

砂礫を混入した粘土の力学特性

Shear Strength Characteristics of Soil with Discontinuous Part in Grain Size Distribution

向谷 光彦 Mitsuhiko MUKAITANI (高松工業高等専門学校建設環境工学科)  
 矢田部龍一 Ryuichi YATABE (愛媛大学工学部)  
 八木 則男 Norio YAGI (愛媛大学工学部)  
 榎 明潔 Meiketsu ENOKI (鳥取大学工学)

海底および陸域に堆積している粘性土や工事施工等によって発生するヘドロのような高含水比粘性土においては、その取り扱い方法が困難である。近年の産業廃棄物の規制や環境問題への一般市民の注目度が増加しているため、簡単にゴミとして処理するにはコストが高く、環境に対する影響も高い。そこで、粘土に対して、砂、礫等を適度に混入することによって、土構造物の安定性に絶大な影響を及ぼす土のせん断強度定数  $c$ 、 $\phi$  の変化を明らかにした。特に、粒度が不連続な土の強度特性に関して、有効応力規準に従ってピーク強度から残留強度発揮のメカニズムを考察した。この研究は、瀬戸内海（香川県沖、広島県沖等）で採取されてきた‘海砂’が、まもなく全面採取禁止措置になることにも対応し、四国の山砂、碎石等を中心とした骨材の有用性検証の一助となることを期待している。

キーワード：有効応力、粒径加積曲線、土の強度定数  $c$ 、 $\phi$ 、中間土 (IGC : E-6, G-6)

1. はじめに

近年の土木工事における施工例を見ると、山岳地帯から海洋域における埋立まで様々である。また、このような地域における土質工学的問題として、海洋域における土の状態は比較的均質で粒度も連続性を有しているが、山岳地帯における土は粒度が不連続なことが多い。また、山岳地帯における自然災害に地すべりが挙げられる。図1に舞鶴港よりサンプリングされた舞鶴粘性土と愛媛県沢渡地すべり地より採取された試料、和歌山県下津町断層破碎部より採取された風化蛇紋岩粘土の粒径加積曲線を示す。これを見ても、海成粘土に比べて地すべり地では、比較的大きな粒径の土粒子が含まれていることが明らかである。そこで、このような比較的粒径の大きな砂・礫分を含む土をいかに判別し、工学的分類を行うべきかという問題が生じてきた。つまり、土の力学特性に与える砂・礫含有率の影響を明らかにする必要がある。例えば、久楽ら<sup>1)</sup>は締固めおよびせん断抵抗に関する礫混じり粘性土の工学的性質について検討を行っているが、せん断特性についてはピーク強度のみの検討であることや産出状況の同一性等にまで言及していないこと、地すべり、斜面崩壊で検討対象となるピーク強度と残留強度の関係については言及していないことから、残留強度を含めた土の強度定数に及ぼす砂・礫の影響を明らかにする必要がある。

また、地すべり地では過去の大変形履歴により、すべり面の土の強度は残留強度状態にあるといわれている。粒度が不連続な土の場合、最大せん断強度発揮後のひずみ軟化量に

より、残留強度が大きく変動し、地盤の安定性に多大な影響を与えることとなる。

そこで、本論文では特に、粒度が不連続な土の強度特性に注目し、有効応力規準に従って、ピーク強度から残留強度発揮のメカニズムを考察する。粒度が不連続な土のせん断では、粒径の大きな土粒子の混合割合によって強度特性がいかに変わるかということである。しかし、そのような粒径の大きい土のせん断強度を求めるためには、装置上の工夫が必要なため、今回は比較的簡易に行うことが出来るよう細粒分に砂・礫を混合するという手法を用いた。まず、三軸圧縮試験のピーク強度をもとに、大変形が可能な一面せん断型と単純せん断型リングせん断試験を行うことにより、残留強度を含めた粒度が不連続な土の強度特性について明らかにする。そして、最後にこのような土の強度特性から見た分類について考察する。

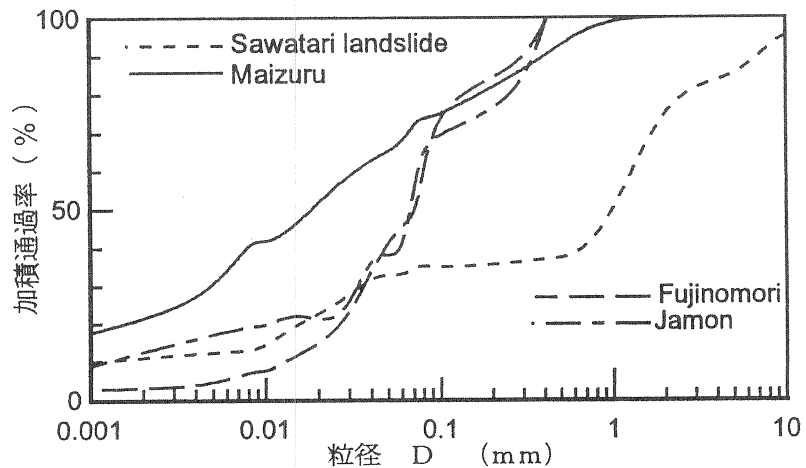


図1 粒径加積曲線

表 1 試料の物性値

試料	粒径 ( $\mu$ m)	w L (%)	I <sub>p</sub>	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	e max	e min
藤の森粘土	<74	44.7	20.0	2.65		
舞鶴粘土	<74	75.3	53.4	2.75		
蛇紋粘土	<420	28.7	11.9	2.83		
豊浦砂	74-420			2.65	0.95	0.58
蛇紋砂礫	2-4.76mm			2.70	0.66	0.30

表 2 実施した試験の一覧

試料	混合砂・礫	三軸 CU	一面リング*	単純リング*
藤の森粘土	豊浦砂	○	○	○
舞鶴粘土	豊浦砂	○	○	
蛇紋粘土	蛇紋礫分	○		○

2. 粒度が不連続な土の強度定数とその考え方

2. 1 試料およびせん断試験法

①試料は、粘土試料として風化蛇紋岩粘土（以下蛇紋岩粘土と呼ぶ）、藤の森粘土、舞鶴粘土を用いた。また、任意の砂・礫含有率になるよう、蛇紋岩粘土はその不かく乱試料中の細礫分をふるいによって選別して混合し、その他は豊浦標準砂を混合した。試料の粒度加積曲線、物性値及び実施試験を図 1、表 1、表 2 にそれぞれ示す。

②用いた試験法は、圧密非排水三軸圧縮試験と一面せん断型リングせん断試験と単純せん断型リングせん断試験である。また、粒度が不連続な土のせん断試験に用いる試料の状態は、不かく乱試料、含水状態からの繰り返し再圧密された試料、乾燥試料を突き固めて飽和させた試料の三種類が考えられる。ここで、どの試料を用いるかということには、検討を要する。不かく乱試料は、地すべり地などでは過去にどれだけの力学的な履歴があったかを判断することが困難で、不かく乱試料を採取することが困難なことが多く、多数のせん断試験を行うことには適さない。高含水比で繰り返した時には、沈降速度の違いにより、混入させた砂・礫分が予備圧密容器の下方に沈澱し、砂・礫分の粒子による骨格構造の発達で圧密が進行しなくなることがあるし、低含水比で繰り返すと飽和度の高い供試体を作成することが困難となるから<sup>2)</sup>、結局含水状態から繰り返し再圧密することは、試料として適さないと思われる。前記の二試料に比べ乾燥試料を突き固めることによって供試体を作成する方法は、同一の砂・礫含有率を再現することがたやすく、供試体内に一樣に砂・礫分の粒子が混合できると考えられるため、三種類のせん断試験では試料を突き固めることにより、供試体を得た。

③三軸試験における供試体作成法の詳細は以下のとおりである。風乾状態で任意の配合比で十分容器の中で攪拌した後、直径 5 cm、高さ 10 cm のモールドに 10 回に分け、一層あたり 50 回突き固めることにより、一番密な状態を得られるよう心掛けた。次に供試体内の空気を二酸化炭素により置換し、水で飽和し、所定の応力で圧

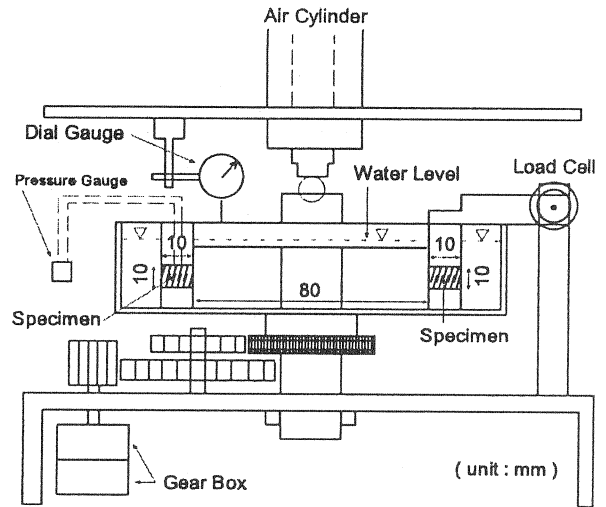


図 2 (a) 単純せん断型リングせん断試験機の概略

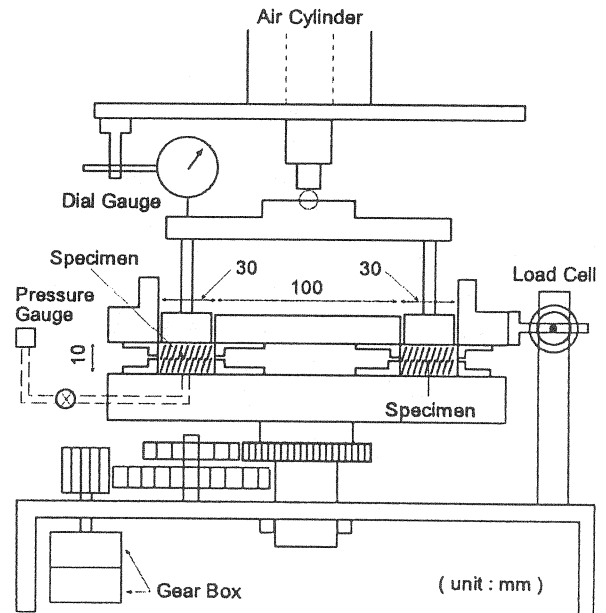


図 2 (b) 一面せん断型リングせん断試験機の概略

密した後、バックプレッシャーを 2 kgf/cm<sup>2</sup> (× 98kN/m<sup>2</sup>) 作用させ、非排水状態で圧縮試験を行った。圧密時間は一日、バックプレッシャーは 4 時間程度作用させている。これらの方法により、Skempton の間隙圧係数 B 値は 0.9 以上を得た。せん断速度は 0.0625 mm/min である。

④土の残留強度を求めるためのリングせん断試験機は、圧密排水条件で行い、詳細は参考文献<sup>3)4)</sup>に示すが、単純せん断型リングせん断試験機と一面せん断型リングせん断試験機である。単純せん断型リングせん断試験機は、リングの外径が 10 cm、内径 8 cm で、供試体高さが 1 cm、変位速度が 0.0345 °/min であり試験機の概略を図 2 (a) に示す。一面せん断型リングせん断試験機は、リングの外径が 16 cm、内径 10 cm で、供試体高さが 2

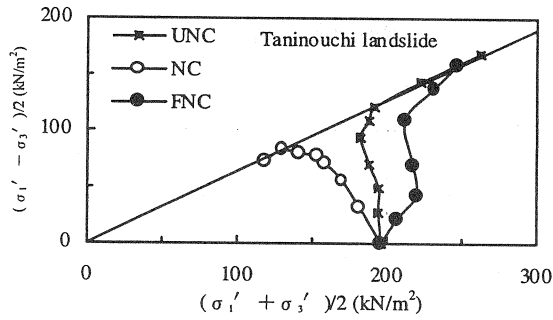


図3 有効応力規準による強度定数に及ぼす乱れの影響<sup>4)</sup>

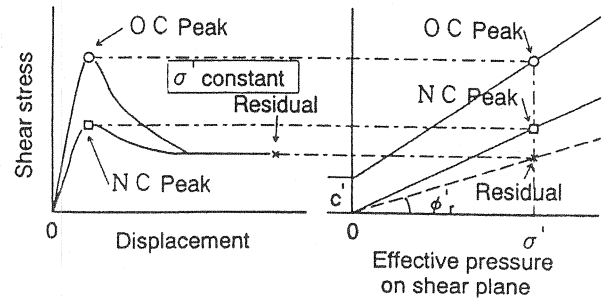


図5 Skemptonによるピーク強度と残留強度の概念図<sup>7)</sup>

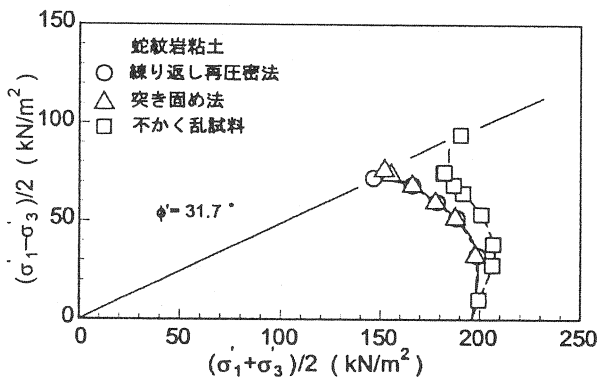


図4 供試体作成方法の違いが有効応力径路に及ぼす影響

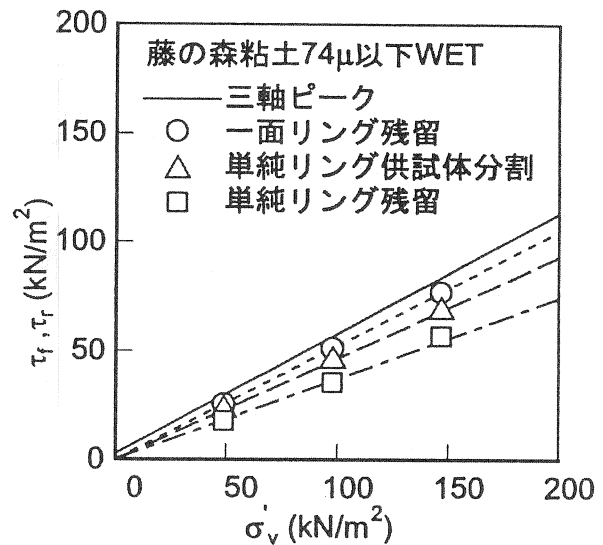


図6 単純せん断型リングせん断試験機による破壊強度線(藤の森粘土、74 μ m 以下)

cm、変位速度が 0.03552 ° /min であり、概略図を図 2 (b) に示す。両試験機とも、通常行われているリングせん断試験の速度よりかなり早い、残留強度にほとんど影響を与えないことを、既に確認している<sup>5)</sup>。また、供試体作成は三軸試験と同様の理由により乾燥状態のものを突き固めたものを使用している。

## 2. 2 粒度が不連続な土の強度試験への有効応力規準の導入

三軸試験による不かく乱試料と練り返し再圧密試料のピーク状態での強度定数に関して、図 3 のように調べている<sup>5)</sup>。試料は谷の内地すべり地の粘土である。図中、UNC は不かく乱試料を、NC は練り返し正規圧密試料を、FNC は一度せん断破壊させた後、再成形・再圧密した正規圧密試料を意味している。供試体は、直径 5 cm、高さ 10 cm で B 値は不かく乱試料では 0.85 以上、練り返し試料で 0.95 以上である。せん断速度は 0.0625 mm/min である。これらより、三軸試験では不かく乱試料と練り返し再圧密試料とで有効応力径路、非排水強度等は大きく異なるが、有効応力規準による強度定数にほとんど違いは見られないことが分かる。

また、今回は、予圧密法ではなく突き固め法を用いて

おり、砂質土等で見られる初期堆積構造による影響が考えられるため、蛇紋岩粘土に対して、高含水比で練り返し再圧密された試料と突き固めた試料に対して圧密非排水三軸試験を行った。図 4 に不かく乱試料の有効応力径路とともに示す。上記と同様に、多少の違いはあるものの、有効応力規準による強度定数に違いはなく、試験条件の影響をほとんど受けない材料固有の定数として、排水状態でのそれとともに、有用であることが実証された。

## 2. 3 リングせん断試験機による残留強度発揮に与えるせん断機構の影響

土のせん断応力とせん断ひずみの関係<sup>7)</sup>を図 5 に示す。最大せん断強度に達するとそれ以後は、ひずみの増加とともにせん断抵抗が減少し、せん断抵抗が変化しない部分が現れる。このときのせん断抵抗を土の残留強度と呼ぶ。この部分においては、排水せん断状態ではダイレタンシーによる体積変化が生じることはなく、また非排水せん断状態では発生間隙水圧の変化が無くなっている。今回は排水条件でせん断試験を行ったので、試験中の状態は、前者の状態を指す。また、一面せん断型のように

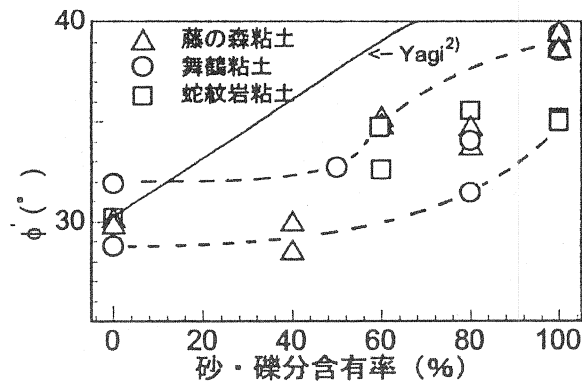


図7 砂・礫分含有率とφ'の関係 (突き固め法)

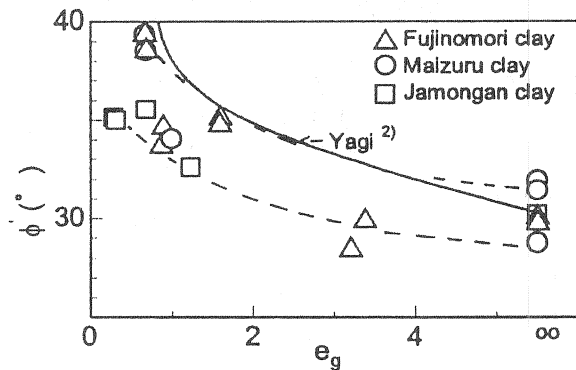


図8 砂・礫分含有率とφ'の関係 (突き固め法)

拘束された面でせん断された場合と、単純せん断型のようにある厚さの層でせん断される場合で、せん断の機構が異なることが考えられる。

単純せん断型リングせん断試験機では、せん断試験中に単純せん断変形が保証される必要があるので、次のような予備試験を行った。供試体をあらかじめ上下5mmずつに分割しておいたものをリングの中にセットし、前述と同様に圧密後排水せん断試験を行った。図6は、藤の森粘土の砂分含有率0%のものについて行った破壊強度線である。明らかに上記の操作を行った試料は強度的にも一面せん断型リングせん断試験の結果に近く、せん断試験後の供試体観察によってもはっきりとしたせん断面が観察された。この試験結果の解釈については二つが考えられる。一つは、単純せん断型リングせん断試験後の供試体観察により、せん断面が見られなかった場合には、せん断試験中単純せん断変形を保っていたと判断できるとするものである。もう一つは、単純せん断型リングせん断試験においても残留強度状態では、せん断面が入ることができ、そのせん断面において、最も摩擦抵抗の小さな粘土粒子同士の接触によりせん断抵抗力を発揮すると考えるものである。現状では、上記のいずれが正しい単純せん断型リングせん断試験による残留強度

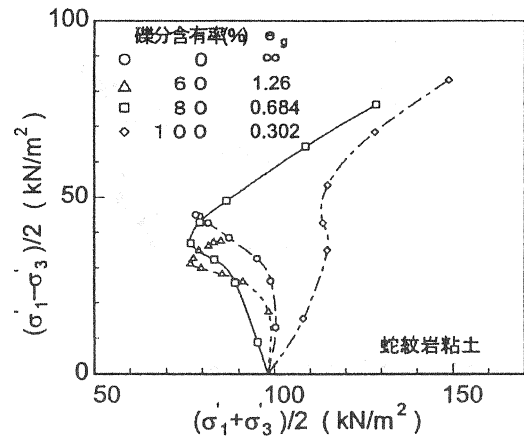


図9 砂分含有率の違いによる有効応力径路に及ぼす影響 (蛇紋岩粘土、突き固め法)

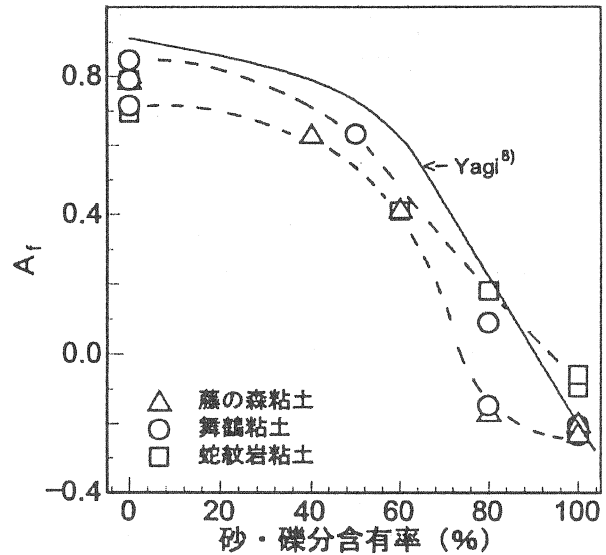


図10 A1と砂・礫分含有率の関係 (突き固め法)

の発揮なのかまでは断定することが出来なかった。そこで、次に粒度が不連続な土の強度特性について考える。

### 3. 粒度が不連続な土の強度特性

#### 3.1 三軸圧縮試験によるφ'に与える砂・礫分含有率の影響

三軸試験によるφ'に与える乱れの影響は小さいことを明らかにしたが、砂・礫分含有率が大きくなれば、当然φ'が変化することが予測される。また、後述する残留強度に与える砂・礫分含有率の影響とともに、ピーク強度φ'から残留強度φrへの低下について考察する上で、重要である。そこで、砂・礫分含有率の影響を検討する。

用いた試料と実験方法は、前記2.1で示した通りである。著者<sup>2)</sup>が、粘土(LL=50.0%, PL=24.6%, ρs=2.61g/cm<sup>3</sup>)と細礫分を用いて、φ'と礫分含有率の関係を明らかにしているように、ある含有率までは粘土か礫のみのφ'に近く、ある含有率付近で過渡的な挙動を示すことが分かっている。また、そこでは礫分間比e<sub>s</sub>

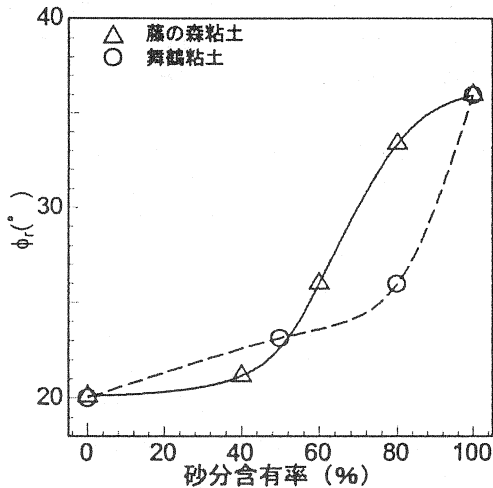


図 1 1 砂分含有率と  $\phi_r$  の関係 (藤の森、舞鶴粘土、突き固め法)

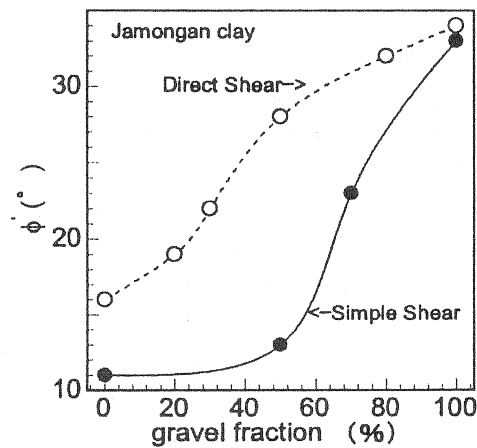


図 1 2 礫分含有率と  $\phi_r$  の関係 (蛇紋岩粘土、突き固め法)

(=粘土粒子と水の体積/礫粒子の体積)を導入しており、礫分含有率が 30%以上になるときに影響が大きいが、既に明かとなっている。図 7、図 8 は、すべての試料についての砂・礫分含有率と  $\phi'$  の関係、砂・礫間隙比と  $\phi'$  の関係を示しており、参考のため著者ら<sup>2)</sup>のデータを加筆している。砂間隙比は  $e_s$  において、分母を砂粒子の体積に置換したものである。図 7 を見ると、当然のことながら前記と同様、砂・礫分含有率の増加とともに、 $\phi'$  の増加が見られる。しかしながら、各試料の結果は少しずつ異なっている。例えば、過渡的な粘土から砂・礫の  $\phi'$  の中間的な挙動を示すところは、蛇紋岩と藤の森粘土では 60%前後、舞鶴粘土では 80%前後となっている。また、舞鶴粘土では、砂分含有率が 80%までは、ほぼ粘土の挙動を示すことが分かる。図 8 では、すべての試料について、砂・礫間隙比  $e_s$  が 3 前後から砂・礫分の影響が大きくなることが分かる。また、非排水せん断強さは有効応力規準にしたがって有効応力径路より発生する過剰間隙水圧の大小や強度定数の違いを明かにすることができる。図 9 に蛇紋岩粘土

試料について各礫分含有率とその有効応力径路の関係の一例を示す。これにより、礫分含有率が大きくなるとダイランシーの影響で径路は右側に移って行く様子が明らかとなっている。間隙比の違いの影響を Hvorslev 規準の強度定数により確認しなければならないが、今回はその考察まで行えなかった。しかし、非排水状態における正規圧密飽和土の強度発揮が間隙比と Skempton の間隙圧係数  $A_r$  によって一義的に決まるから、 $A_r$  と砂・礫分含有率の関係を知ることは意義深いことには変わりはない。図 10 に  $A_r$  と砂・礫分含有率の関係を示す。これをみるとちょうど図 7 と上下対称形に近く、前記のダイランシーの影響を  $A_r$  の違いであるとして理解することができる。例えば、ある砂・礫分含有率で突き固められた飽和粘土試料は、すべり面上で礫粒子の接触・せん断抵抗が卓越するときには、密な状態の砂・礫のせん断特性を有する。密な砂・礫は、非排水せん断時にはダイランシーの影響で吸水しようとする力が働き、結果として負の過剰間隙水圧が測定され、 $A_r$  が負の値を示すことになる。

### 3. 2 リングせん断試験による残留強度に与える砂・礫分含有率の影響

著者<sup>9)</sup>は愛媛県佐田岬半島の名取地すべり地より採取した黒色片岩の風化粘土について、粘土分に種々砂分含有率を調整し、一面せん断型リングせん断試験機を用いて残留強度に与える砂分含有率の影響について、以下のような結果を得ている。破碎帯地すべり粘土で多くみられる砂分含有率 20%前後では、残留強度への影響が小さく、30%を越えると急激な  $\phi_r$  の増加が見られるとしている。しかし、これは、せん断面を拘束してせん断試験を行うという一面せん断型リングせん断試験機であることから、単純せん断のようなせん断変形を考慮しなければならないときに、その強度発揮のメカニズムが異なるため、砂・礫分含有率の影響について調べる必要がある。図 1 1 に藤の森粘土と舞鶴粘土試料の  $\phi_r$  と砂分含有率の関係について示す。これらは、ともに単純せん断型リングせん断試験機を用いて行ったものである。舞鶴粘土に比べ藤の森粘土の方が相対的に砂分含有率の小さなところから影響が現れていることが明かとなっている。また、舞鶴粘土においては、 $\phi'$  のときと同様に、砂分含有率が 80%付近から急激な  $\phi_r$  の増加がみられ、藤の森粘土では、50%付近から  $\phi_r$  の増加がみられる。砂分含有率が 0%のときの残留強度には大きな差異は見られないが、図 7 の同試料のピーク強度から残留強度への低下量を考えたとき、舞鶴粘土の方が低下量大きいことがわかる。これは、砂分含有率がともに 0%のときの粘土分含有量が、藤の森粘土は 4.35%であるのに対し、舞鶴粘土は 63%であり、粘土粒子が大変形を受け、スリッケンサイドが発達し、より残留強度の低下を招く結果となったと思われる。図 1 2 には、蛇紋岩粘土

の $\phi_c$ と礫分含有率の関係を示す。これより、一面せん断型では単純せん断型に比べて、礫分含有率の小さなおとところから $\phi_c$ の増加がみられるが、単純せん断型リングせん断試験の結果はそれと異なり、礫分含有率が60%を越えるところから急激な増加が見られる。このことは、せん断機構の違いにより、前記2.3で考察したことと同様の残留強度発揮のメカニズムが影響しているものと思われる。また、残留強度では一般的に一面せん断型リングせん断試験が使用されることが多いが、砂・礫分含有率とせん断機構の違いにより、単純せん断変形が、残留強度に影響を与えることがあることが明らかとなった。次に、これらの土に対する判別と工学的分類について考える。

#### 4. 粒度が不連続な土の判別と工学的分類

粒度の不連続性を土の判別分類試験に反映させるためには、粒度試験より得られる粒径加積曲線に注目すべきであると考え。図1に愛媛県沢渡地すべり地粘土の粒径加積曲線を示す。粒径が1mm付近で不連続な部分がみられる。このような粒度を有する土は、砂・礫分含有率によってピーク強度では砂・礫のみによる強度に近い値を示すかもしれないが、残留状態では粘土粒子の影響により粘土のみの残留強度を示すものがある。よって、粒度が不連続な土におけるピーク強度に対する評価には、砂・礫間隙比 $e_s$ が有効なパラメータとなり、 $e_s$ が3前後において $\phi'$ に与える砂・礫分含有率の影響が明らかとなったが、工学的には現位置での砂・礫分土粒子分布のばらつきなどを考えて、 $e_s$ が4前後からその影響を考慮すれば良いと思われる。残留強度では、砂・礫分含有率が60%を越えると、粘土のみによる残留強度から砂・礫の影響を受けることが明らかとなった。

今回の一連の実験と考察は、主として、粒度が不連続な土の強度特性に与える砂・礫分含有率の影響に関してのみ行った。したがって、圧縮性や透水性など重要な他の力学特性を考慮する必要性があり、それらすべてが整った時に、真に工学的に有用となり得るが、本論文がその一助となることを希望する。

#### 5. まとめ

粒度が不連続な土の強度特性として三種類の粘土試料と砂・礫を種々の混合比で調整し、三軸圧縮試験と二種類のリングせん断試験を行い、その強度特性を調べた。得られた結論は次のようである。

- 1) 有効応力に関する見かけの強度定数 $\phi'$ に与える砂・礫分含有率の影響について検討し、砂・礫間隙比 $e_s$ が3前後から粘土のみの強度から砂・礫の強度の影響を受けることを明らかにした。
- 2) 残留強度定数 $\phi_c$ に与える砂・礫分含有率の影響について検討し、砂・礫分含有率が60%程度から粘土のみの強度から砂・礫の強度の影響を受けることを明らかにした。

3) 粒度が不連続な土の判別と工学的分類について検討し、粒径加積曲線において不連続な部分を有する土のピーク強度と残留強度には、特に検討を要することを明らかにした。

粒度が不連続な土の強度特性を室内試験を中心に考察したが、現位置におけるせん断試験との相関性や安定解析への導入には、なお多くの問題を有している。しかし、現位置の強度算定のためにせん断試験や判別分類試験を行うことは、有用であることに変わりはない。

謝辞：本研究の一部は、(社)四国建設弘済会平成11年度助成事業の技術開発支援制度「種々の骨材を混入した粘土の力学特性とその利用に関する研究」、学術審議会科学研究費補助金奨励研究(A)「地方都市における地下空間情報の活用に関する研究」、(財)香川県科学技術振興財団平成12年度リサーチ・オン・リサーチ事業支援金、平成12年度高松高専教育研究助成会交付金を使用した。

#### 参考文献

- 1) 久楽勝行、三木博史、真下陽一、関一雄：締固め度がレキ混り粘性土の工学的性質に及ぼす影響、土木技術資料、Vol.22、No.7、pp.21～26、1980。
- 2) 八木則男、榎明潔、丸山悟：不連続粒度を有する土のせん断特性、第41回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集、pp.286～269、1989。
- 3) 矢田部龍一、八木則男、榎明潔：破碎帯地すべり地の粘性土のリングせん断特性、土木学会論文集、第436号/Ⅲ-16、pp.93～101、1991。
- 4) 八木則男、矢田部龍一、二神治、榎明潔、石井朋紀、向谷光彦、萩田高秀：粘性土の残留強度特性、第45回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集、pp.466～467、1993。
- 5) 石井朋紀：地すべり地粘性土の力学特性と移動量解析、愛媛大学修士論文、1991。
- 6) 矢田部龍一、八木則男、榎明潔：乱さない地すべり粘土のせん断特性、地すべり、Vol.26、No.4、pp.3～9、1990。
- 7) Skempton,A.W. : long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, Vol.14, No.2, pp.77～102, 1964。
- 8) 八木則男、矢田部龍一、向谷光彦、榎明潔：粒度が不連続な土の強度特性、土の判別と工学的分類に関するシンポジウム発表論文集、(社)地盤工学会、pp.123～128、1993。
- 9) 八木則男、矢田部龍一、向谷光彦：不連続粒度を有する土の強度特性、愛媛大学工学部紀要、第13巻、pp.81～88、1994。