

# 論文 モルタルの粒子構造が初期収縮ひび割れに及ぼす影響とそのメカニズムの解明

後藤 卓\*<sup>1</sup>・高橋 恵輔\*<sup>1</sup>

**要旨:** 初期収縮ひび割れの対策は、高強度モルタルやセルフレベリング材などのセメント系材料において重要な課題の一つである。本研究では、高水セメント比のモルタルの初期物性が、ひび割れ発生に及ぼす影響を調べ、そのメカニズムについて考察した。その結果、初期収縮挙動、水和発熱速度および水分蒸発量がほぼ同一であっても、微粉量の多い試料にひび割れが生じた。ひび割れが生じた試料では、初期収縮時の貯蔵弾性率が増加していたことから、微粉量の増加に伴って不動水量が増加し、より強固な粒子の凝集構造が形成されることで、初期収縮に対して構造が伸長しにくくなり、ひび割れを生じたものと説明できる。

**キーワード:** プラスチック収縮、ひび割れ、動的粘弾性、セメントモルタル、毛細管張力

## 1. はじめに

セメントモルタル（以下、モルタル）やコンクリートにおいて打設直後から翌日までに生じる初期収縮（以下、プラスチック収縮）は、ひび割れや施工不良を生じ、構造物の耐久性の低下や美観の損失を招く。初期収縮ひび割れの対策は、高強度コンクリートや高強度モルタルといった低水セメント比の材料のみならず、セルフレベリング材など高水セメント比の材料でも重要な課題である。

プラスチック収縮挙動には、自己収縮と乾燥収縮が寄与する。低水セメント比のモルタル・コンクリートでは、水和反応による自己収縮も大きく影響するが<sup>1)</sup>、主にプラスチック収縮の原因は、水分蒸発に伴い、試料表面の粒子間に形成されるメニスカスに毛細管張力が生じるためと考えられてきた<sup>2)</sup>。例えば Uno の報告では、気温や相対湿度、風速がフレッシュコンクリートの水分蒸発量およびプラスチック収縮に及ぼす影響が詳細に検討されている<sup>3)</sup>。また、ブリーディング速度が遅いほどメニスカスの形成が早くなり、プラスチック収縮が生じやすくなること<sup>4)</sup>、あるいは表面張力の低下が水分蒸発量を低下させ、プラスチック収縮ひび割れを抑制することが報告されている<sup>5)</sup>。このように、プラスチック初期収縮に関する多くの研究では、表面張力と水分蒸発量に基づき、議論されてきた。しかし、水分の蒸発速度とひび割れの発生に相関がないという事例も報告されており<sup>6)</sup>、初期収縮ひび割れのメカニズムを解明し、その発生を制御できているとは言い難い。

一方で、近年 Bier らは、モルタルの流動性が塑性状態の乾燥収縮に影響を及ぼすことを指摘している<sup>7)</sup>。高橋らは、攪拌条件のみを変えたモルタルにおいて、水分蒸

発量が同程度であっても初期収縮量が大きく異なることを報告している<sup>8)</sup>。高橋らはその原因について、攪拌により水和反応が増進して結晶状態が緻密化することで<sup>9)</sup>、細孔構造が緻密になり、メニスカスによる毛細管張力が増加すると考察した。これらの報告は、水分逸散量だけではなく、細孔や粒子、水和生成物が形成する粒子の凝集構造が初期の収縮挙動に大きく影響することを示唆している。以下、本論文では、粒子が粒子間力のみならず水和反応、乾燥などに起因する毛細管張力によって形成する凝集構造を粒子構造と呼称する。

さらに、プラスチック収縮では、乾燥収縮に比べると比較的小さい収縮量でひび割れを生じるが<sup>10)</sup>、その理由も明らかではない。多くの研究では収縮量の大小のみの議論に留まっており、実際のひび割れのしやすさとは関連づけられていない。

本研究では、高水セメント比のモルタルの水分逸散量、水和挙動のみならず、フレッシュモルタル中に形成される粒子構造が初期の収縮挙動とひび割れ発生に及ぼす影響を検討し、初期収縮ひび割れのメカニズムを解明することを目的とした。水和挙動は、水和熱量測定より判断した。粒子構造については、フレッシュモルタルがひずみを受ける際の構造の強さがひび割れのしやすさに影響すると考え、動的粘弾性測定より評価した。また、これらの性質がひび割れに及ぼす影響を評価するために、よりひび割れを生じやすい屋外条件下で暴露実験を行ない、ひび割れのしやすさの指標とした。

## 2. 試験の概要

### 2.1 使用材料および配合

\*1 宇部興産（株） 技術開発研究所 建材開発部 SL・グラウト材グループ 工博（正会員）

表-1 モルタルの配合 (単位: g)

	セメント	石膏	珪砂	スラグ 微粉末	フライ アッシュ	増粘剤	混和剤	水道水
試料A	210	30	600	150	0	0.75	14.3	260
試料B	210	30	400	250	100	0.50	14.3	260

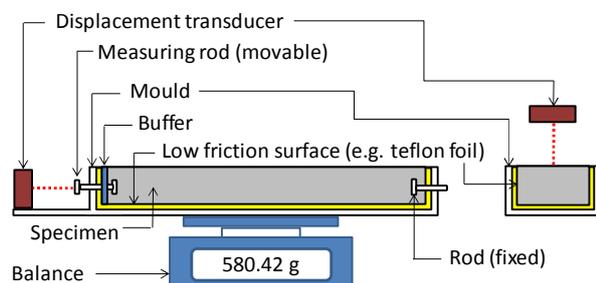


図-1 収縮量および蒸発水量の測定装置の模式図

試験では、ひび割れが生じにくい配合として試料 A、ひび割れが生じることが確認されている試料 B を比較した。試験に用いたモルタルの配合を表-1 に示す。早強ポルトランドセメント、珪砂 (粒径 75~300 $\mu$ m)、混和材、増粘剤、水道水を用いた。使用したセメントの物性は、真密度  $\rho=3.14\text{g/cm}^3$ 、ブレン比表面積  $S_{BL}=4560\text{cm}^2/\text{g}$ 、平均粒径  $L_{50}=10.7\mu\text{m}$  である。混和材として、A、B で同一のスラグ ( $\rho=2.85\text{g/cm}^3$ 、 $S_{BL}=4300\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $L_{50}=11.8\mu\text{m}$ )、石膏 ( $\rho=2.93\text{g/cm}^3$ 、 $S_{BL}=4110\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $L_{50}=5.1\mu\text{m}$ )、フライアッシュ ( $\rho=2.34\text{g/cm}^3$ 、 $S_{BL}=4890\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $L_{50}=7.4\mu\text{m}$ ) を使用した。試料 B は、試料 A と比較して珪砂の量が少なく、その代わりにスラグ、フライアッシュの量が多い配合である。また、増粘剤以外の混和剤の量は試料 A、B で同一であり、増粘剤量の差は本論文の考察には影響しない。試料 A、B の水粉体比はともに 26wt% と同一であるが、粉体の密度が異なるため、試料 A、B の体積濃度は異なる。

## 2.2 屋外暴露試験

幅 15cm×長さ 200cm×高さ 60cm の型枠を屋外に設置し、レディーミクストコンクリートを約 55cm の高さまで、バイブレーターで振動を加えながら打設した。使用したコンクリートの水セメント比は 55% であり、細骨材率が 48.5%、材齢 28 日の呼び強度を 27N/mm<sup>2</sup>、スランブを 18cm、粗骨材の最大寸法を 20mm とした。

型枠への打設から約 5.5 時間後に、硬化を確認したコンクリート表面を目荒らしし、その上に約 15mm の厚さで試料 A、B を静かに流し込んだ。コンクリート打設後に、コンクリート表面から 15mm の高さを示すねじを 65cm おきに 2 本設置し、その後すべてのねじの高さが水平となるようにレーザー式のオートレベルを用いて調製した。ねじの高さまで試料を流し込むことで、試料の水平性を確保した。

屋外試験では、試料 A、B の混練に外径 150mm、750rpm のハンドミキサーを用いて、粉体量 25kg に対する水道水

の量を 6.5kg として、屋内にて 3 分間練り混ぜを行ない、その後屋外の型枠に試料を流し込んだ。練り上がり直後のモルタル温度は A、B それぞれ 23.5 $^{\circ}$ C、23.8 $^{\circ}$ C であった。モルタル打設時の外気温は 25.5 $^{\circ}$ C、天候は晴であった。ひび割れの発生時刻および、一日経過後の試料表面の観察より、ひび割れの本数、長さを判定した。

## 2.3 モルタルの調製方法

2.4~2.7 節で示す屋内試験では、混練水を入れたビーカーにあらかじめ混合した粉体を投入し、回転数 650rpm のケミカルスターラーを用いて 3 分間攪拌することで、モルタルを調製した。調製および各種測定は 20 $^{\circ}$ C 65%RH の恒温恒湿室にて行なった。試験はそれぞれ 2 回以上測定し、再現性を確認した。

## 2.4 フロー値および凝結時間の測定

フロー値の測定は JASS15M-103 セルフレベリング材の品質基準の試験に準拠し、内径 50mm×高さ 51mm のフローコーンに攪拌直後のモルタルを流し入れ、振動を与えずにフローの広がり測定した。また、視覚的に試料の変形のしやすさを確認するために、試料攪拌から 0.5 時間後、2 時間後、4 時間後にそれぞれフローコーンを外した際の試料の広がりを撮影した。凝結時間の測定は JIS R5201 に準拠し、封かん条件で行った。

## 2.5 収縮量および蒸発水量の測定

図-1 に収縮量および蒸発水量の測定装置の概要を示す。水平方向および垂直方向の収縮量は、レーザー式変位センサーを用いて測定した。幅 40mm、長さ 540mm、深さ 15mm のステンレス鋼製型枠にモルタルを流し込み、試料の片端に埋め込んだ可動式治具の水平移動距離より水平方向の収縮量を、モルタル試料表面の変位より垂直方向の収縮量を計測した。型枠底面および側面にフッ化樹脂シートを張り、無拘束に近い条件で測定した。収縮をマイナスとして表記した。

蒸発水量の測定は、収縮量の測定と同様の型枠にモルタルを流し込み、その重量変化を開放部の面積で除した値を蒸発水量とした。

収縮量および蒸発水量の測定は、20 $^{\circ}$ C 65%RH の恒温恒湿室にて、型枠上面を解放した条件で測定した。

## 2.6 水和発熱速度の測定

水和挙動の指標として、等温型カロリーメーターを用いて水和発熱速度を測定した。攪拌直後のモルタル約 10g を密閉容器に入れ、カロリーメーター内に静置した。その際の発熱量の経時変化より水和発熱速度を求めた。

## 2.7 貯蔵弾性率の測定

レオストレスメーター (共軸円筒システム) を用いて、モルタルの動的粘弾性を測定した。周波数一定条件 (100 rad/s) にて、測定により構造が破壊されないようにひずみ量 0.1% の条件で、貯蔵弾性率を測定した。動的粘弾性試

験では、試料を線形粘弾性体と仮定し、ひずみに対する試料の応答を弾性項と粘性項に分け、弾性項を貯蔵弾性率、粘性項を損失弾性率と呼ぶ。貯蔵弾性率は変形中に系に蓄えられるエネルギーの大きさを表す。一般に貯蔵弾性率が大きいほどより硬化した構造を有していると考えられ<sup>11)</sup>、モルタル内部の粒子構造が発達していると推察される。円筒内に約 19ml の試料および内円筒を入れた状態で測定場所にて静置し、試料を動かすことなく連続的に、練り混ぜから 0.5 時間、2 時間、4 時間経過時点で測定を行った。

### 3. 試験結果

#### 3.1 屋外施工試験

屋外施工試験における硬化後の試料表面を写真-1 に示す。試料 A の硬化表面にはひび割れは確認されなかった。試料 B の硬化表面では、打設後 1 時間過ぎから 4 時間までの間に、ねじの周辺を中心として長さ 1cm~7cm の範囲で計 7 本のひび割れが観察された。

封かん状態での下地コンクリートの収縮量は、下地コンクリートの型枠への打ち込みから 5 時間時点で約  $200 \times 10^{-6}$ 、24 時間時点で  $250 \times 10^{-6}$  程度であり、後述する試料 A、B の最大収縮量と大きく変わらなかった。したがって、本論文では試料の下地のコンクリートの収縮の影響については考慮しない。

試料 A、B のブリーディング量は、屋外試験および後述する屋内試験において、試料表面にごく薄く確認される程度であり、明確な材料分離は観察されなかった。

#### 3.2 フロー値および凝結時間の測定

フロー値および凝結時間を表-2 に示す。0.5 時間、2 時間、4 時間フローの広がり様子を写真-2~4 に示す。試料 A に比べ、試料 B のフロー値が大きく、練り混ぜ直後は試料 B の方が良好な流動性を示した。また、練り混ぜ 0.5 時間時点では、試料 A、B とともにフローコーンを外した際に流動し、広がった。2 時間時点では、試料 A は自重で変形するが広がらず、試料 B は自立する程度まで硬くなった。4 時間時点では、試料 A、B のいずれもフローコーンを外した際に自立する程度まで硬くなった。

試料 B の凝結時間は、始発、終結ともに試料 A より 1 時間程度早かった。始発から終結までの時間はいずれの試料も 3 時間程度であった。

#### 3.3 収縮量の測定

水平方向の収縮量の変化を図-2 に、垂直方向の収縮量の変化を図-3 に示す。水平方向の収縮量は、試料 A、B とともに  $150 \sim 200 \times 10^{-6}$  であり、ほぼ同程度の値を示した。試料 A、B とともに攪拌開始直後から約 2 時間までは収縮・膨張量ともにほぼ 0 であるが、2~4 時間程度で急速に収縮挙動を示し、4~8 時間では緩やかに収縮、その後、8

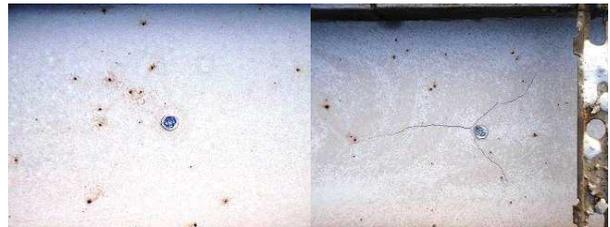


写真-1 屋外試験における試料表面 (材齢 24 時間)  
試料 A (左) 試料 B (右)

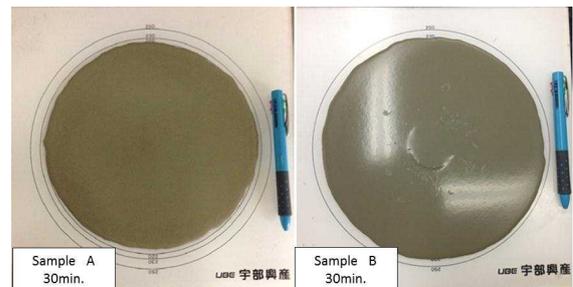


写真-2 0.5 時間時点のフロー 試料 A (左) 試料 B (右)

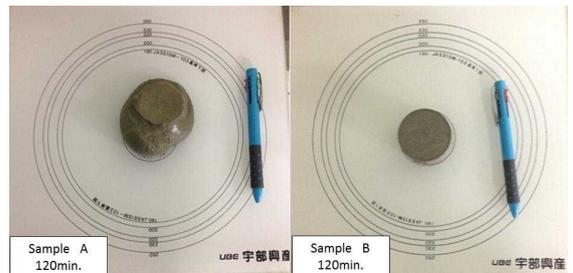


写真-3 2 時間時点のフロー 試料 A (左) 試料 B (右)

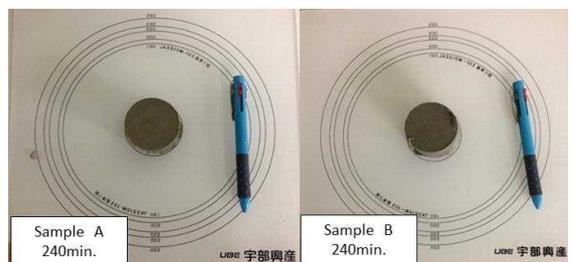


写真-4 4 時間時点のフロー 試料 A (左) 試料 B (右)

表-2 攪拌直後のモルタルのフロー値および凝結時間

	フロー値 (mm)	始発時間 (h:min)	終結時間 (h:min)
試料A	220	5:05	8:10
試料B	238	4:15	7:05

時間以降では、収縮挙動が膨張挙動に転じた。鉛直方向の収縮量は、試料 A、B とともに攪拌直後から急速に減少し、4~5 時間程度で一定値に収束した。その値は、試料 A で  $30 \times 10^{-3}$  程度、試料 B で  $35 \times 10^{-3}$  程度であった。

#### 3.4 蒸発水量の測定

蒸発水量の経時変化を図-4 に示す。試料 A、B の蒸発水量を比較すると、5 時間時点まではほぼ同程度の蒸

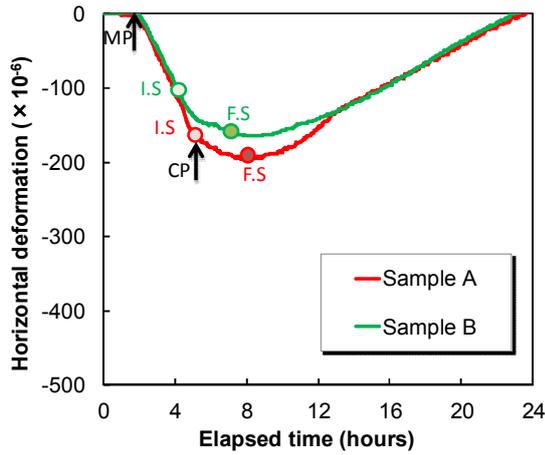


図-2 水平方向の変位

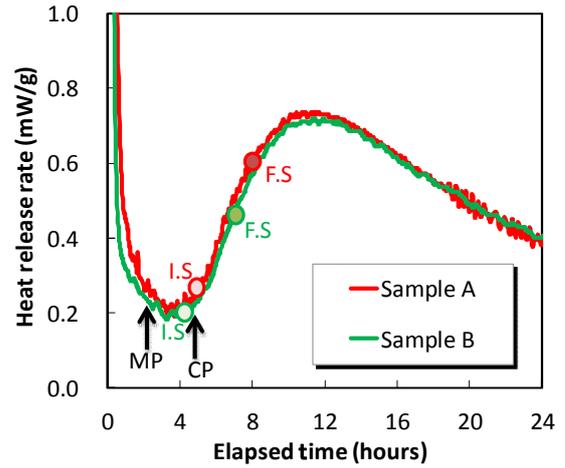


図-5 水和発熱速度の時間経過

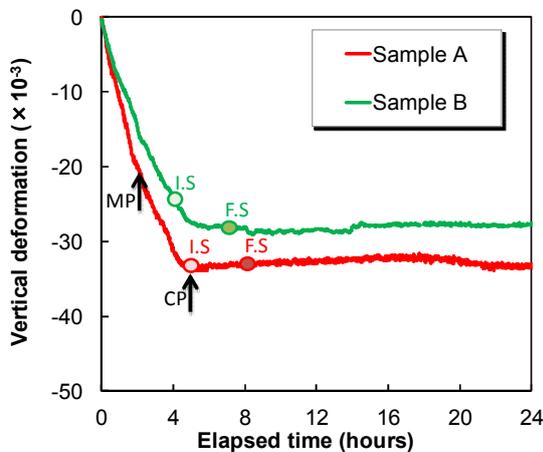


図-3 鉛直方向の変位

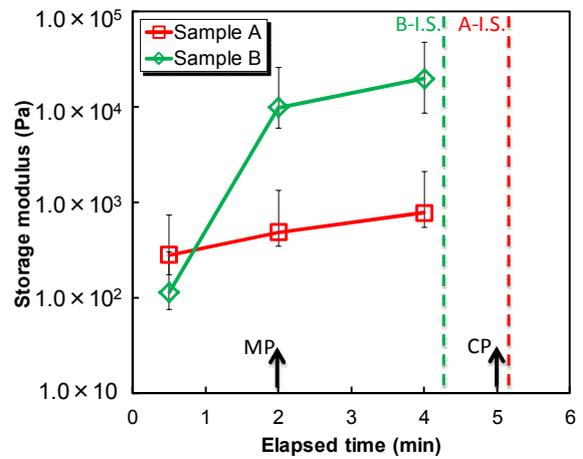


図-6 貯蔵弾性率の経時変化

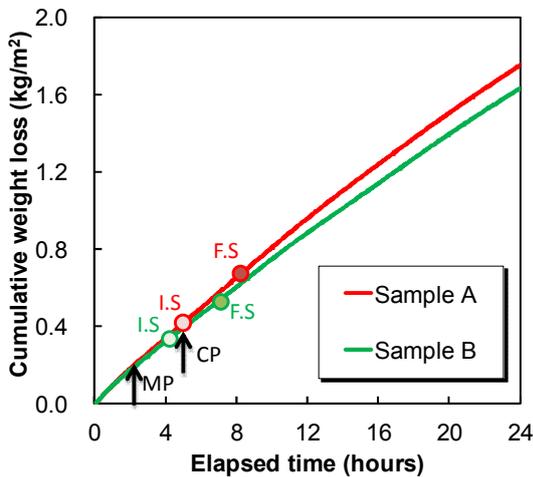


図-4 水分蒸発量の経時変化

発水量であった。5時間以降では、試料Bの蒸発水量がわずかに小さいものの、その差は10%以下であった。

### 3.5 水和発熱速度の測定

水和発熱速度を図-5に示す。攪拌直後の水和反応の第一ピークは4時間程度で最小値を示し、その後水和反応の第二ピークが増加し、10~12時間で最大値を示した。

### 3.6 動的粘弾性の測定

動的粘弾性測定の結果として、貯蔵弾性率の経時変化を図-6に示す。結果は二回の測定の平均値であり、その誤差範囲を同時に表記した。0.5時間時点では、試料A、Bの貯蔵弾性率は同程度であるが、2時間時点で試料Bの弾性率は試料Aに比べて大きく増加し、4時間でさらに増加した。試料Aの貯蔵弾性率は0.5、2、4時間と緩やかに増加する傾向を示した。

## 4. 考察

### 4.1 既往のメカニズムに基づく初期収縮挙動の説明

Luraら<sup>12)</sup>は、BrinkerとScherer<sup>13)</sup>によるゲルの乾燥収縮モデルに基づき、モルタルの初期収縮挙動を3つの段階に分類しており、本研究でもその定義に則って議論する。図-7にLuraら<sup>12)</sup>のモデルに基づくモルタルの初期収縮挙動の模式図を示す。モルタル表面の粒子の上にブリーディング水の層が存在する状態を第一段階(Phase I)とする。このとき、メニスカスからの水分蒸発はないため、収縮挙動は生じない。第二段階(Phase II)は、モルタル表面の粒子間にメニスカスが形成され、水分が蒸発している状態を指す。このとき、メニスカスからの

水分蒸発により、毛細管張力が発生し、収縮挙動が生じる。第三段階(Phase III)は、メニスカスがモルタル表面ではなく、モルタル内部に観察される状態である。

Phase I と Phase II の境界 (以下 MP とする) をメニスカスの形成および収縮挙動の開始とみなすと、本実験では、図-2 より試料 A, B とともに打設後約 2 時間で MP に達する。Phase II と III の境界は Critical Point (以下 CP とする) と呼ばれ、モルタルの鉛直方向の変位が停止する点を指す。また、図-3 より、試料 A, B とともに CP は打設から約 5 時間である。

Phase II では鉛直方向の変位が減少し続ける、すなわち粒子沈降、抜泡、あるいは毛細管張力により粒子構造が圧密されることで、その分のモルタル内部の水分が表面に移動し、モルタル表面のメニスカスが保たれる。Phase III では粒子構造が強固になることで沈降と圧密が停止し、水分がモルタル表面に移動できなくなる。さらに水分が蒸発し続けると、モルタル表面の一部のメニスカスが消失してモルタル内部の大きな気泡に繋がり、モルタル内部のメニスカスから水分が蒸発する。これは Wittmann が定義した Breakthrough Point と一致する<sup>14)</sup>。

図-8 に水平変位・鉛直変位・水和発熱速度の経時変化を同一のグラフで示す。打設後 0~2 時間を Lura ら<sup>12)</sup> のモデルにおける Phase I, 2~5 時間を Phase II, 5 時間以降 Phase III として、本実験の初期収縮挙動を説明することができる。また、材齢 8 時間以降の水平方向の膨張については、エトリングait等の膨張性の水和生成物が成長し、収縮挙動が膨張に転じたものと推測される。

#### 4.2 初期収縮ひび割れと貯蔵弾性率の関係

既往の研究では、水分蒸発量が収縮挙動やひび割れに大きく影響を及ぼすと考えられてきたが<sup>2~5)</sup>、本研究で用いた試料 A, B では、練り混ぜ後 4 時間まで水分蒸発量および水平方向の収縮挙動に大きな差異はなかった。また、水和発熱速度および水和反応の進展もほぼ同一と判断できる。一般に、初期収縮量が  $700 \times 10^{-6}$  を超えるとひび割れを生じる可能性が高くなるとされている<sup>10)</sup>。しかし、屋外試験でひび割れを生じた試料 B の収縮量は  $200 \times 10^{-6}$  以下と小さく、試料 A との収縮量の差も  $40 \times 10^{-6}$  以下であるため、収縮量と水分蒸発量の結果からは、試料 B のみにひび割れが生じた理由を説明できない。

そこで本研究では、図-6 よりひび割れが生じた Phase II の 2 時間、4 時間時点で、試料 A, B 間の貯蔵弾性率に差が生じた点に着目した。貯蔵弾性率が大きいほど、弾性的に挙動し、見かけ上”硬化”(いわゆる締めり)が進んでいると考えられる。Phase II では水和反応が停滞期にあることから、ここでいう”硬化”とは、水和反応の進行による硬化ではなく、単純に硬さが増加することを指す。これは、貯蔵弾性率の大きい試料 B の方が凝結の時

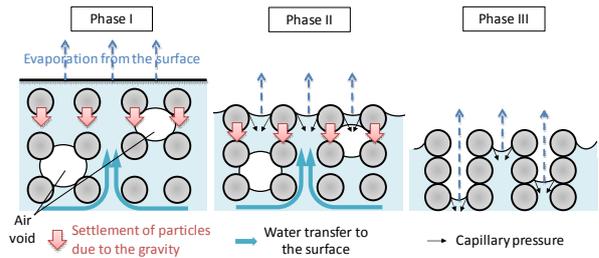


図-7 Lura ら<sup>12)</sup> のモデルに基づくモルタルの初期収縮挙動の模式図

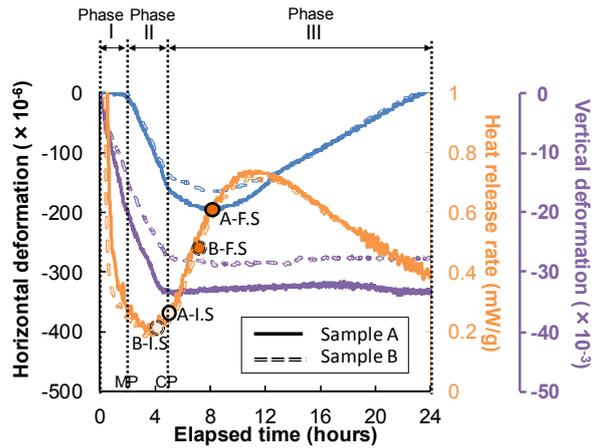


図-8 水平変位・鉛直変位・水和発熱速度の経時変化

間が多いことから理解できる。

一般に動的粘弾性試験では、応力を正弦的に与えると、完全弾性体ではひずみの応答が正弦的に一致するのに対して、完全粘性体では応力に対するひずみの応答が  $90^\circ$  ずれる。プラスチックな状態のモルタルのような粘弾性体ではその中間の応答を示す<sup>11)</sup>。すなわち、弾性体では引張力を加えた際にそのまま変位するのに対して、液体のような粘性体では引張力に抵抗しながら回り込む、あるいは伸長する動きが可能と考えられる。

十分に水和反応が進行したモルタルであれば、弾性体として、応力に対してひずみが線形に応答できるだけの強度を有しているが、プラスチック状態のモルタルでは応力に対して抵抗できるだけの強度がないため、ひび割れを防ぐためには引張力が加えられた際に液体的に伸長することが必要と考えられる。例えば、写真-3 に示す 2 時間経過時点での試料の様子より、貯蔵弾性率の小さい試料 A は柔らかく、強い引張力に対して試料が伸長する動きが可能であるが、試料 B ではその強度以上の引張力が加えられた場合には試料が破断するものと予想される。すなわち、貯蔵弾性率が大きいほど弾性的に挙動して伸長しづらいため、同一の収縮量であっても貯蔵弾性率の大きい試料 B にひび割れが生じたと推測される。

最後に、試料 B の貯蔵弾性率が大きく、より早い時間で強固な構造を形成した理由を考察する。Phase II では、

蒸発や水和反応による水分の消費や、水和生成物による比表面積の増加により、サスペンションとして水に浸漬した状態から、キャピラリー、あるいはファニキュラー状態<sup>15)</sup>へと変化すると考えられる。このとき、粒子は主に毛細管張力によって密に固まった状態にある。一般に凝集サスペンションでは、不動水を開放し粒子間（凝集体間）に水膜ができることで流動が可能となる<sup>16)</sup>。キャピラリー、ファニキュラー状態でも同様に、不動水量が多いほど流動に使える水が少なくなり、試料はより”硬化”した粒子構造を形成する。同じ体積濃度であっても粒子径が小さく、数が多いほど、不動水化する水の量は多くなる<sup>17)</sup>。したがって、試料 B の配合は試料 A に比べて、粒度の大きい珪砂が 200g/kg 少なく、その代わりにスラグやフライアッシュが 100g/kg ずつ多いため、キャピラリー、ファニキュラー状態で不動水化する水分量が増加し、より強固な粒子構造を形成したと考えられる。

また、ひびわれが生じた材齢 1~4 時間において、不動水量が異なっているにもかかわらず、水分蒸発量が A,B で同一である理由について、水分蒸発速度は蒸発するメニスカスの半径に依存すると考えられ、メニスカスの半径は、水分量が多い状態では粒径のオーダーであり、試料 A,B のメニスカス半径はいずれも数  $\mu\text{m}$  のオーダー程度と予想されるため、水分蒸発速度にほぼ差がなかったと推察される。

## 5. まとめ

本研究では、高水セメント比のモルタルに対して、水平・鉛直方向の変位より初期収縮挙動を測定し、同時刻における水和発熱速度、水分逸散量および貯蔵弾性率の変化と比較することで、それらが屋外施工試験の結果から得られる初期収縮ひび割れ発生のしやすさに及ぼす影響を調べ、そのメカニズムについて考察した。以下に本論文で得られた結果と考察を記す。

- (1) 水セメント比、水粉体比が同一で珪砂、微粉量のみが異なる二試料について屋外施工試験を行なったところ、初期収縮挙動、水和発熱速度および水分逸散量がほぼ同一であるにもかかわらず、微粉量の多い試料のみにひび割れが発生した。ひび割れの発生は、始発前に粒子間のメニスカスから水分が蒸発し、毛細管張力によって初期収縮を生じたことが原因であると推察された。
- (2) 微粉量の多い試料のみにひび割れが発生した理由として、貯蔵弾性率の増加と始発時間の短縮から推測される粒子の凝集構造の硬化促進が考えられる。微粉量が多いことで、毛細管張力により形成される粒子の凝集構造の内部に含まれる不動水量が多くなり、より硬化した構造が形成されると考察した。

## 参考文献

- 1) 田澤栄一, 宮澤伸吾: セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集, Vol.25, No.502, pp.43-52, 1994
- 2) Slowik, V. and Ju, J.W.: Discrete modeling of plastic cement paste subjected to drying, *Cement and Concrete Composites*, 33, pp.925-935, 2011
- 3) Uno P.J.: Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas, *ACI Materials Journal*, pp.365-375, 1998
- 4) Lamond J.F., and Pielert J.H.: Significance of tests and properties of concrete & concrete-making materials, *ASTM International*, pp.99-122, Apr.2006
- 5) Mora-Ruacho J., Gettu R. and Aguado A.: Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.39, pp.141-146, 2009
- 6) Shaeles, C.A. and Hover K.C.: Influence of mix proportion and construction operations on plastic shrinkage cracking in thin slabs, *ACI materials journal*, pp.495-504, Nov./Dec.1988
- 7) Bier T. and Rizwan A.: Early shrinkage in self-compacting mortars using secondary raw materials, *Proceedings of 9<sup>th</sup> International High Performance Concrete Symposium*, DVD, 2011
- 8) 高橋恵輔, Bier T.: 異なる攪拌条件が初期収縮挙動に与える影響およびそのメカニズム, *コンクリート工学論文集*, Vol.36, No.1, pp.466-471, 2014
- 9) Takahashi K. and Bier T.: Effects of mixing energy on technological properties and hydration kinetics of grouting mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol.41, pp.1167-1176, 2011
- 10) Slowik V. et al.: Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value, *Cement and Concrete Composite*, Vol.31, pp.461-469, 2008
- 11) 上田隆宣: レオロジーなんかこわくない! 数式のないレオロジー入門 (第2版), *サイエンス&テクノロジー*, ISBN978-903413-68-6
- 12) Lura P. et al.: Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks, *ACI Materials Journal*, pp.187-194, Mar./Apr.2007
- 13) Brinker C.J. and Scherer G.W.: *Sol-Gel Science*, Academic Press, New York, pp.407-513, 1990
- 14) Wittmann F.: On the action of capillary pressure in fresh concrete, *Cement and Concrete Research* Vol.15, pp.218-224, 2001
- 15) 三輪茂雄: 紛体工学通論, 日刊工業新聞社, 1981
- 16) 岩田進牛, 足立泰久: 土のコロイド現象, 学会出版センター, pp.217-220, 2003
- 17) 後藤卓, 名和豊春: フラクタル凝集モデルに基づくサスペンションの流動性予測, *セメント・コンクリート論文集*, Vol.65, No.1, pp.544-551, 2011