

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.45    NO.2    June 2006

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# 港湾空港技術研究所報告(REPORT OF PARI)

第 45 卷 第 2 号 (Vol. 45, No. 2), 2006年 6月 (June 2006)

## 目 次 (CONTENTS)

1. NOWPHAS波浪観測データを同化させた波浪推算法の開発とその特性の検討  
..... 橋本 典明・河合 弘泰・永井 紀彦 ..... 3  
(Development of Adjoint WAM Model to NOWPHAS Wave Observation Data  
..... Noriaki HASHIMOTO, Hiroyasu KAWAI, Toshihiko NAGAI)
2. 気泡量の違いによる気泡混合処理土の透水・吸水特性の変化  
..... 菊池 喜昭・永留 健・水谷 崇亮 ..... 29  
(Permeability and Absorption Property Change of Light Weight Soil with the Change of the Fraction of Air Foam  
..... Yoshiaki KIKUCHI, Takeshi NAGATOME, Taka-aki MIZUTANI)
3. アーク形の矢板とトラスを有する新形式二重矢板護岸構造の水平抵抗性能の評価  
..... 菊池 喜昭・北詰 昌樹・水谷 崇亮・恩田 邦彦・平嶋 裕・木下 雅敬・森 玄 ..... 51  
(Lateral Resistance of Arc Shaped Double Sheet Wall with Truss Structure  
Yoshiaki KIKUCHI, Masaki KITAZUME, Taka-aki MIZUTANI, Kunihiko ONDA, Yutaka HIRASHIMA, Masanori KINOSHITA, Gen Mori)
4. ゴムチップ混合固化処理土のせん断時の破壊メカニズム  
..... 菊池 喜昭・永留 健・御手洗 義夫 ..... 87  
(Failure and Permeability Properties of Cement Treated Clay with Tire Chips under Shear Deformation  
..... Yoshiaki KIKUCHI, Takeshi NAGATOME, Yoshio MITARAI)
5. 港湾工事に用いる高炉水砕スラグの硬化特性  
..... 菊池 喜昭・中島 研司・木村 淳治・水谷 崇亮 .....105  
(Solidification of Granulated Blast Furnace Slag used for Port Construction  
..... Yoshiaki KIKUCHI, Kenji NAKASHIMA, Junji KIMURA, Taka-aki MIZUTANI)
6. 深層混合処理工法による液状化抑制効果の検討及び改良深度を縮減した新しい格子配置の提案  
..... 高橋 英紀・山脇 秀仁・北詰 昌樹・石橋 伸司 .....135  
(Effects of Deep Mixing Method on Liquefaction Prevention and Proposal on New Arrangement of Grid-type Improvement  
..... Hidenori TAKAHASHI, Shuuji YAMAWAKI, Masaki KITAZUME, Shinji ISHIBASHI)
7. 耐海水性ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性  
..... 宮田 義一・若林 徹・濱田 秀則 .....169  
(Cathodic Protection Characteristics of Marine Steel Structure Sheathed with Seawater Resistant Stainless Steel  
..... Yoshikazu MIYATA, Toru WAKABAYASHI, Hidenori HAMADA)

## 気泡量の違いによる気泡混合処理土の透水・吸水特性の変化

菊池 喜昭\*・永留 健\*\*・水谷 崇亮\*\*\*

### 要 旨

本研究では、気泡量の違いが気泡混合処理土の透水特性と吸水特性に及ぼす影響を検討した。ここでは、気泡量の異なる気泡混合処理土供試体について透水試験と吸水試験を行い、試験中の供試体内部の透水状況や吸水状況を X 線 CT スキャナを用いて非破壊で観察した。また、CT 画像を解析することによって、供試体の密度分布や水の浸透範囲を求め、透水特性、吸水特性との関係について検討した。

気泡混合処理土の透水・吸水特性についてわかった新たな知見は以下の通りである。

- 1)気泡混合処理土の透水・吸水特性に、気泡量が及ぼす影響は非常に大きい。
- 2)気泡混合処理土の透水現象は、大きく二つの形態に分類される。一つは、独立した気泡が不透水性材料として機能する場合であり、もう一つは連亘した気泡群が水みちとして機能する場合である。後者のような現象は気泡混合率(=気泡の体積/全体の体積)が 30%くらいから顕著となる。
- 3)気泡混合処理土の吸水は、水みちができるような条件では初期に水みちを満たすように吸水するが、十分に独立した気泡の水への置換速度は、水みちの存在にはあまり影響されない。

キーワード：X 線 CT スキャナ，画像解析，気泡混合処理土，三軸透水試験，水浸試験

---

\* 地盤・構造部基礎工研究室長

\*\* 基礎工研究室受託研修生(東亜建設工業株)

\*\*\* 地盤・構造部主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5057 Fax：046-844-0618 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

## **Permeability and Absorption Property Change of Light Weight Soil with the Change of the Fraction of Air Foam**

**Yoshiaki KIKUCHI\***  
**Takeshi NAGATOME\*\***  
**Taka-aki MIZUTANI\*\*\***

### **Synopsis**

Effects of the difference of the fraction of air foam in a light weight soil to the permeability and absorption characteristics are discussed in this paper. Permeability tests using triaxial apparatus and absorption tests of light weight soil specimens with different fraction of air foam were conducted. During these tests, pervious state and absorbed state during these tests are investigated using X-ray CT scanner. Estimating the density distribution change and water absorbed zones of the specimens by analyzing CT images. Relationship between permeability and absorption characteristics are discussed.

Followings are the main conclusions in this study;

- 1) Effect of the fraction of air foam to the characteristics of permeability and absorption of light weight soil is prominent.
- 2) Pervious phenomena of the light weight soil are divided into two categories; one is that air foam works as impermeable media, the other is that air foam works as the zone easy to permeate the water by making a string of hole. Latter mechanism is getting prominent when the fraction of air foam is larger than 30%.
- 3) Absorption velocity of light weight soil is affected by the amount of the isolated volume of air, permeability, and suction of the specimen.

**Key Words:** X-ray CT scanner, image processing analysis, light weight soil with air foam, permeability test by triaxial apparatus, absorption test

---

\*Head, Foundations Division, Geotechnical and Structural Engineering Department  
\*\* Trainee of Foundations Division, Geotechnical and Structural Engineering Department  
\*\*\* Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5057 Fax : +81-46-844-0618 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

目 次

要 旨.....	29
1.まえがき.....	33
2.既往の研究.....	33
2.1 気泡混合処理土の透水・吸水特性に関する研究.....	33
2.2 X線を利用した地盤工学の研究.....	34
3.試料の作製方法.....	34
4.気泡混合処理土の透水・吸水特性.....	34
4.1 透水試験結果.....	34
4.2 水浸試験結果.....	41
5.考察.....	45
5.1 気泡混合処理土の透水特性.....	45
5.2 気泡混合処理土の吸水特性.....	47
6.結論.....	48
7.あしがき.....	49
参考文献.....	49



## 1. まえがき

軟弱地盤における対策工法は、地盤自身の強度を上げる方法が主となるが、地盤の強度増加では対応が困難な場合には、地盤に作用する荷重を軽減する方法が効果的である。地盤に作用する荷重を軽減する代表的な工法として、高含水比の浚渫粘土に気泡を混ぜて軽量化し、セメントを混ぜて強度増加を期待する軽量混合処理土工法がある(沿岸開発技術センター, 1999)。この材料は、地盤沈下を抑制したり、擁壁や橋台に作用する土圧を低減させたりするための地盤材料として利用されている。

港湾工事では、軽量混合処理土のひとつである気泡混合処理土を主に水面下で使用するため、長期間経過後に気泡の一部が水に置き換わり、密度が増加することが懸念されている。また、海水との接触によって気泡混合処理土の強度が低下する可能性も考えられる。これらの現象は、いずれも材料の透水特性や吸水特性に深く関係がある。このため、気泡混合処理土の透水特性や吸水特性を把握することは、この材料の長期的な特性の変化を考える上で非常に重要な課題である。

一方、近年のコンピュータの発達に伴い、医療分野においてX線CTスキャナ装置が導入され、画像診断技術として多く利用されている。この技術は、対象物内部の密度分布を非破壊かつ三次元的に評価可能であることから、産業分野にも普及しており、その用途も増えている。地盤工学の分野では、気泡混合処理土のように不均質な材料の内部構造の把握に適した装置であると考えられる。

本研究は、気泡量を変えることによって目標密度を変えた気泡混合処理土の透水・吸水特性を把握するために、三軸透水試験と水浸試験を行うとともに、試験期間中の気泡混合処理土の内部状況をマイクロフォーカス X 線 CT スキャナによって観察することにより、気泡混合処理土の透水・吸水特性を微視的に評価することを目的とした。

なお、今回用いたX線CTスキャナは、平成16年3月に港湾空港技術研究所が地盤工学への応用を目的として導入したマイクロフォーカス X 線 CT スキャナ装置 (SMX-225CT: 島津製作所) である(菊池ら, 2006)。

## 2. 既往の研究

### 2.1 気泡混合処理土の透水・吸水特性に関する研究

本研究で対象とした気泡混合処理土は、浚渫粘土を母材とし、気泡を混ぜ、セメントで固化処理をした軽量地盤材料 SGM(Super Geo Material)軽量土(土田ら, 1999)の一

つで、運輸省港湾技術研究所を中心に開発されたものである。

気泡混合処理土の透水特性や吸水特性を知ることは、施工後の密度管理や海水による劣化の問題の有無を明らかにするために重要であることから、これまでもいくつかの研究がなされている。

森ら(1994)は、海成粘土を母材として作製された密度  $0.8\text{g/cm}^3$  と  $1.0\text{g/cm}^3$  の気泡混合補強土の三軸透水試験を行い、その透水係数は動水勾配の影響を受けず、 $10^{-6}\text{cm/s}$  のオーダーであることを報告している。

菊池・吉野(1998)は、浚渫粘土で作製された密度  $1.1\text{g/cm}^3$  の気泡混合処理土に対して、三軸透水試験、定ひずみ速度圧密試験などを実施して透水特性を検討した。この検討に先立ち、菊池らは、気泡混合処理土と一般的に言われる不飽和土との違いについて言及しており、気泡混合処理土は、内部に気泡を有しているものの、気泡の存在形態の違いから、基本的には、不飽和土としての取り扱いができないとしている。

菊池・吉野の検討の結果、定ひずみ速度圧密試験結果に対して間隙流体の圧縮性を考慮した解析手法を用いることによって透水係数を推定できることを示した。また、その結果から、透水時に水が気泡を避けて通水している可能性があるとして指摘した。この点に関してより具体的に現象を把握することを目的に、大谷ら(2002)は、気泡混合処理土の長期吸水試験を実施し、その際の供試体内部の密度変化を産業用X線CTスキャナ装置で観察した。その結果、数mm程度の大きな気泡に水が進入してくる場合、気泡の周りがすべて浸透領域で囲まれたあと、気泡内部に水が浸入していると報告している。また、徳永・大谷(2003)は、海成粘土を母材とした密度  $1.1\text{g/cm}^3$  の気泡混合処理土の透水試験を行い、透水過程で得られたX線CT画像をもとに、浸透距離から透水係数を評価する方法を提案している。これらの一連の研究における透水現象とX線CTスキャナの観察との関係は菊池らによってまとめられている(Kikuchi et al., 2005)。

また、星野ら(1995)は、砂を母材とした配合条件の異なる気泡混合軽量土の三軸透水試験を行い、気泡量の減少に伴い透水係数が小さくなることを報告している。

以上のように、これまでに気泡混合処理土の透水特性や吸水特性についてはいくつかの検討事例があるが、検討が十分とは言えず、特に、X線CT装置の限界もあり、十分な観察が出来ていないと考えられる。

なお、渡部らは気泡量の異なるSGMについて電子顕微鏡(SEM)画像をとり、気泡量が多ければ気泡同士が繋がりが合っている可能性を報告している(Watabe et al., 2004)。

## 2.2 X線を利用した地盤工学の研究

1895年にレントゲンがX線を発見して以来、医療分野においてX線技術は大変注目を集めるようになった。それは、人体内部をメスを入れずに、患者の検査・診断が可能となったからである。その後X線技術は、医療分野のみならず、産業分野にも導入されていった。

地盤工学の分野におけるX線技術の利用は、1980年代初期から始まっている。阪上ら(1980)は、X線写真を利用することによって、室内実験のために採取された不均質なサンプルの中から、より高品質なものを選別できることを発表した。また、西尾ら(1980)は、模型実験で地中に埋設された埋設管とその周辺の地盤との間に相対的な変位が生じたときに発生したすべり線をX線写真によって報告した。

港湾の関係では、善ら(1982)によって、港湾地域でサンプリングした試料の乱れの状況の把握を行うほか、力学試験を実施して、X線写真から判別されるクラックと力学特性の関連性について検討した。また、石井ら(1987)は、この研究を発展させて、サンプリングした試料の内部の乱れが一軸圧縮試験に及ぼす影響について詳細な検討をした。

しかし、これらのX線写真は、元来三次元物体にX線を照射し、透過してきたものを二次元のフィルムに投影したものであるため、映像は奥行きに重複が起こるといった弱点があった。

1973年英国EMI社は、従来のX線写真の欠点を除いた物体の断面像を表示することができるX線CTスキャナを開発した。X線CTスキャナは物体を三次元に可視化できることから、医療分野をはじめ産業分野にも急速に普及していった。地盤工学の分野では、地盤の内部物性や破壊現象、浸透現象を評価している研究などもいくつか報告され、その用途は増えつつある(例えば Otani, 2003)。

以上のように、X線CTスキャナを用いた地盤工学的研究は、複合地盤材料の挙動に関する研究や密度変化を伴う挙動を把握する上で重要なツールとなることが期待されている。

## 3. 試料の作製方法

本研究で対象とした試料は、浚渫粘土に気泡を混ぜ、セメントで固化処理をした気泡混合処理土である。母材は、東京湾で浚渫された粘土である。この粘土の物理特性を表-1に示す。固化材には、高炉セメントB種を用いた。また、起泡剤には、界面活性剤系のものを用いた。

表-1 浚渫粘土の物理特性

土粒子密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	粒度組成 (%)			
			礫	砂	シルト	粘土
2.758	104.2	43.7	0.0	1.7	31.2	67.1

表-2  $1\text{m}^3$ あたりの配合表

目標密度	$1.25\text{g}/\text{cm}^3$ 気泡無し		$1.1\text{g}/\text{cm}^3$ 気泡12.7%		$0.8\text{g}/\text{cm}^3$ 気泡37.8%		$0.6\text{g}/\text{cm}^3$ 気泡58.6%	
	質量 (kg)	体積 (L)	質量 (kg)	体積 (L)	質量 (kg)	体積 (L)	質量 (kg)	体積 (L)
乾燥土	283	103	246	89	152	55	94	34
海水	904	878	787	764	560	544	347	337
セメント	60	20	61	20	69	23	130	43
軽量材	—	—	6	127	19	378	29	586
全体	1247	1000	1100	1000	800	1000	600	1000

この実験では、目標密度の異なる4つの配合の試料を作製した。試料は、浚渫粘土に人工海水を混ぜて所定の含水比としたのちに、気泡と固化材を混練りして作製した。表-2には各配合  $1\text{m}^3$ あたりの配合表を示す。なお、気泡無しと目標密度  $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ のケースでは、調整泥土(浚渫粘土+人工海水)の含水比を母材の液性限界の3.07倍とし、目標密度  $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ と  $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ の配合では、調整泥土の含水比を3.55倍とした。これは実施工で要求される条件を勘案したもので、ほぼ同じ強度を持ち、かつ流動性もほぼ等しいような試料を作製するために決定したものである。

これらの試料を直径50mm、高さ約100mmの軽量モールドに流し込み、モールド上面をラップで覆った後、温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度95%以上の養生容器に入れて1ヶ月以上養生した。

なお、詳細については後述するが、図-6のX線CT画像などをみるとわかるように、供試体内にある気泡の大きさは、通常のサイズのものでは、0.2mmから0.3mm程度であり、時々0.5mm程度の大きなものが混在している状況にある。

## 4. 気泡混合処理土の透水・吸水特性

### 4.1 透水試験結果

#### (1) 供試体および実験方法

透水試験に用いた各供試体の透水試験前の実測密度を表-3に示す。供試体の寸法は、直径50mm、高さ100mmである。気泡が混合されている供試体では、実測された湿潤密度が目標密度よりも若干高かった。これは、主に供試体作製時に気泡が消泡したことが原因として考えら

表-3 各供試体の実測密度

	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )
気泡無し	1.232
目標 1.1g/cm <sup>3</sup>	1.114
目標 0.8g/cm <sup>3</sup>	0.816
目標 0.6g/cm <sup>3</sup>	0.676

れる。

なお、養生期間中には供試体中の水分量の変化がなかったとすると表-3に示した各供試体の透水試験前の湿潤密度から、気泡無し、目標密度 1.1, 0.8, 0.6g/cm<sup>3</sup>のそれぞれの供試体に含まれている気泡の量は、それぞれ 2.4, 21.5, 68.0, 98.4cm<sup>3</sup>であったと考えられる。これと、表-2から求められる気泡量との差を消泡量であるとする、目標密度 1.1, 0.8, 0.6g/cm<sup>3</sup>のそれぞれの供試体の消泡量は、それぞれ 2.5, 3.9, 24.9cm<sup>3</sup>であったと考えられ、それぞれ 10, 5, 20%の消泡率に相当する。

三軸透水試験は、X線CT専用三軸試験装置(菊池ら2006)を利用して実施した。実験は次のような手順で行なった。

- 養生した試料をモールドから取り出し、端面成形のみ行い(側面のトリミングは行わない)、直径 50mm、高さ 100mm の供試体に成形する。
- 供試体側面にグリスを塗布し、供試体をメンブレンでシールし、三軸室にセットする。
- セル圧を 50kPa、背圧 0kPa で 3 日間圧密する。
- 圧密終了後に CT 撮像を行う。
- 供試体下面側の水圧が約 20kPa となるように、供試体の下面側のビュレットに圧力を加え、供試体内の通水を始める。
- 所定の通水時間経過ごとに CT 撮像を行う。一回の CT 撮像は、約 20 分間の撮像時間を要した。このため、撮像時に供試体上下の配管を遮断し、透水試験を一時的にとめ、撮像終了後に試験を再開するという手順を繰り返した。
- 通水量が 60cm<sup>3</sup>以上となるまで通水する。
- 通水終了後に CT 撮像を行う。

X線CTによる撮像と解析では、ある厚さを持った水平方向の1枚の板を解析の対象としている。この板をいくつもの要素(voxel)に分解して、X線の透過量から逆解析により各 voxel に GL 値という X線吸収率を示す数値を割り当てていくものである。X線吸収率と密度には正の相関があるので、GL 値は基本的に voxel の平均的な密度を表している。今後示していく画像及び各種解析データは各 voxel の GL 値をもととしたものになっている。

つまり、各 voxel の平均的な密度の指標が示されるので、その voxel のサイズをどのように取るかが解析結果に大きく効いてくる。今回の解析では、通常は、1voxel は水平方向 0.12mm×0.12mm 厚さ 1mm として解析している。一方、図-6のような拡大画像では、1voxel は水平方向 0.01mm×0.01mm 厚さ 0.01mm としている。

また、この実験では、供試体とメンブレンの間にグリスを塗布して実験を行った。それは、次の理由による。別途作製した目標密度 1.1g/cm<sup>3</sup>の気泡混合処理土供試体を用いて、供試体側面とメンブレンの間にグリスを塗布した供試体と塗布していない2つの供試体の透水試験後に X線 CT 撮像をした。なお、ここに示した供試体の母材は表-1に示した粘土とは異なる粘土であるため、配合条件は表-2とは異なっている。

図-1に透水試験前後の CT 画像を示す。CT 画像では明るいほど密度が高く、暗いほど密度が低いことを示している。図-1(a)をみると、グリスを塗布していない供試体の側面に近い部分では、試験前にあった暗く表される低密度領域や大きめの気泡と思われる黒っぽい円形領域が減少していることが確認できる。これに対し、図-1(b)に示したグリスを塗布した供試体では、画像中の明暗の変化はほとんどない。つまり、密度はほとんど変わらなかったものと考えられる。これらのことから、供試体の側面にグリスを塗布しない場合には、供試体側面から供試体内部に水が浸入するような傾向にあることが疑われた。少なくとも、この実験で想定するような供試体下方から

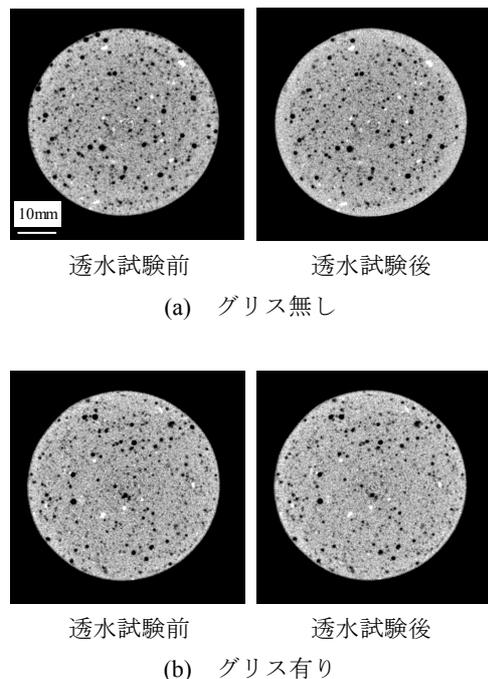


図-1 透水試験前後の横断面 CT 画像

上方に向けての一次元の水の流れを考えようとしているにもかかわらず、想定方向以外の向きの水の流れが生じていることが懸念された。また、このようになった理由はメンブレンと供試体の間に卓越した水の流れがあるためではないかと考えられ、その流れは供試体側面にグリスを塗布することによって、抑えられるものと考えられる。

そこで、本研究では供試体側面にグリスを塗布して透水試験を行った。なお、供試体側面にグリスを塗布したものと塗布しないものとで測定された透水係数は、どちらも  $1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$  程度でほぼ同じ値であり、メンブレンとの境界を流れる水の影響によって透水係数の測定結果が変わるということにはなかったものと考えられる。

(2) 透水過程における内部物性の変化

図-2に各供試体の三軸透水試験における経過時間と流入、流出水量の関係を示す。なお、目標密度  $0.8 \text{ g/cm}^3$  と  $0.6 \text{ g/cm}^3$  の供試体の透水試験では、試験開始直後に供試体上面から空気が流出していることが目視で観察された。ただし、この流出空気は、装置の構造上、流出量を計測するビュレットまで流れ込まないようになっているため、試験中は配管経路内にとどまっていたので、若干の体積変化の可能性はあるが、流出水量として示したものは、供試体から流出した流体(水+気体)の体積とほぼ等しいと考えてよい。目標密度  $1.1 \text{ g/cm}^3$  の供試体についても空気が流出した可能性があるが、目視ではわからなかった。

図-2からわかるように、各供試体での流入量と流出量は、ほとんど等しかった。また、気泡無しの供試体と目標密度  $1.1 \text{ g/cm}^3$  の供試体では、流入量、流出量ともに経過時間にほぼ比例して増加していた。一方、目標密度  $0.8 \text{ g/cm}^3$  の供試体では、通水の初期に流入量と流出量が

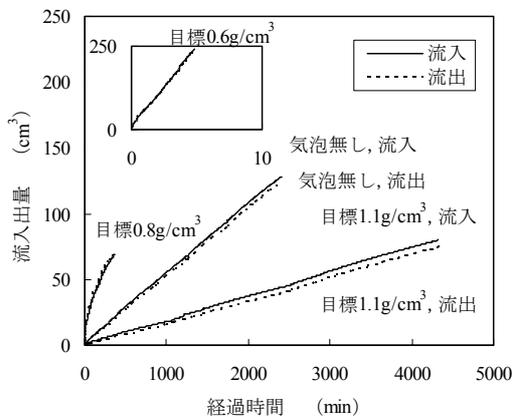
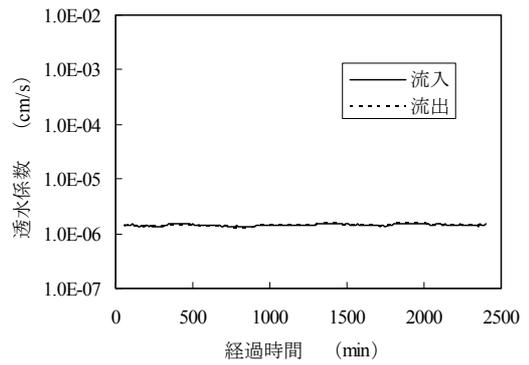
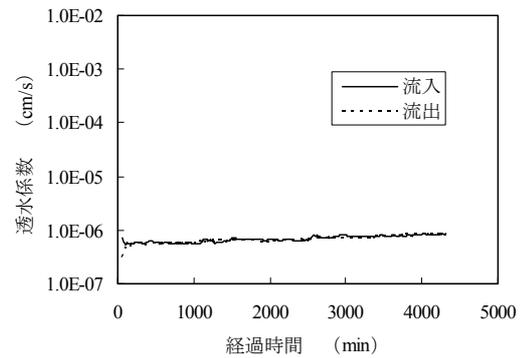


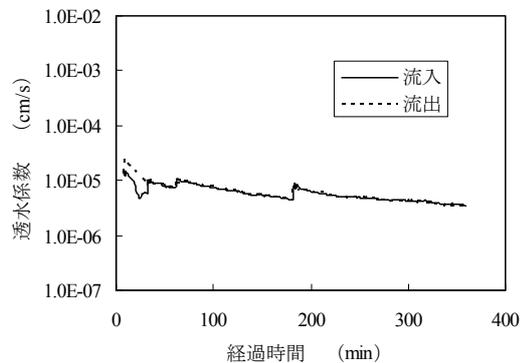
図-2 流入量と経過時間



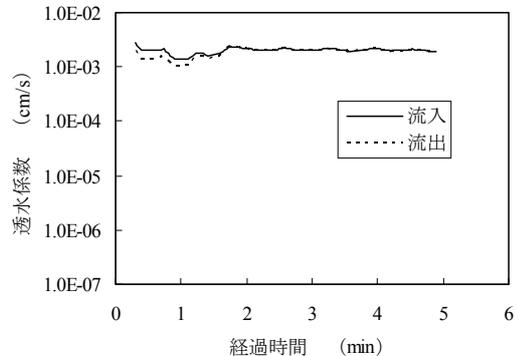
(a) 気泡無し



(b) 目標密度  $1.1 \text{ g/cm}^3$



(c) 目標密度  $0.8 \text{ g/cm}^3$



(d) 目標密度  $0.6 \text{ g/cm}^3$

図-3 透水係数と経過時間の関係

著しく大きく、流入出速度が時間の経過とともに遅くなるような傾向がみられた。また、目標密度  $0.6\text{g/cm}^3$  の供試体では、流入出量が著しく多く、5 分程度しか通水することができなかった。

図-3 に各供試体の透水係数と経過時間の関係を示す。図-2 からも推測できるが、気泡無し、目標密度  $1.1\text{g/cm}^3$

の供試体では、透水係数は時間の経過に対してあまり変化していないが、目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$  の供試体では、時間の経過とともにわずかに透水係数が低下する傾向がみられた。なお、特に目標密度  $0.8, 0.6\text{g/cm}^3$  の供試体では、実験の初期を中心に部分的に透水係数が不連続になっている箇所がみられる。これらの不連続は、透水試験を中断して CT 撮像を行い、透水試験を再開したときに生じている。これは、供試体上下の配管を遮断して CT 撮像を行う間に、供試体内の水圧が通水中の状態から変化した状態で通水を再開したためであると思われる。

表-4 に各供試体の透水試験前後の湿潤密度と透水試験終了付近の透水係数の値を示す。目標密度  $1.1, 0.8, 0.6\text{g/cm}^3$  のいずれの供試体とも、透水試験後には密度が増加していた。とくに目標密度  $0.8, 0.6\text{g/cm}^3$  の供試体の

表-4 透水試験前後の湿潤密度と透水係数

	湿潤密度 ( $\text{g/cm}^3$ )		透水係数 ( $\text{cm/s}$ )
	試験前	試験後	
気泡無し	1.232	1.229	$1.47 \times 10^{-6}$
目標 $1.1\text{g/cm}^3$	1.114	1.122	$8.33 \times 10^{-7}$
目標 $0.8\text{g/cm}^3$	0.816	0.894	$3.47 \times 10^{-6}$
目標 $0.6\text{g/cm}^3$	0.676	0.951	$1.87 \times 10^{-3}$

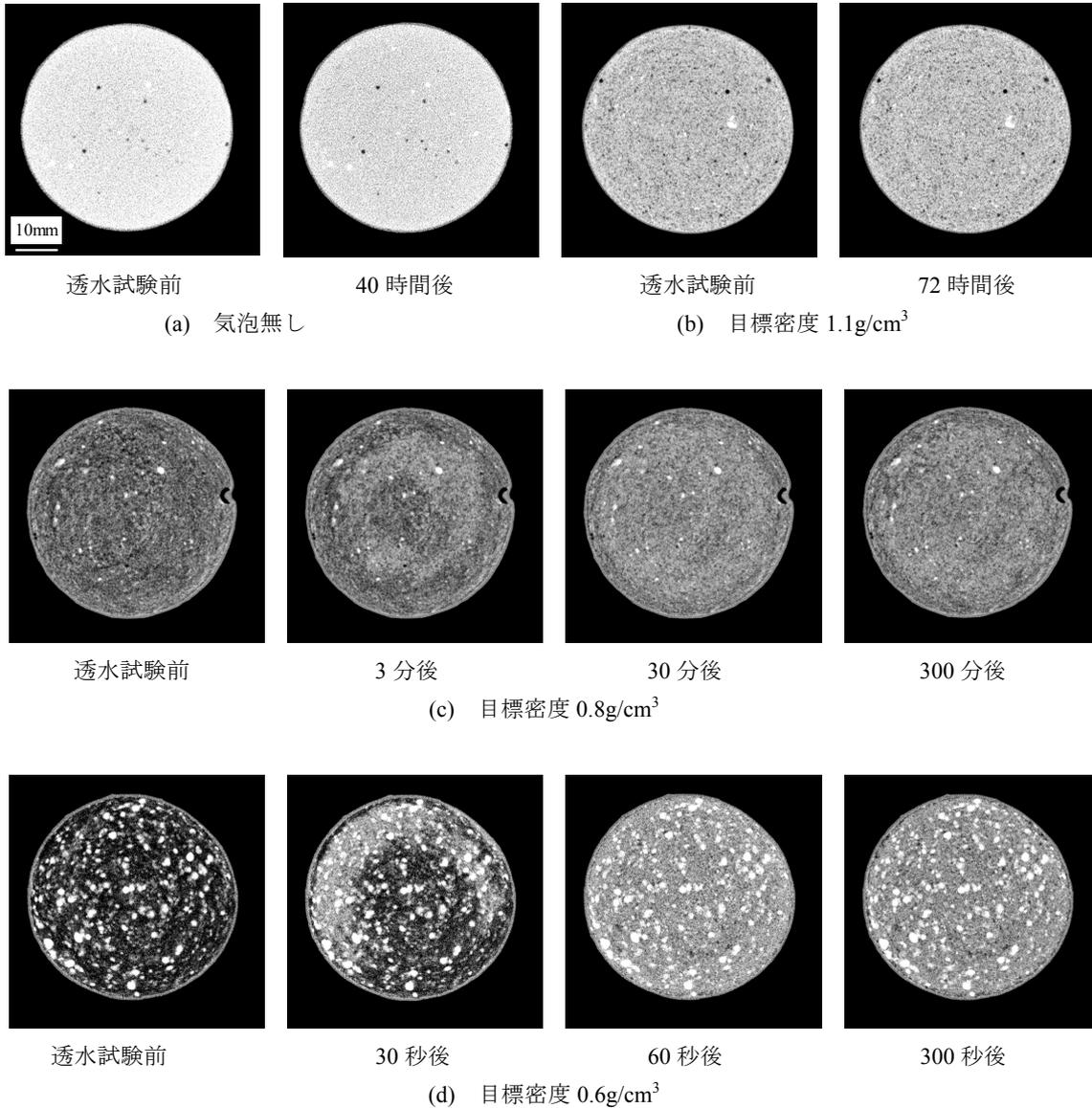


図-4 透水過程における横断面 CT 画像

密度増加が著しい。この密度変化から改めて試験後の供試体中の気泡量を計算すると、目標密度 1.1, 0.8, 0.6g/cm<sup>3</sup> のそれぞれの供試体で、19.9, 52.7, 44.4cm<sup>3</sup> となっていたことになる。それが、透水試験直前には、それぞれ、21.5, 68.0, 98.4cm<sup>3</sup> であったので、それぞれの供試体から 1.6, 15.3, 54.0cm<sup>3</sup> の空気が抜け出していたことになる。

また、透水係数に注目すると、目標密度 1.1g/cm<sup>3</sup> の供試体の透水係数は、気泡無しの供試体よりも小さく、4 種類の供試体の中では最も小さな透水係数となっている。目標密度がそれより小さいものでは、密度が小さくなるにつれて透水係数が増加する傾向にあり、特に、目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup> の供試体の透水係数は、他の供試体の透水係数に比べて著しく大きかった。

図-4 に透水過程における各供試体中央部(供試体高さ 50mm)付近の横断面画像を示す。図-4(a), (b)に示した気泡無しと目標密度 1.1g/cm<sup>3</sup> の供試体では、透水の前後で断面の CT 画像の明暗に変化は見られず、表-4 に示した結果と同じように、密度変化がほとんど生じていないことがわかる。一方、図-4(c), (d)に示した目標密度 0.8、

0.6g/cm<sup>3</sup> の供試体では、透水の初期(0.8g/cm<sup>3</sup> : 3 分後、0.6g/cm<sup>3</sup> : 30 秒後)に、CT 画像がまだらに明るくなる部分(密度が増加する部分)が観察され、その後通水を続けると、ある程度全体的に密度が上昇する様子が観察された。

図-4(a)から(d)にみられた現象を別の観点からみるために、透水過程における供試体の縦断面画像を図-5(a)から(d)に示す。縦断面画像は、断面厚 1mm の横断面画像を高さ方向に重ね合わせて作成したものである。これらの画像を見ると(a)と(b)では透水時間の経過に伴う密度変化の様子は観察されないが、(c)と(d)では通水の初期に供試体の密度が急激に変化し、その後は密度の大きな変化が生じないことがわかる。例えば、(c)に示した目標密度 0.8g/cm<sup>3</sup> の場合には、透水を始めて 3 分後には、下方三分之一ほどの部分の密度が上昇してきている。その後、30 分後までには、供試体全体の密度が増加した傾向にあり、30 分後と 300 分後との間では、密度はほとんど変化していない。(d)に示した目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup> の場合には、最初の 60 秒くらいで、密度が一気に変化した。

図-4(c)の 3 分後の断面画像や図-4(d)の 30 秒後の断面

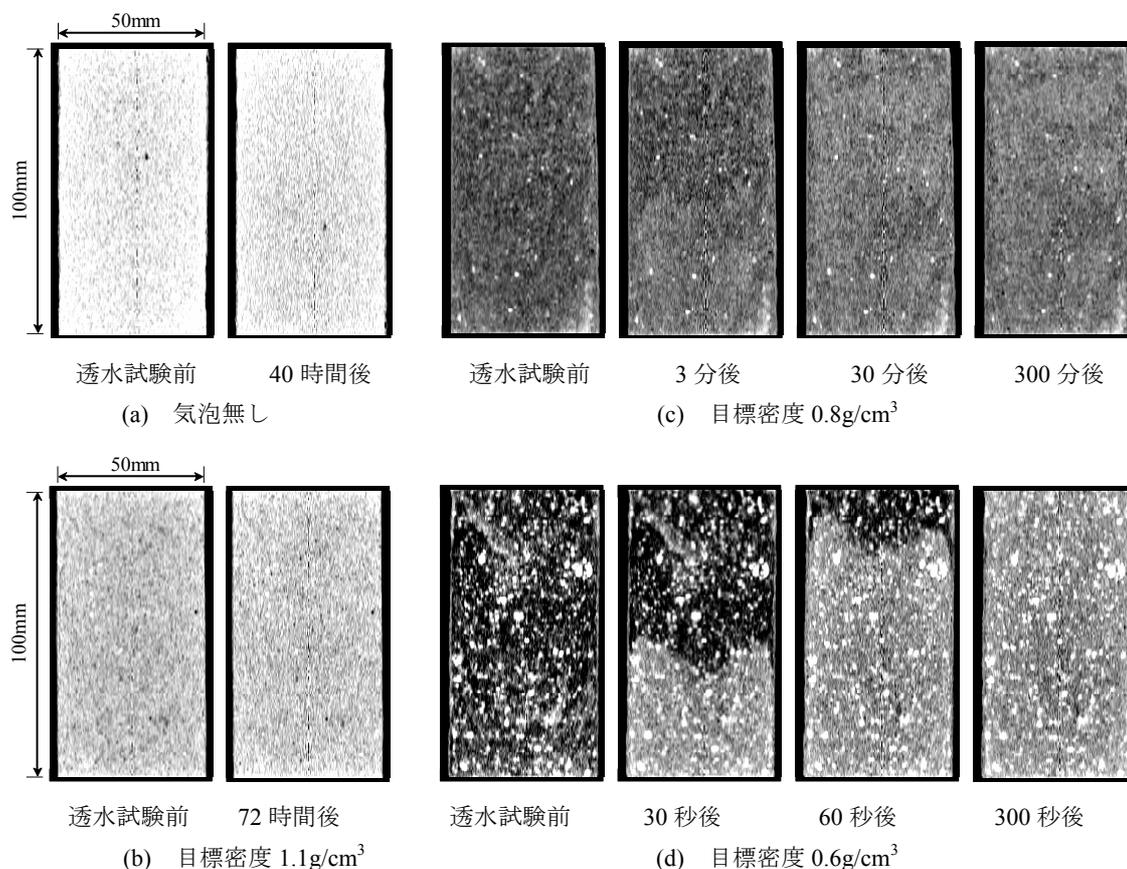


図-5 透水過程における縦断面 CT 画像

画像は、ちょうど密度が変化している際のある高さの一断面を示したもので、まだらに密度が変化していく様子を示している。

図-6 に、目標密度 1.1, 0.8, 0.6g/cm<sup>3</sup> の各供試体の透水過程における供試体高さ方向の密度分布を CT 解析結果から推定したものを示す。この推定は、断面厚 1mm の各断面の voxel に割り当てられた GL 値の平均値を求め、これを平均密度に換算することによって、高さ方向密度分布を求めたものである。

まず、図-6(a)をみると、目標密度 1.1g/cm<sup>3</sup> の供試体は透水過程での密度変化が試験中にほとんどみられない。

これに対し、図-6(b), (c)にある目標密度 0.8, 0.6g/cm<sup>3</sup> の供試体では、透水試験開始直後から供試体下部から密度が増加していることが確認できる。これは、透水試験初期に気泡の一部が水に押し出されて密度が増加したものと推測される。また、初期に大きく密度が増加してしまうと、その後は供試体内部の密度変化はほとんどみられなくなる。

図-6にある各供試体の密度分布と配合表から各高さでの気泡量を推定し、また、透水中の密度変化が、すべて気泡が水に置き換わったことによるものであると仮定して、透水試験中の気泡から水への置換量を求め、この水

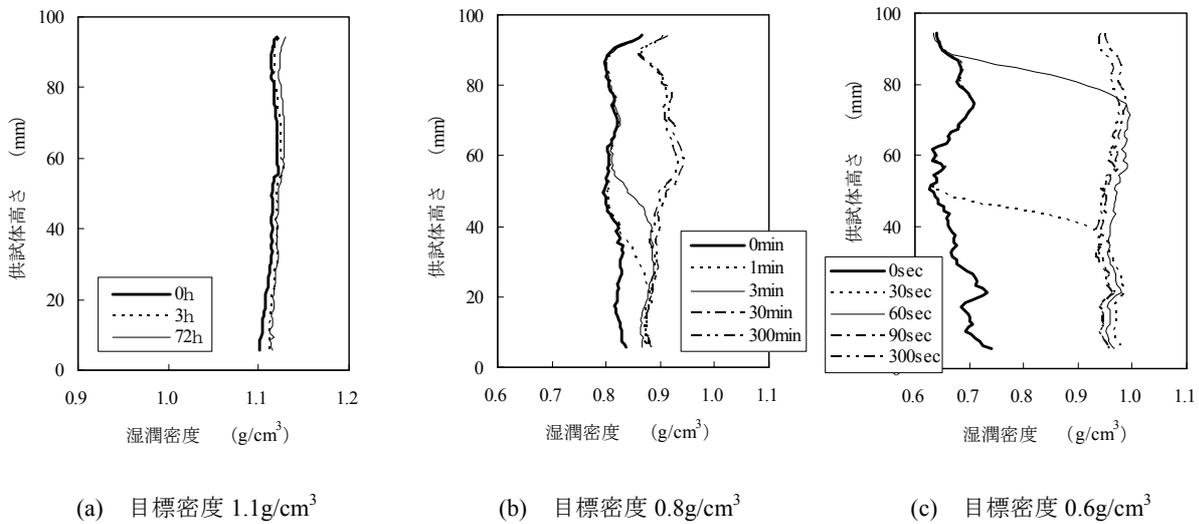


図-6 透水過程における高さ方向密度分布

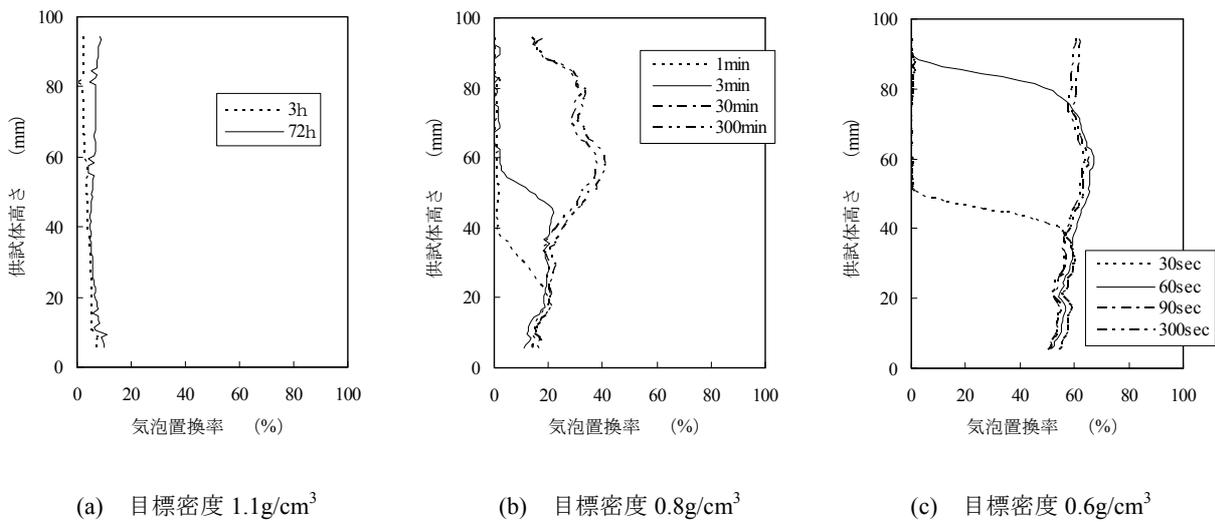


図-7 透水過程における高さ方向気泡置換率分布

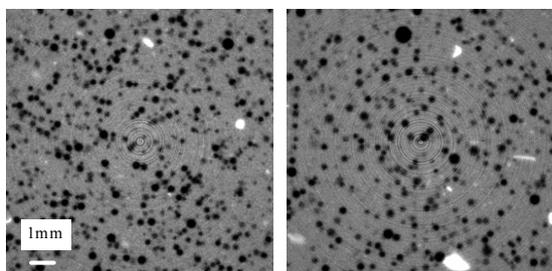
への置換量を元の気泡量で除したものを気泡置換率とした。その結果を図-7 に示す。まず、図-7(a)の目標密度  $1.1\text{g/cm}^3$  の供試体では透水試験を開始して3時間後に供試体下部を中心に気泡置換率が増えており、72時間経過後までに供試体全体で約7%の気泡が置換されている。そして、72時間経過後の置換率も供試体下面がやや大きい、高さ方向にあまり変化がない。図-7(b)は目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$  の供試体の結果である。この場合には、透水試験開始直後に供試体下部から気泡置換率が増えている。そして、透水試験開始30分後には、全体で25%程度の気泡が置換されており、その後は置換率にほとんど変化がない。図-7(c)は目標密度  $0.6\text{g/cm}^3$  の供試体の結果である。この場合も目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$  の供試体と同様、透水試験

開始直後に供試体下部から気泡置換率が増加しているが、ほぼ上面まで均一に気泡が置換される90秒を過ぎてからは置換率の増加はほとんど見られなくなっている。また、透水試験開始300秒後には供試体全体で約57%の気泡が置換される結果となった。

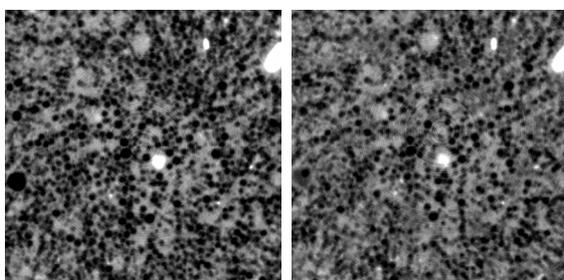
図-8 に透水試験前後の目標密度  $1.1, 0.8, 0.6\text{g/cm}^3$  の供試体中央部付近(供試体高さ50mm)の横断面拡大画像を示す。これらの写真では、概ね4つの明るさの部分に分けて考えることが出来る。つまり極めて明るいところ、グレーの部分、やや暗いグレーの部分、暗いグレーの部分の4つの領域である。このうち、暗いグレーの部分は気泡と考えられる領域であり、グレーの部分と白い部分は、固化処理土部分と考えられる領域である。特に白い領域は、セメントの塊や貝殻が存在する領域であると考えられる。やや暗いグレーの部分は水であると考えられる。図-8(b)と(c)をみると暗いグレーの部分が減って、やや暗いグレーの部分が増えていることがわかる。このことから、図-6、図-7 に示した密度の変化は、実際には、気泡が水に置き換わることによって生じた現象であることがわかる。また、(b)や(c)において黒い部分が少なくなっているが、全くなくなっているわけではないこと、密度の変化は透水の初期に生じており、途中からは安定してきている。これらのことから、気泡は選択的に水に置換されており、長期間の通水後も残存する気泡が存在することを示している。

図-5の結果ともあわせてみると、各供試体の密度は下から上に向かって上昇しており、これらの供試体では、空気と水とが置き換わる現象を伴いながら水が流れていたことがわかる。また、密度が増加する面は必ずしも水平ではなく、不定形な形状をしていることもわかる。このことから、供試体内には空気と水が置き換わりやすいところと起こりにくいところが存在していると考えられる。

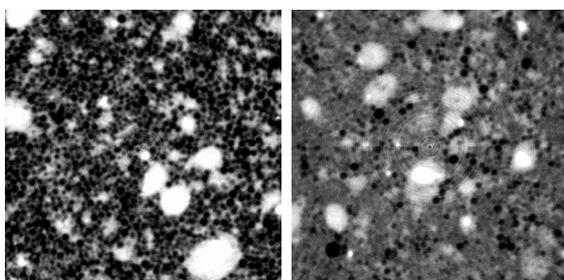
これらのことから、通水によって気泡の一部が押し出される現象は比較的初期に生じ、その後は、気泡の水への置換はほとんど生じないことがわかる。なお、この置換は選択的に行われ、置き換わる気泡と全く置き換わらない気泡とが存在する。また、気泡置換率は供試体中の気泡量によって異なり、目標密度  $1.1\text{g/cm}^3$  では7%とわずかの置換率であるが、目標密度が  $0.8, 0.6\text{g/cm}^3$  と小さくなるにつれて気泡置換率が大きくなる傾向にあった。このことは、気泡を大量に加えて無理に軽量化しようとしても、このような材料を水中で用いようとする場合には、施工後比較的早い段階で密度の大きな変化を生じる可能性が高いことを示している。



透水試験前 透水試験後  
(a) 目標密度  $1.1\text{g/cm}^3$



透水試験前 透水試験後  
(b) 目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$



透水試験前 透水試験後  
(c) 目標密度  $0.6\text{g/cm}^3$

図-8 透水試験前後の横断面拡大画像

## 4.2 水浸試験結果

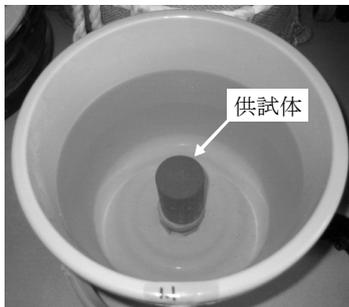
### (1) 供試体および実験方法

水浸試験に用いた各供試体の水浸試験前の実測密度を表-5に示す。供試体の寸法は、直径50mm、高さ100mmである。対象とした供試体のうち目標密度0.6g/cm<sup>3</sup>の供試体の実測密度が目標密度よりも若干高かったのは4.1の場合と同様である。なお、目標密度1.1、0.8、0.6g/cm<sup>3</sup>の供試体に含まれている養生後(水浸試験直前)の気泡混合率(=気泡の体積/全体積)は、それぞれ12%、36%、53%であった。

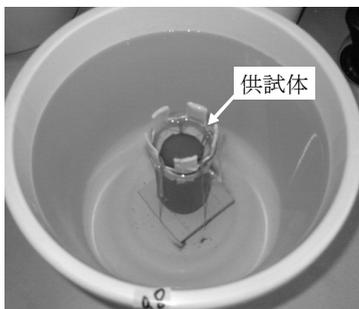
水浸試験は、写真-1に示すように10リットル用のポリバケツに蒸留水を入れて、その中に供試体全体を水浸させて行った。供試体は水温20℃の水の中にむきだしのまま浸け、全ての方向から水が浸入する状態にして試験

表-5 各供試体の実測密度

	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )
気泡無し	1.229
目標 1.1g/cm <sup>3</sup>	1.098
目標 0.8g/cm <sup>3</sup>	0.803
目標 0.6g/cm <sup>3</sup>	0.632



(a) 気泡無し，目標密度 1.1g/cm<sup>3</sup>



(b) 目標密度 0.8g/cm<sup>3</sup>，目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup>

写真-1 水浸試験状況写真

を開始した。試験開始後は、所定の期間ごとにポリバケツから供試体を取り出してCT撮像を行った。同時に供試体の湿潤密度も実測した。また、水浸試験中は、ポリバケツの上面にラップで蓋をしてバケツの水の蒸発を防止した。

水浸試験は開始してから282日後まで行った。

### (2) 吸水過程における内部物性の変化

図-9に、各供試体の水浸試験における経過日数と湿潤密度の関係を示す。なお、水浸試験開始直後に目標密度0.8g/cm<sup>3</sup>と0.6g/cm<sup>3</sup>の供試体では、水に浸けた供試体の中から幾つもの泡が発生し、空気が出ていく様子が目視で観察された。特に0.6g/cm<sup>3</sup>の供試体で空気が多く抜け出していた。

図-9をみると、気泡無しの供試体の湿潤密度はほとんど変化していない。これに対し、目標密度1.1、0.8、0.6g/cm<sup>3</sup>の供試体は、時間の経過とともに吸水し、湿潤密度が上昇した。また、気泡量の多い目標密度0.8、0.6g/cm<sup>3</sup>の供試体の方が気泡量の少ない目標密度

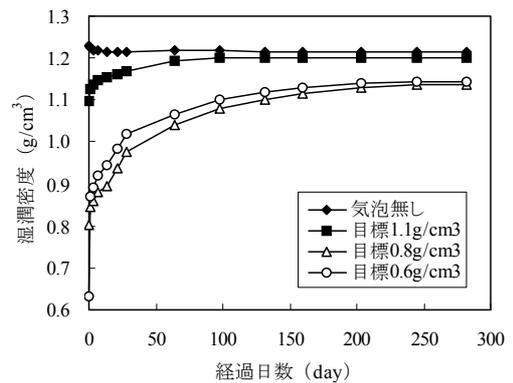


図-9 実測密度と経過日数の関係

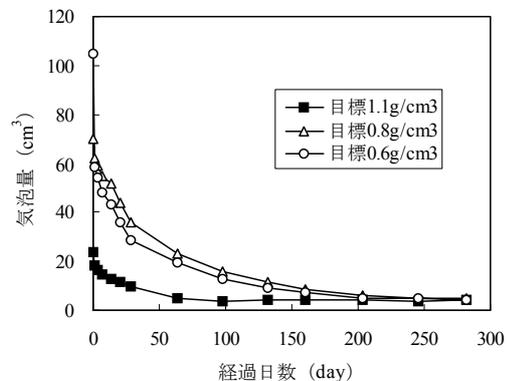


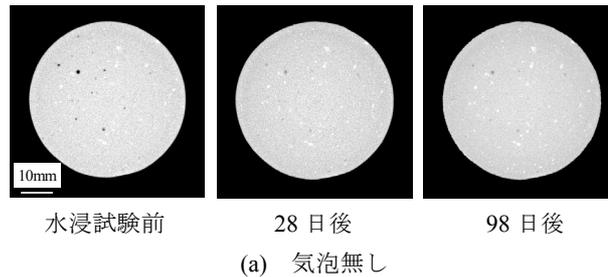
図-10 気泡量と経過日数の関係

1.1g/cm<sup>3</sup> の供試体よりも、湿潤密度の上昇が大きかった。

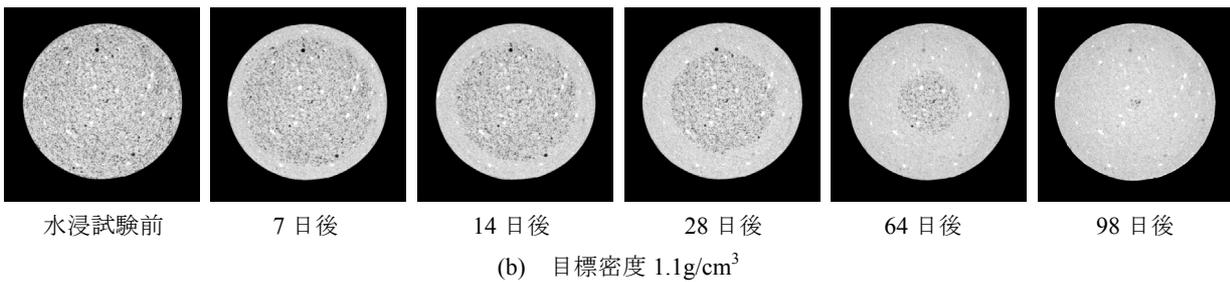
水浸試験での実測密度から目標密度 1.1, 0.8, 0.6g/cm<sup>3</sup> の供試体の密度上昇が、気泡が水に置き換わった影響だけであるとして、供試体内の気泡量を計算した。図-10 に各供試体の吸水過程での気泡量を示す。どの供試体も水浸試験初期ほど気泡量の減少量が大きく、最終的に気泡量 5cm<sup>3</sup> 以下になった。

図-11 に吸水過程における各供試体中央部(供試体高さ 50mm)付近の横断面画像を示す。図-11(a)に示した気泡無し

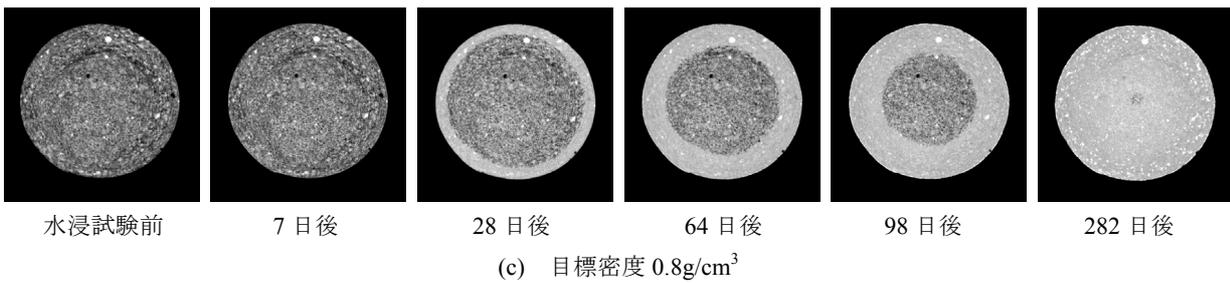
が明るくなっている。このことは、供試体作製時に混入した空気と考えられる領域に水が浸入したことによって生じたものと思われる。ただし、混入空気量が極めて少なかったため、湿潤密度の変化はほとんどなかった。図-11(b), (c)の目標密度 1.1, 0.8g/cm<sup>3</sup> 供試体の断面画像をみると、時間の経過とともに明るい部分が供試体側面から中心に向かって同心円状に広がっていることがわかる。この明るくなったところは、供試体が吸水したことによって気泡と水が置き換わったことを示している。図-11(d)の目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup> の供試体の断面画像をみると、水浸試験 1 日後にまばらで全体的に明るくなっている。その



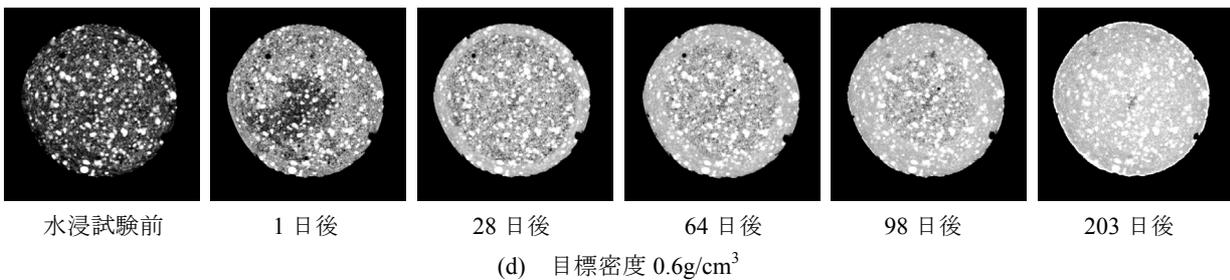
(a) 気泡無し



(b) 目標密度 1.1g/cm<sup>3</sup>



(c) 目標密度 0.8g/cm<sup>3</sup>



(d) 目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup>

図-11 吸水過程における横断面 CT 画像

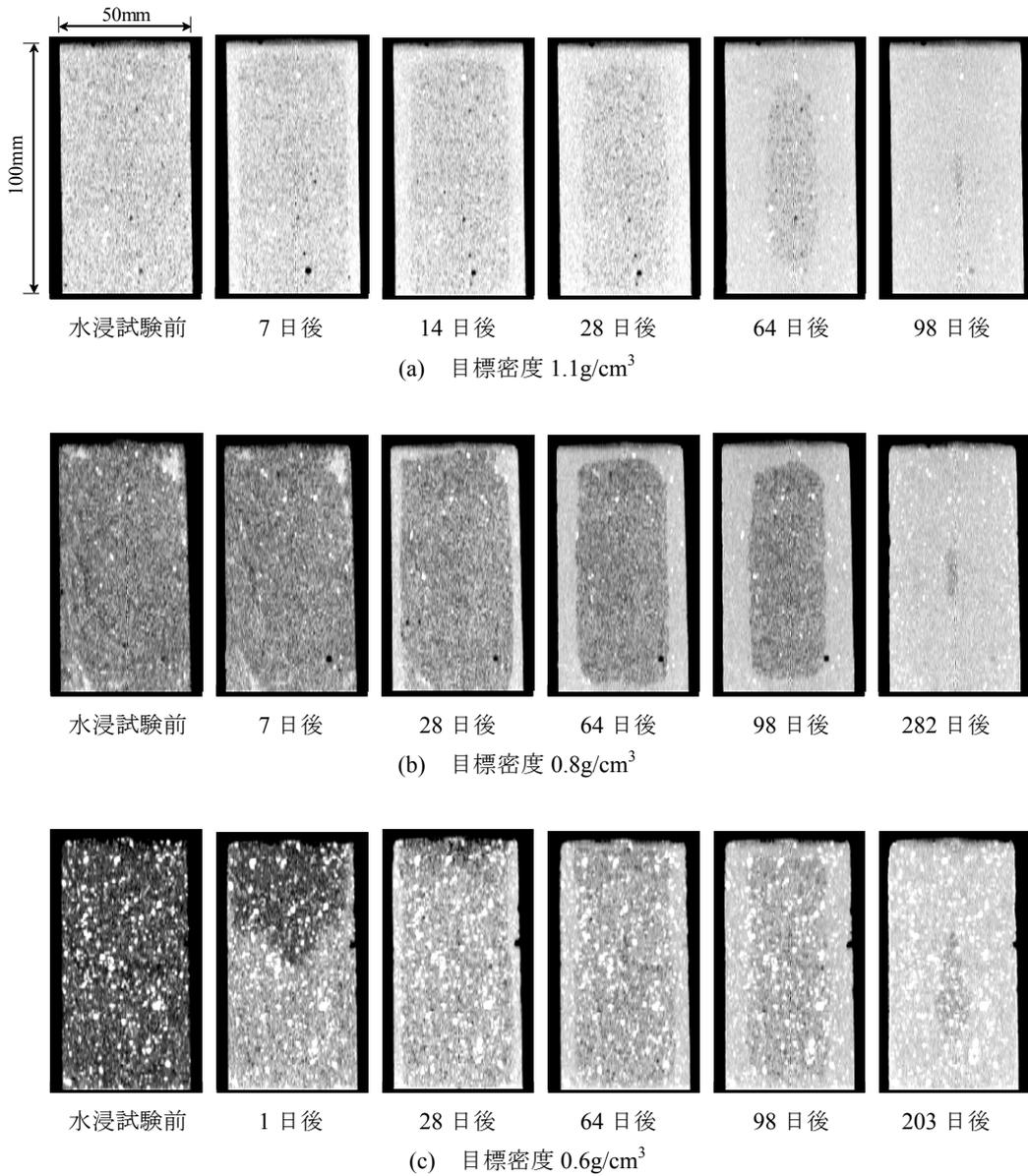


図-12 吸水過程における縦断面 CT 画像

後目標密度 1.1, 0.8g/cm<sup>3</sup> 供試体の断面画像と同様に、時間の経過とともに供試体側面から中心に向かって明るい部分が同心円状に広がっている。

図-12 に吸水過程における目標密度 1.1, 0.8, 0.6g/cm<sup>3</sup> の供試体の縦断面画像を示す。図-12(a), (b)の目標密度 1.1, 0.8g/cm<sup>3</sup> の供試体の縦断面画像は、どちらの供試体とも横断面画像でみられた傾向と同じように、時間の経過とともに供試体と水が接触している面から供試体の中心に向かって明るい領域が広がっている様子が観察できる。図-12(c)の目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup> の供試体は、水浸試験初期に供試体下部から上部に向かって明るい領域が広がっており、約 28 日で全体にわたり密度が増加した。同時に

側面からも吸水しており、28 日以降は他の密度のものと同様側面からの吸水現象のみが見られるようになった。なお、この供試体は、実験開始直後からしばらくの間、供試体上部から空気が流出するのが観察されたものである。

図-13 に、目標密度 1.1, 0.8, 0.6g/cm<sup>3</sup> の各供試体の吸水過程における供試体高さ方向の密度分布を CT 解析結果から推定したものを示す。この推定は、図-7 にある透水過程での密度分布と同様の方法で推定した。各供試体とも時間の経過とともに湿潤密度が上昇していることがわかる。また、目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup> の供試体については、吸水初期に供試体下部の方から大きく湿潤密度が上昇し

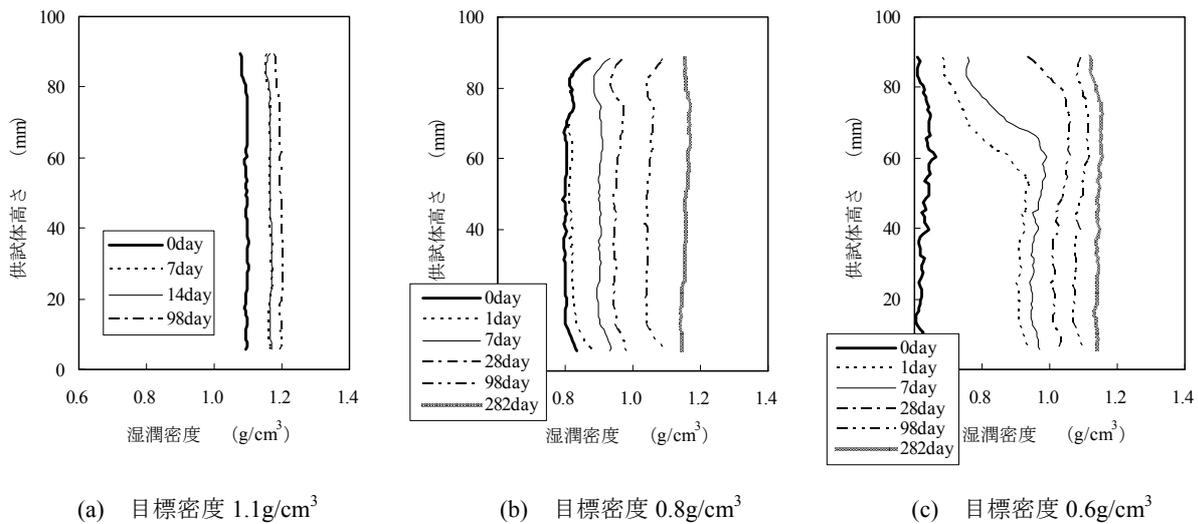


図-13 吸水過程における高さ方向密度分布

ており、試験開始直後に急激な吸水をしたことが窺われるが、そのような現象の大半は1日で終了し、28日までにはほぼ完全に終了したことがわかる。目標密度  $0.6\text{g/cm}^3$  の供試体ほど顕著ではないが、同様の現象が目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$  の供試体についても観察された。

ここで、代表的な断面として、各供試体中央部(供試体高さ  $50\text{mm}$ )の横断面半径方向の平均密度分布の時間変化を図-14に示す。この図における半径方向の平均密度は、供試体横断面の中心から  $0.36\text{mm}$  ごとの各リング領域のGL値の平均を求め、平均密度に換算して算出したものである。計測領域のイメージ図を図-15に示す。また、図-14には水浸試験前に実測した供試体密度からすべての気泡が水に置き換わったと仮定して計算した飽和密度  $\rho_{\text{sat}}$  を示した。

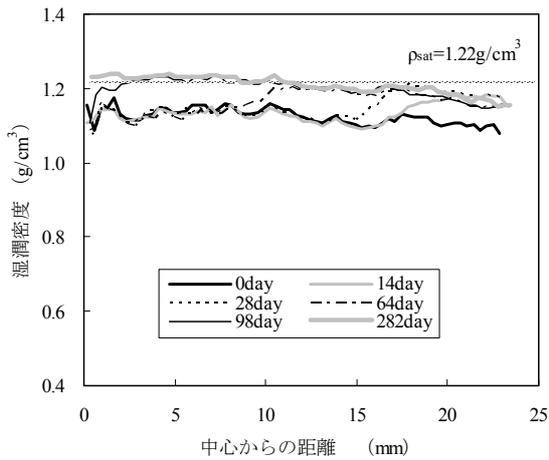
まず、図-14(a)の目標密度  $1.1\text{g/cm}^3$  の供試体の分布をみると、時間の経過とともに供試体側面から湿潤密度が中心に向かって大きくなっており、98日までには、全領域がほぼ飽和状態となっていることがわかる。次に、図-14(b)の目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$  の供試体の密度分布の変化をみると、水浸試験初期である28日頃までに供試体内の密度が平均的に少し上昇し、その後、供試体側面から中心に向かって湿潤密度が更に大きくなっていく結果となった。外側から内側に向かって密度が増加する場合には、必ず、半径方向に見て密度が一定の範囲が、内側と外側にあり、密度が変化している範囲がほぼ  $4\text{mm}$  程度と一定であることが注目される。図-14(c)は目標密度  $0.6\text{g/cm}^3$  の供試体の測定結果である。これをみると、水浸試験開

始から1日以内で密度が  $0.2\text{g/cm}^3$  も上昇するほどの吸水をしており、この時点で、目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$  の供試体の密度を上回ってしまう。このケースでも28日頃までには、全体の密度が上昇しきり、その後は、外側から内側に向かって密度が上昇していく挙動が顕著となる。実験の終期(200日以上)データの傾向がつかみにくくなるが、それまでは、目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$  の供試体の場合と同様に、密度が変化するバンドが存在していることが窺える。

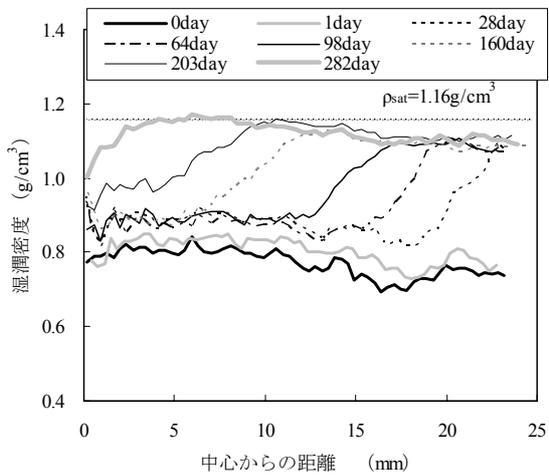
なお、初期の供試体全体にわたる吸水時の気泡置換率は、目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$  のもので、約25%、目標密度  $0.6\text{g/cm}^3$  のもので約75%であり、透水試験のときと同様の置換量であった。

このように目標密度  $0.8, 0.6\text{g/cm}^3$  の供試体の吸水特性が、初期に供試体が全体的に吸水する形態と時間をかけて供試体側面から吸水する形態の2種類の形態をもっているようになったのは、透水試験で見られたように、気泡同士が連亘し、水みちを作っていたためと考えられる。また、この水みちはすべての気泡に通じているわけではなく、目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$  のもののほうが少なく、目標密度  $0.6\text{g/cm}^3$  のものではかなりの気泡が連亘していたものと考えられる。このため、どちらの供試体についても28日以降には、目標密度  $1.1\text{g/cm}^3$  の供試体と同様に、外から中に向かって密度が増加し続ける傾向となる。

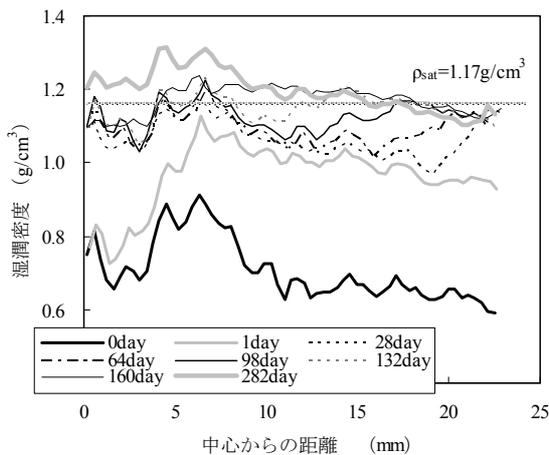
図-16に、図-14で示した密度変化の図から求めた、ほぼ飽和密度に達した領域の先端部分の外側面からの距離を求め、それを浸透距離と定義して、浸透距離と経過日数の関係を示した。このようなまとめ方をすると、浸透



(a) 目標密度 1.1g/cm<sup>3</sup>



(b) 目標密度 0.8g/cm<sup>3</sup>



(c) 目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup>

図-14 半径方向密度分布

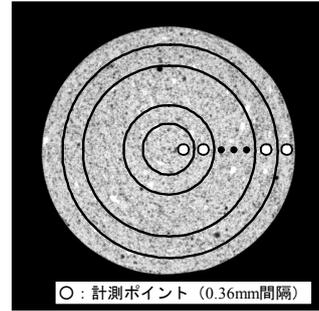


図-15 計測領域の概略図

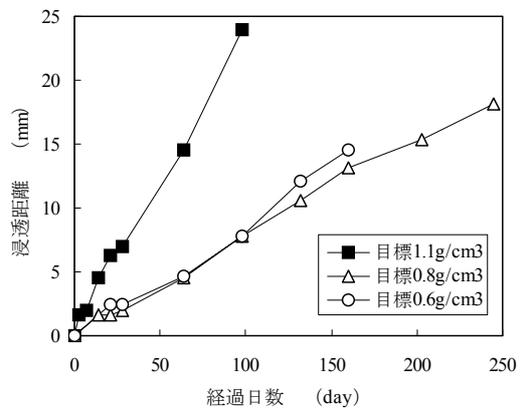


図-16 浸透距離と経過時間の関係

最も早く、目標密度 0.8 と 0.6g/cm<sup>3</sup> のものがほぼ同じ速

度であることがわかる。また、浸透距離が内側に伸びる速さは、どのケースでも経過時間に関わらずほぼ一定である。

## 5. 考察

### 5.1 気泡混合処理土の透水特性

図-4 や図-5 でみたように、目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup> と 0.8g/cm<sup>3</sup> の供試体では、通水初期に供試体中の空気が水に急速に置き換わっている。目標密度 1.1g/cm<sup>3</sup> のものでも空気が水に置き換わる現象は見られている。このうち、目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup> と 0.8g/cm<sup>3</sup> の供試体では、通水初期に気泡が水に置き換わっており、目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup> のもので 60%程度、目標密度 0.8g/cm<sup>3</sup> のもので 25%程度の気泡が水に置き換わっている。また、気泡の置き換わり量が著しかった目標密度 0.6g/cm<sup>3</sup> のものでは極めて大きな透水係数が求められており、目標密度 0.8g/cm<sup>3</sup> のものでも目標密度 1.1g/cm<sup>3</sup> のものよりも大きな透水係数が得られ

距離が内側に伸びる速度は、目標密度 1.1g/cm<sup>3</sup> のものが

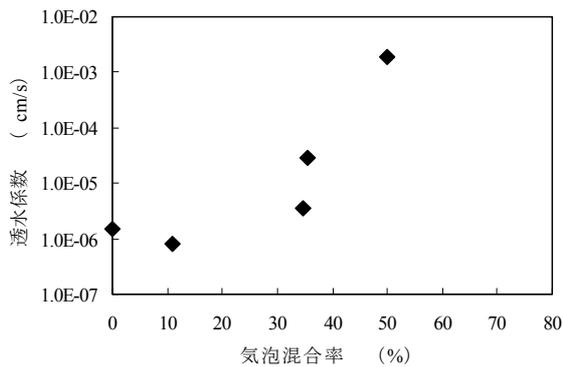


図-17 気泡混合率と透水係数の関係

ていた。これらのことは、初期に水に置き換わった気泡部分は結果的に水みちとして透水係数を増大させるのに役立っていることを物語っていると思われる。

図-17 に本研究で得られた透水試験前の気泡混合処理土供試体の気泡混合率とみかけの(時間当たり透水量を平均動水勾配と供試体全断面積で除した)透水係数の関係を示した。ここで、気泡混合率 11%(目標密度  $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ )以下の供試体とそれ以外の供試体とでは、母材の含水比やセメント混合量が異なっているので、母材+セメントの透水係数には多少の違いがあることに注意が必要である。この図からわかるように、ここでの実験結果からは気泡混合率 11%で作製した供試体の透水係数が一番低い値として得られた。気泡を含むほうが気泡を含まないものよりも低い透水係数を示すという傾向は菊池・吉野(1998)の実験結果と同一の傾向を示すものである。なお、菊池らの実験で用いた供試体は、目標密度が  $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ であったが、母材となる粘性土の含水比が低かったため、気泡混合率は 25%であった。この場合にはみずみちは確認されていない。

しかし、気泡と水との置換が大量に起こった気泡混合率 35%(目標密度  $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ )、50%(目標密度  $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ )の供試体では、透水係数は母材の透水係数より大きくなる傾向にあった。これらの違いは、気泡が水と置き換わることによって水みちとなるかどうかによるものと考えられる。つまり、気泡混合率 11%の供試体では、気泡が水みちとなることはなく、水が気泡を避けて流れていたことを示しているが、気泡混合率の多いものでは、水に置換された気泡痕が水みちとなってしまったためといえるであろう。このように、気泡混合処理土の透水係数には二つの要因が存在するものと考えられる。

今回対象とした供試体について、透水試験開始前の気

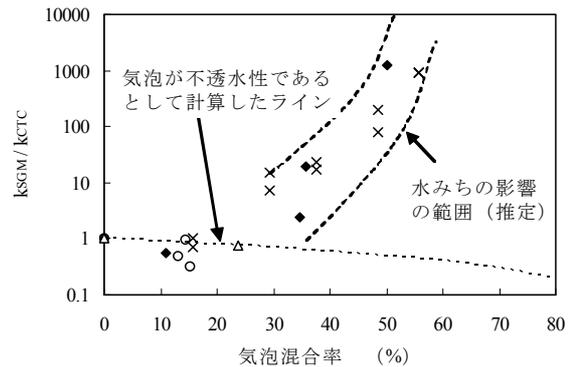


図-18 気泡混合率と正規化した透水係数の関係

泡量から、全ての気泡を直径 0.3mm の球形状と仮定し、気泡が体心立方格子の配列をなしていると想定すると、隣り合う気泡の表面間距離の最小値は気泡混合率 11%の供試体で 0.25mm、気泡混合率 35%の供試体で 0.08mm、気泡混合率 50%の供試体で 0.03mm となる。

実際には、気泡の大きさも隣り合う気泡間の距離もさまざまなばらつきを持っているので、上に示したような平均的な数字ですべての現象を表現できるわけではないが、全体の傾向をつかむための指標となると考えられる。つまり、平均的な気泡間距離が短ければ、隣り合う気泡がくっついて、ひとつの泡となりやすく、全体として水を通しやすい気泡群となる可能性が高くなると考えられる。また、気泡間距離があまりにも近い時には、気泡同士を遮断する粘土粒子に水を遮断する能力がなくなるものと考えられる。このようなことが原因となって結果的に水みちを形成するものと考えられる。どの程度の気泡量になると水を通しやすい気泡群となるのかについては今後のデータの蓄積が必要である。

図-18 には、気泡混合率と気泡を混合しない時の透水係数  $k_{CTC}$  で正規化した気泡混合処理土の透水係数  $k_{SGM}/k_{CTC}$  の変化率の関係を示す。この図には、今回の実験結果を◆で、菊池・吉野(1998)、渡部ら(2005)の実験結果および別途実施した気泡混合処理土の透水試験結果をそれぞれ△と×および○で示している。渡部らの実験における固化処理土のみの透水係数は正確にはわかっていないので、気泡量約 15%のところの透水係数から気泡が不透水材料であることを仮定して、気泡を混合しない場合の透水係数を推定したものを示している。全体的な傾向としては、図-18 に示したラインに代表されるように、気泡混合率の小さいところでは、菊池・吉野(1998)が示したように、気泡が不透水性材料として機能するが、気泡

混合率が多くなると水みちを形成しやすくなり、透水性を高める要因となってしまうものと考えられる。これらのデータの範囲では、気泡混合率 30%程度以下であれば、気泡の混入による見かけの透水係数の増加は見られないものと考えられる。

## 5.2 気泡混合処理土の吸水特性

5.1 で考察したように、気泡混合処理土の透水特性を議論するには、気泡の混合率が重要であると考えられる。その点については、ここで考察する吸水特性についても類似であると考えられるので、以降は、主として初期の気泡混合率を基準として述べていく。

4.2(2)で述べたように、気泡混合率の大きい目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$  と  $0.6\text{g/cm}^3$  の供試体では、水浸直後に空気が供試体内部から抜けている様子が観察された。それらの供試体は、CT 画像解析結果からも水浸直後に供試体下部の方から気泡が水に置き換わり密度が上昇する現象として見られた。気泡が水に置き換わる部分は時間の経過とともに上方向に広がった。これらの供試体ではこの現象が目立っているが、実際には、目標密度  $1.1\text{g/cm}^3$  の供試体と同じように、水と接触している部分から内側に向けた吸水現象も起こっていた。

水浸直後に気泡が抜け、しかも下から密度上昇するような現象は、透水試験で密度が大きく変化し透水係数が上昇した結果と対を成すものであり、水みちの形成によるものであると考えられる。また、図-14 からわかるように、ここでもすべての気泡が水みちとなるのではなく、水みちを形成する気泡と形成しない気泡とが存在していることがわかる。

水みちとなっているために、初期に水が浸入した気泡以外の気泡について、これらが、水と置き換わる量と速度を見てみる。やや粗い計算となるが、図-14 の密度変化を見ると、気泡混合率 12%(目標密度  $1.1\text{g/cm}^3$ )の供試体では、初期における水みちが原因と思われるような密度上昇はなく、外周面からの水の浸入による密度上昇は、およそ  $0.11\text{g/cm}^3$  である。気泡混合率 36%(目標密度  $0.8\text{g/cm}^3$ )の場合には、水みちによるとと思われる密度上昇は、 $0.08\text{g/cm}^3$  程度であり、その後、外周面からの気泡と水の置換による密度上昇は、 $0.33\text{g/cm}^3$  程度である。気泡混合率 53%(目標密度  $0.6\text{g/cm}^3$ )の場合には、水みちによる密度増加は、 $0.37\text{g/cm}^3$ 、外周面からの密度上昇は、 $0.17\text{g/cm}^3$  程度である。これを、水みち形成後に残っている気泡量として推定すると、目標密度 1.1, 0.8,  $0.6\text{g/cm}^3$  の供試体に対して、それぞれ 47, 113,  $62\text{cm}^3$  となっている。水浸実験では、これらの気泡もすべて水に置き換わ

っていることから、外周面からの気泡と水の置換による気泡置換量が最も多いのが、気泡混合率 36%のケースであり、ついで、気泡量 53%のケース、気泡混合率 12%の順となっている。その量の違いは気泡混合率 12%で作成したものに比べ、気泡混合率 36%の供試体で約 2.4 倍、気泡混合率 53%で作成したもので約 1.3 倍となっている。

図-16 に示した、気泡が水に置き換えられる領域のフロントの浸入距離と経過日数の関係を見るといずれの実験ケースでも浸入距離と経過日数の関係は必ずしも線形ではなく、初期の浸入速度が速く、時間が経つにつれて浸入速度がやや遅くなる傾向にある。ただし、その違いはあまり大きく無い。そこで、浸入距離 20mm のところの経過時間から平均の浸入速度を算定してみると、気泡混合率 12%のもので、 $0.25\text{mm/day}$ 、気泡量 36%と 53%のもので  $0.10\text{mm/day}$  となる。上に述べたように、気泡混合率 12%のものとは 36%のものでは置換すべき気泡の量にはほぼ 2.4 倍の開きがあり、透水係数は、気泡混合率 36%のほうが 4 倍大きかった(表-4)。一方、気泡混合率 53%の供試体では、気泡混合率 12%のものに比べて、置換すべき気泡の量はほとんど変わらないものの、透水係数はおよそ 2500 倍も大きくなっている。

外周面から内部方向に向けて気泡が水に置換されるときメカニズムは、必ずしもわかっていない。しかし、これまでの観察からすれば、供試体内で気泡が水中に溶け出して供試体外に放出されるのではないかと考えられる。これが正しいとすれば、供試体内での水の循環の速度と気泡量とが外側から内部へ向けて気泡が水に置き換わる速度を支配するものと考えてよいと思われる。水が供試体内を移動するし易さの指標として透水係数が考えられるが、透水試験で得られている透水係数は、気泡混合率の小さい場合には、気泡以外の部分を通る水の通りやすさを表しているが、気泡混合率が高く、水みちを形成するような場合には、水みちを通る水の量の影響を強く受けている。このため、水みちを含んだ意味での透水係数は、水浸試験における気泡の水への置換速度には影響が無く、母材の透水係数にこそ意味があると考えられる。母材の透水係数を考えれば、ここで用いている供試体の透水係数はほぼ同じであると考えられるので、気泡量の違いが置換速度の違いとなると考えられる。

図-16 の結果は、浸入速度が気泡混合率のみでは決まらないような結果となっており、また、今回の実験条件では、浸入速度が一定ということは、初期の気泡置換量が大きく、時間が経つにつれて気泡置換量が少なくなっていることを意味している。

図-19 と 図-20 に水との接触面をある面に限定した、一

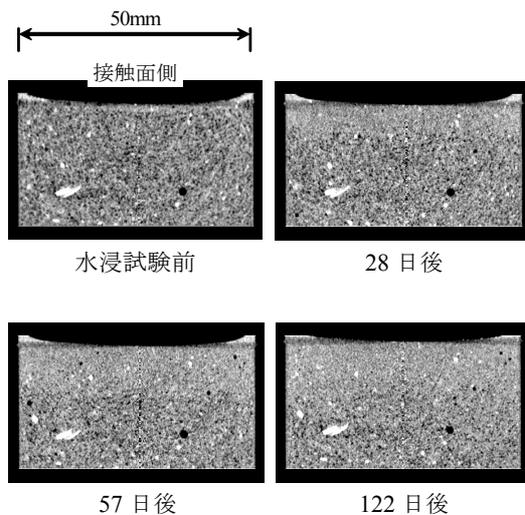


図-19 水の浸入状況(一次元水浸試験)

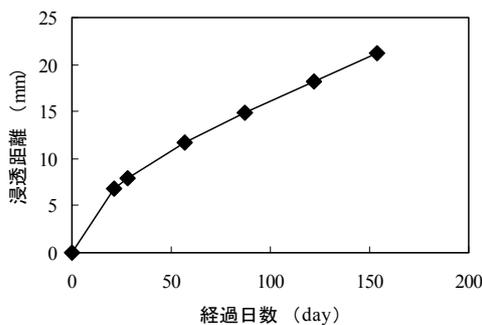


図-20 浸入距離と時間の関係(一次元水浸試験)

次元水浸試験を行った時の水の浸入状況(図-19)とその時の浸入距離と時間の関係(図-20)を示す。水との接触面は供試体上面である(図-19では、画像の上)。この時に用いた試料の目標密度は、 $1.05\text{g/cm}^3$ であり、気泡混合率は約15%である。この場合には、水みちはできていないと考えられる。図-19を見ると時間の経過とともに供試体上面から次第に白くなる部分が増えていくことがわかる。この、白く変化していく部分で空気と水の置換が生じている。図-20はこのときの置換領域のフロントを測定したものである。この結果を見ると、接触面からの水の置換フロントの浸入速度がほぼ一定であることがわかる。

このように、水との接触面からの水の浸入は、置換フロントの浸入速度がほぼ一定であるということに意味があるようである。

以上の考察をまとめる。

気泡量が多く水みちを形成する場合には、初期に水みちを埋めるように供試体に水が浸入する。これによる密

度の増加は、初期の気泡混合率の高いものほど大きくなる傾向にあり、気泡混合率が低い(密度の高い)ものよりも密度が高くなる可能性がある。

また、すべての気泡混合処理土では外周面(水との接触面)から気泡と水の置換が生じる。外周面からの気泡の水への置換速度は、気泡の水への置換フロントを考慮することによって、説明できる。置換フロントの内部への浸入速度は今回の実験の範囲では、ほぼ一定である。この速度には、置換される気泡の量のほかに、母材の透水係数などが影響しそうであるが、必ずしも明確になっていない。

なお、以上の水浸試験の結果の評価については次の二点について注意する必要がある。一点目は、水みちを形成する場合には気泡が水みちを伝わって外に出て行く条件が必要であることである。原位置では、気泡混合処理土をマスとして打設することが多いと考えられる。この場合にすべての潜在的水みちが同時に水に満たされるかどうかは検討の必要があることである。二つ目は、外部との接触面における水への置換面の浸入速度に関してである。今回の実験は、気泡混合処理土の周囲が水という条件にしているが、これは気泡混合処理土のおかれる環境としては特異である。一般的には、土の中に気泡混合処理土があるという条件になると考えられる。この問題については現在検討中であるが、気泡混合処理土のおかれる環境によって水への置換フロントの浸入速度には違いがありそうであることがわかっている。

## 6.結論

本研究では、気泡量の異なるいくつかの気泡混合処理土の透水特性と吸水特性を検討した。ここでは、実験の過程で、X線CTスキャナを用いて気泡混合処理土供試体内部の透水状況や吸水状況を観察した。また得られたCT画像を解析で求めた供試体の密度分布や水の浸透範囲と外的に観察できる実験結果とを組み合わせ、気泡混合処理土の透水特性と吸水特性を検討した。

本研究の結果で、気泡混合処理土の透水・吸水特性についてわかった新たな知見は以下の通りである。

- 1) 気泡混合処理土の透水・吸水特性に、気泡混合率や気泡の配列が及ぼす影響は非常に大きい。
- 2) 気泡混合処理土の透水・吸水現象は、気泡の配列によって大きく二つの形態に分類される。一つが、独立した気泡が不透水性材料として機能する場合と、もう一つが連亘した気泡群が水みちとして機能する場合である。後者のような現象は気泡混合率が30%

くらいから顕著となる。

- 3) 気泡混合処理土の吸水は、水みちができるような条件では初期に水みちを満たすように吸水するが、十分に独立した気泡の水への置換速度は、水みちの存在にはあまり影響されない。

## 7.あとなぎ

比較的気泡混合率の少ない気泡混合処理土の透水特性について検討し、最初の論文を上梓したのは、8年前のことである。その際、この仮説を証明するには、X線CT装置のような、内部の透水現象を直接見ることでできる装置による検討が不可欠であることを述べた。その後、熊本大学との共同研究を経て、8年前の論文で示した仮説が概ね正しいことを確信できるような成果が得られていた(Kikuchi et al. 2005)。

約2年前に独立行政法人港湾空港技術研究所にマイクロフォーカスX線CT装置が導入され、これまでのX線CT装置に比べてより細かな部分の観察ができるようになったところに、SGM協会との間でより気泡混合率の高い、軽いSGMの特性についての研究の機運が高まった。

このような機会を与えていただいた結果、気泡混合処理土の透水・吸水特性について広い条件で検討できるようになった。X線CT導入にご尽力いただいた各位、SGM協会の各位に大変感謝をいたします。

気泡混合処理土の透水・吸水特性についてはこのような要素レベルの研究にとどまらず、模型地盤や実地盤の気泡混合処理土についての研究を行なうことが望まれる。研究はすでに着手しているの、結果がそろったところで改めて報告する所存である。

X線CTを用いた観察をすることによって幾つかの疑問は晴れた気がしているが、それを上回る疑問点が出てきており、現象の解明にたどり着く道がより長いものとなったことを感じている。

(2006年2月17日)

## 参考文献

- 石井一郎・吉田稔・堀江宏保(1987)：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)－クラックの判定法と試料の力学的特性－，港湾技研資料 No.575, 45p.  
沿岸開発技術センター(1999)：軽量混合処理土マニュアル。  
大谷順・椋木俊文・永留健・菊池喜昭・佐藤孝夫(2002)：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，土木学会論文集，No.701/III-58，pp. 293-302.  
菊池喜昭・吉野博之(1998)：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，pp. 33-56。  
菊池喜昭・水谷崇亮・永留健・島俊郎(2006)：マイクロフォーカスX線CTスキャナの地盤工学への適用性の検討，港湾空港技術研究所資料。(投稿中)  
阪上最一・森博・斉藤幸雄(1980)：サンプリング試料のX線透過試験結果，第15回土質工学研究発表会，pp. 81-84。  
善功企・松本一明・石井一郎(1982)：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，港湾技研資料 No.438, 93p.  
土田孝・横山裕司・水上純一・清水和也・笠井寿太郎(1999)：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資料，No833, 30p.  
徳永健介・大谷順(2003)：X線CT法を用いた混合土中の透水に関する定量的評価，第38回地盤工学研究発表会，pp. 1195-1196  
西尾宣明・米山潔・高木宣雄・島村一訓(1980)：X線写真による埋設管周辺地盤の挙動の研究，第15回土質工学研究発表会，pp.1601-1604。  
星野克之・横田聖哉・小林一・三嶋信祐(1995)：気泡混合軽量土の材料特性，第30回土質工学研究発表会，pp. 2521-2522。  
森範行・井上秀治・石樽保則・船津英治・渡辺直樹・黒島一郎(1994)：気泡混合補強土の特性について－その8 透水性－，第29回土質工学研究発表会，pp. 2423-2424。  
渡部要一・渡邊雅哉・椎名貴彦・大久保泰宏(2005)：気泡混合処理土の透水特性と微視的構造，第40回地盤工学研究発表会，pp. 831-832。  
Kikuchi, Y., Otani, J., Mukunoki, T., Yoshino, H., and Nagatome, T.(2005): Permeability of lightweight treated soil mixed with air foam, Proc. of 16th ICSMGE, pp.1721-1726。  
Otani, J. (2003): State of the art report on geotechnical X-ray research at Kumamoto University, X-ray CT for Geomaterials Soils, Concrete, Rocks, Proc. of International Workshop on X-ray CT for Geomaterials –GeoX2003–, 2003., pp.43-78。  
Watabe, Y., Itou, Y., Kang, M.-S. and Tsuchida, T.(2004) : One-dimensional compression of air-foam treated lightweight geo-material in microscopic point of view, Soils and foundations, 44(6), pp. 53-67.

港湾空港技術研究所報告 第45巻 第2号

2006.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 ニッセイエブロ株式会社

Copyright© (2006) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。