

論文 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

鈴木 雄大^{*1}・小林 薫^{*2}

要旨: 実環境下で 100×100×400mm のコンクリート供試体の収縮ひずみの進展と、環境特性の測定を行った。収縮ひずみは降雨の影響を受けて進展が鈍化する様子が確認され、実環境下での収縮ひずみを予測するためには、降雨等の環境特性を考慮する必要性を確認した。既往の解析手法を用いて、降雨によるコンクリートの吸水を簡便に表現する手法について検討し、解析ステップ等の解析条件の設定方法について検討を行った。
キーワード: 収縮ひずみ, 降雨, 吸水, 水分伝達係数

1. はじめに

コンクリート構造物には、コンクリートの硬化過程においてひび割れが生じることがある。例えばビームスラブ形式のRCラーメン高架橋スラブにおいて写真-1に見られるようなコンクリートの収縮が原因と考えられるひび割れが発生している場合がある。コンクリートに生じたひび割れは構造物の外観を損なうほか、部材が薄いスラブでは貫通ひび割れとなり漏水の原因ともなり、ひび割れからの漏水によって鉄筋の腐食が促進することも考えられ、構造物の耐久性への影響が懸念される。耐久性のほかにも、高架橋下を店舗等で利用する場合の漏水対策としてひび割れ補修が求められることがある。

このようなコンクリートの乾燥収縮に伴う有害なひび割れの発生を抑制する必要があると考える。

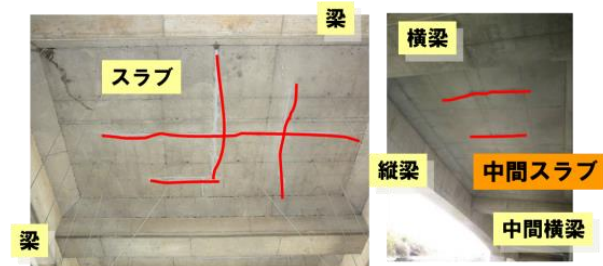


写真-1 高架橋スラブのひび割れ

コンクリート部材のひび割れ発生原因となるコンクリートの収縮は、構造物の周囲環境の影響を受けることが指摘されている¹⁾。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相対湿度が挙げられるが、これに加えて浅本らは、コンクリートの収縮ひずみに及ぼす降雨の影響を指摘²⁾している。浅本らは、コンクリート供試体に降雨が作用する場合にはコンクリートの収縮が顕著に抑制されることから、適切な劣化予測を行うためには環境作用に留意する必要があることを指摘している。

2012年制定コンクリート標準示方書¹⁾においては、環境特性とコンクリートの収縮ひずみの関係について、構造物の部材断面内のコンクリートの収縮ひずみの算定に温度や湿度の変化、降雨等の影響を考慮したコンクリート中の水分移動解析に基づくことが望ましいと明記している。

気温変化や湿度の変化に加え、降雨によるコンクリートの吸水によってコンクリートの収縮ひずみが増加することが指摘されている。

コンクリート構造物が置かれる環境を考慮してコンクリートの有害なひび割れを抑制するためには、今後さらにコンクリートの収縮ひずみ解析の重要性が増すと考えられる。このため実務レベルで容易に解析結果を得られることが求められると考える。

そこで本論文では解析により収縮ひずみを求める手法の実務上の課題を整理するとともに、実環境下の収縮ひずみを評価するために、簡便ながらも精度の高い評価方法について検討を行った。

2. 実環境に暴露したコンクリート収縮ひずみ

2.1 収縮ひずみの測定概要

(1) 供試体概要

コンクリートの収縮ひずみを測定するために、100×100×400mmの角柱供試体を作成し、実環境に暴露した。供試体数は2体とした。供試体のコンクリート配合は、実際のRCラーメン高架橋のスラブ等に使用されたものと同じものとした。供試体のコンクリートは設計基準強度の27N/mm²の普通コンクリートで、単位水量は170kg/m³、水セメント比は50%とした。粗骨材は宮城県産の砕石で表乾密度2.68g/cm³、絶乾密度2.65g/cm³あり、細骨材は福島県産の砕砂で表乾密度2.66g/cm³、絶乾密度2.61g/cm³であった。高性能AE減水剤を3.4%使用し、合

*1 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所品川工事区 修士(工学) (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 研究開発センター 博士(工学) (正会員)

成短繊維を 455g/m³ 添加している。コンクリートの詳細な配合を表-1 に示す。

表-1 コンクリート配合

呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法	セメントの種類	空気量	W/C
27	12	20	N	4.5%	50%
セメント	水	細骨材	粗骨材	合成短繊維	高性能AE減水剤
340kg	170kg	812kg	994kg	0.46kg/m ³	3.4%

(2) 測定内容

2 体製作した供試体の収縮ひずみの測定は、供試体コンクリート打設直後から開始した。熱電対付小型埋込ゲージを供試体中心に設置し、供試体長手方向の収縮ひずみと供試体温度を測定した。収縮ひずみの進展を詳細に把握するために測定器をデータロガーに接続し、10分に1回測定する自動計測とした。材齢 260 日以降は測定間隔を 30 分に 1 回に変更した。

供試体が暴露される環境について、写真-2 に示す測定器を設置し、気温・相対湿度および降水量を測定した。降水量の測定には、0.5mm 用の転倒ますを内蔵した転倒ます型雨量計を用いた。環境の測定値は、収縮ひずみの測定と同一のデータロガーを使用して自動計測した。



写真-2 環境測定器設置状況

(気温・相対湿度計 (左), 雨量計 (右))

(3) 供試体設置環境

供試体は暴露する環境下でコンクリートを打設し、供試体上面はコテ均した後、上面に養生シートをかけて散水養生した。コンクリートの打設日は、2009年4月23日の午後であった。材齢5日目に脱型し、1mm厚のテフロンシートを2枚重ねにした上に供試体を設置した。供試体は日射や降雨に暴露される屋外環境に設置した。供試体の設置状況を写真-3 に示す。

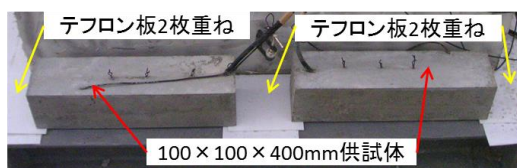


写真-3 供試体設置状況

供試体を設置した場所は、仙台近郊の太平洋岸から 3 km 程度内陸側で、供試体の周囲には降雨や日射を妨げる

ものが存在しない環境とした。

2.2 環境測定結果

(1) 気温、湿度

現場環境の気温の測定結果から求めた1日の最高気温および最低気温、1日の平均気温を図-1に示す。材齢100日頃の夏季に最高気温で30℃程度まで上昇した。材齢300日頃の冬季には最低気温-7℃程度となったものの、1日中氷点下になることは稀であった。1年間の平均気温は13℃だった。

相対湿度は材齢21日目から測定した。1日の最高相対湿度および最低相対湿度、1日の平均相対湿度を図-2に示す。相対湿度は気温の変動を大きく受けるため、気温の下がる夜間には80%RHから90%RHまで上昇する。日中の相対湿度は天候により異なるが、気温が上昇する場合には相対湿度は50～60%RHへと低下する。降雨が観測された日では相対湿度は概ね80%RH程度の高い値を維持したことが観測された。測定結果より算定された1年間の平均相対湿度は72%RHであった。

(2) 降水量

日降雨量の測定結果を図-3に示す。降雨は、材齢30日から250日頃までにかけて観測され、特に材齢30日から130日に多くの降雨を観測した。その後材齢290日以降も降雨が観測された。

0.5mm/時以上の降雨が連続的に観測された場合を1回の降雨として、連続降雨時間毎の降雨測定回数を図-4に示す。降雨を観測した回数の35%は1時間以内の降雨であり、80%は5時間以内の降雨であった。降雨1回の平均降雨継続時間は2.7時間であった。また最大降雨継続時間は材齢44日で22時間であった。

時雨量別の降雨測定時間を図-5に示す。時雨量1mmが降雨計測時間の56%を占め、時雨量2mmまでを含めると77%となり、ほとんどが弱い雨であることが分かった。測定期間中の平均時雨量は2.2mm/時間であった。

2.3 供試体の収縮ひずみ

(1) 収縮ひずみ測定結果

現場環境で暴露した2体の100×100×400mm供試体の収縮ひずみを図-6に示す。2体の測定結果はほとんど一致していた。収縮ひずみには、コンクリートの温度変化に応じたひずみも含まれている。

脱型時に収縮ひずみが100μ程度まで、その後材齢40日頃までに400μ程度まで進展し、材齢50日頃から120日までにかけて収縮ひずみが減少し200μ程度になった。収縮ひずみが減少した時期には降雨が連続的に観測されており、降雨を吸水して膨潤したものと考えられる。材齢120日以降は増大し、材齢280日頃には700μ程度となった。

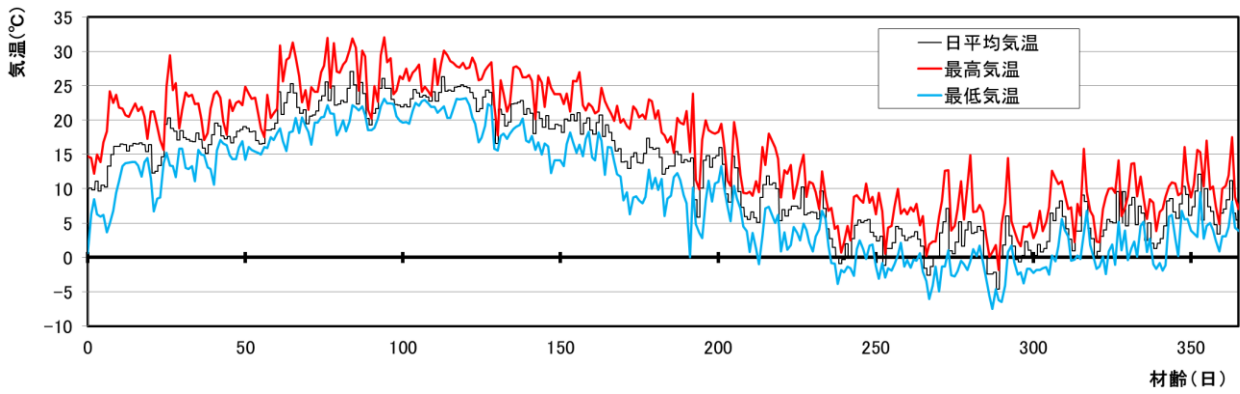


图-1 气温（最高气温，最低气温，日平均气温）

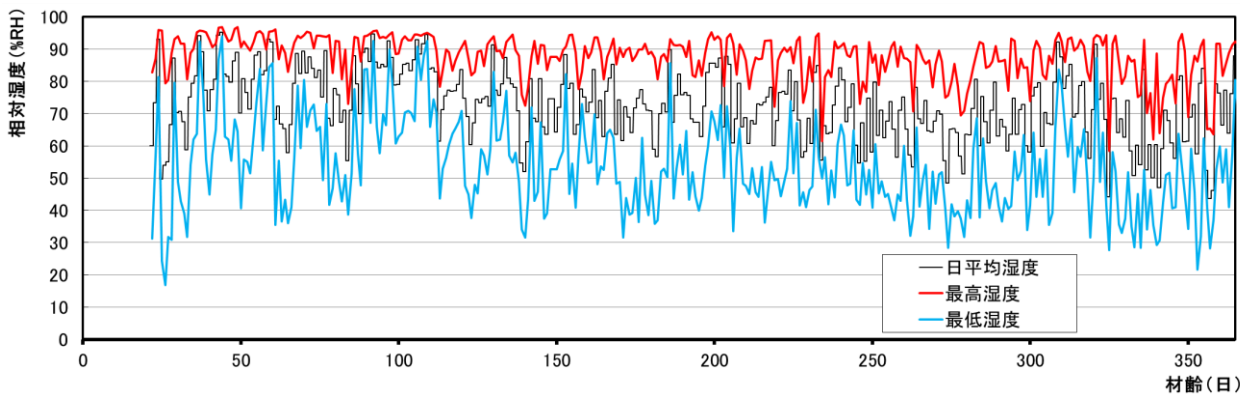


图-2 相对湿度（最高湿度，最低湿度，日平均湿度）

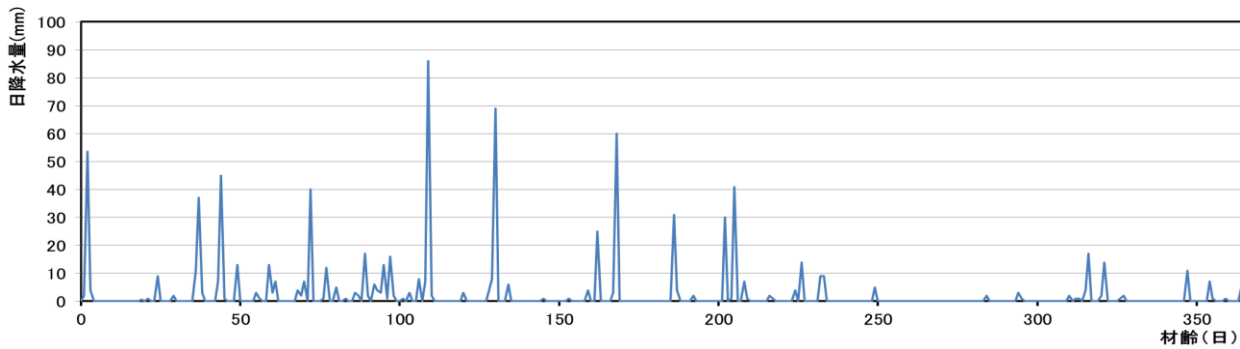


图-3 日降雨量

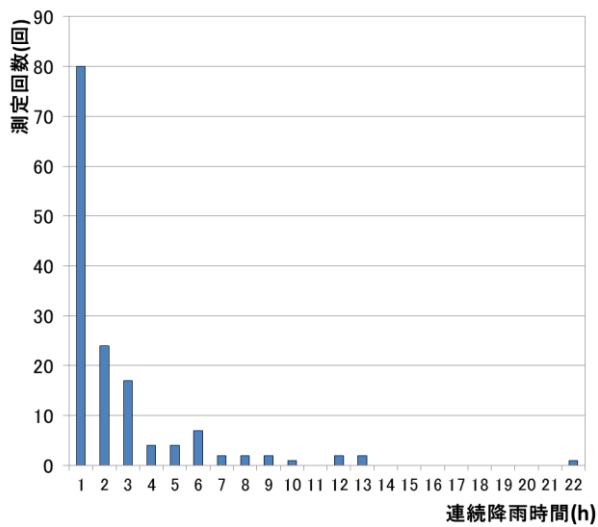


图-4 連続降雨時間と降雨測定回数

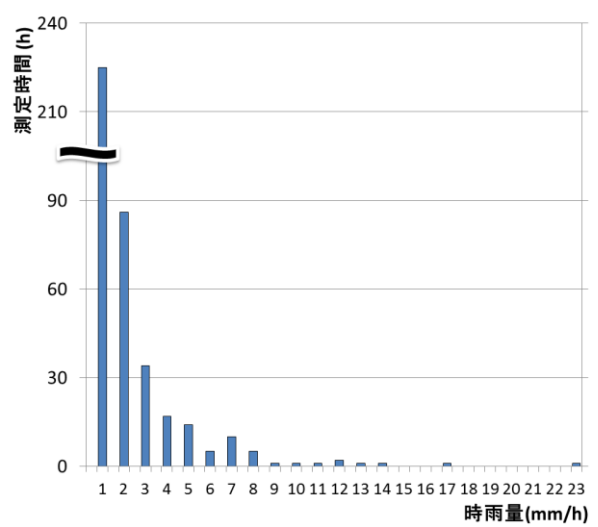


图-5 時雨量と降雨測定回数

材齢280日以降は増減の変動を生じながらも収縮ひずみは再度減少に転じている。材齢280日頃の収縮ひずみの挙動としては、降雨による吸水の影響に加えて、季節変動による気温の上昇から降下による温度ひずみによるものだと考えられる。

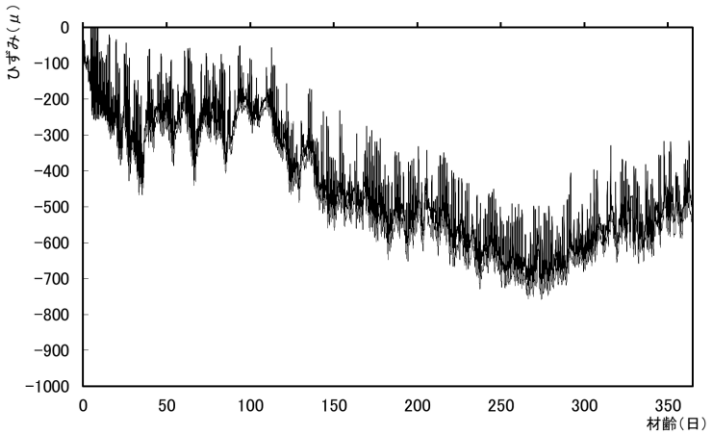


図-6 供試体の収縮ひずみ

供試体の収縮ひずみの測定結果と、収縮ひずみ予測式の算定結果の乖離が生じる時期は、降雨が観測された時期と一致する。このことから、実環境の収縮ひずみを予測する場合には、収縮ひずみの予測式の算定結果に降雨の影響を考慮する必要があると考えられる。

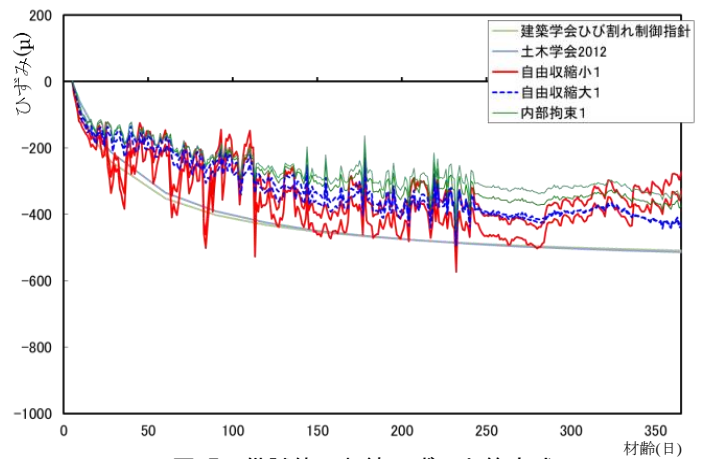


図-7 供試体の収縮ひずみと算定式
(温度 20°C換算、脱型時以降の収縮ひずみ)

(2) 収縮ひずみ予測式との比較

収縮ひずみを予測する方法として収縮ひずみ予測式を用いる方法がある。主な収縮ひずみ予測式として、土木学会のコンクリート標準示方書³⁾と建築学会の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)がある。収縮ひずみ予測式は、気温20°C、相対湿度60%RHの環境下におけるコンクリートの収縮ひずみを測定した実験結果が基になっている⁴⁾ことから、実環境下のコンクリートの収縮ひずみとは乖離が生じるものと予想される。予測式の結果と測定結果を比較し、実環境下の収縮ひずみを予測する上で考慮すべき条件を確認することとした。収縮ひずみ予測式と測定結果の比較を図-7に示す。供試体2体の収縮ひずみを温度補正した結果を赤線で示す。

温度ひずみの補正には、測定された供試体温度の一日の最高値と最低値から求まる温度変化で、収縮ひずみの変動幅を除いて求めた熱膨張係数を用いた。一般にコンクリートの熱膨張係数は、 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と言われているが、材齢180日までの熱膨張係数はこれよりも小さく、 $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \sim 9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度⁵⁾であった。収縮ひずみの予測式は、脱型以降の収縮ひずみを表す式となっている。そのため、測定値は脱型時点で測定されたひずみをゼロとして図示している。

材齢30日時点までは収縮ひずみの進展が良くあっている。その後の材齢30日～120日にかけての供試体の測定結果は収縮ひずみが減少しているが、収縮ひずみ予測式の算定値は30%程度大きな値を示した。また、材齢280日以降の供試体の収縮ひずみの減少についても算定結果は30%程度の違いを示した。

3. 疑似的に吸水を考慮した解析の検討

3.1 検討概要

コンクリートの収縮ひずみを予測するためには、降雨などの環境の変化の影響を考慮できる手法が必要となる。気温や相対湿度の変動のほか、降雨によるコンクリートの吸水の有無が随時変動する解析が必要となる。そこで収縮ひずみ解析手法として、東京大学コンクリート研究室で開発された熱力学連成解析プログラム「Ducom-Com3」⁶⁾を使用して、実環境に暴露した供試体の収縮ひずみ解析の検討をした。

解析上の設定としてコンクリートの引張強度を $99.9\text{N}/\text{mm}^2$ として、コンクリートにひび割れは生じないものとした。収縮ひずみの解析値は、解析モデルの断面中心における供試体長手方向の変位から算出した。

「Ducom-Com3」は、環境の変化を考慮することが可能で、降雨による吸水も考慮できる解析プログラムとなっている。このうち液状水の吸水を考慮する吸水解析と、水蒸気の出入りを考慮する吸湿解析では、解析モデルの切り換えが必要になる。このため降雨の回数が多いと解析モデルの変更の回数が増える。そこで解析モデルの切り換えを行わず、疑似的に吸水状態を再現する方法を検討した。

そこで、解析上でコンクリート表面の水分伝達量を示す『水分伝達係数』⁷⁾を、吸水状態を解析する場合のみ一時的に大きく設定する解析手法を検討した。これにより疑似的に吸水と同等の水分移動現象を表現できるか実験と解析により検討を行った。

3.2 雨降らし試験による水分伝達係数の検討

(1) 雨降らし試験の実験概要

雨降らし試験では、100×100×100mmのコンクリートブロックの上面に、雨水を模擬した時間当たり一定量の水を降りかけ、吸水量（供試体の重量増加量）を測定した。供試体は、コンクリート打設後に試験室内で重量減少が無くなるまで約2年間雨の当たらない室内環境で乾燥させ、その後気温20℃、相対湿度40%RHの試験室環境に1週間おいたものを用いた。雨降らし試験は試験室環境内で行った。100×100×400mmの角柱供試体を、乾式カッターで100×100×100mmの大きさに切断した。雨降らし試験の供試体数は2体とした。供試体コンクリートの水セメント比はW/C=60%である。

測定された降雨のうち80%は連続降雨時間が5時間以内であったことから、雨降らし試験の継続時間は6時間とした。供試体重量は実験開始前（初期値）のほか、30分、1時間、3時間、6時間経過時点で測定した。

雨降らし試験の降雨強度は、実環境で測定した降雨の平均時雨量が2.2mm/hだったことから、試験時の降雨強度を2mm/hに設定した。供試体上面だけでは全ての水を吸収されず、供試体側面に流れたものもあった。供試体表面に付着した水滴はウエスで拭き取ってから重量を測定した。

(2) 雨降らし試験の解析結果

解析モデルは境界条件を考慮して100×100×100mmの1/4モデルとした。解析モデルの表面の要素分割を細かくし、吸水面から離れるにしたがって要素を大きくした。要素分割は供試体の各表面から5mm、10mm、15mm、20mm、50mmとし、最大で50mmとした。

実験では吸水が供試体上面だけでなく、側面に滴り落ちた部分でも吸水されていたことから、解析モデルの上面と、吸水面から2要素目（吸水面からの距離が15mmまで）の解析モデル表面を吸水面として設定した。その他の表面は乾燥・吸湿面と設定した。

吸水面の気温および吸水が生じない面の気温・相対湿度は、試験室の環境条件（20℃、40%RH）を入力した。

水分伝達係数を規定値⁶⁾である 5.0×10^{-5} (m/s)としたほか、その10倍（ 5.0×10^{-4} ）、100倍（ 5.0×10^{-3} ）、1000倍（ 5.0×10^{-2} ）を比較した。

雨降らし試験の測定結果と解析結果を図-8に示す。縦軸に供試体の吸水量（水分増加量）、横軸に時間（分）を示す。水分伝達係数を規定値の100倍の 5.0×10^{-3} とした解析結果が実験結果と近く、吸水継続時間が6時間の時点で、実験の吸水量と解析結果の差が10g程度となり、10%程度の誤差であった。

このことから、供試体断面寸法が100×100mm程度のJIS 供試体の様なコンクリートについて、吸水状態を水

分伝達係数を100倍することで表現することとした。

水分伝達係数を変えた吸水量は、時間が経過するにしたがって差が大きくなってゆく。吸水開始から60分時点で、水分伝達係数を規定値の10倍にした吸水量（8.64g）は、100倍にした吸水量（10.67g）の8割程度となっている。降雨継続時間が長いほど水分伝達係数の設定値による吸水量の差が大きくなる。このため解析上の水分伝達係数は、吸水時間を十分確保した吸水試験に基づいて決定する必要がある。

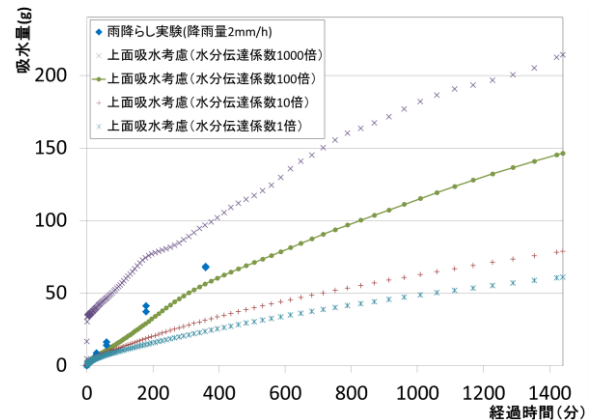


図-8 水分伝達係数とコンクリート吸水量

3.3 最適な解析ステップの検討

(1) 検討概要

コンクリートの収縮ひずみを解析する上で、解析精度を向上させるためには、解析ステップを細かくすることが望ましい。しかし解析ステップを細かくすることは解析時間の増大につながるため、精度を確保できる範囲で極力1ステップの時間を長くすることが実務上望ましい。そこで断面寸法が100×100mm程度の供試体の収縮解析を行う場合の解析ステップの妥当な範囲を確認する。

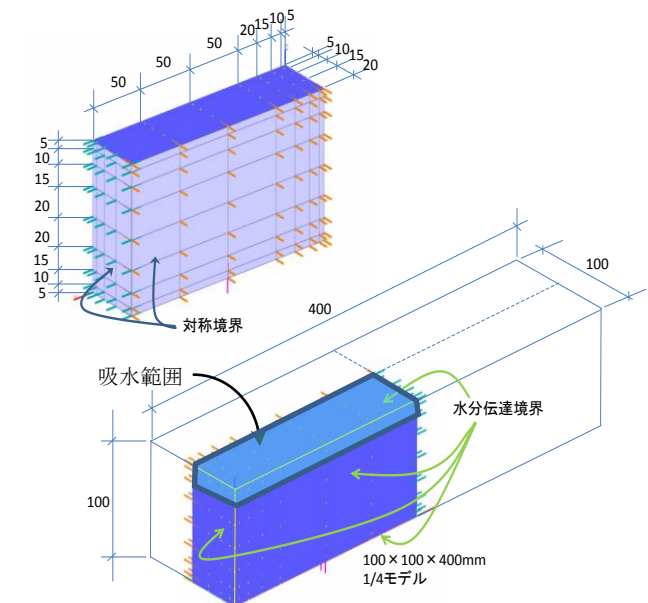


図-9 解析モデル

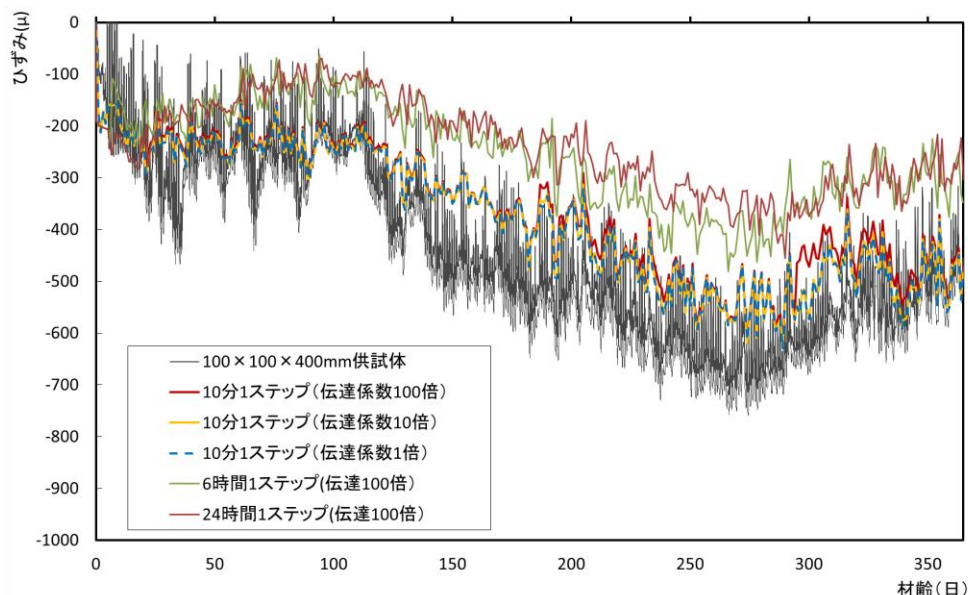


図-10 解析ステップ，水分伝達係数を変えた収縮解析

(2) 解析ステップを変えた解析

解析ステップを10分、6時間、24時間と変えて、実環境で測定した100×100×400mm 供試体の収縮ひずみ解析した。気温や相対湿度、降雨時間は、測定結果を基に解析ステップ時間ごとの平均値を算出して入力した。解析モデルの要素分割は、雨降らし試験と同一の分割とし、図-9に示す通り境界条件を考慮して1/4モデルとした。100×100×400mm 供試体の吸水を考慮した解析では水分伝達係数を規定値の100倍するのが望ましいとの結果を得ている。ここでは再度比較するために解析ステップを10分とした場合について、水分伝達係数を1倍、10倍とした場合の解析も行った。

解析結果を図-10に示す。解析ステップを10分とした解析結果は水分伝達係数が10倍と1倍がほぼ同一の解析結果を示し、これらよりも100倍とした場合は収縮ひずみがやや小さくなった。解析結果は供試体の測定結果と概ね重なっており、精度よく解析できることが確認された。

1ステップの解析時間を6時間や24時間とした場合は、収縮ひずみが測定結果より100 μ ～200 μ 程度小さくなった。降雨の測定結果を図-4で示した通り、降雨継続時間は1時間以内が最も多い。このため解析ステップを6時間とすると、解析上のコンクリートの吸水量が実際よりも多くなり、コンクリートが膨潤する状態になっているためと考えられる。

4.まとめ

断面寸法100×100mmの小断面コンクリート部材の実環境下の収縮ひずみ予測手法について次の結論を得た。

- (1) 実環境に置いた供試体の収縮ひずみと環境条件を測定した結果、降雨によるコンクリートの吸水によって収縮ひずみの進展が鈍化した。
- (2) 小断面コンクリート部材を対象に解析上の水分伝達

係数を変えることで、降雨によるコンクリートの吸水状態を疑似的に考慮する解析法の検討を行い、吸水時の水分伝達係数を規定値の100倍とすることで概ね妥当な吸水状態となることを確認した。

- (3) 水分伝達係数を増大させることで吸水を模擬する解析法を、実環境に暴露した100×100×400mm 供試体の収縮ひずみ解析に適用した。1ステップを10分とした解析ステップで、測定結果を精度よく再現することを確認した。また1ステップが、連続降雨時間を大きく超える時間とした場合は、吸水が多くなり収縮ひずみが小さくなる現象を確認した。

謝辞

本研究を進めるにあたり東京大学石田哲也教授より貴重なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：2012年制定コンクリート標準示方書改訂資料，コンクリートライブラリー138号，2013
- 2) 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.1，35-43，2010
- 3) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造構造物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案），2006
- 5) 鈴木雄大・小林薫・鈴木慎一：鉄筋コンクリート高架橋の乾燥収縮ひずみの測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，2010
- 6) Koichi Maekawa・Tetsuya Ishida・Toshiharu KishiMulti：Scale Modeling of Structural Concrete，2008.11
- 7) 石田哲也：微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム，東京大学博士論文，1999.3