

論文 早強性軽量コンクリートに関する基礎検討

北野 勇一^{*1}・塩井 健太^{*2}・段下 義典^{*3}

要旨：道路橋の床版更新に際しての要求事項には、早期に交通解放を行える以外に、主桁や下部工への負担軽減を必要とする場合がある。そこで、場所打ち合成床版を対象に、早強ポルトランドセメントと軽量骨材を用いた早強性軽量コンクリートに関する各種検討を行った。その結果、水セメント比を 40%、粗骨材全量と細骨材容積の 50%を人工軽量骨材とした早強性軽量コンクリートは、材齢 2 日で設計基準強度 30N/mm^2 と単位容積質量 18.5kN/m^3 を確保するとともに、養生を行わずとも強度特性が損なわれることがなく、かつ、膨張材を用いずともひび割れ抵抗性を十分有することなどを確認した。

キーワード：早強性軽量コンクリート、床版更新、合成床版、現場工期短縮、ひび割れ抵抗性

1. はじめに

筆者らは、図-1 に示す場所打ち合成床版を対象に、材齢 2 日で設計基準強度 30N/mm^2 を得られる早強性膨張コンクリートを用いることで、施工期間の短縮を図る技術の検討を進めてきた¹⁾。これによって、場所打ち合成床版の現場工期がプレキャスト床版並みに短縮するとともに、合成床版の底鋼板が外力に抵抗するほかコンクリート打設時の型枠を兼ねることから、プレキャスト床版では対応が難しい合成桁への対応や複雑な道路線形への対応が可能となる。このように場所打ち合成床版に早強性膨張コンクリートを用いる技術は、道路橋建設および床版更新の際の生産性向上に寄与する技術になり得る。

また、道路橋の床版更新に際しての要求事項には、早期に交通解放を行える以外に、主桁や下部工への負担軽減を必要とする場合がある。この対応として、筆者らは早強ポルトランドセメントと軽量骨材を用いることで早強性と軽量性を有するコンクリート（以下、早強性軽量コンクリート）を開発した²⁾。材齢 2 日で設計基準強度 30N/mm^2 を得られる早強性軽量コンクリートの例を以下に示す。

軽量 1 種の例：早強ポルトランドセメントを用いて水セメント比を 40%、粗骨材全量を人工軽量骨材とし、単位重量 19.5kN/m^3 のもの。

軽量 2 種の例：早強ポルトランドセメントを用いて水セメント比を 40%、粗骨材全量と細骨材容積の 50%を人工軽量骨材とし、単位重量 18.5kN/m^3 のもの。

しかし、早強性軽量コンクリートを合成床版に適用する際には、養生を十分に行えないことが強度特性に与える影響、水和熱や収縮に起因する体積変化特性、鋼桁や底鋼板がコンクリートを強く拘束することとひび割れ抵抗性との関係について予め確認する必要がある。

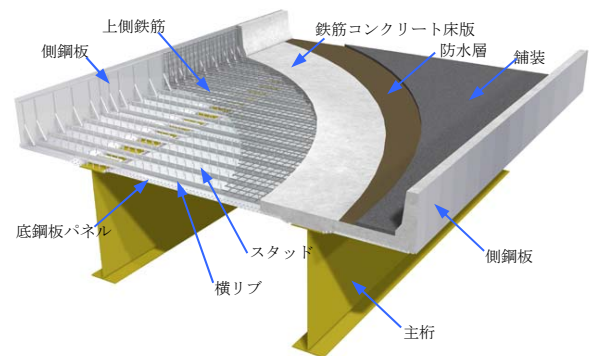


図-1 場所打ち合成床版の概要

そこで、材齢 2 日で設計基準強度 30N/mm^2 を得る早強性軽量コンクリートを対象に、強度特性、体積変化特性およびひび割れ抵抗について検討した。なお、早強性軽量コンクリートの耐久性に関しては別途検討する。

2. 強度特性に関する検討

2.1 検討方法

コンクリートの目標性状を表-1 に示す。早強性軽量コンクリートは材齢 2 日で 30N/mm^2 、合成床版の総重量を同厚の RC 床版以下に抑えるため単位重量 18.5kN/m^3 、ポンプ圧送性に配慮しスランプ 23cm とした。比較の普通コンクリートは、合成床版の場所打ちコンクリートに通常使われる材齢 28 日で 30N/mm^2 、単位重量 23.0kN/m^3 、スランプ 12cm とした。

使用材料を表-2 に示す。人工軽量骨材は膨張頁岩で予め十分に吸水させた(プレソーキング)ものを用いた。コンクリート配合を表-3 に示す。早強性軽量コンクリートは早強ポルトランドセメントを用い水セメント比 40%とし、所要の単位重量を確保するため、粗骨材全量

*1 川田建設（株） 技術部技術開発課（正会員）

*2 川田建設（株） 技術部技術開発課

*3 川田工業（株） 鋼構造事業部技術部東京技術課

表-1 目標性状

項目	早強性軽量 コンクリート	普通コンクリート
設計基準強度	2日：30N/mm ²	28日：30N/mm ²
単位重量	18.5kN/m ³	23.0kN/m ³
スランプ	23±2.0cm	12±2.5cm
空気量	5.0±1.5%	4.5±1.5%

表-2 使用材料

材料	記号	仕様
セメント (C)	HPC	早強ポルトランドセメント(密度3.14g/cm ³)
	OPC	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)
細骨材	S	混合砂(表乾密度2.60g/cm ³)
	LS	人工軽量細骨材(膨張頁岩・プレソーキング品, 絶乾密度1.65g/cm ³ , 吸水率15.0%)
粗骨材	LG	人工軽量粗骨材(膨張頁岩・プレソーキング品, 絶乾密度1.29g/cm ³ , 吸水率27.5%)
	G	石灰石碎石 2005(表乾密度2.70g/cm ³)
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)
	AE	AE 減水剤

と細骨材容積の50%を人工軽量骨材とした軽量2種、所定のスランプと空気量が得られるよう高性能 AE 減水剤の使用量を調整した。普通コンクリートは、普通ポルトランドセメント、砂、碎石および AE 減水剤を用い、水セメント比51%とした。なお、各材料は20℃の室内にて密封した状態にて保管したものを用いた。

練混ぜは公称容量60Lの強制二軸ミキサを用い、粗骨材、セメント、細骨材を投入し空練り15秒、混和剤を含む水を追加して本練り90秒にて行った。コンクリートの排出後、目標性状の範囲内であることを確認した上で供試体を採取し、材齢2日まで封かんし、脱型後、図-2に示す養生を行った。ここで、「水中」とは標準養生のことであり、「封かん」は合成床版に打ち込まれるコンクリートが底鋼板と床版防水に挟まれて水の出入りがないことを想定したもの、「気乾」は参考として気中で乾燥を受けた場合の影響について確認するものである。

上記の養生が完了した後、所定の材齢で圧縮強度(JIS A1108)、静弾性係数(JIS A1149)、引張強度(JIS A1113)の各試験(各水準とも3体)を実施した。

2.2 目標性状の確認

フレッシュ性状を表-4に、圧縮強度試験結果を図-3に示す。これらの図表より、早強性軽量コンクリートおよび普通コンクリートとも目標性状を得ることと、早強性軽量コンクリートの強度発現性状は、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの強度発現式³⁾と概ね一致することが確認された。

2.3 養生方法が強度特性に与える影響

材齢28日における強度試験結果を図-4～6に示す。

圧縮強度：普通コンクリートは水中>封かん>気乾の

表-3 コンクリート配合

種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S	LS	LG	G
早強性軽量 コンクリート	40.0	175	438	422	308	514	—
普通コンク リート	51.0	168	330	792	—	—	1021

*人工軽量骨材 LS および LG は表乾状態の質量を示す。



図-2 養生方法

表-4 フレッシュ性状

項目	早強性軽量 コンクリート	普通コンクリート
単位重量	18.5kN/m ³	22.8kN/m ³
スランプ	23.5cm	9.5cm
空気量	4.0%	4.2%
コンクリート温度	21.5℃	21.0℃

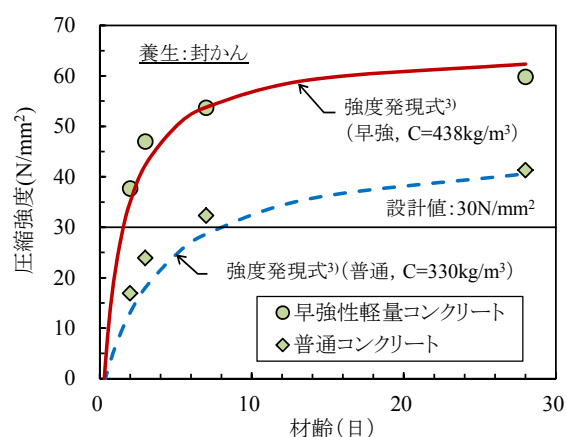


図-3 圧縮強度試験結果

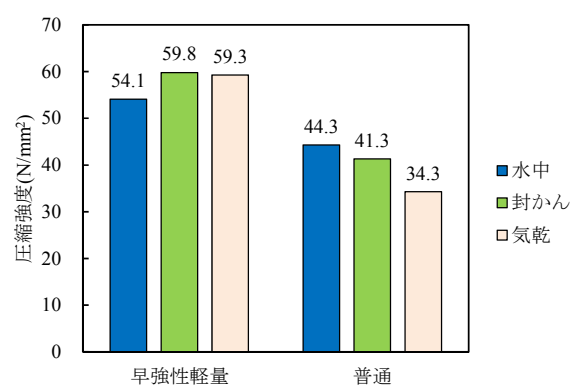
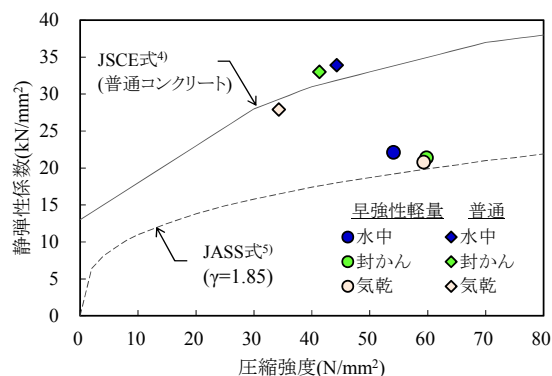
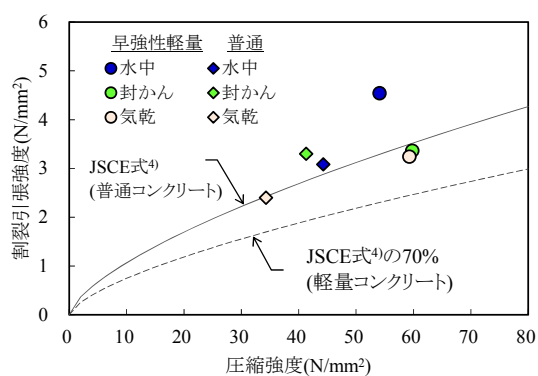


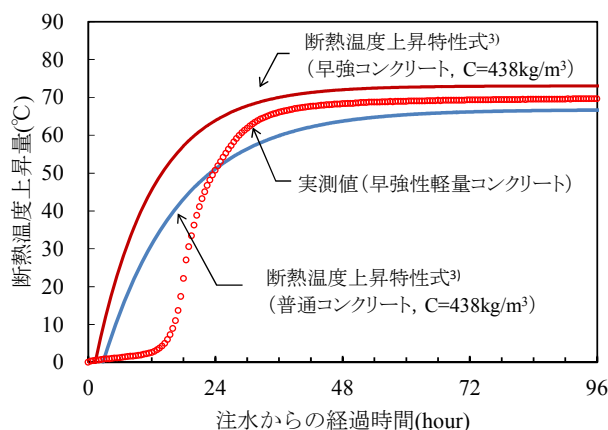
図-4 養生方法が圧縮強度に与える影響



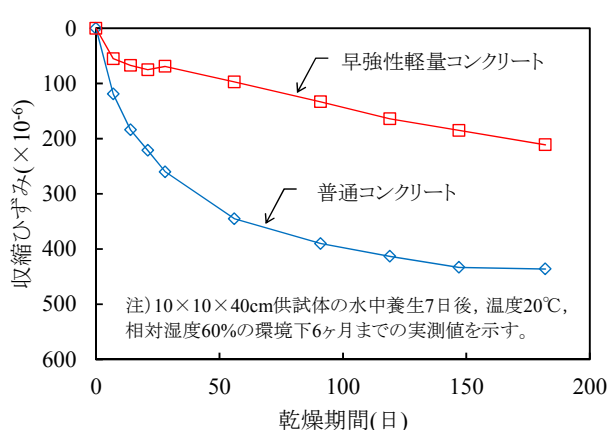
図－５ 養生方法が静弾性係数に与える影響



図－６ 養生方法が引張強度に与える影響



図－７ 断熱温度上昇試験結果



図－８ 乾燥収縮試験結果

順に圧縮強度が小さくなるのに対し、早強性軽量コンクリートは封かんおよび気乾としたものでも水中と同等以上の圧縮強度が得られた。

静弾性係数：早強性軽量コンクリートは普通コンクリートの 2/3 程度であり、養生方法によらず単位重量を 18.5kN/m³ とした日本建築学会式⁵)に概ね一致し、合成床版の設計値⁶)である 20kN/mm² を確保した。

引張強度：早強性軽量コンクリートは養生方法によらず普通コンクリートの設計値⁴)と概ね一致した。軽量コンクリートの引張強度は乾燥を受けると相当に低下することが知られているが⁷)，今回、骨材工場で事前吸水された高含水状態の人工軽量骨材を用いることで乾燥の影響が低減されたと考える。

3. 体積変化特性に関する検討

3.1 概要

早強性軽量コンクリートは普通コンクリートに比べ水セメント比が小さく早強性があり、かつ、軽量骨材を用いていることから、水和熱による温度応力や自己収縮に伴う拘束応力の増大が懸念される。また、乾燥を受ける場合の影響も把握する必要がある。そこで、前出表－3 に示すコンクリートを対象に断熱温度上昇特性、乾燥

収縮ひずみおよび拘束応力を実験的に確認した。

3.2 断熱温度上昇特性

早強性軽量コンクリートについて実施した断熱温度上昇試験の実測値と、文献 3 に示される断熱温度上昇特性式を図－7 に示す。早強性軽量コンクリートの実測値に着目すると、発熱開始時間の遅れが認められ、断熱温度上昇量の最大値は同一セメント量の早強コンクリートより若干小さくなることが確認された。前者はスランプを大きくしたため凝結時間が遅れること、後者も含めて人工軽量骨材が高含水状態であり比熱が大きく温度上昇が抑制されたこと（ただし、水和による熱エネルギーの総量は減少していない）が理由に挙げられる。

3.3 乾燥収縮ひずみ

100×100×400mm の供試体を作製し、水中養生 7 日後、温度 20℃、相対湿度 60% の環境下に 6 ヶ月まで保管した際の長さ変化率を JIS A1129 に従い測定した結果を図－8 に示す。早強性軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて乾燥収縮ひずみが小さく、その進行も遅いことがわかる。後者は人工軽量骨材から供給される水がセメント硬化体を自己養生するためと考えられるが、一方、このことがセメント硬化体中の細孔の微細化に寄与し、長期材齢において細孔に乾燥が生じた際に、毛細管張力に

よる負圧が大きくなり乾燥収縮ひずみが増大するとの指摘⁸⁾もあるので、前者については引き続き測定を行って真相を確認する予定である。

3.4 拘束応力

文献 9「コンクリートの自己収縮応力試験方法（案）」を参考に、底鋼板の鋼材比が 5%程度であること考慮し鉄筋 D25 とし、断面 100×100mm のコンクリートの体積変化を拘束することにより生じる応力を測定した。前出表一3 に示す 2 配合のコンクリートを用いて供試体を作製し、材齢 7 日まで封かん（20℃）を保ち、以降は屋内にて暴露した。屋内暴露は材齢 250 日まで実施し、いずれの供試体もひび割れの発生は認められなかった。

拘束応力の測定結果を図一9 に、封かんおよび屋内暴露における拘束応力の代表値を表一5 に示す。普通コンクリートは封かん状態で引張応力が若干生じるのに対し、早強性軽量コンクリートは材齢 7 日まで圧縮応力を維持し自己収縮応力が生じず、屋外暴露により乾燥を受ける状態においても引張応力が小さく（ただし、乾燥収縮ひずみで見られたほどの差異は認められない）、その進行が遅いことが確認された。これらの要因は前節にて述べたことに加え、軽量コンクリートの場合は乾燥収縮の進行度が遅いことでクリープによる収縮応力の緩和が小さいことが影響した可能性もあるが、これを精査するデータを取得できていないため、今後の検討課題とする。

4. ひび割れ抵抗性に関する検討

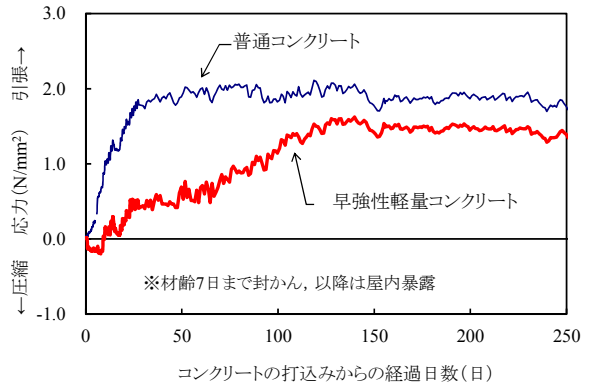
4.1 概要

早強性軽量コンクリートの水和熱や収縮に対するひび割れ抵抗性を明らかにするため、温度応力および収縮応力に関し解析的に検討した。

4.2 解析方法

解析モデルを図一10 に示す。厚さ 8mm の底鋼板に厚さ 180 mm（鋼桁上は 260mm）のコンクリートを場所打ちするケースを想定し、床版コンクリートの拘束が最も厳しくなるよう鋼桁下面は鉛直方向をすべて拘束し、かつ、上面側を完全付着しているものとみなしすべての節点を剛結とした。

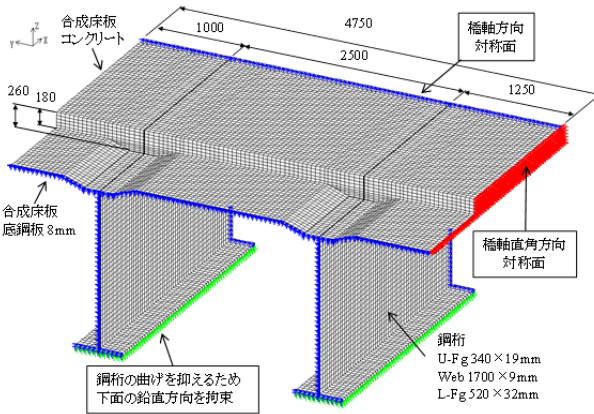
解析ケースを表一6 に示す。解析ケース「普通」は、前出表一3 に示した普通コンクリートのことであり、解析に用いる値は文献 3 に従った。「普通膨張」は、上記の普通コンクリートに標準的な使用量 20kg/m³ の膨張材を使用する場合とし、膨張ひずみは文献 3 に示される近似式を用いた。「早強性軽量」は前出表一3 に示した早強性軽量コンクリートのことであり、強度特性は文献 3 の早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートに、比熱と熱伝導率は文献 7 に従った。断熱温度上昇および乾燥収縮は、実験結果を用いた（前出図一7～8）。



図一9 拘束応力試験結果

表一5 拘束応力の代表値（単位：N/mm²）

項目	早強性軽量 コンクリート	普通コンクリート
封かん (材齢 7 日)	-0.2 (圧縮)	0.2 (引張)
屋内暴露 (材齢 180 日)	1.5 (引張)	2.0 (引張)



図一10 解析モデル

表一6 解析ケース

項目	普通	普通膨張	早強性軽量
セメント種類	普通		早強
水セメント比	51%		40%
セメント量	330kg/m ³		438kg/m ³
強度特性	文献 3（普通）		文献 3（早強）
密度	2300 kg/m ³		1850kg/m ³
比熱	1.15kJ/kg℃		1.7kJ/kg℃
熱伝導率	2.7W/m℃		1.5W/m℃
熱拡散率	0.0037m ² /h		0.0017m ² /h
膨張ひずみ	未考慮	考慮	未考慮

コンクリートの自己収縮は各ケースとも無視し（3 章参照）、熱膨張係数とポアソン比はコンクリート 10×10⁻⁶/℃と 0.2、鋼 12×10⁻⁶/℃と 0.3 とした。コンクリートのクリープの影響は有効ヤング係数法³⁾により考慮した。

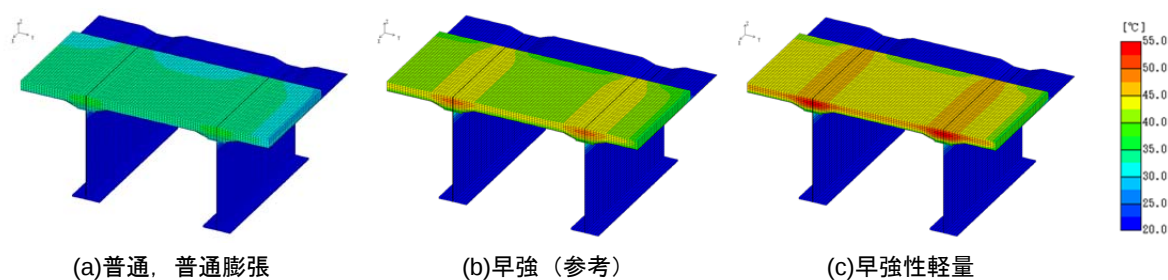


図-11 最高温度の分布

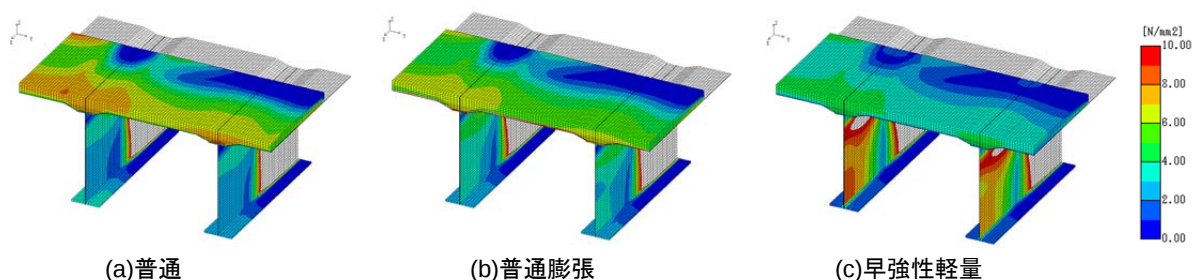


図-12 最大引張応力度の分布（橋軸方向）

また、温度解析に際し熱伝達条件は対称面 $0\text{W/m}^2\text{C}$ 、鋼材面 $14\text{W/m}^2\text{C}$ 、床版コンクリート上面を材齢 2 日まで $8\text{W/m}^2\text{C}$ （養生マット）、それ以降 6 ヶ月までを $12\text{W/m}^2\text{C}$ （外気）、外気温 20C 一定、コンクリートの打込み温度 25C とした。

4.3 解析結果および考察

経験した最高温度を図-11 に示す。ここで、最高温度については普通と普通膨張が同じ結果であり、「早強（参考）」は水セメント比 40%、単位セメント量 438kg/m^3 、早強ポルトランドセメントと普通骨材を用いたコンクリートの温度解析結果である。図より、早強性軽量コンクリートを用いることで床版内部温度は普通コンクリートより鋼桁上床版中心部で大幅に高く（ $+17.3\text{C}$ ）、しかも同一セメント量で普通骨材を用いた早強コンクリートよりも高温（同部で $+5.4\text{C}$ ）となっている。前者は早強ポルトランドセメントの使用とセメント量を 100kg/m^3 以上増したことが、後者は熱拡散率が普通コンクリートの半分程度と小さく放熱しにくい（蓄熱しやすい）ことに起因する。

橋軸方向の最大引張応力度を図-12 に、鋼桁上の床版中央部のコンクリート応力履歴を図-13 示す。材齢初期の温度変化に伴って生じる引張応力は普通と早強性軽量が概ね同程度であるが、材齢の進行とともに生じる引張応力は、普通 > 普通膨張 > 早強性軽量の順に小さくなることを確認された。これは、乾燥期間 6 ヶ月における乾燥収縮ひずみが普通コンクリートに比べ早強性軽量コンクリートの方が半分程度と小さいことによるが、3 章で述べたように最終的な乾燥収縮ひずみが低減されない可能性がある。

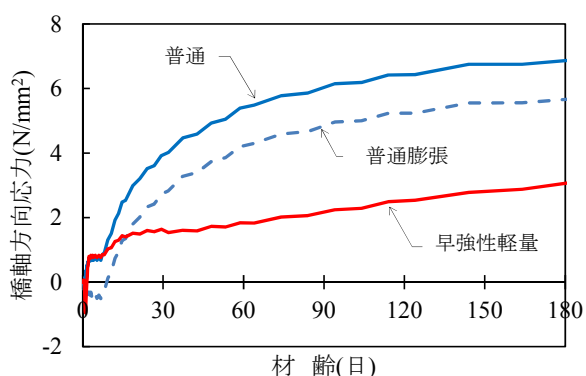


図-13 鋼桁上床版中央部のコンクリート応力履歴

表-7 解析結果一覧

	普通	普通膨張	早強性軽量
最高温度(°C)	36.4		53.7
温度応力 (N/mm²)	0.79	-0.40	0.77
収縮応力 (N/mm²)	3.13		2.34
合計応力 (N/mm²)	3.92	2.73	3.11
引張強度 (N/mm²)	2.40		3.24
ひび割れ指数	0.61	0.88	1.04

*収縮応力は乾燥収縮ひずみ 200×10^{-6} 相当分とした。

**引張強度は材齢 28 日の結果（気乾）を用いた。

***ひび割れ指数は、引張強度を合計応力で除した値とした。

そこで、各ケースとも乾燥収縮ひずみを 200×10^{-6} と同じ条件にして、解析結果を整理した結果を表-7 に示す。これによると、温度応力と収縮応力の合計応力は普通膨張 2.73N/mm^2 に対し、早強性軽量 3.11N/mm^2 と若干大きくなるものの、ひび割れ指数は同等以上となることからわかる。この理由としては、早強性軽量コンクリートの静

弾性係数が普通コンクリートの 2/3 程度と小さく拘束応力を低減することと、引張強度が普通コンクリートよりも高くなることが挙げられる。

なお、図-12(c)早強性軽量コンクリートを用いた鋼桁ウェブでは、(a)(b)と比較して約 2 倍の引張応力が生じるが、これは床版コンクリートの材齢初期における水和発熱によるもので最大 10N/mm^2 程度の引張応力であり、その後は材齢の進行とともに引張応力は解消されることから、橋梁構造として悪影響を与えるものではない。

5. まとめ

早強ポルトランドセメントを用い、水セメント比 40%、粗骨材全量と細骨材容積の 50%を人工軽量骨材とした早強性軽量コンクリートについて諸検討を行い、次のことが確認された。

- (1) 早強性軽量コンクリートは、材齢 2 日で設計基準強度 30N/mm^2 と単位容積質量 18.5kN/m^3 を確保するとともに、養生を行わずとも強度特性が損なわれることがない。
- (2) 早強性軽量コンクリートの断熱温度上昇量は、ひび割れ制御指針に基づき算出される同一セメント量の早強コンクリートより若干小さい。
- (3) 早強性軽量コンクリートは材齢 7 日まで自己収縮応力が生じない。
- (4) 早強性軽量コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびそれに伴う拘束応力は、設計基準強度 30N/mm^2 の普通コンクリートに比べ、小さくかつ進行が遅い。
- (5) 早強性軽量コンクリートは、設計基準強度 30N/mm^2 の普通コンクリートに比べ、温度上昇量が増大するものの温度応力としては同程度であり、収縮に伴う

拘束応力が低減されることから膨張材を用いずともひび割れ抵抗性を十分有する。

なお、本研究を実施するにあたり、アサノコンクリート(株) および日本メサライト工業(株)の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 段下義典, 北野勇一, 大友直之, 堀池一男, 江崎正浩, 橘吉宏: SC デッキによる床版取替え技術, 川田技報, Vol.30, 2011.1
- 2) 段下義典, 北野勇一, 高田嘉秀: SC デッキの現場工期短縮と床版取替への取り組み〜2DAY コンクリートの開発と活用〜, 川田技報, Vol.35, 2016.1
- 3) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008.11
- 4) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書設計編, 2013.3
- 5) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015, 2015.7
- 6) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, 1997.9
- 7) 土木学会: 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル, 1985.5
- 8) 河野克哉, 岡本亨久, 石川雄康, 児玉明彦: 人工軽量骨材を用いたコンクリートの収縮に及ぼす養生の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, 2000
- 9) 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, 1996.11