

飽和砂の液状化抵抗に及ぼすメンブレン貫入の影響

大原 資生*・山本 哲朗*・若本 昭弘**

Influence of Membrane Penetration on Liquefaction Resistance of Saturated Sands

Sukeo O-HARA, Tetsuro YAMAMOTO and Akihiro WAKAMOTO

Abstract

In this paper, we examine the relationship between pore-water pressure increase and volumetric strain corresponding to it in process of liquefaction of saturated sands, especially influence of membrane penetration. From a series of tests using cyclic triaxial test apparatus, it is found that membrane penetration in sand structure influences to disturb pore-water pressure increase. Therefore liquefaction resistance obtained from cyclic triaxial test apparatus is thought to be overestimated. Then we try to correct the liquefaction resistance by consideration of the effect of membrane penetration and make a comparison with the results obtained from other test apparatus.

1. ま え が き

土の液状化とは、広い意味で土がそのせん断強度を失って、液体のごとくふるまうことである。地盤の液状化現象は、地震力のような繰り返しせん断力を受ける場合にも発生している。

地震時における飽和砂層の液状化は、構造物への被害だけでなく基礎地盤の破壊現象でもあることから、土の動的性質上重要な問題の一つである。従って、飽和砂の液状化抵抗を正確に把握する必要がある。

一般的に、飽和砂層の液状化抵抗は、動的三軸試験機、動的単純せん断試験機などによって実験的に調べられている。しかし、試験機あるいは供試体寸法の違いなどによって、得られる液状化抵抗が異なるといった傾向がある。特に、動的三軸試験機によって得られた液状化抵抗は、他の試験機によって得られた結果より大きい傾向にある。このことに関しては、せん断応力を平均主応力によって無次元化すると各試験結果が一致するという報告¹⁾もあるが、試料を包むメンブレンの影響によるという報告²⁾もある。

本論文は、一部改良した動的三軸試験機を用いて、液状化過程における過剰間隙水圧の上昇とこれに対応

する体積ヒズミとの関係について調べたもので、主にメンブレン貫入の影響について考察している。そして、メンブレン貫入の過剰間隙水圧上昇に及ぼす影響を考慮して、動的三軸試験機によって得られた液状化抵抗の補正を試みた。豊浦砂および新宮砂については、補正後の液状化抵抗を動的単純せん断試験機あるいは振動台（大型単純せん断試験機）によって得られた液状化抵抗と比較している。

実験としては、1) 液状化試験、2) 注水による間隙水圧発生試験（以下、静的液状化試験とよぶ）、3) リバウンド試験、4) メンブレン貫入補正試験、5) 排水繰り返しせん断試験を行なった。

2. 試 料

本実験に用いた試料は、豊浦砂、新宮砂および真砂土である。試料の粒径加積曲線および物理定数を Fig. 1 および Table 1 に示す。粒径加積曲線中の一点鎖線および破線は、土田の提案による“液状化を生じ易い”および“液状化の可能性のある”砂質土の分布範囲を示している。

試料は、所定重量を計り取った後、飽和状態とするために脱気水を加えて、2時間程度水浸煮沸した。

* 土木工学科

** (株)間組

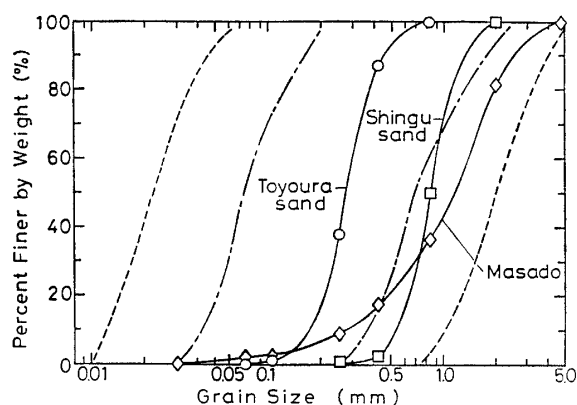


Fig. 1 Grain-size distribution curves of sands.

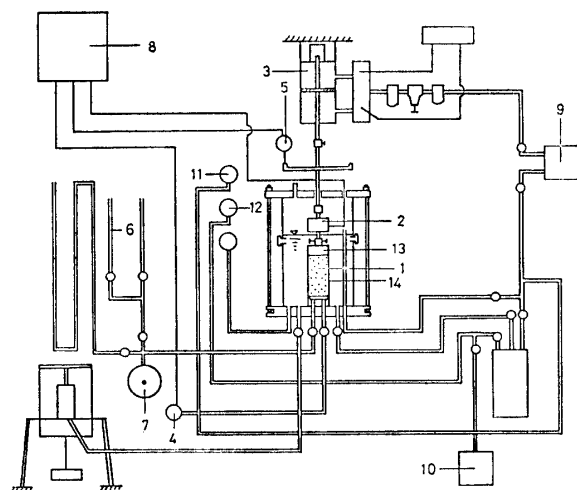
Table 1 Physical properties of sands.

	Toyouura sand	Shingu sand	Masado
G_s	2.63	2.64	2.63
D_{50} (mm)	0.27	0.83	1.13
U_c	1.64	1.70	5.11
$e_{max.}$	1.028	0.859	1.091
$e_{min.}$	0.678	0.623	0.549

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

Fig. 2 に、一部改良した動的三軸試験機の概略図を



- ① Sample
- ② Load Cell
- ③ Double Acting Air Cylinder
- ④ Pore Water Pressure Transducer
- ⑤ Electric Dial Gauge
- ⑥ Burette
- ⑦ Cylinder
- ⑧ Recorder
- ⑨ Compressor
- ⑩ Vacuum Pump
- ⑪ Pressure Gauge
- ⑫ Vacuum Gauge
- ⑬ Pedestal
- ⑭ Membrane.

Fig. 2 Cyclic triaxial test apparatus.

示す。この動的三軸試験機は、従来、軸差応力（せん断応力）測定用のロードセルを復動式エアシリンダー上部に設置していたが、载荷用ロッドとセル室上盤との摩擦（摩擦検定の結果、平均8%の摩擦損失が認められた）の影響を取り除くために、セル室内に設置しなおしたものである。

セル室内の水は、供試体が隠れるまでとして、上部に空間を残している。側圧の負荷は、この空間にコンプレッサーから圧縮空気を送り込んだ後、恒圧装置と連動させて行なう。

载荷方式は、応力制御式である。応力波形は、矩形波に近いもので、周期は2秒とした。

3.2 実験方法

3.2.1 液状化試験

内側にゴムスリーブをセットしたモールド内に脱気水をみたして、試料をスプーンで注ぎ込む。振動を与えて、所定の間隙比にする。作製した供試体は、直径約5cm、高さ約12cmの円柱状である。ロードセルと供試体を結合した後、セル水を注水する。所定の側圧(0.5および1.0 kgf/cm²)を負荷して、15分間圧密する。供試体からの排水量は、ビューレットで測定した。

圧密終了後、復動式エアシリンダーとロードセルを結合する。非排水条件の下で繰り返しせん断応力を载荷する。過剰間隙水圧、せん断応力および軸方向変位をレコーダーで記録した。

3.2.2 静的液状化試験

供試体の作製から圧密過程までは、液状化試験と同様である。

圧密終了後の供試体に、バックプレッシャーをかけるのと同様の方式で間隙水を送り込んで、間隙水圧を発生させる。間隙水の注水量は、シリンダーのハンドルの回転角 ($k=5.7562 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{degree}$) によって測して、間隙水圧はレコーダーで記録した。間隙水圧の上昇に伴う管路およびシリンダーの膨張量は、検定を行なって補正している。間隙水の注水量を供試体の体積ヒズミと見なしている。

3.2.3 リバウンド試験

供試体の作製方法は、液状化試験と同様である。

排水条件の下で、側圧を0.1 kgf/cm² ずつ0.5あるいは1.0 kgf/cm² まで上昇して、5分間圧密する。圧密終了後、0.1 kgf/cm² ずつ減少させてゼロに戻す。各有効拘束圧における供試体の排水量および吸水量をビューレットで測定した。供試体の排水量および吸水量を体積ヒズミと見なした。

3.2.4 メンブレン貫入補正試験

メンブレン貫入量を求める方法は、三浦、山本の報告³⁾にあるロッド挿入法を用いた。具体的説明は、省略する。ただし、体積ヒズミの測定は、側圧を圧密圧まで増加した後、減少させた過程で行なった。従って、得られたメンブレン貫入量は、メンブレン貫入の減少量（以下、メンブレン膨張ヒズミとよぶ）を表わしている。

3.2.5 排水繰り返しセン断試験

供試体の作製から圧密過程までは、液状化試験と同様である。

圧密終了後の供試体に対して、有効拘束圧一定・排水条件の下で繰り返しセン断応力を載荷する。セン断応力の大きさは、液状化試験において初期液状化回数が5~200回に相当するものとした。所定回数における圧縮側での供試体からの排水量をビューレットで測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 液状化試験

液状化試験は、試験機の一部改良に伴って新たに測定しなおしたものである。Fig. 3 は、本試験における記録波形の一例を示す。図中の記号 N_L は、初期液状化点を示しており、軸方向変位（軸方向ヒズミ ϵ_1 ）の急増しはじめる点で定義している。繰り返しセン断応力 ($\sigma_d/2$) の載荷開始から初期液状化に至るまでの過程において、従来の結果と特に異なる点はない。

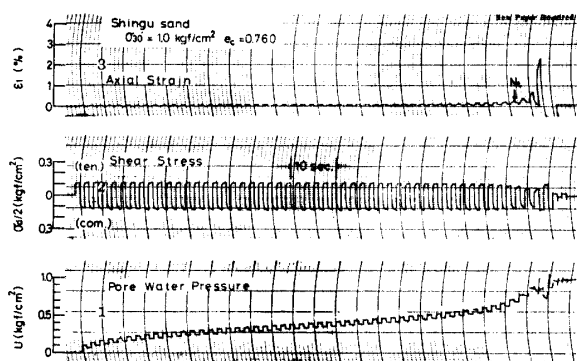


Fig. 3 Typical record of liquefaction test on cyclic triaxial test.

Figs. 4 (a), (b) は、繰り返しセン断応力を初期有効拘束圧 (σ'_{30}) で除し応力比 ($\sigma_d/2\sigma'_{30}$) と初期液状化回数との関係を示している。(a) 図は、新宮砂の結果である。ゆる詰め供試体 ($e_c=0.76$) の場合、初期有効拘束圧の違いによらずほぼ同一直線上に分布してい

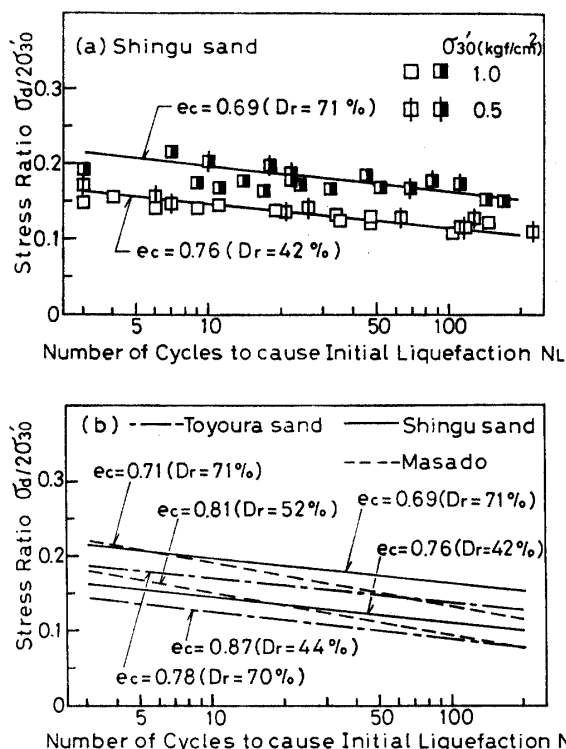


Fig. 4 Stress ratio versus number of cycles to cause initial liquefaction.

る。密詰め供試体 ($e_c=0.69$) の場合、初期有効拘束圧 0.5 kgf/cm^2 の結果が、初期有効拘束圧 1.0 kgf/cm^2 の結果よりも大きい傾向にある。この点に問題は残るが、ここでは“液状化試験におけるセン断応力は、初期有効拘束圧に比例する”という報告⁴⁾に基づいて、同一直線で表わしている。以上の傾向は、豊浦砂および真砂土についても同様である。(b) 図は、各試料の結果を平均直線で整理したものである。均一な試料である豊浦砂および新宮砂と比較して、真砂土の直線の勾配が急になっている。すなわち、応力比の小さい範囲において、液状化抵抗の低下が著しいといえる。

4.2 静的液状化試験およびリバウンド試験

静的液状化試験およびリバウンド試験は、液状化過程における過剰間隙水圧の上昇とこれに対応する体積ヒズミとの関係が、排水条件の下での外部からの注水あるいは有効拘束圧 (σ'_s) の減少によって測定される体積ヒズミから近似的に把握できると考えて行なった。これは、供試体が砂および水といった非圧縮性と考えてさしつかえない物質によって構成されているためである。

Fig. 5 は、静的液状化試験における注水による体積ヒズミ ($\Delta V/V_c$) と間隙水圧比 (u/σ'_{30}) との関係の一例を示している。単位あたりの間隙水圧を上昇させ

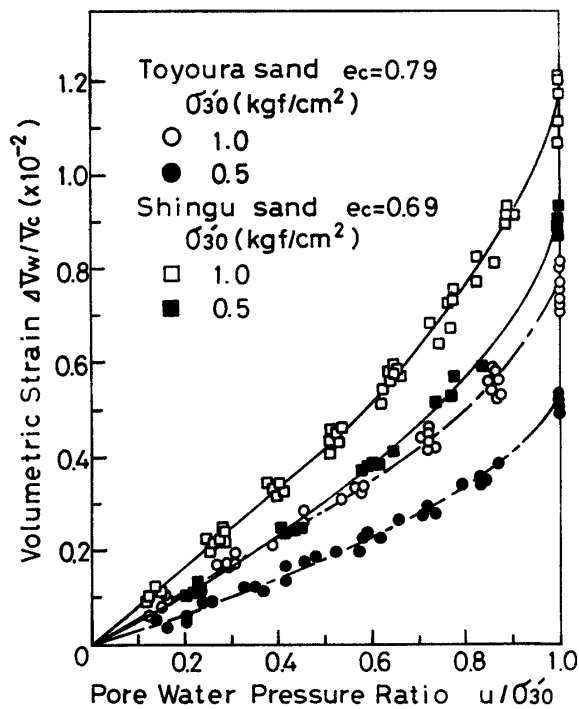


Fig. 5 Test results of static liquefaction test.

るのに必要な注水による体積ヒズミに関して、次のことがいえる。

- 1) 間隙水圧の上昇に伴って増加する。
- 2) 初期有効拘束圧の小さい方が、多くの注水による体積ヒズミを必要とする。
- 3) 豊浦砂の方が、新宮砂と比較して約20~30% ($\sigma'_{30} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)、約25~40% ($\sigma'_{30} = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$) 小さい。

また、図中には示していないが、

- 4) 同一初期有効拘束圧において、ゆる詰め供試体の方が密詰め供試体よりも多くの注水による体積ヒズミを必要とする。

という結果を得ている。

間隙水圧の上昇は、間隙水の圧縮によるものと考えられるが、三軸供試体において間隙水圧の上昇に影響を及ぼすものとしては、有効拘束圧の減少に伴う砂粒子骨格の体積膨張ヒズミおよびメンブレン貫入量の減少が考えられる。

ここでは、メンブレン貫入量の減少の影響を調べるために、Fig. 6 に示す3本のエンビ製ロッドを用いて同様の試験を行なった。ロッド A は、中密である。ロッド B およびロッド C は、エンビ管側面に直径3mmの孔を12ヶ所および48ヶ所あけたものである。

Fig. 7 に、その結果を示す。ロッド A の結果が一番小さくて、間隙水圧を 1.0 kgf/cm^2 上昇させるのに約

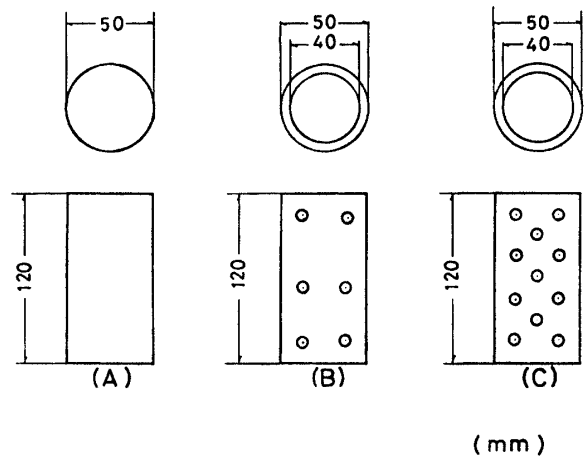


Fig. 6 Vinyl chloride rods.

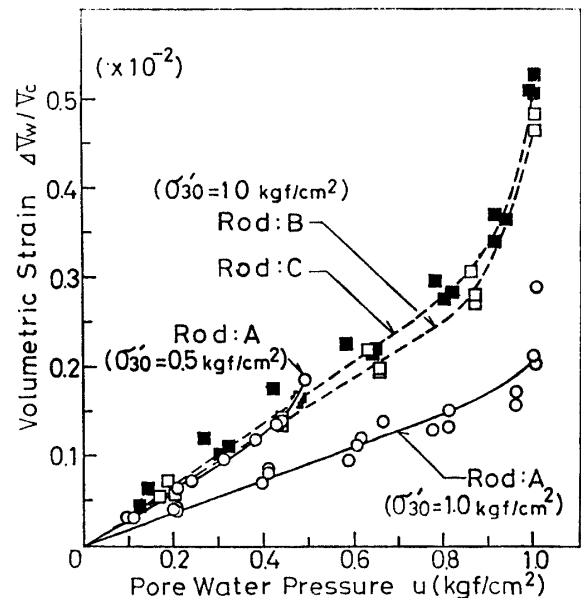


Fig. 7 Test results of static liquefaction test on vinyl chloride rods.

0.2×10^{-2} の注水による体積ヒズミを必要としている。これは、試料を用いた場合の1/4~1/5である。ロッド B とロッド C では、ロッド C の結果の方が大きい。

以上をまとめると、間隙水圧の上昇は、孔の有無および孔数の影響を受けるといえる。すなわち、孔数が多いほど圧密過程でのメンブレン貫入量が多くなる。間隙水の注水によって間隙水圧が上昇すると、メンブレン貫入量が減少していき、間隙水圧の上昇を妨げようとする。このために、メンブレン貫入量の多いものほど多くの注水による体積ヒズミを必要とすると考えられる。従って、試料を用いた場合にもメンブレン貫入による影響があるものと考えられる。

次に、Fig. 8 は、リバウンド試験およびメンブレン貫入補正試験における体積膨張ヒズミ ($\Delta V_r/V_c$) と

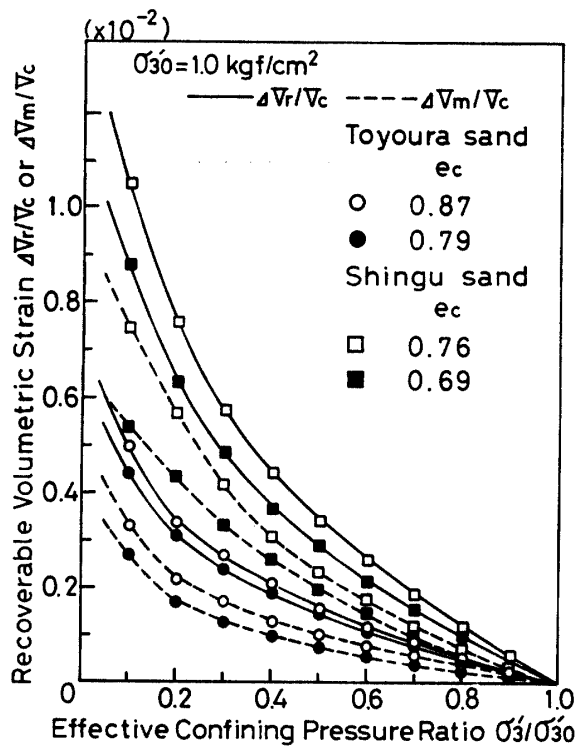


Fig. 8 Test results of rebound test and membrane penetration test.

有効拘束圧比 (σ'_3/σ'_{30}) との関係およびメンブレン膨張ヒズミ ($\Delta V_m/V_c$) と有効拘束圧比との関係の一例を示している。有効拘束圧の減少を仮想的な間隙水圧の上昇と考えると、いずれの関係も静的液状化試験における1)~4)と同様の傾向にある。体積膨張ヒズミとメンブレン膨張との差は、砂粒子骨格の体積膨張ヒズミを与える。砂粒子骨格の体積膨張ヒズミ ($\Delta V_s/V_c$) は、メンブレン膨張ヒズミの約30~50% (豊浦砂および新宮砂) である。両者とも膨張性のヒズミであって、供試体内の間隙水圧上昇を妨げる作用を及ぼすと考えられるが、割合の上ではメンブレンの影響の方が大きい。

静的液状化試験とリバウンド試験の結果を比較すると静的液状化試験における注水による体積ヒズミの方が大きい。両者の違いは、有効応力の減少方法すなわち供試体内に間隙水圧が発生しているか否かによると考えられる。注水による体積ヒズミの方が大きいことから、両試験における砂粒子骨格の体積膨張ヒズミが等しいと仮定すると、両試験結果の差はメンブレン膨張ヒズミの差と考えられる。応力条件の下では、静的液状化試験が液状化試験と同じであるが、本実験では一種類のメンブレンしか使用していないので、影響の割合を定量的に評価するには至っていない。

4.3 排水繰り返しせん断試験

供試体が、非排水条件の下で繰り返しせん断力を受けると、過剰間隙水圧が蓄積する。一方、排水条件の下で繰り返しせん断力を受けると、体積ヒズミが増大する。このように、過剰間隙水圧の蓄積と体積ヒズミの増大は、表裏一体の関係にある。

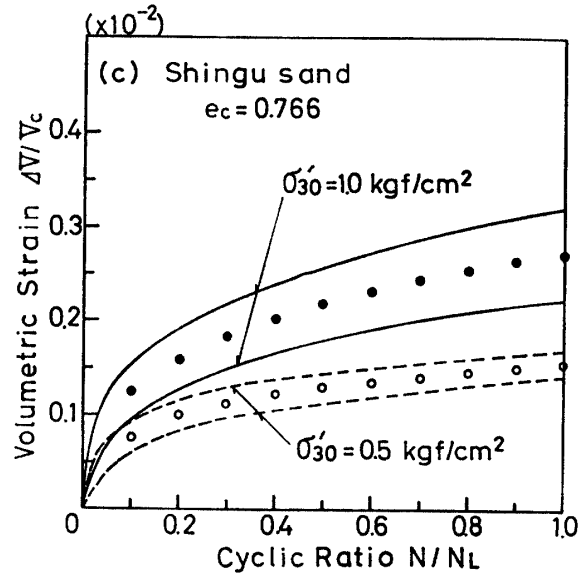


Fig. 9 Test results of cyclic shear test under drained condition.

Fig. 9 は、本試験における体積ヒズミ ($\Delta V/V_c$) と繰り返し回数比 (N/N_L) との関係の一例を示している。初期液状化回数、試験時の応力比を基に Fig. 4 (b) から求めた。図中の実線および破線は、各初期有効拘束圧における初期液状化回数が5~200回に相当する応力比での測定結果の分布範囲を示している。また、黒丸および白丸は、それぞれの平均値を示している。繰り返し回数比の増加すなわち繰り返し回数の増加に伴って、応力履歴効果の影響によって体積ヒズミの増加割合が減少している。

4.4 液状化抵抗の補正

静的液状化試験およびリバウンド試験の結果から、三軸供試体内に間隙水圧が発生する場合、供試体を包むメンブレンの影響すなわち有効拘束圧減少過程におけるメンブレン貫入量の減少によって、その上昇が妨げられるという結果を得た。従って、液状化過程においても、非排水条件にもかかわらずメンブレン貫入量を打ち消す意味での体積膨張を許すために過剰間隙水圧の上昇が妨げられて、その結果、液状化抵抗を過大評価していると考えられる。

本節では、砂の応力~ヒズミ関係を基に動的三軸試

験機によって得られた液状化抵抗の補正を試み、他の試験機による結果との比較を行なっている。

八木⁵⁾は、1 サイクル中に残留する 過剰間隙水圧を (1) 式で与えている。

$$\Delta u = \frac{\Delta(\Delta V/V_c)}{m_s} \quad (1)$$

ここで、 Δu : 1 サイクル中に残留する 過剰 間隙水圧
 $\Delta(\Delta V/V_c)$: 1 サクル中に残留する 体積ヒズミ、
 m_s : 砂粒子骨格の体積膨張ヒズミである。

三軸供試体における過剰間隙水圧と体積ヒズミとの関係は、メンブレンの影響を考慮して次のように表わされると考えた。

$$\Delta(\Delta V/V_c) - \Delta u m_s - \Delta u m_m = \Delta u m_w n \quad (2)$$

ここで、 m_m : メンブレンの体積膨張係数、 m_w : 水の圧縮係数、 n : 間隙率である。(2) 式より、過剰間隙水圧は、(3) で表わされる。

$$\Delta u = \frac{\Delta(\Delta V/V_c)}{m_s + m_m + m_w n} \quad (3)$$

ここで、 m_s および m_w は、 10^{-2} のオーダーであるのに対して、 m_m は 10^{-1} のオーダーであり n は通常 0.5 以下であるから、(3) 式は近似的に (4) 式で表わされる。

$$\Delta u = \frac{\Delta(\Delta V/V_c)}{m_s + m_m} \quad (4)$$

(4) 式を繰り返しセン断力の載荷開始からある載荷回数までに蓄積される 体積ヒズミの関係で表わすと、(5) 式のようになる。

$$\frac{\Delta V_s}{V_c} + \frac{\Delta V_m}{V_c} = \frac{\Delta V}{V} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta V_s/V_c$: 砂粒子骨格の体積膨張ヒズミ、
 $\Delta V_m/V_c$: メンブレン膨張ヒズミである。(5) 式の右辺は、先の排水繰り返しセン断試験において測定された体積ヒズミである。そこで、この体積ヒズミと他の試験結果を比較したところ、リバウンド試験との対応が認められた (Fig. 10)。体積ヒズミは、Fig. 9 において $N/N_L=1.0$ での平均値を用いており、体積膨張ヒズミは Fig. 8 で液状化試験における初期液状化時の平均有効拘束圧に対応する値を用いている。新宮砂のゆる詰めめにバラツキが見られるが、ほぼ 45° の直線付近に分布している。すなわち、液状化過程において供試体内に発生する体積ヒズミは、過剰間隙水圧の上昇のみに関与しているのではないといえる。

液状化抵抗の補正は、Fig. 8 の結果を Fig. 9 の結

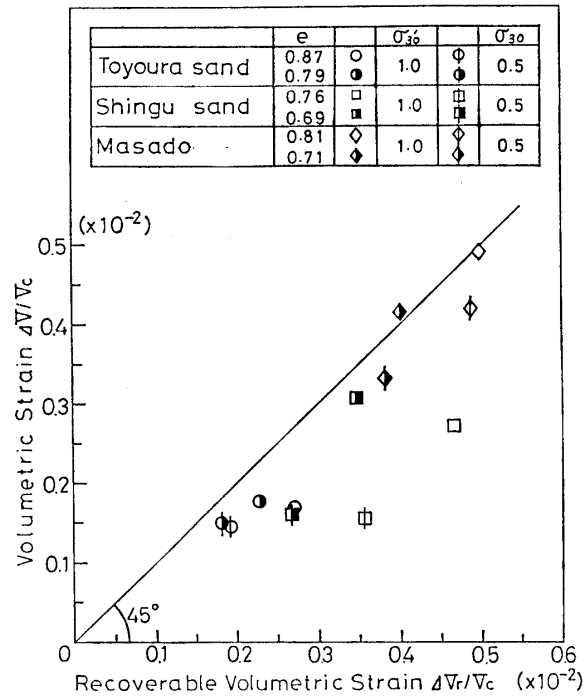


Fig. 10 Relationship between $\Delta V/V_c$ and $\Delta V_r/V_c$.

果に対応させて行なっている。以下、新宮砂のゆる詰め側圧 1.0 kgf/cm^2 を例に、Figs. 11 (a), (b), (c) を用いて説明する。

液状化試験の結果から、初期液状化時の平均過剰間隙水圧 (u) は、 0.56 kgf/cm^2 である。この時の有効拘束圧 (σ'_3) は、 0.44 kgf/cm^2 となる。(a) 図において、 $\sigma'_3=0.44 \text{ kgf/cm}^2$ のときの体積膨張ヒズミ ($\Delta V_r/V_c$) およびメンブレン膨張ヒズミ ($\Delta V_m/V_c$) は、それぞれ 0.42×10^{-2} および 0.28×10^{-2} である。従って、砂粒子骨格の体積膨張ヒズミ ($\Delta V_s/V_c$) は、 0.12×10^{-2} となる。実際の液状化現象ではメンブレンの影響はないので、過剰間隙水圧の上昇に対応する体積ヒズミは、八木の提案した (1) 式のように砂粒子骨格の体積ヒズミによって表わされる。動的三軸試験機による液状化過程において、供試体内に生じる体積ヒズミ ($\Delta V/V_c$) が過剰間隙水圧の上昇のみに関与すると仮定すれば、(b) 図において 0.12×10^{-2} の体積ヒズミが生じているのは、繰り返し回数比が 0.12 のときである。すなわち、メンブレンの影響が無い場合には、液状化試験で測定された初期液状化回数の 0.12 倍の載荷回数で初期液状化を生じると考える。(c) 図は、上記に従って補正を行なったものである。例えば、 $N_L=100$ 回の場合、補正後は $100 \times 0.12=12$ 回となる。

Figs. 12 (a), (b), (c) は、補正した液状化抵抗および他の試験機による結果との比較を示している。(a) 図は、本試験で測定された液状化抵抗の補正結果で、補

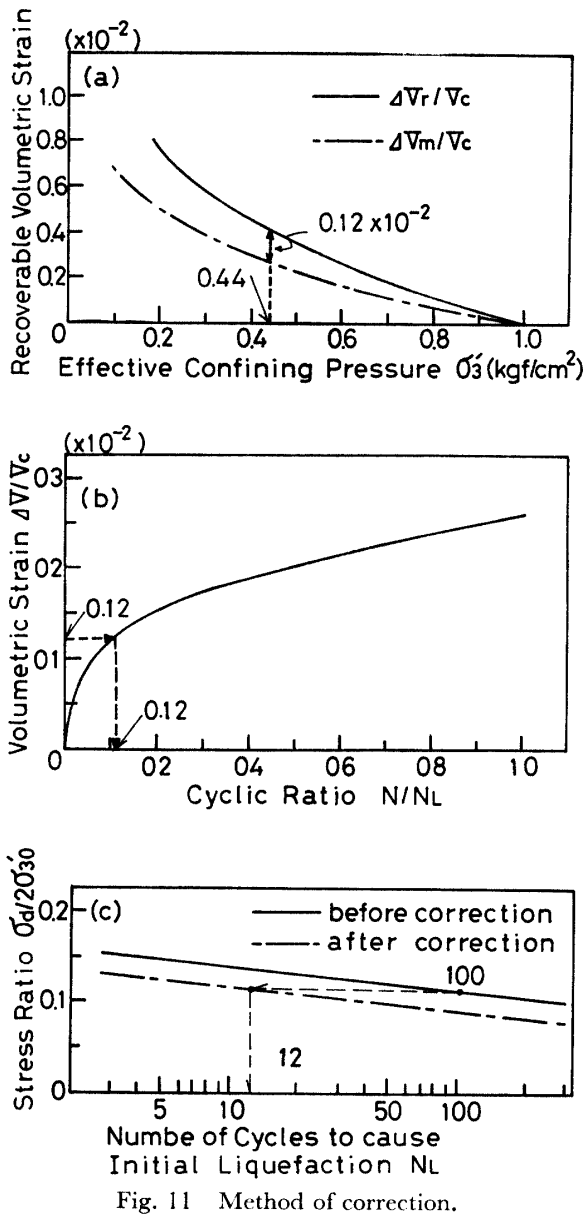


Fig. 11 Method of correction.

正には、Table 2 に示す各数値を用いた。補正前の結果 (Fig. 4) と比較すると、試料によって異なるが約 32~58% の低下が認められる。初期液状化回数が $1/5 \sim 1/40$ になったにもかかわらず、32~58% の低下にしかないのは、Fig. 4 の各直線の勾配が $0.034 \sim 0.080$ と小さいためである。(b) および (c) 図は、新宮砂および豊浦砂について動的単純せん断試験機および大型単純せん断試験機 (振動台) による試験結果と比較したものである。新宮砂では補正後の液状化抵抗は、振動台による結果とほぼ一致している。豊浦砂では、振動台による結果を下回っているが、相対密度の違いが一つの原因と考えられる。

大型単純せん断機では、水平地盤内の地震時の応力およびヒズミ条件を忠実に再現していると考えられ

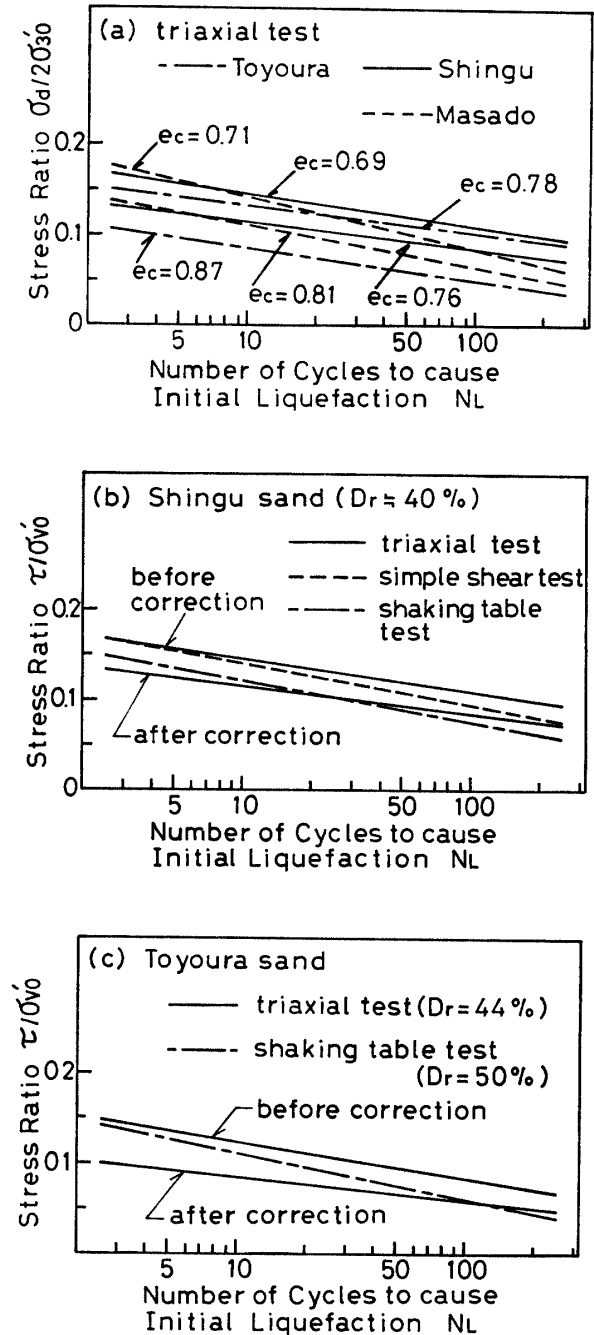


Fig. 12 Comparison of corrected liquefaction resistance with other test results.

る⁶⁾ので、以上の補正方法がある程度妥当であると考えられる。

5. まとめ

本論文は、液状化過程における過剰間隙水圧の上昇とこれに対応する体積ヒズミとの関係について調べたもので、特に、供試体を包むメンブレンの影響を中心に考察した。また、液状化抵抗の補正を試みた。

Table 2 Numbers used for correction

	σ_{30}' (kgf/cm ²)	e_c	u/σ_{30}'	$\Delta V/V_c$ ($\times 10^{-2}$)	$\Delta V_r/V_c$ ($\times 10^{-2}$)	$\Delta V_s/V_c$ ($\times 10^{-2}$)	N/N_L
Toyoura sand	1.0	0.87	0.680	0.171	0.240	0.092	0.184
		0.78	0.680	0.165	0.230	0.103	0.167
	0.5	0.87	0.710	0.144	0.195	0.053	0.090
		0.79	0.713	0.145	0.185	0.061	0.063
Shingu sand	1.0	0.76	0.560	0.258	0.400	0.120	0.120
		0.70	0.520	0.299	0.310	0.092	0.030
	0.5	0.77	0.600	0.170	0.300	0.070	0.110
		0.69	0.580	0.170	0.250	0.062	0.024
Masado	1.0	0.81	0.710	0.501	0.495	0.145	0.052
		0.72	0.675	0.419	0.400	0.142	0.060
	0.5	0.81	0.720	0.404	0.485	0.190	0.155
		0.72	0.710	0.330	0.385	0.186	0.175

動的三軸試験機を用いた一連の試験結果から、次のことが明らかになった。

- 1) 静的液状化試験およびリバウンド試験によって、圧密過程におけるメンブレン貫入が、以後の供試体の間隙水圧上昇に対して、これを妨げようとする作用を及ぼす。この影響は、メンブレン貫入量の多いほど大きい。液状化過程においても、非排水条件にもかかわらずメンブレン貫入量を打ち消す意味での体積膨張を許す結果、液状化抵抗を過大評価していると考えられる。
- 2) 砂の応力～ヒズミ関係に基づいて液状化抵抗の補正を行なった結果、ある程度の妥当性が認められた。

最後に、本試験を行なうにあたり助力をいただいた槇畝 浩、山地正宏両君に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Ishihara, K., S. Iwamoto, S. Yasuda and H. Takatsu: "Liquefaction of Anisotropically Consolidated Sand", ICSMFE, 2 (1977)
- 2) Geoffrey R. Martin, W. D. Liam Finn and H. B. Seed: "Effects of System Compliance on Liquefaction Tests", ASCE, 104, No. GT4 (1978)
- 3) 三浦哲彦, 山本哲朗: "三軸試験におけるメンブレンペネトレーションの測定", 山口大学工学研究報告, 25, No. 2 (1975)
- 4) Lee, K. L. and H. B. Seed: "Cyclic Stress Conditions Causing Liquefaction of Sand", SMFD, ASCE, 92, No. SM6 (1967)
- 5) 八木則男: "繰り返しせん断による砂の体積変化と過剰間隙水圧", 第7回土質工学研究発表会発表公演集 (1972)
- 6) 吉見吉昭: "砂地盤の液状化" 技報堂出版 (1980)

(昭和56年3月23日 受理)