

地盤工学における産業用 X 線 CT スキャナーの適用

Application of Industrial X-ray Computed Tomography Scanner to Geotechnical Engineering

大谷 順 (おおたに じゅん)
熊本大学工学部環境システム工学科 助教授

尾原 祐三 (おばら ゆうぞう)
熊本大学工学部環境システム工学科 教授

菅原 勝彦 (すがわら かつひこ)
熊本大学工学部環境システム工学科 教授

椋木 俊文 (むくのき としふみ)
熊本大学大学院自然科学研究科 博士課程後期 2 年
(日本学術振興会特別研究員)

1. はじめに

医療分野において、診察技術に革命をもたらした X 線 CT スキャナー (X-ray Computed Tomography Scanner) が、コンピューターのめざましい発展と共に工学分野においても普及しつつある。近年、高エネルギー X 線を使用した装置の出現によって高分解画像が得られるようになった。また、画像がデジタルデータとして得られるため、目的に応じた画像処理が可能となり、物体内部構造の三次元画像が非破壊かつ簡便に取得できるようになった。

X 線 CT 法に関する最新の装置と解析技術は、定性的のみならず定量的な情報を提供すると考えられる。地質学¹⁾や土壌学²⁾ (Soil Science) においては、すでにその適用性と有効性が認められており、それぞれの分野において各種の地盤材料 (または地質材料) の微細構造や、水の浸透現象などについての研究がなされている。また、地盤工学の分野においても、医療用 X 線 CT スキャナーを用いた研究^{3),4)}が幾つか行われているが、その X 線強度が小さいために十分な寸法を持つ試料での定量的評価は困難であることが指摘されている。

熊本大学工学部環境システム工学科岩盤工学グループでは、1996年に地盤工学への応用を目的として産業用 X 線 CT スキャナー (TOSCANER 23200min 東芝) を導入した。この装置の X 線管電圧は医療用のそれに比較して高く X 線の透過能力が優れている。

本報告では、本装置の地盤工学における適用性について紹介する。まず、X 線 CT スキャナーの理論背景について述べる。次に、これを用いた岩盤に関する適用例と土質に関する適用例をそれぞれ紹介し、本装置の有用性を示すと共に今後の展開について言及する。

2. X 線 CT スキャナー装置

2.1 概要⁵⁾

X 線 CT スキャナーの開発の歴史は、1963年にまでさかのぼる。実際には、その基本原理の数学的証明は 1917年オーストラリアの数学者 J. Radon (ラドン) によって発表されたが、実用化されるためにはコンピューターの普及を待たなければならなかった。英国の EMI

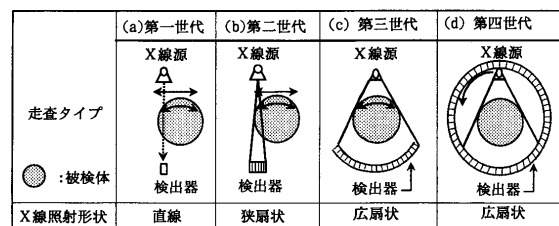


図-1 X 線 CT スキャナー装置の変遷

社の中央研究所に勤めていた G. Hounsfield (ハンスフィールド) が X 線 CT スキャナーの基礎実験を開始し、商品として発表したのは 1973年のことである。X 線 CT スキャナーの登場は、世界の臨床医学界に大きな衝撃を与え、目覚ましい普及によって医療分野に革命的な変化をもたらした。近年、高いエネルギーの X 線を利用した CT 装置も開発され、産業用材料や製品の非破壊検査などに使用されつつある。

元来、X 線 CT 装置は医療用に開発されたものである。したがって、診察中の患者の負担を減らすため、検査時間短縮の改良が進められた。図-1は、この X 線の走査技術の発展を図示したものである。導入した産業用 X 線 CT スキャナーのタイプは、図中の第二世代である。医療用と産業用 CT 装置の最大の違いは、X 線管電圧である。医療用では人体に悪影響を及ぼさない程度の X 線を発生させるために管電圧は 140 kV 程度であるが、主に鉄やアルミニウムなどのような金属を対象としている産業用では 200 kV 以上の管電圧を有している。しかし、医療用に比べて走査時間が長いという欠点も備えており、この改善が近年の産業用装置の課題となっている。

2.2 X 線 CT 法の原理⁶⁾

(1) 理論背景

トモグラフィーの概念は逆問題である。つまり様々な方向から得られた被検体の投影データを用いて、その内部の画像を再構成する方法である。

図-2に示すように一次元の均質材料の被検体内を透過する X 線は、次式に示すように X 線吸収係数に比例して減衰する。

$$I = I_0 \exp\{-\mu W\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 I は被検体通過後の X 線強度、 I_0 は X 線源強

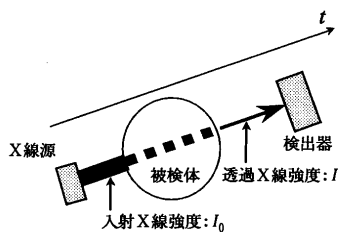


図-2 CT スキャナーの原理 (一次元)

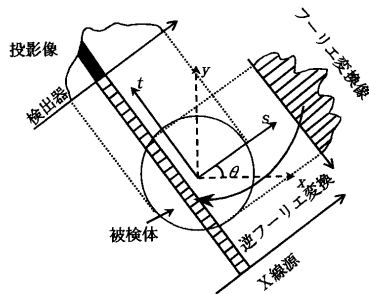


図-3 CT スキャナーの原理 (二次元)

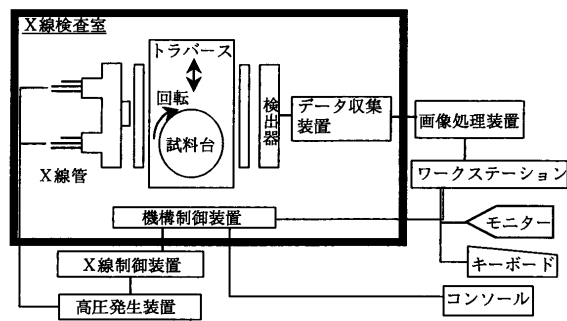


図-4 産業用 X 線 CT スキャナー装置

度を示し、 W は被検体の奥行きを示す。また μ は線形吸収係数であり、単位長さあたりの量として定義され、これは被検体の密度に比例することが知られている。以下ではこれを吸収係数と呼ぶことにする。式(1)の両辺を I_0 で除して、対数を取ると投影関数 (Projection Function) p が次式で定義される。

$$p = \mu W = \ln \{I_0/I\} \dots \dots \dots (2)$$

この理論を二次元に拡張したものが次式であり、それを図示したものが図-3 である。

$$p(s, \theta) = \ln \{I_0/I\} = \int_{-\infty}^{\infty} \mu(x, y) dt \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\mu(x, y)$ は X 線吸収係数の空間分布である。最終的には断層写真法 (Tomography) に基づき互いに独立な方向の投影を計測した後、フィルター補正逆投影法⁶⁾を用いて X 線吸収係数分布 $\mu(x, y)$ が求められる。ここで得られる画像は、X 線を照射した断面の二次元画像であるが、各断面の二次元画像を被検体全体で重ね合わせるにより三次元画像を得ることができる。

(2) CT 値

X 線検出器の出力は A/D 変換され、断面の投影画像ごとに吸収係数が計算される。このとき吸収係数は次式で定義される CT 値と呼ばれる数値に変換され、これにより CT 画像と呼ばれるデジタル画像が得られる。

$$CT \text{ 値} = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} \times K \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 μ_t は求める点の吸収係数、 μ_w は水の吸収係数、 K は比例定数である。上式は、基準として水の CT 値が 0 に設定されている。このとき空気の吸収係数は水のそれに比較して無視できるほど小さいので $\mu_t \approx 0$ となる。よって空気の CT 値は $-K$ となるが、本装置では比例定数 K が 1 000 に設定されていることから空気の CT 値は $-1 000$ となる。このように、水の密度は約 1 t/m^3 、空気の密度はほぼ 0 t/m^3 であるので、CT 値では密度 1 t/m^3 が 1 000 倍に拡大して表現される。この定義は臨床における目的で考案された単位であり、産業用においてもこれを導入している。

CT 値画像は、CT 値を白黒の 256 階調濃淡レベルに置き換えることにより表示され、一般には CT 値が高い領域 (高密度領域) は白く、低い領域 (低密度領域) は黒く表される。

2.3 装置の概要⁷⁾

今回使用した産業用 X 線 CT スキャナー装置の概略

表-1 産業用 X 線 CT スキャナー装置の仕様

スキャン方式	トラバース/ローテンション方式
X線発生装置管電圧	300kV or 200kV/2mmV 2段切替式
X線ビーム形状	扇状・広がり角度 30度
検出器数	176チャンネル (固体検出器)
検査対象の最大寸法	最大直径400mm×最大高さ600mm
最大積載重量	981N
X線ビーム厚さ	0.5mm・1.0mm・2.0mmの3段切替
マルチスキャン数	最大1000画像
空間分解能	直径20mmの鉄円杭において 最小0.2mmの孔隙を判断できる

図を図-4 に、またその仕様を表-1 に示す。X 線検査室内は鉛で完全に遮蔽されており、試料台に被検体をセットする以外の操作はすべて検査室の外から行うことになる。X 線の照射が開始すると X 線検査室内では、まず、X 線発生装置と検出器の間を試料台が並進移動する。この間に X 線が照射され、ある一方向からの先験情報を得る。次に試料台が端点に到達すると、試料台は 30 度回転し、続いて並進移動し、新たな方向から X 線が照射され、その方向の投影情報が蓄積される。この操作を 6 回繰り返すことで 180 度方向から X 線が照射されたことになる。断面画像はこれらの情報を 180 度回転させ、合計 12 の方向から投影したと見なして再構成される。一方、被検体の投影情報を 360 度の方向から得ようとする、並進・回転移動を 12 回繰り返すことになるが、その分撮影時間を要する。検出された X 線は画像処理装置で逆変換され、ワークステーションのモニター上に表示される。

3. 岩盤工学における適用例

SR (Short Rod) 試験片における亀裂開口分布の測定⁸⁾

破壊靱性試験の一つである SR 試験装置を図-5 に示す。SR 試験片は、シェブロンノッチを持つ試験片の端面に貼られたアルミ製プレートを通じて上下に荷重 F で引張られる。同時に LVDT (Linear Variable Differential Transformer) により開口変位 (CMOD) が測定される。

秋吉大理石の荷重-開口変位曲線 (F -CMOD 曲線) を図-6 に示す。図中の A (無負荷段階)、B (除荷段階) および C (再載荷段階) 点において X 線 CT 法を適用し、B および C 点における亀裂の開口分布を測定した。3 点で得られた X 線 CT 画像を図-7 に示す。撮影は試験片の中心断面であり、CT 値 = 2 400 より高

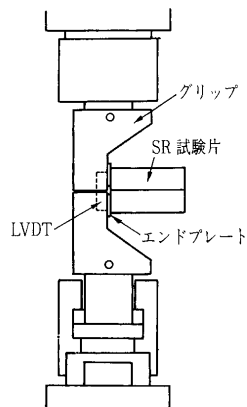


図-5 SR試験装置

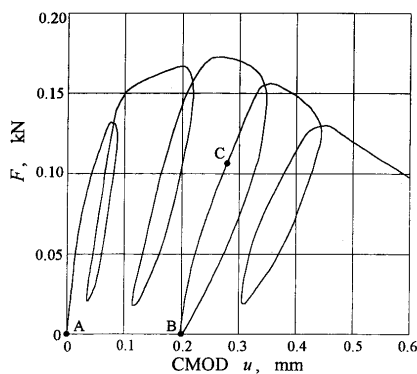


図-6 秋吉大理石の荷重 (F)-開口変位 (CMOD) 曲線と X 線 CT の実施段階

い部分を白く、低い部分を黒くした2値化画像である。無負荷段階の画像(a)では、白い部分が秋吉大理石であり、左側の黒太線はシェブロンノッチである。除荷段階の画像(b)では、シェブロンノッチの先端から右に向かって表面に凹凸のある亀裂が進展している。また、画像(b)と再載荷段階の画像(c)とを比較すると、再載荷による亀裂の開口が読みとれる。

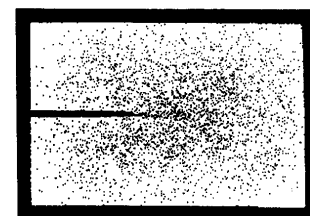
これらの画像は岩石に特有な不均質性も現れるため、直接亀裂開口変位を読み取ることはできない。このため、画像間差分法の一つである開口差分法⁸⁾により無負荷段階の画像と除荷段階および再載荷段階の差画像を構成し、これに亀裂投影法を適用して亀裂開口分布を測定した。この結果を図-8に示す。図-8の付図に示すように、区間aa'~cc'は投影領域内にシェブロンノッチが完全に入っていない。そこで測定値の信頼性が低いと考えられる区間aa'~cc'を除外すると、BおよびC点の開口変位 u_B および u_C は比較的滑らかに分布している。したがって、除荷段階の u_B は残留変形に、再載荷段階の u_C は全変形に対応し、弾性変形は $u_C - u_B$ によって評価される。また、 $Y > 46$ mmの範囲で $u_C = u_B$ 、 $Y > 60$ mmで $u_B = 0$ と見なせるので、 $46 \text{ mm} < Y < 60 \text{ mm}$ の区間が破壊プロセスゾーン、 $Y < 46$ mmの区間が開口亀裂であると解釈される。

4. 土質工学における適用例

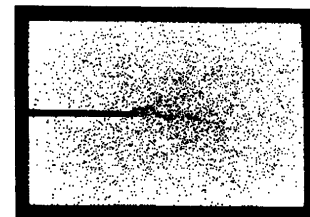
杭基礎先端地盤の破壊現象の解明⁹⁾

ここでは、近年の支持力問題に着目して、破碎性地盤の鉛直支持力メカニズムを解明することを目的とし、模型地盤を用いた杭の鉛直貫入実験を実施し、その時の杭先端地盤状態についてX線CTスキャナーを用いた非破壊検査を行った。

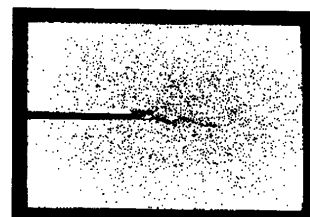
試料には、破碎性材料としてまさ土を用いた。X線CT撮影では、X線ビーム厚を2mmとし、地盤内を走査間隔を1mmとして杭先端から連続撮影している。図-9は、本実験によって得られた荷重-沈下曲線である。荷重ピーク点が現れていないことから、杭先端地盤では進行性破壊が生じていると考えられる。図-10(a), (b)は、正規化沈下量 S/D (S : 沈下量および D : 杭径) = 1.5の時の杭先端から5mmの深さにおける断



(a) 無負荷段階



(b) 除荷段階



(c) 再載荷段階

図-7 各段階の X 線 CT 画像

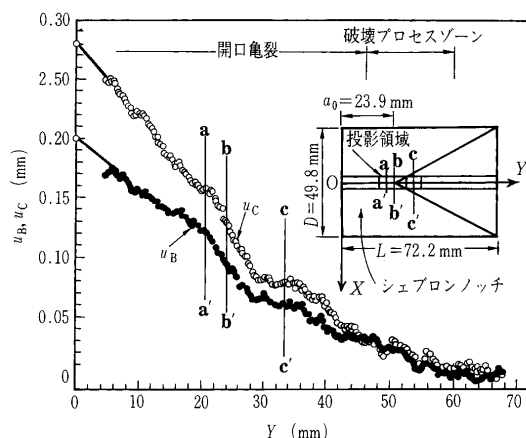


図-8 亀裂開口量分布と標準試験片の断面

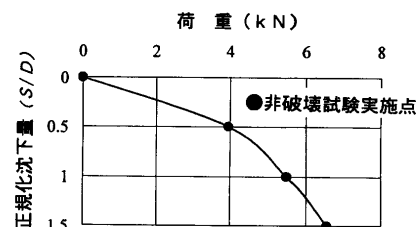


図-9 荷重-沈下量曲線

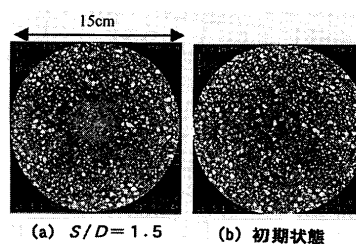


図-10 CT断面画像

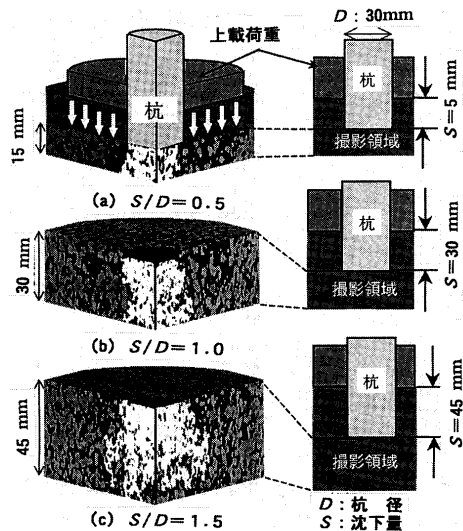


図-11 杭先端付近の三次元密度分布画像

面画像と同位置の初期状態における断面画像である。これらと比較すると、図-10 (b)の初期状態に対して図-10 (a)では画像中央に白色に変化した領域が認められる。これは杭貫入によって高密度な領域が形成されていることを示している。

図-11は、杭先端地盤の二次元断面画像を、コンピュータ上で重ね合わせて再構成し、三つの荷重ステップにおける、三次元画像を1/4切断面について示したものである。画像中の杭先端地盤部の白い領域は、杭貫入によって形成された高密度領域を示している。どのステップにおいても、この高密度領域とその外側の領域との境界には黒色の低密度領域がこれを縁取るように存在していることが明らかとなった。これらは、杭先端付近において杭貫入に伴い三次元的に完全な対称ではないが、有限かつ球根状の領域が形成されていることがわかる。しかし、この領域の形状は杭の沈下とともに変化しており、沈下の増大とともに周辺方向に広がる傾向を示している。

このように、X線CTスキャナーを用いることにより、地盤の内部状況を非破壊かつ定量的に評価可能となり、土質材料における適用性を示唆するものと考えられる。

5. おわりに

地盤工学において、破壊現象の解明やその定量的評価は大きなテーマの一つである。本報文に示したように、X線CTスキャナーによる非破壊検査は、地盤内部の物性や構造の変化を定量的に評価することができるため、これらテーマに十分答えることが可能であると考えられる。現在著者らは、これらの現象を可視化するだけでなく、その定量的評価についてもいくつかの報告を行っている^{10)~13)}。

最後に、これまでの実験はCT室外で実施し、CT撮影するときのみ実験装置をCT室内に移動してこれを実

施している。今後の展望としては、結果の精度向上をめざして、実験自身もCT室内で行えるようにCT装置特有の実験装置の開発が挙げられる。これについては、著者らはすでにCT装置専用の三軸圧縮試験装置を開発しており、模型実験についても同様な開発が現在進行中である。また、最終的には結果の定量的評価を目的としているため、地盤材料特有なCTデータ処理方法やその解析手法の開発についても今後の課題となろう。

謝辞：本研究の実施にあたり、その初期段階から多くの貴重かつ心温まるご助言をいただいた北海道大学大学院工学研究科の金子勝比古先生に対し心からお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西澤 修・稲角忠弘・中野 司：X線CTによる地球科学試料の内部構造分析技術とその応用，地質調査所月報，第46巻，第11号，pp. 565~642, 1995.
- 2) Anderson, S. H. and Hopmans, J. W.: Tomography of Soil-Water-Root Processes, SSSA Special Publication, No. 36, Soil Science Society of America, 1994.
- 3) Desrués, J., Chambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F.: Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studies by computed tomography, Geotechnique, 46, No. 3, pp. 529~546, 1996.
- 4) Tani, K.: X-ray Computed Tomography Technique to Observe Shear Banding in Dense Sands, Deformation and progressive failure in geomechanics, IS Nagoya '97, pp. 315~320, 1997.
- 5) 岩井喜典：CT スキャナ，コロナ社，pp. 1~186, 1979.
- 6) 高木幹雄・下田陽久監修：画像解析ハンドブック，東京大学出版会，1991.
- 7) 椋木俊文：X線CT法を用いた土および地盤の破壊メカニズム解明に関する研究，平成9年度熊本大学工学研究科修士論文，1998.
- 8) 菅原勝彦・小島隆輔・尾原祐三・佐藤 晃・島田英樹：X線CTによる亀裂開口解析，資源と素材，Vol. 114, No. 12, pp. 881~887, 1998.
- 9) 椋木俊文・大谷 順・尾原祐三：X線CT法による杭基礎先端地盤内の粒子挙動評価，破砕性地盤における工学的諸問題に関するシンポジウム論文集，pp. 89~94, 地盤工学会，1999.
- 10) Sugawara, K., Y. Obara, Y. Kaneko, K., Koike, K., Ohmi, M. and Aoi, T.: Visualization of three-dimensional structure of rocks using X-ray CT method, Proc. of the 1st Asian Rock Mechanics Symposium, ARMS '97, pp. 769~774, 1997.
- 11) 菅原勝彦・尾原祐三・青井崇浩・小島隆輔：X線CTによる岩石透水現象の可視化，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 341~346, 1998.
- 12) Otani, J., Mukunoki, T. and Kikuchi, Y.: Evaluation of engineering property of light-weight soil with air foam using X-ray CT scanner, 第11回国際地盤工学会アジア地域会議論文集，ソウル，pp. 57~60, 1999.
- 13) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y.: Application of X-ray CT Method for Characterization of Failure in Soils, Soils and Foundations, JGS (投稿中).

(原稿受理 1999.4.20)