

論文 低水セメント比のモルタルの若材齢におけるブリーディングが膨張挙動に及ぼす影響

山崎 健仁^{*1}・胡 巧英^{*2}・五十嵐 心一^{*3}

要旨: 低水セメント比のコンクリートの若材齢期は、自己収縮と膨張が同時に進行する過程である。この膨張にブリーディングが及ぼす影響について若材齢期の組織形成の特徴と関連付けながら検討した。その結果、低水セメント比のモルタルの若材齢期の膨張はブリーディングが発生した系にのみ確認された。しかし、その一方にて、内部水が残存しているにも関わらず増粘剤の添加により内部水の移動が制限されると、セメントゲルへの再吸収が妨げられるようであり、膨張は抑制されることが示された。

キーワード: 若材齢, 体積変化, ブリーディング, 電気抵抗率, 増粘剤

1. はじめに

低水セメント比のコンクリートに顕著な現象として自己収縮が挙げられ、これが拘束されることによる内部ひび割れの発生が、コンクリートの物性発現や長期の耐久性に影響を及ぼすことが懸念されている。しかし、その一方にて、低水セメント比のセメント系材料が若材齢期において膨張を示すことも知られている¹⁾。この膨張は自己収縮低減の観点からは好ましいものの、実際には大きな膨張を生じた後に、それが拘束されたなら、若材齢期にてひび割れや破断を生じさせるのに十分な大きさにもなりうる自己収縮を生じる場合もある。したがって、膨張特性の理解は自己収縮の低減策を考えるうえで重大な意味を持つ。

低水セメント比のセメント系材料の若材齢期における膨張について、いくつかのメカニズムが挙げられており、1)反応熱による熱膨張、2)反応生成物の結晶圧による膨張、3)ブリーディング水の再吸収による膨張という3つの要因が考えられている²⁾。そのなかでもブリーディング水の再吸収による膨張を卓越要因と考える場合が多いようである。Mohr と Hood は¹⁾、ブリーディングが発生するセメントペーストに対して、硬化に至るまでの間、供試体を型枠ごと回転させることによってブリーディングの発生を抑制した時に、膨張が発生しなかったことから、膨張はブリーディング水の再吸収によるものと結論付けている。一方、Bjøntegaard らは²⁾ブリーディングが発生しているコンクリートに対して、そのブリーディング面に水を加えることによって膨張がさらに大きくなるということを確認している。

しかし、その一方にて、若材齢期における膨張は水酸化カルシウムの生成に関連付けられるとする強い意見もある。Bouny らは³⁾、様々な水セメント比のセメントペ

ーストに対して、自己収縮と水和度との関係性を明らかにし、水酸化カルシウムの結晶の発達が膨張に影響していると結論付けており、現在のところ膨張に関する詳細なメカニズムは明らかではない。

さらに、若材齢期の膨張に関して一つの特異な例として、内部貯水性の粒子を内包させる内部養生時の挙動がある。内部養生は自己収縮の低減方法の一つであり、著者らは内部養生材として超吸水性ポリマーを用いた場合の自己収縮低減効果を明らかにしている⁴⁾。また、打ち込み後から硬化に至るまでの過程において、超吸水性ポリマーを使用しない場合には膨張が認められなかったのに対して、これを内部養生材として混入することによって若材齢にて膨張が現れることも指摘している⁴⁾。一方にて、超吸水性ポリマーはまだ固まらないセメント系材料のレオロジー特性を変化させる目的でも使用される材料となっており、この超吸水性ポリマーの混入によって塑性粘度が上昇し、これがブリーディングを低下させることも指摘されている⁵⁾。すなわち、これらの事実は、低水セメント比のセメント系材料においてブリーディングを低減させた系の方が膨張を生じたことになり、前述の考え方と矛盾する現象のようにも思われる。よって、低水セメント比のセメント系材料の若材齢期において発生する膨張を、ブリーディング水の再吸収による膨張として単純に説明することは適切ではないと思われる。

本研究においては、高性能減水剤および増粘剤によってブリーディング量を変化させたモルタルを作製し、ブリーディングの発生がモルタルの体積膨張に及ぼす影響を水和反応の進行と関連付けながら考察する。また、若材齢期における内部組織の形成過程についてレオロジー特性や電気抵抗率の変化の観点から考察を行い、水分移動特性や内部水の存在と関連付けながら体積膨張のメカ

*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)

表-1 モルタルの配合

配合	W/C	C	W	S	SP	VE	フロー値
高性能減水剤添加量 2% (SP=2%)	0.28	1	0.28	2	0.02	0	223
高性能減水剤添加量 5% (SP=5%)	0.28	1	0.28	2	0.05	0	268
高性能減水剤添加量 5%+増粘剤 (SP=5%+VE)	0.28	1	0.28	2	0.05	0.00056	239



図-1 長さ変化測定装置

ニズムについて論ずることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体作製

セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³，比表面積：3310cm²/g）を使用し，細骨材には石川県手取川産の川砂（密度：2.60 g/cm³，吸水率：1.81%）を使用した。JIS R 5201 に準じて水セメント比 0.28，セメント砂比(C:S)1:2 のモルタルを作製した。また，ブリーディング量を変化させるためにポリカルボン酸系高性能減水剤（以後 SP と記す）を添加し，その添加量を 2%，および 5% と変化させた。なお，高性能減水剤の添加量 2% のモルタルと同程度のワーカビリティが得られるように高性能減水剤の添加量 5% のモルタルに対してセルロース系増粘剤（以後 VE と記す）を添加した供試体も作製した。以上の配合をフロー値とあわせて表-1 に示す。

2.2 長さ変化試験

ASTM C 1698-09 に従い，ポリエチレン製のコルゲートチューブ（直径：約 30mm，長さ：約 420mm）供試体を密封養生下での長さ変化測定用供試体として作製した。打ち込み後，20℃の恒温室にて水平に静置し，長さ変化測定装置（図-1）を用いて供試体の長さ変化を継続的に測定した。打ち込み直後からの変形についてはレーザー変位計により測定した。硬化後の長さ変化は接触式のダイヤルゲージを用いて測定し，打ち込み直後から材齢 7 日までの長さ変化を比較した。なお，予備的な検討においてコルゲートチューブ内に熱電対を挿入して温度計測を行った。その結果，本実験の範囲においては 1℃から 2℃程度の変化しか認められなかったことから，温度による膨張への影響は考慮しないこととした。

2.3 凝結試験

水セメント比が 0.28 のセメントペースト供試体に対し

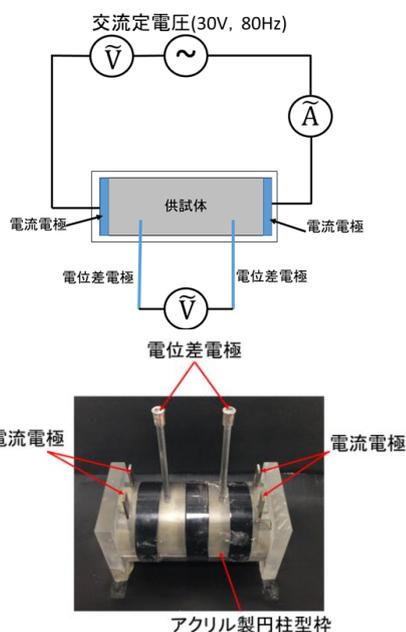


図-2 電気抵抗測定装置の模式図と供試体用型枠

JIS R 5201 に従い，凝結試験を行い，始発および終結を決定し，始発を誘導期の終了の目安とした。

2.4 電気抵抗率測定

図-2 に示す装置を用いて，JSCE-K 562-2008 に規定される四電極法に準じて，電圧 30V，周波数 80Hz の交流電圧を供試体に印加し，打ち込み直後のフレッシュな状態から材齢 24 時間までのモルタルの電気抵抗率を 5 分間隔で測定した。なお，図-2 に示す型枠は直径 50mm，長さ 100mm，電位差電極間距離 50mm であり，供試体に流れる電流値と供試体中央部の 2 つの電位差電極間の電圧を測定し，以下の式(1)により電気抵抗率 $\rho(\Omega \cdot m)$ を得た。

$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L} (\Omega \cdot m) \quad (1)$$

ここに V は電位差電極間の電位差(V)，A は供試体の断面積(m²)，I は供試体に流れる電流(A)，L は電位差電極間の距離(m)である。

2.5 ブリーディング試験

モルタルを直径 100mm，高さ 200mm の円柱型枠に打ち込み，JIS A 1123 に準じてブリーディング試験を行い，式(2)にてブリーディング率 $B_r(\%)$ を算出した。

$$B_r = (B/W_s) \times 100(\%) \quad (2)$$

ここに B は最終時まで累計したブリーディング水量(g), W_s は試料中の水量(g)である。

2.6 強熱減量試験と水和度の算出

20×30×5mm の薄板状の水セメント比 0.28 のセメントペースト供試体を作製し、所定時間にて 110℃、24 時間炉乾燥を行った。その後、乾燥試料を乳鉢ですばやく粉砕し、さらに 24 時間真空乾燥を行った。粉砕した試料を JIS R 5202 に規定される方法に準じて強熱し、式(3)より材齢 t における結合水量 $W_n(t)$ を求めた。

$$W_n(t) = \frac{m-m'}{m'} \quad (3)$$

ここに m は強熱前の試料質量(g), m' は強熱後の試料質量(g)である。得られた結合水量に対して Powers のモデルに従い、完全水和時の結合水量をセメント質量の 23% として⁶⁾、式(4)より水和度 α を求めた⁷⁾。

$$\alpha = W_n(t)/0.23 \quad (4)$$

2.7 レオロジー試験

市販の 500ml ビーカーを用いてモルタルを打ち込み、市販の内円板型回転粘度計一式を用いて、恒温環境(温度: 20±2℃)にて回転速度を 2rpm から 50rpm の間で変化させながら測定を行った。なお、各測定の前には供試体を 1 分間金属棒で練り混ぜ、粒子沈降のない均一な状態とした⁵⁾。注水 10 分後から測定を開始し、測定間隔は材齢 60 分までは 10 分ごとに、それ以降は 30 分ごとに測定を行い、金属棒による攪拌時に供試体がプラスチックでない状態になるまで測定を継続した。一般に、測定時に表示する値は、回転速度が上昇過程において変動が大きく、下降過程においてせん断応力とせん断ひずみ速度との関係が線形傾向を強く示すことから、下降過程において測定値を求めた。せん断応力およびせん断ひずみ速度を求めるにあたって、回転速度と測定値を用いて、トルク $T(N \cdot mm)$ を式(5)より算出した。

$$T = \frac{f}{60} \times \frac{R_h}{1000} \quad (5)$$

ここに f は回転速度(rpm), R_h は測定値である。また、測定値はスピンドルの形状による係数で補正されている。さらに、このトルクを用いて、せん断応力 τ とせん断ひ

ずみ速度 $\dot{\gamma}$ を式(6), (7)より算出した⁸⁾。

$$\tau = T / (2\pi R_a^2 h + 2\pi R_a^3 / 3) \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = 2\omega / \left\{ 1 - \left(\frac{R_a}{R_b} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

ここに R_a はスピンドル半径(mm), R_b はビーカーの半径(mm), h はスピンドルの内円筒高さ(mm), ω はスピンドルの角速度(rad/s)である。この結果から 2 組以上のせん断ひずみ速度およびせん断応力の関係を直線回帰し、ビンガムモデルにおける塑性粘度を式(8)より算出した⁸⁾。

$$\tau - \tau_0 = \eta \dot{\gamma} \quad (8)$$

ここに τ はせん断応力(Pa), τ_0 は降伏値(Pa), η は塑性粘度(Pa·s), $\dot{\gamma}$ はせん断ひずみ速度(1/s)である。

2.8 蛍光顕微鏡観察

2.2 にて作製したコルゲートチューブ供試体を切断し、エタノール浸漬して水分との置換を行った。その後、蛍光染料を溶解させたエポキシ樹脂を含浸し、常温にて硬化後、耐水研磨紙を用いて表面の研磨を行い、蛍光顕微鏡観察試料とした。取得した画像の観察倍率は 40 倍とし、紫外線強度を一定のまま観察を行い、蛍光発色の程度を比較した。

3. 結果

図-3 は長さ変化試験結果を示したものである。高性能減水剤を 2% 添加したワーカブルなモルタルの場合、打ち込み直後に収縮を示し、材齢 4 時間ほどで膨張を生じるようになり、さらに 12 時間以後は再び緩やかな収縮を示している。一方、高性能減水剤を 5% と過剰に添加すると、打ち込み直後に著しい膨張を示すが、その後すみやかに収縮に転じている。そして材齢 9 時間程度で再び膨張を示している。この傾向は高性能減水剤の添加量 2% の場合と同様である。これに対して、増粘剤を添加した場合は、内部に有する水量が同じであるにもかかわらず全く膨張傾向を示すことなく、材齢 20 時間程度まで急激に収縮が増大し、その後は緩やかに自己収縮が増大している。

図-4 は図-3 のひずみ変化について、JCI 基準に従って始発を始点として表したものである。高性能減水剤の

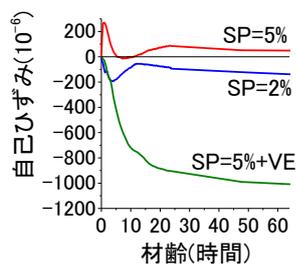


図-3 打ち込み直後を始点とした自己ひずみ変化

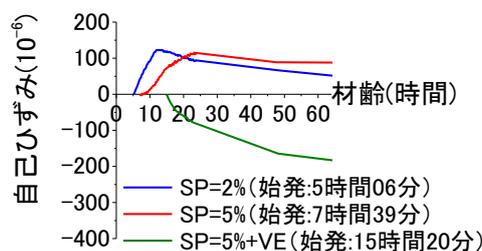


図-4 始発を始点とした自己ひずみ変化

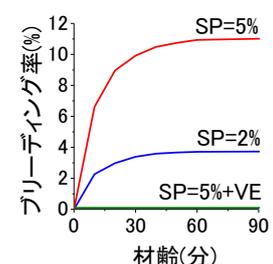


図-5 ブリーディング率の変化

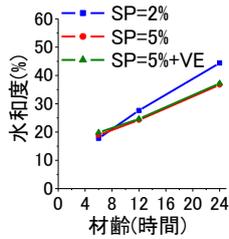


図-6 水和度の変化

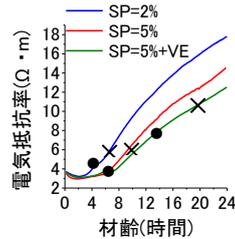


図-7 電気抵抗率変化

(●: 始発, ×: 終結)

添加量 2% と 5% とのひずみの差は小さくなるが、図-3 に示したように、ここまでの変形履歴が大きく異なることには留意すべきである。また、増粘剤を添加した場合は始発が遅延するため、始発後に限ってみると自己収縮は図-3 よりも著しく小さくなる。しかし、この場合であっても収縮量は増粘剤を使用していないモルタルの最大膨張後の収縮量よりも明らかに大きい。

図-5 はブリーディング試験の結果を示したものである。高性能減水剤の添加量が 2% で、目視上およびフロー値からもワーカブルと判断されたモルタルであっても、打ち込み直後からブリーディングを生じており、そのブリーディング割合は 20 分後程度から小さくなっていき、40 分以後にはほとんどブリーディングを生じていない。一方、高性能減水剤を 5% と過剰に添加した場合は、著しく大きなブリーディングを生じて 10% 以上のブリーディング率に達するが、この場合も 40 分程度でブリーディングは終了している。これに対して、高性能減水剤を過剰添加したモルタルに増粘剤を加えるとブリーディングは完全に抑制されている。ここで、図-3 および図-4 と図-5 の対応から、ブリーディングを生じた配合のみ大きな膨張が観察されており、初期の膨張にブリーディング水の挙動が関係することが強く示唆される。すなわち、練り混ぜ直後から 40 分程度までに生じたブリーディング水が、その後の材齢数時間にわたって徐々に吸収されることにより膨張が生じると考えられる。

4. 考察

ブリーディングが認められた低水セメント比の供試体において、若材齢における体積変化は自己乾燥とブリーディング水の再吸収の両者が同時に進行する過程であり、一般に膨張が認められた場合には、ブリーディング水の再吸収による膨張が収縮を上回ったとして理解される。本研究においても図-3, 4, および 5 のようにブリーディングを生じた高性能減水剤の添加量が 2%, 5% の供試体にも膨張傾向が観察されることから若材齢の膨張はブリーディングに関係すると思われる。

図-6 は結合水量から求めた水和度の変化を示したも

のである。材齢 6 時間における水和度は、高性能減水剤の添加量や増粘剤の有無にかかわらずほぼ同程度である。しかし、材齢 12 時間においては、高性能減水剤の添加量 2% のものは他の 2 つに比べて水和度が高くなっており、材齢 24 時間においては顕著な差が認められる。一方、高性能減水剤を 5% 添加した場合は、高性能減水剤を 2% 添加したものに比べると水和遅延を生じているようであるが、増粘剤添加の有無によるセメントの水和進行の差異は生じていない。すなわち、若材齢にて発現する膨張をブリーディング水がセメントゲルに再吸収されることによる膨潤と考えるとすれば、高性能減水剤を 2% 添加した場合は、より早い材齢から多くのセメントゲルが存在しており、これが図-4 に示すような早期の膨張に反映されたと考えられる。一方、高性能減水剤の過剰添加と増粘剤を併用した場合は、ブリーディング水として供試体表面に観察されなかったとしても、内部に存在する自由水量は増粘剤に影響されずに同量であり、その周囲には同程度のセメントゲルが存在していたことになる。

図-7 は打ち込み直後から材齢 24 時間までの電気抵抗率の変化を示したものである。高性能減水剤の添加量が 2% の場合、電気抵抗率は、始発直前の材齢 3 時間から 4 時間程度にて増大を開始し、材齢 24 時間まではほぼ単調に増大している。一方、高性能減水剤の添加量が 5% の場合は、電気抵抗率の増大の開始時間が明らかに高性能減水剤の添加量 2% より遅延しており、材齢 7 時間程度から増大している。また、材齢 24 時間における電気抵抗率の大きさは高性能減水剤の添加量が 5% の方が 2% よりも小さくなり、図-6 の水和度の変化傾向とも一致している。すなわち、高性能減水剤の添加量 5% のモルタルにおいては、材齢 6 時間程度まではセメントの水和度は高性能減水剤を 2% 添加したモルタルと同程度であるにも関わらず、電気抵抗率の増大は遅延していることになる。これより、高性能減水剤の過剰添加により、セメントペーストマトリックスが不均質になり、供試体の骨材界面やバルクセメントペースト（骨材界面の影響を受けないセメントペーストマトリックス領域）⁹⁾などの各部位において局所的に水セメント比が変化したことが考えられる。つまり、局所的に水セメント比の高いところでは反応生成物による伝導経路である毛細管空隙のネットワークが効果的に分断されなかったと考えられる。一方、高性能減水剤を 5% と過剰に添加したものにさらに増粘剤を添加した場合は、高性能減水剤を 5% 添加したものと同時期から電気抵抗率は増大し始めるが、これは始発よりもかなり早い時間帯である。その後、電気抵抗率は単調に増大していくが、増大割合は高性能減水剤を 5% 添加したものよりも小さい。両者においては、水和度が同程度であったにもかかわらず、電気抵抗率の増大割合に

相違があることから毛細管空隙ネットワークの分断の程度に相違があり、セメント粒子の初期粒子配置の影響を示唆している。

図-8 は塑性粘度の変化を示したものである。高性能減水剤の添加量が 2% の場合、打ち込み直後からは目立った変化を示さないが、打ち込み後 150 分から 180 分ほどで急激に塑性粘度が増加し、これ以降は流動性を失い、使用装置による計測は不可能であった。この 150 分から 180 分という時間は始発以前であり、一般に誘導期とみなされる材齢であってもセメントの水和反応が穏やかに進行していることは明らかであり、また、図-6 の水和度の結果とも一致する。また、高性能減水剤を 5% と過剰に添加した場合、打ち込み直後からの変化はほとんどないが、打ち込み後 360 分程度から塑性粘度は増大し始めており、この増大開始材齢は始発とほぼ一致している。これに対して、高性能減水剤を 5% と過剰に添加したものに増粘剤を添加した場合は、練り混ぜ後、数 10 分にて塑性粘度は他のものよりも大きく、かつ早い時間から増大し始めており、その後も流動性を失うことなく急激に増大していく。このことは、高性能減水剤添加量 5% において、増粘剤の有無にかかわらず水和度が同程度であり、かつそれが凝結以前であっても、内部の組織には相違があることを示している。

図-9 は蛍光顕微鏡像を示したものである。高性能減水剤を 2% 添加したモルタルにおいては図-9(a) に示すように骨材界面にブリーディングに起因すると考えられる強い蛍光を発する領域が確認された。また、高性能減水剤を 5% 添加した場合は、骨材とセメントペーストとの界面に明瞭なブリーディング領域が観察され、中には明らかに骨材周囲に空隙を残している部分も観察された(図-9(b))。このようなブリーディングに起因する領域の大きさは高性能減水剤を 5% 添加した方が大きくなっていった。この蛍光顕微鏡観察の結果は、図-5 のブリーディング試験結果とも対応し、ブリーディング試験にて大きなブリーディングを示すモルタルは、その内部においてもそれに対応した内部ブリーディング領域を生じて

いることになる。Bjontegaard らは²⁾、供試体表面に表れるブリーディングと同様に内部ブリーディングも自己収縮を軽減し、結果として膨張が生じると述べており、内部ブリーディングが確認される供試体は図-4 においても膨張傾向を示している。しかし、図-9 から確認されるブリーディング領域は高性能減水剤を 5% 添加したものの方が大きいにも関わらず、図-4 における膨張量は高性能減水剤の添加量が 2% のものと同程度であることには留意が必要である。これに対して、増粘剤を添加した場合は、図-9(c) に示すように骨材界面に明瞭な蛍光領域はほとんど観察されず、断面全体のマトリックス中においても均質な蛍光発光であり、内部ブリーディングの存在はほとんど観察されなかった。これより、高性能減水剤を過剰に添加しても増粘剤の効果によりセメントの分散が均質化され、局所的に水セメント比の高い領域が存在しなかったと考えられる。そのような、均質な分散性を保持した状態からセメントの水和が進行する過程にて、毛細管空隙経路の分断が緩やかに進行し、連続経路がより多く残存するような組織形成が行われたと考えられる。また、高い連続性が維持されているにもかかわらず、増粘剤の効果により水分の移動は制限されているために、自己乾燥領域への内部水の移動が抑制されていたものと考えられる。

自己収縮の抑制のためには自己乾燥により生じた空

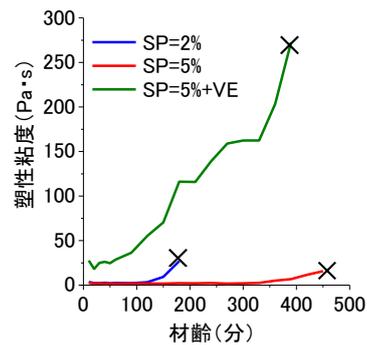


図-8 混和剤添加による塑性粘度への影響 (× : 以後測定不能)

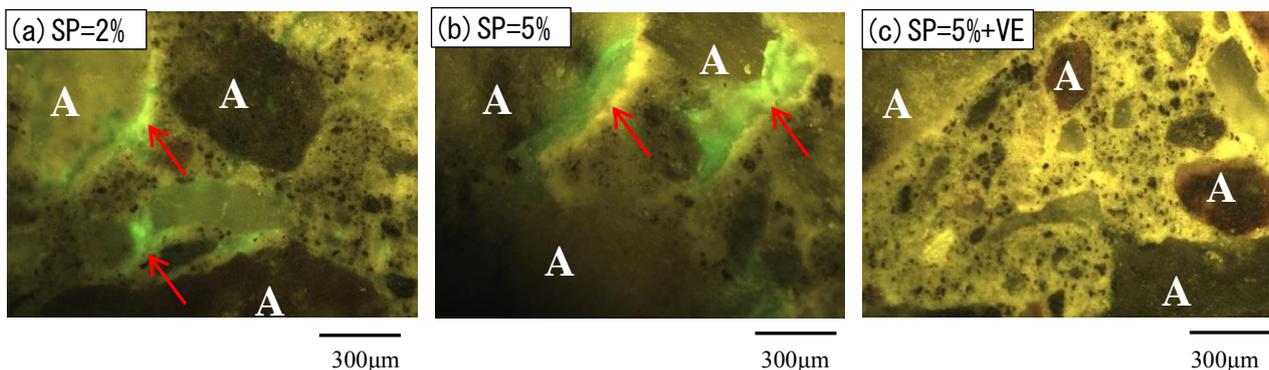


図-9 蛍光顕微鏡像 (A : 骨材, 赤矢印 : ブリーディング領域)

隙への水分移動が必要であり、その過程でブリーディング水の移動が可能な場合はその再吸収によるセメントゲルの膨潤により全体として膨張を生じる。しかし、たとえ系内に同程度の水分が残存したとしても、その移動が妨げられると、自己乾燥領域への水分の移動およびそれに伴う水分の再分配が生じないことになり、結果として自己収縮が顕著に現れたものと考えられる¹⁰⁾¹¹⁾。

5. 結論

本研究は高性能減水剤および増粘剤を使用し、ブリーディング量を変化させたモルタル供試体を作製し、ブリーディングの発生が若材齢におけるモルタルの体積膨張に及ぼす影響について水和反応の進行と関連付けながら考察することを目的とした。本研究において得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) ブリーディング水の再吸収は若材齢期の膨張に大きく影響し、これには内部ブリーディングも関係している。
- (2) ブリーディングの発生時間は自己ひずみ変化の傾向とは必ずしも一致せず、ブリーディングが終了した数時間後に膨張を開始し、その後数時間にわたって増大する。
- (3) 始発前においても水和反応は進行しており、若材齢期における膨張に必要なセメントゲルが生成されている。
- (4) 膨張期と電気抵抗率や塑性粘度の増大期が一致していることから、水和反応によって生成されたセメントゲルへの水分移動が若材齢期の膨張を起こす要因であることが示された。
- (5) 内部水が自己乾燥によって生じた空隙に向かって移動する過程にて、セメントゲルの再吸収によって膨潤を生じるが、その内部水の移動が制限されれば、結果として膨張は認められなくなる。
- (6) モルタルの内部の水分移動は塑性粘度の違いによって大きく変化し、レオロジー特性の理解が若材齢期の自己ひずみ変化を考えるうえで重要と思われる。

謝辞

本研究の実施にあたり日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号 24560564)の交付を受けた。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) Mohr, B.J. and Hood, K.L.: Influence of bleed water reabsorption on cement paste autogenous deformation,

- Cement and Concrete Composites, Vol.40, No.2, pp.220-225, 2010
- 2) Bjøntegaard, Ø., Hammer, T.A. and Sellevold, E.J.: On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete, Cement and Concrete Composites, Vol.6, No.5, pp.427-435, 2004
- 3) Bouny, V.B. et al.: Autogenous deformations of cement pastes: Part II. W/C effects, micro-macro correlations, and threshold values, Cement and Concrete Research, Vol.36, No.1, pp.123-136, 2006
- 4) 桑原寛司, 五十嵐心一: 超吸水性ポリマーの混入がモルタルの収縮挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1378-1383, 2013
- 5) Mechtcherine, V., Secrieru, E. and Schröfl, C.: Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars — Development of yield stress and plastic viscosity over time, Cement and Concrete Research, Vol.67, pp.52-65, 2014
- 6) Powers, T.C.: Physical properties of cement paste, 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, D.C., 1960, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards Monograph 43, Vol.2, pp.577-613, 1962
- 7) Mouret, M., Bascoul, A. and Escadeillas, G.: Study of the degree of hydration of concrete by means of image analysis and chemically bound water, Advanced Cement Based Material, Vol.6, No.3-4, pp.109-115, 1997
- 8) 大村修太郎, 畑中重光, 三島直生: 回転粘度計を用いたフレッシュコンクリートのレオロジー性質に及ぼすダイラタンシー特性の定量化に関する実験的研究, 三重大学修士論文, 2008
- 9) 柴山舞, 五十嵐心一: モルタル中の不均質な多孔質領域が電気伝導率に及ぼす影響. コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.83-88, 2011
- 10) Igarashi, S., Aragane, N. and Koike, Y.: Effects of spatial structure of superabsorbent polymer particles on autogenous shrinkage behavior of cement paste, Proc. Int. RILEM. Conf. on Use of Superabsorbent Polymer and other new Additives in Concrete, (Jensen, O.M., Hasholt, M.T. and Laustsen, S. eds.) RILEM SARL, Bagneux, France, pp.137-147, 2010
- 11) Wyrzykowski, M. et al.: Modeling of water migration during Internal curing with superabsorbent polymers, J. Material in Civil Engineering, ASCE, Vol.24, No.8, pp.1006-1016, 2012