

非破壊 CT-XRD 連成法によるセメント硬化体中の材料劣化が解体時の破壊メカニズムに与える影響の解明

Investigation of Effect of Cementitious Materials' Deterioration on Fracture Behavior in Demolition by Non-Destructive Integrated CT-XRD Method

高橋 駿人^a, 人見 尚^b
Hayato Takahashi^a, Takashi Hitomi^b

^a 東京理科大学, ^b 大林組
^aTokyo University of Science, ^bObayashi Corporation

本研究は、外部応力による微視的なひび割れ発生メカニズムの解明のため、応力制御下のコンクリート系材料中へのひび割れの発生および伝播について、非破壊 CT-XRD 連成法を用いて観察を行った。結果として、セメントペーストはひび割れ発生と同時に破壊に至り、鋼線入りセメントペーストでは鋼線界面を通じてひび割れの発生が観察された。またモルタルでは、骨材とセメントペーストの界面からひび割れが観察された。

キーワード： コンクリート、破壊、解体、非破壊 CT-XRD 連成法

背景と研究目的：

コンクリート構造物の維持補修や供用終了の際にはコンクリートの解体が必要となる。現状は大型重機を利用した解体作業がほとんどであり、騒音、粉塵等の環境問題のために、施工時間の制限など解体工事は大きな制約を受けている。また解体で排出されるコンクリート塊は、道路の路盤材やコンクリート用再生骨材として利用が進められているが、品質確保に課題が多い。これら課題の解決のため、新たな解体工法開発へのニーズは高いと考えられる。そこで本提案では、脆性材料であるコンクリートの特性を利用して、応力状態を制御した条件下でのコンクリートにおけるひび割れの発生手法の開発を最終目的とする。まず、その第一歩としてひび割れ発生メカニズムの解明に取り組む。

本研究では、その開発の起点として、供試体に外部から応力を導入する手法を適用し、コンクリートの変形・破壊挙動の理解より、制御可能な解体技術工法の開発に資する知見の取得を目的とする。具体的には、供試体外部から応力載荷状態を制御した状態で、破壊の起点となるひび割れの発生とその伝播について、Spring-8 内のビームライン BL28B2 に設置の非破壊 CT-XRD 連成法での観察を実施する。既往の研究では、麓らは圧縮載荷時の変形挙動を X 線 CT 画像と画像相関法を用いて計測している事例はある[1]。しかし、モルタルと粗骨材の 2 相材料としてのマクロな破壊挙動の違いは把握できているものの、更に微視的な観点で詳細なメカニズムの解明には至っておらず、これらの把握は重要であると考えられる。そこで、本研究では、セメントペーストとモルタル、また炭酸化に供したセメント硬化体を用いて、供試体外部から応力を段階的に加えた際のひび割れ発生条件およびその伝播について、非破壊 CT-XRD 連成法により観察を実施した。

実験：

試料は水セメント比 (W/C) が 0.5 のセメントペーストおよび W/C が 0.5 で砂セメント比 (S/C) が 1.0 または 2.0 のモルタルである。使用したセメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.15 g/cm³)、砂は秩父産石灰石砕砂 (密度 2.60 g/cm³) を粒径 0.6 mm 以下にふるったもの、水は上水道水 (密度 1.00 g/cm³) である。上記の材料を練り混ぜた後に、 $\phi 3.0 \times 10$ mm の型枠に打設し、鋼線入りセメントペーストを作製した。なおセメントペーストは鉄筋を模擬した鋼線を中央に配置した型枠内にも打設した。打設後 1 日で脱型し、材齢 28 日まで水中養生した。

測定手法として、X 線 CT 法による供試体内部の幾何学的形状や劣化状態を把握した上で、非破壊で局所 XRD を実施できる、非破壊 CT-XRD 連成法を用いた[2]。図 1 に非破壊 CT-XRD 連成

法の概要を示す。CT 測定では、特定のエネルギーを取得するようシリコン単結晶で回折させ、透過像を取得して画像を再構成する。局所 XRD には、関心領域の固定のため白色 X 線を使用して、エネルギー分散型の回折プロファイルを取得する。実験測定条件は、X 線 CT 測定のエネルギーが 25 keV、投影数が 1500 枚、露光時間が 0.4 秒、画素長が 2.46 μm で実施した。XRD 用の半導体検出器 (SSD) と光軸のなす角度は 5° ($2\theta=10^\circ$) であり、ビームの幅は 50 μm 、高さ 300 μm であった。また XRD 測定では、供試体から下流側のスリット 2 までは 150 mm、スリット 2 から SSD 前のスリット 3 までは 450 mm であった。

図 2 に CT 測定時に供試体中に応力を載荷できるシステムの概要を示す。供試体はアルミ製治具上の、背面支持がある台座内に設置する。外部にネジ送り式のステンレス圧子を設置し、これを操作して供試体への応力載荷状態を制御する。ネジは 1 回転毎に 0.5 mm 進む設計になっており、今回は圧子が接触した時点を目安としたネジの回転角度で応力状態を制御した。

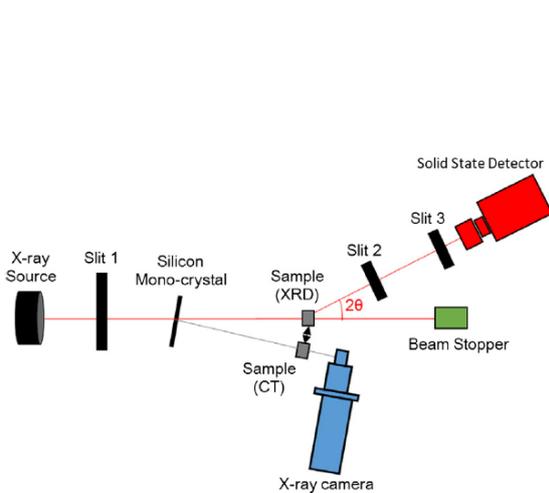


図 1. 非破壊 CT-XRD 連成法の概要[2]

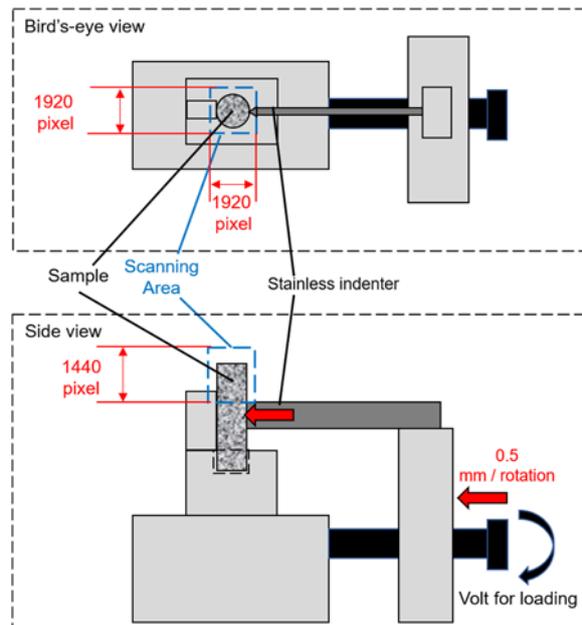


図 2. CT 測定時の応力載荷システムの概要

結果および考察：

図 3 にモルタル供試体 (S/C=2.0) のひび割れ前後の経時変化を示す。これによると、ひび割れの形状に着目して観察すれば、ひび割れは骨材の界面からではなく、骨材中から発生していることがわかる。図 4 に鋼線入りのモルタル供試体 (S/C=1.0) のひび割れの経時変化を示す。これによると、ひび割れは骨材の界面から発生していることがわかる。このような違いが生まれた原因として、鋼線の有無による違いもあるかもしれないが、S/C=2.0 の場合では、骨材同士に多くひずみエネルギーが生じ、骨材からひび割れが生じたと考えられ、S/C=1.0 の場合では、骨材とセメントペースト間に、材料的に不連続で空隙が多い遷移帯と呼ばれる領域があり、この領域を起点にひび割れが発生したためと考えられる[3]。なお、その後回転を加えて応力を増加させても、ひび割れ幅の進展は見られなかった。

図 5 に炭酸化していない供試体と、炭酸化した供試体の CT 画像を示す。これによると、特に CT 画像上では大きな違いは見られなかった。また紙面には掲載していないが、XRD 測定においても炭酸化の有無は同定できた。また、破壊機構も、経時的なひび割れは見られず、急激な破壊を迎えたため、ひび割れの CT 画像を取得することはできなかった。

以上のように、材料の構成が異なる供試体間での基礎的なひび割れ性状の違いを整理することが出来た。一方で、鉄筋腐食により付着の性状が変化して、全体の破壊の挙動が変化することが考えられるため、このような材料劣化の影響も検討していきたい。

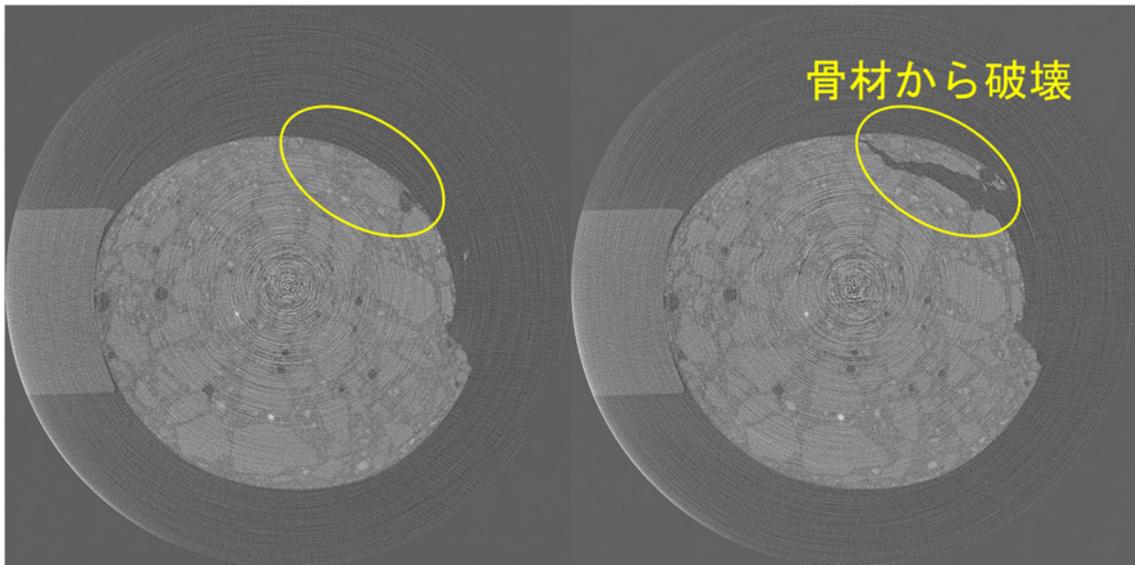


図 3. モルタル供試体 (S/C=2.0) の CT 画像

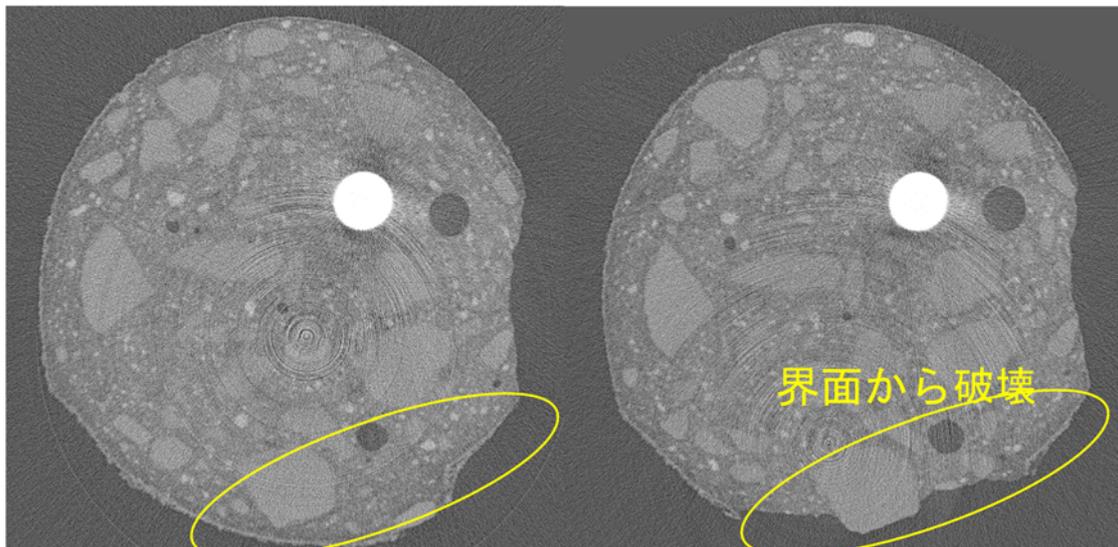


図 4. 鋼線入りモルタル供試体 (S/C=1.0) の CT 画像

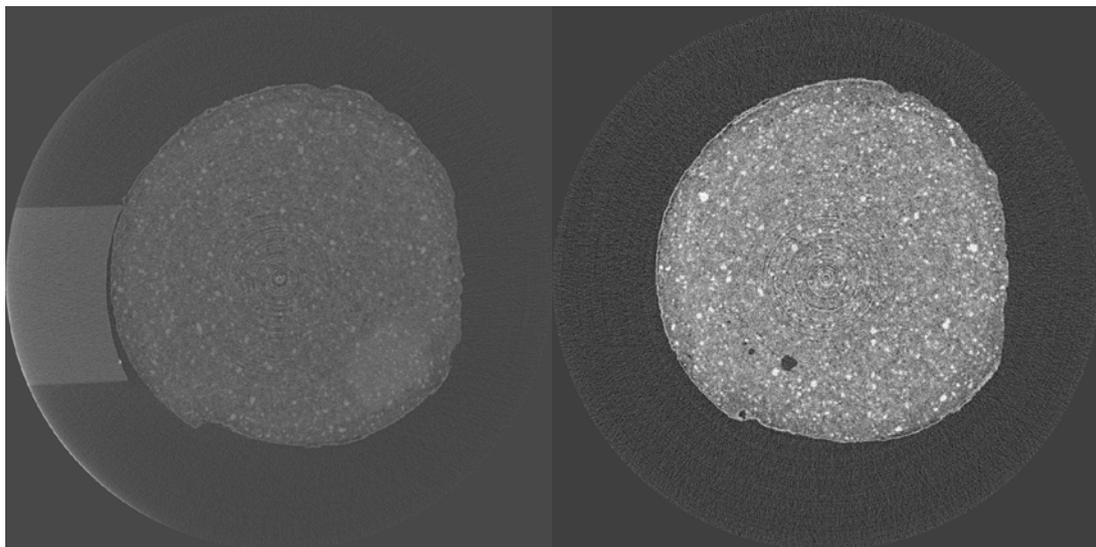


図 5. セメントペーストの CT 画像 (左: 炭酸化無, 右: 炭酸化有)

今後の課題：

今後は、セメントペースト部で材料変質領域がひび割れ性状に与える影響の検討や、荷重などによるひび割れが存在している場合が破壊へ与える影響を、2022B 期以降の実験に反映させる。

参考文献：

- [1] 麓 隆行, 他, 土木学会論文集 A2 **76**(2), 337 (2020).
- [2] H. Takahashi, T. Sugiyama, *Construct. Build. Mater.* **203**, pp.579–588 (2019).
- [3] B. D. Barnes et al., *Cem. Concr. Res.*, **8**(2), pp.233–243 (1978).