

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 37

NO. 1

MAR. 1998

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第37巻 第1号 (Vol.37, No.1), 1998年3月 (Mar. 1998)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量  
……高橋重雄・半沢 稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内 潔・高山知司・谷本勝利 …… 3  
  
Lifetime Damage Estimation with a New Stability Formula for Concrete Blocks  
Shigeo TAKAHASHI, Minoru HANZAWA, Hirokazu SATO, Michio GOMYO,  
Ken-ichiro SHIMOSAKO, Kiyoshi TERAUCHI, Tomotsuka TAKAYAMA,  
and Katsutoshi TANIMOTO
  
2. 気泡混合処理土の透水特性  
……菊池喜昭・吉野博之 …… 33  
  
Permeability of Light-Weight Soil Made of Dredged Slurry Mixed with Air Foam  
Yoshiaki KIKUCHI, Hiroyuki YOSHINO

## 気泡混合処理土の透水特性

菊池喜昭\*  
吉野博之\*\*

### 要 旨

現在開発が進められている軽量混合地盤材料(SGM軽量土)の透水特性を知ることが、この材料の海水による劣化の促進の問題や、SGM軽量土からのアルカリ分の溶出などの問題の程度を明らかにするために重要である。本研究では、SGM軽量土のうち気泡を混入することによって軽量化したSGM軽量土の三軸透水試験、定ひずみ速度圧密試験、段階載荷圧密試験を実施し、透水特性を調べた。また、圧縮性のある間隙流体を含む土の透水特性と圧密特性を考慮するモデルを構築してこれらの実験をシミュレーションし、気泡を含むSGM軽量土の透水特性を検討した。その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 気泡を含むSGM軽量土の真の透水係数はセメントを含む母材の透水係数とほぼ一致する。すなわち、気泡を含むSGM軽量土の間隙比はかなり大きなものとなるが、気泡の存在による透水係数の増減はない。
- 2) 気泡を含むSGM軽量土では、気泡の存在のため、初期に気泡が圧縮する環境ではみかけの透水係数が大きくなる。その一方で、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に比べてはるかに長い時間を要する。
- 3) 気泡を含むSGM軽量土の透水係数を圧密試験結果から求める場合には、気泡を含むSGM軽量土中の気泡の圧縮性を考慮に入れることにより適切に透水係数を決定することができる。

キーワード：気泡混合処理土、透水係数、圧縮性流体、浚渫粘土、三軸透水試験、圧密試験

---

\* 土質部基礎工研究室長

\*\* 土質部基礎工研究室研修生(八千代エンジニアリング(株))

## Permeability of Light-Weight Soil Made of Dredged Slurry Mixed with Air Foam

Yoshiaki KIKUCHI\*  
Hiroyuki YOSHINO\*\*

### Synopsis

It is important to make an effective use of the waste material generated either during large construction projects, blast furnace or dredging operations. One of the effective utilization of such wastes products is by means of forming new geo-material by mixing it with air foam and cement. The characteristics of such materials can be influenced by the sea water. In severe cases, where the permeability is high, pollution of ground and sea water remains a possibility. To check the permeability of such a material is the most important part to utilize it. In this paper, several permeability experiments and numerical calculation were carried out to discuss the permeability of light-weight soil (LWS) made-up of dredged slurry mixed with air foam and cement .

The pore fluid in LWS is compressive, because of existing of air form. To estimate "true" permeability, compressibility of the pore fluid is taken in consideration in this study.

Following conclusions are drawn from this study:

- 1) "True" permeability in LWS is consistent with the permeability of the clay with cement.
- 2) Apparent permeability in LWS is affected because of compressibility of the air included in the material.
- 3) To estimate "true" permeability of LWS by using consolidation test, it is necessary to take in consideration the compressibility of the pore fluid.

**Key Words :** Light-Weight Soil, Coefficient of permeability, Compressible fluid, Dredged clay, Permeability test by triaxial apparatus, Consolidation test

---

\* Chief, Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division

\*\* Trainee, Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division (Yachiyo Engineering Co. LTD.)

## 目 次

要 旨 .....	33
1. まえがき .....	37
2. 既往の研究 .....	37
2.1 セメント混合土の透水係数に関する研究 .....	37
2.2 不飽和土の透水係数に関する研究 .....	38
2.3 軽量混合処理土の透水係数に関する研究 .....	39
3. 気泡を含む土の透水理論 .....	39
4. 透水実験 .....	40
4.1 供試体の作成方法 .....	40
4.2 変水位透水試験 .....	43
4.3 三軸透水試験 .....	44
4.4 段階载荷圧密試験 .....	46
4.5 定ひずみ速度圧密試験 .....	49
5. 考察 .....	51
6. 結論 .....	54
7. あとがき .....	54
参考文献 .....	54
付録 いくつかのスーパージオマテリアルの透水係数 .....	55

## 1. まえがき

浚渫土を母材とした軽量混合地盤材料(SGM軽量土)の開発が進んでいる。これは、液性限界より高い含水比の粘性土に気泡などの軽量化材を混合して単位体積重量を小さくし、さらにセメントなどの固化材を添加して強度を増加したものである。SGM軽量土については平成4年度より研究が進められ、力学特性や施工性について多くの知見が得られており、既にいくつかの報告<sup>1)~3)</sup>がなされている。

気泡混合処理土は、気泡を混入させることによって軽量化したSGM軽量土である。港湾ではこの材料を主に水面下で使用するため、長期間の後に気泡の一部が水に置き換わってしまうことが懸念されている。しかし、この問題は実際には水圧のほかに、材料の持つ透水性に関連していると考えられる。このほか、海水との接触により気泡混合処理土の劣化(強度の低下など)が進行したり、本来気泡混合処理土はアルカリ性に富むためこの材料よりなる地盤を通過する地下水はアルカリ性になる恐れがある。これらの現象はいずれも透水性に深く関係がある。このように、気泡混合処理土の透水性が問題となるが、気泡やセメントを混入してあるため、気泡混合処理土の透水特性は適切な実験をしなければ判定できない。

一般に地下水面よりも上にある地盤では、地盤材料内に気泡が含まれている場合が極めて多い。このような気泡を含む地盤材料を特に不飽和土とって、地下水面下に普通にある飽和土と区別している。自然状態にある不飽和土は主に土粒子間の毛細管現象によって気相と液相が分離されていくと考えられる。このため、飽和状態から不飽和状態になるときは、気相は連続した形で広がっていき、逆に飽和状態へ移行するときには、気相が分断されながら飽和していくものと考えられる。このため、不飽和土の現象は一般的にヒステリシスを持つ複雑なものとなっている。

一方、気泡混合処理土はセメントを混入させた飽和粘土にエアフォームの形で気泡を混入させるものである。このため、一般に気泡は独立にトラップされており、材料がセメントの影響で固化された後には、個々の気泡は位置を変えずに存在するものと考えられる。このような状況にあるので、気泡混合処理土の不飽和の取扱いは、通常の不飽和土とは少し異なるものと考えられる。

本研究は、気泡混合処理土の透水特性を求めることを目的としている。ここでは、変水位透水実験、三軸透水実験、定ひずみ速度圧密試験、段階載荷圧密試験などの透水実験を実施し、圧縮性流体を含む地盤材料の透水や

圧密に関する方程式を適用することにより、気泡混合処理土の固有の透水係数と見かけの透水係数の関係について議論した。

なお、現在地盤材料として利用することが考えられているいくつかのリサイクル材料についても透水試験も実施したので、参考のためにその結果を付録に示した。これらの中には透水性の高いものもあることが理解できるものとする。

## 2. 既往の研究

### 2.1 セメント混合土の透水係数に関する研究

一般に土にセメントを添加すると土粒子間がセメントの水和物で充填され、透水係数が低下することが知られている。図-1<sup>4)</sup>に示すように、固化材(セメント系)の添加による透水係数の低下の傾向は土粒子の大きさによって異なり、砂のように土粒子の大きなものほど透水係数の低下が著しく、粘性土のように土粒子の小さいものでは少ないという結果が得られている。

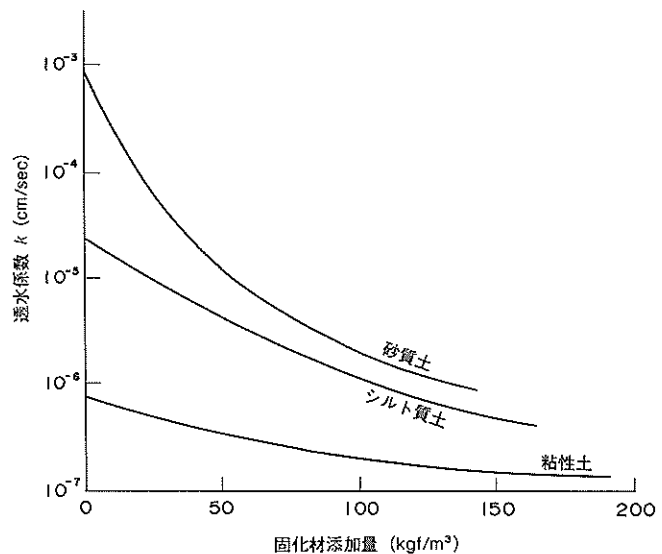


図-1 固化材添加による透水係数の変化<sup>4)</sup>

寺師ら<sup>5)</sup>は、川崎粘土(液性限界 $w_L=88\%$ 、塑性指数 $I_p=48$ )にセメントを添加することによる透水係数の変化について詳細な検討をしている。彼らは、初期含水比とセメントの添加量をさまざまに変化させ、間隙比とセメント混入量の違いによる透水係数の変化を調べた。図-2はセメント混入後の含水比と透水係数の関係がセメント添加量によってどのように変化するかを示したものである。飽和度100%であると仮定できれば、含水比は間隙比と一対一に対応している。また、彼らは、図-3のように養生日数が増えることによっても透水係数が変化する

ことを示している。養生日数が長くなると透水係数が低下するのは、セメントの水和物の生成が影響しているものと考えられる。

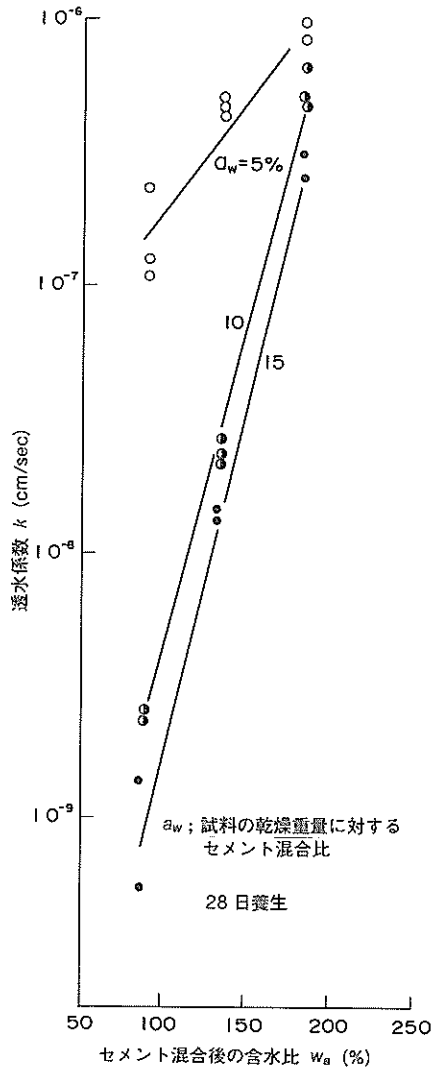


図-2 セメント添加量と含水比が透水係数に与える影響<sup>7)</sup>

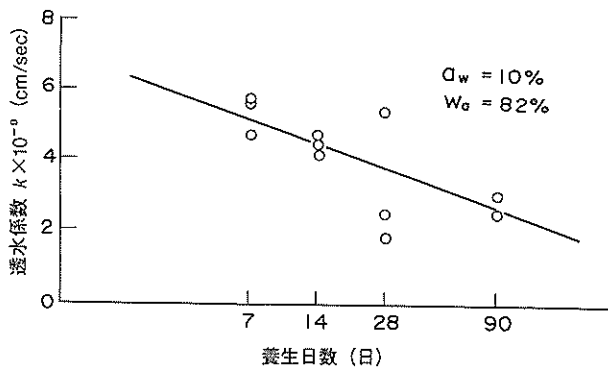


図-3 養生日数による透水係数の変化<sup>7)</sup>

## 2.2 不飽和土の透水係数に関する研究

土中水の流れは、土が飽和しているときには、基本的には、動水勾配と透水係数によって決定される。しかし、地盤が不飽和になると、毛管力が水を流す力として重要になる<sup>8)</sup>。すなわち、不飽和土の場合には、表面張力の働きによって、水と空気の境界面が曲がっている。このために、水の圧力が小さくなる。水は、水頭の小さいところへ流れるので、水平面内であれば、水圧の低いところへ流れようとする。水と空気の圧力差は、表面張力の大きさによって決まるが、境界面の曲率が小さいほど圧力差が大きくなる。この曲率は土中では粒子の大きさによって決まり、細粒土ほど曲率が小さくなる。このため、不飽和土では、水は粗粒土の間を避け、細粒土の間を流れるようになるのである。

以上の不飽和土の透水特性は飽和土の場合とはまったく異なるものである。飽和土では、粗粒土部分ほど水が流れやすくなっているのであるが、不飽和土ではその傾向がまったく逆転している。

不飽和土では、飽和度が下がるにつれて透水係数が低下することは良く知られているが、これはまさに上述の不飽和土の透水特性によるものであり、不飽和になればなるほど細粒土の間を水が流れるようになるためである。つまり、図-4<sup>8)</sup>に示すように、飽和度が下がると、細粒土の間に水がよせられていき、毛管力が大きくなる。それと同時に、透水性が低下していくのである。

不飽和土の透水特性を調べる方法には、定常法と非定常法とがあり、多くの方法が提案されているがいずれも一般化はされていない<sup>9)</sup>。

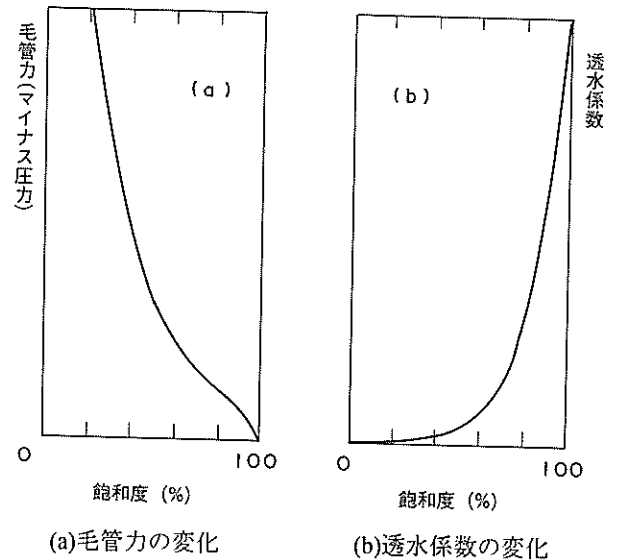


図-4 土の不飽和特性

気泡混合処理土は、気泡を含むという点では、不飽和であるが、一般的な不飽和土とは透水特性が異なると考えられる。通常の不飽和土では、不飽和の形態は、図-5<sup>10)</sup>に示す3種類に分類される。これらの3形態は通常は飽和度によって決まると考えられ、飽和度が下がるにつれて(a)、(b)、(c)の形態に推移していくものと考えられる。しかしここで考えている気泡混合処理土では、図-5(a)の封入不飽和状態しか起こらないと考えてよい。すなわち、混入している気泡は、ある程度以上の大きさを有しており、気泡の混入量が多くなったとしても、気泡の粒径に影響が無い場合、常に水が気泡を覆うような形態となっていると思われる。このため、実際には、気泡の混入による負圧の発生は考慮する必要がないと考えられる。

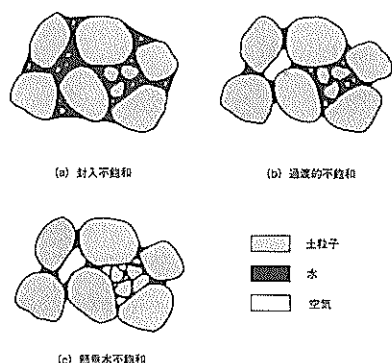


図-5 実際の土における可能な不飽和状態

### 2.3 軽量混合処理土の透水係数に関する研究

森ら<sup>11)</sup>は、海成粘性土(液性限界 $w_L=104\%$ 、塑性指数 $I_p=53$ )に加水し、含水比400%に調整したものに、セメントと気泡を混練りした供試体を600日気中で養生した試料に対して三軸試験機を用いた透水試験を実施している。できあがった供試体の含水比は、気泡の量によって異なるが、およそ200~270%であった。また、いくつかの供試体は、気泡を混入させない試料を用いて作成している。彼らの実験では、動水勾配 $i$ は、6、12、20の三種類を用いている。測定時間は6日間であった。彼らの実験の結論は次のとおりである。①透水係数は、動水勾配の影響を受けない。②気泡の多い試料ほど(これは同時に含水比の低い試料となっている)透水係数が小さくなる。③気泡の混入量の多い試料では、透水係数が安定化するのにおよそ24時間かかっている。

また、彼らは、透水試験終了時の供試体が不飽和であったことから、水は気泡以外のところを流れていたのではないかと推論している。

彼らの用いた海成粘土は有楽町シルトといわれるもので、粘土分42%、シルト分54%と、細粒分を十分に含み、液性限界は比較的高い粘性土である。彼らの調整した試料の間隙率は、7.18~9.11と比較的高く設定されている。このため、透水係数は、 $6 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ と比較的大きな結果が得られている。

### 3. 気泡を含む土の透水利論

気泡混合処理土は、間隙中に気泡を含んでいる。気泡はそれぞれ独立して存在していると考えられ、周辺の間隙水圧の変動によって気泡の圧力も変化し、気泡が体積変化するものと考えて良い。実際、養生圧力 $p=1.0 \text{kgf/cm}^2$ で養生した試料の透水試験を実施しようとしたところ、供試体から長時間にわたり間隙水が滲み出す現象が見られた。このような現象は、養生圧力 $p=0.0 \text{kgf/cm}^2$ で養生した試料の場合には観察されなかった現象であり、供試体内部の間隙気体が圧力の変動に応じて体積変化をしているためと考えられる。このようなことから、気泡混合処理土は、間隙流体が圧縮性を持つ材料として取扱うことができる。善<sup>12)</sup>は、気泡を内包する地盤の過剰間隙水圧の伝達を考慮したときの土の特性について検討を行っており、気泡混合処理土の透水性について検討する際にもこのような手法が適用できると考えられる。

圧縮性流体を含む土の一般的な圧密の支配方程式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$v = -\frac{k}{\rho g} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2)$$

ここで

$\rho$  : 間隙流体の密度

$z$  : 距離

$t$  : 時間

$v$  : 水流の見かけの速度

$n$  : 間隙率 ( $= \frac{e}{1+e}$ )

$k$  : 透水係数

$u$  : 間隙流体の圧力(絶対圧)

$g$  : 重力加速度

である。

(1)式を展開すると以下ようになる。

$$\rho \frac{\partial v}{\partial z} + v \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3)$$



$\sigma = \sigma' + (u-1) = \text{const.}$  とすると、(3)式は以下のようになる。

$$\frac{k}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{C'_w k}{g} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = (\rho m_v + \rho n C'_w) \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

ただし、 $C'_w$  は間隙流体の圧縮率で、次式で定義される。

$$C'_w = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial u} \quad (5)$$

ここで、 $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \gg \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$  とすると、(4)式は次のようになる。

$$\alpha \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \rho g} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (6)$$

ただし、

$$\alpha = 1 + n \frac{C'_w}{m_v} \quad (7)$$

また、圧縮性流体が空気と水の混合体であるとしたときには、Verruijt<sup>13)</sup>は  $C'_w$  が次式で表わされるとした。

$$C'_w = \frac{1 - S_r}{u} + S_r C_w \quad (8)$$

善<sup>12)</sup>によると、不飽和土中の空気は、飽和度がある程度高く85%~90%以上になると、間隙水中の気泡として存在すること、また、その時の透水係数は、近似的に飽和した土の透水係数とほぼ同じとみなしても良いと考えられるとしている。今回対象としているような処理土の場合、飽和度は、およそ75%と高くはないが、試料の作成方法から考えて、空気は気泡として独立に存在すると考えてよいので、上記のような考え方が採用できるものと考えられる。

さて、(6)式に示した基礎方程式の差分分解を求めるために無次元化を行う。考えている材料が圧密に要する時間を、材料の厚さをとし、

$$C = C_v \frac{T}{l^2} \quad (9)$$

$$T = \frac{t_{90} \cdot \left( \frac{H_0}{2} \right)^2}{C_v} \quad (10)$$

$$\bar{z} = \frac{z}{l} \quad (11)$$

$$\bar{T} = \frac{t}{T} \quad (12)$$

$$\bar{U} = \frac{u}{u_0} \quad (13)$$

とおくと、(6)式は次式のように無次元化される。

$$C \cdot \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial \bar{z}^2} = \alpha \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{T}} \quad (14)$$

材料の高さ及び時間の差分間隔をそれぞれ、 $\Delta \bar{z}$ 、 $\Delta \bar{T}$  とすると、

$$C \cdot \left\{ \frac{U(\bar{z} + \Delta \bar{z}, \bar{T}) - 2U(\bar{z}, \bar{T}) + U(\bar{z} - \Delta \bar{z}, \bar{T})}{\Delta \bar{z}^2} \right\} = \alpha \cdot \frac{U(\bar{z}, \bar{T} + \Delta \bar{T}) - U(\bar{z}, \bar{T})}{\Delta \bar{T}} \quad (15)$$

となる。従って、

$$U(\bar{z}, \bar{T} + \Delta \bar{T}) = \left\{ \frac{C \times \Delta \bar{T}}{\alpha \cdot \Delta \bar{z}^2} \right\} \times \{ U(\bar{z} + \Delta \bar{z}, \bar{T}) - 2U(\bar{z}, \bar{T}) + U(\bar{z} - \Delta \bar{z}, \bar{T}) \} + U(\bar{z}, \bar{T}) \quad (16)$$

であるから、任意時間  $\bar{T} + \Delta \bar{T}$ 、任意高さ  $\bar{z}$  における  $U = U(\bar{z}, \bar{T} + \Delta \bar{T})$  が計算される。

## 4. 透水実験

### 4.1 供試体の作成方法

本研究では、川崎港で浚渫された海成粘性土を母材として用いた。その物理的性質を表-1に示す。また、粒径加積曲線を図-6に示す。この海成粘性土は液性限界が52.1%であり我国の海成粘土としては比較的塑性の低い粘土である。気泡混合処理土を作成するときに添加した水以外の材料は表-2に示すものである。

気泡混合処理土の作製フローは図-7に示したとおり

表-1 川崎粘土の物理特性

土粒子 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	液性 限界 (%)	塑性 限界 (%)	粒度組成 (%)			
			礫	砂	シルト	粘土
2.678	52.1	23.0	0	19	44	37

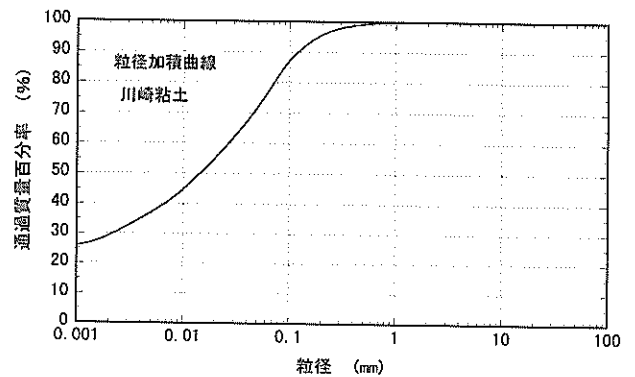


図-6 川崎粘土の粒径加積曲線

表-2 実験に使用した材料

固化材	高炉セメントB種
発泡剤	ファイフォームM606(界面活性剤系)

式は、泡の大きさが均一で安定していること、気泡の発生量を調整しやすいという利点がある。これまでのSGM軽量土の研究における気泡混合処理土の作成方法でもプレフォーム方式で実施されており、本実験もこの方式で行った。

今回用いた気泡は以下のようにして発生させた。すなわち、10倍に希釈した発泡剤をローラーポンプにて定量供給し、その希釈液に圧縮空気を送り、アクリルビーズの入った円筒容器（発泡ノズル）を通すことによって気泡を発生させた。発生する気泡量や発泡倍率はローラーポンプの流量や空気圧を変えることによって自由に調整できるようになっている。一般に、発泡倍率が小さいほど丈夫な泡が作成されるが、同量の気泡を発生させるのにより多くの発泡剤が必要になる。今回の実験では発泡倍率を25倍（気泡の単位体積重量 $40\text{kgf/m}^3$ ）とした。

最後に、気泡混合処理土の単位体積重量 $\gamma_r$ を測定し、測定値が計算値の $\pm 0.03\text{gf/cm}^3$ であればモールドに充填する。今回の気泡混合処理土の作成では目標単位体積重

である。

まず、母材の含水比を測定し、粘土の重量と所定の含水比にするための加水量を計算し、所定量の粘土と水道水をミキサーで十分に混練した。ここでは、SGM軽量土の混合性と流動性ならびに施工時の分級・消泡などの特性を検討した研究<sup>3),4)</sup>および力学特性を検討した研究<sup>2),4)</sup>を参考にして、所定の含水比として液性限界の2.5倍を採用した。

次に調整後の母材と固化材(高炉スラグセメントB種、比重3.05)を計量し、ホバートミキサーで6分間混練した。これに、気泡発生装置によって作製した気泡の重量を計量して投入し、材料が均一になるまでヘラで丁寧に混練した。このように、母材に発泡剤で発生させた気泡を土に混合する方法はプレフォーム方式と呼ぶ。この方

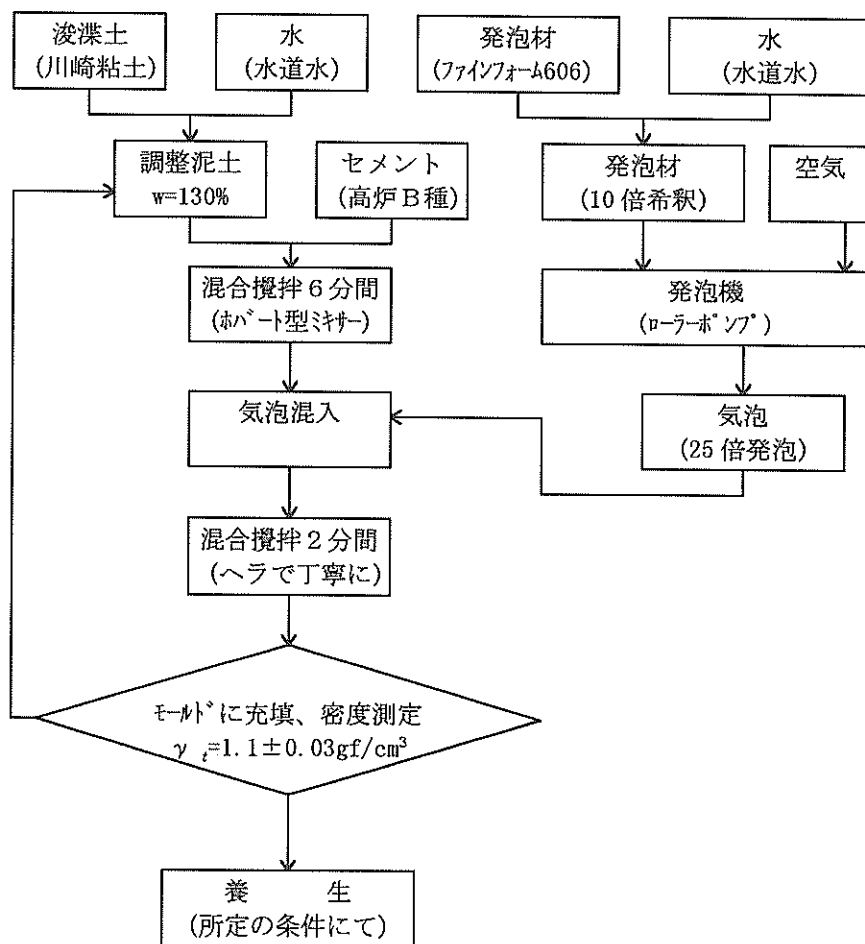


図-7 気泡混合処理土の作成フロー

量  $\gamma_c$  は  $1.1 \text{ gf/cm}^3$  の 1 種類としている。

作成した気泡混合処理土を所定のモールド内にタッピングして充填した。気泡混合処理土を水面下で打設した場合に作用する水压を想定し、まだ固まらない間に水を満たした容器内に入れ、圧力を作用させて養生させた。その方法は、作製した気泡混合処理土を型枠に打設後、水道水を満たした圧力容器の中にモールドごと沈める方法とした。この時、供試体はモールドの上面で水道水と接している。所定の供試体をすべて沈めたら、直ちに水压を作用させて養生した。作用させた水压は、 $0.0, 0.5, 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の三種類とした。養生期間は7~28日とした。

透水試験の実施に先立ち、実験に用いる気泡混合処理土の配合を決定するための配合試験を実施した。表-3に配合試験の条件の一覧を示す。養生期間は7日とした。

表-3 配合試験の条件

配合 No.	調整 含水比 (%)	1 m <sup>3</sup> 当りの配合			
		土 (kg)	水 (kg)	セメント (kg)	気泡 (l)
50	130	453	588	50	228
75	130	442	574	75	238
100	130	431	560	100	248
125	130	419	545	125	259
150	130	408	531	150	269

図-8に配合試験の結果得られた7日養生後の一軸圧縮強度  $q_{0.7}$  と養生圧力の関係を示す。この図によると、セメント添加量が少なく  $q_{0.7}$  が約  $1.0 \text{ kgf/cm}^2$  以下の場合には、養生圧力の増加による強度の増加傾向は見られないが、セメント添加量が多くなり、 $q_{0.7}$  が約  $2.0 \text{ kgf/cm}^2$  以上の場合には、養生圧力の増加とともに、 $q_{0.7}$  が増加する傾向にある。ただし、この場合でも養生圧力と  $q_{0.7}$  の間にはばらつきが大きく、必ずしもセメント量と養生圧力の関係だけでは、強度を推定できないようである。

そこで、養生後の単位体積重量  $\gamma_c$  と  $q_{0.7}$  の関係を図-9に示す。この結果によると、 $q_{0.7}$  はセメント添加量によらず、単位体積重量によって決まる傾向にあることが分かる。

今回の試料作成法では、粘性土の初期含水比を一定にし、そこに必要量のセメントを混入させてから所定の密度になるように気泡を混入させている。従って、セメント添加量が多いほど気泡の量も多くなり、養生圧力の増加による単位体積重量の増加も大きくなる傾向にある。すなわち、養生圧力が高いところでは、セメント添加量が多いほど単位体積重量も大きく、強度も大きい結果と

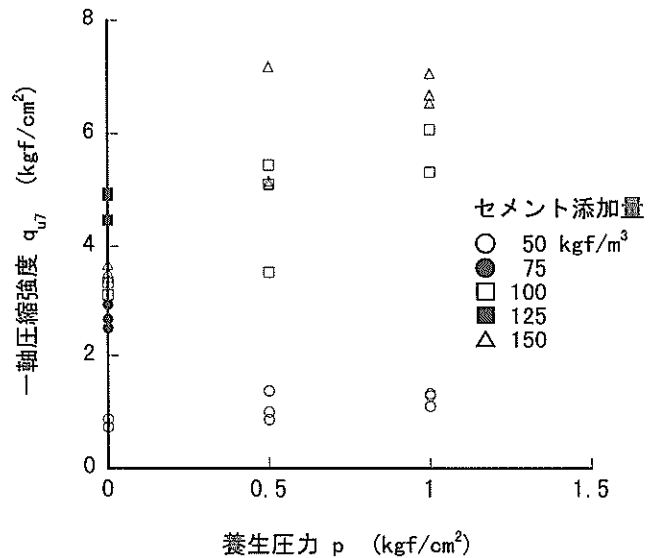


図-8 一軸圧縮強度と養生圧力の関係

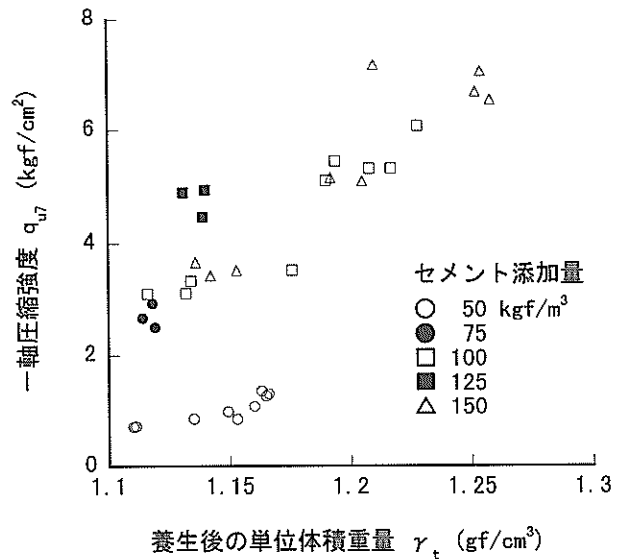


図-9 一軸圧縮強度と単位体積重量の関係

なっている。一方、養生圧力が小さい場合には、セメントの添加量の違いによる単位体積重量の違いは小さい。セメントの添加量と同じものについて比較してみると、添加量  $50 \text{ kgf/m}^3$  のものを除き、 $\gamma_c$  が大きなものほど  $q_{0.7}$  が大きくなっており、その傾向はセメント量による違いが見られない。セメント量が同じであれば、 $\gamma_c$  の違いは気泡の体積の差によるものであり、これが強度に影響をもたらしているといえる。一方で、セメント量が違っていても、 $\gamma_c$  と  $q_{0.7}$  の関係が同じであるということは、セメント量の増加と気泡量の減少が強度に及ぼす影響がほぼバランスしていたことによると考えられる。このように、気泡混合処理土の強度はセメント添加量のほかに

気泡の占める割合の影響を受けているようである。

これまでの実験<sup>14)</sup>では、28日養生後の供試体の特性が調べられている。その結果によると、養生圧力の増加によって単位体積重量が増加する傾向が見られているが、強度の増加はあまり顕著ではなかった。これは今回の傾向と異なるが、養生日数のほかいくつかの条件が違うので、単純な比較は困難である。気泡混合処理土の強度がどのようにして決まるかという問題については、今後の更なる検討を必要としている。

今回の検討からは、 $q_{u7}$ は同じセメント量であっても養生圧力によって変化することが明らかとなったので、養生圧力が0.0kgf/cm<sup>2</sup>の場合の強度を基本とすることにした。図-10に養生圧力0.0kgf/cm<sup>2</sup>のときのセメント添加量と $q_{u7}$ の関係を示す。本試験では、 $q_{u7}$ の目標値をSGM軽量土の強度の目標値としてよく用いられる2.0kgf/cm<sup>2</sup>とすることにした。そこで、図-10の結果から、セメント添加量を75kgf/m<sup>3</sup>として各種の実験を行うことにした。

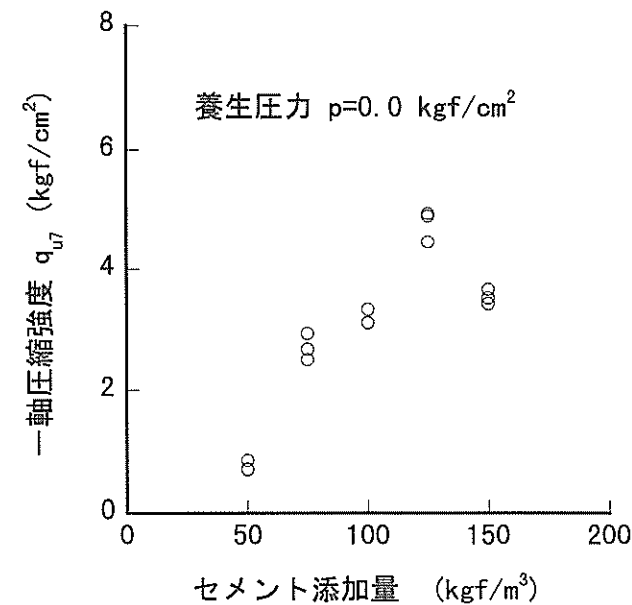


図-10 一軸圧縮強度とセメント添加量の関係

#### 4.2 変水位透水試験

4.1に述べた配合試験の結果に基づき、透水試験に用いる気泡混合処理土の供試体を作成した。実験は表-4に示すように、養生圧力3種類、養生期間2種類の組み合わせで行っており、あわせて5つの条件で実施した。供試体はすべて水中養生してある。セメント添加量は、すべて75kgf/m<sup>3</sup>である。透水試験用の供試体の寸法はおよそφ100mm×h127.5mm(約1000cm<sup>3</sup>)である。

透水試験はJIS A 1218に準じて実施した。ただし、通常は飽和度を高めるために減圧吸水などの処置をするものであるが、ここでは、不飽和であることが前提であるため、そのような処置はしていない。養生日数7日のもものは養生圧力解放後即座に通水実験を実施したが、養生日数14日のものでは供試体から水が浸出する現象が見られたので、供試体の状態を安定させるために、供試体が乾燥しないように注意しながら、通水実験を始める前に3日間放置させてから透水試験を開始した。なお、実験前に含水比を測定するために、供試体の湿潤重量を測定しているが、これは圧力開放直後のものである。すなわち、3日間放置した供試体の場合も放置する前のものである。これから求めた含水比を実験前の含水比として表-4に示した。透水実験はすべて変水位で行った。実験に用いた動水勾配の範囲は8~10である。通水時間はおよそ3時間とした。また、通水終了後に含水比を測定し、飽和度を求めた。

この実験では、実験の前後で供試体の含水比が変化しているのが特徴的である。養生圧力が0kgf/cm<sup>2</sup>のものでは、実験中に含水比が増えており、供試体が、約4cm<sup>3</sup>吸水している。その一方で、養生圧力の大きなものでは、最大で約21cm<sup>3</sup>排水していた。これらのことは、供試体内部の気泡が周囲の圧力変化に応じて体積変化を起していることを示しており、透水試験に供試体内の気泡の圧縮性を考慮する必要性を示唆している。

表-4 気泡混合処理土の透水試験一覧\*

No.	養生圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	養生期間 (日)	試験方法	平均 動水勾配	間隙比	試験前 含水比 (%)	試験後 含水比 (%)
1	0	7	変水位	8	4.05	102.6	105.2
2	0.5	7	〃	9	3.68	100.5	98.6
3	1.0	7	〃	9	3.48	97.0	97.4
4**	0.5	14	〃	10	3.60	99.3	96.8
5**	1.0	14	〃	10	3.38	97.8	94.4

\*)すべて水中養生である。

\*\*)養生圧解放後、3日間放置した後実験を実施した。

ところで、これらの透水実験から求められた透水係数  $k_{ts}$  はおよそ  $10^{-7}$  cm/sec であった。そこで動水勾配を大きくして実験を行ったが、実験中に供試体の中で置き換わったと考えられる水の量は、およそ  $1\text{cm}^3$  と極めて少なく、透水係数を求める実験としては、ほとんど信用のおけるものとはなっていない。

以上のことから、気泡混合処理土の透水試験をを求める試験としては、以下のことに注意する必要があることがわかった。

- ① 供試体から排出する水の体積と流入する水の体積を適切に評価できるようにする。
- ② 透水量を多くする工夫が必要である。すなわち、動水勾配を大きくするか通水時間を長くする。

#### 4.3 三軸透水試験

4.2の結果、通常の透水試験では、気泡混合処理土の透水性を把握することができなかつたので、三軸試験機を用いて透水試験を実施した。この試験では、以下の点について特別に注意を払っている。

- ① 養生圧力を  $0.0\text{kgf/cm}^2$  とし、三軸試験機にセットしたときの背圧は  $0.0\text{kgf/cm}^2$  とした。このようにすることによって、透水を始めるまでの供試体内の気泡の体積がほとんど変わらないようにした。
- ② 動水勾配を大きくした。所定の動水勾配をかけるために、供試体の上面の圧力を変化させずに底面に所定の水压を作用させた。底面に作用させたおおよその水压は、 $0.2\sim 1.0\text{kgf/cm}^2$  である。
- ③ 通水時間を長くした。
- ④ 供試体に流入する水の体積と流出する水の体積の両方を測定するようにした。

このシリーズの実験では、所定の配合の気泡混合処理土のほかに、これと対比するために、同じセメント量で、気泡を含まず、含水比を変えた供試体も作成し、透水係

数を求めるための実験を実施した。試験条件の一覧を表-5に示す。

試験は以下の手順によって実施した。まず、三軸圧力室を組み立て、養生容器より取り出した供試体をトリミングをせずにセットする。三軸透水試験用の供試体は  $\phi 50\text{mm} \times h 100\text{mm}$  の型枠にて作成したものである。ペDESTALとキャップの径はそれぞれ  $5\text{cm}$  で、どちらも断面全体にポーラスストーンを取り付けてある。供試体をメンブレンでシールした後、三軸圧力室に水を満たす。まず、通水時に作用させる背圧よりもわずかに大きな等方応力を三軸圧力室に作用させる。この時、背圧は  $0\text{kgf/cm}^2$  としておく。ここで、バルブを開いて供試体からの排水を許し、体積変化の測定を開始する。ついで、三軸圧力室の圧力を所定の値にし、圧密を開始する。圧密中の排水量  $\Delta V$  ( $\text{cm}^3$ ) を適当な経過時間毎に計測する。圧密時間は少なくとも3日間置くことにした。

圧密が終了したら通水を開始する。まず、供試体のバルブを閉め、水頭差が所定の値になるように、供試体下面側の二重管ビュレットへ圧力を作用させる。圧力を作用させた後、通水を開始する。通水中における水の流入量及び流出量を二重管ビュレットを用いて計測する。通水は1週間行い、1日に4回計測を行う。ところで、1週間通水を行うと二重管ビュレットから水が蒸発する恐れがあるので、別途水を満たした二重管ビュレットを用意し、通水開始と同時に水位の減少を計測し、蒸発量の補正を行った。

図-11に供試体に流入する水の量の時間変化を示す。図中に示してある数字は供試体の下部に作用させた水压を示しており、この実験では、供試体上部の水圧はほぼ  $0.0\text{kgf/cm}^2$  とみなしてよいので、この圧力は供試体の両端での水压差にほぼ等しいと考えてよい。従って、平均的にはこの数字にほぼ比例した動水勾配が供試体に作用

表-5 三軸試験機を用いた透水試験の条件

ケース	養生 圧力 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	養生 期間 (日)	間隙比	試験前 含水比 (%)	側圧 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	背圧 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	透水時の 供試体 下面の 水压 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	平均 動水 勾配	気泡の 有無
A-1	0.0	14	4.17	108.2	0.5	0.0	0.2	22	あり
A-2	0.0	14	4.18	107.5	0.8	0.0	0.5	50	〃
A-3	0.0	14	4.16	107.7	1.3	0.0	1.0	99	〃
A-4	0.0	28	4.13	105.7	0.5	0.0	0.2	20	〃
A-5	0.0	28	2.75	98.6	0.5	0.0	0.2	20	なし
A-6	0.0	28	3.02	109.3	0.5	0.0	0.2	21	〃
A-7	0.0	28	3.45	126.1	0.5	0.0	0.2	20	〃

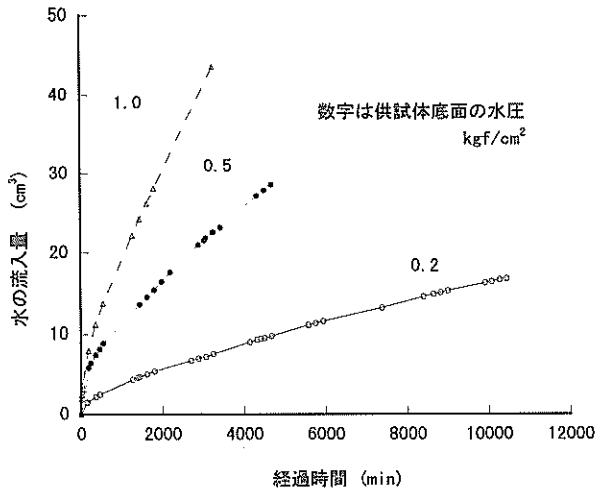


図-11 供試体への水の流入量の経時変化

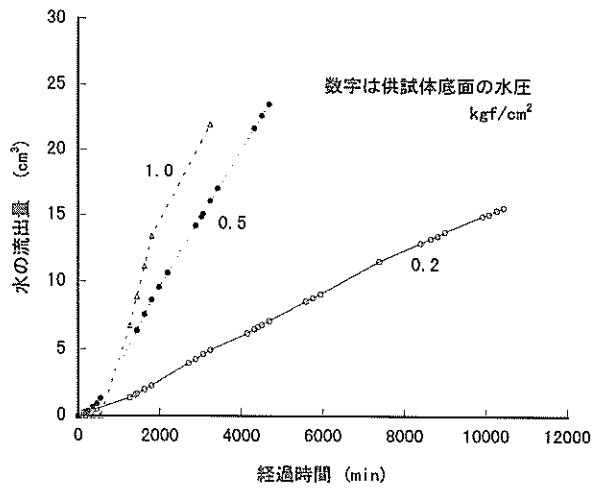


図-12 供試体からの水の流出量の経時変化

していることになる。図-11を見ると水圧の違いによって流入する水の量は異なるが、どの曲線も初期には上に凸となり、その後ほぼ直線状になっていることが分かる。これは、通水の初期には流入速度が速く、その後ほぼ一定速度で流入するようになることを示している。

図-12には、供試体から流出する水の量の時間変化を示す。流出量は、通水の初期に少なく、特に、水圧1.0 kgf/cm<sup>2</sup>を作用させた場合には、通水開始後およそ500分間流出が観察されていないことが分かる。時間の経過とともに流出速度は速くなり、最終的にはほぼ一定の流出速度となる。

図-11と図-12を比較すると、流入量は概ね水圧に比例する形で多くなったのに対し、流出量は必ずしも、水圧に比例的に大きくはなっていない。このことは、供試体中に保持される水の量が水圧によって異なっていることを意味している。図-13には、供試体が保持している水の量の変化を示した。なお、供試体は表-5に示した拘束条件で3日間圧密されているが、この間の排水量はきわめて少なく、水圧の変化による骨格の体積変化はほぼ無視できるものとしてよい。供試体底面の水圧が1.0 kgf/cm<sup>2</sup>のときのほぼ3000分のときのデータのみ傾向が異なるが、この点を例外と考えると、どの水圧の場合にも通水開始後ほぼ1000分の間は保水量が増加し、その後は、保水量がほぼ一定か少しずつ減少する傾向にある。また、保水量は水圧によって異なっていることが分かる。これらのことは、供試体内部の間隙水圧が上昇し、気泡が小さくなっていった供試体の保水量が変化していることと、気泡が小さくなって安定するには時間がかかることを示している。

以上は供試体に気泡が含まれている場合のデータであ

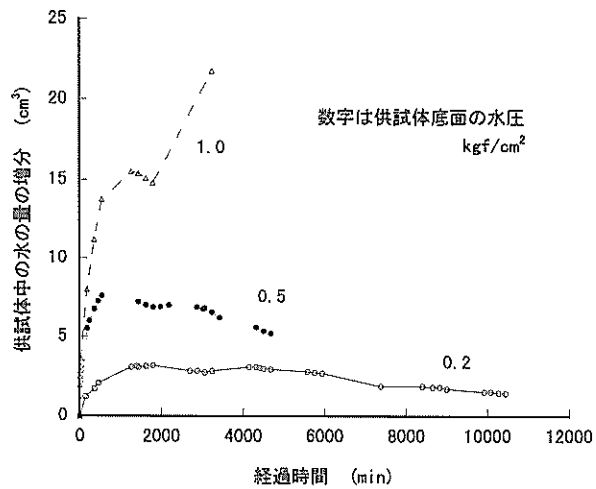


図-13 供試体中の水分量の経時変化

る。供試体に気泡が含まれていない場合の流入流出水量の変化を図-14に示す。ここに示した二つのデータは、間隙比は異なるが、含水比がほぼ同じ実験のものであり、動水勾配もほぼ等しい。この図から、供試体内に気泡を含まないA-6のケースの場合には、流入量と流出量の差がほとんどなく、また、それらの速度が通水初期からほぼ一定であることが分かる。A-4のケースで示されているように気泡がある場合には、流入量が初期に大きいことが顕著であり、その後は流入量と流出量の差がほぼ一定となって一定量の水が保持される傾向にあることが分かる。また、この二つの実験ケースから、透水係数については、間隙比が小さいにもかかわらずA-6の方がやや大きい傾向にあることが伺える。

一般の透水試験では供試体から流出する水の量から透水係数を決定することが多いが、ここでは供試体内部で

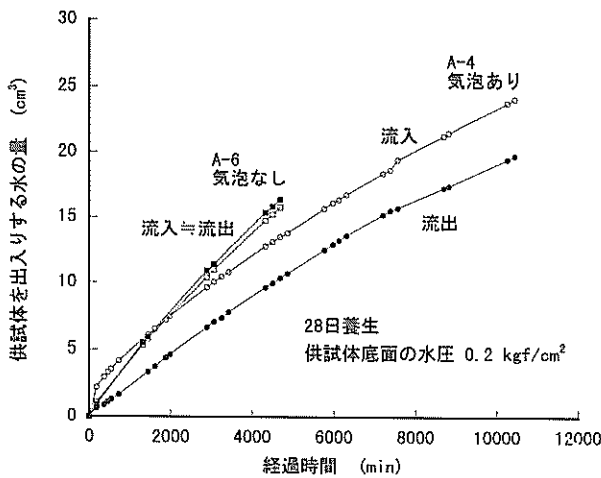


図-14 供試体を出入りする水の経時変化

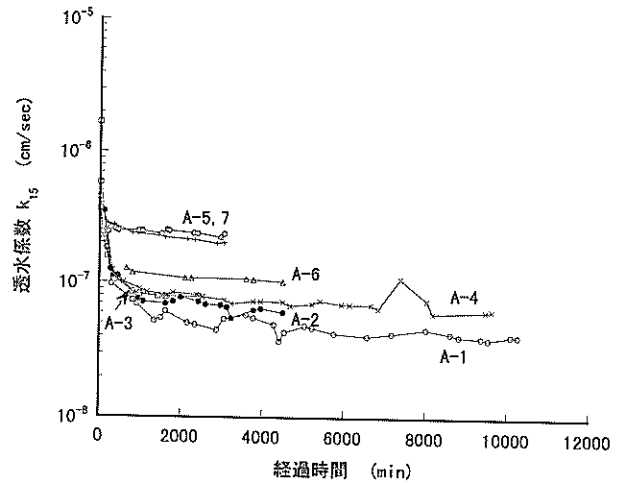


図-15 見かけの透水係数の経時変化

の水圧分布などの細部を無視して、流入する水の量から透水係数を求めてみる。図-15はマクロな動水勾配と流入する水の量から推定した透水係数 $k_{15}$ と通水の経過時間との関係を示したものである。供試体断面積は全断面積が有効なものとして計算している。ここで、A-1～A-4は気泡を含む供試体である。気泡を含む場合には、通水後1000分くらいまでは、透水係数が時間とともに減少し、その後ほぼ一定となる傾向にあることが分かる。ところで、A-1とA-2、A-3はそれぞれ動水勾配が異なるが、動水勾配が異なることによる透水係数の違いはないようである。A-1とA-4は養生期間だけが異なる供試体であるが実験条件のばらつきがある可能性があるが、このデータだけでは養生期間の違いによる透水係数の違いは議論ができない。A-5からA-7は気泡を含まず、供試体が飽和している場合である。この場合は透水係数は経過時間によらずほぼ一定であった。

ところで、流出水量から透水係数を求めることも考えられる。既に、図-12に示してあるように、気泡を含む場合には初期に流出量が少ないので、初期に小さな透水係数が得られることになる。ただし、いずれにしても、ある一定期間が過ぎた後には、流入量から求めた透水係数と流出量から求めた透水係数が等しくなり、適切な透水係数を求めることができるようになると考えられる。

また、2.2で述べたように、気泡混合処理土の場合には、水は気泡を避けるようにして通水されるものとしてよいのではないかと考えられる。この場合、通水のための有効な断面積は気泡の分を取り除いた断面積であるべきであると考えられる。このような観点からすると、気泡を含む場合の有効断面率(=(全断面積-気泡の断面積)/全断面積)はほぼ0.8であった。このような考え方に

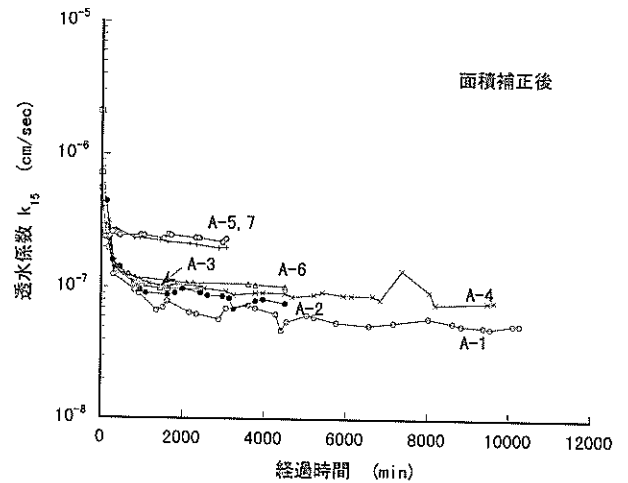


図-16 見かけの透水係数の経時変化(面積補正後)

よる有効断面積の補正をしたときの透水係数を図-16に示す。データ間にばらつきはあるようであるが、同じ含水比を持つ供試体間の透水係数はほぼ等しいと考えてよいようである。

#### 4.4 段階載荷圧密試験

透水性の低い試料の透水特性を調べるためには、圧密試験も利用することができる。一般の段階載荷圧密試験では、体積圧縮係数と圧密係数を求め、それから透水係数を求める、といった形で透水係数を求めている。一般に用いられているこの方法は、飽和した粘性土に対するものであり、不飽和土では圧密係数の推定に理論的な問題がある。しかし、ここでは、気泡混合処理土に対してこのような従来から用いられている方法を援用することが出来ないかあるいはこのようにして求めることにどのような問題点があるかといった観点から圧密試験を用いて透水係数を求めることを試みた。

圧密試験では、養生の条件として、養生期間、養生時の圧力を変えて供試体を作成した。すなわち、養生期間は14日と28日の2種類であり、養生時の圧力は0.0, 0.5, 1.0kgf/cm<sup>2</sup>の3種類である。試料の配合条件は、三軸試験の場合と同様である。

モールドで作成した供試体をトリミングして圧密リングに挿入することは困難であると想像されたため、圧密試験では、試料を直接圧密リングに充填させ養生した。養生後、供試体を試験機に設置する際に上下の端面を整形した。供試体の寸法は、直径6cm、高さ2cmである。

段階荷重試験には、約100kgf/cm<sup>2</sup>まで荷重可能な高圧圧密試験機を用いた。これは、今回用いている気泡混合処理土は強度が十分に高く、圧密降伏応力が大きいことが予想されたためである。荷重増分比は、概ね1とした。圧密時間は各段階で24時間とした。

段階荷重圧密試験では、圧縮曲線から求めた体積圧縮係数  $m_v$  と時間沈下量関係から求めた圧密係数  $c_v$  から透水係数  $k$  を次式で求める。

$$k = m_v \gamma_w c_v \quad (17)$$

ここに、

$\gamma_w$  : 水の単位体積重量

図-17に圧縮曲線として  $e - \log p$  関係を示す。図中の数字は養生圧力を示している。図-17には、14日養生の例を示したが、28日養生でもほぼ同じ結果が得られている。また、参考のために、室内で練り返して再圧密した試料の圧密試験で得られた母材の正規圧密曲線も示した。

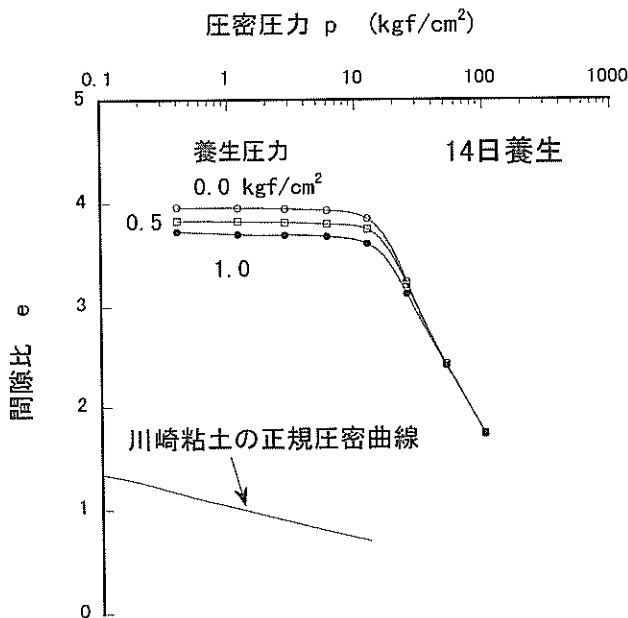


図-17 気泡混合処理土の圧縮曲線(段階荷重圧密)

この図を見ると、初期の間隙比は養生圧力によって異なるが、正規圧密領域に入ると養生圧力が異なってもほぼ同じような挙動をするようになることがわかる。この材料の圧密降伏応力は、16~18kgf/cm<sup>2</sup>であり、ほとんど養生圧力の影響を受けない。また、圧縮指数  $C_c$  は、初期間隙比の違いの影響を受け、養生圧力が大きくなると小さくなるが、養生圧力がそれぞれ0.0, 0.5, 1.0kgf/cm<sup>2</sup>のときに、 $C_c$ はそれぞれ2.8, 2.7, 2.5であった。この材料の圧縮曲線は、圧密降伏応力以下の荷重レベルでは間隙比の変化が小さく、圧密降伏応力を超えると圧縮指数が大きくなるのが特徴である。一般に、セメントで固化した材料は、降伏するまでの間隙比の変化が小さく、圧密降伏応力が大きくなる。また、この材料の場合には、 $C_c$ が大きいことが特徴である。これらのことは、ある圧密圧力までは、セメントによって固められた骨格の剛性が高いが、ある圧力を超えると骨格が徐々に圧縮されるようになるが、セメントによって作られた高位の状態が一度に失われるわけではないことを示している。

図-18に体積圧縮係数  $m_v$  と平均圧密圧力  $\bar{p}$  の関係を示す。ここには今回行ったすべての実験データを示しており、それぞれ養生圧力や養生期間が異なっている。実験結果には、養生条件の相違による体積圧縮係数の違いは見られず、その影響が少ないことが示されている。

次は、圧密係数  $c_v$  である。段階荷重圧密試験では、 $c_v$  は実験で得られた時間沈下量の間係を理論的に得られる関係に当てはめることによって求められる。一般の不飽

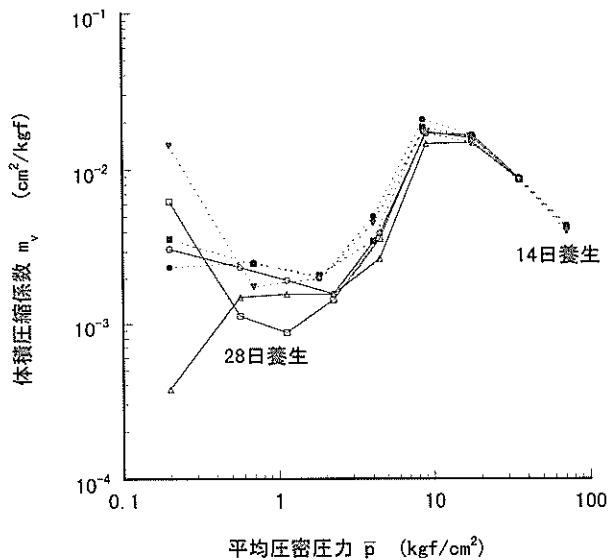


図-18 体積圧縮係数と平均圧密圧力の関係(段階荷重圧密)



和土の場合には、間隙流体が圧縮性であることと圧密の過程で透水係数が変化することが原因となって、時間沈下量の関係が理論曲線とは異なった傾向を示すことになる。その傾向として、

- ①時間軸を平方根にとった場合の時間沈下量曲線に初期の直線部分が表れず、常に曲がった曲線となる(図-19(a))
- ②初期圧縮量が多い(図-19(b))
- ③時間軸を対数にとった場合の一次圧密曲線がやや平らになる(図-19(b))
- ④二次圧縮曲線が急になる(図-19(b))

などがあげられる<sup>15)</sup>。気泡混合処理土の場合には、圧密の過程での透水係数の変化が大きいかどうかについては不明であると考えられ、上の特徴がどの程度になるかはわからないが、いずれにしてもこのようなことを考慮してデータを整理する必要がある。

今回の時間沈下量関係を整理するにあたり、 $\sqrt{t}$ 法を用いてみたところ、最初の測定までの沈下量が極めて大きく、この方法を適用することが不適切であることがわかった。そこで時間軸を対数にとって整理したところ、図-20のような結果を得た。これは、養生圧力0.0kgf/cm<sup>2</sup>、養生期間14日、圧密圧力50.2kgf/cm<sup>2</sup>の条件のときのデータである。この図において圧密開始時の沈下量は0としてある。実験のデータとしては、やや太い実線の部分のみが得られている。ここでは、曲線のもっとも急な部

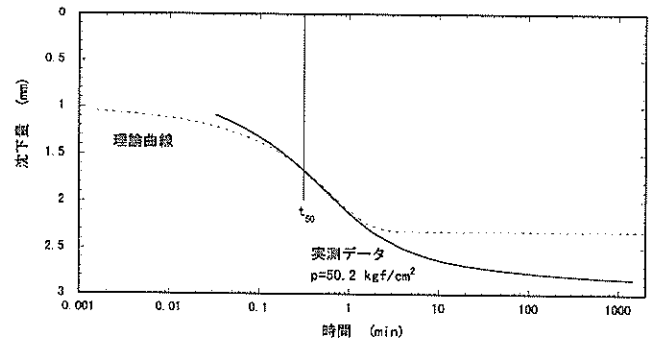
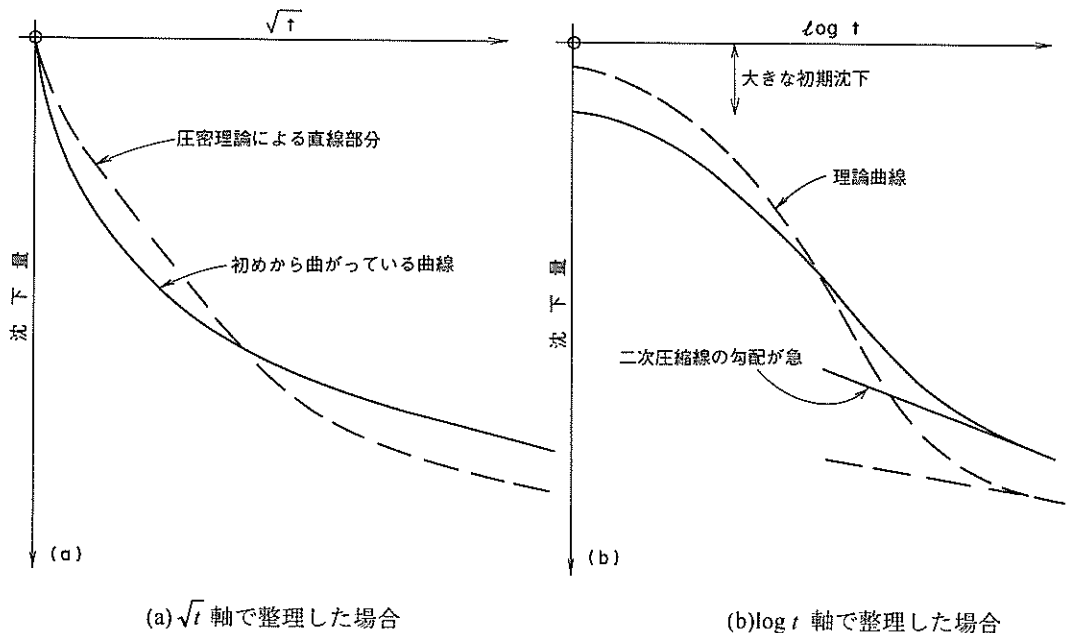


図-20 気泡混合処理土の時間沈下曲線(段階載荷圧密)

分以降のデータは理論曲線にあっているものと考えて整理を行った。想定した理論曲線は図-20に細い点線で示した。このような整理が妥当であるという保障はないが、想定した理論曲線と実測データとを比較からみて、圧縮性間隙流体の圧縮は圧密の初期にほとんどおきているとすれば、このような整理方法も可能と考えられる。このようにして決定した圧密係数を図-21に示す。

以上の結果から求めた段階載荷による透水係数 $k$ と平均間隙比 $e$ の関係を図-22に示す。この結果は、三軸試験機によって求めた透水係数よりやや大き目の値となっている。図-19からすると、実際の $e$ はもっと大きく取れる可能性があり、 $k$ はこれよりもう少し大きく求められる可能性がある。



(a)  $\sqrt{t}$ 軸で整理した場合

(b)  $\log t$ 軸で整理した場合

図-19 不飽和土の時間沈下曲線<sup>15)</sup>

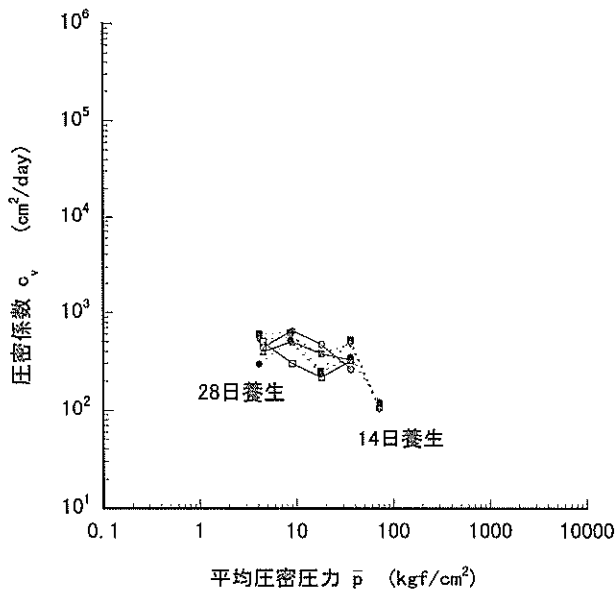


図-21 圧密係数と平均圧密圧力の関係(段階載荷圧密)

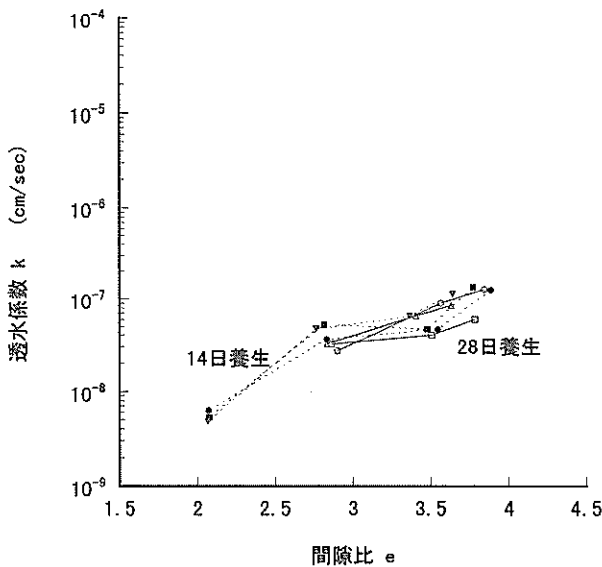


図-22 間隙比と透水係数の関係(段階載荷圧密)

#### 4.5 定ひずみ速度圧密試験

4.4に示したように、気泡混合処理土は段階載荷圧密試験では、荷重載荷直後に瞬時沈下の挙動が著しく、圧密係数を適切に求められているかは大いに疑問である。このような、気泡の圧縮が原因と見られる瞬時圧縮は、載荷の方法が異なれば現象的にも異なるものと考えられる。このような観点から定ひずみ速度圧密試験を実施することにした。この試験は、段階載荷圧密試験とは異なり、飽和粘性土の場合透水係数を直接推定する試験であると考えてよい試験方法である。

試料の配合条件、供試体の養生条件、作成条件、寸法は段階載荷圧密試験の場合と同じである。

定ひずみ速度圧密試験では、間隙水圧の測定を伴うため、密閉容器に圧力を作用させ、それを背圧とするが、この圧力としては1.0kgf/cm<sup>2</sup>を採用した。用いた試験機では、間隙水圧を測定するための多孔板は直径1cm程度のもので、底面部の供試体中央部分にある。気泡を含む供試体の場合には、このような方法で供試体底面部に発生している間隙水圧の代表的な値を測定できているかどうかは必ずしも明確とは言えない。しかし、ここでは特殊な試験機を用いなくて気泡混合処理土の透水性を評価することがひとつの主眼であるので、このような方法を採用した。ひずみ速度は0.05%/minとした。最大荷重は圧密降伏応力が確認できる程度に大きくすることにした。

図-23に圧縮曲線の例を示す。この図は、養生期間が28日の例を示しているが、14日養生の場合もほぼ同様の結果が得られている。図-17に示した段階載荷圧密試験の結果と比較するとわかるように、気泡混合処理土の圧縮曲線は養生圧力の影響を受け、養生圧力が大きくなると初期の間隙比が小さくなり、圧縮指数もわずかながら小さくなる傾向がある。圧縮指数C<sub>c</sub>は、養生圧力が0.0, 0.5, 1.0kgf/cm<sup>2</sup>のときにそれぞれおよそ2.8, 2.4, 2.3となった。ただし、圧密降伏応力については、養生圧力の影響を受けず、およそ6~10kgf/cm<sup>2</sup>の範囲にある。このように、一般的傾向は段階載荷圧密試験と定ひずみ速度圧密試験で同じ結果となったが圧密降伏応力のみ段階載荷圧密試験の結果より小さくなった。この理由についてはよくわからないが、供試体作成時期の違いなどによるばらつきの影響が大きいのではないかと考えている。

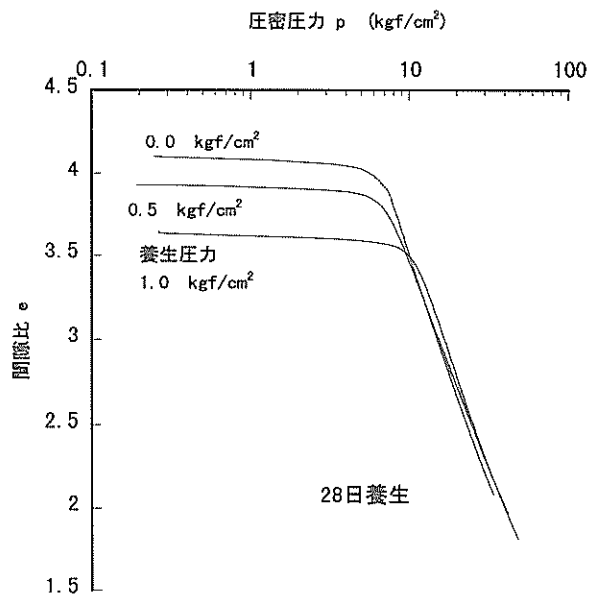


図-23 気泡混合処理土の圧縮曲線(定ひずみ速度圧密)

図-24に圧密圧力 $p$ と体積圧縮係数 $m_v$ の関係を示す。体積圧縮係数 $m_v$ については、養生条件の影響をほとんど受けていないので、ここにはすべてのデータを示した。定ひずみ速度圧密試験の結果は、実線で示してある。また、段階载荷圧密試験の結果も点線で示している。これらの結果は、段階载荷圧密試験と定ひずみ速度圧密試験でほとんど結果に差がないことを示している。

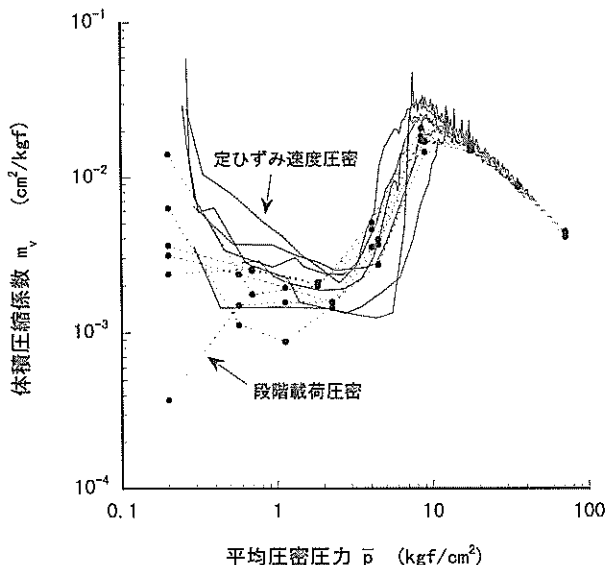


図-24 体積圧縮係数と平均圧密圧力の関係

図-25に圧密係数 $c_v$ と圧密圧力 $p$ の関係を示す。図-24と同様に、すべての実験結果をまとめて示してある。また、段階载荷圧密試験の結果も示しており、実線が定ひずみ速度圧密試験の結果であり、点線が段階载荷圧密試験の結果である。定ひずみ速度圧密試験の結果は、過圧密領域で $c_v$ にばらつきがあるが、正規圧密領域に入ると養生条件の差がほとんどなくなる。また、 $c_v$ の変化が非常に大きいのが特徴的である。ここで、 $c_v$ は定ひずみ速度圧密試験の結果から次のようにして求めている。

$$c_v = \frac{\Delta\sigma \cdot \bar{H}^2}{2 \cdot \bar{u} \cdot \Delta t} \quad (18)$$

ここに、

$\Delta t$  : 結果の整理に用いる時間間隔

$\Delta\sigma$  :  $\Delta t$ の時間間隔の間の軸圧縮応力の増分

$\bar{u}$  :  $\Delta t$ の時間間隔の間の底面で測定される平均間隙水圧

$\bar{H}$  :  $\Delta t$ の時間間隔の間の供試体の平均高さ

このように、定ひずみ速度圧密試験では、供試体下部で測定した間隙水圧と、供試体中の間隙水圧分布を仮定することによって圧密係数を推定している。従って、実

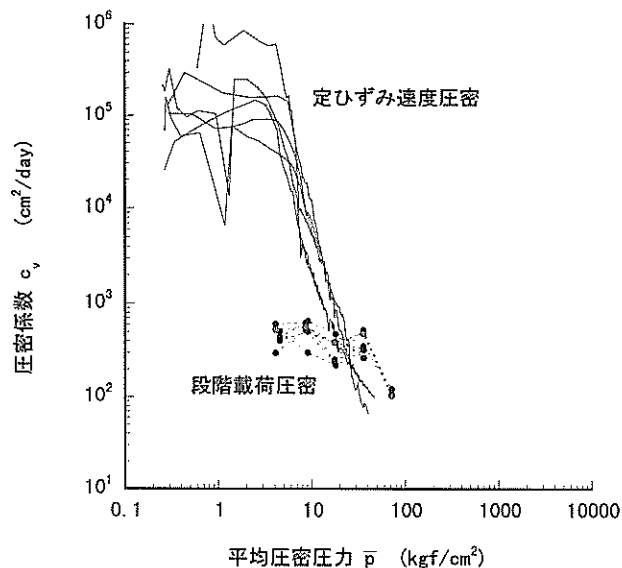


図-25 圧密係数と平均圧密圧力の関係

験データの評価には、間隙水圧の測定精度や間隙水圧分布形状の推定などが問題となり、特に今回のような不飽和な土については、通常の仮定が適切であるとは言い難いところがある。

このようなことを考慮して図-25を見ると、荷重レベルの低いところでは、間隙水圧の上昇が少ないために、計算された $c_v$ が大きくなっているが、その理由は単純に $c_v$ が大きいためではなく、間隙流体の圧縮性などが原因していると考えられる。また、 $c_v$ は正規圧密に入ってから高い状態が続いているが、これについても、定ひずみ速度圧密試験の試験方法によるところが大きいと思われる。このように、求められた $c_v$ は真の $c_v$ とはいえないと結論づけられるが、これをどう評価したら良いかについては、5.で触れることにする。

透水係数 $k$ は、段階载荷試験と同様に、式(17)で計算できるが、実際的には、次式によって実験データから直接的に計算していることになっている。

$$k = \frac{\Delta H \cdot \bar{H}}{2 \cdot \bar{u} \cdot \Delta t} \times \gamma_w \quad (19)$$

ここに、

$\bar{H}$  :  $\Delta t$ の時間間隔の間の供試体の圧縮量

従って、間隙水圧の取扱いに関する問題は圧密係数の場合と全く同じである。

図-26に透水係数と間隙比の関係を示す。実線が定ひずみ速度圧密試験の結果である。点線は段階载荷圧密試験の結果である。これらの結果は圧密試験より得られたものであるので、間隙比が大きなもの、圧密荷重が小さい過圧密領域のものであり、間隙比が小さなものは圧

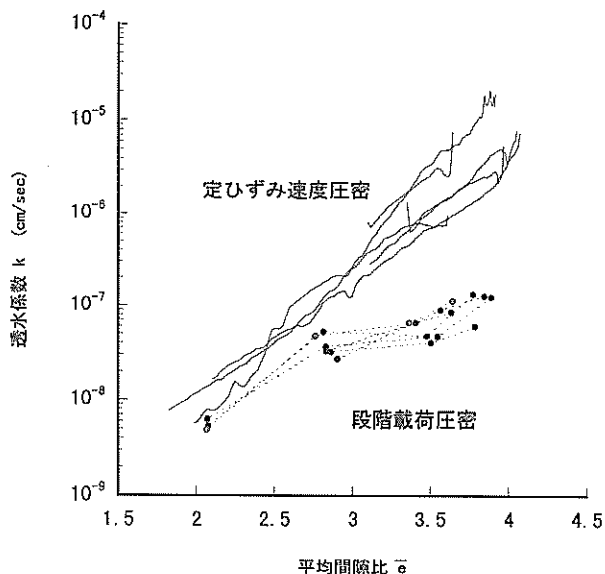


図-26 間隙比と透水係数の関係

密荷重の大きな正規圧密領域のものである。図中の圧密係数のところでも述べたように、間隙比の大きな、過圧密領域や正規圧密の初期の領域では、定はずみ速度圧密試験の場合過大な透水係数が求められている恐れがある。

### 5. 考察

4. に示したいくつかの実験結果を総合すると、気泡混合処理土の透水係数としては三軸透水試験の結果がもっとも信用がおけるものと考えられ、図-16に示したような範囲に存在するとしてよいと思われる。しかし、三軸透水試験においても透水係数が正確に求められるにはある程度の時間を要するといった問題があり、また場合によっては圧密試験を実施して透水係数を推定したいケースもあるものと思われる。ここでは、気泡混合処理土の透水試験時の挙動と圧密試験時の挙動のシミュレーションを実施し、気泡混合処理土の透水性について検討する。

シミュレーションに用いる支配方程式は、(6)式である。この式を3. で示したように差分法で計算を行った。なお、ここでは、透水係数は間隙比のみの関数として表わせるものとして取扱っている。

三軸試験機による透水の場合、供試体は養生圧力が  $0.0 \text{ kgf/cm}^2$  であった。この時、飽和度  $S_r$  はおよそ  $0.70$ 、下端から作用させた水圧は  $0.2 \text{ kgf/cm}^2$  であるので、(8)式の  $u$  は  $1.0 \sim 1.2 \text{ kgf/cm}^2$  の範囲である。体積圧縮係数  $m_v$  は、およそ  $0.01 \text{ cm}^2/\text{kgf}$  である。間隙比  $e$  がおよそ  $4$  であるので、間隙率  $n$  は  $0.8$  となる。また、水の圧縮係数  $C_w$  は  $4.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kgf}$  とした。この場合、 $\alpha$  は  $21 \sim 25$  となる。 $\alpha$  はいわば圧密係数  $c_v$  を低下させるものであるので、

圧密の速度が  $1/\alpha$  になったものと同じ事になる。このようなケースの場合、飽和しているものとすれば圧密係数  $c_v$  は約  $900 \text{ cm}^2/\text{day}$  となるが、気泡混合処理土の場合には、 $36 \sim 43 \text{ cm}^2/\text{day}$  として計算するのとほぼ同じである。

図-27に、今回の気泡混合処理土の場合の三軸試験機を用いた透水試験中の間隙水圧の変化のシミュレーション結果を示す。図中の太い実線は同じ透水係数をもつが気泡を含んでいない場合についてのシミュレーション結果も参考のために示した。気泡を含む場合には、上述のように見かけの透水係数が低下するため、間隙水圧が定常に達するのに長い時間を必要とすることが示されている。

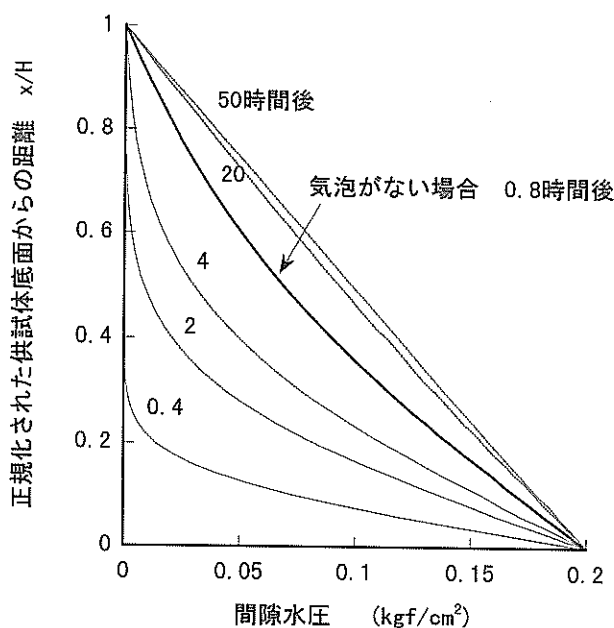


図-27 通水中の間隙圧の変化

通水の過程ではこのように供試体内部の間隙圧が上昇するが、間隙圧が上昇するにつれて、気泡が収縮するため、定常状態に達するまでは、供試体下端につないであるピュレットから供試体に流入する水の量が多く、見かけ上透水係数が大きいと判断されるような現象が生じる。図-28にはそのような状況を示すために、供試体に流入する水の量の経時変化についてシミュレーションした結果を示す。シミュレーションをする際には、 $\alpha$  を適切に評価しなくてはならない。このケースの場合には、体積圧縮係数  $m_v$  と気泡の内部の初期の圧力  $u$  を適切に評価することが求められる。特に、気泡混合の中に存在している気泡は、表面張力の影響によって気泡外の圧力より高くなっていることが考えられる。今回の条件で解析してみると、このシミュレーションでは、 $m_v$  の違いによる影

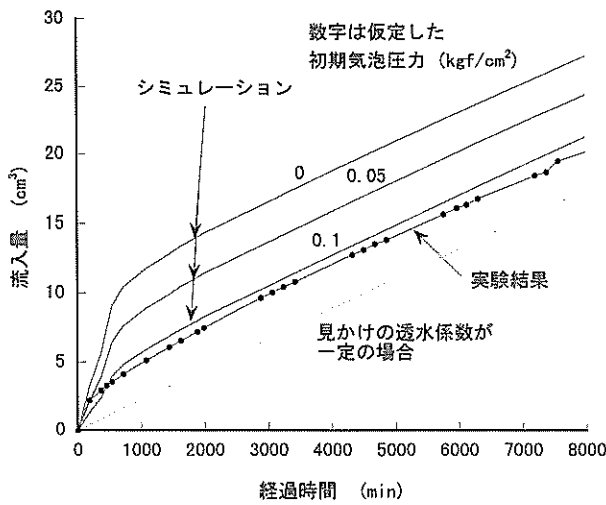


図-28 三軸試験機による透水試験のシミュレーション

響は少なく、気泡の内部の初期の圧力 $u$ の違いによる影響が大きいことが分かった。そこで、この図には、気泡内部の初期圧力をいくつか変えて計算した結果を示した。また、この図には、実測のピュレットの水位変化をプロット付きの実線で示し、気泡の収縮を考慮しなくてよい場合の結果については点線で示している。実験結果とシミュレーション結果では、通水の初期に急激に供試体に水が流入することを示している。この傾向については、今回用いたようなモデル化によって現象がだいたい表現できるようになっているようである。ただし、流入量の絶対値は、気泡内の初期圧力の仮定によって大幅に異なっており、気泡内の初期圧力を無視するとシミュレーション結果と実験とで大きく異なることが分かる。これまでのSGM軽量土の研究の成果の中でも、養生圧力の違いによる密度変化の調査結果などからすると、気泡は多少被圧されている傾向にあることが報告されており<sup>14)</sup>、今回のシミュレーション結果もこのことを裏付けているようである。

上記のシミュレーション結果を見かけの透水係数として示すと、図-29のようになる。なお、ここでは、気泡内の初期圧力を $0.0\text{kgf/cm}^2$ とした場合のみ示している。シミュレーションと実験データとで、見かけ上の透水係数が等しくなるのに要する時間はほぼ同じとなっており、この結果もこのモデル化で現象を表現できることを示している。

このようなことから、実際には、三軸透水中の透水係数はほぼ一定であったと考えてよいものと考えられる。

定ひずみ速度圧密試験では、圧密の初期に大きな透水係数が観察され、圧密圧力が大きくなるにつれて急速に

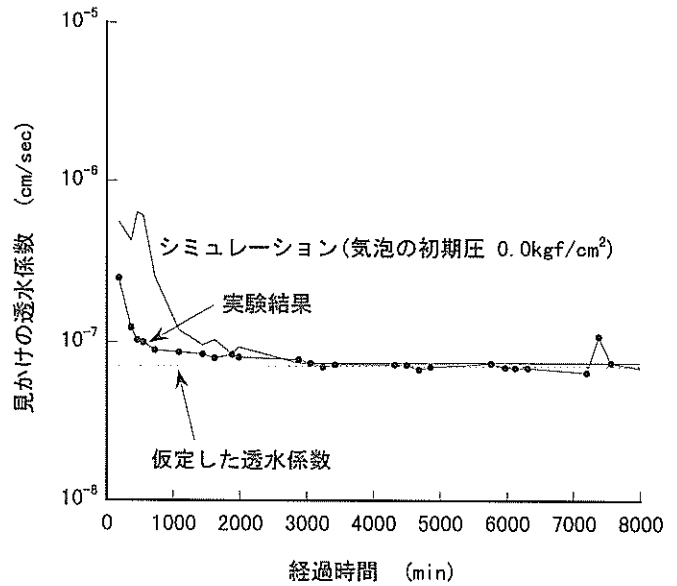


図-29 見かけの透水係数の経時変化

透水係数が低下した。この現象についても、圧密中の供試体内の気泡の圧縮が強く関係しているものと考えられる。そこで、定ひずみ速度圧密試験の実験結果についてもシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、各測定段階では供試体は準定常状態となっており気泡は供試体からは流出しないものとして、圧縮量と軸圧縮力と供試体底面で測定される間隙水圧をもとにシミュレーションを実施し透水係数を逆算している。このシミュレーションでも気泡内の初期圧力は $0.0\text{kgf/cm}^2$ としてある。

このシミュレーションの結果を図-30に示す。このシミュレーションに用いた実験の供試体の養生条件は、養

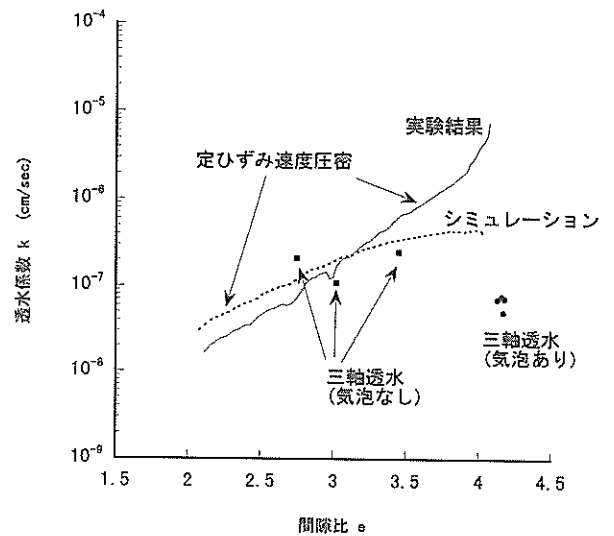


図-30 透水係数と間隙比の関係

生期間が28日、養生圧力は0.0kgf/cm<sup>2</sup>である。図-30には、実測値からマクロに推定した透水係数を実験結果として実線で示し、シミュレーションの結果を点線で示している。また、参考のため、三軸透水試験から求められた透水係数についても示した。なお、三軸透水試験の結果のうち●で示したのは気泡を含む場合の結果で、■で示したのは気泡を含まない場合の結果である。定ひずみ速度圧密試験の透水係数についてみると、圧密の初期の見かけの透水係数とシミュレーション結果との違いは非常に大きく、見かけの透水係数は過大に評価されていることが分かる。一方、圧密が進むと見かけとシミュレーションとで透水係数に差がなくなり、見かけの透水係数はやや小さめに出る傾向にあるようである。このシミュレーション結果と、気泡を含む場合の三軸試験機による透水試験結果による透水係数とを比べるとシミュレーションの結果は、全体的にやや大きめの透水係数を与えているようであるが、このシミュレーションの傾向としては、図-29でもあったように、少し高目の透水係数を与える傾向があるようである。

図-30には気泡を混入させずに作成した供試体(表-5のA-5からA-7)の三軸試験機による透水試験の結果も合わせて示してあるが、同じ方法による透水試験の結果であっても、気泡を含む場合と含まない場合とで間隙比と透水係数の関係には大きな違いがある事が分かる。ところで、三軸試験機を用いたこれらの透水試験に用いられた供試体は、単位体積あたりのセメント量がほぼ同じであり、試験時の含水比にもあまり大きな差がない。すなわち、気泡の有無による間隙比の違いの主たる原因は気泡の占めている分である。2.2でも述べたように、気泡混合処理土では、気泡は透水に関与していないとしてよいと考えられるが、図-30に示した結果もそれを支持しているようである。そこで、気泡の占める間隙を差し引いて間隙比を求め、さらに、気泡部分は有効断面積として寄与していないものとして、気泡を含む試料の間隙比と透水係数を計算し直したものを図-31に示す。この結果を見ると、三軸試験機を用いた透水試験の結果から得られる透水係数と間隙比の関係はほぼ等しくなり、マクロ的にはこのような考え方をしてもよいものと考えられる。ただし、収縮した気泡の周りでの透水の状態については実際にどのようなことが起きているかは現状では知見がなく、上述のことは実験結果の一つの解釈として成立しているということを示しているにとどまっている。ミクロな観点からの気泡の周りの透水についての検討は現在進めているところである。

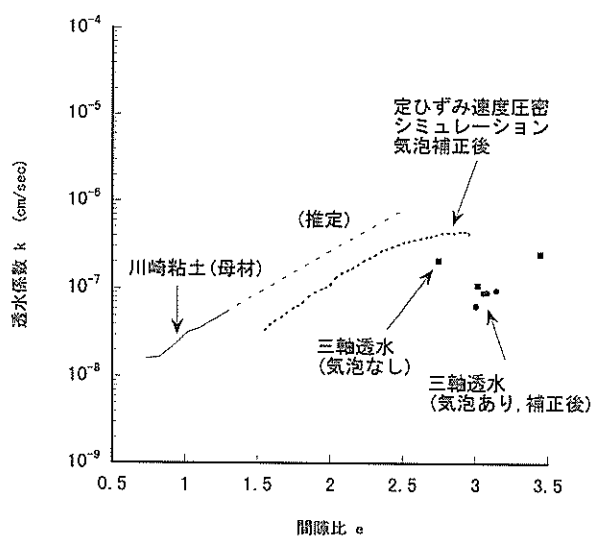


図-31 透水係数と間隙比の関係(補正後)

図-31には、母材である川崎粘土の透水係数と間隙比の関係と、定ひずみ速度圧密試験のシミュレーションから得られた透水係数の気泡の補正をしたものもあわせて示してある。図に示した、母材の透水係数は、繰り返して再圧密した試料の標準圧密試験から得られたものである。既往の研究<sup>6)</sup>によると透水係数を対数にとったものと間隙比の関係はほぼ直線的な関係があるとされているので、母材の透水係数と間隙比の関係を推定線として間隙比の高いところまで示している。定ひずみ速度圧密試験のシミュレーションから得られた透水係数と間隙比の関係は、母材の関係とほぼ平行であり、気泡混合処理土の透水係数についても透水係数を対数にとったものと間隙比の関係はほぼ直線的な関係があるようである。しかし、気泡混合処理土の場合には、セメントを添加しているため全体的に透水係数が低くなっているようである。寺師ら<sup>7)</sup>の研究によるとセメントの添加による透水係数の低下の割合は、間隙比の違いによっても異なるようである。寺師らの示した図(本報告の図-2)をもとに、試料が完全に飽和していたものとして間隙比を計算し、セメント添加量も単位体積当たり計算し直して整理したものが図-32である。この図からセメントの添加による透水係数の変化は初期の間隙比の影響を受けることがわかる。このような違いはあるが、この粘性土の場合、セメントを75kgf/m<sup>3</sup>添加すると透水係数はおよそ1/100~1/10ほど低下する結果となっている。一方、別の研究<sup>8)</sup>では、図-1に示したように、低下の割合を土質材料の違いだけで示しており、粘性土の場合には1/4程度に低下するとしている。今回の実験データからすると、セメント混

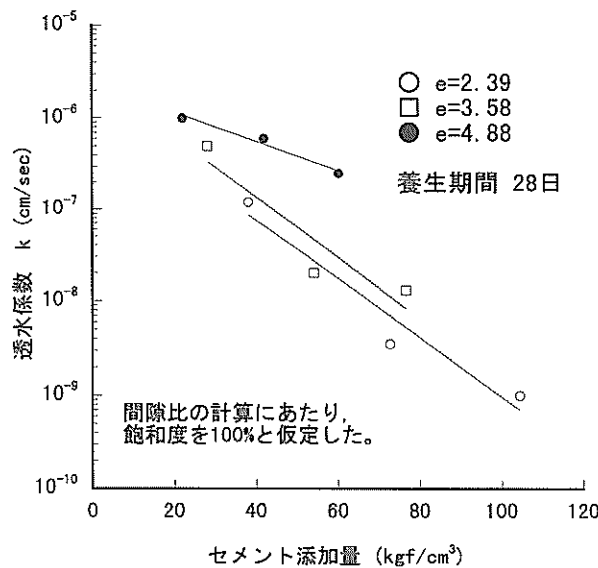


図-32 セメントの添加量と透水係数の関係

入によって透水係数の低下はシミュレーションの結果でおよそ1/4程度、三軸試験機による透水試験結果ではばらつきがあるが1/30程度であったようである。シミュレーションの結果はやや高目の透水係数を示している恐れもあるので、セメントの混合によっても透水係数は1/10以下に低下したと考えると良さそうである。

## 6. 結論

気泡を含むSGM軽量土の透水性を調べるために、三軸透水試験、定ひずみ速度圧密試験、段階載荷圧密試験を実施した。また、気泡を含むSGM軽量土の透水性を考慮できるモデルを構築し、実験の結果得られるマクロの透水係数とモデルによるシミュレーションとを比較した。その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 気泡を含むSGM軽量土の真の透水係数はセメントを含む母材の透水係数とほぼ一致する。すなわち、気泡を含むSGM軽量土の間隙比はかなり大きなものとなるが、気泡の存在による透水係数の増減はない。
- 2) 気泡を含むSGM軽量土の透水試験では、気泡の存在のため、初期に気泡が圧縮する環境ではみかけの透水係数が大きくなる。一方で、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に比べてはるかに長い時間を要する。
- 3) 気泡の圧縮性を考慮に入れて圧密試験結果を整理することにより適切に気泡を含むSGM軽量土の透水係数を決定することができる。

## 7. あとがき

本研究では、気泡を含むSGM軽量土の透水特性について検討するために、透水特性を調べるためのさまざまな試験を実施した。この結果からマクロ的には、透水係数を測定する方法を確認できたと考えている。しかし、地盤材料の内部でどのようなことがおきているかについては、不明であり、今回のモデルは現象をとりあえず説明できるということにとどまっているものと考えられる。現在この問題を解決するために、X線CTを用いた実験を進行させているところである。その結果が出次第改めて報告する所存である。

なお、本報告は、港湾技術研究所と(財)沿岸開発技術研究センターを代表とする研究グループとの共同研究「港湾・海洋環境における軽量地盤材料の開発」(平成4年度より開始)の成果の一部であり、共同研究グループでの討議を参考にさせていただいた。

本報告を取りまとめるにあたり、水上純一土質部主任研究官には圧密試験に関して有益なご助言をいただいた。また、善功企土質部長には、本報告の全般に対しご指導いただいた。

関係の各位に、記して謝意を表します。

(1997年12月1日受付)

## 参考文献

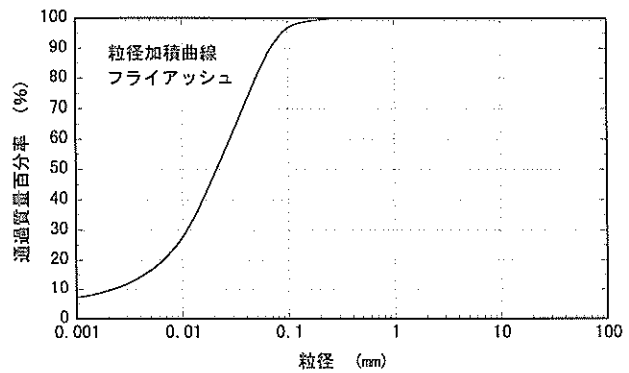
- 1) 土田 孝, 横山裕司, 水上純一, 清水和也, 笠井寿太郎: 港湾における軽量混合処理土の用途と現地打設実験, 港湾技研資料No. 833, 1996年, p. 30.
- 2) 土田 孝, 笠井寿太郎, 水上純一, 横山裕司, 植田和徳: 軽量混合処理土に及ぼす養生条件の影響, 港湾技研資料No. 834, 1996年, p. 24.
- 3) 土田 孝, 長井興治, 湯川雅之, 岸田隆夫, 山本 実: 岸壁の裏込め材として打設された軽量混合処理土の土質特性, 港湾技研資料No. 835, 1996年, p. 15.
- 4) 湯 怡新, 土田 孝, 竹内大輔, 鏡田昌孝, 西田 登: 軽量混合処理土の三軸試験結果と考察, 港湾技研資料No. 845, 1996年, p. 29.
- 5) 土田 孝, 輪湖建雄, 菊池喜昭, 東 俊夫, 新舎 博: 軽量混合処理土の水中打設時の流動性と材料特性, 港湾技研資料No. 865, 1997年, p. 25.
- 6) (社)セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル, (社)セメント協会, 1994年, p. 42.
- 7) 寺師昌明, 田中洋行, 光本 司, 本間定吉, 大橋照美

- ：石灰・セメント系安定処理土の基本的特性に関する研究(第3報)，港湾技術研究所報告第22巻第1号，1983年，pp. 69-96.
- 8) 渡辺邦夫：地中の虹，近未来社，1993年，pp. 19-28.
- 9) (社)土質工学会：不飽和土，ジオテクノート5，1993年，pp. 44-48.
- 10) 向後雄二，堀井 潔：応力浸透連成解析手法によるフィルダムの安定性の解析，不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム，土質工学会，1992年，pp. 127-134.
- 11) 森 範行，井上秀治，石樽保則，船津英治，渡辺直樹，黒島一郎：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，1994年，pp. 2423-2424.
- 12) 善 功企：海底地盤の波浪による液状化に関する研究，港湾技研資料No.755，1993年，p.112.
- 13) Verruijt, A. :Elastic storage of aquifers, Flow Through Porous Media, Chapter 8, Academic Press., 1969.
- 14) 菊池喜昭，高橋邦夫：港湾構造物の改良・更新に関わる地盤工学的課題，平成7年度港湾技術研究所講演会講演集，1995年，pp.19-20.
- 15) Head K., H. : Manual of Soil Laboratory Testing, Vol.2, pp.706-707.
- 16) 小林正樹・水上純一・土田 孝：粘性土の水平方向圧密係数の決定法，港研報告第29巻第2号，1990年，pp. 63-83.

## 付録 いくつかのスーパージオマテリアルの透水係数

### 1. 石炭灰を母材とするSGMの透水係数

フライアッシュ(石炭灰)は組成のほとんどがシルト分で構成されている。本実験で用いたフライアッシュの粒径加積曲線を付図-1に示す。フライアッシュの土粒子密度  $\rho_s$  は  $2.124\text{g/cm}^3$  であった。



付図-1 フライアッシュの粒径加積曲線

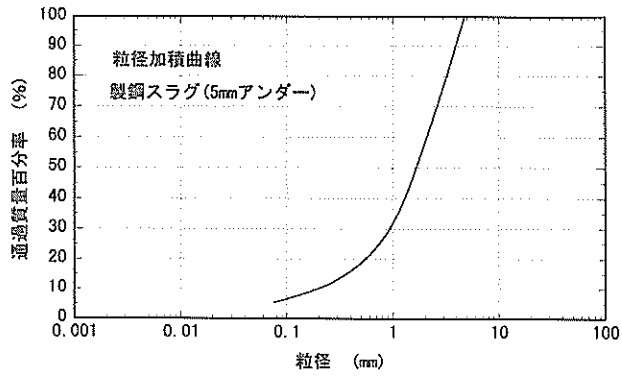
本実験ではフライアッシュを固化させるために，セメントを用いている。配合するセメントの量はあらかじめ配合試験を行い，一軸圧縮強度が  $2\text{kgf/cm}^2$  となることを目標にした。

セメントを混合したフライアッシュの供試体は以下の手順で作成した。まず，フライアッシュを含水比50%のスラリー状態に調整した。つぎに，セメント添加量が  $20\text{kgf/m}^3$  となるようにセメントを入れよく攪拌する。この混合試料をモールドに入れ1週間水中養生した。養生中いくつかの供試体については圧力をかけたが，この事は実験結果には影響はなかった。透水実験は変水位試験方法で行った。平均的な動水勾配は4~8の範囲で変えて実験を行った。実験の結果得られた透水係数  $k_s$  は，  $8 \times 10^{-5}\text{cm/sec}$  であった。

### 2. 製鋼スラグの透水係数

製鋼スラグは，一種の工場製品ともいべきもので，出荷時に最大粒径や最小粒径を規定することが可能である。今回は最大粒径19mmの材料を用意したが，実験の都合上最大粒径が大きすぎると判断し，透水試験に用いる試料としてふるいにかけて，最大粒径を5mmに落としたものを用いた。粒径加積曲線を付図-2に示す。製鋼スラグの土粒子密度  $\rho_s$  は，  $3.507\text{g/cm}^3$  であった。この5mmのふるいを通した製鋼スラグを炉乾燥させ，モールドに





付図-2 製鋼スラグの粒径加積曲線

充填後、 $D_r = 50\%$ になるよう木槌でモールドに打撃を加えて締め固めた。この材料については透水性が高いと判断されたので、動水勾配を0.15~0.6の範囲で変えて定水位試験を実施した。測定された透水係数 $k_{15}$ は動水勾配の影響を受けず、およそ $2.9 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ であった。