の走行回数は323,100回, 軽量RC-30の走行回数は351,116回であり, RC8n-1の357,029回に近い結果であった。

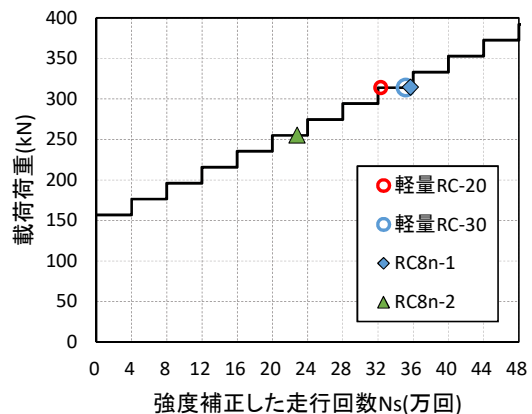


図-24 載荷荷重と強度補正した走行回数の関係

## (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。

本検討において比較対象としたのは、軽量 RC の 2 体と普通 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  $40N/mm^2$  と  $24N/mm^2$  である。強度補正した走行回数は、以下に示す方法で算出した。

- 走行回数より  $157kN$  基準の等価繰返し回数を算出
- 強度補正係数  $\alpha$  を算出

$$\alpha = P_{sx} / P_{sxe} \quad (2)$$

ここに、 $P_{sx}$ : 設計値の押抜きせん断強度,  $P_{sxe}$ : 物性試験値を用いた押抜きせん断強度。式(3), (4)は軽量コンクリート 1 種を対象とした提案式<sup>3)</sup>である。

$$P_{sx} = 2B(\alpha_{cv} \cdot f_{cv} x_m + \alpha_t \cdot f_t C_m) \quad (3)$$

$$P_{sxe} = 2B(\alpha_{cv} \cdot f_{cve} x_m + \alpha_t \cdot f_{te} C_m) \quad (4)$$

#### (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-25に示す。

軽量RC-20であるが、試験開始前はほぼ全断面有効と同じ位置に中立軸があり、荷重開始とともに約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。

#### (5) ひび割れの分布

本実験結果のひび割れ分布を図-26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。このひび割れ分布は、普通RCと違いがないと考えられる。また、本実験結果は文献<sup>13)</sup>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回走行、二方向ひび割れ(段階II)が240,000回走行、亀甲状ひび割れ(段階III)が320,000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-27に軽量RCの床版下面のひび割れ密度と走行回数との関係を示す。

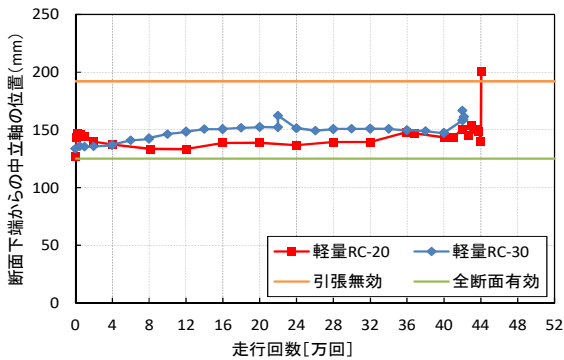


図-25 中立軸の位置と走行回数との関係

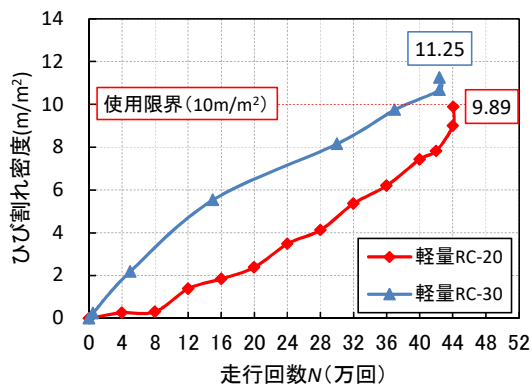
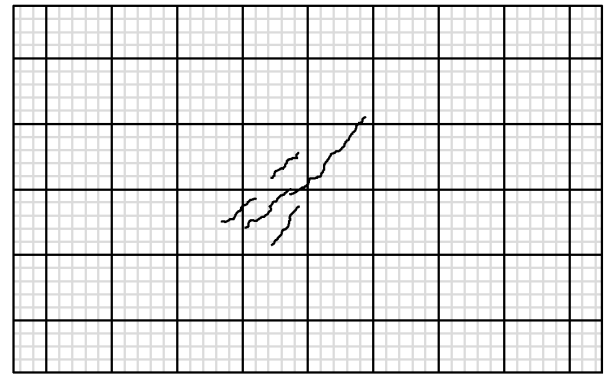
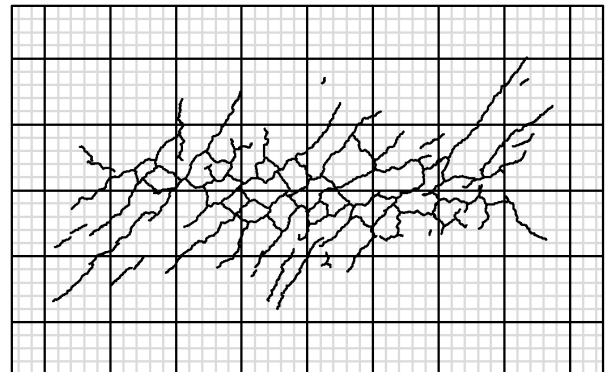


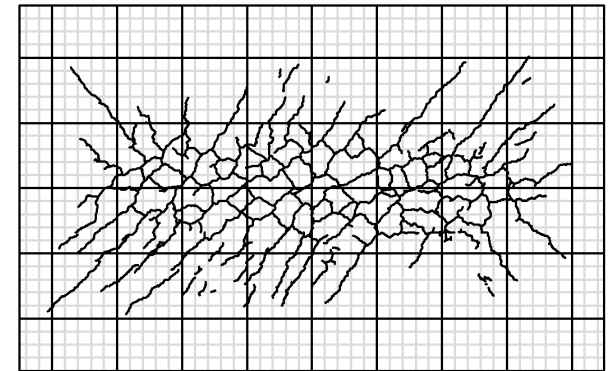
図-27 床版下面のひび割れ密度と走行回数との関係



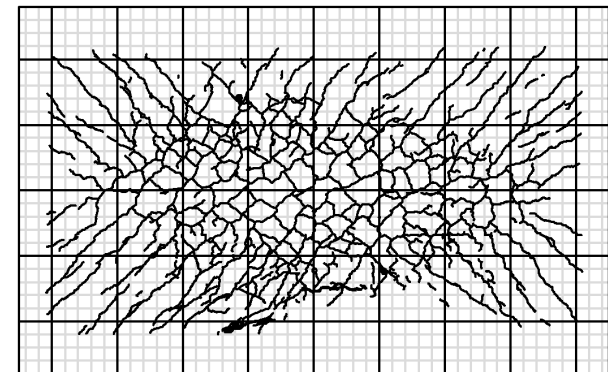
(a)段階I : 80,000回走行



(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-26 供試体下面のひび割れ分布

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 $10.0\text{m/m}^2$ であり<sup>13)</sup>、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する結果であった。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)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-28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

#### (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-29に示す。S-N曲線は文献<sup>13)</sup>の松井理論式とした。図中の縦軸に示す $P_{sxe}$ は、式(4)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。

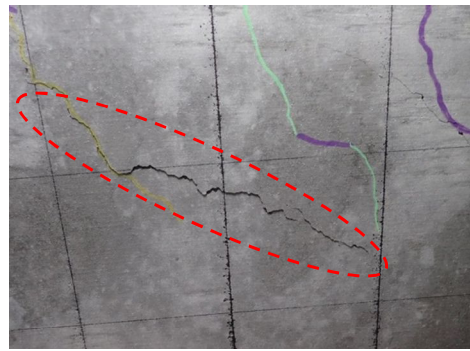


写真-4 段差を伴うひび割れ (軽量 RC-20)

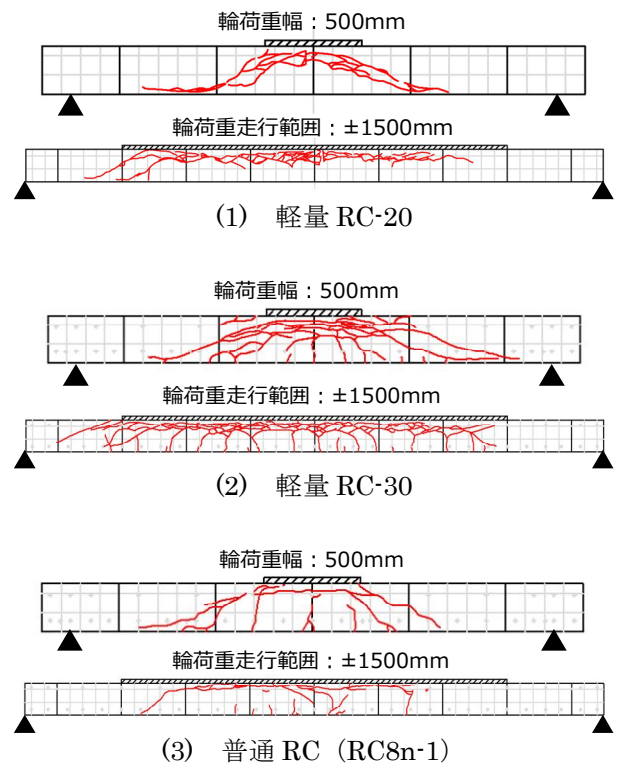


図-28 供試体断面のひび割れ分布

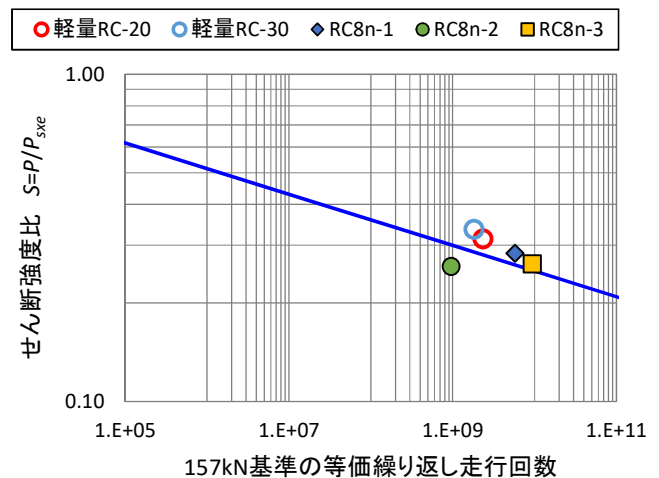


図-29 157kN 基準の S-N 曲線

#### 4.4 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：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との関係より、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 の中立軸の推移は荷重開始とともに約 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 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。

# 第5章 「松」の耐疲労性に関する検討

## 5.1 概説

「松」の研究開発の知見を活かし、高耐久性能を目指す「松」は、以下のコンセプトで開発した。

- 標準混和量の1.5倍の混和で、ケミカルプレストレスを有効に働かせ、平成29年度に実施した膨張材併用軽量床版「松」よりも、耐疲労性の高い床版を開発する。
- 膨張材混和量を増加させるため、鉛直方向への拘束のための鉄筋を配置する。現場での鉄筋加工・組立ては標準ではないため、当面プレキャスト部材で取り扱う。
- 養生方法は、蒸気養生を行った。
- 床版厚は、RC8床版シリーズと比べて3cm小さくし、22cmとする。(ケミカルプレストレインを考慮した設計により決定。22cmはループ接手厚さを考慮)
- W/Cを低減させて、自己治癒性能・耐凍害性能を保有させる。

## 5.2 試験概要

### (1) 供試体

供試体は2,800mm×4,500mm×220mmの複鉄筋RC床版であり、その形状および寸法を図-30に示す。供試体の外形寸法は、表-21および表-22に示す過去の軽量RC床版の実験で用いた供試体<sup>7)</sup>(供試体名：軽量RC-30)および道路橋示方書<sup>8)</sup>に準拠した既往の研究の普通RCの供試体<sup>9),10)</sup>(供試体名：RC8n-1, RC8n-2, RC8n-3)をベースとして床版厚のみ3cm縮小とした。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。

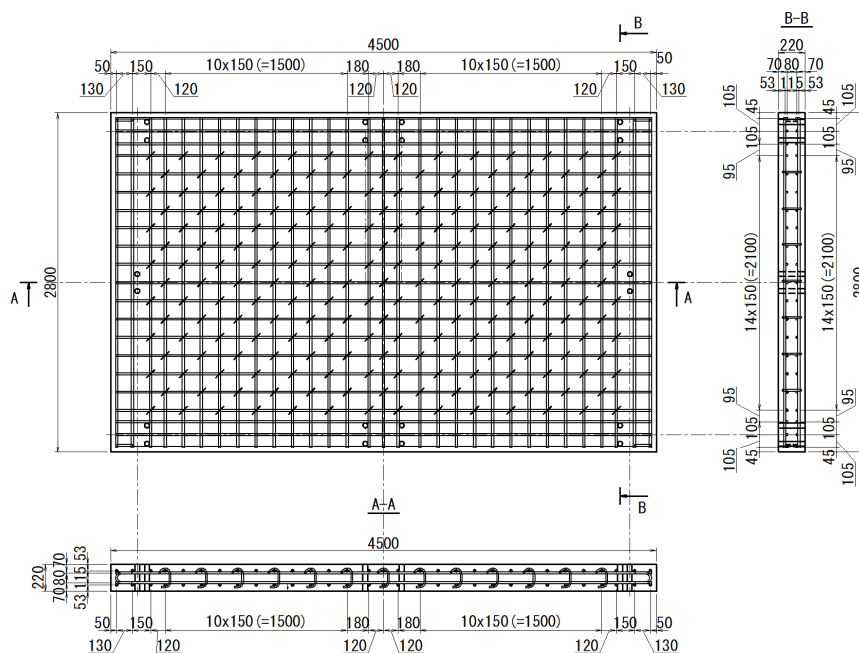


図-30 供試体概要

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-45	2800×4500×220	D19	150 (300)	D16	150 (300)
軽量RC-30	2800×4500×250				125 (250)
RC8n-1					
RC8n-2					
RC8n-3					

表-22 既往の実験結果<sup>7),9)</sup>

供試体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	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

実験に用いた軽量コンクリートの配合を表-23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。軽量RC-45にはエトリンガイト系の低添加型膨張材(標準添加量30kg/m<sup>3</sup>)を45kg/m<sup>3</sup>混和した。一方、軽量RC-30には石灰系の低添加型膨張材を初期収縮補償に必要な量である20kg/m<sup>3</sup>の1.5倍(30kg/m<sup>3</sup>)混和している。設計基準強度は40N/mm<sup>2</sup>で、せん断強度が設計基準強度27N/mm<sup>2</sup>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21cm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-45のフレッシュコンクリートの性状は、スランプ23.5cm、空気量5.5%、コンクリート温度27.3℃であった。

供試体作製時の養生条件を図-31に示す。プレキャスト製を想定し、養生は、蒸気養生とし、前養生時間を2時間以上とし、養生パイプで蒸気を通してシート内温度を徐々に上昇させる。この時の温度上昇勾配は15℃/h以下とする。最高温度は45℃以下として6時間継続し、徐々に温度を下降させる。温度管理は、自動養生装置を用いて行う。また、圧縮強度試験等の要素試験用の試験体は、シート内の蒸気が直接当たらない場所に置き、製品同一養生とする。輪荷重走行試験の開始は、試験機の都合上材齢37日とした。供試体の作製状況を写真-5～写真-7に示す。輪荷重走行試験の開始は、試験機の都合上材齢37日とした。

表-23 配合条件

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AD <sup>*2</sup> (P×%)	AE (P×%)
		W	C	Ex <sup>*1</sup>	SL	GL		
25.8	48.5	155	555	45	549	520	5.1	-

\*1:30型膨張材 \*2:高性能AE減水剤



写真-5 供試体作製状況 (打設前)

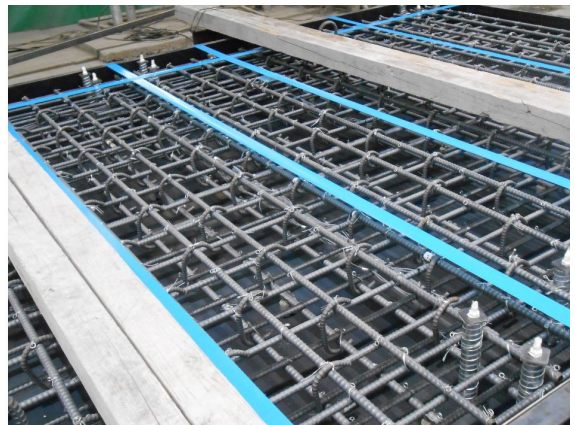


写真-6 供試体作製状況 (配筋拡大)



写真-7 供試体作製状況 (打設後)

標準蒸気養生図

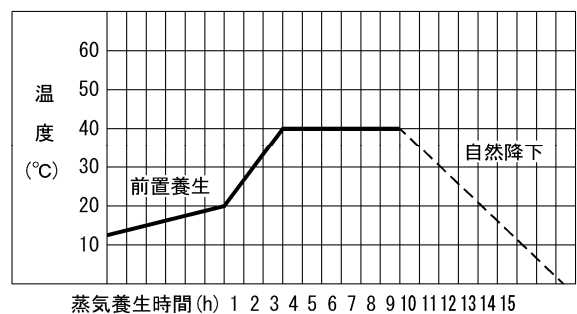


図-31 供試体作製時の養生条件



### (3) 試験方試験方法

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-8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<sup>9)</sup>の方法と同様の図-32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-8 輪荷重走行試験機

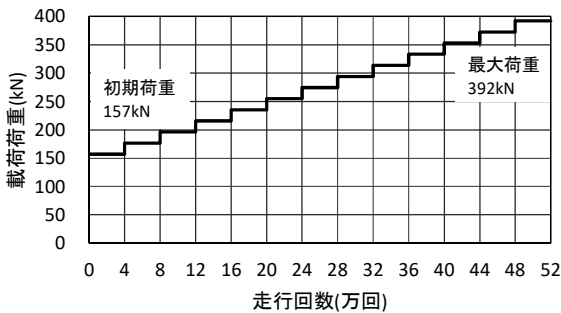


図-32 階段状荷重漸増載荷<sup>9)</sup>

## 5.3 試験結果

### (1) 物性試験結果

硬化コンクリートの物性値を表-24に示す。材齢 28 日で設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup> を上回った。輪荷重走行試験開始材齢において、軽量 RC-45 と軽量 RC-30 を比較すると、圧縮強度及びせん断強度は、軽量 RC-45 の方が大きく、割裂引張強度は軽量 RC-30 の方が大きい結果となった。なお、せん断試験は JCI-SF6 に準拠して実施した。

表-24 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 <sup>2</sup> )	静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度(N/mm <sup>2</sup> )
軽量RC-45	28	59.0	2.00	2.8	7.2
	37	64.2	2.06	3.1	7.7
軽量RC-30	173	49.1	17.7	3.3	5.6

また、式(7)を用いて算出<sup>4)</sup>した橋軸直角方向のケミカルプレストレス $\sigma_{cp}$ の推移を図-33に示す。軽量RC-45は、蒸気養生を行ったこともあり、材齢14日で脱枠、その後、運搬を行ったため計測データが28日までとなっていない。軽量RC-30と同程度以上となるケミカルプレストレスが導入されていることが確認された。

$$\sigma_{cp} = \varepsilon \cdot E_s \cdot p \quad (7)$$

$\varepsilon$  : 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(配筋より軽量RC-45は1.736%、軽量RC-30は1.146%)

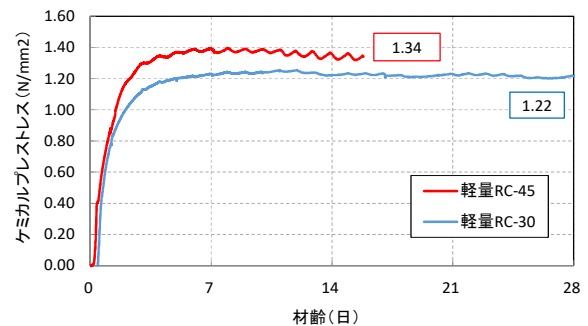


図-33 ケミカルプレストレスの推移

### (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-34に示す。なお、活荷重たわみは、静的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ている。軽量RC-45のたわみの増加傾向はRC8n-3(普通RC床版、平成8年道示準拠)とほぼ同じであった。走行回数360,000回(314kN終了)以降からRC8n-3よりやや高い値となった。軽量RC-30がたわみ3mmに到達すると押抜きせん断破壊に至るのに対して、軽量RC-45は、たわみがほぼ一定の勾配で増加し続け、RC8n-1、RC8n-2と同様にたわみが約7mm付近まで増加したところではたわみが急激に増加した。供試体下面の状況から、軽量RC-30に見られるような、明確な押抜きせん断破壊は発生しなかった。軽量RC-45は、土研式の52万回走行完了時点でも破壊に至っておらず、非常に高い耐疲労性を有することが確認できた。

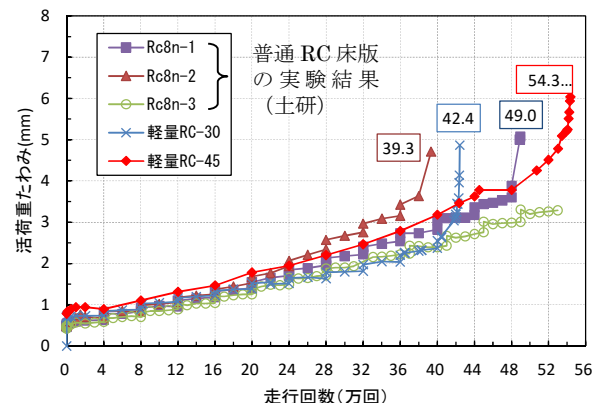


図-34 活荷重たわみと走行回数の関係

### (3) 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-35に示す。

軽量RC-45であるが、走行回数28万回までは全断面有効の中立軸位置付近ではほぼ一定の値を示し、以降は圧縮側有効の中立軸位置に徐々に近づく結果であった。これは、軽量RC-30が、引張側無視の中立軸に対して、漸近することなく終局に至るのに対して異なる傾向となった。

### (4) ひび割れの分布

本実験結果のひび割れ分布を図-36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。このひび割れ分布は、普通RCと違いがないと考えられる。また、本実験結果は文献<sup>13)</sup>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回走行、二方向ひび割れ(段階II)が160,000回走行、亀甲状ひび割れ(段階III)が240,000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543,662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-37に軽量RCの床版下面のひび割れ密度と走行回数との関係を示す。

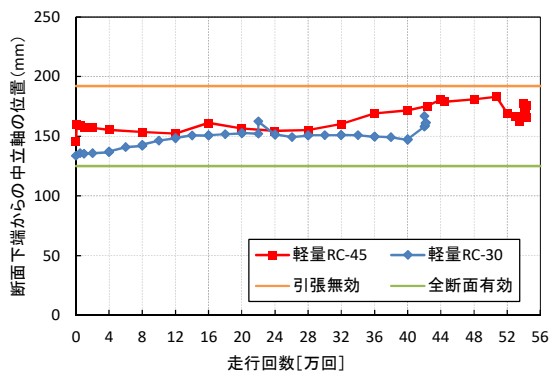


図-35 中立軸の位置と走行回数との関係

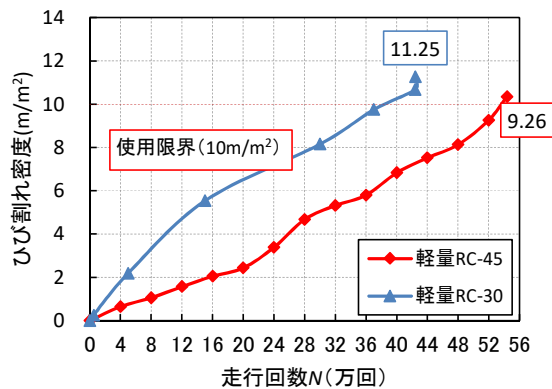
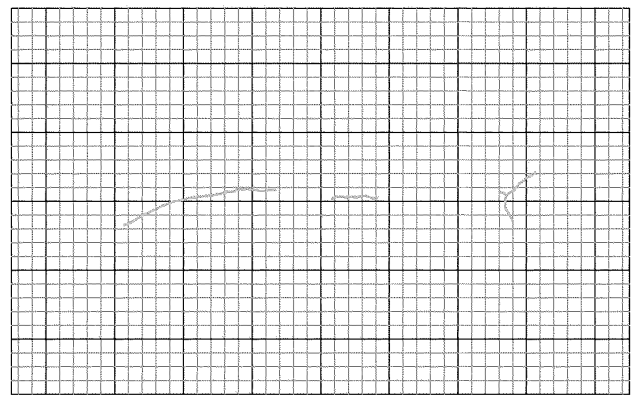
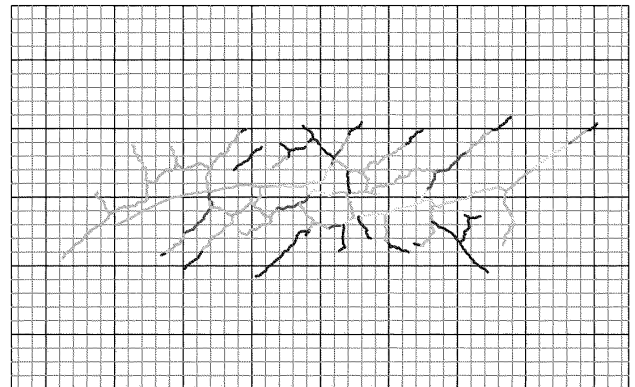


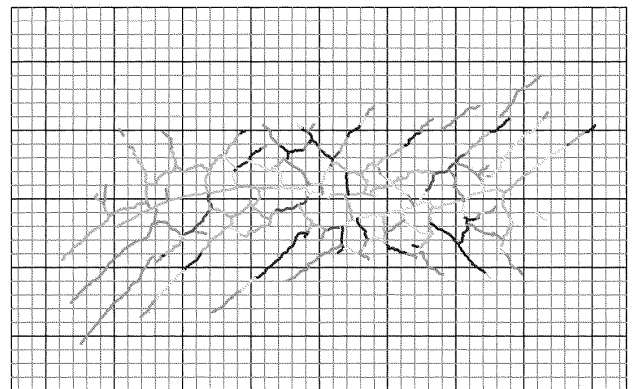
図-37 床版下面のひび割れ密度と走行回数との関係



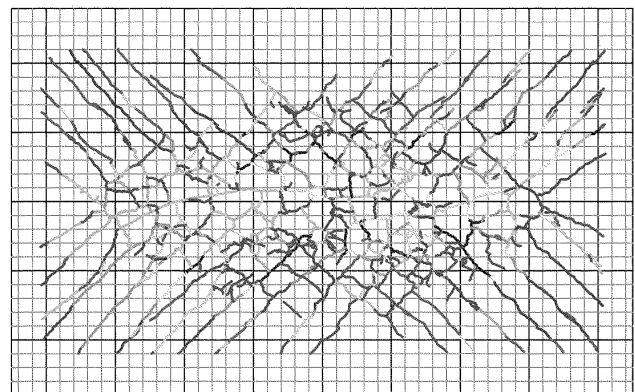
(a) 段階I : 1,000回走行



(b) 段階II : 160,000回走行



(c) 段階III : 240,000回走行



(d) 段階IV : 543,662回走行

図-36 供試体下面のひび割れ図

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  $10.0\text{m}^2$  であり<sup>13)</sup>、実験終了時にひび割れ密度がほぼ使用限界値と一致する結果であった。軽量 RC-45 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 240,000 回からひび割れが格子を形成し始め、以降は格子が細くなるようにひび割れが増加した。走行回数 320,000 回から約 1mm のコンクリート片が確認(写真-9)され、以降はひび割れが増加し格子状のひび割れがより細かくなった。供試体側面は走行回数 360,000 回から下端からひび割れが発生し始め、破壊時には 4 面とも数本のひび割れが上端付近に達していた。供試体上面は破壊時に載荷板の橋軸方向端部付近に微細なひび割れが確認された。

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-38 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-45 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-45 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る。橋軸方向は、軽量 RC-45、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。

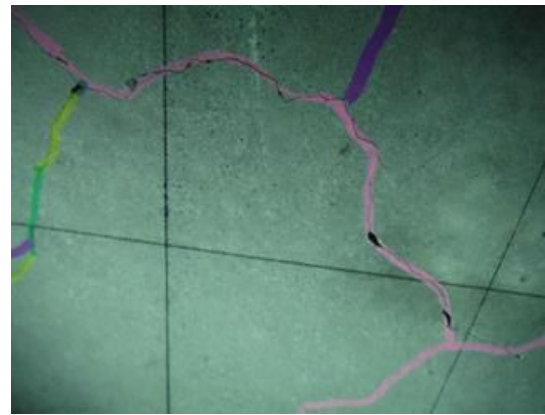
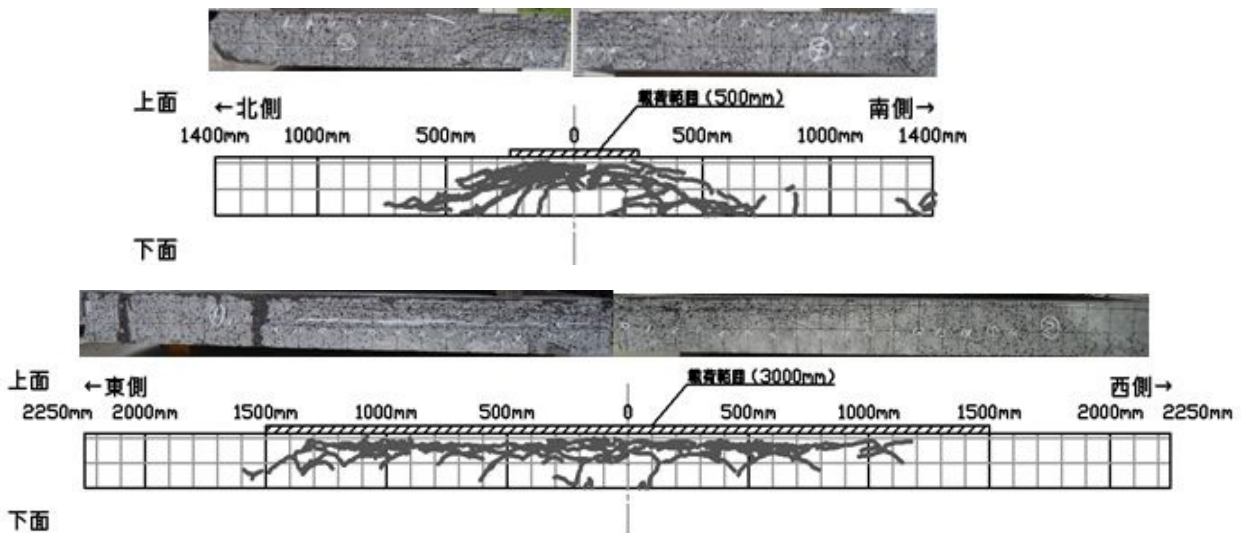
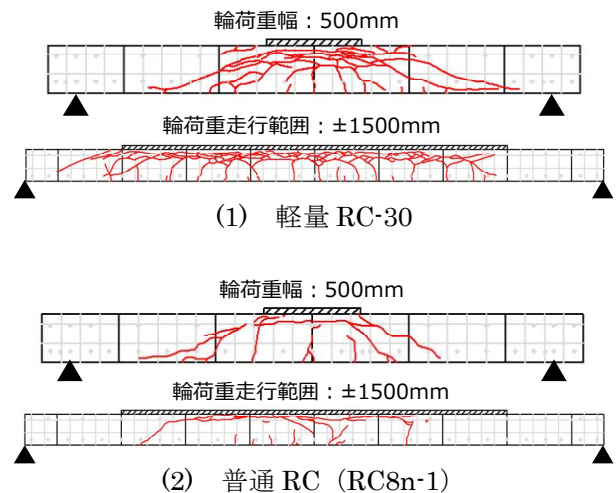


写真-9 段差を伴うひび割れ (軽量 RC-45)



(3) 軽量 RC-45

図-38 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)

## 5.4 まとめ

本研究では、軽量 RC-45 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。なお、プレキャスト化を想定した床版作製方法を採用したが、従来の現場打ち床版に現場で縦筋を設置するという施工上の工程追加を厭わなければ、「松」グレードの床版は現場打ちでも十分に実現できる仕様である。

- (1). 軽量 RC-45 「松」の諸元は、膨張材を標準混和量の 1.5 倍混和し、普通 RC 床版に比べて床版厚を 3cm 薄くし、床版厚さ方向に縦筋を配置した床版である。床版厚を 3cm 薄くして更なる軽量化を図ったにも拘わらず、走行回数 52 万回で未破壊という高い耐疲労性を有することを確認した。
- (2). 膨張材を標準混和量の 1.5 倍混和することに伴う床版厚さ方向への膨張に対しては、床版厚さ方向へ配置する縦筋により膨張ひずみを制御できる可能性があると考えられる。また、床版厚さ方向へ配置する縦筋は耐疲労性にも寄与すると考えられる。
- (3). 膨張材を標準混和量の 1.5 倍混和し、床版厚さ方向に縦筋を配置することで床版厚さを薄くできることから死荷重の低減が可能となり、コスト削減効果が期待できることを確認した。

## 第6章 凍結融解抵抗性に関する検討

### 6.1 概説

膨張材併用軽量コンクリート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、膨張材併用軽量コンクリート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<sup>14)</sup>。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<sup>15)</sup>。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。本研究では、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。

### 6.2 試験概要

#### (1) 使用材料

表-25 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 cm<sup>2</sup>/g）、膨張材には現場打ち配合としてエトリングナイト・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グナイト系膨張材（CS）をそれぞれ用いた。また、骨材は細骨材、粗骨材ともに人工軽量骨材を用い、プレウエッティン

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、低い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。練り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助剤（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）。

表-25 使用材料

種類	内容	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
水(W)	上水道水	1.00
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	3.16
膨張材 A(PC)	エトリングナイト・石灰複合系 (20型)	3.10
膨張材 B(CS)	エトリングナイト系 (30型)	2.95
細骨材(SL)	人工軽量細骨材 (プレソーキング品)	1.62
細骨材(SL-D)	人工軽量細骨材 (低含水产品)	1.62
粗骨材(GL)	人工軽量粗骨材 (プレソーキング品)	1.30
粗骨材(GL-D)	人工軽量粗骨材 (低含水产品)	1.30
中空微小球 (MS)	中空微小球	0.13
減水剤(SP①)	高性能 AE 減水剤	—
減水剤(SP②)	高性能 AE 減水剤	—
AE 助剤(AE)	AE 助剤	—

## (2) コンクリート配合

表-26 に、コンクリート配合を示す。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（「松'」）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「松」（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/m<sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup>）を混和した。膨張材を用いた配合では、エトリングait・石灰複合系膨張材を標準混和量程度（20kg/m<sup>3</sup>）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、エトリングait系膨張材を標準混和量の 1.5 倍（45kg/m<sup>3</sup>）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、プレウェッティ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。

## (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、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。

## (4) 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圧縮強度試験

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/mm<sup>2</sup> 以上とした。

### ③静弾性係数試験

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気泡間隔係数試験

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。

表-26 コンクリートの配合

No.	ケース	W/B (%)	s/a (%)	Air (%)	(kg/m <sup>3</sup> )								
					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	—

表-27 フレッシュ性状

No.	ケース	SP① (B×%)	SP② (B×%)	AE (B×%)	SL (cm)	Air (%)	C.T. (°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

\*Slump flow

### 6.3 試験結果

#### (1) フレッシュ性状

表-27 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。

#### (2) 圧縮強度

図-39 に現場打ち配合、図-40 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/mm<sup>2</sup> 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/mm<sup>2</sup> 程度、材齢 28 日で 48~58 N/mm<sup>2</sup> 程度であった。いずれの配合も、目標強度の 40N/mm<sup>2</sup> を上回る結果となった。現場打ち配合と同様に、いずれの配合も圧縮強度は同等程度であり、中空微小球や軽量骨材の含水状態による圧縮強度への影響は小さいと考えられる。

#### (3) 静弾性係数試験

図-41 に現場打ち配合、図-42 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 15~19kN/mm<sup>2</sup>程度であった。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 15~18kN/mm<sup>2</sup>程度、材齢 28 日で 15~21kN/mm<sup>2</sup>程度で推移していた。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。圧縮強度と同様に、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。

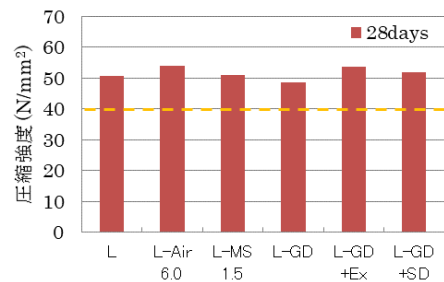


図-39 圧縮強度試験結果 (現場打ち配合)

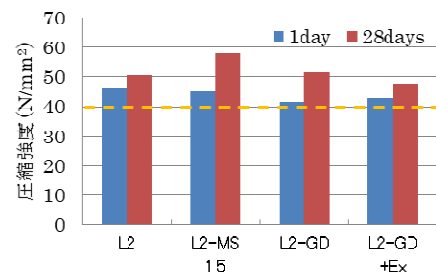


図-40 圧縮強度試験結果 (プレキャスト配合)

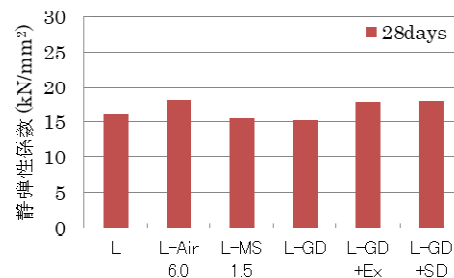


図-41 静弾性係数試験結果 (現場打ち配合)

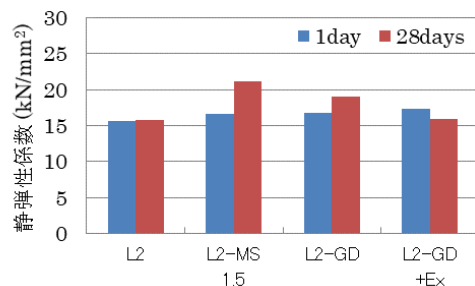


図-42 静弾性係数試験結果 (プレキャスト配合)

### (3) 凍結融解試験

#### ① 相対動弾性係数

図-43 に現場打ち配合, 図-44 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<sup>15)</sup>。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-Air 6.0, L-MS 1.5) 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-MS 1.5) 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。

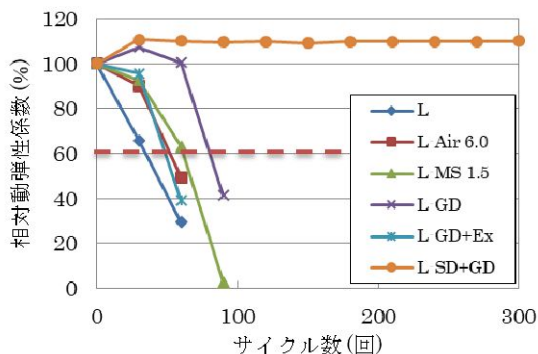


図-43 凍結融解試験結果 (現場打ち配合)

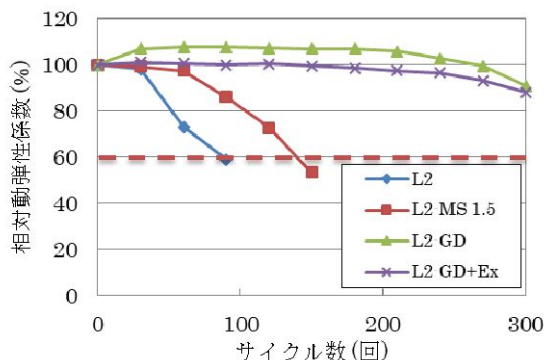


図-44 凍結融解試験結果 (プレキャスト配合)

一般にセメントの完全水和に必要な水量はセメント重量に対して約 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<sup>16)</sup>。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, 練り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<sup>17)</sup>。ここで, 5 配合の水量について表-28 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晶で 15.5%, 低含水晶で 0%, 粗骨材が保有する水は骨材の絶乾重量に対して含水晶で 29.5%, 低含水晶で 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重量に対して 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

表-28 含水晶と低含水晶のコンクリートの水量

No.	ケース	W/B (%)	(kg)				凍結融解試験結果
			W	セメントの完全水和に必要な水分	細骨材が保有する水分	粗骨材が保有する水分	
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



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は、練り混ぜ水でほぼ補えることから、軽量粗骨材だけではなく、軽量細骨材も低含水にすることで、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り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とすれば、粒径の小さな軽量細骨材からセメント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、耐凍害性は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、低水セメント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。

### ② 質量減少率

図-45 に現場打ち配合、図-46 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作用による影響であり、凍結融解作用によるスケ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。

### ③ 気泡間隔係数

図-47 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<sup>18)</sup>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気泡間隔係数は改善できず、結果として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。

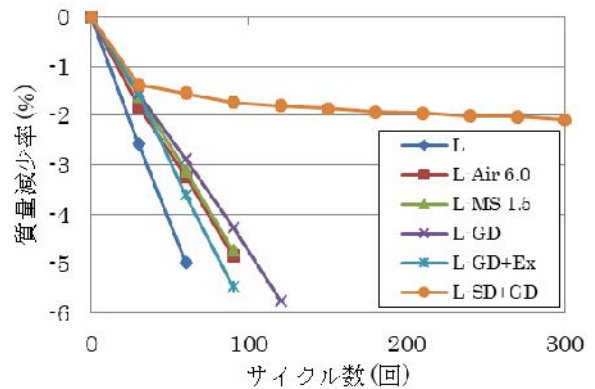


図-45 質量減少率（現場打ち配合）

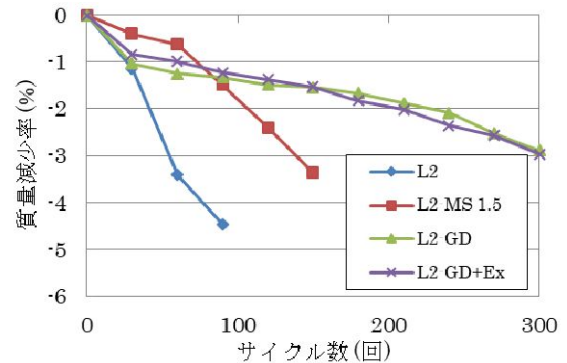


図-46 質量減少率（プレキャスト配合）

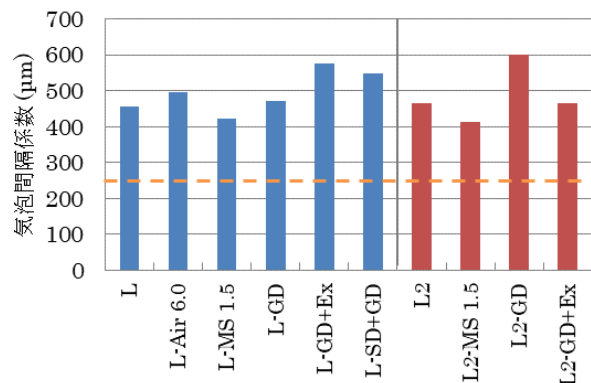


図-47 気泡間隔係数測定結果

## 6.4 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-48 (a) に現場打ち配合を、図-48 (b) にプレキャスト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<sup>19)</sup>を参考に作成した式(8)を用いて算出し、耐久性指数は式(9)<sup>20)</sup>を用いて算出した。

$$\Omega = (1 - s/a) \times \left( \frac{M_{GL}}{W_{GL}} \right) + s/a \times \left( \frac{M_{SL}}{W_{SL}} \right) \quad (8)$$

ここに

- $\Omega$  : 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

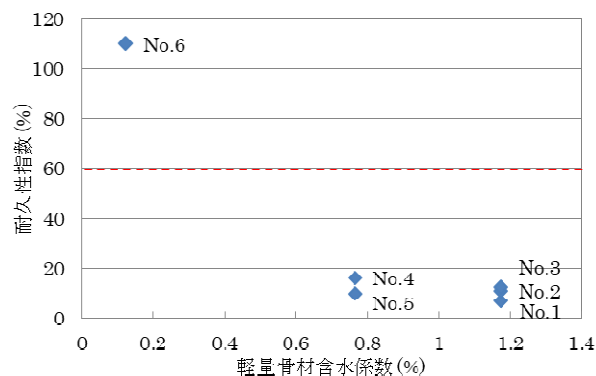
$$D.F = \frac{(P \times N)}{M} \times 100 \quad (9)$$

ここに

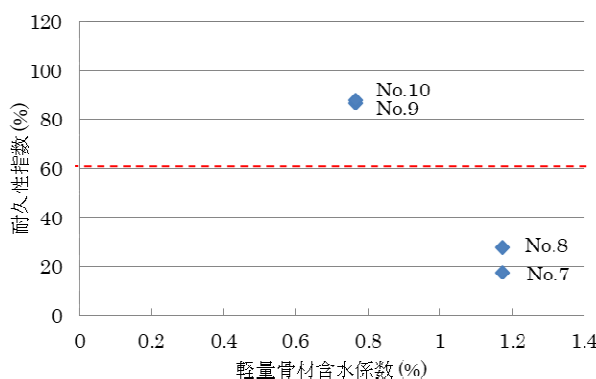
- $D.F$  : 耐久性指数 (%)
- $P$  : 凍結融解 N サイクルにおける  
相対動弾性係数 (%)
- $N$  : P が特定の値 (60%) となるまで  
のサイクル数あるいは試験を終了する  
サイクル数 (回)
- $M$  : 試験を終わらせる特定のサイクル数  
(300 回)

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) を比較すると 10%ほどの改善にとどまったものの、No. 1 (L) と No. 6 (L-GD+SD) を比較すると 104%の改善があり、W/B が 37%とやや小さい水粉体セメント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、耐凍害性を劣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) を比較すると 70%の改善があった。プレキャスト製品配合の場合、軽量細骨材が含水产品であるため、耐凍害性を劣化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。



(a) 現場打ち配合



(b) プレキャスト配合

図-48 耐久性指数と軽量骨材含水係数の関係性

## 6.5 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種を用いた場合、コンクリートの空気量による影響よりも、軽量骨材の骨材中の飽水度が支配的要因であることを確認した。
- (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%のように低水セメント比の場合には、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、低水セメント比の場合、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7章 膨張材併用軽量床版のコスト縮減効果

## 7.1 概説

道路橋の鋼桁を想定し、試設計を行い、膨張材併用軽量床版を適用した場合のコスト縮減効果について検証する。

上部工の橋種は、鋼連続鈹桁を基本として、従来適用されている床版と「松'」及び「松」を加えた合計5ケースでの上下部工の経済性を検討する。

なお、設計基準は、現行の道路橋示方書<sup>8)</sup>を用いて行った。

## 7.2 検討条件

試設計の対象とした5ケースを以下に示す。

- 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 : 鈹桁橋(多主桁)(松')
- 第5案 : 鈹桁橋(多主桁)(松)

図-49 に上部工標準断面図、表-26 に設計条件一覧表を示す。

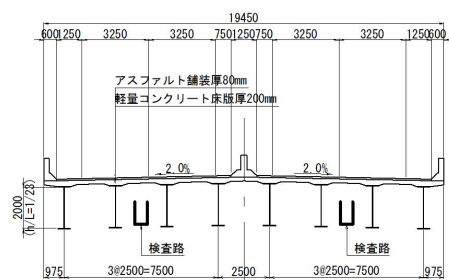
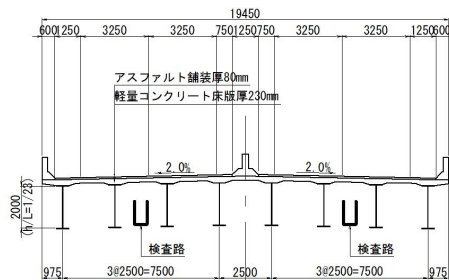
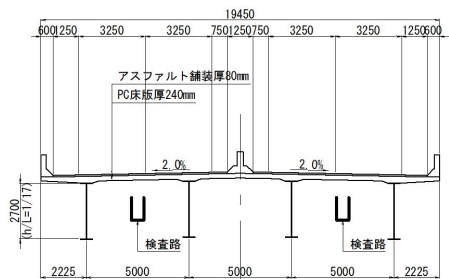
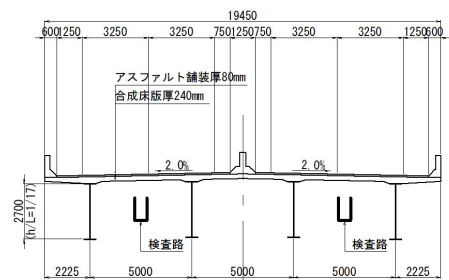
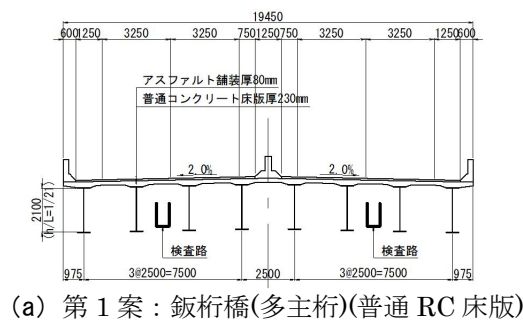


図-49 上部工標準断面図

表-26 試設計条件一覧

項目	細目	設計条件	備考	
基本条件	道路規格	第2種第2級	自動車専用道路での採用を想定した	
	幅員	路肩：1.25m，車道：3.25m 	自動車専用道路での採用を想定した	
	橋長	L = 180.0m	条件として与えた	
	支間割	44.3m + 2@45.0m + 44.3m の4径間	条件として与えた	
	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	軽量コンクリートを用いた下部工の耐震性能が不明瞭であるため、軽量コンクリートは床版にのみ使用する	
	単位体積重量	普通RC床版 RC 24.5kN/m <sup>3</sup> 膨張材併用軽量床版 20.0kN/m <sup>3</sup>	膨張材併用軽量床版「松 <sup>1</sup> 」及び「松 <sup>2</sup> 」は、普通RC床版より20%低減される	
	平面線形	R = ∞	条件として与えた	
	横断勾配	i = 2.0% 拌み勾配	平面線形より道路構造令に準拠し設定した	
	設計活荷重	B活荷重	条件として与えた	
	設計水平震度	k <sub>h</sub> =0.25 (A2地域 II種地盤想定)	条件として与えた	
基礎構造	杭基礎	基礎形式	場所打ち杭 φ1200mm	一般的な杭種杭径を想定した
		杭長	L = 35.0m	条件として与えた
	地盤条件 検討モデル	<p>場所打ち杭φ1200 L=35.0m</p> <p>砂質土 N=3 γ t=17/KN/m<sup>3</sup> c=0.0KN/m<sup>2</sup> φ=30° α E0=8400(常時)、 16800(地震時)</p> <p>支持層：良質な砂礫層 N=50以上 γ t=20/KN/m<sup>3</sup> c=0.0KN/m<sup>2</sup> φ=35° α E0=140000(常時)、 280000(地震時) qd=5000 KN/m<sup>2</sup></p>		

## 7.2 検討結果

「松'」及び「松」のコスト削減効果について、試設計を実施し、従来の床版形式を用いた場合（第1案）との比較を行った結果を図-50に示す。上段は、死荷重反力の対比であるが、第1案の普通RC床版を基とすると、「松'」は約10%、「松」は約15%小さくなる。

このため、下部工及び基礎工の工費が低減され、結果として、「松'」は、従来形式の最も安価な案に対して約3%のコストが削減される。更に、「松」を採用した場合、従来形式の最も安価な案に対して約7%のコスト削減となった。

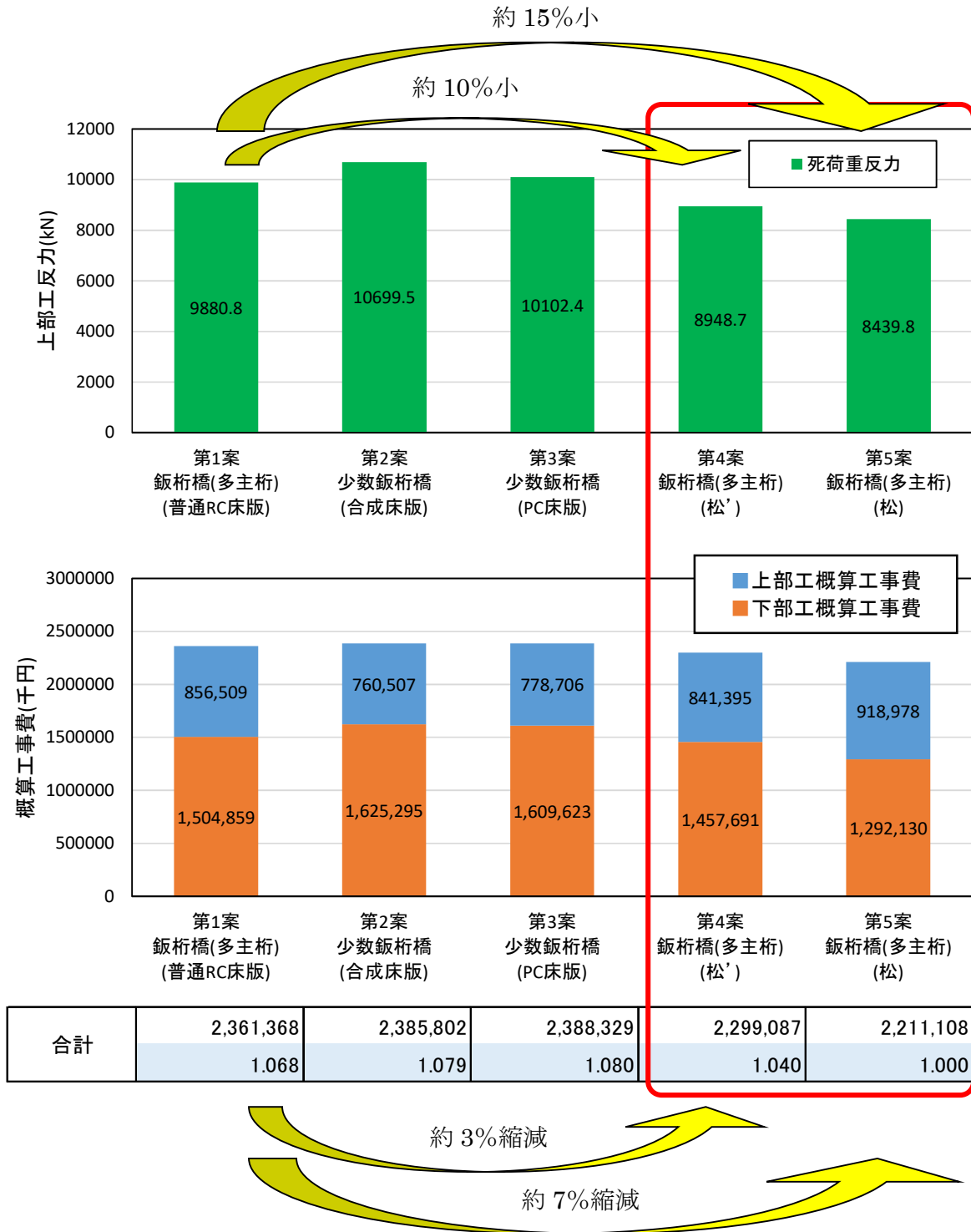


図-50 試設計結果（コスト削減効果）

# 第8章 まとめ

## 8.1 本研究で得られた知見

本研究によって得られた知見を以下に列挙する。

### (1) 圧送性確保のための検討

・これまでの知見では単位水量を  $165\text{kg/m}^3$  とした場合に圧送性の確保が困難である冬季において、単位水量を  $170\text{kg/m}^3$  とわずかに単位水量を  $5\text{kg/m}^3$  増やすことで圧送性が改善することを確認した。

・また、一般的に圧送性が低下すると言われる夏季においても単位水量を  $170\text{kg/m}^3$  とすることで圧送性は確保できることも確認した。

・以上のことから、生産性を向上させるために、ポンプ圧送を前提とした軽量コンクリートの施工は、年間を通して確実に施工できる配合を確認することができた。

・圧送性の低下のメカニズムにまで踏み込んで検討を行い、ブリーディング率と加圧ブリーディング試験のそれぞれの試験結果を用いた軽量コンクリートの圧送性指標を提示した。

### (2) 耐疲労性に関する検討

・「松」の諸元は、膨張材を標準混和量の 1.5 倍混和し、普通 RC 床版に比べて床版厚を 3cm 薄くし、床版厚さ方向に縦筋を配置した床版である。床版厚を 3cm 薄くして更なる軽量化を図ったにも拘わらず、「松」は走行回数 52 万回で未破壊という高い耐疲労性を有することを確認した。

・膨張材を標準混和量の 1.5 倍混和することに伴う床版厚さ方向への膨張に対しては、床版厚さ方向へ配置する縦筋により膨張ひずみを制御できる可能性があると考えられる。また、床版厚さ方向へ配置する縦筋は耐疲労性にも寄与すると考えられる。

・膨張材を標準混和量の 1.5 倍混和し、床版厚さ方向に縦筋を配置することで床版厚さを薄くできることから死荷重の低減が可能となり、コスト削減効果が期待できることを確認した。

・「松」の諸元は、普通 RC 床版と同じ厚さで、膨張材は標準混和量を混和する床版である。H29 年度に実施した輪荷重走行試験により軽量コンクリートに膨張材を標準混和量混和することでケミカルプレストレスを導入できることが確認され、また、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た。

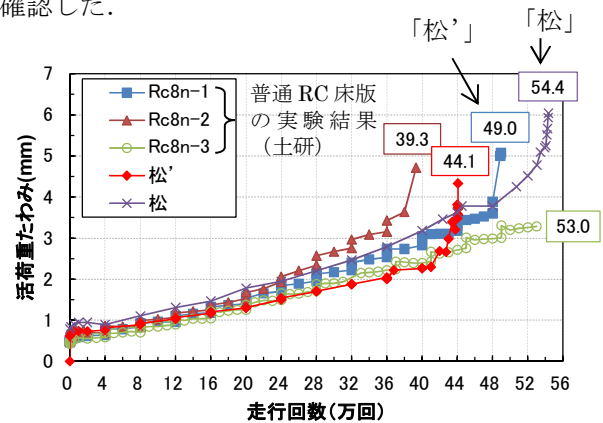


図-51 輪荷重走行試験結果

### (3) 凍害に対する抵抗性に関する検討

・空気量を増やす、また、軽量骨材は低含水品することで凍害に対する抵抗性の検討を行った結果、軽量床版の耐凍害性の改善には、水セメント比を小さくすること、また、軽量骨材の含水比を小さく（低含水品を使用）することが有効であることを確認した。

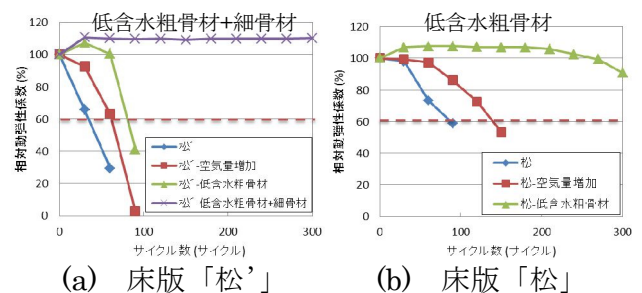


図-52 凍結融解試験結果

## 8.2 膨張材併用軽量床版の開発結果

本研究によって開発が完了した膨張材併用軽量床版の概要を以下に示す。

### (1) 『松』(現場汎用性重視上級床版)の開発

現場打設については、軽量骨材がポンプ打設中の圧力に対し骨材が吸水し、閉塞による打設困難さが課題となっていた。本研究では、年間を通して安定して打設可能な打設方法の研究を行い、汎用的な打設方法を開発し達成できた。膨張材量については、膨張材量が多い場合に、床版鉛直方向に対する過大膨張が課題としてあったが、膨張材量の各種実験、輪荷重走行試験による研究を行い、最適な膨張材量の使用のもと、過大膨張を抑制しつつ、耐疲労性向上に資するケミカルプレストレスの導入によって、普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有し、かつ 20%軽量な床版を開発した。

### (2) 『松』(最上級プレミアム床版)の開発

『松』の研究開発の見直しを活かし、膨張材量を増やし、ケミカルプレストレス導入による耐疲労性の向上を狙いつつ、床版鉛直方向への過大膨張対策として、床版厚さ方向に拘束鉄筋を組み込む構造を提案。設計的には、ケミカルプレストレス導入によって、床版厚さを普通 RC 床版の 90% (3cm 減少) とした。輪荷重走行試験を行った結果、普通 RC 床版の耐久性を大幅な上回る結果が得られた。また、低水セメント比コンクリート使用により、従来軽量コンクリートでは弱点とされていた凍害防止効果も高められることが凍結融解試験によって確認された。さらに、自己治癒性能が期待できるコンクリートを使用しているため、万が一ひびわれが発生した時には自己補修効果を期待できる。床版厚さ方向に拘束鉄筋への鉄筋の配置は、現場施工において標準的でないため、当面はプレキャスト部材での適用が想定されるが、『松』よりさらに 10%軽量で、高耐久化を図った床版、寒冷地の使用にも耐えうる床版が開発され、当初想定した以上の成果が得られた。

### 参考文献

- 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
- 武藤佳祐 他: 膨張材併用軽量床版の設計と施工, 橋梁と基礎(建設図書), 2017.4, vol51, pp29-34
- 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, 第 16 巻第 1 号, pp.45-54, 2005.1
- 膨張コンクリート設計施工指針: 土木学会コンクリート・ライブラリー, 第 75 号, 1993
- 岸田政彦 他, 膨張材併用軽量コンクリートの圧送性に関する検討, セメント・コンクリート論文集, 69 巻 1 号, pp.279-286 (2015)
- コンクリートのポンプ施工指針[2012 年版], 土木学会 (2012)
- 岸田政彦 他: 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
- 日本道路協会: 道路橋示方書 I 共通編, II 鋼橋編, ほか, 2017.11
- 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, 2008.8
- 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書施工編, 2012.3
- 杉山彰徳 他: 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(平成 23 年度), V-530
- 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, 2007.10
- 橋大介 他: 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, 1994.8
- 笠井芳夫編, 井須紀文 他: 軽量コンクリート, 技術書院, 2002 年発行
- 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)
- 五十嵐心一 他: 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)
- 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)
- 石清水隆 他: 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)
- 橋大介 他: 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)