

X線CT法を用いた気泡混合処理土の 浸透・乾燥現象の解明

大谷 順¹・椋木俊文²・永留 健³・菊池喜昭⁴・佐藤孝夫⁵

¹正会員 Ph.D. 熊本大学工学部 環境システム工学科 教授
(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

²正会員 博士 (工学) Post Doctoral Fellow, Department of Civil Engineering, Queen's University,
Ontario, Canada K7L 2N6 (元熊本大学大学院)

³正会員 工修 東亜建設工業 (元熊本大学大学院) (〒450-0002 名古屋市中村区 4-10-27)

⁴正会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 基礎工研究室長
(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

⁵正会員 工修 国土交通省 (前運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所長)
(〒100-8989 東京都千代田区霞ヶ関 2-1-3)

近年、海底などの軟弱地盤における対策工法において、経済性および施工性の面から軽量安定処理を施した気泡混合処理土の適用が増えつつある。しかし、海水をはじめ地下水や雨水の浸入や乾燥による密度変化が生じるため、その浸透特性および乾燥特性を把握することが大変重要である反面、この現象を詳細に解明した例は少ない。本研究は、非破壊検査法として有効な X 線 CT 法を用いて、前運輸省港湾技術研究所で提案されている気泡混合処理土の浸透メカニズムおよび乾燥メカニズムの解明を試みるものである。ここでは、工学材料を非破壊検査可能な産業用 X 線 CT スキャナを用いてコアサンプリングされた気泡混合処理土供試体の浸透および乾燥現象を解明することを試みた。

Key Words: light-weight soil, X-ray CT method, seepage, drying, visualization, image processing analysis, nondestructive test

1. 序 論

今日、港湾周辺部の開発における軟弱地盤対策工法として、土にセメント系固化材と気泡や発泡ビーズ等の軽量材を人工的に混合させた新地盤材料を適用する軽量安定処理土工法¹⁾がある。軽量安定処理土は、地盤沈下を抑制させるための盛土材や埋立て材、および擁壁や橋台に作用する土圧を低減させるための裏込め材としても適用されている。また一般に軽量材として、特に気泡を使用するものは、気泡混合処理土と呼ばれている。

気泡混合処理土は、経済性や地盤環境問題に対応して、母材には現地発生土を利用することが多い²⁾。これにセメントなどの固化材と気泡を人工的に混合させたものであるため、気泡混合処理土は複雑な構造を有していると考えられる。近年、軽量地盤材料の適用例が増加しており、十分な強度と経済的な配合条件についての研究や、一軸および三軸圧縮試験などによる力学特性の評価を行う研究成果が得られている^{3) 4)}。しかし、セメントや気泡が、混合地盤材料としての物理特性や力学特性に与える影響

因子については未解明な部分が多い。特に、地盤の軽量化が大きな目的の一つである気泡混合処理土にとって、打設および施工後の密度の管理はたいへん重要である。

一方、近年の気泡混合処理土の適用例に着目すると、ウォーターフロント開発に先だって港湾部周辺での適用事例が増えつつある^{5) 6)}。このような施工現場では、気泡混合処理土が海水中に打設されるために、地盤中に水が浸透することによって密度が増加し、本来の利点である軽量さが失われてしまうことが懸念される。また、この逆の場合として、地下水位の低下や空气中に露出されることにより、水分が蒸発し乾燥収縮を起こすことにより強度の劣化現象を生じる可能性もある⁷⁾。菊池・吉野⁸⁾は、気泡混合処理土の透水特性を調べるために、三軸透水試験、定ひずみ速度圧密試験および段階載荷圧密試験を実施している。またその結果として、気泡の存在によってみかけの透水係数が大きくなるが、定常透水状態になるには、間隙流体が非圧縮性流体の場合と比較してはるかに長い時間を要することを報告し、マクロな透水現象について評価している。

一般に、気泡混合処理土内部における水の浸透現象や乾燥現象の把握は、試料の密度変化を評価する以外に有効な方法はなく、これについては物体内部の密度分布を非破壊かつ3次元的に定量的評価が可能なX線CTスキャナ装置が有効である。近年、岩盤工学において、菅原⁹⁾が産業用X線CTスキャナを用いて岩盤内部の水の浸透現象を可視化し、それを定量的に評価する実験を行っている。また、大谷^{10)~14)}はX線CT法を用いて気泡混合処理土の工学的特性の解明を試みている。

本研究の目的は、工学材料を非破壊検査可能な産業用X線CTスキャナを用いて、気泡混合処理土を対象に、長期浸透実験および乾燥実験を実施することによりその現象解明を試みることである。本研究で対象とした気泡混合処理土は、前運輸省港湾技術研究所で提案されたSGM(Super Geo-Material)と呼ばれる地盤材料であり、1998年熊本新港の埋立て現場において試験的に打設された原位置からのコアサンプルである¹⁵⁾。ここでは、起泡材が界面活性剤系の気泡混合処理土を対象に浸透・乾燥実験を実施する。なお、浸透実験では、比較対象として動物性タンパク質系の供試体についても同様の実験を実施する。

2. 供試体および実験方法

(1) 試料¹⁵⁾

表-1は、気泡混合処理土 1m³ 当たりの配合条件を示している。母材は、有明粘土であり、固化剤には高炉 B 種セメントを使用している。また、起泡剤には界面活性剤系と動物性タンパク質系の2種類が用いられている。一般に、界面活性剤系の泡は、分子量千以下の界面活性剤が泡膜面に吸着し整列することにより構成されている弾力性のある泡であり、タンパク系の泡は分子量数千~数万の高分子が泡膜で複雑に絡み合っ構成されている泡膜強度が大きい泡といわれている¹⁶⁾。

本試験施工では、巨大プラントにおいて浚渫粘土に海水を加え、流動性を高めた上で所定の量のセメントをセメントミルクの状態と混合させ、さらに気泡を混合してSGMを作成し、ポンプ圧送してトレミー管で水中打設した。配合は、打設時の目標密度 1.1 t/m³、原位置での目標強度 196kPa (配合試験時の目標 28 日強度 588kPa) として設定されたものである。なお、本試験施工では、およそ 10m 厚の施工を一日で実施している¹⁵⁾。以後、本文では、起泡剤に界面活性剤系を用いた供試体を界面活性剤系供試体、タンパク系を用いた供試体をタンパク系供試体と呼ぶことにする。

表-1 配合条件

	質量 (kg)	体積 (l)
粘土	367.0	136.0
水	624.0	606.0
セメント	100.0	32.8
気泡	9.3	225.0
合計	1100.3	999.8

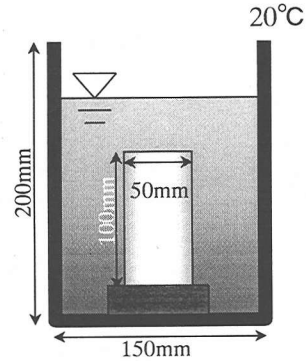


図-1 浸透実験方法

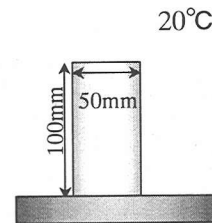


図-2 乾燥実験方法

(2) 浸透実験

浸透実験に使用した供試体は、界面活性剤系供試体およびタンパク系供試体である。これらの供試体は、それぞれ打設後28日してから原位置よりサンプリングされたものであり、界面活性剤系供試体は深度 0.9~1.0m より、またタンパク系供試体は 3.9~4.0m よりコアサンプリングされたものである。

図-1は、浸透実験の方法を示している。ここでは、直径 50mm、高さ 100mm の供試体を直径 150mm、高さ約 200mm の水槽に水浸させている。本実験では、図-1に示すように、水槽底面に平らな底板を用意し、その上に供試体を設置している。また、定期的に供試体の密度を測定し、供試体底面より走査間隔 1mm で連続 X 線 CT 撮影を実施した。なお、本実験では、水槽の水に水道水を使用し、水浸中は容器に蓋をして室温が 20°C に設定された恒温室に放置した。

(3) 乾燥実験

乾燥実験に使用した供試体は、打設後 28 日目に深度 8.8~8.9m よりコアサンプリングされた界面活性剤系供試体

である。図-2は、乾燥実験の方法を示している。この図に示すように、気泡混合処理土供試体を気中に放置することにより乾燥させ、浸透実験と同様に定期的に密度測定とX線CT撮影を実施した。なお、この実験は供試体を室温20℃、湿度50-60%で設定された恒温室内で実施している。

(4) X線CT撮影

浸透実験および乾燥実験において、供試体の初期条件はそれぞれ実験開始前とし、まず初期状態のX線CT撮影を実施する撮影条件として、X線発生起電圧は300kVとし、X線照射幅は1mmと設定した。

X線CT画像はボクセルと呼ばれる要素の集合体であり、それはX線CT撮影条件によって変化する¹⁷⁾。本実験で得られるX線CT画像は、512×512個のボクセルから構成されており、1ボクセルの大きさは、0.293×0.293×1(X線照射幅)(mm³)である。また、X線CT画像は、CT値と呼ばれる密度と正の相関関係を示すパラメータによって構成されるデジタル画像であり、CT値はボクセルの密度を意味する。一般的なCT値の定義式において、理論的には水のCT値は0、空気のCT値は-1000と与えられる¹²⁾。以上のことより、X線CT画像は物体内部の密度空間分布の可視化と言える。また画像においては、物体が持つCT値を256階調表示され、明度が高い領域は高密度な領域を意味し、明度が低い領域は低密度な領域を意味する。なお、X線CT法の詳細については、参考文献12)および17)を参照されたい。

3. 浸透実験結果および画像解析結果

(1) 浸透量の評価

本浸透実験で用いた界面活性剤系供試体の初期湿潤密度は1.17t/m³であり、タンパク系供試体は湿潤密度1.36t/m³であった。目標密度の1.1t/m³に対してそれぞれ密度が大きくなっていることから、打設からサンプリングするまでの間に、気泡の縮泡や消泡が生じたことは明らかである。また、タンパク系供試体の方が、密度が大きくなっており、この差は土被り圧の影響と起泡剤の縮泡率の違いであると推察される。

図-3は、界面活性剤系とタンパク系の供試体を水浸させた時の経過日数と湿潤密度の関係を示している。ここでは、水浸させた供試体を取りだして、供試体表面の水滴をふき取った後にその質量と体積を測定し、密度を求めている。図-3を見ると、界面活性剤系供試体とタンパク系供試体ではその初期密度が大きく異なり、その初期密度の違いによる密度変化特性の違いは明らかである。

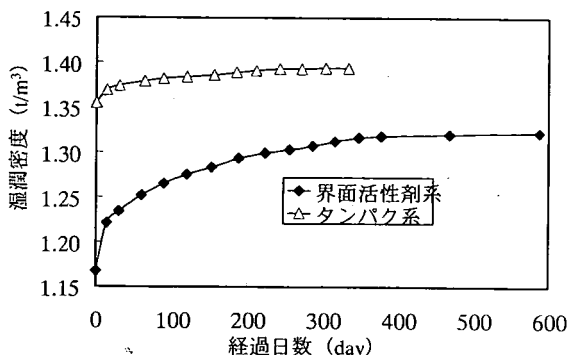


図-3 養生期間と密度変化

(2) X線CT画像

図-4および図-5は、界面活性剤系とタンパク系の両供試体中央部の浸透状況を示した水平断面CT画像である。X線CT撮影条件では、X線走査間隔を1mmとしているため、ボクセルよりも小さい寸法の気泡は、X線CT画像上では気泡として判別できない。しかし、浸透領域は、密度増加した領域であるため、X線CT画像では明度が高くなった領域を浸透領域と評価可能である。

図-4において、画像中に示している特に大きな気泡に着目すると、初期状態から6ヵ月後までは気泡に変化は見られず、吸水領域はこの気泡部分を選けて中心方向に進行している。しかし、9ヵ月後になると、吸水領域がこの気泡を完全に覆い、この気泡の大きさは6ヵ月後と比べて小さく、気泡内の色も黒色から灰色へ変化しており水が浸透していることが明らかである。また、15ヵ月後および19ヵ月後になると、黒色部の大きさは徐々に小さく変化しているのが確認できる。さらに、気泡のある場所に水が進入してくる場合、その気泡に水のフロントが接触していても、気泡の周りがすべて水で囲まれなければその気泡は水の進入を遮断し、その形状を保っていることが確認できる。しかし、気泡の周りがすべて水で囲まれてしまうと、その後気泡は水と置き換わっており、供試体内部の浸透特性は、局所的には気泡の影響を受けると考えられる。

これに対して、図-5が示すタンパク系供試体の画像では、水が浸透しているものの、その量はわずかであり、内部特性の変化はほとんど見られないことがわかる。このことから、初期密度の影響がその浸透特性に与える影響は顕著であるといえる。

図-6は、図中に示した矢印間について図-4に見られる大きな空隙のCT値分布を示したものである。図-6をみると、気泡に変化が見られない6ヵ月後までは、そのCT値は約-1000以下を示しており、気泡内は空気で満たされている。しかし、気泡が変化し始めた9ヵ月後になると、初期状態から6ヵ月後の状態までCT値が-1000

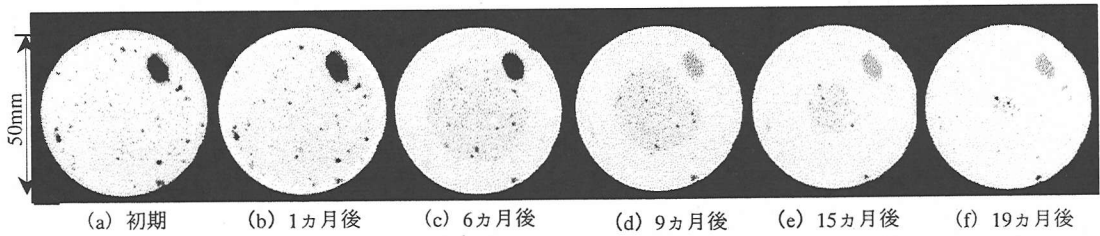


図-4 水平断面CT画像（界面活性剤系）

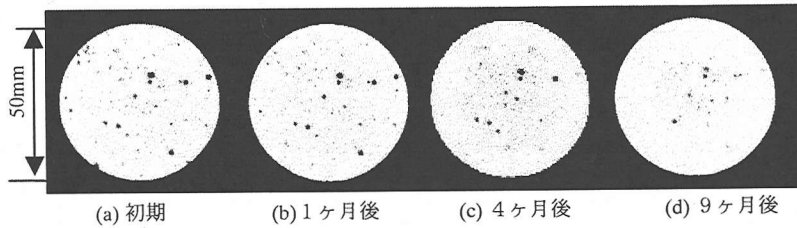


図-5 水平断面CT画像（タンパク系）

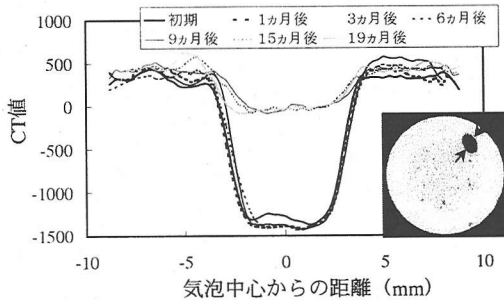


図-6 気泡内のCT値分布（界面活性剤系）

を示していた領域のCT値が0に上昇しており、気泡内に水が完全に浸透したことを示している。

図-7は供試体の直径を含む任意の鉛直断面画像である。図中の白い部分は、気泡に水が浸透し、密度が増加した領域であり、黒い部分は吸水されていない領域を示している。図-7を見ると、時間の経過と共に白い領域が供試体内部へ発達していることがわかる。このことは、図-4の水平断面CT画像と同様に、浸透領域が供試体の中心方向に進展しており、そのフロントが上下方向からも進展していることが確認できる。

図-8は、供試体内部の3次元画像であり、浸透現象を3次元的に可視化したものである。画像中の白い領域は、浸透領域を示し、黒い領域は浸透現象が生じていない領域を示している。図-8を見ると、浸透領域を示す白い領域が、時間経過に伴い供試体の中心方向に広がっていることがわかる。また、浸透領域内において、水で満たされていないと考えられる黒い領域が残っていることが確認できる。これは、浸透現象が気泡部分を避けて進行し、気泡部分を覆っていることを示している。さらに、黒い部分が多く存在しているため、気泡の周りは水

で覆われているが、内部はまだ水で満たされていないままのものが多く存在しているということが明らかである。

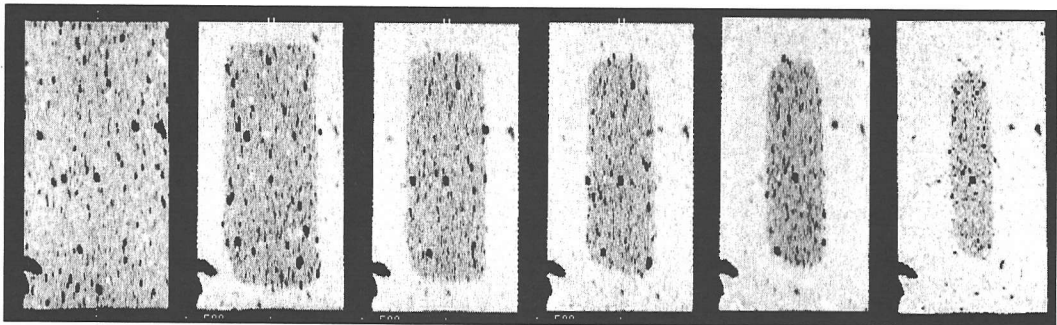
以上の結果をまとめると、浸透過程において、気泡群に浸透現象が進行したとき、すぐ気泡内が水で満たされる場合と、気泡の周りを覆ったまま、その内部を水で満たすまでに時間がかかる場合の2つに分類されると考えられる。

(3) 浸透方向の密度変化

図-9および図-10は、各供試体中央部の横断面半径方向の平均CT値を経過時間ごとに表わしており、図-11はその計測領域を示している。図-9および図-10において、供試体中心から供試体側面に向かってCT値の変化がはじまる領域は、供試体側面から浸透してきた水の浸透フロント領域を示している。

まず、図-9を見ると、界面活性剤系供試体の水平断面CT値の変化は顕著であり、時間と共に供試体中心に向かってCT値が高くなっている。また、供試体中心より17mmから24mmの領域に着目すると、9ヶ月から19ヶ月の間に、浸透現象がほぼ定常状態であることがわかる。さらに、初期状態から12ヶ月後まではフロントから勾配がほぼ一定であるが、15ヶ月以降はフロントの勾配が小さくなっている。これは、供試体内部における浸透速度が小さくなったことを示唆している。

一方、図-10を見ると、タンパク系供試体の横断面CT値の変化はほとんどなく、供試体の側面付近の領域のみに浸透現象が生じている。これより、図-3の初期密度の影響がはっきりと現れており、密度変化がほとんどないことはこの画像からも判断できる。



(a) 初期 (b) 6ヶ月後 (c) 9ヶ月後 (d) 12ヶ月後 (e) 15ヶ月後 (f) 19ヶ月後

図-7 鉛直断面CT画像 (界面活性剤系)



(a) 初期 (b) 6ヶ月後 (c) 19ヶ月後

図-8 吸水の様子 (界面活性剤系)

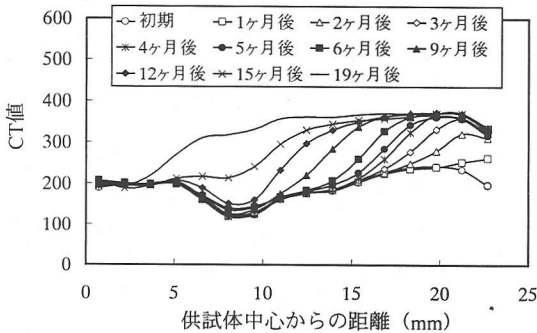


図-9 横断面半径方向平均CT値 (界面活性剤系)

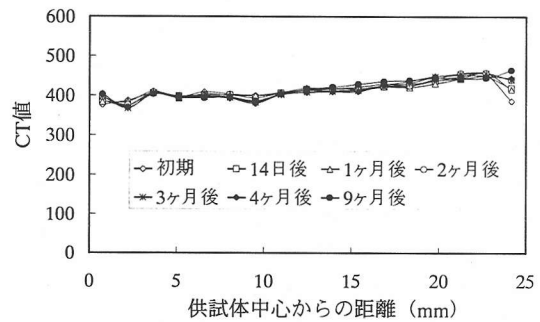


図-10 横断面半径方向平均CT値 (タンパク系)

(4) 透水係数の推定

ここでは、供試体端面からの浸透現象の影響を最も受けないと考えられる供試体中央の高さの断面画像に着目する。図-12は、2つの画像を重ね合わせ、その変化分を白色で示す画像間差分処理によって示した界面活性剤系供試体内部における浸透領域フロントの経時変化である。図中の(a),(b),(c)は、それぞれ(a)初期状態から1ヶ月後、(b)6ヶ月後から9ヶ月後、(c)15ヶ月後から19ヶ月後の変化を示している。これを見ると、(a)における1ヶ月間の浸透量の変化と(b)の3ヶ月間における浸透量の変化は、ほぼ等しいことが明らかである。このことから、供試体内部における浸透フロント中心部への進入速度は、初期ほど早く、経過日数と共に遅くなっていることが言

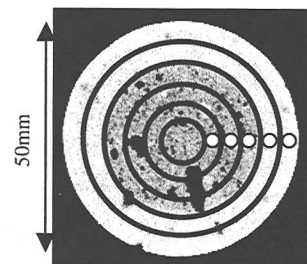


図-11 平均CT値の測定領域

える。

図-13は、画像間差分処理によって得られた画像から1ヶ月における浸透距離を画像解析し、この結果を用いて透水係数を推定したものである。これを見ると透水

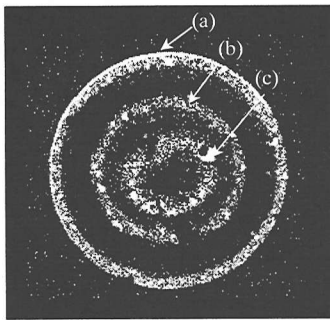


図-1 2 浸透領域のフロント
(界面活性剤系)

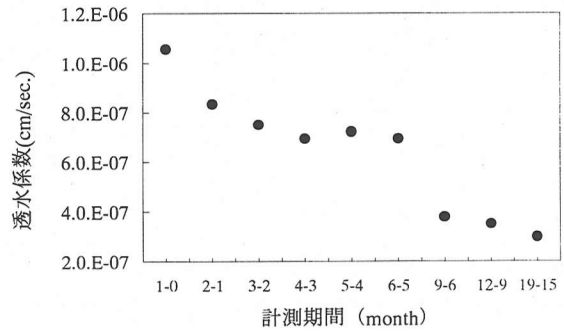


図-1 3 透水係数の推移 (界面活性剤系)

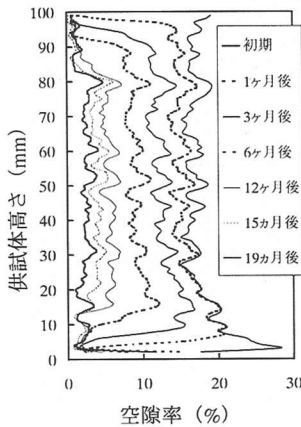


図-1 4 空隙率分布 (界面活性剤系)

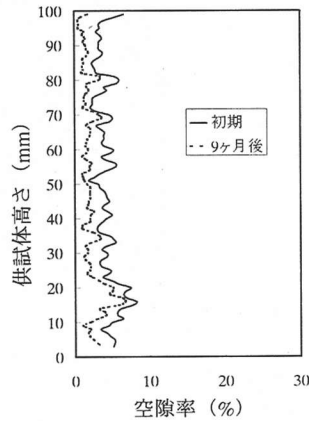


図-1 5 空隙率分布 (タンパク系)

係数は時間の経過と共に減少している。また、その値のオーダーは 10^7 であり、この結果は菊池らが行った透水試験結果⁸⁾と比較的類似している。なお、ここで示した透水係数の減少傾向に若干のばらつきがあるのは、供試体高さの中央における透水係数を求めているために、その断面に存在する局所的な気泡への吸水が影響したものと考えられる。さらに、透水係数の減少傾向については、菊池・吉野⁸⁾が報告しているように、気泡の存在によってみかけの透水係数が大きくなるが、定常透水状態になるには、間隙流体が非圧縮性流体の場合と比較してはるかに長い時間を要するというを示唆している。

(5) 空隙率の変化

図-1 4と図-1 5は、各供試体の時間経過における供試体高さ方向の平均空隙率分布である。ここで空隙率とは、大谷他¹²⁾によって提案された量であり、CTスキャナ結果を画像解析することにより得られた見かけの空気空隙率を表わすものである。これらの結果は、配合条件に基づいて供試体内部のマトリクス領域と気泡を多く含む2領域に分割する画像の2値化処理を実施し、その画像内の気泡群の占める割合を空隙率として示して

いる¹²⁾。ここで、両端面付近の空隙率の低下が大きいのは、供試体を水浸させているため側面だけでなく両端面も水と接触しているからである。いずれの供試体も経過時間と共に、空隙率が低下しており、界面活性剤系の変化が顕著である。これらのことより、同じ母材から作製された気泡混合処理土においても、気泡量によってその浸透メカニズムは大きく異なり、気泡量が多いほど浸透量(密度増加量)も大きくなることが推測される。これらのことから、気泡が気泡混合処理土の浸透メカニズムに及ぼす影響は非常に大きいことが推察される。

(6) 密度増加率と空隙率減少率の関係

ここでは、水の浸透量が大きい界面活性剤系供試体に限って議論する。図-1 6および図-1 7は、浸透による供試体の密度増加率と、気泡群減少率をそれぞれ示したものである。図-1 6は、図-3で示した定期的に測定した密度量から、X線CT撮影を実施した経過日数での密度変化量を示している。また、図-1 7に示す減少率は、X線CT画像の画像解析によって得られた図-1 4に示す各経過日数での分布より得られる気泡量を、その初期量に対して除したものである。まず、図-1 6を見る

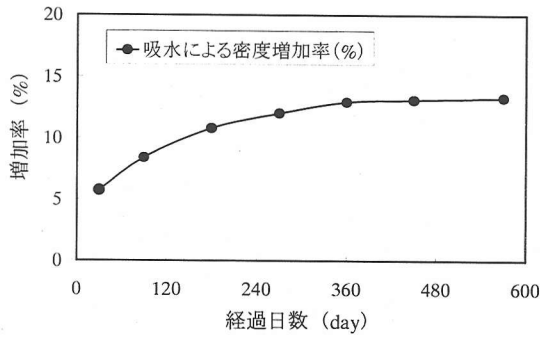


図-16 密度増加率分布
(界面活性剤系)

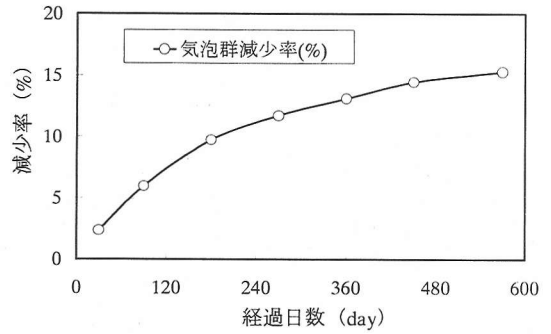


図-17 気泡群減少率分布
(界面活性剤系)

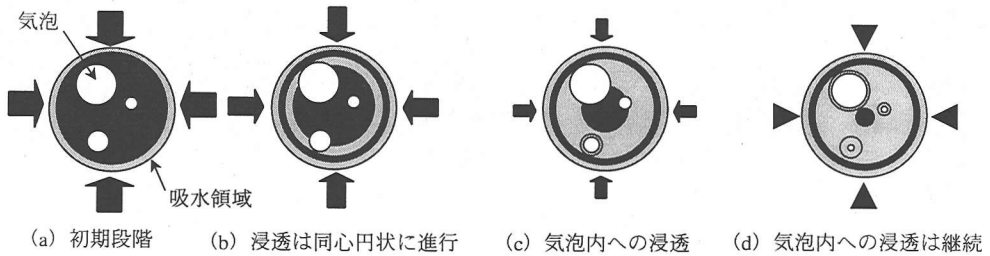


図-18 気泡混合処理土の浸透メカニズム

と、240日までは密度増加率は徐々に増加している。しかし、240日を過ぎるとその増加率は落ち着きを見せ、360日以降の増加率はほぼ一定値を示している。本実験において、供試体の密度増加要因は、浸透現象のみであると考えられるため、360日以降は外部からの吸水作用はほとんどないと言える。このことは、図-9の結果からも裏付けられる。

一方、図-17を見ると、360日付近までは図-15と同じような挙動を示しているが、密度増加率が一定の値を示した360日以降も、気泡群減少率は増加傾向にある。このような現象が生じる可能性の一つとして、外部からの新たな吸水がない場合にも、拡散現象のような空気が水に溶けるという化学的変化が生じることにより、供試体内部に溜まった水が供試体中心方向に向かって浸透することが推察される。このことから、浸透量と気泡群減少量は必ずしも1対1に対応していないことが推察されるが、これらの現象解明については今後さらなる検討が必要であると考えられる。

(7) 気泡混合処理土の浸透メカニズム

(1)～(6)の結果に基づいて、気泡混合処理土の浸透メカニズムについてまとめる。図-18は、この供試体における浸透メカニズムを説明している。これを説明すると以下ようになる。

(a) 浸透現象は同心円状に進行し、初めに比較的浸透

しやすい気泡以外の部分に入り込む。そのフロントが気泡部分に接触した場合は、それを避けるようにして浸透現象は進行するため、気泡混合処理土内部の浸透特性は異方性を持つ。

- (b) 浸透実験初期の段階においては、浸透する水の量が多い。
- (c) 気泡部分が浸透領域ですべて囲まれたのち、水は気泡内に吸水する。また、時間経過とともに外部からの浸透量は減少する。
- (d) 浸透領域が供試体の中心付近まで進み、外部からの浸透量が減少しても、気泡内部への浸透現象は継続している。

以上のことから、供試体レベルで浸透するのに長時間かかることから実際の気泡混合処理土地盤においては、水が浸透していくのに更に長い時間を有すると考えられる。

4. 乾燥実験結果および画像解析結果

(1) 乾燥実験結果

本実験で用いた供試体は、湿潤密度 1.31t/m^3 の界面活性剤系供試体である。図-19は、界面活性剤系供試体について乾燥過程における経過時間と湿潤密度の関係を示している。乾燥実験開始時においては、供試体内の水分

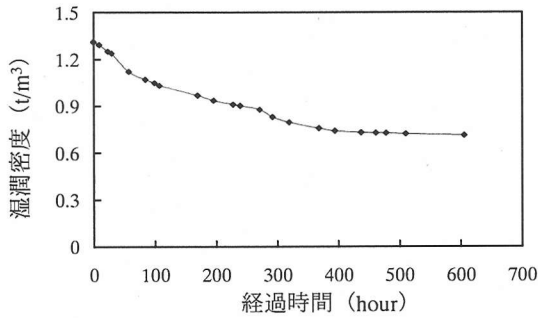


図-19 乾燥期間と密度変化 (界面活性剤系)

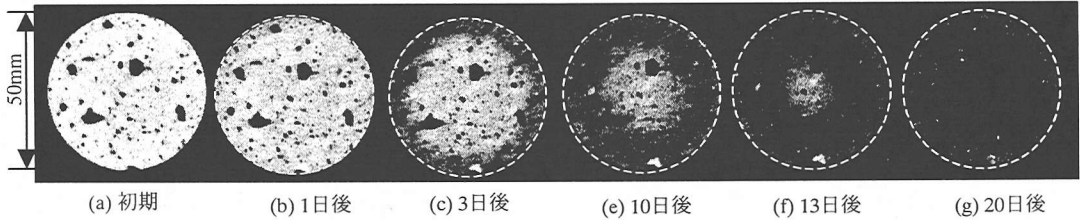


図-20 乾燥実験における水平断面CT画像 (界面活性剤系)

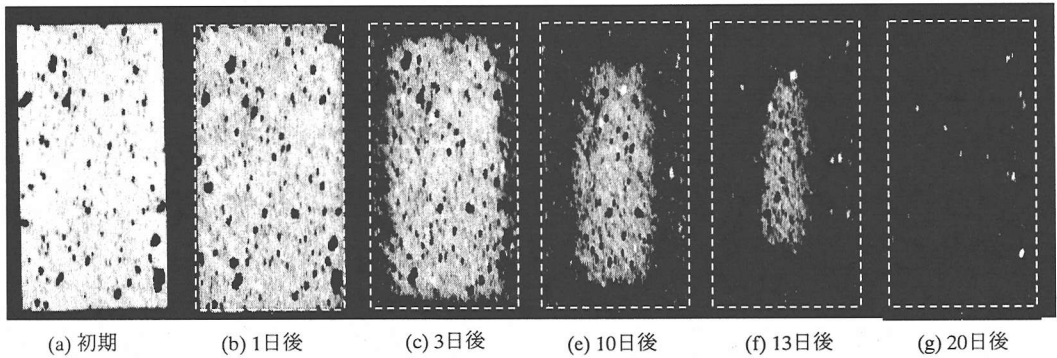


図-21 乾燥過程における鉛直断面CT画像 (界面活性剤系)

が急激に蒸発し密度が低下している。しかし、400 時間を超えたあたりから密度変化がほとんどなかったため、これ以降の X 線 CT 画像からは画像の変化を得ることは困難と判断し、乾燥実験開始後 478 時間目で X 線 CT 撮影を終了した。その後供試体の密度測定は継続して行い、乾燥実験開始から 606 時間後に本実験を終了した。

実験終了後の供試体は乾燥収縮を起こしており、実験開始時に直径 50.2mm、高さ 100mm であった供試体が、乾燥実験終了時には直径 48.1mm 高さ 96.4mm になっていることを確認した。また、供試体側面には無数の亀裂が目視された。

(2) X 線 CT 画像

図-20 および図-21 は、それぞれ供試体高さの中央における水平断面 CT 画像と任意の直径を含む鉛直断

面画像である。図中の白い点線は、初期状態における供試体の輪郭を示している。X 線 CT 画像において、白い部分は湿潤領域であり、黒い部分は乾燥が生じている領域である。したがって、供試体が乾燥すると、密度が低下するため、X 線 CT 画像においては経過時間と共に黒い領域が進展することになる。

図-20 を見ると、その乾燥過程において、水が蒸発していると考えられる黒色の領域が、供試体中心部に向かって徐々に進展していることがわかる。また、その進行速度は浸透現象と比較してかなり早い。次に図-21 を見ると、図-20 の水平断面 CT 画像と同様に、乾燥領域が供試体側面より等方的に広がっており、そのフロントが上下方向からも広がっていることが確認できる。また、その広がり方はほぼ一定であると言える。

図-22 は、炉乾燥後の界面活性剤系供試体の X 線 CT

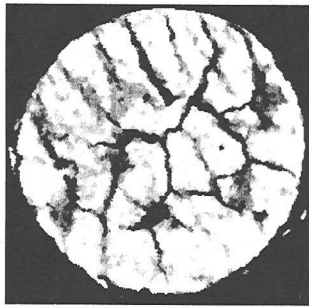


図-2 2 炉乾燥後における供試体内部のX線CT画像
(界面活性剤系)

画像である。このように乾燥過程では、乾燥収縮に伴って供試体内部に亀裂が生じるため、乾燥が促進すると同時に急激な強度低下が予測される。

(3) 乾燥方向の密度変化

図-2 3は、図-9と同様の結果であり、供試体中央部の水平断面半径方向の平均CT値を経過時間ごとに表わしたものである。これより、時間の経過と共にCT値が中心方向に向かって低下していることから、水が蒸発していることが明らかである。また、その乾燥過程において供試体中央部のCT値も実験開始後数日で低下が始まっているため、供試体中央部の水分も実験開始直後から徐々に蒸発していることが考えられる。このことから、もし実地盤においてSGMが乾燥する環境下に置かれた場合には、乾燥による水の蒸発は比較的広範囲におよぶことが予測される。また、実験開始後20日後において、供試体中心からの距離が24.2mmの位置の平均CT値が同位置の他の結果と比較して急激に下がっている。本画像解析では、図-1 1で示したように平均CT値の算出領域を一定にしていることから、供試体が乾燥によって収縮したことによって、算出領域に空気の領域が入ってきたことを示している。

以上より乾燥現象は、浸透現象よりも短期間かつ広範囲におよぶことが考えられる。また、乾燥による収縮は気泡混合処理土内部に亀裂を生じさせ、直接強度の低下に繋がる恐れがある。このため、SGMが乾燥環境下に長時間さらされないように十分注意する必要がある。

5. 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浸透特性および乾燥特性について、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。

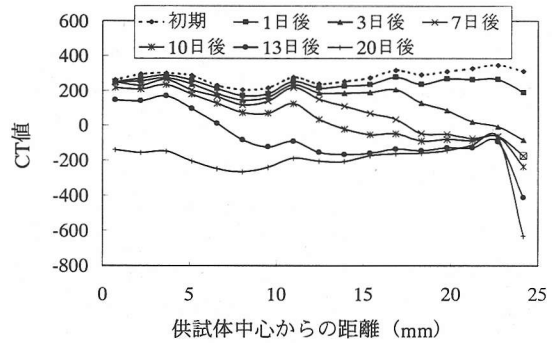


図-2 3 横断面半径方向平均CT値
(界面活性剤系)

- (1) 産業用X線CTスキャナを用いることにより、気泡混合処理土供試体の密度や空隙などの物性値の分布が求められる。よって、この装置はその供試体の内部評価に有効な手段であるといえる。
- (2) 気泡混合処理土内部の気泡は、浸透現象において水と置き換わる可能性が高く、気泡量が多いほど浸透量も多い。また、浸透量と気泡群減少量は、必ずしも1対1に対応するのではなく、外部より新たな吸水作用がなくても空気が水に置き換わる現象が確認された。しかしこれらの現象解明については、今後さらなる検討が必要であると考えられる。
- (3) 供試体レベルでの考察ではあるが、乾燥現象は、浸透現象よりも短期間かつ広範囲におよぶことが確認された。また、乾燥による収縮は気泡混合処理土内部に亀裂を生じさせ、直接強度の低下に繋がる恐れがある。よって、SGMが乾燥環境下に長時間さらされないように十分注意する必要があると考える。

以上より、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。気泡混合処理土の品質管理において、その浸透特性および乾燥特性を把握することは重要であり、実際の現場において採取された試料の工学的特性が非破壊かつ3次元的に解明できたことは大変意義があると考えられる。しかし、本研究で対象とした試料は限られており、今後は本論文で得られた知見を、より多くの試料について検討することが期待される。

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部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) 地盤工学会：軽量地盤材料の物性と適用の現状，1998.7.
- 2) 土田 孝：4.地盤改良に関する最近の話題，4.2 リサイクル材の活用（その1），講座「各種構造物の実例にみる地盤改良工法の選定と設計」，土と基礎，vol.46, No.9, pp.37-42, 1998.9.
- 3) 矢島寿一，丸尾茂樹，小川正二：飽和軽量土の初期間隙比・一軸圧縮強さと破壊基準の関係，土木学会論文集，No.554/III-37, pp.251-257, 1996.12.
- 4) 矢島寿一，丸尾茂樹，小川正二：気泡を混入した軽量土のせん断特性，土木学会論文集，No.499/III-28, pp.197-205, 1994.9.
- 5) 土田 孝，横山裕司，水上純一，清水和也，笠井寿太郎：港湾における軽量混合処理土の用途と現地打設実験，運輸省港湾技術研究所，No.833, 1996.6.
- 6) 土田 孝，笠井寿太郎，水上純一，横山裕司，植田和徳：軽量混合処理土に及ぼす養生条件の影響，運輸省港湾技術研究所港湾技研資料，No.834, 1996.
- 7) 輪湖建雄他：軽量気泡混合処理土の乾燥特性，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，pp.496-497, 1997.
- 8) 菊池喜昭，吉野博之：気泡混合処理土の透水特性，港湾技術研究所報告書，第37巻，第1号，1998.3.
- 9) 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.
- 10) Otani, J., Mukunoki, T. and Kikuchi, Y.: Evaluation of engineering property on light-weight soil with air foam using X-ray CT scanner, Eleventh Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering in Korea, pp.57-60, 1999.
- 11) 椋木俊文，大谷 順，永留 健，菊池喜昭：異なる起泡剤を用いた気泡混合処理土の工学的特性評価，軽量地盤材料の物性評価に関するシンポジウム論文集，pp.193-198, 2000.
- 12) 大谷 順，椋木俊文，菊池喜昭：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.
- 13) Mukunoki, T., Otani, J., Nagatome, K. and Kikuchi, Y.: Evaluation of engineering property of in-situ light weight soil with air foam using X-ray CT Technique, Proc. of Coastal Geotechnical Engineering in Practice, IS' Yokohama, pp.681-686, 2000.
- 14) 大谷 順，椋木俊文，永留 健，菊池喜昭：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，応用力学論文集，Vol.3, pp.57-64, 2000.
- 15) Satoh, T., Ueno, N., Mitsukuri, K. and Kawano, K.: Underwater casting test of light-weight treated soil made of waste soils, Proc. of Coastal Geotechnical Engineering in Practice, IS Yokohama pp.709-714, 2000.
- 16) 古谷俊明：軽量盛土材としての気泡モルタル，土と基礎，vol.37, No.2, pp.73-77, 1989.
- 17) 椋木俊文：地盤工学におけるX線CT法の適用に関する研究，熊本大学博士論文，2001.3.

(2001. 3. 16 受付)

CHARACTERIZATION OF SEEPAGE AND DRYING ON LIGHT WEIGHT SOIL WITH AIR FOAM USING X-RAY CT METHOD

Jun OTANI, Toshifumi MUKUNOKI, Takeshi NAGATOME,
Yoshiaki KIKUCHI and Takao SATOH

The purpose of this paper is to characterize seepage and drying properties of light weight soils with air foams using industrial X-ray CT scanner. A series of water absorption test and drying test were conducted using in-situ light weight soils which were sampled at the trial construction site of new Kumamoto seaport, Japan. A series of CT scanning for those specimens during the tests were also conducted for a long period and the effect of air foams for seepage and drying was evaluated. Finally, the effectiveness of industrial X-ray CT scanner in geotechnical engineering was confirmed based on those results.