

## 混和材を用いたコンクリートの初期応力推定に関する検討

プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 工博 ○河金 甲  
 土木研究所 正会員 工修 中村 英佑  
 プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 工博 鈴木 雅博  
 プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 工修 石井 豪

Abstract : The estimation method for the restrained stresses of concrete containing supplementary cementitious materials at early ages was investigated by comparing finite element analysis results with experimental results given in specimens restrained with invar or normal steels in expanded polystyrene formworks. The analysis procedure based on the effective Young's modulus method was found applicable to estimate the restrained stresses due to autogenous shrinkage and temperature change. The estimation method for the restrained stresses of concrete using expansive additives was also discussed.

Key words : GGBF slag , Fly ash , Autogenous shrinkage , Restrained stress , Expansive additive

### 1. はじめに

産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末をコンクリート混和材としてさらに活用するため、PC構造物施工時に主に使用される早強ポルトランドセメントの一部を混和材により置換したコンクリートの特性把握に努めている<sup>1),2)</sup>。これまでの検討で、混和材の有無によらず高温履歴を受けると自己収縮は増大すること、高炉スラグ微粉末を用いた場合には早強単味の場合と比較して自己収縮が大きくなることが明らかとなっている<sup>2)</sup>。自己収縮が既設コンクリート等により拘束されるとコンクリートには引張応力が発生するが、自己収縮に起因した収縮応力は材齢初期に卓越するため、コンクリートの水和反応に起因した温度応力と組み合わせた応力を有限要素法 (FEM) によるクリープ解析で推定するケースが多い。現在はクリープ解析を簡便な有効ヤング係数法を用いて行っているが<sup>3)</sup>、早強ポルトランドセメントの一部を混和材により置換したコンクリートへの適用性は検証されていない。

そこで、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換したコンクリートの初期応力推定に対する有効ヤング係数法を用いたクリープ解析の適用性を、異形鉄筋あるいはインバー鋼材による拘束試験で得られた結果とFEM解析結果とを比較することにより行った。さらに、ひび割れ抑制対策として膨張材を併用して初期応力低減を図った場合の応力推定手法についても考察した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 コンクリートの配合

検討に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。設計基準強度は $40\text{N/mm}^2$ を想定し、材齢3日でプレストレス導入強度 $30\text{N/mm}^2$ が確保できるように配合を決定した<sup>1),2)</sup>。早強ポルトランドセメントのみを用いたH40は水結合材比を40%とし、これをベースに混和材を用いた3配合 (H35F20, H35B430, H35B650) と既往の研究<sup>2)</sup>で自己収縮が最も増大したH35B650にひび割れ抑制対策として膨張材を20kg混和したH35B650EXを検討に用いた。これまでの実績から結合材に対する混和材置換率は、H35F20はフライアッシュⅡ種を20%、H35B430は高炉スラグ微粉末4000を30%、H35B650は高炉スラグ微粉末6000を50%とした。なお、強度発現がH40と同等となるよう、混和材を用いた場合の水結合材比は35%とした。

## 2.2 製作供試体

製作供試体の一覧を表-2に示す。拘束応力は、図-1に示す200mmの発泡スチロールにより全面を覆って簡易的な断熱を行い高温履歴を与えた拘束供試体(100×100×900mm)を用いて測定した。拘束用鋼材として異形鉄筋(D32, ゲージ貼付部断面積 701mm<sup>2</sup>, ヤング係数 202kN/mm<sup>2</sup>)と全長にわたりねじ切り加工を行ったインバー鋼材(φ30, ゲージ貼付部断面積 599mm<sup>2</sup>, ヤング係数 136kN/mm<sup>2</sup>, 熱膨張係数 0.7×10<sup>-6</sup>/°C)を用いた。異形鉄筋はコンクリートとほぼ熱膨張係数が等しく主に自己収縮応力が測定されるが、インバー鋼材はコンクリートに比べて熱膨張係数が明らかに小さく、自己収縮応力とコンクリート温度変化に起因した温度応力が複合した応力測定が可能である。各拘束用鋼材の長さ方向中央部にひずみゲージを貼付し、鋼材とコンクリートの力の釣り合いからコンクリート応力を算出した<sup>4)</sup>。さらに、供試体中央に熱電対を設置してコンクリート温度を測定した。なお、練混ぜ、打込み、測定は室温約20°Cに管理された実験室内で行った。

コンクリートの自己収縮は、拘束供試体と同一寸法・同一養生の無拘束供試体(100×100×900mm)を用いて測定した。自己収縮ひずみは供試体中央に設置した埋込型ひずみ計(標点距離100mm)を用いて測定したひずみから、材齢91日以降に角柱供試体(100×100×400mm)を用いて温度範囲15~55°Cで測定した熱膨張係数を全材齢に適用して温度ひずみを補正した。

コンクリートの圧縮強度とヤング係数は、終結直後、材齢0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 7, 28日の11材齢で測定した。圧縮強度とヤング係数は、コンクリート打込み直後から室温約20°Cの実験室で封緘養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)を用いて測定した。

膨張材を用いたH35B650EXにおいては、日本コンクリート工学会マスコンのひび割れ制御指針<sup>3)</sup>(以下、JCI指針)で推奨している膨張ひずみ測定方法に準じ、標準的な拘束膨張試験(JIS A 6202 附属書2)に用いるPC鋼棒φ11を用いた拘束供試体(100×100×900mm)に図-1の簡易断熱による温度履歴を与えた封かん養生の供試体と、JIS A 6202 附属書2に準じて材齢1日で脱型を行い、材齢7日まで標準養生(20°C水中)を行った供試体(100×100×400mm)を製作し膨張ひずみを測定した。

表-1 配合

配合名	水結合材比 W/B	混和材置換率	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )							
			W	HPC	FA	B4	B6	EX	S	G
H40	40%	0%	165	413	-	-	-	-	-	758
H35F20	35%	20%		377	94	-	-	-	-	682
H35B430		30%		330	-	141	-	-	-	700
H35B650		50%		236	-	-	236	-	-	695
H35B650EX		50%		226	-	-	226	20	-	696

HPC: 早強ポルトランドセメント(密度3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積4580cm<sup>2</sup>/g),  
 FA: フライアッシュII種(密度2.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積3810cm<sup>2</sup>/g),  
 B4: 高炉スラグ微粉末4000(密度2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積4440cm<sup>2</sup>/g),  
 B6: 高炉スラグ微粉末6000(密度2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積5970cm<sup>2</sup>/g),  
 EX: 石灰系膨張材,  
 S: 細骨材(陸砂, 密度2.56g/cm<sup>3</sup>), G: 粗骨材(砕石, 密度2.67g/cm<sup>3</sup>)

表-2 製作供試体

	拘束鋼材	供試体寸法	養生方法	製作配合
拘束供試体〔異形鉄筋〕	異形鉄筋 D32	100×100×900mm	簡易断熱	全配合
拘束供試体〔インバー鋼材〕	インバー鋼材 φ30	100×100×900mm	簡易断熱	
無拘束供試体	-	100×100×900mm	簡易断熱	
圧縮強度・ヤング係数測定用供試体	-	φ100×200mm	20°C 封かん養生	
熱膨張係数測定用供試体	-	100×100×400mm	20°C 封かん養生	
膨張ひずみ測定用供試体(簡易断熱)	PC鋼棒 φ11	100×100×900mm	簡易断熱	H35B650EX
膨張ひずみ測定用供試体(標準養生)	PC鋼棒 φ11	100×100×400mm	標準(20°C水中)	H35B650EX (H35B650も比較用に製作)

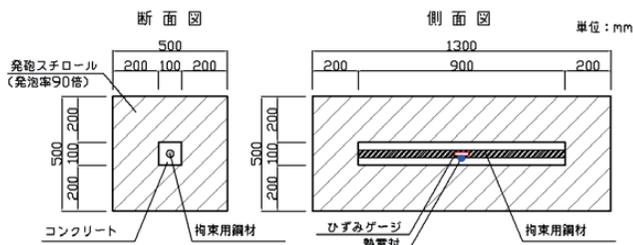


図-1 拘束供試体

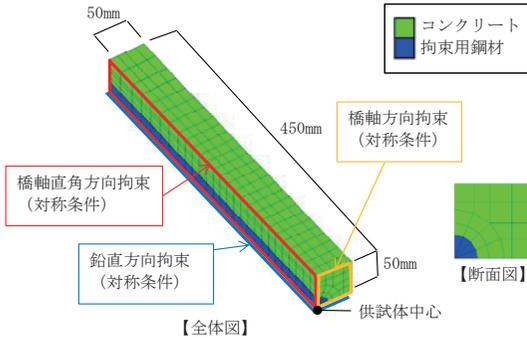


図-2 解析モデル

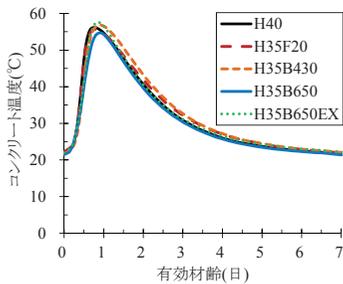


図-3 コンクリート温度 (拘束供試体〔異形鉄筋〕)

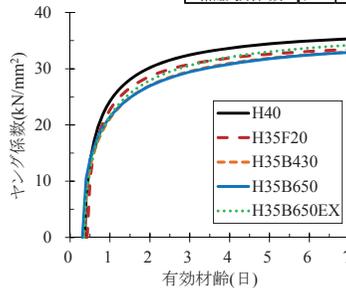


図-4 ヤング係数

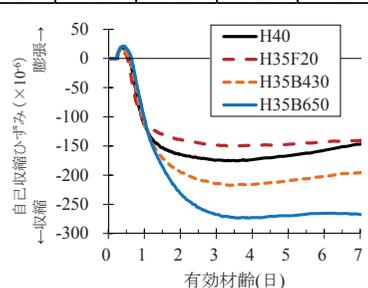


図-5 自己収縮ひずみ

表-3 コンクリート物性値

コンクリート温度履歴	各供試体の中央位置でのコンクリート温度の実測値 (拘束鋼材温度も同一)
圧縮強度 $f'_c(t_c)$	各配合の実測値からJCI指針式の係数を回帰(表-4) $f'_c(t_c) = \frac{t_c - S_f}{a + b \cdot (t_c - S_f)} f'_c(t_{28})$
ヤング係数 $E_c(t_c)$	各配合の実測値からJCI指針式の係数を回帰(表-4) $E_c(t_c) = C_3 \cdot f'_c(t_c)^{0.4}$
有効ヤング係数 $E_s(t_c)$	$E_s(t_c) = \phi(t_c) \times E_c(t_c)$ (ピーク温度時まで $\phi(t_c) = 0.42$ , 最高温度に達する有効材齢+1日以降 $\phi(t_c) = 0.65$ )
自己収縮	各配合の無拘束供試体での実測値
熱膨張係数	各配合の実測値(表-4)
ポアソン比	0.2

表-4 各配合毎の物性値

		単位	H40	H35F20	H35B430	H35B650	H35B650EX
圧縮強度	$S_f$	日	0.370	0.424	0.337	0.305	0.360
	$a$		0.954	0.960	1.492	1.733	1.447
	$b$		0.985	0.998	0.984	0.982	1.005
	$f'_c(t_{28})$	N/mm <sup>2</sup>	62.6	58.0	61.7	62.6	62.3
ヤング係数	$C_3$		5261	5578	5617	6414	5452
	$C_4$		0.474	0.456	0.450	0.417	0.467
熱膨張係数	$\mu / ^\circ\text{C}$		12.1	11.0	12.8	12.6	12.5

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析モデル

コンクリート温度応力解析プログラム (ASTEAMACS) を用いて3次元FEM解析による拘束応力を算出した。図-2に示すように、対称性を考慮し1/8モデルにて解析を行い、拘束用鋼材 (鉄筋とインバー鋼材) も3次元要素により断面積が実測値と同一となるようモデル化した。解析期間はコンクリート打込み後28日間とした。

#### 3.2 解析方法および解析に用いた材料物性値

本研究では早強ポルトランドセメントと混和材を組み合わせた場合の拘束応力推定に対する、有効ヤング係数法を用いたクリープ解析の適用性を検討することを目的とし、各供試体の温度履歴やコンクリート物性値は可能な限り実測値を用いて解析した。初期応力推定に重要なクリープによる応力緩和の影響は、JCI指針に準拠した有効ヤング係数法を用いて評価した。解析に用いた、コンクリートの物性値を表-3および表-4に、コンクリート温度履歴、ヤング係数、自己収縮ひずみを図-3～図-5にそれぞれ示す。なお、有効材齢は各供試体のコンクリート温度の実測値を用いてJCI指針に従い計算した。混和材を用いた場合の水結合材比は早強単味に対して5%小さくした結果、図-3の一例に示すようにコンクリートの温度履歴に混和材の有無の影響はほとんどみられなかった。一方、図-4に示す混和材を用いた場合の材齢7日までのヤング係数発現はH40よりも若干遅い傾向がみられた。図-5から、普通ポルトランドセメントと混和材を組み合わせた場合(例えば5)と同様に、H40との比較において、自己収縮はフライアッシュで置換すると減少するのに対し、高炉スラグ微粉末で置換すると大きくなり、さらに粉末度が高く混和材置換率が大きいとその増大が顕著になることが確認できる。

### 3.3 解析に用いた膨張ひずみ

膨張材を用いた場合の拘束応力推定には膨張ひずみの設定方法やクリープによる応力緩和の考慮方法が重要となる。本研究では、クリープによる応力緩和はJCI指針に準じた有効ヤング係数法を用いて考慮し、膨張ひずみの設定方法を変化させた場合の応力推定精度を検討する。H35B650EXにおけるJIS A 6202附属書2に準じて標準養生を行った場合の膨張ひずみ（以下、JIS膨張）の推移を、JCI指針の早強ポルトランドセメントの膨張ひずみの近似式（以下、JCI膨張式）の値および比較のために行ったH35B650の同一試験の結果と併せて図-6に示す。さらに、膨張材を用いた場合の検討ケース一覧を表-5に、各検討ケースの膨張ひずみを図-7に示す。H35B650EXの無拘束供試体で得られたひずみ（無拘束膨張）、PC鋼棒φ11を拘束鋼材として用い応力推定する拘束供試体と同一養生を行った供試体で得られたひずみ（拘束φ11膨張）、さらに「JIS膨張」と「JCI膨張式」には自己収縮ひずみの影響を含んでいないので、H35B650の無拘束供試体で得られた自己収縮ひずみと重ね合わせたひずみ（収縮+JIS膨張、収縮+JCI膨張式）の4ケースを比較した。なお、図-6に示すように「JIS膨張」のひずみは材齢1.5日以降は収縮側に推移しているが、膨張材を混和していないH35B650の場合も水中養生中であっても同様に収縮した。自己収縮を二重に考慮しないよう、「JIS膨張」の膨張ひずみは最大値のまま一定として自己収縮ひずみと重ね合わせた。

鋼材のヤング係数は実測値を用い、熱膨張係数は異形鉄筋の場合  $10.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、インバー鋼材の場合  $0.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  とし、ポアソン比はどちらの鋼材も0.3を用いた。

## 4. 検討結果

### 4.1 コンクリート応力分布

FEM解析結果の一例としてH35B650の長さ方向の応力分布を図-8に示す。この図のようにコンクリートと鋼材の境界部および長さ方向端部を除くとほぼコンクリート応力は一様に分布した。拘束応力の実測位置であるひずみゲージを貼付した長さ方向中央断面において、部材表面の長さ方向の応力を平均して実験結果と比較することとした。

### 4.2 拘束応力の推定（膨張材無混和の場合）

膨張材を用いていない4配合について、異形鉄筋とインバー鋼材による拘束応力の実測値と解析値の

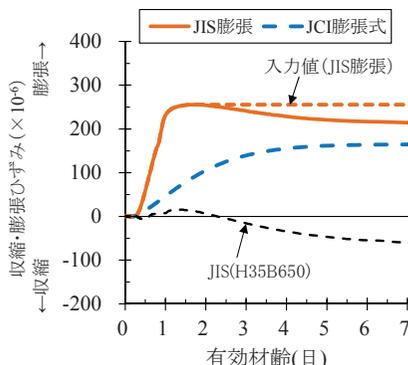


図-6 膨張ひずみ（標準養生）

表-5 膨張材効果の検討ケース

ケース	自己収縮ひずみ	膨張材効果
無拘束膨張	無拘束供試体 【H35B650EX(簡易断熱)】	
拘束φ11膨張	拘束供試体(PC鋼棒φ11) 【H35B650EX(簡易断熱)】	
収縮+JIS膨張	無拘束供試体 【H35B650(簡易断熱)】	JIS A 6202 【H35B650EX(標準養生)】
収縮+JCI膨張式	無拘束供試体 【H35B650(簡易断熱)】	JCI指針膨張ひずみ 近似式【早強】

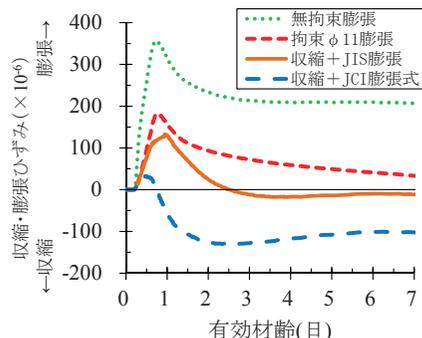


図-7 解析に用いた膨張ひずみ

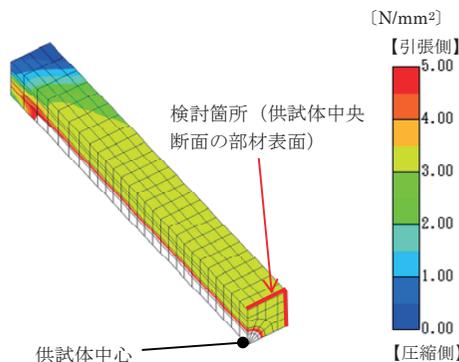


図-8 応力分布 (H35B650, インバー鋼材)

推移を図-9に、材齢28日までの最大引張応力の実測値と解析値の関係を図-10に示す。図-9より特に異形鉄筋を用いた場合にみられるように混和材の有無によらず材齢3日までは実測値を過小評価するケースが多い。これは、クリープによる応力緩和の影響を簡易的に考慮していることが原因として考えられる。しかしながら、その後材齢7日までは実測値と解析値はほぼ同等になり、図-10に示すように最大引張応力の実測値と解析値は概ね等しくなった。よって、早強ポルトランドセメントと混和材を用いた場合、自己収縮応力が卓越する異形鉄筋による拘束応力、自己収縮応力と温度応力が複合したインバー鋼材による拘束応力どちらも、コンクリートの材料特性が把握できていればJCI指針の有効ヤング係数に基づいた既存の応力解析手法でほぼ推定可能であると考えられる。

4.3 拘束応力の推定 (膨張材混和の場合)

膨張材を用いた表-5の4ケースについて、異形鉄筋とインバー鋼材による拘束応力の実測値と解析値の推移を図-11に示す。さらに、材齢28日までの引張応力の最大値を図-12に示す。まず、「無拘束膨張」のケースに着目すると、異形鉄筋とインバー鋼材どちらのケースも若材齢時に圧縮応力を過大に評価し、引張側に応力が推移してもその傾向は変わらず引張応力の実測値を明らかに過小評価した。無拘束供試体により得られたひずみを用いて拘束応力を推定した場合、膨張材無混和のケースでは拘束応力をほぼ評価できたが、膨張材を用いたケースではひび割れ発生に対し危険側の評価を与える結果となった。JCI指針においても拘束下での膨張ひずみを用いて膨張材の効果を考慮しているが、図-7に示すように無拘束の膨張ひずみは他のケースより若材齢時に急激に増加するため、クリープによる応力緩和の影響を有効ヤング係数法のような簡易的な方法では評価できないと考えられる。一方、図-11より異形鉄筋とインバー鋼材による拘束応力どちらも「収縮+JIS膨張」のケースは若材齢時からの応力推移をほぼ評価できることがわかる。ただし、膨張材による応力低減効果を示すと考えられる図-12の最大引張応力に着目すると「収縮+JIS膨張」に対して「拘束φ11膨張」もほとんど差はみられず、これらに比べて「収縮+JCI膨張式」でも0.1N/mm<sup>2</sup>程度過大評価しているだけである。

以上のことから、高炉スラグ微粉末と膨張材を併用した場合の応力低減効果は、JCI指針で推奨して

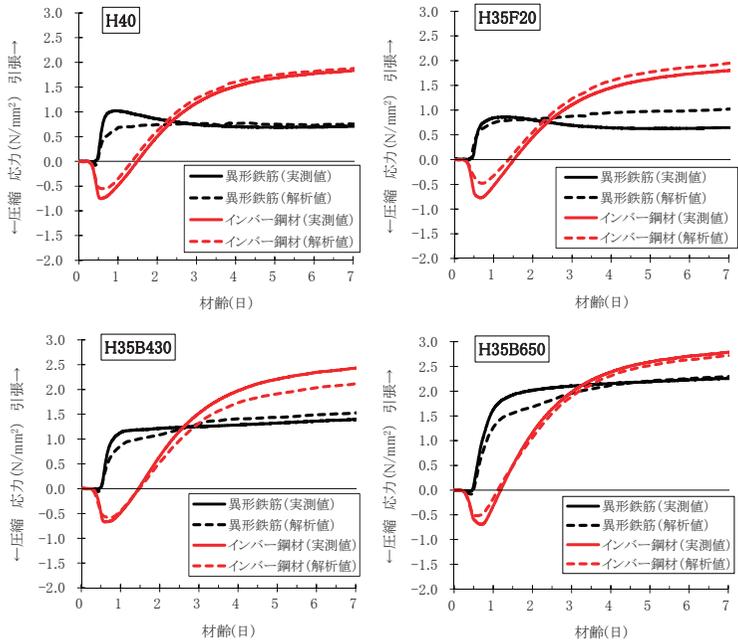


図-9 拘束応力の推移 (膨張材無混和)

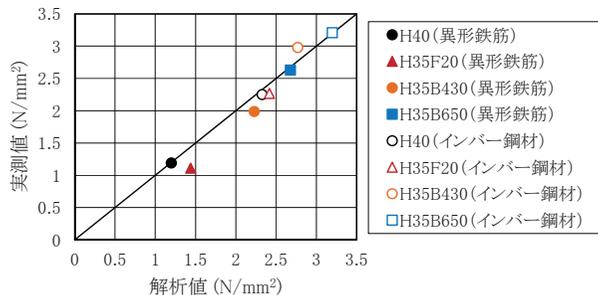


図-10 最大引張応力 (膨張材無混和)

いるPC鋼棒φ11を用いて温度履歴を与えた封かん養生の供試体のひずみ、もしくはJIS A 6202附属書2に準じて標準養生を行った供試体のひずみと膨張材無混和の自己収縮ひずみを重ね合わせたひずみを用いれば概ね評価できると考えられる。さらに膨張ひずみを実測せずに早強ポルトランドセメントのJCI膨張式を用いても多少安全側ではあるが最大引張応力はほぼ推定可能であるといえる。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 早強セメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換したコンクリートにおいて、コンクリートの材料特性が把握できていれば、自己収縮応力や温度応力は有効ヤング係数法を用いた既存のクリープ解析手法でほぼ推定可能である。
- (2) 高炉スラグ微粉末と膨張材を併用した場合の有効ヤング係数法に基づいた拘束応力推定に、PC鋼棒φ11の拘束下で温度履歴を与えた封かん養生の供試体のひずみ、もしくはJIS A 6202附属書2に準じて標準養生を行った供試体のひずみと膨張材無混和の自己収縮ひずみを重ね合わせたひずみを用いると、膨張材による応力低減効果を概ね評価可能である。さらに、早強ポルトランドセメントを用いた場合の既存の膨張ひずみの近似式を用いても多少安全側ではあるが最大引張応力はほぼ推定できる。

なお、本研究は、土木研究所、プレストレスト・コンクリート建設業協会ほか国内7機関による共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 中村英佑ほか：混和材を用いたコンクリートのクリープ・収縮に関する実験的研究，プレストレストコンクリート，Vol. 56, No. 3, pp. 54-60, 2014
- 2) 石井豪ほか：混和材を用いたコンクリートの強度発現と自己収縮特性への温度履歴の影響，第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.59-64, 2014
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008，2008
- 4) 日本コンクリート工学協会：JCI規準集，pp.459-461, 2004
- 5) 堀田智明ほか：セメント系材料の自己収縮に及ぼす混和材の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No. 2, pp. 697-702, 2001

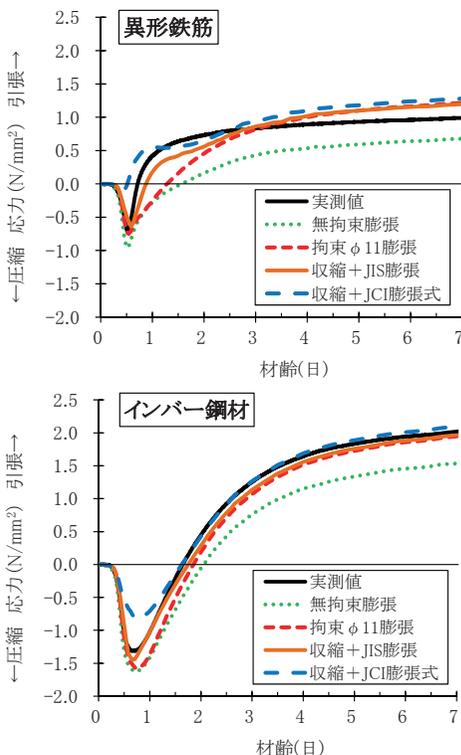


図-1 1 拘束応力の推移 (膨張材混和)

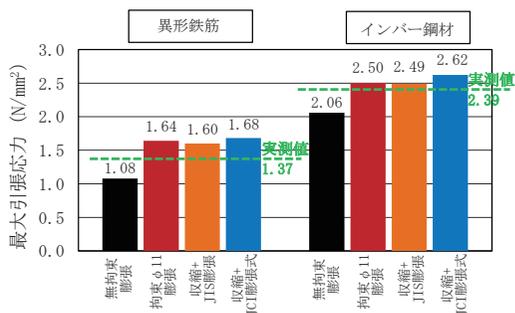


図-1 2 最大引張応力 (膨張材混和)