

(70) 地盤物性評価における X 線 C T の利用例

応用地質 (株) 中山栄樹

応用地質 (株) ○ 持田文弘

応用地質 (株) 田中達吉

応用地質 (株) 田中荘一

On application of X-ray CT Technique for Evaluating Properties of Geomaterials

by

Eiki NAKAYAMA, Fumihito MOCHIDA, Tatsukichi TANAKA, Sōichi TANAKA
(OYO CORPORATION, Core Laboratory)

Abstract

X-ray CT (Computer Tomography) technique was applied to examine internal structure of geomaterials and their physical and mechanical properties. Undisturbed samples of various geomaterials, such as rock, clay etc., were used in this study.

As a result, following applications of X-ray CT are clarified.

(1) 3-dimensional information obtained from rearrangement of sectional CT data make possible to clarify geometrical distribution of voids and cracks in geomaterials.

(2) CT values can be related quantitatively with wet density and water content.

(3) Relationships between CT values and unconfined compression strength are clearly separated by classification of geomaterials such as soils, sedimentary rocks and hard rocks.

1. まえがき

X線技術は、模型実験における地中変位測定や、不攪乱試料内の状況観察のための手段として利用されてきた^{1), 2), 3), 5)}。しかし、従来型の単純X線透過写真は、元来、三次元の構成をなしている物体の奥行き情報を消失し、二次元のフィルム上に投影したものである。内部を非破壊で観察できるという大きな利点があるものの、映像は奥行き方向に重複が起こり、三次元的構成が不明確になり詳細な観察や、定量的な評価が不可能であった。

X線CT(computed tomography)装置が開発され、医療の分野で有効に活用されているのは周知のとおりである。最近では、複合材料の物質分布測定や遺伝子工学の分野にも応用されている。X線CTは、X線が物質を透過する場合の吸収量の差をCT値として測定し、数値計算により断面情報や三次元情報として定量的に処理する手法である。

地盤工学においても、地盤材料の内部構造を三次元的に把握することは物理的・力学的性質を考える上で有効な情報となる。

筆者らは、この技術を新しい評価法として応用することを検討している。本文では、種々の地盤材料の供試体についてX線CTで得られる情報を処理し、供試体内部の観察や、CT値と物理的・力学的性質との関係について検討した例を示す。

2. X線CT装置の原理および撮影方法

今回用いたX線CT装置の概要を図2-1に示す。装置は、微小焦点からX線を発生させるX線管と、透過X線量の測定に必要な数のX線検出器を対称的に配置し、これら2つを一体として等角度間隔で360度回転する構造となっている。計測は、X線を連続的に放射した状態で、試料をX線管の回転面に対して垂直に移動させて実施する。計測データは、図2-2のように試料に対して螺旋状の連続的な情報として収集される。このため、従来の、断面毎の計測に比べ空間分解能が向上し、高精度な情報が得られる。

データ処理系統図を図2-3に示す。放射されたX線は、試料を透過後、検出器により電気信号に変換される。このデータは、コンピュータにより放射X線量と透過X線量の関係から三次元マトリックスの各要素のX線吸収係数として解析され、二次元（断面）や三次元（立体像）のデジタル画像に構成される。各要素のCT値は、水のX線吸収係数を0、空気のX線吸収係数を-1000として校正した場合の相対値として表される値である。X線エネルギーは全て同一とし、管電圧120kv、管電流300mAとした。

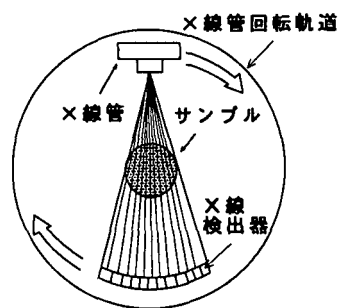


図2-1 X線CT装置の概要

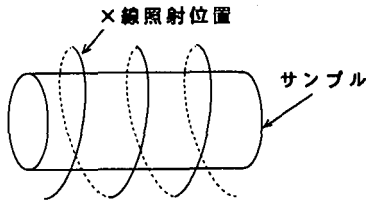


図2-2 試料のX線照射位置図

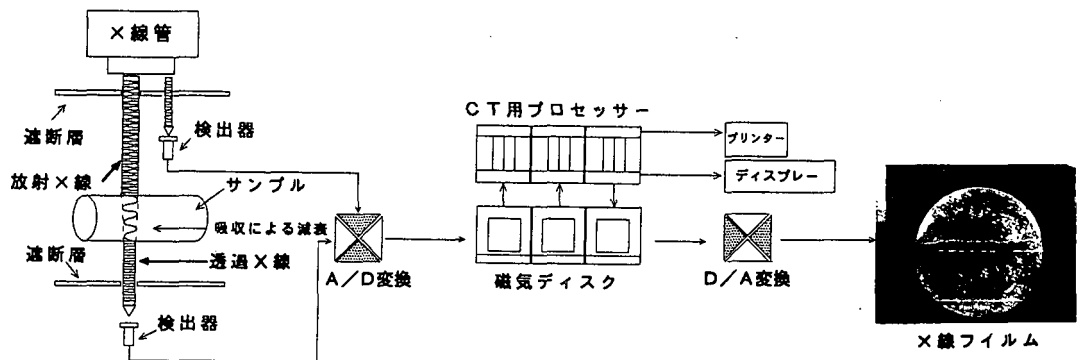


図2-3 X線CT装置のデータ処理系統図

3. X線CTによる画像およびCT値解析結果

本研究では、内部構造や物理的・力学的性質が異なった種々の地盤材料を対象とした。試料の種類およびそれらの基本的性質を表2-1に示す。撮影に用いた試料は直径50mm、高さ100mmの円柱型の供試体である。撮影は、一軸圧縮試験の前・後で実施した。

3-1. CT画像による試料の観察結果

試験前の各試料の代表的なX線CT写真を写真3-1～9に示す。写真は、供試体の中央部を厚さ1mmでスライスした横断面の状況である。写真は、濃度が濃いほどX線吸収係数、即ちCT値が低いことを示す。写真中のグラフは、横軸に位置、縦軸にCT値を示している。また、断面内のCT値と度数の関係を図3-1～9に示す。

表2-1 試料および基本的性質

サンプル名	地質年代	産地	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)
花崗岩	白亜紀	岐阜県	0.21	2.601
頁岩	ジュラ紀	群馬県	0.05	2.730
凝灰岩A	新第三紀中新世	栃木県	4.5	1.760
凝灰岩B	新第三紀中新世	長野県	2.4	1.750
泥岩	新第三紀鮮新世	新潟県	52.8	1.633
洪積粘性土	第四紀洪積世	大阪湾	33.1	1.823
冲積粘性土	第四紀冲積世	東京湾	79.4	1.517
ローム	第四紀冲積世	東京都	37.4	1.689
コンクリート	—	—	1.4	2.404

但し、凝灰岩Aは安山岩質溶結凝灰岩（俗称：大谷石）、凝灰岩Bは安山岩質溶結凝灰岩（俗称：野沢凝灰岩）

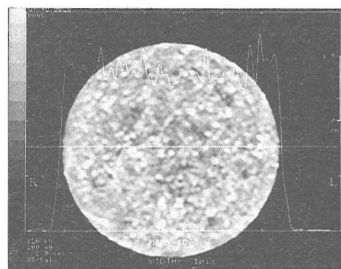


写真3-1 花崗岩のCT写真

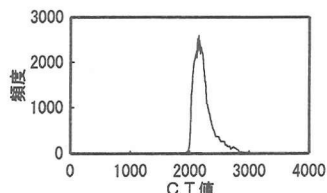


図3-1 花崗岩のCT値頻度分布

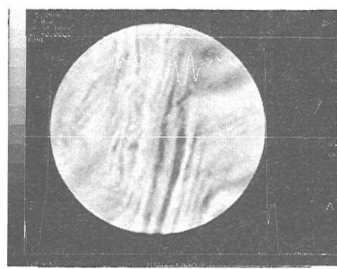


写真3-2 頁岩のCT写真

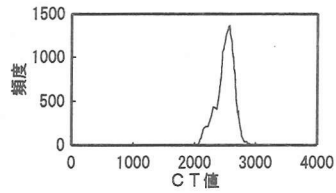


図3-2 頁岩のCT値頻度分布

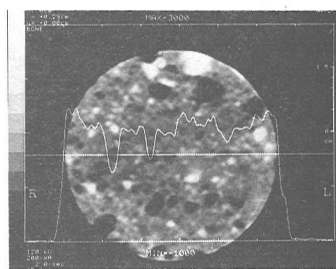


写真3-3 凝灰岩AのCT写真

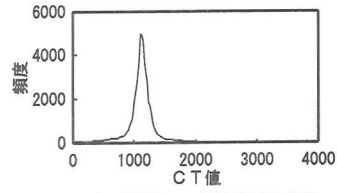


図3-3 凝灰岩AのCT値頻度分布

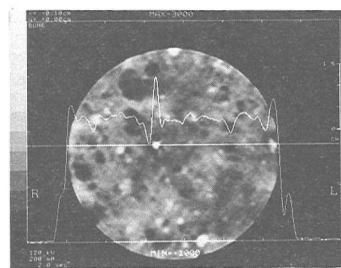


写真3-4 凝灰岩BのCT写真

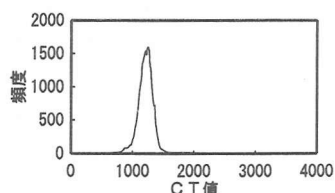


図3-4 凝灰岩BのCT値頻度分布

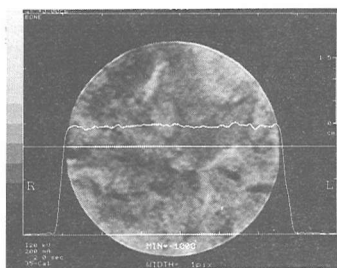


写真3-5 泥岩のCT写真

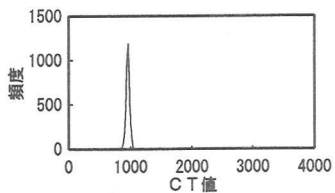


図3-5 泥岩のCT値頻度分布

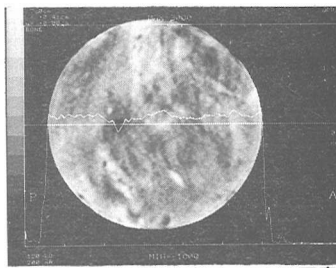


写真3-6 洪積粘性土のCT写真

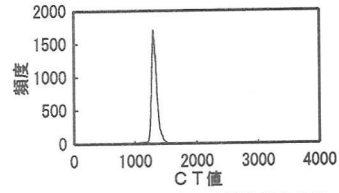


図3-6 洪積粘性土のCT値頻度分布

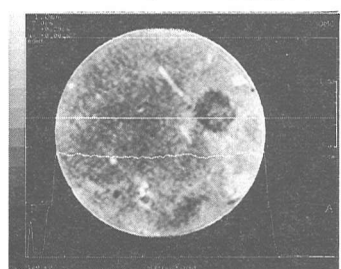


写真3-7 沖積粘性土のCT写真

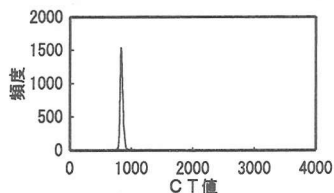


図3-7 沖積粘性土のCT値頻度分布

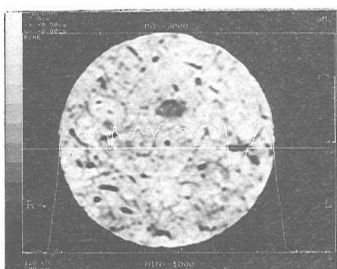


写真3-8 ロームのCT写真

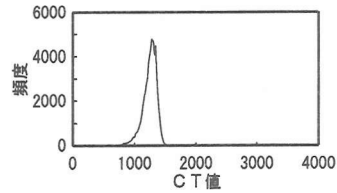


図3-8 ロームのCT値頻度分布

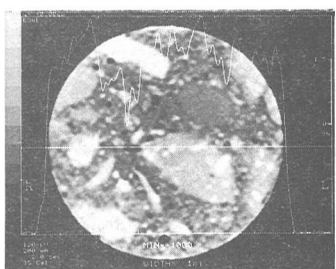


写真3-9 コンクリートのCT写真

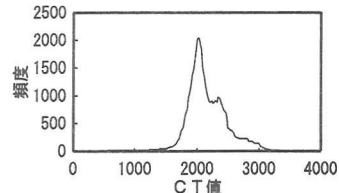
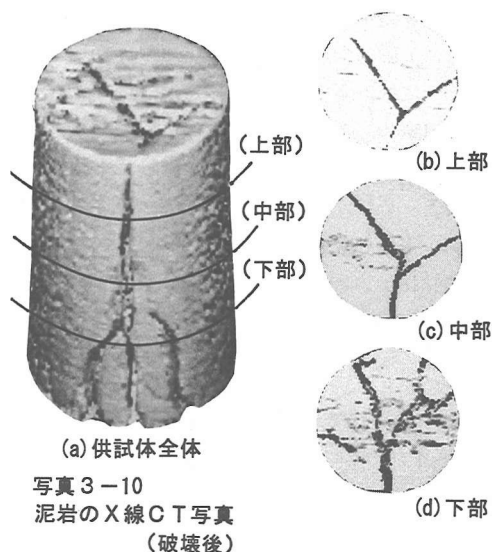


図3-9 コンクリートのCT値頻度分布

各試料の特徴を観察すると、花崗岩の緻密な組織構造、頁岩の発達した葉理面の状況、また、凝灰岩A、Bでは、数多くの大小の空隙により形成される多孔質構造の状況が明瞭に観察できる。泥岩、洪積粘性土、沖積粘性土では、いずれも貝殻や砂と思われる混入物が確認でき、画像濃度分布も近似している。これは、堆積年代は異なるが、試料を構成している鉱物に大差がないことを示唆するものである。ロームでは、小さな空隙の存在が多数確認できる。一般に、不攪乱状態のロームは、海成粘土等に比較すると透水係数ははるかに高いという傾向を示すが、このような空隙が、いわゆる水みちの役割を果たしていることが考えられる。コンクリートは、種々の形状や粒径を持つ骨材の分布状況、混練が不十分なために残存した気泡が明瞭に確認できる。



3-2. CT画像による破壊後試料の観察結果

破壊後の供試体状況の一例として、泥岩試料のX線CT写真を写真3-10に示す。(a)は、三次元で再構成した状況であり、(b)、(c)、(d)は、供試体の上部、中部、下部の横断面をスライスしたものである。また、図3-11、12には写真3-10(a)を図3-10のようにスライスした縦断面のa-a'およびb-b'上のCT値を示している。CT値が急激に低下している位置は、X線CT写真ではクラックとして画像化されている。

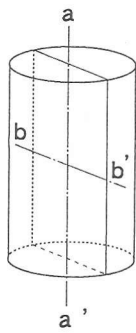


図3-10 泥岩のCT値解析断面(破壊後)

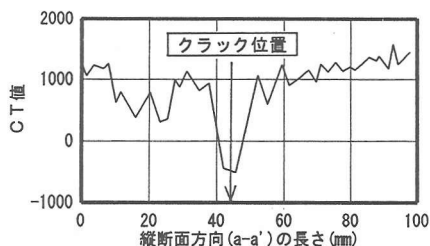


図3-11 (a-a')線上のCT値分布

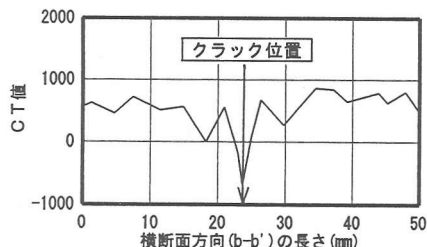


図3-12 (b-b')線上のCT値分布

3-3. CT値と物性値の関係

写真3-1~9に示した断面内の平均CT値とそれぞれの供試体の湿潤密度の関係を図3-13に示す。平均CT値は、湿潤密度の増加と共に直線的に増加する傾向にある。両者の関係は、密度軸の切片が0.94を通る一次式で近似でき、相関係数は、0.98を示す。このことは、平均CT値は供試体の質量と体積から求まる平均密度に相当する情報であることを示している。一方、これに対してCT値のバラツキは、マトリックスを構成する材料の不均質性を表すものと考えられる。そこで、CT値の標準偏差に相当する密度の幅を不均質性のパラメータとして、密度の範囲を試料毎に求めた結果を表3-1に示す。泥岩や粘性土は、平均密度 $\pm 0.02 \sim 0.03 \text{ g/cm}^3$ 程度の密度差を持った材料が主体で構成され、比較的均質な材料の集合体であると推測できる。一方、凝灰岩A、Bやコンクリートでは、空隙や、骨材などの不均質な構造の影響に

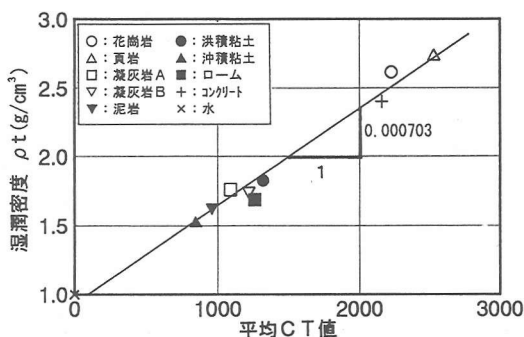


図3-13 平均CT値～湿潤密度 関係図

より、密度差が±0.20～0.23g/cm³と大きい。

平均CT値と含水比の関係を図3-14に示す。平均CT値は、含水比の増加と共に低下する傾向が認められる。ただし、凝灰岩A、Bではその傾向が不明瞭である。これは、X線CT写真でも明らかのように非常に多孔質で保水性が低いこと、また、試料が不飽和であったことが原因と考えられる。

平均CT値と一軸圧縮強さの関係を図3-15に示す。同図によると、第四紀の粘性土、ロームのグループ、凝灰岩、泥岩の第三紀堆積岩のグループ、花崗岩、頁岩等の硬質岩石のグループごとに、異なった平均CT値と強度の関係が読みとれる。

表 3-1 試料の要素密度範囲

サンプル名	要素密度の範囲 (g/cm ³)
花崗岩	2.60 ± 0.11
頁岩	2.73 ± 0.09
凝灰岩 A	1.76 ± 0.20
凝灰岩 B	1.75 ± 0.09
泥岩	1.63 ± 0.02
洪積粘性土	1.82 ± 0.03
沖積粘性土	1.52 ± 0.02
ローム	1.69 ± 0.08
コンクリート	2.40 ± 0.23

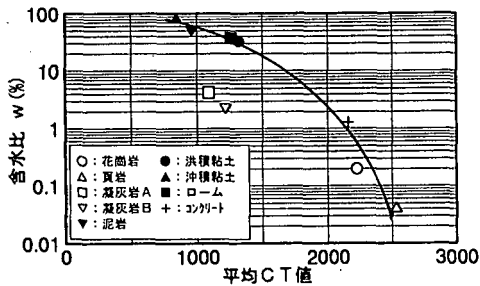


図 3-14 平均CT値～含水比 関係図

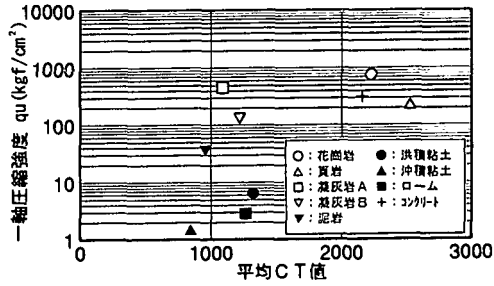


図 3-15 平均CT値～一軸圧縮強度 関係図

4. まとめ

CT情報を三次元で処理することにより、試料内部の空隙、クラック、混入物等の規模や、位置に関する情報を詳細に把握することができた。試料内部の状況は、これまで概念的な推定で論じられることが多かったが、今回の試みでX線CTの有用性を見いだすことができた。

X線CT装置を用いた地盤材料の物性評価法の一例として、X線CT写真による画像観察およびCT値と物理的・力学的性質との関係について検討した。その結果、湿潤密度とCT値の関係には非常によい相関関係があり、CT値をパラメータとして試料内部の密度分布を詳細に把握できる可能性を見いだすことができた。また、含水比とCT値の関係も、比較的よい相関関係にあることが確認できた。ただし、凝灰岩のような多孔質な試料では、CT値との関係がやや不明瞭である。一方、一軸圧縮強さとCT値の関係では、材料特性ごとに分類するとそれぞれ相関性が見られることがわかった。

しかしながら、X線は、同一の密度であっても物質の違いによりX線吸収係数が異なるという性質があるため、さらに詳細な適用性の検討が必要である。今後は、詳細な内部構造の解析や、物性評価における実用的な手法の確立に向け研究を進めたい。

最後に、X線CTの撮影にあたって、社会保険大宮総合病院、ならびに、シーメンス旭メデック（株）の関係者の皆様には、X線CT技術を地盤工学分野に応用することに対して御理解を頂き、多大な御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献：

1) 善 企功・石井一郎：サンプリングチューブ内の土のX線透過試験、第18回土質工学研究発表会、pp97～98、1983
2) 松原幹夫・中山栄樹：X線透過によるサンプリングチューブ内試料の品質評価と密度測定、第19回土質工学研究発表会、pp71～72、1984
3) 石井一郎 他：X線透過試験によるサンプリングチューブ内の土の品質評価（その2）、港湾技研資料、pp3～45、1987
4) 高橋信次・佐久間貞行：図解コンピュータ断層法、株式会社秀潤社、1992
5) 中山栄樹・持田文弘：種々の乱れが変形特性に与える影響の一考察、地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性一試験法・調査法および結果の適用に関する国内シンポジウム、pp157～162、1994