

5. 地震波形に着目した液状化特性の実験的検討 (直下地震と液状化)

Experimental Study on Liquefaction Characteristics Attended to Earthquake Wave Form (Liquefaction Induced by Shallow Inland Type Earthquake)

三上武子, 迫 昌平, 畑山正則, 古田一郎

Takeko Mikami, Shohei Sako, Masanori Hatakeyama, Ichiro Furuta

Abstract

In the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, violent liquefaction was induced in reclaimed land which consists of Masado (decomposed granite soil), although the Masado was thought hard to liquefy till now. We think this liquefaction was induced by shock type earthquake waves which are peculiar to shallow inland type earthquake. So we investigated following features by laboratory test paying attention to a wave form of earthquake,

- 1) Correction factor $1/C_2$ about randomness of earthquake wave form,
- 2) Rise characteristics of excess pore water pressure,
- 3) Applicability of the cumulative damage concept.

In this test we used cyclic triaxial hollow cylindrical torsional shear apparatus. The materials were Toyoura standard sand and Masado which was used for reclamation of Kobe Port Island. Regarding wave form applied to test specimen, we used sine waves and actual earthquake waves. As the earthquake waves, we used two types of wave form. One was the shock type observed in Hyogo-ken Nanbu Earthquake at Kobe Port Island and the other was the vibrational type observed in Kushiro-oki Earthquake in 1993. As a results of experiments, the following spiritual awakening was obtained;

- 1) In case of Toyoura sand, the value of $1/C_2$ almost agreed with suggested value, but in case of Masado somewhat smaller value was obtained.
- 2) Before peak load, well relationship was found between shear stress ratio and the value of excess pore water pressure increment while shear stress wave passed. After peak load, the dispersion of relationship expanded somewhat larger than before peak load, and the dispersion was remarkable after excess pore water pressure ratio rise more than about 0.7 in which the strain begins to increase rapidly.
- 3) We applied cumulative damage concept in order to predict excess pore water pressure ratio subjected to earthquake waves. As a result it tend to underestimate excess pore water pressure ratio by using cumulative damage concept. In case of shock type wave, underestimation is more remarkable than that of vibrational type wave. But we think there is possibility as a practical use of cumulative damage concept because of its simplicity compared with another methods.

So it can be said that the liquefaction phenomenon caused by large acceleration or shock type waves is not different from sine wave or vibrational type wave essentially, and that conventional method evaluating liquefaction potential is available. But we must be careful that there is a difference in the correction factor according to its wave type.

1 まえがき

平成7年兵庫県南部地震（以下、「兵庫県南部地震」と略記する）では、ポートアイランド、六甲アイランド他の液状化現象および液状化による被害が話題になった。液状化現象に目を向けてみると、次の3点が今回の特徴としてあげられる。

- ① 液状化しにくいと考えられていたまさ土（埋立て材料）の液状化
- ② 直下地震での大加速度・衝撃的な波による液状化
- ③ 液状化による破壊・変形形態

上記3点の液状化発生メカニズムは、これまでに考えられていたメカニズムと異なるのであろうか。

材料あるいは波形が液状化発生に及ぼす影響については、新潟地震以降の初期の研究段階で実験的な取り組みが行われたが、その後は構成式、そして解析へとテーマが発展した。時代とともに試験装置、試験条件が著しく変わったにもかかわらず、基礎的な実験的研究がその後あまり行われていない。

以上のような背景のもとに、筆者らはいくつかの基礎的な実験を行い、今回の地震による液状化現象の特徴を実験的に検証することを考えている。ここでは、今回の地震が「都市近傍で発生した大加速度による直下地震」と特徴づけられることから、実際に観測された地震波形を用いて液状化試験を行った。試験装置は、原地盤の応力状態をより忠実に再現できる中空ねじりせん断試験装置を用いた。得られた実験結果から、地震波形のランダム性に関する補正係数、間隙水圧の上昇特性、および累積損傷度理論の適用性について検討を行った。

2 既往の研究

まず実験を行うに先立ち、不規則波形の取扱に関する基礎的な研究を調べた¹⁾。液状化に関する研究では、操作の簡便さから一様振幅の荷重を繰返し載荷する方法で実験を行う場合が多い。一方、地震動は不規則な荷重であるから、両者の関連づけが必要となる。これについて基礎的な研究は、Seedら（1983）²⁾ および石原ら（1975）³⁾ によってなされている。また、不規則波形を取り扱う一つの方法としてLeeら（1972）⁴⁾ は、累積損傷度の考え方を採用している。以下にそれらの考え方の概要を示す。

Seedらは、不規則な地震波形を、等価な一様振幅波形に変換し、等価繰返し回数 N_{eq} との組み合わせで地震動の強さを表している。最大せん断応力 τ_{max} の地震波形を τ_{max} の65%の大きさの振幅を持つ一様振幅波形と

表-1 0.65 τ_{max} に対応する等価繰返し回数

Table 1 Equivalent number of loading cycles corresponding to 0.65 τ_{max}

地震マグニチュード M	等価繰返し回数 N_{eq}
8-1/2	26
7-1/2	15
6-3/4	10
6	5
5-1/4	2~3

した場合、地震マグニチュードMとの間に表-1に示す関係を提案している。

石原らは、中空ねじりせん断試験装置で、正弦波および地震波形を用いた実験を行い、一様振幅波形と不規則波形の関連づけを行っている。地震波形を用いた実験結果から、最大せん断応力 τ_{max} と載荷後の過剰間隙水圧の関係性を求め、過剰間隙水圧比が1になる最大せん断応力 $\tau_{max,L}$ を求める。一方、正弦波を用いた実験結果から、繰返し回数20回の時に過剰間隙水圧比が1となるせん断応力 $\tau_{d,L}$ を求める。いくつかの地震波形について、両者の比 $(\tau_{d,L})/(\tau_{max,L})$ を求めると、衝撃型の波形の場合で0.55、振動型の波形の場合で0.70となる。ここで衝撃型の波形とは、最大せん断応力 τ_{max} が起こる側の波形のみを考え、 τ_{max} の60%以上の振幅を持つ波が、 τ_{max} が起こる以前に2つ以下の場合をさし、3つ以上ある場合が振動型の波形である。 $(\tau_{d,L})/(\tau_{max,L})$ の逆数は、地震波形のランダム性に関する補正係数 C_2 として、液状化の予測に用いられている。

Leeらは、金属材料の疲労破壊の分野で提案された累積損傷度の概念を応用している。すなわち、図-1(a)に示すように不規則波形中のせん断応力比 R_i をいくつかのレベルに分け、各レベルに含まれる波数を数える。一方、正弦波の載荷試験により液状化を起こす応力比と繰返し回数の関係を図-1(b)のように別途求めておくと、この関係によりあるレベルの応力比 R_i で液状化を起こす繰返し回数 N_{if} を求めることができる。このとき、 R_i の応力比の荷重が1波（1サイクル）作用した場合の液状化に寄与する度合いは $1/N_{if}$ であると考えられる。地震波形の場合、一波の中に含まれる逆位相の波形の振幅は異なっているのが普通であるので、これを半波（1/2サイクル）ごとにカウントする。応力比 R_i の半波の波が N_i 回作用した時の寄与は $N_i/(2N_{if})$ であり、地震波

形全体による累積損傷度Dはそれらの総計で次のように与えられる。

$$D = \sum (N_i / (2 N_{if}))$$

なお、累積損傷度理論についてはその後龍岡ら⁹⁾により詳細な研究が行われ、半波形を用いることによりかなり良い予測ができるとされている。

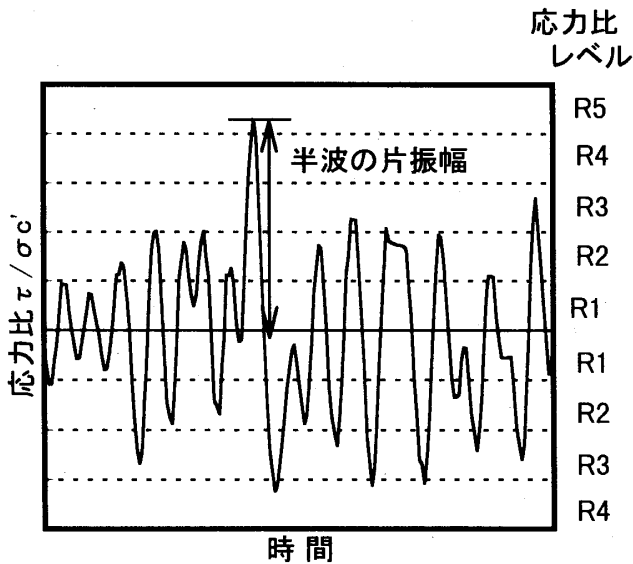
3 実験方法

3.1 実験材料

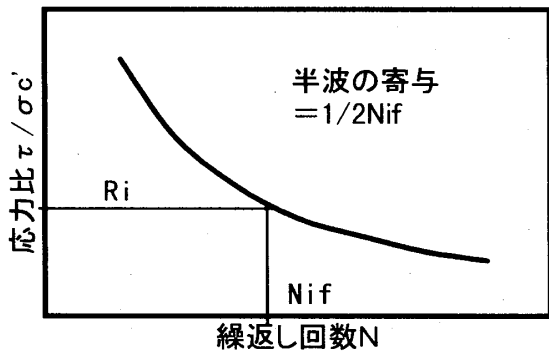
今回の実験には、神戸ポートアイランドI期工区内に埋立てられた“まさ土”と“豊浦標準砂”を使用した。まさ土は、今回の震災によって液状化現象が見られた岸壁背後埋土部の表層部より掘削により採取した。それら

の粒度特性を表-2に、粒径加積曲線を図-2に示す。まさ土の粒度特性は、図中に示すように最大粒径が約40mmの礫を含むが、平均粒径(D₅₀)が1.17mm、均等係数(U_c)が44で粒度配合の良い材料である。一方、豊浦標準砂の粒度特性は、均等係数(U_c)が2で極めて粒径の揃った細砂粒子を主体とした材料である。

まさ土については、使用する供試体(外径70mm、内径30mmの中空円筒)の関係から最大粒径を4.75mmに調整した。実験用に調整したまさ土の粒径加積曲線を図-3に破線で示した。同図には、ポートアイランドI期埋立て土の代表的な材料の粒度分布範囲⁶⁾を併記した。それによると、採取したまさ土は、ほぼ埋立て材料の粒度分布範囲にある。一方、室内実験用に調整した材料(最大粒径を4.75mm)についても、粒径の粗い範囲を除き、



(a)不規則なせん断応力波形



(b)正弦波載荷試験による液状化を起こす応力比と繰返し回数の関係

図-1 累積損傷度の考え方説明図

Fig.1 Explanation of cumulative damage concept

表-2 実験材料の粒度特性

Table 2 Grain size properties of test materials

材 料	粒 度								
	粒度構成率 (%)				粒 径 (mm)				
	レキ	砂	シルト	粘土	D60	D50	D30	D10	均等係数
まさ土	41	47	8	4	2.10	1.17	0.43	0.048	44
豊浦標準砂	-	100	-	-	0.21	0.19	0.16	0.12	2

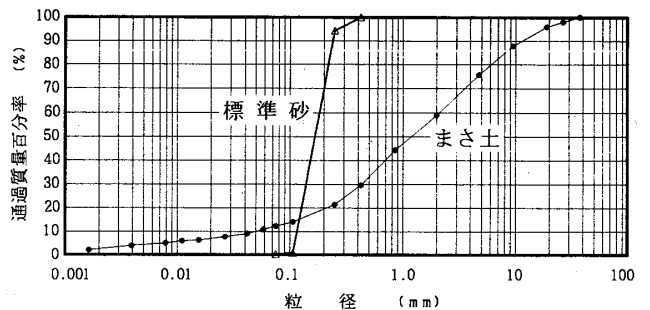


図-2 実験材料の粒径加積曲線

Fig.2 Grading curves of test materials

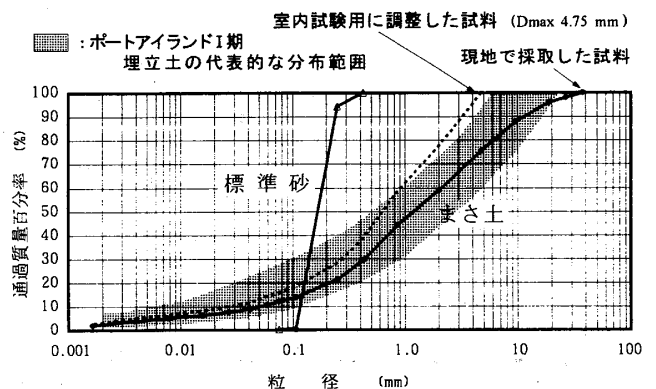


図-3 実験材料の粒径加積曲線 (粒度調整後)

Fig.3 Grading curves of test materials (Smaller than D=4.75mm)

ほぼI期埋立て土の粒度分布範囲に入っているの、実験結果を評価するうえで問題ないものであると判断できる。

3・2 実験密度の決定

(1) 最大・最小密度試験

実験用の密度を決定するため、豊浦標準砂ならびにまさ土の最大・最小密度を求めた。

豊浦標準砂に対しては「砂の最大密度・最小密度試験」結果から、緩い状態 (Dr=45%) と比較的密な状態 (Dr=80%) の二種類を実験用の密度として選定した。

一方、まさ土のようにレキや細粒分を多く含む材料に対しては上述した試験法が必ずしも適切な方法といえないため、ここでは幾つかの締固め方法によって、まさ土の最大・最小密度の測定を試みた。その結果を表-3にまとめて示す (図-4参照)。最大・最小密度は試験方法によって、大きく変化することがわかった。

埋立て (海中投下法) によって形成された地盤は、高い密度 (締固め度) になっていないことが予想されるものの、上述した密度試験結果から現場密度状態を予測することが困難であると判断した。そこで、図-4に示し

表-3 実験材料の最大・最小密度試験結果
Table 3 Maximum and minimum density of test materials

材 料	試験方法	最大密度 ρ_d (g/cm ³)	最小密度 ρ_d (g/cm ³)
まさ土	突き固め法	1.896	1.461
	ジッキング法	1.736	1.461
	水中落下法		乾燥試料 1.436 湿潤試料 1.500
	砂の最大密度 ・最小密度試験	1.523	1.257
豊浦標準砂	・最小密度試験	1.640	1.330

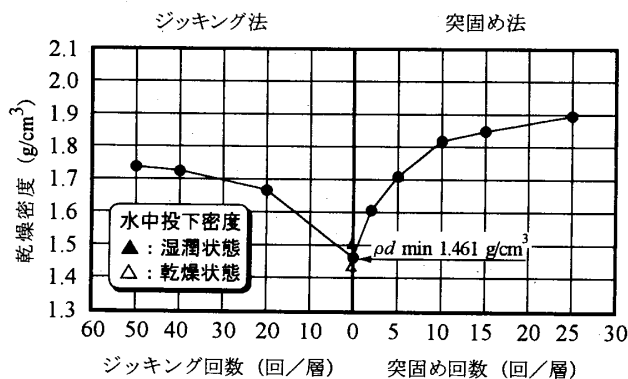


図-4 締固め試験結果

Fig.4 Results of compaction test

た“突固め法”の結果から三種類の密度を設定し、非排水三軸圧縮試験の応力経路から、相対的な密度状態を判断することとした。ここでは、緩い状態と密な状態およびその中間の密度として、1.60g/cm³、1.90g/cm³、1.75g/cm³の三種類の密度を設定した。

(2) 実験密度の決定のための静的非排水三軸圧縮試験
実験密度を決定するため、上記三種類の密度の供試体について、圧密圧力 1 kgf/cm² の下で静的非排水三軸圧縮試験を行った。

図-5に示した有効応力経路上には、密度の違いによる変化が明瞭に現れている。すなわち、締固め密度の増加により、せん断中におけるダイレイタンスの傾向が異なっている。一般に、液状化を生じやすい緩い飽和砂においては、せん断に伴い正の間隙水圧が発生するため、有効応力は減少し、破壊線近くで非常に小さい残留強度を示す。一方、密度が増加するにつれて、せん断に伴う正の間隙水圧の発生は減少し、破壊線に沿って強度増加を示すことが通常である。このような、静的せん断時の破壊傾向の違いから実験密度を相対的な密度の中間に設定し、以降の実験密度を $\rho_d=1.75\text{g/cm}^3$ とした。これは、突固め法によって得られた最大・最小密度を用いて計算した相対密度 (Dr) では約75%に相当する。

3・3 中空ねじり試験方法

実験は、中空ねじりせん断試験装置を用いて行った。装置の概要を図-6に示す。供試体形状は、外径70mm、内径30mm、高さ140mmの中空円筒である。豊浦標準砂の供試体は、空中落下法を用いて作製した。まさ土の供試体は、空中落下法を用いると高さ方向に粒度分布がばらつく可能性があるため、静的締固め法を用いて作製した。

実験は、圧密圧力 $\sigma'_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ で等方圧密した

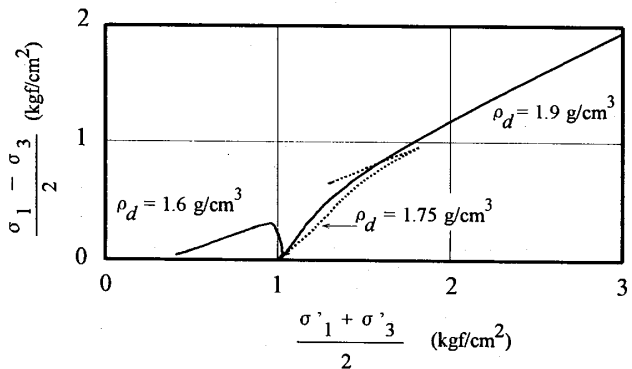


図-5 静的非排水せん断時の有効応力経路

Fig.5 Effective stress passes during static undrained shear test

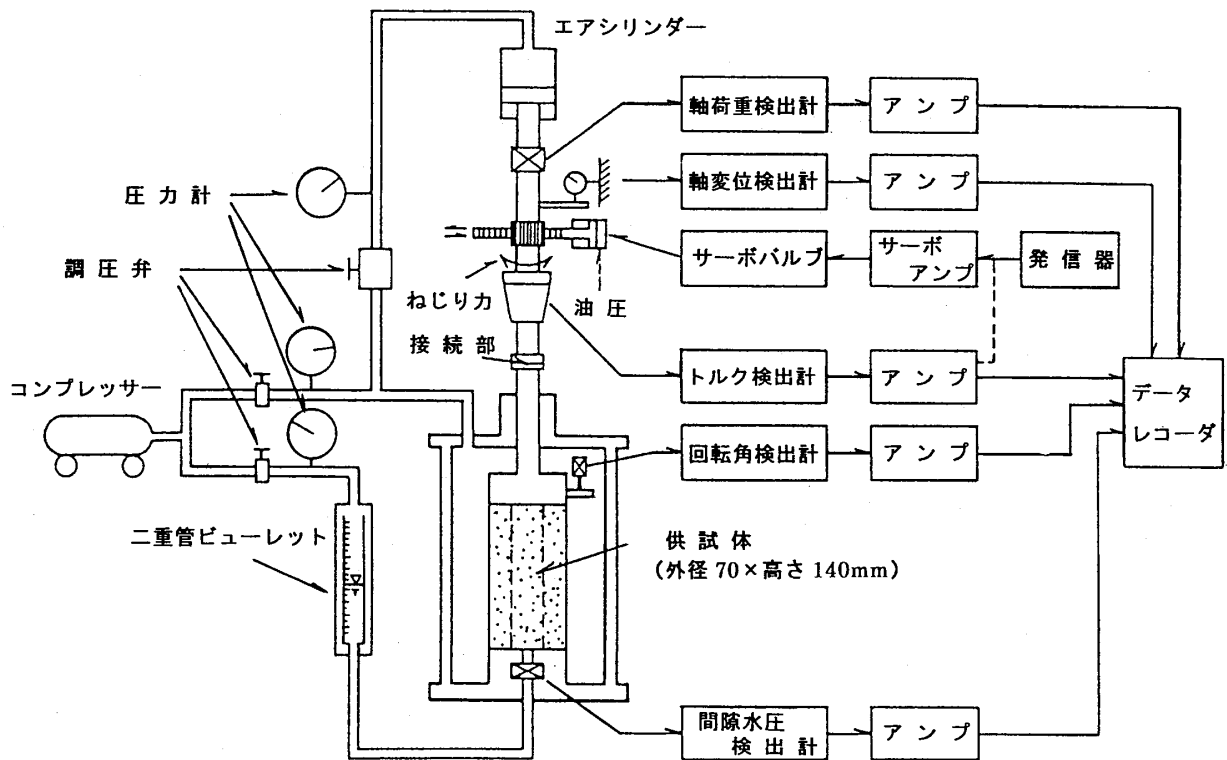


図-6 中空ねじりせん断試験装置概要図

Fig.6 Schematic diagram of arrangement of hollow cylindrical torsional shear testing apparatus

表-4 実験に用いた地震波形の諸元

Table 4 Outline of earthquake wave used in the tests

分類	地震	観測地点	最大加速度
衝撃型	1995年 兵庫県南部地震 (M=7.2)	ポートアイランド GL-32m	544gal
振動型	1993年 釧路沖地震 (M=7.8)	千代田橋	399gal

のち、繰返し载荷を行うものであり、1試料あたり5供試体を準備し、それぞれ異なるせん断応力振幅 τ で繰返し载荷を行った。なお、飽和条件はSkemptonのB係数が0.95以上とした。

繰返し载荷波形は、一様振幅波形として正弦波を用い、不規則波形として表-4に示した地震波形を用いた。表中の衝撃型、振動型の分類は2項で示した石原らの分類によった。実験に用いた地震波形の時刻歴図を図-7に示す。正弦波の载荷周波数は0.1Hzとした。地震波形は時間軸を10倍伸張して実験に用いた。

4 実験結果

4.1 時刻歴挙動

実験結果をまとめて表-5に示す。ここでは、繰返し载荷過程のせん断ひずみ、過剰間隙水圧の挙動に着目してデータを見ることにする。

(1) 正弦波を用いた実験結果

正弦波を用いた実験から得られた時刻歴図、応力経路図、応力~ひずみ曲線の一例を図-8~10に示す。

1) 豊浦標準砂 $Dr=45\%$ の場合

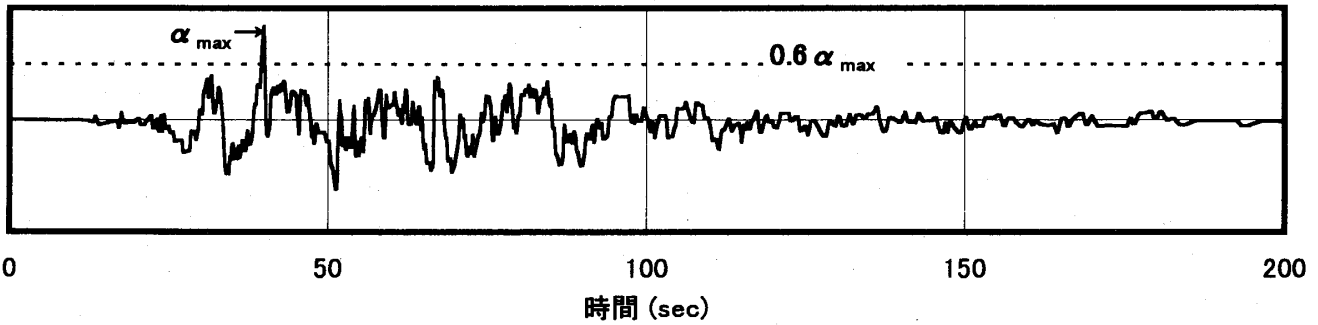
時刻歴図を見ると、過剰間隙水圧は繰返し回数を重ねるごとに蓄積されており、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'c$ が0.6~0.7に達した時点で、せん断ひずみ γ が急増する。そして、 $\Delta u/\sigma'c$ が1に達すると、 $\gamma_{DA}=10\%$ を越える大変形を生じ、破壊に至る。この傾向は、応力経路図、応力~ひずみ曲線からも見ることができる。有効応力は徐々に減少して行くが、A点以降急激に有効応力が減少し、大変形が生じていることがわかる。

2) 豊浦標準砂 $Dr=80\%$ の場合

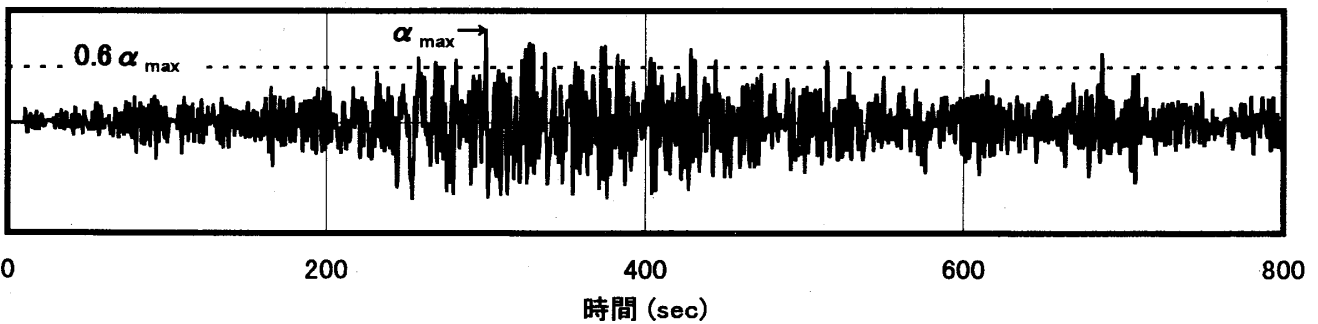
$Dr=80\%$ の場合のせん断ひずみの挙動は、 $Dr=45\%$ のような急増点は見られず、徐々に増加していく。 $\Delta u/\sigma'c$ が1に達した時点での γ_{DA} は4%程度しか発生していない。繰返し载荷をさらに続けると、せん断ひずみは増幅していくが、増幅はやがて収束する。応力経路図を見ると、 $\Delta u/\sigma'c$ が1に達してもせん断応力を加えると負の過剰間隙水圧が発生して有効応力が回復していることがわかる。

3) まさ土 $Dr=75\%$ の場合

過剰間隙水圧は繰返し回数を重ねるごとに蓄積をする



(a)地震波形(衝撃型) 1995年兵庫県南部地震 ポートアイランド-32m NS成分



(b)地震波形(振動型) 1993年釧路沖地震 千代田橋

図-7 実験に用いた地震波形

Fig. 7 Earthquake wave used in the tests

表-5 実験結果一覧

Table 5 Summarizing table of test results

(a) 正弦波

材料	No.	Drc(%)	$\tau_{max}/\sigma'c$	$N_{DA=3\%}$	$N_{DA=7.5\%}$	$N_{DA=15\%}$	$N_{\Delta u/\sigma'c=1}$
豊浦標準砂 Dr=45%	1	49.54	0.151	43.0	44.0	45.0	44.0
	2	45.40	0.216	2.6	3.0	4.0	3.0
	3	45.13	0.115	119.0	120.0	121.0	119.0
	4	45.39	0.181	14.0	14.5	16.0	14.0
	5	46.06	0.196	6.5	7.0	8.0	7.0
豊浦標準砂 Dr=80%	1	73.84	0.349	3.5	7.0	16.0	5.0
	2	78.21	0.273	12.5	17.5	32.0	13.0
	3	78.57	0.487	2.0	6.0	18.0	3.0
	4	77.76	0.220	63.0	68.0	92.0	63.0
	5	77.51	0.593	1.0	3.5	10.0	3.0
まさ土 Dr=75%	1	77.35	0.233	33.0	35.0	37.0	35.0
	2	75.18	0.287	7.5	9.0	10.0	10.0
	3	75.90	0.342	5.0	6.0	7.0	7.0
	4	75.90	0.220	67.0	71.0	72.0	71.0
	5	76.87	0.498	1.0	2.0	3.0	3.0

表中Drcは圧密終了時における相対密度

(b) 地震波形(衝撃型)

材料	No.	Drc(%)	$\tau_{max}/\sigma'c$	$\Delta u_{max}/\sigma'c$
豊浦標準砂 Dr=45%	1	43.56	0.273	0.514
	2	44.46	0.326	0.998
	3	45.32	0.322	0.632
	4	45.41	0.301	1.000
	5	44.87	0.260	0.234
豊浦標準砂 Dr=80%	1	77.45	0.408	0.519
	2	77.34	0.459	0.816
	3	77.85	0.516	1.000
	4	78.04	0.374	0.288
	5	78.46	0.311	0.243
まさ土 Dr=75%	1	74.85	0.371	0.278
	2	75.59	0.412	0.431
	3	76.60	0.455	0.508
	4	75.70	0.539	0.943
	5	75.26	0.493	0.684

表中Drcは圧密終了時における相対密度

(c) 地震波形(振動型)

材料	No.	Drc(%)	$\tau_{max}/\sigma'c$	$\Delta u_{max}/\sigma'c$
豊浦標準砂 Dr=45%	1	43.55	0.228	0.999
	2	45.81	0.199	0.206
	3	45.27	0.215	0.398
	4	44.88	0.225	0.385
	5	45.15	0.232	0.278
豊浦標準砂 Dr=80%	1	78.57	0.314	0.306
	2	78.25	0.343	0.992
	3	78.79	0.330	0.391
	4	78.69	0.353	0.992
	5	78.39	0.254	0.158
まさ土 Dr=75%	1	76.06	0.308	0.414
	2	75.17	0.246	0.255
	3	74.88	0.350	0.580
	4	75.73	0.413	0.981
	5	73.74	0.378	0.995

表中Drcは圧密終了時における相対密度

が、急増点は見られず、なめらかに蓄積していく。
 $\Delta u/\sigma'c$ が1に達した時点の γ_{DA} は7.5~10%である。

(2) 地震波形を用いた実験結果

1) 衝撃型の地震波形の場合

衝撃型の地震波形を用いた実験のうち、過剰間隙水圧比 $\Delta u_{max}/\sigma'c$ が1に達した結果(1に達しない場合は同一材料の中で $\Delta u_{max}/\sigma'c$ が最大の結果)の時刻歴図、応力経路図、応力~ひずみ曲線の一例を図-11~13に示

す。正弦波の場合と異なり、過剰間隙水圧は漸増するのではなく、段階的に蓄積していく。いずれの材料においても最大せん断応力 τ_{max} 載荷時に大きな過剰間隙水圧が一気に発生している。応力経路図を見ると、 τ_{max} の除荷、反転時(B, C, D点)に大きな過剰間隙水圧が発生していることがわかる。

豊浦標準砂Dr=45%の場合には、 τ_{max} 載荷時に過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'c$ は0.8に達している。このときのせ

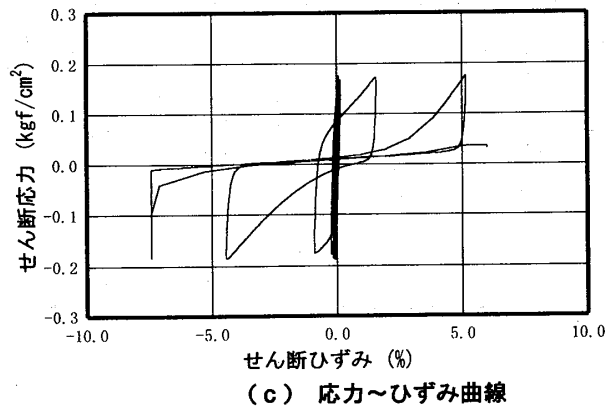
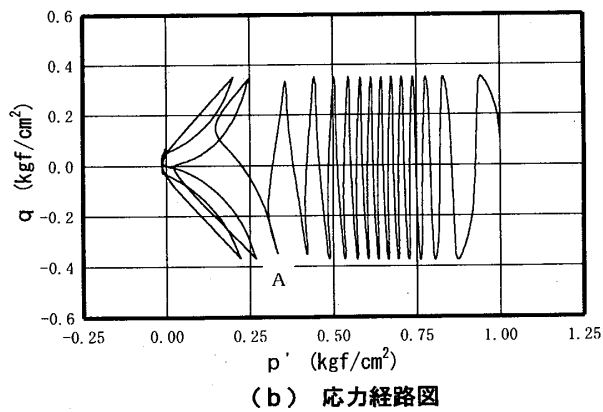
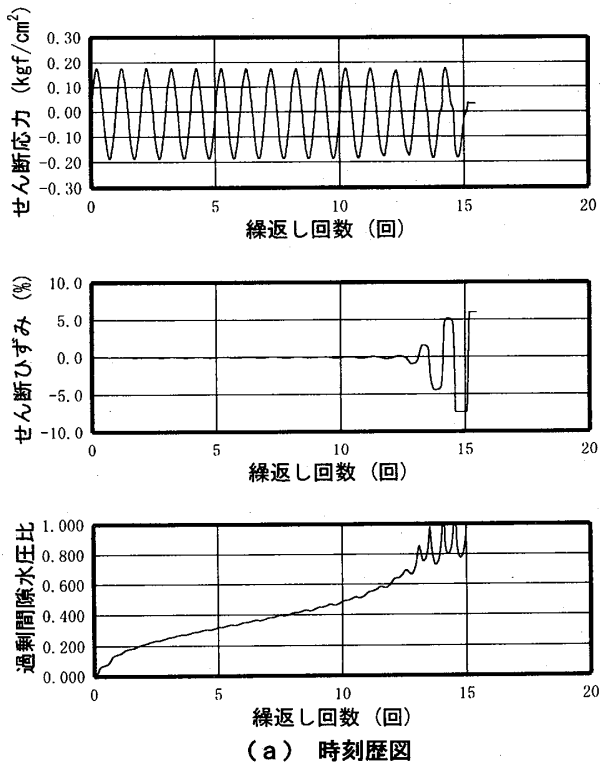


図-8 正弦波載荷時の記録例 (豊浦砂 : Dr=45%)

Fig. 8 Typical record for the case of sine wave loading (Toyoura sand : Dr=45%)

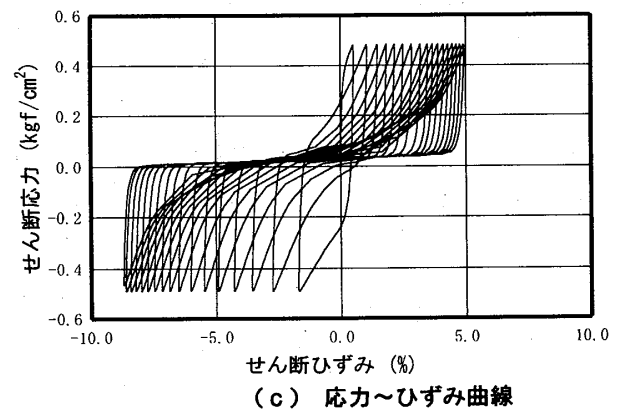
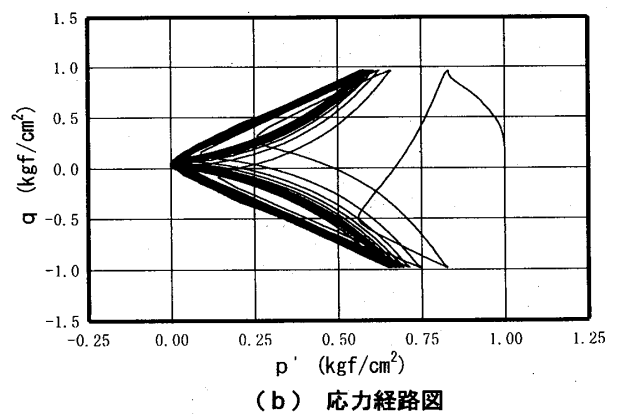
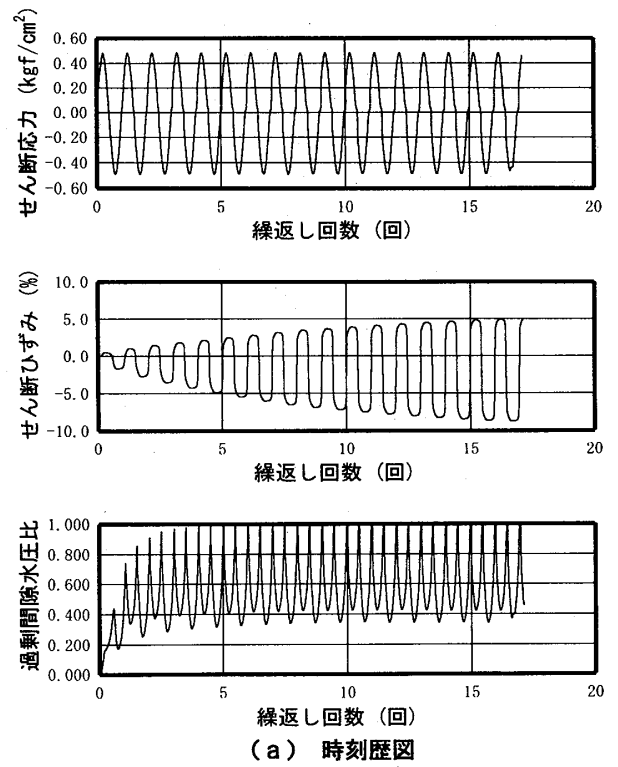


図-9 正弦波載荷時の記録例 (豊浦砂 : Dr=80%)

Fig. 9 Typical record on the case of sine wave loading (Toyoura sand : Dr=80%)

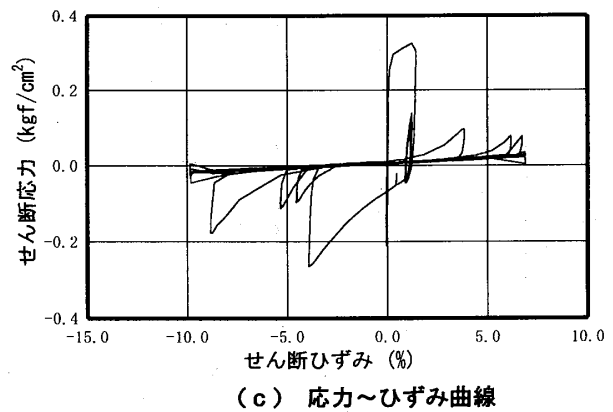
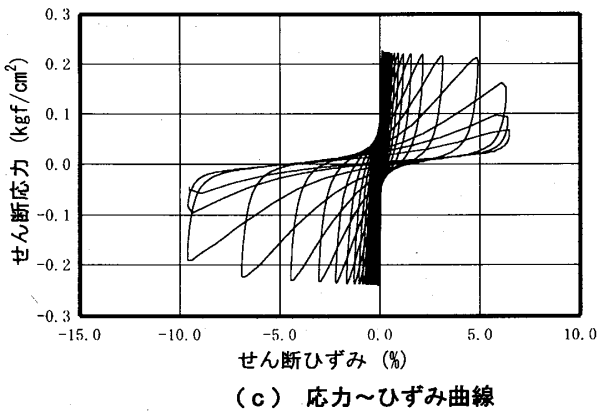
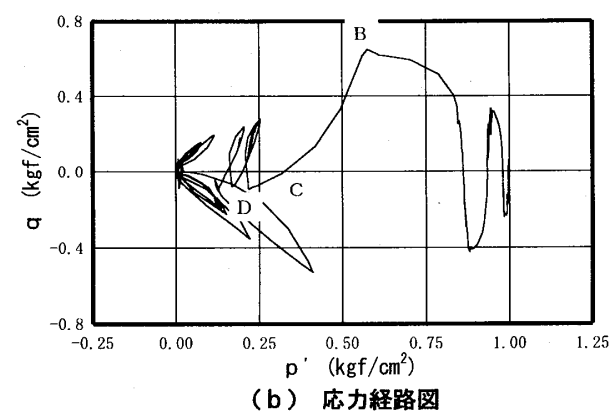
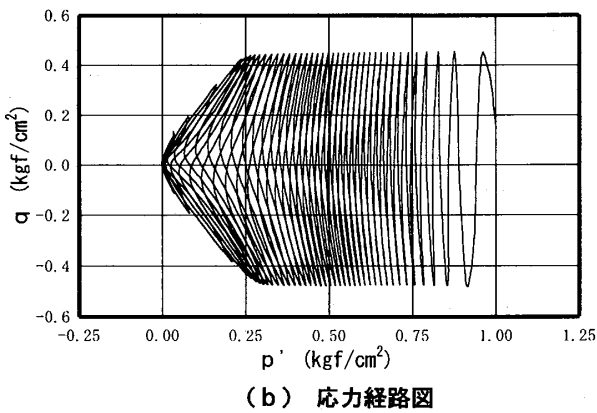
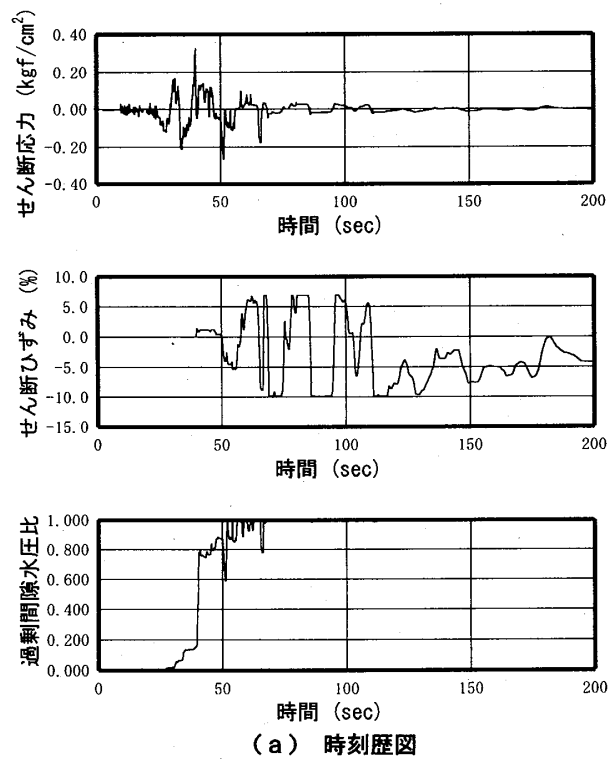
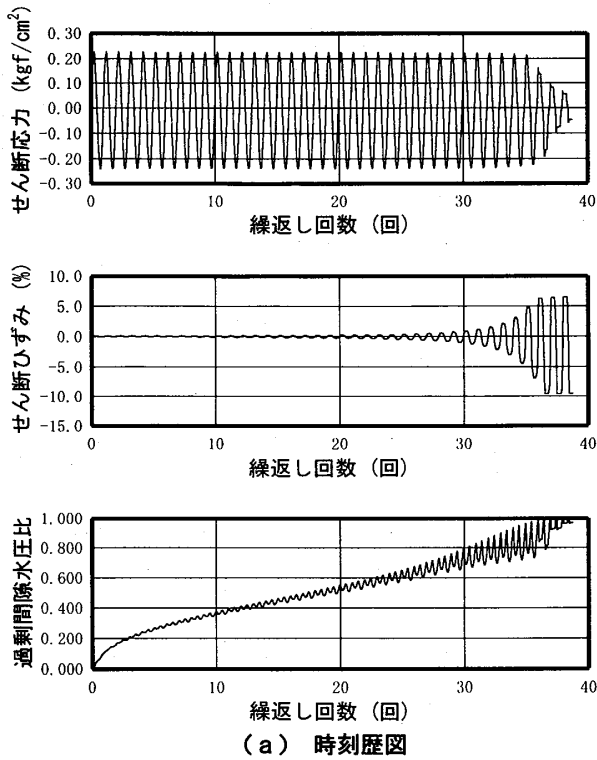


図-10 正弦波載荷時の記録例 (まさ土 : $Dr=75\%$)
 Fig.10 Typical record on the case of sine wave loading (Masado : $Dr=75\%$)

図-11 衝撃型地震波載荷時の記録例 (豊浦砂 : $Dr=45\%$)
 Fig.11 Typical record for the case of shock type earthquake wave loading (Toyoura sand : $Dr=45\%$)

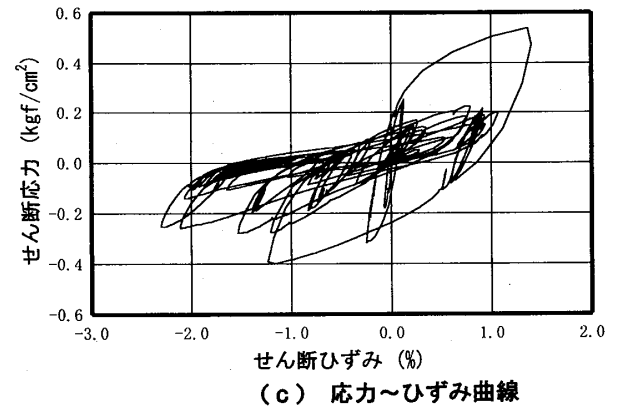
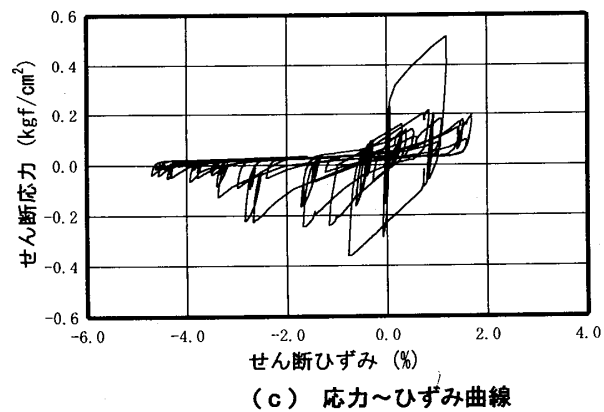
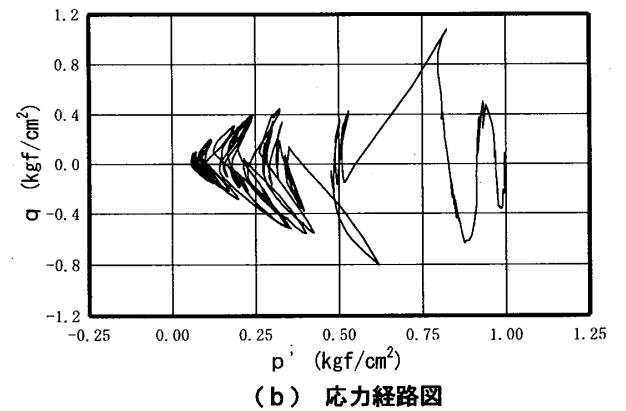
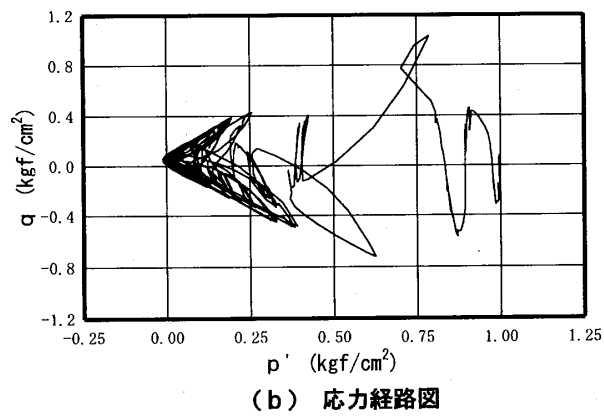
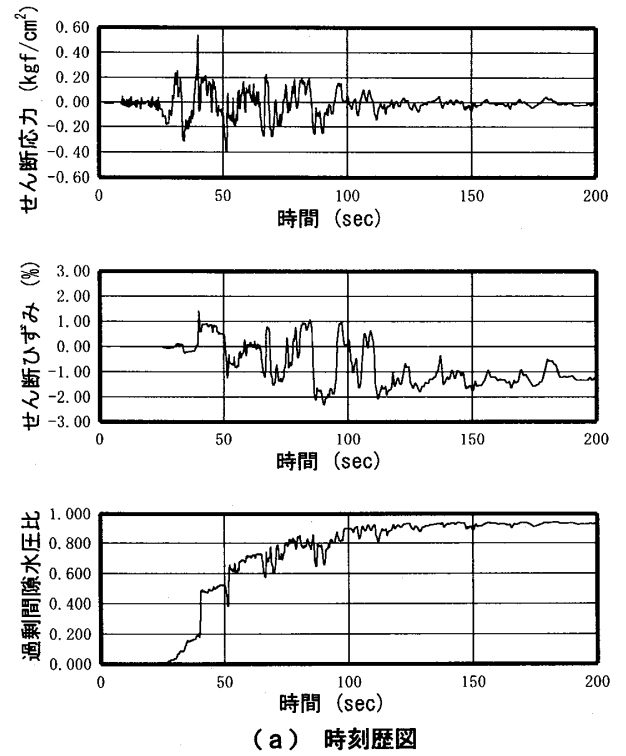
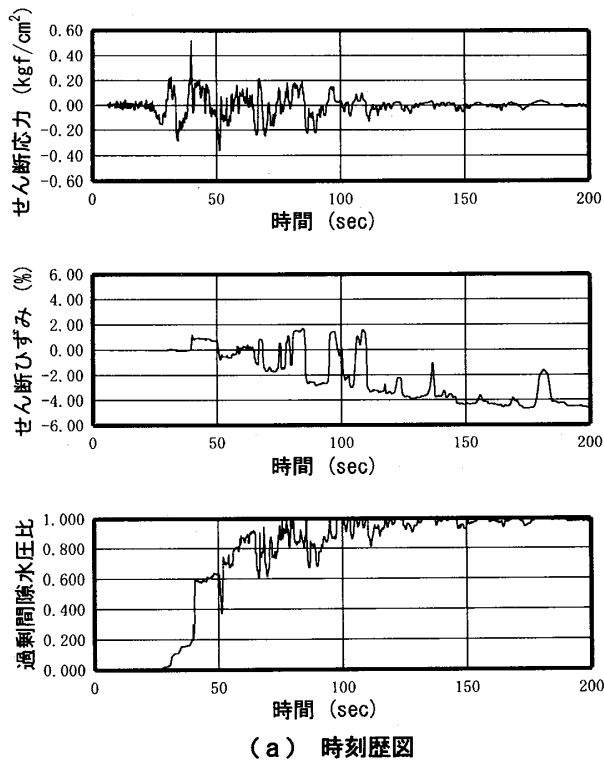


図-12 衝撃型地震波載荷時の記録例 (豊浦砂 : $Dr=80\%$)
 Fig. 12 Typical record for the case of shock type earthquake wave loading (Toyoura sand : $Dr=80\%$)

図-13 衝撃型地震波載荷時の記録例 (まさ土 : $Dr=75\%$)
 Fig. 13 Typical record on the case of shock type earthquake wave loading (Masado : $Dr=75\%$)

せん断ひずみ γ_{DA} は 2% ほどであるが、 $\Delta u/\sigma'c$ が 1 に達すると γ_{DA} は 10% を越え、その後大変形を生じ破壊に至る。一方、豊浦標準砂 $Dr=80\%$ の場合には、 τ_{max} 載荷時の $\Delta u/\sigma'c$ は 0.6 であり、 γ_{DA} は 1% 程度である。 $\Delta u/\sigma'c$ が 1 に達した時点での γ_{DA} は 5% に満たない。同様にまさ土 $Dr=75\%$ の場合も、 τ_{max} 載荷時の $\Delta u/\sigma'c$ は 0.5、 γ_{DA} は 1.5% であり、 γ_{DAmax} は 3% と 3 材料の中では一番小さい。

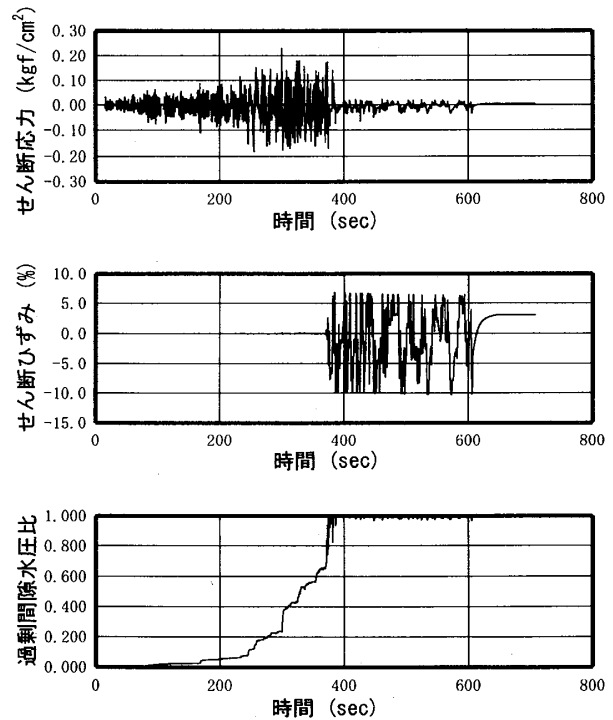
2) 振動型の地震波形の場合

振動型の地震波形を用いた実験から得られた時刻歴図、応力経路図、応力～ひずみ曲線の一例を図-14～16に示す。過剰間隙水圧は、段階的に蓄積するが、衝撃型の地震波形の場合ほど顕著ではない。また、豊浦標準砂に比べると、まさ土の方がなめらかに蓄積していくことがわかる。いずれの材料においても、 τ_{max} 載荷時に $\Delta u/\sigma'c$ は 0.4 程度で、せん断ひずみはほとんど発生していない。豊浦標準砂 $Dr=45\%$ の場合には、 $\Delta u/\sigma'c$ が 1 に達すると同時にせん断ひずみが発生し、一気に破壊に至る。豊浦標準砂 $Dr=80\%$ の場合には、 $\Delta u/\sigma'c$ が 0.8 に達する前後からせん断ひずみが発生するが、急激に増幅するのではなく漸増する。まさ土 $Dr=75\%$ の場合には、 $\Delta u/\sigma'c$ が 0.7 に達する前後からせん断ひずみが発生する。いずれの材料においても、せん断ひずみの挙動は、正弦波を用いた実験結果の挙動に似た傾向を示す。

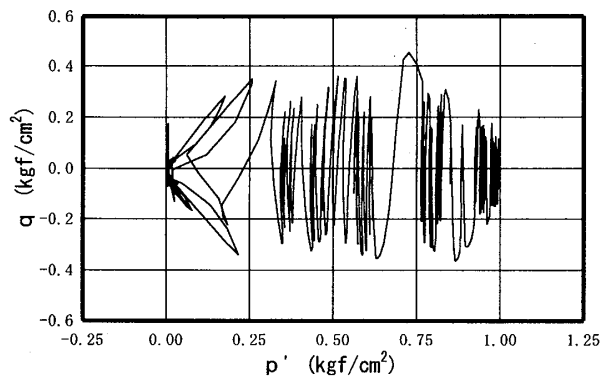
4・2 一般的な強度評価

(1) 正弦波を用いた実験結果

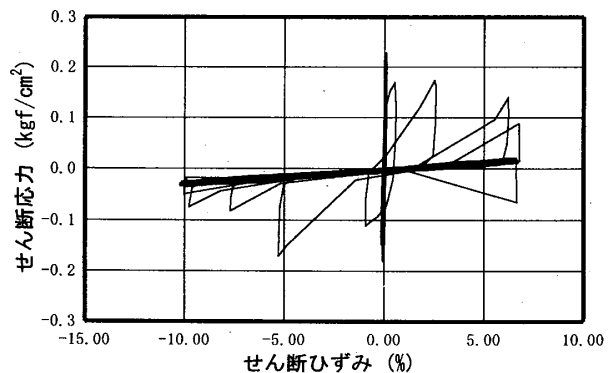
液状化発生時点の判断方法は、今日まで様々な方法が提案されている。主な考え方を表-6に示す。ここでは、せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{DA} = 3\%, 7.5\%, 15\%$ 、および過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'c = 1$ (1 に達しない場合は、 $\Delta u/\sigma'c$ の増加が見られず、一定値に落ち着いたときの値) の 4 つの規準で整理を行った。応力比 (せん断応力 τ_d と圧密圧力 $\sigma'c$ の比) と、各々の規準で液状化に達した繰返し回数との関係を、図-17に示す。また、同図から 4 つの規準について、繰返し回数 20 回で液状化に達する応力比 $\tau_{dL}/\sigma'c$ を読みとり、表-7に示した。過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'c = 1$ を規準とした場合の $\tau_{dL}/\sigma'c$ は、豊浦標準砂 $Dr=45\%$ では 0.171、豊浦標準砂 $Dr=80\%$ では 0.252、まさ土 $Dr=75\%$ では 0.248 である。表より、ゆる詰め材料の場合には、どの規準を用いても液状化発生時点の応力比に大差ないが、密詰めの場合には、液状化発生時点での応力比がかなり異なってくる。特に、 $\gamma_{DA}=15\%$ を液状化の規準とした場合は、他の規準で得られた応力比と大きく異なっている。密詰め材



(a) 時刻歴図

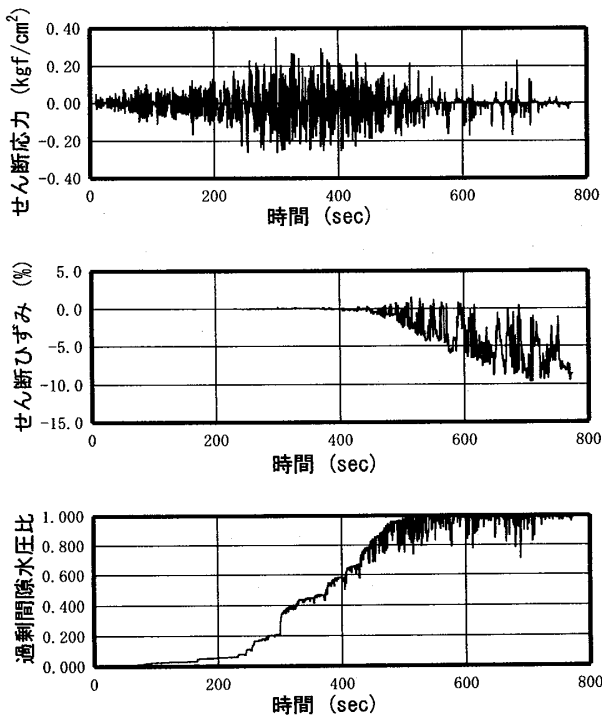


(b) 応力経路図

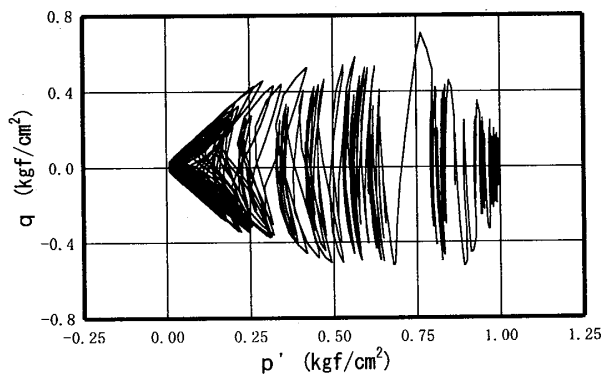


(c) 応力～ひずみ曲線

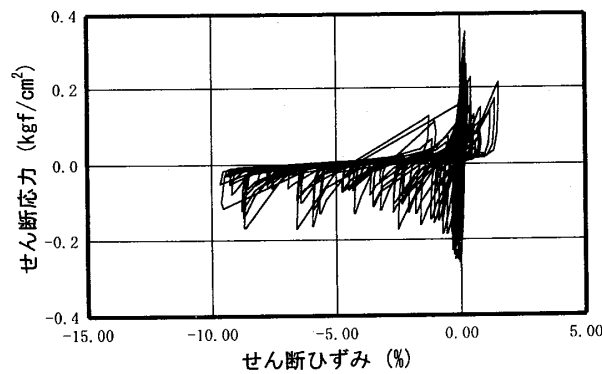
図-14 振動型地震波載荷時の記録例 (豊浦砂 : $Dr=45\%$)
Fig.14 Typical record for the case of vibrational type earthquake wave loading (Toyoura sand : $Dr=45\%$)



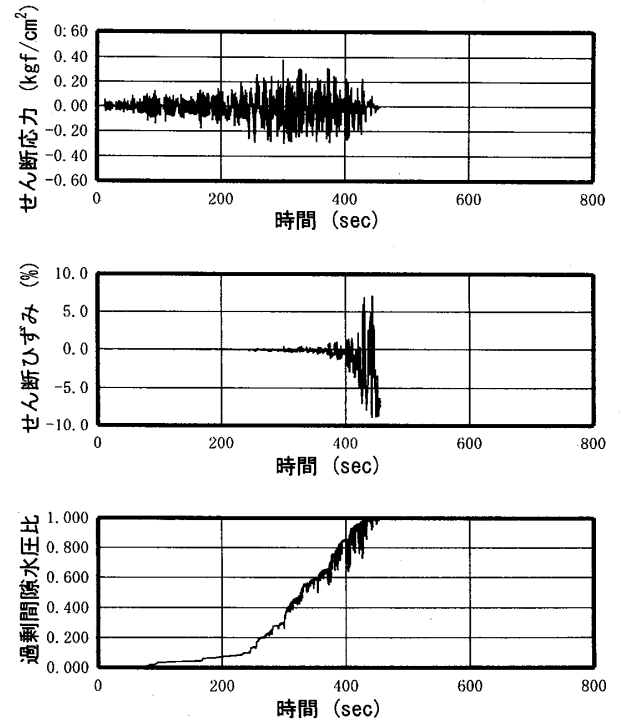
(a) 時刻歴図



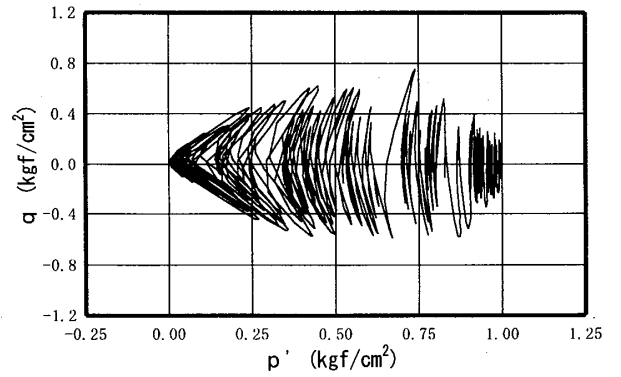
(b) 応力経路図



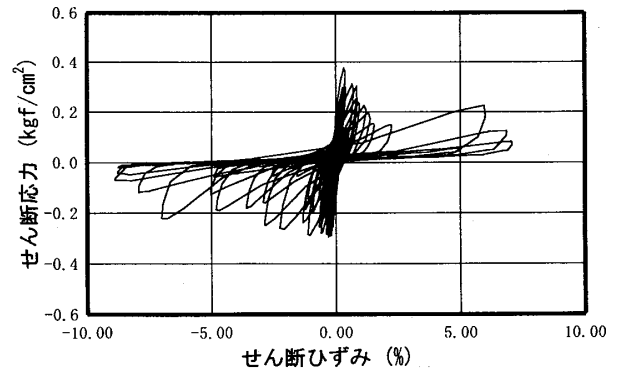
(c) 応力～ひずみ曲線



(a) 時刻歴図



(b) 応力経路図



(c) 応力～ひずみ曲線

図-15 振動型地震波載荷時の記録例 (豊浦砂 : $Dr=80\%$)
 Fig.15 Typical record for the case of vibrational type earthquake wave loading (Toyoura sand : $Dr=80\%$)

図-16 振動型地震波載荷時の記録例 (まさ土 : $Dr=75\%$)
 Fig.16 Typical record for the case of vibrational type earthquake wave loading (Masado : $Dr=75\%$)

表-6 液状化時点の判断方法
Table 6 Various methods of judgment for liquefaction

着目点	液状化時点の判断方法	判断方法がとられている理由
ひずみ	ひずみ振幅の急増点	破壊現象が生じ始めるとの考え
ひずみ	軸ひずみ両振幅(DA)=5%	構造物が被害を受けるひずみに達したのではないかと考え
ひずみ	軸ひずみ両振幅10~25%	大ひずみが生じ、構造物は必ず被害を受けるのではとの考え
間隙水圧	急増し始める点	液状化し始めたとの考え
間隙水圧	飛び出し現象が生じ始める時点	液状化し始めたとの考え
間隙水圧	$\Delta u/\sigma'c=1$ (または一定値)に達した時点	有効拘束圧が0となり、液状化したとの考え

表-7 液状化の発生に必要な応力比
Table 7 Cyclic stress ratio required for liquefaction

材料	正弦波 (N=20の場合)				地震波形($\Delta u/\sigma'c=1$)	
	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$	$\gamma_{DA}=15\%$	$\Delta u/\sigma'c=1$	衝撃型	振動型
豊浦砂Dr45%	0.168	0.171	0.173	0.171	0.315	0.230
豊浦砂Dr80%	0.248	0.274	0.350	0.252	0.500	0.350
まさ土Dr75%	0.246	0.247	0.249	0.248	0.540	0.400

料の場合は、粒子と粒子のかみ合わせが強固なため、有効拘束圧が0となっても、粒子はバラバラにならず、変形しにくいものと考えられる。対象とする材料および相対密度により、規準の選定が必要であると思われる。

豊浦標準砂Dr=45%の場合の応力比~繰返し回数関係は非常にゆるやかな勾配を示している。わずかな応力比の差で、液状化に達する繰返し回数が大きく異なり、応力比に敏感な材料であるといえる。一方、豊浦標準砂Dr=80%、まさ土Dr=75%の場合の応力比~繰返し回数関係は、繰返し回数N=10~40前後で折れ曲がった曲線となっている。

(2) 地震波形を用いた実験結果

地震波形を用いた実験では、(1)で示した応力比~繰返し回数の関係にまとめることができない。そこで、応力比 $\tau_{max}/\sigma'c$ と過剰間隙水圧比 $\Delta u_{max}/\sigma'c$ の関係にまとめた。結果を図-18に示す。豊浦標準砂Dr=45%の場合には、過剰間隙水圧の上昇は $\tau_{max}/\sigma'c$ に敏感で、 $\Delta u_{max}/\sigma'c=0.6$ 以上の範囲では、 $\tau_{max}/\sigma'c$ のわずかな差で、液状化を生じたり生じなかったりする。図から $\Delta u_{max}/\sigma'c$ が1になる応力比 $\tau_{max,L}/\sigma'c$ を求め、表-7に示した。これらの応力比が正弦波の応力比に換算すると何波に相当するか調べた。衝撃型の地震波形の場合、豊浦標準砂Dr=45%では0.1波に、豊浦標準砂

Dr=80%では3波に、まさ土Dr=75%では2.5波に相当する。同様に振動型の地震波形の場合には、それぞれ2波、6波、4波に相当する。

5 考察

5・1 地震波形のタイプによる応力比の違い

4・2(2)の地震波形を用いて得られた $\Delta u_{max}/\sigma'c$ が1になる応力比 $\tau_{max,L}/\sigma'c$ の値をグラフに示すと図-19のようになる。これより、今回実験した3つのケースのいずれについても、衝撃型の波形の方が振動型の波形の場合よりも応力比が大きいことがわかる。大きさの度合は図中に示したように1.35倍から1.43倍の範囲である。このことは、今回の兵庫県南部地震のような内陸型直下地震の波形(衝撃型波形)の場合には、プレート境界型地震の波形(振動型波形)の場合に比べて応力比(動的せん断強度比)を1.4倍程度割り増しして考えなければならないことを示している。

5・2 地震波形のランダム性に関する補正係数の検討

ここでは、液状化に必要な応力比について、正弦波を用いた実験結果と地震波形を用いた実験結果を比較することにより、両者の間の補正係数 $1/C_2$ について検討する。表-7に示した応力比から、 $(\tau_{aL}/\sigma'c)/$

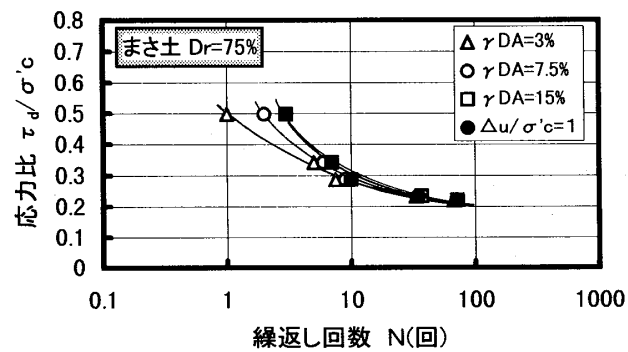
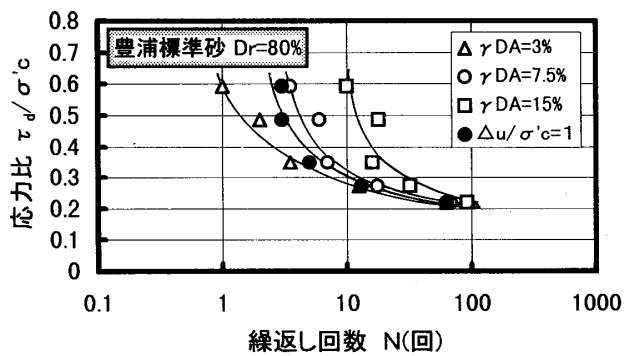
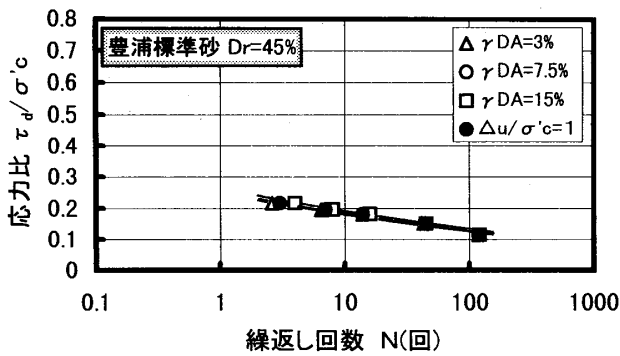


図-17 応力比と繰返し回数の関係 (正弦波載荷時)
Fig. 17 Relationships between cyclic stress ratio and number of loading cycles required to liquefaction by sine wave loading

($\tau_{max,L}/\sigma'_c$) (以下 $1/C_2$ と記す) を求めると、表-8 のようになる。図-20にはこれらをグラフに示した。石原ら³⁾によると、ゆる詰めめの富士川砂を用いた実験から $1/C_2$ は衝撃型の場合0.55, 振動型の場合0.70であると報告されている。国生ら⁷⁾は、密な砂の場合には上記の値より小さくなると指摘している。また、龍岡ら⁵⁾は C_2 は密度の関数になっていると報告している。今回の実験結果から得られた $1/C_2$ は、豊浦標準砂 $Dr=45\%$ では衝撃型の場合に0.543, 振動型の場合に0.743, 豊浦標準砂 $Dr=80\%$ では、衝撃型の場合に0.504, 振動型の場合に0.720であり、石原らの報告と大差ない結果が得られた。また、密度の影響については、密なほど $1/C_2$

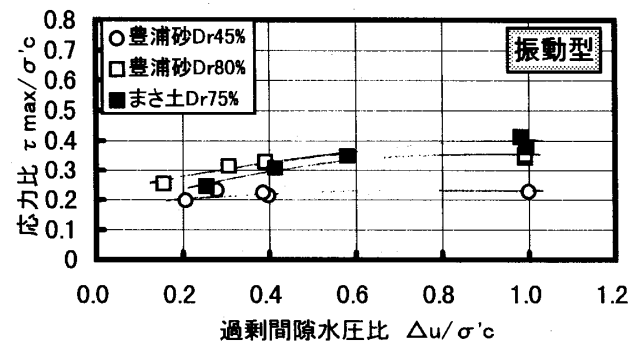
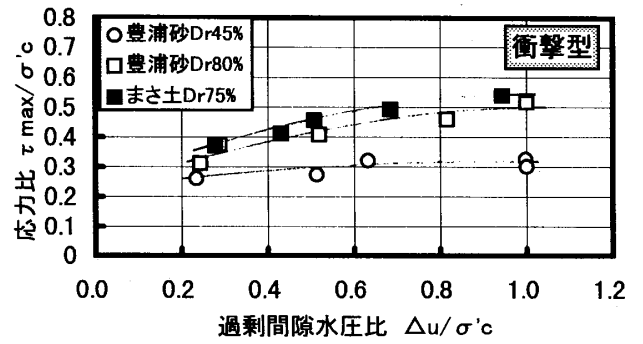


図-18 応力比と過剰間隙水圧比の関係 (地震波形載荷時)
Fig. 18 Relationships between cyclic stress ratio and excess pore water pressure ratio by earthquake wave loading tests

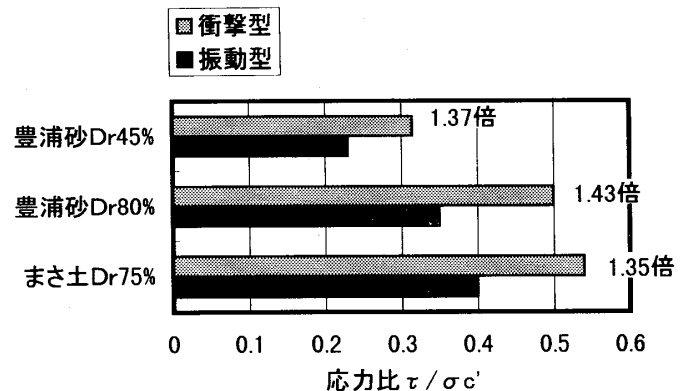


図-19 液状化に必要な応力比 (地震波形の場合)
Fig. 19 Cyclic stress ratio required for liquefaction (In case of earthquake wave)

の値は小さい傾向が見られる。まさ土 $Dr=75\%$ では、衝撃型の場合に0.459, 振動型の場合に0.620と、豊浦標準砂に比べて小さい値である。仮に、 $1/C_2$ は相対密度のみに依存すると考えるならば、この値は豊浦標準砂から予測される値よりもかなり小さいとすることができる。このことから、 $1/C_2$ は相対密度のみならず、材料の違いの影響を受ける可能性があると考えられる。今回、まさ土については1種類の密度についてしか実験を行っていないため、材料の違いについては断定的なことはいえ

表-8 $1/C_2 (= (\tau_{d,L}/\sigma'c)/(\tau_{max,L}/\sigma'c))$ の値
Table 8 Value of $1/C_2 (= (\tau_{d,L}/\sigma'c)/(\tau_{max,L}/\sigma'c))$

材料	衝撃型	振動型
豊浦砂Dr45%	0.543	0.743
豊浦砂Dr80%	0.504	0.720
まさ土Dr75%	0.459	0.620

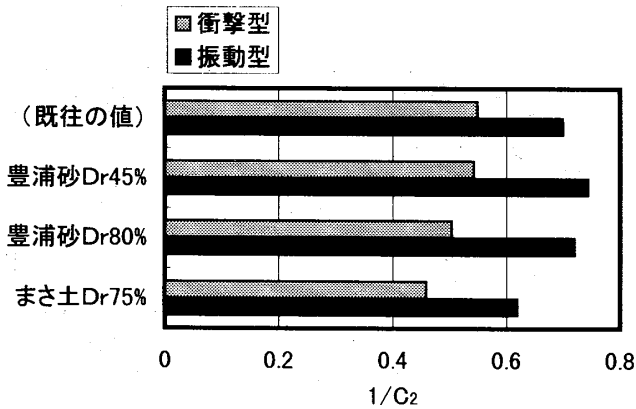


図-20 $1/C_2 (= (\tau_{d,L}/\sigma'c)/(\tau_{max,L}/\sigma'c))$ の値
Fig.20 Value of $1/C_2 (= (\tau_{d,L}/\sigma'c)/(\tau_{max,L}/\sigma'c))$

ないが、今後、検討を要する課題であると考える。

5・3 過剰間隙水圧の上昇特性について

ここでは、正弦波および地震波形載荷時の過剰間隙水圧の上昇特性について考察する。

(1) 正弦波載荷の場合

正弦波を用いた実験結果から、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'c$ と繰返し回数比 N/N_L の関係についてまとめ、図-21に示した。ここで、 N_L は $\Delta u/\sigma'c = 1$ に達した繰返し回数である。これより両者の関係は一般に直線ではなく、曲線形状をなしていることがわかる。この曲線はいずれの材料においても、載荷する応力比 $\tau_d/\sigma'c$ が大きいほど上方に位置する傾向が見られる。仮に、この関係が一直線であるならば、液状化に至る過程において一波の寄与が最初から最後まで常に一定であり、次に述べる累積損傷度理論の適用に好条件となる。

(2) 地震波形載荷の場合

地震波形の場合はせん断応力振幅が不規則に変化するため、まず、半波の応力比 $\tau/\sigma'c$ とその間の過剰間隙水圧比増分 $\Delta (\Delta u/\sigma'c)$ の間にいかなる関係があるか調べた。図-22(a)は衝撃型の場合、(b)は振動型の場合である。地震波のような不規則波形の場合、 $\Delta (\Delta u/\sigma'c)$ は応力履歴、特に材料に最大のダメージを与え

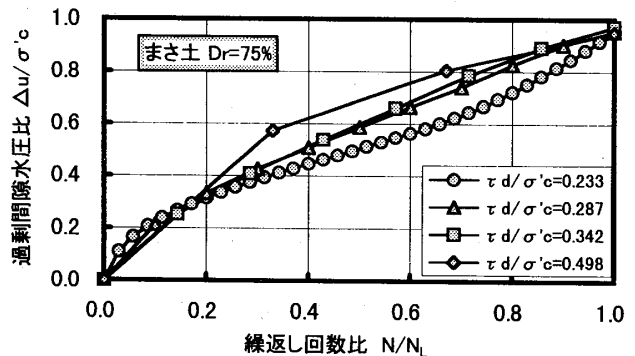
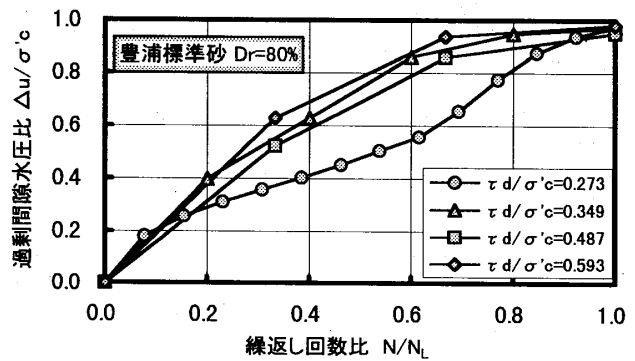
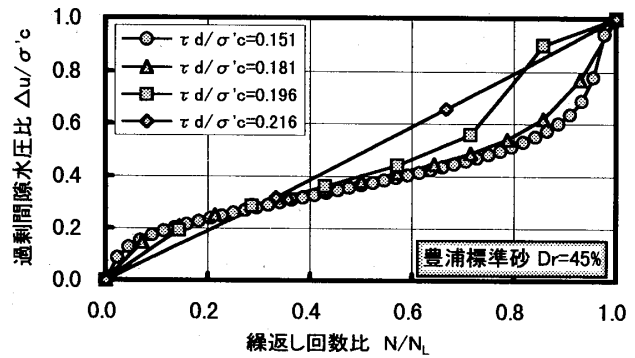


図-21 過剰間隙水圧比と繰返し回数比の関係
Fig.21 Relationships between excess pore water pressure ratio and number of loading cycle ratio

る最大せん断応力 τ_{max} の影響を受けると考えられる。そのため、 τ_{max} の前後で記号を分けてプロットした。これより以下の傾向が読みとれる。

- ① 衝撃型、振動型にかかわらず、 τ_{max} 通過前では $\tau/\sigma'c$ と $\Delta (\Delta u/\sigma'c)$ の間にかなり良い関係が見られる。具体的に言えば、ある $\tau/\sigma'c$ までは $\Delta (\Delta u/\sigma'c)$ がほとんどなく、それ以上の $\tau/\sigma'c$ において $\Delta (\Delta u/\sigma'c)$ が急増するという関係である。この限界となる $\tau/\sigma'c$ の値は正弦波による応力比~繰返し回数関係により得られる下限の応力比にほぼ対応している(図-17参照)。 τ_{max} 通過後では両者の関係にばらつきが大きくなり、通過前ほどきれい

な関係はみられない。 τ_{\max} 通過後、 $\Delta u/\sigma'c=0.7$ 付近を境にしてひずみの増大も大きくなる。したがって、 τ_{\max} 通過後について、 $\Delta u/\sigma'c=0.7$ を境に別々にプロットした（今回は τ_{\max} 通過後についても徐々に間隙水圧比が上昇する振動型についてのみとした）。図-23(a)は $\Delta u/\sigma'c<0.7$ の場合、(b)は $\Delta u/\sigma'c>0.7$ の場合である。これによると、 τ_{\max} 通過後でも $\Delta u/\sigma'c<0.7$ の場合には τ_{\max} 通過前と比べて若干ばらつきは大きくなるものの、著しい傾向の違いは生じていない。しかし、 $\Delta u/\sigma'c>0.7$ の場合にはばらつきが大きくなっていることがわかる。これは有効応力経路では変相線に近づいた状態であり、挙動がきわめて不安定になっていることに対応している。

- ② 衝撃型の波形では材料や相対密度の違いによらず、 τ_{\max} 載荷時に $\Delta u/\sigma'c$ の最大値があり、以降は相対的に小さい増分でしかない。これは、 τ_{\max} 載荷時に急激に $\Delta u/\sigma'c$ が上昇することに対応している。
- ③ 振動型の波形では材料や相対密度の違いによらず、 τ_{\max} 通過後においても τ_{\max} 載荷時と同等かそれ以上の増分がある。これは、 τ_{\max} 通過後においても過剰間隙水圧が継続的に増加することに対応している。

5・4 累積損傷度の考え方に基づく挙動の検討

つぎに、5・3で検討したのと同じ試料について累積損傷度を計算した。累積損傷度の考え方は2章で述べたとおりであり、半波形を用いて評価した。応力比振幅は、せん断応力のゼロクロス点間に挟まれた半波形の最大片振幅をとった。累積損傷度を求めるに際して、正弦波を用いた応力比～繰返し回数が必要であるが、これは図-17を使用している。このようにして求めた過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'c$ と累積損傷度Dの関係を図-24に示した。(a)が衝撃型、(b)が振動型の場合である。理論的に言えば累積損傷度が1になる時点でちょうど $\Delta u/\sigma'c$ が1となることが期待される。今回の結果を見ると、累積損傷度が1に達していないにもかかわらず $\Delta u/\sigma'c$ が1付近まで上昇しているケースが多いことがわかる。波形のタイプで言えば衝撃型の方がより小さい累積損傷度において $\Delta u/\sigma'c$ が1となっている。これは言い換えれば、累積損傷度理論によって $\Delta u/\sigma'c$ を予測した場合には、過小評価する可能性があるということである。このように誤差が生じる原因として以下のことが考えられる。

- ① 累積損傷度理論では、一波の寄与は応力比のみの関数であり、その時点で発生している過剰間隙水圧の影響や波の順序の影響は考慮できない。これらの点が一

つの誤差要因として考えられる。

- ② 正弦波を用いた応力比～繰返し回数の関係曲線に当てはめる限り、ある応力比よりも小さい応力比では液状化に対する寄与が無限に小さくなる。ところが、図-22を見てもわかるように、地震波形載荷の場合、そのような小さな応力レベルにおいても無視できない大きさの過剰間隙水圧の上昇を見ることがある。これらが累積した結果、誤差が大きくなっている。
- ③ 衝撃型の場合、特に上記②で述べた累積損傷度としては寄与しないが $\Delta u/\sigma'c$ を上昇させている波が相対的に多いため、振動型に比べて誤差が大きくなりやすい。

以上のように、地震波形載荷時の $\Delta u/\sigma'c$ の予測に累積損傷度理論を適用した場合にはある程度の誤差は避けられず、 $\Delta u/\sigma'c$ を過小評価する傾向にあることがわかった。地震波形載荷時の $\Delta u/\sigma'c$ の予測は有効応力解析法や他の方法によっても可能であるが、累積損傷度理論の適用は、それらの方法に比べるとはるかに簡単である。今回、他の手法による予測結果と比較していないので、予測精度の優劣について判断できないが、今回の実験結果を見る限り、簡便法として、不規則波形に対する累積損傷度理論の有用性がある程度確認されたと考えている。仮に、過剰間隙水圧や波の順序の影響あるいは τ_{\max} 後の小さな応力レベルにおける寄与を考慮に入れることができればもう少し予測精度が向上する可能性がある。

6 まとめ

今回の実験によって得られた知見を以下にまとめる。

- ① 正弦波を用いた実験では、過剰間隙水圧は繰返し回数の増加とともに漸増する。一方、衝撃型の地震波形を用いた実験では、過剰間隙水圧は段階的に蓄積し、最大せん断応力 τ_{\max} の除荷、反転時に大きな過剰間隙水圧が発生する。振動型の地震波形を用いた実験でも、過剰間隙水圧は段階的に蓄積するが、衝撃型の地震波形の場合ほど顕著ではない。振動型の地震波形の場合のせん断ひずみの挙動は正弦波の場合に似た傾向を示す。
- ② 地震波形のランダム性に関する補正係数 $1/C_2$ の値は、均等係数の小さい豊浦砂の場合には既往の結果とほぼ一致するが、まさ土のような均等係数の大きい材料については多少異なる可能性があることがわかった。今回、まさ土の場合の $1/C_2$ は豊浦砂に比べ若干小さい値が得られた。
- ③ 正弦波載荷の場合、過剰間隙水圧比と繰返し回数比

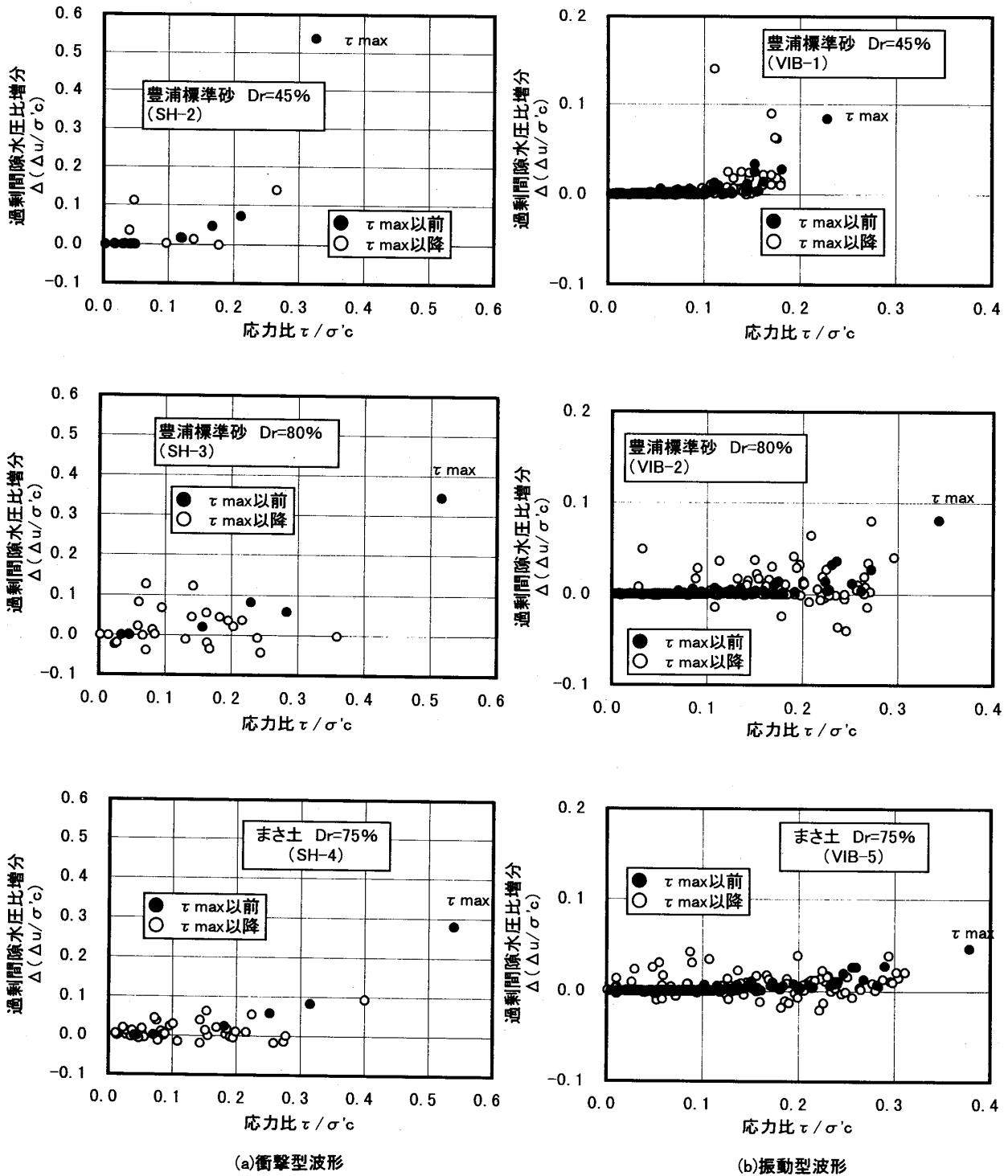


図-22 過剰間隙水圧比増分と半波の応力比の関係
 Fig. 22 Relationships between excess pore water pressure rise and stress ratio of half pulse

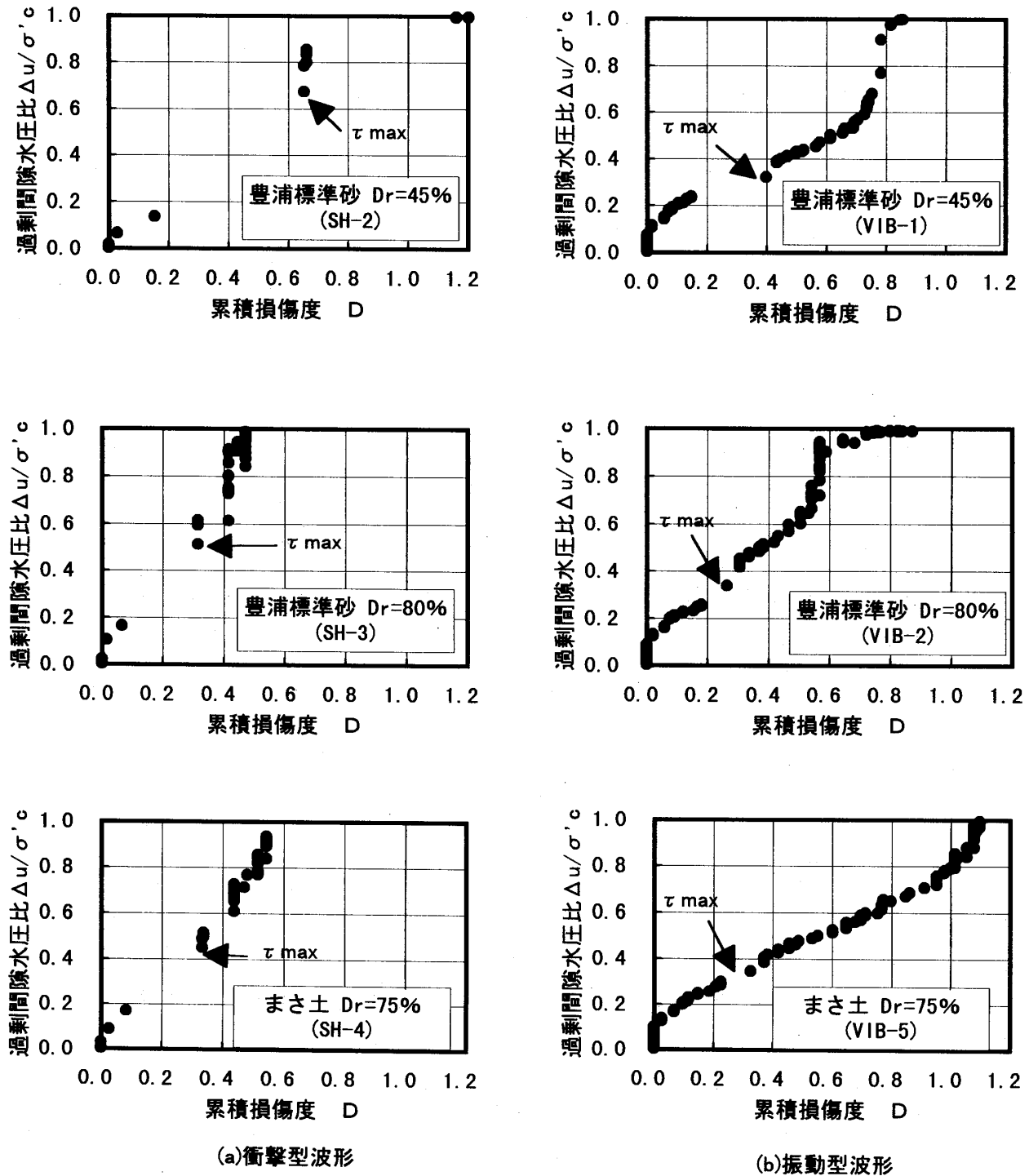


図-24 過剰間隙水圧比と累積損傷度の関係

Fig. 24 Relationships between excess pore water pressure ratio and cumulative damage

の関係は一般に直線関係にならない。

- ④ 地震波形載荷の場合、衝撃型、振動型にかかわらず、 τ_{\max} 通過前ではせん断応力比と過剰間隙水圧比増分の間にかなり良い関係が見られる。すなわち、ある応力比までは過剰間隙水圧比増分がほとんどなく、それ以上の応力比において増分が急増している。 τ_{\max} 通過後では両者の関係にばらつきが大きくなるが、詳細に見ると過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'c$ が大きい状態(おおよそ $\Delta u/\sigma'c > 0.7$)においてばらつきが著しくなることがわかった。
- ⑤ 衝撃型の波形では材料や相対密度の違いによらず、 τ_{\max} 載荷時に最大の水圧増分があり、以降は相対的に小さい増分でしかない。これは、 τ_{\max} 載荷時に急激に過剰間隙水圧比が上昇することと対応している。
- ⑥ 振動型の波形では材料や相対密度の違いによらず、 τ_{\max} 通過後においても τ_{\max} 載荷時と同等かそれ以上の水圧増分がある。これは、 τ_{\max} 通過後においても過剰間隙水圧比が継続的に増加することに対応している。
- ⑦ 累積損傷度理論を用いて地震波形載荷時の過剰間隙水圧比を予測した場合、過剰間隙水圧比を過小評価する傾向があることがわかった。その程度は振動型波形の場合よりも衝撃型波形の方が大きいことがわかった。累積損傷度理論の適用は他の手法に比べて簡単であり、簡便法として実用の可能性があるものと考えられる。

7 あとがき

中空ねじりせん断試験装置を用い、正弦波および地震波形を載荷することにより、地震波形のランダム性に関する補正係数、間隙水圧の上昇特性、および累積損傷度理論の適用性について検討を行った。検討の結果、以下の知見が得られた。

- ① 豊浦砂の場合、 $1/C_2$ の値は、従来提案されているものとはほぼ一致するが、まさ土の場合には若干小さい値が得られた。
- ② 衝撃型、振動型波形にかかわらず、ピーク荷重通過前ではせん断応力比と過剰間隙水圧比増分の間にかなり良い関係が見られた。ピーク荷重通過後では、両者の関係に通過前よりもばらつきが大きくなり、特にひずみが急増する過剰間隙水圧比0.7付近以上で著しい。
- ③ 地震波形載荷時の過剰間隙水圧比を推定するため累積損傷度理論を適用した。その結果、累積損傷度理論では過剰間隙水圧比を過小評価する傾向があることがわかった。その程度は振動型波形の場合よりも衝撃型波形の方が大きい。しかし、累積損傷度理論の適用は他の手法に比べて簡単であるため、簡便法として実用

の可能性があるものと考えられる。

すなわち今回の実験により、大加速度、衝撃的な波による液状化現象も本質的には正弦波や振動型の波形の場合と変わるものではなく、従来の液状化ポテンシャルの評価法が適用できることがわかった。ただし、衝撃型と振動型では、従来言われていたように補正係数に違いがあることが確認された。今回は、液状化現象を波形の面からとらえたが、液状化に影響を及ぼす因子はこれ以外にも数多くある。したがって、今後はたとえば、材料の違いや、応力状態の違いの及ぼす影響についても調べていかなければならないと考えている。

謝辞

本実験に当っては、神戸市にポートアイランドにおける試料採取の便宜を図って頂いた。ここに厚く御礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 石原研而, 安田 進 (1975): 液状化に及ぼす地震波の不規則性と初期拘束圧の影響, 土と基礎, Vol.23, No.6, pp.29~35.
- 2) Seed, H. B., I. M. Idriss and I. Arango. (1983): Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data, J.GE, ASCE, Vol.109, No.3, pp.1249~1273.
- 3) Ishihara, K. and Yasuda, S. (1975): Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation, Soils and Foundations, Vol.15, No.1, pp.45~59.
- 4) Lee, K. L. and Chan, K. (1972): Number of Equivalent Significant Cycles in Strong Motion Earthquake, Proc. Of the Int. Conf. On Microzonation for Safer Construction Research and Application, pp.609~627.
- 5) 龍岡文夫 (1985): 地震応答解析のための土の動的性質 2. 土の動的性質, 土と基礎, Vol.33, No.9, pp.63~70.
- 6) 神戸市開発局 (1995): 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド, 六甲アイランド).
- 7) 国生剛治, 嶋田光明, 加藤 進 (1981): 密な砂の非排水くり返しせん断特性, 第16回土質工学研究発表会講演集, pp.609~612.

