

砂・粘土・中間土の非排水単調及び 繰返しせん断特性

伊東周作¹・兵動正幸²・藤井照久³・山本陽一⁴・谷口聡一⁵

¹正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ(株) 関東支社水戸支店 (〒310-0022 茨城県水戸市梅香 2-2-45)

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

³正会員 工博 復建調査設計株式会社 (〒732-0052 広島県広島市光町 2-10-11)

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

⁵正会員 工修 清水建設株式会社 (〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目 2-3)

本研究は、種々の細粒分含有率からなる室内配合及び不攪乱試料を用いて、一連の単調及び繰返し試験を行ったものである。まず、細粒分含有率約 15% を境に砂粒子が骨格を成す領域と、細粒分がマトリックスを構成する領域の識別を行った。さらに細粒分が主体となる領域において、粘土分含有率 15% 付近で単調せん断挙動に顕著な違いが認められたので、これらの 3 つの領域において挙動の分類を行った。非排水せん断繰返し三軸試験もこれらの領域で顕著な違いが認められ、砂粒子が骨格を形成する試料では明確な液状化が観察されたのに対し、その他の 2 つの領域の試料は有効応力が完全には消失せず延性的な挙動を示した。また、細粒分が非活性の場合には液状化を起こすことが分かった。

Key Words : clay content, cyclic strength, cyclic triaxial test, fines, liquefaction, plasticity index, undisturbed sample

1. まえがき

地盤の沈下や安定性の評価あるいは液状化の可能性について検討する際、対象地盤の適切な土質定数を設定する必要があるが、多くの場合、対象地盤を砂地盤か粘土地盤のいずれかに区別して対応がなされている。しかし、実際の地盤には、砂、シルト、粘土が複雑に混入した状態もあり、砂か粘土に明確に区分できない土を対象とする場合もある。これらの土は、砂と粘土の中間的な性質を示すことから中間土¹⁾と呼ばれ、実務において、強度定数の設定や液状化の判定など、取り扱いに苦慮している現状にある。

中間土に関する研究は、これまで、粒度組成やコンシステンシー特性に着目し、単調及び繰返しせん断強度を明確にすることを目的に行われてきた。単調せん断挙動に関しては、倉田ら²⁾あるいは Georgiannou ら³⁾の混合試料を用いた一連の力学試験結果があげられる。倉田・藤下²⁾は、砂質土と粘性土の区分において、砂分 80% 以上を含む土を砂質土と定義しており、その定義は、港湾の施設の技術上の基準・同解説⁴⁾に取り入れられている。一方、中間土のせん断強度を一軸圧縮試験で評価する際、サンプリング時の応力解放の影響で強度が過小に評価されるため、妥当な原位置の強度を求めるための研究が行われてきた。中瀬ら⁵⁾

は、砂分を含む粘性土の一軸圧縮強度に対し、粘土分及び塑性指数の値に応じて補正する方法を提案した。これに対し、岡崎ら⁷⁾、田中ら⁸⁾は、一軸圧縮試験と一面せん断及び三軸圧縮試験さらに原位置試験などとの比較を行い、中間土に対する一軸圧縮試験の問題点を指摘し、より妥当な強度定数を求める方法について検討した。また中間土の粒子構造に着目した研究が、福江・大草⁹⁾、八尾・平田¹⁰⁾、大嶺・落合¹¹⁾により行われてきた。それらは土の骨格及びマトリックスの変化に対し、それぞれの応力分担特性を評価し、土全体の応力-ひずみ関係の推定を行うものであった。

新潟地震 (1964) 以来、主として粒子が純粋で堅固な粒子の砂の液状化が注目されてきたが、細粒分の多い土の液状化判定に関する問題は、千葉県東方沖地震 (1987)、ロマブリエタ地震 (1989)、北海道南西沖地震 (1993)、兵庫県南部地震 (1995) 等で明らかとなり、液状化判定基準に対する細粒分の影響が見直されてきた。中間土の繰返しせん断に関する研究は比較的多く、砂にシルトや粘土を混入した試料の液状化強度が求められ、細粒分や塑性の影響を評価した結果が報告されている^{12)~20)}。

古関・石原¹²⁾、戸張ら¹⁷⁾により、細粒分含有率と液状化強度の関係は、低塑性シルトを主体とする試料であれば、

表-1 室内配合試料の物理特性一覧

| 試料番号 | 三軸試験条件のタイプ | | 小野田粘土：珪砂混合比 | 作成方法 | 砂分 (%) | シルト分 (%) | 粘土分 (%) | 細粒分 (%) | w_L (%) | I_p | e | 骨格間隙比 e_s | 骨格の相対密度 $D_{rs}(s)^*$ | 記号 |
|-------|------------|-----|-------------|------|--------|----------|---------|---------|-----------|-------|------|-------------|-----------------------|----|
| | 単調 | 繰返し | | | | | | | | | | | | |
| FC-00 | ○ | ○ | 0:100 | 水中落下 | 100 | 0 | 0 | 0 | — | NP | 0.68 | 0.68 | 53 | ◎ |
| FC-04 | ○ | ○ | 5:95 | | 96 | 3 | 1 | 4 | — | NP | 0.59 | 0.66 | 58 | ○ |
| FC-08 | ○ | ○ | 10:90 | | 92 | 5 | 3 | 8 | — | NP | 0.51 | 0.64 | 64 | ▽ |
| FC-12 | ○ | — | 15:85 | | 88 | 7 | 5 | 12 | — | NP | 0.45 | 0.65 | 61 | ☆ |
| FC-16 | ○ | ○ | 20:80 | 予圧密 | 84 | 10 | 6 | 16 | — | NP | 0.56 | 0.87 | -5 | □ |
| FC-24 | ○ | ○ | 30:70 | | 76 | 16 | 8 | 24 | 25 | 9 | 0.55 | 1.04 | -58 | △ |
| FC-32 | ○ | ○ | 40:60 | | 68 | 21 | 11 | 32 | 27 | 12 | 0.59 | 1.33 | -147 | ◇ |
| FC-56 | ○ | ○ | 70:30 | | 44 | 37 | 19 | 56 | 54 | 31 | 0.91 | 3.32 | -758 | ▲ |
| FC-80 | ○ | ○ | 100:0 | | 20 | 52 | 28 | 80 | 73 | 44 | 1.23 | 9.86 | -2764 | ● |
| | | | | | | | | | | | | | | |

* 骨格の相対密度 D_{rs} は、 $e_s < e_{max} = 0.85$ の場合マイナスを示す。
 e_{max} は細粒分含有率 $F_c = 0\%$ 時の最大間隙比を示す。

細粒分の増加に伴い低下を示し、また高塑性な粘土が主体であれば、増加する傾向があることが示されている。

さらに、佐藤ら¹⁸⁾、桑野ら²¹⁾は、砂骨格構造の変化と液状化強度の関連性に着目し、骨格間隙比と砂のみの最大間隙比が一致する細粒分含有率において、繰返しせん断挙動が、砂から粘土的な挙動に変化することを示した。しかしながら、これらの研究においては再構成試料あるいは人工的に作製した試料が用いられており、自然状態の地盤との関連性については、さらに調べていく必要があると考えられる。特に、細粒分については粉末の人工粘土が混入されたものが多く、その結果全体の粒度分布も階段粒度となっている。

本研究では、細粒分の混入により砂から粘土へと力学特性が変化していく広範囲の土を中間土と呼び、その特性を明確にするために、室内配合試料と不攪乱試料を用いて、力学特性の違いに基づいたタイプ分けを試みた。対象とした試料のうち、不攪乱試料は、砂から粘土に至る粒度及びコンシステンシー特性の異なる試料を対象とした。一方、室内配合試料は、自然状態に近い試料を準備するため、海成粘土と珪砂を混合した試料を作製し、連続的な粒度分布となるようにした。このように、自然状態の試料でありながら物理特性等の対比が難しい不攪乱試料と、人工的な試料であるが再現性の高い室内配合試料を用いることにより、砂から粘土に至る広い範囲の土の力学特性を明確にできると考えた。供試体の作製は、混合比に応じて砂分が骨格を成す状態では水中落下法により、また細粒分がマトリックスを構成する場合には、試料圧密容器における予圧密法により行った。これらの試料に対し、まず砂粒子骨格に着目した骨格間隙比と細粒分の関係から、砂の特性が顕著な領域と細粒分の性質がより顕著に現れる領域の区分を行った。次に、骨格構造による区分をもとに、物理特性に基づき単調及び繰返しせん断特性の区分を行い、物理特性と繰返しせん断特性の関連性について考察を行った。

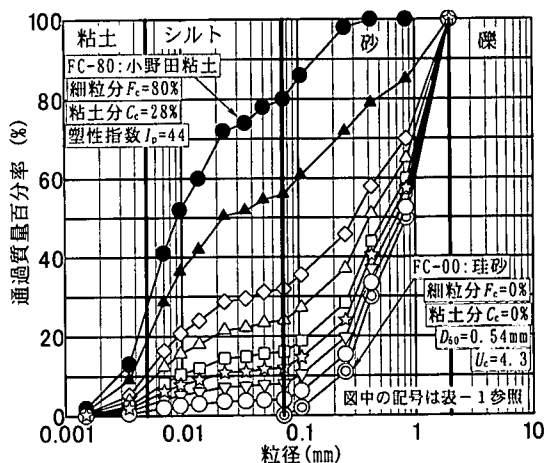


図-1 室内配合試料の粒径加積曲線

2. 試料及び試験方法

実験に用いた試料は、人工的に作製した室内配合試料と不攪乱試料である。室内配合試料は、粒度調整した珪砂と山口県小野田港で採取した海成粘土（小野田粘土）を所定の乾燥重量比で混合して作製した。図-1に、粒度調整した珪砂と小野田粘土の粒径加積曲線をそれぞれ示した。小野田粘土は、砂分含有率20%、シルト含有率52%、粘土分含有率28%であり、塑性指数 $I_p = 44$ を示した。一方、珪砂は、平均粒径 $D_{50} = 0.84\text{mm}$ 、均等係数 $U_c = 4.3$ であった。これより、小野田粘土は少量の砂分を含みやや活性の強い粘土であり、珪砂は均等な粒度組成を示す砂質土であると考えられる。

室内配合試料としては、小野田粘土と珪砂の混合比に応じて10種類の試料を作製した。各試料の粒径加積曲線を図-1に示した。これらの試料の混合比及び物理特性は表-1

表-2 不攪乱試料の物理特性一覧

| 試料番号 | 三軸試験条件 のタイプ | | 深度 GL-(m) | N値 | σ_v (kPa) | D_r (%) * | ρ_s (g/cm ³) | 砂分 (%) | シルト 分 (%) | 粘土 分 (%) | 細粒 分 (%) | w_L (%) | I_p | D_{50} (mm) | e | 骨格間 隙比 e_s | 記号 | |
|------|----------------|-----|--------------|-------------|---------------------|-------------|----------------------------------|-----------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------|---------------|-------|-----------------|-------|---|
| | 単調 | 繰返し | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | A1-1 | — | ○ | 3.00~3.85 | 9 | 26.0 | 64 | 2.704 | 92 | 8 | 0 | 8 | — | NP | 0.192 | 0.73 | 0.88 | ◎ |
| | A1-2 | — | ○ | 5.00~6.75 | 11 | 45.0 | 65 | 2.681 | 72 | 24 | 4 | 28 | — | NP | 0.117 | 1.02 | 1.81 | ○ |
| | A1-3 | — | ○ | 8.00~9.50 | 10 | 66.0 | 57 | 2.624 | 48 | 46 | 6 | 52 | — | NP | 0.072 | 1.19 | 3.57 | ▽ |
| | A1-4 | ○ | — | 11.00~11.80 | 1 | 80.0 | — | 2.571 | 10 | 66 | 24 | 90 | 71 | 35 | 0.022 | 1.81 | 27.07 | ◆ |
| | A1-5 | ○ | ○ | 14.00~14.80 | 2 | 98.0 | — | 2.595 | 16 | 70 | 14 | 84 | 56 | 22 | 0.037 | 1.41 | 14.06 | △ |
| | A1-6 | ○ | ○ | 17.00~17.80 | 1 | 116.0 | — | 2.642 | 21 | 50 | 29 | 79 | 81 | 47 | 0.019 | 1.84 | 12.54 | ▼ |
| B | B1-1 | — | ○ | 15.00~15.70 | 1 | 163.0 | — | 2.712 | 41 | 47 | 12 | 59 | 40 | 7 | 0.060 | 1.12 | 4.18 | □ |
| | B1-2 | ○ | ○ | 17.00~17.80 | 1 | 144.0 | — | 2.703 | 38 | 50 | 12 | 62 | 43 | 9 | 0.055 | 1.22 | 4.85 | ◇ |

*相対密度 D_r は、式(4)で求めたもの

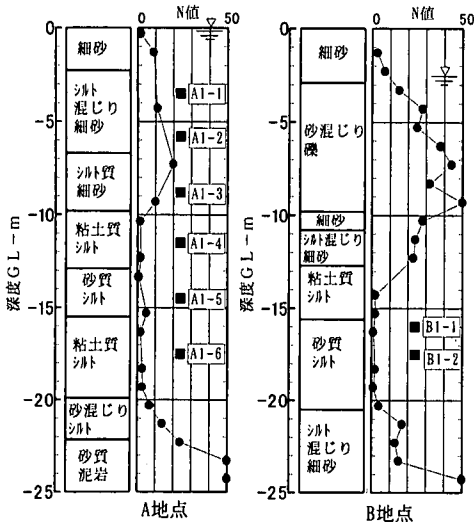


図-2 不攪乱試料採取地点地盤状況図

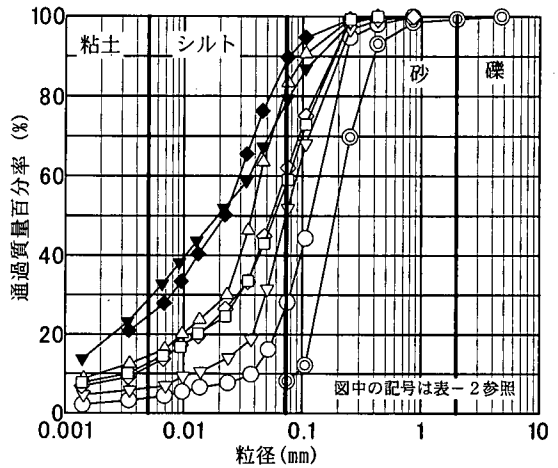


図-3 不攪乱試料の粒径加積曲線

に掲げており、表中のそれぞれの試料番号は各試料の細粒分含有率の値とした。ここに示す細粒分含有率は、小野田粘土そのものに含まれる約 20%の砂分の影響を考慮したものである。なお、試料番号 FC-00 は珪砂、FC-80 は小野田粘土に相当する。

一方、不攪乱試料は図-2 に示す A、B の 2 地点の各深さから、シンウォールサンプラー及びトリプルチューブサンプラーで採取した試料を用いた。これらの試料の物理特性は表-2 に、粒径加積曲線を図-3 に示した。対象とした試料の堆積年代は、1 万年以降の完新統であった。

室内配合試料において、細粒分を多く含む試料の供試体は予圧密法で作製したが、細粒分含有率が 16% 付近以下になると供試体の自立が困難となり、水中落下法で初期密度を調整する方法をとった。一方、水中落下法においては、細粒分含有率が 12% 付近以上になると、砂粒子の骨格が失われ始め初期密度の調整が困難となった。このように、供試体は細粒分含有率の違いにより異なる 2 つの方法で作製

したが、同じ細粒分含有率の試料に対し異なる作製法で行うことはできなかった。

水中落下法による供試体作製は、表-1 に示す細粒分含有率 12% 以下の 4 つの混合比に対して行った。まず、気乾状態の珪砂と小野田粘土を所定の乾燥重量比で混合し、脱気水を満たした後、脱気槽に 24 時間放置した。次に、モールド内に脱気水を 2cm 程度張り、スプーンで 5 杯程度の試料をゆっくりと分離しないように水中落下させた後、モールドの側方を均等に木づちで 6 回程度軽く叩く方法を繰返し行った。なお、珪砂の乾燥重量比を一定にすることで、珪砂のみの骨格間隙比が相対密度 50% となるよう密度調整を行った。さらに、供試体の上、中、下の細粒分含有率を調べた結果、ほとんど差のないことを確認した。

予圧密法は、表-1 に示す細粒分含有率 16% 以上の 6 種類の乾燥重量比となるよう、小野田粘土と珪砂を混合した試料に対して行った。試料作製においては、まず含水比が液性限界の 2 倍程度になるように調整した小野田粘土と珪

砂を、所定の乾燥重量比で均一になるよう混ぜた。次に、予圧密装置のセル壁にシリコン離型剤を塗布し、気泡ができないようにゆっくりと試料を投入した。さらに、鉛直圧密圧力を $\sigma'_{vc}=10, 20\text{kPa}$ とそれぞれ 1 日ずつ段階的に載荷した後、 $\sigma'_{vc}=50\text{kPa}$ で 2 週間圧密を行い、圧密の終了は 3t 法で確認した。

本研究では、これらの試料に対し、非排水単調及び繰返し三軸試験を行った。供試体はいずれも高さ 10cm、直径 5cm の円柱供試体であり、予圧密供試体の上下端には、ろ紙、テフロンシート、ポーラスストーンを取り付け、また側面には圧密促進のためにペーパードレーンを巻き付けた。圧密は、所定の圧密圧力まで段階的に等方圧を漸増して行い、最終荷重段階では 24 時間圧密を行った。なお、圧密圧力 σ'_c は、単調せん断試験においては強度定数を求めるために正規圧密状態の 3 種類で、また繰返しせん断試験では室内配合試料で $\sigma'_c=100, 200\text{kPa}$ 、不攪乱試料については現場の有効上載圧にほぼ等しい値とした。単調せん断試験は、軸ひずみ速度 0.1%/min で軸ひずみ 15% に至るまで行った。一方、繰返しせん断試験は、側圧一定、荷重振幅一定のもと、0.02Hz の正弦波荷重で載荷することにより行った。

3. 試料の物理特性と骨格構造

(1) 物理特性の相関性

実験に用いた室内配合試料及び不攪乱試料の物理特性を把握する目的で、図-4 に粘土含有率 C_c と細粒含有率 F_c の関係、図-5 に粘土含有率 C_c と塑性指数 I_p の関係を示した。なお、図中比較のために、関東地方の数地点における沖積地盤のデータも併せて示した。図-4 及び図-5 における室内配合試料及び不攪乱試料の分布は、沖積地盤のデータの分布と概ね一致しており、一般的な土の分布範囲内にあると判断される。図-4 における粘土含有率 C_c と細粒含有率 F_c の関係は、室内配合試料においては直線的な対応がみられるが、不攪乱試料においては若干不連続な関係が認められる。これは、不攪乱試料においては、それぞれに含まれる細粒土の種類が異なるのに対し、室内配合試料では同じ試料の混合により作製したためである。一方、図-5 における塑性指数 I_p と粘土含有率 C_c の関係は、概ね良好な対応が認められている。

(2) 試料の骨格構造

試料が飽和状態とした場合の土の組成は、図-6 の模式図に示す様に砂粒子骨格を形成する粗粒子、細粒子、水の 3 つに区分して考えられる¹¹⁾。そして、これらの体積比から空隙比 e 、骨格空隙比 e_s 、骨格の相対密度 D_{rs} を定義し、砂骨格の形成する領域を明確にするための空隙量の評価と

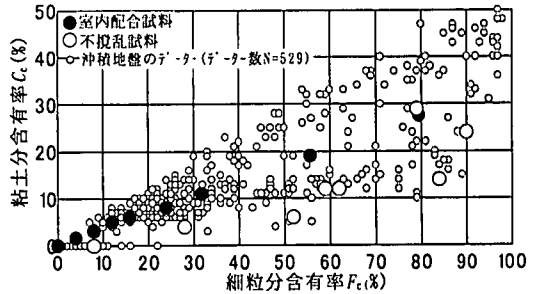


図-4 細粒含有率と粘土含有率の関係

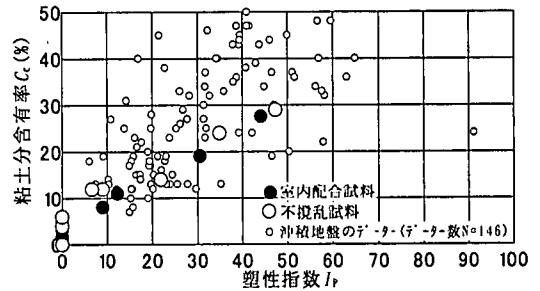


図-5 塑性指数と粘土含有率の関係

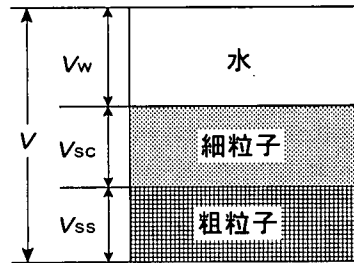


図-6 中間土の構造模式図

して用いた。

空隙比 e は固体部の体積 V_{ss} と V_{sc} の和と空隙部の体積 V_w の比により求められる。

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

次に、骨格空隙比 e_s は、細粒子の体積 V_{sc} も空隙とみなし、砂粒子骨格の体積 V_{ss} で除した次式で定義される。

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

さらに、骨格の相対密度 D_{rs} は式(2)で定義した骨格空隙比 e_s 、粗粒子のみの試料における最大空隙比 e_{max} 、最小空隙比 e_{min} を用いて次式で求められる。

$$D_{rs} = \frac{e_{max} - e_s}{e_{max} - e_{min}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

ここで、細粒分が多くなり骨格空隙比 e_s が最大空隙比

e_{max} 以上になった場合、骨格の相対密度 D_{rs} はマイナスの値を示し、粒子骨格を形成していた砂粒子が細粒分中に分離した状態に移行したと判断される。

水中落下法で作製した FC-00~FC-12 の試料は、骨格の相対密度 $D_{rs}=50\%$ 、骨格間隙比 $e_s=0.68$ に統一し、一定の体積の珪砂 V_s に対し、小野田粘土の体積 V_c 、水の体積 V_w を変化させて作製した。しかしながら、小野田粘土中にも約 20% の砂分を含んでおり、この砂分を考慮すると表-1 に示すように骨格間隙比 $e_s=0.65\sim 0.68$ となる。一方、骨格の相対密度 D_{rs} は、珪砂の最大間隙比 e_{max} 、最小間隙比 e_{min} を用いて求めており、骨格の相対密度 D_{rs} は 53~61% となった。図-7 は室内配合試料に対する骨格間隙比 e_s と細粒分含有率 F_c との関係を示したものである。図中には珪砂の最大間隙比 $e_{max}=0.85$ を太線で示した。同図より、FC-00~FC-12 の骨格間隙比 e_s は、珪砂の最大間隙比 $e_{max}=0.85$ 以下であることが認められる。このことより、FC-00~FC-12 は砂主体で粗粒子が骨格を形成していると判断される。

一方、予圧密による FC-16~FC-80 は、表-1 に示す珪砂と小野田粘土の乾燥重量比で作製した。これらの骨格間隙比 e_s は細粒分含有率 F_c の増加に伴い大きくなっており、珪砂の最大間隙比 $e_{max}=0.85$ より大きな値を示している。このことから、FC-16~FC-80 の試料は細粒土主体であると考えられる。また、図-7 から室内配合試料では、骨格間隙比 e_s が珪砂の最大間隙比 $e_{max}=0.85$ と交わる細粒分含有率 F_c は 15% 程度であることが認められる。このことから、細粒分含有率 F_c が 15% 程度以下では砂粒子が骨格を形成しているが、15% 程度を上回ると砂粒子の骨格が失われ始めると考えられる。

また、室内配合試料と同様な方法で求めた不攪乱試料の間隙比 e と骨格間隙比 e_s を表-2 に示し、図-8 に不攪乱試料に対する骨格間隙比 e_s と細粒分含有率 F_c の関係を表した。ちなみに、後述する繰返しせん断挙動から砂質土と判断される A1-1, A1-2, A1-3 に対し、 N 値、有効上載圧 σ'_v (kPa) から、相対密度 D_r を次式で求め、表-2 に示した。得られた相対密度 D_r は 57~65% 程度であった。

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{100N}{\sigma'_v + 70}} \times 100(\%) \quad (4)$$

4. 単調せん断特性

(1) 単調せん断特性の分類

図-9(a), (b) に、室内配合試料の単調せん断試験による有効応力経路、軸差応力 q ・軸ひずみ ϵ_s 関係を示した。また、図-10(a), (b) には、不攪乱試料 A1-4, A1-5, A1-6 及び B1-2 の同様の結果を掲げた。これらの関係から、単調せん断特性は図-11 に示す 3 タイプに分類できると考えた。

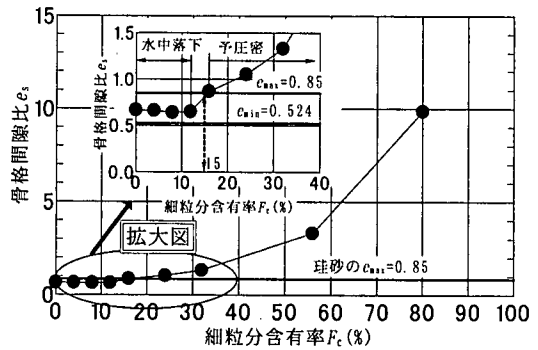


図-7 室内配合試料の細粒分含有率と骨格間隙比の関係

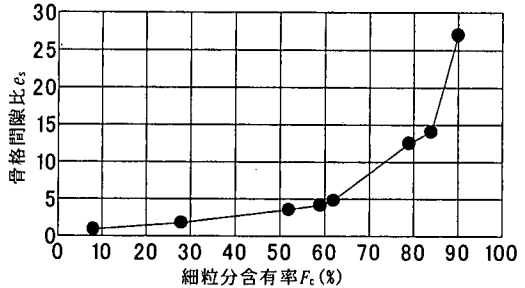
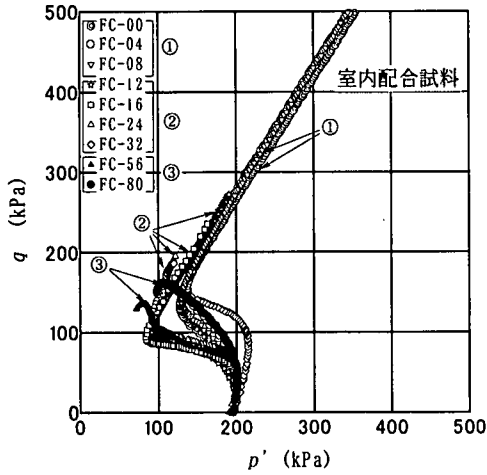


図-8 不攪乱試料の細粒分含有率と骨格間隙比の関係

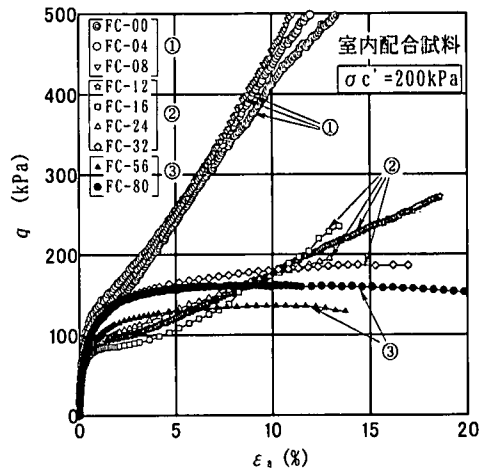
同図のような挙動の違いは、密度、物理特性及び応力レベルの違いにより現れると考えられるが、ここでは中程度の密度を示す砂質土、中間土、粘性土を対象としたものである。まず、タイプ①に区分されるものは、室内配合試料 FC-00~FC-08 であり、これに区分される不攪乱試料は得られていない。このタイプは、有効応力経路がせん断初期に収縮挙動を示すが、変相点に達した後膨張挙動に転じ、その後ダイレンタンスーにより大きな強度となる傾向を有する。また、軸差応力 q ・軸ひずみ ϵ_s 関係は、軸差応力が軸ひずみの発達と共に常に増加するひずみ硬化挙動を示し、特に変相点付近よりその傾向が顕著となっている。

次に、タイプ②に区分されるものは、室内配合試料 FC-12~FC-32 と不攪乱試料 A1-5, B1-2 である。有効応力経路はせん断時、主として収縮挙動を示し、変相点に達した後わずかに膨張挙動を示すが、初期拘束圧より大きくなならない。一方、軸差応力 q ・軸ひずみ ϵ_s 関係より、軸差応力は変相点付近まで急増し、その後ひずみの発達と共にだだらかに増加する傾向を示している。

最後に、タイプ③に区分されるものは、室内配合試料 FC-56~FC-80 と不攪乱試料 A1-4, A1-6 である。有効応力経路はせん断中終始収縮挙動を示し、タイプ①、②のように膨張に転じる挙動はみられず、限界応力状態に至っている。また、軸差応力 q ・軸ひずみ ϵ_s 関係より、軸差応力は急増しピークを示した後、若干の軟化挙動を示している。

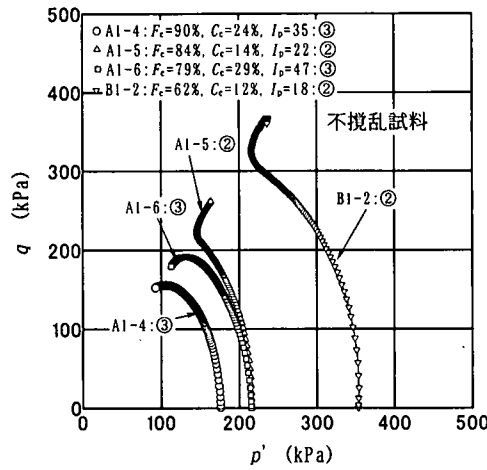


(a) 有効応力経路

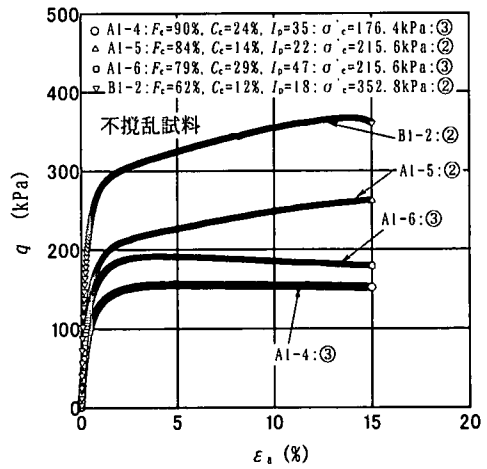


(b) 軸差応力・軸ひずみ関係

図-9 室内混合試料の単調せん断試験結果



(a) 有効応力経路



(b) 軸差応力・軸ひずみ関係

図-10 不攪乱試料の単調せん断試験結果

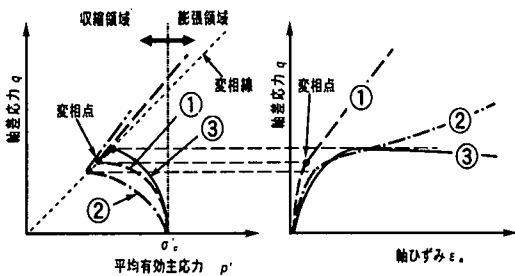


図-11 単調せん断の概念図

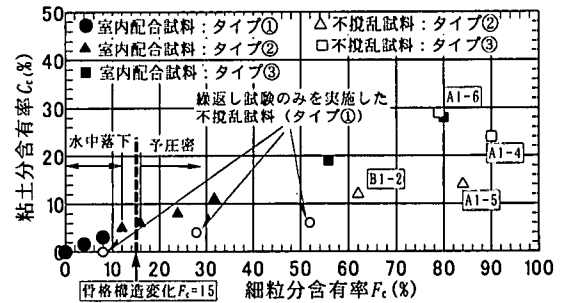


図-12 単調せん断特性と物理特性の関係

(2) 単調せん断強度特性と物理特性の関係

図-12 に、タイプ①～③に区分した試料の粘土含有率 C_c と細粒含有率 F_c の関係を示した。図中に、室内配合試料で骨格間隙比 e_s が珪砂の最大間隙比 e_{max} 以上となり、骨格の相対密度 D_r がマイナスとなった細粒含有率 $F_c = 15\%$ の部分を破線で示した。この図より、単調せん断特性と物理特性の関連性について調べるとともに、骨格構造の関係についても考察した。室内配合試料では、タイプ①の細粒含有率 F_c は8%以下、粘土含有率 C_c は5%以下であり、砂主体の骨格構造を示す領域に分布している。

次に、タイプ②の室内配合試料の細粒含有率 F_c は12～32%、粘土含有率 C_c は5～11%を示し、骨格構造の変化すると考えられる細粒含有率 $F_c = 15\%$ 付近でタイプ①と境界をなしている。これより、タイプ②に区分される試料は細粒土がマトリックスを形成し、支配的なせん断特性を示していると考えられる。一方、不攪乱試料 A1-5, B1-2 は、細粒含有率 F_c が62～84%、粘土含有率 C_c が12～14%であり、室内配合試料の分布範囲と一致していない。しかし、室内配合試料と不攪乱試料の粘土含有率 C_c は5～15%付近に分布し、両者の粘土含有率は概ね一致している。

さらに、タイプ③の細粒含有率 F_c は56～90%、粘土含有率 C_c は19～28%を示し、タイプ②とは粘土含有率 C_c が15%付近を境に区分される傾向が認められる。

5. 非排水繰返しせん断特性

(1) 有効応力経路、軸差応力・軸ひずみ関係

繰返しせん断挙動についても、前述の単調せん断挙動から区分したタイプ①、②、③の試料に対して比較を行った。図-13、図-14、図-15 にそれぞれのタイプの有効応力経路及び軸差応力 q ・軸ひずみ ϵ_s 関係を示している。これらの図には、単調せん断試験より得られた破壊線及び変相線を示した。有効応力経路は、破壊線を越えた結果となっているが、これは断面積補正を行っていないためと考えられる。室内配合試料は、タイプ①として FC-08、タイプ②として FC-32、タイプ③として FC-56 を掲げ、また不攪乱試料は、タイプ②として A1-5、タイプ③として A1-6 をそれぞれ掲げた。なお、不攪乱試料 A1-1, A1-2, A1-3 については、単調せん断試験を行わず、繰返しせん断試験のみを実施した。これらの試料の粘土含有率 C_c と細粒含有率 F_c の関係は図-12 に示している。物性による分類では、A1-1, A1-2 はタイプ①、A1-3 はタイプ②に属するものであるが、繰返しせん断挙動の観察から以下に述べるように、タイプ①に属するものとした。

図-13(a)～(d) に示したタイプ①においては、繰返し載荷に伴い有効応力が減少し、最終的に0に達し、液状化

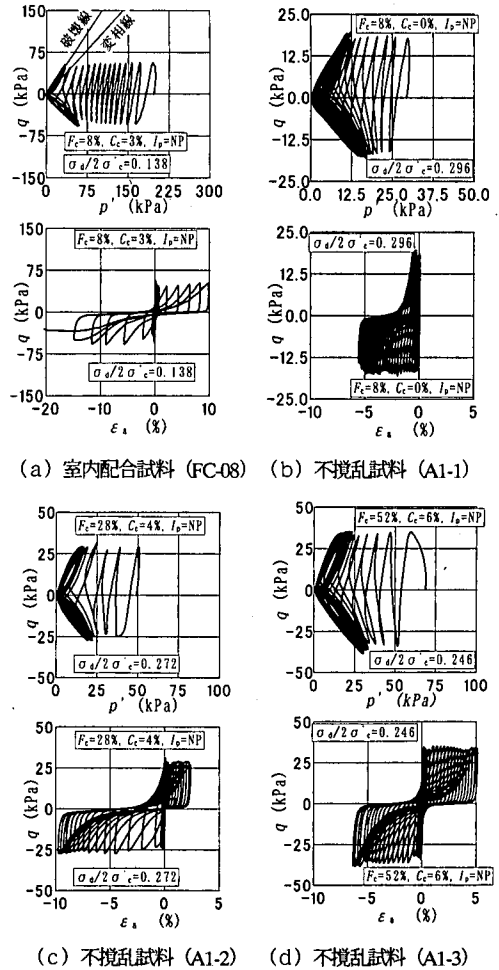
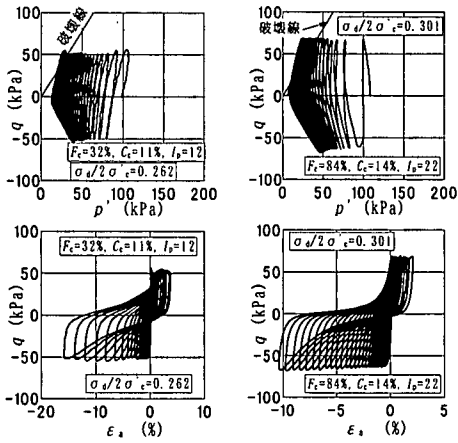


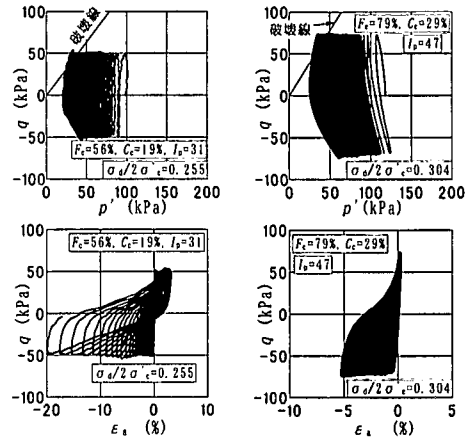
図-13 有効応力経路及び応力・ひずみの関係(タイプ①)

に至っていることが認められる。軸差応力 q ・軸ひずみ ϵ_s 関係において、ある繰返し回数から、軸ひずみの急増がみられ、有効応力0を通過する付近で剛性が消失している様子が認められる。不攪乱試料において、細粒分を多く含む試料も液状化を起こしたのは、細粒分が母材の粉碎あるいは非活性シルトで構成していたためであると考えられる。後述するが、この試料の塑性指数はNPであった。

図-14(a), (b) に示したタイプ②では、繰返し載荷に伴い有効応力の減少がみられるが、最終的に0には至っていない。また、軸差応力 q ・軸ひずみ ϵ_s 関係もそれに対応して最終的に若干の剛性を残しながら徐々にひずみが発達していく傾向を示している。次に、図-15 (a), (b) に示したタイプ③においては、繰返し載荷に伴い有効応力が減少する傾向が認められるが、タイプ②に比べて最終的に大きな有効応力を残している。なお、軸差応力 q ・軸ひずみ ϵ_s 関係は、タイプ②と同様に、徐々にひずみが発達し、比較的大きな剛性を残したループ形状を示している。タイプ②とタイプ③の挙動は、明確に区分できる変化がみられず、



(a) 室内配合試料 (FC-32) (b) 不攪乱試料 (A1-5)
 図-14 有効応力経路及び応力・ひずみの関係 (タイプ②)



(a) 室内配合試料 (FC-56) (b) 不攪乱試料 (A1-6)
 図-15 有効応力経路及び応力・ひずみの関係 (タイプ③)

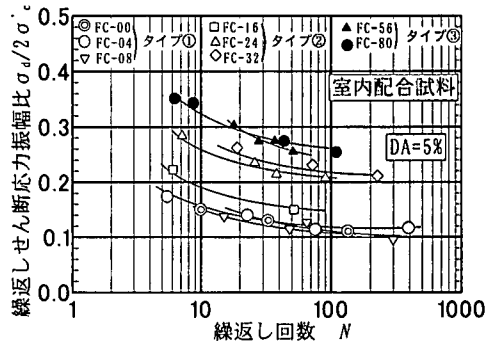
物理特性の変化により継続的に移行していると考えられる。

(2) 繰返しせん断強度特性

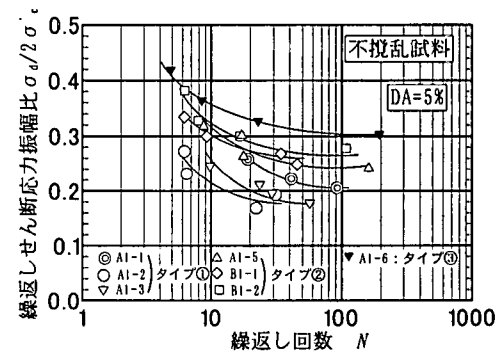
図-16 (a), (b)に、室内配合試料及び不攪乱試料に対し、軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ に至るに必要な繰返しせん断応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ と繰返し回数 N の関係を示した。室内配合試料及び不攪乱試料の繰返しせん断強度は、タイプ①, ②, ③の順で高い値となっている。次に、繰返しせん断強度と物理特性の関連を調べる目的で、細粒含有率 F_c 、粘土含有率 C_c 及び塑性指数 I_p と繰返し回数 $N=20$ 回で軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ に至るに必要な繰返しせん断強度 ($\sigma_d/2\sigma'_c$) $N=20$ 関係をそれぞれ図-17, 図-18, 図-19 に示した。さらに、繰返しせん断特性と物理特性の関係を調べる目的で、図-20 に示す粘土含有率 C_c と細粒含有率 F_c の関係に、タイプ①, ②, ③の分布範囲を示した。

図-17において室内配合試料では、タイプ①が0.15程度、タイプ②が0.15~0.25程度、タイプ③が0.30程度の繰返しせん断強度をそれぞれ示し、全体として繰返しせん断強度は細粒含有率 F_c の増加に伴い増加する傾向が認められる。一方、不攪乱試料においては、タイプ①が細粒含有率 $F_c=0\sim50\%$ の範囲で0.20から0.25に分布し、タイプ②と③が細粒含有率 $F_c=60\sim85\%$ の範囲で0.27~0.32程度を示している。このように、不攪乱試料ではタイプ別の区分が明確ではない。

一方、図-18においては、室内配合試料と不攪乱試料ともに粘土含有率 C_c は、タイプ①が5%以下、タイプ②が5~15%、タイプ③が15%以上の範囲に区分されている。図-20におけるタイプ①, ②, ③の分布は、細粒含有率 F_c に対しては明確でないが、粘土含有率 C_c に対しては比較的明確に区分されている。タイプ①の室内配合試料に



(a) 室内配合試料



(b) 不攪乱試料

図-16 繰返しせん断応力振幅比と繰返し回数の関係 (軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$)

おける繰返しせん断強度は、細粒分がスラリー状であり、その強度が低いため、粘土含有率 C_c による違いが認められない。一方、タイプ①の不攪乱試料での強度は、粘土含有率 C_c の増加に伴い低下しており、これは粗粒子骨

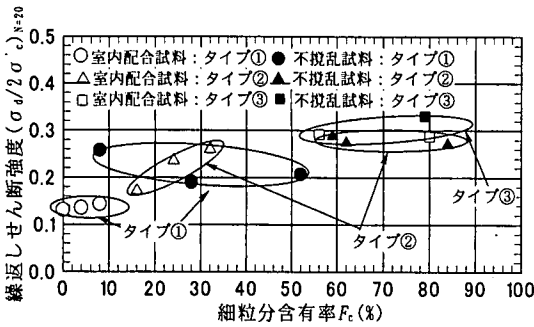


図-17 繰返しせん断強度と細粒含有率の関係

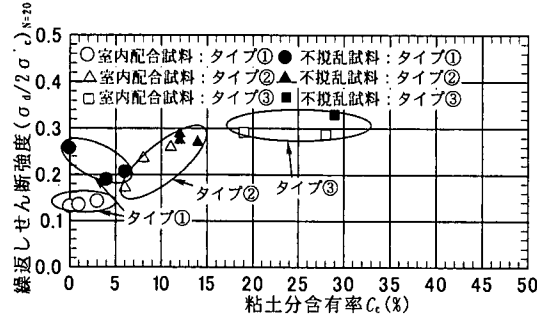


図-18 繰返しせん断強度と粘土含有率の関係

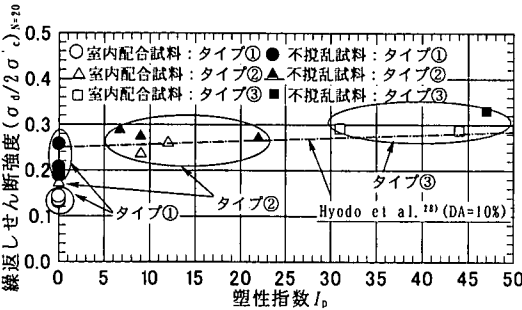


図-19 繰返しせん断強度と塑性指数の関係

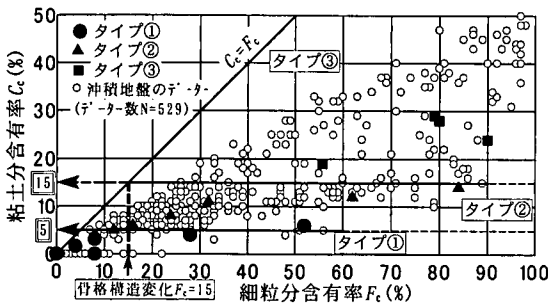
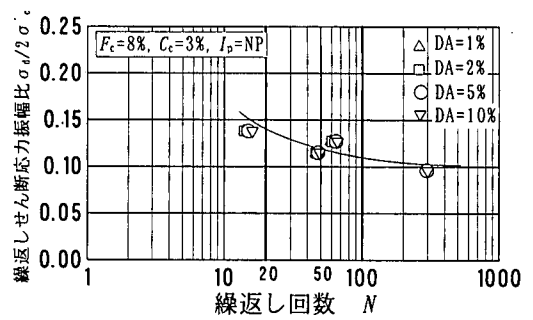


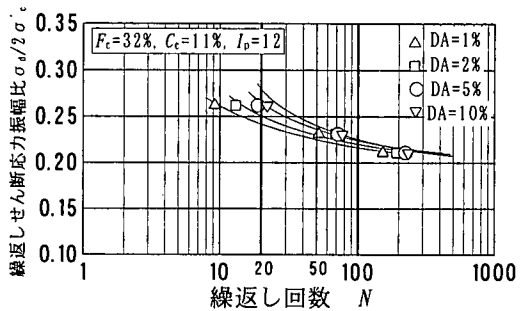
図-20 繰返しせん断特性と物理特性の関係

格内の細粒分が増えたことによるものと考えられる。

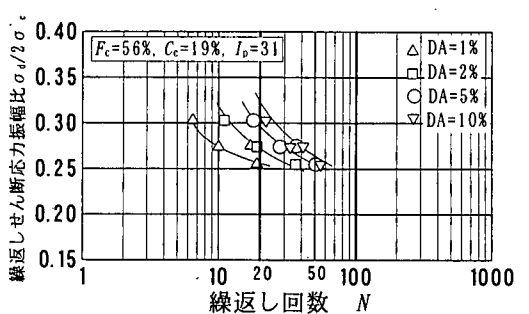
図-19において塑性指数 I_p は、タイプ①がNP、タイプ②がNP~25、タイプ③が25以上を示している。図中に示



(a) タイプ① (FC-08)



(b) タイプ② (FC-32)



(c) タイプ③ (FC-56)

図-21 繰返しせん断応力振幅比と繰返し回数
の関係 (室内配合試料)

す繰返しせん断強度 $\sigma_d/2\sigma'_c$ は、塑性指数 I_p の増加に対し漸増しており、この傾向は第2著者ら²⁹⁾を含め、同様な結果が示されている。

骨格及び細粒分の変化に着目した繰返しせん断強度特性は、粘土分含有率 C_c 及び塑性指数 I_p との相関性が高いことが改めて認められた。まず、粘土分含有率 C_c との関係では、砂質土から粘性土に至る強度分布の連続的な変化を再確認することができた。一方、塑性指数 I_p との関係では、活性を持つ土に対しては有効であると判断される。設計基準に示す液状化判定の必要な土層は、道路橋示方書²⁹⁾では塑性指数 I_p が15以下とし、建築基礎構造設計指針³⁰⁾では粘土分含有率 C_c が10%以下、または塑性指数 I_p が15以

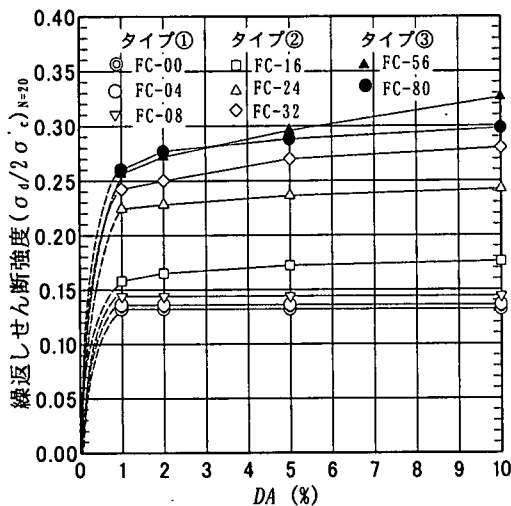


図-2-2 繰返し回数 $N=20$ 回における繰返しせん断応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ と軸ひずみ両振幅 DA の関係

下としている。この範囲は、図-18、図-19及び図-20によるタイプ①と②の分布範囲と概ね一致していると考えられる。これより、設計基準での液状化判定は、タイプ②のような土までを液状化の対象としてしていると考えられる。

(3) ひずみの発達と繰返しせん断強度の関係

図-21(a), (b), (c)に、室内配合試料のタイプ①, ②, ③の代表的な試料において、軸ひずみ両振幅 $DA=1, 2, 5, 10\%$ に至る繰返しせん断応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ と繰返し回数 N の関係を示した。タイプ①においては $DA=1\%$ 程度で液状化状態となり、 $DA=1\%$ から 10% まではほぼ瞬時にひずみが発達しており、繰返しせん断応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ は、液状化を定義するひずみ振幅による違いがみられない。これは液状化によりひずみが急増したためであると考えられる。これに対し、タイプ②及びタイプ③の繰返しせん断応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ は DA の増加に対し、増加する傾向を示している。

図-22は、 $DA=1, 2, 5, 10\%$ における繰返し回数 $N=20$ 時の繰返しせん断強度 $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{N=20}$ と DA の関係を示したものである。これより、繰返しせん断強度 $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{N=20}$ は、タイプ①では $DA=1\%$ 以上では一定値を示しているが、タイプ②とタイプ③では DA の増加に対する強度の増加傾向が認められる。また、繰返しせん断強度は、タイプ①, ②, ③の順で高くなっている。これより、タイプ①では液状化による急速なひずみの発達を伴う液状化破壊が生じるのに対し、タイプ②, ③ではひずみの発達に対してある程度の抵抗を示すことが推察される。

6. まとめ

本研究は、地盤の物理特性と非排水単調及び繰返しせん断特性の関係を明確にする目的で、室内配合試料と不攪乱試料を用いて、一連の単調及び繰返しせん断試験を行ったものである。本研究により得られた知見をまとめると以下のようなになる。

- 1) 細粒分含有率 F_c の増加に伴う骨格構造の変化について、骨格間隙比 e_s と細粒分含有率 F_c の関係より考察した。その結果、細粒分含有率 F_c が 15% 程度以下の領域では砂主体の骨格を形成するのに対し、 15% 程度以上の領域では砂粒子の骨格が失われ、細粒土主体の構造に移行することが推察された。
- 2) 単調せん断特性は、挙動の違いから、タイプ①~③の3タイプに区分した。これを物理特性との関係と比較した結果、タイプ①は砂主体の骨格を形成する領域に属し、タイプ②, ③は細粒土主体の骨格を形成する領域に属することが分かった。さらに、タイプ②と③は粘土分含有率 $C_c=15\%$ 付近で区分されることが確認された。
- 3) 単調せん断特性による3タイプに対し、繰返しせん断挙動の比較を行った。その結果、タイプ①は有効応力が0に至り液状化を起こし、タイプ②と③は有効応力が0に至らず剛性の消失が見られないことが分かった。また、非活性の細粒分を多く含む不攪乱試料の繰返しせん断挙動は、タイプ①に属するものであった。
- 4) 繰返しせん断強度特性と物理特性の関係を調べた結果、繰返しせん断強度 $\sigma_d/2\sigma'_c$ は粘土分含有率 C_c 及び塑性指数 I_p との相関性が高いことが確認された。設計基準による液状化対象土層は、概ねタイプ①と②の分布範囲と一致することが確認された。
- 5) 軸ひずみ両振幅 DA の発生と繰返し回数 $N=20$ 回での繰返し強度特性において、タイプ①での繰返しせん断強度 $(\sigma_d/2\sigma'_c)_{N=20}$ は DA によらず一定値を示した。しかし、タイプ②, ③では DA に対する増加傾向を示すことが分かった。

参考文献

- 1) 地盤工学会: ジオテクノート2 中間土-砂か粘土カー, 1992.
- 2) 倉田進, 藤下利夫: 砂と粘土の工学的性質に関する研究 運輸省港湾技術研究所報告, Vol.11, No.9, pp. 389-424, 1961.
- 3) Georgiannou, V.N., Burland, J.B. and Hight, D.W.: The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension, *Geotechnique*, Vol.40, No.3, pp. 431-449, 1990.
- 4) Georgiannou, V.N., Hights, D.W. and Burland, J.B.: Undrained behaviour of natural and model clayey sands, *Soils and Foundation*, Vol.31, No.3, pp.17-29, 1991.
- 5) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 241~245, 1999.

- 6) 中瀬明男, 勝野克, 小林正樹: 砂分の多い粘性土の一軸圧縮強さ, 運輸省港湾技術研究所報告, Vol.11, No.4, pp. 83-102, 1972.
- 7) 岡崎圭哉, 水上純一, 土田孝: 一面せん断試験による中間土のせん断特性, 第41回地盤工学シンポジウム, 地盤工学会, pp. 99-104, 1997.
- 8) 田中洋行, 田中政典, 土田孝: 自然堆積した中間土の強度特性, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.195-204, 1998.
- 9) 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手法について, 東海大学紀要海洋学部, 第14号, pp. 247-261, 1981.
- 10) 八尾真太郎, 平田茂良: 中間土の強度発現機構に関する考察(その2), 第25回土質工学会研究発表会, pp.701-704, 1990.
- 11) 大嶺聖, 落合英俊: 二種混合体の応力-ひずみ関係と混合土の一次元圧縮特性への適用, 土木学会論文集, No.448/III-19, pp. 121-130, 1992.
- 12) 古関潤一, 石原研而: 細粒分を含む砂の三軸液状化試験, 第21回土質工学会研究発表会講演集, pp. 595-596, 1986.
- 13) 森伸一郎, 沼田淳紀, 境野典夫, 長谷川昌弘: 埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, Vol.39, No.2, pp. 17-21, 1991.
- 14) 原田光男, 浦沢義彦, 白井伸一: 細粒分を含む砂によって造成された海岸埋立地盤の液状化強度特性(塑性指数と液状化強度との関係), 土と基礎, Vol.38, No.6, pp. 21-26, 1990.
- 15) 草野郁: 細粒分を含む砂質地盤の液状化強度の推定法, 土木学会論文集, No.418/III-13, pp.55-64, 1990.
- 16) 黄大振, 柳沢英司, 菅野高弘: シルトを含む砂のせん断特性について, 土木学会論文集, No.468/III-22, pp. 25-33, 1993.
- 17) 戸張聖久, 小西純一, 松村秀彰: 砂の液状化強度に及ぼす細粒分の影響, 第29回土質工学会研究発表会講演集, pp. 727-728, 1994.
- 18) 佐藤正行, 小田匡寛, 風間秀彦, 小瀬木克己: 細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp. 271-282, 1997.
- 19) 足立雅樹, 安原一哉, 福島正明: 非塑性シルト質土の液状化とそれに伴う体積変化特性, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp. 145-154, 1996.
- 20) 足立雅樹, 安原一哉, 島袋淳: 塑性のない細粒分を含む砂質土の液状化とそれに伴う体積変化特性, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp. 29-38, 1998.
- 21) 桑野二郎, 中澤博志, 杉原弘一, 矢部浩史: 細粒分を含む砂の非排水繰返しせん断強度, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 993-994, 1996.
- 22) 谷口聡一, 兵動正幸, 中田幸男, 村田秀一, 黒谷和男: 中間土の非排水せん断特性に及ぼす細粒分含有率の影響, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp.685-686, 1998.
- 23) 伊東周作, 兵動正幸: 不攪乱低塑性粘性土の繰返しせん断特性, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 1421-1426, 1998.
- 24) 松山知美, 兵動正幸, 中田幸男, 伊東周作, 徳本直子: 初期せん断を受ける中間土の繰返しせん断特性, 第34回地盤工学研究発表会講演集, pp.637-638, 1999.
- 25) 伊東周作, 兵動正幸, 松山知美: 細粒分を含む土の繰返しせん断強度と骨格構造の関係, 第34回地盤工学研究発表会講演集, pp. 639-640, 1999.
- 26) 松山知美, 兵動正幸, 中田幸男, 伊東周作, 徳本直子: 初期せん断を受ける中間土の非排水繰返しせん断強度特性, 土木学会第54回年次学術講演会, pp. 148-149, 1999.
- 27) Meyerhof, G.G.: Discussion on soil properties and their measurement, Discussion 2, Proc. of the IVth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. III, pp. 110, 1957.
- 28) Hyodo, M., Hyde, A. F. L., Yamamoto, Y. and Fujii, T.: Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.2, pp. 45-58, 1999.
- 29) 日本道路協会: 道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説, 丸善, pp. 91-95, 1996.
- 30) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 技報堂, pp. 163-169, 1988.

(2000. 8. 14 受付)

UNDRAINED MONOTONIC AND CYCLIC SHEAR CHARACTERISTICS OF SAND, CLAY AND INTERMEDIATE SOILS

Shusaku ITO, Masayuki HYODO, Teruhisa FUJII, Yoichi YAMAMOTO
and Toshikazu TANIGUCHI

This paper introduces the effect of fine grained soil to undrained cyclic shear behavior studied on a series of monotonic and cyclic triaxial tests conducted on mechanically compounded and undisturbed samples, respectively. The samples were classified into three types of soil based on the cyclic shear behavior obtained from results of the triaxial tests. Relationships between cyclic strength characteristics, growth of strain and physical properties are discussed on the each type of soils. One of the types mainly consisted of sand has less strength against liquefaction than the others containing more fines. It is also found that the cyclic shear strength is strongly related to clay content and plasticity index.