

論文・報告

コンクリート系床版の乾燥収縮ひび割れ防止に関する検討

～初期ひび割れ防止のための設計手法の高度化に向けて～

Advancement of Design Methods on Drying Shrinkage Crack with Concrete Slab

北野 勇一 *1
Yuichi KITANO

住谷 安子 *2
Yasuko SUMIYA

中山 良直 *3
Yoshinao NAKAYAMA

段下 義典 *4
Yoshinori DANSITA

橋 吉宏 *5
Yoshihiro TATIBANA

社会基盤構造物の高耐久化・長寿命化の要請から、コンクリートの初期ひび割れを施工段階で防止するのではなく、設計段階にて性能照査することが今後必要になる。本研究では、コンクリート系床版の中でも鋼材拘束度の高い合成床版に着目し、乾燥収縮ひび割れ防止のための設計手法について実験・解析の両面から検討した。その結果、コンクリートの時間依存性挙動を事前に把握し適切な解析を行うことで、コンクリート系床版の収縮応力を推定できることが確かめられた。さらに、コンクリート系床版の乾燥収縮ひび割れの防止策として、膨張材の適正な使用が効果的であることが確かめられた。

キーワード： コンクリート系床版，乾燥収縮ひび割れ，収縮応力解析

1. はじめに

近年、適切な設計・施工がなされた橋梁構造物であっても、コンクリートの乾燥収縮ひずみの増大に起因すると考えられるひび割れが発生し、中には部材の剛性やたわみに影響を及ぼした事例が報告されている。コンクリートの乾燥収縮ひずみの増大は骨材の品質変化が主原因として挙げられるが、一方、現行の設計基準がこのような材料特性の変化に必ずしも対応できているとは言えない現状にある。そこで、本研究ではコンクリートの乾燥収縮ひび割れを設計段階で防止することを目標とし、以下に示す点について検討することにした。

【検討A】コンクリートの時間依存性挙動の予測手法

【検討B】コンクリート系床版の収縮応力解析手法

【検討C】コンクリート系床版の収縮ひび割れ防止手法

検討にあたっては、橋梁構造物の中でも乾燥収縮ひび割れが生じやすいコンクリート系床版を対象とした。また、コンクリート系床版にはRC床版、PC床版、合成床版があるが、本研究では鋼材拘束度の高い合成床版に着目し、既往の実験結果¹⁾と対比することで検討を進めることにした。

2. 検討方法

(1) コンクリートの時間依存性挙動の予測

コンクリートは、載荷による変形に加え、水和反応（水とセメント粒子が接触することによる発熱を伴う化学反応）や水分移動（多孔質材料であることに起因するものであり、必ずしも液体として移動するとは限らない）に起因して練混ぜ後から時間の経過とともに複雑な変形が生じる。このような時間依存性のある変形挙動をひずみで表すと、式(1)として示すことができる。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_t + \varepsilon_{as} + \varepsilon_{cs} + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{ex} \quad (1)$$

ε ：全ひずみ， ε_e ：弾性ひずみ（拘束ひずみを含む）， ε_t ：温度ひずみ， ε_{as} ：自己収縮ひずみ， ε_{cs} ：乾燥収縮ひずみ， ε_{cc} ：クリープひずみ， ε_{ex} ：膨張ひずみ。

本検討では、式(1)中の各ひずみを次のように取り扱うものとした。

弾性ひずみ：本研究では、竣工後比較的早期に発生する初期ひび割れを防止する観点より検討を進め、活荷重の載荷等による弾性ひずみは考慮しないものとした。ただし、時間依存性挙動により副次的に生じる拘束ひずみとして弾性ひずみについては生じるものとする。

*1 川田建設㈱技術部技術課 課長

*2 川田建設㈱技術部技術課

*3 川田建設㈱技術部技術課 次長

*4 川田工業㈱橋梁事業部技術部東京技術部保全技術室 係長

*5 川田工業㈱橋梁事業部技術部東京技術部 次長

温度ひずみ：実構造物では水和反応による発熱や温度変化による温度ひずみが生じる。一方、本検討では、温度一定(20℃)の環境下で実験を行うこととし、解析上も温度ひずみを考慮しないものとした。

自己収縮ひずみ：床版のように部材厚が比較的薄い場合、適切な時期からの散水により水セメント比が30%のコンクリートを用いても自己収縮が大きくなることと確認されている²⁾。一般的な構造物に用いられるコンクリートの水セメント比はこれよりも大きいことから、本研究では自己収縮ひずみを考慮しないものとした。

乾燥収縮ひずみ：現在、様々な予測式が提案されているが、本研究では土木学会が2007年度に制定したコンクリート標準示方書(以下、JSCE07と略す)と、日本道路協会より2002年に発刊された道路橋示方書(以下、道示02と略す)に示される予測式を取り上げる。これらの予測式は、式(2)あるいは式(3)に示すように、基本的な構成としては収縮ひずみの最終値に収縮の進行度を乗じる形で時間依存性挙動を表現している。

$$JSCE07: \varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \cdot \varepsilon'_{sh} \quad (2)$$

$$道示02: \varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{s0} \cdot \beta_{s0}(t - t_0) \quad (3)$$

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ および $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$: コンクリートの材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ, ε'_{sh} および ε_{s0} : 収縮ひずみの最終値, $\beta_{s0}(t)$: 材齢および部材の仮想厚さに関する関数

クリープひずみ：クリープひずみの予測式も様々あるが、上述のJSCE07と道示02の予測値は大きく異なるため、ここでは式(4)に示す前者についてのみ検討する。

$$\varepsilon'_{cc}(t, t', t_0) / \sigma'_{cp} = [1 - \exp\{-0.09(t - t')^{0.6}\}] \cdot \varepsilon'_{cr} \quad (4)$$

$\varepsilon'_{cc}(t, t', t_0) / \sigma'_{cp}$: 有効材齢 t_0 に乾燥を開始し有効材齢 t' に載荷されたコンクリートの有効材齢 t における単位応力当りのクリープひずみ, ε'_{cr} : 単位応力当りのクリープひずみの最終値。

膨張ひずみ：コンクリート用膨張材の使用によりコンクリートに付与される膨張ひずみは、JIS A6202附属書2の拘束膨張試験(鋼材比0.95%)により測定される長さ変化率を指標として示される。膨張ひずみの予測式は、日本コンクリート工学協会より発刊されているマスコンクリートのひび割れ制御指針2008(以下、JCI08と略す)に

よると、早強ポルトランドセメントを用いた場合は式(5)として表される。

$$JCI08: \varepsilon_{ex}(t_e) = 165 \cdot [1 - \exp\{-0.45(t_e - 0.2)^{1.38}\}] \quad (5)$$

$\varepsilon_{ex}(t_e)$: 有効材齢 t_e における膨張ひずみ (×10⁻⁶)

以上より、本研究では乾燥収縮・クリープ・膨張ひずみを取り上げ、表1に示す予測条件にて時間依存性挙動を検討することにした。この内、検討B・Cの体積表面積比は型枠面となっている下面も乾燥するものとしてV/S=100mmとした。

また、合成床版に用いられるコンクリートの実際の時間依存性挙動を把握するため、表2に示す配合コンクリート(ここでは、取替え床版として急速施工を行うため材齢2日で設計基準強度30N/mm²を確保できる配合を選定し、膨張材量は収縮補償用コンクリートを念頭に30kg/m³とした)を用い、表3に示す試験を実施した。ここで、クリープ試験の載荷材齢は、JISに従い材齢7日まで水中養生を行った後にコンタクトゲージ用のチップを設置するため、最短材齢として9日とした。

表1 コンクリートの時間依存性挙動の予測条件

項目	検討A	検討B・C
一定温度(℃)	20	
乾燥開始材齢 t_0 (日)	7	2
載荷開始材齢 t' (日)	9	解析時刻毎
相対湿度RH(%)	60	
単位水量W(kg/m ³)	162	
単位セメント量C(kg/m ³)	426	
水セメント比(%)	38	
体積表面積比V/S(mm)	25	100

表3 コンクリート材料試験(検討A)

項目	試験方法
乾燥収縮試験	JIS A1129 附属書A (10×10×40cmの試験体を材齢7日より20℃・60%の環境下に6ヶ月静置)による
クリープ試験	JIS A1157 (φ10×20cmの試験体に対し材齢9日より圧縮強度の1/3に相当する荷重を6ヶ月載荷)による
拘束膨張試験	JIS A6202 附属書2の拘束膨張試験(鋼材比0.95%)による

表2 コンクリート配合

配合名	粗骨材の最大寸法(mm)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)					
				水W	セメントC	膨張材EX	細骨材S	粗骨材G	混和剤A
配合H	20	38.0 (EX含む)	44.0	162	426	0	763	978	4.48
配合EX					396	30			4.26

W:水(密度1.00), C:早強セメント(密度3.13), S:陸砂(硬質砂岩,密度2.56), G:砕石2005(密度2.66), A:ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(標準形,密度1.06), EX:コンクリート用膨張材(密度2.93)

(2) コンクリート系床版の収縮応力解析

本研究では、図1に示すような床版の一部を切り出した解析モデルを用い、表4に示す解析条件のもと、step-by-step法による3次元線形FEM解析（市販プログラム使用）を行うことにした。ここで、本研究では合成床版に着目しながらも1方向のみに鉄筋を配置することにしたのは、既往の研究²⁾において、板厚9mmの底鋼板に横リブ、スタッドを配置したSCデッキを再現した床版試験体にて実験を行い、直交する2方向のひずみを計測したが、実験値がほぼ同値であったことを踏まえてのことである。また、解析にあたっては、次のように設定することにした。

- ・ 解析モデルは合成床版を想定するため、鋼材比で5.22%となる鉄筋を断面一方向に配置し、乾燥収縮ひずみを鉄筋軸方向の1方向のみに作用させた。
- ・ クリープひずみは作用応力に比例し、その比例常数は圧縮および引張とも等しい（Davis-Glanville則による）ものとした。
- ・ 解析条件に示した各ひずみは、予測式をそのまま用いることを基本としたが、道示02に関しては予測式を2.25倍にすることにした。これらの根拠については、3章に詳述する。

(3) 床版試験体を用いた収縮試験

写真1は図1に示した解析モデルを模擬した床版試験体の製作状況である。床版試験体は上下面を除く4辺を厚さ10cmの発泡ポリスチレンで覆った状態とし（切出し状態であることを反映するため）、前掲表2に示す配合のコンクリートを打込み、その後6時間あるいは24時間から材齢2日まで散水養生を行った後、上面1面を6ヶ月間乾燥させた（前者を散水6h、後者を散水24hと称す）。また、床版試験体の断面中央に配置したD13に4ゲージ法によるひずみゲージとその近傍に埋込型ひずみ計を配置し、鉄筋およびコンクリートのひずみ、温度を測定した。

なお、床版試験体中の鉄筋はすべて長さ40cmとし、付着を切った部分を設けないものとした。これは、比較的強度の高いコンクリートを用い自己収縮応力を確認した供試体のひずみゲージの定着長を20cmとしたものでも既往研究の鋼材比と拘束率の関係を再現できたこと³⁾によるものである。

3. コンクリートの時間依存性挙動の予測手法に関する検討（検討A）

ここでは、乾燥収縮・クリープ・膨張の各ひずみについて、2章に示した予測式(2)～(5)と、表3に示したJIS試験による実測値とを比較検討する。

乾燥収縮ひずみ：乾燥収縮ひずみの予測値と実測値を図2に示す。6ヶ月時点の乾燥収縮ひずみに着目すると、JSCE07による乾燥収縮ひずみの予測値（ 647×10^{-6} ）はコ

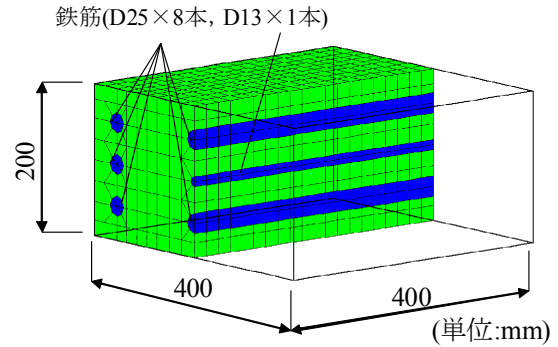


図1 解析モデル

表4 時間依存性挙動の解析条件

項目	検討B	検討C
圧縮強度	40N/mm ² 一定*	
弾性係数	31000 N/mm ² 一定	
ポアソン比	0.2	
乾燥収縮ひずみ	JSCE07：式(2)による 道示02：式(3)×2.25	
クリープひずみ	JSCE07：式(4)による	
膨張ひずみ	—	JCI08：式(5)による

*表2に示す配合Hの材齢2日強度が41.5N/mm²であったことから、本検討では40N/mm²とした。

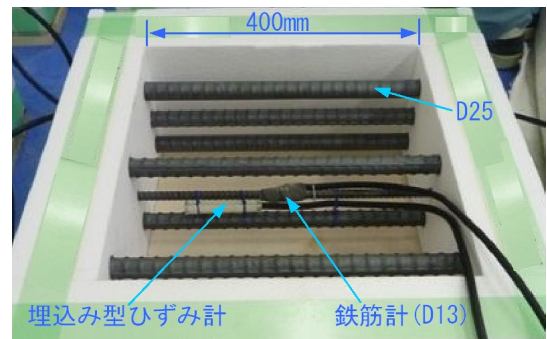


写真1 床版試験体の作製状況

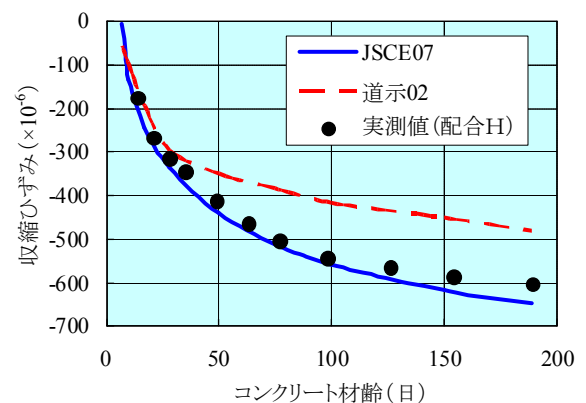


図2 乾燥収縮ひずみ（検討A）

ンクリートの実測値 (603×10^{-6}) と概ね一致 (+7%) し、一方、道示02による乾燥収縮ひずみの予測値 (481×10^{-6}) は実測値とやや乖離した (-20%)。したがって、以後の検討にあたっては、JSCE07の予測値はそのままとし、道示02の予測値は6ヶ月時点で一致するように係数を乗じて扱うものとした。また、6ヶ月時点における乾燥収縮ひずみを100%とした場合の収縮ひずみの進行度を図3に示す。これによると、JSCE07と道示02のそれは概ね一致することがわかる。この点については、旧版の道路橋示方書ではRüschらの研究成果に基づくCEB-FIP MC-78 (JSCE07に比べ収縮ひずみの進行が極めて遅くなるように予測される) を乾燥収縮ひずみの予測式として用いていたものを、2002年改訂時に仮想部材厚が20cm以下 (V/Sで70mm程度以下) となる場合に $\beta_{s0}(t)$ の取る数値を改良したことが影響している。

クリープひずみ：単位応力当りのクリープひずみ (以下、単位クリープひずみと略す) の予測値と実測値を図4に示す。ここで、載荷時点 (材齢9日) のクリープ試験体の弾性係数の平均値は 32.0 kN/mm^2 であった。6ヶ月時点のクリープひずみに着目すると、JSCE07による予測値 ($51 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^2$) はコンクリートの実測値 ($33 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^2$) とやや乖離 (+35%) した。ただし、収縮が生じるときのコンクリートの材齢は非常に若く、また収縮の大部分は早期に終了することから、収縮ひずみを完全拘束する場合の応力緩和に用いるクリープ係数としては材齢による補正係数を2に取ること ($\phi_2 = 2\phi_1 = 2 \times 2.0 = 4.0$) が実務設計の一部に慣例として残っている。また、JSCE07のクリープひずみ予測式をそのまま用いた応力緩和の傾向と、JCI08に示される有効弾性係数法による応力緩和量が概ね一致することを別途確認している。したがって、以後の検討にあたっては、JSCE07の予測値はそのまま用いた方が実現象を再現できるものと判断した。なお、JSCE07の予測式あるいはJIS A1157というクリープ係数とはクリープひずみを載荷時弾性ひずみで除した値であり、道示02に基づく実務設計における材齢28日を基準としたクリープ係数とはその定義が異なることに注意を要する。

膨張ひずみ：膨張ひずみの予測値と実測値を図5に示す。図には配合EXの実測値と、これに配合Hの自己収縮ひずみ (2日で 25×10^{-6} 、7日で 38×10^{-6}) を加算したものを掲載した。これより、今回用いた膨張コンクリートの膨張ひずみについては、JCI08の予測値と概ね一致することが確認された。

4. コンクリート系床版の収縮応力解析手法に関する検討 (検討B)

コンクリート系床版の時間依存性ひずみ挙動の解析値と実測値 (配合Hのコンクリートを使用) を図6に示す。こ

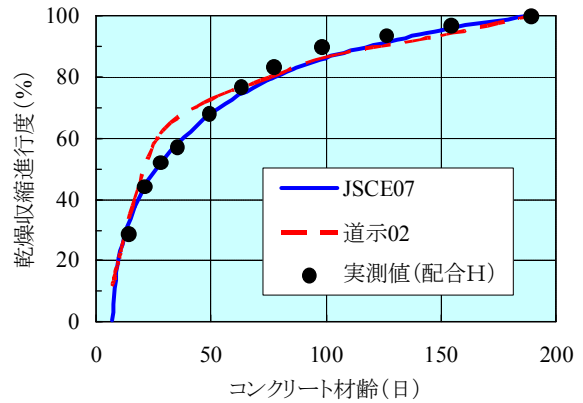


図3 収縮ひずみの進行度 (検討A)

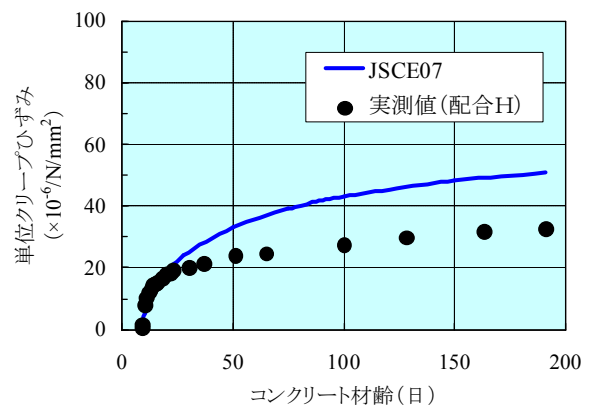


図4 クリープひずみ (検討A)

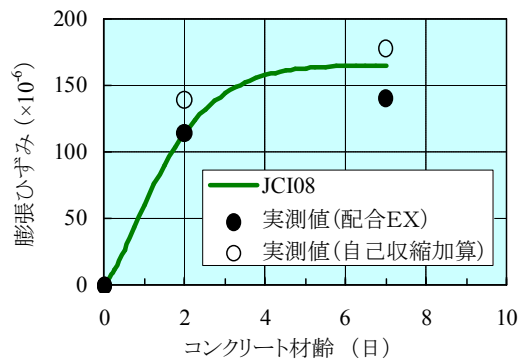


図5 膨張ひずみ (検討A)

こで、道示02の解析値については、6ヶ月時点の自由収縮ひずみをJSCE07と合わせるため、2.25倍の値 (道示02 \times 2.25) を用いることにした。コンクリート材齢180日の最終値に着目すると、JSCE07および道示02 \times 2.25とも“鉄筋+クリープ考慮”の解析値と実測値が概ね一致することがわかる。一方、途中材齢においては、JSCE07よりも道示02の方が、実測された時間依存性ひずみ挙動を良く再現する結果となった。この点に関しては、道示02が

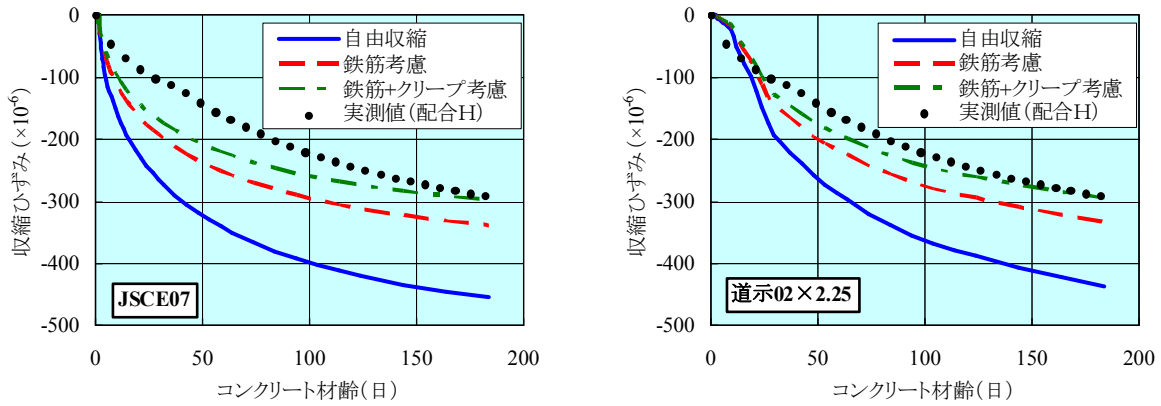


図6 床版試験体の時間依存性ひずみ挙動 (検討B)

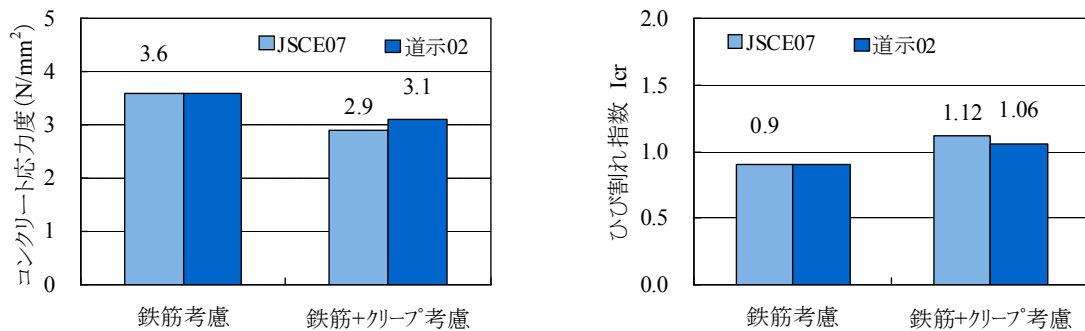


図7 床版試験体の最大引張応力経験値と最小ひび割れ指数 (検討B)

CEB-FIP MC-78の収縮進行度を反映した範囲 ($V/S > 70\text{mm}$) で今回の実験 (床版試験体の $V/S=100\text{mm}$) を行ったことが、結果的に整合する方向に影響したと考える。

なお、コンクリート系床版の最大引張応力経験値と最小ひび割れ指数は図7に示す通りであり、前者に関しては、式(6)から求められるコンクリート引張応力と、“鉄筋+クリープ考慮”の解析値とが概ね一致することが確認されている。

$$\sigma_c = (E \times \varepsilon_s \times A_s) / A_c \quad (6)$$

$$= (200000 \times 290 \times 10^{-6} \times 522) / (10000 - 522)$$

$$= 3.19 \text{ N/mm}^2$$

E_s : 鋼材の弾性係数, ε_s : 鋼材のひずみ, A_s : 鋼材の断面積, A_c : コンクリート純断面積。

5. コンクリート系床版の収縮ひび割れ防止に関する検討 (検討C)

膨張材使用時のコンクリート系床版の時間依存性ひずみ挙動の解析値と実測値 (配合EXのコンクリートを使用) を図8に示す。前節同様、6ヶ月時点における収縮ひずみ量はJSCE07および道示02×2.25とも“鉄筋+クリープ考慮”の解析値と実測値が概ね一致することがわかる。途中材齢においては、道示02×2.25の方が実測値と一致

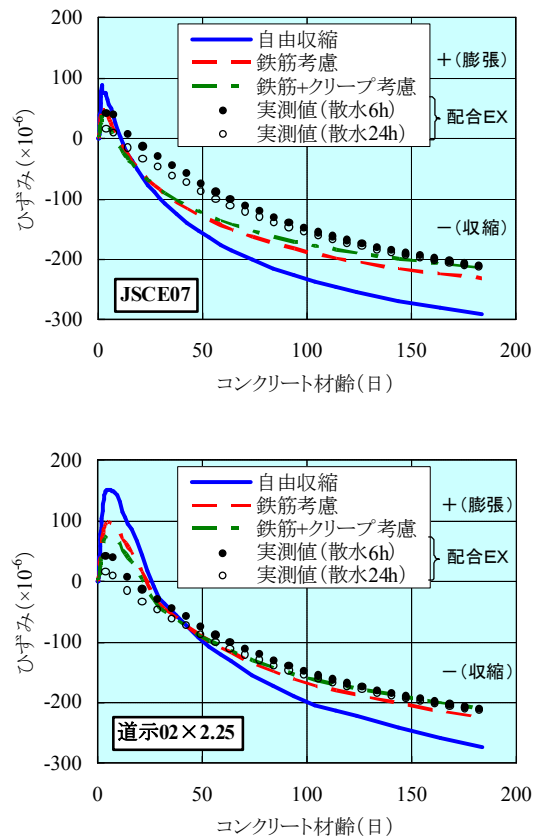


図8 膨張材使用時の床版試験体のひずみ挙動 (検討C)

する傾向であり、JCSE07は収縮の進行度が早い分、材齢初期ほど乖離することが確認された。また、実測値として散水の開始時間を6時間と24時間にした結果を掲載したが、散水時間を6時間（散水6h）とすることで初期膨張性が得られるものの、最終的な膨張効果は散水を1日程度以上実施すれば、散水の開始時間にはあまり影響されないことが確認された。

一方、膨張材使用時のコンクリート最大引張応力は式(6)から求められる値 (2.32N/mm^2) と概ね一致し、その効果は膨張材未使用時（図7左あるいは式(6)）と比較すると、 0.8N/mm^2 程度のケミカルプレストレス導入に相当することが確認された（図9）。

なお、写真1に示した床版試験体を1年間まで試験を継続した所、膨張材を用いた配合EXにはひび割れの発生は認められなかったものの、膨張材未使用の配合Hに関しては配筋に直交するひび割れが確認された。

6. まとめ

本研究を通じ、以下のことが確かめられた。

- (1) 今回用いたコンクリートの時間依存性挙動は、既往の予測式と概ね一致する（検討A）。
- (2) コンクリートの時間依存性挙動を事前に把握し、適切な解析を行うことで、コンクリート系床版の収縮応力の推定が可能である（検討B）。
- (3) コンクリート系床版の乾燥収縮ひび割れの防止策として、膨張材の適正な使用が効果的である（検討C）。

以上のことから、コンクリート系床版に生じる初期ひび割れを設計段階で防止することが可能であると考えられる。しかしながら、今回は実験室レベルでの検討に留まっていることから実構造物での検証を要すること、また、合成床版としての乾燥収縮の進行度や底鋼板の収縮抑制効果が十分に検討されていないなどの点については、今後の課題と考える。

参考文献

- 1) 段下, 橘, 江崎, 田坂, 北野, 堀池: 取替え用鋼コンクリート合成床版の初期ひび割れ抵抗性に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012. 9.
- 2) 北野, 大友, 橘, 田口: 急速施工を伴う鋼橋取替え床版への高強度膨張コンクリートの適用性に関する研究, コンクリート工学年次論文集Vol. 32, 2010. 7.
- 3) 北野, 堀池, 段下, 橘: 鋼・コンクリート合成構造を対象とした高強度コンクリートの適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集Vol. 33, 2011. 7.

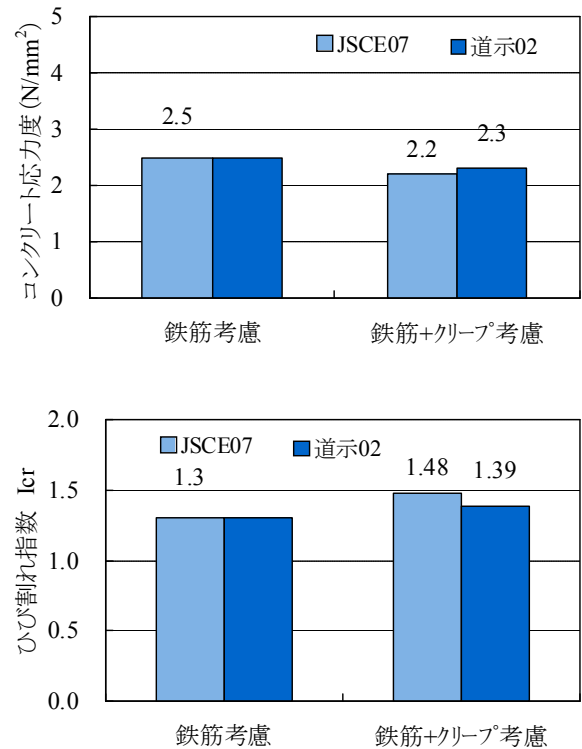


図9 膨張材使用時の床版試験体の最大引張応力経験値と最小ひび割れ指数（検討C）