

飽和豊浦砂の全国一斉非排水繰返し三軸試験の実施と試験結果の解析

飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会

1. まえがき

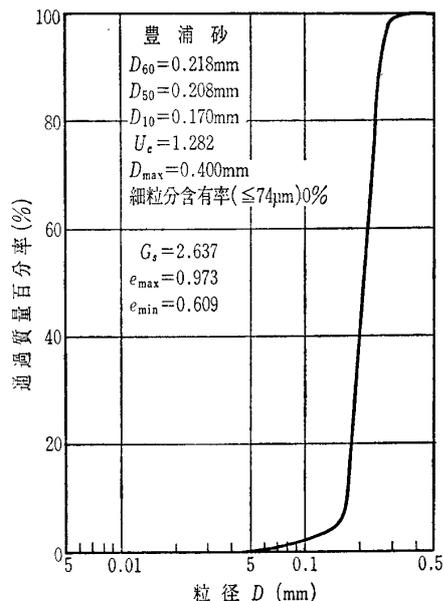
非排水繰返し三軸試験は砂地盤の液状化強度や土の動的変形特性を評価する室内試験法として広く用いられてきており、土質動力学ならびに設計実務において極めて重要な位置を占めている。ところが、この試験法で得られる結果は本質的に各要因の影響を受けやすく、試験機、試験手法のわずかな相違によって異なる^{1)~5)}とされている。このような背景から、1985年8月に発足した本研究委員会では、繰返し非排水試験法に関連する諸問題が調査・研究されてきた。具体的には、(1)アンケートによる非排水繰返し三軸試験の現状に関する調査、(2)既往関連研究資料の調査と取りまとめ、(3)全国一斉非排水繰返し三軸試験の実施、(4)繰返し三軸試験による動的変形特性の評価法の検討、(5)非排水繰返し三軸強度に及ぼす諸要因に関する分担研究の実施、(6)標準的な繰返し非排水試験方法(案)の作製、などについて広範な研究が展開され、いくつかの新知見を得ている。

本稿では、主として項目(3)の内容が以下に紹介されている。すなわち、飽和砂の非排水繰返し三軸試験自身の精度の把握、試験結果に及ぼす諸要因の影響の特性や程度の評価、ならびに各要因を制御した試験による結果の詳細な吟味などに関して、今回実施された全国一斉試験から得た成果を中心にまとめている。

2. 全国一斉非排水繰返し三軸試験の企画と実施概要

本研究委員会における審議の結果、同一の砂(飽和豊浦砂)を用い同一の試験仕様に基づいた全国一斉非排水繰返し三軸試験を実施し、広く国内から提供される試験結果の解析を通して、飽和砂の非排水繰返し三軸試験法を統一化(標準化)する上での問題点や工学上の意義について研究していくことにした。

公募に対して、北は北海道から南は九州地区にわたって48にも及ぶ多数の機関から参加の申し込みがあった。ついで、1987年6月の第22回土質工学研究発表会(新潟)で開催された委員会報告会において、本研究委員会が作成した試験仕様の詳細についての説明を行い、引続き、(社)土質工学会が一括購入し全体の一様性を確保した豊浦標準砂を所定重量各々の機関に送付した。



図—1 各機関に送付した豊浦標準砂の粒径加積曲線と物理特性(機関 No.12 によるデータ)

2.1 試験に用いた砂および試験仕様

図—1は、本一斉試験参加機関に配分した豊浦砂の粒径加積曲線および物理特性を示している。土質試験法「砂の最大・最小密度試験」による最大、最小密度 ρ_{dmax} および ρ_{dmin} はそれぞれ 1.639 g/cm^3 、 1.336 g/cm^3 である。

今回の試験仕様は、過去に行われた一斉試験で得られた経験および研究成果にもとづいて決められているので、過去の一斉試験について若干述べておく。本一斉試験に関連する飽和砂の液状化についての一斉試験として、まず1972年国内の5大学の研究室が参加して行われ、新潟港万代島砂の液状化強度を検討している。その結果は第16回土質工学シンポジウムにおいて報告されている¹⁾。非排水繰返し三軸試験の工学的意義が明確にされて間もないこのような時期に、精力的な一斉試験が行われたことは注目に値する。引続き、米国において同様の目的の一斉試験²⁾が行われるとともに、最近、(社)土質工学会「砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会」(委員長 北海道大学教授 土岐祥介)の委員が属する五つの機関の参加によって同一の豊浦砂を用いて行われている^{3),4)}。

これらの研究ならびに他の多くの研究者の意欲的な実験

学会活動から

的研究によって、非排水繰返し三軸試験は本質的に非常に微妙な試験であり、結果に影響を与える要因の数も多いことが明らかにされている。したがって、本一斉試験ではその事実を十分考慮した上で、重要と思われる必要最小限の項目について共通仕様を設定している。紙数の制限のため、その詳細をここでは記述できないが、「土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム論文集」に、報告事項と併せて紹介している⁶⁾ので参照していただきたい。なお、前回の一斉試験の条件^{3),4)}との大きな相違点は次の2点であり、そのために試験結果は前回のそれに比べはるかに各要因の影響を受けやすいものとなっている。

(1) 有効圧密応力 σ'_c は 0.5 kgf/cm^2 とする (前回は $\sigma'_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

(2) 圧密後の供試体の相対密度 D_{rc} は70%とする (前回は $D_{rc}=50\%$ および 80%)

2.2 試験実施状況

1988年4月末までに、次の37機関より39ケースの試験結果の報告がなされた。

愛知工業大学工学部、運輸省港湾技術研究所、応用地質地盤工学研究所、大阪土質試験所、梶谷エンジニアリング、基礎地盤コンサルタント技術センター、北見工業大学工学部、九州工業大学工学部、九州電力総合研究所、京都大学農学部、京都大学防災研究所、建設企画コンサルタント、建設省土木研究所、五洋建設技術研究所、佐藤工業中央技術研究所、サンコーコンサルタント、清水建設技術研究所、大成基礎設計、竹中工務店技術研究所、中央開発東京事業部、電力中央研究所、東急建設技術研究所、東京ソイルリサーチ、東京大学生産技術研究所、東京電力技術研究所、東京都立大学工学部、東北大学工学部、徳山工業高等専門学校、飛鳥建設技術研究所、日本大学生産工学部、機関組技術研究所、フジタ工業技術研究所、復建調査設計、北海道開発コンサルタント、北海道大学工学部、室蘭工業大学工学部、山口大学工学部(アイウエオ順で紹介)

表-1には、本報告で用いた参加機関の記号の一覧と一斉試験ではあえて統一しなかった試験仕様を併せて示した。表から明らかなように、空中落下法によって作製された三軸供試体には5cm~30cmまでの広範な直径が採用されているが、(高さH)/(直径D)は2.0~2.5の値であり、ほぼ同じ形状のものとなっている。また、直径5cmの供試体が全体の65.8%となっており、参加機関の2/3近くを占めている。メンブレン厚さ t_m に関しては、直径Dが30cmの大型供試体では1mmあるいは2mmのものが用いられているが、それ以外は標準仕様のおおむね0.2~0.3mmを使用しているものがほとんどである。次に、軸荷重測定用のロードセルの位置に関しては、試験仕様では特に指定しなかったが、三軸セル内に取り付けてより正確な測定を試みているものが全体の73.7% (これには三軸セル外にも併置しているものを含む) あり、各々の機関でプッシング等の軸摩擦を除去した測定に努めていることがわかる。三軸セル外に設置してあっても、軸摩擦の補正を行っているものを含めると、全参加機関の84.2%にも及ぶ数となってお

表-1 参加機関と統一しなかった試験仕様

| 機関番号 | 記号 | D (cm) | H/D | *1 t _m (mm) | *2 ロードセル | *3 軸荷重 | 機関番号 | 記号 | D (cm) | H/D | *1 t _m (mm) | *2 ロードセル | *3 軸荷重 |
|------|----|--------|------|---------------------------|-------------|-----------|------|----|--------|-----|---------------------------|-------------|-----------|
| 1 | ⊙ | 7.5 | 2.0 | 0.3 | OUT | AIR | 19 | ▼ | 10 | 2.0 | 0.2 | IN | AIR |
| 2 | △ | 7.5 | 2.0 | 0.3 | IN | AIR | 20 | ▶ | 7.5 | 2.0 | 0.3 | OUT | AIR |
| 3 | □ | 30 | 2.0 | 2.0 | IN | OIL | 21 | ◀ | 5 | 2.4 | 0.25 | OUT | AIR |
| 4 | ⊖ | 5 | 2.0 | 0.2 | BOTH | OIL | 22 | ✕ | 5 | 2.2 | 0.2 | IN | OIL |
| 5 | ▽ | 5 | 2.0 | 0.25 | IN | OIL | 23 | ● | 5 | 2.0 | 0.3 | OUT | OIL |
| 6 | ◇ | 5 | 2.5 | 0.2 | — | AIR | 24 | ▲ | 5 | 2.4 | 0.2 | IN | OIL |
| 7 | ▷ | 10 | 2.0 | 0.3 | OUT | AIR | 25 | ■ | 5 | 2.5 | 0.3 | IN | OIL |
| 8 | ◀ | 5 | 2.0 | 0.3 | BOTH | OIL | 26 | ▽ | 5 | 2.2 | 0.2 | IN | AIR |
| 9 | ✕ | 5 | 2.0 | 0.28 | IN | OIL | 27 | ◇ | 7.5 | 2.0 | 0.2 | OUT | AIR |
| 10 | ○ | 7 | 2.43 | 0.2 | IN | AIR | 28 | ▶ | 5 | 2.0 | 0.2 | IN | OIL |
| 11 | △ | 7 | 2.43 | 0.2 | IN | AIR | 29 | ● | 5 | 2.0 | 0.25 | IN | OIL |
| 12 | □ | 7 | 2.43 | 0.2 | IN | AIR | 30 | ▲ | 5 | 2.0 | 0.25 | OUT | OIL |
| 13 | ▽ | 5 | 2.43 | 0.2 | IN | AIR | 31 | ■ | 5 | 2.0 | 0.25 | IN | OIL |
| 14 | ◇ | 5 | 2.5 | 0.25 | OUT | AIR | 32 | ▽ | 5 | 2.5 | 0.25 | IN | AIR |
| 15 | ▷ | 5 | 2.0 | 0.3 | IN | OIL | 33 | ✕ | 5 | 2.0 | 0.25 | BOTH | AIR |
| 16 | ◀ | 5 | 2.0 | 0.3 | IN | OIL | 34 | ◇ | 10 | 2.0 | 0.3 | OUT | AIR |
| 17 | ▲ | 5 | 2.5 | 0.25 | IN | OIL | 35 | ▶ | 5 | 2.5 | 0.25 | IN | OIL |
| | ● | 30 | 2.0 | 1.0 | IN | OIL | 36 | ◀ | 5 | 2.5 | 0.20 | IN | AIR |
| 18 | ■ | 7.5 | 2.0 | 0.2 | OUT | AIR | 37 | ◀ | 5 | 2.0 | 0.25 | IN | AIR |
| 19 | ◆ | 5 | 2.0 | 0.15 | IN | AIR | | | | | | | |

*1 t_m:メンブレン厚さ, *2 ロードセルの位置:IN;三軸セル内, OUT:三軸セル外, BOTH:セル内およびセル外に設置, *3 軸荷重供給システム;AIR:空圧システム, OIL:油圧システム

り、精度の高い測定がなされていると期待される。また、最近の繰返し載荷システムはどのように構成されているのか興味もたれるところであるが、油圧による供給システムを採用しているものが全体の45.7%、空圧システムによる制御を試みているものが54.3%とほぼ同数であった。そのほか、標準仕様としては繰返し軸荷重は必ずしも正弦波を用いることに制限するものではないとしたが、機関No.13がく形波を採用した以外は、すべて正弦波によって試験を行っている。

3. 試験結果と考察

図-2(a)は、報告されたすべての機関のデータをそのままプロットしたもので、 $DA=5\%$ が生じた時の繰返し回数 N_c と $DA=1\%$ に至るまでの平均的な繰返し応力比 $\sigma_a/2\sigma'_c$ 値との関係が示されている。図-2(b)は $DA=10\%$ が生じた時の同様な関係である。ここで、繰返し応力比として $DA=1\%$ に至るまでの平均的な値 ($\sigma_a/2\sigma'_c (DA \leq 1\%)$) と表示) を採用しているのは、後でも明らかにされるように、この程度のひずみレベルまでに供試体を受ける応力履歴の繰返し回数に及ぼす影響が顕著であること、また大ひずみレベルでは所定の一様な繰返し軸応力の載荷が比較的困難になることなどの事実を考慮したためである。両図から、報告されたこれらのデータにはかなりのばらつきが見られる。これは、圧密後の乾燥密度 ρ_{ac} 値が個々の供試体で必ずしも目標値 ($=1.538 \text{ g/cm}^3$) になっていないことに起因するようと思われる。さらには、本一斉試験で

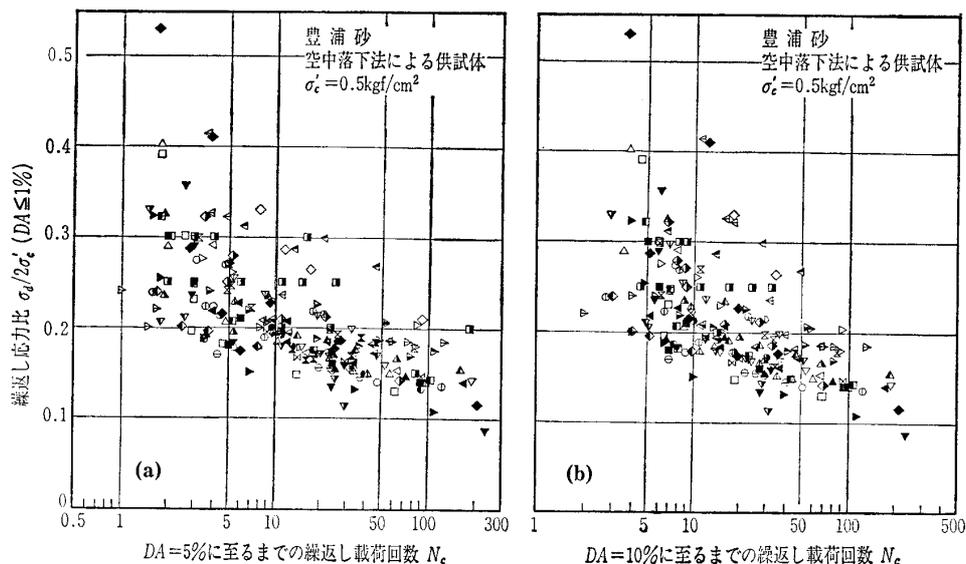
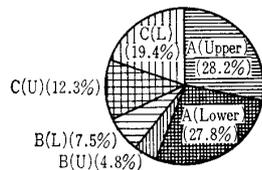


図-2 繰返し载荷回数 N_c と繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ との関係 (報告されたすべてのデータ): (a) $DA=5\%$ を生じるに必要な N_c と $\sigma_d/2\sigma'_c$ の関係, (b) $DA=10\%$ を生じるに必要な N_c と $\sigma_d/2\sigma'_c$ の関係

| 密度(ρ_{dc})の範囲 | D_{rc} の変動 | 評価 |
|--|----------------------|----|
| A(Lower) — A(Upper) 1.532 1.538 1.545 | $0 \sim \pm 2\%$ | A |
| B(L) — B(U) 1.528 1.532 1.545 1.548 | $\pm 2 \sim \pm 3\%$ | B |
| C(L) — C(U) 1.528 1.548 (g/cm^3) | $\pm 3\% \sim$ | C |



(a) (b)

図-3 供試体密度の変動: (a)密度 (ρ_{dc}) の変動と評価基準, (b)密度評価の結果

は統一しなかった直径の相違による影響,あるいは荷重制御の精度(プッシング部の摩擦,繰返し荷重の対称性・一様性など)やB値の違いなどによって,結果がばらついていることも考えられる。以下,結果に及ぼす諸要因の影響を可能な限り定量的に検討する。

3.1 供試体密度の影響

等方圧密後の供試体密度 $\rho_{dc}=1.538 g/cm^3$ が,本一斉試験の密度に関する標準仕様であった。今回の一斉試験において,この仕様がどの程度満足されているかを調べてみたのが図-3である。機関No.12による $G_s=2.637$, e_{max}

$=0.973$, $e_{min}=0.609$ によって相対密度 D_{rc} を表せば, $\rho_{dc}=1.538 g/cm^3$ は $D_{rc}=71\%$ に相当する。ここで,図-3(a)に示すようにこの目標相対密度からの変動幅が $\pm 2\%$ 以内のものをAランク, $\pm 3\%$ のものをBランク,それ以上のものをCランクとし,それぞれ+側にあるものにUpper, -側にあるものをLowerのサフィックスを付けて全供試体の密度の精度を表現してみた。結果は,図-3(b)に表示されているように,実験的研究レベルでの通常の相対密度の変動に関する規制値 ($\pm 2 \sim 3\%$) に適合するAおよびBランクの供試体が全体の68.3%に及んでおり,まずまずの結果であろう。

さて,ここでは別報⁶⁾に示した方法で $\rho_{dc}=1.538 g/cm^3$ からの違いに対する補正を試み,密度の影響を除去した繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c \sim$ 繰返し回数 N_c 関係を求めた(図-4(a)および(b))。なお,今回の補正適用範囲は $0.10 \leq \sigma_d/2\sigma'_c \leq 0.45$ および $1.490 \leq \rho_{dc}(g/cm^3) \leq 1.590$ とし,この条件に入らないデータや補正値の方向が修正されるべき方向と全く逆になるデータは補正の対象からはずされている⁶⁾。図-3に示したように全体の密度のばらつきが小さ

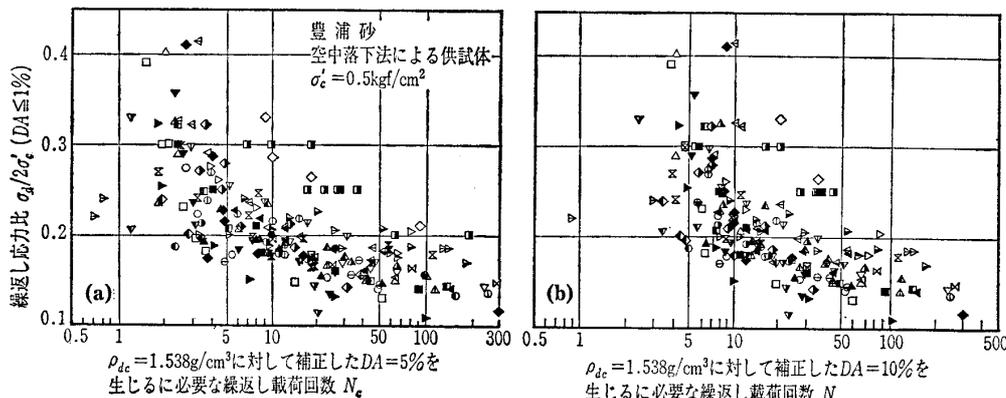


図-4 $\rho_{dc}=1.538 g/cm^3$ に対して補正した N_c と $\sigma_d/2\sigma'_c$ との関係: (a) $DA=5\%$, (b) $DA=10\%$ を生じるに必要な N_c と $\sigma_d/2\sigma'_c$ の関係

学会活動から

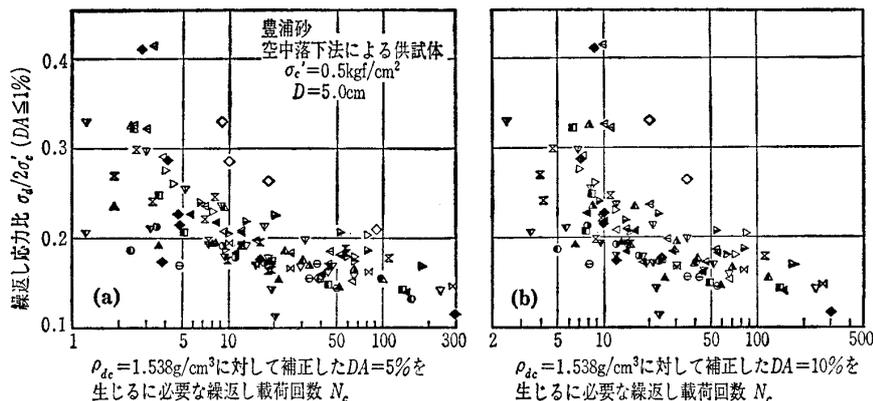


図-5 $\rho_{dc}=1.538\text{ g/cm}^3$ に補正された $D=5\text{ cm}$ に対する N_c と $\sigma_d/2\sigma'_c$ との関係: (a) $DA=5\%$, (b) $DA=10\%$ を生じるに必要な N_c と $\sigma_d/2\sigma'_c$ の関係

いために、補正による N_c の変化はそれほど大きくはないが、図-4(a)および(b)は、2, 3のケースを除き、密度の変動の影響を補正することによってデータのばらつきを図-2(a)および(b)に比べて少なくできることを示している。しかし一方で、残されたばらつきは他の要因にかなりの程度依存していることも示唆している。

3.2 供試体寸法の影響

前回の一斉試験^{3),4)}や委員会の共同研究⁵⁾によれば、供試体高さ(H)/直径(D)の値の相違による非排水繰返し三軸強度の違いは、本一斉試験で用いられている $H/D=2.0\sim 2.5$ の間では、ほとんど生じないことが示されている。一方、直径差による非排水繰返し三軸強度の違いは確実に認められるとしている。このことから、本一斉試験結果においても、直径 D の相違による強度の変化が生じていることが予想されるので、報告されたデータの各直径ごとの整理を試みた。図-5は一例として、 $D=5\text{ cm}$ についての直径別 $\sigma_d/2\sigma'_c\sim N_c$ 関係を示している。図-2や図-4に比べて、全体としてのデータのばらつきは小さくなっている。図示は省略したが、ほかの直径 $D=7\text{ cm}$, 7.5 cm , 10 cm および 30 cm についても同様のことがいえる⁶⁾。

ところで、図-5に示された $\sigma_d/2\sigma'_c\sim N_c$ 関係には、与

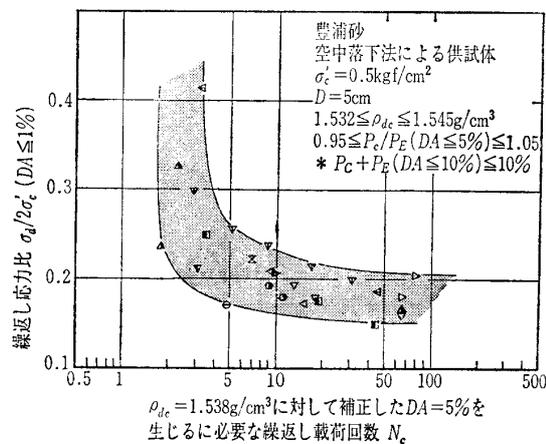


図-6 標準仕様をすべて満足するデータから決定した液状化強度 ($D=5\text{ cm}$)

えられた繰返し荷重の対称性や一様性の程度が影響していると考えられる。このことに関しては、次節で論ずるが、ほかの影響因子を排除した条件のもとでの供試体直径の差による非排水繰返し強度の相違を定量的に評価するため、標準仕様をすべて満足したデータに基づいて各供試体の $\sigma_d/2\sigma'_c\sim N_c$ 関係を評価してみた。たとえば図-6は、 $D=5\text{ cm}$ かつ標準仕様をすべて満足しているデータ ($0.95\leq P_c/P_e(DA\leq 5\%)\leq 1.05 : DA=5\%$ までのすべてにお

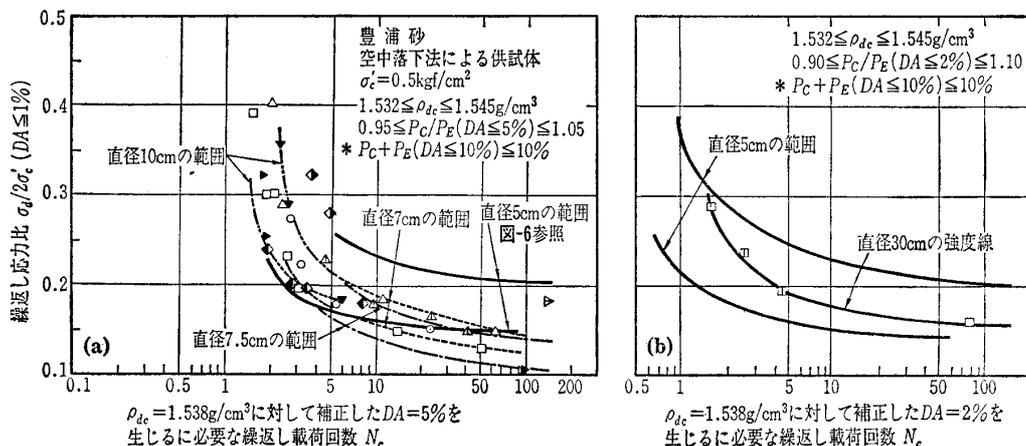


図-7 供試体直径の相違による液状化強度の変化: (a) $D=5, 7, 7.5, 10\text{ cm}$ 間での比較, (b) $D=5\text{ cm}$ と 30 cm との比較

いて±5%以内の軸荷重変動幅にある、 $P_C+P_E(DA\leq 10\%) \leq 10\%$: $DA=10\%$ までのすべてにおいて10%以内の P_C+P_E の変動である)によって決定された液状化強度線である。また $D=7\text{ cm}$, 7.5 cm , 10 cm および 30 cm に対する液状化強度線も同様な判定基準のもとで求めることができていた⁶⁾。ただし、 $D=30\text{ cm}$ に関しては $DA=5\%$ のデータでは求められなかったため、 $DA=2\%$ のケースについてのみ強度線を決定した。

これらの各直径の強度線の直接比較を試みたのが図-7(a)および(b)である。なお、図中のデータ点は上述のようにすべて標準仕様を満足しているものである。過去の研究のように明りょうな形で直径差による強度の違いが表れているとはいえないが、たとえば図-7(a)の比較から、少なくとも直径5cmの液状化強度は7~10cmのそれとは明確に違って、高い強度値を示しているのがわかる。また、図-7(b)においては、直径5cmと直径30cmの液状化強度の比較を $DA=2\%$ について行っている。図示は省略したが、直径5cmに対する $DA=2\%$ のゾーンは前述の $DA=5\%$ の場合と同様な方法で求めたものである。 $D=30\text{ cm}$ の強度値は、繰返し応力比が低いところでは $D=5\text{ cm}$ の下限値に近くなっているものの、全体としては $D=5\text{ cm}$ の基本ゾーン内に推移している。なお、 $D=30\text{ cm}$ の供試体では厚手のメンブレンが用いられているため、メンブレンの張力補正や貫入補正に関して詳細な検討を加えてみたが、直径差を明確に説明するにはいたらなかった。

3.3 繰返し荷重振幅の非対称性の影響

本標準仕様の中での繰返し荷重の振幅に対する規定は、『圧縮荷重振幅 P_C と伸張荷重振幅 P_E の比は常に $0.95 \leq P_C/P_E \leq 1.05$ 状態に適合しており、かつ P_C+P_E は供試体の変形が進行しても±10%以下の変動とする』となっている。そこで、規定外の繰返し荷重振幅を供試体に与えると、標準仕様どおりの荷重振幅が与えられた場合の液状化強度とどのような形でどの程度異なるものなのかを研究した。

なお、 $D=5\text{ cm}$ の試験結果は、前述のように全体の66%を占めていて、ほかの直径のデータに比べて圧倒的にその数が多い。したがってより客観的な要因分析を展開できると期待されるので、ここでは $D=5\text{ cm}$ の試験結果について検討を進めている。図-8(a)は $DA \leq 1\%$ において、 P_C/P_E の変動が±5%~±10%の範囲にある実測データと基本ゾーン(図中の網掛け曲線)との比較を示している。1, 2のデータを除いて、基本ゾーンから逸脱するものはないことが注目される。このことは、 $DA \leq 1\%$ において±10%までの P_C/P_E の変動は、実用上許容の範囲にあることを示している。図示は省略しているが、標準仕様どおり±5%以内の変動幅にあるデータは、明らかに基本ゾーン内に存在していることはいままでもない⁶⁾。一方、図-8(b)は±10%以上の非対称性を有する試験結果と基本ゾーンとの比較を示している。繰返し応力振幅の所定の値からの変動が大きいため、やはり基本ゾーンから大きく逸脱するデータの存在していることがわかる。

ここで、繰返し応力振幅の非対称性による液状化強度の変動を詳細に検討するために行った一連の試験結果^{6),7)}によれば、①同一の繰返し応力比の値に対して一義的な軸荷重振幅比 $P_C/P_E \sim N_c$ 関係が存在する、②これらの関係は、 (P_C+P_E) が一定の場合、 P_C/P_E が1より大である時の N_c が $P_C=P_E$ に対する N_c 値より大きな値となること、逆に P_C/P_E が1より小さい時、すなわち伸張荷重が卓越している時は $P_C=P_E$ の N_c 値より減少するような傾向を示している、さらに③それらの変化率は繰返し応力比の値に依存する、などの事実が明らかにされている。そこで、この研究成果を本試験結果に適用して、 $P_C=P_E$ の条件に対して補正したデータの一例が図-8(b)に示されている。図中の◇のデータはこの方法で補正されることによって、◆で示すデータ点へ移動し、標準仕様の規定条件を満足するデータより確定した基本ゾーンにより近づいていくのが理解されよう。

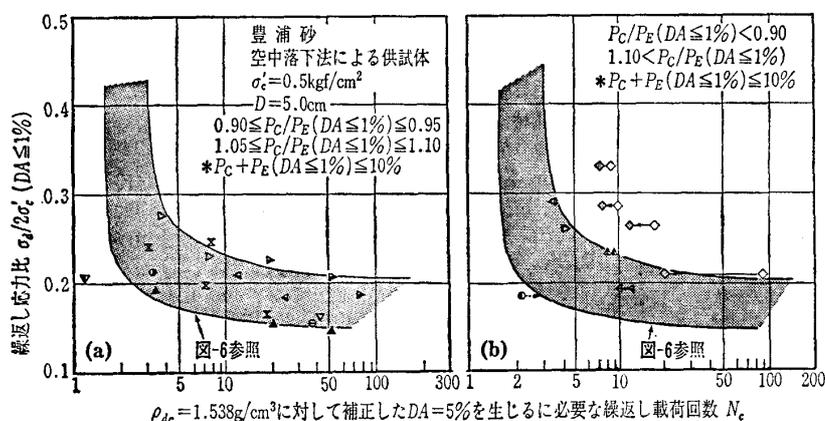


図-8 繰返し応力の非対称性と液状化強度の変化 : (a) DA が1%生じるまでに P_C/P_E が±10%以内にある試験データと基本ゾーンの比較, (b) DA が1%生じるまでに P_C/P_E が±10%以上にある試験データと基本ゾーンの比較

なお、供試体径 $D=7.5\text{ cm}$ を用いた機関No. 18より、当初試験仕様のうち繰返し荷重の対称性についてあまりこだわらないで実施された試験データの報告が別途なされていたので、上述の考えが直径 $D=5\text{ cm}$ 以外の場合についても成立するのかが検討することができた。すなわち、その結果が図-9に示されており、図から明らかなように、 $P_C \neq P_E$ のデータを $P_C=P_E$ の条件に対して補正すれば(例えば図中の■のデータが◆へ移動する)、実測の液状化強度値は試験仕様が完全に満足されている強度値(図中の網掛け曲線)に近いものとなっていき、 $D=5\text{ cm}$ に関する上記の推論を支持する結果となっている。

以上の考察から、微小ひずみレベル(例え

学会活動から

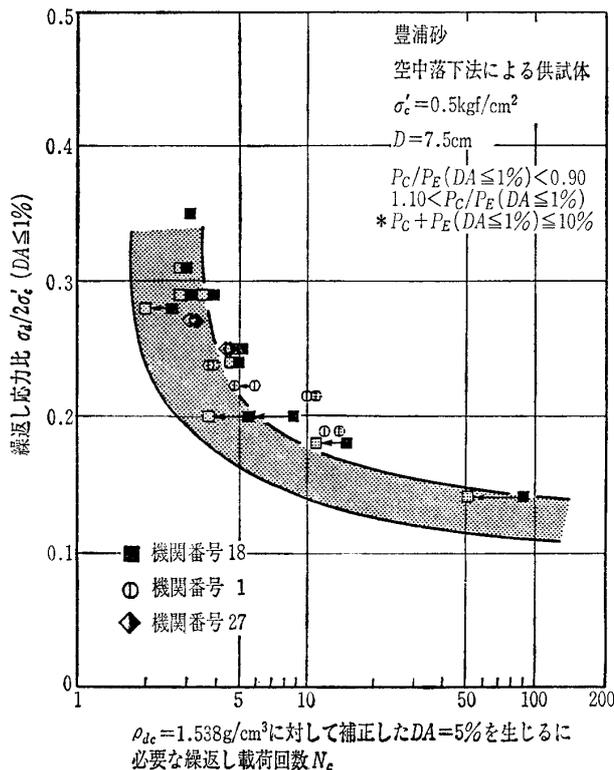


図-9 $D=7.5$ cm 供試体における P_C/P_E の変動による液状化強度の変化と補正

ば $DA \leq 1\%$) における繰返し荷重の対称性の保持は極めて重要であるものの、 P_C/P_E 値を少なくとも $\pm 10\%$ 以内の変動に抑えておけば、実用上問題は無いと言えそうである。

4. 結論

37機関より39ケースのデータの提供をうけた全国一斉試験の結果を検討して、次のような結論を得た。

- (1) 供試体の密度の影響は、前回の一斉試験の場合と同様顕著である。しかし、ある範囲内の密度では、密度のばらつきによる強度の変化はほとんどの場合補正することが可能であり、目標密度に対する結果として妥当に評価できる。
- (2) 供試体直径の差によって液状化強度は異なる。今回の一斉試験では、直径 5 cm の強度値は直径 7~10 cm のそれとは確実に違っていて、いずれも高い強度値を示している。
- (3) 繰返し応力振幅の一様性や対称性の保持は予想以上に重要であることがわかった。すなわち、圧縮荷重片振幅 P_C と伸張荷重片振幅 P_E の比は、少なくとも両振幅軸ひずみレベルが 1% 以内の段階で $\pm 10\%$ 以内におさえる必要がある。これを越えると明りょうな強度差が生じている。このことから、本一斉試験の標準仕様である $0.95 \leq P_C/P_E \leq 1.05$ は厳しすぎる規定であったのかも知れない。
- (4) 供試体の作成方法、圧密方法、繰返し応力荷重法、

結果の解析法を統一できれば、極めてデリケートな試験法である非排水繰返し三軸試験においても、データのばらつきをかなりの程度小さくできるといえる。

5. あとがき

本一斉試験は、過去に類例をみないほど大規模で、かつ試験手順のいくつかの重要項目の統一化を計って実施された。その解析を通して、貴重な成果をいくつか認めることができている。全体としては上述のように満足すべき試験結果が示されている。したがって、これら各機関の試験データは本試験法の基準化に対して重要な情報を多数提供することになったと思われる。

なお、この一斉試験と平行して、本委員会に属する 8 機関の協力を得て、非排水繰返し三軸強度の評価に関する次の項目について研究が進められた。

- 1) 供試体直径の影響の定量的評価法
- 2) B 値の影響、特に $B \geq 0.90$ の範囲でのその影響
- 3) メンブレン厚さおよび材質の影響
- 4) 繰返し荷重の対称性および一様性について
- 5) 圧密法（ひずみ履歴）の相違の影響
- 6) 試料の再使用の影響

得られた成果は、別報⁷⁾に報告した。また、本委員会が進めた研究項目の一つである「土の動的変形特性を求める繰返し三軸試験法」に関しては、下記のように「参考資料」として紹介している。参考にさせていただきたい。

本報告は、土岐祥介委員長を始め委員会各位の御教示をいただいて三浦清一幹事が取りまとめたものである。末筆ながら、本一斉試験に参加された37の機関の関係各位に深甚なる謝意を表します。また、膨大な結果の整理や本原稿の作成にあたって北海道大学 青野哲成氏、室蘭工業大学大学院生 鎌田 強、扇谷 治、同大学卒業生 松本富士夫の各君から惜しみない協力をいただいた。なお、添付の「参考資料」は畑中宗憲委員に作成していただいたものである。感謝申し上げたい。

参考文献

- 1) 吉見吉昭・大岡 弘：飽和砂の液状化に関する一斉試験結果、土と基礎、Vol.20, No.7, pp.67~68, 1972.
- 2) Silver, M.L., Chan, C.K., Ladd, R.S., Lee, K.L., Tiedeman, D.A., Valera, J.E. and Wilson, T.H.: Cyclic triaxial strength of standard test sand, Jour. G.E. Div., Proc. ASCE, Vol.102, No. GT5, pp.511~523, 1976.
- 3) 砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会(委員長 土岐祥介)：飽和豊浦砂の繰返し非排水三軸試験における変形特性に及ぼす諸要因に関する共同研究報告、砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価に関するシンポジウム論文集、pp.7~22, 1984.
- 4) Toki, S., Tatauoka, F., Miura, S., Yoshimi, Y., Yasuda, S. and Makihara, Y.: Cyclic undrained triaxial strength of sand by a cooperative test program, Soils and Foundations, Vol.26, No.3, pp.117~128, 1986.
- 5) 砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会(委員長 土岐祥介)：飽和豊浦砂の繰返し非排水三軸試験における変形

特性に及ぼす諸要因に関する共同研究報告—統報—, 砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価に関するシンポジウム論文集, pp.23~46, 1984.

- 6) 飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会(委員長 土岐祥介): 飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験の結果について, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム論文集, pp.1~35, 1988.
- 7) 飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会: 飽和豊浦砂の非排水繰返し三軸強度に及ぼす諸要因に関する分担研究報告, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム論文集, pp.36~53, 1988.

「参考資料」

「繰返し三軸試験により土の動的変形特性を求める方法についての検討」

I 試験方法検討の背景と現状

繰返し三軸試験により求められる土の動的特性としては, 前述の強度特性のほかに地盤の応答解析などに用いられる変形特性(せん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性)がある。そして, 強度試験と同様な理由で変形特性を求める試験についても試験法の最小限の規格化を行い, データの精度を高め, かつ各機関で得られるデータの共通性を高めることは大いに意義のあることと考えられる。本委員会においてはその様な認識のもとに土の動的変形特性を求める繰返し三軸試験の方法についても若干の討議をすすめてきた。それらの討議を通じて, “両試験法には共通の部分も多くあるが, 土はひずみレベルが 10^{-5} ~ 10^{-4} 程度から非線形性が現れるので, それだけ微小変位時における変形と力を正確に測定することが必要となる。そのために, 部分的には, 「動的強度を求める試験法」よりもさらに細かな規定が必要であり, 今後の一層の検討が不可欠である。”との結論に達した。以下は当委員会において動的変形特性を求める繰返し三軸試験法について議論になった主な事柄である。

II 試験方法について議論になった点

II-1 「排水条件」と「飽和度」

強度特性を求める繰返し三軸試験では, 砂質土を主対象に「飽和した土」を「非排水状態」のもとで繰返し軸荷重を加えることが基本条件になっている。そして, この二つの条件が結果に与える影響は非常に大きいことが知られている。これに対して, 動的変形特性を求める試験では, 盛土を含めた粘性土も重要な試験対象土となる。盛土の場合は実地盤が飽和していない場合もあるので, 試験において供試体を積極的に飽和させる理由がない。また, 粘性土の場合は完全に飽和させることが非常に難しい場合がある。そして, 動的強度への影響に比べて飽和度の動的変形特性

に及ぼす影響はかなり小さいと思われる。一方, 供試体が飽和していれば, ポアソン比はほぼ0.5と仮定できるので, 通常の繰返し三軸試験で直接求められるヤング係数からポアソン比を介してせん断弾性係数を求めることができる。この理由のため供試体を飽和させることがある。こういう実情のもとで繰返し三軸試験により土の動的変形特性を求める際の供試体の「飽和度」と「排水」の条件をどの様に考えるのかが一つの検討点となっている。

II-2 「初期有効拘束圧」

繰返し強度を求める三軸試験では, 通常試験結果をせん断応力と初期有効拘束応力の比で表すので, 実験に用いる初期有効拘束圧の絶対値の選択は比較的問題が小さいと考えられる(不攪乱試料の場合も応力比で規定できるかどうかは今後の要検討課題)。これに対して, 動的変形係数はその絶対値が直接(設計)計算に用いられ, しかも, その値は拘束圧に大きく影響されることが知られている。したがって, 試験に用いる初期有効拘束圧の選択は重要な課題である。この「初期有効拘束圧」としては通常原地盤における①有効上載圧と②有効平均主応力のどちらかが用いられている。一般に原位置での静止土圧係数が不明のもとでは「初期有効上載圧」の選択も一つの検討課題になっている。

II-3 試験装置についての検討点

繰返し三軸試験装置を用いて動的変形特性を求める場合は, 試験装置に関する以下の点を十分検討する必要があることが討議された。

- 1) 繰返し軸荷重測定用の荷重変換器の設置位置(三軸セル内に設置する方法を標準とするか), 荷重変換器の容量および精度に関する規定の必要性。
- 2) 軸変位測定器の設置位置(三軸セル内のできるだけ供試体に近い位置に非接触型の変位計を設置するのを標準とするか), 10^{-3} 程度以上のひずみ範囲での軸変位の計測法。
- 3) 完全弾性体の試験体により荷重と変位の測定結果の間に位相ずれがないことを確認する必要性。

II-4 繰返し載荷方法についての検討点

- 1) 載荷周波数の範囲は動的強度試験とほぼ同じでよいのか。
- 2) 圧縮荷重振幅 P_C と伸張荷重振幅 P_E の比の変動をどの程度の範囲にするのか。
- 3) どのせん断ひずみ範囲を何ステージにわけて載荷するのを標準とするのか。
- 4) 1ステージの繰返し載荷回数は何回を標準とするのか。
- 5) 軸荷重, 軸変位の測定精度をどの程度に規定するのか。

(文責: 三浦清一 室蘭工業大学)