

カキ殻混合土の非排水せん断強度・変形特性

李基豪¹・風間基樹²・寺田賢二郎³

- ¹正会員 博士(工学) Post-Doc. Geo-environmental Engineering Laboratory,
Department of Civil Engineering, Seoul National University
(Shinlim-Dong, Kwanak-Gu, Seoul, Korea 151-742)
(元東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻)
- ²正会員 博士(工学) 東北大学教授 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)
- ³正会員 Ph.D 東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

破碎したカキ殻と浚渫粘土の混合土を地盤材料として活用するため、カキ殻混合土の非排水せん断強度・変形特性が純粋な粘土のそれとどのように異なるかを三軸試験から検討した。その結果、カキ殻の混合は浚渫粘土の強度・変形特性を改善することがわかった。そのせん断強度の増加は、カキの混合率(0-80%)にほぼ比例し、圧密応力(49-98kPa)によらなかった。また、応力-ひずみ関係と間隙水圧発生特性から、カキ殻混合土中のカキ殻の構造はその圧密応力、カキ殻混合率、せん断ひずみレベルに応じて複雑に変化することが推察された。また、均質化法に基づく数値解析から、カキ殻の割線変形係数を評価することによって、カキ殻の混合による変形係数改善効果の評価を試みた。

Key Words : mixed soil, wastes, secant modulus, triaxial compression test, homogenization method, skeleton structure, oyster shells

1. 序論

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、その力学特性は未解明な部分が多い。既に著者ら¹⁾はカキ殻混合土の圧密・透水特性に関する研究成果を報告しているが、本研究では、カキ殻混合土を地盤材料として活用するため非排水強度・変形特性を実験的に検討した結果を報告する。また、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が粘土の強度・変形特性に与える影響を定性的に評価する。なお、非排水強度を対象としたのは、先の研究¹⁾からカキ殻の混合率を80%程度に増やすと混合土の透水性は2倍程度に改善されるものの、オーダーが変化するほどの改善にはならず、依然として粘性土としての性質を示すためである。

混合土の力学挙動に関する実験的研究は、粘土と砂を混ぜた中間土の研究に端を発している。Trollope & Zafar²⁾は砂と粘土の混合土の排水三軸試験の結果をもとにして、粘性土と砂質土の境界を

示す細粒分含有率が存在することを報告している。また、福江³⁾は細粒分含有率が減少し、粗粒子同士骨格が形成されると混合土の圧縮特性が大きく変化することに着目して、混合土中の粗粒子同士が完全に骨格構造を形成する場合と形成しない場合の二つの状態を考え、これら中間的な状態に対する間隙比を用いて、混合土の工学的特性を評価する手法を提案している。中瀬ら⁴⁾、亀井⁵⁾は、コンシステンシー特性に着目して、砂と粘土の混合土の非排水強度異方性が塑性指数の減少とともに大きくなることを明らかにし、さらに、自然海成粘土に対しても、同様の関係が得られることなどを確認している。Skempton⁶⁾は、地すべり粘土および泥岩の残留強度と粘土分含有率との関係を調べ、粘土分と粘土鉱物が混合土の残留強度の変化特性を支配する領域が存在すること、さらに砂とベントナイトの混合土についても同じ傾向が認められることを指摘している。

また、混合土の力学特性を現場での簡易な試験装置から求めるための研究も行われている。Kumar & Wood⁷⁾とWood⁸⁾は、Fall cone testを用いてレキと粘土の混合土の力学挙動を検討している。その結果、粘土分含有率は液性限界や非排水強度と線

形関係があり、コーン貫入量と粘土とレキの体積比の関係から粘土とレキの影響を受ける境界値があることを明らかにしている。

一方、混合土の力学特性に関する理論・解析的研究は、一般的には2種混合体のマクロな力学特性の研究にさかのぼることができ、不均質材料の巨視的力学挙動を微視的な観点から予測する研究が多い。Eshelby⁹⁾は、無限弾性体の中に弾性係数の異なる一つの楕円体介在物が混合したときの介在物内部の応力およびひずみの乱れに着目し、混合体の応力-ひずみ関係を評価する理論式を提案している。この種の研究において最も重要な点は、基質部分と介在物および介在物同士の相互作用をどのようにして考慮するかにある。この相互作用を近似する方法には、ある材料定数を持つ混合体の中にさらに一つの介在物を付加したモデルによる self-consistent 法¹⁰⁾などの提案や挙動の上下界算定法¹¹⁾などの研究がある。また、大嶺・落合¹²⁾および大嶺ら¹³⁾は、砂と粘土の混合土の強度特性をそれぞれの構成要素の材料特性を用いて予測する手法を提案した。これは、混合土内部の応力分担割合を混合材と細粒子と水からなる部分の単位体積当たりの仕事量は等しいと仮定した算定手法を示すとともに、提案手法を混合土の一次元圧縮問題に適用したものである。

最近になって、巨視的および微視的考察を同時に行うことができる漸近展開法に基づく均質化理論を利用して混合土の力学特性を評価する研究が始められている¹⁾。本論文でも二種混合土の強度・変形特性の究明に均質化法を導入して実験結果を分析している。

2. 三軸圧縮試験

(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。固相部分をカキ殻と粘土粒子の二つに分けて考えると、混合土の体積は、それぞれの構成要素の重量 W と単位体積重量 γ を用いて次のように表わすことができる。

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

ここに、添字 o, s, w は、それぞれカキ殻、基質部分の粘土粒子、間隙水の属性であることを示す。

表-1 実験材料の物理特性

試験項目		粘土	破碎されたカキ殻
土粒子の密度 (g/cm ³)		2.538	2.430
液性限界 (%)		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	2.0~9.5 (mm)
	シルト (%)	52.5	
	砂 (%)	16.5	
	レキ (%)	3.0	

また、カキ殻の混合率 R (%) は、粘土粒子に対する乾燥重量比として、

$$R = \frac{W_o}{W_s} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

と定義した。以下、試験結果は主にこの混合率を用いて整理するが、混合体理論ではしばしば構成要素の体積割合で考察される。そこで、上記の定義の他に、圧密終了後の混合土中に占めるカキ殻の体積の割合を示すカキ殻の体積比 n_v を以下のよう

$$n_v = \frac{V_o}{V_e} \quad (3)$$

ここで、 V_e : 圧密終了後の基質粘土とカキ殻の体積、 V_o はカキ殻の体積である。このような体積比を定義したのは、カキ殻混合率は同じでも異なる圧密応力で圧密した場合には、基質粘土の含水比の違いによって、異なる体積割合となることを示すためでもある。なお、供試体は高さ 20cm、直径 10cm の中実供試体である。

b) 混合土の作製方法

実験に用いた粘土は塩釜港の浚渫粘土であり、その自然含水比は 90%、塑性指数は 54 である。粘土は海水と混ぜながら脱気した。粘土に混合するカキ殻は、モールドの大きさの制約から破碎して使用した。破碎したカキ殻はふるい上で異物を取り除いた後、数日間天日乾燥した。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 0~80% までの 5 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ことになる。実験に用いた粘土とカキ殻の物理的特性を表-1 に示す。

表-2 圧密終了後の基質粘土の間隙比および圧密応力分担率

混合率 (%)	圧密終了後の間隙比		粘土の圧密応力分担率 (%)	
	49kPa	98kPa	49kPa	98kPa
20	1.815	1.445	64	73
40	1.955	1.449	56	72
60	1.986	1.639	52	39
80	2.103	1.834	42	32

注) 圧密前の初期間隙比は 2.538 である。

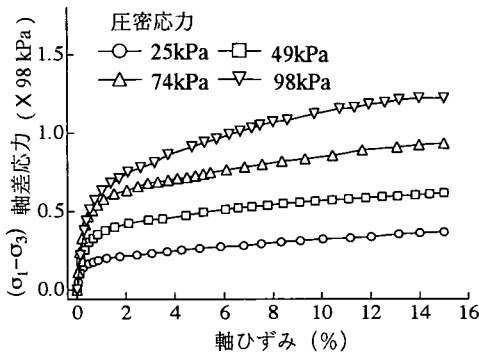


図-1 粘土の応力-ひずみ関係

c) 三軸試験の方法

圧密中の供試体の体積変化が大きいため、三軸供試体と同一の内径を持つモールド中で、圧密応力 49、98kPa で予圧密を行った。予圧密が終了した供試体は、自立し、直径 10cm で整形したものと同等となるため、メンブレンの装着が容易となる。また、せん断中のメンブレンの破れが懸念されたため、厚さ 0.4mm のメンブレンを利用した。しかし、実験中 3 回に 1 回程度は軸ひずみが大きくなったときメンブレンが破れた。

三軸セル内にセットした供試体を予圧密と同じ応力で等方圧密した後、非排水三軸圧縮せん断を行った。圧密の終了時間は 3T 法で決定した。49kPa と 98kPa を圧密応力として選んだのは、この応力レベルが地中 5~15m 程度の土かぶり圧に相当するものであり、通常の埋立地盤が受ける土かぶり圧に相当するからである。また、圧密応力を変化させたのは、圧密応力とカキ殻混合割合によっては、カキ殻混合土の微視的構造に違いが生じると考えられたからである。試験条件は等方圧密非排水試験で、せん断は軸ひずみ 0.5%/min の載荷速度で行った。なお、著者らがすでに実施した混合土の透水試験¹⁾によると、98kPa の圧密終了後の粘土は 0.7×10^{-6} cm/s、同じく混合率 80% のカキ殻混合土は 1.5×10^{-6} cm/s 程度の透水係数であった。この値はシルトや砂の混じった粘土の透水係数にほぼ対応する。土質試験法によれば、間隙水圧を測

る場合、シルト分の多い試料で三軸試験のひずみ速度 0.1%/min.程度が推奨されているが、これに比較すると、本実験に用いたひずみ速度 0.5%/min.はやや速めの値である。

(2) 試験結果

a) 圧密過程での供試体の体積変化

表-2 は、圧密前後の基質粘土の間隙比変化をカキ殻混合率ごとに示したものである。圧密応力が同じでも、カキ殻混合率が増えると圧密応力の一部をカキ殻骨格が受け持つため、粘土にすべての圧密応力が作用せず、粘土の間隙比も大きくなるのがわかる。

この間隙比と粘土のみの圧密試験から得られた間隙比-圧密応力関係を用いて、混合土中の粘土の圧密に有効に作用した圧密応力を求めることができ、混合土に作用した全圧密応力のうち基質粘土がどれだけ負担したかがわかる。これを圧密応力分担率と定義し、同表右に示した¹⁾。20、40% のカキ殻の混合率では、圧密応力 49kPa の場合の方が 98kPa の場合よりも、粘土の圧密応力分担率が小さいのが特徴的である。これは 20、40% のカキ殻の混合率のとき、せん断前の時点で圧密応力が小さい 49kPa の場合の方が等方圧密応力をカキ殻の骨格で受け持つ割合が大きいことを意味している。

b) 応力-ひずみ関係

混合土のせん断変形特性を述べる前に、混合土基質部分の粘土のせん断変形特性を求めた。図-1 は三軸圧縮試験から得られた粘土のみの軸差応力-軸ひずみ関係を示したものである。図は 25、49、74、98kPa の等方圧密後、非排水せん断した結果を示しているが、圧密応力が大きくなるとせん断強度も増加することがわかる。また、軸ひずみ 15% における軸差応力を非排水せん断強度とみなせば、その値は圧密応力に比例し、通常の正規圧密粘土のせん断強度と圧密応力の関係と同じ結果である。

図-2、3 は、それぞれ圧密応力が 49kPa、98kPa の三軸試験から求めた粘土のみ、カキ殻のみおよび混合土の応力-ひずみ関係である。混合土の応力-ひずみ関係を粘土のみのそれと比較すると、カ

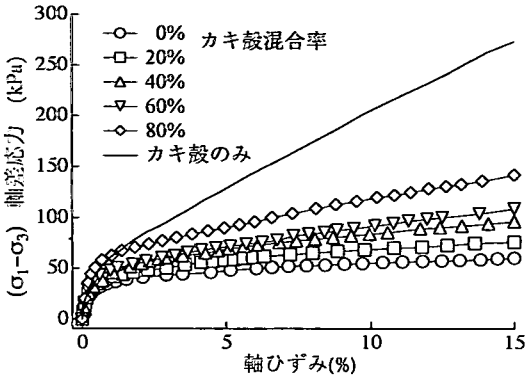


図-2 混合土の応力-ひずみ関係 ($\sigma_c' = 49\text{kPa}$)

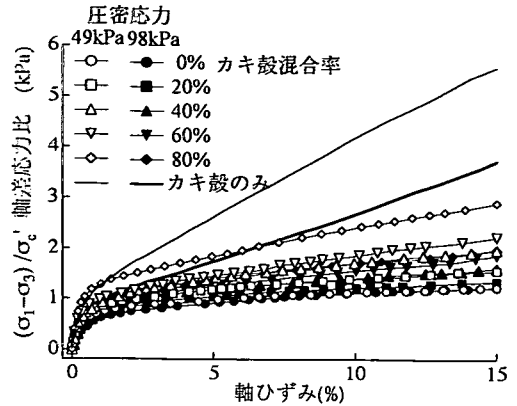


図-4 正規化した混合土の応力-ひずみ関係

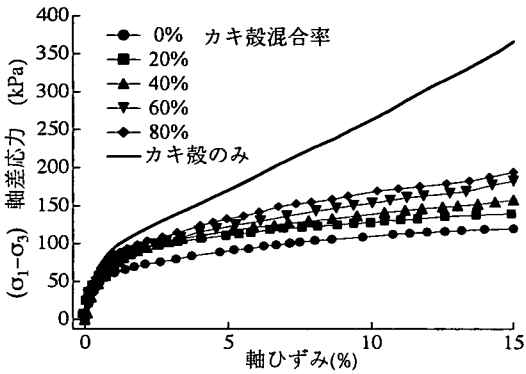


図-3 混合土の応力-ひずみ関係 ($\sigma_c' = 98\text{kPa}$)

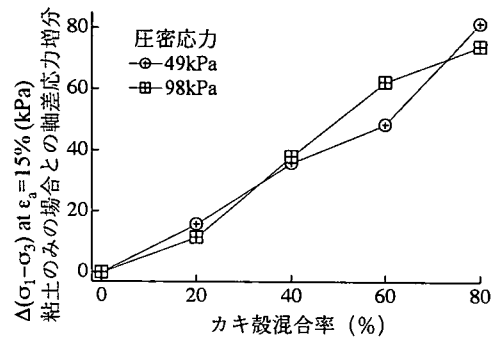


図-5 軸差応力増分と混合率の関係

キ殻混合率が増加することによって混合土の応力-ひずみ関係はカキ殻のみの特性に近づいていることがわかる。さらに、カキ殻のみの応力-ひずみ関係の変化パターンも粘土のみおよび混合土の変化パターンと類似しているが、カキ殻のみの場合のせん断強度は、粘土のみの数倍になっている。また、圧密応力の大きさが混合土の応力-ひずみ関係に与える影響を調べるために、圧密応力で正規化した応力-ひずみ関係を図-4 に示した。粘土のみの応力比-ひずみ関係は圧密応力に係らず、同じ関係となっているが、カキ殻のみおよび混合土の場合は圧密応力が小さい方が軸差応力比が大きいことがわかる。この関係から、カキ殻を含む混合土は圧密応力に比例した土粒子の摩擦抵抗のみに支配されないことがわかる。この結果は、カキ殻同士の骨格構造に起因してそのかみ合わせ（インターロッキング）効果の影響を受けているためと推察される。

図-5 は軸ひずみが 15%のときの混合土の軸差応力と粘土のみのそれとの差を示したものである。混合土のせん断強度は、カキ殻混合率が増加する

と増加するが、その増加の程度は圧密応力によらないように見える。この結果は、単純に言えば、粘土をそのまま埋め立てる場合とカキ殻を混合して埋め立てた場合のせん断強度の増加を示している。また、この結果を工学的に判断すれば、浚渫粘土をカキ殻と混ぜて埋立する場合は、浅い地盤ほどせん断強度の増加効果を期待できることも意味している。ただし、この結果はカキ殻同士の作る骨格構造がせん断強度に与える影響がカキ殻の割合だけで決まり、圧密応力によらないことを示しているものではない。というのは先に示したようにカキ殻の体積割合や基質部分の粘土の間隙比も異なるからである。したがって、混合土のせん断強度は、単純に圧密応力に比例せず、せん断強度の増加は、カキ殻の作る骨格構造と基質部分の粘土のせん断強度の相互関係で決まるものと考えられる。

c) 間隙水圧-ひずみ関係

図-6, 7 は圧密応力が 49kPa, 98kPa の間隙水圧-軸ひずみ関係である。また、図-8 はそれらを圧密応力で正規化したものである。圧密応力が小さ

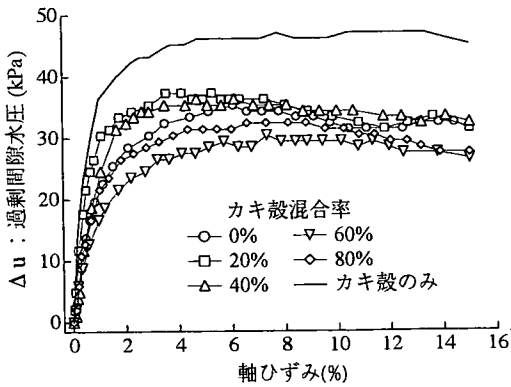


図-6 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係($\sigma_c' = 49\text{kPa}$)

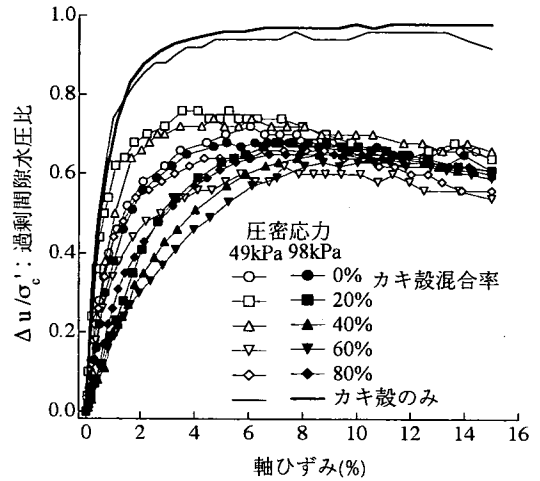


図-8 過剰間隙水圧比-軸ひずみ関係

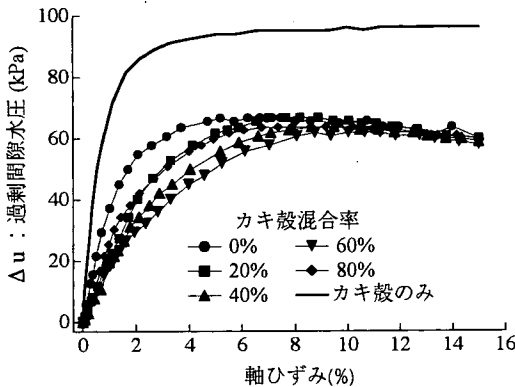


図-7 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係($\sigma_c' = 98\text{kPa}$)

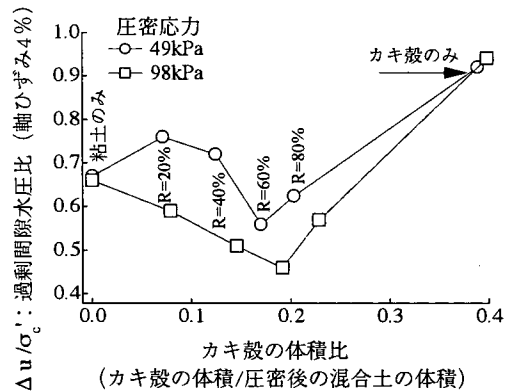


図-9 カキ殻の体積比-間隙水圧関係比

い(49kPa)場合は、軸ひずみ 4%あたりで過剰間隙水圧は最大値を示している。そこで、図-9 に軸ひずみ 4%に達したときの過剰間隙水圧比をカキ殻の体積比に対して示した。図-9 から、混合率や体積比による一様な増減特性は見られない。

まず、圧密応力 49kPa、軸ひずみ 4%の時の粘土のみの場合と混合土の間隙水圧比とを比較すると、20%、および 40%の混合率の場合は粘土のみの場合より混合土の方が間隙水圧の発生が大きい。この原因は、次のように推論できる。カキ殻の混合率が小さい場合、混合土の間隙水圧発生特性は基質部分の粘土の間隙水圧発生特性に支配されると考えられるが、混合土の基質部分粘土は粘土のみの場合より受けている圧密応力が小さいため、緩い構造を有している。このため、カキ殻混合率 20%、40%のときには粘土のみの場合より大きな負のダイラテンシー特性を示したと考えられる。

この推論によれば、さらにカキ殻混合率が高い場合 (60%)、基質部分の粘土が受ける圧密応力は

さらに小さく間隙比も小さいため、基質部分粘土のせん断によって発生する過剰間隙水圧はより大きくなると考えられるが、実験結果はそうになっていない。これは、混合土のもう一つの構成要素であるカキ殻同士の骨格構造の収縮特性が、20%から混合率が増えるにつれて小さくなるためと考えられる。しかし、60%からさらにカキ殻の割合が増えた場合にそのまま水圧の発生量が小さくならないことは明白である。なぜなら、図からカキ殻のみの場合の間隙水圧発生量は、混合土の場合よりむしろ大きいからである。

以上の結果をまとめて考察すれば、20%から 60%の間でのカキ殻の持つ骨格構造は 80%以上の場合のそれと、大きく異なるものと考えられる。具体的に言えば、20%から 60%の間でのカキ殻の持つ骨格構造は、カキ殻の端部が他のカキ殻の面に接触するような構造であるのに対し、80%の場合では、カキ殻同士が面的に重なっているような構造が卓

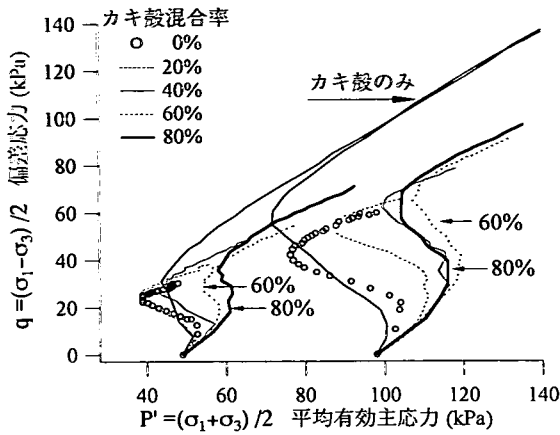


図-10 有効応力経路

越してくるものと推察される。また、混合土の中で持つカキ殻の骨格構造は、必ずしもカキ殻のみの場合のカキ殻骨格構造と対応しないものと考えられる。

一方、圧密応力が 98kPa の場合、49kPa の場合と若干異なる特性を示している。すなわち、最大過剰間隙水圧を示す軸ひずみレベルは 49kPa の場合より大きくなると同時に、過剰間隙水圧の発生量は粘土のみあるいはカキ殻のみの場合がそれらを混合した場合よりも大きくなっている。これは、98kPa の圧密応力を受けた混合土の負のダイレイタンスー特性が、49kPa の場合より小さくなることを意味している。また、軸ひずみが 8%を超えると、混合率に係らず発生する過剰間隙水圧比は圧密応力 49kPa の場合より収束している。この結果は、98kPa の方がせん断中の構造変化が小さく、安定していることを示唆している。

圧密応力で正規化した間隙水圧-ひずみ関係から、軸ひずみ 6%程度までの過剰間隙水圧比は圧密応力 49kPa の方が大きい値を示しているとともに、ひずみが大きくなってからの水圧発生量の差が大きい。したがって、49kPa の場合は、せん断中にその構造が大きく変化しているものと推察される。

d) 有効応力経路

図-10 はせん断中の有効応力経路を示したものである。図から、カキ殻混合土の摩擦角は、カキ殻のみの摩擦角より小さく、粘土の摩擦角とほぼ等しいか若干大きい傾向を示していることがわかる。特徴的なのは、粘土のみ、あるいはカキ殻のみに比較して、混合土はせん断初期に有効平均主応力の増加傾向が大きく、変相時の有効平均主応力も大きくなっている。さらに、変相時のひずみレベ

ルを比較したところ、粘土のみあるいはカキ殻のみの場合の約 2 倍のひずみレベルとなっていることがわかった。

以上をまとめれば、カキ殻混合土の軸ひずみ発達に伴う過剰間隙水圧発生特性が、その構成要素である粘土とカキ殻のみの場合の間にくるような挙動を示さないのは、混合したときダイレイタンスー特性が構成要素の中間的な特性を示さないためであると理解できる。

3. 混合土の割線変形係数およびダイレイタンスー特性から見たカキ殻骨格構造の評価

混合土の割線変形係数およびダイレイタンスー特性について、粘土のみおよびカキ殻のみの特性からどの程度説明できるかを検討し、せん断中のカキ殻骨格構造変化を考察する。

(1) 混合土の割線変形係数の検討

まず、あるひずみでの混合土の軸差応力 $q_m(\gamma)$ が基質部分の粘土の実験から得られた軸差応力 $q_c(\gamma)$ とカキ殻のみの実験から得られた軸差応力 $q_o(\gamma)$ の和で表され、それらの比率がカキ殻の体積比 n_v になると仮定すれば、以下の式が成立する。

$$q_m(\gamma) = (1 - n_v)q_c(\gamma) + n_v q_o(\gamma) \quad (4)$$

ここに、添字 m, c, o は、それぞれ混合土、基質部分の粘土、カキ殻の属性であることを示す。しかし、カキ殻混合土中のカキ殻構造はカキ殻のみの場合に形成される構造とは異なることおよび、その影響度が体積比に比例するとは限らないため、上式は一般的に成立しない。そこで、これを補正する補正係数 $\alpha(\gamma)$ を導入する。すなわち、あるひずみ γ での割線変形係数を $E(\gamma) = q(\gamma) / \gamma$ と定義し、この補正係数を用いれば、上式は割線変形係数の関係として次のように表現できる。

$$E_m(\gamma) = (1 - n_v)E_c(\gamma) + \alpha(\gamma)n_v E_o(\gamma) \quad (5)$$

上式から、未知の補正係数について解けば、以下の式が得られる。

$$\alpha(\gamma) = \frac{E_m(\gamma) - (1 - n_v)E_c(\gamma)}{n_v E_o(\gamma)} \quad (6)$$

こうして得られた補正係数の値が大きいほど、混

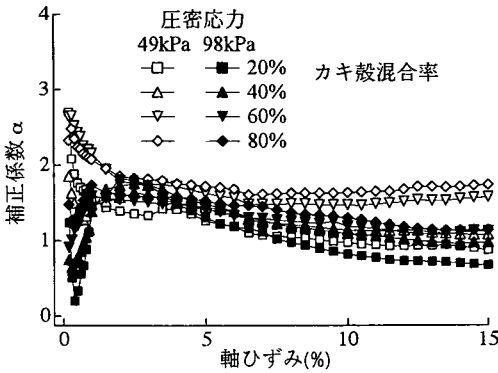


図-11 補正係数 α のひずみ依存性

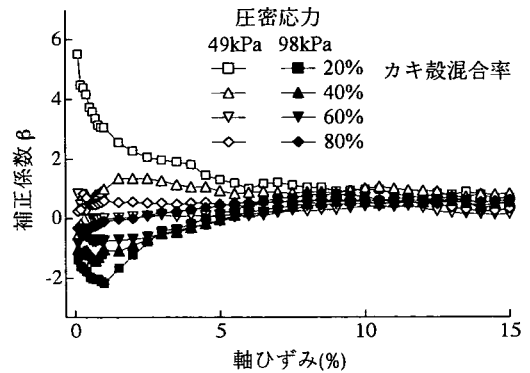


図-12 補正係数 β のひずみ依存性

合土の割線変形係数に対してカキ殻の構造が果たす役割が大きいことを示している。

図-11 はカキ殻の混合率が 20-80%のときのひずみの発達に伴う補正係数 α の変化を示している。これを見ると、補正係数の値はひずみの発達に伴い初期に大きく変化し、その後なだらかな変化を示している。これは、せん断に伴ってカキ殻の構造変化が生じていることを示唆している。また、49kPa と 98kPa の場合で、ひずみレベルが小さい場合に特徴的な違いが見られる。49kPa の場合には、ひずみが 1%以下のときに補正係数が 1 より大きな値を示し、逆に 98kPa の場合では 1 より小さな値を示している。すなわち、この結果は、49kPa の場合にはひずみが 1%以下のときにカキ殻の骨格構造がその体積比に比較して混合土の割線変形係数に対して大きな役割を果たし、逆に 98kPa の場合ではカキ殻の骨格構造が果たす役割が小さいことを意味している。

これらの考察から、せん断初期段階では、圧密応力の小さい 49kPa の場合の方が、体積比に比較してカキ殻同士が骨格構造をつくっていることを示していると考えられる。これは、先に表-2 で示した粘土の圧密応力分担率からも推察できるが、この結果は、圧密応力が 98kPa に増してカキ殻の体積比は大きくなっても、カキ殻自身の接触による荷重伝達の割合はむしろ小さくなることを示している。このことから、圧密応力が小さい 49kPa の場合に作られていたカキ殻の骨格構造は、98kPa までの圧密によって、圧密応力に応じて大きくならなかったものと推察できる。微視的に考えると、ランダム構造から配向構造に移行すること、あるいは接触点の応力集中による破碎が関係していると考えられる。このうち、前者については、圧密

後のカキ殻の配向の観察から明かに、長軸が水平になる傾向が見られた。また、後者の破碎性については、カキ殻混合率 80%・圧密応力 98kPa の場合についてせん断後のカキ殻の粒度を調べた結果、2mm 以下分の若干の存在が認められたが、その変化は、顕著ではなかった。後者の影響は小さいと考えられるが、粒子破碎についてはなお、今後検討の余地がある。

(2) 混合土の過剰間隙水圧発生特性の検討

割線変形係数と同様に試験で得られた間隙水圧によって混合土の過剰間隙水圧発生特性を説明することができる。あるひずみ γ での混合土の過剰間隙水圧 $\Delta u_m(\gamma)$ は、基質部分粘土の実験から得られた水圧 $\Delta u_c(\gamma)$ 、カキ殻のみの実験から得られた水圧 $\Delta u_o(\gamma)$ 、補正係数 $\beta(\gamma)$ を用いて、

$$\Delta u_m(\gamma) = (1 - n_v)\Delta u_c(\gamma) + \beta(\gamma)n_v\Delta u_o(\gamma) \quad (7)$$

と書ける。上式を補正係数について解けば、以下の式が得られる。

$$\beta(\gamma) = \frac{\Delta u_m(\gamma) - (1 - n_v)\Delta u_c(\gamma)}{n_v\Delta u_o(\gamma)} \quad (8)$$

こうして得られた補正係数 $\beta(\gamma)$ の値が大きいほど、混合土のダイレタンシー特性に対してカキ殻の構造が果たす役割が大きいことを示している。図-12 はカキ殻の混合率が 20~80%のときのひずみの発達に伴う $\beta(\gamma)$ の変化を示している。これを見ると、49kPa と 98kPa の場合でひずみレベルが小さい場合の補正係数の値は、正負が反対で対照的な特性を示している。これは、49kPa の場合にはせん断初期から、カキ殻の構造が混合土のダイレタンシー

特性に果たす役割があるのに対して、98kPa の場合にはその効果が無いことを示している。これは、割線変形係数の場合と同様にせん断初期では、49kPa の方がカキ殻の構造が作られていることを示すものである。また、ひずみが発達するにつれて、補正係数の値は収束傾向にあるが、その変化パターンから、圧密応力の小さい 49kPa の場合には、せん断に伴ってカキ殻の骨格構造が単調に収縮していく様な緩い構造であるのに対して、98kPa の場合にはカキ殻の構造が一端膨張し、その後収縮するような密な構造の特徴を示していると言える。

4. 均質化法による混合土のせん断強度・変形特性の検討

ここでは、数学的均質化法を用いて混合土の微視的な構造変化を反映した巨視的な変形特性を評価し、実験結果に定性的な解釈を与える。なお、混合土のせん断変形特性は非線形な特性を有するものであるが、実験で得られた混合土や基質部分の粘土の非線形性を均質化の計算に導入することは困難なため、ここでは混合土の割線変形特性を対象として解析することとした。その際、ひずみレベルによって変形挙動が異なることが推測されたため、軸ひずみ 1% および 15% における割線変形係数を検討対象とした。

なお、本来カキ殻同士は 3 次元的な力の伝達構造を持ち、しかも非線形な挙動を示す。このような混合土のせん断挙動を 2 次元の直接的なカキ殻同士の力の伝達構造を持たない線形モデルで説明することは基本的に不可能である。その一方で、混合土の 2 次元断面は、混合土中のカキ殻の構造を何がしか反映していることも確かである。ここでは、手法そのものの限界は認識した上で、2 次元の断面写真をもとにした混合土のモデル化を試み、カキ殻が混合土の変形特性に果たす役割を考察する。均質化法の定式化については付録を参考されたい。

(1) カキ殻の見かけの割線変形係数の算定方法

カキ殻混合土の割線変形係数は、混合土を構成するカキ殻と基質部分の粘土のそれぞれの物性およびこれらの分布構造から決定される。したがって、カキ殻混合土の割線変形係数を算定するためには、カキ殻混合土の微視構造と個々の材料の物性を知る必要がある。これらのうち、カキ殻固有

の割線変形係数を求めることは容易でないため、ここでは粘土の物性と微視構造を与えて、試験結果を説明できるカキ殻の見かけの割線変形係数を均質化法から推定を試みる。すなわち、カキ殻の弾性係数を仮定し、実験と解析から求めた弾性係数が一致したときのカキ殻の弾性係数をカキ殻の見かけの割線変形係数とする。

a) 基質粘土の割線変形係数の決定方法

混合土中の基質粘土の受けている圧密応力は、混合率ごとに異なるので、その割線変形係数も異なることになる。先に述べたような方法で、基質粘土の受けている圧密応力を算定し、その圧密応力条件下で粘土のみの三軸圧縮試験を行った。こうして求められた粘土の応力-ひずみ関係から、基質粘土の割線変形係数を求めた。

一方、ターゲットとする混合土の割線変形係数は三軸試験から求めた応力-ひずみ関係からすでに求められている。表-3 に、解析に与えた基質粘土とカキ殻混合土の割線変形係数を示した。

b) 解析条件および解析方法

カキ殻混合土のユニットセルモデルは画像から直接生成する手法¹⁴⁾を用いて作成した。また、ユニットセルの大きさは 200×200 pixels (1 pixel 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。図-13 は解析に用いた混合土の断面写真とユニットセルモデルを示したものである。ここで、ユニットセルは、供試体の断面写真のうち、10cm×10cm の領域をもとに作成している。なお、均質化解析から求められる物性は平均的なものであり、このユニットセルの実際には依存しない。

また、三軸試験の排水条件は非排水であることと、完全に飽和されているという仮定からポアソン比は 0.5 になるが、計算ではポアソン比 0.5 に近似する値として 0.48 を用いることとした。

三軸試験から求められた混合土の割線変形係数を説明できる均質化弾性係数は次のように定義される。

$$E^H = \begin{bmatrix} E_{xx} & E_{xy} & E_{xz} \\ & E_{yy} & E_{yz} \\ \text{symm.} & & E_{zz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 E^H は均質化弾性係数、 E_{xx} は水平方向弾性係数、 E_{yy} は上下方向の弾性係数である。三軸試験の載荷方向が上下方向であるので、三軸試験から得られる弾性係数は E_{yy} に相当することになる。すなわち、この値と三軸試験から求めた混合土の

表-3 均質化解析に用いた粘土および混合土の割線変形係数(×98kPa)

圧密応力(kPa)		カキ殻混合土				基質粘土			
		49		98		49		98	
軸ひずみレベル(%)		1	15	1	15	1	15	1	15
カキ殻 混合率 (%)	20	0.420	0.052	0.675	0.089	0.240	0.030	0.540	0.059
	40	0.470	0.066	0.710	0.108	0.232	0.027	0.520	0.057
	60	0.500	0.074	0.790	0.124	0.218	0.026	0.290	0.033
	80	0.640	0.097	0.881	0.132	0.190	0.021	0.240	0.030

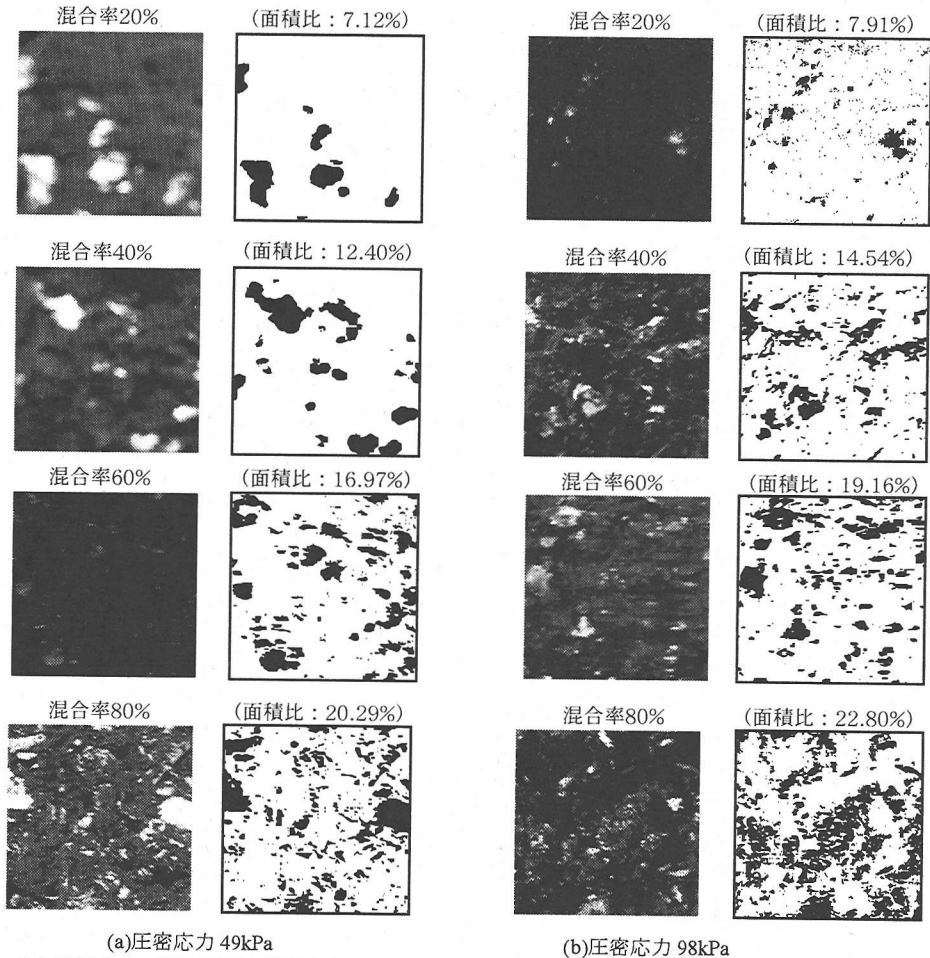


図-13 カキ殻混合土の断面写真と数値解析に用いたユニットセルモデル (断面写真は、すべて10cm×10cmの範囲であり、ユニットセルモデル中の黒い部分がカキ殻にモデル化された部分を示している)

弾性係数が一致する時のカキ殻の弾性係数をその見かけの弾性係数と定義した。

(2) 混合率とカキ殻の見かけの割線変形係数の関係

図-14 は計算から求めたカキ殻の見かけの割線変形係数をせん断前のカキ殻の体積比に対して示したものである。求められたカキ殻の割線変形係数がすべての場合においてほぼ一定の値とならないことから、この方法ではカキ殻の真の割線変形係

数が求められていないのは明かである。しかし、求められた見掛けの値は、与えられた微視構造でマクロな混合土の変形係数を説明できるカキ殻自身の割線変形係数を示しており、カキ殻の寄与する程度を表していると見なすことができる。すなわち、この値が大きいほど、個々のカキ殻の剛性が大きいのであるから、カキ殻の骨格構造が混合土の変形係数に果たしている役割が大きいことを意味しているものと考えられる。

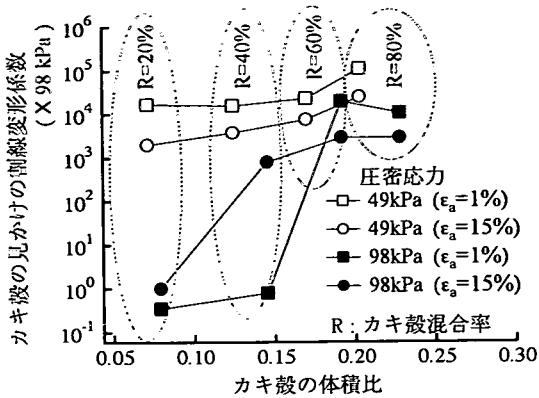


図-14 カキ殻の体積比と割線変形係数の関係

図からカキ殻混合率が増加すると、見かけの割線変形係数も増加するが、その増加傾向は圧密応力によって大きく異なっている。圧密応力が 49kPa の場合、混合率の増加に伴って係数は算術的に増加し、混合率が 60%を超えたときその増加幅は大きくなる。一方、圧密応力が 98kPa の場合はカキ殻混合率が 20%から 60%の間でオーダー的に急増し、混合率 60%から 80%で急激な弾性係数の変化は見られない。

図-15 は、このような結果の違いを考察するため、解析に用いた基質粘土とカキ殻混合土の変形係数の差を示したものである。図の変化パターンは、概ね図-14 の変化パターンと対応していることから、カキ殻混合によって生じた基質粘土と混合土の変形係数差を解消するためには、カキ殻の見かけの変形係数を対数的に増加させなければならなかったものと解釈できる。裏返せば、断面写真から決めた 2 次元微視構造は、実際の力学的構造を反映していないものと考えられる。

なお、圧密応力 98kPa、軸ひずみ 1% の場合のカキ殻混合率 60%と 80%の結果は、上記の単純な考察に必ずしも当てはまらない。この差は、実際の微視構造の違いに起因することは明らかであり、混合土の非排水せん断挙動が、その圧密応力や混合率、ひずみレベルによって複雑に変化する理由もそこにあると思われる。

5. 結論

浚渫粘土にカキ殻片を混合した土の非排水せん断強度・変形特性を三軸圧縮試験によって実験的

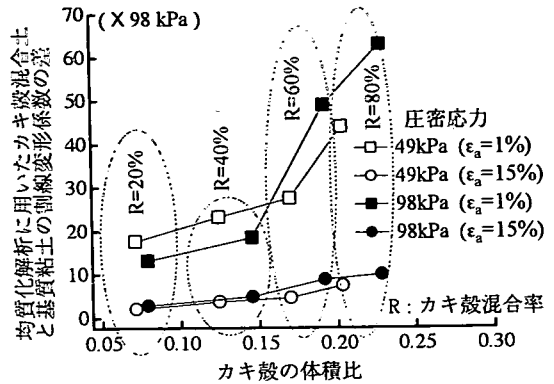


図-15 カキ殻の体積比と均質化解析に用いた基質粘土とカキ殻混合土の割線弾性係数の差の関係

に検討した。また、均質化法によって、カキ殻の果たす役割の検討を試みた。その結果得られた結論は以下のとおりである。

(1) 純粋な粘土に比較して、カキ殻混合率が増加すると混合土の非排水せん断強度は増加する結果が得られた。また、カキ殻の混合によるせん断強度の増加は、カキの混合率 (0 - 80%) にほぼ比例し、圧密応力 (49 - 98kPa) によらなかった。

(2) 三軸試験から得られる応力-ひずみ関係と間隙水圧発生特性を詳細に検討し、カキ殻混合土中のカキ殻の構造はその圧密応力、カキ殻混合率、せん断ひずみレベルに応じて複雑に変化することが推察された。混合土の非排水せん断挙動が個々の構成要素のせん断挙動の中間的なものにならないのは、混合土のダイラテンシー特性が構成要素の中間的特性を示さないためであると考えられる。

(3) 均質化法に基づく数値解析から、カキ殻の割線変形係数を評価することによって、カキ殻の混合による変形係数改善効果の評価を試みた。その結果、2 次元微視構造をモデル化しただけの場合、基質粘土と混合土の変形係数の差を解消するようにカキ殻の見かけの変形係数が大きく算定されることがわかった。

謝辞：本研究の実施に際し、元東北大学教授（現八戸高等専門学校校長）柳澤栄司先生に多大なご教示を頂いた。また、本研究で使用したカキ殻と浚渫粘土は、運輸省（現国土交通省）第二港湾建設局塩釜港湾空港工事事務所から提供されたものである。また、せん断試験は東北大学大学院学生君島芳友君に協力を頂いた。ここに記して感謝を表す次第である。

付録：均質化の定式化

本研究で用いた周期的な微視構造を持つ非均質線形弾性体に対する均質化法の定式化を概説する。数学的に厳密な式展開は他書^{14),15)}を参照されたい。

1. 境界値問題

ある領域 Ω を占める弾性体を考えると、ついでに式は次のように表れる。

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (A-1)$$

ここで、 f_i は物体力である。境界 S_i で表面力 t_i^0 、変位 u_i^0 、が与えられるものとすれば、

$$\begin{aligned} u_i &= u_i^0 & \text{on } S_u \\ \sigma_{ij} n_j &= t_i^0 & \text{on } S_t \end{aligned} \quad (A-2)$$

のようになる。仮想仕事式は、

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \right) v_i d\Omega = 0 \quad (A-3)$$

のようになる。式 (A-3) に Hook 則を適用して次式で表される仮想仕事式を得る。

$$\int_{\Omega} E_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} d\Omega = \int_{\Omega} f_i v_i d\Omega + \int_{\partial\Omega} t_i^0 S_i v_i d\Omega \quad (A-4)$$

ここで、 E_{ijkl} は弾性テンソルである。

2. 二つの空間変数と漸近展開法

均質化法を用いるあたり、次の二つの仮定を導入する。

『1. 不均質な構造は周期的なものであり、周期構造の単位をユニットセルと呼ぶ。』

『2. ユニットセルは Ω に対して微小でありその大きさを ε と書く。』

この仮定に基づき、周期構造を構成する一つの単位格子 (ユニットセル) の代表的スケールを ε で表す。 Ω 内の場の変数は ε の大きさに依存することから、 Ω を Ω^ε と置き換える。すなわち、対象とする境界値問題が定義される $n_{dim}(=1\sim 3)$ 次元領域 Ω^ε は、代表長さ ε を有する基本周期構造領域 (ユニットセル) を繰り返し配置することによって覆うことができる。このとき、場を構成する変数は、マイ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 ε に影響を受ける。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表現できる。したがって式 (A-4) の仮想仕事式を次のように表わす。

$$\begin{aligned} &\int_{\Omega} E_{ijkl} \frac{\partial u_k^\varepsilon(x)}{\partial x_l} \frac{\partial v_i^\varepsilon(x)}{\partial y_j} d\Omega \\ &= \int_{\Omega} f_i^\varepsilon(x) v_i d\Omega + \int_{\partial\Omega} t_i v_i^\varepsilon(x) d\Omega \quad \forall v_i^\varepsilon(x) \end{aligned} \quad (A-5)$$

微視的周期構造を考慮するため、上述したように、微視構造の代表長 ε で変化する関数を扱うために新たな微視的スケール $y_i = x_i / \varepsilon$ を導入して、Y-周期的な弾性係数、物体力、変位を、

$$\begin{aligned} E_{ijkl}^\varepsilon &= E_{ijkl}^\varepsilon \left(x, \frac{x}{\varepsilon} \right) \\ f_i^\varepsilon(x) &= f_i \left(x, \frac{x}{\varepsilon} \right) \\ u_i^\varepsilon(x) &= u_i \left(x, \frac{x}{\varepsilon} \right) = u_i(x, y) \end{aligned}$$

のように二つの空間変数に依存する形で表現する。式 (A-5) の解である未知の変位関数 $u_i^\varepsilon(x)$ を ε について漸近展開すると、

$$u_i(x, y) = u_i^0(x, y) + \varepsilon u_i^1(x, y) + \dots \quad (A-6)$$

のように表される。各項の勾配は、

$$\frac{\partial u_i(x, y)}{\partial x_j} = \frac{\partial u_i(x, y)}{\partial x_j} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u_i(x, y)}{\partial y_j} \quad (A-7)$$

ただし、この関数であるからには独立であり、微視的構造の影響を受けない。式 (A-7) の形で表現した変位の勾配を漸近展開すると、

$$\frac{\partial u_i^\varepsilon(x, y)}{\partial x_j} = \left(\frac{\partial u_i^\varepsilon}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i^1}{\partial y_j} \right) + \varepsilon \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i^2}{\partial y_j} \right) + 0 \quad (A-8)$$

のようになる。

これを仮想変位の漸近展開形とともに式 (A-5) に代入しての極限を取ると、微視的問題と巨視的問題を表れるとに関する二つ式が求められる。

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{|Y|} \int_Y E_{ijkl} \left(\frac{\partial u_k^0}{\partial x_l} + \frac{\partial u_k^1}{\partial y_l} \right) \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} dY \right) d\Omega = 0 \quad (A-9)$$

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{|Y|} \int_Y E_{ijkl} \left(\frac{\partial u_k^0}{\partial x_l} + \frac{\partial u_k^1}{\partial y_l} \right) dY \right) \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} dY d\Omega = 0 \quad (A-10)$$

ここで、式 (A-10) は微視的変位をデータとして巨視的変位を求める問題で、式 (A-9) は巨視的変位をデータとして与えて Y-周期的な微視的変位を求めるものである。このような数理構造を有する境界値問題は「2 変数境界値問題 (Two-scale boundary value problem)」と呼ばれている。

3. 平均弾性特性のための均質化法の定式化

ミクロスケールの方程式式 (A-9) から微視的周期構造の影響を表す u_i^1 を求める。このとき、ユニ

ットセル内での平均を取ると u_i^1 が Y - 周期的であることを利用する。変分方程式、

$$\int_0^Y E_{ijkl}(x, y) \left(\frac{\partial \chi_k^{pq}(y)}{\partial y_l} \right) \frac{\partial v^1}{\partial y} dy \quad (A-11)$$

$$= \int_0^Y E_{ijpq}(x, y) \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} dy \quad \forall v_i$$

の解が存在するものと仮定すると、変位の漸近展開式の第一次項は、

$$u_i^1(x, y) = -\chi_j^{pq}(x, y) \frac{\partial u_p^0}{\partial x_q} + \tilde{u}_i(x) \quad (A-12)$$

のように表すことができる。式 (A-12) を巨視的方程式 (A-10) に代入することで、

$$\int_{\Omega} E_{ijkl}^H(x, y) \frac{\partial u_k^0(x)}{\partial x_l} \frac{\partial v_k^0(x)}{\partial x_j} d\Omega \quad (A-13)$$

$$= \int_{\Omega} f_i^H(x) v_i^0(x) d\Omega + \int_{\partial\Omega} t_i v_i^0(x) ds$$

を得る。ここで、均質化弾性係数、平均物体力は

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijkl}(x, y) - E_{ijpq}(x, y) \frac{\partial \chi_k^{pq}(x, y)}{\partial y_q} \right) dY$$

$$f_i^H(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y f_i(x, y) dY \quad (A-14)$$

のように定義されている。

4 節では、式 (A-11) を解いて、 X_k^{pq} を求め、式 (A-14) から混合土の弾性係数を算出している。

参考文献

- 1) 李基豪, 風間基樹, 寺田賢二郎, 柳沢栄司: 破砕されたカキ殻を含む浚渫粘土の透水特性, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.245-256, 2000.
- 2) Trollope, D.H. and Zafar, S.M.: A study of the shear strength of saturated sand, and sand/clay mixtures, in

triaxial compression, *Proc.2nd Australia-New Zealand Conf. SAFE*, pp.7-16, 1965.

- 3) 福江正治, 大草重康: 砂と粘土の混合土の工学的性質の新しい評価法について, 東海大学紀要海洋学部, 第14号, pp.247-261, 1981.
- 4) 中瀬明男, 日下部治, 亀井健史: 粘性土地盤の異方性と塑性指数, 土と基礎, Vol.32, No.11, 1984
- 5) 亀井健史: 中間土, 砂か粘土か, 第2章, 中間土の力学的性質, 土質工学会, pp.7-54, 1992.
- 6) Skempton, A.W.: Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3-18, 1985.
- 7) Kumar, G. V. and Wood, D. M.: Fall cone and compression tests on clay-gravel mixtures, *Geotechnical J.*, Vol.49, No.6, pp.727-739, 1999.
- 8) Wood, D. M.: Some fall cone tests, *Geotechnical J.*, Vol.35, No.1, pp.64-68, 1985.
- 9) Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problem, *Proc. Roy. Soc. London*, Vol.A241, pp.376-396, 1957.
- 10) Hill, R.: A self-consistent mechanics of composite materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.13, pp. 213-222, 1965.
- 11) Hasin, Z. and Shtrikman, S.: A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.11, pp.120-140, 1963.
- 12) 大嶺 聖, 落合英俊: 土構造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/III-21, pp.127-136, 1992.
- 13) 大嶺 聖, 落合英俊, 吉田信夫: 土構造に着目した混合土の強度特性, 土木学会論文集, No.469/III-23, pp.55-64, 1993.
- 14) 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.
- 15) Sanchez-Palencia, E.: Non homogeneous media and vibration theory. *Lecture Notes in Physics 127*, Springer-Verlag, Berlin, 1980.

(2001. 3. 19 受付)

UNDRAINED SHEAR CHARACTERISTICS OF DREDGED SLUGES MIXED WITH CRASHED OYSTER SHELL

Kiho LEE, Motoki KAZAMA and Kenjiro TERADA

In order to utilize mass of oyster shells for a partial substitute material for reclamation, we investigate the undrained shear characteristics of dredged sludge mixed with oyster shells by tri-axial compression test and numerical analysis based upon the mathematical homogenization. The following conclusions can be obtained from this study. It is verified that the shear strength of dredged clay is improved by mixing with oyster shells. The increase of the undrained shear strength is almost proportional for mixing rate (0-80%) of the oyster shell, and it is independent of consolidation stress (49-98kPa). And, it was guessed that the structure of the oyster shell in mixed soil complicatedly changed from stress-strain relationship and pore water pressure generation characteristic in proportion to the consolidation stress, oyster shell mixing rate, and the shear strain level.