凍結融解作用を受けた鉄筋コンクリートの

内部劣化のX線CT法による評価

Evaluation of internal deterioration on reinforced concrete subjected to freezing and thawing based on Xray CT method

北海道大学大学院工学院	学生員	久呉直也	(Naoya Kugo)
北海道大学大学院工学研究院	正員	志村和紀	(Kazuki Shimura)
北海道大学大学院工学研究院	正員	杉山隆文	(Takahumi Sugiyama)
北海道立総合研究機構		田中大之	(Hiroyuki Tanaka)

1. はじめに

社会基盤施設において、コンクリートは主要な構造材 料であり、その多くは鉄筋コンクリート(以下 RC)と して使用されている。RC に発生するひび割れは、荷重 による力学的なもの、環境作用によるものなど、その発 生原因は様々であるが、構造物の耐久性や耐荷力に影響 を及ぼすこともあり、その挙動を明らかにすることは重 要である。しかし通常、ひび割れはその幅や間隔など、 外部から観察される情報により評価されるが、コンクリ ート内部における性状を把握することは難しい。また、 北海道などの寒冷地で問題になっている凍害劣化につい ても内部状況を正確に把握することは難しい。

ひび割れに内部からインクを注入し、供試体を割裂し て内部のひび割れ評価を行った研究 ¹は、内部ひび割れ を評価した先駆的なものであったが、ひび割れ幅やひび 割れの成長について把握できないため、非破壊試験によ る評価が望ましい。

非破壊試験として X 線装置を用いた報告²⁾もあるが、 撮影画像は X 線透過像であり、これから得られる情報 は少ないといえる。一方、医療分野で広く用いられてい る X線 CT 法は、任意の断面画像が得られるという特長 を有しており、非破壊で物体の内部を観察するためには 極めて有効な手法である。鉄筋を埋設したコンクリート 試験体については、鉄筋に起因する金属アーチファクト のために正確な画像を得ることが難しかった。しかし、 近年の X線 CT 装置の能力の向上に伴い、金属アーチフ ァクトが軽減され、鉄筋を埋設した試験体の報告もされ ている³⁾。本報告は、鉄筋に導入された引張力を保持す る目的で開発されたスリーブ鉄筋を埋設したコンクリート 大試験体を用い、引張ひび割れを導入したコンクリート 供試体を引張拘束状態のまま凍結融解を行い、内部ひび 割れについて X線 CT 法により検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 X線CT装置

撮影装置としてマイクロフォーカス X 線 CT システム を採用した。これは、試験体を 360°回転させて、あら ゆる角度からの X 線透過データを収集し、コンピュー タによる再構成が行われ断面画像を取得することを可能 としている。得た断面画像を元に画像解析ソフトを用い ることで任意断面画像の作成を行った。 撮影条件は、X 線発生装置の管電圧 200kV、管電流 100 µ A とし、X 線検出器は X 線フラットパネルであり、 入力視野寸法は 8.0×8.0 インチ、2400view(360°の回 転を 2400 分割で撮影)、ボクセルサイズは 0.056mm と した。

2.2 スリーブ鉄筋による引張力導入

1) D13 異形棒鋼の内部に直径 9mm の孔を開け、上部に 内径 8mm の六角ナットを溶接する(以下スリーブ鉄筋)。 孔は貫通せず、厚さ 10mm の底部を設ける。また孔の 長さより 10mm 長いボルトを使用することとし、スリ ーブ鉄筋上端のナットとねじが対応している(図-1(a))。 2)ボルトを回転させ、鉄筋に挿入する(図-1(b))。 3)ボルトが鉄筋の孔の底部に到達した後も回転を続ける

と、スリーブ鉄筋の上部ナットと孔の底部がそれぞれボ ルトのねじとボルトの先端によって押され、スリーブ鉄 筋全体に引張力が発生する(図-1(c))。

2.3 供試体概要

スリーブ鉄筋を中央に配置した円柱試験体を使用した (図-2)。供試体は普通ポルトランドセメントを使用した 円柱コンクリート(W/C=0.55)である。また粗骨材とし て石灰岩砕石を用いることにより、単一の密度となり X 線 CT 画像の解析において他の構成物質から分離しやす くなるようにした。



2.4 凍結融解試験

試験体はΦ65×200mm の円筒形鋼製容器に入れ、周 囲の水厚が 5mm となるように純水を満たした。これを-25℃~25℃、1 サイクル 12 時間の凍結融解試験に供し た(図-4)。



図-4 凍結融解 試験容器

時間(h) 図-5 凍結融解サイクル概要

2.4 撮影概要

スリーブ鉄筋を用いて試験体にひび割れを発生させ、 撮影はスリーブ鉄筋で引張力の作用した状態のまま撮影 を行った。試験体の上部ナットを固定し、ボルトを少し ずつ回転させながらひび割れを視認した。供試体にひび 割れが発生した段階で止め、クラックスケールでひび割 れ幅を測定し(表-1)、1回目の撮影は凍結融解試験を行 わず、X線CT装置で撮影を行った。その後、凍結融解 試験を6サイクル行うごとに撮影を行い、計3回(12サ イクル)撮影を行った。

撮影回数	上部ひび割れ	下部ひび割れ		
1回目(0サイクル)	0.5mm	—		
2回目(6サイクル)	1.2mm	1.5mm		
3回目(12サイクル)	2.0mm	1.8mm		

表-1 各撮影回のひび割れ幅

2.5 画像処理

本研究では撮影で得られた画像を ImageJ と slice の 2 種類の画像処理ソフトウェアを使用し、処理を行った。

1. ImageJ

画像解析では主に画像処理ソフトウェアの ImageJ を 使用した。これを用いて、撮影で得た断面画像を元に横 断面画像の作成や三次元画像の作成、また画像の合成を 行った。

2. slice

slice も画像処理ソフトウェアであるが、輝度値の変 更や数値化、また個々の対象物体の認識を行うクラスタ ーラベリングに使用した。slice は UNIX コマンドライ ンで実行する環境が必要であるため、Cygwin により Windows で Unix 環境を構築した。

3. 実験結果

3.1 内部ひび割れの観察

図-3 は今回実験で使用した供試体の写真である。この供試体をX線CT装置で撮影して得られたものが図-4である。白い部分が鉄筋、グレーがコンクリート、黒が

空隙(ひび割れ)である。図-8 は各撮影回でのある 1 断面の画像である。3回目では 1,2回目では観察するこ とができなかったスケーリング劣化が観察できる。また 側部のひび割れが発達していることも観察できる。





図-6 供試体の写真

図-7 供試体の横断面画像



図-5 供試体の縦断面画像と 3D 画像

3.2 鉄筋及びひび割れの摘出

ImageJ を使用し、横断面画像の集合から軸方向にス ライスした試験体中心部分の断面画像が図-9 の 3 つの 画像である。(b)の 6 サイクルの画像には凍結融解作用 によって下部に新たなひび割れが発生したことが観察で きる。これは氷の線膨張係数が鉄筋の約5倍であり、凍 結時に鉄筋よりコンクリートが大きな収縮を生じたため ではないかと考えられる。(a)の 0 サイクルの撮影では (b)の 6 サイクル以降に発生した下部のひび割れが発生 していなかったため、上部のみの撮影となっている。ま たひび割れは鉄筋のフシ部分から発生していることがわ かる。周縁部では(a)の 0 サイクルでは見られなかった ひび割れが発生しており(c)の 12 サイクルではそのひび が発達し、表面部分が剥がれ落ちているのが観察できる。

次に表面からの約 15mm 部分を軸方向にスライスした画像が図-10 の 3 画像である。(b)の 6 サイクルの画像から引張りひび割れ付近の粗骨材にひび割れが発生しおり、(c)の 12 サイクルではそのひび割れが発達している

ことがわかる。ひび割れが発生した粗骨材は周囲の粗骨 材に比べて黒いため、密度が低いことがわかるため、密 度が低く強度が小さい粗骨材からダメージを受けると考 えられる。また、引張ひび割れは粗骨材の下面に沿って 発生している。これはブリーディングの影響であり、水 や水セメント比の大きなペーストが粗骨材の下面に溜ま ることでそこが弱点となり、引張ひび割れが発生したと 考えられる。周縁部は凍結融解によってひび割れが進行 しており、(c)の 12 サイクルではスケーリングが発生し ている。(c)では粗骨材に沿うようにひび割れが発生し ているため、今後さらにスケーリング進行することやポ ップアウトが発生することが予想できる。

4. 考察

本研究では、スリーブ鉄筋を使用し円柱試験体に引張ひ び割れを発生させ、その状態で凍結融解試験を行い X 線 CT 装置で撮影し、ひび割れの観察を行った。 得られた結論を以下にまとめる。

- ひび割れは鉄筋のフシ部分から発生する。 1.
- 凍結融解により新たに2次ひび割れが発生する。 2.

凍結融解により引張りひび割れ付近の密度の低い 3. 粗骨材にひび割れが発生する。

- ブリーディングの影響でひび割れは粗骨材の下面 4. 部分に沿って発生する。
- 凍結融解を進行させると粗骨材の周りにひび割れ 5. が発生し、スケーリングやポップアウトの原因と なる。

参考文献

1) Yukimasa Goto : Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, ACI Journal Vol.68, pp. 241-251, April 1971

2) 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

3) 高橋駿人, 志村和紀, 杉山隆文, 田中大之: X 線 CT 法を用いた鉄筋埋設モルタルのひび割れおよび電食試験 による腐食鉄筋の観察, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016



(a) Ocycle

(b) 6cycles

(c) 12cycles

凍結融解作用を受けた試験体中心部分の縦断面画像 図-9



(a) Ocycle (b) 6cycles (c) 12cycles 図-10 凍結融解作用を受けた試験体の表面から約15mm部分の縦断面画像