

論文 乾燥収縮によるひび割れ抑制対策としての遮光・散水の効果の検討

深瀬 晶之^{*1} 渡辺 健^{*2} 平岡 良彦^{*3} 橋本 親典^{*4}

要旨: 本研究ではコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ抑制対策として、日射の遮断および規定日数での湿潤養生後の定期的な散水の効果を実験的に検討するため、夏期に角柱供試体と拘束効果のあるリング供試体を併用した屋外曝露試験を実施した。その結果、透気・透水性がない遮光シートによる日射の遮断により、10%程度の収縮抑制の効果が確認された。また、湿潤養生後も4日に1回の散水を行うことで、散水期間中におけるひび割れ発生を防止して、ひび割れ発生時期を遅延する効果が認められるとともに、7日に1回の散水を継続することで、生じたひび割れ幅の拡大を抑制する効果が認められた。

キーワード: 乾燥収縮, ひび割れ, 遮光, 散水, 屋外曝露試験, リング供試体

1. はじめに

コンクリート構造物の初期ひび割れは、劣化因子の侵入経路となりコンクリート構造物の耐久性を低下させる原因となるため、構造物の品質および耐久性を向上させるためには初期ひび割れを抑制することが重要である。近年、初期ひび割れのひとつであるコンクリートの乾燥収縮に起因するひび割れが問題となっており、これらの乾燥収縮問題に関する検討や研究が進められており、JCIでもコンクリートの収縮問題検討委員会からの報告書が出版されている¹⁾。

夏期に降雨が無く、日差しの強い天候が数日に渡り続いた場合、通常に比べて乾燥収縮の進行が進み、乾燥収縮ひび割れが多発する現象が経験的に知られている。浅本らは、日射が表面部分のコンクリートの局所的な乾燥を促進し、収縮ひび割れを誘発すると指摘している²⁾。夏期の日射や降雨量の極端な減少による乾燥収縮を防止する対策には、遮光シートを敷設して日射を遮ることや、湿潤養生後に定期的な散水と養生マットによりコンクリートを湿潤状態に保つことなどが考えられる。これらの対策が乾燥収縮に及ぼす影響について実環境下で検討した研究事例は少ない。

そこで、本研究では乾燥収縮の抑制対策として「日射の遮断」および「定期的な散水」を検討対象とし、これらの対策が乾燥収縮に与える影響について、開口部を設けたビニールハウスの中に供試体を置き、降雨以外の気温、湿度の環境条件がビニールハウス外と同一な曝露試験（以後、屋外曝露試験という）により実験的な検討を行った。また、当該曝露試験と、本研究室で提案している短時間で最終的

な乾燥収縮量を把握できる急速乾燥収縮試験³⁾（乾燥炉を利用し、炉内温度を40℃として乾燥を促進させる室内試験）による収縮量の比較を行い、降雨の少ない夏期環境条件においても適用できるか検討を行った。

2. 実験概要

2.1 配合および使用材料

今回の実験の配合を表-1に、使用した骨材を表-2に示す。セメントは普通セメント（密度は3.16g/cm³）を使用した。高性能AE減水剤はポリカルボン酸エーテル系化合物が主成分のものを、AE剤にはアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤が主成分のものをを使用した。本実験で実施した試験方法と乾燥収縮抑制対策を表-3、表-4に示す。

2.2 屋外曝露試験

屋外曝露試験における、日射の遮断による乾燥収縮対策を表-3に示す。CASE1を基準とし、CASE2では養生マット（写真-1）、CASE3では遮光シート（写真-2）により覆うことで日射を遮断し、その乾燥収縮低減効果を確認した。今回使用した遮光シートは、ビニール素材で透気・透水性の無いものを使用した。

供試体は角柱供試体（100×100×400mm）を試験ケース毎に3本、リング供試体（外径489mm、肉厚94.5mm、高さ120mm、内側を厚さ20mmの鋼製リングで拘束）を試験ケース毎に3体ずつ作製した。角柱供試体には両側面の中央に1枚ずつひずみゲージを貼り付け、熱電対を1本設置した（図-1）。リング供試体は側面にひずみゲージを3枚貼り付け、角柱と同じく熱電対を1本設置した（図-2）。ASTM

表-1 コンクリート配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量				高性能AE減水剤	AE剤
					W	C	S	G		
20	8±2.5	5±1	46	45	162	353	789	943	C*1%	1A

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 博士前期課程2年 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 博(工) (正会員)

*3 三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 新事業開発室 主席 工修

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)

表-2 使用骨材

骨材の種類	産地	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
細骨材	阿波市市場町産砕砂	2.57	1.77
粗骨材 (5~13mm)	鳴門市撫養町産碎石	2.55	2.30
粗骨材 (13~20mm)	鳴門市撫養町産碎石	2.55	2.16

表-3 日射の遮断に関する試験ケース

検討項目	試験方法	試験ケース	対策
日射の遮断	屋外曝露試験	CASE1	対策無し
		CASE2	養生マット設置
		CASE3	遮光シート設置

表-4 定期的な散水に関する試験ケース

検討項目	試験方法	試験ケース	対策
定期的な散水	屋外曝露試験	CASE2	養生マット設置
		CASE4	養生マット+散水7日に1回
		CASE5	養生マット+散水4日に1回

C 1581-04⁴⁾によると、リング供試体は外径 406mm、肉厚 76mm、高さ 150mm、鋼管の厚さ 12.5mm であり、供試体の下に非吸湿材を敷いたものとしている。本実験では、乾燥収縮を緩やかに進め、抑制対策の効果を明確にするためにコンクリートの肉厚を増して V/S (V: コンクリート体積, S: 大気に接しているコンクリートの表面積) を大きくした。また、ひび割れの発生を確認しやすくするために、鋼管の厚さを ASTM 規格の 1.6 倍の 20mm とし、拘束度を高くした。

リング供試体の側面はひずみゲージ貼り付け後にアルミニウムテープで覆い、下面は非吸湿材であるコンクリー

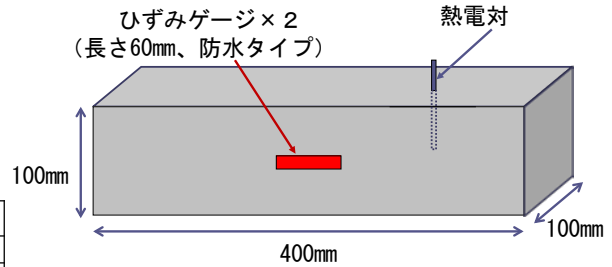


図-1 屋外曝露試験の角柱供試体

トパネルを敷くことにより、水分の蒸散および散水による水分供給をコンクリート上面のみに限定した。コンクリート上面に露出している鋼製リングには円形の発砲スチロールを被せることにより、リングの日射による温度上昇を防止した。

5 日間の湿潤養生完了後、ひずみゲージの設置や上記の処理を終えた供試体 (材齢 7 日) を夏期の降雨がない環境を再現するため、開口部を設けることで通気を確保して温度と湿度を大気と同じ状態にしたビニールハウス内に設置した (写真-3、写真-4)。なお、ビニールハウス内の温度と湿度が大気と同じであるかどうかは、温湿度計を設置



写真-1 養生マット (CASE2, CASE4, CASE5)

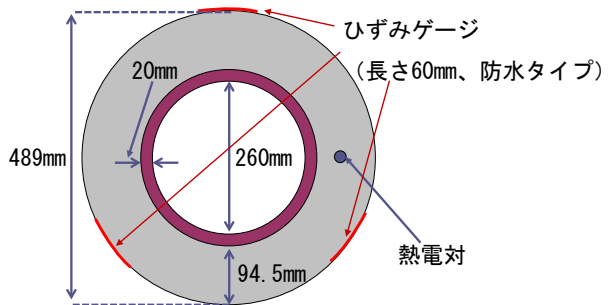


図-2 屋外曝露試験のリング供試体



写真-2 遮光シート (CASE3)



写真-3 屋外曝露試験の供試体

して確認をした。供試体の設置において、角柱供試体は直接地面と接しないように 4cm 角の木材を供試体の下に置き、地面との隙間を確保した。また、リング供試体はコンクリートパネル下面の片側のみに 4cm 角の木材を置き、日射ができるだけ供試体に垂直に当たるよう設置した。

屋外曝露試験での湿潤養生後の定期的な散水（以後、散水という）による乾燥収縮対策を表-4 に示す。CASE2 を基準とし、CASE4 および CASE5 では養生マットで供試体を覆い、散水間隔が 7 日に 1 回および 4 日に 1 回、昼の 12 時頃に散水を行った。散水には、供試体および養生マットが十分に湿潤状態になるまで、各試験ケースの試験体 3 体に対して約 7 リットルの水を使用した。

3. 実験結果と考察

3.1 日射の遮断の影響

(1) 角柱供試体による結果

屋外曝露試験の角柱供試体による結果を図-3 に示す。このひずみの値は供試体 3 体の平均である（各供試体には両側面に 1 本ずつひずみゲージを貼り付けている）。

図-3 より、CASE1 に比べて CASE2 および CASE3 は曝露試験期間 150 日での乾燥収縮量が 80 μ (10%)ほど小さいことが確認された。

また、曝露試験期間 75 日から 110 日（10 月 13 日から 11 月 17 日）にかけて膨張側にひずみが増加していること



写真-4 開口部を設けたビニールハウス

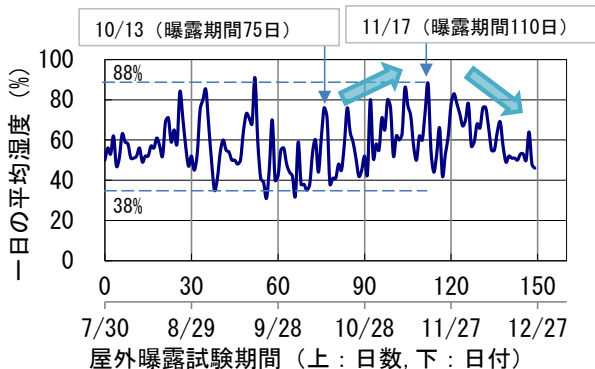


図-4 曝露期間の平均湿度

が確認された。その後 CASE1 では再び収縮側にひずみが増加し、CASE2 および CASE3 ではひずみの増加が CASE1 に比べて小さくなった。この理由については、曝露期間 75 日程度で、乾燥収縮の進行が緩やかになり、それ以降では乾燥収縮ひずみは、湿度による影響が大きいと考えた。そこで、図-4 に曝露試験期間における気象庁 HP で公表している徳島市の 1 日の平均湿度のデータを示し、比較を行った。

図-4 より、曝露試験期間 75 日から 110 日（10 月 13 日から 11 月 17 日）頃にかけて 1 日の平均湿度は 40%~90% 程度であり、マクロ的に見ると湿度は上昇傾向にあり、コンクリート内部の湿度と大気湿度の相対関係でコンクリートが吸湿したため膨張側に推移したと考えられる。井ノ口らは乾燥収縮量とコンクリート内部の湿度には相関関係があり、湿度が上昇すると乾燥収縮量が減少することを示している⁵⁾。曝露試験期間 110 日（11 月 17 日）以降では 1 日の平均湿度が上下しながら低下していくため、ひずみが収縮側に移行していると考えられる。養生マットおよび遮光シートでは、水分の逸散が遅くなっているため収縮ひずみが小さくなったと考えられる。

(2) リング供試体による結果

屋外曝露試験のリング供試体による結果を図-5 に示す。このひずみの値は供試体 3 体の平均である（各供試体には側面にひずみゲージを 3 本貼り付けている）。

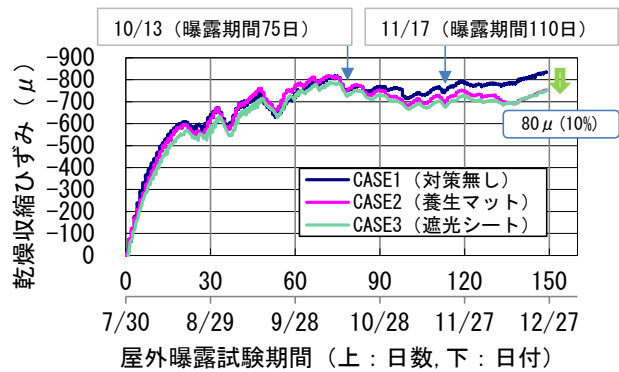


図-3 角柱供試体の乾燥収縮ひずみ (CASE1, CASE2, CASE3)

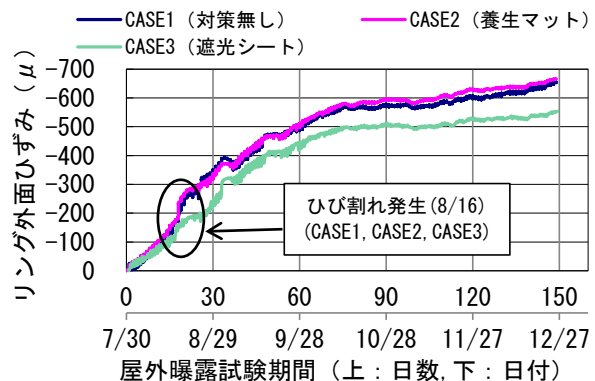


図-5 リング供試体の乾燥収縮ひずみ (CASE1, CASE2, CASE3)

図中の円で囲った箇所は、リング試験体表面の目視観察において確認できるひび割れが発生した時期を示している。いずれのリング供試体においても、ひび割れの発生時期は、曝露試験期間 18 日（8 月 16 日）であり、各 CASE 間において差異を明確に確認することができなかった。これは図-3 に示すように、曝露試験期間 18 日（8 月 16 日）程度まで各 CASE の収縮量に大きな差異がないことと関係しているといえる。

3.2 定期的な散水による効果

(1) 角柱供試体による結果

角柱供試体による結果を図-6 に示す。図-6 より、散水の影響については CASE2 と CASE4 および CASE5 を比較すると、散水を継続している期間において乾燥収縮の抑制効果が認められたが、散水停止後に CASE4 および CASE5 の双方において乾燥収縮が再度進行し、曝露試験期間 150 日での乾燥収縮量はほぼ同程度となった。このことより、散水中は散水による水分の供給により、乾燥収縮が抑制されるが、散水停止後は大気湿度とコンクリート内部の湿度の相対関係で収縮、膨潤があるものの、ある一定期間（本実験の場合 87 日）経過すると散水の効果は無く、散水の有無に係らず同程度のひずみとなると考えられる。

ここで、散水による効果を詳細に確認するため、乾燥収縮が比較的安定して増加した曝露試験期間 8 月 3 日から 8

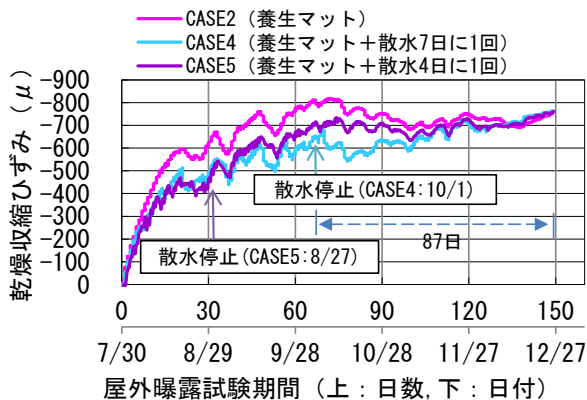


図-6 角柱供試体の乾燥収縮ひずみ (CASE2, CASE4, CASE5)

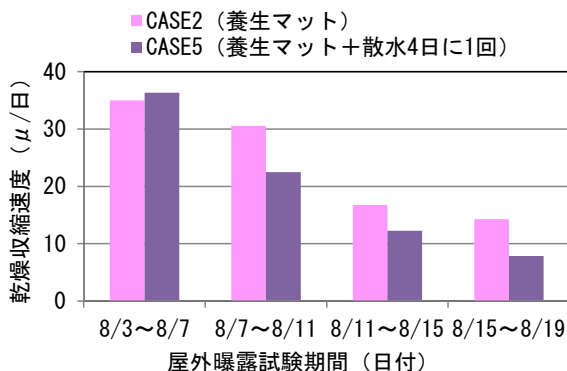


図-8 乾燥収縮速度 (CASE2, CASE5)

月 19 日までを対象として、1 日あたりの乾燥収縮の進行程度を示す指標として乾燥収縮速度を定義して検討した。ここで、本論文において乾燥収縮速度とは「乾燥収縮速度」=「散水直後から次の散水までの乾燥収縮ひずみ」/「散水間隔の日数」で定義した。これらの結果を図-7、図-8 に示す。なお、CASE2 については散水を行っていないので比較する試験 CASE と同じ日数でその期間の乾燥収縮ひずみを除した値を用いた。

図-7 より、曝露試験期間 8 月 6 日から 8 月 13 日の期間では CASE4 の乾燥収縮速度は CASE2 と比較して低下しているが、8 月 13 日から 8 月 18 日では、その低下は確認されなかった。

図-8 より、CASE5 の乾燥収縮速度は、曝露試験期間 8 月 3 日から 8 月 7 日の間においては CASE2 と比較して大きな差異は確認されなかったが、8 月 7 日以降、8 月 15 から 8 月 19 日の期間においても CASE5 で乾燥収縮速度が低下していることが確認された。図-7 の 8 月 6 日から 8 月 13 日と比較して、図-8 の 8 月 3 日から 8 月 7 日の差が小さい理由としては、8 月 3 日から 8 月 7 日までは乾燥収縮速度が大きい、CASE2 と CASE5 とも供試体中に含まれている水分が多いため、散水による水分供給の影響がほとんど生じず、収縮に差が生じなかったためと考えられる。その後、乾燥が進行すると、CASE2 では供試体中の水分量が減少するが、CASE5 では散水による水分をコンクリ

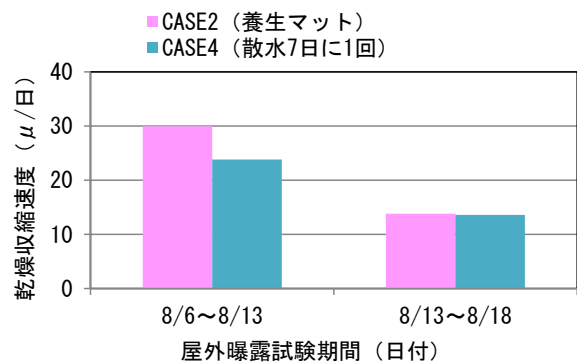


図-7 乾燥収縮速度 (CASE2, CASE4)

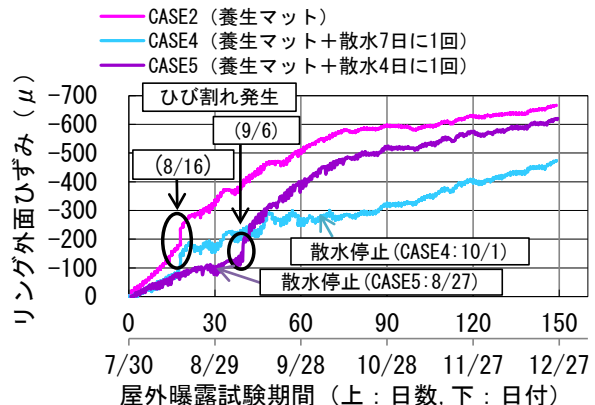


図-9 リング供試体の乾燥収縮ひずみ (CASE2, CASE4, CASE5)

ートが吸水したため乾燥収縮量が減少し、乾燥収縮速度も低下したと考えられる。

これらの結果より、本実験の範囲で乾燥収縮速度を継続的に低下させるためには、散水を7日に1回行うことに比べて4日に1回行うほうが効果的な結果が得られると考えられる。

(2) リング供試体による結果

屋外曝露試験におけるリング供試体の結果を、**図-9**に示す。図中の円で囲った箇所は、リング試験体表面の目視観察において確認できる程度のひび割れが発生した時期を示している。

これらのひび割れ発生時期を各ケースで比較すると、CASE2およびCASE4ではひび割れ発生時期は同じであったが、CASE5においては、ひび割れ発生時期が遅れたことが分かる。CASE4は7日に1回の散水を継続していたがひび割れが発生したことになる。一方、CASE5では4日に1回散水することにより散水継続期間中はひび割れが発生しなかった。このことにより、4日に1回程度の散水を行うと、その期間中の乾燥収縮ひび割れの発生リスクを低く抑えることができる可能性が示された。これは、**図-8**に示したように、繰り返しの散水によりコンクリートが吸水し収縮が抑えられ、乾燥収縮速度が小さくなった効果といえる。

ここで、リング供試体に発生したひび割れの幅について検討した。ひび割れが発生した供試体には、卓越した1本のひび割れが発生していることを確認した。そこで、目視でひび割れ幅が一番大きい箇所を選定し、クラック測定器により計測して比較を行った。このクラック測定器は、13mm×13mmの範囲を撮影し、その範囲に入っているひび割れ幅の平均を算出するものである。また、その時のひび割れの測定結果の一例を**写真-5**に示す。得られたひび割れの経時変化を**図-10**に示す。

図-10より、CASE2とCASE4を比較すると、7日に1回の散水を行ったCASE4では、ひび割れの発生時期は同じであるが、ひび割れ発生後のひび割れ幅は散水停止(10

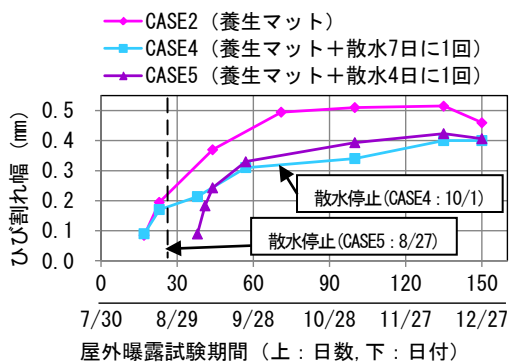


図-10 ひび割れ幅の経時変化(CASE2, CASE4, CASE5)

月1日)までの間、CASE2に比べて抑制される傾向にある。また、CASE5では4日に1回の散水により、ひび割れ発生時期が遅延されており、ひび割れが発生した後はひび割れ幅が大きくなり、曝露試験期間60日程度でCASE4と同程度のひび割れ幅となった。これらの結果より、散水によるひび割れ抑制効果は、散水頻度を多くするとひび割れ発生時期が遅くできるといえる。本実験の範囲では4日に1回の散水で効果が見られた。

CASE2と比較すると、CASE4およびCASE5では曝露試験期間約60日から150日にかけて増大傾向にあり、CASE2とのひび割れ幅の差が小さくなり、その差は約10%程度であるが、最終的なひび割れ幅の抑制効果については、もう少し長期的な観察が必要である。

これらの結果は、ひび割れ幅の最大値での比較であるため、散水によるひび割れの抑制効果については、ひび割れの定量化の手法も含めて、今後もさらなる検討が必要である。

3.3 夏期環境条件における急速乾燥収縮試験の適用性の検討

本研究室では、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートな長さ変化測定法」(以後、JIS法という)の1/4の日数で最終的な乾燥収縮量を把握できる急速乾燥収縮試験³⁾を提案している。この試験は、乾燥炉を利用して炉内温度を40℃

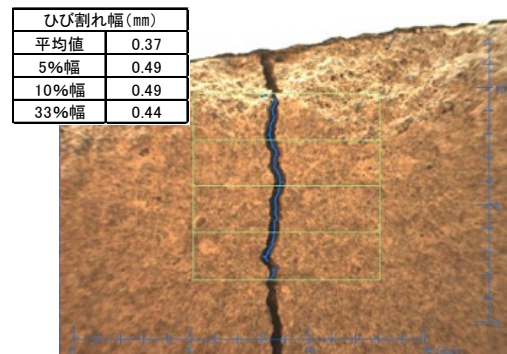


写真-5 リング供試体のひび割れ幅の計測例

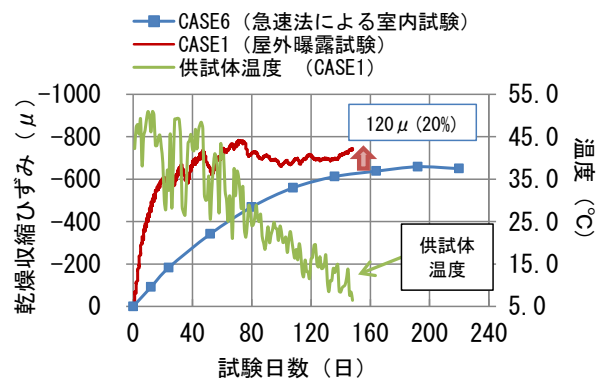


図-11 急速法による室内試験と屋外曝露試験の比較 (CASE6, CASE1)

として乾燥を促進させる室内試験（以後、急速法による室内試験という）である。この試験では、JIS 法による最終的な乾燥収縮量より安全側な値を得ることができる³⁾ことから、種々の収縮ひずみ低減対策を講じた場合の実際の低減効果を短期間で把握するために利用できる。そこで、本節では急速法による室内試験が、降雨の少ない夏期環境条件においても適用できるかどうかを検討した。

具体的には、急速法による室内試験（CASE6）における乾燥収縮量と降雨の少ない夏期環境条件を模擬した屋外曝露試験（CASE1）における乾燥収縮量を比較することで、その適用性を検討した。

急速法による室内試験（CASE6）では、供試体は図-1と同様の寸法のものを使用し、同じくひずみゲージにより乾燥収縮ひずみを計測した。5日間の湿潤養生完了後、ひずみゲージを設置した供試体を乾燥炉内に設置した。長さ変化の計測は、供試体の温度膨張の影響を避けるため、乾燥炉から供試体を取り出し後に、温度 20℃の試験室に 24 時間静置した後に計測を行った。

検討結果を図-11 に示す。図中に示す温度は、屋外曝露試験 CASE1 の角柱供試体の温度を熱電対で測定した結果であり、外気温のピーク温度を示す 13 時 30 分の値である。また、CASE6 については、急速法による室内試験を用いることで、JIS 法の約 1/4 以下の乾燥材齢期間で最終乾燥収縮ひずみを予測できるため、実際に乾燥炉に置いた日数に 4 を乗じた日数を横軸とし、CASE1 と検討条件を同一にした。

図-11 より、CASE6 に比べて CASE1 は試験日数 150 日において乾燥収縮量が約 120 μ （20%）ほど大きい。また、曝露開始から 40 日ごろまで乾燥収縮量の進行が非常に早く、供試体温度も急速法における温度条件の 40℃よりも高く 45℃を超えていることが確認された。よって、今回の屋外曝露試験は、急速法による室内試験の環境よりもさらに厳しい環境条件であったといえる。

以上のことから、夏期の厳しい環境条件を急速法による室内試験に適用させるためには、さらに炉の温度を高く設定するなど試験方法の検討が必要である。

4. 結論

本研究では、乾燥収縮によるひび割れ抑制対策として日射の遮断、定期的な散水の効果について実験的な検討を行った。その結果、明らかになったことを以下に示す。

- 1) 日射の遮断の効果は、角柱供試体の結果により、遮光シートを用いることで 10% 程度の収縮低減効果がある可能性が示された。
- 2) 定期的な散水の効果は、角柱供試体の結果から、散水

継続中は収縮低減効果があるものの、散水を止めると乾燥収縮量は散水を行っていないものと同程度となった。

一方、拘束効果のあるリング供試体の結果から、散水間隔が 7 日に 1 回の供試体では散水を行わなかった供試体と同時期にひび割れが発生したが、散水間隔が 4 日に 1 回の供試体では散水期間中はひび割れが発生せず、ひび割れ発生時期を遅延することが確認できた。

- 3) 今回実施した屋外曝露試験は、炉温度を 40℃として実施する急速法による室内試験よりも厳しい環境であることが示された。

以上の結論は、限られた供試体や環境条件に対する対策効果の結果であるが、これらより現地における乾燥収縮によるひび割れのリスクを低下させるための対策としては、雨水の供給を利用でき、かつ、日射の影響を遮断できる養生マットをコンクリート表面に施設し、湿潤養生後も 4 日に 1 回程度の定期的な散水を実施することが良いと考えられる。ただし、実環境における乾燥収縮対策の効果の定量化については、更なる検討が必要である。

なお、本研究は当研究室と三菱重工鉄構エンジニアリング（株）との共同研究により実施したものである。

参考文献

- 1) （社）日本コンクリート工学会：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書，2010
- 2) 浅本晋吾ほか：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，第 21 巻第 2 号，pp.35-43，2010
- 3) 井上裕貴ほか：骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，第 33 巻第 1 号，pp.473-478，2011
- 4) ASTM C 1581-04：Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage，2004
- 5) 井ノ口公寛ほか：初期養生方法と養生後の環境変化が乾燥収縮に与える影響，土木学会 第 65 回年次学術講演会講演概要集，第 65 巻第 5 号，pp.331-332，2010