

論文 屋外暴露されたコンクリートの収縮性状に対する日射および降雨の影響

大塚 歩*¹・三浦 千佳子*²・浅本 晋吾*³・睦好 宏史*⁴

要旨: 本研究では、日射および降雨がコンクリートの収縮に与える影響の抽出を目的に系統的な実験を行った。環境条件が異なる三ヶ所の屋外環境に供試体を暴露し収縮の経時変化を計測した結果、降雨浸透によって収縮が大きく抑制されることが確認された。また、コンクリートの収縮ひずみが概ね等しい場合でも、乾燥を促進する日射の有無によって表面の収縮ひび割れ発生に顕著な差が現れることが分かった。さらに、既存の収縮予測式との比較を通じ、乾燥中に計測した平均湿度では雨水浸透による収縮回復の予測は難しく、境界条件によって異なる収縮挙動を予測するには局所的な降雨の影響を考慮する必要があることが分かった。

キーワード: 収縮, 降雨, 日射, ひび割れ, 寸法効果

1. はじめに

コンクリート構造物表面に発生する微細ひび割れは内部鉄筋腐食を促進するため、構造物の耐久性に影響を及ぼす要因の一つとして認識されている。これらのひび割れは、内外部の境界条件がコンクリートの乾燥に伴う体積変化を拘束することで発生するため、収縮性状を適正に把握することは工学的に重要な課題といえる。これまで、収縮挙動に影響を及ぼす要因として温度、相対湿度に着目した研究は数多く報告されている。一方で、日射、降雨など実環境作用が収縮に及ぼす影響について検討した研究例は少なく、個々の環境作用がコンクリートの収縮に如何なる影響を及ぼすかを定量的に評価するには至っていない。

以上のことから本研究では、降雨、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の抽出

を試みた。降雨の有無、日射の有無が収縮挙動に与える影響を把握するために三ヶ所の屋外環境下にコンクリート供試体を暴露し、経時的な収縮挙動の変化、および鉄筋コンクリートの収縮ひび割れ性状について検討を行った。また、水セメント比の異なる普通強度コンクリート供試体と高強度コンクリート供試体の比較も行い、配合条件の影響についても検討した。

2. 実験概要

本実験に用いたコンクリート供試体の示方配合と諸元を表-1に示す。圧縮強度、ヤング率は湿潤養生後の材齢 28 日の値である。単位水量の等しい普通強度と高強度のコンクリートで 10×10×40cm および 10×10×100cm の角柱供試体を作製した。10×10×100cm の供試体では、内部拘束によって発生するひび割れ性状を把握

表-1 コンクリートの示方配合 (kg/m³) および緒元

	W/C	水	セメント	細骨材	粗骨材	圧縮強度	ヤング率
普通強度	55.0 %	170	309	819	975	39.4 N/mm ²	32.5 kN/mm ²
高強度	30.0 %	170	567	757	901	59.2 N/mm ²	36.0 kN/mm ²

細骨材：川砂（比重 2.59g/cm³, 吸水率 2.53%） 粗骨材：硬質砂岩碎石（比重 2.65g/cm³, 吸水率 0.70%）

表-2 各環境下に暴露された供試体の環境条件

	環境条件
C	温度 20°C, 湿度 60%の恒温恒湿槽
S	日射を受け、降雨は受けない
N	日射・降雨ともに受けない
SR	日射・降雨ともに受ける



写真-1 供試体の暴露環境

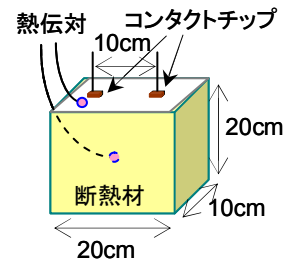


図-1 10×20×20cm 供試体

*1 埼玉大学大学院理工学研究科 (正会員)

*2 東急建設株式会社

*3 埼玉大学大学院理工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

*4 埼玉大学大学院理工学研究科教授 工博 (正会員)

することを目的として、D32の鉄筋を中央に埋め込んだ。中川、大野はD32を埋没した供試体の鉄筋ひずみ分布から、供試体両端の定着長が30cm程度であることを報告している¹⁾。これより、供試体長100cmの中央部分では鉄筋とコンクリートの付着が確保されと考えられ、本実験ではひび割れ試験の供試体長を100cmとした。

実構造物部材の内部では、日射および降雨によって乾燥・湿潤を繰り返す表面に比べて水分の移動は少なく、構造物の全体挙動において表層の乾湿の影響が小さい可能性もある。そこで、実環境下における収縮挙動の寸法効果を検証するため、実構造物の境界条件を模擬した角柱供試体も作製した。体積表面積比100cmの実構造物を想定し、図-1に示すように10×20cmおよび20×20cmの側面にエポキシ系樹脂を用いて不透水性の断熱材を貼り付け、側面からの水分および熱の移動を遮断した。外気と接する乾燥面数を減らすことで、部材中心部のコンクリートを模擬する供試体とした。各供試体とも内部に熱伝対を埋め込み、10×20×20cmの供試体のみ表面温度も熱伝対によって計測した。

打設は9月中旬に行い、打設1日後に脱型、材齢3日まで湿潤養生を行った。その後、降雨・日射を受ける実環境下（供試体SR）、日射のみ受ける屋外環境下（供試体S）、日射・降雨の両者を受けない屋外環境下（供試体N）それぞれにコンクリート供試体を暴露し（表-2、写真-1）、温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿槽に静置した供試体とともに、経時的に収縮、質量変化を測定した。収縮は基長100mmのコンタクトゲージを用いて静置した供試体の上下面において計測した。収縮は10×10×40cmの供試体のみ各環境下で2体作製し、結果は両者の平均とした。

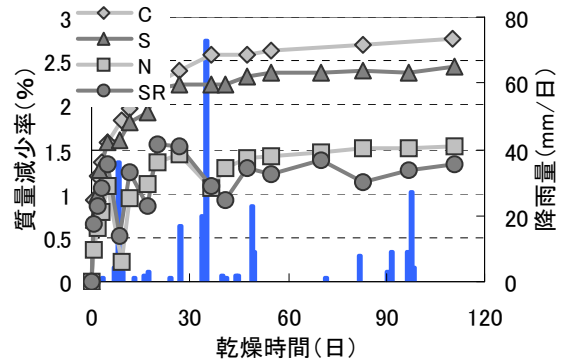
湿度については、計測地から800m離れた場所で計測された環境省の観測データ²⁾を、降雨量は気象庁の埼玉県さいたま市の観測データ³⁾を使用した。乾燥期間中の平均気温、平均湿度はそれぞれ11.3℃、62.2%であった。

3. 実験結果

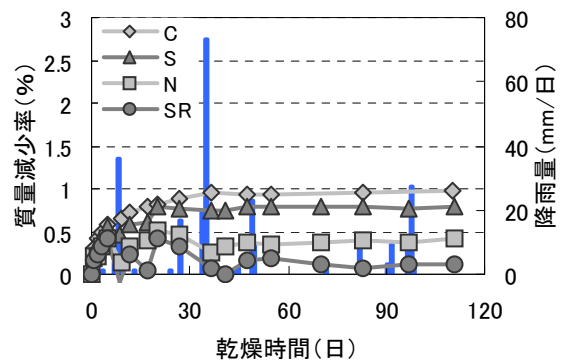
3.1 質量変化

図-2に10×10×40cmの供試体の各環境下における質量減少の経時変化を普通強度コンクリート、高強度コンクリートについてそれぞれ示す。質量減少率は質量減少量を乾燥前供試体質量で除した値である。

いずれの環境下においても、高強度コンクリートの質量減少率は普通強度コンクリートに比べ半分以下となっている。高強度コンクリートの細孔は普通強度コンクリートに比べ密であり、コンクリート表面からの水分の浸透・逸散量は少ない。また、高強度コンクリートは低水セメント比であり、セメントと水和する自由水量が普



普通強度コンクリート



高強度コンクリート

図-2 質量変化 (10×10×40cm)

通強度コンクリートに比べて少ない。高強度コンクリートではコンクリート中に浸透した雨水が水和に利用され結合水ともなり得るため、水分逸散量が小さくなったと考えられる。

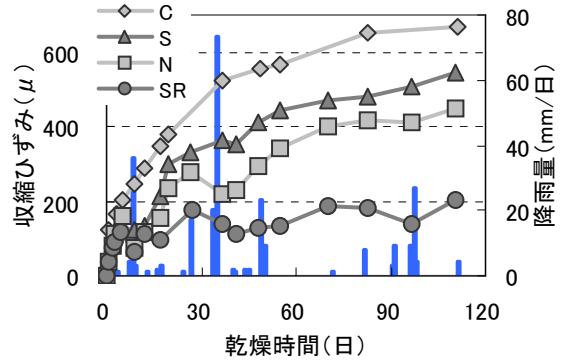
まず日射の影響について述べる。日射を受ける供試体Sと日射を受けない供試体Nで比較すると、普通強度、高強度コンクリートともに供試体Sの質量減少率は供試体Nを上回っている。これより、日射が乾燥を促進するためにコンクリート中の水分が蒸発し、質量減少率が大きくなったことが確認される。次に降雨の影響を供試体Sと供試体SRで比較検討すると、多量の降雨を観測した乾燥時間8日、35日直後の計測で降雨を受ける供試体SRの質量減少率が大きく減少したのに対し、降雨を受けない供試体Sの変動は小さい。また、供試体Sに比べて供試体SRの質量減少率は小さくなっている。以上のように、日射は乾燥を促進し、降雨は乾燥を抑制する。そこで、降雨をさほど観測せず乾燥が促進されたと考えられる乾燥時間50日から80日の挙動に着目すると、日射・降雨をともに受ける供試体SRの質量減少率はさほど変わっていない。これより、一度コンクリート中に浸透した雨水は日射による乾燥促進を受けても蒸発しにくく、質量減少率は降雨浸透の影響を強く受けて小さくなると考えられる。

3.2 収縮挙動の比較

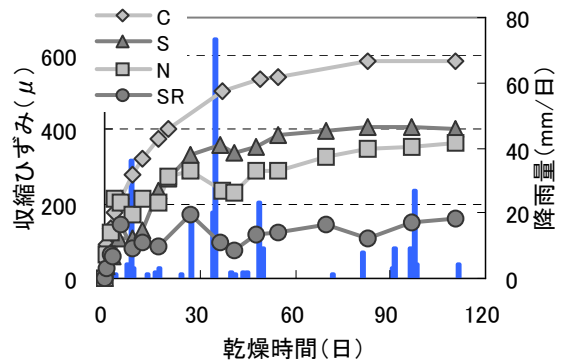
図-3に普通強度、高強度コンクリートの収縮の経時変化を示す。収縮ひずみは測定された供試体内部温度を用い、線膨張係数 $10 \mu / ^\circ\text{C}$ を温度ひずみ分として差し引いて算出した。全環境下において普通強度コンクリートの質量減少率が高強度コンクリートの質量減少率を大きく上回ったのに対して、収縮ひずみは両コンクリートともに乾燥時間 110 日まで同様の挙動を示している。養生期間が短い場合、乾燥開始後もコンクリート中の水和反応が継続するため、自己収縮が乾燥収縮と同時に生じ得る。低水セメント比のコンクリートは乾燥収縮量が小さくなる一方で自己収縮量は大きくなるため、コンクリートの全収縮で考えた場合、水セメント比の相違によっては収縮量に差が現れないことも報告されており⁴⁾、本実験も同様の傾向を示した。

普通強度コンクリートの質量減少率と収縮ひずみの関係を図-4に示す。質量減少率と収縮ひずみの経時変化を比較すると、1%を超える質量減少率に対する収縮ひずみ量は、供試体 S と供試体 N において大きく異なることが分かる。これは、コンクリートの収縮発生機構を水分逸散のみで説明することが困難であることを示唆している。福留、下村は乾燥速度によって同一逸散水量に対する乾燥収縮ひずみが異なることを実験的に示し、乾燥収縮を瞬間変形として弾性変形、時間依存変形として線形クリープを仮定することで、任意の環境条件の乾燥収縮ひずみを予測することが可能であることを報告している⁵⁾。本実験も、環境条件による乾燥速度の違いによって質量減少率に対する収縮ひずみ量が異なると考えられ、収縮も時間依存変形クリープ挙動の一部とみなす上記考察で現象説明できるのではないかとと思われる。また、いずれも降雨・日射を受けず、平均湿度が概ね等しい条件下にある供試体 C と供試体 N の収縮量に 200μ の差が現れたのは、降雨時の局所的な湿度上昇によってコンクリート中に浸透した水分が、逸散せずに収縮抑制を促したためと考えられる。

実環境作用の影響に着目すると、環境条件の相違が日射の有無のみである供試体 S と供試体 N の収縮ひずみ量が大きく変わらないことから、日射による収縮ひずみの促進は小さいと考えられる。一方で、多量の降雨を観測した乾燥時間 8 日以降、唯一降雨を受ける供試体 SR の収縮ひずみの増加が緩慢になっている。一般に、コンクリートの乾燥収縮は周囲の湿度の影響が大きいと認識されているが、供試体 SR のみ収縮ひずみ量が小さいことから、実環境下では降雨の影響が湿度よりも大きいことが推測される。すなわち、大気中の水蒸気が湿度勾配によりコンクリート内部に浸透するよりも、液体としての降雨が毛細管作用によって内部に浸透する現象の方

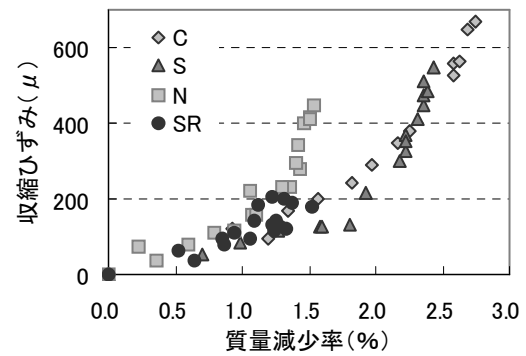


普通強度コンクリート



高強度コンクリート

図-3 収縮の経時変化 (10×10×40cm)



普通強度コンクリート

図-4 質量減少率と収縮ひずみ (10×10×40cm)

が収縮抑制に寄与すると考えられる。

収縮ひずみは降雨を受ける供試体 SR のみ小さくなり、日射の有無による相違は確認されなかった。これより、コンクリート構造物の収縮挙動に関与する因子としては日射よりも降雨の影響が大きいと推測できる。しかしながら、これは体積表面積比の小さい供試体から得られた結果であり、部材厚が大きければ部材全体に対する雨水浸透の影響は小さくなると推測される。そこで、実構造物部材の境界条件を模擬した供試体で、上記考察について検討を行った。

10×20×20cm の供試体の普通強度コンクリートおよび高強度コンクリートの質量変化を図-5に、収縮ひずみの経時変化を図-6に示す。普通強度コンクリートの供試体 S と供試体 N の質量減少率が概ね等しいのは、直接日射を受ける供試体の表面積が 200cm² と小さく、日射による乾燥促進が抑制されたためだと考えられる。一方で、供試体の表面積が小さいために供試体に浸透した雨水が逸散しにくく、降雨を受ける供試体 SR の質量はほとんど減少しなかったと考えられる。

環境条件の違いによる収縮挙動の相違は 10×10×40cm の供試体と同様で、供試体 S と供試体 N の値がほぼ等しく、降雨を受ける供試体 SR のみ小さくなった。また、普通強度コンクリートと高強度コンクリートでは同等の収縮ひずみ量を示し、供試体寸法の違いによる影響は認められない。実構造物を想定した試験体で検討を行った結果、実構造物においても雨水浸透による収縮回復作用は大きく、降雨による収縮抑制効果は顕著に現れることが分かった。より大型な構造物については再度検討する余地はあるが、体積表面積比 100cm 程度の構造物では降雨の影響を考慮する必要があると思われる。

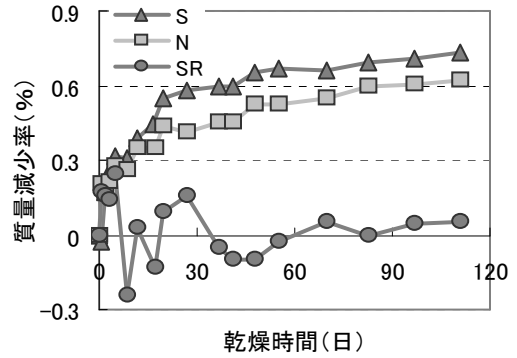
3.3 収縮ひび割れ

10×10×100cm の角柱供試体に発生したひび割れ状況を表-3に示す。本実験では、高強度コンクリートの供試体 S にのみ多数のひび割れが発生した。初期ひび割れ発生は乾燥時間 25 日に確認された。

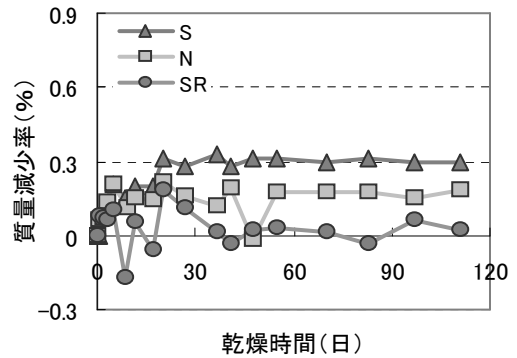
10×10×100cm の供試体における収縮の経時変化を図-7に示す。10×10×40cm および 10×10×20cm の供試体 S の収縮挙動は、降雨による影響をほとんど受けずに経時的に収縮ひずみ量が増加した。一方、10×10×100cm の場合においては、乾燥時間 20 日で収縮から膨張へと転じており、目視による初期ひび割れも乾燥時間 25 日に確認されたことから、初期ひび割れは乾燥時間 20 日前後に発生したと推測される。ひび割れの発生がさほど確認されなかった普通強度コンクリートの収縮挙動の傾向は 10×10×40cm の場合と同様であった。

無筋コンクリート供試体では、普通強度と高強度で収縮ひずみはさほど変わらず、供試体 S と N の環境の違いで収縮量に大きな差がなかったにもかかわらず、鉄筋コンクリートは高強度の供試体 S にのみ多数の収縮ひび割れが発生した。高強度コンクリートの付着性状は普通強度コンクリートと比較して卓越しており、鉄筋とコンクリートの付着が大きいため、普通強度コンクリートと同じ収縮量を呈した場合でも、早期に収縮ひび割れが発生する。このため、本実験において高強度コンクリート供試体にひび割れ発生が顕著に現われたと考えられる。

高強度コンクリートにおいては暴露された環境下条件の相違によるひび割れ発生性状の違いが見受けられ

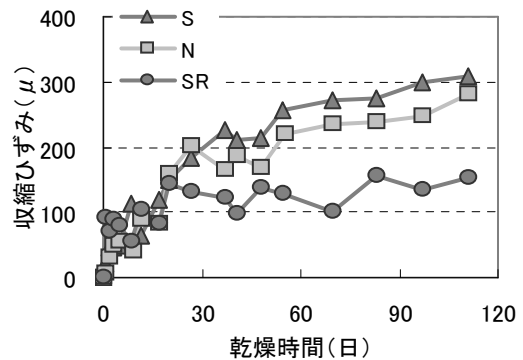


普通強度コンクリート

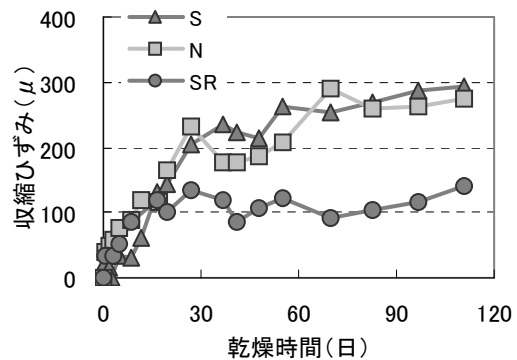


高強度コンクリート

図-5 質量変化 (10×20×20cm)



普通強度コンクリート



高強度コンクリート

図-6 収縮の経時変化 (10×20×20cm)

る。10×10×40cm の供試体の収縮量差が僅か 50 μ である供試体 S と供試体 N を比較すると、日射を受ける供試体 S にのみ多数のひび割れが早期から確認されている。両供試体はともに降雨を受けず収縮量差も小さいことから、供試体 S においては日射の影響によってひび割れ発生が促進されたと考えられ、この点について検討を加える。

図-8 に乾燥時間 18 日前後における高強度コンクリート供試体の表面温度と内部温度の変動を示す。表面温度変化は材料に依存すると考え、供試体 S、供試体 N ともに表面温度は 10×20×20cm の供試体で計測したものをを用いた。内部温度は 10×10×100cm の供試体から計測した。図-8 に示されるように、日射のある 10×10×100cm の供試体 S でも表面と内部の温度差はさほど無かった。一方で、供試体 S から計測された温度は供試体 N のそれを最大で 10℃以上上回っている。日射を受ける供試体 S は供試体 N に比べて厳しい乾燥条件下にあり、供試体 S のコンクリート表面は供試体 N よりも乾燥していたと考えられる。供試体 S は日射をうけることでコンクリート表面の乾燥、収縮が促進され、その結果ひび割れが発生しやすい状態であったと推測される。

これらを踏まえて収縮ひび割れ挙動に関与する環境要因の影響を検討すると、降雨の有無は収縮挙動に大きく影響するが、収縮量のみでひび割れ発生を予測することは困難である。日射によってコンクリート表面の乾燥状態が促進された結果ひび割れが多数発生したと考えられることから、ひび割れ発生に対しては日射の影響が大きいと推察される。

3.4 実験結果と予測モデルの比較

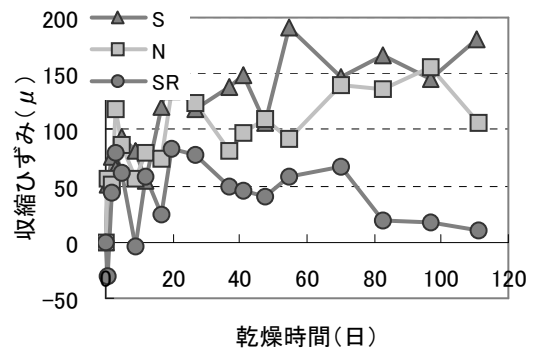
本研究では、既存の収縮予測式である土木学会予測式⁶⁾ (以下 JSCE 式)、ACI 209 委員会式⁷⁾ (以下 ACI 式)、CEB-FIP model code 1990⁸⁾ (以下 CEB 式) と実測値の比較を行った。高強度コンクリートについては JSCE 式との比較にとどめることとした。

10×10×40cm の供試体から得られた実測値と収縮予測式との比較を、普通強度コンクリート、高強度コンクリートそれぞれについて図-9 に示す。予測式の終局値では、CEB 式が ACI 式および JSCE 式に比べて収縮量を過小評価しており、およそ 160 μ 小さくなった。

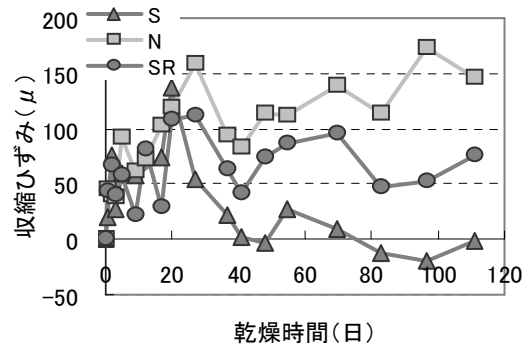
実測値と予測値を比較すると、供試体 SR を除く実測値は JSCE 式および ACI 式との適合性が高く、降雨を受けない環境下の収縮挙動を精度良く追跡している。3.2 節で前述したように日射による収縮の促進効果は小さい。このため、日射のみを受ける供試体 S に対しても予測値の適合性は高くなったと考えられる。一方で、降雨・日射を受ける環境下で計測された供試体 SR の値は、予測式に比べて極端に小さい。これらの予測式は、本実

表-3 収縮ひび割れ発生状況

		ひび割れ	初期ひび割れ
		本数	確認時間
S	普通強度	6	55 日
	高強度	18	26 日
N	普通強度	0	-
	高強度	1	55 日
SR	普通強度	0	-
	高強度	0	-



普通強度コンクリート



高強度コンクリート

図-7 収縮の経時変化 (10×10×100cm)

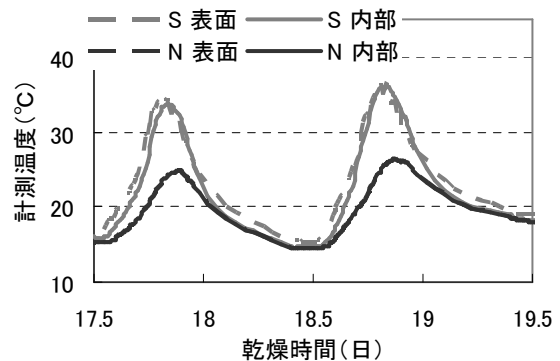


図-8 高強度コンクリートの表面温度と内部温度

験で得られた実環境下におけるコンクリートの収縮挙動を適切に予測できておらず、精度向上のためには降雨の影響を考慮する必要があると考えられる。

今回比較に用いた予測式の収縮ひずみは相対湿度によるところが大きく、相対湿度が高いほど収縮ひずみは小さくなる。本比較では、計測期間中の平均湿度 62.2% を用いたが、85% とすると JSCE 式、ACI 式、CEB 式はほぼ同値の終局ひずみを示し供試体 SR との高い適合性を示した。しかしながら、実験期間中の平均湿度が 85% になるとは考えにくく、平均湿度を予測式に用いて実環境下での収縮挙動を追跡することは困難である。これより、実環境下での収縮を予測するためには、降雨の影響を相対湿度に反映させる等の手法によって、収縮を抑制する降雨浸透の影響を考慮する必要があることが本実験結果より示唆された。

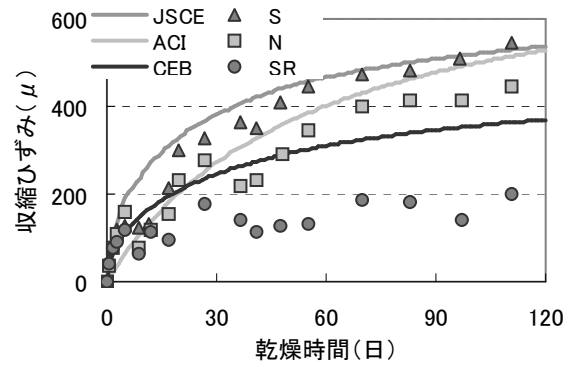
4. まとめ

本研究によって得られた知見を以下に列挙する。

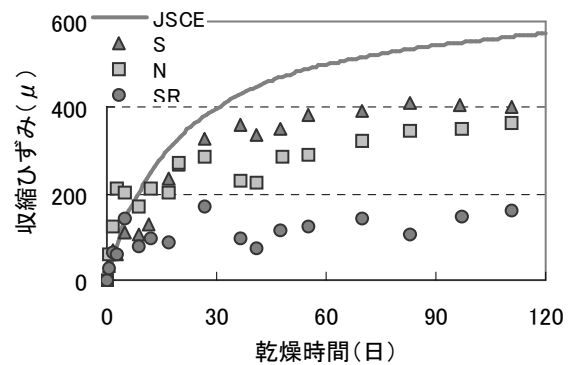
- (1) コンクリートの質量変化、収縮に対する降雨の影響は大きく、降雨を受けた供試体の質量減少率、収縮ひずみは降雨を受けない供試体に比べて小さくなった。
- (2) 体積表面積比の異なる供試体の収縮挙動から実構造物部材の収縮挙動を検討した結果、部材厚の大きいコンクリートにおいても降雨浸透による収縮抑制効果は大きいことが分かった。
- (3) 本実験では、日射を受ける供試体と受けない供試体の収縮量が同等であるにもかかわらず、日射をうける供試体に多数の収縮ひび割れが発生した。コンクリート表面が乾燥することでひび割れが発生しやすくなったと考えられ、収縮ひび割れ発生が日射によって促進されると推察された。
- (4) 屋外暴露されたコンクリートの収縮ひずみと収縮予測式の値を比較した結果、土木学会予測式においては降雨を受けないコンクリートの収縮挙動を精度良く予測するものの、降雨を受けるコンクリートの収縮量を過大に評価することが分かった。境界条件の異なるコンクリートの収縮量をよりの確に予測するためには、降雨浸透による収縮抑制効果を考慮する必要があると考えられる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(若手研究(B), 課題番号: 19760301, 研究代表者: 浅本晋吾)の補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。



普通強度コンクリート



高強度コンクリート

図-9 実測値と収縮予測式の比較 (10×10×40cm)

参考文献

- 1) 中川隆夫, 大野義照: コンクリートの自己収縮応力試験方法に関する実験, コンクリート工学年次論文集, vol20, No2, pp.751-756, 1998
- 2) 環境省汚染物質広域監視システム(衛生研究所) <http://soramame.taiki.go.jp/MstItiran.php>
- 3) 気象庁気象観測(電子閲覧室): <http://www.data.kishou.go.jp/etm/index.html>
- 4) 岩城一郎ほか: 周囲の温湿条件が高強度コンクリートの収縮挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No1, pp.473-478, 2003
- 5) 福留和人, 下村匠: 時間依存変形を考慮したコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, pp.944-945, 1992
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002
- 7) ACI Committee 209: Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures, Designing for creep & shrinkage in concrete structures, ACI Special Publication, 76, 193-300, 1982
- 8) Comite Euro-International Du Beton: CEB-FIP Model Code 1990 design code, Thomas Telford Service Ltd., 1993