

論文 セメント硬化体の時間依存変形に及ぼす気象作用の影響評価

早坂 駿太郎*1・千々和 伸浩*2・岩波 光保*3

要旨: 本研究ではコンクリートの体積変化が実環境における降雨や日射によって受ける影響を調査するために、実環境を想定した暴露実験で降雨や日射の有無を模擬することとした。その結果、水分吸収により乾燥収縮ひずみが回復し、その程度が水分吸収の時間・量に必ずしも依存しないこと、日射作用の増大による熱膨張と局所的な乾燥の促進、これによるひずみの日変動が活発化することが判明した。

キーワード: 乾燥収縮, 気象作用, 日射, 降雨, 水分逸散, 水分吸収, 熱膨張

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化要因として表面に発生するひび割れは、強度低下のみならず塩害や中性化、鉄筋の腐食などを促進させる。長期間に渡って発生するコンクリートの体積変化は構造物にはたらく種々の拘束力と相まってその表面にひび割れを誘発する。この体積変化は、コンクリートにはたらく拘束力や水分含有量の変化、温度変化などの種々の外的作用の変化によって引き起こされる。これらの体積変化による変形として主に、外力によって短時間に生じる弾性変形、時間依存変形のクリープや水分の逸散による乾燥収縮、温度変化に起因する熱膨張・収縮が挙げられる¹⁾。コンクリートの用途が拡大し、様々な環境において使用される中で、とりわけ乾燥収縮や温度変化による熱膨張・収縮は、構造物の実環境下における気象作用に依存してその程度が大きく変化すると考えられる。近年の研究から実験室環境のような一定環境下においては解析による予測が可能となりつつあるが²⁾、実環境下における体積変化は定量的評価が十分な精度に達していない³⁾。そこで、本研究では実環境における気象作用として最も一般的と考えられる、日射と降雨について考えることとした。

2. 実験方法

2.1 実験概要

本実験は、実環境におけるセメント系材料の体積変化に及ぼす気象作用の影響を測定することが目的である。環境条件の異なる場所にモルタル供試体を暴露しこれを実現した。また、気象作用への寸法や水セメント比の影響の度合いを見るために4種類の供試体を用いた。各環境条件下に寸法、水セメント比の異なる供試体を設置し、体積変化と水分の逸散・吸収を観察するために供試体内部のひずみと温度、質量変化を測定した。

2.2 試験供試体

供試体寸法は40×40×160mmおよび100×100×400mmの2種類とし、収縮挙動を明確に取り出すためにモルタル製とした。水セメント比は50%と25%の2種類で、示方配合は**表-1**に示すとおりである。計4種類の供試体は9月の下旬に打設した。打設後は温度20°C、相対湿度60%の恒温恒湿槽において、11日間型枠ごとプラスチックラップで覆う封緘養生を行なった後、脱型して同じ場所に2日間置いた。これは各供試体の基本的な乾燥収縮特性を把握するとともに、脱型直後の環境への感度が高い時期に実環境の複雑な変動作用を受けるのを避けるためである。この過程を経て、条件の異なる屋外環境に設置した(**表-2**, **写真-1**)。

2.3 各環境条件

実環境を模擬した各環境条件、およびそれらの略号を**表-2**に示す。

乾燥状態の日射有り、無しの場合では、ともに風雨の影響をなくすために側面部をブルーシートによって遮断し、かつ外気の循環は行なわれるように床面から約1mの高さとなるような実験装置内に設置した。乾燥状態・日射有りのケースにおいては装置屋根部分を透明アクリル板にして太陽光が入るようにしてある。乾燥状態・日射無しのケースにおいて装置屋根部分はブルーシートによって覆って日射を遮っている(**写真-2**)。

湿潤状態のケースではバット内に水を張り、供試体を常時水中浸漬とした。

乾燥状態、湿潤状態繰り返しのケースでは、降雨を模擬するために2,12,24時間水中浸漬を行い、この実験操作以外の期間はそれぞれ乾燥状態・日射有り、無しの装置内に設置した。

実環境暴露においては、通常の供試体の他に、下面以外の5面全面を油性マジックで黒塗りした供試体のシリーズを設け、表面色の違いによる日射の影響差を測った。

*1 東京工業大学 工学部土木・環境工学科 (学生会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

供試体はテフロンシートで覆った棒による2点支持によって床面に設置した。床面からの熱放射対策は行っていないが、実環境暴露のすべての供試体に同様な影響を与えており、また実環境暴露シリーズ以外には影響がないため、この場では特に考慮しないものとする。

試験場所は東京工業大学緑が丘1号館の屋上であり、地上約20mで周囲に日射や雨を遮るものがない環境とした。

2.4 供試体ひずみ、内部温度、質量変化測定方法

供試体中心部のひずみと温度は、標点間距離50mmのモールドゲージで30分毎に測定した。乾燥状態、湿潤状態および乾燥状態、湿潤状態繰り返しの40×40×160mm供試体のみ2体のデータの平均値、残りの供試体では1体で測定をしている。また、このモールドゲージは11(μ°C)の自己温度補償機能を有しているが、この自己温度補償機能のみでは温度ひずみを排除しきれていないことを確認したため、測定から得られたひずみには温度による影響成分が含まれているものとして分析を進めた。

質量の変化については40×40×160mm供試体は0.001g、100×100×400mm供試体は5g単位で、環境条件ごとに1供試体ずつ用意してその推移を測定した。実環境暴露における黒塗り供試体では質量変化は計測していない。

各環境の気温、相対湿度は、乾燥状態日射有り、無しの装置内にて30分毎に測定した。

表-1 モルタルの示方配合

| 水セメント比 W/C | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|---------------|--------------------------|-----------|----------|----------|
| | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 混和剤 A |
| 25% | 236 | 944 | 1200 | 14 |
| 50% | 328 | 656 | 1200 | 0 |

セメント: 普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16 (g/cm³)

細骨材: 表乾密度: 2.59 (g/cm³), 吸水率: 1.58 (%)

粗粒率: 2.42

混和剤: 高性能 AE 減水剤

表-2 各供試体の環境条件一覧

| 略号 | 環境条件 |
|-----------|------------------------|
| Dry/Sun | 乾燥状態・日射有り |
| Dry/Shade | 乾燥状態・日射無し |
| Wet | 湿潤状態(水中浸漬) |
| Exp | 実環境暴露(日射・降雨とも受ける) |
| Exp/Black | 実環境暴露(日射・降雨とも受ける), 黒塗り |
| DW/Sun | 乾燥状態, 湿潤状態繰り返し・日射有り |
| DW/Shade | 乾燥状態, 湿潤状態繰り返し・日射無し |



写真-1 各種環境条件実験装置
(写真右上が乾燥状態・日射有りとし、
左下が湿潤状態、右下が実環境暴露)

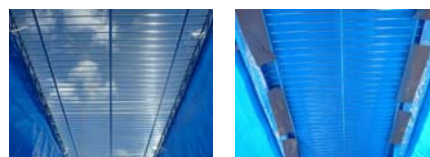


写真-2 左が乾燥状態・日射有り、
右が乾燥状態・日射無しの装置内から見た屋根部分

3. 実験結果

質量変化は質量変化量を11日間の封緘養生終了後の質量で除した質量変化率として表している。体積変化を表すひずみも打設後11日間の封緘養生終了後を原点としてしている。

データは環境条件ごとに示し、モルタル供試体のパターンの区別は表-2の略号と、40×40×160mm供試体はS、100×100×400mm供試体はLとして、25、50の数字は供試体の水セメント比の%として表す。[S25 Dry/Sun]では寸法40×40×160mm、W/C=25%の乾燥状態・日射有りに設置した供試体を表す。

データを見る際の留意点として、14、48、55日目に台風などの影響により乾燥状態シリーズの装置が破損したため、一時的に供試体が降雨にさらされたことが挙げられる。この影響で14、48、55日目を以降数日間の乾燥状態および乾燥状態、湿潤状態繰り返しのシリーズのひずみの計測値が増加しているが、これは実験操作によるものではない。また、[L50 DW/Sun]の供試体はひずみをとるセンサーの異常により使用に耐えるデータが得られなかった。

3.1 時間-ひずみ関係

(1) 乾燥状態

時間-ひずみ関係を日射有り、無しについて図-1, 2に示す。全体の傾向として、供試体寸法の小さく、W/Cが大きい方がより収縮していることがわかる。W/C=25%の供試体シリーズにひずみの差がほぼ見られないことから、低水セメント比においては乾燥収縮への寸法の影響は少ないことが確認できた。これに対して W/C=50%で

は、供試体寸法の大小が水分の逸散に要する時間に影響を与え、ひずみ挙動に差異が出た。日射の有無に関しては、乾燥状態・日射有りの供試体シリーズにおいてわずかに収縮量が大きく、日射による乾燥の促進が見られた。

(2) 湿潤状態

図-3 は封緘養生後を原点にとってひずみの時間変化を追ったものである。封緘養生を終了して水分移動が自由になったため、急激な乾燥収縮が発生している。特にW/C=50%の供試体の収縮が著しく、そのために水分吸収による膨張量も大きくなっている。

(3) 乾燥状態・湿潤状態繰り返し

図-4,5 には水中浸漬時間の 2, 24, 12 時間のタイミングを示してある。水中浸漬することで、急激な膨張を観察できた。寸法、水セメント比の異なる 4 種類の供試体間で膨張量差があるものの、1 つの供試体内では水中浸漬時間の 2, 12, 24 時間で大きな差は表れなかった。

(4) 実環境暴露

この環境条件においては、黒く塗ったものを用意して、表面色による日射影響の促進について分析を試みた。実験結果の図-6,7 は同時期の降雨量(mm/h)を合わせて示したものである。雨が降るとひずみが膨張に転じている点は前項(3)と同様である。また、黒塗りの供試体ではひずみ変化の振幅が通常の供試体に比べて大きい。黒く塗ったことによる太陽光の吸収促進は、温度上昇による熱膨張・収縮を増加させ、かつ供試体表面部分のRH低下の加速を引き起こすことにより乾燥収縮が顕著になり、有為な差が見られたと考えられる。

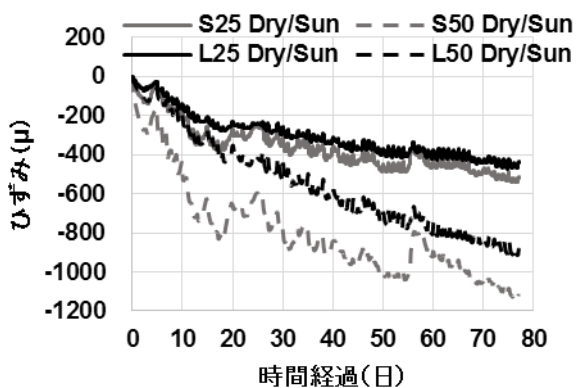


図-1 乾燥状態・日射有りの時間-ひずみ関係

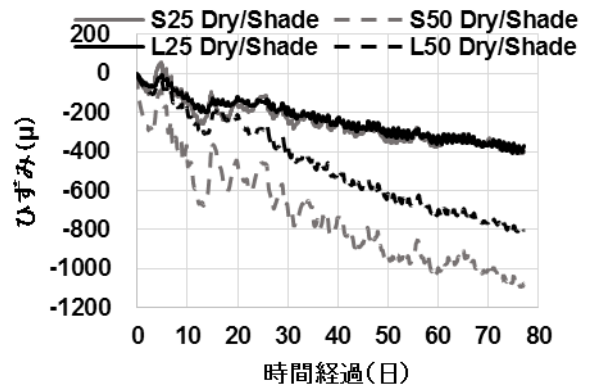


図-2 乾燥状態・日射無しの時間-ひずみ関係

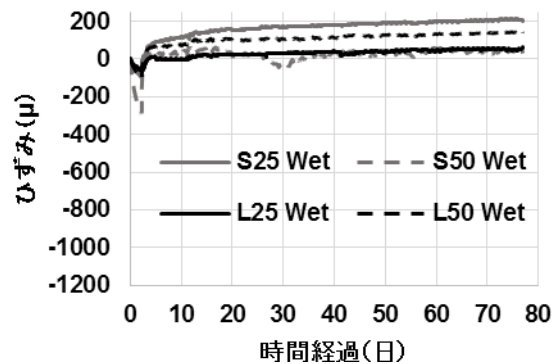


図-3 湿潤状態の時間-ひずみ関係

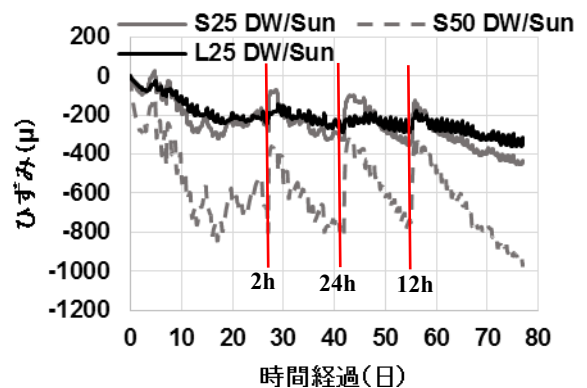


図-4 乾燥状態、湿潤状態繰り返し・日射有りの時間-ひずみ関係

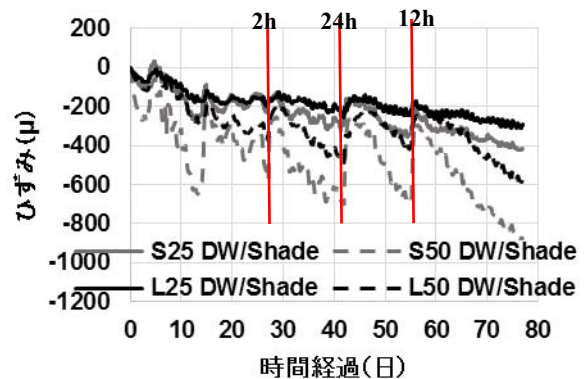


図-5 乾燥状態、湿潤状態繰り返し・日射無しの時間-ひずみ関係

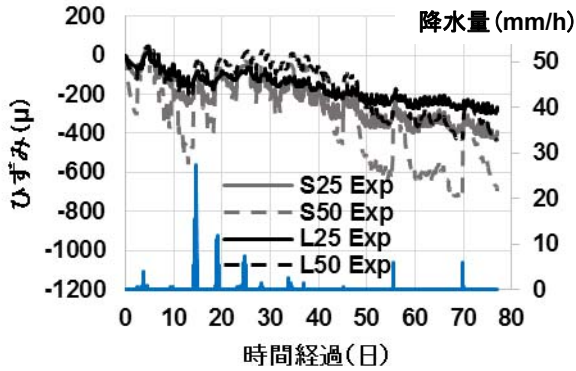


図-6 実環境暴露の時間-ひずみ関係

—— S25 Exp/Black - - - S50 Exp/Black
 —— L25 Exp/Black - - - L50 Exp/Black

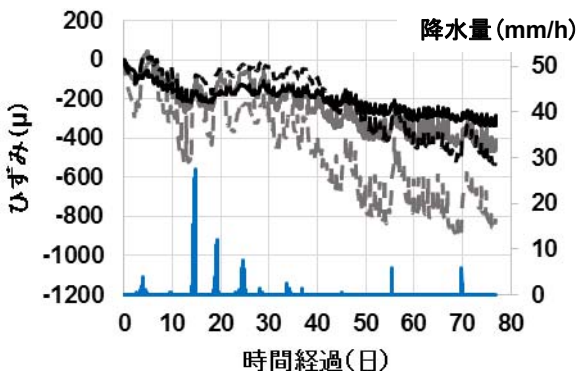


図-7 実環境暴露（黒塗り）の時間-ひずみ関係

3.2 時間-質量関係

(1) 乾燥状態

図-8,9 より、乾燥状態にあると W/C が大きい供試体の質量減少が顕著であることが確認できた。寸法および日射の有無による質量変化率の差異はほとんどない。日射有りの環境条件下で乾燥の促進が起こっていることは 3.1 (1) で日射有りの供試体においてわずかに収縮ひずみが大きくなっていることから判明している。しかし、日射の有無で質量変化率に与える影響がほとんど見られなかったのは、測定精度以下での質量変化で差異が表れていた可能性が高いと考えられる。また、W/C=25%の供試体シリーズについては、水和により水分が消費され⁴⁾、W/C=50%の供試体シリーズに比べて水分の逸散がほとんど見られなかった。

(2) 湿潤状態

図-10 から、暴露直後の乾燥による水分逸散が W/C=50%の供試体シリーズで活発であり、その後失った水分量以上に吸収していることが読み取れる。W/C=25%の供試体シリーズでは乾燥による水分逸散量よりも水分吸収量の方が多いが、これは打設後からの自己乾燥によって内部への水分吸収が大きいためと考えられる。

(3) 乾燥状態・湿潤状態繰り返し

図-11,12 に示すように、全体的な傾向は日射の有無に関わりなく 3.1 (3)のひずみ変化と同様になっているが、水中浸漬時間が長くなると質量変化率の上昇量が増える傾向にあること、W/C=25%、50%の供試体シリーズ間での質量変化率、特に減少率が大きく異なっている。

(4) 実環境暴露

結果を図-13 に示す。この環境条件においては実際の降雨にさらされることで定期的な水分吸収による膨張が見られる。水分吸収の頻度が 3.2 (3)の乾燥状態・湿潤状態繰り返しのシリーズより多いため、約 80 日経過時点での実環境暴露供試体は乾燥状態・湿潤状態繰り返しの供試体に比べて質量減少が緩和されている。

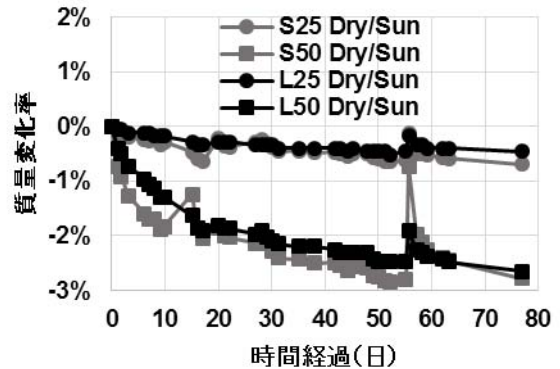


図-8 乾燥状態・日射有りの時間-質量関係

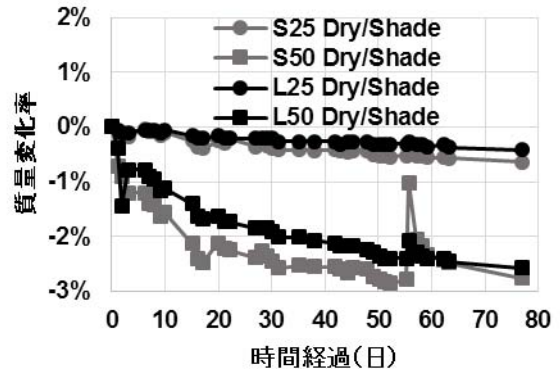


図-9 乾燥状態・日射無しの時間-質量関係

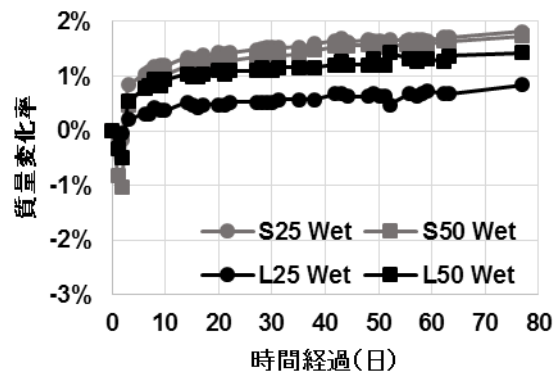


図-10 湿潤状態の時間-質量関係

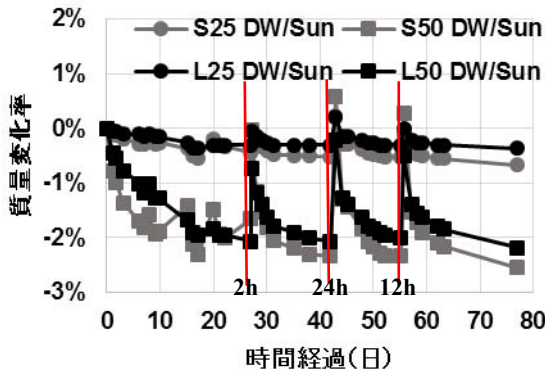


図-11 乾燥状態，湿潤状態繰り返し・日射有りの時間-質量関係

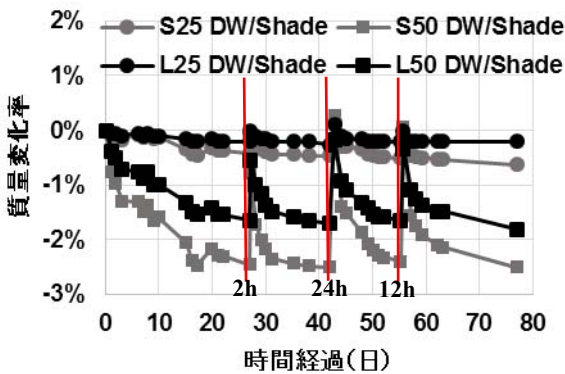


図-12 乾燥状態，湿潤状態繰り返し・日射無しの時間-質量関係

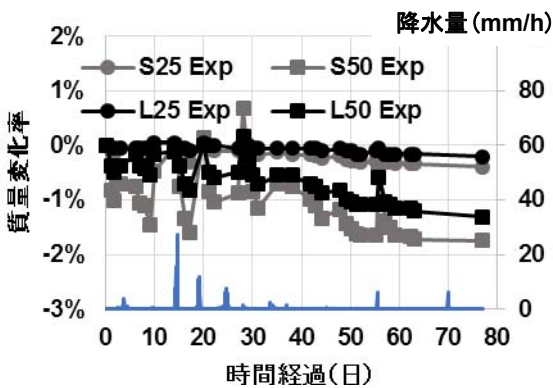


図-13 実環境暴露の時間-質量関係

4. 考察

4.1 降雨による収縮ひずみ回復

3.1 (3)の項で降雨による乾燥収縮の緩和および供試体ひずみ膨張を確認した。降雨の与える影響の定量的な評価については、降水量測定による評価の面で困難であったため、降雨を模擬している乾燥状態，湿潤状態繰り返しを考える。図-14,15 は水中浸漬時間ごとの膨張ひずみと質量変化率を供試体について比較している。質量変化率については水中浸漬時間が増加するにつれて質量増加率が上昇し、水分吸収量が水中浸漬時間に依存する傾向にある。膨張ひずみにおいてはその限りではなく、特

に日射がある供試体においては規則的でないばらつきが見られた。また、[S25 DW/Sun]と[S50 DW/Sun]では2時間と24時間の水中浸漬で10%ほどの差異しか確認できなかった。このことから、ひずみの膨張は必ずしも水中浸漬時間に依存しない、という可能性が示された。仮に、この場合の水中浸漬時間を実環境の降水量として置き換えてみる。図-6,7における15日目や55日目の降水量と膨張ひずみに着目すると、15日目が55日目よりも降水量では上回るのに対し、ひずみの増加量に関しては同程度となっている供試体もある。これについては供試体内部への水分吸収とその速度によって説明できる。SとLの供試体シリーズではひずみ測定点の内部中心までの距離に2.5倍の差があるため、L供試体においては水分吸収における感度が鈍くなる。W/Cの面でも、25%と50%では内部構造の密実さが異なり、密な構造を有する25%の供試体シリーズでは水分吸収による膨張が50%の供試体シリーズほど顕著には表れない。

対象とする実験データが不足してはいるものの、水分吸収によるモルタルの膨張は、必ずしも水分の吸収時間に依らず、供試体寸法と内部空隙量に依存して、その膨張量の上限が決定されると言えよう。

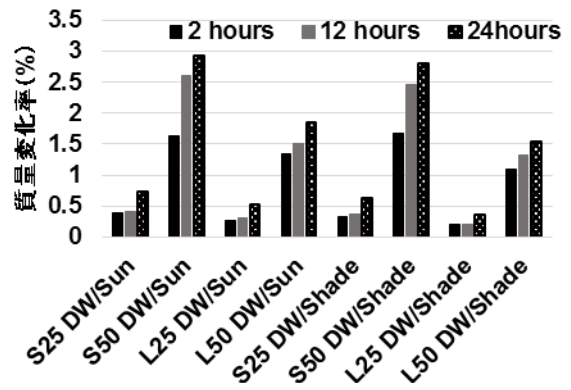


図-14 水中浸漬時間ごとの質量変化率

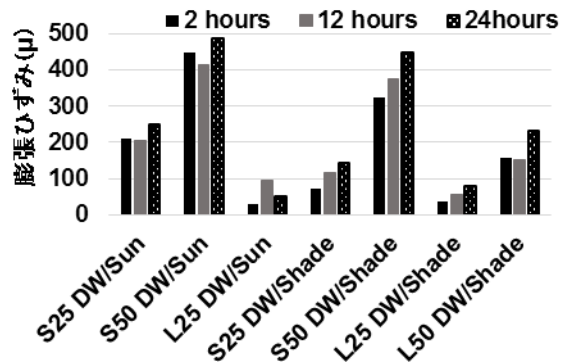


図-15 水中浸漬時間ごとの膨張ひずみ

4.2 日射による収縮ひずみの日変動

3.1 (4)において実環境暴露のうち、特に黒塗り供試体のひずみ変化の特徴が熱膨張の促進によるものと述べた。そこで、図-16,17には乾燥状態・日射有りと日射無し、

および実環境暴露の通常と黒塗り供試体について、ひずみの1日における変動量を比較した。対象とするデータスパンを1日間に限定し、正午付近のひずみ最大値と夕方から夜にかけてのひずみ最小値の差によって算出した。観察した期間は50~55, 60~65日目とし、これは降雨の影響がある程度無視できて、かつ乾燥収縮が落ち着いている時期である。図-16には日射の有無の影響を並べているが、いずれも有為な差は現れておらず、規則性があるとは言えない。図-17ではどちらも実環境暴露のため日射は受けているが、黒塗り供試体はより日射を吸収しやすくなっていることがひずみの日変動からわかる。同種類の通常供試体と黒塗り供試体を比較すると、[S50 Exp]と[S50 Exp/Black]で4倍、中には変化が見られないものもあったが、約2倍程度のひずみ日変動差が現れるものとみてよい。

これらの現象はコンクリートの乾燥収縮と熱膨張の相互作用によって生じている。黒塗り供試体では日射による熱膨張が促進されると同時に、供試体表面部の局所的な乾燥の加速によってその後の乾燥収縮が促進されている。他の供試体シリーズでひずみの日変動差が見られないのは、熱膨張と乾燥収縮が釣り合ったためであり、黒塗りの供試体シリーズではこの釣り合いが崩れたため、ひずみ日変動が活発化したと考えられる。

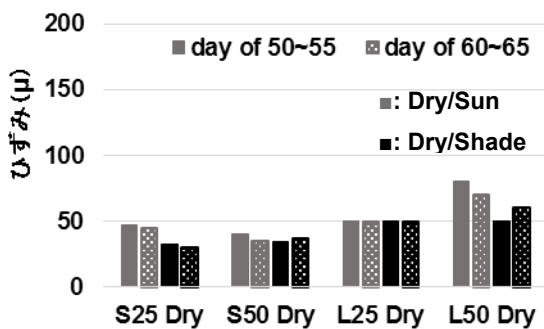


図-16 乾燥状態・日射有り、無しの日変動比較

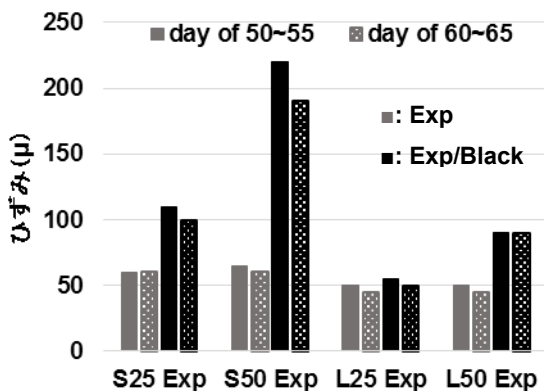


図-17 実環境暴露における通常供試体と黒塗り供試体のひずみ日変動比較

5. まとめ

気象作用のうち特に、降雨と日射がモルタル供試体の時間依存変形に与える影響について判明したことを以下に示す。

- (1) 降雨によってモルタル供試体の乾燥収縮は膨張に転じ、質量は増加する。また、その体積膨張の程度は必ずしも降雨にさらされる時間に依存せず、供試体の寸法・内部空隙構造に依る。
- (2) 日射による熱の吸収を促進させることで、熱膨張が顕著になり、局所のRH低下による乾燥が加速され、ひずみの日変動が増大した。今回は日射の有無においては有為な差異が見いだせなかったが、日射の作用が促進される黒塗り供試体シリーズでは通常よりも2~4倍のひずみ日変動が観察された。

6. おわりに

今回対象としているモルタル供試体は材齢が100日に満たない。既往の研究では年間を通して実環境下で実験を行なっているものもあり^{3),5)}、使用材料と示方配合、供試体形状の点で異なるものの、実験データは同様の傾向をたどっている。だが、本研究においては詳細な体積変化挙動を追跡し、より実環境を細分化した点で異なっている。そのため、短期間で体積変化挙動の蓄積が与える長期的な影響や、降雨を模擬することでの体積変化挙動の評価のために、さらに実験を継続することが必要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 23226011 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 川村満紀, S.Chatterji: コンクリートの材料科学, 森北出版株式会社, 2002.9
- 2) Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Structural Concrete: Taylor & Francis, 2009
- 3) 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.2, pp.35-43, 2010.5
- 4) 田澤栄一, 宮澤伸吾: コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.211-219, 1997.8
- 5) B. Barr, S.B. Hoseinian, M.A. Beygi: Shrinkage of concrete stored in natural environments: Cement & Concrete Composites, Vol.25, pp.19-29, 2003