X 線 CT 法を利用したモルタル内部のひび割れの可視化

Visualization of internal cracks in mortars using X-ray CT

北海道大学工学部	\bigcirc	学生	E員	高橋正行	(Masayuki	Takahashi)
北海道大学大学院工学研究院		Æ	員	杉山隆文	(Takafumi	Sugiyama)
北海道大学大学院工学院		学生	と員	吉川昂純	(Takasumi	Kikkawa)
北海道大学大学院工学研究院		Æ	員	志村和紀	(Kazunori	Shimura)

1. まえがき

コンクリートは複合材料であり、その力学的挙動は極 めて複雑である。特にコンクリートに発生するひび割れ は、その挙動に影響を及ぼすだけでなく、有害物質の侵 入経路として劣化の要因となっている。コンクリートの 力学的性能や物質移動性においては、内部に発生したひ び割れの形状や経路が大きく影響していると考えられて おり、その3次元での解明が求められている。

大塚らは医学用のX線造影剤を用いて鉄筋コンクリー ト内部のひび割れ検出に関する研究を行っており¹⁾、X 線造影剤の代替として炭酸セシウムを用いる方法を開発 している²⁾。また、著者らはX線CT法を利用したコン クリート内部構造の観察を行ってきた³³⁴⁵⁵。

本研究では、曲げひび割れを導入したモルタル供試体 について微焦点X線CT装置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、X線造影剤と して前述した炭酸セシウム水溶液を用いることで、単純 CT撮影では検知できない微細なひび割れの検出を可能 にした。

我, 区加纳特			
材料	種類	密度(g/cm ³)	
セメント	普通(N)	3.16	
細骨材	砕砂	2.67	
AE 剤	アルキルコ	ローテル系	

表_1	df E	日材料
1X I	ר דעו	D171 AT

<u>₹</u> -2	モルツ	ルの配合わよび住り	

W/C		単位量	(kg/m ³)	空気量	圧縮
(%)	W	С	S	AE 剤	<u>エス重</u> (%)	強度 (N/mm²)
50	274	548	1370	0.016	5.2	45.7

表3 FRP	シー	トの諸元
--------	----	------

繊維種類	高強度カーボン (一方向配列)
繊維目付 (g/m ²)	200
設計厚さ (mm)	0.111
引張強度 (N/mm ²)	3,400
引張弾性率 (N/mm ²)	2.45×10^{5}

2. 実験方法

2.1 供試体の作製

2.1.(1) 配合

モルタルの使用材料を表-1 に、配合および性状を表-2 に示す。マイクロカッターを用いて 40mm×40mm× 160mm のモルタルから 20mm×10mm×60mm の直方体 を切り出し、供試体とした。供試体は全部で 3 体用意し た。図-1 に供試体寸法および座標軸を示す。

2.1.(2) FRP シート補強

供試体をそのまま曲げ試験すると、供試体が破壊して しまうため、供試体の側面上部に 10mm×60mm の FRP シートを貼付して補強を行った。使用した FRP シートの 諸元を表-3 に示す。繊維の方向は X 軸方向と平行とした。 FRP シートの貼付手順は、下地処理としてカットした供 試体全面にやすりがけを行い、FRP 貼付面にプライマー を塗布して乾燥させた後に、FRP を接着した。

2.1.(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に、三点曲げ試験を行った。曲げ試験の条件は、支間長 45mm、せん断スパン 比は 1.125 である。荷重計および供試体の引張縁に取り 付けたクリップゲージをデータロガーに接続して、荷重 および開口変位を計測した。

2.1.(4) マイクロスコープでのひび割れの観察

曲げ試験により発生した曲げひび割れをマイクロスコ ープ(KEYENCE VHX-200)を用いて観察した。ひび割れ 位置を確認するとともに引張縁におけるひび割れ幅の計 測を行った。



2.2 X線CT法

2.2.(1) 微焦点 X 線 CT 装置

微焦点 X線 CT 装置を用いて曲げひび割れ部の撮影を 行った。微焦点 X線 CT とは、マイクロフォーカス X線 装置と X線 I.I.(Image Intensifier)を組み合わせ、供試体を 拡大撮影することにより微小構造部の断層画像を再構成 する CT である。X線 CT の特長としては、非破壊で供 試体内部の構造を正確に把握することができることが挙 げられる。撮影条件を表-4 に示す。

2.2.(2) X線造影剤

微細なひび割れを検出するためにX線造影剤を使用した。X線造影剤とは、画像にコントラストを付けて特定の部分を強調するために用いられる薬品であり、周囲とは著しくX線吸収率が異なる物質がよく利用される。X線造影剤として大塚らの研究²⁾を参考にして炭酸セシウム水溶液を用いることとした。

X線 CT 撮影では空気など X線吸収係数が低いものは 黒の色調で、反対に密度が高い物質で X線吸収係数が高 いものは白の色調で表される。炭酸セシウムはコンクリ ートの主構成成分よりも原子番号や密度が大きいことか ら X線吸収係数が高く、撮影された画像において白く表 示される。

本実験では、造影剤を用いない CT 撮影のことを単純 CT 撮影、造影剤を用いた CT 撮影のことを造影 CT 撮影 と呼び区別する。

2.2.(3) 実験条件

造影剤の吸収を促すために、供試体を105℃の乾燥炉 の中で12時間乾燥させた。使用した造影剤は、60wt%の 炭酸セシウム水溶液であり、密度の測定値は1.91g/cm³ であった。各供試体の造影剤浸漬撮影時間を表-5に示す。 それぞれの浸漬時間になった時点でX線CT撮影を行っ た。造影剤の浸漬は引張縁を底面として高さ2mmのみ 浸漬させる方法で行った。また、側面からの浸透を防ぐ ために防水テープを巻き付けた。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ発生試験結果

曲げ試験で計測した荷重-開口変位曲線を図-2に示す。 載荷してひび割れが入ると開口変位が急激に大きくなり、 除荷に伴い開口変位が減少していることが確認できる。 除荷後も開口変位が残留した。

いずれの供試体も残留開口変位が 50µm 以下の微細な ひび割れであり、肉眼では確認することはできなかった。 マイクロスコープで引張縁を観察したところ、ひび割れ 幅は場所によって異なり、細骨材を避けるように曲線的 に発生していることが分かった。マイクロスコープで撮 影した供試体引張縁の曲げひび割れ画像の一例を図-3 に示す。供試体のひび割れ情報を表-6 に示す。

3.2 浸漬時間による変化

図-4 は造影剤浸漬前後における供試体 No.1 の X-Z 平面の断面図を示したものである。他の供試体でも同様の

表-4 X線CT撮影条件

供試体	No.1	No.2	No.3	
管電圧(kV)	130			
管電流(μA)	124			
FID (mm)		600		
FCD (mm)	1	.60	90	
I.I.視野(inches)		4		
1 画素サイズ(µm)	1	8.7	10	
スライス厚(µm)		40	17.2	
画像サイズ (pixels)		1024×1024		

表-5 供試体の浸漬撮影時間 (O:CT 撮影)

浸渍	責時間	浸漬前	10min	6h	12h	24h
供	No.1	0	0	0	-	0
試	No.2	0	0	0	-	0
伓	No.3	0	0	-	0	-



図-2 荷重-開口変位曲線



図-3 引張縁のひび割れ画像(拡大倍率 500 倍)

表-6 供試体のひび割れ情報

	荷重計	クリッこ	プゲージ	マイクロ スコープ
供試体	最大	最大	残留	除荷後
	荷重	変位	変位	ひび割れ幅
	(N)	(µm)	(µm)	(µm)
No.1	500	111	43	10~40
No.2	540	80	21	5~15
No.3	570	115	28	20~30

結果が得られた。

造影剤浸漬前の画像でも、ひび割れが入っていること を確認できる。ひび割れは内部でも細骨材を避けるよう に曲線的に発生していることが分かる。しかし、1 画素 サイズがひび割れに対して大きいために微細な部分を観 察することは難しい。

造影剤に10分間浸漬後に撮影した画像では、ひび割れ に造影剤が浸透していることが分かる。浸漬前の画像で は確認できなかった微細なひび割れを経路として、造影 剤が移動したと思われる。

造影剤24時間浸漬後に撮影した画像では、造影剤の浸 透がさらに広がっていることが分かる。微細ひび割れと 連結する空隙中へも浸透すると考えられる。

また、実験中における供試体の質量変化量を示すグラフを図-5に示す。変化量は乾燥後の質量を0として算出している。質量の変化量は供試体の造影剤吸収量と考えられることから、X線CT撮影の結果と一致していることが確認できる。

なお、造影剤浸漬後の画像が暗い色調で表されている のは、X線吸収係数が高い造影剤浸透部分の白とびを防 ぐために色調を整えているからである。

3.3 造影剤移動の理由-毛細管現象

造影剤がひび割れへ移動する理由としては、毛細管現 象によるものと考えられる。毛細管現象とは、細い管状 物体の内側の液体が表面張力により管の中を上昇する現 象である。ひび割れも微細な構造であるため、毛細管現 象による吸い上げが生じたと考えられる。

3.4 造影ひび割れの3次元可視化

撮影した断面画像をもとに、造影剤が浸透したひび割 れの3次元画像を作成した。使用した画像は供試体 No.2 および No.3 の造影剤浸漬 10min のものである。

画像から ROI(Region of Interest)を抽出した。造影剤が 浸透している場所を、曲げひび割れ試験で損傷を受けて いる領域だと考え、造影剤が浸透している部分とそれ以 外の部分に分ける二値化処理を行った。二値化処理前後 の画像を図-6 に示す。二値化処理後は白黒2色のみで表 される。図-6(b)において黒色で表されている部分を造影 剤の浸透した部分と判断した。

二値化処理した断面画像から画像処理ソフトウェア ImageJ⁷⁾の 3D viewer を用いてひび割れの 3 次元画像を作 成した。作成した 3 次元画像を図-7 に示す。

3次元画像においても、細骨材を避けるようにしてひ び割れが発生していることが確認できる。セメントペー ストと骨材の間の粗な領域は遷移帯と呼ばれ、強度に劣 ることが知られていること、およびひび割れの形状を考 えると、引張力によりセメントペーストと骨材が剥離し ていることが考えられる。従って、曲げひび割れ試験に よって損傷を受けた遷移帯が造影剤の移動経路となって いると推定できる。

また、X線CT撮影によって得られた情報として各供 試体のひび割れ深さを表-7に示す。



(a) 浸漬前(単純 CT 撮影)



(b) 造影剤 10 分間浸漬



(c) 造影剤 24 時間浸漬 図−4 No.1の造影剤浸漬前後の X−Z 平面の断面画像



図-5 時間と供試体の質量変化量の関係





(a) 未処理回縁 (b) 二値化回 図-6 二値化処理前後の断面画像(X-Y 平面)

表-7 各供試体のひび割れ深さ

供試体	ひび割れ深さ (mm)
No.1	9.6
No.2	8.8
No.3	11.2

3.5 X線CT法によって得られる情報の活用

X線CT法はコンクリートの内部構造を微細に観察で きる特長を持っている。本研究の実構造物への適用法と しては、詳細点検の分野での活用が考えられる。日常的 な簡易点検とX線CT法などの詳細点検を組み合わせる ことで、より正確な情報を得ることが可能になる。

4. 結論

本研究では、曲げひび割れを発生させた供試体に対し、 微焦点 X 線 CT 装置を用いた単純撮影および造影撮影を 行うことで、モルタル内部のひび割れの微細構造の観察 を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- X線CTを用いることで三次元の内部構造を観察することが出来る。
- (2) 光学顕微鏡および CT 撮影によるひび割れ観察によ れば、ひび割れは細骨材を避けるように曲線的に発 生していることが示された。
- (3) 造影 CT 撮影では、ひび割れ部を強調することがで きる。単純 CT 撮影ではひび割れが認められなかっ たところにも造影剤が浸透していることから、本研 究での撮影条件では検出できない微細なひび割れ があることが推測できる。
- (4) 造影剤の浸漬時間によって、モルタル内部への浸透 量が異なることが分かった。X線CT法と造影剤を 用いることで、ひび割れによる水溶液の物質移動性 を検討することができる。
- (5) 実構造物への適用法としては詳細点検での活用が 期待される。より正確な情報の把握に役立てると考 えられる。

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成果の一部である。

参考文献

1) 大塚浩司:X線造影撮影による鉄筋コンクリート内



(a) 供試体 No. 2 造影剤 10 分間浸漬



(b) 供試体 No.3 造影剤 10 分間浸漬 図-7 造影剤が浸透したひび割れの3次元画像

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

- 2) 特許公報、公開特許 平 7-134084
- Promentilla M.A.B.,Sugiyama T.,Hitomi T.,Takeda N.; Characterizing the 3D Pore Structure of Hardened Cement Paste with Synchrotron Microtomography, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6,No.2,pp.273-286,2008
- 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
- Promentillia M.A.B., Sugiyama T.: X-ray Microtomography of Mortars Exposed to Freesing-Thawing Action, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8,No.2,pp.97-111,2010
- 6) 中野司,土、山明,上杉健太郎,上椙真之,篠原邦夫
 (2006) "Slice" -Softwares for basic 3-D analysis-, Slice Home Page (web),
 http://www-bl20.spring8.or.jp/slice/,財団法人 高輝 度光科学研究センター.
- Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, http://rsb.info.nih.gov/ij/, 1997-2009.