

論文 ひび割れ導入モルタルの X 線 CT による自己治癒過程の研究

人見 尚^{*1}・片岡 弘安^{*2}

要旨：モルタル中のひび割れの直接観察による自己治癒のメカニズム解明を目的として、普通ポルトランドセメント(OPC)および高強度セメント(HSC)を用いたモルタル供試体について、ひび割れを導入し、2 日間の通水試験を行ない、高分解能 X 線 CT を用いてその前後の内部観察を行った。その結果、モルタル供試体のひび割れおよび細骨材が明瞭に観察でき、ひび割れの形状は OPC と HSC で大きく異なっていたことがわかった。通水前後の比較より、OPC ではひび割れの自己治癒とひび割れの増加が見られ、HSC ではひび割れの周囲に変質が見られ、セメントペースト部分での密度の低い物質への変質を確認した。

キーワード：ひび割れ、自己治癒、高強度セメント、X 線 CT

1. はじめに

コンクリートの劣化現象の一つに、ひび割れの発生がある。ひび割れの発生原因として、硬化時の部材内外の温度差によることやコンクリートが脆性材料からなる複合材料であるために引張り荷重の生じた部分でも弾性変形ができないことが知られている。これらの解決はいまだ困難であり、ひび割れの補修や予防に、多くの労力が割かれ、多くの技術者がその対策に従事している。

コンクリートのひび割れがコンクリートの成分により自動で補修されることは、コンクリートの自己治癒または自己修復と呼ばれている。この現象の身近な例としてエフロレッセンスがある。これは、コンクリート中のカルシウムがひび割れを経路として表面に現れた際に空中の二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムを作り、ひび割れを埋める現象である。このようなコンクリートの自己治癒に関しては、多くの研究がなされてきている。まず、単位セメント量を多くすることで未水和のセメントを残しひび割れ発生箇所水和による閉そくさせる例¹⁾がある。次いで、繊維の混入によりひび割れを分散させ、その幅を狭くして治癒させる ECC²⁾の例がある。混和材の積極利用としては細田らの膨張材の大量使用³⁾の例や、谷口らのフライアッシュセメント⁴⁾および岸らの方法⁵⁾がある。

これらの自己治癒に関してはそのメカニズムの解明が更なる自己治癒性能の向上に寄与すると考えられる。しかしこれまでは、ひび割れ面の表面観察や引き剥がして開いたひび割れ面の観察に留まっており、ひび割れ内部の直接観察は不可能であった。このため、ひび割れ内部の幅の把握やひび割れ内部の水の流れとの自己治癒との関係を定量的に考察することは困難であった。コンクリート内部観察法として、近年盛んに利用が進められてきた X 線 CT がある。市販の X 線 CT では、コンクリ

ートの観察では天明らかによる粗骨材分布の例⁶⁾がある。大型放射光施設の高分解能 X 線 CT では、筆者らによってセメントペーストの空隙や水和物の分布や構成の観察^{7,8)}が行われている。さらに空隙中の物質の移動特性⁹⁾やモルタルの破壊過程の観察¹⁰⁾など高分解能 X 線 CT の応用は広がってきている。本法は、モルタル試料にも適用できると考えられる。本報告では、モルタル供試体に導入したひび割れの直接観察を通じ、ひび割れと細骨材との位置関係、およびひび割れの自己治癒現象の発生とその条件について述べ、自己治癒のメカニズムに関する考察を加えた。

2. 試験方法

2.1 供試体の仕様と作成

試験対象とした供試体は、普通ポルトランドセメントモルタル(以下、OPC)と、高強度セメントモルタル(以下、HSC)とした。表-1 に使用材料を示す。供試体の調合を表-2 に示す。HSC は、OPC に比べ水—結合材比(W/B)が非常に小さく単位セメント量が多いため、未水和のセメントも多く残っていると推測される。供試体に用いたモルタルは、練混ぜ後、直径 5cm、高さ 10cm の円筒型枠に打設し、24 時間の封かん養生後、脱型し、水中養生を行った。観察時の材齢は OPC が 2 年、HSC が 181 日である。供試体は、試験 1 日前に直径 5mm で高さが 6~7mm の円筒形に加工後、無水アルコールに浸漬し水和を停止させた。試験直前に熱収縮チューブの中心に供試体を設置し両端に通水用のシリコンチューブを継ぎ足し、ドライヤーで加熱し供試体とシリコンチューブを固定した。写真-1 に供試体と固定後の外観を示す。さらに、固定した供試体に万力を用い、割裂によりひび割れを導入した。

2.2 試験項目および試験方法

*1 (株) 大林組 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株) 大林組 技術研究所 生産技術研究部 研究員 修士(工学) (正会員)

試験は、通水試験により供試体のひび割れ部からの通水量の測定と X 線 CT によるひび割れ部の観察を行った。

(1) 通水試験

供試体はひび割れの初期状態を X 線 CT で観察の後、通水試験に供した。通水試験の状況を写真-2の左側に、供試体部分を右側に示す。供試体よりも 1.5m 上に設置したタンクに水を貯め、静水圧のみで通水を行った。

通水量は、供試体によってひび割れ幅も異なるため、条件を揃えることはできなかった。また、通水によって排出された水の量は 1 時間あたり 100ml 弱であった。通水期間は 2 日間とし、通水前の初期状態と通水後について X 線 CT 撮影を行った。

(2) X 線 CT

X 線 CT 撮影は、高エネルギー加速器研究機構に設置の放射光科学研究施設であるフotonファクトリー(Photon Factory: 以下 PF)のビームライン BL-14B の装置を用いた。図-1に装置の構成を示す。X 線は、PF の電子蓄積リングで強力な磁場により発生させ、ビームラインに誘導される。さらに X 線は分光結晶で適切なエネルギーに調整される。供試体を透過した X 線は像として CCD で受光される。

得られるデータは、角度を変えて撮影された X 線透過像である。透過像を用い数値計算を行うことで、供試体の断面図を得ることができる。コンクリート構成元素と空気の X 線吸収係数の比較より、15~25keV が X 線の照射エネルギーとして適している¹⁾ため、本試験における照射エネルギーはおよそ 25keV に設定した。事前の調査結果より、最適条件として投影数は 900 とし、露光時間は 1.5 秒とした。断面図には、回転中心に沿って、同心円状のノイズが現れた。これは、アーチファクトと呼ばれ、撮影時の X 線の時間変動や試料台などの温度や振動による揺らぎに起因している。ノイズの除去は今後の課題である。

断面図の計算には、PF で作製されたソフトウェア CtCalc(画像における回転中心位置の算出)、CtCbp(Cbp 法に基づく断面図再構成)、Raw2Bmp(画像の形式変換)を用いた。本試験で用いた CCD カメラは、Photonic Science 社製の X-FDI で、水平方向は 8.9mm、高さ方向は 6.7mm の視野を有し、構成画素数は 1384×1040 である。構成する画素の寸法は 6.45μm で、観察範囲は、9.0mm×9.0mm の領域である。

X 線 CT による断面図では、画素の明るさが物質とその密度の積に対応し、分子量が大きく密度が高いものほ

表-1 使用材料

| 材料名 | 記号 | 品名 | 品質 |
|------|-----|------------------|---|
| セメント | OPC | 普通ポルトランドセメント | 密度 3.16g/cm ³ |
| | LPC | 低熱ポルトランドセメント | 密度 3.22g/cm ³ |
| 混和材 | SF | シリカフューム | 密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 20000cm ² /g |
| | FA | フライアッシュ・JIS II 種 | 密度 2.25g/cm ³ , 比表面積 3290cm ² /g |
| 細骨材 | S | 陸砂・粒径 2.5mm 以下 | 密度 2.62g/cm ³ |
| 混和剤 | SP | 高性能 AE 減水剤 | ポリカルボン酸エーテル化合物 |

表-2 供試体の調査

| 供試体名称 | W/B (%) | S/B | 単位量 (kg/m ³) | | | | | 膨張剤 (kg/m ³) | 減水剤 (kg/m ³) |
|-------|---------|------|--------------------------|-----|------|-----|------|--------------------------|--------------------------|
| | | | W | OPC | LPC | SF | S | | |
| OPC | 50 | 2.0 | 305 | 610 | | | 1220 | | 0.5 |
| HSC | 14 | 0.37 | 228 | | 1425 | 158 | 588 | 44 | 3.2 |

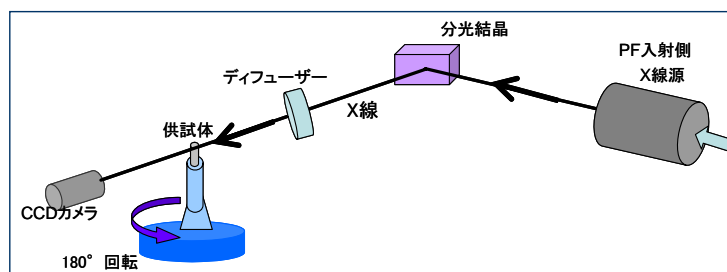


図-1 X線CT装置の構成



写真-1 供試体の外観と固定後の外観



写真-2 通水試験の状況

ど明るい色調で表示される。供試体の構成材料は、空気、細骨材およびセメントペーストであり、それぞれの構成材料は固有の輝度を持つ。これらの材料を示す固有の輝度の間にしきい値を設け、それぞれの構成材料を表示している画素だけを抽出することでそれぞれの材料の二

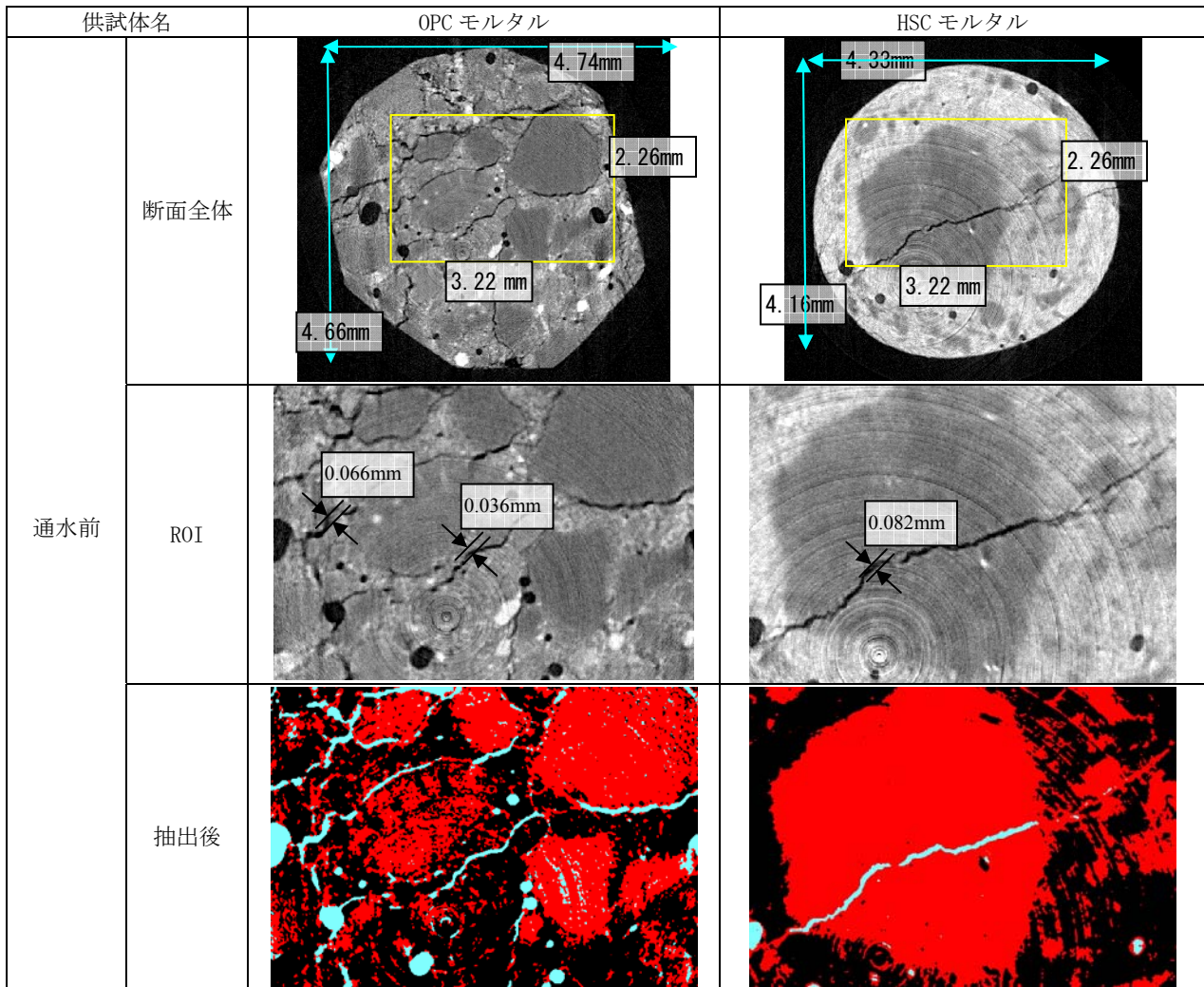


図-2 ひび割れおよび断面の可視化結果

値化表示ができる。しきい値の設定方法は、Promenntillaらによる断面図の画素を輝度に応じたヒストグラムについて空隙(空気)を表す分布と材料を表す分布の中間の材料側の変極点にしきい値を設置する方法⁹⁾を用いた。断面図の二値化の画像処理にはフリーソフトであるImageJおよび付属のマクロを用いた。

骨材やひび割れおよび空隙の形状などに注目し、位置合わせを行うことにより、通水前後の供試体の断面図間の比較が可能になる。ひび割れ部分の位置合わせにはImageJのマクロであるStuckregを用いた。詳細観察の過程では、断面図の微細な空隙の有無が異なるという問題点が見られた。これは投影数の不足によるものと思われる。この傾向は、独立した気泡に現れ、ひび割れへの影響は小さいことを確認した。

3. 試験結果

3.1 断面図

OPC および HSC のひび割れおよび断面図の可視化結果を図-2に示す。断面図は供試体の中央部分のものであ

る。上段に断面の全体、中段に抽出した領域(以下、この領域をROI (Region of interest: 関心領域)と標記)、下段にROIについてひび割れと細骨材をのみを抽出した画像を示す。周囲の空気の影響を排除するためROIは中心部分の500×350ピクセル(3.23×2.26μm)の領域とした。周囲の空気やひび割れは黒色、未水和のセメントは白色で表示されている。細骨材はOPCでは周囲より若干暗色の粒状で内部が均質な領域、HSCでは周囲の領域より暗色の領域で表示されている。この細骨材の色調の違いは、OPCに比べHFSCは単位セメント量が多く、緻密でカルシウム含有量の多いセメントペーストを形成していることに起因する。図-2のROIのひび割れと細骨材の抽出結果ではひび割れは水色、細骨材は赤色で示した。その他の部分は、セメントペーストである。

ひび割れ形状の特徴として、OPCでは分散して網目状に存在するが、HSCでは、ひび割れは直線的に存在する傾向が見られた。

OPCのひび割れは細骨材とセメントペーストとの境界を通るように発生し、HSCのひび割れは細骨材を貫通

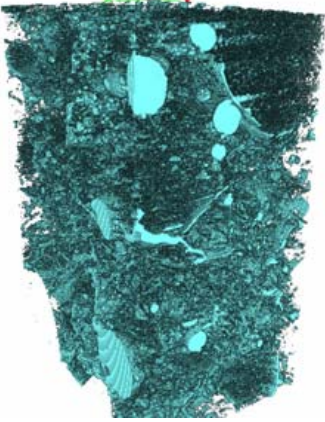
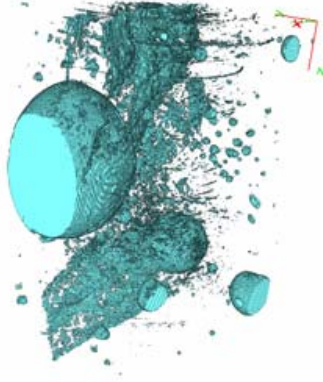
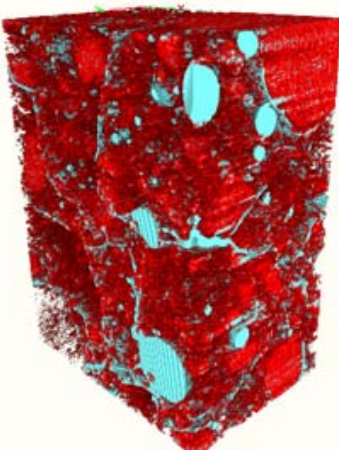
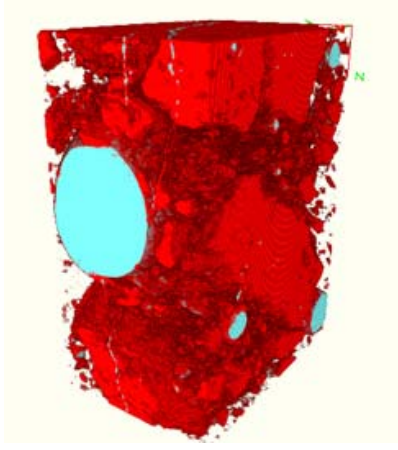
| 供試体名 | | OPC モルタル | HSC モルタル |
|------|--------------|--|---|
| 通水前 | 空隙 (ひび割れ) |  |  |
| | 空隙と細骨材 |  |  |

図-3 ひび割れおよび骨材の3次元可視化結果

する傾向が見られた。HSC のような高強度コンクリートでひび割れが骨材を貫通することはよく知られており、このような微細なスケールでもこの現象が見られたことになる。ひび割れ幅は、大きなもので OPC では 0.066mm, HSC では 0.082mm であった。ひび割れの発生形態の異なる理由として、細骨材量とセメントペースト部分の強度の違いによると考えられる。OPC は W/C も大きいため細骨材に比べ強度が低いこと、細骨材周囲に遷移帯のような強度の低い領域が存在することなどが考えられる。これに対し HSC においては、細骨材量が少なく、セメントペーストの強度が細骨材より高く、ひび割れが細骨材を貫通する箇所も見られたと考えられる。

3.2 ひび割れの立体像

空隙を立体的に表示した結果を図-3に示す。上段はひび割れのみ、下段はひび割れと細骨材を併せたものを示す。空隙にはひび割れに加え、気泡も含まれている。微細な気泡やアーチファクトを排除するため、それぞれの断面における ROI についてノイズ除去を行なった後、これらを積層し、立体画像を作製した。立体画像の高さ方向には断面図を 800 枚積層した。表示した領域は 500

×350×800 ピクセル(3.23×2.26×5.16 μm)である。

下段の細骨材位置を考慮すると、図-2 の中段のひび割れ分布の傾向と呼応するように、OPC では、細骨材とセメントペーストとの境界を結ぶようにひび割れが分布している。一方、HSC ではひび割れは大きく一枚の平板のような直線的な形状で存在する傾向が見られた。

また、OPC では細かい気泡が散在しているが、HSC では数十～数百 μm 程度の大きな気泡が点在する様子が分かる。これらは W/B の違いで OPC が空隙を多く含むことに加え、HSC では SF の使用によりセメントペースト部分の粘性が増大し大きな気泡が巻き込まれたためと考えられる。

3.3 浸漬試験後の断面

浸漬試験後の結果の一例としてそれぞれの供試体の ROI について図-4に示す。通水期間が2日という短期間であり、通水が止まることは確認できなかった。また、全断面を通じ、いずれの供試体にもひび割れが全面的に閉塞した様子は確認できなかった。

OPC の場合は、通水前後で赤い囲みのセメントペースト側の境界において、材料のせりだしが確認できた。HSC

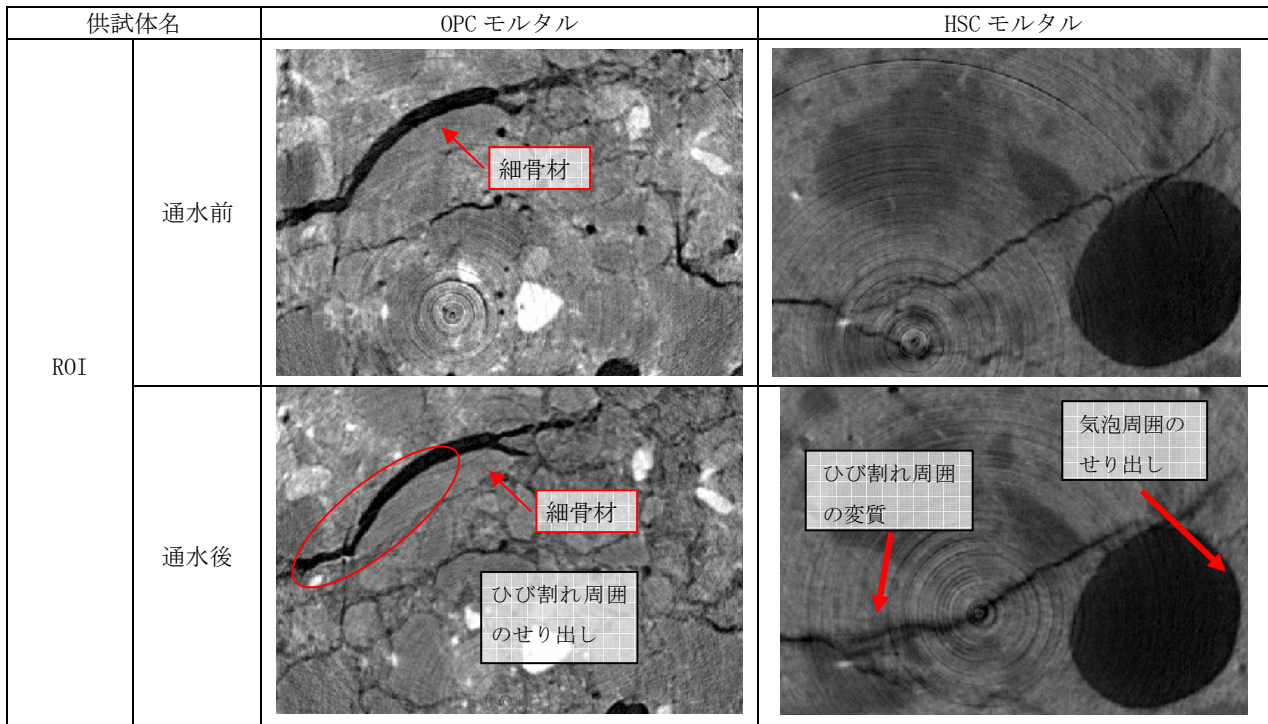


図-4 ひび割れおよび断面の比較による変質状況

の場合は、気泡周囲でのせり出しが顕著であったことに加えて、細骨材部分では OPC のようなせり出しが見られなかったが、セメントペースト部分においてひび割れ部分の変質が認められた。赤の矢印で示すひび割れの周囲には、セメントペースト部分とは異なる輝度を有する組織の分布が確認された。先述の通り輝度は、画素に含まれる物質の分子量と密度の積で表され、この組織は、ひび割れ部分の水分と未水和セメントが反応した硬化体組織が卓越したと考えられる。組織の色調は骨材に近いものになっているため、ケイ素成分を多く含むカルシウムシリケート化合物がまたは密度の低い炭酸カルシウムが主成分となっている可能性も考えられる。HSC には膨張材が使われているが、膨張材の効果は判断できない。組織の水和物構成や膨張材の効果については今後の課題である。

3.4 断面図の重ねあわせによるひび割れ形状の変化

二値化した ROI の空隙について、断面図の重ね合わせを行い、画像の差分演算により、空隙であった部分が材料に変化した部分を求めることで供試体内の自己治癒部分の抽出を行った。位置合わせを行うために ROI の各断面を、テキストデータに変換し、画素ごとの演算を行った。3.3 節で用いた ROI についての結果を図-5 に示す。自己治癒によって空隙部であったところがセメント水和物へと変化した部分を緑で示し、修復の無い空隙を赤、それ以外の部分は青色で示した。

OPC の場合、自己治癒が進む傾向が認められた。ひび割れに沿って皮膜のように領域に物質の生成が認めら

れた。図-4 との比較によりひび割れ部の物質の生成はセメントペースト部分に多く見られ、細骨材側の生成も薄膜状であるが見られた。同時に、新たに空隙の増加している領域も見られた。これは、ひび割れ内部にあった物質が通水によって失われたものと考えられる。

HSC の場合は、前節で述べたように、細骨材部分では変質はわずかであった。また気泡の部分にも材料部分のせり出しが見られた。セメントペースト部分に発生したひび割れの部分では、ひび割れに接するセメントペースト部分に変化が見られ、周囲のセメントペースト部分と異なる材料の生成が見られた。この変化は自己治癒機能につながる可能性を有すると考えられる。この傾向は OPC には見られなかった。

すなわち、OPC ではセメントペースト部分のごく表層由来の物質が自己治癒に寄与し、HSC ではセメントペースト周囲の物質からの析出が期待できる。いずれの供試体でも細骨材側の自己修復はほとんど見られなかったが、OPC ではひび割れの多くが、細骨材の周囲に存在していたことを合わせると、セメント量に加え、ひび割れがどの材料に接しているかが自己治癒の実現に大きく寄与していると考えられる。効率的な自己治癒の実現には、セメントペースト部分に、治癒機能を持たせ、細骨材量を考慮することなどが必要と推測される。

4. まとめ

モルタル中のひび割れおよびその自己治癒過程のメカニズムの理解を目的として、普通ポルトランドセメン

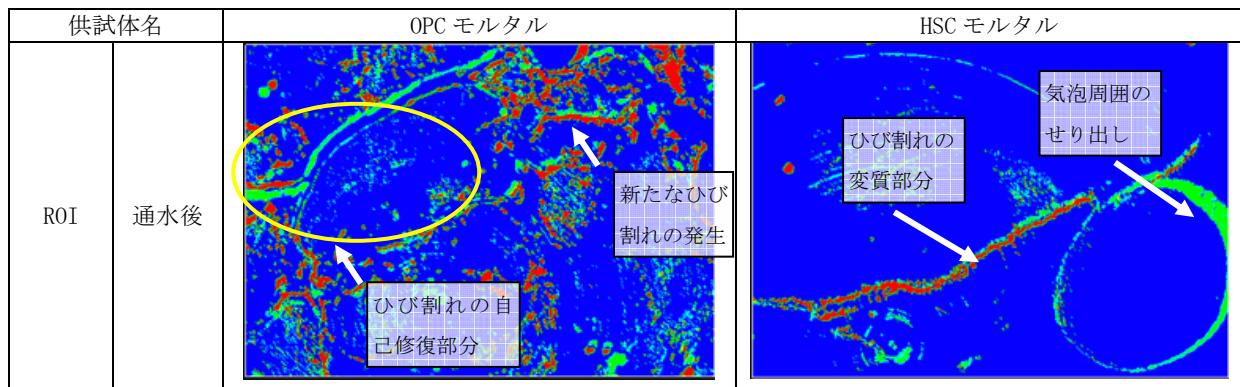


図-5 ROI の重ねあわせによる変化の抽出結果

ト(OPC) および高強度セメント(HSC)について、ひび割れを導入し、2 日間の通水試験を行なった供試体の前後について高分解能 X 線 CT を用いて内部の観察を行い、以下の結果を得た。

- (1) モルタル供試体の観察を通じ、ひび割れおよび細骨材が明瞭に観察でき、観察可能な最小ひび割れ幅は $13\mu\text{m}$ であった。
- (2) ひび割れの形状は供試体によって大きく異なり、OPC モルタルではひび割れは細骨材の周囲に、HSC ではひび割れは平板状となり細骨材を貫通していた。これらは、セメントペースト部分の強度の違いを反映すると考えられる。
- (3) OPC のひび割れの自己治癒はセメントペーストに接する部位で大きく認められ、細骨材に接する部位では、わずかであった。
- (4) OPC モルタルでは、自己治癒も起きるが通水によって新たな空隙の増加も見られた。HSC では、ひび割れの修復に至らないものの、ひび割れ周囲でセメントペースト部分の密度の低い物質への変質の傾向が見られた。さらに、気泡の周囲にせり出しが確認された。

本研究は、先端研究施設共用事業フォトンファクトリーにおける産業利用推進(課題番号 2009I004)の下で実施されました。ここに銘記し謝意を表します。

参考文献

- 1) Reinhardt H.S, Joos M. : Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, Cement Concrete Research, Vol.33, No.7, pp.981-985,2003
- 2) Yamamoto A., Watanabe K., Li V. C., Niwa J. : Effect of wet-dry condition on self-healing of early-age ECC, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.251-256, 2010
- 3) 下村哲雄, 細田暁, 岸利治 : 低水粉体比の膨張コンクリートのひび割れ自己修復機能, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.661-666, 2001
- 4) 藤原祐美ほか : フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.303-308, 2007
- 5) 森田卓, 戸部良太, 安台浩, 岸利治 : ひび割れ自己治癒組成物を用いた漏水防止対策に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1577-1582, 2010
- 6) 天明敏行, 尾原祐三, 堤知明, 村上裕司 : X 線 CT 法による硬化コンクリートの特性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.545-550, 2010
- 7) 人見尚, 三田芳之, 斉藤裕司, 竹田宣典 : SPring-8 における X 線 CT 像によるモルタル微細構造の観察, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.645-650, 2004
- 8) 人見尚, 竹田宣典 : X 線 CT によるセメント水和物の分析, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.757-758, 2008
- 9) Promentilla M.A.B., Sugiyama T., Hitomi T., Takeda N. : Characterizing the 3D pore structure of hardened cement paste with synchrotron microtomography, J. Adv. Con. Tech., Vol.6, No.2, pp.273-286, 2008
- 10) Landis E.N., Zhang T., Nagy E.N., Nagy G: Cracking, damage and fracture in four dimensions, Materials and Structures, Vol.40, pp.357-364, 2007
- 11) D.P. Bentz, P.V.Coveney, E.J.Garbozi, M.F.Kleyn and P.E. Stutzman, Cellular automaton simulations of cement hydration and microstructure development, Modelling Simulation Materials Science Engineering, Vol.2, pp.783-808, 1994
- 12) Stutzman P.: Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure, Cement and Concrete Composites, Vol.26, pp.957-956, 200