

論文 乾湿変化がプレキャストコンクリート製品の変形挙動に与える影響

本田 和也^{*1}・瀧瀬 直登^{*2}・齋藤 尚^{*3}・橋場 正明^{*4}

要旨：乾燥・吸水の影響を受けた PCa 製品の変形挙動を確認するため、乾燥養生と雨を模擬した散水養生を行った排水フリームの開口部の変形量および底版・側壁のひずみの測定を行った。その結果、材齢 100 日まで乾燥養生を行い、材齢 100 日以降に散水養生を行った排水フリームは、散水養生切り替え後に水と接する部分が吸水膨張し、排水フリームの開口部が急激に変形することが確認された。また、材齢 100 日まで散水養生を行い、材齢 100 日以降に乾燥養生を行った排水フリームは、散水養生時に水と接する部分のひずみの挙動が小さくなり、排水フリームの開口部が徐々に変形していくことが確認された。

キーワード：プレキャストコンクリート、膨張、収縮、変形

1. はじめに

近年、建設労働者の減少により、施工現場の省力化を目的として、プレキャストコンクリート製品（以下、PCa 製品）の需要が高まっている。PCa 製品の長所として、天候の影響を受けない専用の工場内にて熟練作業員が製造しているため、一般の現場打ちコンクリートに比べ品質に対する信頼性が高いことが挙げられる。一方、短所として、運搬することが前提となるため、製品の寸法に制約がある。そのため、長大な構造物を施工する場合、施工現場にて各製品を連続的に接合して構造物にするため、継手に対する製品寸法の正確性が要求される¹⁾。

またモルタルやコンクリートは、乾燥により収縮し、吸水によって膨張することが広く知れ渡っており、コンクリートが乾湿変化を受けると、内部応力が作用し、曲げ強度に影響を与えるといった報告^{2,3)}もある。しかし、これらの乾湿変化による収縮・膨張が PCa 製品の変形挙動に与える影響に関しては、あまり検討されていない。

そこで本研究は、PCa 製品が養生中、もしくは現場施工時に乾湿変化の影響を受けた場合の変形挙動を確認することを目的として、農業用プレキャストコンクリート製排水路（以下、排水フリーム）を対象に、乾燥養生・散水養生を行った場合の開口部の変形量および底版・側壁のひずみの測定を行った。

2. 実験概要

2.1 排水フリーム試験体概要

(1) 形状・寸法

本実験に使用した排水フリームの形状、寸法および配筋状況を図-1、写真-1 に示す。縦鉄筋は D10 を 14 本、横鉄筋は D10 を 18 本使用した。また鉄筋は、横鉄筋の中心が外側から 25mm の位置となるよう設置した。

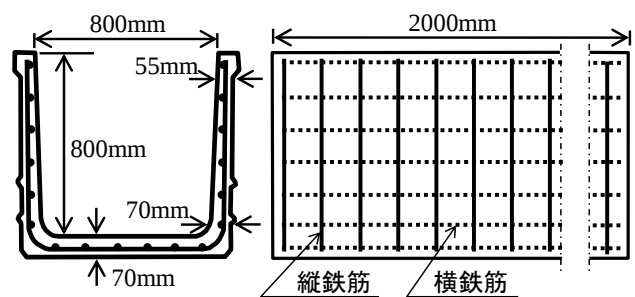


図-1 排水フリームの概略図



写真-1 排水フリーム外観

(2) 製造方法

排水フリームの製造方法は、鋼製型枠内に溶接した鉄筋を配置し、W/C=46.8%、スランプ 21.0cm、空気量 2.4%のコンクリートを打ち込み、バイブレーターにて締固めを行った。蒸気養生は、前置き 15h、昇温速度 10℃/h、最高温度 45℃保持時間無しで、自然冷却後に翌日脱型した。

また排水フリーム製造時に圧縮強度試験用供試体採取し、上記の蒸気養生後、材齢 28 日まで排水フリー

*1 住友大阪セメント（株） 北陸支店 修（工） （正会員）

*2 住友大阪セメント（株） 北陸支店 技術センター長

*3 住友大阪セメント（株） セメント・コンクリート研究所 修（工） （正会員）

*4 （株）ホクエツ北陸 統括工場長

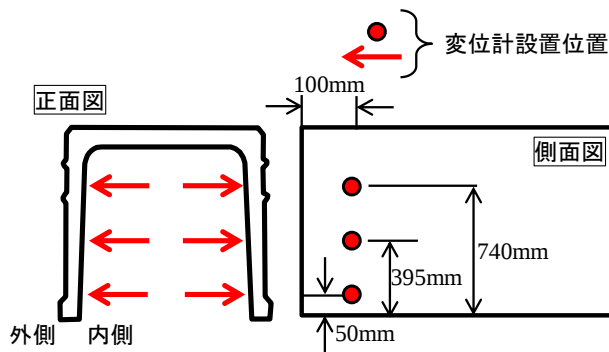


図-2 変位計の設置位置

ームと同一環境下で気中養生を行った。材齢 28 日の圧縮強度は 47.9N/mm^2 であった。

2.2 測定方法

排水フリームの変形量の測定には容量 10mm の高感度変位計を使用し、ひずみの測定にはひずみゲージを使用した。

変位計の設置位置を図-2 に示す。変位計は排水フリーム端部内側に 6 箇所設置した。設置位置は下端部から 50mm、395mm、740mm とし、側壁端部から 100mm の位置の内側に 2 個ずつ設置した。

ひずみゲージの貼付位置を図-3 に示す。ひずみゲージは試験体 1 体当たり 44 枚とし、排水フリームの側壁と底版にそれぞれ貼り付けた。側壁には端部から 50mm 及び中央の内側と外側に各 6 枚貼り付けた。また、底版には端部から 50mm 及び中央の内側と外側に各 6 枚貼り付けた。ひずみの値は各測定箇所には貼り付けたひずみゲージの測定結果の平均とし、図-4 に示すとおり、底版端部、側壁端部、底版中央、側壁中央の内側と外側の合計 8 箇所とした。各測定機器は製造 2 日後までに設置し、その後測定を開始した。なお、排水フリームは木製角材の上に設置した。

2.3 乾燥・散水方法

排水フリームは測定期間中の室温が $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ の屋内にて暴露し、設置方法は工場で設置している状態と同様に開口部が下、底版が上になるように設置した。散水は保管中もしくは運搬中の製品が雨に濡れる状態を想定して、外側のみが濡れるよう散水を行った。なお、散水には上水道を使用した。排水フリーム上部中央にシャワーを設置し、排水フリームの表面が常時濡れている状態になるよう、15 分間の散水を 6 時間間隔で行った。

養生方法は、乾燥養生および散水養生の 2 水準とし、それぞれを組み合わせ実験 A および実験 B とした。実験 A では材齢 100 日まで乾燥養生を行い、材齢 100 日以降に散水養生へ切り替えた。一方、実験 B では材齢 100 日まで散水養生を行い、材齢 100 日以降散に乾燥養生へ切り替えた。

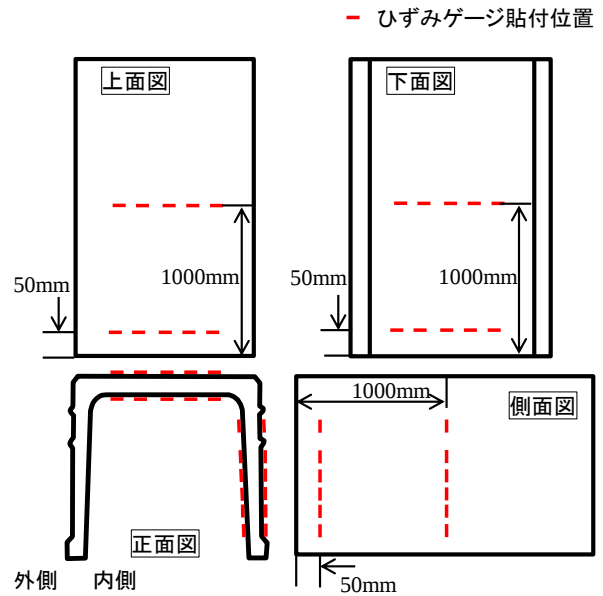


図-3 ひずみゲージの貼付位置

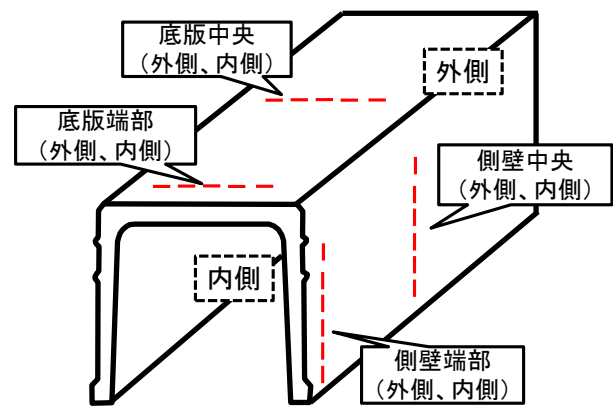


図-4 ひずみゲージの貼付位置の呼称

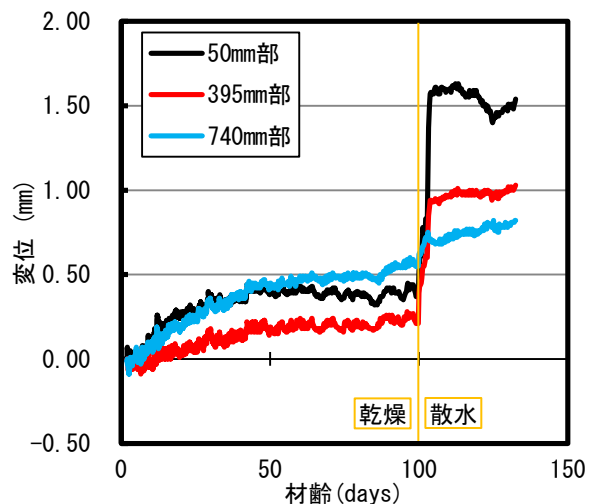


図-5 排水フリームの変形量
(実験 A : 乾燥→散水)

2.4 無筋コンクリートの長さ変化率

今回使用したコンクリートの膨張収縮挙動を確認するため、排水フリーム製造時に無筋の自由膨張収縮供試体として100mm×100mm×400mmの供試体を採取した。養生条件は、2.1に示す蒸気養生を行ったものと蒸気養生なしの2水準とし、それぞれ打込み翌日に脱型し、その後20℃環境下にて6日間の水中養生した後に基長を測定し、20℃60% R.H.の環境下にて長さ変化率の測定を行った。測定にはコンタクトゲージを使用した。測定日は7, 14, 28, 56, 91, 182, 229日とし、229日以降は20℃環境下にて水中養生を実施し、水中養生開始後1, 3, 7, 14, 28日までの長さ変化率を測定した。また、長さ変化率の測定に併せて、質量変化率の測定も実施した。

3. 実験結果

3.1 排水フリーム開口部の変形量

(1) 実験 A (乾燥養生→散水養生)

図-5に排水フリームの変形量の測定結果を示す。一般的に排水フリームの製品の寸法を測定する場合、開口部の内幅が測定されている。そのため、変形量は排水フリームの内幅の長さを想定して、下端部から50mm, 395mm, 740mmの位置に設置した各2箇所の変位計の測定した値の和とした。なお、図中の変位は、プラスの場合、開口部の内幅が小さくなっている状態を示している。

材齢100日までの乾燥養生期間では、いずれの測定箇所も材齢の経過に伴い変形量が大きくなり、下端部から740mmの位置において、最大で0.60mm内側に変形することが確認された。

材齢100日以降の散水養生期間では、急激に変形量が大きくなり、下端部から50mmの位置において、最大で1.63mm内側に変形した。なお、下端部から50mmの位置の変形量が最も大きく、散水養生開始前後で1.18mm変形する結果となり、最終的な変形量の大きさは、50mm>395mm>740mm(設置位置)となった。

(2) 実験 B (散水養生→乾燥養生)

図-6に排水フリームの変形量の測定結果を示す。材齢100日までの散水養生期間では、いずれの測定箇所も材齢の経過に伴い変形量が大きくなり、下端部から50mmの位置において、最大で2.00mm内側に変形することが確認された。なお最終的な変形量の大きさは、50mm>395mm>740mm(設置位置)となった。

材齢100日以降の乾燥養生期間では、大きな変化は確認されなかった。

3.2 排水フリーム底版・側壁のひずみ

(1) 実験 A (乾燥養生→散水養生)

図-7に排水フリームの内側のひずみの測定結果を

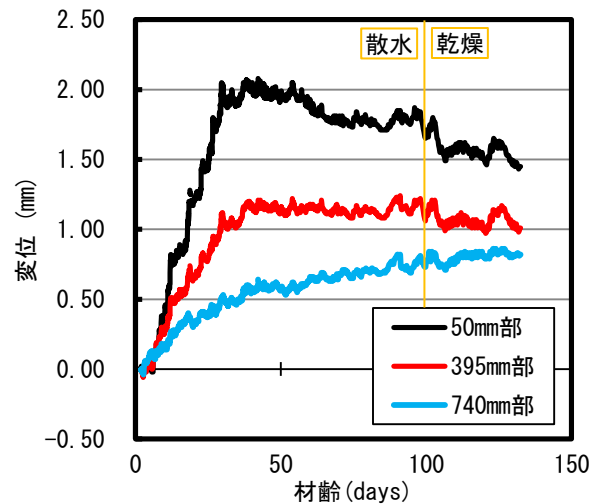


図-6 排水フリームの変形量
(実験 B : 散水→乾燥)

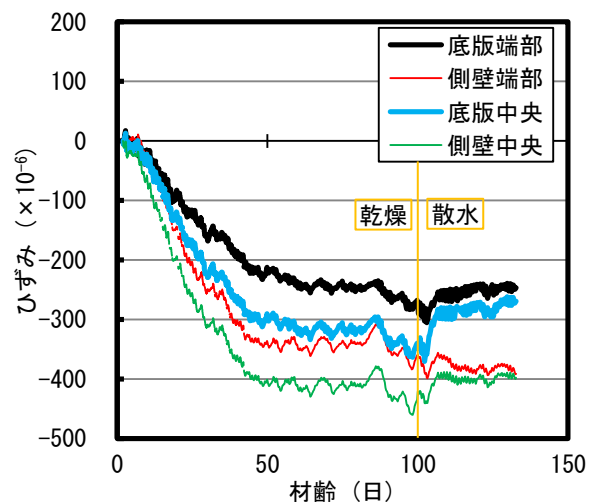


図-7 排水フリーム内側のひずみ
(実験 A : 乾燥→散水)

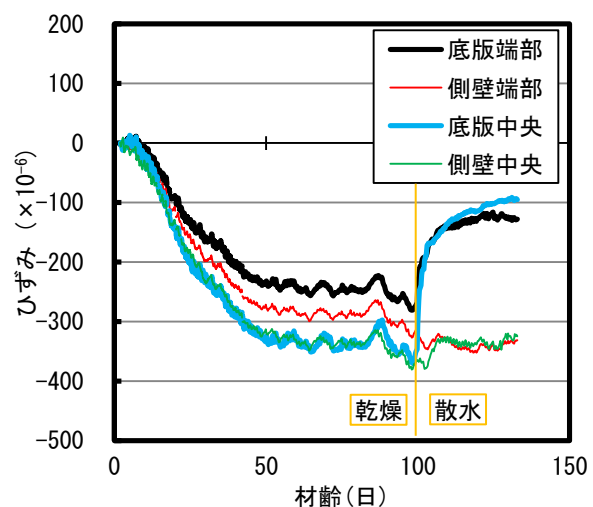


図-8 排水フリーム外側のひずみ
(実験 A : 乾燥→散水)

示す。材齢 100 日までの乾燥養生期間では、いずれの測定箇所も収縮しており、散水養生開始直前のひずみは、底版端部で -268μ 、側壁端部で -360μ であり、底版中央で -340μ 、側壁中央で -421μ であった。材齢 100 日以降の散水養生開始以降のひずみは、いずれの測定箇所も膨張傾向にあり、最大で膨張した底版中央は 80μ 程度膨張することが確認された。

図-8 に排水フリームの外側のひずみの測定結果を示す。材齢 100 日までの乾燥養生の結果では、いずれの測定箇所も収縮しており、散水養生開始直前のひずみは、底版端部で -270μ 、側壁端部で -321μ であり、底版中央で -347μ 、側壁中央で -364μ であった。材齢 100 日以降の散水養生開始以降のひずみは、直接水に接する底版端部と底版中央では散水直後に急激に膨張しており、それぞれ最大で 150μ 、 250μ 膨張する結果となった。これら値は図-6 に示す排水フリーム内側の膨張量よりも大きい値であった。

図-7、図-8 の結果から、材齢 100 日までの乾燥養生期間では、外側と内側で大きな差は生じなかったが、材齢 100 日以降の散水養生開始以降では外側と内側で膨張収縮挙動に差が生じており、特に散水の影響を直接受ける底版においてその傾向が顕著に現われていることが確認された。

図-9 に内側と外側のひずみの差を示す。ひずみの差は、“外側のひずみ-内側のひずみ”と定義し、+の値であれば外側が内側に比べ収縮していることを示している。材齢 100 日までの乾燥養生期間のひずみの差に関して、底版端部と底版中央においては、大きなひずみの差は確認されなかった。一方、側壁端部と側壁中央においては、測定開始後から徐々に値が大きくなり、内側が外側に比べ側壁端部で 50μ 、側壁中央で 60μ 収縮していることが確認された。材齢 100 日以降の散水養生開始後のひずみの差に関しては、底版にて急激に大きくなり、内側が外側に比べ底版端部で約 110μ 、底版中央で約 150μ 大きくなることが確認された。また、側壁端部と側壁中央においては、大きな変化は確認されなかった。

(2) 実験 B (散水養生→乾燥養生)

図-10 に排水フリームの内側のひずみの測定結果を示す。なお、ひずみの測定データに関して、外側の底版端部と側壁端部以外のデータは材齢9日から40日までの間、ノイズの発生により、採取することができなかった。材齢 100 日までの散水養生期間では、いずれの測定箇所も収縮しており、散水養生開始直前のひずみは、底版端部で -248μ 、側壁端部で -362μ であり、底版中央で -155μ 、側壁中央で -262μ であった。材齢 100 日以降の乾燥養生開始以降のひずみは、いずれの測定箇所も収縮傾向にあることが確認された。

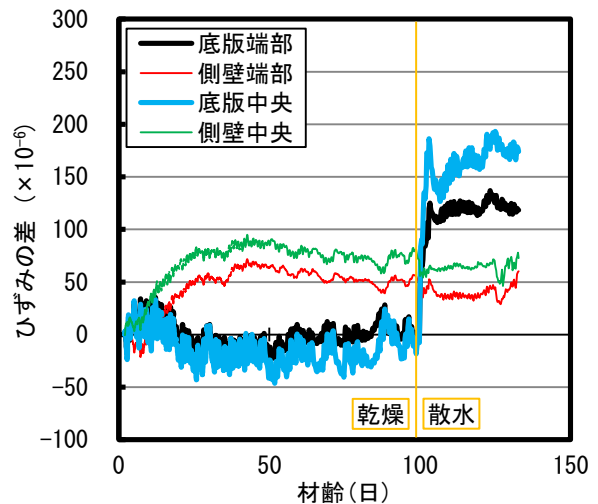


図-9 内側外側のひずみの差
(実験 A : 乾燥→散水)

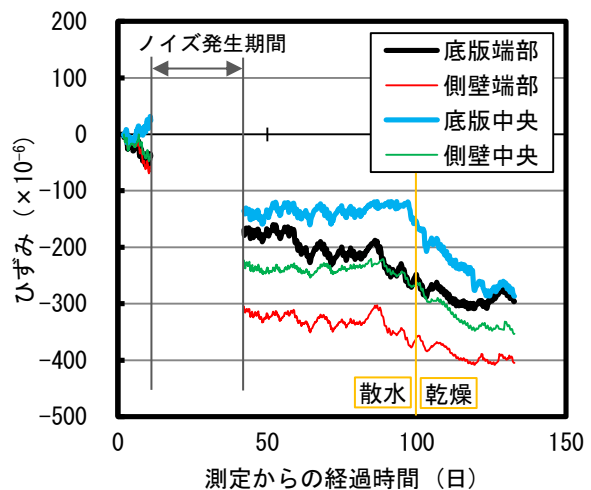


図-10 排水フリーム内側のひずみ
(実験 B : 散水→乾燥)

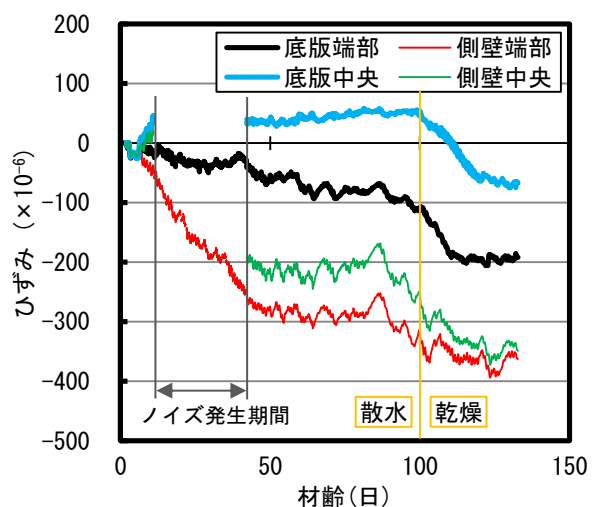


図-11 排水フリーム外側のひずみ
(実験 B : 散水→乾燥)

図-11 に排水フリームの外側のひずみの測定結果を示す。材齢 100 日までの散水養生期間では、膨張している測定箇所もあり、散水養生開始直前のひずみは、底版端部で -114μ 、側壁端部で -315μ であり、底版中央で 55μ 、側壁中央で -252μ であり、水と接する底版中央は膨張する結果となった。材齢 100 日以降の乾燥養生開始以降は、いずれの測定箇所も収縮傾向にあることが確認された。

図-12 に内側と外側のひずみの差を示す。材齢 100 日までの散水養生期間では、底版にひずみの差が確認され、乾燥養生開始直前において、内側が外側に比べ底版端部で 138μ 、底版中央で 199μ 収縮していることが確認された。一方、側壁に関しては、乾燥養生開始直前において、内側が外側に比べ側壁端部で 48μ 、側壁中央で 19μ 収縮していることが確認された。材齢 100 日以降の乾燥養生開始以降のひずみの差は、底版端部では小さくなり、底版中央では大きくなる結果となった。また、側壁端部と側壁中央では大きな変化は確認されなかった。

3.3 変形メカニズムに関する考察

図-13 に無筋コンクリートの長さ変化率の測定結果、図-14 に無筋コンクリートの質量変化率の測定結果を示す。測定 229 日までの長さ変化率は蒸気養生ありが -838μ 、蒸気養生なしが -845μ であった。また質量変化率は蒸気養生ありが -2.42% 、蒸気養生なしが -2.35% であった。

水中養生開始後の各測定結果に関して、長さ変化率は水中養生 1 日後にて蒸気養生ありが -560μ 、蒸気養生なしが -563μ と、ともに約 280μ 膨張する結果となった。さらに水中養生 28 日後では蒸気養生ありが -416μ 、蒸気養生なしが -411μ となり、約 430μ 膨張する結果となった。また、質量変化率は水中養生 1 日後で蒸気養生ありが -1.17% 、蒸気養生なしが -1.09% と、約 1.25% 吸水する結果となった。さらに水中養生 28 日後では蒸気養生ありが -0.58% 、蒸気養生なしが -0.53% と、ともに約 1.8% 吸水する結果となった。

これらの乾燥収縮と吸水膨張に関する知見は、研究者によって様々な意見⁴⁾があり、現在も研究が進められている。排水フリームの場合では無筋コンクリートと形状や内部鉄筋による拘束条件が異なり、水の供給状況も異なるため、ひずみの大きさに違いはあるが、今回使用したコンクリートが、227 日間の乾燥で約 840μ 収縮し、約 400μ 吸水膨張することが確認できた。

また、今回の結果では、蒸気養生の有無による長さ変化率の測定結果に大きな差は確認されなかった。一般的に蒸気養生を行うことで乾燥収縮が小さくなること⁵⁾が知られているが、今回の実験では蒸気養生の温度が低く、時間も短かったため、差が生じなかったと思われる。

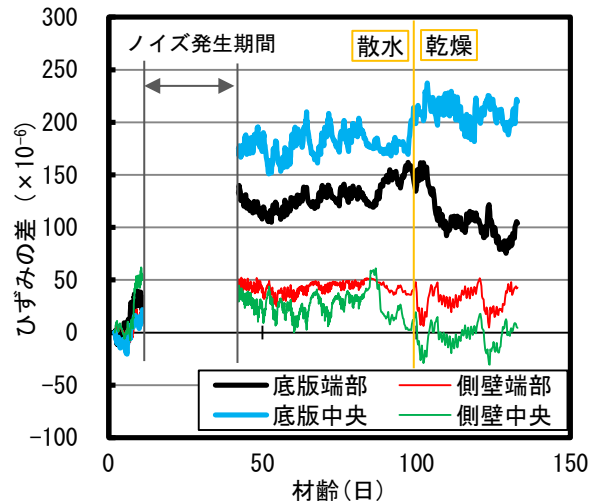


図-12 内側外側のひずみの差
(実験 B : 散水→乾燥)

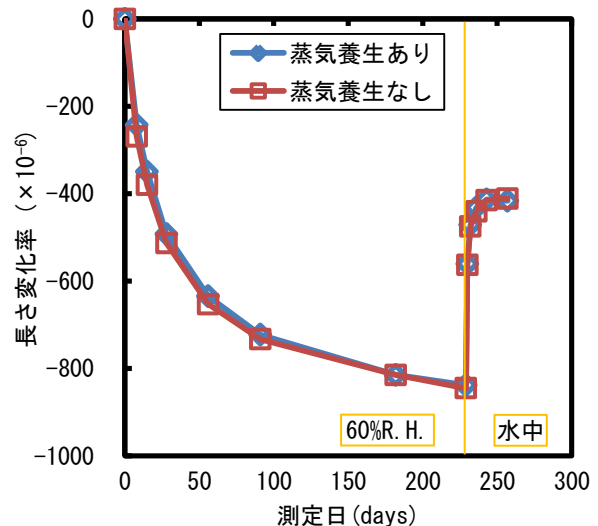


図-13 無筋コンクリートの長さ変化

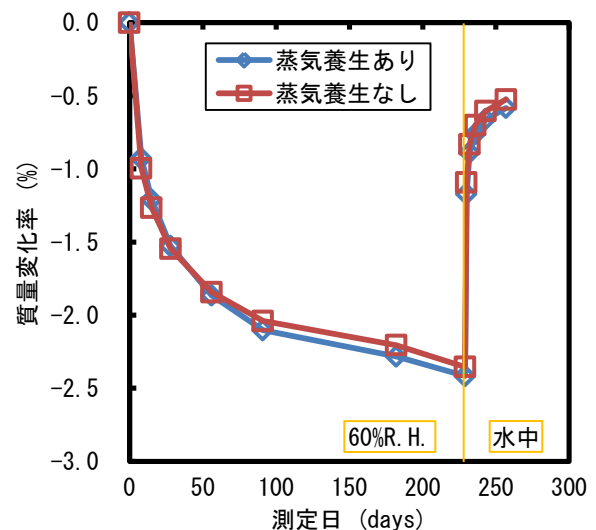


図-14 無筋コンクリートの質量変化率

実験 A および B について、排水フリュームの開口部の変形が生じたメカニズムに関する考察を下記に示す。まず実験 A に関して、材齢 100 日までの乾燥養生では、底版において、外側と内側はともに乾燥収縮しているものの両者の差は小さく、開口部の変形に与える影響は小さい。一方、側壁では外側の乾燥収縮量が内側よりも大きくなり、開口部の変形に影響したと考えられる。また、材齢 100 日以降の散水養生開始以降では、水と接する外側の底版のコンクリートが吸水膨張し、内側と外側でひずみの差が発生し、開口部の変形が生じたと推察される。

次に実験 B に関して、材齢 100 日までの散水養生では、水と接する外側の底版において、側壁端部は収縮が小さく、側壁中央は膨張したが、水と接しない内側の底版は乾燥収縮により収縮していくため、外側と内側でひずみの差が発生し、排水フリュームが変形したものと推察される。その後の乾燥養生では、材齢 130 日まではいずれの測定箇所も一様に収縮しているため、内側外側の膨張収縮の差に大きな変化は確認されなかった。

以上より、外部からの水の影響によって、部材内外でひずみの差が生じ、それが開口部の変形に及ぼす要因であることが示された。今後は開口部の変形を抑制するための方法を検討し、より製品寸法の正確性が図れるようにすることが課題として挙げられる。また、今回の実験では部分的な散水を行った場合の短期間の変形挙動を確認したが、供用後に変形による不具合が確認された事例は少ない。これは敷設後に通水や土壌から水が長期間供給されることにより、変形が緩和していくためと推察される。

4. 総括

本実験で得られた結果を、下記にまとめる。

- (1) 材齢 100 日まで乾燥養生を行い、材齢 100 日以降に雨を模擬した散水養生を行った排水フリュームは、乾燥養生時の変形が小さいが、散水養生に切り替えた後に変形することが確認された。これは、散水養生開始直後に水と直接接する外側の部材が急激に吸水膨張することで、内側とのひずみの差が生じ、変形を引き起こしたものと考えられる。
- (2) 材齢 100 日まで散水養生を行い、材齢 100 日以降に乾燥養生を行った排水フリュームは、散水養生開始後から変形し、2.00mm 程度まで変形することが確認された。これは、散水養生にて直接水と接する外側の部材が、膨張もしくは乾燥収縮が小さく、内側の部材は乾燥収縮することで、徐々にひずみが大きくなり、変形したものと考えられる。

参考文献

- 1) 國府勝郎：プレキャストコンクリート製品の技術－性能規定を目指して－，セメント新聞社，2014.10
- 2) 宮沢伸吾，田澤栄一：セメント系材料の曲げ強度に及ぼす不均一な乾燥収縮応力の影響，土木学会論文集，No.426/V-14，pp.121-129，1991.2
- 3) 来海豊：水セメント比と乾湿がコンクリートの曲げ強度に及ぼす影響：コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.429-434，2004.6
- 4) 丸山一平，岸直哉：セメント硬化体の収縮理論，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.642，pp.1395-1403，2009.8
- 5) 呉承寧，今井昌文，佐藤重一，小林俊秋：コンクリートの収縮に及ぼす使用材料，配合および養生方法の影響，プレストレストコンクリート技術協会第 9 回シンポジウム論文集，pp.731-734，1999.10