

論文 遠心成形コンクリートの収縮特性と強度分布特性に関する研究

松井 淳史^{*1}・伊藤 始^{*2}・宮田 真人^{*3}・水谷 征治^{*4}

要旨：通常のコンクリートに関するひび割れ分散性は、以前より様々な側面から研究が行われており、多くの設計式が提案されてきた。しかし、遠心成形コンクリートを対象にひび割れ分散性の関する研究の事例は少ない。著者らは、遠心成形コンクリートにおけるひび割れ挙動の研究を進めている。遠心成形コンクリートの長期的なひび割れ進展を把握するためには、収縮ひずみ特性を把握することが重要となる。本研究は、遠心成形コンクリート製の円筒試験体を用いて、相対湿度の異なる環境下での収縮試験を行い、収縮ひずみを測定した。加えて、収縮試験で用いた円筒試験体を使用し、小径コアの圧縮強度試験により断面内の強度分布を確認した。

キーワード：遠心成形、振動成形、収縮ひずみ、強度分布、水分移動、常圧蒸気養生

1. はじめに

コンクリート二次製品のうち、杭やヒューム管、ポールなどの円筒型の製品は、遠心成形により製造されることが多い。遠心成形されたコンクリートは、製造過程で脱水されるため、一般の現場打ちコンクリートに比べて高強度なコンクリートが得られることや促進養生により早期に脱型できることから、工場製品としてのメリットが大きい。

遠心成形コンクリート製品が長期にわたってその性能を保持し安全に使用されるためには、対象となるコンクリートのひび割れ挙動を把握することが重要となる。

遠心成形コンクリートの長期的なひび割れの進展をより精度よく解析上で表現または予測するためには、コンクリートがこれまでに受けた収縮ひずみや今後受ける収縮ひずみを把握することが必要である。

著者らは、遠心成形コンクリートのひび割れ分散性について両引き引張試験から得られたデータをもとに解析モデルを選定し、応力-ひずみ関係、ひび割れ幅およびひび割れ間隔に焦点をあてて研究を進めてきた¹⁾。

本研究では遠心成形コンクリート製の円筒試験体を用いて収縮試験を行い、遠心成形コンクリートの長期的なひび割れ挙動の把握のために収縮特性を調べた。加えて、遠心成形コンクリートは、製造上の特性から断面内に材料の偏りが生じ、収縮特性や強度分布特性の分布を生じることが知られている。そこで、本研究では遠心成形コンクリート製の円筒試験体から小径コアを採取し、圧縮強度試験を行うことにより強度分布を検討した。研究は、図-1に示す流れの通りに行った。

2. 収縮試験の試験方法

2.1 使用材料

遠心成形コンクリート製の円筒試験体の製作に使用した材料は、表-1に示すとおりである。これらの材料を使用し、設計強度 63.7N/mm^2 でコンクリートの配合を決定した。水セメント比 W/C は 36.3% で、遠心成形前の単位水量は 178kg/m^3 とした。スランブは、 $20\pm 2\text{cm}$ で管理した。

2.2 試験ケース

収縮試験は、相対湿度を 45% と 60% の 2 水準に変化させた恒温恒湿室で行った。試験体形状は、図-2に示す

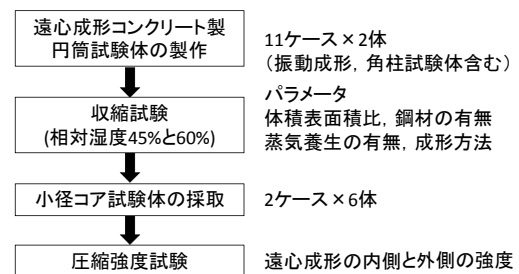


図-1 研究の流れ

表-1 使用材料

使用材料	物理的性質など
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm^3 , 比表面積: $3,340\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材(S)	栃木県産沼砕石(硬質砂岩) 密度: 2.63g/cm^3
粗骨材(G)	茨城県産瀬産砕砂(硬質砂岩) 密度: 2.62g/cm^3 , G_{max} : 13mm
混和剤	高性能減水剤

*1 富山県立大学 短期大学部 環境システム工学専攻 (正会員)

*2 富山県立大学 短期大学部 環境システム工学専攻 准教授(工学部環境工学科 兼任) 博(工) (正会員)

*3 東京電力(株) 技術開発研究所 主任 修(工)

*4 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 (正会員)

表-2 実験ケース

No.	相对湿度(%)	形状	成形方法	乾燥面(S/V)	鋼材配置	養生方法	
D45-1	45	円筒	遠心	全面(0.056)	無し	蒸気	
D45-2				外面(0.031)			非緊張用鋼材
D45-3					無し	普通	
D45-4							
D60-1	60				全面(0.056)	無し	蒸気
D60-2					外面(0.031)		
D60-3						緊張用鋼材	
D60-4						非緊張用＋緊張用	
D60-5		角柱	振動	全面(0.045)	無し		
D60-6				上下面(0.031)			
D60-7							

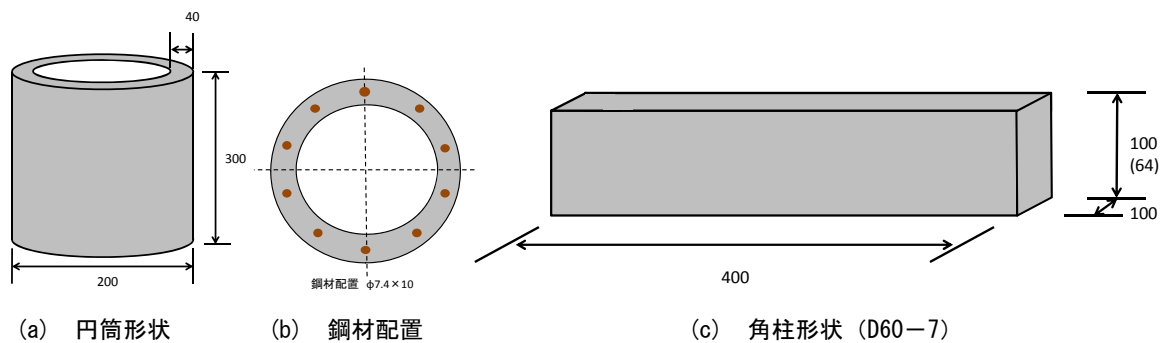


図-2 試験体の形状寸法

形状のものを用い、相対湿度 45% で円筒試験体とし、相対湿度 60% で円筒試験体と角柱試験体とした。実験ケースを表-2 に示す。実験ケースの表記については、D (dry) 45 および 60 が、それぞれ相対湿度 45%、60% を示し、以降の数字はシリーズごとに順番を付した。D45 シリーズにおける実験要因は、乾燥面、鋼材の有無、養生方法とし、D60 シリーズにおける実験要因は、乾燥面、鋼材の有無、成形方法とした。試験体数は各ケース 2 体とした。

実験ケースのうち、全面を暴露したケースは D45-1、D60-1、D60-6 である。その他のケースでは乾燥面を制限した。乾燥面の制限は、円筒試験体の場合、上下の円筒断面を断面中央の中空部も含めてアルミテープで覆うことで行った。角柱試験体の場合、上下面以外の側面をアルミテープで覆うことで行った。今回の実験では、体積 V を一定として表面積 S を変化させたため、体積表面積比 V/S^2 の逆数の表面積体積比 S/V を用いた。表面積体積比 S/V (V/S) は 0.056 (17.6)、D45-1 および D60-1 で 0.031 (32.0)、D60-6 で 0.045 (22.2) とした。

鋼材を配置したケースは、D45-3、D60-3、D60-4、および D60-5 の 4 ケースである。直径 7.4mm の異形鉄筋を用い、図-2 (b) のように断面に 10 本配置した。実験ケースに示した「非緊張用鋼材」、「緊張用鋼材」は、実製品で非緊張状態および緊張状態で使用される鋼材であり、ここでは鋼材種類の違いを表し、試験体では鋼材を緊張状態にはしていない。

D45-4 を除く試験体は、脱型直後に最高温度 70℃ で蒸気養生を行った。D45-4 は脱型後、蒸気養生は行わず乾燥開始までビニールシートで覆い静置した。

2.3 試験体概要と測定方法

試験体寸法を図-2 に示す。収縮試験に用いた円筒試験体の寸法は、外径 200mm、部材厚 40mm、高さ 300mm である (図-2 (a))。円筒試験体の製作は、鋼製の円形型枠内にコンクリートを投入し、最大加速度 28G、総遠心時間 5 分で遠心締め固めを行った。

収縮試験に用いた角柱試験体の寸法は、D60-6 の場合、断面 100×100mm、D60-7 の場合、断面 64×100mm であり、長さは共通して 400mm である (図-2 (c))。角柱試験体の製作は、鋼製の角柱型枠内にコンクリートを投入し、振動締め固めによって行った。

全ての試験体は、材齢 3 日までは封緘養生し、材齢 3 日から恒温恒湿室に静置し、それぞれ所定の湿度下での乾燥を始めた。恒温恒湿室での乾燥を始める直前に、試験体にゲージプラグを対局の位置に 2 か所設置し、標定距離 200mm とした。また、乾燥面を制限するケースはアルミテープ処理を施した。

収縮ひずみの測定は、コンタクトゲージを使用し長さ変化率を算出した。測定日は、相対湿度 45% の場合、乾燥開始 7、13、14、17、18、19 週を除いて 21 週まで各週で測定した。相対湿度 60% の場合、乾燥開始 4 週まで各週で測定し、以降は 8、13、26 週に測定した。

3. 収縮試験の試験結果

3.1 試験結果

収縮試験の結果を図-3に示す。試験体1体につき、ゲージプラグを設置した2か所から得られた値を平均したものをその試験体の収縮ひずみ値とし、各ケース2体の平均値をそのケースの収縮ひずみとして、図-3で用いた。試験終了時における試験体2体の収縮ひずみの差は、相対湿度45%の場合2.1~15.9%、相対湿度60%の場合0.6~11.2%であった。図中の破線は、配合や暴露した乾燥面、相対湿度の条件のもとに土木学会・コンクリート標準示方書に示された収縮ひずみの算定値を示した²⁾。

(1) 相対湿度 45%

相対湿度45%における収縮ひずみは、乾燥開始から急激に増加し始め、乾燥開始4週後で全面を乾燥したD45-1は550 μ 程度、蒸気養生をしていないD45-4は400 μ 程度、乾燥を制限したD45-2および非緊張鋼材を配置したD45-3は300 μ 程度まで増加した。その後、収縮ひずみの増加量はやや緩やかになり、乾燥開始12週以降大きな収縮ひずみの増加は見られなかった。D45-1は、その他のケースより大きな収縮ひずみを示し、試験終了時(21週時)の最終ひずみは701 μ であった。その他の3ケースに関しては、最終ひずみが500 μ 程度であった。乾燥開始から試験終了まで一貫して、D45-1の収縮ひずみが最も大きく、次にD45-4、D45-2、D45-3の順番で収縮ひずみが大きく測定された。

(2) 相対湿度 60%

相対湿度60%における収縮ひずみは、図-3(b)に示すように相対湿度45%の試験結果に比べて、ケース間の収縮ひずみの差は小さかった。乾燥開始後の急激な収縮ひずみの増加は、ケースごとに違いはあるものの乾燥開始4週まで続いた。乾燥開始4週までで、最も大きな収縮ひずみを示したケースは全面を乾燥したD60-1で、最も小さな収縮ひずみを示したケースは鋼材(非緊張+緊張)を配置したD60-5であった。28日以降、全てのケースで同様の収縮ひずみ増加量を示し、収縮試験を終え

た乾燥開始26週時点で最大の収縮ひずみを示したケースと最小の乾燥収縮ひずみを示したケースの差は150 μ 程度であった。

(3) 算定値との比較

実験値をコンクリート標準示方書の算定値と比較すると、D45-1を除くケースで小さな収縮ひずみを示した。D45-1以外のケースを対象にした算定値は、実験値に比べて、乾燥開始約83日時点で200 μ 程度大きかった。このことから、遠心成形コンクリートの収縮ひずみは、通常のコンクリートより小さくなり、示方書等の算定式を直接適用できないことが確認できた。

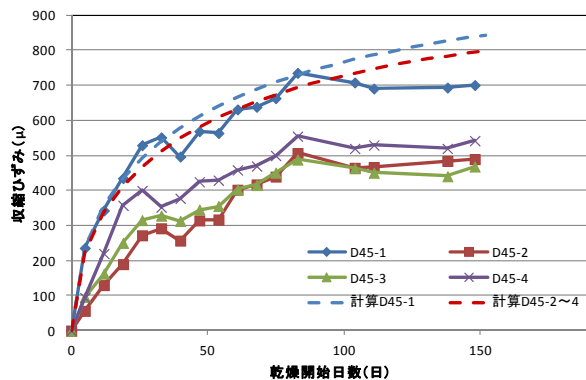
3.2 各要因の影響

乾燥面、鋼材の有無、成形方法および養生方法の違い、相対湿度の違いが収縮特性に与える影響を検討した。その結果を図-4から図-7に示す。乾燥開始直後の収縮ひずみの増加量が大きい期間では、収縮ひずみのケースごとに明確な傾向が表れなかった。それに対して、収縮ひずみ増加量が減少し始める乾燥開始約80日以降、ケースごとの傾向が表れた。

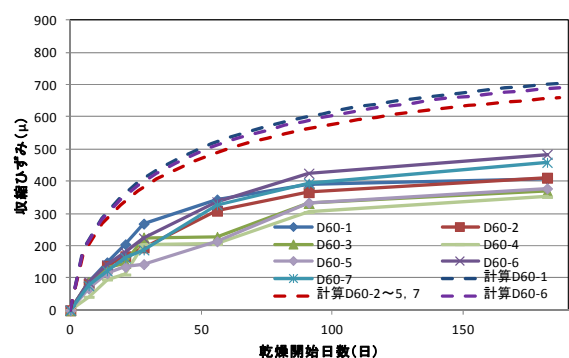
このことから、各要因の詳細な検討は、収縮ひずみの増加量が小さくなり始めた範囲の中で、相対湿度45%および60%の乾燥開始からの日数が近いときの収縮ひずみを用いて行った。各要因の詳細な検討のためのグラフは、相対湿度45%の場合に乾燥開始83日の測定値、相対湿度60%の場合に乾燥開始91日の測定値を用いて作成した。加えて、グラフには、要因によって収縮ひずみが小さくなったケースの結果(赤棒グラフ)を、同要因において収縮ひずみが大きくなったケースの結果(青棒グラフ)で除して収縮ひずみの減少率を求め、記載した。

(1) 乾燥面の影響

乾燥面に関する影響を検討したグラフを図-4に示す。図-4では、各相対湿度において、全面乾燥と乾燥面を制限して収縮試験を実施した円筒試験体または角柱試験体の結果を比較した。表面積体積比S/Vの増加による収縮ひずみの増加は、全てのケースで現れた。相対湿度45%



(a) 相対湿度 45%



(b) 相対湿度 60%

図-3 収縮試験結果

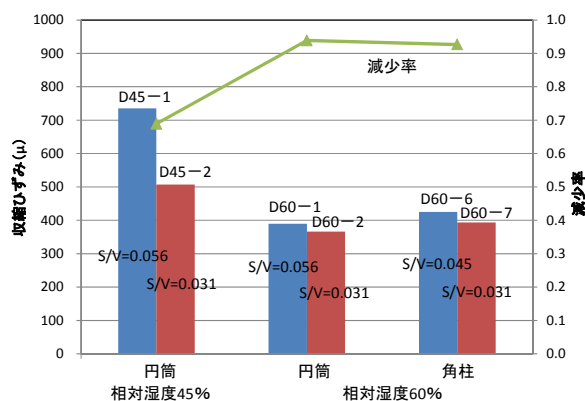


図-4 乾燥面の影響

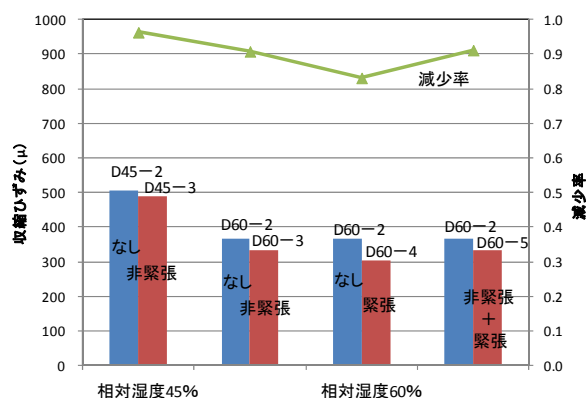


図-5 鋼材の有無による影響

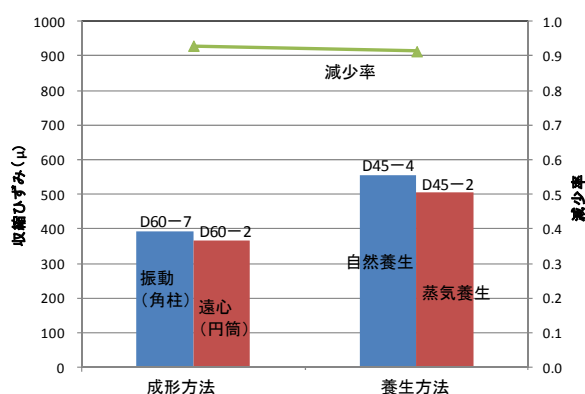


図-6 成形方法および養生方法の影響

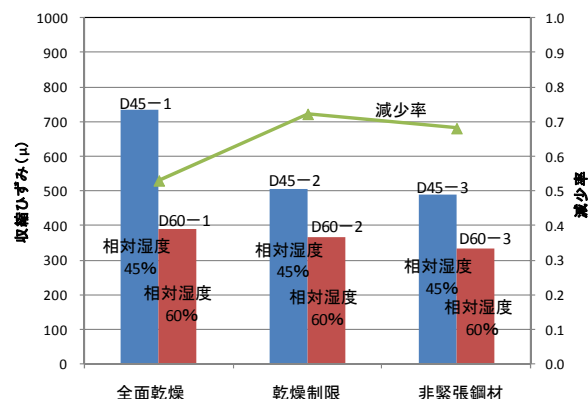


図-7 相対湿度の影響

における円筒試験体の検討では、S/V の違いによる収縮ひずみの差が 200 μ 程度と大きく、S/V の違いによる減少率は 0.69 であった。相対湿度 60% における円筒試験体および角柱試験体の検討では、収縮ひずみの差がいずれも 50 μ 未満で小さかった。試験体形状ごとの S/V の比は、円筒試験体で 1.82 倍、角柱試験体で 1.44 倍である。S/V の比は、円筒試験体の方が角柱試験体より大きかったものの、収縮ひずみの減少率は角柱試験体の方がわずかに小さかった。これは、後述 (図-6) の成形方法の違いも影響したと考えられる。

(2) 鋼材の有無による影響

鋼材の有無に関する影響を検討したグラフを図-5 に示す。図では相対湿度 45% および 60% において、鋼材を配置したケースと配置しないケースの結果を比較した。全てのケースにおいて、鋼材の拘束作用による収縮ひずみの減少が確認できた。相対湿度 45% における検討では、減少した収縮ひずみの差は、他のケースに比べて小さかった。相対湿度 60% における検討では、緊張鋼材を配置したケースで、収縮ひずみの減少が鋼材を配置した他の 2 ケースより大きかった。緊張鋼材を配置したことによる収縮ひずみの減少率は 0.83 であり、非緊張鋼材および非緊張+緊張鋼材を配置したことによる収縮ひずみの減少率はどちらも 0.9 程度であった。これはコンクリート

の付着性能が関係していると考えられた。

(3) 成形方法および養生方法の影響

成形方法および養生方法に関する影響を検討したグラフを図-6 に示す。図では相対湿度 60% において、S/V が同じで成形方法が異なるケースの結果を比較した。また、相対湿度 45% において、S/V が同じで養生方法が異なるケースの結果を比較した。成形方法および養生方法の違いによる収縮ひずみの減少は、どちらも現れた。成形方法の違いによる減少率は 0.91 であり、養生方法の違いによる減少率は 0.93 であった。成形方法の違いでは、遠心成形の脱水作用により単位水量が減少することで収縮ひずみが小さくなったと考えられる。また、養生方法の違いでは、蒸気養生を行ったことで水和反応が促進され、コンクリート表面が緻密化し、湿気透過が抑制されたため、収縮ひずみが小さくなったと考えられる。

(4) 相対湿度の影響

相対湿度に関する影響を検討したグラフを図-7 に示す。これは全面乾燥、乾燥制限、非緊張鋼材配置のケースについて比較したものである。相対湿度の違いによる収縮ひずみの減少率は、その他の要因よりも大きくなった。その中でも、全面乾燥における収縮ひずみの減少率は 0.53 であり、最も大きかった。その要因を 3.3 節で考察する。

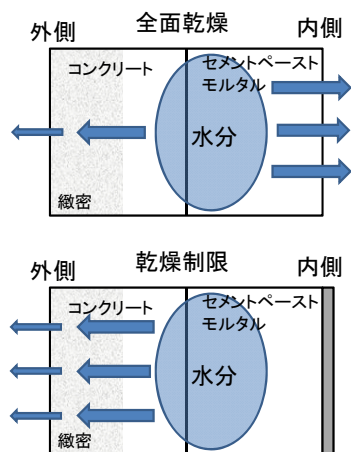


図-8 水分逸散メカニズムの概念図

3.3 相対湿度と乾燥面の影響に関する考察

(1) 既往の知見

製造後の遠心成形コンクリートは、一般に断面内で材料に偏りが生じ、材料密度の大きさと共に外側よりコンクリート、モルタル、セメントペーストの順に分布する。その結果、内側には余剰水が集まり、外側は水結合材比の低減や遠心締固めの影響により強度増加が図られる³⁾。

田中らの研究では、遠心成形コンクリートにおける材料の偏りを想定した収縮特性を検討しており、セメントペースト>モルタル>コンクリートの順で乾燥収縮ひずみが大きくなるということが確認されている⁴⁾。

(2) 本試験の考察

本試験では、全ての要因の中で図-4や図-7のように、相対湿度の影響が強かった。その中で、乾燥面を全面乾燥として相対湿度を45%としたときに相対湿度に加えて、乾燥面の影響が強くなった。この理由について、既往の知見と図-8のような遠心成形コンクリートの製造の特徴と水分逸散の関係を考慮して以下のように考察した。

遠心成形コンクリートでは、水分が成形時に試験体内側に集まる。この水分が試験体の外側のコンクリート層に比べ、内側のモルタルとセメントペーストの層(以下、モルタル層)に多く存在することになる。両面乾燥の場合、図-8上図のように内側に水分が多く存在することと外面が緻密であることで、内側面から逸散する水分量は多く、外側面から逸散する水分量は少なくなる。相対湿度が小さいとき、内側面から逸散する水分量は、より大きくなる。

一方、図-8下図のように内側の乾燥面を制限すると、外側面からのみ水分が逸散するようになる。この場合、内側から外側に向かって移動する水分量は多くなるが、コンクリート層が緻密であることにより、外部に逸散する水分量は小さいと考えられる。この水分の差が図-4の収縮ひずみの差として生じたと考察する。

内側面と外側面における水分逸散の違いに起因する収

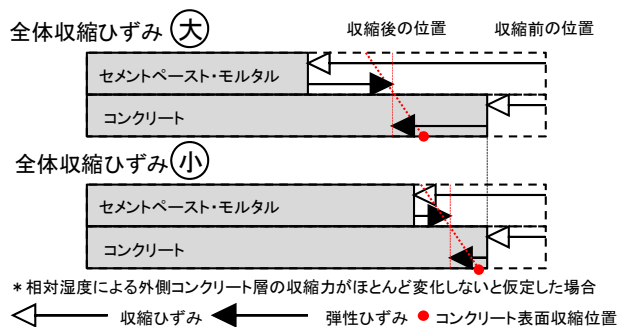


図-9 全体収縮ひずみの違いにおける収縮の概念図

縮の概念図を図-9に示す。ここでは、外側面から逸散する水分量が小さく、外側面のコンクリート層において、乾燥による収縮の差は生じないものと仮定した。内側のモルタル層の収縮ひずみは、既往の知見からコンクリート層の値より大きくなる。また、モルタル層の収縮ひずみは、相対湿度45%のように乾燥しやすい環境にあるほど、より大きくなる。この2つの条件から、モルタル層とコンクリート層の間では大きなひずみの差が生じることになる。

図-9に示す全体の収縮後の位置は、各層間の収縮ひずみを考慮した力の釣り合い関係により決定する⁵⁾。実際には乾燥面からの距離に応じてひずみ量が決まるため、コンクリート表面における収縮位置は、図中の赤丸印を付した破線になる。ゲージプラグを外側のコンクリート層に設置したため、赤丸印の値が本実験の全体収縮ひずみに表われる。

以上のことから遠心成形コンクリートでは、モルタル層の水分逸散と収縮作用が有意に働き、乾燥しやすい環境にあるほど、全体収縮ひずみがさらに大きくなる。このことが図-7において相対湿度45%と60%の収縮ひずみの違いが全面乾燥と乾燥制限で大きく異なった要因と考察した。

4. 小径コアを用いた圧縮強度試験の試験方法

遠心成形コンクリートの製造工程では、前述のように材料の偏りが生じる。この偏りによって生じる強度分布を調べるために、ソフトコアリング法⁶⁾に従って小径コアの圧縮強度試験を行った。

小径コアの採取対象とした試験体は、収縮試験で使用したD45-1の円筒試験体とした。試験体の上下2断面を小径コア採取断面とし、それぞれ円筒断面内側と外側に分けてコアを6本採取した。コアの抜き取りは、呼び径φ25mmのダイヤモンドコアビットを設置した電動コアドリルを用い、摩擦熱を考慮して水を散布しながら行った。採取したコアは、直径20mm程度であったため、設計高さ40mmとなるようにダイヤモンドカッターで切断し、寸法と気乾質量を測定した。コアの切断面は、平滑

性の確保を目的として硫黄キャッピング処理を施した。
その後、圧縮強度試験を行い、圧縮強度を測定した。

5. 圧縮強度試験の試験結果

円筒試験体の内側と外側から採取したコアの単位体積質量を図-10、圧縮強度を図-11に示す。採取断面の内側から採取した6本の小径コアのうちの一本は、極めて大きな圧縮強度を示し、棄却値とした。図-11では、その結果を除外し、残りの5本のデータをもとにグラフを作成した。

採取した小径コアの寸法および気乾質量から単位体積質量を導き、採取位置ごとの平均値を比較した。その結果、遠心成形コンクリート内側から採取したコアの圧縮強度より外側から採取したコアの値が大きくなった。遠心成形コンクリート外側から採取したコアの平均圧縮強度は、内側から採取したコアの値より大きくなった。その内側に対する外側の強度比は、1.14であった。圧縮強度の変動係数は、内側および外側から採取した小径コアのどちらも10%程度であった。ソフトコアリング法の報告では、コア強度の試験誤差は強度が高くなるほど増加し、変動係数の平均は12%とある⁶⁾。変動係数によって本試験の精度を判断すると、誤差の小さい試験であったといえる。

以上の小径コアを用いた単位体積質量および圧縮強度に関する試験により、今回使用した遠心成形コンクリート試験体の断面内に単位体積質量の分布と強度分布が存在することが確認できた。これは、既往の知見と同様に遠心成形時の遠心力により、試験体外側にコンクリート層、内側にセメントペースト・モルタル層を形成し表面が緻密化し高強度になったと考えられる。

6. まとめ

遠心成形コンクリート製の円筒試験体の収縮試験および円筒試験体から採取した小径コアの圧縮強度試験を実施した結果から得られた知見を以下に示す。

- 1) 遠心成形コンクリートの収縮ひずみは、通常のコンクリートより小さくなり、示方書等の算定式を直接適用できないことが確認できた。
- 2) 乾燥面（表面積体積比）、鋼材の有無、遠心成形の有無、蒸気養生の有無、相対湿度の違いによる収縮ひずみの変化傾向が確認できた。
- 3) 相対湿度と乾燥面が収縮ひずみに与える影響を考察した結果、遠心成形コンクリートの収縮ひずみには、モルタル層からの水分逸散が大きいことと、モルタル層の収縮ひずみがコンクリート層よりも大きいことが影響すると考えられた。
- 4) 小径コアを用いた圧縮強度試験の結果から、今回使

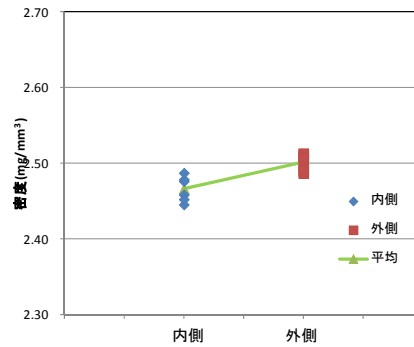


図-10 単位体積質量

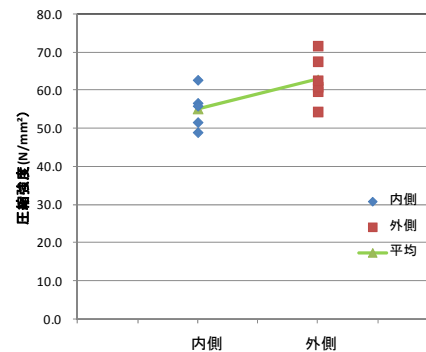


図-11 圧縮強度

用した遠心成形コンクリート試験体の断面内に、強度分布が存在し、外側が1.14%大きいことが確認できた。

参考文献

- 1) 松井淳史, 伊藤始, 宮田真人, 竹中寛: 遠心成形コンクリートのひび割れ分散性に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.341-346, 2011.7
- 2) (社) 土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書 設計編, pp.45-49, 2008.3
- 3) 菅一雅, 榊田佳寛: 高強度コンクリートの遠心成形性に及ぼす調合の影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.606, pp.29-34, 2006.8
- 4) 田中佑二郎, 菅一雅: 蒸気養生後の遠心成形高強度コンクリートの収縮特性に関する実験的研究(その3. 実験概要, ペースト・モルタル・コンクリートの乾燥収縮試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集. A-1, pp.327-328, 2009.7
- 5) 古賀一八, 衣笠秀之, 今井教博: モルタルの乾燥収縮に着目した外壁タイルの剥離メカニズムに関する研究 その2. 剥離応力に対するモルタルの乾燥収縮の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集. A-1, pp.951-952, 2006.7
- 6) 日本建築センター, 建築保全センター: 既存構造物のコンクリート強度調査法「ソフトコアリング」, 2000.4