

X 線 CT スキャナを用いた一軸圧縮下における気泡混合処理土の破壊現象解明

Characterization of failure in light-weight soil with air foam under unconfined compression using X-ray CT scanner

大谷 順*・棕木俊文**・永留 健***・菊池喜昭****

Jun OTANI, Toshifumi MUKUNOKI, Takeshi NAGATOME and Yoshiaki KIKUCHI

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

** 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)

*** 正会員 工修 東亜建設工業株式会社名古屋支店 (元熊本大学大学院学生) (〒450-0002 名古屋市中村区名駅南 4-10-27)

**** 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)

The objective of this paper is to characterize the failure in light-weight soil with air foam under unconfined compression using industrial X-ray CT scanner. In this study, a series of unconfined compression tests was conducted for both specimens made in laboratory and sampled at in-situ construction site. And then, the nondestructive testing was also examined under the process of unconfined compression for all the specimens. Here, image processing analyses in order to obtain the distribution of the density in the soil were conducted. According to those results, the change of soil property under unconfined compression was evaluated and it was also convinced that the industrial X-ray CT scanner may be a powerful tool in geotechnical engineering.

Key Words: *Progressive failure, X-ray CT scanner, light-weight soil, unconfined compression*

1. 序 論

近年、地盤の破壊現象は、荷重に伴い変形の局所化が進み、その進行と共にせん断帯が発達していく現象であると考えられつつある。また今日までの実験的研究においては、供試体や模型地盤条件が平面ひずみであることを前提に、載荷に伴う地盤の挙動を側面より直接的に観察したもののがほとんどである¹⁾。しかし、実地盤の挙動は三次元下であり、厳密な意味での破壊現象の把握には至っていないと言える。これについて、近年地盤工学の分野においても、X 線 CT スキャナを用いて地盤内部の挙動を三次元的に評価する研究が行われつつある。例えば、Desrues et al.²⁾ や Tani³⁾ は、医療用 X 線 CT スキャナを用いて、砂質系材料を対象として地盤内部における変形の局所化や破壊現象を定性的に評価している。また Otani et al.⁴⁾ は、産業用 X 線 CT スキャナを用いて、一軸圧縮下における過圧密粘土供試体内部の破壊状況を可視化することを試みている。

一方、今日我が国では、建設発生土の処理問題が浮上しており、これらを積極的に利用でき、経済的かつ施工性に優れた地盤材料の開発が進められている。運輸省港湾技術研究所を中心に開発された SGM (Super

Geo-Material) もその一つである。これは、一般に浚渫粘土、セメントおよび気泡または発砲ビーズの軽量材を規定の配合条件で混合したものであり、今日港湾施設の整備事業に広く用いられている⁵⁾。軽量土の研究についての最近の動向は参考文献 6) に詳しいが、実務レベルの品質管理を目的とした強度と最適な配合条件の確立に着目した研究が多く、荷重下での内部物性の変化を詳細かつ微視的に考察した研究は少ない。これについて、著者らはこの気泡混合処理土を対象とし、その物理特性について X 線 CT 法を用いて内部物性の可視化とその定量的評価についてすでに報告している⁷⁾。

本研究は、この気泡混合処理土の力学特性に着目し、実務においてしばしば実施される一軸圧縮試験を取り上げ、産業用 X 線 CT スキャナを用いて、その圧縮過程における内部物性変化の把握と破壊メカニズムの解明を目的としている。ここでは、前に紹介した SGM の気泡混合処理土を対象とし、室内で作製した供試体 (以下、室内供試体と呼ぶ) と、原位置の海水面下で施工された気泡混合処理土よりコアサンプリングされた現場供試体を対象とした。また、用いた産業用 X 線 CT スキャナは医療用に比べ X 線管の起電圧が高く、装置の解像度は医療用に比べてかなり高いとされ、結果としての現象の可視化のみならず、その定量的評価までが期待されている装

置である。本研究で使用した産業用 X 線 CT スキャナの
詳細については参考文献 7) を参照されたい。

2. X線CT画像⁴⁾

X 線 CT 法では、X 線が物体を透過する際に物体に吸収される X 線吸収係数の空間分布が逆解析される。さらに X 線吸収係数をパラメータとする CT 値⁴⁾ が画素値として与えられる。この画素は一般に画像のピクセルと呼ばれる「面」を指すが、X 線 CT 画像においてはボクセルと呼ばれる「直方体」を意味する。これはこのピクセルに X 線ビーム厚を高さとする直方体であり、CT 値はこの直方体の密度を表している。よってこれらの集合体で構成される CT 画像は厚みを持つ密度分布を示す画像であるといえる。

CT 値は、一般に空気で -1000、水で 0 と設定されており、物体の密度に比例するとされている。図-1⁷⁾ は、今回対象とした気泡混合処理土についてこの関係を示しており、同様の関係が認められる。また、2 次元 CT 画像では、CT 値を白黒の 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。さらに、連続撮影して得られた 2 次元水平断面画像を重ね合わせるにより、3 次元画像が再構成されることになる。本研究においてもこの CT 値および得られる画像を用いて、物体の密度変化を対象にその物性変化について議論する。

3. 実験方法

3.1 気泡混合処理土^{7), 8)}

SGM は、主に港湾部周辺で用いるために開発された新しい地盤材料である。本研究で対象とする気泡混合処理土では、母材として現地浚渫粘土を用い、軽量材としては界面活性剤系の起泡剤を対象とした。表-1 は、本研

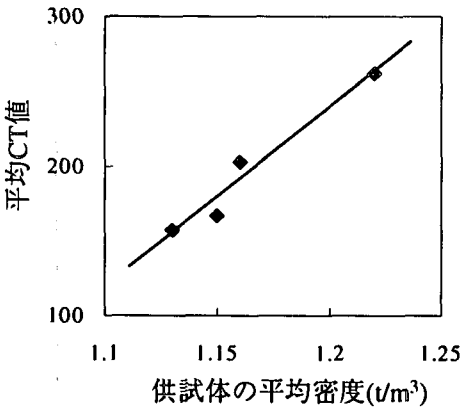


図-1 供試体密度とCT値の関係⁷⁾

究で用いた室内供試体と現場供試体の配合条件を示している。この配合は、目標密度を 1.1 t/m³、目標強度を 196kPa として設計されている。室内で作成する供試体については、圧力を作用させない水中養生を行ったものを対象とした。一方現場供試体は、熊本新港で実施された試験施工において、28 日養生後にコアサンプリングされたものである。それぞれの母材は、室内供試体は川崎粘土、現場供試体は有明粘土である。本論文では、室内供試体を 1 種類と異なるサンプリング深さの現場供試体 2 種類を対象とし、室内供試体をサンプル A、現場供試体として、原位置のサンプリング深さが 0.9~1.0m の供試体をサンプル B、また 8.8~8.9m のものをサンプル C とした。なお、供試体の寸法はいずれも直径 50mm、高さ 100mm の標準供試体である。ここで、現場供試体は施工される深さによる水圧および土被り圧の影響により養生中の密度増加が認められている。これについて対象としたサンプル B とサンプル C では、配合時の 1.1 t/m³ に対し、それぞれ 1.16 t/m³ および 1.22 t/m³ であった⁷⁾。

3.2 実験手順

本研究では、一軸圧縮過程における供試体内部の物性変化を考察するために、載荷前の初期状態(a)、ピーク応力前(b)、およびピーク応力後(c)の 3 つの状態において非破壊検査を実施した。ここでは高精度な CT 撮影を行うために、供試体底面から X 線ビーム厚を 2mm、X 線走査間隔を 1mm として同位置を 2 回操作する連続 CT 撮影を行った。これより画像は 1mm の厚さを持つことになるため、初期状態においては一供試体当たり 100 枚の CT 断面画像が得られることになる。また本検査での 1 ボクセルのサイズは 0.293mm x 0.293mm x 1.0mm とした。

本実験では CT 撮影室内に載荷装置を設けられなかったため、下記に示すような手順で実験を行った。

- (1) 供試体の初期状態を X 線 CT 撮影する。
- (2) 撮影終了後、CT 撮影室より供試体を取り出して、一軸圧縮試験装置に設置し試験を開始する。載荷はピーク応力付近で止め続いて除荷を行う。
- (3) 速やかに供試体を CT 室にセットし、ピーク応力前の状態として CT 撮影を行う。
- (4) 撮影終了後、(2)の手順を繰り返し再載荷する。ここでは、ピーク応力後まで載荷して、供試体の損壊状況を判断して除荷する。
- (5) 再度(3)の手順でピーク応力後として CT 撮影を行う。

表-1 1m³あたりの配合条件

	室内供試体		現場供試体	
	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

4. 結果と考察

4.1 一軸圧縮試験結果

図-2 はサンプル A の応力-ひずみ関係である。本実験では 3.2 に示した実験手順を踏んだため、繰り返し載荷の挙動が得られている。図中の(a),(b)および(c)は、それぞれ供試体の初期、ピーク応力前、およびピーク応力後の CT 撮影地点を示す。また図中にはその載荷過程の説明も付している。この図よりサンプル A では、圧縮ひずみがおよそ 0.5% 付近で応力のピークを示し、その後は徐々に強度が低下していることがわかる。図-3 は、現場供試体のサンプル B およびサンプル C についての応力-ひずみ関係をそれぞれ示したものである。これらについてもピーク応力を示すひずみレベルは室内供試体同様 0.5% 付近であるが、ピーク強度の値は現場供試体の方が室内供試体のそれと比較して、2 倍以上の値を示していることがわかる。

4.2 CT 画像による可視化

本節では、CT 画像を用いて供試体内部状況を可視化することによりその物性変化について考察を進める。なお、荷重が作用していない初期状態での物性についてはすでに参考文献 7) において報告済みであるので、ここ

では考察の対象から省く。

(1) 室内供試体の X 線 CT 画像

図-4 (a)、(b)および(c)は、サンプル A の(a)初期状態、(b)ピーク応力前、および(c)ピーク応力後の状態における、供試体中央付近の水平断面 CT 画像である。図中の (a)、(b)および(c)はそれぞれ図-2 に示した撮影地点(a)、(b)および(c)に対応している。図-4 (a)と 4 (b)を比較すると、初期状態とピーク応力前の状態には大きな変化は見られない。しかし図-4 (c)のピーク応力後においては、供試体を三等分するようなある幅を持った線的な低密度領域が現れている。本論文においてはこの領域を破壊の進展に伴うせん断帯とし、その発生や進展の違いを議論することで破壊現象の解明について言及する。なお、画像中の白色の領域はセメントの塊等のかかなり密度の高い領域であることを付け加える。

図-5(a)、(b)および(c)は、同様のサンプルについて、図-4(c)の矢印間の平面を含む供試体の鉛直断面画像である。図-4 同様に、初期状態からピーク応力前の過程では大きな変化は見られないが、ピーク応力後において鉛直方向に複数のせん断帯が現れていることがわかる。続いて、ピーク応力後の三次元内部状況を特にせん断帯に着目して示したものが図-6 である。この図は、各断面中の低密度領域を抽出し、これらを三次元的に白色領域として示したものであり、図-6(a)は立面、また図-6

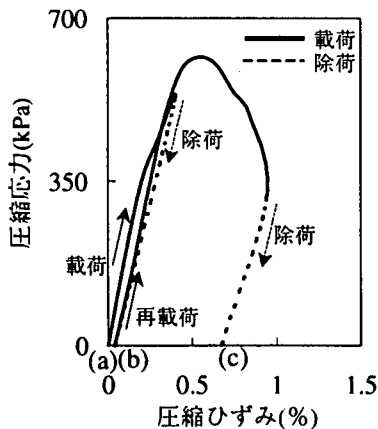


図-2 応力-ひずみ曲線(サンプルA)

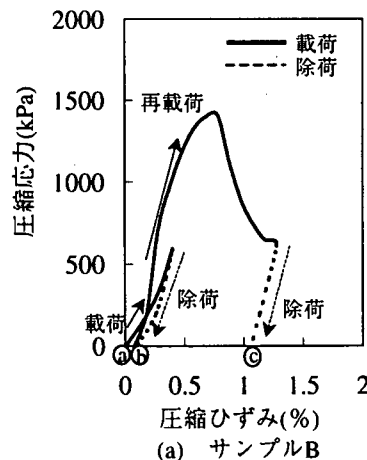
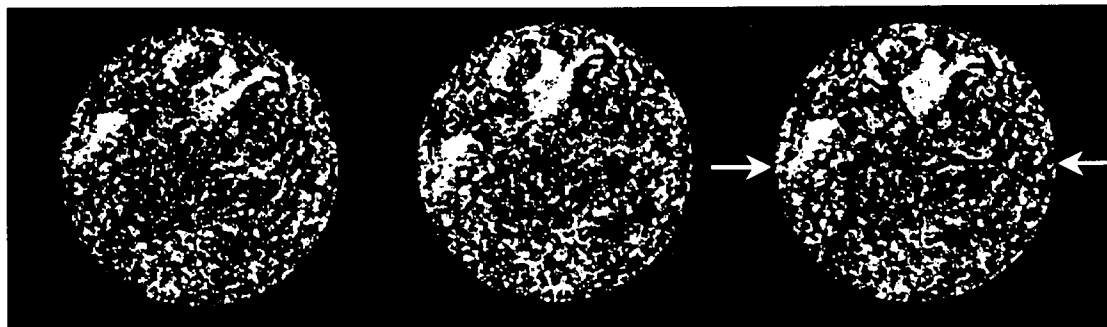
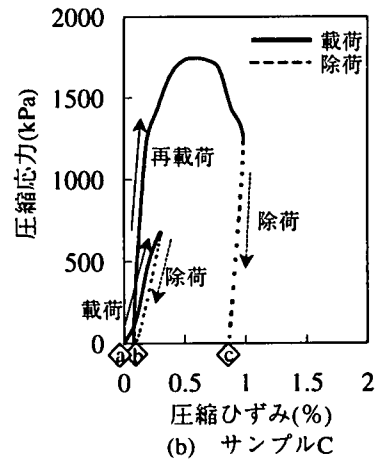
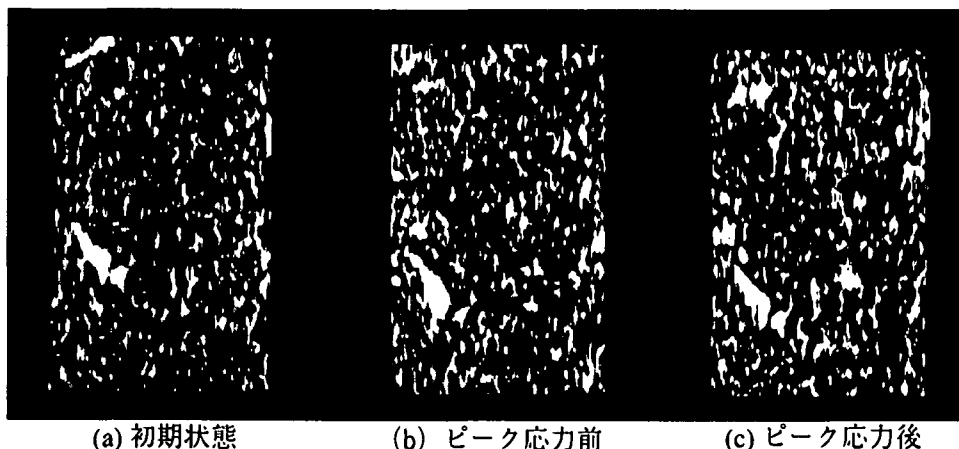


図-3 応力-ひずみ曲線



(a) 初期状態 (b) ピーク応力前 (c) ピーク応力後

図-4 水平断面画像の変化(サンプルA)



(a) 初期状態

(b) ピーク応力前

(c) ピーク応力後

図-5 サンプルAの2次元鉛直断面画像



(a) 立面像



(b) 平面像

図-6 ピーク応力後におけるサンプルA内部の低密度領域

(b) は平面からの透過図である。ここでは、気泡やせん断帯が相対的にかなり低密度であるという仮定の基に、CT 値が-1000 で空気、0 で水であることを考慮に入れて、CT 値の範囲として-800~-300 を各断面画像の CT 値ヒストグラムに基づいて選択し、それをせん断帯領域とする三次元画像表示を行った。これを見ると、供試体中央部および側面に近い領域において低密度な領域が存在すると共に、その低密度領域が連続して存在するせん断帯の内部形状が認められる。また図-6(b)より、この供試体のせん断帯の存在は比較的鉛直方向に複数存在していることがわかる。

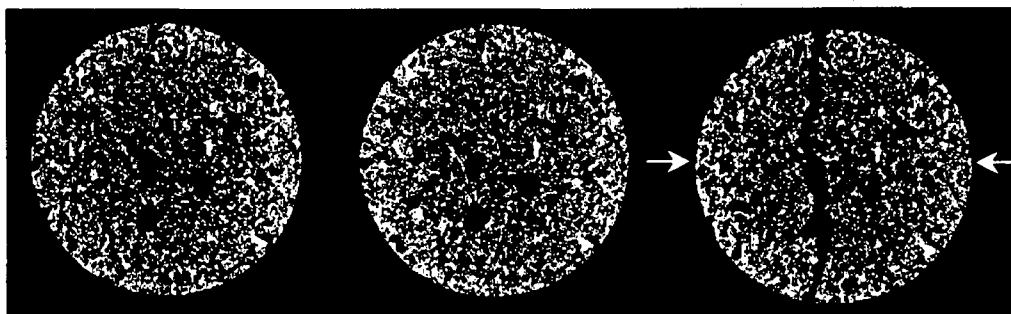
(2) 現場供試体のX線CT画像

図-7 および図-8 は、それぞれサンプル B とサンプル C について図-4 同様に供試体中央付近の水平断面画像を示している。サンプル B およびサンプル C 共に、サンプル A と同様、初期状態からピーク応力前まではせん断帯の発生は観察されないが、ピーク応力後においてはせん断帯が局所的に現れていることがわかる。これらの破壊形態においては、空隙の存在があまり影響していないと言える。図-9 および図-10 は、サンプル B とサンプル C について図-7(c)および図-8(c)の矢印間の平面を含む鉛直断面画像を示したものである。これらをよく観察すると、サンプル B では、せん断帯が供試体底面とほぼ 60 度の角度で一方向に生じているのに対し、サンプ

ル C では供試体下部を中心により複雑な破壊形態が認められる。図-11 と図-12 は、両サンプルについて図-6 と同様の方法で低密度領域を三次元的に抽出したものである。これらより、サンプル B およびサンプル C 共にせん断帯の三次元形状が白色の領域として確認可能である。また図-11 を見ると、サンプル B の内部に形成されたせん断帯の表面が、比較的平面であることがわかる。一方図-12 では、サンプル C の内部に形成されたせん断帯が、供試体下部を中心に空間的かつ複雑に発達していることが確認される。

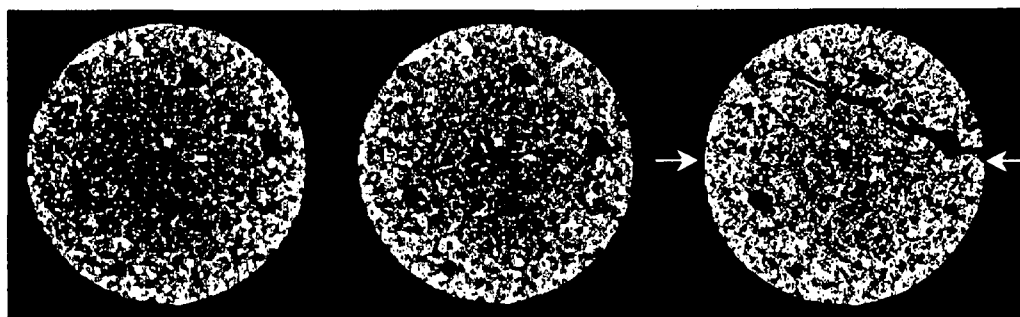
(3) 破壊現象

図-13、図-14 および図-15 は、それぞれサンプル A、サンプル B およびサンプル C について、ピーク応力後におけるせん断帯の発生が著しい高さでの水平断面画像をそれぞれ 3 断面について示している。図中の高さは供試体底面からの距離を示す。サンプル A は、載荷前の供試体自身の状態において密度のばらつきが大きく、その破壊現象は複雑である。一方、現場供試体であるサンプル B およびサンプル C では、気泡を含む空隙部分と粘土とセメントで構成されるいわゆるマトリクス部分が比較的是っきりと識別されるため、荷重と共に新たに発生したせん断帯も比較的明瞭に確認できる。よってここでは現場供試体に限って議論を進める。サンプル B とサンプル C の結果を比較すると、図-7 および図-8 でも



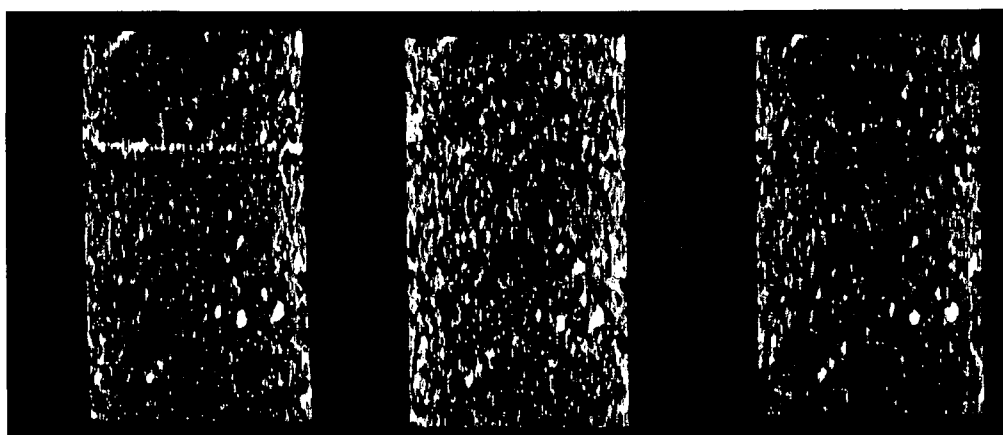
(a) 初期状態 (b) ピーク応力前 (c) ピーク応力後

図-7 水平断面画像の変化(サンプルB)



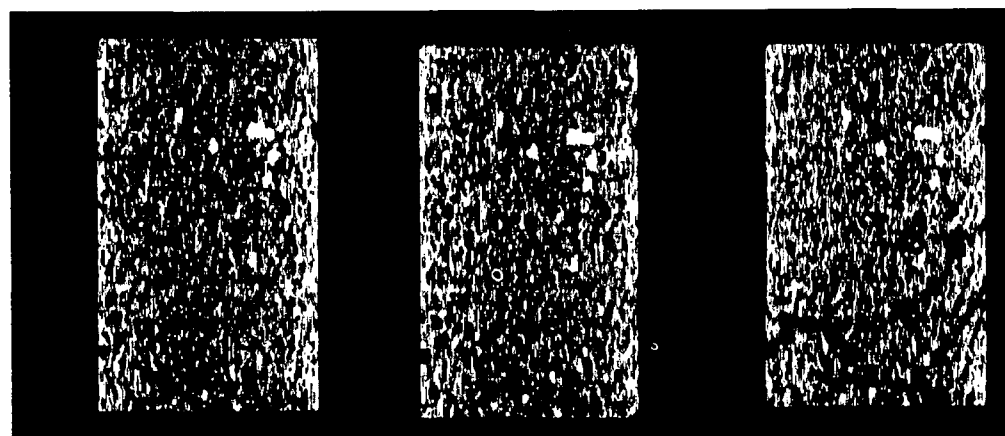
(a) 初期状態 (b) ピーク応力前 (c) ピーク応力後

図-8 水平断面画像の変化(サンプルC)



(a) 初期状態 (b) ピーク応力前 (c) ピーク応力後

図-9 サンプルBの2次元鉛直断面画像

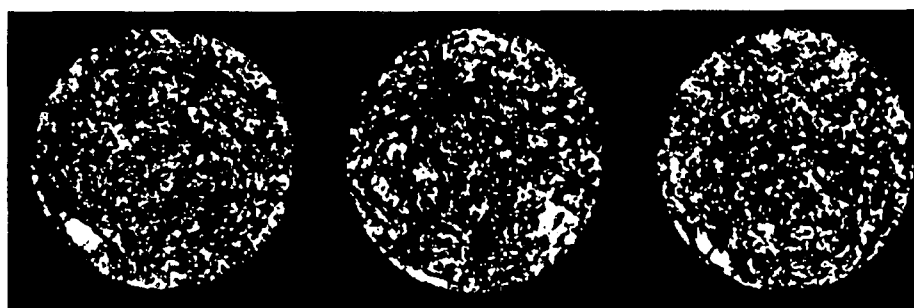


(a) 初期状態 (b) ピーク応力前 (c) ピーク応力後

図-10 サンプルCの2次元鉛直断面画像

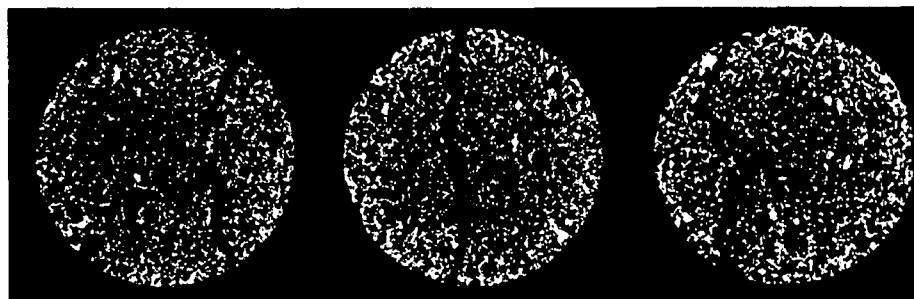


図-11 ピーク応力後の低密度領域 (サンプルB) 図-12 ピーク応力後の低密度領域 (サンプルC)



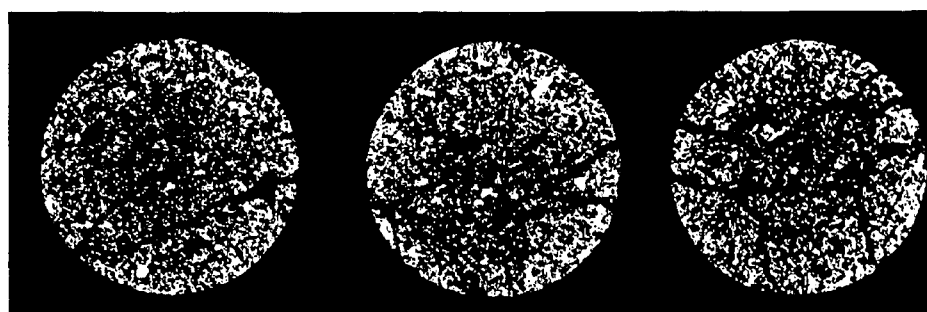
(a) 高さ89.5mm (b) 高さ 72.5mm (c) 高さ 53.5mm

図-13 ピーク応力後の水平断面画像(サンプルA)



(a) 高さ86.5mm (b) 高さ 60.5mm (c) 高さ44.5mm

図-14 ピーク応力後の水平断面画像(サンプルB)



(a) 高さ59mm (b) 高さ 46mm (c) 高さ20mm

図-15 ピーク応力後の水平断面画像(サンプルC)

議論したように、破壊の進展は大きな気泡を含む空隙の存在位置に必ずしも関係がないことが確認できる。またそのせん断帯の断続性から判断して、これらは一方向かつ単調に進展していないことが確認される。また、図-9

および図-10 の鉛直断面について述べたせん断帯の発生状況は、各水平断面についても容易に確認される。すなわち、サンプルBでは主要なせん断帯が唯一発生しているのに対し、サンプルCでは比較的小さいせん断帯が

いくつか現れており、各断面においても複雑な破壊形態を示している。

4.3 画像解析による定量的評価

前にも述べたが、X線CT画像はCT値を構成要素とする画像であるので、これを密度に換算することが可能である。各断面の密度算定方法については図-1より回帰直線を求めると次式が得られる。

$$CT_i = 1200.5\rho_i - 1201.2 \tag{1}$$

ここで、 CT_i ：各断面における平均CT値、 ρ_i は各断面の湿潤密度である。図-16、図-17および図-18は、式(1)に従って各断面の湿潤密度を求め、一軸圧縮過程におけるこの内部分布の変化についてそれぞれサンプルA、サンプルBおよびサンプルCについて示したものである。サンプルAは、初期状態からピーク応力前の過程において供試体上部に密度増加が生じていることが確認される。またその後は、ピーク応力後まで大きく減少している。これは、ピーク応力付近で密度が増加している領域ほど応力が集中し、その結果としてピーク応力後にその領域の局所ひずみが進展して低密度化したと考えられる。一方、サンプルBの密度変化を見ると、ピーク応力後まで

の全過程において供試体全体の密度が単調に減少していることが分かる。また、サンプルCについても同様の結果が得られている。このことは、サンプルAとは対照的に、ダイレイタンスを伴うせん断変形が載荷初期より起きたと考えられる。また、現場供試体では、各状態において供試体高さ方向の密度分布の形状が類似していることから、局所的なせん断帯の発生に伴う密度の減少が支配的であると言える。これは気泡が縮泡することによるひずみの局所化は生じず、供試体の骨格が徐々に破壊していくような進行性破壊が起きたと推測される。

4.4 まとめ

以上より、室内供試体は載荷と共に圧縮変形からせん断変形に移行する破壊形態であることがわかった。また、現場供試体は圧縮変形がほとんど起こらずに初期よりせん断変形が卓越する破壊形態であることがわかった。この要因をCT画像の特徴の面から考える。図-19は、CT画像を構成するボクセルと気泡の寸法との関係を示している。現場供試体は、内部の領域を大まかに分類すると明らかに空隙とわかる領域とそれ以外の領域とに区別できることは4.2(3)で述べた通りである。これは図-19(a)のような状態を意味する。このことから、現場供試体の

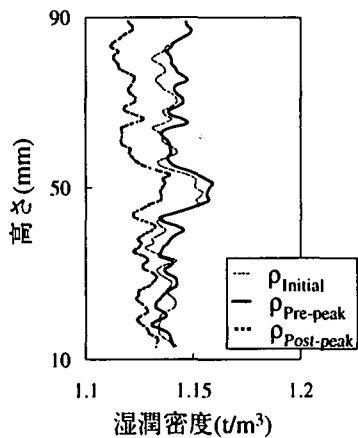


図-16 湿潤密度の変化 (サンプルA)

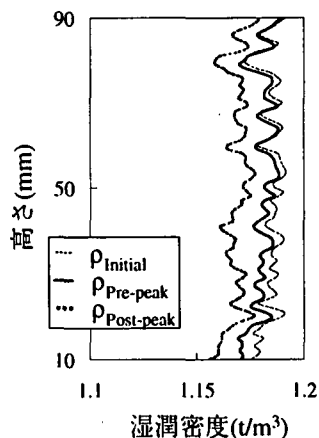


図-17 湿潤密度の変化 (サンプルB)

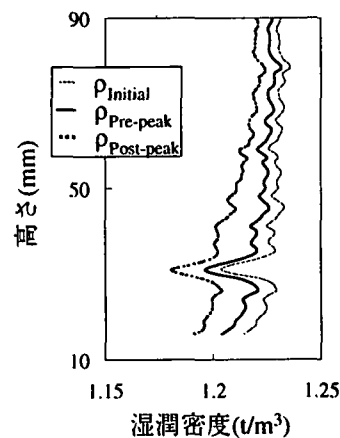
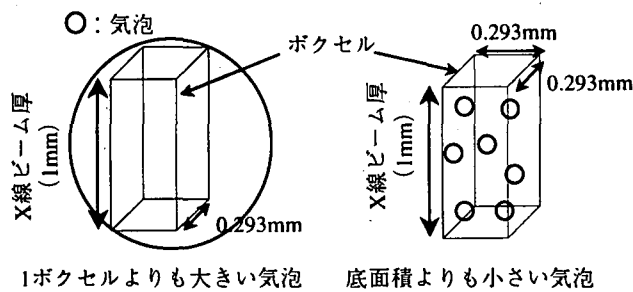
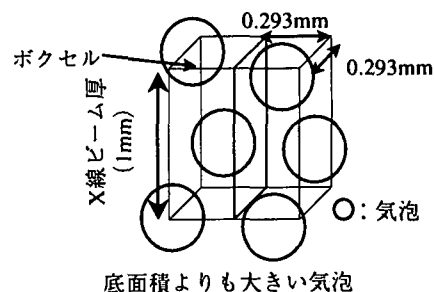


図-18 湿潤密度の変化 (サンプルC)



→CT値は、気泡としての値を示す

(a) 現場供試体内部の気泡と画素の関係



→CT値は、気泡を含んだ領域としての値を示す

(b) 室内供試体内部の気泡と画素の関係

図-19 X線ビーム厚さと気泡の寸法の関係

CT 画像は、何らかの原因によってボクセルよりも大きな空隙が空気の CT 値として検出される領域とボクセルよりも非常に小さい気泡が混在するマトリクスとしての CT 値が検出されているものと構成されているといえる。一方、室内供試体では明らかに空気の CT 値として検出されるほどの空隙が多く存在せず、マトリクスとしての CT 値が分布しているといえる。しかし、現場供試体の画像と比較して室内供試体の画像の方が黒く見えるのは CT 値が小さいからである。これは、図-19(b)が示すように室内供試体内部の気泡が現場供試体のマトリクス内部の気泡と比較して大きくかつボクセルよりも小さいためと考えられる。またこのことは、室内供試体内部の気泡が隣接して分布していることを意味する。この影響により、図-16 に示すように室内供試体は初期载荷の段階で気泡の縮泡により局所的に負のダイレイタンスーが起こったと考えられる。一方現場供試体では、小さな気泡間に介在するマトリクスに応力が伝達し、気泡自身が大きく変形するのではなくマトリクスの部分が脆性的に破壊するような現象が生じたと考えられる。このような破壊形態の違いは、供試体の作製方法や養生条件により土自体の物性が必ずしも同じでないことも原因として考えられる。もちろん実験における端面の境界条件等の影響なども考えられるが、両端面付近の CT 画像からその現象が認められなかったためここでは考察の対象から省いている。

5. 結 論

本論文では、気泡混合処理土の力学特性より一軸圧縮試験を対象とし、X 線 CT スキャナを用いた非破壊検査結果を用いてその変形や破壊現象を定量的に評価することを試みた。本論文の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 今回対象とした室内供試体は、気泡の寸法が現場供試体のそれと比較して大きく、また隣接して分布しているため、载荷初期段階では局所的に気泡が縮泡して一度密度が増加した後、ダイレイタンスーを伴うせん断変形に移行する破壊形態である。
- (2) 現場気泡混合処理土の破壊メカニズムは、供試体内の気泡が縮泡するような変形はほとんど生じず、気泡以外の部分であるいわゆるマトリクス部分におけるダイレイタンスーを伴うせん断破壊である。また、サンプリング深さが異なると密度が異なるために破壊形態が異なる。
- (3) 現場気泡混合処理土の破壊の進展は、大きな気泡を含む空隙の存在位置に関係しないと言える。

以上より、X 線 CT 法を用いることによって、従来不可能だった圧縮過程での内部物性変化の評価およびその破壊メカニズムの解明を非破壊で検討することが可能となった。今後は、X 線 CT 用の三軸圧縮载荷装置を開発することにより、圧縮試験時も CT 室内で実施可能にすることで、より厳密な破壊現象の解明を試みたい。

謝 辞

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) 例えば、T. Adachi, F. Oka and A. Yashima, "Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks", Proceedings of the fourth international workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, 1997.
- 2) Desrues, R. Chambon., M. Mokni, and F. Mazerolle, "Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studies by computed tomography", Geotechnique 46, No.3, pp.529-546.
- 3) K. Tani, "X-ray Computed Tomography Technique to Observe Shear Banding in Dense Sands", Proceedings of International Symposium on Deformation and progressive failure in Geomechanics, IS Nagoya'97, PERGAMON: pp.315-320.
- 4) J. Otani, T. Mukunoki and Y. Obara, "Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils", Soil and Foundations, the Japanese Geotechnical Society, vol.40, No.2, pp.111-118. Apr. 2000.
- 5) T. Tsuchida, D. Takeuchi, T. Okumura and T. Kishida, "Development of light-weight fill from dredgings", Environmental Geotechnics, pp.415-420, 1996 Balkema, Rotterdam.
- 6) 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, 平成 10 年 7 月.
- 7) 大谷順, 椋木俊文, 菊地喜昭, "X 線 CT 法を用いた気泡混合処理土の物理特性の定量的評価", 土木学会論文集, No. 652/Ⅲ-51, pp.269-278, 2000. 6.
- 8) T. Tsuchida, "Super Geo-Material Project in Coastal Zone", International Symposium on Coastal Ocean Space Utilization COSU'95, pp.22-31, 1995.

(2000 年 4 月 21 日 受付)