

室内繰返し載荷試験による豊浦砂の変形特性に関する

全国一斉試験の実施と試験結果の解析

土の動的変形定数試験方法基準化委員会

1. ま え が き

本委員会では、同一の試料（豊浦標準砂および堆積軟岩）を用いて、同一の試験仕様に基づいた室内繰返し載荷試験による土と堆積軟岩の変形特性に関する全国一斉試験を実施し、試験結果の解析を通じて、本試験法を基準化する上での潜在的問題点や工学上の意義について検討した。本報告は、上記2試料のうち豊浦砂の一斉試験の結果を取りまとめたものである。

2. 一斉試験の概要

下記の一斉試験の実施を計画し、「土と基礎」を通じて広く国内機関の参加を呼びかけた。

(1) 豊浦砂の繰返し三軸試験

(2) 豊浦砂の繰返しねじりせん断試験

(1), (2)ともに空中落下法で作成した相対密度50%と80%の供試体を少なくとも一つずつ。

供試体は、拘束圧1.0k gf/cm²で等方圧密する。

その結果、1993年9月末までにのべ23機関（表一1, 2参照）より試験結果の報告がなされた。

参加機関：(株)大林組, (株)大阪土質試験所, 応用地質(株), 基礎地盤コンサルタンツ(株), 九州工業大学, 九州電力(株), 建設省, 大成建設(株), (株)ダイヤコンコンサルタンツ, (株)竹中工務店, 中央開発(株), (株)東京ソイルリサーチ, 東京大学生産技術研究所, 飛鳥建設(株), 復建調査設計(株), 北海道大学, 室蘭工業大学, 山口大学, 横浜国立大学（アイウエオ順）

表一1, 2は、各参加機関の試験仕様で、統一しなかった試験仕様¹⁾を中心に示したものである。なお、報告された三軸試験結果のうち、仕様と異なる拘束圧で試験を行った機関が2機関あり、以下の報告では割愛させていただいた。

3. 豊浦砂の繰返し三軸試験結果

本試験仕様では、供試体の圧密後の相対密度を規定した値から±5%の範囲にあれば良いこととした。一般にきれいな砂のせん断剛性率 G は以下の式で示されている。

$$G = A \cdot F(e) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 A は拘束圧およびひずみレベルによって決まる定数、 $F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ である。

実際は、機関によって相対密度で最大20%もの差があった。(1)式によれば、この差によって G は約15%の差になる。そこで、各試験機関間の間隙比の相違の影響を除くために、以下のように等価ヤング率 E_{eq} の補正を行った。

$$E_{eq}(D_{rc}=50\%) = E_{eq} \times F(e_{0.8}) / F(e_c) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $E_{eq}(D_{rc}=50\%)$ は $D_{rc}=50\%$ に補正した E_{eq} 、 E_{eq} は各機関から報告された E_{eq} 、 $F(e_{0.8})$ は $D_{rc}=50\%$ の時の間隙比から求めた $F(e)$ 、 $F(e_c)$ は報告された圧密後の間隙比から求めた $F(e)$ である。

同様に、 $D_{rc}=80\%$ の報告された E_{eq} に対しても補正を行った。なお、履歴減衰係数 h に及ぼす間隙比の影響は極めて小さいとされているので補正は行わなかった。

図一1, 2に、密度補正後の各載荷段階の繰返し載荷10サイクル目で求めた $E_{eq} \sim (\epsilon_a)_{SA}$ 関係を相対密度($D_{rc}=50, 80\%$)と排水条件（排水載荷、非排水載荷）に分けてプロットした（図中のプロットマークは、表一1参照）。

図に示したように、すべての機関から報告された $E_{eq} \sim (\epsilon_a)_{SA}$ 関係は、比較的よく一致しており、排水および非排水載荷で $D_{rc}=50\%$ の結果では、 $(\epsilon_a)_{SA} = 10^{-5}$ のひずみレベルでの E_{eq} のばらつきは、9割以上の機関で約2割以内に収まっている。

表一 各参加機関の試験仕様（豊浦砂の繰返し三軸試験）

機 関 No.	マーク	高 さ H (cm)	直 径 D (cm)	メンブレン 厚 t_m (mm)	変 位 計		载荷制御 方法	周波数 Hz	デー タ 数	$D_{rc}=50\%$		$D_{rc}=80\%$	
					測定位置	種 類				排 水	非排水	排 水	非排水
1	○	17	7	0.2	キャップ	GS	荷 重	0.1	100	47.6	49.7	80.5	78.8
2	△	15	7.5	0.3	キャップ	GS	変 位	0.1	130	65.2	—	80.8	—
3	□	10	5	0.2	キャップ	GS	荷 重	0.1	100	50	—	77	—
4	◇	10	5	0.25	キャップ	GS	荷 重	1.0	100	48.6	49.9	84.1	80.3
5	▽	10	5	0.2	キャップ	GS	荷 重	0.1	160	48.8	—	78.6	—
6	●	10	5	0.2	キャップ	差 動	荷 重	0.5	100	48	48	79	81
7	▲	10	5	0.25	キャップ	差 動	荷 重	0.1	100	50.7	49.0	77.3	77.8
8	■	10	5	0.25	キャップ	GS	荷 重	0.5	100	46.0	—	80.0	—
9	◆	10	5	0.25	キャップ	GS	荷 重	0.1	100	55	55	84	76
10 a	▼	60	30	2.3	キャップ	差 動	荷 重	0.05	100	50.3	52.0	79.7	79.9
10 b	◎	10	5	0.185	キャップ	GS	荷 重	0.05	100	?	47.9	—	80.9
11	+	10	5	0.2	キャップ	GS	荷 重	0.1	100	51.0	56.0	78.0	80.8
12	×	15	7.5	0.3	側 面	LDT	荷 重	0.1	100	60.7	—	89.0	—
13	⊕	10	5	0.2	側 面	LDT	荷 重	0.1	100	54.5	54.8	78.0	77.5
14	⊗	17	7	0.2	キャップ	GS	荷 重	0.1	100	46.4	50.4	81.3	77.1
15	⊕	10	5	0.25	キャップ	GS	荷 重	0.2	120	47.8	—	81.1	—
16		10	5	0.25	キャップ	GS	変 位	0.1	200	52.7	46.0	75.9	75.4
17		10	5	0.25	キャップ	GS	荷 重	0.2	100	—	53.4	—	78.2

GS：非接触型変位計，差動：差動トランス型変位計，LDT：局所変位計

表二 各参加機関の試験仕様（豊浦砂の繰返しねじり試験）

機関 No.	マーク	高 さ H (cm)	外 径 D_o (cm)	内 径 D_i (cm)	t_m (mm)	変 位 計		载荷制 御方法	周波数 Hz	デー タ 数	$D_{rc}=50\%$		$D_{rc}=80\%$	
						測定位置	種 類				排 水	非排水	排 水	非排水
1	○	20	10	6	0.2	キャップ	GS	荷 重	0.1	100	51.7	50.2	83.4	76.1
2	△	12	10	6	0.4	キャップ	GS	荷 重	0.1	100	52	—	88	—
3	□	7	7	3	0.25	キャップ	GS	荷 重	0.5	100	52.3	—	81.6	—
4	◇	10	10	6	0.3	キャップ	GS	荷 重	0.1	100	54.5	49.6	77.8	78.6
5	▽	7	7	3	0.3	キャップ	GS	荷 重	0.2	120	52.9	—	81.4	—
6	●	14	7	3	0.3	キャップ	PM	荷 重	0.5	40	54	52	75	83

GS：非接触型変位計，PM：接触型回転角計（ポテンシオメーター）

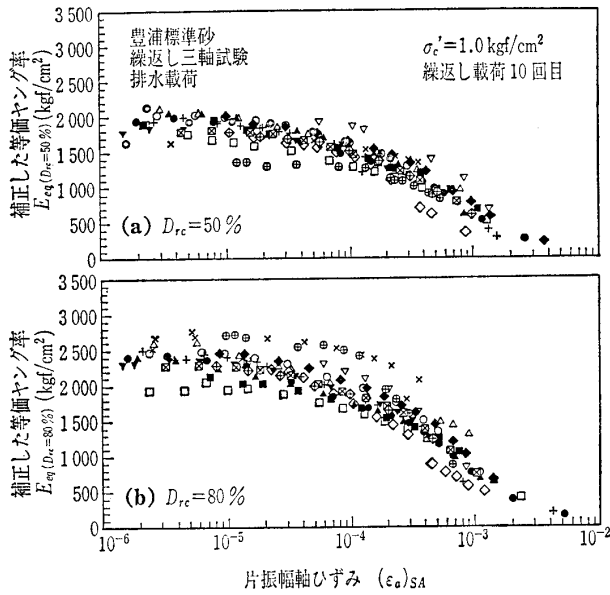
一方、排水载荷試験の $D_{rc}=80\%$ の試験ケース（図一（b））では、No.12, 13の機関の E_{eq} がほかよりもやや高くなっている。この2機関は供試体の軸変位を LDT（局所変形測定装置）を用いて供試体側面で計測している。一般に、キャップの変位から求めた E_{eq} はベディングエラーの影響で供試体の局所軸変形から求めた E_{eq} よりも過小に評価される²⁾。ただし、図一（a）に示した $D_{rc}=50\%$ のケースでは、LDTを用いて求めた E_{eq} とキャップの変位から求めた E_{eq} との間に差が認められないことから、供試体の密度が低くなるとベディングエラーの影響が少なくなるのであろう。

また、図一（2）にも排水载荷試験での結果を範囲で示している。 $(\epsilon_a)_{SA} \div 10^{-4}$ 以下のひずみレベルでは非排水载荷試験による E_{eq} は、排水载荷試験による

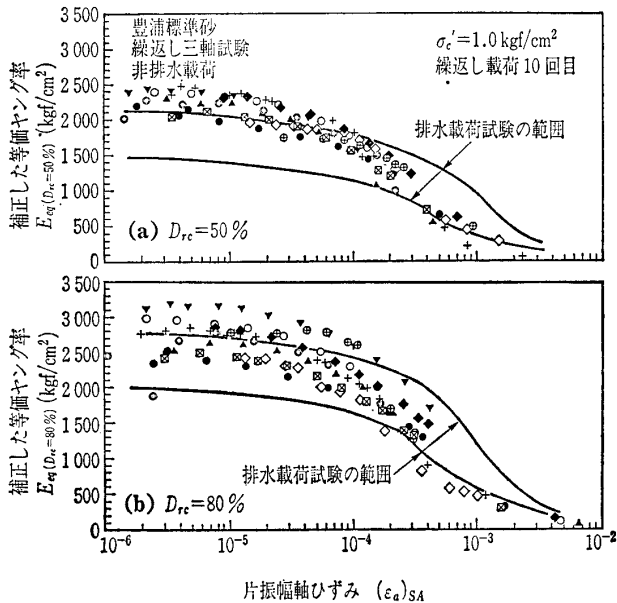
E_{eq} よりも高くなっている。ただし、 $(\epsilon_a)_{SA} \div 10^{-4}$ 以上になるとその関係は逆転している。これは、非排水条件での繰返し载荷では過剰間隙水圧が発生し有効応力が低下することが原因と考えられる。

図一（3）は、 $h \sim (\epsilon_a)_{SA}$ 関係を $D_{rc}=80\%$ の試験ケースについて示したものである。およそ 3×10^{-5} 以下の微小なひずみレベルでは、 h はほとんどゼロに近く各機関のばらつきも小さいが、ひずみレベルが大きくなり h が增大するとともに各機関のばらつきも大きくなっている。

図一（3）（b）にも、排水载荷試験での結果を範囲で示している。排水条件の相違を比較すると、微小ひずみレベルでは差はないが、 10^{-3} 以上では非排水载荷での h の増加が頭打ちになっており、低下する傾向も見られる。これは、繰返し载荷中に過剰間隙水



図—1 間隙比の補正を行った $E_{eq} \sim (\epsilon_a)_{SA}$ 関係 (排水載荷) (a) $D_{rc}=50\%$ (b) $D_{rc}=80\%$



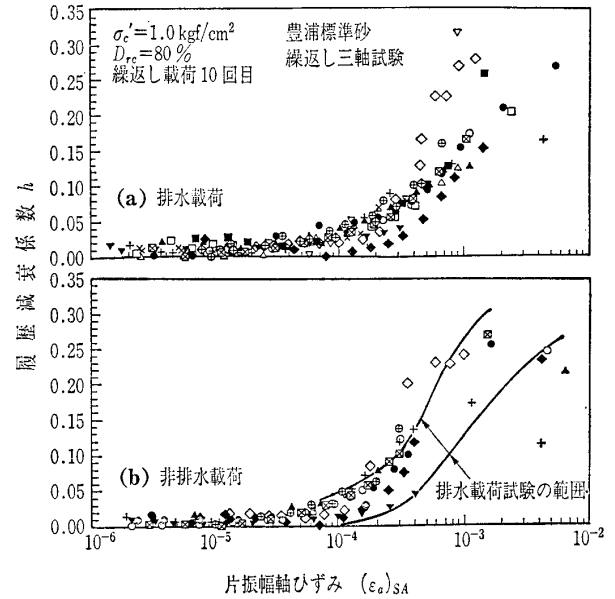
図—2 間隙比の補正を行った $E_{eq} \sim (\epsilon_a)_{SA}$ 関係 (非排水載荷) (a) $D_{rc}=50\%$ (b) $D_{rc}=80\%$

圧が発生し有効応力が変化するため、ヒステリシスループがS字型にゆがむためと考えられる³⁾。

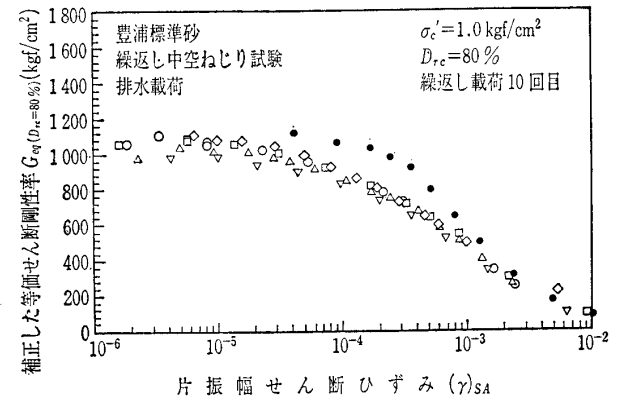
4. 豊浦砂の繰返しねじりせん断試験結果

図—4 に、報告された試験結果を密度補正した排水載荷試験での各載荷段階の繰返し載荷10サイクル目で求めた $G_{eq} \sim (\gamma)_{SA}$ 関係を相対密度 $D_{rc}=80\%$ の試験ケースについて示した。

報告された機関数が三軸試験と比較して少ないこともあるが、全体的に各機関のデータのばらつきは少ない。また、排水条件の影響を比較した図—5 か



図—3 $h \sim (\epsilon_a)_{SA}$ 関係 ($D_{rc}=80\%$) (a)排水載荷試験 (b)非排水載荷試験



図—4 間隙比の補正を行った $G_{eq} \sim (\gamma)_{SA}$ 関係 (排水載荷, $D_{rc}=80\%$)

ら、三軸試験結果と異なりねじり試験では、微小ひずみレベルでは排水条件の影響はほとんどない。

図—6 に、 $h \sim (\gamma)_{SA}$ 関係を相対密度 $D_{rc}=80\%$ (排水載荷)の試験ケースについて示した。 $h \sim (\gamma)_{SA}$ 関係は、 $G_{eq} \sim (\gamma)_{SA}$ 関係よりも各機関のデータのばらつきは非常に小さい。

5. 三軸試験とねじり試験の比較

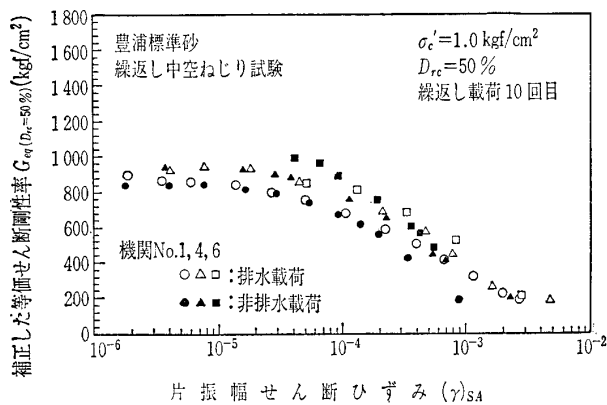
次に、三軸試験とねじり試験結果を比較する。なお、三軸試験は非排水繰返し載荷でのポアソン比 ν を 0.5 と仮定して下式から $G_{eq} \sim (\gamma)_{SA}$ 関係を求め、非排水載荷のねじり試験と比較した。

$$E_{eq} = 2(1 + \nu)G_{eq} \dots\dots\dots (3)$$

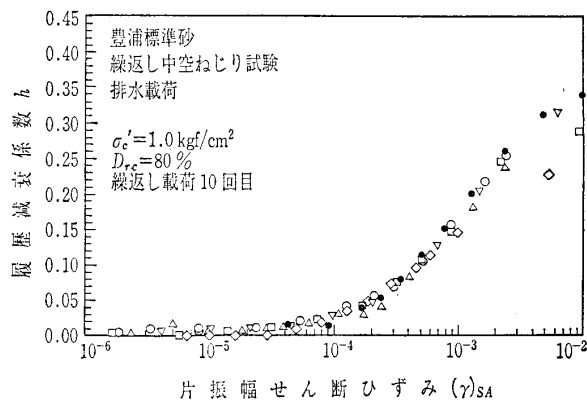
$$\gamma = (1 + \nu)\epsilon_a \dots\dots\dots (4)$$

図—7 に、報告されたすべての三軸試験とねじり

学会活動から



図—5 排水载荷試験と非排水载荷試験の比較
(機関 No.1, 4, 6)

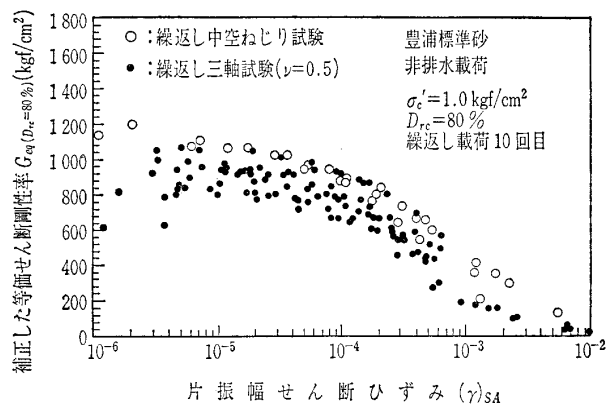


図—6 $h \sim (\gamma)_{SA}$ 関係 (排水载荷, $D_{rc}=80\%$)

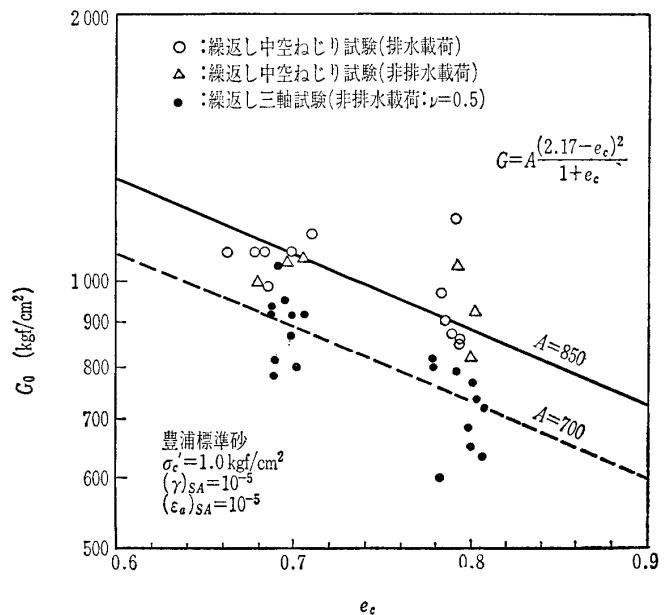
試験の結果 ($D_{rc}=80\%$) を示した。三軸試験よりもねじり試験による G_{eq} の方がどのひずみレベルでも大きくなっている。また、図—8 に $(\gamma)_{SA}=10^{-5}$ における $G_{eq}(G_0)$ と間隙比との関係を示したが、間隙比によらずねじり試験による G_0 は三軸試験による G_0 よりも確実に高く、密な場合の方がその差は大きい。3. でも述べたように、三軸試験において $D_{rc}=80\%$ の排水载荷の場合、供試体の局所軸変形から E_{eq} を求めた場合、キャップの変位から求めた E_{eq} よりも高くなることを示した。したがって、中空ねじり試験の G_{eq} が三軸試験よりも高くなった一つの要因として、三軸試験でのベディングエラーの影響が考えられる。ただし、それ以上の差が認められることから、非排水三軸試験での ν が 0.5 よりも低い可能性や、三軸試験とねじり試験の応力条件の相違の影響等が考えられる。

6. あとがき

今回の一斉試験結果を検討することによって、多くの貴重な成果が得られ、試験方法の基準化に対し



図—7 非排水三軸試験 ($\nu=0.5$) と非排水ねじり試験の比較 ($D_{rc}=80\%$)



図—8 非排水三軸試験 ($\nu=0.5$) と非排水ねじり試験の比較 ($G_0 \sim e_c$ 関係)

て有用な結果が得られたと思われる。

今回参加された23機関の関係各位には業務で忙しい中を、数十ページにも及ぶ試験結果の報告をいただき、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 土の動的変形定数試験方法基準化委員会：全国一斉試験試験仕様、地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性に関するシンポジウム論文集, pp. 103~126, 1994.
- 2) Tatsuoka, F. and Shibuya, S.: Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory tests, Proc. of 9th ARCSMFE, Vol. 2, pp. 101~170, 1992.
- 3) 安田 進・山口 勇：繰返し载荷中の排水条件が減衰定数に与える影響, 第18回土質工学研究発表会, pp. 505~506, 1983.

(文責：山下 聡)

(原稿受理 1994.6.22)

土と基礎, 42-11 (442)