

# 三軸試験のゴム膜の厚さが 砂の液状化抵抗に及ぼす影響について

大原資生\*・山本哲朗\*\*・松田 博\*\*\*・若槻好孝\*\*\*\*

## Membrane Effect on Liquefaction Resistance of Sand

Sukeo ŌHARA, Tetsuro YAMAMOTO, Hiroshi MATSUDA  
and Yoshitaka WAKATSUKI

### Abstract

The effect of membrane thickness on the liquefaction resistance of sands was studied by means of the undrained and drained cyclic triaxial tests, the rebound tests, and the membrane strength and penetration tests. The latex membranes used are 0.18, 0.25 and 0.60mm in thickness. It was found that : (1) the correction values of the membrane strength for the liquefaction resistance increased with increasing thickness of the membrane ; and (2) the liquefaction resistance in case of the membrane with thickness of 0.25mm which was corrected for the membrane strength and penetration was similar to that in case of 0.60mm which was only corrected for the membrane strength.

### 1. 緒言

通常、繰返し三軸試験機で得られた飽和砂の液状化抵抗には、供試体を包むメンブレンの強さおよびメンブレンの砂粒子間への貫入量の減少といった2つの要因による試験誤差が含まれている。

通常の液状化実験では、厚さ0.2mm程度のメンブレンが用いられるが、この程度の厚さのメンブレンでは、メンブレンの強さによる液状化抵抗に含まれる試験誤差はほとんどないといわれている。しかし、粒子の角ばった礫の液状化実験を行う場合には、0.2mm程度の厚さのメンブレンでは破れることが多いので、より厚手のメンブレンを用いることが必要となり、メンブレンの強さによる液状化抵抗に及ぼす影響を無視することができなくなると考えられる。

メンブレンの貫入量の減少に対する液状化抵抗の補

正法はいくつか提案されており、著者らも先に厚さ0.25mmのラテックス系のメンブレンの貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正法を提案したり、メンブレンの貫入量は、メンブレンの厚さによって異なるので、液状化抵抗に及ぼす影響の度合も異なると考えられる。

本文では、メンブレンの強さと貫入量の2つの要因が液状化抵抗に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、厚さ0.18mm, 0.25mmおよび0.60mmのメンブレンを用いて砂の液状化実験を行い、また、両方の要因によって生じる試験誤差を求め、液状化抵抗を補正するための実験も行った。

以下に、試料およびメンブレンの性質、実験装置、実験方法、結果について順次のべる。

### 2. 試料およびメンブレン

本実験に用いた試料は、豊浦砂および新宮砂（福岡県新宮町産の浜砂）の2種である。それぞれの物理定数はTable 1に示されている。新宮砂の平均粒径( $D_{50}$ )は豊浦砂のほぼ3倍である。

実験に用いたメンブレンの材質はラテックス系のものであり、厚さ( $t$ )は0.18mm, 0.25mmおよび0.60mm

\* 宇部工業高等専門学校

\*\* 工業短期大学部土木工学科

\*\*\* 土木工学科

\*\*\*\* 大学院土木工学専攻

Table 1 Physical properties of samples

	Toyoura sand	Shingu sand
Gs	2.636	2.642
D <sub>50</sub> (mm)	0.26	0.83
Uc	2.1	1.7
e <sub>max</sub>	1.023	0.859
e <sub>min</sub>	0.676	0.623

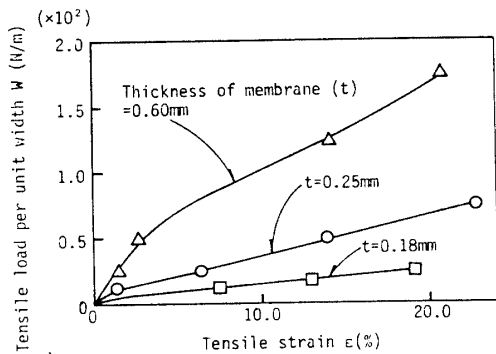


Fig. 1 Relationship between tensile load and strain

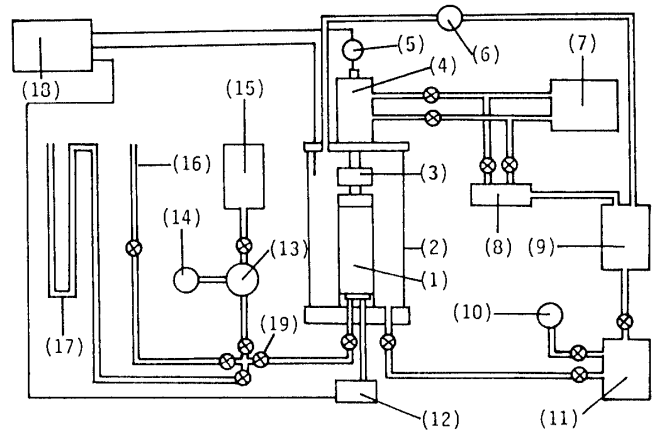
の3種である。

Fig. 1は Bishop と Henkel の方法<sup>2)</sup>にしたがって測定した3種のメンブレンの引張り荷重とひずみの関係を示す。この図からわかるように、各メンブレンのひずみの増加による引張り荷重の増加の割合は異なるが、 $\epsilon=10\%$ における $t=0.25\text{mm}$ 、 $0.60\text{mm}$ のメンブレンの引張り荷重は $t=0.18\text{mm}$ の場合のそれぞれ約2倍、7倍である。

3. 実験装置

実験には、われわれの実験室で試作した繰返し三軸試験機が用いられた。その詳細については、先の論文<sup>1)</sup>にのべてあるので、ここでは簡単に説明しておく。

Fig. 2は試験機の概略図を示す。供試体の大きさは直径5 cm、高さ約12.5cmで、この供試体を所定の側圧で圧密した後、所定の振幅の軸差応力を周期2秒で繰返し作用させるようになっている。供試体に負荷する正弦波状の繰返し軸差応力は、復働式のエアシリンダーの上下の圧力室に交番的に圧縮空気を送り込んだり、排気したりすることによって発生される<sup>3)</sup>。



- (1) Specimen
- (2) Plastic cylinder
- (3) Load cell
- (4) Air cylinder
- (5) Electric dial gauge
- (6) Pressure gauge
- (7) Electromagnetic valve
- (8) Regulator
- (9) Compressor
- (10) Pressure gauge
- (11) Water tank
- (12) Pore water pressure transducer
- (13) Control cylinder
- (14) Pressure gauge
- (15) Water tank
- (16) Burette
- (17) Manometer
- (18) Recorder
- (19) Valve

Fig. 2 Experimental apparatus

4. 実験方法

今回の実験は、まず、3種の厚さの異なるメンブレンを用いて繰返し三軸試験機による液状化実験を行った。そして、その結果には、メンブレンの強さおよび貫入量の減少といった2つの要因によって生じる試験誤差が含まれていると考えられるので、その試験誤差を明らかにし、また、液状化抵抗を補正する実験も行った。メンブレンの強さに対する液状化抵抗の補正は、後でのべるように Fig. 1の結果を用い、メンブレンの貫入量の補正については、排水繰返し載荷試験、リバウンド試験、メンブレン貫入試験を行った。実験方法は先の研究<sup>1),4)</sup>と同様であるので、ここでは簡単にのべる。

a. 液状化実験

飽和状態の供試体は、水中落下法で作製した。すなわち、炉乾燥した試料に脱気水を加え、煮沸による脱気を行い、モールドの内側に装着して脱気水を満たした厚さ $t=0.18\text{mm}$ 、 $0.25\text{mm}$ あるいは $0.60\text{mm}$ のメンブレンの中に試料を少量ずつ水中落下させて供試体を作った。その直径は5.0cmで、高さは約12.5cmである。なお、豊浦砂供試体では相対密度( $D_r$ ) $\approx 50\%$ 、 $70\%$ 、 $80\%$ の3種の状態とし、新宮砂供試体では $D_r \approx 50\%$ 、 $70\%$ の2種の状態とした。

次に、セル室を組み立て、セル室内にあるロードセルと上部ペDESTALを結合する。次に、セル室内に上部ペDESTALの上面まで水を入れる。軸差応力、間隙水圧および軸方向変位の測定準備が終了した後、非排水状態で側圧( $\sigma'_{30}$ )=98kPaを加え、間隙水圧の上昇高をチェックする。本実験において、供試体の間隙水圧係数は0.96以上であった。その後、排水コックを開いて10分間供試体を圧密し、その際の供試体からの排水量をビューレットで測定する。

圧密終了後、復動式ペロフラムシリンダーとロードセルを結合して、レギュレーターを所定の圧力に調整する。非排水状態で周期2秒の正弦波状の繰返し軸差応力( $\sigma_d$ )を供試体に載荷し、液状化が確認された後に実験を終了する。液状化は供試体内に発生する間隙水圧が側圧に等しくなったときと定義した。

b. 排水繰返し載荷試験

液状化実験の場合と同じ方法で作製された供試体に、排水状態で所定の繰返し軸差応力を加えながら、供試体からの排水量をビューレットで測定する。このときの軸差応力は、液状化実験の際に供試体に載荷された繰返し軸差応力に等しく、排水量の測定も液状化が生じたときと同じ繰返し回数まで行う。

c. リバウンド試験

液状化現象が有効応力の減少という形で発生することを考慮して、セル室内にセットされ、 $\sigma'_{30}$ =98kPaで圧密された供試体に対して、側圧を9.8kPaずつ段階的に減少させていながら、ビューレットの水位の測定を行うことで供試体の膨張率を求めた。この試験では、供試体の膨張量に供試体表面におけるメンブレンの砂粒子間への食込みの回復、いわゆるメンブレン貫入量の減少によるものが含まれている。そこで、砂骨格のリバウンド量を求めるためには、供試体の膨張量から次にのべるメンブレン貫入試験で得られるメンブレン貫入量の減少を除く必要がある。

d. メンブレン貫入試験

直径5cmの供試体の中央部に直径1.8cm、2.6cmあるいは3.4cmの真ちゅう棒を入れた供試体を作り、 $\sigma'_{30}$ =98kPaを作用させた後、側圧を9.8kPaずつ減少させたときのそれらの体積変化から計算してメンブレン貫入量のみを求めた。その方法の詳細は他の論文<sup>5)</sup>にのべてある。

5. 実験結果および考察

5.1 補正前の液状化抵抗とメンブレンの厚さの関係

Figs. 3, 4は液状化実験から得られた応力比  $\sigma_d/2\sigma'_{30}$

$\sigma'_{30}$ と液状化までの繰返し回数  $N_L$ の関係を示す。Fig. 3は豊浦砂の結果で、Fig. 4は新宮砂の結果である。図中の、半黒ぬりの点、白ぬきの点、黒ぬりの点は、それぞれ厚さ( $t$ )=0.18mm, 0.25mm および0.60mmのメンブレンの結果である。両図からわかるように、豊浦砂および新宮砂の実験値にはややバラツキが見られるが、両方の砂とも、同じ相対密度における厚さの異なる3種のメンブレンを用いた実験から得られた液状化抵抗には明確な差は見受けられなかった。

Figs. 3, 4の液状化抵抗の中にはメンブレンの強さと貫入量の減少といった2つの要因によって生じる試験誤差が含まれていると考えられる。このうち、前者

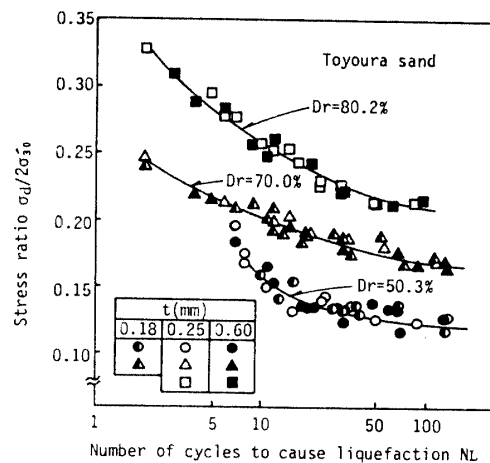


Fig. 3 Relationship between stress ratio  $\sigma_d/2\sigma'_{30}$  and number of cycles to cause liquefaction  $N_L$  (Toyoura Sand)

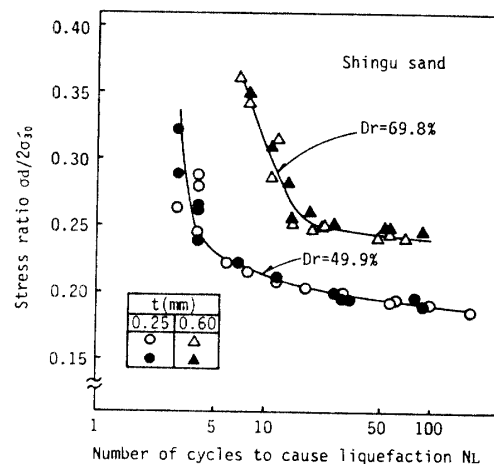


Fig. 4 Relationship between stress ratio  $\sigma_d/2\sigma'_{30}$  and number of cycles to cause liquefaction  $N_L$  (shingu sand)

の要因が液状化抵抗に及ぼす影響の度合は、メンブレン厚が厚いほど大きいですが、逆に、後者の要因が液状化抵抗に及ぼす影響の度合は、メンブレン厚が薄くなるほど大きいと考えられる。結局、 $t=0.18\text{mm}$ ,  $0.25\text{mm}$  および  $0.60\text{mm}$  のメンブレンを用いた液状化実験では、両方の要因による液状化抵抗に対する試験誤差の度合が相殺されて、それぞれのメンブレンを用いた実験で得られた液状化抵抗がほぼ同じになったと解釈することができる。

Figs. 5, 6 は各メンブレンを用いた実験から得られた間隙水圧比  $u / \sigma'_{30}$  の上昇曲線の一例である。u は間隙水圧を表す。Figs. 5, 6 はそれぞれ  $D_r \approx 70\%$  の豊浦砂および新宮砂の結果の中で、応力比のほぼ等しい 2 ~ 3 組の結果を示している。両図からわかるように、両方の砂とも、メンブレンの厚さの違いによって間隙水圧の上昇量には有意な差は認められない。同ような結果は他の相対密度の豊浦砂ならびに新宮砂においても得られた。この結果は間隙水圧の上昇に対するメンブレンの強さと貫入量の減少の影響が相殺されて生じたものであると考えられる。つまり、メンブレンの強さが間隙水圧の上昇に及ぼす影響の度合はメンブレン厚が厚いほど大きくなるのに対して、メンブレンの貫入量の影響の度合はメンブレン厚が薄いほど大きくなると考えられる。

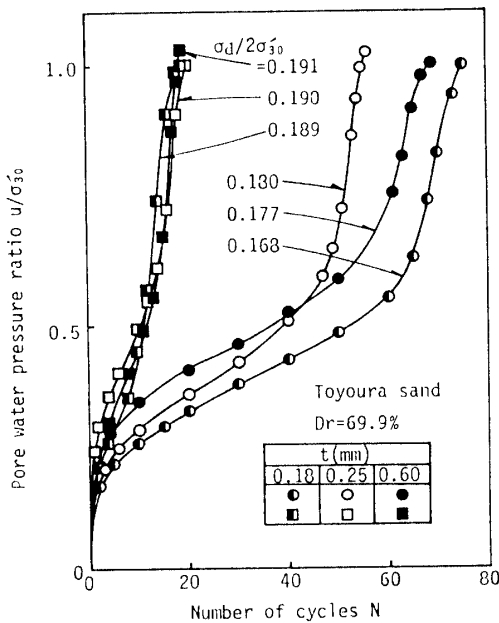


Fig. 5 Variation of pore water pressure ratio  $u / \sigma'_{30}$  with number of cycles N (Toyouura sand)

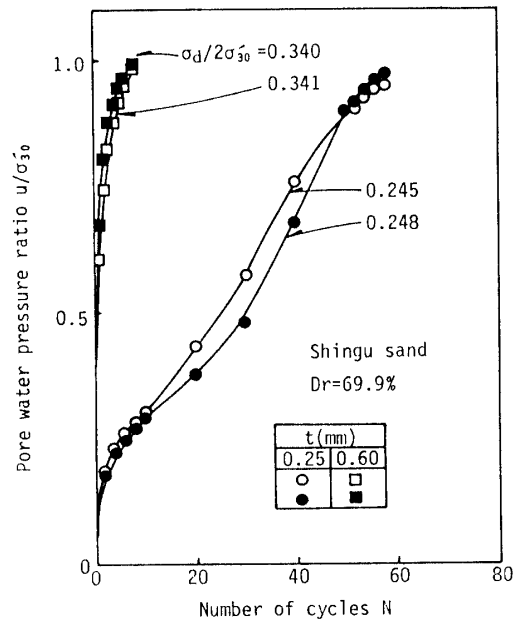


Fig. 6 Variation of pore water pressure ratio  $u / \sigma'_{30}$  with number of cycles N (Shingu sand)

### 5.2 メンブレンの強さに対する液状化抵抗の補正

節5.1で得られた液状化抵抗にはメンブレンの強さおよび貫入量による試験誤差が含まれているが、ここではメンブレンの強さに対する液状化抵抗の補正を行ってみる。

メンブレンの強さに対する液状化抵抗の補正の方法は確立されていないが、ここでは式(1)を用いて補正を行ってみた。この式は Bishop と Henkel<sup>2)</sup>がメンブレンの強さに対する土の静的圧縮強度の補正量を求める場合に用いた式である。

$$\sigma_r = \pi \cdot D \cdot E \cdot \epsilon \cdot (1 - \epsilon) / a_0 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_r$ ：メンブレンの強さに対する圧縮強度の補正量、D：供試体の直径、E：メンブレン単位幅当りの引張り係数、 $\epsilon$ ：ひずみ、 $a_0$ ：供試体の初期断面積。

この式では、 $E \cdot \epsilon$  は Fig. 1 の単位幅のメンブレンに作用する引張り荷重として求まることになるので、液状化時の軸ひずみ半振幅値に対応する引張り荷重を Fig. 1 から読み取り、式(1)から補正量  $\sigma_r$  を求めた。ここで、液状化時の供試体の軸ひずみ半振幅は、メンブレン厚にかかわらず、1 ~ 4%程度であった。

このような方法でメンブレンの強さ(MS)に対する液状化抵抗の補正を行った結果の一例を Fig. 7 に示す。これは  $D_r = 70.0\%$  の豊浦砂の応力比を補正したものである。図中の白ぬきの点、黒ぬりの点は補正前、後の結果を示す。補正前の実験値は Fig. 3 の実験値と同じ

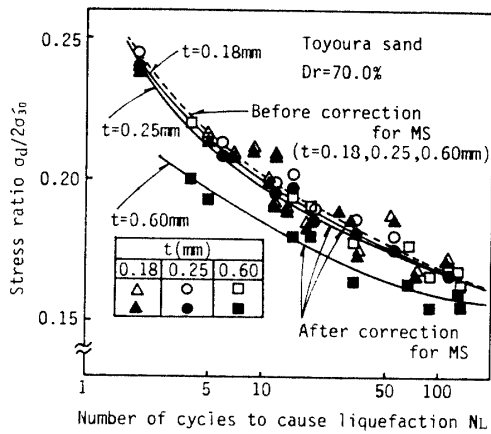


Fig. 7 Correction of liquefaction resistance for membrane strength (Toyoura sand ( $D_r=70.0\%$ ))

ものであり、補正前の厚さ  $t=0.18$  mm,  $0.25$  mm および  $0.60$  mm のメンブレンの場合の応力比と液状化までの繰返し回数の関係は破線で示される。また、補正後の両者の関係は実線で示されている。

この図の実線および破線間の応力比の差が、メンブレンの強さに対する補正量である。この補正量は液状化時のひずみが大いときの結果、言いかえると、せん断応力が大い場合の実験値に対しては補正量が大きくなる。また、メンブレン厚が大きくなるほどその液状化抵抗に対する補正量は大きくなっている。すなわち、実験範囲内で、メンブレンの強さに対する補正量の補正前の液状化抵抗に含まれる比率は、 $t=0.18$  mm のメンブレンの場合には、 $0.5\sim 1.1\%$  で、 $t=0.25$  mm の場合は、 $2.0\sim 2.7\%$  で、 $t=0.60$  mm の場合は、 $3.2\sim 10.3\%$  であった。

これらの結果から、厚さ  $t=0.18$  mm および  $0.25$  mm のメンブレンでは、その強さの液状化抵抗に対する影響はほとんど無視できるが、厚さ  $t=0.60$  mm の場合、メンブレンの強さが液状化抵抗に及ぼす影響は考慮する必要があることがわかった。

ここで、図中のメンブレンの強さの補正後の  $t=0.18$  mm,  $0.25$  mm および  $0.60$  mm のメンブレンでの応力比の差は、メンブレンの貫入量の違いによって生じたものであると考えられる。

### 5.3 メンブレンの貫入量に対する液状化抵抗の補正

ここではメンブレンの強さに対して補正をした後の液状化抵抗に対してメンブレンの貫入量の補正を行ってみた。

メンブレンの貫入量に対する液状化抵抗の補正は、

著者らの方法<sup>1)</sup>を用いて行った。

まず、著者らの方法を簡単にのべておく。メンブレンの膨張を考えた場合の供試体内に生じる間隙水圧と体積ひずみの関係は次式で与えられる。

$$\Delta u = \Delta \varepsilon_v / (m_s + m_m + m_w \cdot n) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta u$ : 間隙水圧の上昇量、 $\Delta \varepsilon_v$ : 排水条件下での砂骨格の体積ひずみ、 $m_s$ : 砂骨格の体積膨張係数、 $m_m$ : メンブレンの膨張係数、 $m_w$ : 水の膨張係数、 $n$ : 間隙率。

$m_s$  および  $m_m$  のオーダーはおおよそ  $10^{-4}/\text{kPa}$  であるのに対し、 $m_w$  のそれは、 $0.45/\text{GPa}$  (水温  $20^\circ\text{C}$  のとき) であり  $n$  は  $0.5$  以下であるから、式 (2) は次のように書くことができる。

$$\Delta u \approx \Delta \varepsilon_v / (m_s + m_m) \quad (3)$$

実験においては、供試体の体積を  $V_c$  とし、排水条件下で繰返しせん断応力を加えたときの体積縮少量  $\Delta V$ 、また、有効拘束圧を減少するリバウンド試験の際の体積膨張量  $\Delta V_r$ 、さらに、メンブレン貫入量の減少に相当する体積膨張量  $\Delta V_{rm}$  を測定しているのだから、次の関係が成り立つ。

$$\Delta \varepsilon_v = \Delta V / V_c \quad (4)$$

$$\Delta u \cdot (m_s + m_m) = \Delta V_r / V_c \quad (5)$$

$$\Delta u \cdot m_m = \Delta V_{rm} / V_c \quad (6)$$

結局、式 (3) は次のようになる。

$$\Delta V / V_c = \Delta V_r / V_c \quad (7)$$

式 (7) の関係は、所定の繰返し回数比  $N/N_L$  において、砂およびまき土に対してほぼ成り立つことが示された。したがって、メンブレンの貫入量の減少分を取り除いた間隙水圧の上昇に関する砂の骨格の体積ひずみを用いることにより、液状化抵抗の補正を行うことが示された。

以上ののべた方法を用いて豊浦砂の  $D_r=70.0\%$  の場合で  $t=0.25$  mm のメンブレンの強さの補正後の液状化抵抗 (Fig. 7) に対して行ったメンブレンの貫入量 (MP) の補正の方法を Fig. 9 を用いてのべる。

Fig. 9 (a) は、リバウンド試験およびメンブレン貫入試験の結果である。図中の体積膨張ひずみ  $\Delta V_r / V_c$  とメンブレン貫入量の減少による体積膨張ひずみ  $\Delta V_{rm} / V_c$  の差が砂骨格の体積ひずみ  $\Delta V_s / V_c$  となり、この砂骨格の体積ひずみが間隙水圧の上昇に関係していると考えられる。

液状化時には、有効拘束圧  $\sigma'_3=0\text{kPa}$  となるが、その場合には砂骨格が壊れ、体積ひずみは正確に求まらない。そこで、今回の補正では  $u/\sigma'_{30}=0.9$  すなわち  $\sigma'_3=9.8\text{kPa}$  での砂骨格の体積ひずみを求め、 $0.98 \times 10^{-3}$  が得られた。

Fig. 9 (b) の曲線は Fig. 8 に示してある排水繰返し載荷試験における体積ひずみ  $\Delta V/V_c$  と繰返し回数比  $N/N_L$  の関係の平均値 (図中の●印) の曲線を示している。ここで、Fig. 8 の液状化までの繰返し回数  $N_L$  は、応力比  $\sigma_d/2\sigma'_{30}$  を液状化実験における応力比と液状化までの繰返し回数の関係 (Fig. 3) に対応させて得られた値であり、これによって得られる曲線は応力比によらず、ある一定の範囲におさまるので、この平均値曲線を用いて補正を行った。

(b) 図において先に求めた砂骨格の体積ひずみ  $0.98 \times 10^{-3}$  を対応させて  $N/N_L$  を求めると  $N/N_L = 0.22$  を得る。すなわち、(b) 図の  $\Delta V/V_c$  はメンブレン貫入の影響が含まれていない体積ひずみであるから、この体積ひずみに (a) 図から求めた砂骨格の体積ひずみを対応させることにより、メンブレンの貫入量の減少分の影響がない場合の液状化の時点が  $N/N_L = 1.0$  から  $N/N_L = 0.22$  へと補正される。したがって、 $N = 0.22N_L$  の点で液状化が生じると考えられるから、(c) 図の液状化抵抗では、補正前の応力比と繰返し回数の関係曲線を  $N_L$  に関して 0.22 倍ずらすことによって補正することができる。このメンブレンの貫入量 (MP) 補正によって液状化抵抗値はかなり低下する。たとえば、 $N_L = 10$  回 のときは 38% 低下することになる。

さらに、Fig. 9 (c) でメンブレンの強さおよび貫入量の減少に対して補正して得られた  $t = 0.25\text{mm}$  のメンブレンを用いた場合の液状化抵抗は、同図のメンブレンの強さに対してだけ補正した  $t = 0.60\text{mm}$  のメンブレンの場合の液状化抵抗 (Fig. 7 の曲線を再掲載) とかなりよく一致することがわかる。このことは、 $t = 0.60\text{mm}$  程度の比較的厚いメンブレンを用いた実験では、

液状化抵抗に含まれるメンブレンの強さの影響はあるが、貫入量の減少の影響はかなり小さくなることを示していると考えられる。なお、 $t = 0.60\text{mm}$  のメンブレンについても貫入量を求め、液状化抵抗を補正することが必要であるが、今回の方法ではこのような厚手のメンブレンの貫入量は正確に測定することができなかつ

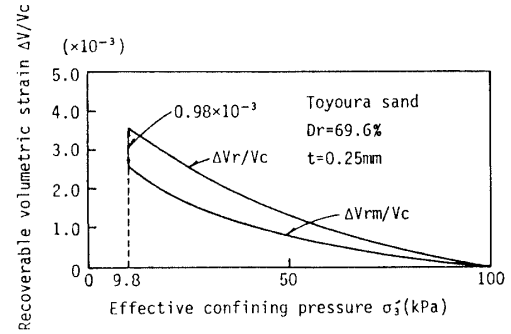


Fig. 9 (a) Relationship between recoverable volumetric strain  $\Delta V/V_c$  and effective confining pressure  $\sigma'_3$

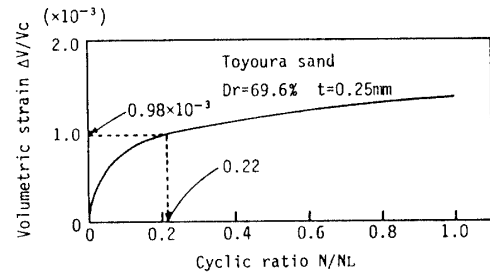


Fig. 9 (b) Average relationship between volumetric strain  $\Delta V/V_c$  and cyclic ratio  $N/N_L$

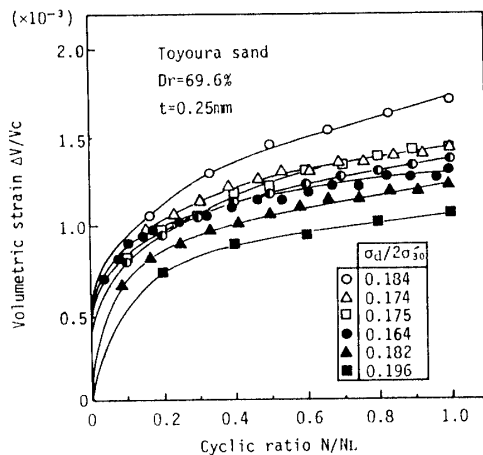


Fig. 8 Variation of volumetric strain  $\Delta V/V_c$  with cyclic ratio  $N/N_L$

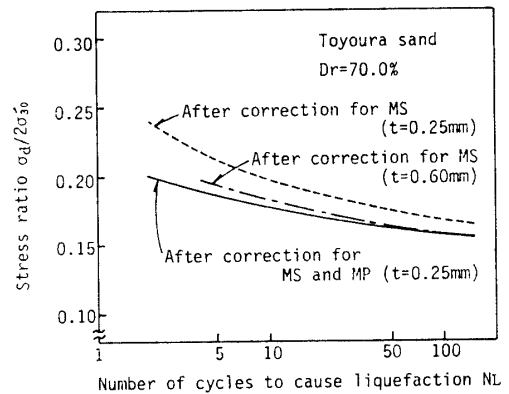


Fig. 9 (c) Liquefaction resistance corrected for membrane strength and penetration

た。

## 6. 結 論

本文では三軸供試体を包むメンブレンの厚さの違いによるメンブレンの強さおよび砂粒子間への貫入量の減少によって生じる試験誤差が砂の液状化抵抗に及ぼす影響を調べた結果、さらに、液状化抵抗を補正した結果をのべた。メンブレンとしては材質がラテックス系で厚さ0.18mm, 0.25mm および0.60mm のものを用いての比較実験を行った。

得られた結果をまとめると次のとおりである。

1) メンブレンの強さおよび貫入量の減少に対する補正前の豊浦砂 ( $D_{50}=0.26\text{mm}$ ) および新宮砂 ( $D_{50}=0.83\text{mm}$ ) の液状化抵抗は、厚さ0.18mm, 0.25mm および0.60mm のメンブレンを用いた場合で同じであった。これは、メンブレンの強さおよび貫入量の減少といった2つの要因の液状化抵抗に対する試験誤差が相殺された結果、それぞれの液状化抵抗が等しくなったと考えられる。

2) メンブレンの強さに対する液状化抵抗の補正量は、厚さ $t=0.18\text{mm}$  および $0.25\text{mm}$  のメンブレンではそれぞれ0.5~1.1%, 2.0~2.7%と小さく無視できるが、 $t=0.60\text{mm}$  のメンブレンでは3.2~10.3%とかなり大きくなった。

3)  $t=0.25\text{mm}$  のメンブレンを用いた場合のメンブレンの強さおよび貫入量の補正後の液状化抵抗は、 $t=0.60\text{mm}$  のメンブレンについて強さの補正のみを行っ

て得られた液状化抵抗とほぼ一致した。

4) 以上の結果から $t=0.60\text{mm}$  のメンブレンについては、液状化抵抗に対する貫入量はかなり小さいと考えられる。なお、以上の結論では $t=0.60\text{mm}$  のメンブレンの貫入量の補正が不必要といっているのではない。今回の方法では、このように厚いメンブレンの貫入量は正確に測定することができなかったが、今後メンブレンの貫入量の測定方法について検討する予定である。

最後に、実験および結果の整理を手伝って頂いた山口大学工学部学生、佐伯育展君(現、東亜建設工業株)に厚く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 大原資生・山本哲朗：動的三軸による液状化試験におけるゴム膜貫入量の影響について、土質工学会論文報告集, Vol.22, No.1, pp.127-135, 1982
- 2) Bishop, A. W. and Henkel, D. J. : The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, Edward Arnold Ltd., London, 2nd ed., pp.167-170, 1962
- 3) 土質工学会編：土質試験法—第2回改訂版—, pp.558, 1979
- 4) 大原資生・山本哲朗・松田博・兵動正幸・若槻好孝：ゴム膜の厚さが液状化抵抗に及ぼす影響, 第40回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp.300-301, 1988
- 5) 三浦哲彦・山本哲朗：砂の高圧三軸圧縮試験の結果に及ぼす2, 3の要因について, 土質工学会論文報告集, Vol.16, No.3, pp.123-128, 1976

(平成元年4月15日受理)