

論文 異なる配合・養生を与えた小型供試体および実物大 RC 床版の若材齢挙動に関するマルチスケール統合解析

大野 直也*1・石田 哲也*2・子田 康弘*3・岩城 一郎*4

要旨：本研究では、使用材料や養生条件の異なる様々な小型供試体及び実物大 RC 床版供試体の各種挙動に対して、マルチスケール統合解析システムを適用し、モデルの検証を試みた。各供試体は通年を通じた実環境下に設置しており、温湿度や日射、降雨といった環境特性の影響についても検討を行っている。本研究ではまず、小型供試体の各種挙動について解析モデルが概ね追跡可能であることを確認した。次に、実物大 RC 床版供試体の収縮膨張挙動について、鋼主桁の拘束を含めた床版モデルを用いることにより、同じく解析モデルは実測値を概ね再現できることが確認された。

キーワード：マルチスケール統合解析システム、膨張収縮挙動、実物大 RC 床版、性能照査

1. はじめに

任意の材料・配合、構造諸元、および養生・環境条件のもとで、水和反応の開始から長期供用期間に及ぶ性能を予測することは、構造物の合理的な設計・施工・維持管理を実現する上で重要である。第一・第二著者の所属する東京大学コンクリート研究室では、様々な条件下におけるコンクリート構造物の挙動を、統一的な手法で評価することを目的として、コンクリート内部の微視的挙動に関するモデル群を実装した熱力学連成解析システム (DuCOM)¹⁾などと、鉄筋コンクリート構造の巨視的応答・損傷を追跡可能な非線形動的 RC 構造解析システム (COM3)²⁾などを統合したマルチスケール統合解析システム (DuCOM-COM3)³⁾の開発を進めている。

本研究は、使用材料や養生条件の異なる様々な小型供試体及び実物大 RC 床版供試体の若材齢の挙動に対して、上記のマルチスケール統合解析システムを適用し、モデルの検証を試みるものである。

2. 解析対象

2.1 「ロハスの橋」プロジェクト

東北地方をはじめとする積雪寒冷地での道路構造物、中でも道路橋の RC 床版は凍結防止剤による塩害や凍害の発生や、アルカリシリカ反応による劣化、また交通荷重による疲労が加わることで複合劣化が発生し、土砂化に至る事例が数多く報告されている。これらの問題に対し、産学連携の研究体制により、健全 (Health) で持続可能 (Sustainability) な橋、すなわち「ロハスの橋」を実現するためのプロジェクトが第三・第四著者らによって進められている。

同プロジェクトでは、使用材料や養生条件を変えた 6 種類のシリーズについて、200×200×800mm 角柱供試体やφ100×200mm 円柱供試体、およびズレ止め鉄筋により鋼主桁と一体化させた実物大 RC 床版を作製し、収縮膨張挙動や剛性等の様々な物性を測定した⁴⁾。また、各供試体は通年を通じた実環境下に設置しており、温湿度や日射、降雨といった環境条件の影響を検討している。本研究ではこの 6 種類のシリーズのうち、表-1、表-2 に示す 5 種類のシリーズについて解析を行った。

2.2 小型供試体の概要

(1) 200×200×800mm 角柱供試体

供試体中央に設置したゲージ長 100mm の埋め込みゲージによる長軸方向の長さ変化試験、および質量測定による質量変化試験に供する。質量変化試験では材齢 7 日を基準質量とし、長さ変化試験では次式により、実ひずみから温度ひずみを除去した値をひずみ量として用いる。

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_2 - \gamma \times \Delta t = C_\varepsilon \times \varepsilon_i + (C_\beta - \gamma) \times \Delta t \quad (1)$$

ここで、 ε_3 : ひずみ量 [$\times 10^{-6}$]、 ε_2 : 実ひずみ [$\times 10^{-6}$]、 C_ε : 校正係数 [$\times 10^{-6}/1 \times 10^{-6}$]、 ε_i : 初期値からの指示値の変化量 [$\times 10^{-6}$]、 C_β : 補正係数 [$\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$]、 γ : 測定対象物の線膨張係数 ($=9.3$) [$\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$]、 Δt : 温度差 [$^\circ\text{C}$] である。

また、200×200×800mm 角柱供試体は、打ち込み後日向保管、日陰保管、室内保管とする 3 種類を用意し (ただし、No.3 と No.5 は日向・日陰保管のみ)、温湿度や日射、降雨といった環境条件の影響を検討した。

(2) φ100×200mm 円柱供試体

圧縮試験に供する。作製した供試体はすべて日向保管

*1 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程 (学生会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 工学部 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 日本大学 工学部 教授 博士 (工学) (正会員)

である。

2.3 実物大 RC 床版供試体の概要

橋軸方向の長さが 3000mm，橋軸直交方向の長さが 3500mm，床版厚さが 210mm（ハンチ厚さ 50mm）の RC 床版供試体を鋼主桁上に設置した。鋼主桁の高さは 900mm である。各供試体は RC 床版中央に設置したゲージ長 100mm の埋め込みゲージによる橋軸方向の長さ変化試験に供する。

3. 小型供試体への解析モデルの適用

3.1 解析要素

図－1 に示すように，降雨による上下面の非対称性を考慮し，200×200×800mm 角柱供試体の 1/4 モデルを使用した。乾燥表面から 40mm までは 10mm，以降内部は 20mm の要素分割としている。また，対称面の拘束および供試体の設置状況（写真－1）を考慮し，供試体下面に

上下方向の拘束を入れている。

3.2 解析条件

(1) 環境条件

図－2 に解析モデルに入力したシリーズ No.1 の環境条件を示す。日向，日陰，室内の温湿度は各場所にて温度・湿度データロガーによって測定した値を用いた。

(2) 初期条件

各供試体の初期条件を表－3 にまとめる。

3.3 解析手法の検討

(1) 骨材収縮量に関わるパラメータ同定

米田らにより，DuCOM-COM3 に実装された準微細ひび割れモデル⁵⁾では骨材の収縮による微細ひび割れの進展およびそれに伴う水分逸散量の増加や剛性の低下等を考慮している。骨材の収縮量の実測値が不明であるため，シリーズ No.1 室内保管供試体の実測値に対する感度解析により，骨材の最大骨材収縮量（絶乾時）を 500μと

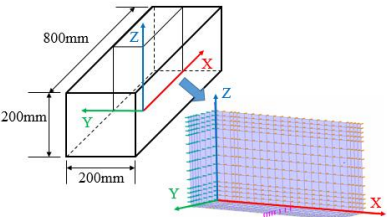
表－1 供試体シリーズの概要

シリーズ No.	コンクリート想定品質	養生条件	備考
No.1	標準品質	7 日間封かん養生	国交省標準仕様を想定
No.2	低品質	7 日間封かん養生	粗悪な品質を想定
No.3	高耐久品質	7 日間封かん養生	膨張材添加による品質向上
No.4	最上級品質	91 日間封かん養生	膨張材＋フライアッシュによる品質向上
No.5	標準品質	91 日間封かん養生	長期間の養生による品質向上

表－2 コンクリートの使用材料および配合

シリーズ No.	W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ²)						混和剤 (P×%)		
				W	C	FA	EX	S	G	Ad	SP	AE
No.1	55	4.5	46	172	313	—	—	834	997	1.2	—	1.6A
No.2	65	3.0	49	185	285	—	—	899	960	1.5	—	1.0A
No.3	45	6.0	45	161	338	—	20	791	992	—	0.55	2.0A
No.4	45	6.0	45	161	338	72	20	709	992	—	0.70	10A
No.5	55	4.5	46	172	313	—	—	834	997	1.2	—	1.6A

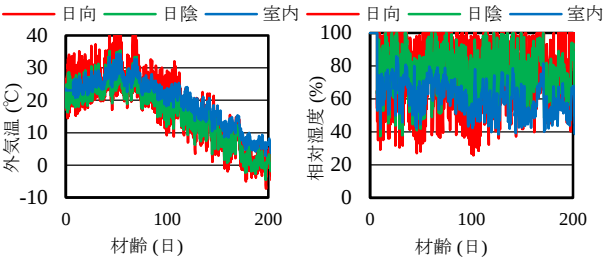
セメント (C)：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）
細骨材 (S)：福島県白河市産砕砂（表乾密度 2.64g/cm³，吸水率 1.09%）
粗骨材 (G)：福島県いわき市産碎石 2005（表乾密度 2.71g/cm³，吸水率 0.45%）
フライアッシュ (FA)：東北電力（株）能代発電所フライアッシュⅡ種（密度 2.31g/cm³）
膨張材 (EX)：市販品（密度 3.16g/cm³，比表面積 3450cm²/g）
AE 減水剤 (Ad)：リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
高性能 AE 減水剤 (SP)：ポリカルボン酸エーテル系化合物
空気量調整剤 (AE)：アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤（No.1,3,5 に使用），変性ロジン酸化合物系イオン界面活性剤（No.4 に使用），ポリアルキレングリコール誘導体（No.2 に使用）



図－1 解析要素



写真－1 供試体設置状況



図－2 シリーズ No.1 の環境条件

表-3 コンクリートの初期条件

シリーズ No.	打ち込み日時 (材齢 0 日)	コンクリート温度(°C)		
		日向	日陰	室内
No.1	6/13 12:00	26.0	24.2	23.6
No.2	6/13 20:00	24.0	25.1	25.2
No.3	6/16 12:00	27.4	26.1	—
No.4	6/16 13:30	30.0	29.0	27.5
No.5	6/13 14:10	30.0	24.8	—

した (図-3)。

(2) 降雨の影響を考慮した解析手法の検討

コンクリートの収縮ひずみに影響を与える環境特性として、降雨が挙げられる。鈴木ら⁹⁾は降雨によるコンクリートの吸水を DuCOM-COM3 上で簡便に表現する手法として、降雨の間、解析上で相対湿度を 100% とするとともに、コンクリート表面の水分伝達量を示す水分伝達係数を規定値 ($=5.0 \times 10^{-5}(\text{m/s})$) の 100 倍とすることを提案している。本研究においても、日向保管供試体では降雨の影響を考慮する必要があるため、鈴木らの手法を用いた。以降、相対湿度 100%かつ水分伝達係数 100 倍として降雨による吸水を考慮した範囲を吸水面、相対湿度による水分のやり取りのみを考慮した範囲を吸湿面とする。

図-4 に気象庁より入手した 10 分ごとの福島県郡山市の降水量を示す。降雨データに従い、降雨時の解析 STEP 分割は 10 分間隔とした。また、鈴木らは側面に滴り落ちた部分での吸水を考慮し、解析モデルの上面と、上面から 2 要素目までを吸水面として設定しており、本研究においても、上面から 2 要素目まで (20mm) を吸水面とした (図-5)。図-6 に示すように、解析は特にひずみ量において実測値との乖離が見られる。実環境下では風の影響等により降雨のかかる範囲も変化するため、上面から 2 要素目までの吸水範囲では吸水による膨張を

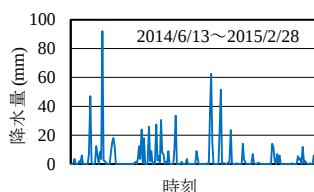


図-4 降水量データ

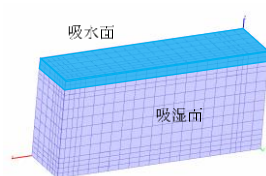


図-5 吸水範囲

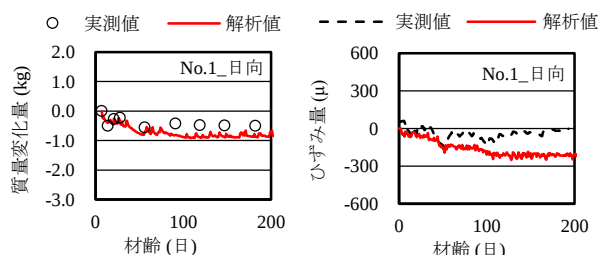


図-6 降雨による吸水を考慮した解析結果

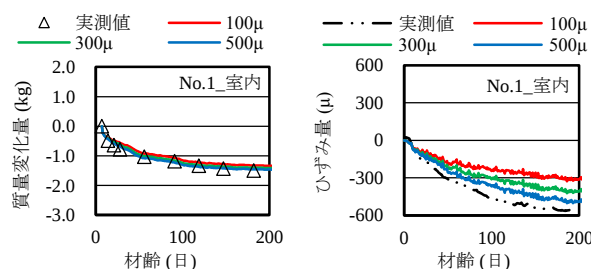


図-3 最大骨材収縮量の検討

過小評価している可能性が考えられる。吸水範囲の詳細な検討については今後の課題としたい。

(3) 膨張材の影響を考慮した解析手法の検討

本研究においては、膨張材の効果を簡便に取り扱う方法として、膨張材によるコンクリートの自由膨張ひずみを時間と共に変化する値として解析上で与える方法を採用した。図-7 にシリーズ No.3 日陰保管供試体への適用例を示す。実測値に合うように、コンクリートの自由膨張ひずみを材齢 0.2 日から 1.7 日にかけて 10μ ずつ増加するように入力し、最終的に 500μ となるようにした。膨張材を考慮しない場合 (0μ) には当然ながら実測値の収縮量を過大評価している。一方で、膨張材による材齢初期の膨張が実測値と合うように、コンクリートの自由膨張ひずみを与えた場合 (500μ) には膨張後の収縮挙動について追跡可能であることを確認した。

ただし、膨張ひずみは周囲の拘束により変動すると言われており、鉄筋の拘束を受ける場合には膨張挙動はより複雑になることが考えられる。単に自由膨張ひずみを時間と共に変化する値として与えるだけでは、正確に膨張材の効果をモデル化しているとは言いがたい。今回は簡易的に、床版橋軸方向のひずみ量に合うようにコンクリートの自由膨張ひずみを与えることとして、小型供試体 (図-7) と同様に、膨張後の収縮挙動まで追跡できるかどうかの検討に留めるものとした。より詳細な検討については今後の課題としたい。

3.4 解析結果

図-8 から図-10 に小型供試体の実測値と解析値を示す。図-9 に示す圧縮強度の解析値は、モデル上で次式により計算される。

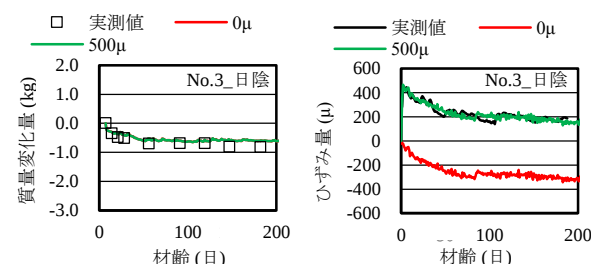


図-7 膨張材モデルの検討

$$f'_c = \Psi \cdot f'_\infty \left[1 - \exp \left\{ -\alpha \left(k \cdot \frac{D_{\text{hyd.out}}}{\theta} \right)^\beta \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 Ψ ：強度比、 f'_∞ ：鉱物組成の割合による最終到達強度、 k ：水和生成物分布の偏りを表す係数、 $D_{\text{hyd.out}}$ ：初期空隙量と外部水和物量との体積比であり配合や水和率により時々刻々と算出される値、 θ ：粒子間隔を表す係数、 α 、 β ：定数（ $\alpha=1.055$ 、 $\beta=2.9$ ）である。

まず、図-8 に示す質量変化量に関しては、環境条件や養生条件の異なる各供試体の挙動について解析値は実測値を精度良く追跡できているのが分かる。

続いて、図-10 に示すひずみ量に関して考察を行う。膨張材を使用しない No.1、No.2 および No.5（図-10(a)(b)(e)）の解析では、封かん養生を 91 日間行った No.5 では降雨による影響が小さいものの、降雨の吸水による膨張（日向保管供試体）を過小評価している。また、室内保管供試体の実測値は No.1、No.2 において概ね追跡できているものの、日陰保管供試体ではわずかに差が見

られる。室内保管と異なり、日陰保管では風の影響等が挙げられ、結果として解析値と実測値に差が生じたものと考えられる。

また、膨張材を使用した No.3、No.4（図-10(c)(d)）では、膨張材の効果による材齢初期の膨張が実測値と合うように、 500μ の自由膨張量を解析上で与えた。結果として、No.3 では実測値に合わせた自由膨張量を与えることで、実測値を概ね追跡できていることを確認した。一方で、No.4 では特に封かん 91 日間の収縮量を過大評価しているのが分かる。No.4 は FA を使用している点で他のシリーズと異なり、また、図-9 に示す圧縮強度の解析結果においても No.4 だけが実測値を過大評価していることから、解析上で FA の水和反応を過剰に評価している可能性が考えられる。その結果として封かん養生中の自己収縮量が大きくなり、No.4 の収縮挙動が過大評価されたと考えられる。なお、詳細な検討についての記載は本稿の主旨とは異なるため、今回は指摘に留め、次回の検討項目としたい。

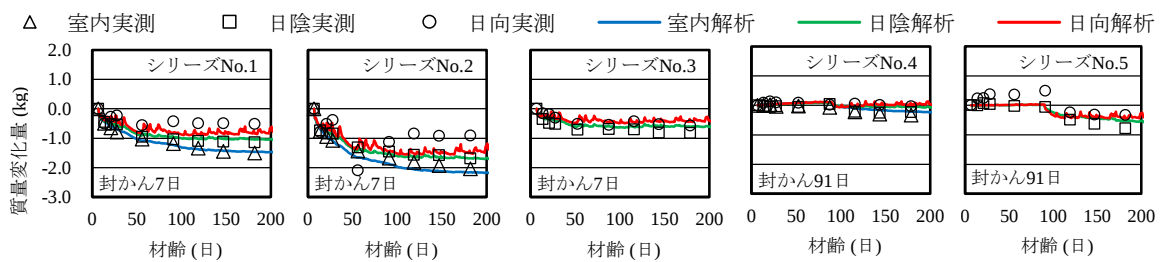


図-8 質量変化量の測定結果と解析結果

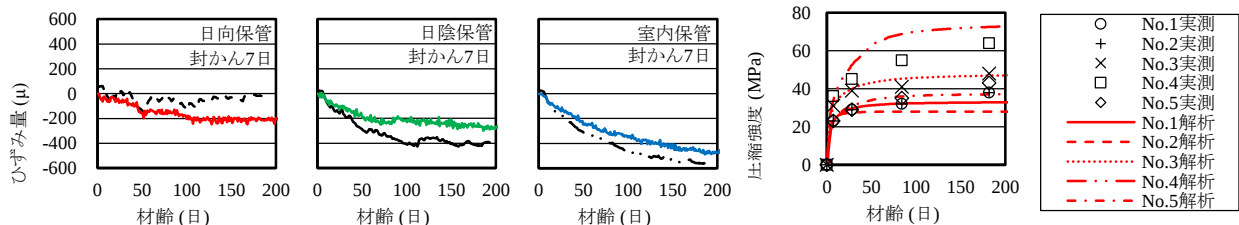


図-9 圧縮強度の測定結果と解析結果

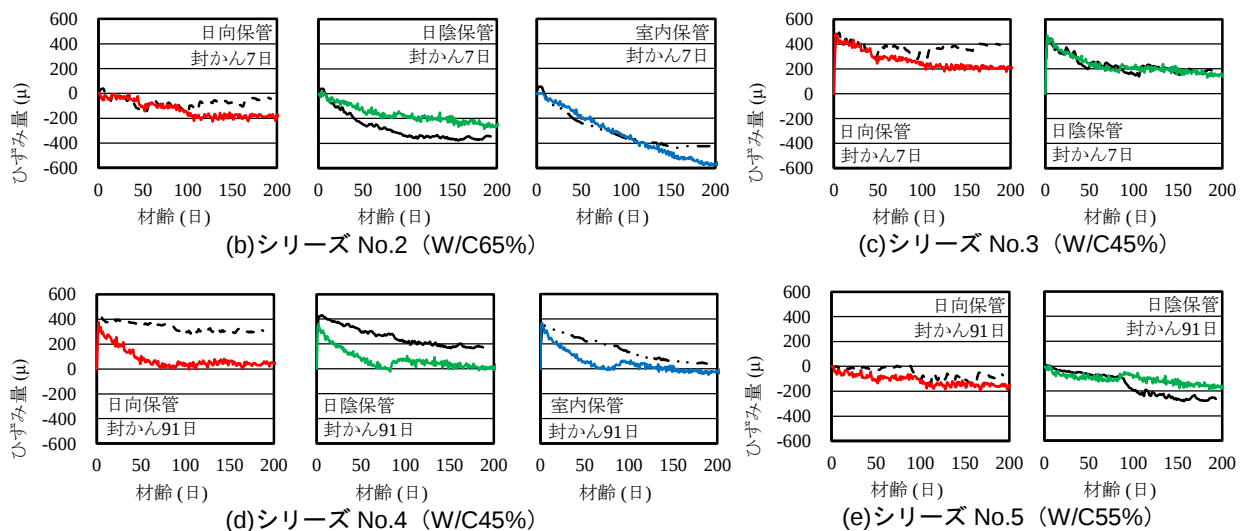


図-10 ひずみ量の測定結果と解析結果（黒線：実測値，色線：解析値）

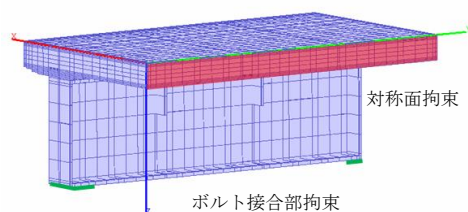


図-11 解析要素

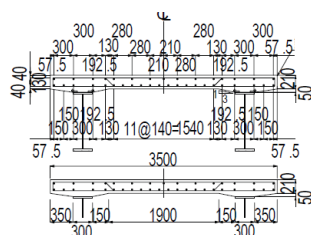


図-12 床版配筋図（左：床版断面図，右：床版要素詳細図）

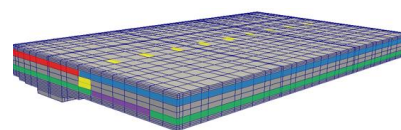


表-4 入力鉄筋比（図-12 右図の色に対

要素色	橋軸直角	橋軸方向	上下方向
赤	4.775%	2.128%	—
青	2.388%	2.128%	—
緑	4.775%	3.121%	—
紫	7.163%	3.121%	—
黄	6.006%	—	1.741%

表-5 コンクリートと鋼主桁の初期条件

シリーズ No.	コンクリート温度	鋼主桁温度
No.1	33.7℃	23.0℃
No.2	26.9℃	23.0℃
No.3	34.0℃	30.1℃
No.4	27.5℃	30.1℃
No.5	29.6℃	23.0℃

3.5 本章のまとめ

本章では、降雨や膨張材の影響を簡便にモデルに取り込むことで、小型供試体の各種挙動について解析モデルは概ね追跡可能であることが確認された。次章では、実物大 RC 床版へとモデルの適用範囲を拡大することで、より実構造物に近いスケールでの検討を行っていく。

4. 実物大 RC 床版供試体への解析モデルの適用

4.1 解析要素

(1) 要素分割・拘束条件

図-11 に示すように、鋼主桁による拘束を含めた RC 床版供試体の 1/2 モデルを使用した。鋼主桁と RC 床版は接点を共有した剛結合としている。床版上面および下面は表面積が大きく、熱や水の伝達を精度良く追えるように、上面および下面から 30mm までは 10mm 間隔の要素分割としている。また、ハンチ部分も 10mm 間隔の要素分割である。

拘束条件については、対称面の拘束に加え、鋼主桁のボルト接合部（写真-2）を全方向に拘束している。

(2) RC 床版内鉄筋比

図-12 に床版配筋図を示す。主鉄筋に D19 鉄筋、配力筋に D16 鉄筋を使用している。配筋図に従い、解析要素では層状に RC 要素を挿入し（図-12 右）、その他の部分は無筋要素としている。入力した鉄筋比に関して表-4 にまとめる。

4.2 解析条件

(1) 環境条件

RC 床版の上面には小型供試体の日向保管、その他の面には日陰保管の環境条件（図-2）を入力している。温度変化による鋼主桁の膨張収縮挙動を考慮するため、鋼主桁にも日陰保管の外気温を与えている。降雨の影響

については小型供試体と同様に設定している。また、すべてのシリーズで材齢 7 日目に型枠を外すため、解析上では 7 日以降自重がかかるように設定している。

(2) 初期条件

初期条件について表-5 にまとめる。

4.3 解析結果

実物大 RC 床版供試体では橋軸方向中央断面の床版中央およびハンチ上の収縮膨張ひずみおよび内部温度を埋め込みゲージにより測定している（図-13）。

図-14 にシリーズ No.1 床版中央の埋め込みゲージによる温度測定結果と解析結果を示す。使用材料や環境条件を入力することにより、若材齢時の水和発熱による温度上昇（図-14 左）および長期間の温度履歴（図-14 右）ともに、解析モデルは実測値を良好に追跡できているのが分かる。

続いて、図-15 に床版中央断面における橋軸方向のひずみ量を示す。膨張材を使用した No.3, No.4（図-15(c)(d)）では、膨張材による材齢初期の膨張が実測値と合うように、No.3 で 200 μ 、No.4 で 300 μ の自由膨張量を解析上で与えた。結果をみると、小型供試体におけるひずみ量の解析結果と同様に、No.1, No.2, No.5（図-15(a)(b)(e)）では解析は実測値を概ね追跡できており、また、No.3（図-15(c)）においても実測値に合わせた自由膨張量を与えることで実測値を追跡できている。一方で、No.4（図-15(d)）では小型供試体と同様に実測値との乖離が見られる。すべてのシリーズにおいて小型供試体と同様の傾向



写真-2 接合部

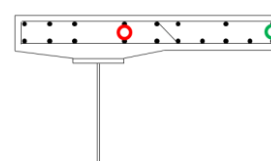


図-13 測定位置

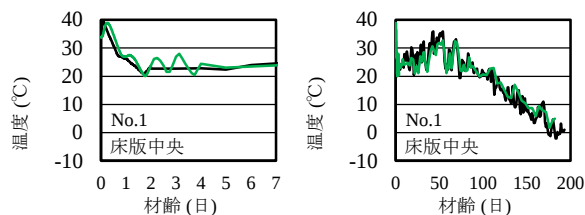
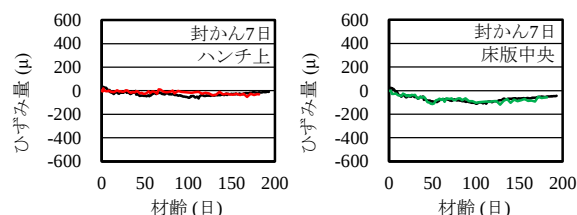
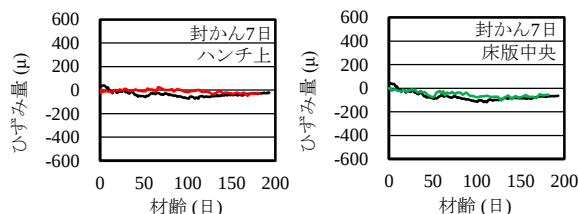


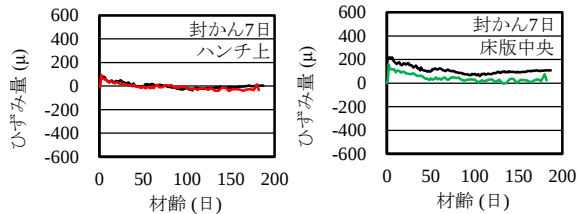
図-14 床版内部温度履歴（黒：実測値，緑：解析値）



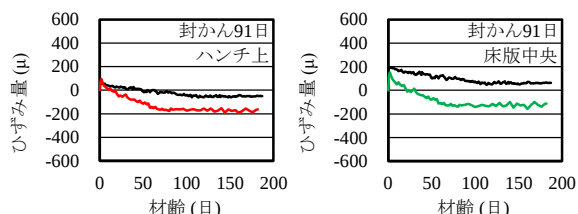
(a)シリーズ No.1 (W/C55%)



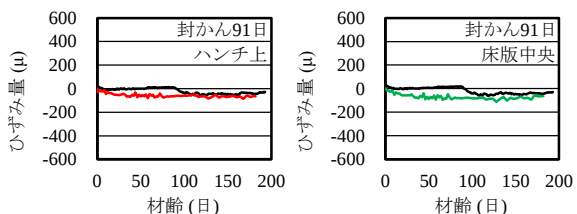
(b)シリーズ No.2 (W/C65%)



(c)シリーズ No.3 (W/C45%)



(d)シリーズ No.4 (W/C45%)



(e)シリーズ No.5 (W/C55%)

図-15 橋軸方向ひずみ量の測定結果と解析結果（黒線：実測値，色線：解析値）

を示しており、小型供試体の各種挙動を追跡できれば、実構造物に近い RC 床版供試体の挙動についても、解析モデルは追跡可能であることが確認できた。ただし、鉄筋拘束による膨張材効果（ケミカルプレストレス等）への影響に関して、より詳細に検討を行う必要がある。

4.4 本章のまとめ

本章では、3 章と同様の解析手法を用いることで、より実構造物に近い RC 床版供試体の収縮膨張挙動についても概ね良好に追跡できることが確認された。

5. まとめと今後の展望

本研究では、使用材料や養生条件の異なる様々な小型供試体及び実物大 RC 床版供試体に対して、マルチスケール統合解析システムを適用し、モデルの検証を試みた。実構造物に近いスケールの RC 床版供試体についても本解析モデルは概ね各種挙動を追跡できており、今後実構造物の解析を行うための足掛かりとなる成果を挙げることができたと考える。

今後は、膨張材や降雨の影響についてより詳細な検討を行い、実構造物の長期耐久性能や疲労寿命を、数値解析により評価する手法の構築を目指したい。

謝辞

本研究は、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(研究代

表者：前川宏一) および科学研究費基礎研究 (A) (15H 02259) (研究代表者：岩城一郎) により実施しました。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T.: Modeling of Concrete Performance, E & FN Spon, 1999.
- 2) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5.
- 3) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, 2009.
- 4) 岩城一郎: 東北発 PC 道路橋の長寿命化を目指して, プレストレストコンクリート, Vol.57, No.2, pp.37-44, 2015
- 5) 米田大樹, 石田哲也, 前川宏一, Esayas, GEBREYOUHANNES, 三島徹也: コンクリートの微視的損傷および細孔内水分状態に着目した準微細ひび割れモデル, 土木学会論文集, Vol.71, No.3, pp.263-282, 2015.
- 6) 鈴木雄大, 小林薫: 実環境下における小断面コンクリート部材の収縮ひずみ解析手法の実務的運用に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.556-561, 2014.
- 7) 小田部裕一: 複合水和発熱モデルの一般化と水和組織形成に着目した強度発現モデルの開発, 東京大学学位論文, 2005.