

X線CT法を用いた 気泡混合処理土の物性評価

大谷 順¹ · 椋木俊文² · 菊池喜昭³

¹正会員 Ph.D. 熊本大学大学院助教授 環境共生科学専攻 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

²学生会員 工修 熊本大学大学院自然科学研究科 博士課程後期 (日本学術振興会特別研究員) (同上)

³正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 土質部基礎工研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

気泡混合処理土は、飽和した浚渫粘土にセメントと気泡を混ぜたいわゆる混合土であり、近年その適用が増えている。しかしその物性に関する今日までの研究では、平均的な密度や気泡量の議論がほとんどであり、混合体としての内部物性の把握やその定量的評価に関する研究は少ない。本研究では、非破壊試験法の1つである産業用 X 線 CT スキャナ装置を用いて、気泡混合処理土の内部状況の可視化とその定量的な評価を行うことを目的としている。結論としては、X 線 CT スキャナ装置が地盤工学においても有用であることを示すと共に、気泡混合処理土の内部状況の可視化と物性の内部分布状況を非破壊で評価可能であることを示した。

Key Words: X-ray CT scanner, light-weight soil, visualization, density, image processing analysis, nondestructive test, computed tomography

1. 序 論

軟弱地盤改良工法を大別すると、(1)化学または物理的方法により地盤自身を強くする方法と、(2)軽量材料自身またはこれを地盤中に混入して荷重を軽減する方法に分けられる。後者は前者に比べ比較的近年にその適用が増えた工法であり、その工学的特性については現在も研究段階にあると言える¹⁾。特に近年、港湾施設の開発やその整備事業を対象に、運輸省港湾技術研究所を中心として SGM(Super Geo-Material)と呼ばれる気泡混合処理土が提案され、阪神大震災後の港湾施設の補修や港湾施設の大規模化に伴う整備事業での適用が増えている²⁾。今日までの気泡混合処理土に関する研究は、主として目標強度とそれを満たす配合条件とのバランスを追求したものが多く、混合土としての物性評価や、施工後の変形特性や物性の変化に着目した研究例は少ない³⁾。また SGM の強度や変形パラメータの決定は、室内試験で評価される場合が多いが、破壊現象にはひずみの局所化が支配的であると考えられ、供試体の内部物性の分布状況を把握することの工学的意義は大きい。加えて、これを非破壊で定量的に評価する試みは大変重要であるとする。近年医療分野において、診察技術に革命をもたらした X 線 CT スキャナ (X-ray Computed Tomography Scanner)

が、コンピュータのめざましい進歩とともに工学分野にまで普及しつつある。地盤工学の分野においてもいくつかの研究例 (たとえば中山ら⁴⁾、西澤ら⁵⁾、Desrues ら⁶⁾、および Tani⁷⁾) があるが、これらはすべて医療用の装置を用いており、照射する X 線発生起電力が低いためにその結果の定量的評価は難しいと言える。一方近年、より高エネルギーな X 線を使った高分解能を有する産業用の装置が開発され、詳細な画像とその定量的評価が可能となった。X 線 CT 装置は、デジタルデータを取得可能なことから、コンピュータ上のソフトウェアを用いることにより目的に応じた画像処理が可能となる。また材料内部の構造や形態が 2 次元断面画像、または 3 次元画像やその展開画像として抽出できることが最大の利点である。

本研究では、この産業用 X 線 CT スキャナを用いて、室内で作成された種々の条件下の気泡混合処理土および原位置で打設された同様の気泡混合処理土のコアサンプルを対象として、その内部状況を可視化すると共に、それらを比較検討することにより物性を定量的に評価することを試みるものである。ここで用いた X 線 CT スキャナ装置は、1996 年に熊本大学工学部環境システム工学科の岩盤工学講座において設備された産業用 X 線 CT スキャナ装置 (TOSCANER 23200min 東芝〔株〕) である。本装置を用いた研究例としては菅原ら⁸⁾ による岩盤を対象

としたものや、Otaniら⁹⁾の土質を対象としたものがある。また同様の装置を岩石について適用した例には萩原らの研究¹⁰⁾がある。産業用装置を地盤工学、特に土質材料に用いた研究例は世界でもあまり例がなく、その適用については現在も発展途上にあると言える¹¹⁾。

本文では、まずX線CT法について紹介し、その後に対象とした室内で作成した気泡混合処理土と、原位置で打設された気泡混合処理土地盤よりコアサンプリングされた試料を非破壊検査することにより、内部状況の可視化とその特性の定量的評価を試みる。

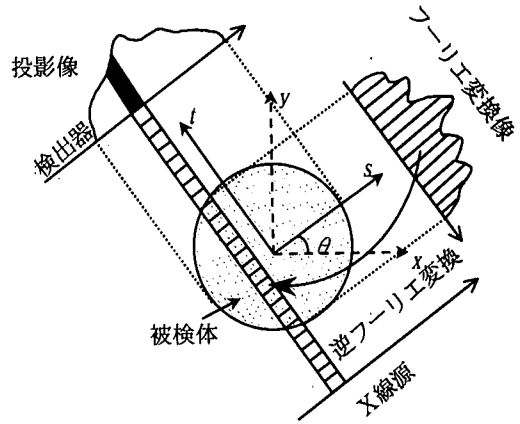


図-1 CT法の原理 (2次元)

2. X線CT法

(1) 概要¹²⁾

「トモグラフィ」という言葉は、1980年代に自然科学を中心に広い分野で使われるようになった言葉であるが、その語源はギリシャ語のτομος (断面) である。CT法は、コンピュータ断層写真法と呼ばれ、「所要の断面を横断する放射線の吸収に関する情報又は放射能分布に関する多くの情報を記憶・蓄積し、コンピュータにより再構成し断面画像を得る手法」と定義される実用化された逆解析手法である。つまり、さまざまな方向から対象領域内の投影データを収集し、得られたデータから対象領域内部の像を再構成する方法である。このような逆解析手法として、今日医学分野においてX線診断技術に大きな進歩をもたらしたのがX線CT法である。これは、X線を被検体に照射し、X線エネルギーが被検体の密度に比例して吸収される時の吸収率の空間分布を求めるものである。この基本原理の数学的証明は、1917年数学者J.Radonによって発表されたが、真に実用化されるためにはコンピュータの普及を待たなければならなかった。今日用いられているCT装置は、1979年にHounsfieldらがノーベル賞を受賞した実用化された方法がその基礎となっている。

(2) CTアルゴリズム¹³⁾

X線を照射することによって得られるX線投影像が「ラドン変換」と呼ばれるX線吸収係数のX線伝播方向に関する線積分の形で表現される。これを1次元フーリエ変換することによってフーリエ変換像を得る。この時、「フーリエ切断面の定理」によって1次元のフーリエ変換が2次元のフーリエ変換式で表されることから、これを逆変換することによって、最終目標である各断面におけるX線吸収係数の空間分布が求まる。この原理を示したものが図-1である。また通常、重積分の変数変換定理による「フィルタ補正逆投影法」を導入することにより高周波数を強調しかつ演算時間を短縮するアルゴリ

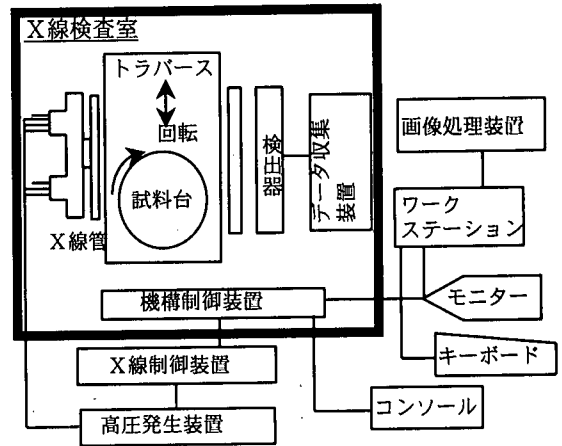


図-2 産業用X線CTスキャナ装置のシステム構成

ズムが組み込まれている。この理論背景の詳細については文献13)を参照されたい。

(3) 産業用X線CTスキャナ

図-2は今回使用した産業用X線CTスキャナ装置の概略図であり、表-1は本装置の仕様である。ここで注目したいのは、医療用装置のX線を照射させる起電圧は140kVに対して産業用装置は300kVとかなり大きいことである。本装置の空間分解能は表-1に示すとおり、0.2mmである。また被検体の最大寸法は直径400mm、高さ600mmである。

本装置では、そのX線強度のために試験は鉛で完全に遮蔽された検査室内で実施され、試料台に被検体をセットする以外のオペレーションはすべてX線検査室外から行う。X線の照射が開始すると、図-2に示す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、ある一方向からの投影データを得る。試料台が端点に到達すると、X線照射角と同じ30度だけ試料台は回転し、続いて並進移動

する。こうすることで新たな方向から X 線が照射され、新たな投影データが蓄積されることになる。この操作を 6 回繰り返すことで、180 度から X 線を照射されたことになる。さらに、ここで得られた情報を 180 度回転させ、合計 12 方向から撮影したとみなし、それら全データを用いて画像が再構成される。検出された X 線は最終的にデジタル量に変換され、ワークステーションを用いて画像再構成のための数値処理が行われる。

(4) CT 値

X 線検出器の出力は、A/D(Analog/Digital)変換され、断面内の画素(1pixel=0.293×0.293mm²)ごとに X 線の吸収係数として計算される。このとき X 線の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る。

$$CT \text{ 値} = \frac{\mu_i - \mu_w}{\mu_w} K \quad (1)$$

ここで、 μ_i は求める画素における X 線吸収係数、 μ_w は水の X 線吸収係数、 K は比例定数である。一般に X 線吸収係数は物体の密度に比例することから、ここで定義される CT 値も密度に比例するとされている。また、X 線走査厚が 1mm の場合、CT 値とは高さ 1mm、正方形底面の一边を 0.293mm とする直方体の密度を表す。種々の材料について密度との関係を示したものが図-3(a)である。また、本研究で対象とした気泡混合処理土について示したものが図-3(b)である。これより、気泡混合処理土についても CT 値と密度が比例関係にあることが認められる。ちなみに、式(1)において $\mu_i = \mu_w$ とすると水の CT 値が 0 であることがわかる。さらに今回用いた装置では、 $K=1000$ と設定しており、空気の水の X 線吸収係数に比べて非常に小さい($\mu_a \approx 0$)ことから、空気の CT 値は-1000であることがわかる。CT 画像は、CT 値が白黒の 256 階調濃淡レベルに置き換えられて表示され、CT 値が高い領域(高密度領域)は白く、低い領域(低密度領域)は黒く表示される。

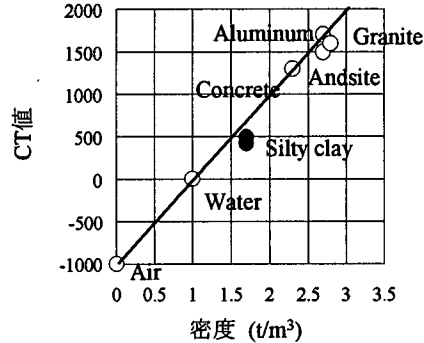
試験結果は、まず供試体の各断面画像が得られ、これらを重ね合わせるにより 3 次元画像およびその展開画像が再構成されることになる。また本研究では CT 値の空間分布を直接利用することにより気泡混合処理土の地盤物性、特に密度分布と空隙率分布の定量的評価を試みる。

3. 画像処理方法^{14), 15)}

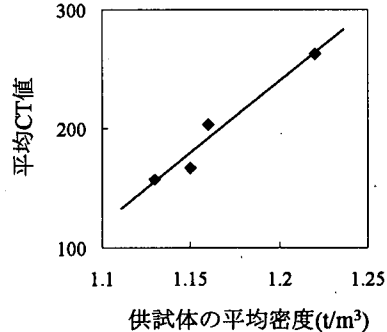
画像処理の目的は、画像のもつ情報を見やすくしたり、画像をある標準的な形に変換することにより、特徴抽出

表-1 産業用 X 線 CT スキャナ装置の仕様

| | |
|-----------|------------------------------------|
| 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 |



(a) 各種材料の密度とCT値の関係



(b) SGMの供試体密度とCT値の関係

図-3 CT値と密度の相関図

や認識を容易に行なえるようにすることである。本研究では、供試体内部の特徴を可視化するためや、空隙の分布状況を定量的に把握する目的で、画像の濃度変換の一手法である「2 値化手法」を用いた。これは連続したデジタルデータを用いて、対象材料の特徴を表す境界値(これをしきい値と呼ぶ)を決定することにより、全データをいわゆる 2 領域化することである。この方法を本研究で得られた CT 画像について示したものが図-4 である。ここでは原画像(図-4(a))としての 256 階調の画像を、気泡と粘土+セメントに分けるしきい値を導入することにより図-4(b)に示す 2 値化画像を得る。これは黒色と白色の 2 階調の画像であり、それぞれの部分の寸法や形状を求めることにより気泡量やその空間分布を求めることが可能となる。この方法は、得られた画像の中から処

表-2 供試体の構成材料および配合条件

| (a) 供試体構成材料の物性 | | |
|----------------|-------------|-------------|
| | 室内供試体 | コアサンプル |
| 母材 | 川崎粘土 | 有明粘土 |
| セメント種類 | 高炉B種セメント | 高炉B種セメント |
| 起泡剤 | ファインフォーム606 | ファインフォーム707 |

| (b) 1m ³ あたりの配合条件 | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| | 室内供試体 | | コアサンプル | |
| | 質量(kg) | 容積(L) | 質量(kg) | 容積(L) |
| 土 | 441.5 | 163.5 | 367.0 | 136.0 |
| 水 | 574.0 | 574.0 | 624.0 | 606.0 |
| セメント | 75.0 | 24.6 | 100.0 | 32.8 |
| 気泡 | 9.5 | 238.0 | 9.3 | 225.0 |
| 合計 | 1100.0 | 1000.1 | 1100.3 | 999.8 |

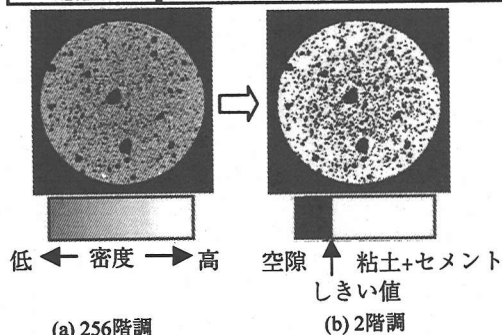


図-4 2値化処理の説明図

理の対象を可視化して抽出する場合やその値を用いて定量的に評価する場合に有効である。また、2値化手法において最も重要なことはしきい値の決定方法である。本研究で用いた方法については第6章で述べる。

4. 供試体および非破壊試験

本研究で用いた室内で作成した気泡混合処理土と、試験施工現場でコアサンプリングされた気泡混合処理土について紹介すると共に、X線CT装置による非破壊試験方法について述べる。

(1) 気泡混合処理土

室内で作成した供試体(以下室内供試体)については、運輸省港湾技術研究所で作成された、実際の施工状況(水压や土被り圧)を考慮して異なる圧力で水中養生を行なったものを対象としている。また、コアサンプルについては施工深度の異なる2種類の供試体を対象とした。使用した試料の構成材料及びその配合条件を表-2に示す。室内供試体の母材は川崎粘土でありコアサンプルの母材は有明粘土である。固化材にはそれぞれ高炉B種セメント、起泡剤には界面活性剤系を用いている。目標密度への調整は気泡混入量をコントロールすることによって行なわれた。室内供試体については、水中で圧力を受けない状態で養生して作成した供試体(養生圧=0.0kPaで28日間養生)と、原位置において海水面下10mで水中施工されることを仮定した水中養生(養生圧力=98.0kPaで28日間養生)された供試体を対象とした。また比較検討を目的として、気泡を混入させない無気泡混合処理土も試

表-3 サンプルの名称

| 室内供試体 | 無気泡混合処理土 | | サンプルA |
|--------|------------|----------|-------|
| | 養生圧0.0kPa | | サンプルB |
| | 養生圧98.0kPa | | サンプルC |
| コアサンプル | サンプリング地点 | 0.9~1.0m | サンプルD |
| | サンプリング地点 | 8.8~8.9m | サンプルE |

験対象とした。コアサンプルは、熊本港で実施された試験施工現場においてサンプリングされたものであり、今回対象としたものは、海水面を地表面に持つ深さ0.9~1.0m地点と深さ8.8~8.9m地点の2箇所においてサンプリングされたものである。供試体寸法は、すべて直径が50mm、高さが100mmである。これらの試料をまとめたものが表-3である。非破壊試験はこれら5つの試料について実施した。

(2) 非破壊試験

X線CT装置を用いた非破壊試験では、X線ビーム厚さを2mm、走査間隔を1mmとした。これは各供試体高さにおいて2度スキャンすることになり、より精度の高い結果を得るためである。試験は供試体下端面から連続的に行った。最終的には厚さ1mmの断面画像が100枚得られることになる。また、解像度については一辺が0.293mmの画素が正方配列に512×512個並んでいることになり、上述したCT値が各画素ごとに求まることになる。

5. 内部の可視化

写真-1と写真-2は、非破壊試験終了後のサンプルB(室内供試体)とサンプルD(コアサンプル)の内部について実体顕微鏡を用いて撮影したものである。これらと比較すると、室内供試体内部の気泡は隣接して分布しており、室内供試体とコアサンプルの内部状況はかなり異なることがわかる。これらのことを踏まえ、気泡混合処理土内部の可視化を目的とし、非破壊試験より得られる供試体内の水平断面画像、それらを合成して再構成された鉛直断面画像および3次元画像やその生データであるCT値分布について議論する。

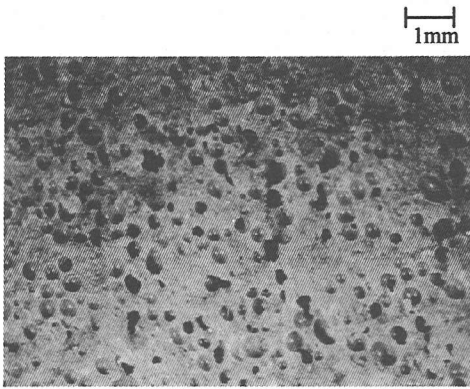


写真-1 サンプルB断面

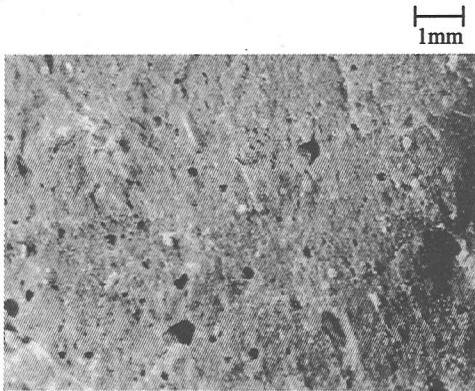
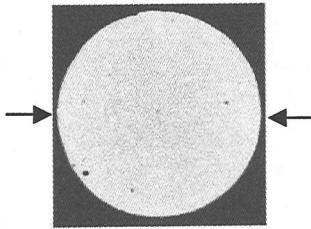
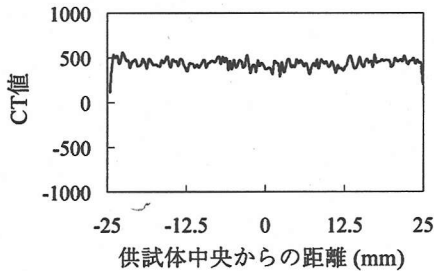


写真-2 サンプルD断面



(a) 水平断面画像

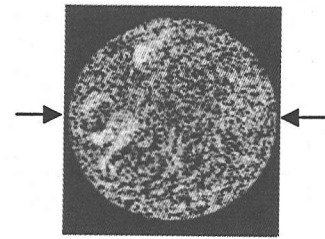


(b) CT値分布

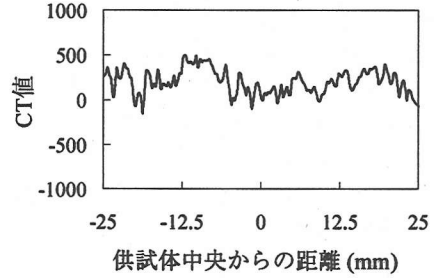
図-5 無気泡混合処理土 (サンプルA)

(1) 断面画像とCT 値分布

図-5は、サンプルAの中央高さ(下端より50mm)における断面画像(図-5(a))、およびその図中の矢印で示した直径を含む断面のCT値分布(図-5(b))であ

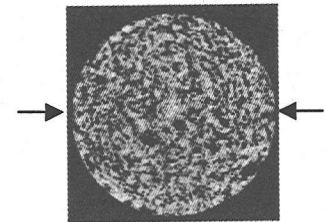


(a) 水平断面画像

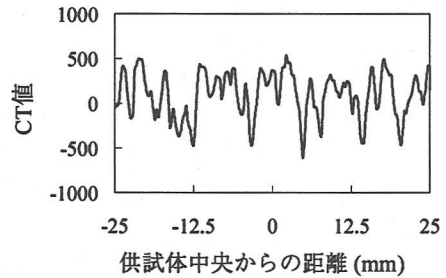


(b) CT値分布

図-6 養生圧 0.0kPa (サンプルB)



(a) 水平断面画像



(b) CT値分布

図-7 養生圧98.0kPa (サンプルC)

る。図-6および図-7は、気泡混合処理土の室内供試体(サンプルB及びサンプルC)について同様の結果を示したものである。まず、気泡を含まないサンプルAと気泡混合処理土のサンプルBおよびCを比較すると、図-5(a)と図-6(a)および図-7(a)との画像の違いは明らかであり、気泡を含むことにより供試体内部の密度はかなりばらつくことがその画像の濃淡レベルの範囲で容易に理解される。これらは図-5(b)と図-6(b)および図-7(b)におけるCT値分布を比較しても一目瞭然であり、無気泡混合土の場合はCT値がほぼ500付近で比較

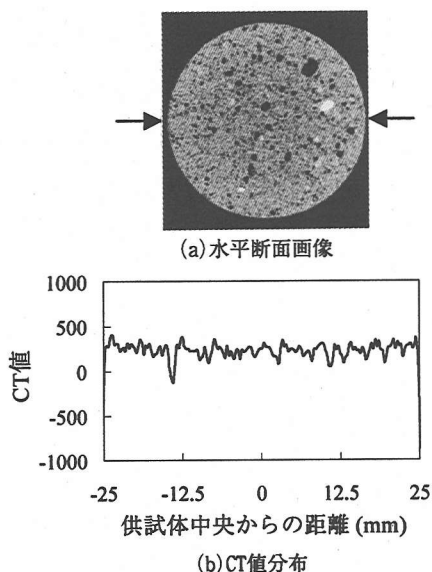


図-8 現場供試体 (サンプルD)

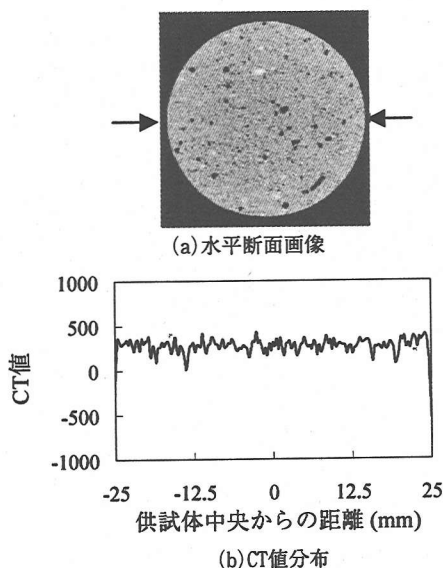


図-9 現場供試体 (サンプルE)

的均質に分布しているのに対して、図-6 (b)で0から500、また図-7 (b)で-500から500とかなり広く分布しており、気泡の影響により密度の不均一性が現れていることがわかる。またサンプルBの結果(図-6)とサンプルC(図-7)の結果を比較すると、サンプルCの方が密度分布の範囲が大きいことがわかる。この結果より、養生圧力が作用すると供試体の密度がばらつくことが言及されるが、供試体ごとのバラツキの影響もあると考えられる。よってこの影響についてはもう少し多くの供試体について検討する必要がある。

原位置でサンプリングされた試料(サンプルDおよびE)について図-6及び図-7と同様の結果を示したものが図-8及び図-9である。これらを室内供試体の結果と比較すると、サンプルD及びEいずれの供試体も全体的に明度が高い(密度が高い)ことがわかる。これについて、コアサンプルは打設直後から高い水圧が作用した状態で固化することにより、必ずしも室内供試体の作成方法と同じ条件であるとは言えないことが原因として考えられる。また、示した画像には明らかに空隙と判断できる比較的大きな領域も観察される。この大きな空隙の存在する原因としては、その位置に作用している水圧よりも高い圧力で試料がポンプ圧送されるため高い圧力によって気泡同士が結合したことや、施工中に新たに空隙が発生したことによると考えられる。

図-10は、それぞれの供試体について全断面画像100枚を重ね合わせて3次元画像を作成した後、直径を含む一鉛直断面画像をすべての供試体について示したものである。図-10(a)はサンプルB、また図-10(b)はサ

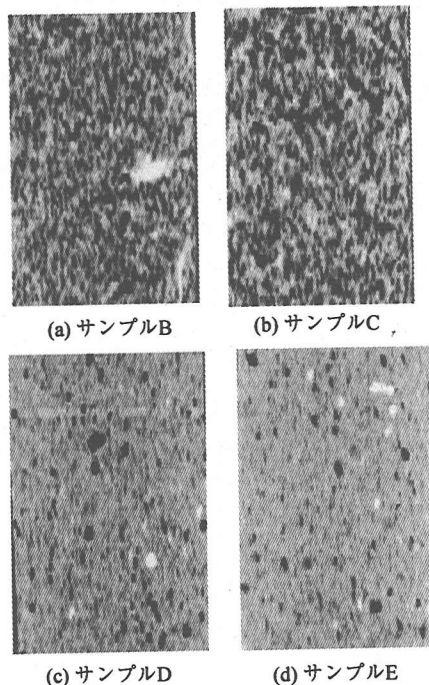
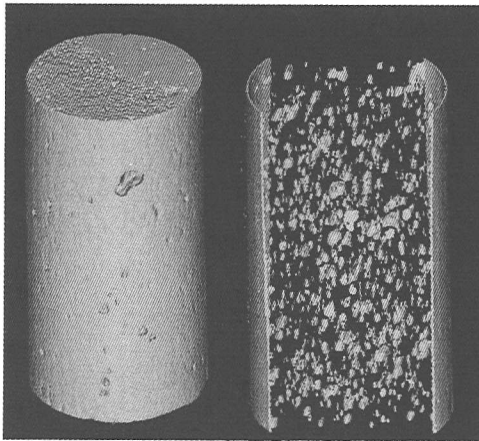


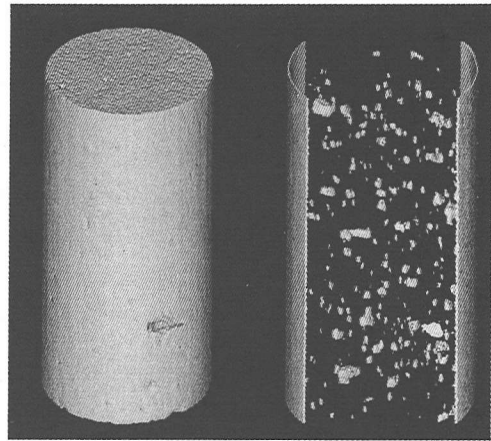
図-10 鉛直断面画像

ンプルCの結果である。また図-10(c)はサンプルD、図-10(d)はサンプルEでありコアサンプルの結果を示している。共に純黒色の部分は気泡を示し、純白色の部分は密度がかなり大きい部分(たとえば貝殻や大きな石)であると考えられる。全体的に見て、室内供試体はコアサンプルと比較して低密度な領域が多く存在してい



(a) 外部画像 (b) 内部画像および空隙形状

図-11 3次元画像 (サンプルD)



(a) 外部画像 (b) 内部画像および空隙形状

図-12 3次元画像 (サンプルE)

ることがわかる。またコアサンプルではこれらが独立に形成されているのに対し、室内供試体では比較的大きな空隙が隣接して分布するため、CT画像上では細長い領域として評価され、結果として黒色の部分が多く存在するように見える。以上より、その内部状況は現場供試体と室内供試体とは明らかに異なり、現場の施工方法と室内での作成方法が異なることを示唆するものである。

(2) 気泡の3次元評価

得られた2次元CT画像をコンピュータ上で重ね合わせることで3次元画像を再構成することが可能となる。また、第3章で述べた2値化手法を用いて、目的に応じたしきい値を決定してやることにより供試体内部の特異な領域を抽出することができる。ここでは、供試体内部の特に気泡を多く含むと考えられる領域を抽出した。

図-11および図-12は、一例としてサンプルDとサンプルEの3次元再構成画像と、内部の気泡を多く含む領域の分布状況を3次元的に抽出した画像である。ここではCT値が0以下すなわち水より密度の小さい部分を純白色で表示している。これらの低密度領域は、それぞれ供試体内では比較的均質に分布しているが、サンプルEよりもサンプルDの方が空隙の占める割合が明らかに多いことがわかる。このことから水圧および土被り圧により消泡が起こったことが容易に確認される。

6. 内部物性の定量的評価

(1) 評価方法

本論文では、内部物性として土中の密度分布と空隙率分布を取り上げる。

a) 密度分布

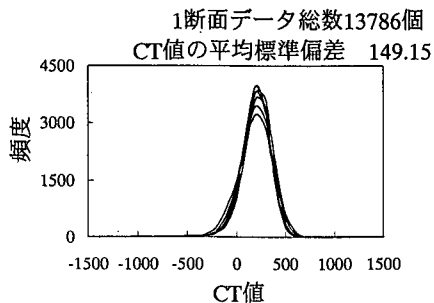
図-13は、4つの試料(サンプルB, サンプルC, サンプルD およびサンプルE)について、一断面内におけるCT値のヒストグラムを高さ1cm間隔の9断面について示したものである。これらの結果より、モード値の頻度は異なるものの、各断面におけるCT値の分布状況は全断面についてあまり変化がないことがわかる。これと図-3(b)で示した密度とCT値の関係から、各サンプルの平均CT値と密度の関係は各断面におけるそれらの関係に比例すると考えられ、次式より各断面の平均密度 ρ_t を求めることができる。

$$\rho_t = (CT_t / CT_{av}) \rho_{av} \quad (2)$$

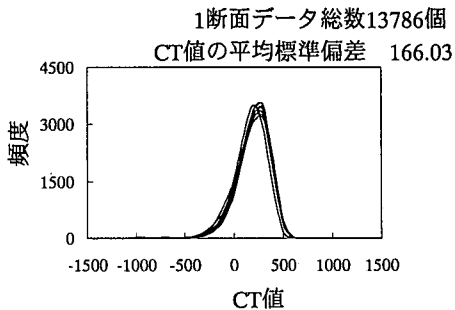
ここで、 CT_t : 各断面における平均CT値 CT_{av} : 供試体全体の平均CT値 ρ_{av} : 供試体全体の平均湿潤密度である。

b) 空隙率分布

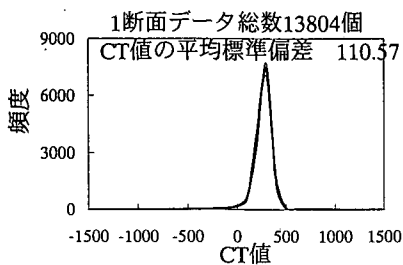
土中に存在する空隙の定量的評価については、前に述べた2値化手法を用いて、気泡と土+セメントとのしきい値を決定することにより行う。本論文では、土被り圧や養生圧による供試体としての平均密度の増加がすべて気泡の減少量によるものと仮定する。まず表-2(b)で示した配合条件において、この気泡の減少量を考慮した供試体作成後およびサンプリング時の気泡混入率を求める。続いてCT値のしきい値を任意に設定し、これを用いて各断面画像における気泡混入率を求め、全断面における平均値が求めた供試体の気泡混入率に等しければそのしきい値が求める値となる。そうでなければ新たなしきい値を設定して同様の計算を繰り返し実行する。この繰り返し計算により気泡の減少量を考慮した修正気泡混入率に



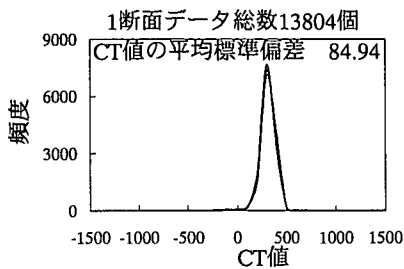
(a) サンプルBのヒストグラム



(b) サンプルCのヒストグラム



(c) サンプルDのヒストグラム



(d) サンプルEのヒストグラム

図-13 各断面のCT値ヒストグラム

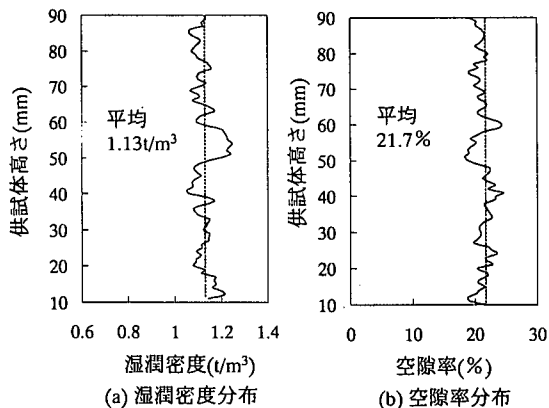


図-14 湿潤密度分布と空隙率分布 (サンプルB)

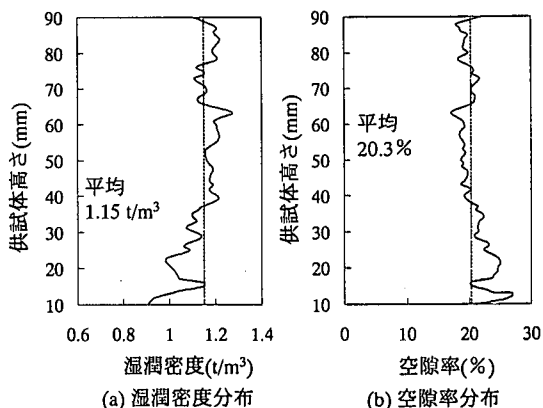


図-15 湿潤密度分布と空隙率分布 (サンプルC)

合ったしきい値を決定し、その時の各断面での気泡混入率により供試体内の空隙率分布が求まることになる。ここで注意したいのは、事前の混合時には加えた気泡量のみでこの気泡混入率が決まっていたが、供試体作成後またはサンプル後の試料では、試料作成時および養生期間に発生した空隙もこの空隙率に含まれていることである。

(2) 室内供試体

図-14および図-15は、室内供試体(サンプルBおよびサンプルC)について供試体内の密度分布(図(a))および空隙率分布(図(b))を示したものである。これらの図においては作成時のキャッピングの影響を考慮し、両端面から10mmの部分を除いている。まずそれぞれの

密度分布について比較すると、最終的な目標平均密度が 1.1 t/m^3 であるのに対して、それぞれの平均湿潤密度は養生圧が 0.0 kPa の供試体で 1.13 t/m^3 、および養生圧が 98.0 kPa の供試体で 1.15 t/m^3 となっている。設計では目標密度の許容誤差範囲は $\pm 0.03 \text{ t/m}^3$ とされているが、これらはある程度目標値に近い値であると言える。しかし、図-14(a)および図-15(a)の分布状況を見ると各深さでの密度はこの誤差範囲を大きく超えているところもある。よって室内供試体では平均的な密度については目標に近い値が得られている反面、その内部では目標密度の許容範囲を超えているところもあることが、X線CT装置を用いることにより非破壊で評価可能となる。

図-14(b)および図-15(b)は、サンプルBおよび

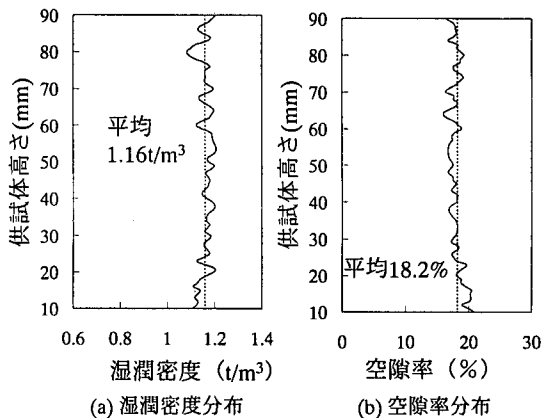


図-16 湿潤密度分布と空隙率分布(サンプルD)

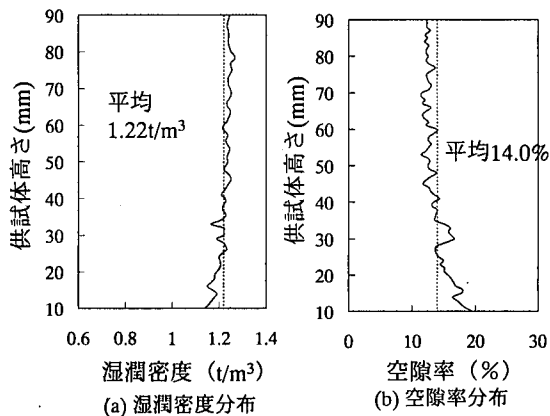


図-17 湿潤密度分布と空隙率分布(サンプルE)

Cの空隙率分布である。供試体としての平均空隙率は養生圧の影響により若干ではあるが小さくなっている。これが密度の変化量に寄与していると考えられる。

(3) コアサンプル

図-16および図-17は、原位置で採取したコアサンプルについての密度分布および空隙率分布を示している。図-16が浅い位置でサンプリングされたサンプルDであり、図-17が比較的深い位置でサンプリングされたサンプルEの結果である。供試体としての平均密度は、いずれのサンプルにおいても配合条件で設定された目標密度よりも増加しており、それぞれ湿潤密度で 1.16 t/m^3 と 1.22 t/m^3 であった。よって何らかの影響で気泡が減少した可能性を示唆していると言える。図-16(a)および図-17(a)は、それぞれの供試体での湿潤密度分布を示したものである。ここでは供試体としての平均密度に対しある範囲のばらつきを示すものの、図-14(a)および図-15(a)の室内供試体と比較するとその範囲は小さい。よって室内供試体よりも内部密度分布は均質であると言える。

図-16(b)および図-17(b)は、それぞれサンプルDおよびEの空隙率分布である。これらより、どちらの深さにおいても空隙率分布は平均値を中心に適度なばらつきがあり、このばらつきと図-16(a)および図-17(a)で示す密度分布はよく対応していることから、供試体の密度増加は気泡の消泡によるものであるという仮定が妥当であることを示唆している。

7. 結論

本論文は、産業用 X 線 CT スキャナ装置を用いて気泡混合処理土の地盤物性について、その可視化及び定量的

評価について試みたものである。本論文で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 産業用 X 線 CT 装置を用いることにより、室内で作成した気泡混合処理土と試験施工現場でサンプリングした気泡混合処理土について、その内部状況を非破壊で可視化することが可能となった。その結果、室内で作成された気泡混合処理土と原位置で施工された気泡混合処理土ではその内部状況は大きく異なることがわかった。
- (2) 各断面画像の密度に関する統計的性質を明らかにすることにより、密度分布に関する仮定を導入し、これを用いて気泡混合処理土内部の密度分布を定量的に評価することを試みた。
- (3) 気泡と土+セメントを分けるしきい値を決定する方法を提案すると共に、これを画像解析手法の一つである 2 値化手法に用いることにより、気泡混合処理土中の空隙率分布を定量的に評価することを試みた。
- (4) 上記 (1)、(2) および (3) より、室内供試体と原位置からのコアサンプルではその物性が大きく異なることが明らかとなった。これは、原位置での施工や養生条件が室内において十分に反映されていない可能性があることを示唆していると言える。

以上より、産業用 X 線 CT スキャナの地盤工学への適用の有用性を示すと共に、気泡混合処理土のようないくつかの材料が混合されて作成される材料の物性を非破壊かつ定量的に評価するという全く新しい手法の提案を行った。今後の課題としては、本論文で得られた知見をより多くのサンプルについて検証すること、力学特性としての一軸圧縮過程における土内部の物性変化について検討することである。

謝 辞：気泡混合処理土のコアサンプルを提供いただいた運輸省第四港湾建設局に対し厚くお礼申し上げます。また本研究で用いた X 線 CT スキャナは、熊本大学工学部環境システム工学科岩盤工学研究室が所有するものである。本研究を進めるに当たり、装置の使用のみならず多大なご指導を賜りました菅原勝彦教授、尾原祐三教授に心から厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 社団法人 土質工学会：小特集 軽量盛土，土と基礎，Ser.373, No.2, Vol.37, 1989.
- 2) 土田孝，笠井寿太郎，水上純一，横山裕司，槌田和徳：軽量混合処理土に及ぼす養生条件の影響，運輸省港湾技研研究所港湾技研資料 No.834, 1996.
- 3) 軽量地盤材料の物性評価に関する委員会，：軽量地盤材料の物性と適用の現状，社団法人 地盤工学会，1998，7月。
- 4) 中山栄樹，持田文弘，田中達吉，田中壮一：地盤物性評価における X 線 CT の使用例，第 26 回岩盤力学シンポジウム，土木学会，pp.336-340, 1995.
- 5) 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.
- 6) Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M. & Mazerolle, F. : Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, *Geotechnique* 46, No.3, pp.529-546, 1996.
- 7) Tani, K. : X-ray computed tomography technique to observe shear banding in dense sands, *Proceeding of Int. Symposium on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*(IS Nagoya'97), pp.315-320, 1997.
- 8) 菅原勝彦，小島隆輔，尾原祐三，佐藤晃，島田栄樹：X 線 CT による亀裂開口解析”，*資源と素材*，Vol.114, pp.881-887, 1998.
- 9) Otani, J., Mukunoki, T., and Obara, Y. : APPLICATION OF X-RAY CT METHOD FOR CHARACTERIZATION OF FAILURE IN SOILS, *Soil and Foundations, the Japanese Geotechnical Society*, Vol.40, No.2, 2000 (掲載決定).
- 10) 萩原利幸，難波隆夫：X 線 CT スキャナーによるフラクチャーコアの分布及び流体挙動の数値モデル化，地下き裂のキャラクタリゼーションワークショップ論文集，資源・素材学会，pp.30-34, 1990.
- 11) Soil Science Society of America : Tomography of Soil-Water-Root Processes SSSA Special Publication no.36, 1994.
- 12) 岩井喜典：CT スキャナ，コロナ社，pp.1-186, 1979.
- 13) Avinash, C. K. and Malcom, S. : Principle of Computerized Tomographic Imaging, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, Published under the sponsorship of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1987.
- 14) 監修 高木幹雄，下田陽久：画像解析ハンドブック，財団法人 東京大学出版会 1991.
- 15) 長尾真：デジタル画像処理，近代科学社，1978.

(1999. 11. 1 受付)

EVALUATION OF PHYSICAL PROPERTY OF LIGHT-WEIGHT SOIL WITH AIR FOAM USING X-RAY CT METHOD

Jun OTANI, Toshifumi MUKUNOKI and Yoshiaki KIKUCHI

The objective of this paper is to investigate the physical property of light-weight soil made of dredged slurry mixed with air foam and cement using X-ray CT method. In this study, not only the specimen made in laboratory but also the one sampled at the in-situ construction site were used and the property in the soil was visualized and the distributions of the density and air porosity were evaluated quantitatively using the results of CT scanning. Here, the method of image processing analysis was also used for this evaluation study. Based on the results obtained in this study, it is concluded that the X-ray CT method is a powerful tool even for geotechnical engineering and this makes not only the visualization but also the quantitative discussion possible for the light-weight soil with air foam.