

メンブレン貫入に対する液状化抵抗の補正值

Correction of Liquefaction Resistance for Membrane Penetration

大原資生 (Sukeo Ōhara)
山本哲朗 (Tetsuro Yamamoto)
松田 博 (Hiroshi Matsuda)
若槻好孝 (Yoshitaka Wakatsuki)

キーワード：液状化抵抗／補正值／メンブレン貫入／メンブレンの強さ (IGC:D7)

1. 緒言

繰返し三軸圧縮試験機を用いた砂質土の液状化試験では供試体はメンブレンで包まれているので、メンブレンの土粒子間への貫入量の減少、メンブレンの強さの影響によって通常、液状化抵抗が大きく求まることになる。そのため、メンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗を補正するための試験^{1), 2), 3)}やメンブレン貫入量の減少が生じないように工夫した装置を用いた液状化実験⁴⁾が行われている。

著者らの方法^{1), 2)}を含めて、この種の補正実験は一般に煩さである。そこで今回この種の補正実験を行わずに種々の土の液状化抵抗の補正値を粒度分布との関係から容易に求め得る図表を作成することを目的として、先の研究と同じ実験を行った。そのために試料としては2種の砂、礫、まさ土といった粒度配合のかなり異なるものを用いた。またメンブレンは材質がラテックス系で、厚さ0.18mm、0.25mm、0.60mmの3種のものを使った。

結論としてメンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正率を均等係数との関係で与えることができた。またメンブレンの強さの液状化抵抗に対する影響は無視しても差しつかえないことが示された。なお、補正後の液状化抵抗は、今回新たに行ったメンブレン貫入量の減少がない液状化実験から得られた値と一致し、著者らの補正方法が妥当であることも確認された。

以下に、実験装置、試料およびメンブレン、結果および考察の順にのべる。

表-1 試料の物理常数

	Toyoura sand	Shingu sand	Gravel	Decomposed granite soil
Gs	2.636	2.642	2.771	2.630
D ₅₀ (mm)	0.25	0.83	2.83	1.34
Uc	1.68	1.61	1.04	28.92
E _{max}	1.023	0.859	0.810	0.922
E _{min}	0.676	0.623	0.587	0.439

2. 試料およびメンブレン

試料としては豊浦砂、新宮砂、礫およびまさ土の4種が用いられた。それぞれの試料の物理常数は表-1に、粒度分布は図-1に示す。礫は比較的偏平な粒子からなり、偏平度(短軸の長さの厚みに対する比)は1.9である。まさ土は山口県宇部市産のもので、風化の程度はそれほど大きくなく、比較的角ばった粒子からなる。均等係数(Uc)は28.9で、それが1程度の他の試料に比して著しく大きいことが特徴である。礫を除く他の試料は土田氏の提案⁵⁾による液状化の可能性のある粒度分布の範囲に入っている。

メンブレンとしては材質はラテックス系で、液状

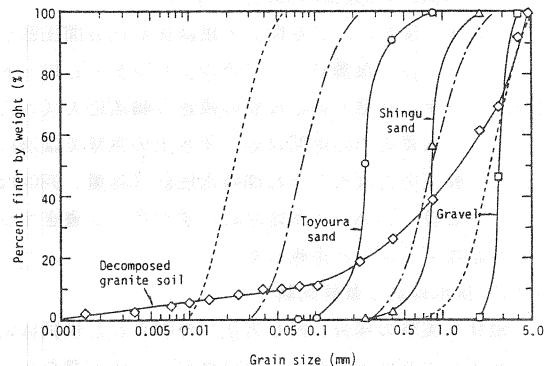


図-1 試料の粒度分布

* 宇部工業高等専門学校 校長、 ** 山口大学工業短期大学部土木工学科 助教授
*** 山口大学工学部土木工学科 助教授、 **** 同 大学院

化実験で通常使用される厚さ (t) = 0.18mm、0.25mmの他に0.60mmのものが用いられた。

図-2はBishopとHenkelの方法⁶⁾にしたがって測定されたメンブレンにかかる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、 $t=0.60\text{mm}$ のメンブレンの引張り強さは $t=0.25\text{mm}$ のメンブレンのほぼ2倍で、 $t=0.18\text{mm}$ の場合の約4倍であった。

3. 実験装置

実験には繰返し三軸試験機が用いられたが、これはわれわれの実験室で製作したもので、その仕様の詳細については先の論文¹⁾を参照されたい。この試験機では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替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する⁷⁾。

4. 実験方法

実験としては先の研究^{1)、2)}と同様に通常の液状化実験を初めとし、メンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗を補正する際に必要な諸値を得るための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の3種の実験が行われた。また今回はメンブレン貫入量の減少が生じないようにしての液状化実験が行われた。

以下にそれぞれの実験方法について述べる。

a) 液状化実験

飽和状態の供試体は、内側にメンブレンが張られ脱気水が満たされたモールド内に湯煎して脱気した試料を所定の密度となるように詰めることで作製された。供試体の相対密度 (D_r) はほぼ50%、70%、80%の3とおりとした。供試体は直径5cm、高さ約12cmである。

供試体を作製した後、セル室を組み立てた後、セル室内にあるロードセルと上部ベDESTALを結合した。次にセル室内に上部ベDESTALの上面まで水を入れ、軸差応力、間隙水圧および軸方向変位が測定できるように準備した後、非排水状態で側圧 (σ'_{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、各試料のB値は0.96以上であった。

その後、排水バルブを開いて供試体を10分間圧密し、その際の排水量をビューレットの水位で測定する。

圧密終了後、復働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。非排水状態で正弦波状の繰返し軸差応力 (σ_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。軸差応力の周期は砂、まさ土の実験では2秒、礫の場合は5秒とした。実験中には間隙水圧、軸方向変位、軸差応力はそれぞれ間隙水圧計 (容量: 980kPa)、抵抗線ひずみ計式変位計 (容量: 20mm)、ロードセル (容量: 490N) で測定され、すべてペン書きオシログラフに記録した。液状化の発生は供試体の軸ひずみが急増するときと定義した。

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、排水状態で液状化実験と同様の周期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の水位で測定する。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し、排水量の測定も液状化が生じたと同じ繰返し回数まで行う。

c) リバウンド試験

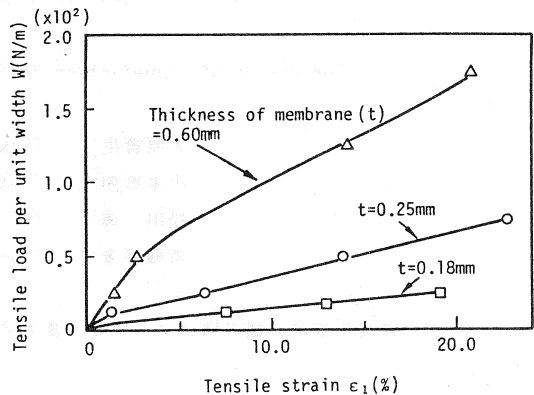


図-2 メンブレンの引張り荷重とひずみの関係

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、側圧 $\sigma'_{30}=98\text{kPa}$ で圧密された供試体に対し、側圧を 9.8kPa ずつ段階的に減少させてゆきながら、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。この実験では供試体の膨張量には供試体表面におけるメンブレンの土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、土の骨格のリバウンド量を求めるには、供試体の膨張量から次にのべるメンブレン貫入試験から得られるメンブレン貫入量の減少分を除く必要がある。

d) メンブレン貫入試験

前回の研究^{1)、2)}では砂供試体のメンブレン貫入量はロッド挿入法によって測定されたが、礫および、まさ土の場合にはロッドをその中央に入れた供試体を作り難いことから、今回の実験では次の Void と Negussey の方法³⁾を用いた。すなわち、直径 3.5cm 、 5.0cm 、 7.0cm で、高さがその約2倍をもつそれぞれの供試体を作り、側圧 $\sigma'_{30}=98\text{kPa}$ を加えて圧密した後、側圧を 9.8kPa ずつ段階的に減少させたときの各側圧での供試体の膨張量をビューレットの水位で測定し、この膨張量と供試体の径との関係から供試体径がゼロのときの膨張量としてメンブレン貫入量の減少分を求めるという方法である。

e) メンブレン貫入量の減少がない液状化実験

図-3の装置を繰返し三軸試験機にとりつけ、以下の方法でメンブレン貫入量の減少が生じないようにして液状化実験を行った。非排水状態で供試体に繰返し軸差応力を1回加える毎に载荷を停止し、バルブ(1)~(5)のみを開けて、そのときまでに供試体内に発生した間隙水圧に相当する水压をコントロールシリンダーを用いて供試体に加える。ゼロ指示計をみながら、このときの間隙水圧と水压の差が生じないようにコントロールシリンダーで調節した後、バルブ(2)、(3)を閉める。次に、そのときの有効応力におけるメンブレン貫入量の減少分を図-9(a)から求めて、その量に相当する脱気水をバルブ(6)を開けた状態で供試体に送り込む。この注水によって間隙水圧したがって有効応力が若干変動するので、その変動に対応する貫入量の変化分の水を供試体にする。通常、この注水の操作を3~6回行うことで、注水による間隙水圧の変化は生じなくなり、図-9(a)の有効応力に対してのメンブレン貫入量の減少分に相当した注水が行われるので、メンブレン貫入量の減少が生じない液状化実験が可能となる。以上の操作を供試体に液状化が生じるまで行う。なお、この実験では繰返し軸差応力の周期は5秒とした。

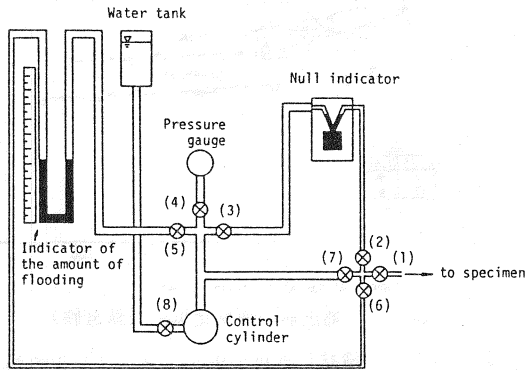


図-3 メンブレンの貫入量の減少を抑止する装置

RamanaとRaju³⁾は図-3と同ような装置を静的三軸試験機にとりつけてメンブレン貫入量の減少の影響がない状態で砂の非排水せん断試験を行っている。

5. 結果および考察

5.1 補正前の液状化抵抗

図-4、5、6、7はそれぞれ豊浦砂、新宮砂、礫、まさ土の通常の液状化実験から得られた応力比 $\sigma_v / 2\sigma'_{30}$ と液状化までの繰返し回数 N_L の関係を示す。これはメンブレンの強さとメンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正を行っていない結果である。図において、半ぬりの点、白ぬきの点、黒ぬりの点はそれぞれ厚さ $(t) = 0.18\text{mm}$ 、 0.25mm 、 0.60mm のメンブレンを用いた結果を示す。まさ土の実験では $t=0.18\text{mm}$ 、 0.25mm のメンブレンでは破れ易いので 0.60mm のもののみが使われた。

図-4、5からわかるように、それぞれの相対密度 (D_r) の豊浦砂および新宮砂の液状化抵抗にはメンブレンの厚さの違いによる差はみられない。

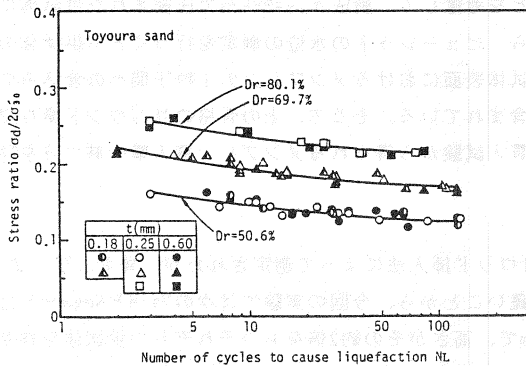


図-4 補正前の液状化抵抗 (豊浦砂)

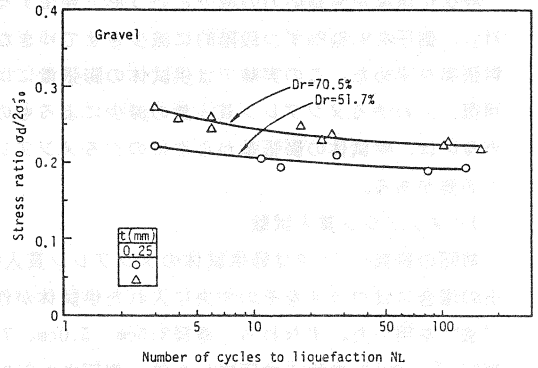


図-6 補正前の液状化抵抗 (礫)

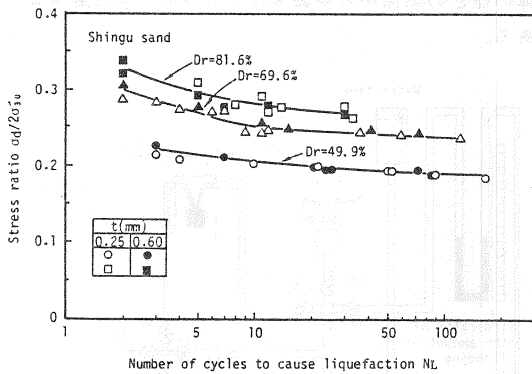


図-5 補正前の液状化抵抗 (新宮砂)

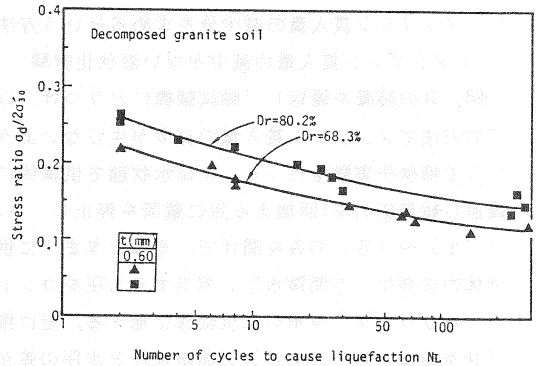


図-7 補正前の液状化抵抗 (まき土)

図-4～7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、メンブレンの強さに対する液状化抵抗の補正は先の研究と同様にBishopとHenkel⁶⁾の式(1)を用いて行ってみた。

$$\sigma_r = \pi \cdot D \cdot E \cdot \varepsilon_1 \cdot (1 - \varepsilon_1) / a_0 \quad (1)$$

ここで、 σ_r ：メンブレンの強さに対する圧縮強さの補正量、D：供試体の直径、E：メンブレン単位幅当りの引張り係数、 ε_1 ：軸ひずみ、 a_0 ：供試体の初期断面積

この式ではE・ ε_1 は図-2の単位幅のメンブレンに作用する引張り荷重として求めることができるので、液状化時の軸ひずみ半振幅値に対する引張り荷重を図-2から読みとり、式(1)から補正量 σ_r を求めた。この σ_r の液状化抵抗に含まれる比率はt=0.18mm、0.25mmのメンブレンの場合には砂に対して約0.5%、礫で1%、t=0.60mmのときでも1%程度であることから、メンブレンの強さが液状化抵抗に及ぼす影響は無視しても差しつかえないとの結論が得られた。

図-8(a)、(b)はそれぞれDr=70%の豊浦砂、新宮砂について応力比はほぼ等しく、メンブレン厚の異なる実験から得られた間隙水圧uと繰返し回数Nの関係曲線と一緒に示した図である。図からわかるように、

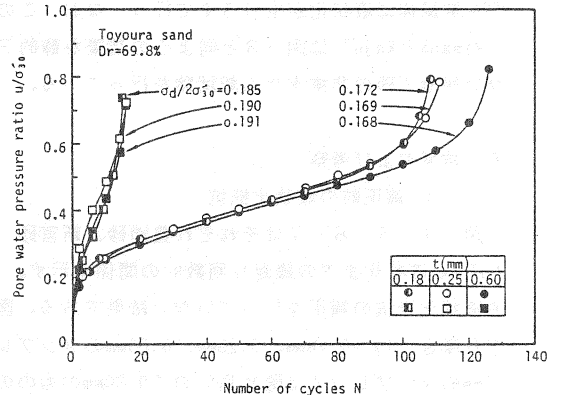


図-8(a) 各メンブレンを用いた実験での間隙水圧上昇曲線 (豊浦砂、Dr=69.8%)

両砂ともにメンブレンの厚さの違いによって、間隙水圧の上昇には有意な差は認められない。同様の結果は $Dr=50\%$ 、 80% の両方の砂においても得られた。

以上のように、メンブレンの厚さの違いによって豊浦砂、新宮砂の液状化抵抗および間隙水圧の上昇に差がなかったが、このことは、メンブレン貫入量の減少のそれらへの影響の度がメンブレン厚によって変わらないということであろう。これについては次節でのべる。

5. 2 メンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正法

メンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正を著者らの方法を用いて行ってみた。この方法は先の論文¹⁾に詳しくのべてあるので、ここでは簡単にのべておく。

メンブレンの膨張を考慮した場合の供試体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、 Δu ：間隙水圧の上昇量、 $\Delta \varepsilon_v$ ：排水条件下での土骨格の体積ひずみ、 m_s ：土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 $10^{-4}/kPa$ であるのに対し、 m_w のそれは $0.45/GPa$ (水温 $20^\circ C$ 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_0 とし、排水条件下で繰返しせん断を加えたときの体積縮少量 ΔV 、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 ΔV_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 ΔV_{rm} を測定しているのであるから、

$$\Delta \varepsilon_v = \Delta V / V_0 \quad (4)$$

$$\Delta u \cdot (m_s + m_m) = \Delta V_r / V_0 \quad (5)$$

$$\Delta u \cdot m_m = \Delta V_{rm} / V_0 \quad (6)$$

となる。

結局、式 (3) は次のようになる。

$$\Delta V / V_0 = \Delta V_r / V_0 \quad (7)$$

式 (7) の関係は、所定の繰返し回数比 N/N_L において、今回用いたすべての試料に対してもほぼ成り立つことが認められた。

したがって、メンブレン貫入量の減少分を取り除いた間隙水圧の上昇に関係する土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い得ることがわかった。

以上に説明したメンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正方法を図-9を用いてのべる。図-9

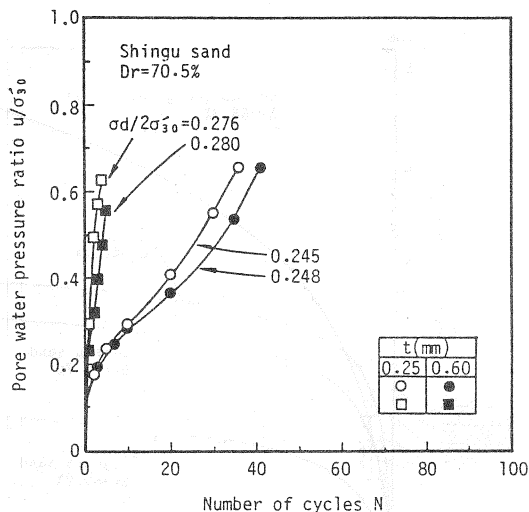
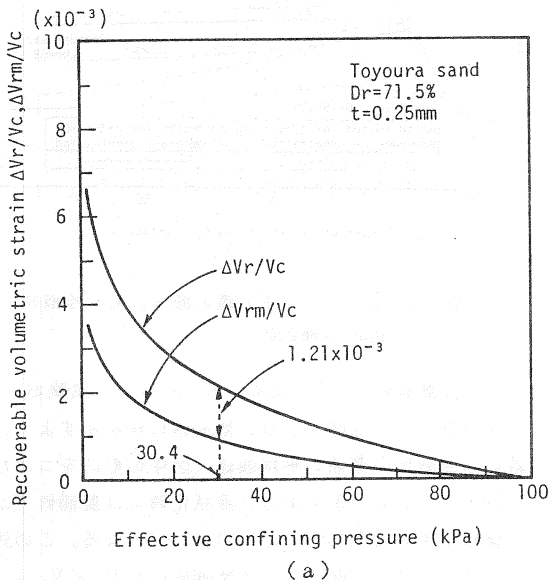


図-8 (b) 各メンブレンを用いた実験での間隙水圧上昇曲線 (新宮砂、 $Dr=70.5\%$)



(a)

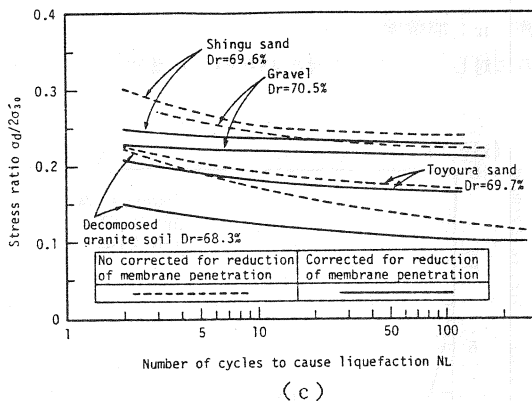
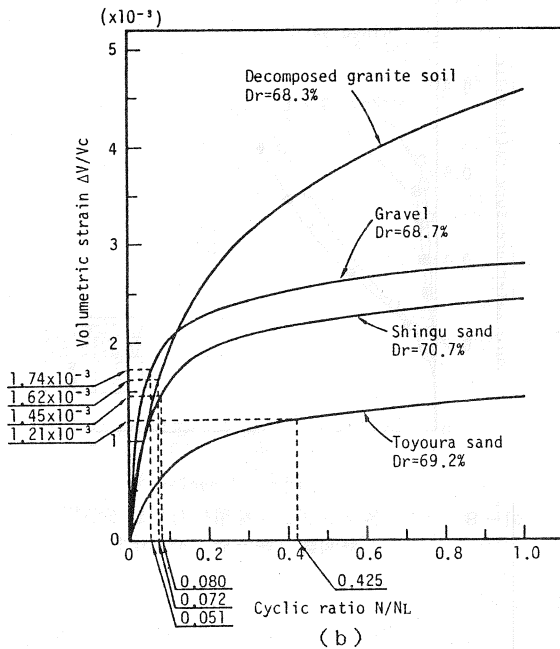


図-9 メンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正法

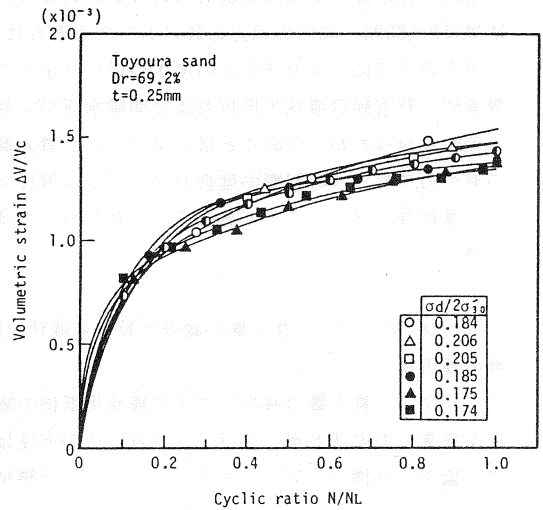


図-10 排水繰返し載荷試験の結果の一例

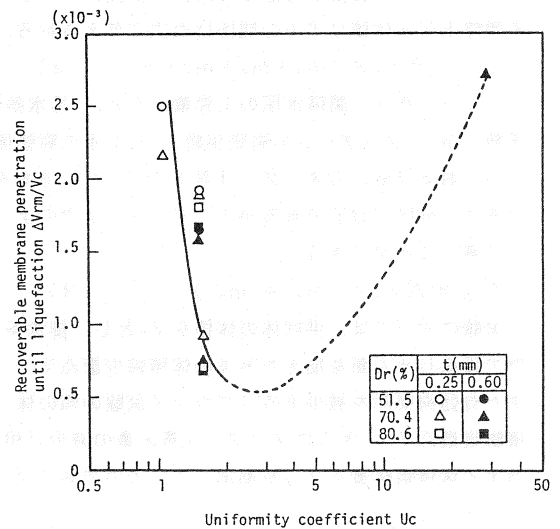


図-11 液状化時までのメンブレン貫入の減少量と均等係数の関係

(a) は豊浦砂 (Dr=71.5%) の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-9 (b) は図-10 に豊浦砂の例を示すように一連の排水繰返し載荷試験から得られた体積ひずみと繰返し回数比の関係の平均曲線 (図中の●印をつけた曲線) を示す。

図-9 (a) に示すように液状化時には豊浦砂では有効拘束圧 σ'_v は 30.4kPa であるので、このときの骨格の体積ひずみ $\Delta V_r / V_c$ は 1.21×10^{-3} となる。こ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。そこで (b) 図において豊浦砂の $\Delta V_r / V_c = 1.21 \times 10^{-3}$ となるとき N/N_L は 0.425 と求まる。したがって、 $N = 0.425 N_L$ の点で液状化が生じたと考えられるから、(c) 図の液状化抵抗では、補正前の応力比と繰返し回数比の関係曲線を N_L について 0.425 倍ずらすことによって補正できる。

同様に (b) に示されるように、新宮砂、礫、まさ土の場合には N_L について、それぞれ 0.080 倍、0.051 倍、0.072 倍ずらすことによって液状化抵抗が補正される (c) 図)。(c) 図からわかるように、補正後

の液状化抵抗は新宮砂でもっとも大きく、ついで礫、豊浦砂、まさ土の順に小さくなる。とくに、まさ土の液状化抵抗は新宮砂のその約1/2とかなり小さいことが注目される。このように均等係数の大きい土の液状化抵抗が均等度のよい土のそれよりも小さくなることは、数種の礫について行った液状化実験の結果でも得られている¹⁰⁾。

図-1 1 は各試料について液状化時までに生じたメンブレン貫入量の減少によって生じた体積ひずみ $\Delta V_r = \Delta V_c / V_c$ と均等係数 U_c の関係を示す。これは $t=0.25\text{mm}$ 、 0.60mm のメンブレンを用いた結果である。 $U_c=5\sim 20$ の結果がないので、両者の関係の一部は破線の曲線で示しているが、メンブレン貫入量の減少は各試料の相対密度およびメンブレン厚によってそれほど違わず、その量はわが国でみられる砂の U_c の上限値といわれる $U_c=3^{11)}$ のあたりでもっとも小さく、 U_c がこれより大きくても小さくても増加するように見受けられる。

5. 3 メンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正率

図-1 2 はメンブレン貫入量の減少がない液状化実験の記録の一例である。試料は豊浦砂 ($D_r=70.0\%$) で、

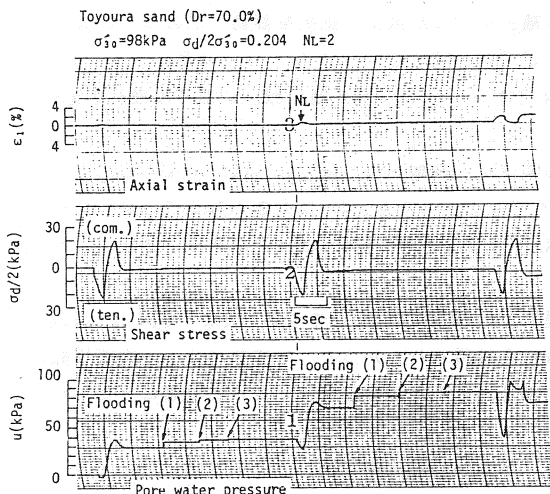


図-1 2 メンブレン貫入量の減少がない液状化実験の記録の一例

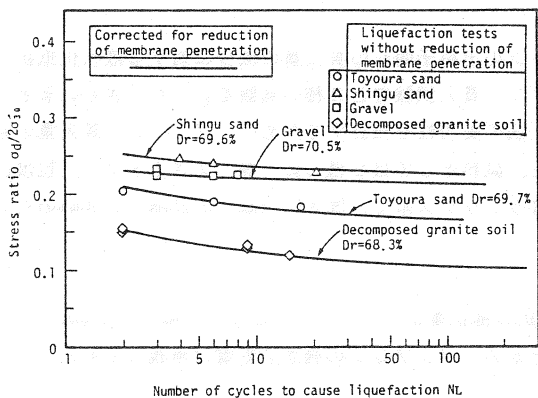


図-1 3 メンブレン貫入量の減少がない液状化実験での液状化抵抗と補正後の値の比較

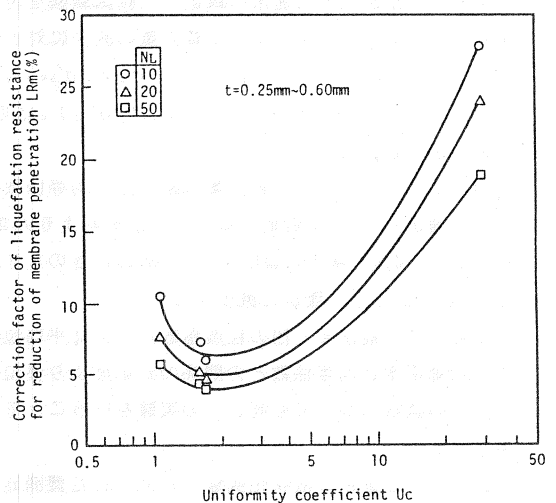


図-1 4 メンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正率

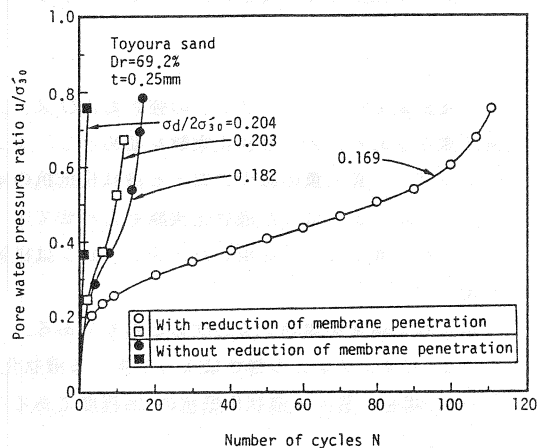


図-1 5 メンブレン貫入量の減少の間隙水圧の上昇に与える影響

$N_L=2$ で液状化を生じた例である。この実験では1回の載荷後に3回の注水が行われている。さらに2回目の載荷によって液状化を生じた後も注水を行って、供試体の軸ひずみおよび間隙水圧の上昇の状況をみた実験である。

図-13のそれぞれの試料についての3~5個の測定値は、メンブレン貫入量の減少を生じない液状化実験から得られた応力比と液状化までの繰返し回数との関係を示す。同図にはメンブレン貫入量の減少に対する補正後の両者の関係曲線(図-9(c))も再掲されている。この図からわかるように、いずれの試料についてもメンブレン貫入量の減少がない実験から得られた液状化抵抗の測定値は、著者らの方法によって得られた補正後の曲線上に載っており、著者らの補正法が妥当であることが確認できた。

このような結果が得られたことから、図-9(c)の補正前・後の液状化抵抗を用いてメンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正率 $L R_m$ (式(8))を求め、それと U_c の関係を $N_L=10, 20, 50$ 回について示したのが図-14である。図-11の説明でのべたように、メンブレン厚の違いによる貫入量の減少の差異は無視できるので、図-14の結果は $t=0.25\sim 0.60\text{mm}$ のメンブレンを使用した場合に対して用いることができる。したがって、通常の繰返し三軸試験機を用いて得られた液状化抵抗からそれに補正率を乗じた量を差引くことによってメンブレン貫入量の減少に対する補正を行った液状化抵抗を容易に求めることができる。

$$L R_m = \{ (\sigma_d / 2\sigma'_{30})_{nc} - (\sigma_d / 2\sigma'_{30})_c \} / (\sigma_d / 2\sigma'_{30})_{nc} \times 100 \quad (8)$$

ここで、 $(\sigma_d / 2\sigma'_{30})_{nc}$ 、 $(\sigma_d / 2\sigma'_{30})_c$ はそれぞれメンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正前、後の値である。

図-11のメンブレン貫入量の減少分と均等係数の関係から推察されるように、図-14でも $U_c=2\sim 3$ において補正率 $L R_m$ は最低となり、 U_c がそれより大きくても小さくても $L R_m$ は大きくなるのがわかる。たとえば $N_L=10$ 回の場合には $U_c=1, 2, 30$ のときの $L R_m$ はそれぞれ12%、6%、28%と求まる。また、 $L R_m$ は N_L が大きくなると、僅かに減少する。

なお、この補正率と他の粒度指数たとえば平均粒径 D_{50} などの関係についても調べたが、図-14に示したような補正率と均等係数との関係の対応度より優位なものとは得られなかった。いずれにせよ、均等係数が2~10の試料についても同様の実験を行うことで、補正率と均等係数の関係がさらに明確に与えられると考えられる。

図-15は通常の液状化実験から得られた豊浦砂の間隙水圧上昇曲線(図中、白ぬきの記号)とメンブレン貫入量の減少のない実験から得られた曲線(黒ぬりの記号)を比較した図である。この図から通常の液状化実験では有効応力の減少に伴い、メンブレン貫入量の減少が生じるために間隙水圧の上昇の割合はメンブレン貫入の減少のない場合に比べて著しく小さくなっていることがわかる。

6. 結論

三軸供試体を包むメンブレンの強さおよびメンブレンの土粒子間への貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正量を求めるために液状化実験を初めとし、メンブレン貫入試験など3種の実験を行った。さらに著者らのメンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正法の妥当性を検討するために、メンブレン貫入量の減少が生じないようにした液状化実験も合わせて行った。試料としては2種の砂、礫、まぎ土といった粒度配合のかなり異なるものを用いた。メンブレンは材質はラテックス系で、厚さ0.18mm、0.25mm、0.60mmのものを用いた。

得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) メンブレンの強さによって生じる液状化抵抗の補正量は、メンブレン厚が0.18mm、0.25mmおよび0.60mmの場合、最大で液状化抵抗の1%程度であることから、メンブレンの強さの影響は無視しても差しつかえない。

(2) 液状化時までのメンブレン貫入量の減少分は、それぞれの試料の相対密度、メンブレンの厚さによってそれほど差異はなく、それは均等係数(U_c)の関係で与えることができる。

(3) 著者らの方法を用いたメンブレン貫入量の減少に対する補正後の液状化抵抗は、メンブレン貫入量の減少がない実験から得られた液状化抵抗と一致し、著者らがこれまでの研究で提案してきたメンブレン貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正法が妥当であることが確認された。

(4) 厚さ0.25mm~0.60mmのメンブレンに対して、貫入量の減少に対する液状化抵抗の補正率(LR_m)はN_L=10、20、50回の場合にU_cとの関係(図-14)で与えられ、U_c=2~3でLR_mは最低値をとり、U_cがそれより大きくても小さくてもLR_mは増加する。たとえばN_L=10回ではU_c=1、2、30の場合、LR_mはそれぞれ12%、6%、28%となる。今後、U_c=2~10の試料についても同様の実験を行い、両者の関係をさらに明確にしたい。

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山本雄樹君に厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大原資生・山本哲朗(1982): 動的三軸による液状化試験におけるゴム膜貫入の影響について, 土質工学会論文報告集, Vol.22, No.1, pp.127~135.
- 2) 大原資生・山本哲朗・松田 博・若槻好孝(1988): 三軸試験のゴム膜の厚さが液状化抵抗に及ぼす影響, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集, pp.97~102.
- 3) 土岐祥介・三浦清一・山下 聡(1988): 三軸試験におけるメンブレン貫入とその評価, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集, pp.86~96.
- 4) Tokimatsu, K. and Nakamura, K. (1986): A liquefaction test without membrane penetration effects, Soils and Foundations, Vol.26, No.4, pp.127~138.
- 5) 日本港湾協会(1974): 港湾構造物設計基準補遺(第2回), pp.2-8-7.
- 6) Bishop, A.W. and Henkel, D.J. (1962): The measurement of soil properties in the triaxial test, Edward Arnold Ltd., London, 2nd ed., pp.167~170.
- 7) 土質工学会編(1979): 土質試験法-第2回改訂版-, pp.558.
- 8) Vaid, Y.P. and Negussey, D. (1984): A critical assessment of membrane penetration in the triaxial test, Geotechnical Testing Journal, Vol.7, No.2, pp.70~76.
- 9) Ramana, K.V. and Raju, V.S. (1982): Constant-volume triaxial tests to study the effects of membrane penetration, Geotechnical Testing Journal, Vol.4, No.3, pp.117~122.
- 10) Wong, R.T., Seed, H.B. and Chan, V.K (1975): Cyclic loading liquefaction of gravelly soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.101, No.GT6, pp.571~583.
- 11) 吉見吉昭(1980): 砂地盤の液状化, 技報堂出版, pp.36.