



課題番号： 2009I004

研究責任者： 人見尚、株式会社大林組 技術研究所

利用施設： 高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設 BL-14B

利用期間： 2009年10月～2010年9月

建設材料の欠陥や不良部位イメージングによる破壊メカニズムの解明
Solution of the destruction mechanism using imaging of the defect or the defective part of
the construction materials

人見 尚

Takashi HITOMI

株式会社大林組技術研究所
Obayashi technical research institute

アブストラクト：

コンクリートの破壊メカニズムの解明を目的として、高分解能 X 線 CT を用いた欠陥・不良部位のイメージングを試みた。建設材料として、砂とセメントを混合したモルタルについて非破壊観察を行い、X 線 CT が建設材料の観察に適すると判断した。さらに不良部位であるモルタル中の 0.013mm 以上の幅のひび割れが観察可能であることを確認した。本観察法が破壊メカニズムの解明の有効なツールであることを確認した。

For the purpose of solution of the destruction mechanism of the concrete, the imaging of the defect or the defectiveness parts were tried with using high resolution X-ray computed tomography (X-ray CT). As construction material, nondestructive observation of mortar, which is mixture of sand and cement, was performed. With this result, X-ray CT was judged as suitable for the observation of the construction material. Furthermore, it was confirmed that the cracks of width more than 0.013mm that defect parts in mortar were observable. Than the above, this observational method confirmed that it was a convincing tool of the solution of the destruction mechanism.

キーワード： X 線 CT, コンクリート, 非破壊観察, ひび割れ, 可視化

1. はじめに： コンクリートは、粗骨材と呼ばれる粒径数十ミリ程度の岩石と、細骨材と呼ばれる粒径を 2mm 以下に調整した砂と、セメントと水を練り混ぜて作られる複合材料である。

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、コンクリートが高脆性材料からなる複合材料であるため、引張り荷重の生じた部分でも弾性変形ができないことや、コンクリート作製時にセメントペーストと呼ばれるセメントと水の混合物が硬化に伴い収縮や発熱を起し、部材の内外温度差による膨張割合の差によることが知られ

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、多くの研究者がその対策に従事している。

コンクリートのひび割れの発生メカニズムに関しては、上述のような理解はなされているが、ミクロなスケールにおいて、粗骨材や細骨材、そしてセメントペーストのどこで、どのような条件で発生し、それが進展していくかに関しての研究的取り組みはいまだ始まったばかりである。これらを解明し、微細な組織の改良により、ひび割れの発生の予防は可能になると思われる。しかしこれまでは、セメントペーストや細骨材、

さらにそれらの界面といったマイクロな領域を非破壊で直接観察する手段が無かった。

Photon Factory(以下、PF)では、市販の X 線 CT 装置に比べ、軽元素からなるコンクリートの観察に適したエネルギーの選択が可能で、高分解能な X 線 CT 観察が可能になっている。本研究では、コンクリート破壊メカニズムの理解のため、X 線 CT によるコンクリート材料観察の有効性評価のため、コンクリート材料の観察最適条件と破壊によって生じるひび割れの 3 次元的な観察を行った。

2. 実験：

本研究では、PFにおけるX線CTがコンクリートの観察，特にひび割れの可視化に適するかの見極めを中心に実験を行った。第1回は、サンプル観察の最適条件の探索，第2回および第3回は，実際にひび割れを導入した供試体の観察を行い，不良部位すなわちひび割れの可視化が可能かを目的とした。

2.1 コンクリート直接観察の最適条件

(1) 目的

PFにおけるX線CT観察に最適な供試体サイズ，照射X線のエネルギーなどの最適条件を求める。

(2) 試験方法

1) 供試体

供試体には，作製から2年が経過し水と結合材の比率(W/B)=50%で，砂とセメントを含む結合材の比率(S/B)=2.0のモルタルを用いた。また一部確認用に砂を取り除いた同じ配合の普通ポルトランドセメント(OPC)のセメントペーストを用いた。供試体は4種類とし，OPCのモルタルとセメントペースト，一部をフライアッシュ(FA)

に置換した低熱ポルトランドセメント(LPC+FA)および高シリカ含有フライアッシュセメント(HFSC)のモルタルである。表-1に使用材料の一覧を示す。供試体の調合を表-2に示す。供試体は，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、観

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 3.16g/cm ³
混和材	SF	シリカフェーム	密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 20000cm ² /g
	FA	フライアッシュ・JIS II種	密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 20000cm ² /g
最骨材	S	陸砂・粒径 2.5mm 以下	密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 20000cm ² /g
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤・SP-8SBMx2	ポリカルボン酸エーテル化合物ポリマー錯体

表-2 供試体の調合

供試体 名称	W/B (%)	S/B	単用量 (kg/m ³)					減水剤 (kg/m ³)	
			W	OPC	LPC	SF	FA		S
OPC	50	2.0	305	610				1220	0.5
LPC+FA			298		417		179	1192	1.2
HFSC			290	232		113	232	1159	0.3

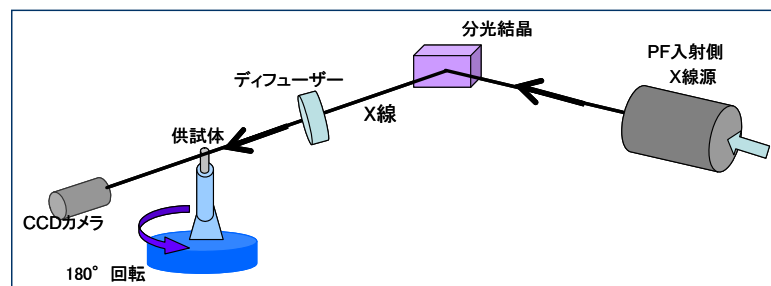


図-1 X 線 CT 装置の構成

察まで水中養生を行った。観察用に直径 5mm で高さが 20mm 程度の円筒形に加工後，無水アルコールに浸漬し水和を停止させた後，炭酸化を防ぐために小瓶にシリカゲルとともに密封した。

2) X 線 CT

X 線 CT 撮影は，PF のビームライン BL-14B を用いた。図-1 に装置の構成を示す。PF のリングから引き込まれた X 線は，まず分光結晶に照射され，適切なエネルギーに調整される。さらに，照射範囲の X 線強度を揃えるためにディフューザーを透過させ，供試体に照射される。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透過像である。これらを

再構成することで、供試体の断面図が得られる。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ことがわかった¹⁾。X 線はエネルギーが小さいほど透過力が低下するため、本試験における照射エネルギーはおよそ 25keV 付近に設定した。再構成には、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。断面図としては、9.0mm 四方の領域となり、構成する画素の寸法は 0.00645mm である。

(3) 試験結果

露光時間や投影数など、条件を変えた 18 回の観察を実施した。供試体、条件および結果の一部を表-3 にまとめた。観察結果を元に断面図を求めた結果を図-2 に示す。空気は黒色、材料部分はグレースケールで表示した。

観察番号 1~11 までは、最適な投影数を求めることを目的とした。360 枚以下の投影数では、断面図は得られないことが分かった。観察番号 4 および 8~11 において、投影数を増やし、900 枚の撮影で得られる断面図の画質が良好であることが分かった。また、露光時間は、1 枚の投影像を撮影する間に供試体に X 線を照射する時間のことを示すが、露光時間が長くなるほど、投影像のコントラストが向上することが分かった。

しかし、露光時間を増やすと、受光側の CCD カメラ信号が飽和することや、供試体観察に必要な

表-3 観察結果まとめ

試験番号	試験体仕様	投影数	露光時間(秒)	結果
1	OPC、φ 5mm	45	5	輪郭のみ確認
7	OPC、φ 5mm	180	4	結像せず(エネルギー低下)
9	OPC、φ 5mm	360	2	金属性の明るい点を確認
12	OPC、φ 5mm	900	3	空隙を確認
14	LPC、φ 5mm	900	4	骨材の境界を確認
15	HFSC、φ 5mm	900	4	骨材の境界を確認
16	OPC、φ 5mm、ひび割れ	900	3	ひび割れを確認
17	HFSC、φ 5mm、ひび割れ	900	4	骨材の境界、ひび割れを確認
18	LPC、ひび割れ(チューブ)	900	4	骨材の境界、ひび割れを確認

な時間が増えることになり、今回は、3~4 秒の露光時間が最適であることが分かった。

観察番号 9~12 までは、OPC のセメントペーストを観察対象とした。一番条件の良い観察番号 12 の断面図において、気泡が明瞭に観察できる結果となった。観察番号 13~15 においては、各種モルタルの撮影を行った。それぞれ骨材を明瞭に区別できることが分かった。しかし、観察番号 9~12 の結果も併せると、セメントペースト部分の詳細観察には不向きであること考えられた。観察番号 16~18 において、ひび割れを導入したモルタルの観察を行った。ひび割れは明瞭に観察することが可能であり、ひび割れ幅は画素数を数えることで求めることが可能である。観察番号 18 は熱収縮チューブを用い、側面を拘束した状態での撮影結果である。チューブは断面図には明瞭に現れず、また内部の断面図にも影響を及ぼさないことが分かった。

以上の結果より本測定法は建設材料の観察に適すると判断した。

2.2 コンクリートのひび割れ部の直接観察

(1) 目的

コンクリートの破壊は内部に微細なひび割れ

が発生し、それが伝播しひび割れ幅が増大していく過程をたどると考えられる。また、微細な

(2) 試験方法
1) 供試体

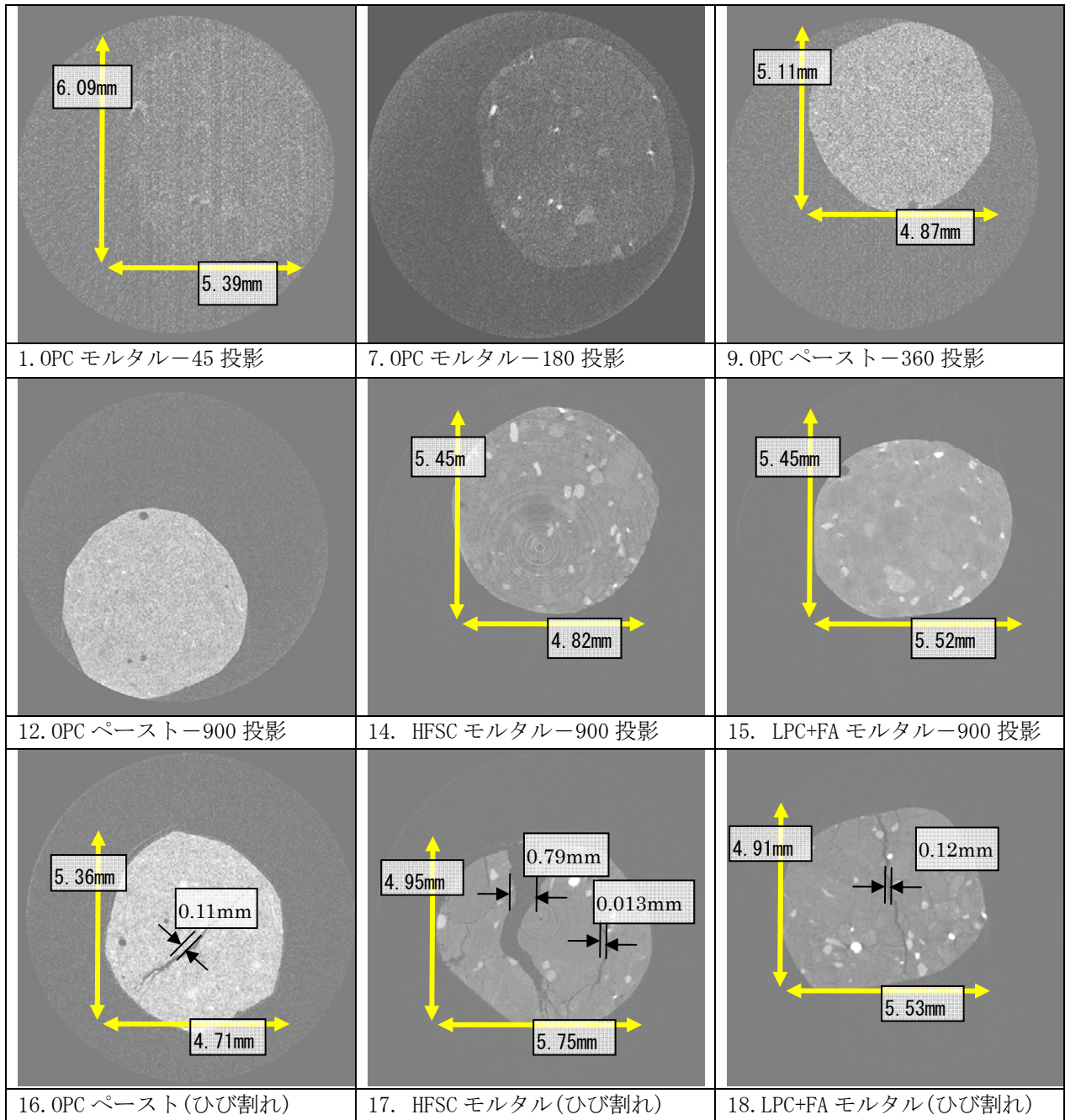


図-2 各供試体の断面

ひび割れの発生は、コンクリートに含まれる粗骨材や細骨材とセメントペースト部分の弾性係数などの物性値の違いにより、その界面より発生すると考えられている。本検討では、モルタル供試体内部の非破壊観察を行い、ひび割れを三次元的に把握できるかを確認し、さらにそのひび割れと細骨材との位置関係を求めることを目的とした。

供試体は、1章で用いた配合のサンプルを用いた。供試体は、およそ直径 5mm の円筒形に加工後、熱収縮チューブで周囲を拘束し、万力を使い割裂する要領で円を横切るようにひび割れを導入した。ひび割れ幅の制御は行っていない。

2) 試験方法

X線 CT 装置の構成は、前節と同様とした。照射エネルギーは、細骨材とセメントペースト部

分の区別のために、前節よりもエネルギーを落とし、22keVとした。露光時間は3秒、投影数は

それぞれの図を合成して、ひび割れと細骨材の抽出画像を作成した。

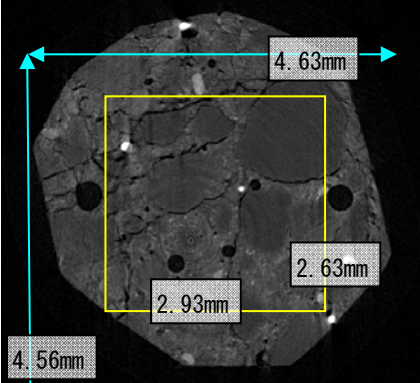
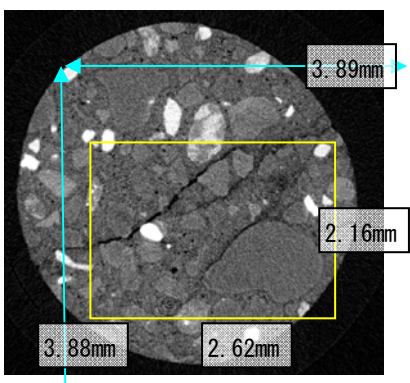
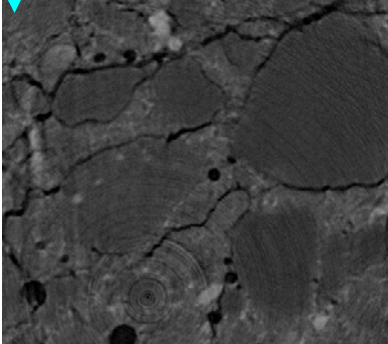
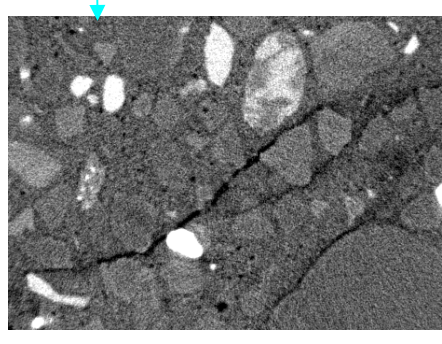
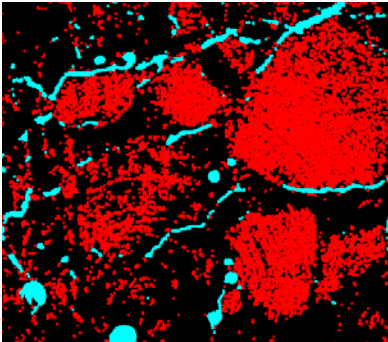
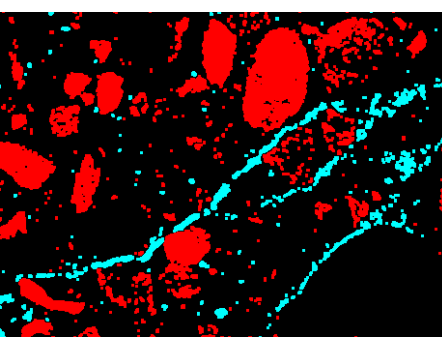
供試体名	OPC モルタル	HFSC モルタル
断面全体		
注目した領域		
ひび割れと骨材		

図-3 ひび割れおよび断面の可視化結果

900とした。

3) ひび割れおよび骨材の可視化方法

得られた透過像群を用い、PFで用意されたソフトウェア (CtCalc, CtCbp, Raw2Bmp) により断面図を求めた。断面全体では画像の規模が大きいため、供試体内部の長方形の領域を抽出し、その部分に関し、ひび割れ部分および骨材部分を二値化により抽出した。これらの処理にはImageJを用いた。なお、二値化を行っても、画面全体には点状のノイズが残った。このノイズを消去するために、ひび割れおよび骨材の抽出後の結果の図にスムージング処理を施した。そ

(3) 試験結果

観察結果のうち、普通ポルトランドセメント、およびHFSCの結果を図-3に示す。上段に断面の全体、中段に抽出した領域、下段に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の領域、HFSCでは周囲の領域より若干明るい粒状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はケイ素を多く含み相対的にカルシウムの含有量が低いことに起因する。OPCモルタルの図-3に

おいてひび割れは水色、骨材は赤色で示した。その他の部分は、セメント硬化体となる。いずれの供試体においても、ひび割れは細骨材とセメント硬化体との境界を通るように存在する傾向が見られた。図-4 にひび割れと細骨材の像を厚さ方向に 800 枚を集積することで得られる立体像を示す。いずれもひび割れは、骨材周囲を包むように存在する様子がみてとれる。本観察法により非破壊でひび割れを観察することが可能で、さらに、骨材などひび割れ発生と関係すると思われる材料を抽出しそれらの三次元的な位置関係を把握することが可能であり、コンクリートの破壊過程の観察には有用であることが分かった。

3. まとめ

PF における高分解能 X 線 CT を用い、コンクリートの構成材であるモルタルの観察に最適な条件を求め、コンクリート破壊メカニズムの解明に必要となるコンクリート中のひび割れの抽出を試みた。結果を以下にまとめる。

1. モルタルの観察には、照射エネルギーが 25keV の条件で、露光時間が 3~4 秒程度、投影数は 900 が最適である。
2. 供試体のサイズは、円筒形で直径 5mm 以下が最適であった。それ以上の直径では X 線が透過しない。
3. 観察可能なひび割れの最小幅は 0.0013mm であった。

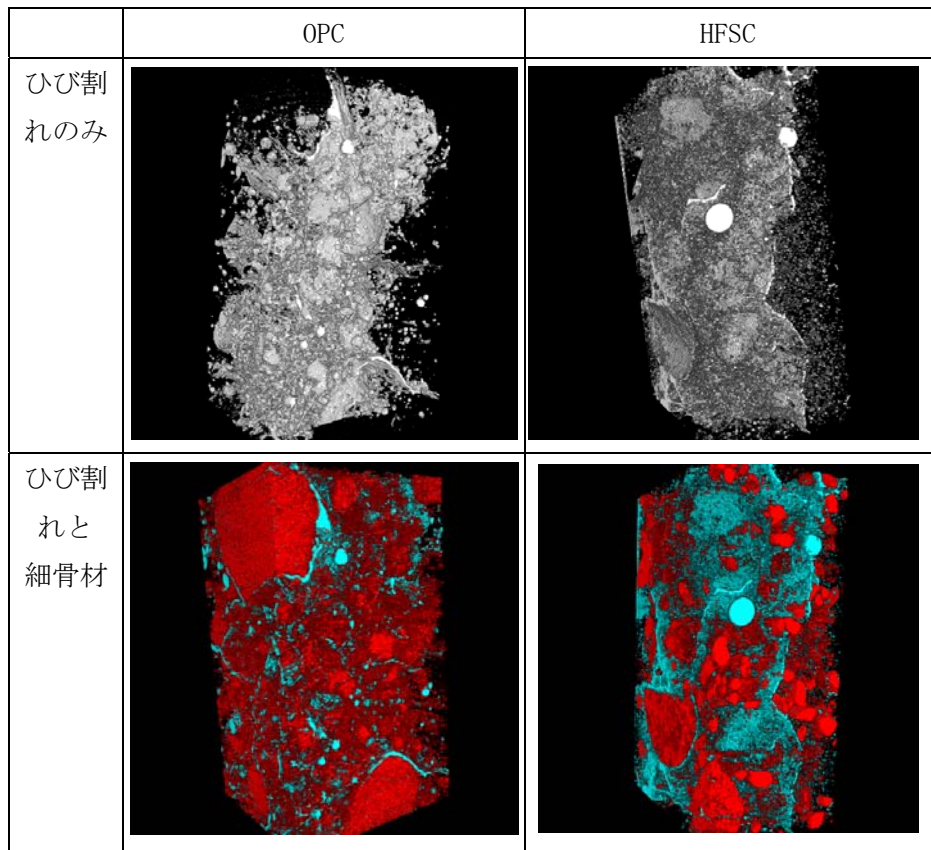


図-4 ひび割れ部と細骨材およびひび割れ部分の立体像

4. 供試体の一部を抽出し、画像処理によってひび割れを抽出することが可能である。また、細骨材も抽出が可能である。
5. 抽出画像を用い、ひび割れの三次元分布を可視化することができた。さらに細骨材の位置関係の把握が可能である。

以上より、本観察法によりモルタル内部の非破壊観察が可能で、内部のひび割れを観察でき、コンクリートの破壊過程の観察には有用であることが分かった。

参考文献

- 1) 人見尚, 三田芳幸, 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小構造の観察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, pp645-650. 2004