論文 吸水現象の時間依存性を考慮した水分移動モデルとコンクリートの 変形予測手法

中村 麻美^{*1}·渡辺 健^{*2}·大野 又稔^{*1}·安保 知紀^{*3}

要旨:実構造物の変形挙動を解析するモデルを構築することを目的として、拡散方程式と微視的機構を用いた既往の水分移動・収縮モデルに、乾燥・吸湿・吸水過程の区別および吸水現象の時間依存性に関するモデルを導入した。上面滞水させた無筋コンクリートと持続荷重を作用させた PRC はりの計測結果を用いて、提案した変形予測手法を検証した。吸水現象が時間の経過とともに収束していくことを考慮した本解析手法により、上面滞水させた無筋コンクリートの含水状態およびひずみの経時変化を概ね再現することができた。 キーワード:時間依存変形、乾燥収縮、PRC はり、上面滞水、拡散方程式、水分移動

1. はじめに

近年, プレストレストコンクリート (PC) 橋りょうで 想定以上の変形が観測されており,部材断面内の水分分 布に起因する部位ごとの収縮ひずみ差に伴う断面曲率の 増加が原因として報告されている^{1),2)}。構造物の変形や 応力状態を予測するためには,水分状態の履歴に依存し たひずみを部位ごとに把握する必要がある。

マルチスケール統合解析システム³⁾の研究が進むにつ れ,材料物性や配合,荷重・気象作用を入力するだけで, コンクリートの時間依存変形を追跡できるようになって きた¹⁾。材料および気象作用など、地域依存度が高く、 変動が大きいうえに解析結果に強く影響を及ぼす情報を, ある材齢までのコンクリートが示す応答値を用いて推定 し、解析に用いることができれば、無数の条件、作用の 組合せにあるそれぞれの構造物にも,より汎用な手法と なると考える。著者ら⁴⁾は、拡散方程式に基づく水分移 動モデルを,供用環境下の要素試験体の応答値を用いて 再評価し、PC 桁に発生するひずみを予測する手法を提案 している。コンクリートに浸透した雨水は蒸発しにくい ことも報告されており 5, 拡散方程式をコンクリート中 の水分移動解析に用いるためには、コンクリート中の水 分移動が含水状態や乾燥・吸湿・吸水過程によって異な る特徴を示す⁶ことを考慮にいれる必要がある。

本研究は、コンクリート構造物の変形を経時的に予測 可能なモデルを構築することを目的としている。著者ら ⁴⁾の変形予測手法に、乾燥・吸湿・吸水過程の区別およ び吸水現象の時間依存性を導入した。また、断面内の水 分勾配が大きくなるような条件でコンクリート、鉄筋コ ンクリート (RC) はり試験体の計測試験を実施し、実験 結果を用いて提案した手法を検証した。

2. 水分移動を考慮したコンクリートの変形解析 2.1 水分移動モデル

図-1 に示す通り、本研究で検討する変形解析方法は 水分移動モデルと収縮モデルで構成される。収縮モデル に関係する空隙構造,水分移動モデルに関係する水密性 および環境に関する諸条件を入力し、水分移動や収縮挙 動を解析し、断面内でのひずみ分布を算出する。

水分移動モデルでは、水分移動に加えて、水和による 水分消費を考慮する。細孔内の水分変化の指標として相 対含水率θを用いると,θの時間変化は式(1)で表される。 なお、相対含水率θは式(2)で定義される。

$$\partial\theta/\partial t = \left(\partial\theta/\partial t\right)_{hvd} + \left(\partial\theta/\partial t\right)_{dif} \tag{1}$$

$$\theta = \left(\varphi_{cap}S_{cap} + \varphi_{gel}S_{gel}\right) / \left(\varphi_{cap} + \varphi_{gel}\right)$$
(2)

ここで、 θ :相対含水率、t:時間 (day)、(d θ / dt)_{hyd}:水 和による θ の変化、(d θ / dt)_{dif}:水分移動による θ の変化、 φ_{cap} :セメント硬化体中の毛細管空隙率、 φ_{gel} :セメント 硬化体中のゲル空隙率、 S_{cap} :毛細管空隙の飽和度、 S_{gel} : ゲル空隙の飽和度である。

水和による相対含水率の変化(dθ / dt)_{hyd}は、コンクリートの強度発現式⁷⁾と強度発現と水和度の関係式⁸⁾から導出した、式(3)により算出できるとした。なお、添え字 n は解析ステップ番号,*i*は要素番号を示す。

$$\begin{pmatrix} \theta_i^{n+1} - \theta_i^n \end{pmatrix}_{hyd} = -\frac{1 - \theta_0}{1.1} \cdot \left\{ \frac{t^{n+1} - S_f}{a/b + (t^{n+1} - S_f)} - \frac{t^n - S_f}{a/b + (t^n - S_f)} \right\}$$
(3)

ここで、 θ_0 :封かん条件での θ の収束値、a, b:強度発現 に関する定数、 S_f :硬化原点に対応する材齢(day)であ る。a、b、 S_f はコンクリートの強度発現式⁷⁾における係 数と同一であり、水和による水分消費は**図**-2(a)のよう

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修士(工学) (正会員) *2 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士(学術) (正会員) *3 鉄建建設(株) 建設技術総合センター 研究開発センター 博士(工学) (正会員) になる。

水分移動による相対含水率の変化(dθ/dt)_{dif} は,既往の 研究^{4),0}に基づき,式(4)および(5)に示す拡散方程式で算 出できるとした。

ここで, q:水分流速 (mm/day), D:水分伝導係数 (mm²/day), η:水分伝達係数 (mm/day), n :境界面の 法線ベクトルである。

一般に多孔質体表面では、液状水や水蒸気など、作用 する水分の形態によって水分移動のメカニズムが異なる。 多孔質体内部での水分移動では、高含水状態における毛 管水移動、低含水状態における水蒸気拡散など、含水状 態によって支配メカニズムが異なる。また、同一含水状 態であっても、吸湿過程と乾燥過程では水分伝導係数や 水分伝達係数が異なると考えられる。浅本ら⁵⁰は、実環 境下でのコンクリートの質量減少率を求め、一度コンク リート中に浸透した雨水は蒸発しにくいことを示してい る。秋田ら⁶⁰は、乾燥・吸湿・吸水の各過程を区別して、 水分伝導係数および水分伝達係数と相対含水率との関係 を示している。

本研究における水分移動モデルでは、乾燥・吸湿・吸 水過程を区別して、図-2(b)に示すような含水状態に依 存した水分伝導係数を用いた。乾燥および吸湿過程にお ける水分伝導係数として、式(6)および式(7)に示す秋田ら の式⁶⁾を用いた。

$$D_{\rm dry} = D_{\rm dry100} \cdot \left[\frac{1}{\{29(1-\theta)+1\}^{1.4}} \right]$$
(6)

$$D_{\text{wet}} = D_{\text{dry100}} \cdot (2.2/4.2) \cdot \{1/(41\theta + 1)^{1.5}\}$$
(7)

ここで, D_{dry} : 乾燥過程における水分伝導係数 (mm²/day), D_{wet} : 吸湿過程における水分伝導係数 (mm²/day), D_{dry100} : 相対含水率 $\theta=1$ のときの D_{dry} (mm²/day) である。

吸水過程において、秋田ら^のは相対含水率 0.8 を境界 に水分伝導係数が大きく変化すること、時間の経過とと もに水分伝導係数が低下することを示している。秋田ら ^のによれば、水分伝導係数の低下は水分の浸透に伴う管 壁との摩擦抵抗の増加に起因する。そこで、水分伝導率 の低下は毛管水移動が支配的な高含水率のみで生じるこ と、管壁との摩擦抵抗がある値以上になると毛管水が移 動しなくなること、管壁との摩擦抵抗の増加は水分浸透 深さに比例すること、水分浸透深さは \sqrt{tw} (t_w : 滞水継 続時間)に比例することを仮定し、吸水過程における水 分伝導係数 D_{water} を式(8),(9)に示す通りに定めた。特に、 吸水過程における水分伝導係数として、秋田ら^のの式に 水分伝導係数の時間依存性を示す係数 k を導入した点に 特徴がある。



$$=\begin{cases} D_{\text{water}} & (\theta < 0.8) \\ k \cdot D_{\text{water}} & (0 \\ 1 - 2.5(1 - \theta)^2 \end{cases} & (\theta < 0.8) \\ k = 1 - \sqrt{t_w / t_{\text{lim}}} & (k \ge 0) \end{cases}$$
(8)

ここで, D_{water} :吸水過程における水分伝導係数 (mm²/day), k:時間依存性を示す係数, t_w :滞水継続時間 (day), t_{lim} : 限界浸透時間 (day) である。限界浸透時間は,水分浸透 に伴って,管壁との摩擦抵抗が増加し,やがて水分の浸 透が停止するまでの浸透時間である。水分伝導係数の時 間依存性モデルの構築により,実構造物における降雨時 間を考慮した水分移動も解析可能であると考えられる。 上記の係数のうち,測定データにより決定が必要なパラ メータは,相対含水率 $\theta=1$ のときの水分伝導係数 D_{dry100} および $D_{water100}$,水分伝達係数 η_{dry} および η_{wet} ,限界浸透 時間 t_{lim} となる。これらのパラメータは配合等に起因す る細孔空隙構造や表層品質に依存すると考えられる。

2.2 収縮モデル

無拘束状態の自由ひずみを求める収縮モデルは下 村・前川⁹,朱ら⁸⁾のモデルを一部簡略化して用いた。 具体的な式は,文献4)を参照されたい。ただし,上記の 水分移動モデルでは相対含水率 θ の経時変化が算出され る。 θ は細孔径分布とRHによって求められる⁹ことか ら, θ とRHの関係を用いて, θ から数値解析的にRHを 求める。 本研究では、棒部材を対象に概ね平面保持を仮定でき るとして、コンクリートと鉄筋の応力が断面内でつり合 うように平面を決定した。決定された平面でのひずみと 無拘束状態での自由ひずみとの差から内部拘束による応 力を求めることで、内部拘束の影響を考慮した。ただし、 部材長やひび割れの有無によっては平面保持が成立しな い場合もあるので、平面保持の適用には注意を要する。 なお、本研究では、PRC はりを対象としており、死荷重 レベルの荷重に対してはひび割れが収縮挙動に及ぼす影 響は小さいと考えて考慮していないが、クリープ挙動の 含水状態依存性は既往の研究⁸⁾と同様に考慮している。

3. 変形予測手法の検証-室内上面滞水試験-

3.1 試験概要

試験ケースを表-1 に,試験体概要を図-3 および図 -4 に示す。試験体は,無筋コンクリート試験体(NC-W) 1 体および上面滞水の有無で異なる PRC はり試験体 2 体

 (PRC-D, PRC-W)の,計3体である。試験体NC-Wは,
 図-5に示す通り、上面に滞水させたまま無載荷状態で 静置した。試験体 PRC-D および PRC-Wは、図-6および図-7に示す通り、試験体に重錘を吊るすことにより

		武殿クー	^		
試験体	試験体	試験体	Pe	Р	
種類	名称	上面	(kN)	(kN)	
無筋	NC-W	滞水	-	-	
DDC 1+ h	PRC-D	乾燥	00	0	
rne (29	PRC-W	滞水	90	0	

Pe: 導入プレストレス力の目標値, P: 持続載荷荷重

荷重を持続して作用させた。PRC はり試験体のプレスト レス力は、死荷重に相当する持続荷重を作用させたとき にひび割れを発生させないように、断面下縁の応力が 0N/mm²程度となるように決定した。

3 体の試験体の断面寸法形状は同一であり,側面は, 上方をアルミテープにより封かんし,下方および下面を 乾燥条件とすることで,異なる排水条件を設定した。

試験体は打設後翌日に脱型し,材齢 14 日目まで水中 養生を行った。材齢 14 日目にプレストレスの導入とシー リングを行い,上面滞水を開始した。材齢 15 日目から持 続荷重を作用させた。試験期間は約1 年間であり,打設 時期は 12 月下旬である。

表-2 に、コンクリートの配合を示す。早強セメント を使用した。粗骨材の最大寸法は13mmである。水セメ ント比は乾燥収縮の影響が大きくなるように58%とした。 PC 鋼棒には丸鋼棒 SBPR1080/1230(Φ19)、軸方向鉄筋 には SD345(D16)を用いた。

試験体の水中養生時の水温は,20℃である。水中養生 終了後は,約20℃に管理された試験室内で試験を行った。 なお,試験室では相対湿度は管理されていない。試験期 間中の試験室内の温度と相対湿度の計測値,および試験 地域の気象台で計測された外気の相対湿度¹⁰⁾を図−8 に 示す。ただし,試験室内の相対湿度の測定は試験開始の 約半年後からである。

無筋収縮試験では、コンクリート温度および試験体中 央部の上方と下方の内部ひずみと自由水量を測定した。 自由水量の測定には印加電圧方式水分センサを用いた。





図-5 無筋収縮試験

図-6 PRC はり滞水状況

図-7 PRC はり持続載荷状況

ヤイントラ	フランプ	フランプ 応信具	粗骨材の	W/C a/a	単位量 (kg/m ³)					
種類	(cm)	至风里 (%)	最大寸法	(%)	(%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
		()	(mm)	. ,	. ,	W	С	S	G	Ad
早強	18	4.5	13	58.0	50.1	193	333	842	867	3.33

表-2 コンクリートの配合

PRC はり持続載荷試験では、コンクリート温度、スパン 中央の内部ひずみ、支点位置とスパン中央での鉛直変位 を測定した。各試験体での内部ひずみおよび自由水量の 測定位置を図-3 および図-4 に示す。内部ひずみおよ び自由水量は試験体上面から 65mm と 135mm の位置で 測定した。

3.2 解析条件の設定

(1) 環境条件

図-8 に解析に用いた試験室内の相対湿度の推定値の 経時変化を示す。解析では、コンクリートの温度を 20℃ の一定値とした。試験開始から約半年間は,試験室内の 相対湿度の測定データがない。一般に、冬季は建物の断 熱や暖房により外気と比較して屋内の相対湿度が低くな ることが知られている。試験室内の相対湿度として外気 の相対湿度を用いると、試験開始初期に相当する冬季に おいて実際の試験環境よりも湿潤となることが予想され る。そこで、試験室内の温度が外気温よりも低い場合に は気象台データをそのまま試験室内の相対湿度として用 い、試験室内の温度が外気温よりも高い場合には、気象 台データを補正して,試験室内の相対湿度として用いる ことにした。相対湿度の補正では、外気と試験室内の水 蒸気圧は等しいと仮定した。外気温および試験室内の温 度から外気および試験室内の飽和水蒸気圧をそれぞれ算 出し,外気の相対湿度と飽和水蒸気圧から水蒸気圧を算 出した。算出した水蒸気圧と試験室内の飽和水蒸気圧の 比から試験室内の相対湿度を求めた。飽和水蒸気圧の算 出には既往の式¹¹⁾を用いた。試験室内の相対湿度の時別 値を環境条件の入力値とした。

(2) 式(6)~(9)の変数の決定

式(6)~(9)の変数は、ひずみの測定結果と解析結果が一 致するように同定した。すなわち、本研究では、水分移 動モデルにおける D_{dry100} , $D_{water100}$, η_{dry} , η_{wet} , t_{im} は、乾 燥開始初期の収縮ひずみの進行速度および湿度変化に伴 うひずみの増減が測定結果と一致するように決定した。 滞水させた無筋試験体のひずみの測定結果を用いて決定 した変数を PRC はり試験体の変形解析にも用いた。

収縮モデルにおける係数 $a_1 \sim a_4^{-0}$ は,水分移動とは独 立に、収縮駆動力から求まる粘弾性ひずみや粘塑性ひず みの大きさに影響を及ぼす。 a_1 はクリープにおける遅れ 可逆変形の終局値と瞬間弾性変形の比率の逆数を表して おり、2~4 程度の値をとる^{4),8)}。 a_3 は不可逆変形の収束 値と瞬間変形の比率を表しており、1~4 程度の値となる ^{4),8)}。粘弾性ひずみや粘塑性ひずみの影響が大きく表れる、 材齢がある程度経過したときのひずみのオーダーが試験 結果と一致するように $a_1 \sim a_4$ を決定した。

表-3 に,このようにして決定した係数の値を示す。 なお,この値を式(6)~(9)に代入すると,図-2(b)に示し



水分移動モデル		収縮モデル		
$D_{\rm dry100}$	40 mm ² /day	α_1	3	
D _{water100}	2000 mm ² /day	α_2	10	
$\eta_{ m dry}$	3 mm/day	α3	1	
$\eta_{ m wet}$	40 mm/day	α_4	100	
t _{lim}	1 day			

た水分伝導係数と含水率の関係が得られる。上記の係数 のほか,収縮モデルで必要な空隙率等は,既往の文献¹²⁾ を参考に,コンクリートに一般的な値を用いた。

(3) 計算方法・設定条件

水分移動モデルにおける拡散方程式は, Euler 陽解法を 用いて差分法により離散化した。また,水分移動モデル から直接求められない細孔内相対湿度は,相対含水率と の関係式を用いて二分法により数値解析的に求めた。上 面滞水条件は最上部の要素の相対含水率を常に1とする ことで表現している。本検討では液状水は鉛直方向の浸 透が卓越すると考え,滞水面に垂直な方向の水分移動を 乾燥・吸水過程とし,乾燥・封かん面に垂直な方向の水 分の移動を乾燥・吸湿過程とした。拡散方程式では計算 時間間隔を要素サイズに対して十分小さくする必要があ ること,要素サイズが大きいと断面内での水分やひずみ の分布を表現できないことから,解析における要素サイ ズは10mm,計算時間間隔は0.04day (1hour) とした。 3.3 試験結果および解析結果

5.5 战夷和本 65 5 0 所 1 1 和

(1) 無筋収縮試験

図-9 に、上面滞水させた無載荷状態の無筋の試験体 NC-W のひずみの経時変化を示す。なお、ひずみは収縮 側を負で示し、全ひずみから線膨張係数を10(×10⁶/°C) として温度ひずみを差し引いて求めた。また、試験体を 静置したときのひずみを初期値とした。

ひずみの絶対値は,滞水面に近い試験体上部 (d=65mm)に設置したひずみゲージに対して,乾燥面 に近い試験体下部(d=135mm)で計測した値が大きい。 上面の滞水と側面の封かんにより試験体上部の乾燥が抑 制され,試験体下部で側面からの水分逸散により乾燥が 進行した結果であると推察される。また,試験体上部お よび下部ともに,ひずみが季節によって変動しているこ とも確認できる。材齢 366 日で上面の水を除去した後は, 試験体下部に対して試験体上部でひずみが収縮側に急増 している。図-9に,試験体 NC-Wの試験体中央部での ひずみの経時変化の解析結果を併記する。解析では,式 (8),(9)において D_{water100}=D_{dry100} としたうえで k=1 とした, 時間依存性を考慮しない解析も実施した。時間依存性を 考慮した解析では,湿度変化によるひずみの変化や,上 面滞水を終了した際の試験体上方の滞水側での収縮ひず みの増加を再現できた。本検討における水分移動モデル では,吸着水の化学ポテンシャルの方向等は考慮してい ないが,ひずみを概ね評価できていると考えられる。

各部位のひずみの変化は、部材中の水分移動と関係す る。実験で水分センサを用いて測定した自由水量から算 出した相対含水率と解析で得られた相対含水率の経時変 化を図-10に示す。実験では、上面を継続して滞水させ ているにも関わらず、水和による水分消費が停滞する打 設約1年後において、上面滞水による相対含水率の回復 は見られず、試験体上方では乾燥が進んでいる。このこ とは,時間の経過とともに水分伝導係数が低下すること ⁶を示唆していると考えられる。解析では、吸水現象の 時間依存性を考慮したことで、試験体上方の乾燥を再現 できており、実現象に近い含水状態を表現できたと考え られる。今回のように,長期間継続的に水の影響を受け る環境では,吸水現象の時間依存性が重要となる。なお, 部材下方では相対含水率を側面から10mmの位置で測定 しており, 乾燥初期の実験値と解析値の乖離は, 境界面 での要素サイズが影響したものと考えられる。次に、実 験および解析でひずみの急増がみられた滞水終了前後に ついて、解析によって得られた相対含水率分布を図-11 に示す。滞水の終了に伴い、試験体上面の乾燥が急速に 進んだことが表現されており、このことがひずみの急増 につながったと考えられる。

以上のように、無載荷状態の無筋コンクリートに対し て、断面内での水分移動を捉えることで、ひずみの変化 を再現することができた。特に、吸水現象の時間依存性 を考慮したことで、今回のような長期間滞水している特 殊な場合であっても、水分の浸透量を過大に評価するこ となく、実際のコンクリート中の含水状態に近い状況を 表現することができたといえる。

(2) PRC はり持続載荷試験

図-12 および図-13 に、上面滞水させていない試験 体 PRC-D と上面滞水させた試験体 PRC-W のスパン中央 で計測したひずみの経時変化を示す。なお、ひずみは全 ひずみから線膨張係数を 10 (×10⁶/°C) として温度ひず みを差し引いて求めた。試験体を支承に設置したときの ひずみを初期値としており、ひずみには導入プレストレ スカ P_eおよび載荷荷重 P による弾性ひずみも含まれる。









200

材齢 (day)

300

400

100

試験体 PRC-D と試験体 PRC-W では,ひずみ分布の特 徴に差異がみられた。試験体 PRC-D では,試験体下部と 比較して,試験体上部のひずみが収縮側に大きくなった。

-1200

0



図-14 PRC はり試験体のたわみδの経時変化

持続荷重による曲げ作用により、試験体上部は圧縮域と なっており、クリープひずみが大きくなったものと考え られる。一方、試験体 PRC-W では、試験体上方の滞水 側のひずみは試験体下部と同程度となった。試験体下部 と比較して試験体上部では、持続荷重による圧縮応力は 大きいものの、上面の滞水と側面の封かんによって収縮 ひずみが小さくなったものと考えられる。

図-14に,試験体 PRC-D と試験体 PRC-W のスパン中 央での鉛直下向き変位の経時変化を示す。なお,スパン 中央での鉛直下向き変位は,試験体を支承に設置したと きを初期とし,測定したスパン中央での変位から支点位 置での変位を差し引いて求めた。試験体 PRC-W では鉛 直下向きに荷重が作用しているにも関わらず,持続載荷 開始後から材齢約 180 日まで,鉛直上向きに変位が発生 し,試験体が上方に反り上がった。これは,図-13に示 す通り,持続載荷開始後4ヶ月間,試験体下部と比較し て試験体上部の収縮ひずみが小さくなったことと一致し ている。上面滞水を施したことで,部材内で水分分布に 偏りが発生し,断面内でのひずみ勾配に起因して,たわ みに影響を及ぼしたものと推察される。

図-12~図-14には,解析結果を併記している。なお, 変位はスパン中央と支点位置の断面でひずみの解析値か ら曲率を算出し,橋軸方向の曲率分布が2次関数で表せ ると仮定して求めた。試験体NC-Wでは計測結果を十分 に再現可能であった解析方法の設定であるが,PRCはり ではひずみやたわみの増減の傾向については表現できて いるものの,その絶対値については一致しない.特に, 持続荷重により圧縮応力が作用する試験体上方において, 収縮ひずみを過小評価している。パラメータの決定方法 や,断面内で大きな応力が作用するはり部材レベルでの 水分移動について検討を進める必要がある。

4. まとめ

上面滞水させた試験体の計測結果を用いて,乾燥・吸 湿・吸水過程の区別および吸水現象の時間依存性を導入 した変形予測手法を検証し,以下の知見を得た。

(1) 死荷重レベルの持続荷重を鉛直下向きに作用させた PRC はりは、上面滞水によって試験体上方の収縮が 抑制され、一時鉛直上向きに変位した。

- (2) 吸水現象の時間依存性を考慮したことで、上面滞水 させた無筋コンクリートの含水状態およびひずみの 経時変化を概ね再現することができた。
- 謝辞:本検討にあたり、土屋智史氏((株) コムスエンジ ニアリング)から水分移動に関する貴重な御助言を 賜りました。この場を借りて、深謝の意を表します。

参考文献

- Ohno, M., Chijiwa, N., Suryanto, B. and Maekawa, K.: An Investigation into the Long-Term Excessive Deflection of PC Viaducts by Using 3D Multi-scale Integrated Analysis, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.10, pp.47-58, 2012.2
- 渡邊忠朋, 土屋智史, 坂口淳一, 笠井尚樹: 断面の 部位別に時間依存挙動を考慮した線材モデルによ る PC 橋梁の長期たわみ解析, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.207-226, 2013
- Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T: Multi-scale Modeling of Concrete Performance -Integrated Material and Structural Mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.2, pp.91-126, 2003.7
- 大野又稔,渡辺健:要素試験体の水分・収縮評価 に基づく供用環境下 PC 桁の変形予測,コンクリー ト工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.361-366, 2017
- 5) 浅本晋吾,大塚 歩,三浦千佳子,桑原勇太:実環 境下におけるコンクリートの収縮,収縮ひび割れ挙 動に関する検討,コンクリート工学論文集,Vol.21, No.2, pp.35-43, 2010.5
- 秋田 宏,藤原忠司,尾坂芳夫:モルタルの乾燥・ 吸湿・吸水過程における水分移動,土木学会論文集, 第 420 号/V-13, 1990.8
- 1) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編],土木学会,2013.3
- 朱 銀邦,石田哲也,前川宏一:細孔内水分の熱力
 学的状態量に基づくコンクリートの複合構成モデル,土木学会論文集,No.760/V-63, pp.241-260, 2004.5
- 9) 下村 匠,前川宏一:微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル,土木学会論文集,No.520/ V-28, pp.35-45, 1995.8
- 10) 気象庁 HP:http://www.jma.go.jp/jma/index.html
- 11) 岡田益己:湿度および関係諸量の計算法,農業気象, Vol.40, No.4, pp.407-409, 1985
- 羽原俊祐, 沢木大介:硬化コンクリートの空隙構造 とその物性, Gypsum & Lime, No.240, 1992