

初期せん断応力作用下の中間土の 非排水繰返しせん断特性

吉本憲正¹・兵動正幸²・伊東周作³・山本陽一⁴・藤井照久⁵

¹正会員 工修 山口大学 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目 16-1)

²正会員 工博 山口大学 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目 16-1)

³正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 関西支社技術部 (〒550-0011 大阪市西区阿波座 1-11-14)

⁴正会員 工博 三井建設株式会社 技術研究所土木研究開発部 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

⁵正会員 工博 復建調査設計株式会社 地質調査部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)

本研究では、砂の地震時の破壊モードを液状化、粘土の地震時の破壊モードを初期せん断応力下の繰返しせん断破壊と位置づけ、砂から粘土に至る中間土の両者に対する繰返しせん断強度特性について調べることを目的とした。実験は、非排水繰返し三軸試験装置を用いて、種々の細粒分含有率からなる室内配合の中間土試料を対象に、等方圧密下および初期せん断応力下で実施した。一連の試験結果から、砂粒子のみで骨格を形成することが可能である限界の細粒分含有率を境界に、軸ひずみの発生形態が変化することが分かった。繰返しせん断強度特性は、細粒分含有率の増加に伴い砂の強度特性から粘土の強度特性へと連続的に移行し、その境界は、今回の試料において、細粒分含有率 $F_c=35\%$ 付近であることが分かった。

Key words : intermediate soils, initial shear stress, cyclic strength, cyclic triaxial test, fine contents, plasticity index

1. まえがき

実地盤の耐震性の評価を行う際に、砂か粘土か明確に分類できない中間土と呼ばれる土に遭遇することがしばしばある。砂と粘土は、その破壊形態が大きく異なることが知られており、地盤工学においては砂と粘土に対してそれぞれ個別に、設計・施工の考え方が示されている。このような中で、砂か粘土かははっきりと区分できない、中間土も曖昧に分類がなされ、砂または粘土のいずれかの枠組みの中に組み入れられて設計される場合が多い。しかしながら、工学的な設計法は安全性・経済性が合理的に考慮されるべきであり、中間土に対しても砂あるいは粘土のいずれかに分類し、異なった設計法を強引に適用する方法は、経済性の面からみても合理的な設計法であるとは言い難い。中間土の非排水繰返しせん断特性について、これまでいくつかの研究がなされてきたが、これらの多くは砂と人工粘土の混合土¹⁾に対するものであった。本研究では、粒度調整した珪砂に海成粘土を混合して、連続的な粒度分布で種々の細粒分含有率からなる試料を作製し²⁾、一連の非

排水繰返し三軸試験を実施した。また、砂の破壊モードである液状化に対して、粘土の地震時の破壊を初期せん断応力下の繰返しせん断破壊³⁾と位置づけ、砂から粘土に至る中間土の両者に対する強度特性について調べることを目的とする。

2. 試料および試験方法

本研究で用いた試料は、粒度調整した珪砂に小野田港より採取した海成粘土（以下、小野田粘土）を乾燥重量比で混合したものである。珪砂と小野田粘土の混合比は 100:0, 95:5, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 30:70 および 0:100 の 8 種類である。供試体作製においては、珪砂と小野田粘土の混合比が 100:0, 95:5, 90:10 のものは、砂のみの相対密度を一定とし、水中落下により作製した。珪砂と小野田粘土の混合比が 80:20, 70:30, 60:40, 30:70, 0:100 のものは、圧密容器内で予備圧密圧力 50kPa を加えて作製した。各試料の物理的性質を表-1 に示す。なお、表中の比重 G_s は既知である珪砂と小野田粘土の比重から算出した

表-1 試料の物理的性質

小野田粘土 含有率 (%)	F_c (%)	C_c (%)	G_s	ρ_d (g/cm ³)	w_L (%)	w_P (%)	I_p
100	80	27.5	2.593	1.01	72.5	28.3	44.2
70	56	19.0	2.610	1.18	54.0	23.4	30.6
40	32	10.9	2.628	1.50	27.0	14.7	12.3
30	24	8.3	2.634	1.58	24.8	15.7	9.1
20	16	5.5	2.640	1.58	-	-	N.P.
10	8	2.8	2.646	1.74	-	-	N.P.
5	4	1.4	2.649	1.66	-	-	N.P.
0	0	0.0	2.652	1.58	-	-	N.P.

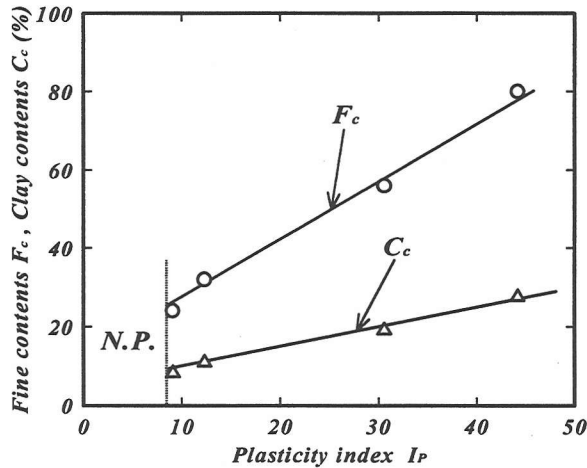


図-1 塑性指数と細粒分および粘土分含有率の関係

ものである。図-1 は試料の塑性指数 I_p と細粒分含有率 F_c および粘土分含有率 C_c の関係を示したものである。図から試料の細粒分含有率が 80% から 24% まで減少するとともに塑性指数は 44.2 から 9.1 までほぼ直線的に減少していることが分かる。また、粘土分含有率は 27.5% から 8.3% までほぼ直線的に減少している。これらのことから、本研究に用いた試料においては、細粒分含有率や粘土分含有率の変化が塑性指数の関係と一義的な対応関係にあるといえる。

実験は、空圧制御式繰返し三軸試験機を用い、各混合比の試料に対して平均有効主応力 $\sigma'_c = 100$, 200kPa 下で初期せん断応力比 $\sigma'_s/2\sigma'_c = 0, 0.4$ の条件で実施した。

3. 中間土試料の骨格構造

中間土の試料が飽和状態とした場合の土の組成は、図-2 の模式図に示す様に粗粒子 (2.0mm~0.074mm)、細粒子 (0.074mm 以下)、間隙水の 3 つに分類して考えられる。これら各々の体積を用いることにより、試料の間隙量は、間隙比 e 、骨格間隙比 e_s として定義することが可能となる。

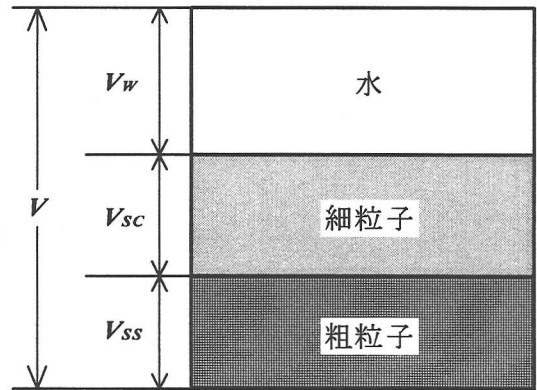


図-2 中間土の構造模式図

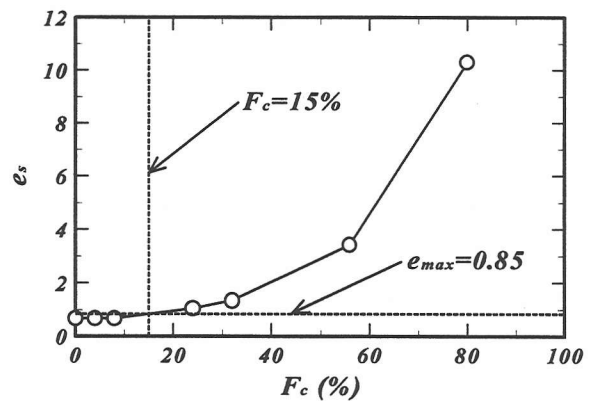


図-3 骨格間隙比と細粒分含有率の関係

間隙比 e は、土粒子の体積 (粗粒子 V_{ss} + 細粒子 V_{sc}) と間隙水の体積 V_w の比である式 (1) で算出される。

$$e = \frac{V_w}{V_{ss} + V_{sc}} \quad (1)$$

また、骨格間隙比 e_s は、細粒子の体積 V_{sc} も間隙の一部とみなし、粗粒子 (砂粒子) の体積 V_{ss} で除す式 (2) により算出される。

$$e_s = \frac{V_w + V_{sc}}{V_{ss}} \quad (2)$$

この式 (2) で示される骨格間隙比 e_s を用いることにより、粗粒子のみで形成される骨格の状況を把握することが可能になる。

図-3 は、式(2)を用いて算出された骨格間隙比 e_s と細粒分含有率 F_c の関係を示したものである。図中には参考のために、珪砂の最大間隙比 $e_{max}=0.85$ を併せて示している。図より、骨格間隙比 e_s は細粒分含有率 F_c が15%付近で珪砂の最大間隙比を越えることが分かる。このことから、細粒分含有率 F_c が15%より小さい範囲では、供試体の骨格は粗粒子である珪砂により形成され、細粒分が15%を越えるとその骨格は細粒分に支配されると考えられる。つまり、細粒分含有率 F_c が15%付近まで骨格は砂のみで形成され、細粒分は粗粒子に付着する形で存在する。細粒分含有率が15%付近に近づくと、砂で形成された骨格の間隙は細粒分で満たされ、15%を越えると粗粒子は細粒子が存在するために浮き上がり、粗粒子のみで骨格を形成することができなくなる。さらに細粒子が増加すると細粒子がマトリックスを形成し、粗粒子が散在する状態になる。

4. 非排水繰返しせん断挙動

図-4 は、非排水繰返し三軸試験より得られる軸ひずみと繰返し回数の関係から求めた繰返し回数 N を所定の破壊ひずみ ε_f に至るに必要な繰返し回数 N_f で正規化した正規化繰返し回数 N/N_f と軸ひずみ ε_{DA} および ε_p の関係を示したものである。なお、図(a)は初期せん断応力比 $\sigma_3/2\sigma_c'=0$ 、(b)は初期せん断応力比 $\sigma_3/2\sigma_c'=0.4$ の結果である。また、ここでは破壊ひずみを $\varepsilon_f=5\%$ と規定し、その破壊ひずみ $\varepsilon_f=5\%$ を発生するのに必要な繰返し回数を N_f とした。図(a)から、 $F_c=0,4,8\%$ の軸ひずみの発生形態と $F_c=16,24,32,56,80\%$ の形態では明らかに異なっていることが分かる。この軸ひずみの発生形態が変化する境界となる細粒分含有率は、珪砂のみで骨格を形成できる限界の細粒分含有率と一致しており、マトリックスが砂から粘土へと移行したことが原因と考えられる。 $F_c=0,4,8\%$ では、いずれの細粒分含有率においても N/N_f が0.95 付近までは、ほとんど軸ひずみの発生が認められないが、それ以降、急激な軸ひずみの発達が認められる。これはゆるい砂に特有の液状化による破壊形態を示すものである。これに対して、 $F_c=16,24,32,56,80\%$ では、軸ひずみが急激発生するのではなく徐々に発生する傾向を示す。また、 $F_c=0,4,8\%$ の場合と同様に、繰返しせん断の後半部分に軸ひずみが急増する変曲点が認められ、その変曲点の発生は、細粒分含有率の増加と共に大きな軸ひずみの値を示す傾向にある。図(b)から、 $F_c=8\%$ の試料は载荷初期に軸ひずみが大きく発生し、その増分

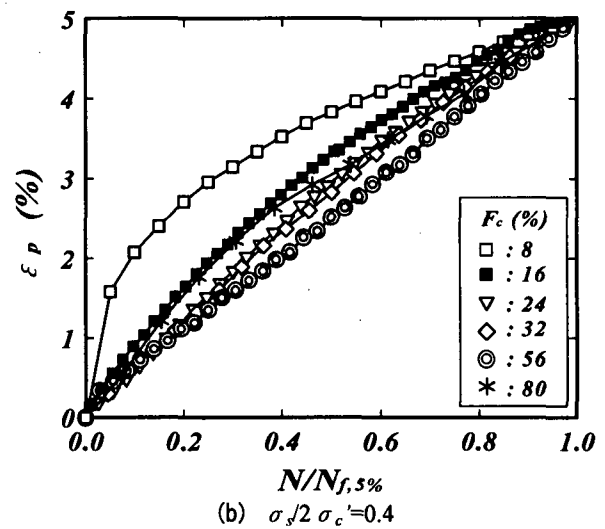
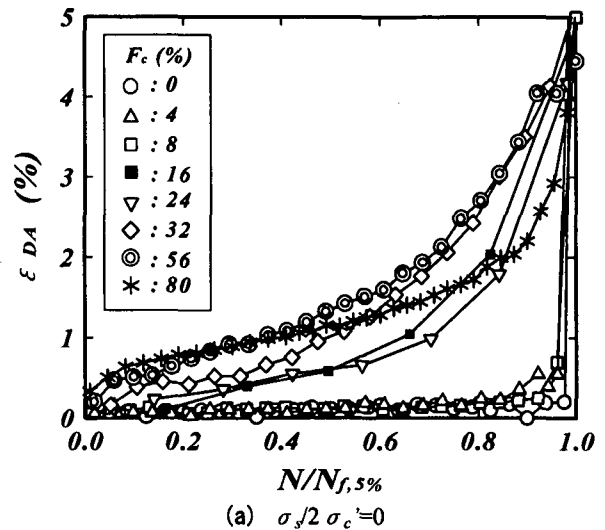
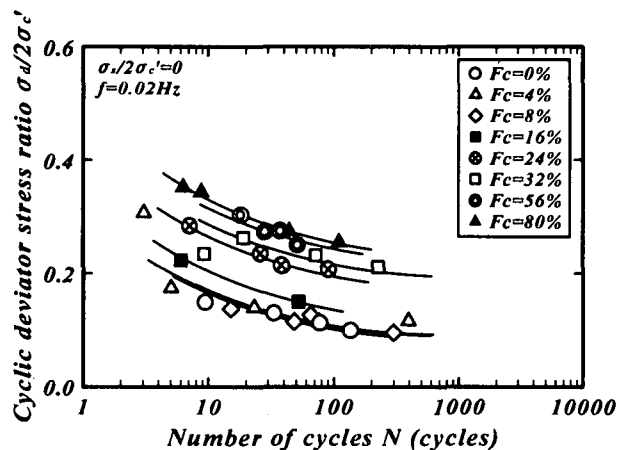


図-4 N/N_f と ε_{DA} , ε_p の関係

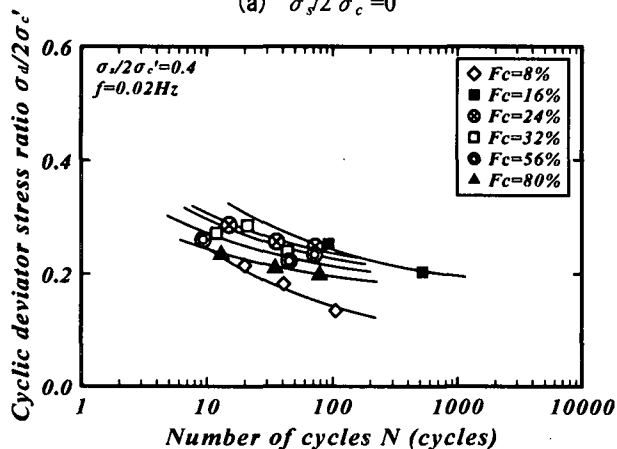
は繰返しせん断が進行するに伴い、減少していく。また、細粒分含有率の増加に伴い、1サイクルあたりの軸ひずみの発生増分が一定になる傾向へと移行していくことが分かる。

5. 非排水繰返しせん断強度

細粒分含有率の違いにより繰返しせん断強度がどのように変化するかを評価するために、破壊を規定するひずみを砂質土の液状化判定に用いられている ε_{DA} および $\varepsilon_p=5\%$ とした場合の繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係を図-5 に示す。図(a)は初期せん断応力比 $\sigma_3/2\sigma_c'=0$ 、図(b)は初期せん断応力比 $\sigma_3/2\sigma_c'=0.4$ の結果である。図(a)より、 $F_c=0,4,8\%$ の強度線にはほとんど差がなく、 $F_c=16,24,32,56,80\%$ では細粒分含有率の増加に伴い強度が増加することが分かる。それに対し、図(b) $\sigma_3/2\sigma_c'=0.4$ においては、細粒分含有率が最も少ない $F_c=8\%$ の強度が最も低い強



(a) $\sigma_d/2\sigma'_c=0$



(b) $\sigma_d/2\sigma'_c=0.4$

図-5 $\varepsilon=5\%$ に至るに必要な繰返し回数と繰返しせん断応力比の関係

度を示すが、 $F_c=16, 24, 32, 56, 80\%$ の強度は等方圧密下で実施した場合とは逆に、細粒分含有率の増加に伴い減少する傾向が認められる。

図-6は、細粒分含有率の違いが初期せん断応力下の土の繰返しせん断強度にどのような影響を与えるかを検討するために、繰返し回数 $N=20$ 回で破壊ひずみ ($\varepsilon_f = \varepsilon_p = 5\%$) に至るに必要な繰返しせん断応力比 $R_{(ANC)}$ を、等方圧密下 ($\sigma_d/2\sigma'_c=0$) の繰返し回数 $N=20$ 回で破壊ひずみ ($\varepsilon_f = \varepsilon_{DA} = 5\%$) に至るに必要な繰返しせん断応力比 $R_{(INC)}$ で正規化した繰返しせん断応力比 $R_{(ANC)}/R_{(INC)}$ と初期せん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ の関係を、細粒分含有率をパラメータとして示したものである。図より、 $F_c=8, 16, 24, 32\%$ では、初期せん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ の増加に伴い、正規化繰返しせん断応力比 $R_{(ANC)}/R_{(INC)}$ は増加することが認められる。これに対して、 $F_c=56, 80\%$ では、初期せん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ の増加に伴い、正規化繰返しせん断応力比 $R_{(ANC)}/R_{(INC)}$ は減少することが認められる。以上より、細粒分含有率の小さい範囲では、初期せん断応力が作用することにより強度が増加する中密および密詰めの砂質土の強度特性と類似するが、細粒分含有率の大きい範囲では、初期せん断応力が作用すること

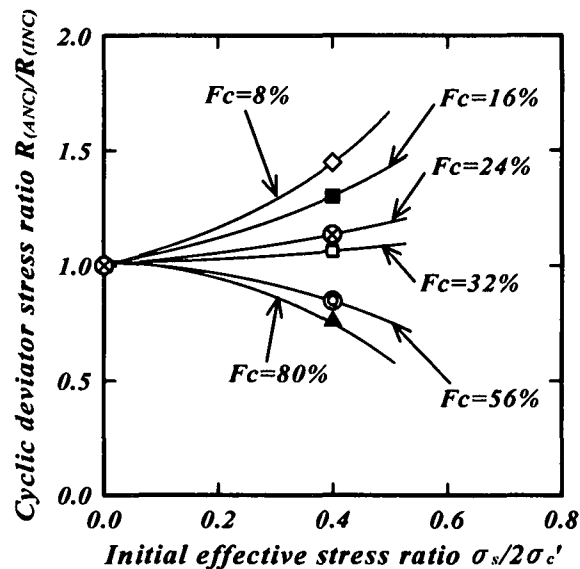


図-6 正規化繰返しせん断応力比と初期せん断応力比の関係

により強度が低下する粘性土の強度特性と類似する。つまり、細粒分含有率の増加に伴い砂の強度特性から粘土の強度特性へと連続的に移行していくと考えられる。そして、その境界は、今回の試料においては、細粒分含有率 $F_c=35\%$ 付近であると思われる。

6. まとめ

種々の細粒分含有率からなる室内配合の中間土試料を対象に、等方圧密下および初期せん断応力下で一連の試験を行った結果、以下の知見が得られた。

非排水繰返し三軸試験より得られた N/N_f と ε_{DA} 、 ε_p 関係において、等方圧密下と初期せん断応力下の軸ひずみの発生形態は $F_c=0\sim 8\%$ では砂の軸ひずみの発生形態と類似し、 $F_c=16\sim 80\%$ では粘性土の軸ひずみの発生形態と類似する。繰返しせん断強度は細粒分含有率の変化により初期せん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ の増加に伴い、繰返しせん断強度が増加する砂の強度特性から、減少する粘土の強度特性へと移行した。また、その境界は、今回の試料においては、細粒分含有率 $F_c=35\%$ 付近であった。

参考文献

- 1) 桑野二郎，高原健吾：細粒分を含む砂の液状化特性，地盤工学会誌，Vol.41，No.7，pp.23-28，1993。
- 2) 谷口聡一，兵動正幸：中間土の非排水せん断特性に及ぼす細粒分含有率の関係，第33回地盤工学研究発表会，Vol.2，pp.685-687，1998。
- 3) 兵動正幸：粘性土の動的性質 2. 粘性土の動的問題の分類，地盤工学会誌，Vol.46，No.6，pp.53-58，1998。