

X線 CT 画像解析によるコンクリート損傷の評価

Evaluation of Concrete Damage using X-ray CT Image Analysis

R&Dセンター 山地 宏志 HIROSHI YAMACHI
知的財産部 中森 純一郎 JUNICHIRO NAKAMORI

放電破砕工法 (EDICS) により破砕されたコンクリートの損傷を評価する目的で、破砕コンクリートの X 線 CT 撮影を実施した。この評価を実施するため、EDICS の破砕機構を考慮し、コンクリート損傷を引張波による微細空隙の形成と定義するとともに、読影の難しい微細空隙を X 線 CT 画像に二値化処理を施すことで抽出する手法を採用した。無筋のコンクリート破砕片をサンプルとして、上記手法を適用したところ、EDICS により形成されたと考えられる損傷は破砕面近傍の約 30mm の範囲に限定されることが明らかになった。

キーワード：放電破砕、コンクリート損傷、微細空隙、X 線 CT

In order to evaluate the damage to concrete crushed by the Electric Discharge Impulse Crushing System (EDICS), X-ray CT images of the crushed concrete were taken. To carry out this evaluation, we defined concrete damage as the formation of microscopic voids by tensile waves, with taking into account the crushing mechanism of EDICS. And also, binarization processing to the X-ray CT images to extract microscopic voids that are difficult to detect with the naked eyes was applied. When the above methods were applied to samples of unreinforced concrete fragments, it became clear that the damage thought to have been caused by EDICS is limited to an area of approximately 30mm near the fracture surfaces.

Key Words: Electric discharge crushing, Concrete damage, Microcavity, X-ray CT

1. はじめに

放電破砕工法 EDICS (Electric Discharge Impulse Crushing System)^{1),2)}は、大型重機の利用できない高所や屋内等の特殊箇所では、効率的なコンクリート構造物の解体を可能とする内部装薬発破法である。このような特殊箇所での解体工は、構造物の一部だけを解体する部分解体で行われることが多い。部分解体は、構造物の保全補修や、機械機器の撤去・置換等を目的に実施されるため、残置される躯体部は以降も構造躯体として利用される。したがって、残置躯体部には恒久利用を担保し得る健全性が要求されることになる。

一方、放電破砕工法では、放電衝撃により発生した引張波の伝播経路上にコンクリートの破砕面が形成される。部分解体では、引張波が残置躯体部にも伝播する可能性があるが、その経路上にあるコンクリートの健全性については、現在、検証がなされていない。これは、コンクリートの健全性を評価する基準が十分に確立されてお

らず、それを検証する試験方法や評価手法も確立されていないためと考える。

筆者らは、放電破砕工法によりコンクリートが破砕されるメカニズムに着目して、コンクリートの損傷を定義し、その損傷を産業用 X 線 CT (Computed Tomography) により評価し得るかを検証した。その結果を、以下に報告する。

2. 放電破砕工法におけるコンクリート損傷の定義

放電破砕工法は、解体対象の媒体内に孔を削孔し、その孔内に放電チップと反応薬液を封入したカートリッジ (エコリッジ) を挿入・填塞し、これに $E=3,000V$ の高電圧を放電することで得られるパルス的な衝撃圧によって媒体を破砕する工法である。

その破砕メカニズムをより詳細に検討すると、パルス的な衝撃圧は装薬孔壁で膨張エネルギーから運動エネルギーに変換され、粗密波あるいはせん断波として互い

に独立した経路で媒体内を伝播する。粗密波は媒質の体積変化が伝播する波であり、これに対し、せん断波は媒質のずり変化（ねじれ）が伝播する波で、体積変化は伴わない³⁾。

粗密波によるコンクリートの体積膨張（引張）が伝播箇所の引張限度を超えるとき空隙（欠陥）が形成され、運動エネルギーは消散するが、このような空隙が密集・連続して形成すると、コンクリートは破砕に至る。一方、破砕に至らないまでも、粗密波の体積膨張による欠陥がある程度の密度で分布するとき、構造としての弱部を形成する。本研究では、このような引張波伝播によって形成される局所的な微細欠陥による弱部をコンクリートの損傷と定義するものとする。

3. 産業用 X 線 CT 撮影

(1) 産業用 X 線 CT 撮影概要

産業用 X 線 CT は、医療から製造業に至るまで、幅広い分野で活用されている非破壊検査技術であり、X 線の物質透過性と物体の密度差を利用し、肉眼で見ることのできない内部構造を詳細に画像化することができる。産業用 X 線 CT は、医療用 CT とは異なり、生体を扱わないため放射線被曝をさほど考慮する必要がなく、長時間照射による解像度の向上が可能となる。このため、品質管理、内部構造の調査、欠陥の検出、リバースエンジニアリングなど、さまざまな分野で活用されているが、実際には撮影者の技量と知見にその精度と解釈が委ねられるところが大きいことは否めない段階にある。

本研究では、室蘭工業大学板倉賢一特任教授・柴田義光准教授が、同大学所有の TOSCANER-34500FD（東芝 IT コントロールシステム株式会社：表-1、および写真-1 に示す）⁴⁾を用いて撮影した画像データを、その検証に供するものとした。

(2) X 線 CT 撮影の原理と撮影画像読影

X 線は、電離放射線と呼ばれる電磁波で、波長が非常に短く、大きなエネルギーを持つため、物質を構成する原子と原子の間を透過するが、この間に原子の周りを回る電子などに衝突することもあり、減衰が生じる。この減衰率（吸収率）は金属のような密度の高い物質では大きくなり、空気や紙など密度の低い物質では小さくなる。

X 線 CT は、X 線を目的の物体に照射し、領域全体での X 線吸収率 $f(x, y)$ を評価することによって、物体の形状を再構成する手法である。図-1 のように、角度 θ で物体 Ω へ X 線を投影して得られる積分量、すなわち投影データ $p(r, \theta)$ は、以下のように記述される。

表-1 TOSCANER-34500FD の仕様⁴⁾

X 線発生器出力	430kV
X 線焦点寸法	0.4mm/1.0mm 選択可
X 線検出器	Flat Panel Detector(16 inch)
分解能	0.1mm
CT 方式	ローテートオンリー方式
最大スキャンエリア	φ600mm×600mm(H)
オプション	UPS/デジタルエンジニアリング/ 画像処理用 PC ワークステーション/ 高速再構成機能
漏洩線量	2μSv/h 以下
用途	コンクリート、大型アルミダイカスト 鉄、鋳物 他



写真-1 撮影に供した TOSCANER-34500FD
(国立大学法人室蘭工業大学所有)

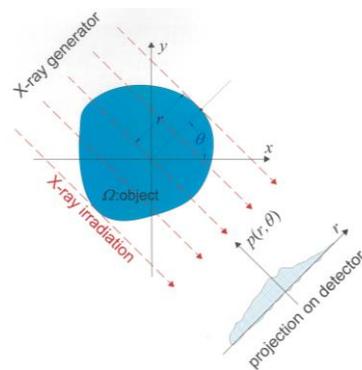


図-1 物体と投影の関係

$$p(r, \theta) = \int f(x, y) \delta(r - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (1)$$

式(1)において、 $\delta(x)$ は、ディラックのデルタ関数を示す。すなわち、可積分な関数 $f(x)$ に対して、以下の関係を有する関数である。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) f(x) dx = f(0) \quad (2)$$

この投影データ $p(r, \theta)$ に、投影切断面定理⁵⁾を用いると物体 Ω の X 線吸収率分布 $f(x, y)$ を求めることができる。投影面切断は、図-2 に模式的に示されるように、角度 θ で X 線を照射した投影データ $p(r, \theta)$ のフーリエ変換が、X 線吸収率 $f(x, y)$ の 2 次元フーリエ変換を角度 θ で切断した断面に一致するという定理である。

産業用 X 線 CT 撮影では、ターンテーブルを回転させ、物体を $0 \leq \theta \leq 360^\circ$ の範囲で撮影するから、全周に亘る

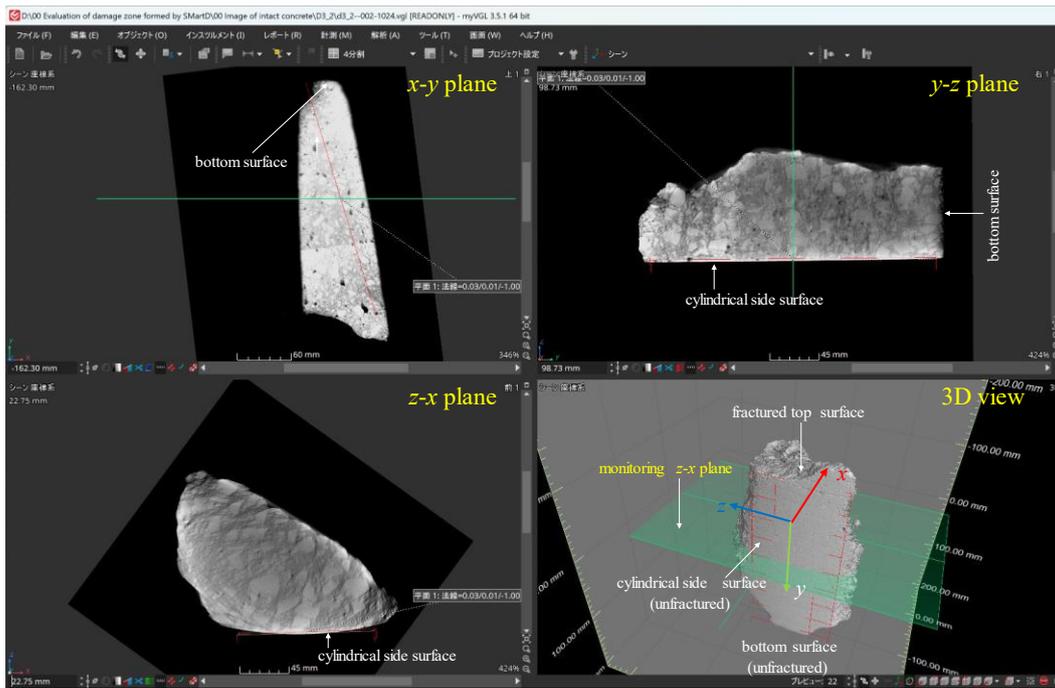


写真-2 無筋コンクリートサンプルの3次元 X 線 CT モニタリング画面

投影データ $p(r, \theta)$ が測定され、これをフーリエ変換すれば、物体 Ω 全領域の 2 次元フーリエ変換分布が得られることになる。したがって、その 2 次元逆フーリエ変換を行えば、物体 Ω 全領域の X 線吸収率分布 $f(x, y)$ が得られる。精度確保等のための細かい操作は省略するが、以上のような手法で 3 次元 X 線吸収率分布を求め画像化する技術が X 線 CT である。

その画像分析は、写真-2 に示す操作画面上で x - y 、 y - z 、 z - x 平面毎に実施され、右下の【3D view】ウィンドウ中の緑の水平面は、現在、画像解析が実施されている z - x 平面のサンプル内部における z - x 断面位置を示す。各断面ウィンドウでは、X 線吸収率の分布が 0~255 階調のグレー画像で表示され、吸収率が大きいほど白く、逆に小さいほど黒く示される。この画像を読影するにあたっては、以下の知見が重要となる。すなわち、

- ① 原子番号と密度の大きいものほど X 線の吸収率が大きくなる。
- ② X 線の透過方向に対して厚みがあれば吸収は高くなり、薄ければ低くなる。
- ③ 管電圧 V を増大すると、X 線の波長が短くなり、透過しやすくなる。
- ④ 管電流 A を増大すると、発生する X 線量が増え強度が上がる。

対象物が人体のように、各組織の密度が小さく、かつ透過方向に対する厚みがさほどなければ、X 線吸収率の分布を、そのまま密度分布として評価することが可能で、その分布形状は各組織の形状を示すことになる。

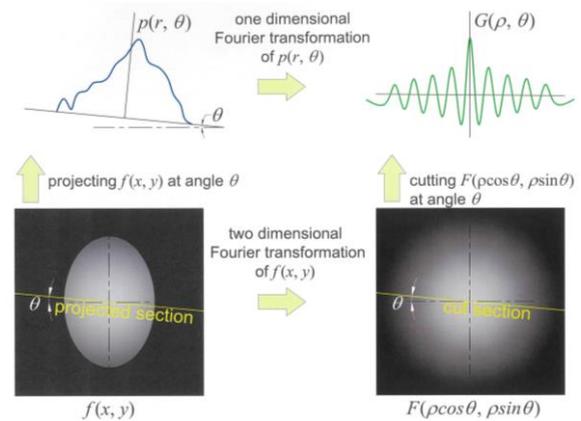


図-2 投影切断面定理

表-2 物質の 1/10 価層と加速電圧の関係*

X 線管の 加速電圧	物質の 1/10 価層 (mm)		
	水	鉄	コンクリート
50 kV	101.5	1.5	29.3
100 kV	134.9	7.9	57.6
150 kV	153.0	14.9	69.7
200 kV	168.1	20.1	78.1

*参考文献 6) からデータを拾取選択し作成

しかし、RC 構造物の主材料たる鉄やコンクリートは、さらには管電圧（加速電圧）等も考慮に入れて読影することが求められる。参考のため、表-2 にいくつかの物質の 1/10 価層（透過する X 線の量が 1/10 になる厚さ）と加速電圧の関係を示す⁶⁾。

いま、写真-2 の X 線吸収率分布をみると、 x - y 平面、

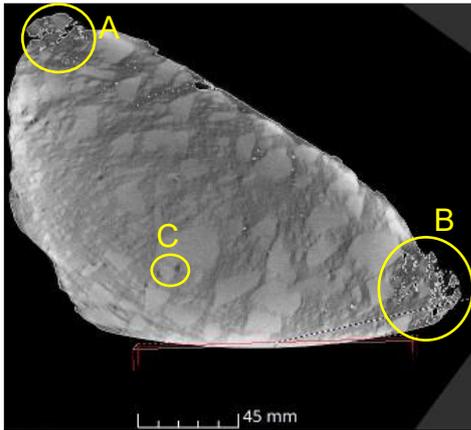
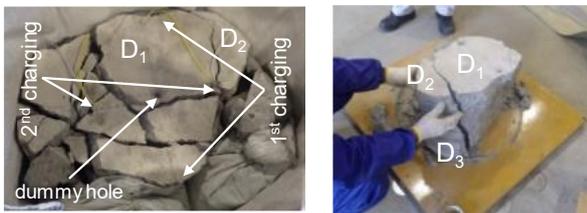


写真-3 二値化処理による破砕面・欠陥の抽出



(a) 破砕直後の試験体上面 (b) サンプルの位置関係

写真-4 サンプル採取状況

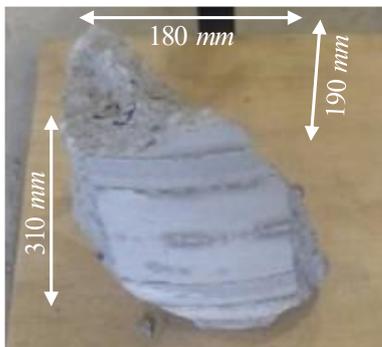


写真-5 サンプルの形状・寸法

y-z 平面、z-x 平面のいずれの画像においても、最も密度の大きい粗骨材が 255 階調付近の白調色で、モルタル成分が中央値である 127 階調付近の灰調色で、さらに空隙やサンプル外部が 0 階調付近の黒調色で描画されており、コンクリート内部構造が適切に再現・図化されていると判断できる。しかしながら、気泡よりも小さい構造は目視で階調を判定することが難しく、1mm 以下の構造についてはその形状を特定することも難しいため、放電破砕による損傷について目視評価だけで議論することはできない。

X 線 CT で撮影される最も密度の小さい物質は、空気であり、X 線吸収率分布上に 0 階調の黒で表示される。第 2 章で定義した放電破砕によって形成される破砕面や

微細な空隙（欠陥）は、空気層との境界面と定義することが許されるであろう。したがって、0 階調近傍を閾値として二値化処理を CT 画像に施せば、微細な破砕面や欠陥を抽出することが可能になると考えた。

写真-2 の z-x 平面画像に 5 を閾値として二値化処理を施し、空気との境界を白線で描いた図が写真-3 である。図より明らかなように、二値化処理により目視では判定が難しかった微細な空隙を多数抽出することができ、凸部 A、B では明らかに放電破砕に影響されたと考えられる空隙が密集している。

一方で、コンクリート打設時に混入したと思われる C 部にある空気の気泡が空隙として認識されていない。C 部の気泡の色をよく見ると明らかに黒色が薄い。これは、気泡内に空気よりも密度の高い物質、例えば水などが介在している可能性が考えられる。したがって、閾値を若干大きくすれば、C 部のような、階調がわずかに高い領域も空隙と認識し得るかもしれない。このように、精密な閾値の設定には若干の疑義が残るものの、上記の二値化手法により微細な空隙を抽出し得ることを確認できた。

4. 放電破砕による損傷の形成

(1) サンプルの作成と緒言

本章では、写真-4、写真-5 に示すサンプル D₃ の X 線吸収率分布画像を基に、放電破砕による損傷の形成に関し考察を行う。サンプル D₃ は、写真-4 (a) に示されるように、φ500mm×500mm (H) の円柱供試体の中央を貫通する空孔 (dummy hole) を ΔL=200mm の距離で q=1.2mL の薬剤カートリッジで挟み、起爆した後、これに直交する方向で ΔL=150mm の距離で空孔を挟み、再び同量の薬剤を起爆して作製したサンプルのうちの一つであり、写真-2 の画像解析に供されるサンプルである。

採取位置は写真-4 (b) に示される位置で、寸法は写真-5 に示されるように 180mm(W)×190mm(L)×310mm(H)、また重量は w=9.04kg である。なお、以下の議論における座標系とその原点は写真-2 中の座標系に従う。

(2) 放電破砕による損傷の形成

サンプル D₃ は、写真-4、写真-5 から分かるように、底面と円柱側面を除き、破砕面で囲まれたコンクリートブロックであるが、破砕面によって損傷の形態が異なっていることが X 線 CT により判明した。写真-6 は、x = -150mm, -145mm, -140mm, -135mm, -130mm, -125mm における y-z 断面の X 線吸収率分布画像を示すものである。

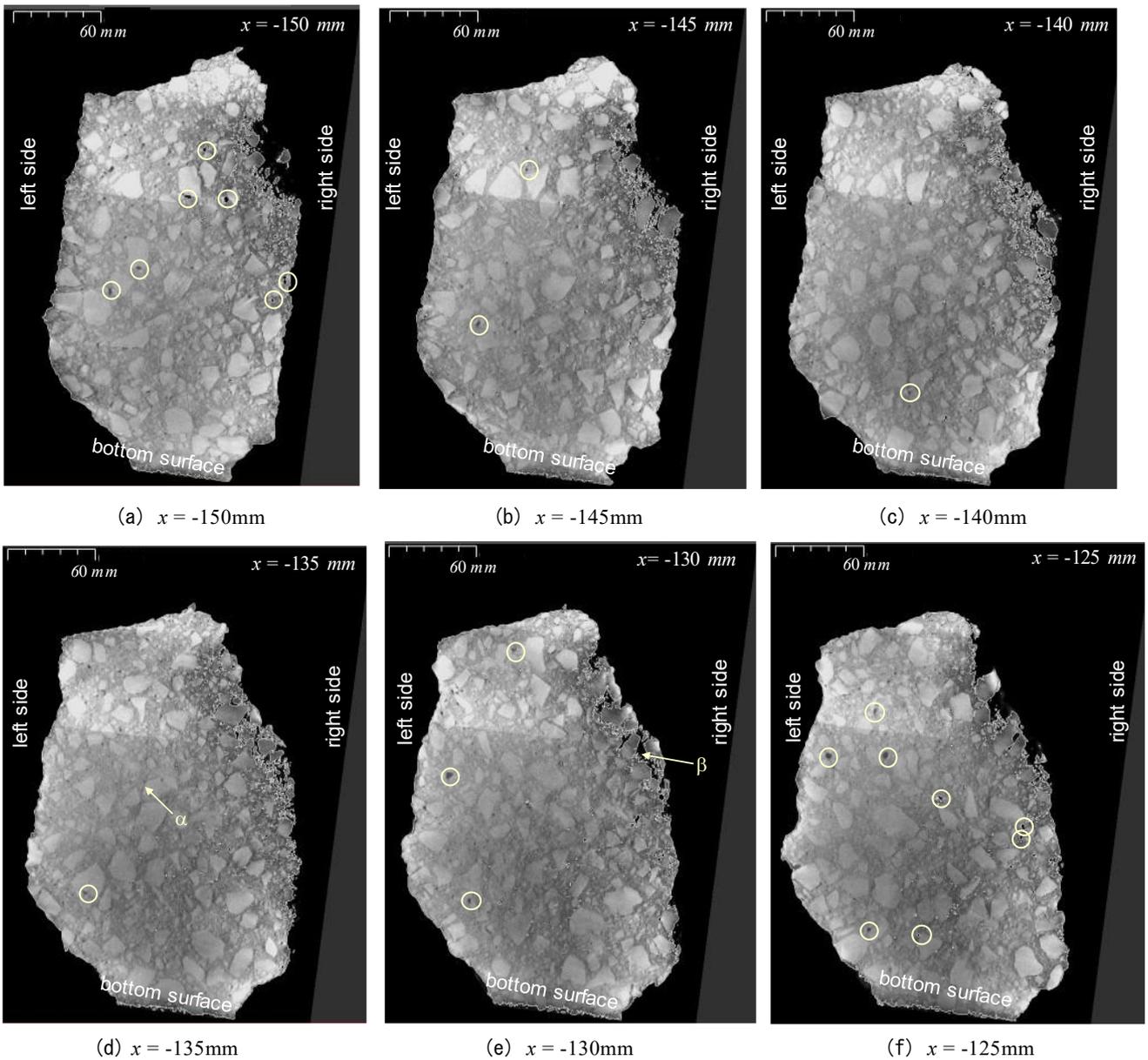


写真-6 $x = -150\text{mm} \sim -125\text{mm}$ 間の $y-z$ 断面透視図

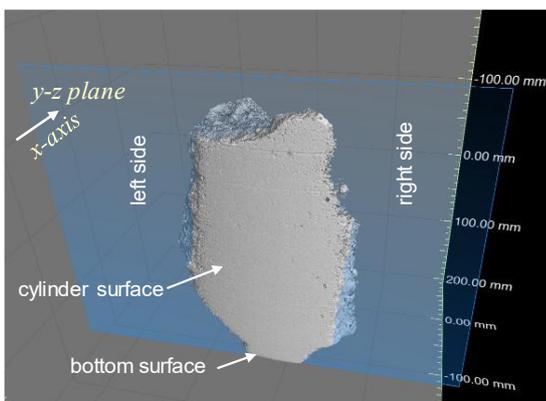
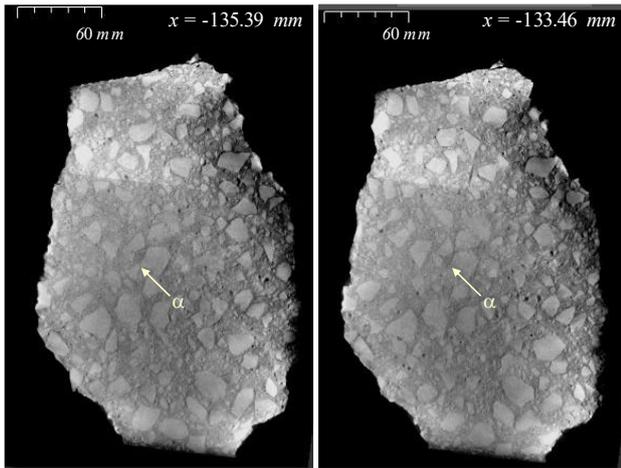


図-3 x 軸, $y-z$ 断面, および左右の定義

いま, 図-3 のように円柱側面を正面にしてサンプルの左右を定義すると, 右破砕面から $\Delta L=30\text{mm}$ の範囲で

は, 破砕時に形成されたと考えられる断面欠損 (例えば写真-6(e)の β 部) や大小の空隙が確認され, この領域のコンクリートは明らかに破砕による損傷を受けたものと判断される。また, 空隙はモルタル成分の領域にだけ存在し, 粗骨材内部には存在しない。これは, 当然のことながら, 強度の高い粗骨材を避け, 弱部であるモルタル成分の領域にだけ破砕面が成長したことを示すものである。なお, 写真-6 で確認される断面欠損は, このモルタル部破砕が, その成長過程でエネルギー消散したため, 破砕面を形成するに至らなかったと推測される。

一方, 左破砕面および上部破砕面近傍のコンクリートには, そのような欠陥を確認することができない。当該のサンプルは, 損傷域の形成を目的に, 2段階の特殊な起爆法により作成したが, どうしてこのような差異が



(a) $x = -135.39\text{mm}$ (b) $x = -133.46\text{mm}$

写真-7 線状構造 α の存在範囲

生じたかは不明である。しかし、破砕面の目視観察だけでは、このような損傷形態を認識することは難しいものとする。したがって、未だ測定条件に多くの制約があるものの、X線CTとその画像処理はコンクリート損傷を評価する有効な手段であるとする。

X線CT画像を読影する上で、起爆により形成された空隙と、コンクリート混練り時の空気混入による空隙（気泡）とを区別することが必要になる。この明確な判別法は、完全に確立してはいないが、写真-6上にいくつか円でマーキングしたように、形状的には円形に近く、寸法も比較的大きな空隙や、色調が0階調よりも若干大きく、空気との境界が設定されない空隙は、気泡と判定してよいものと思われる。

最後に、写真-6(d)中の線状構造 α はひび割れと判断された。しかし、写真-7に示すように、その存在範囲は $x = -135.39\text{mm}$ 付近から $x = -133.46\text{mm}$ 付近と非常に狭く、幅としては $w = 2\text{mm}$ に満たない。したがって、これがひび割れであるとしても、破砕によって形成された構造的なひび割れとは考え難く、コンクリート硬化に伴う局所的な収縮ひび割れではないかと推察された。今後、非破壊のコンクリートサンプル内に α のような狭小な線状構造が存在するかを観察することにより、これを確認する必要がある。このように、X線CT画像の読影では、三次元的な連続性等の情報が、内部構造を評価する上で非常に有用な情報となる。

5. おわりに

本研究では、放電破砕工法により部分破砕された構造物の残置躯体部の健全性評価を目的に、放電破砕工法

の破砕メカニズムを考慮して損傷を定義し、これをX線CT画像解析により評価し得るかを検証した。その結果、読影時に考慮すべき点は多いものの、十分に放電破砕により形成される損傷を評価し得る手法であると判断した。

当該研究に供したサンプルは、コンクリート損傷を形成することを主目的としたため、実際の破砕作業では採用されることのない装薬法を採用したが、今後は標準的な構造物破砕に供される装薬法によって、損傷域がどのように形成されるかを検証し、放電破砕による構造物の部分解体を実務として実施する予定である。

謝辞：室蘭工業大学 板倉賢一特任教授、柴田義光准教授に破砕サンプルのX線CT撮影を実施いただくとともに、画像解析法のご指導を賜りました。また、東京大学 上西幸司教授にはX線CT画像評価に関する損傷力学的アプローチをご指導いただきました。SMC テック 榎須 藤俊典氏、南洲興業 榎山下英威氏には、試験体作成、放電破砕実施、並びにサンプル採取のため並々ならぬご尽力を賜りました。ここに、深甚の感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- 1) 株式会社ニチゾウテック：放電破砕工法，
<https://www.nichizotech.co.jp/technology/discharge>，
2024.6.10 閲覧
- 2) 山地宏志，中森純一郎：放電破砕によるコンクリートの破壊機構，三井住友建設技術開発センター報告，Vol. 12，pp.67-72，2014.9
- 3) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：強振動の基礎，4.2 地震波の生成と伝播，4.2.1 P波とS波，
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/gk/publication/1/I-4.2.1.html>，2024.6.7 参照
- 4) 東芝 IT コントロールシステム株式会社：TOSCANER-20000/30000 X線非破壊検査システム，
<https://www.toshiba-itc.com/hihakai/toscaner-20000/>，
2024.6.10 参照
- 5) 田中敏幸：X線CTの原理・現状とさらなる画像の高品質化，計測と制御，Vol.56，No.11，pp.874-879，2017.11
- 6) 松定プレジジョン株式会社：X線検査装置，よくあるご質問（Q&A），X線装置の管電圧（加速電圧）ってどのくらい必要ですか？，
https://www.matsusada.co.jp/support/faq/xm_xins/x-ray_voltage.html，2024.6.10 参照