

部材寸法がコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響

(株)ピーエス三菱	正会員	○小林 仁
近畿地方整備局 道路部		先本 勉
岡山大学大学院	正会員	綾野 克紀
京都大学大学院	正会員	宮川 豊章

Abstract : Recently, there were a few cases that cracks occurred on PC structures at their young ages. It was judged that cracks were caused by large drying shrinkage of concrete.

Generally, the method of measurement for length change of concrete by the Japanese Industrial Standards (JIS) is used to obtain drying shrinkage strain of concrete. However, the result of the measurement by the JIS method does not correspond with the actual shrinkage strain in real structures. Therefore, it is necessary to clarify the correlation between the drying shrinkage strain by the JIS method and that of real structures to design structures with the result of the JIS method.

In order to achieve this purpose, many measurements with various specimens made by different concrete mixtures were carried out, and it was concluded that the thickness of the test specimen could be taken into account as a factor for the change of the drying shrinkage strain with time.

Key words : PC bridges, thickness of test specimen, change of drying shrinkage strain with time

1. はじめに

PC (プレストレストコンクリート) 構造物は、使用状態でのひび割れを許容せず耐久性に優れるが、近年、いくつかのPC上部工に、完成後の比較的早い段階で、設計で予期せぬひび割れが発生し問題となった^{1), 2)}。各種検討により、ひび割れにはコンクリートの大きな乾燥収縮ひずみに関係している可能性の高いことが明らかになっている。

こうした乾燥収縮問題への対応について、JIS A 1129試験により使用予定のコンクリートの乾燥収縮ひずみを確認することが行われている。しかし、100×100×400mmと実構造物のスケールに比べ小さい供試体を使用し、温度・湿度一定の条件で収縮ひずみを測定するため、通常、測定値は実構造物に生じる乾燥収縮ひずみと一致しない。このため、JIS試験を行っても、測定された乾燥収縮ひずみがある基準値に対し大きい小さいかという相対的な評価を行うに留まっている。JIS試験で得られた収縮ひずみを用いて安全性や使用性に対する性能照査を行うためには、JIS試験結果と実際の乾燥収縮ひずみとの相関を明らかにする必要がある。

こうした背景から、PC箱桁を模した実物大の供試体を作成し、収縮ひずみの長期計測を実施している^{3), 4)}。今回、この実物大供試体からコアを抜き、長さ変化試験によりコアの乾燥収縮ひずみを直接測定した。この測定結果と、複数の生コン工場で製造されたコンクリートの乾燥収縮ひずみの試験結果から、供試体の寸法が乾燥収縮ひずみの経時変化に及ぼす影響は、その経時変化を表す双曲線関数に供試体の厚さを考慮することで近似され、JIS試験結果から実構造物の収縮ひずみを推定できる可能性が示されたため、その詳細について報告する。

2. 寸法が異なる供試体における乾燥収縮ひずみ

図-1は、寸法が異なる4種類の供試体における乾燥収縮ひずみの経時変化を示したものである。

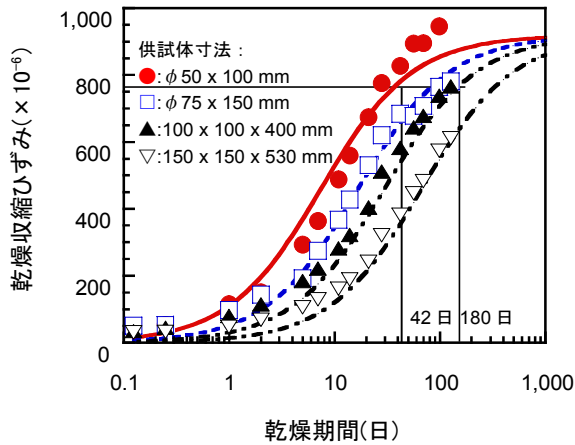


図-1 供試体の寸法が乾燥収縮ひずみの経時変化に与える影響

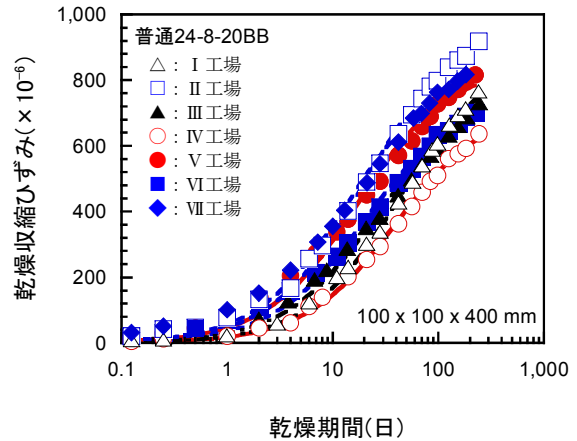


図-2 レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみの比較

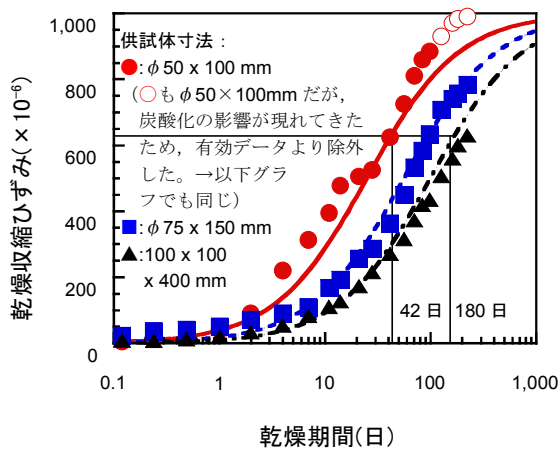


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化 (I工場)

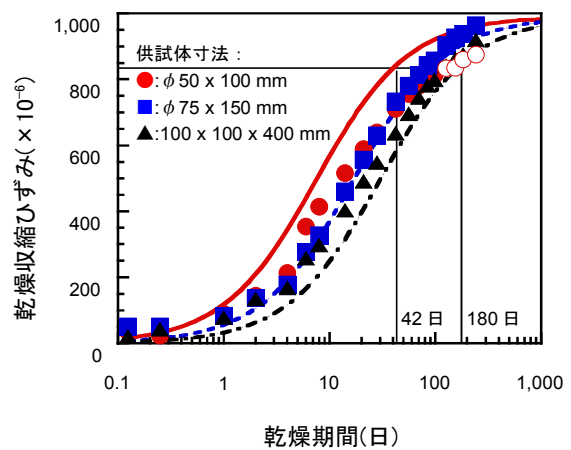


図-4 乾燥収縮ひずみの経時変化 (II工場)

図中の●, □および▲, ▽は, それぞれ, φ 50×100mm, φ 75×150mmのコア供試体, および100×100×400mm, 150×150×530mmの角柱供試体を用いた結果を示している。なお, コンクリートは呼び名が「普通30-10-20N」のレディーミクストコンクリートで, 同一バッチより採取したものである。

これによると, 供試体の寸法が小さくなるに従い, コンクリートの乾燥収縮が速く進行することが分かる。また, φ 50×100mmのコア供試体と100×100×400mmの角柱供試体を比べると, 前者の乾燥期間42日における乾燥収縮ひずみが, 后者の乾燥期間180日における乾燥収縮ひずみとほぼ一致していることが分かる。

ここで, 各図に示されている曲線は, 次の a および b を未定係数として, 各供試体における実験データを包括するように求めた回帰線である。

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{b \cdot t}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot a + t} \quad (1)$$

ここに, $\epsilon_{sh}(t)$: 乾燥期間 t (日) における乾燥収縮ひずみ

d: 供試体の厚さ(mm)

未定係数の a は乾燥収縮ひずみの経時変化を示し, b は乾燥収縮ひずみの最終値を示す。a, b は,

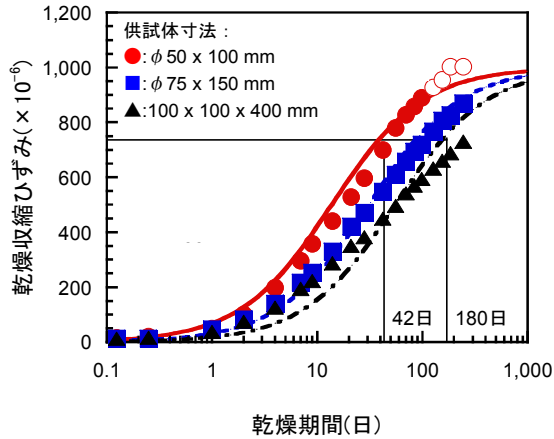


図-5 乾燥収縮ひずみの経時変化 (Ⅲ工場)

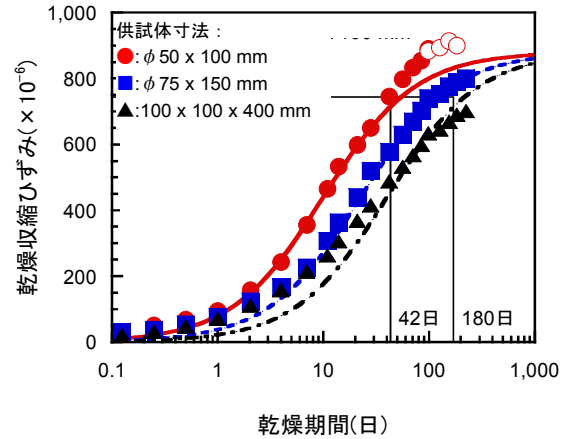


図-6 乾燥収縮ひずみの経時変化 (Ⅳ工場)

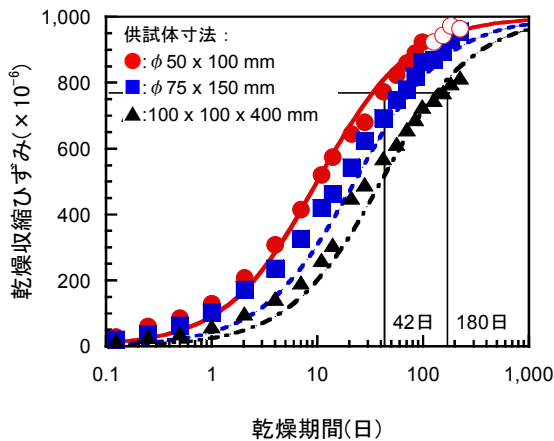


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化 (Ⅴ工場)

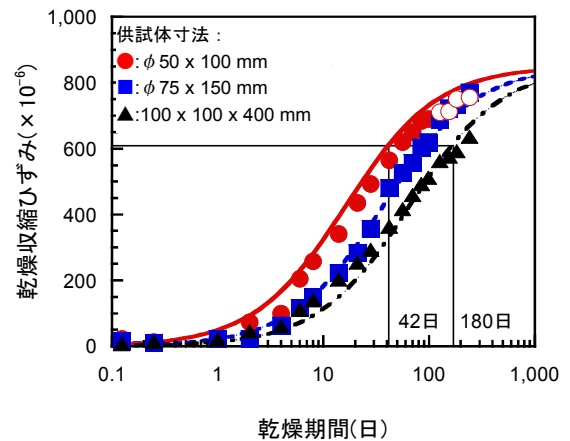


図-8 乾燥収縮ひずみの経時変化 (Ⅵ工場)

コンクリートの製造工場が同じ場合には、配合ごとに一定値となる。図-1によると、供試体の厚さが異なっても実験データと回帰線は概ね一致しており、式(1)が妥当であることを示している。

図-2は、ある地域の7つの生コン工場から出荷された、呼び名が「普通24-8-20BB」のレディーミクストコンクリートにおける乾燥収縮ひずみの経時変化を示したものである。供試体は、100×100×400mmの角柱供試体である。

これによると、同一名称のレディーミクストコンクリートであっても、製造工場が異なると乾燥収縮ひずみの経時変化が異なることが分かる。

図-3～図-9は、同じ「普通24-8-20BB」のコン

クリートを用いて作成した、寸法の異なる3種類の供試体における乾燥収縮ひずみの経時変化を、製造工場ごとに整理したものである。工場ごとに、式(1)の未定係数 a, b は異なるが、同一工場であれば a, b は一定で、供試体の厚さ d だけが変化する。I～VIIのすべての工場において実験データと回帰線は概ね一致しており、さまざまな製造工場においても式(1)が成立することが分かった。また、すべて

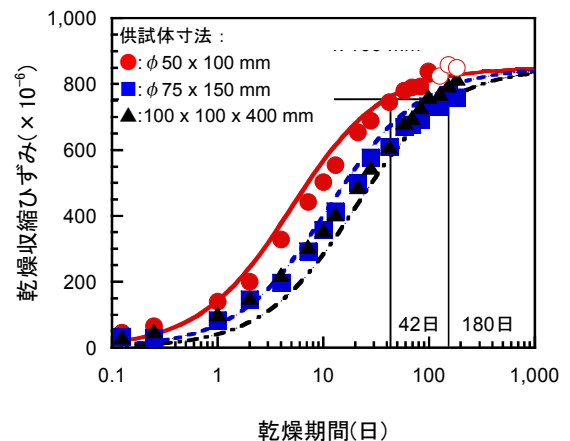


図-9 乾燥収縮ひずみの経時変化 (Ⅶ工場)

の工場において、コア供試体φ50×100mmの乾燥期間42日における乾燥収縮ひずみは、角柱供試体100×100×400mmの乾燥期間180日における乾燥収縮ひずみと概ね一致していることが分かった。

3. 実物大供試体から採取したコア抜き供試体における乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみが大きいコンクリート、標準的なコンクリートを用いて、PC箱桁を模した実物大の供試体を製作し、乾燥収縮ひずみを長期間、計測している。供試体の構造寸法を図-10に、外観を写真-1に示す。なお、測定された収縮ひずみの経時変化については、別報告^{3), 4)}を参照されたい。

コンクリートには呼び名が「36-12-20H」のレディーミクストコンクリートを用い、粗骨材には産地の異なる2種類の砕石（A：硬質砂岩砕石，B：石灰石砕石）を用いている。また、単位水量および単位セメント量は、それぞれ165kg/m³および384kg/m³である。

実験に用いたコンクリートのJIS A 1129試験結果を図-11に示す。骨材Aを用いたものは乾燥期間26週で936×10⁻⁶のひずみを、骨材Bを用いたものは乾燥期間26週で548×10⁻⁶のひずみを計測した。

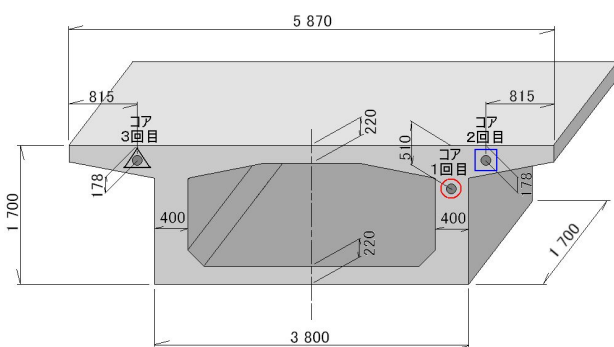


図-10 実物大供試体 構造図



写真-1 実物大供試体の外観

実物大供試体のコンクリート打設は2011年12月に行い、7日後に型枠を取り外した。脱型から71日後の2011年2月に、供試体からφ70mm×500mmのコアを採取した。続いて脱型から191日後の2011年

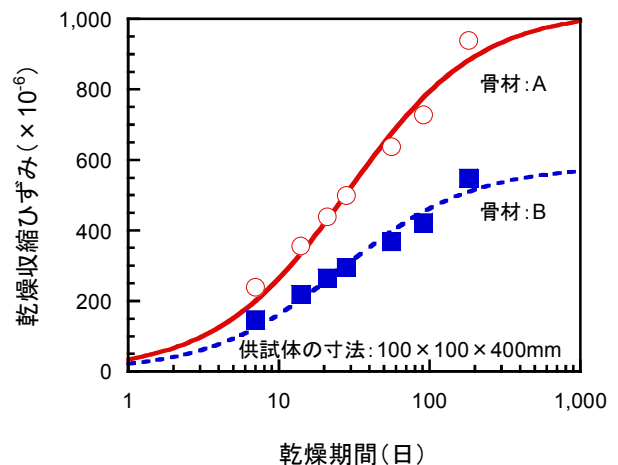


図-11 実物大供試体に使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみ (JIS試験結果)

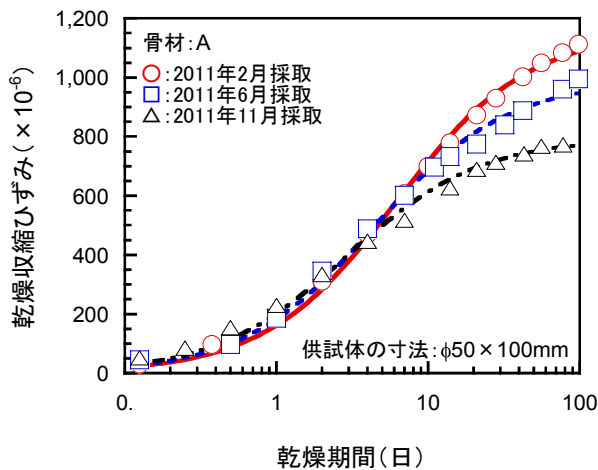


図-12 実物大供試体から採取したコンクリートの乾燥収縮ひずみ (骨材A)

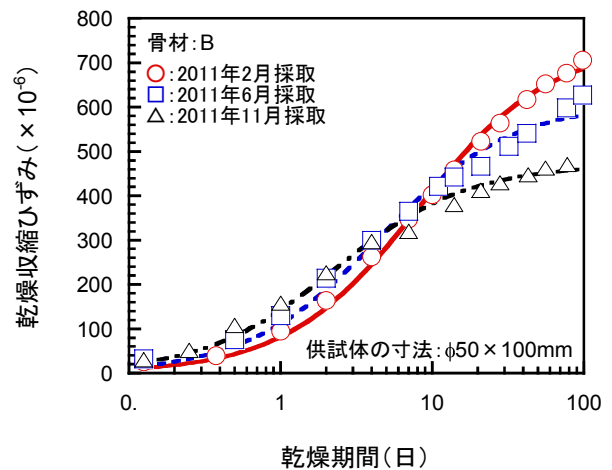


図-13 実物大供試体から採取したコンクリートの乾燥収縮ひずみ (骨材B)

6月, および344日後の2011年11月に同じ寸法のコアを採取した(各コアの採取位置は図-10に記載)。採取したコアは両端部100mm程度を切断し, ラッピングで乾燥防止措置を施したのちに, 実験室に搬入した。実験室でコアよりφ50×100mmの供試体を切り出し, 写真-2に示すリニアゲージ(検長: 100mm, 最小目盛り: 5/10,000mm)を用いて長さ変化を測定した。結果を図-12および図-13に示す。各図において, ○, □および△は, それぞれ, 脱型から71日後, 191日後および344日後に採取したコアの結果である。



写真-2 リニアゲージ

なお, 図中の曲線は, 式(2)によって回帰し得られたものである。

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{b \cdot t}{a + t} \quad (2)$$

ここに, $\epsilon_{sh}(t)$: 乾燥期間 t (日) における乾燥収縮ひずみ

式(2)中の b が, 乾燥収縮ひずみの最終値となる。

表-1に, 式(2)によって回帰して求めた乾燥収縮ひずみの最終値を示す。

時間を経て採取したコアの方が, 乾燥収縮ひずみの最終値が小さくなっていることが分かる。図-14に示すように, 脱型から時間を経るほど, 供試体より採取したコアの乾燥収縮ひずみの最終値 $\epsilon_{sh\infty}(t_0)$ は小さくなっていく。したがって図-15に示すように, 脱型からコア採取までの時間と乾燥収縮ひずみの最終値との関係は, 図-14における乾燥収縮ひずみの経時変化を上下反転させた形の双曲線として表される。この場合, y 軸の切片が脱型直後にコアを抜いたと仮定した場合の乾燥収縮ひずみの最終値となる。

表-1 最終値の回帰値 [式(2)のb]

乾燥材齢	骨材A	骨材B
71日	$1,155 \times 10^{-6}$	742×10^{-6}
191日	989×10^{-6}	608×10^{-6}
344日	764×10^{-6}	470×10^{-6}

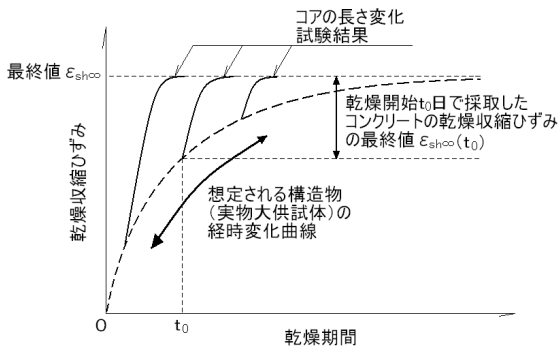


図-14 乾燥を開始したのちに採取したコンクリートの乾燥収縮ひずみ

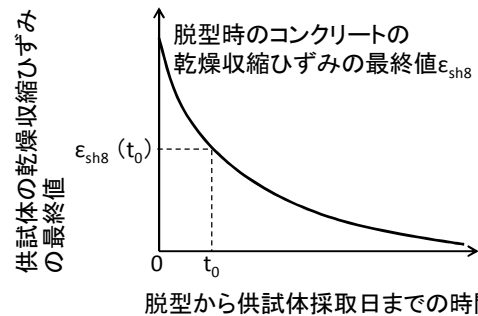


図-15 脱型から供試体採取までの時間と供試体の乾燥収縮ひずみの最終値の関係

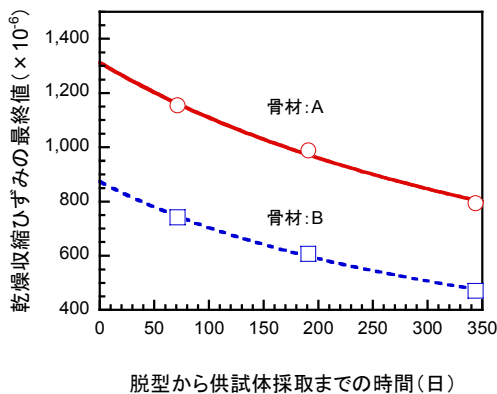


図-16 コア抜き供試体における乾燥収縮ひずみの最終値

表-2 経時変化を示す項の回帰値

	JIS 供試体 [式(2)の a]	実物大供試体 [式(3)の a]
骨材 A	28.7	545
骨材 B	26.1	414

表-3 最終値の回帰値

	JIS 供試体 [式(2)の b]	実物大供試体 [式(3)の b]
骨材 A	$1,022 \times 10^{-6}$	$1,313 \times 10^{-6}$
骨材 B	583×10^{-6}	874×10^{-6}

図-16は、表-1に示される乾燥収縮ひずみの最終値と、脱型から供試体採取までの時間との関係を示したものである。

図中の曲線は、式(3)によって回帰し得られたものである。

$$\varepsilon_{sh\infty}(t_0) = \frac{-b \cdot t_0}{a + t_0} + b \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh8}(t_0)$ ：脱型から t_0 日後に採取したコアより作成した供試体の長さ変化試験結果から式(2)により回帰した乾燥収縮ひずみの最終値

t_0 ：脱型から供試体採取までの時間（日）

式(3)中、 a が乾燥収縮ひずみの経時変化を示し、 b が乾燥収縮ひずみの最終値を示す。図-16の回帰線における乾燥収縮ひずみの経時変化と最終値、および図-11（JIS試験結果）の回帰線における乾燥収縮ひずみの経時変化と最終値を表-2、表-3に比較して示す。

式(1)に示す様に、乾燥収縮ひずみの経時変化を示す項は、供試体の厚さの2乗に応じ大きくなる。実物大供試体のコアを採取した部分（ウェブ）の厚さは400mmであり、JIS供試体の厚さは100mmであるため、表-2に示すJIS供試体の値を両者の比率で $(400/100)^2=16$ 倍すると、骨材Aの場合で $28.7 \times 16=459$ 、骨材Bの場合で $26.1 \times 16=418$ となり、実物大供試体における値（骨材A：545、骨材B：414）と概略一致する。

一方、表-3に示される乾燥収縮ひずみの最終値は、実物大供試体の方がJIS供試体より1.3～1.5倍程度大きな値となっている。実物大供試体は、必ずしも $t=\infty$ でそれだけ大きい収縮ひずみを示す訳ではなく、あくまで収縮に対するポテンシャルを示している点に注意が必要であるが、部材厚が400mm程度で、発熱の影響があまり大きくない部材においては、ブリーディングなどの影響により、実験室で得られる乾燥収縮ひずみの最終値より大きくなる可能性があると考えられる。

4. 結論

レディーミクストコンクリートを使用し、寸法の異なる供試体で長さ変化試験を行った。その結果、供試体の寸法が乾燥収縮ひずみの経時変化に及ぼす影響は、その経時変化を表す双曲線関数に供試体の厚さを考慮することで近似されることが分かった。これより、JIS試験の結果に寸法効果を考慮することで、実構造物に生じる乾燥収縮ひずみの経時変化や収縮ひずみの最終値を予測できる可能性のあることが分かった。

また、PC箱桁橋と同スケールの実物大供試体から時間をおいて複数のコアを抜き、コアから切り出した供試体で長さ変化試験を行った。その結果、コアを抜いた時期が遅くなるほど、長さ変化試験の結果から回帰される乾燥収縮ひずみの最終値は小さくなることが分かった。この、収縮ひずみの最終値の経時変化をJIS試験結果と比較すると、実物大供試体の部材厚とJIS供試体の厚さの比率に応じ、前者の進行度が遅くなっていることが確認された。

本論文で報告したこれらの研究成果が、PC上部工を取り巻く乾燥収縮問題解決の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 垂井高架橋損傷対策特別委員会 中間報告書，土木学会，2005.9
- 2) 第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会 報告書，土木学会，2010.3
- 3) 小林ほか：PC上部工の実物大供試体による乾燥収縮ひずみの測定，第20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，pp151-154，2011.10
- 4) 河中ほか：PC上部工の実物大供試体と実橋における乾燥収縮ひずみの測定，第21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（報告予定），2012.10