

論文 実環境作用に着目したコンクリートの収縮特性に関する研究

浅本 晋吾^{*1}・玉置 一清^{*2}・大塚 歩^{*3}・睦好 宏史^{*4}

要旨：本研究は、外気温・湿度変動、雨天、日射といった実環境作用がコンクリートの収縮挙動に与える影響に着目して検討を行った。温湿度変化が概ね等しい屋内外の各環境条件に供試体を暴露し収縮の経時変化を計測した結果、降雨による水分浸透の影響は大きく、屋内に比べ屋外の収縮量は小さいことが分かった。さらに、マルチスケール複合構成モデルの適用性を検討した結果、降雨の影響を除いた実環境作用下における収縮挙動は平均湿度境界条件で概ね追跡が可能であるが、雨天による局所的な収縮回復を再現するには降雨浸透境界モデルが必要であることがわかった。また、骨材自体の収縮特性の違いにより収縮挙動が異なることが示唆された。

キーワード：収縮、実環境作用、降雨、骨材

1. はじめに

長期に渡って継続的に発生するコンクリートの収縮は、内外拘束、鉄筋による拘束によってコンクリート表面にひび割れをもたらす。近年、コンクリートの想定外の大きな収縮によって多数のひび割れがもたらされた実例が報告されており¹⁾、新設構造物の長期耐久性、及び既設構造物の劣化を予測する上で、収縮の定量的な予測は極めて重要である。

収縮特性は、配合、材料、部材の寸法によって変化し、周辺温湿度変化にも敏感である。従って、気温、湿度が季節によって複雑に変動する実環境下における収縮の経時的な予測は困難となっている。日射、降雨などの環境因子も収縮挙動に影響すると考えられ、個々の影響量の把握が必要と言える。さらには、使用骨材によっても収縮量が変化することが報告されており^{1),2),3)}、良質な骨材が枯渇している近年、骨材種による収縮の変動を予測することは工学的に極めて重要であるといえる。

以上のことから、本研究では、変動する気温・湿度、日射、雨天といった実環境作用がコンクリートの収縮挙動に与える影響量の把握、抽出を試みた。また、粗骨材種の異なる同一配合のコンクリートの収縮を比較することで、骨材特性の違いがもたらす

収縮量の変化について検討を行った。これらの実験結果をマルチスケール複合構成モデル^{4),5),6),7)}と比較し、実環境作用下におけるモデルの適用性、及び追加モデルの必要性について考察した。

2. 実験概要

本実験に用いたコンクリートの配合を、表-1 に示す。供試体寸法は 10×10×40cm の角柱供試体である。打設は9月下旬に行い、打設1日後に脱型、屋内で材齢7日まで湿潤養生を行った。その後、屋内、降雨、日射の影響を受ける屋外の両環境に供試体を暴露し(写真-1)、経時的に収縮、質量変化を測定した。屋外の設置場所では、晴天時午前日照し、午後は日陰に入った。屋内環境では、環境の制御は行っていない。収縮は基長 100mm のコンタクトゲージを用いて計測し、打設面以外の側面 2 面の平均をとった。供試体は各環境下で二体作製し、結果は両者の平均とした。以下、屋内の供試体は供

表-1 コンクリートの示方配合 (kg/m³)

W/C	水	セメント	細骨材	粗骨材
0.424	160	377	767	978

セメント: 早強セメント(比重: 3.14g/cm³)

細骨材: 川砂(比重 2.51g/cm³, 吸水率: 2.85%)

粗骨材: 石灰岩碎石(比重 2.72g/cm³, 吸水率: 0.40%)

*1 埼玉大学大学院理工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所土木研究開発部 主任研究員 工修 (正会員)

*3 埼玉大学工学部建設工学科

*4 埼玉大学大学院理工学研究科教授 工博 (正会員)

試体 IN, 屋外の供試体は供試体 OUT と定義する。

図-1 に計測期間中の屋内外の温度湿度変化を示す(測定精度, 温度: $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 湿度: $\pm 5\%$)。降雨量については気象庁のデータ⁸⁾を利用した(埼玉県さいたま市の観測データ)。温度, 湿度ともに屋外の方が変動が大きい。これは日射, 降雨の影響であり, 屋根のある日陰に温湿度計測器を設置したものの, 晴天時若干日が計器に当たる時間帯があったため計測温度は大きく上昇することがあり, 直接雨に触れてはいるが, 雨天時の計測湿度は 100%に近い計測結果になった。平均で考えると温度は屋内の方が若干高く, 湿度は屋内の方が低くなっている。日射, 降雨の実環境作用を除いた乾燥条件が等しいとは明言できないが, 本検討では温湿度変動がさほど異なる条件での比較に留めることとした。

また, 石灰岩を骨材としたコンクリートは他の骨材を用いたコンクリートに比べ線膨張係数が小さいことが知られており⁹⁾, 気温変動に伴う温度ひずみを求めるため線膨張係数についても計測を行った。上記と同様の養生を行った後, 別室(温度 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$, 湿度 $60 \pm 15\%$)で材齢 106 日まで気乾した供試体をアルミテープで封緘し, 5°C を起点に温度ひずみを計測した。十分に硬化, 乾燥した状態での線膨張係数を求めることを試みたのである。なお, アルミテープの粘着によって体積変化が拘束されることを防ぐため, 供試体をシリコン樹脂のパーチメント紙で包んだ後アルミテープで封緘した。

3. 実験結果

3.1 線膨張係数

まず, 線膨張係数の計測結果について示す。図-2 に示されるように, コンクリートの線膨張係数は $7.4\mu/\text{C}$ となった。既往の研究⁹⁾と同様, 石灰岩を骨材に用いたコンクリートの線膨張係数は一般に認識されているコンクリートの線膨張係数 ($10\text{--}12\mu/\text{C}$) に比べ小さい値となった。鉄筋の線膨張係数が $12\mu/\text{C}$ 程度であることから, 本コンクリートは鉄筋に比べ小さな線膨張係数をもつ。鉄筋コンクリートで考えた場合, 周辺平均温度が下降する季節遷移では, コンクリートに比べ鉄筋は温度低下による温度



写真-1 暴露状況

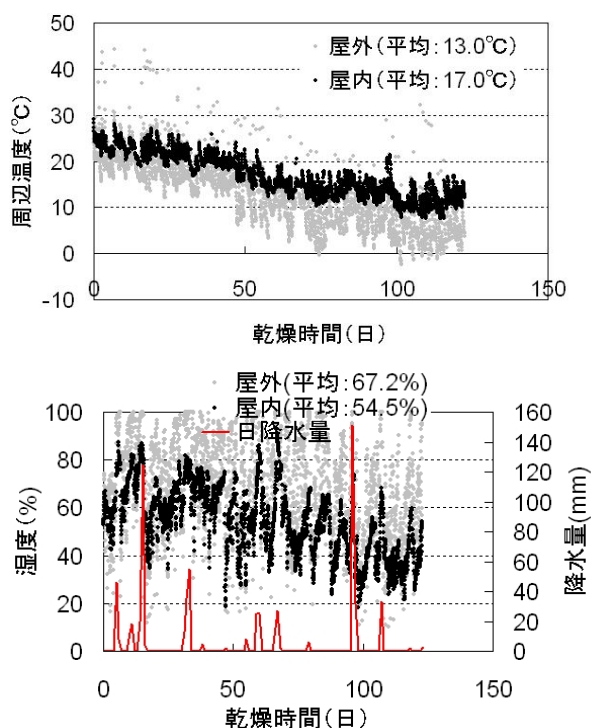


図-1 屋内外の温度湿度変動

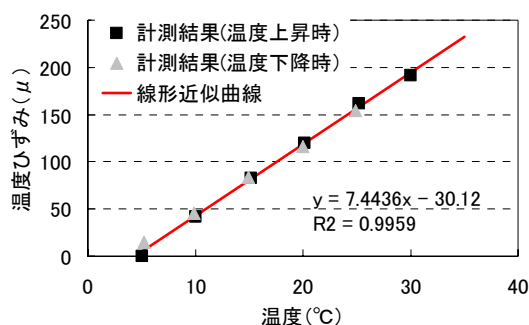


図-2 温度とひずみ変化

収縮ひずみが大きく, 付着によりコンクリートに圧縮の応力をもたらすため, 収縮ひび割れ発生は低減すると考えられる。一方で, 平均温度が徐々に上昇する季節では, コンクリートの温度膨張ひずみが鉄筋に比べ小さいことで, 引張応力が発生しひび割れを促進させると考えられる。従って, 線膨張係数が鉄筋に比べ大きく異なる場合, 気温変動が表面ひび割れに及ぼす影響は大きくなると推察される。

3.2 質量変化, 収縮

(1) 屋内外の質量変化, 収縮挙動の比較

図-3 に質量減少の経時変化を示す。質量減少率は、供試体の質量減少量を乾燥前供試体質量で除した値である。供試体 IN は乾燥時間とともに質量は継続的に減少しているのに対し、屋外に曝した供試体 OUT は雨天の影響で変動が大きく、乾燥前に比べ質量が増加することもある。コンクリートへの雨水の浸透は、降雨量より降雨時間に依存することが知られている¹⁰⁾。本実験でも断続的に雨が降った乾燥 30 日から 80 日にかけて質量減少は緩慢となり、供試体内部に雨水がしみ込んだと言える。

図-4 に収縮の経時変化を示す。線膨張係数は 3.1 節で求めた $7.4\mu\text{C}$ とした。本実験では供試体内部温度を測定しておらず、単純に計測周辺温度を供試体温度として温度ひずみを求めた。後述する同一寸法の供試体を屋根付きの屋外に曝した場合、図-5 に示すように周辺温度と供試体内部の温度の相違は小さい。本実験では、日射を受けるものの、供試体が日陰に入ってから十分時間が経った後計測を行ったため、周辺温度と供試体内部温度でさほど相違はないと判断した。

屋内に暴露した供試体に比べ、降雨、日射、風のある屋外に曝した供試体の方が収縮ひずみは小さくなった。これは雨水がコンクリートの内部空隙に浸透することで、メニスカスが形成される空隙半径が大きくなり、収縮の主要因とされる毛細管張力が小さくなったためと考えられる。質量減少と同様に、雨が断続的に降った期間は収縮の進行が緩慢となっている。雨水は一度浸透すると外部へ逸散するまで時間がかかり、質量増加、収縮低下をもたらすことから、実環境作用の中でも降雨の影響が大きいことが本実験より示唆された。一方で、屋内の平均温度は高く湿度も小さく、屋外に比べ乾燥条件が厳しいことから、雨水ではなく、周辺温湿度の影響で収縮が大きくなった可能性も棄却できない。そこで、雨水の影響が顕著に観察された他の実験結果を用いて上記考察について検討する。

図-6 に示す条件で、屋根付きの屋外で収縮ひずみの経時変化を計測した。収縮の計測は埋め込み

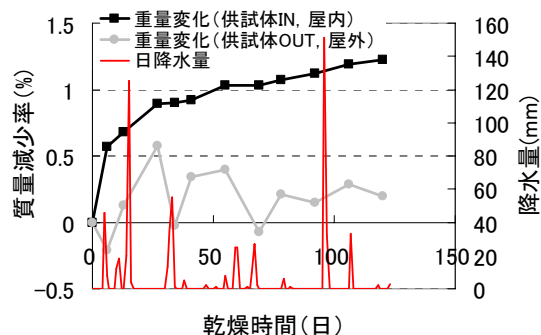


図-3 質量減少の経時変化

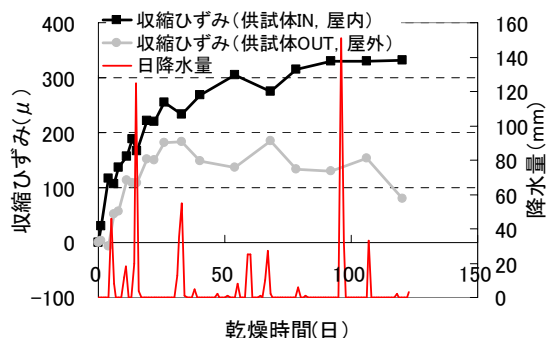


図-4 収縮ひずみの経時変化

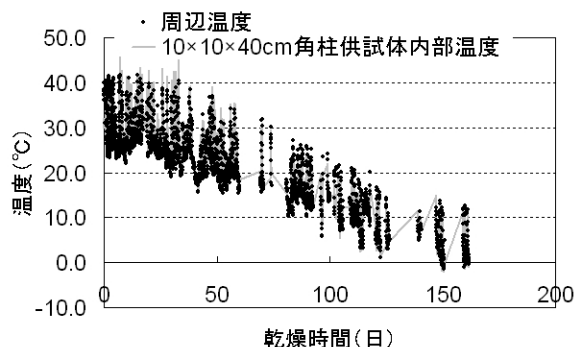


図-5 周辺温度と供試体内部温度

ゲージで行った。骨材は石灰岩ではないため、線膨張係数は一般的な $10\mu\text{C}$ とした。図-7 に乾燥開始材齢を基点にした収縮ひずみの経時変化を示す。供試体 SV に混入しているビニロン短繊維は 0.4%/vol と微量であることと、収縮ひずみに対する繊維混入の影響は小さいという既往の研究¹¹⁾を勘案すると、供試体 S と SV で収縮ひずみの相違は小さいと予想される。乾燥初期は予想通り収縮量に違いはないが、乾燥 30 日付近から供試体 S の収縮ひずみは SV に比べ急激に小さくなっている。これは、供試体 S の設置場所が雨だれ付近であったため降雨により供試体が濡れてしまい、雨水の内部浸透によって膨張したためである。長雨のあった 9/6~15 に大きく収縮が回復しており、9/21 に設置場所を変更したが、初期の雨水浸透の影響で供試

コンクリートの示方配合 (kg/m³)

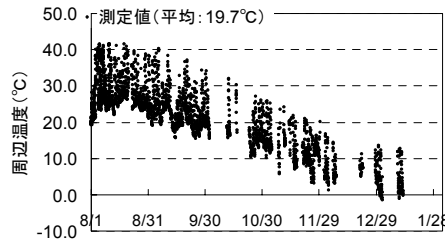
	W/C	水	セメント	細骨材①	細骨材②	粗骨材	短繊維
供試体 S	0.424	160	377	242	563	974	-
供試体 SV	0.424	160	377	242	563	974	5.2

セメント: 早強セメント (比重: 3.14g/cm³), 細骨材①: 硬質砂岩砕砂 (比重 2.67g/cm³, 吸水率: 1.31%), 細骨材②: 川砂 (比重 2.62g/cm³, 吸水率: 2.24%), 粗骨材: 硬質砂岩砕石 (比重 2.64g/cm³, 吸水率: 0.88%), 短繊維: ビニロン短繊維 (比重: 1.3g/cm³, 直径: 0.66mm, 標準長さ: 30mm)

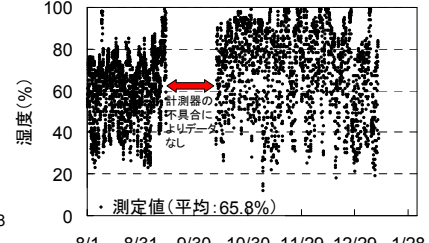
乾燥条件: 10×10×40cm 角柱供試体を打設一日後脱型, 材齢 3 日まで散水養生。その後屋外に暴露。



供試体暴露状況



周辺温度変化



湿度変化

図-6 屋根付き屋外暴露実験概要

体 S の収縮は小さくなっている。従って、降雨の影響は大きいという上記の考察が裏付けられたと思われる。ただし、これは体積表面積比の小さい供試体から得られた結論であり、今後大型供試体で検証することが必要であると認識している。

2) コンクリート収縮における骨材種の影響

次に、骨材特性の違いがコンクリートの収縮に与える影響について議論する。降雨の影響がなく、同一配合で異なる粗骨材を持つ供試体 SV と IN の収縮ひずみに着目した。供試体 SV は繊維を混入しているものの、前述のように収縮への影響は小さいと考え比較に用いた。乾燥開始材齢は異なるが、水セメント比は 40%程度で自己収縮の影響は材齢 3 日以降では小さいと考えられること¹²⁾から、乾燥開始材齢の影響は小さいと考えられる。また、細骨材の吸水率が大きく異なるが、細骨材と粗骨材の平均吸水率で考えると、両者の違いは小さく(供試体 IN, SV: 1.48%, 1.37%), 骨材内水分の影響も小さいと推察される。従って、供試体 IN と SV の収縮差は乾燥条件によって決まり、屋内で乾燥させた場合平均湿度が著しく低いことから、供試体 IN の収縮は SV より大きくなると考えられる。

図-8 に比較の結果を示す。乾燥条件が厳しいにもかかわらず、供試体 IN の収縮ひずみは SV より小さい。石灰岩を骨材に用いた場合、他の骨材を使った場合に比べ、自己収縮、乾燥収縮

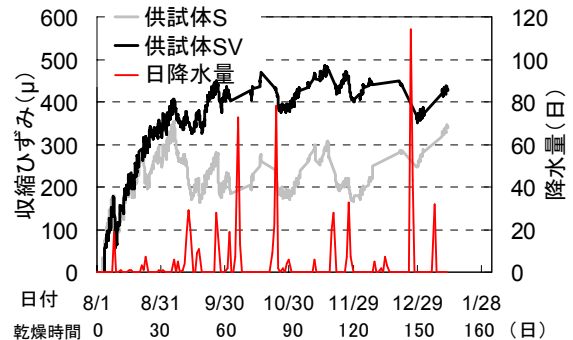


図-7 乾燥後の収縮ひずみの経時変化

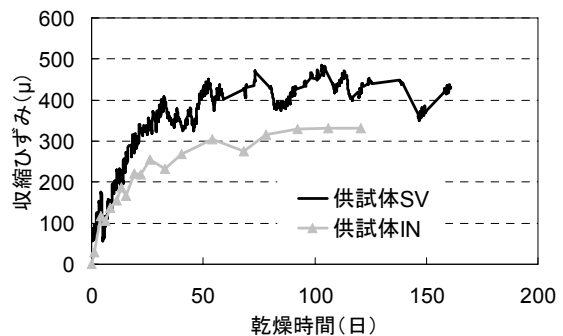


図-8 使用骨材種の異なる供試体の収縮ひずみの比較

が小さくなることが知られている^{13), 3)}。本実験においても同様の傾向が得られたと考えられる。

4. マルチスケール複合モデルによる検証

前川、石田らは、コンクリート材料の熱力学連成解析システム DuCOM の開発を進めており、任意の環境下で水和反応、空隙構造形成、水分保持・移動などの空間情報を時系列で得ることが可能になっている^{4), 5)}。近年では、DuCOM から得られる微視的な熱力学的状態量を 3 次元 FEM 構造解析シス

テムと連成させ、巨視的な体積変化、持続変形を予測するマルチスケール型時間依存構成モデルが開発された^{5),6),7)}。これによれば、常温恒湿環境において一定精度で収縮・クリープの予測が可能であることが検証されている。本章では、マルチスケール複合モデルの実構造物への適用を見据え、実環境に暴露した前章の収縮実験結果との比較を行った。なお、解析モデルの詳細については、既往の研究論文^{4),5),6),7)}を参考にされたい。

4.1 解析条件

本解析モデルは、供試体寸法、配合、および各材齢における境界条件(温度、湿度)を入力することで、任意の材齢でコンクリートの体積変化を追跡することが可能である。部材寸法、配合は実験条件に即したものを入力し、実環境条件は以下のように入力した。水和反応が活発である材齢7日までは1日の気温変化を考慮し、材齢7日以降は計算負荷を低減するため実測の温度変化を最小二乗法で線形近似した(図-9)。なお、供試体 IN, OUT の養生中7日間の周辺温度は、気象庁のデータ⁸⁾を用いて一時間毎の気温変化を線形近似した。湿度に関しては、湿潤養生中は99.5%とし、乾燥後は湿度変動が大きいと単純に平均した値を入力した(供試体 IN, OUT, SV:54.5%, 67.2%, 65.8%)。

4.2 解析結果及び考察

まず、供試体IN, OUTの実験結果について議論する。図-10に解析と実験結果の比較を示す。降雨の影響のない供試体INの質量減少、収縮ひずみの経時変化については、概ね良好に追跡できている。従って、変動する温度・湿度環境下でも、温度変化の線形近似、乾燥期間中の平均湿度を入力することで、水分、収縮挙動の予測が可能であるといえる。一方で、屋外の降雨の浸透に伴う質量増加、収縮低下は、線形近似した温度、平均湿度境界条件では再現できない。降雨のある実環境の収縮を予測するには、液体としての水が表面浸透する境界モデルが必要であると考えられる。

次に、供試体 SV の収縮ひずみで解析と比較する。図-11に結果を示す。概ね解析は実験結果を再現できているものの、全体的に実験値を下回る。

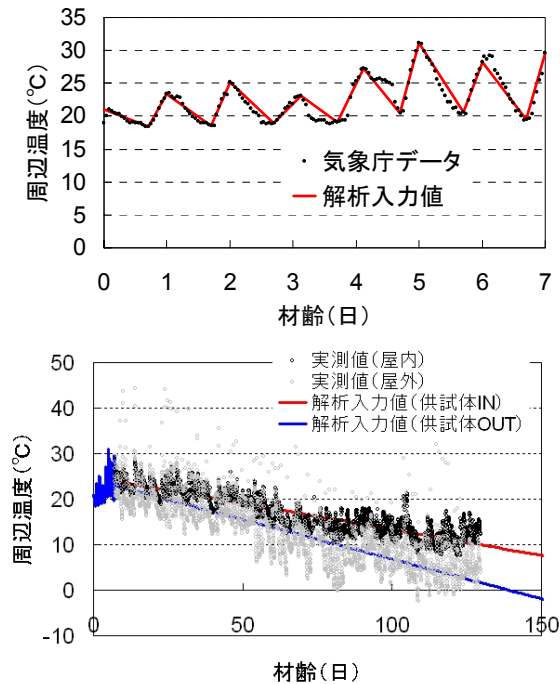


図-9 温度湿度解析条件(供試体 IN, OUT)

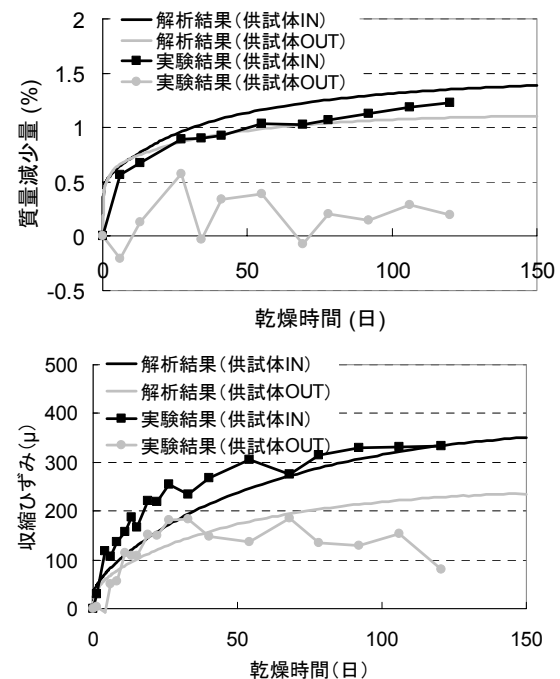


図-10 供試体 IN と OUT の質量減少量と収縮ひずみの解析結果

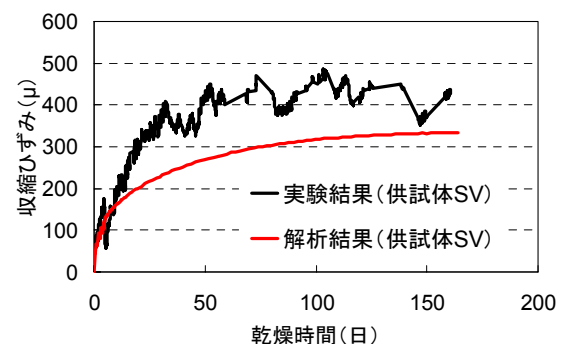


図-11 供試体 SV の収縮ひずみの解析

骨材剛性は骨材密度に基づいたモデル⁶⁾で、骨材内水分は吸水率に基づき骨材－セメント硬化体間の水分移動⁴⁾を考慮しているものの、実験で示された骨材種による収縮量の明確な違いは再現できていない。近年、コンクリートの収縮にもたらす骨材特性の影響が再度注目され³⁾、既往の先駆的研究²⁾と同様、骨材の剛性、密度、空隙といった特性より骨材自体の収縮がコンクリートの収縮増大に大きな影響をもたらすという結論に至っている。解析モデルは骨材収縮について考慮しておらず、これをモデル化することで、骨材により異なるコンクリートの収縮を追跡できるのではないかと考えられる。

5. 結論

本研究で得られた成果を以下に列挙する。

- ・ 本実験条件では、降雨による水分浸透の影響は大きく、降雨を受けない場合に比べ収縮量は小さくなった。
- ・ マルチスケール複合構成モデルは、降雨の影響のない実環境作用下の収縮挙動については精度よく追跡可能である。降雨に曝される環境では、平均湿度ではなく雨水浸透に伴う水分浸透境界モデルが必要であることがわかった。
- ・ コンクリートの収縮量は使用骨材によって異なり、骨材自体の収縮がコンクリートの収縮増大をもたらすことが示唆された。

本研究では、小型供試体で収縮挙動に実環境作用が与える影響についての基礎的検討を行った。今後はこれらの基礎実験をもとに、別途行っている実環境作用下における大型梁試験体の収縮、収縮ひび割れの把握に努める予定である。

謝辞

4 章の検討に用いたマルチスケール複合モデルは東京大学前川宏一教授、石田哲也准教授のご厚意により使用させて頂きました。ここに、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会垂井高架橋損傷対

策特別委員会:垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書,土木学会, 2005

- 2) 後藤幸正, 藤原忠司:コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文報告集, 第286号, pp.125-137, 1979
- 3) 今本啓一ほか:各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.606, p9-14, 2006
- 4) Maekawa, K. et. al.: Modeling of Concrete Performance, London, E & FN Spon, 1999.
- 5) Maekawa, K. et al.: Multi-scale modeling of concrete performance -Integrated material and structural mechanics” Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.2, pp.91-126, 2003
- 6) 朱銀邦ほか: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
- 7) Asamoto, S. et al.: Time-Dependent Constitutive Model of Solidifying Concrete Based on Thermodynamic State of Moisture in Fine Pores, Journal of advanced concrete technology, Vol.4, No.2, pp.301-323, 2006
- 8) 気象庁気象観測(電子閲覧室): <http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>
- 9) 小島明ほか:供用後14年を経過した石灰石を用いたRCCPの調査結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1133-1138, 2003
- 10) C. Andrade, J. et al.: Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, Cement and Concrete Research, Vol.29, pp.1249-1259, 1999
- 11) 綾野克紀ほか:形状寸法の異なるビニロン繊維の混合効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.213-218, 2002
- 12) Neville, A. M.: Properties of Concrete Fourth Edition, New York: John Wiley & Sons, 1995
- 13) 小島明ほか:石灰石砕石を用いたコンクリートの強度特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.93-98, 2004