

PC桁内の水分分布の経時変化に関する解析的検討

(公財)鉄道総合技術研究所 修士(工学) ○中村 麻美
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 博士(学術) 渡辺 健
 (公財)鉄道総合技術研究所 修士(工学) 大野 又稔

Abstract : This research aims to evaluate the moisture state in PC girders. The moisture migration analysis based on the diffusion equation was conducted for some types of cross sectional shape. As a result, the moisture state of each region such as flange and web depended on the thickness of the region and the existence of the surface subjected to the rainfall. Analytical results imply that the moisture state in the member should be considered to divide the cross section for analysis especially for the case that the deflection cannot be calculated only from the average value of moisture state of each region.

Key words : Time-dependent deformation, Shrinkage, Moisture migration, Fiber analysis

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート(PC)橋梁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)}。土木学会コンクリート標準示方書³⁾には、2012年の改訂以降、断面内の収縮差により生じる曲率を考慮して変位や変形を算定する方法として、鋼材による拘束条件と降雨等の環境条件を考慮して部材断面を複数の部位に分割し、分割した部位ごとのコンクリートの収縮やクリープの挙動を入力値として与える方法が記載されており、例として、ファイバーモデルによる構造解析²⁾があげられている。入力値となるコンクリートの自由収縮ひずみやクリープ係数は、部材内の水分状態の影響を受けることが知られている。ファイバーモデル等を用いた構造解析において、降雨等の環境条件を適切に考慮するためには、断面内の水分状態の観点から、断面分割方法を検討する必要があると考えられるが、断面内の水分状態を断面の分割と関連させて検討した事例は少ない。

本研究では、ファイバーモデル等における断面分割方法の決定において有用となる断面内での水分分布を把握することを目的として、拡散方程式に基づく解析モデルに乾燥・吸湿・吸水過程を考慮した水分移動モデル⁴⁾を用いて、実PC構造物を想定した断面に対して水分移動解析を実施した。

2. 水分移動モデルの概要

水分移動モデルでは、図-1に示すように、水分移動と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式(1)で定義される相対含水率 θ を用いると、 θ の時間変化は式(2)で表される。

$$\theta = (\varphi_{cap} S_{cap} + \varphi_{gel} S_{gel}) / (\varphi_{cap} + \varphi_{gel}) \quad (1)$$

$$\partial\theta/\partial t = (\partial\theta/\partial t)_{hyd} + (\partial\theta/\partial t)_{dif} \quad (2)$$

ここで、 θ : 相対含水率、 t : 時間 (day) , $(\partial\theta/\partial t)_{hyd}$: 水和による θ の変化、 $(\partial\theta/\partial t)_{dif}$: 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 $(\partial\theta/\partial t)_{hyd}$ は、コンクリートの強度発現式³⁾と強度発現と水和度の関係式⁵⁾から導出した、式(3)により算出できるとした。添え字 n は解析ステップ番号、 i は要素番号を示す。

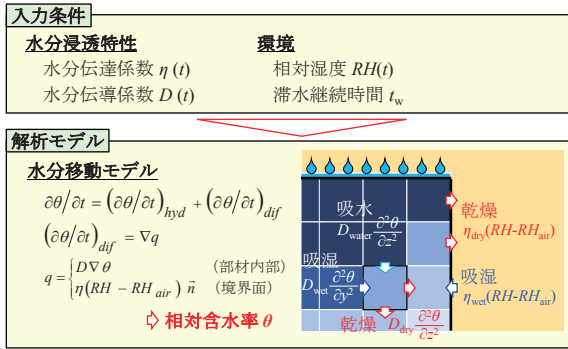
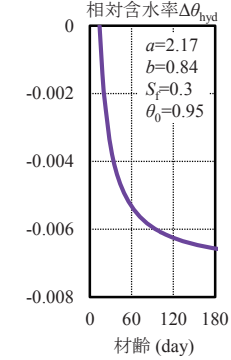
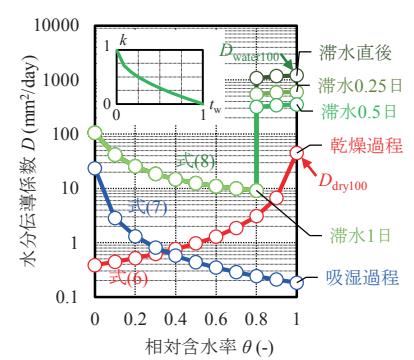


図-1 水分移動解析方法



(a) 水和による水分消費



(b) 水分伝導係数の例
図-2 水分移動モデル

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

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³⁾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) のようになる。

水分移動による相対含水率の変化 $(\partial\theta/\partial t)_{dif}$ は、既往の研究⁶⁾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。

$$\left(\partial\theta/\partial t\right)_{dif} = \nabla q \quad (4)$$

$$q = \begin{cases} D\nabla\theta & (\text{コンクリート内部}) \\ \eta(RH_v - RH_{air}) \bar{n} & (\text{大気との境界面}) \end{cases} \quad (5)$$

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)、 RH_v : 細孔内相対湿度、 RH_{air} : 外気相対湿度、 \bar{n} : 境界面の法線ベクトルである。一般に多孔質体では、液状水や水蒸気など、水分の形態によって水分移動のメカニズムが異なる。本モデルでは、乾燥・吸湿・吸水過程を区別している。乾燥および吸湿過程での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。吸水過程での水分伝導係数は、秋田らの式⁶⁾に、時間の経過とともに水分伝導係数が低下する⁶⁾ことを示す係数 k を導入し、式(8)および(9)で表せるとした。係数 k は、水分伝導係数の低下は毛管水移動が支配的となる相対水率 0.8 以上でのみ生じること、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を、管壁との摩擦抵抗は液状水の浸透深さと関係して $\sqrt{t_w}$ (t_w : 滞水継続時間) に比例することを仮定して定めた。水分伝導係数は、図-2 (b) のようになる。

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

$$D_{wet} = D_{dry100} \cdot (2.2/4.2) \cdot \left\{ 1 / (41\theta + 1) \right\}^{1.3} \quad (7)$$

$$D_{water} = \begin{cases} D_{water00} \{ 0.004 + 0.0031 / (\theta + 0.095) \}^{1.4} & (\theta < 0.8) \\ k \cdot D_{water00} \{ 1 - 2.5(1-\theta)^2 \} & (\theta \geq 0.8) \end{cases} \quad (8)$$

$$k = 1 - \sqrt{t_w / t_{lim}} \quad (k \geq 0) \quad (9)$$

ここで、 D_{dry} : 乾燥過程での水分伝導係数 (mm²/day)、 D_{wet} : 吸湿過程での水分伝導係数 (mm²/day)、 D_{dry100} : $\theta=1$ のときの D_{dry} (mm²/day)、 D_{water} : 吸水過程での水分伝導係数 (mm²/day)、 $D_{water00}$: $\theta=1$ のときの D_{water} 、 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。滞水継続時間は、連続した1回の滞水開始からの経過時間である。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、液状水の浸透が停止するまでの時間である。本モデルを用いた解析により、滞水させた無筋コンクリートの含水状態を概ね再現できることが確かめられている⁴⁾。

3. 解析概要

3.1 対象断面および解析ケース

本研究において、想定している構造物は、**図-3**に示すようなPCT桁とPCI桁、PC箱桁である。解析を実施した断面の形状と境界条件を**図-4 (a)-(c)**に示す。本検討の目的は、断面内での水分状態の把握であるため、鋼材を考慮せず、全断面コンクリートとした。湿度変動と降雨を考慮した実環境条件での解析に加えて、降雨を作用させず、外気相対湿度をパラメータとした解析を実施した。

3.2 解析条件

(1) 環境条件

湿度変動と降雨を考慮した実環境条件での解析では、熊本市の2014年の1年間の気象台データ⁷⁾の時刻別値をもとに、入力値として外気相対湿度、降雨（滞水）の有無と滞水継続時間を、解析期間分、繰返し与えた。本検討で用いた気象台データ⁷⁾として、湿度と降水量を**図-5**に示す。雨上がり後の滞水等も考慮し、滞水継続時間は、実際の降雨時間に3時間加算した時間とした。桁上面のみ降雨の影響を受けると仮定し、降雨の期間中、上フランジの最上縁の要素の相対含水率を1とすることで、降雨を表現した。本検討では、降雨時、水分浸透に伴う相対含水率の変化が大きい鉛直方向については、雨水が浸透している深さ分のみを乾燥・吸水過程とし、雨水が浸透していない部分は乾燥・吸湿過程とした。降雨時の水平方向および降雨時以外の水平・鉛直方向については、乾燥・吸湿過程とした。降雨時の雨水の浸透深さ（以下、水分浸透深さ）は、後述する水分浸透解析により事前に得られた滞水継続時間と水分浸透深さの関係を用いて、滞水継続時間から簡易的に算出している。今後、水分移動方向や水分浸透深さによらず、各要素の水分履歴から吸湿過程と吸水過程、すなわち水蒸気拡散と毛管水移動とを一意に決定する解析手法について更なる検討が必要である。なお、温度変化や日射の影響は考慮していない。

降雨を作用させず、外気相対湿度をパラメータとした解析では、解析期間全体を通して、外気相対湿度を一定値とし、全方向を乾燥・吸湿過程とした。外気相対湿度は、71%、85%の2種類とした。71%は熊本市の2014年の平年値の年平均値に相当し、85%は平年値の1.2倍に相当する値として設定した。

(2) 水分移動モデルにおける各係数

本解析手法では、解析結果が各部材の応答を再現するように、水分移動モデルに用いる各係数を決定する必要がある。しかし、本検討の目的は、各断面形状での水分分布の傾向を把握することであるため、本検討では、別の上面滞水試験に対する解析⁴⁾により決定した、**表-1**に示す値を解析に用いた。

(3) 計算方法と設定条件

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。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を用いて二分法により数値解析的に求めた。要素寸法は、**図-4 (d)**に示すように、20mmを基本とし、表層から2要素のみ、境界面垂直方向の要素寸法を5mmとした。表層の要素寸法は、水分浸透解析等から、降雨開始時の水分浸透深さを表現できるように決定した。また、滞水継続時間を実際の降雨時間に3時間を加算した時間としていることから、計算時間間隔は4時間とし、1時間の降雨でも計算ステップに含まれるようにしている。本検討では、乾燥開始材齢を3日として、材齢3日以降について水分移動解析を実施した。なお、現状の解析モデルは、外気相対湿度が変動する条件下で、要素寸法と計算時間間隔が解析結果の絶対値に影響を及ぼす可能性があるが、乾燥領域と湿潤領域の分布や外気相対湿度をパラメータとしたときの乾燥の程度の大小関係などの定性的な傾向の把握においては大きな問題はないと考えられる。

(4) 水分浸透解析

水分浸透解析の概要を**図-6**に示す。解析対象は、幅100mm、高さ200mmの2次元平面であり、側面は封かん条件である。要素寸法は2mmとし、計算時間間隔は1分とした。解析では、浸透開始時の全

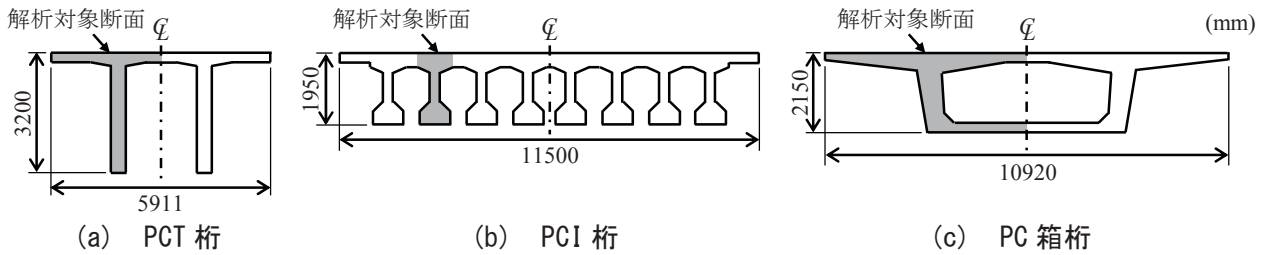


図-3 解析対象構造物

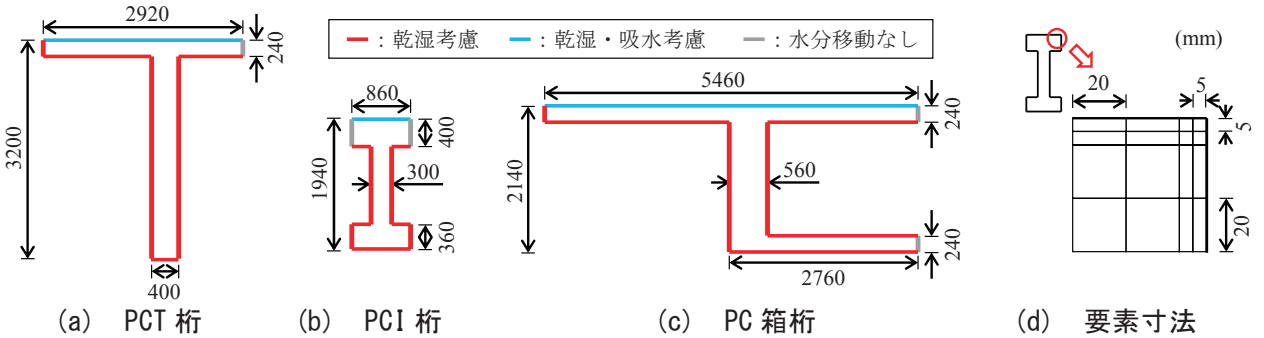


図-4 解析対象断面

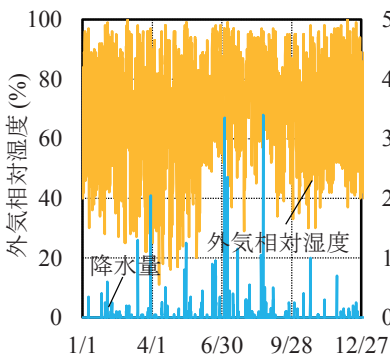


図-5 解析で用いた実環境条件

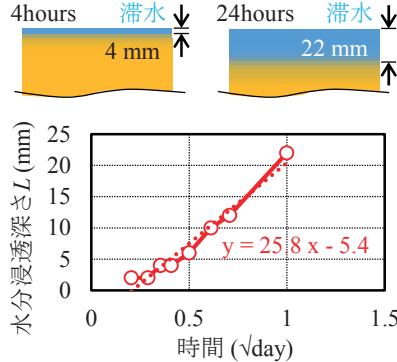


図-6 水分浸透解析の概要

表-1 解析で使った係数

D_{dry100}	40 mm ² /day
$D_{water100}$	2000 mm ² /day
η_{dry}	3 mm/day
η_{wet}	40 mm/day
t_{lim}	1 day

D : 水分伝導係数, θ : 相対含水率,
 D_{dry100} : 乾燥過程 $\theta=1$ での D ,
 $D_{water100}$: 吸水過程 $\theta=1$ での D ,
 η : 水分伝達係数, η_{dry} : 乾燥過程の η ,
 η_{wet} : 吸湿過程の η , t_{lim} : 限界浸透時間

要素の相対含水率を 5.0×10^{-6} として絶乾を想定し、浸透開始後の試験体最上縁の要素の相対含水率を1として水分浸透試験を模擬し、滞水継続時間と水分浸透深さの関係を求めた。なお、水分浸透深さは、相対含水率0.8以上の要素が存在する深さとした。

4. 解析結果および断面分割に関する一考察

4.1 実環境条件下での細孔内相対湿度分布および部位平均値

湿度変動と降雨を考慮した実環境条件下での解析結果について、材齢5年時点での細孔内相対湿度分布を図-7に示す。なお、図には部材縁から60mmの代表的な箇所の細孔内相対湿度を併記している。降雨の影響を受ける桁上面はほとんど乾燥していないことが分かる。また、二面の乾燥面が近接するPCT桁ウェブの下端やPC箱桁の角部では、同一部材内の他の箇所と比較して乾燥が進んでいる。既往の研究により、部材内での水分状態が、厚さや降雨の影響を受けることが指摘されている⁸⁾が、上記の水分移動モデルを用いた本解析においても、同様の傾向を確認することができた。さらに、部材断面内の水分分布の傾向を把握するため、桁断面を形状の観点から上フランジ、ウェブ、下フランジの部位に分割し、細孔内相対湿度の部位ごとの平均値（以下、部位平均値）を求めた。細孔内相対湿度の部位平均値の経時変化を図-8に示す。降雨の影響を直接受ける上フランジは、降雨の影響を直接受けないウェブや下フランジと比較して、細孔内相対湿度が同程度、もしくは高くなる傾向にあることが分かる。PC箱桁では、厚さが大きく異なるウェブと下フランジで細孔内相対湿度が大きく異なった。

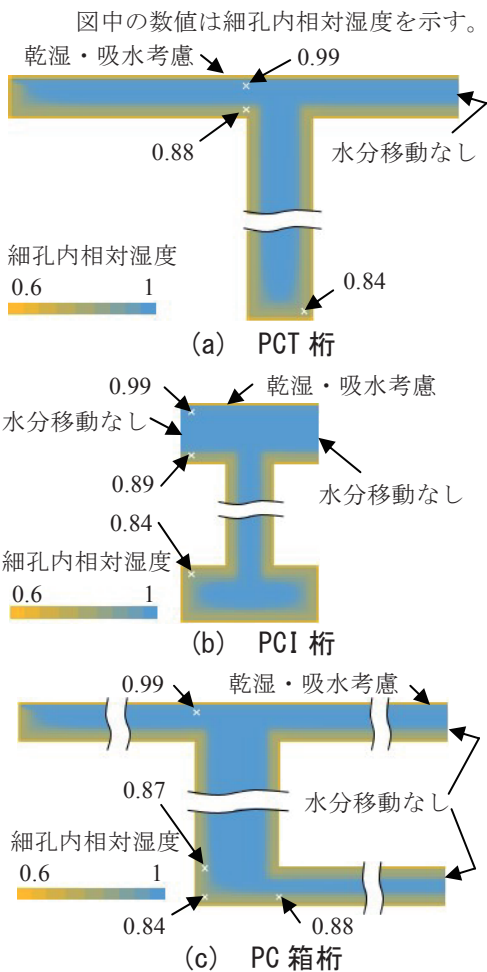


図-7 細孔内相対湿度分布(材齢5年)

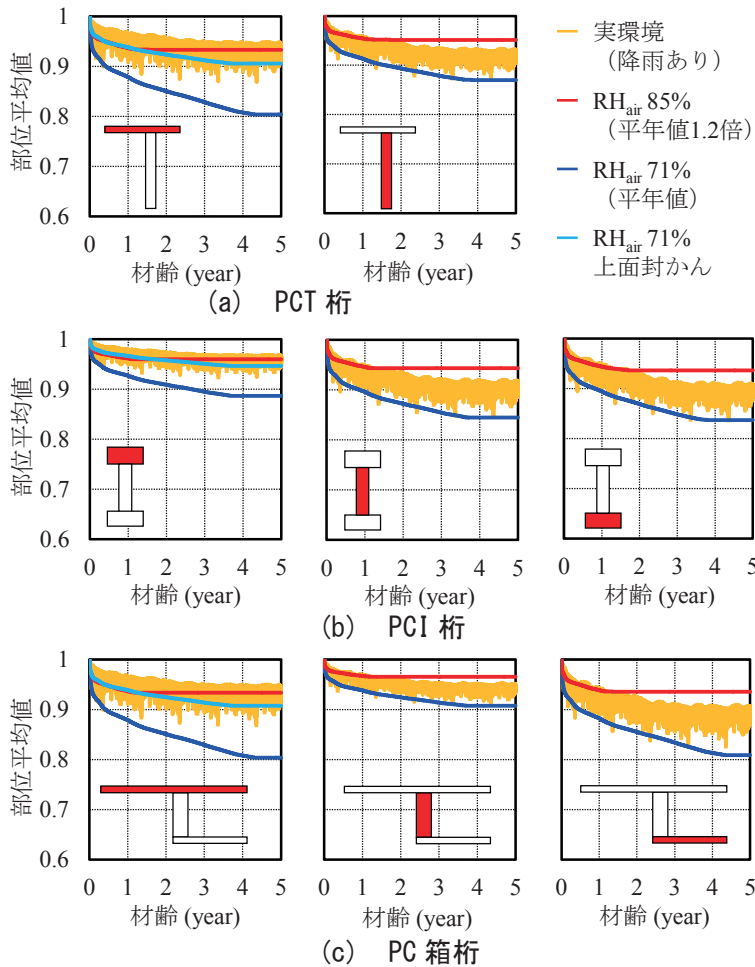
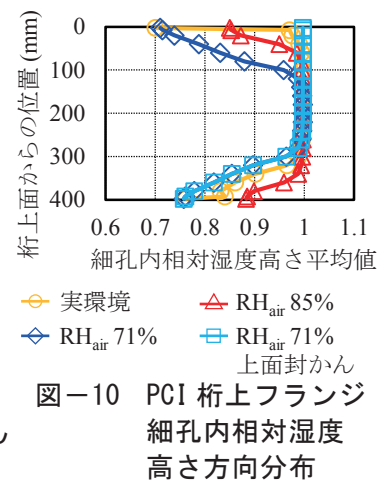
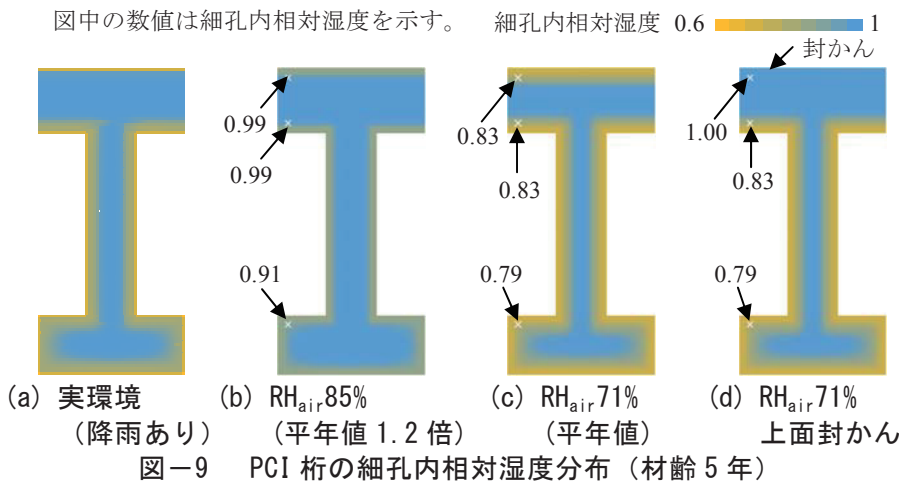


図-8 細孔内相対湿度の部位平均値

4.2 外気相対湿度をパラメータとしたときの細孔内相対湿度分布および部位平均値

降雨を作用させず、外気相対湿度をパラメータとして水分移動解析を実施したときの、細孔内相対湿度の部位平均値の経時変化を図-8に、材齢5年時点でのPCI桁を例として、細孔内相対湿度の分布を図-9(a)-(c)に、上フランジ内で細孔内相対湿度を同一高さで平均した値の高さ方向分布を図-10に、実環境条件での解析結果と合わせてそれぞれ示す。外気相対湿度を平年値とした場合、図-8に示すように、細孔内相対湿度の部位平均値は、実環境条件とした解析結果と比較して、上フランジでは1割程度小さい値となったが、ウェブおよび下フランジでは実環境条件との差が小さい傾向にあった。実環境条件下での水分分布を求めるためには、降雨の影響を考慮した環境作用を入力条件とする必要がある。外気相対湿度を仮に平年値の1.2倍とした場合には、図-8に示すように、上フランジの細孔内相対湿度の部位平均値は、実環境条件と同程度の値となった。一方で、図-10に示すように、外気相対湿度を平年値の1.2倍とした条件と実環境条件とでは、上フランジ内の細孔内相対湿度の勾配が上面付近で異なった。実環境条件では、図-10に示すように、上フランジの上面は下面と比較して乾燥がほとんど進んでいなかったことから、上フランジ上面を仮に水分移動なしの条件(封かん条件)とした解析を実施した。なお、外気相対湿度は平年値とした。外気相対湿度を平年値、上フランジ上面を封かん条件としたケースの解析結果を、図-8~図-10に併記する。外気相対湿度を平年値、上フランジ上面を封かん条件とした解析結果は、外気相対湿度を85%とした場合と比較して、上フランジ内での細孔内相対湿度の部位平均値は図-8に示すように同程度の値となっているが、細孔内相対湿度の勾配は図-9と図-10に示すように上面付近で異なっている。各部位の細孔内相対湿度の平均値は、部位間の収縮差の目安のひとつとなる一方で、各部位内での細孔内相対湿度の勾配は各部位内でのひず



み差と関係して、部材断面内での曲率増加の原因となる。ファイバーモデル等を用いたたわみを解析的に検討する際、本検討におけるPCT桁やPCI桁、PC箱桁のように、各部位内での曲率が、部位間のひずみ差に起因する曲率に対して相対的に小さい場合には、既往の研究²⁾のように、形状に応じて断面を分割しても大きな問題はないと考えられる。一方で、矩形断面等の単一形状の部材では、断面内での曲率が全体のたわみに及ぼす影響を無視できず、断面内の細孔内相対湿度の平均値だけではたわみを評価できないため、形状ではなく細孔内相対湿度分布に応じて適切に断面を分割する必要がある。

5. まとめ

- 1) PC桁断面に対する水分移動解析の結果、桁上面は降雨の影響によりほとんど乾燥せず、また、ウェブと下フランジでは厚さが大きく異なる場合、細孔内相対湿度の部位平均値が大きく異なった。
- 2) 各部位で、細孔内相対湿度の平均値が同程度でも、部位内の高さ方向の分布が異なる場合もある。ファイバーモデル等による構造解析において、部位ごとの細孔内相対湿度の平均値だけではたわみを評価できない部材の場合には、細孔内相対湿度分布に応じて適切に断面を分割する必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 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
- 3) 土木学会: 2017年度制定コンクリート標準示方書 [設計編], 丸善, 2018.3
- 4) 中村麻美, 渡辺 健, 大野又稔, 安保知紀: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.435-440, 2018
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 気象庁HP: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 8) Chijiwa, N., Hayasaka, S. and Maekawa, K.: Long-Term Differential and Averaged Deformation of Box-Type Pre-stressed Concrete Exposed to Natural Environment, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp.1-17, 2018.1