

# 論文 膨張材を混和した軽量 RC 床版の膨張特性に関する検討

岸田 政彦\*1・田嶋 仁志\*2・宮口 克一\*3・中澤 治郎\*4

**要旨:** 膨張材を混和した軽量コンクリート 2 種を用いて実構造物を模擬した RC 床版供試体を作製し、内部の鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみの特性について実験的に検討を行った。その結果、軽量コンクリート 2 種は普通コンクリートに比べて同量の膨張材で導入できる膨張ひずみが大きくなることを確認した。また、小型供試体では材齢 91 日で収縮傾向が見られたが、RC 床版供試体では材齢 120 日でも収縮傾向が見られなかった。これは軽量骨材の内部養生効果と考えられ、実構造物では単位体積当りの表面積が小さく、乾燥収縮の影響を受けにくいいため、膨張ひずみを長期にわたって維持できる可能性があるものと考えられた。

**キーワード:** 軽量 RC 床版, 膨張ひずみ, 膨張材, 軽量骨材

## 1. はじめに

構造用人工軽量骨材（以下、軽量骨材）を使用したコンクリート（以下、軽量コンクリート）を道路橋床版に適用することで、上部工のみならず下部工の規模縮小が可能となる。また、維持管理の分野においても、死荷重が小さくなるため、床版の更新等において有用である。

軽量コンクリートは、軽量骨材の製造技術の進歩によって、軽量骨材にあらかじめ多量の水分を吸水させる手法（プレソーキング）を用いることで、圧送性を低下させる要因である圧力吸水量が低減され、圧送性が大幅に改善されている。現在では土木分野においてもポンプ施工が十分可能な状況となっている。

一方、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、通常骨材を用いたコンクリートに比べて乾燥収縮が小さくなることが確認されている<sup>2)</sup>。また、コンクリート中のセメントの水和の過程で失われるペースト内の水分は、骨材から供給される効果（以下、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<sup>3)</sup>されている。さらに、軽量 RC 床版の鉄筋にケミカルプレストレスを導入できる量の膨張材を混和することで、耐疲労性が大幅に向上することが報告<sup>4)</sup>されている。

本研究は、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. 試験概要

### 2.1 使用材料およびコンクリート配合

#### (1) 使用材料

本研究で用いた使用材料を表-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-1 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 <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3.08g/cm <sup>3</sup> )
細骨材(S <sub>t</sub> )	人工軽量細骨材(絶対密度1.62g/cm <sup>3</sup> F.M.2.75 吸水率27.5%)
粗骨材(G <sub>t</sub> )	人工軽量粗骨材(絶対密度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-2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、

\*1 首都高速道路（株） 技術部 技術推進課 修士（工）（正会員）

\*2 首都高速道路（株） 技術部 土木技術担当部長 博士（工）

\*3 デンカ（株） 青海工場 セメント・特混研究部 主席研究員 博士（工）（正会員）

\*4 パシフィックコンサルタンツ（株） 交通基盤事業本部 インフラマネジメント部 インフラ第一室長

表-2 コンクリート配合

記号	W/B (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			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

表-3 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 <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)	—

ポンプ圧送できることを確認した 170kg/m<sup>3</sup> 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-1 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。

2.2 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-3 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℃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。

(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, 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。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

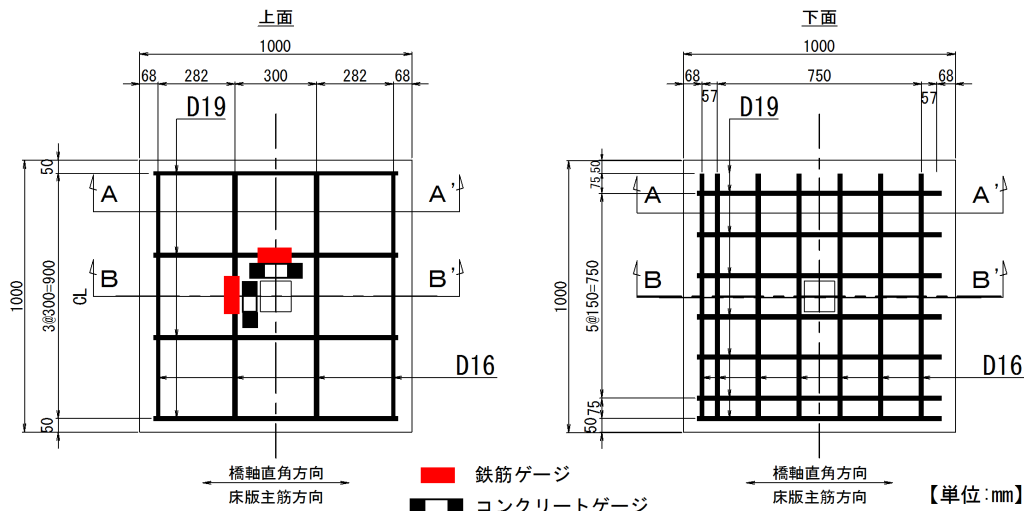


図-1 RC 床版供試体 配筋図 (その 1)

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. 試験結果

#### 3.1 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-4 に示す。打込み当日（2017 年 7 月 7 日）の試験室内の気温は 25°C 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。

#### 3.2 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-5 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>5)</sup>を用いて算出した。

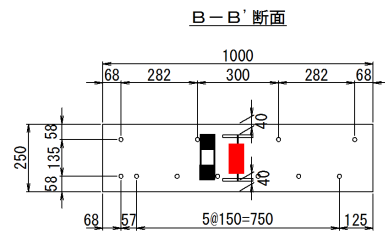
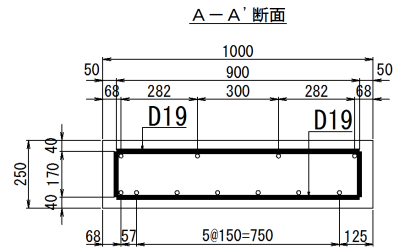
#### 3.3 拘束膨張供試体の長さ変化

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>6)</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>4)</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。

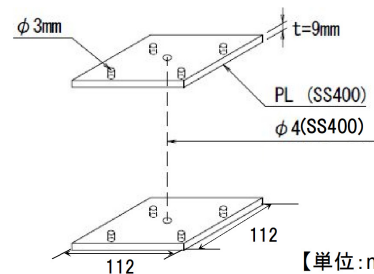
また、膨張材混和量が 25kg/m<sup>3</sup> の EX-25 および 30kg/m<sup>3</sup> の EX-30 は材齢 7 日の膨張率は 400~500×10<sup>-6</sup> を示しており、土木学会「膨張コンクリート設計施工指針」<sup>6)</sup>に示されるケミカルプレストレス用のコンクリート（200~1000×10<sup>-6</sup>）となる領域の膨張率を示している。

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。



【単位：mm】

図-2 RC床版供試体 配筋図（その2）



【単位：mm】

図-3 鉛直方向長さ変化率測定用拘束棒

表-4 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-5 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>

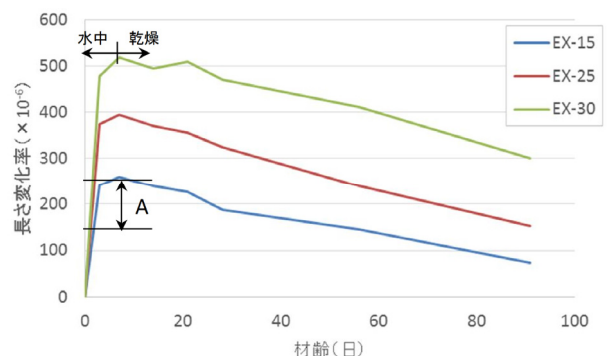


図-4 拘束膨張供試体の長さ変化率

### 3.4 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。

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。

### 3.5 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等であった。この理由については、今後検証していく必要があると考えている。

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

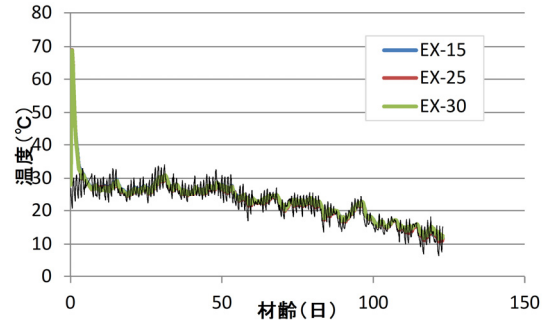


図-5 コンクリート内部の温度

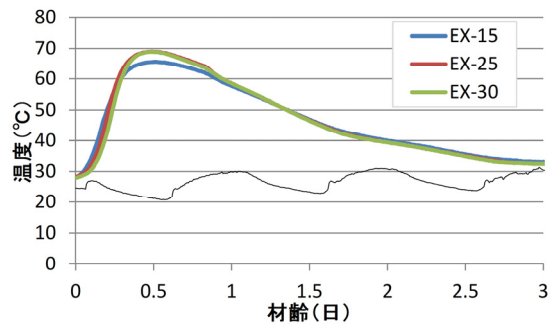


図-6 コンクリート内部の温度（材齢 3 日まで）

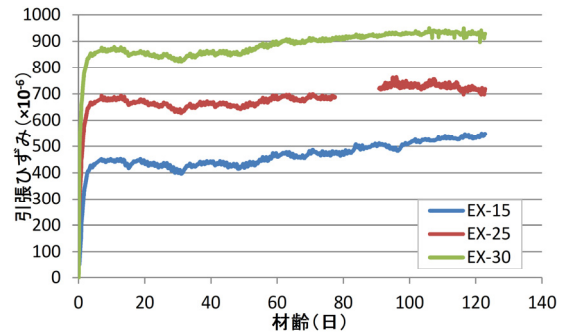


図-7 橋軸方向の鉄筋ひずみ

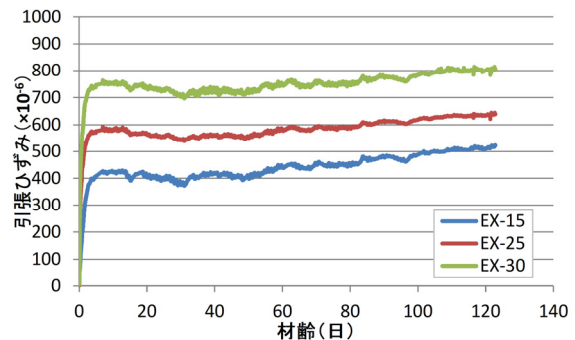


図-8 橋軸直角方向の鉄筋ひずみ

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。

### 3.6 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<sup>7)</sup>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、10×10×40cm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。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ので、さらに長期にわたって測定を実施し検証を行う予定である。

## (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。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、最終的にコア等采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を行う予定である。

## 3.7 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 $200\text{kN/mm}^2$ 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

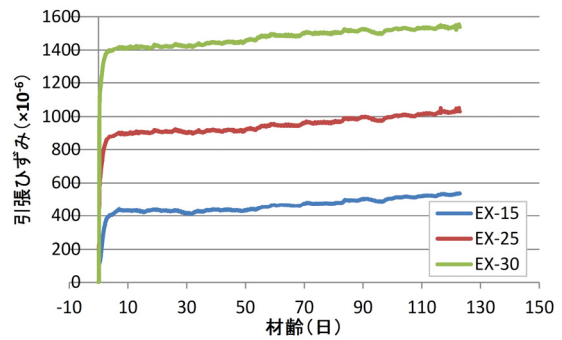


図-9 鉛直方向の鉄筋ひずみ

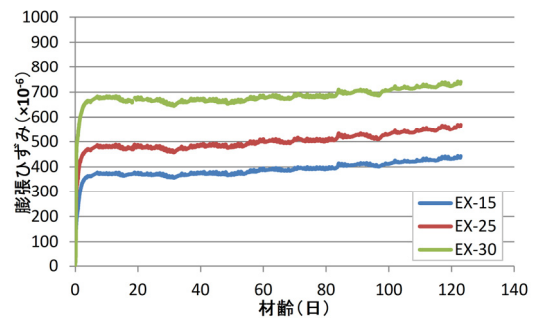


図-10 橋軸方向のコンクリートひずみ

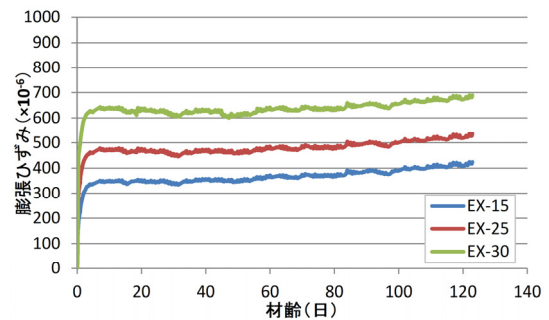


図-11 橋軸直角方向のコンクリートひずみ

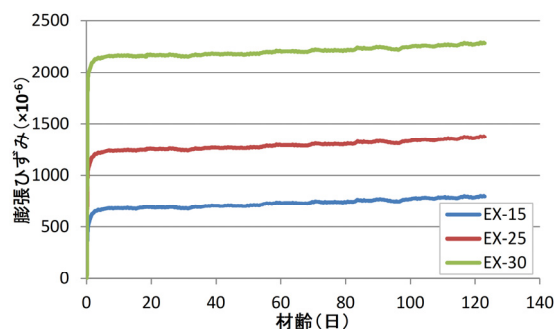


図-12 鉛直方向のコンクリートひずみ

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したいと考えている。

#### 4. まとめ

本研究の範囲内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。

謝辞：本研究を進めるにあたり、東京大学岸利治教授、日本大学岩城一郎教授、前橋工科大学・群馬大学辻幸和名誉教授には、多くの助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

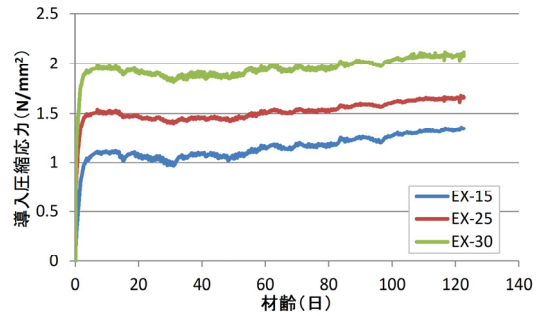


図-13 橋軸直角方向に導入される圧縮応力

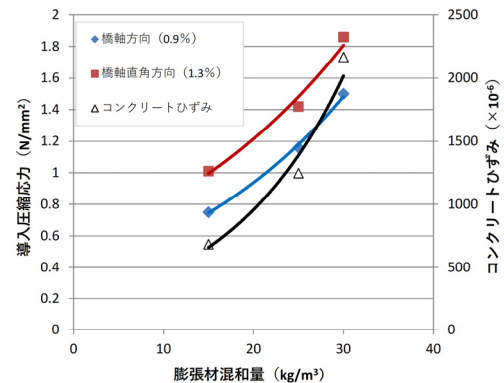


図-14 膨張材混和量と導入圧縮応力および鉛直方向のコンクリートひずみの関係

#### 参考文献

- 1) 人工軽量コンクリート設計施工マニュアル：土木学会コンクリート・ライブラリー，第56号，まえがき，1985
- 2) 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，土木学会コンクリート・ライブラリー，第24号，pp.1-13，1969
- 3) 五十嵐心一，川村満紀，神埼暁史：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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) (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](http://www.tml.jp/solution/data/embedment_straingauge_1.pdf)