

論文 X線CTによる曲げひび割れ及び炭酸セシウム水溶液の移動の可視化

吉川 昂純*1・杉山 隆文*2・Ivan sandi darma*3・志村 和紀*4

要旨: FRP シートを側面に貼付して補強したモルタル供試体を用いて三点曲げ試験を行い、曲げひび割れを発生させた。FRP シートの貼付方法により発生するひび割れ幅、深さが異なることが分かった。また、微焦点 X 線 CT を用いてひび割れの 3 次元可視化を行い、ひび割れの形状を把握することができた。また、ひび割れ部に X 線造影剤として炭酸セシウム水溶液を浸漬させ、水溶液の移動挙動を可視化した。水溶液は、毛細管現象を伴い移動し、ひび割れ以外の微細な連続空隙へも移動していることが推察された。

キーワード: 曲げひび割れ, FRP シート, マイクロスコープ, X 線 CT, 三次元透視図, 炭酸セシウム

1. はじめに

コンクリート構造物は様々な原因によりひび割れが生じることがある¹⁾。ひび割れを有する構造物では、構造物の美観の低下に加え、ひび割れから塩分が侵入することで生じる塩害、ひび割れから二酸化炭素が侵入して生じる中性化、ひび割れがコンクリート中の鋼材の腐食速度に影響を及ぼすなど様々な問題が生じる。コンクリートの物質移動性において、内部に発生したひび割れの形状や経路が及ぼす影響は大きく、3次元での物質移動のメカニズムの解明が求められている²⁾。立体透視図に関しては、X線CT法の利用が有効と考えられ、セメント系材料への適用が増えつつある^{2),3),4),5)}。

本研究では、モルタル供試体の側面にFRPシートを貼付し、三点曲げ試験を行い、曲げひび割れを制御しながら発生させた。そして、微焦点X線CTを用いて内部画像を撮影し、ひび割れの3次元可視化を行った。また、炭酸セシウム水溶液を用いてひび割れ中に浸透する水溶液の移動挙動を可視化した。これは、大塚らが医学用のX線造影剤を用いて従来のX線写真から鉄筋コンクリート内部のひび割れ検出に関する研究を行っており⁶⁾、このX線造影剤の代替として炭酸セシウムを用いているためである⁷⁾。本研究は、X線CTによる曲げひび割れの3次元可視化に加えて、炭酸セシウムをトレーサーとしたひび割れ中の物質移動の可視化も目的としている。

2. 実験概要

2.1 供試体作製

使用材料および配合を表-1, 表-2 に示す。フライアッシュを混和していない供試体をP, フライアッシュをセ

表-1 使用材料

材料	種類	密度(g/cm ³)
セメント	普通ポルトランド(OPC)	3.16
細骨材	砕砂	2.67
フライアッシュ	JIS II 種灰	2.20
AE 剤	アルキルエーテル系	
X 線造影剤	粉末炭酸セシウム	4.07
FRP シート	炭素繊維シート	

メントの一部に置換した供試体をFとする。細骨材の粒径は1.7mm以下とした。なお、一部のモルタルには粒径が0.5mm以下の石灰石を用いた。石灰石を用いたモルタルの配合も表-2 に示した。表記はPL, FLである。空気量試験はJIS A 1128, 圧縮強さ試験はJIS R 5201に従って行った。フレッシュモルタルを40×40×160mmの型枠に打ち込み、24時間後に脱枠した。その後、水中養生をP, Fで320日間, PL, FLで170日間行った。そして、高さ20mm, 幅10mm, 長さ60mmの直方体をマイクロカッターにより切り出した。供試体は合計7体作製した。

2.2 補強用FRPシート

供試体をそのまま曲げ試験するとひび割れが発生すると同時に供試体が破壊するため、供試体の側面部にFRPシートを貼付する方法を採用した。貼付方法は側面全体に貼付する方法と側面高さが半分の上部だけに貼付する方法の2種類とした。FRPシートの貼付手順は下地処理として供試体をサンドペーパーで粗面に仕上げ、プライマーを塗布し、乾燥させ、FRPシートを接着した。

2.3 ひび割れ発生試験方法

曲げひび割れを発生させるため、図-1のように三点曲

*1 北海道大学大学院 工学院 環境フィールド工学専攻 修士課程1年 (学生会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究院 環境フィールド工学部門 教授 Ph.D. (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学院 環境フィールド工学専攻 博士課程1年 (学生会員)

*4 北海道大学大学院 工学研究院 環境フィールド工学部門 助教 博(工) (正会員)

表-2 モルタル配合, 空気量および圧縮強度

	FA/(C+FA)(%)	W/B(%)	単位量(kg/m ³)					空気量 (%)	圧縮強さ (N/mm ²)
			W	C	S	FA	AE 剤		
P	0	50	274	548	1370	0	0.016	5.2	45.7
F	30	50	268	375	1340	161	0.3	4.4	31.8
PL	0	50	345	690	1035	0	0.3	-	49.7
FL	15	50	340	578	1020	102	0.3	-	40.3

げ試験を行った。曲げ試験においてスパンは 45mm であり、せん断スパン比は 1.125 である。X 線 CT を用いて画像を撮影するに際して、供試体の長さは極力小さいほうが好ましいが、曲げひび割れを発生させるためにはせん断スパンをある程度大きくしなければならないことを考慮した。また、供試体高さにおいて、せん断スパン比を大きくするためには高さを小さくする必要があるが、ひび割れの形状及び炭酸セシウム浸透を把握するため供試体高さを 20mm とした。供試体の引張縁にクリップゲージを取り付けて荷重およびひび割れ開口変位の変化を計測した。

2.4 マイクロスコップでのひび割れ観察

曲げ試験終了後に残留した曲げひび割れをマイクロスコップを用いて観察した。マイクロスコップでは供試体の引張縁および側面を観察した。撮影した引張縁部の曲げひび割れ画像の一例を図-2 に示す。レンズ倍率は 100 倍である。計測機能の 2 点間距離計測を用いてひび割れ幅を数カ所計測した。

2.5 X 線 CT による画像処理

微焦点 X 線 CT は数ミクロン程度の分解能を持つ X 線 CT 装置であり、これを用いて曲げひび割れ部の撮影を行った。微焦点 X 線 CT を用いて多色のコーンビームによって、360° 回転した供試体を撮影した。微焦点 X 線 CT では X 線源にマイクロフォーカス X 線装置を使用しているため、対象領域を幾何学的に拡大することにより高分解能な断面画像が得られる。撮影した 1 枚の断面画像は 1024×1024pixels で表示される。撮影された 189 枚の連続断面画像からひび割れ部分を中心に 3 次元画像の立体サンプル (VOI) を抽出した。VOI は立体を格子状に分解された最小要素 (voxel) で構成され、色調を整え、鮮明にするために、撮影時の 16bit 画像から 256 階調の 8bit 画像に変換している。以後、この階調を GSV と称す。また、本実験において 1pixel のサイズは 22μm、1 層の厚さは 80μm であり、抽出した VOI は 400pixel×400pixel×168 層である。

2.6 二値化処理

ひび割れの 3 次元画像を作成するためには、ひび割れ部分とモルタル部分を区別しなくてはならない。そのため、抽出された VOI からヒストグラムを作成し、ひび割

れを含む空隙部分とモルタル部分のしきい値を決定した。VOI のヒストグラムの一例を図-3 に示す。微焦点 X 線 CT を用いた場合の空隙のしきい値は下限を GSV=0 とし、上限をモルタルを表すヒストグラムのピークの GSV の半値とするものである⁸⁾。その範囲を空隙とみなし、画像では黒く表示される。また、空隙の上限から GSV=255 までの範囲をモルタル部分とみなし、画像では白く表示される。二値化前後の断面画像の一例を図-4 に示す。黒色の連続したひび割れと独立した空隙が判別できる。

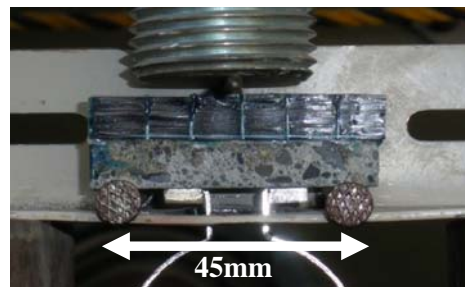


図-1 三点曲げ試験

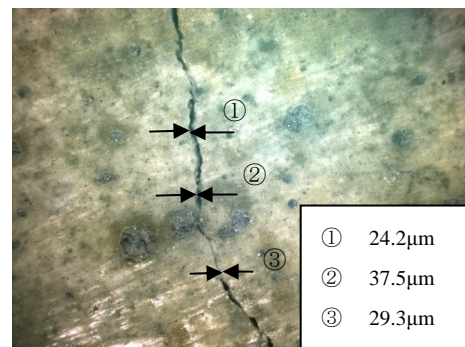


図-2 引張縁のひび割れ画像 (拡大倍率 100 倍)

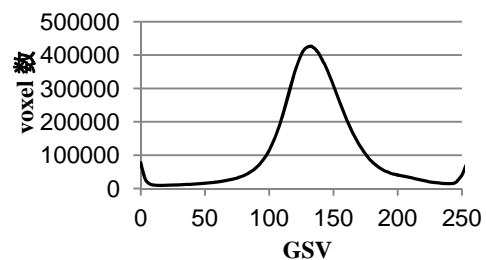


図-3 VOI からのヒストグラム

表-3 ひび割れ情報および実験条件

供試体番号	使用供試体	マイクروسコープにより測定した引張縁の残留ひび割れ幅	クリップゲージにより測定した載荷時の最大開口変位	FRP
1	P	100~120 μm	-	全面貼付
2	P	100~120 μm	-	全面貼付
3	F	45~55 μm	-	半面貼付
4	F	40~60 μm	-	半面貼付
5	P	100~120 μm	515 μm	全面貼付
6	PL	25~40 μm	160 μm	半面貼付
7	FL	5~15 μm	55 μm	半面貼付

2.7 ひび割れの3次元透視図作成

二値化されたVOIにSLICEプログラム⁹⁾を用いてクラスターラベリングを行った。この手法を用いることで数多く存在する空隙を大きさの昇降順に並べることが可能になる。これにより、最も連続性が大きいとみなされたクラスターをひび割れとした。ひび割れ部分とその他の空隙を区別する操作も行った。固体部分を白色、ひび割れ部分を黒色、その他の空隙部分を灰色で表示した。画像処理ソフトウェアであるImage Jを用いてひび割れの3次元透視図を作成した。

2.8 炭酸セシウム水溶液への浸漬

ひび割れ中に浸透する水分の移動を可視化するため、X線造影剤として炭酸セシウム水溶液を用いた。X線CT撮影では、空気などのX線を吸収しないものは黒の色調で、反対に密度が大きい物質でX線が吸収されやすいものは、白の色調で表される。セメントの主構成成分の中で原子番号が大きいのはカルシウムであり、セシウムはそれよりも原子番号が大きく、炭酸セシウムの密度は4.07g/cm³とモルタルおよびコンクリートの使用材料の密度よりも大きいことから、撮影された画像において白く示される。7体の供試体の内5体に対して、炭酸セシウム水溶液の浸漬試験を行った。炭酸セシウムの濃度は、質量パーセントで40%である。5体の内3体の供試体には、引張縁を底面として、ここから2mmの高さまで浸漬させた。残りの2体には供試体全体を浸漬させた。浸漬時間は24時間である。

3. 結果および考察

3.1 ひび割れ発生およびマイクروسコープ観察

本研究では予備実験として実施したFRPシートを貼付していないモルタル、FRPシート全面貼付、FRPシート半面貼付の3種類で三点曲げ試験を行った。それぞれの荷重-開口変位曲線を図-5、図-6、図-7に示す。FRPシートを貼付していないモルタルでは曲げひび割れ発

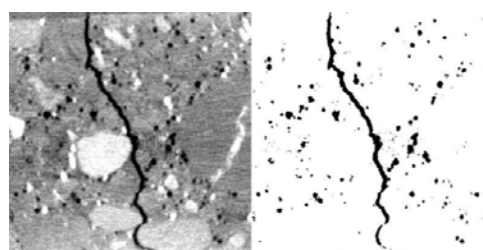


図-4 二値化前後の断面画像

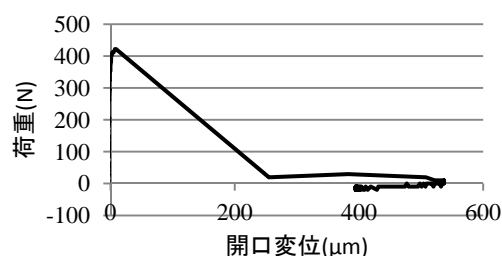


図-5 荷重-開口変位曲線 (FRP シートなし)

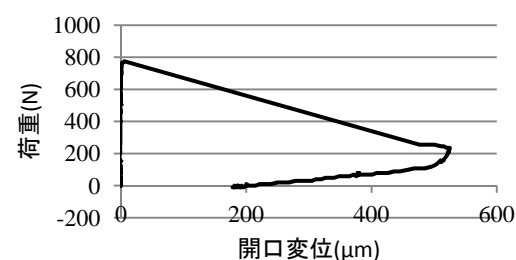


図-6 荷重-開口変位曲線 (FRP シート全面貼付)

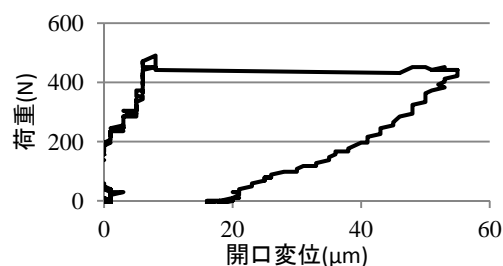


図-7 荷重-開口変位曲線 (FRP シート半面貼付)

生直後に、供試体が破壊した。FRP シート全面貼付では予兆なく瞬時にひび割れが発生し、大きな開口変位を示した。FRP シート半面貼付では 100 μm 以下の小さな曲げひび割れが発生した。他の FRP シート全面貼付、半面貼付供試体でも同様の結果を得た。曲げひび割れが発生した供試体のクリップゲージによる開口変位、顕微鏡により計測したひび割れ幅および実験条件を表-3 に示す。

顕微鏡でひび割れを観察すると、ひび割れは直線的には入らず、細骨材を避けるように曲線的に入っていることが分かった。顕微鏡で測定した引張縁の残留ひび割れ幅は、クリップゲージで測定した引張縁の最大開口変位の 1/5 程度まで小さくなっていた。

3.2 ひび割れの 3 次元可視化

供試体番号 1~7 全てについてひび割れの 3 次元透視図の作成を試みた。供試体番号 6 ではひび割れ幅が小さく、断面を組み合わせた時に連続体と見なされず、ひび割れの 3 次元画像を作成することが出来なかった。また、供試体番号 7 ではひび割れ幅が 10 μm 程度と 1pixel サイズの 22 μm より小さいため、撮影した断面画像でひび割れを検出することが出来なかった。ひび割れ幅が 40 μm 以下のような小さい供試体ではひび割れの 3 次元画像の作成は困難であると考えられる。X 線 CT 撮影範囲を図-8 に示す。供試体番号 2 の X 軸, Y 軸, Z 軸方向から見たひび割れの 3 次元透視図を図-9, 図-10, 図-11 に示す。3 次元透視図を見ると、ひび割れに球状のものが無数に連結していることが分かる。ひび割れに接している空隙がひび割れと認識された可能性が考えられる。今後は分離のための演算法を用いて区別することが課題である⁴⁾。

曲げひび割れは引張縁でひび割れ幅が最大となり、圧縮側で徐々にひび割れ幅が小さくなることを確認した。X 線 CT においても引張縁のひび割れ幅を測定した。X 線 CT により測定した引張縁のひび割れ幅およびひび割れ深さを表-4 に示す。引張縁におけるひび割れ幅は顕微鏡と X 線 CT でほぼ等しい結果となった。これより、X 線 CT を用いて作成したひび割れの 3 次元透視図は実際のひび割れにほぼ等しいことが推察される。

表-4 X 線 CT により計測したひび割れ情報

供試体番号	X 線 CT により測定した引張縁のひび割れ幅	引張縁から Z 軸方向のひび割れ長さ
1	154~176 μm	13.44mm 以上
2	110~132 μm	13.44mm 以上
3	44~66 μm	6.4mm
4	44~66 μm	7.2mm
5	132~154 μm	13.44mm 以上
6	22 μm	8mm
7	-	2.4mm

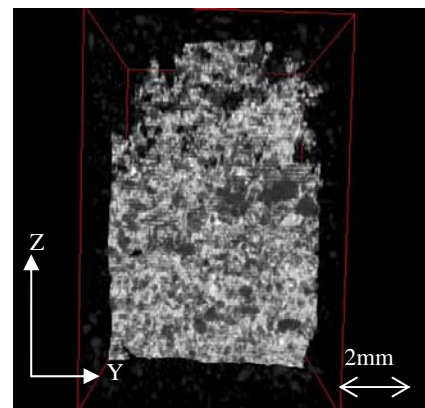


図-9 X 軸方向から見たひび割れの 3 次元透視図

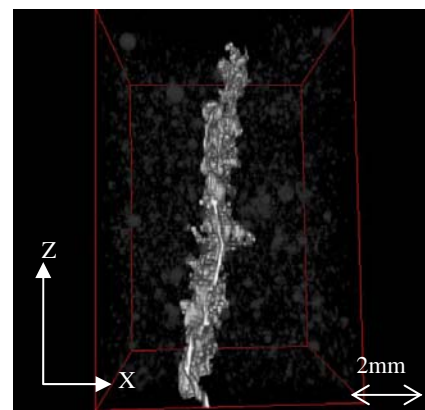


図-10 Y 軸方向から見たひび割れの 3 次元透視図

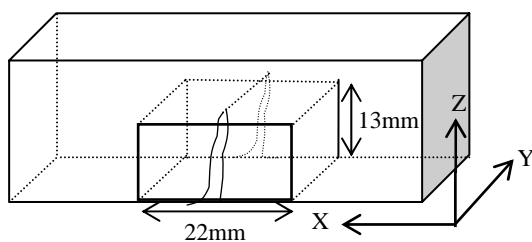


図-8 X 線 CT 撮影範囲

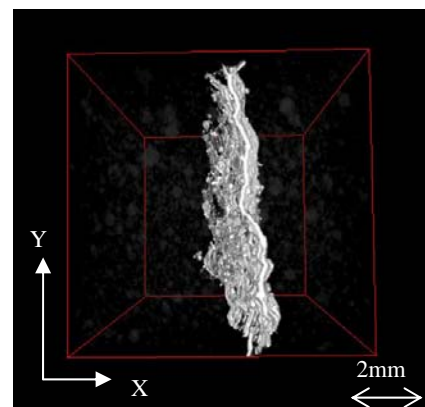


図-11 Z 軸方向から見たひび割れの 3 次元透視図

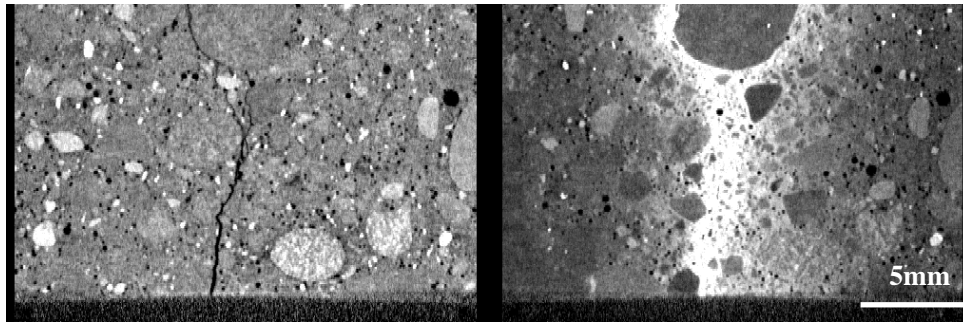


図-12 2mm 浸漬前後の断面画像(供試体番号 1)

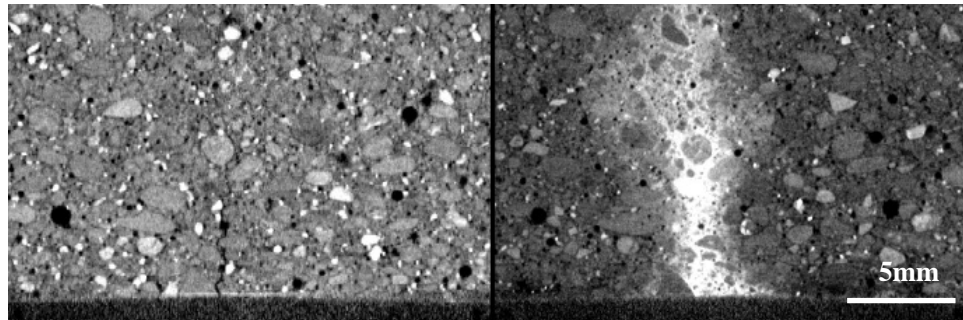


図-13 全浸漬前後の断面画像(供試体番号 4)

3.3 ひび割れ中に浸透する炭酸セシウム水溶液の移動

図-12, 図-13 に Y 軸方向から見た中央部の供試体番号 1 および 4 の浸漬前後の断面画像を示す。画像を見ると、2mm 浸漬、全浸漬ともにひび割れ中に炭酸セシウム水溶液が浸透していることが分かる。浸漬高さが 2mm の供試体番号 1 でも、炭酸セシウム水溶液の浸透距離が 2mm を大きく超えており、引張縁のひび割れ幅が 154~176 μm であっても毛細現象が生じた可能性がある。他の供試体でも同様の結果が得られた。ひび割れ部の周辺領域にも炭酸セシウム水溶液が浸透しており、連結空隙中へも移動しているのが分かる。供試体底面から炭酸セシウム水溶液が浸透していないが、炭酸セシウム水溶液は FRP シート補強の際に供試体底面に付着したプライマーにより、浸透が遮断されたと推察される。

ひび割れ幅が 10 μm 程度と小さく X 線 CT でひび割れを検出することが出来なかった供試体番号 7 の Y 軸方向から見た 2mm 浸漬後の断面画像を図-14 に示す。他の供試体と同様、炭酸セシウム水溶液が特定の領域に浸透していることが分かる。抽出が困難なひび割れ中を移動したと考えられる。また、断面画像の圧縮縁に近づくにつれて炭酸セシウムが広がっていることが確認された。

図-15 は供試体番号 3 の Y 軸方向から見た 2mm 浸漬後の断面画像である。ひび割れ上部で炭酸セシウムが枝分かれして広がっているように見える。ひび割れ上部で X 線 CT では検知できない微細なひび割れが数カ所発生していることが推察される。供試体番号 4, 7 においてもひび割れ上部で炭酸セシウムの広がりが確認された。

供試体番号 3, 4, 7 は FRP シート半分貼付であり、この条件でひび割れ上部に微細なひび割れが発生することが考えられる。

図-12, 図-13 の使用供試体はそれぞれ P, F であり、両者を比較すると、それぞれひび割れ幅は異なるが、F に比べて P の方が炭酸セシウム水溶液のモルタルへの浸透が大きく、比較的広範囲に広がっていることが分かる。これは F はフライアッシュを混合しているため、水密性が高く、浸透が抑制されたためと考えられる。このように炭酸セシウム水溶液は、ひび割れ幅以上に浸透の拡がりを見せており、ひび割れ部だけでなく、ひび割れ面を通じて微細な連続した空隙へも移動していることが推察される。したがって、コンクリート中の物質移動を模擬できると考えられる。今後、水溶液の性質を詳しく調べる必要がある。

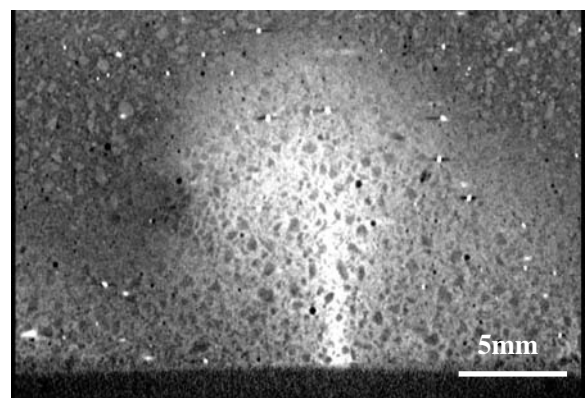


図-14 2mm 浸漬後の断面画像(供試体番号 7)

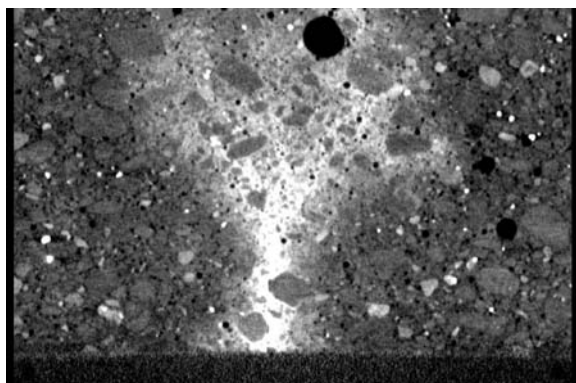


図-15 2mm 浸漬後の断面画像(供試体番号 3)

4. 結論

本研究では、FRP シートを側面に貼付したモルタル供試体を用いて、曲げひび割れの発生を制御しながら曲げ試験を行い、この曲げひび割れを微焦点 X 線 CT を用いて撮影し、ひび割れの 3 次元画像を作成した。また、X 線造影剤として炭酸セシウム水溶液を用いて、供試体を浸漬させ、水溶液の移動挙動を可視化した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) FRP シートの有無、貼付方法によって、曲げひび割れ幅、深さが変化することを示した。
- (2) X 線 CT により計測した引張縁のひび割れ幅は、マイクロ스코プの計測値とほぼ等しい結果となった。しかし、本実験では、ひび割れ幅 $40\mu\text{m}$ 以下のひび割れに対して 3 次元透視図を作成することは出来なかった。
- (3) 曲げひび割れは、引張縁でひび割れ幅が最大となり、圧縮側で小さくなる形状を可視化できた。
- (4) 炭酸セシウム水溶液を用いた浸漬実験を行った結果、ひび割れ中に炭酸セシウムが浸透する様子を可視化できた。
- (5) 炭酸セシウム水溶液の移動は、ひび割れ部以外に、連続空隙へも生じており、コンクリート中の水の移動を模擬できる可能性が示唆された。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金（基盤研究 B，課題番号:23360187）を受けて実施した研究の一部です。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉山隆文，辻幸和，橋本親典，黒岩俊之:鉄筋コンクリートの沈下ひび割れの発生要因とその対策に関する基礎研究，土木学会論文集，Vol.34，pp.101-109，1997.2
- 2) Promentilla M.A.B., Sugiyama T., Hitomi T., Takeda N. : Quantification of tortuosity in hardened cement pastes using synchrotron-based X-ray computed microtomography , Cement and Concrete Research , Vol.139, pp.548-557, 2009
- 3) 池上裕樹，杉山隆文:実構造物フライアッシュコンクリートの空隙構造のイメージング，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1859-1864，2011.6
- 4) Promentilla M.A.B., Sugiyama T. : X-ray Microtomography of Mortars Exposed to Freezing-Thawing Action, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.2, pp.97-111, 2010
- 5) 人見尚，片岡弘安: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，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1427-1432，2011.6
- 6) 大塚浩司:X 線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひびわれ検出に関する研究，土木学会論文集、No.451、V-17、pp.169-178、1992
- 7) 特許公報，公開特許 平 7-134084
- 8) 池上裕樹，吉川昂純，杉山隆文:X 線 CT によるひび割れ中の水分移動の可視化，第 65 回セメント技術大会講演要旨，Vol.65，pp.138-139，2011.4
- 9) SPring-8，Slice Program Reference 参照：
http://www-bl20.spring8.or.jp/slice/file/slice_rm_080108.pdf