

# 破碎されたカキ殻を含む浚渫粘土の透水特性

李基豪<sup>1</sup>・風間基樹<sup>2</sup>・寺田賢二郎<sup>3</sup>・柳澤栄司<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻(同上)

<sup>3</sup>正会員 Ph.D 東北大学助教授 大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻(同上)

<sup>4</sup>フェロー会員 工博 八戸工業高等専門学校校長(元東北大学教授)

(〒039-1192 八戸市田面木字上野平16-1)

破碎したカキ殻と浚渫粘土の混合土を埋立材料として活用するための基礎資料として、その透水性を検討した。まず、カキ殻を含む混合土の透水性を圧密実験から検討した。その結果、それ自身は不透水であるカキ殻は混合土の透水性を改善する特性を有することがわかった。混合土のマクロな透水特性は、構成材料である粘土およびカキ殻の自身の透水性と両者が成す構造によって決まる特性である。そこで、混合土の供試体スケールの非均質性を反映できる均質化法により、マクロな混合土の透水係数を説明できる等価物性としてのカキ殻の見かけの透水係数を同定した。さらに、理想化したモデルを用いて、カキ殻混合率を増加させた場合の混合土の透水性を解析的に求めるとともに、混合土の透水異方性を検討した。

**Key Words :** *mixed soil, wastes, permeability coefficient, consolidation test, homogenization method, anisotropy*

## 1. まえがき

河口部などに堆積する高含水比粘土(ヘドロ)は港湾区域の船路を埋没させるため、定期的に浚渫される。しかし、浚渫された粘土は圧密するまでに長い期間を要するため、埋立地の埋立材料として使用するためには、なんらかの処理が必要となる。そのような浚渫粘土の処理法としては、固化処理方法と粒度調整による方法が代表的である。

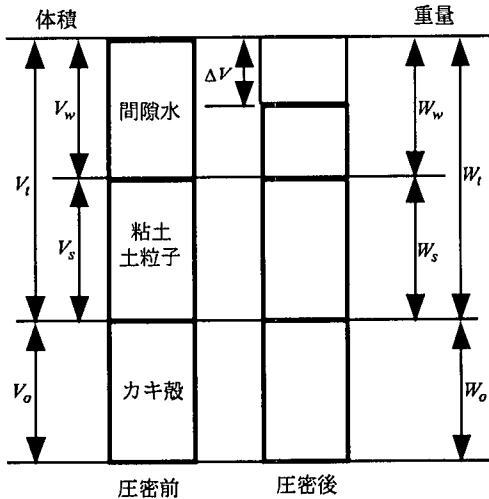
粒度調整による方法は、高含水比の粘土と砂を混合するものである。混合土は細粒土と粗粒土の混合率や物理的特性によって異なる沈下特性を示すことが知られており、鬼塚ら<sup>1)</sup>はこのような粒度調整された混合土の圧縮指数と塑性指数の関係がほぼ直線関係となることを示した。また、福江ら<sup>2)</sup>は細粒分が減少し粗粒分が増加すると混合土の圧縮特性が変化することから混合土の圧縮性の新たな評価法を提案している。

一方、固化処理方法は、天日乾燥に長時間を要する高含水比粘土のトラフカピリティーを確保するために、使われる方法である。この種の処理方法としては、セメント系安定処理と石灰系安定処理が代表的方法である。上ら<sup>3)</sup>はセメント系固化材により安定化されたカオリン粘土の力学的性質に関して、木幡ら<sup>4)</sup>はセメント安定処理土の強度-変形の特性について報告

している。また、河野ら<sup>5)</sup>は石灰とフライアッシュの添加による粘性土の安定処理特性について研究し、実用的な成果を上げている。

これに対して、最近では、上述した粘土の処理方法に混合材として廃棄物を活用しようとする研究が幅広く進められている。特に、廃棄物を用いて高塑性高含水比の浚渫粘土を改良する方法については、環境保護の観点からも注目を集めている。加藤ら<sup>6)</sup>はプラスチック片を混合したセメント安定処理土について強度-変形の特性を求めており、松尾ら<sup>7)</sup>は建設発生土を利用した軟弱地盤改良工法の研究開発を行っている。このように、軟弱浚渫土の処理技術および処理された土の力学特性評価について、多くの研究が行われているが、より合理的な評価法の開発が望まれている<sup>8), 9)</sup>。

本研究では、実際の埋立現場を想定し、浚渫粘土の混合材として漁業系廃棄物である破碎したカキ殻の利用を考える。東北地方では、カキ殻は廃棄物として多量に野積みされており、悪臭の発生原になるだけではなく美観上も好ましくないため、その有効利用が望まれている<sup>10)</sup>。現在、カキ殻はSCP (Sand Compaction Pile) 改良地盤の砂に混合し使用されているが<sup>11)</sup>、さらに多量のカキ殻を安定的に利用するため、カキ殻をそのまま浚渫粘土と混合することが考



$V_0$  : カキ殻の体積       $W_0$  : カキ殻の重量  
 $V_s$  : 粘土土粒子の体積       $W_s$  : 粘土土粒子の重量  
 $V_w$  : 間隙水の体積       $W_w$  : 間隙水の重量  
 $V_t$  : 粘土の体積       $W_t$  : 粘土の重量  
 $\Delta V$  : 体積変化量

粘土の体積変化率:  $\frac{\Delta V}{V_t}$       混合率  $R = \frac{W_0}{W_s} \times 100(\%)$

図-1 体積変化率の定義

えられている。カキ殻を浚渫粘土に混合したものは典型的な混合土であるが、その透水性や変形性などの力学特性は未解明な部分が多い。本研究は、実験および数値解析による検討を行い、埋立材料として活用するための透水性に関する基礎資料を提供することを目的としている。

本論文では、まず大型圧密槽を用いた圧密実験を行い、カキ殻を含む混合土の圧密特性および粘土のみの透水特性を把握する。次に、圧密試験の結果をもとに、カキ殻を透水性材料とみなしたときのみかけの透水係数を均質化法を用いて算出する。カキ殻そのものは不透水性材料であるが、計算から求めたカキ殻の見かけの透水係数はカキ殻が混合土の透水性に与える影響を示すものである。また、理想化した解析モデルを用いた解析を行い、カキ殻の混合率を増加させたときに得られる混合土の透水係数の変化とカキ殻粒子の形態によって発生する透水係数の異方性の変化について考察した。本研究の特色は、混合土の透水特性を実験的に検討するだけでなく、混合土の微視的な構造に着目し、供試体スケールの非均質性を反映できる均質化法を用いてカキ殻の見かけの透水特性を定量的に評価することにある。実験と均質化法を組み合わせることで地盤材料の特性を評価する試

表-1 実験材料の物理的特性

試験項目	粘土	破碎されたカキ殻
土粒子の密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.538	2.430
液状限界 (%)	87	-
塑性限界 (%)	33	-
塑性指数	54	-
最大間隙比	-	0.809
最小間隙比	-	0.693
粒度組成	粘土 (%)	28.0
	シルト (%)	52.5
	砂 (%)	16.5
	礫 (%)	3.0

みは、国内外において例がなく本研究の有用性および発展性は、大いに期待されるものと考えられる。本研究で提案する方法は、カキ殻混合土の透水特性を予測できるだけでなく、他の異なる透水性を持つ混合材についても適用可能な方法である。

## 2. カキ殻混合土の圧密特性

### (1) 混合土供試体の作成

#### a) 混合土の構成割合の定義

カキ殻混合土は間隙水、土粒子、破碎されたカキ殻から構成されている。このため、固体部分としての土粒子と水の質量比の関係で表現する含水比の概念を用いて整理することはできない<sup>12)</sup>。大嶺ら<sup>13)</sup>は混合土を粗粒土骨格と細粒土と水から成る部分がある割合で混在した材料と見なし、その応力-ひずみ関係を考察した。本論文でも、固相部分をカキ殻と粘土の二つに分けて取り扱うことにする。図-1は混合土の構成割合の定義を示したものである。前提条件として粘土が飽和度100%であること、破碎されたカキ殻は剛体と見なし、含水比0%であるとするれば、混合土の体積と質量の関係は次のように表わすことができる。

$$V = \frac{W_0}{\gamma_0} + \frac{W_s}{\gamma_s} + \frac{W_w}{\gamma_w} \quad (1)$$

ここで、記号は図-1に示すとおりである。式(1)中  $W_0$  は混合率  $R(\%)$  を用いて、

$$W_0 = W_s \times R/100 \quad (2)$$

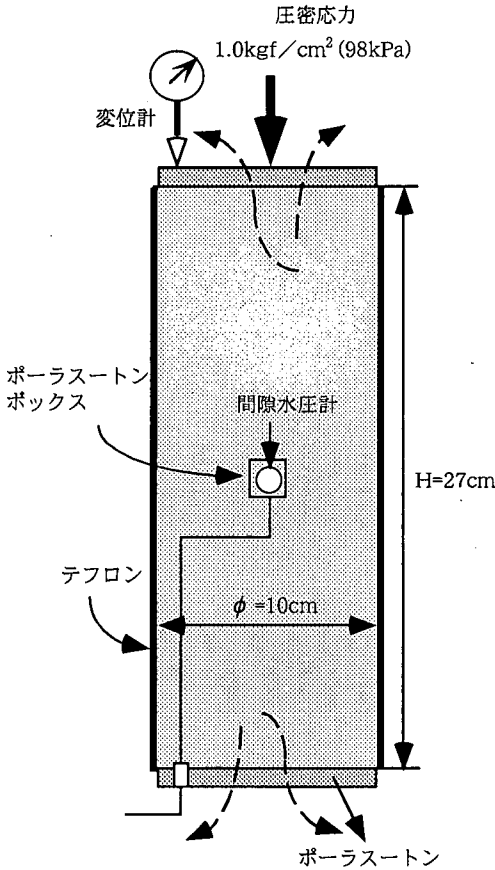


図-2 実験装置の概略図

のように表すことができる。以下の圧密試験は、この混合率  $R$  を用いて整理する。

#### b) 混合土の作製方法

実験に用いた粘土は塩釜港で浚渫したもので、その自然含水比は90%、塑性指数は54である。粘土は混ぜながら脱気した後、濡れている布で密閉して含水比が維持できるように保管した。粘土に混合するカキ殻は、モールドの大きさの関係から破碎して使用した。破碎したカキ殻はふるいで異物を取り除いて、数日間天日乾燥した。破碎する前のカキ殻の原形状は長さ80~140mm、幅30~70mm、厚さ20~50mmであり、破碎後は薄片になる特徴がある。破碎したカキ殻の粒度分布は2.0~9.5mmであり、混合するカキ殻の粒度分布が均等になるように2.0~4.75mmの範囲で50%、4.75~9.5mmの範囲で50%ずつ入れて混ぜた。圧密試験のために用意した混合土はカキ殻の混合率が0から80%までの8つの混合率で作成した。つまり、基質部分の浚渫粘土の含水比は一定としてカキ殻を添加した。圧密試験に用いた粘土とカキ殻の物理的特性を表-1に示す。

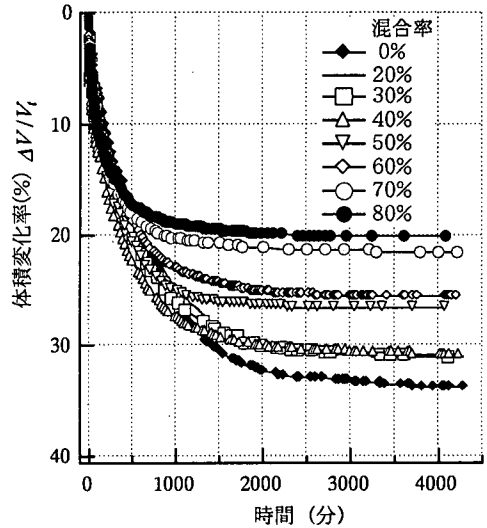


図-3 体積変化の経時変化

#### c) 圧密試験の方法

カキ殻混合土の圧縮、透水特性を検討するため、直径100mm、高さ270mmの大型モールドを用いた圧密試験を行った。圧密試験の排水条件は上下両面排水とし、圧密モールドはできるだけ摩擦を減らすためにテフロンで作成した。供試体の中心部に設置した間隙水圧計は、上部から直接圧密荷重を受けないように直径19mm、高さ13mmの小さなポーラストーン製の箱を被せた。また、沈下量と過剰間隙水圧はレコーダーに自動的に記録されるようにした。実験に用いた圧密応力は1.0kgf/cm<sup>2</sup> (98kPa) とし、圧密時間は3T法で決定した。図-2は実験装置の概略図を示すものである。

#### (2) 実験結果

##### a) カキ殻混合土の体積圧縮特性

混合土を圧密すると、排水に応じて体積圧縮が起こる。この体積圧縮は、基質部分の粘土が圧密されたものであることから、体積圧縮量は粘土に対するものとして評価した。

図-3は混合土中の粘土の体積変化率の経時変化を示したものである。混合土の体積変化率はカキ殻混合比が大きいくほど早く収束していることがわかる。また、最終的な体積変化量はカキ殻混合率が増加すると小さくなるのがわかる。粘土のみの体積変化率の最大値に対してカキ殻の混合がある場合の体積変化率の比として定義した相対体積変化率を表-2に示す。カキ殻混合率が増加すると、相対体積変化率は

表-2 体積変化率  $\Delta V/V_i$

カキ殻混合率 (%)	体積変化率 (%)	相対体積変化率 (%)
0	33.8	100
20	31.0	92
30	30.9	91
40	30.7	91
50	26.6	79
60	25.4	75
70	21.5	64
80	20.1	59

$$\text{相対体積変化率} = \frac{\text{ある混合率での体積変化率}}{\text{粘土のみの場合の体積変化率}} \times 100$$

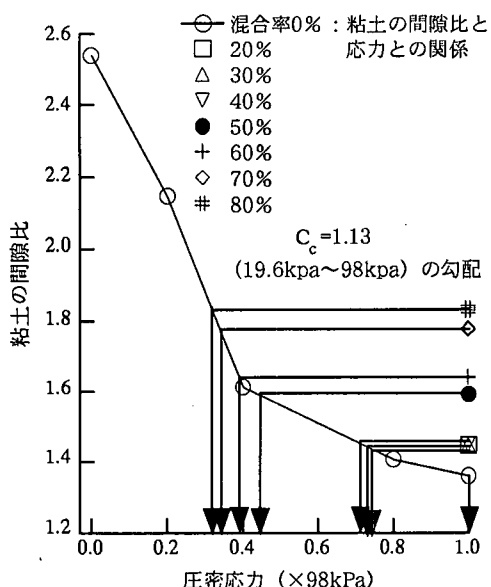


図-4 応力分担率の求め方

小さくなる。カキ殻混合率80%の相対体積変化率は粘土のみのものに対し、59%程度となっている。

このようにカキ殻の割合が増すに連れて、基質部分の粘土の体積変化が小さくなったのは、上載した圧密応力の一部がカキ殻骨格によって受け持たれたためと考えられる。そこで、混合土の体積圧縮特性を評価するために、カキ殻と粘土の応力分担率を次のように求めた。まず、粘土のみの圧密試験結果から、圧密応力-間隙比関係が図-4のように求められる。次に混合土を圧密した時の粘土のみの間隙比を求め、図の関係から粘土が受けた圧密応力が求められることができる。なお、粘土の間隙比は飽和度100%とした時、図-1に示した記号から次のよう定義される。

表-3 粘土が受けている応力と間隙比

カキ殻混合率 (%)	間隙比*	粘土が受ける応力 (kPa)	粘土の応力分担率 (%)
0	1.346	98.0	100
20	1.445	71.5	73
30	1.445	71.5	73
40	1.446	70.6	72
50	1.595	44.1	45
60	1.639	38.2	39
70	1.778	33.3	34
80	1.834	31.4	32

\*) 圧密沈下が終了した時(3T法)での間隙比

$$\text{応力分担率} = \frac{\text{粘土の受ける応力}}{\text{全鉛直有効応力}} \times 100$$

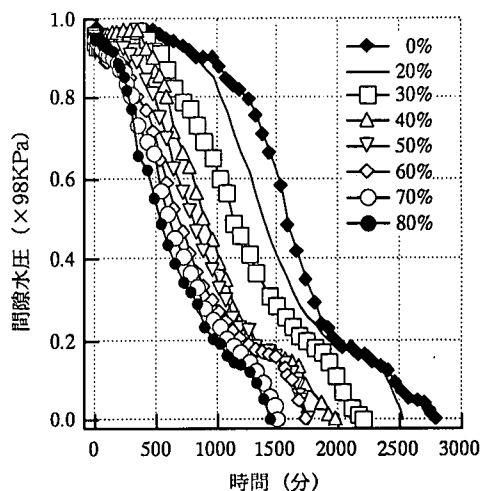


図-5 間隙水圧の消散曲線

$$e = \frac{V_w}{V_s} \quad (3)$$

表-3はこうして求めた粘土が受ける応力と応力分担率を示したものである。この結果から、圧密沈下が終了した時点(3T法)での間隙比から求めた粘土の応力分担率はカキ殻混合率が増加すると小さくなり、例えばカキ殻混合率80%の場合は粘土受け持つ応力は0.32kgf/cm<sup>2</sup>(31.4kPa)である。また、応力分担率が減少する傾向は混合率50%程度から大きく表われていることもわかる。

#### b) カキ殻混合土の圧密係数

混合土の場合、初期段階で大きな圧密速度が現われる特性があるため、初期部分への依存が比較的小さい最急勾配に至る範囲に着目することができる。キャサグランデ(logI)法で混合土の圧密係数を求めた<sup>14), 15)</sup>。

図-5は間隙水圧消散の経時変化曲線を示したもの

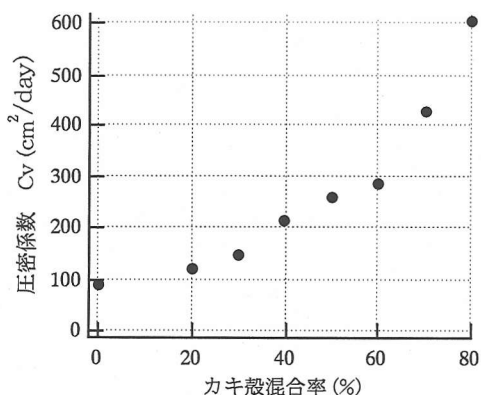


図-6 圧密係数とカキ殻混合率の関係

である。過剰間隙水圧の消散は間隙水が排出されていく過程の指標であり、その速度は圧密沈下速度と密接な関係がある。カキ殻の混合率が増加すると過剰間隙水圧の消散速度も速くなり、水圧消散に要する時間も速くなる。カキ殻が混合土の間隙水圧消散速度を促進させる働きをすることがわかる。

図-6は混合土の圧密係数と混合率の関係を示したものである。図から、混合土の圧密係数は、カキ殻混合率が大きくなると増加し、混合率が60%を超えると圧密係数は急増する。実際、圧密係数は混合率80%と混合率0%を比較すると約6倍増加しており、混合土の沈下速度にカキ殻の影響が大きく現われたと判断できる。なお、圧密係数は混合率60%で変曲点を示しているが、図-4の粘土のみのe-p関係において60%付近から間隙比が急増していることと調和している。

### 3. カキ殻の見かけの透水係数の算定

2章で述べたように破碎されたカキ殻の混合率が増加すると過剰間隙水圧の消散速度が速くなり、カキ殻は排水促進効果を発揮する。このような効果の原因は以下の二つが考えられる。一つは、カキ殻の混入によってカキ殻が粘土の圧密応力を一部負担することで粘土の間隙比が大きいままであるため、透水性が高くなること、二つめは、カキ殻自身が混合土の透水性を高める役割があることである。このうち、前者の役割のみでは、混合土の透水性の改善を説明できないことは明らかである。したがって、後者の役割を明らかにすることが必要である。しかしながら、破碎されたカキ殻自身は不透水性であり、仮に不透水性の薄片を混合した混合土の透水性は元の粘土のそれよ

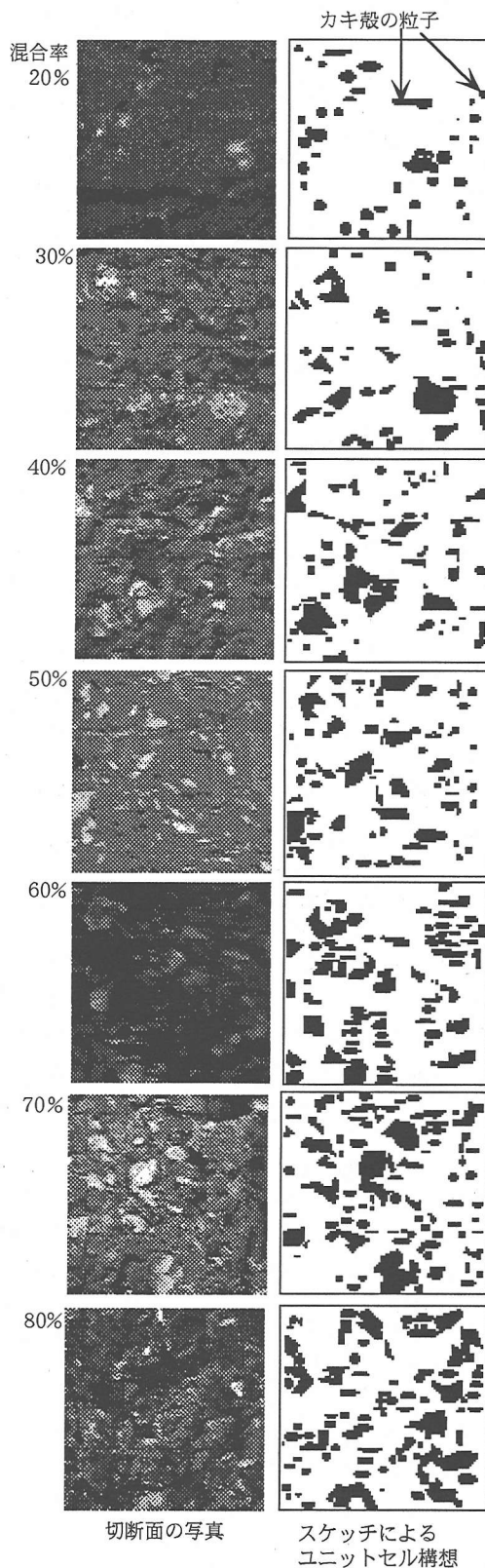


図-7 ユニットセル構造

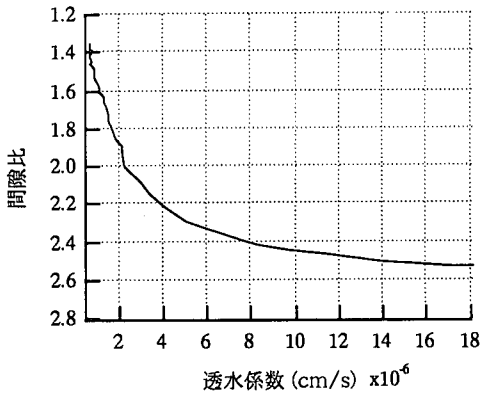


図-8 粘土の間隙比と透水係数の関係

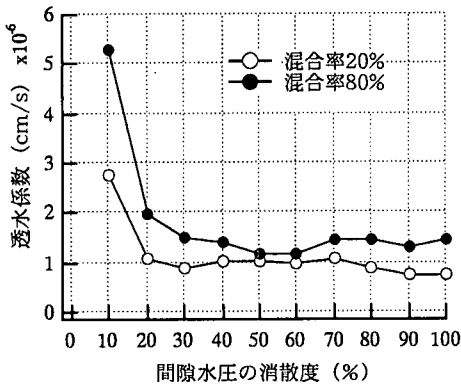


図-9 圧密過程における混合土の透水係数の変化

り低くなるのは明白である。したがって、カキ殻混合土の透水性の改善を評価するためには、カキ殻自身に何らかの形で透水係数を考慮する必要がある。そこで、本研究では、その第一近似としてカキ殻自身を透水性材料と考えて見かけの透水係数を導入することとした。なお、微視的な構造を勘案すれば間隙水はカキ殻の周面にそって移動しやすくなっているものと考えられるが、実際に確認されたメカニズムでないため、本研究では、簡単のため一様な透水性材料としてモデル化したものである。圧密過程において混合土の透水性は変化しているが、解析では間隙水圧がほぼ100%消散した時点での透水性に着目することにした。

混合土の透水係数は、粘土の透水係数とカキ殻の見かけの透水係数との関係およびその構造から決まるものである。このとき、混合土と粘土の透水係数は圧密試験から求めることができるが、カキ殻の見かけの透水係数は圧密試験から求められない値である。このため、カキ殻に仮定した透水係数の値を与え、圧

表-4 圧密混合土中の粘土の間隙比と透水係数の関係

カキ殻混合率 (%)	透水係数 (cm/s)	間隙比 *
0	$7.031 \times 10^{-7}$	1.372
20	$7.107 \times 10^{-7}$	1.379
30	$8.522 \times 10^{-7}$	1.395
40	$9.080 \times 10^{-7}$	1.403
50	$9.101 \times 10^{-7}$	1.425
60	$9.135 \times 10^{-7}$	1.429
70	$9.338 \times 10^{-7}$	1.467
80	$9.401 \times 10^{-7}$	1.479

\*) 間隙水圧が消散した時点での間隙比

表-5 混合土の間隙水圧消散度90~100%の透水係数

カキ殻混合率 (%)	透水係数 (消散度=90~100%) (cm/s)
20	$7.123 \times 10^{-7}$
30	$9.818 \times 10^{-7}$
40	$1.164 \times 10^{-6}$
50	$1.230 \times 10^{-6}$
60	$1.298 \times 10^{-6}$
70	$1.417 \times 10^{-6}$
80	$1.499 \times 10^{-6}$

密実験から得た混合土全体の透水係数を説明できる値を求めることとした。ここでは、このような混合土の微視的構造が透水係数に与える影響を反映できる方法として均質化法を用いた。均質化法の概要は付録を参照されたい。

### (1) 混合土と粘土の透水係数の算定

まず、混合土の微視的構造を把握するため、圧密後の供試体の断面をカメラで撮影スケッチし、その混合率のカキ殻の構造を決めた。図-7は、こうして決定した混合土の単位構造モデル(ユニットセル)である。

均質化計算に必要な粘土の透水係数は、次のような方法で求めた。まず、粘土の圧密過程における透水係数は沈下量と間隙水圧の変化量を用いて次式によって求めた<sup>16)</sup>。

$$k = \frac{\Delta h \times A}{\Delta t} \cdot \frac{\gamma_w \cdot \bar{H}}{p + \gamma_w \cdot \bar{H}} \cdot \frac{1}{A} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta h$  は供試体の高さの変化、 $\bar{H}$  は供試体の平均高さ、 $p$  は間隙水圧、 $A$  は供試体の断面積である。式(4)から、粘土のみの圧密過程における粘土の透水係数とその時点の間隙比の関係が図-8のように求められる。一方、表-3に示したように混合土の圧密試験において水圧消散が終了した時点での粘土部分

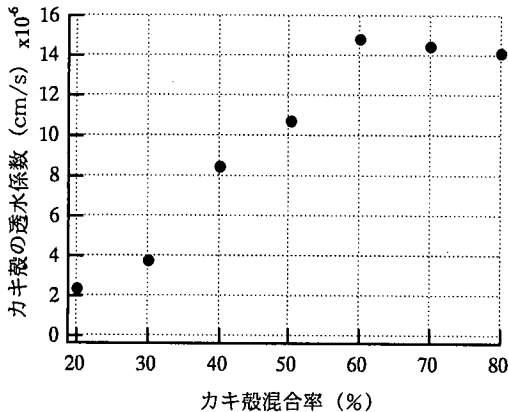


図-10 均質化計算から求めたカキ殻の見かけの透水係数

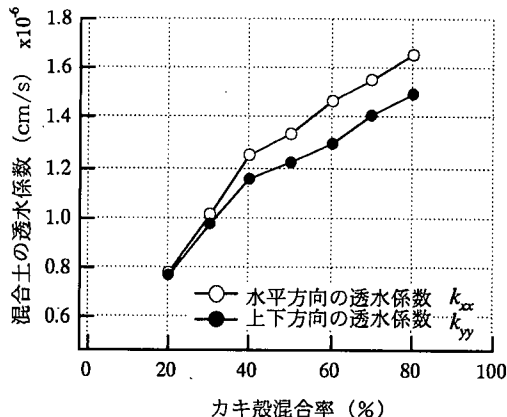


図-11 均質化計算から求めた混合土の透水係数

の間隙比も求められるので、図-8からその間隙比に相当する粘土の透水係数を求めることができる。こうして求めた粘土のみの透水係数と間隙比の関係を表-4に示す。カキ殻混合率が増加すると粘土が受ける応力分担率が小さくなり、間隙比と透水係数は大きくなることがわかる。

混合土の透水係数も式(4)によって求めた。圧密荷重をかけてから間隙水圧が10%ずつ消散するごとに平均的な透水係数を求め、間隙水圧の消散度が90%~100%の間での透水係数を混合土の透水係数とした。図-9は混合率20%と80%の透水係数を例として示したものである。表-5は、こうして求めた混合土の間隙水圧消散度がほぼ100%時の透水係数である。間隙水圧がほぼ100%消散する時点での混合土の透水係数はカキ殻混合率が増加すると大きくなることがわかる。

#### (2) 均質化法から求めたカキ殻の見かけの透水係数

カキ殻を見かけ上の透水性材料と見なし、均質化法による計算から求めた混合土の透水係数が圧密実験から求めた透水係数と一致するまで繰返し計算を行い、その時のカキ殻の透水係数を求めた。均質化透水係数の計算結果は次のように表される。

$$k^H = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{yy} \\ k_{yy} & k_{xx} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $k^H$ は均質化透水係数、 $k_{xx}$ は水平方向の透水係数、 $k_{yy}$ は上下方向の透水係数である。圧密実験の排水条件は上下排水であるから、実験からの透水係数は計算値の $k_{yy}$ に相当する。

図-10は均質化法による計算から求めたカキ殻の透水係数を示したものである。カキ殻の見かけの透

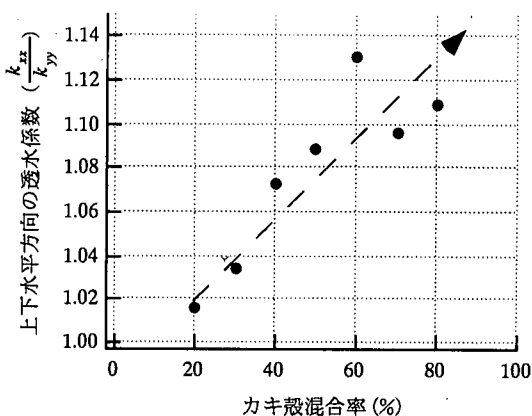
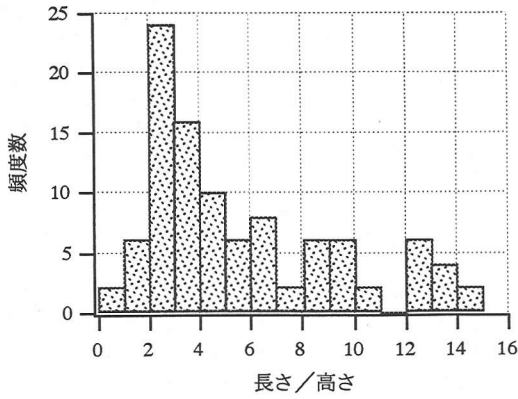


図-12 均質化計算から求めた混合土の透水異方性

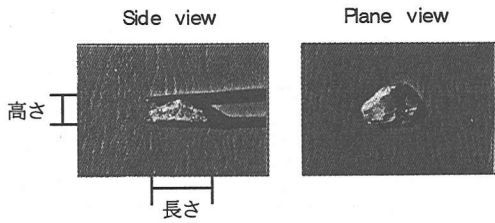
水係数は混合率60%までは線形的に増加したが、60%を超えるとほぼ一定値となった。カキ殻の混合率が増すにつれて見かけの透水係数が大きくなる理由は、カキ殻の混入構造によって混合土の透水性が変化するためと考えられる。また、カキ殻混合率が60%を超えてからほぼ一定となるのは、この混合率あたりからカキ殻混合構造が見かけの透水係数に与える影響が小さくなっているものと考えられる。

#### 4. 混合土の透水異方性に関する検討

一般に、自然堆積構造を持つ地盤は、その構造異方性から透水性にも異方性があることは良く知られている。ここで検討対象としている破砕されたカキ殻混合土の場合にも、カキ殻が扁平な形状をしていることから、圧密によって構造異方性が顕著になることが予想される。このような透水係数の異方性の評



(a) 長さ/高さの割合と頻度数の関係



(b) カキ殻粒子の写真

図-13 カキ殻の形態

価は、圧密促進のための鉛直ドレーンの効果の算定などに重要な影響を及ぼす。しかしながら、実験的に透水異方性を調べることは難しいので、ここでは均質化法による計算で用いた微視的構造を基にして、混合土の異方性を検討する。また、圧密実験では、カキ殻混合率は80%まで行い、混合土とカキ殻の透水係数を評価したが、カキ殻混合率をさらに増加させた場合についても、解析的に検討した。

(1) 実験における混合土の微視的構造の透水異方性

図-11は先の検討で同定されたカキ殻の見かけの透水係数と図-7の構造を用いて求めた混合土の水平および上下方向の透水係数の計算結果である。上下方向の透水係数は間隙水圧消散が100%時点の圧密実験から求めた透水係数と一致している値であり、水平方向の透水係数はその構造を用いて均質化法の計算で得られた値である。カキ殻混合率が增加すると水平、上下方向の透水係数も増加したが、水平方向の透水係数が上下方向の透水係数より大きい値となる。

図-12は透水方向による透水係数の異方性の程度を示したものである。カキ殻混合率が增加すると透水係数の異方性も増加したことがわかる。この原因は、断面写真からスケッチによって作成したユニッ

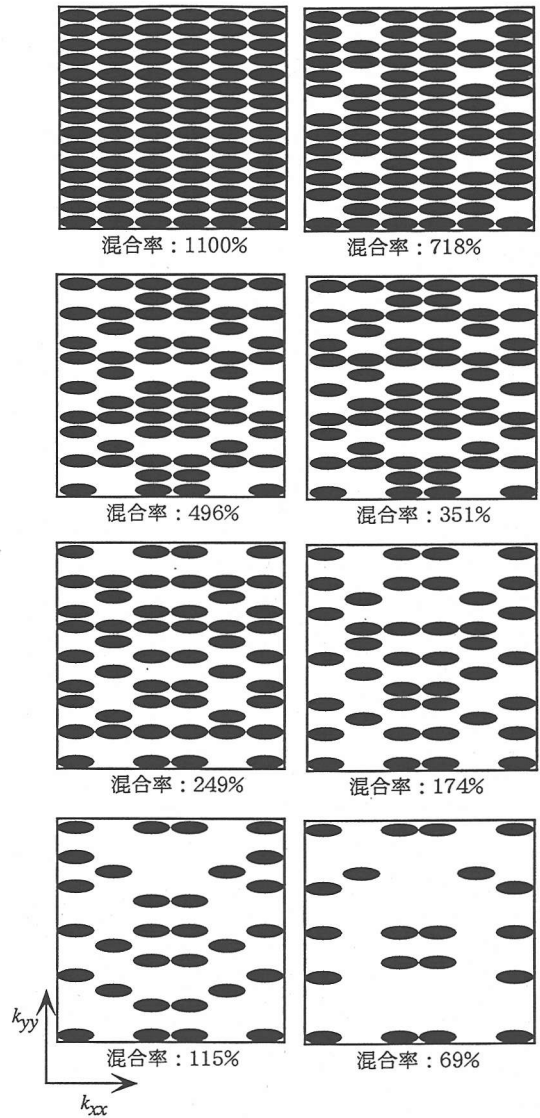


図-14 理想化したモデルの構造

トセル構造が異方的に評価されたためと考えられる。

(2) 理想化した混合土の透水異方性

カキ殻混合率が大きい場合の透水性を評価するため、理想化した混合土のモデルを用いて透水性を検討した。

まず、カキ殻のモデル化に当たり、カキ殻粒子の長さや高さの決定のため、破碎したカキ殻のサンプルをランダムに100個を取って形状を計測した。図-13(a)はカキ殻の長さ/高さの割合と頻度数の関係を示したものである。破碎したカキ殻粒子は薄片化され、圧密の際には横になる特徴があるので、図-13(b)に示すようにカキ殻の側面から粒子の大



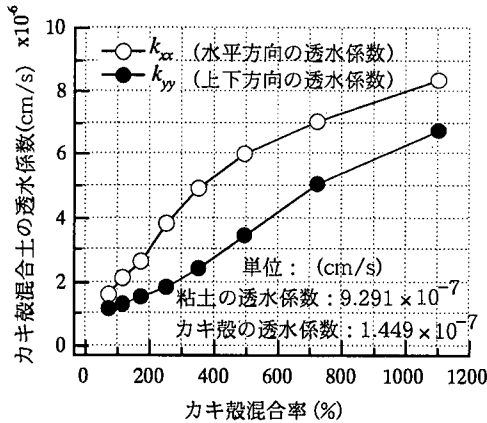


図-15 均質化計算から求めた混合土の透水異方性

きを求めたものである。図から、長さ/高さの割合が2~3倍の範囲に最も多く分布しており、理想化計算モデルの作製も最も代表的な割合である2.5倍を長軸と短軸とする楕円を選んだ。

理想化したユニットセル構造は、図-14に示すようにカキ殻片を最も密に配置した場合の最大混合率1100%から、69%の8つの場合を想定した。カキ殻混合率を1100%まで考えた場合、カキ殻はそれ自身で骨格構造を形成し、透水性を議論する工学的意味は小さいと考えられる。しかし、その極限を求めるという意味と異方性の変化を調べるため実施したものである。また、理想化したモデルはカキ殻粒子同士が接触するように作成し、式(7)の透水マトリックスのうち、非対角項がゼロになるように、カキ殻粒子を対称に配置した。ユニットセルの大きさは200 × 200pixel (1ピクセルが1要素に対応する有限要素にモデル化している)で解析した。この数値解析で用いたカキ殻の見かけ透水係数は先に示したように透水係数の変化が殆ど見られなかった混合率60%から80%までの透水係数を平均した値を用いた。

図-15は、計算から求められた上下および水平方向の透水係数である。図中には、カキ殻の見かけの透水係数および粘土の透水係数も示した。スケッチによって作成したユニットセルを用いた計算結果と同様にカキ殻の混合率が増加すると混合土の透水係数も増加し、透水係数は上下方向より水平方向の方が混合率にかかわらず大きい値を示した。この理由は、カキ殻粒子の楕円の形態によって間隙水の移動は上下方向より側面方向が移動しやすいためであると考えられる。

図-16は透水係数の異方性を示したものである。カキ殻混合率が増加すると透水係数の異方性の程度( $k_{xx}/k_{yy}$ )も増加し、混合率249%で2.1倍の異方性

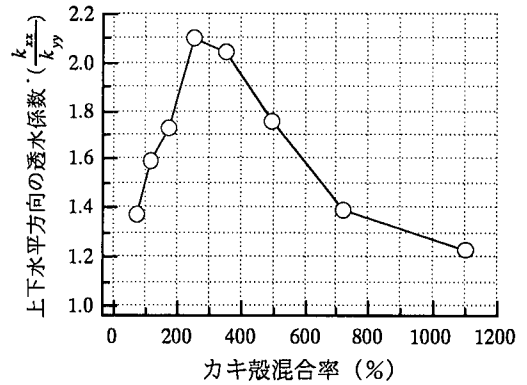


図-16 均質化計算から求めた混合土の透水異方性

を示した。カキ殻混合率が249%を超えると、透水係数の異方性が減少し、異方性が最も顕著に現れる混合率が存在することがわかる。

## 5. 結論

本研究では浚渫粘土に廃棄物であるカキ殻を混合する埋立現場を想定し、大型圧密実験と均質化法を用いて混合土の透水特性を評価した。本研究の結論を要約すると次のとおりである。

- (1) 破碎されたカキ殻を浚渫粘土と混ぜて作成した混合土の透水係数は、粘土の透水係数より、大きくなることが実験的に確認できた。このことは、カキ殻を混入すると浚渫粘土の圧密沈下特性を改善できることがわかる。
- (2) カキ殻を混ぜることによって、上載荷重の一部は、カキ殻の骨格構造で分担されるが、カキ殻の応力分担割合は、カキ殻混合率50%の当たりから顕著になることがわかった。
- (3) カキ殻の見かけの透水係数を、混合土の微視的構造を反映できる数学的手法である均質化法を用いて評価する方法を示した。均質化計算から求めたカキ殻の見かけの透水係数は混合率60%までは増加したが、60%を超えると殆ど一定値となった。これは、混合率60%当たりからカキ殻の構造がほぼ一定となるためと考えられる。
- (4) 混合土の構造異方性に起因して、水平方向の透水係数が上下方向の透水係数より大きくなることを示した。このような透水係数の異方性は250%程度のカキ殻混合率で最大2.1倍程度となった。

謝辞：本研究で使用した浚渫粘土とカキ殻は運輸省第二塩釜港空港工事事務所から提供されたものである。関係各位にお礼を申し上げます。

付録：均質化法による解析の概要

カキ殻混合土は、二つ以上の異なる透水係数を有する媒体からなる非均質体と見なすことができる。また、定常浸透流問題は、楕円型の偏微分方程式で記述される典型的な境界値問題である。ここでは、この非均質性を代表する領域が周期的な広がりを持つものと仮定し、ミクロ/マクロスケールを用いた特異摂動法に基づく、最も一般的な均質化法の定式化およびここで用いたモデル化の方法を概説する。

(1) 浸透問題の均質化法の定式化

対象とする境界値問題が定義される  $n_{dim}$  ( $=1\sim3$ ) 次元領域  $\Omega^\epsilon$  は、代表長さ  $\epsilon$  を有する基本周期構造領域 (ユニットセル)  $\epsilon Y$  を繰り返し配置することによって覆うことができるものである。このとき、場を構成する変数は、ミクロ構造内の材料の配置および物性だけでなく、その大きさ  $\epsilon$  にも影響される。この影響を明示的に表すために各変数に添え字を付けて、次のように支配方程式を表す。

$$\frac{\partial v_i^\epsilon(x)}{\partial x_i} = f^\epsilon(x) \text{ in } \Omega^\epsilon \quad (A-1)$$

$$v_i^\epsilon(x) = -k_{ij}^\epsilon(x) \frac{\partial p^\epsilon(x)}{\partial x_j}; k_{ij}^\epsilon = k_{ji}^\epsilon \text{ in } \Omega^\epsilon \quad (A-2)$$

ここで、 $v_i^\epsilon$  は流速、 $p^\epsilon$  は圧力であり、透水係数  $k_{ij}^\epsilon$  と単位体積当たりの沸き出し/吸い込み  $f^\epsilon$  を既知としている。この物体の境界  $\partial\Omega$  には、次のような境界条件が与えられているものとする。

$$p^\epsilon = \hat{p} \text{ on } \Gamma_p \subset \Omega^\epsilon \quad (A-3)$$

$$k_{ij}^\epsilon \frac{\partial p^\epsilon}{\partial x_j} = \hat{v}_i^\epsilon \text{ on } \Gamma_v \subset \Omega^\epsilon \quad (A-4)$$

いま、この境界値問題値について、全体を測るスケール  $x$  に加えて、ユニットセル内での変数の変化に対してスケール  $y$  を導入すると、各変数は  $x$  と  $y$  の二つのスケールで表すことができる。さらに、各変数は  $y$  について周期的 (Y-periodic) であり、次のような漸近展開形の解の存在を仮定する。

$$\begin{cases} p^\epsilon(x) = p^0(x, y) + \epsilon p^1(x, y) + \dots \\ v_i^\epsilon(x) = v_i^0(x, y) + \epsilon v_i^1(x, y) + \dots \end{cases} \quad (A-5)$$

この展開式を式 (A-1)、(A-2) に代入すると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial v_i^0}{\partial y_i} + \frac{\partial v_i^0}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i^1}{\partial y_i} + \epsilon \left( \frac{\partial v_i^1}{\partial x_i} + \dots \right) + \dots \\ = f(x, y) \text{ in } \Omega \times Y \end{aligned} \quad (A-6)$$

$$v_i^0(x, y) + \epsilon v_i^1(x, y) + \dots \text{ in } \Omega \times Y \quad (A-7)$$

$$= -k_{ij}^\epsilon(x) \left\{ \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial p^0}{\partial y_i} + \frac{\partial p^0}{\partial x_i} + \frac{\partial p^1}{\partial y_i} + \epsilon \left( \frac{\partial p^1}{\partial x_i} + \dots \right) + \dots \right\}$$

が得られる。ここで、微分に関して、

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_{\Omega^\epsilon} = \frac{\partial}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial y_i} \Big|_{\Omega \times Y} \quad (A-8)$$

なる連鎖則を用いている。この展開された支配方程式の各  $\epsilon$  のオーダーについての恒等関係を作り、 $\epsilon \rightarrow 0$  の極限をとると、式 (A-6) からミクロおよびマクロスケールの方程式

$$\frac{\partial v_i^0(x, y)}{\partial y_i} = 0 \text{ in } \Omega \times Y \quad (A-9)$$

$$\frac{\partial v_i^0}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i^1}{\partial y_i} = f(x, y) \text{ in } \Omega \times Y \quad (A-10)$$

を得る。ユニットセル内での平均を取ると  $v_i^1$  が Y-periodic であることを利用して、マクロスケールの方程式

$$\frac{\partial v_i^1}{\partial x_i} = F \text{ in } \Omega \quad (A-11)$$

を得る。ここで、体積平均を  $\langle \cdot \rangle = \frac{1}{|Y|} \int_Y \cdot dy$  で表して、平均速度を  $v_i := \langle v_i^0 \rangle$ 、平均沸き出し/吸い込みを  $F := \langle f \rangle$  としている。一方、式 (A-7) は

$$v_i^0(x, y) = -k_{ij}^\epsilon(x) \left( \frac{\partial p^0(x)}{\partial x_j} + \frac{\partial p^1(x, y)}{\partial y_i} \right) \quad (A-12)$$

を与えるが、線形成から特性関数  $\chi^k(y)$  を定義して、

$$p^1(x, y) = -\chi^k(y) \frac{\partial p^0(x)}{\partial x_k} \quad (A-13)$$

であることがわかる。これを式 (A-12) に代入すると、セル内での流速が

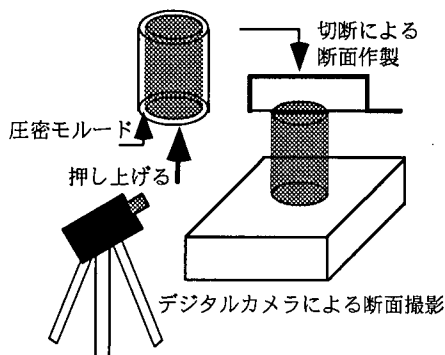


図-17 撮影断面の作製方法

$$v_i^0(x, y) = - \left( k_{ik}(y) - k_{ij}(y) \frac{\partial \chi^k(y)}{\partial y_j} \right) \frac{\partial p^0(x)}{\partial x_k} \quad (A-14)$$

のように定義され、ミクロスケールの方程式 (A-9) が、特性関数が満たすべき式として次のように得られる。

$$\frac{\partial}{\partial y_i} \left( k_{ij}(y) \frac{\partial \chi^k(y)}{\partial y_j} \right) = \frac{\partial k_{ik}(y)}{\partial y_i} \text{ in } Y \quad (A-15)$$

さらに、式 (A-14) のセル内体積平均、

$$V_i = -k_{ik}^H \frac{\partial p^0(x)}{\partial x_k} \quad (A-16)$$

は、マクロ方程式 (A-11) についての平均的なDarcy則を与え、均質化透水係数が

$$k_{ik}^H = \left\langle k_{ik}(y) - k_{ij}(y) \frac{\partial \chi^k(y)}{\partial y_j} \right\rangle \quad (A-17)$$

と定義されている。

より詳細な数学的議論は文献を参照されたい<sup>17)</sup>。

## (2) 計算モデルの作製方法

均質化法による数値解析では、デジタル画像を用いたモデリング手法 (Digital image-based modeling)<sup>18)</sup> を利用した。圧密が終了した供試体を圧密モールドから取り出して縦断面をデジタルカメラで撮影し、その写真をもとにしてユニットセル構造をスケッチによって生成した。供試体を切断する時はカキ殻の配列構造や角度が変わらないようにワイヤソーで約5cmほど上部に切り目を入れた後、そこから手で割裂させた。スケッチからユニットセル作成に用いたプログラムは米国保健機構の NIH Image を用いて作製した。図-17にはデジタルカメラによる撮影方法とユニットセル構造の作製方法の概略を示す。

## 参考文献

- 1) 鬼塚克忠, 吉武茂樹: 粘土, 砂の飽和混合土の圧密特性, 土と基礎, Vol.34, pp.73-79, 1986.
- 2) Fukue, M., Okusa, S. and Nakamura, T.: Consolidation of sand-clay Mixtures, ASTM, STP.No.892, pp.627-641, 1986.
- 3) 上 俊二, 藤原東雄, 竹内 潤, 福田 靖, 酒井敏明, 柳原勝也: セメント系固化材により安定されたカオリン粘土の力学的性質, 土木学会論文集, No.582, pp.217-228, 1997.
- 4) 木幡行宏, 前川晴義, 矢島寿一, 村本勝巳, 馬場崎亮一: セメント安定処理土の強度, 変形特性について, セメント安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.1-19, 1996.
- 5) 河野伊一郎, 富田武満, 上村克巳, 田辺和康: 石灰とフライアッシュの混合物を用いた粘性土と砂質土の安定処理の相違について, 土木学会論文集, No.469, pp.73-81, 1993.
- 6) 加藤丈晴, 落合英俊, 安田規之, 大嶺 聖: プラスチック片混合した表層安定処理土の模型荷重試験, 第32回地盤工学研究発表会, pp.2447-2448, 1997.
- 7) 松尾 稔, 木村 稔, 西尾良治, 安藤 裕: 建設発生土を利用した軟弱地盤改良工法の開発に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.547, pp.199-210, 1996.
- 8) 松尾新一郎: ヘドロ問題の処理・対策, 土と基礎, Vol.26, pp.7-12, 1978.
- 9) 喜田大三: ヘドロのシュンセツ・処理処分, 土と基礎, Vol.26, No.1049, pp.55-61, 1978.
- 10) 運輸省第二港湾建設局塩釜港工事事務所: 石巻港建設資材活用調査報告書, 1992.
- 11) 運輸省第二港湾建設局塩釜港工事事務所: 石巻港サンドコンパクションパイル工法中詰材調査報告書, 1992.
- 12) 竹内裕二: 廃棄物混合土のモデル化に対する考え方, 土木学会第53回年次学術講演会, pp.12-13, 1998.
- 13) 大嶺 聖, 落合英俊: 土構造物に着目した混合土の一次元圧縮特性, 土木学会論文集, No.457, pp.127-136, 1992.
- 14) 土質工学会: 土質試験の方法と解説, pp.289-307, 1990.
- 15) 土田 孝: 中間土, 混合土の圧密, 圧縮, 透水特性, 土と基礎, Vol.41, pp.5-10, 1993.
- 16) 高根弘志, 柏木淳男, 有泉浩蔵, 山川一秀, 早川 敦: 飽和粘土の透水特性について, 第21回土質工学研究発表会, pp.179-182, 1986.
- 17) Sanchez-Palencia, E.: Non homogeneous media and vibration theory. Lecture Notes in Physics 127, Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- 18) Terada, K., Miura, T. and Kikuchi, N.: Digital image-based modeling applied to the homogenization analysis of composite materials, Computational Mechanics, Vol.20, pp.331-346, 1997.

(1999.9.29 受付)

# PERMEABILITY CHARACTERISTICS OF DREDGED SLUGES MIXED WITH CRASHED OYSTER SHELL

Kiho LEE, Motoki KAZAMA, Kenjiro TERADA and Eiji YANAGISAWA

In order to utilize mass of oyster shells for a partial substitute material for reclamation, we investigate the permeability characteristics of dredged sluge mixed with oyster shells. The apparent permeability of the this mixture are obtained from the consolidation tests and is utilized to characterize the fictitious permeability of the oyster shells by carrying out some numerical analyses based upon the homogenization theory. Then, it is found that the oyster shells play role of (improving materials) for soils, and such an effect is due to the geometrical configurations of soils and shells in a local region. In addition, due to the distinctive feature of the theory, the anisotropy nature of the permeability is also examined via a series of numerical analyses.