

液状化したまさ土の変形特性

安田 進¹・小林 利雄²・寺内 哲也³

¹正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

²正会員 東京電機大学講師 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

³学生会員 修士 東京電機大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

1995 年阪神・淡路大震災では、ポートアイランドなどで液状化した“まさ土”と基礎的な実験として豊浦標準砂について、単調载荷用の電動モーターを有した繰返しねじりせん断試験装置を用いて、液状化後の変形特性を調べた。まず、中空円筒状の供試体に繰返しせん断力を加えて液状化させ、その後に静的せん断力を供試体に加えた。この時の応力～ひずみ関係について整理した。液状化したまさ土のせん断剛性は液状化前と比べ、約 1/200～1/300 に低下し、豊浦砂では約 1/1000 も低下することがわかった。更に液状化の激しさを変えて、同様の試験を行った。その結果液状化の程度が激しいほどせん断剛性低下率は大きくなった。更に豊浦標準砂において液状化の激しさを定める方法として従来の方法に対して今回、新しく提案した方法の妥当性を検討した。

Key word : *liquefaction, torsional shear test, masa, sand*

1. はじめに

阪神・淡路大震災での地盤の流動を検討する場合、液状化した土の応力～ひずみ関係を知る必要がある。そこで“まさ土”に対し、これを求める実験を行った。また、豊浦砂についても同様の実験を行い、比較検討した。

2. 実験装置および方法

実験装置には単調载荷用の電動式モーターを有する繰返しねじりせん断装置を用いた。供試体の外径 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の大きさとしている。

実験方法の概要を示すと、Fig. 1 となる。まず、飽和した供試体に所定の有効拘束圧 σ'_0 を等方的に加える。圧密終了後に非排水状態で繰返しせん断力を一定の振幅で所定の回数または、所定の振幅で一定の回数だけ加える。そして、繰返し载荷終了後に、非排水状態のままで、10%/min. のせん断ひずみ速度で単調 (静的) 载荷を行う。この時のせん断応力～せん断ひずみ関係を整理する。

繰返しせん断力の载荷方法としては、①一定の振幅で所定の回数だけ加える方法 (以降、方法 1 と呼ぶ) と、②所定の振幅で一定の回数だけ加える方法 (方法 2) の 2 通りの方法がある。

そこで、本研究では、まず既往の実験¹⁾と同様な条件で、豊浦砂を 50% の相対密度に詰め、有効拘束圧 1kgf/cm²(98kPa)のもとで方法 1 による実験を行った。作製した実験装置の妥当性を検証した。この場合の液状化に対する安全率 F_L は従来の研究¹⁾と同様に次式によって求めた。

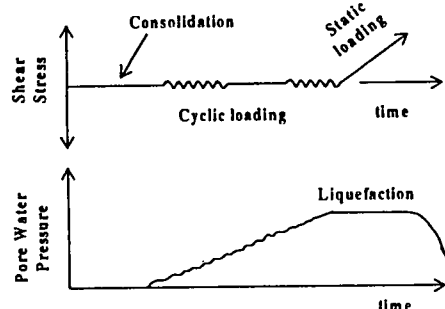


Fig.1 Procedure of cyclic loading

次に、同じ砂と密度、拘束圧のもとで方法 2 による実験を行い、両者の方法による相違を検討した。この場合、一定の繰返し回数としては 20 回とし、液状化に対する安全率 F_L は次式で求めた。

$$F_L = \frac{R1(N1=20, \gamma_{DA}=7.5\%)}{L(N=20)} \quad (1)$$

ただし、 $R1(N1=20, \gamma_{DA}=7.5\%)$: 20 回の繰返し回数で液状化する応力比

$L(N=20)$: 20 回繰り返した所定の応力比振幅

そして、まさ土の特性を調べるために、相対密度が 50% と 80% の 2 種類の密度の供試体に対し、有効拘束圧 1kgf/cm²(98kPa)のもとで方法 2 によって実験を行った。

実験に用いたまさ土はポートアイランド内の港島沈埋トンネルから採取した試料について、26.5mm 以上の粗粒を除いたものである。平均粒径は 3.10mm、細粒分含有率は 4.44%、礫分含有率は 61.5% である。相対密度は礫分以外の砂分以下の土粒子に対して求めている。

3. 液状化後の応力～ひずみ関係

実験結果のうち、20 回の繰返しで液状化する応力比 $R_1(N_1=20, \gamma_{DA}=7.5\%)$ を求めると、豊浦砂で 0.201、 $D_r=50\%$ のまさ土で 0.220、 $D_r=80\%$ のまさ土で 0.231 となった。そこで、この値を用いて、式(1)により F_L を計算した。

次に、繰返し载荷後の単調载荷時におけるせん断ひずみ～せん断応力、間隙水圧関係を Fig.2～5 に示す。順に豊浦砂で方法1、豊浦砂で方法2、まさ土で 50% (方法2)、まさ土で 80% (方法2) の場合である。これらの図で(b)は (a)の両軸を拡大したものである。また、繰返しせん断力は加えずに単調载荷のみ行った実験結果を static と示してある。

これらの図に示されているように、static と F_L が 1.0 より小さい、つまり液状化した供試体を比較すると、非常に小さなせん断力で数%～20%といった非常に大きなせん断ひずみが発生し、その後過剰間隙水圧の低下とともにせん断力が増す傾向となった。そして、 F_L が小さい、つまり液状化の程度が激しいほどその傾向となった。せん断抵抗が回復するのは変形が大きくなると土粒子同士が再び接触し合っ、正のダイレイタンスが発生するようになったためと考えられる。豊浦砂とまさ土のせん断力～せん断ひずみ関係を比べてみると、まさ土の方が液状化しても多少せん断抵抗が残っている傾向となった。

これは、まさ土の方が細粒分を多く含むためではないかと考えられる。また、まさ土で密度が密になると、液状化

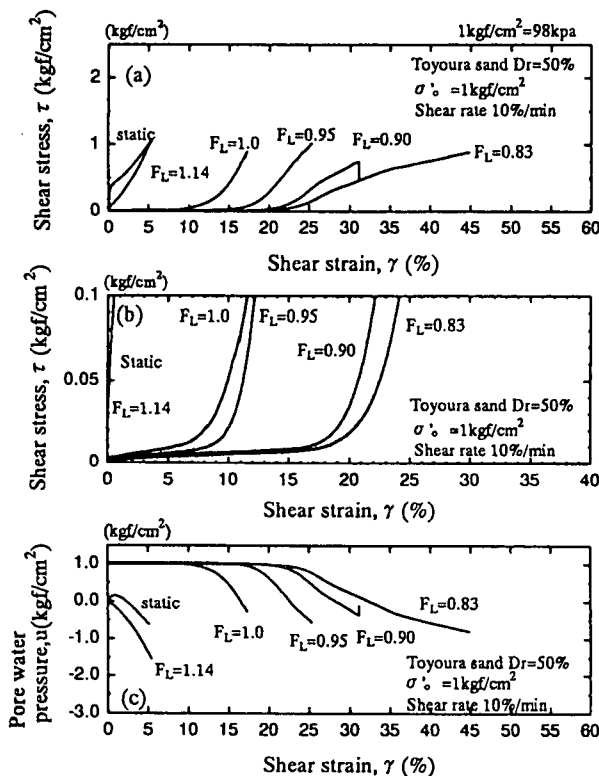


Fig.2 Stress-strain curves and strain-pore pressure curves (Toyouira sand, $D_r=50\%$, method1, τ_d const.)

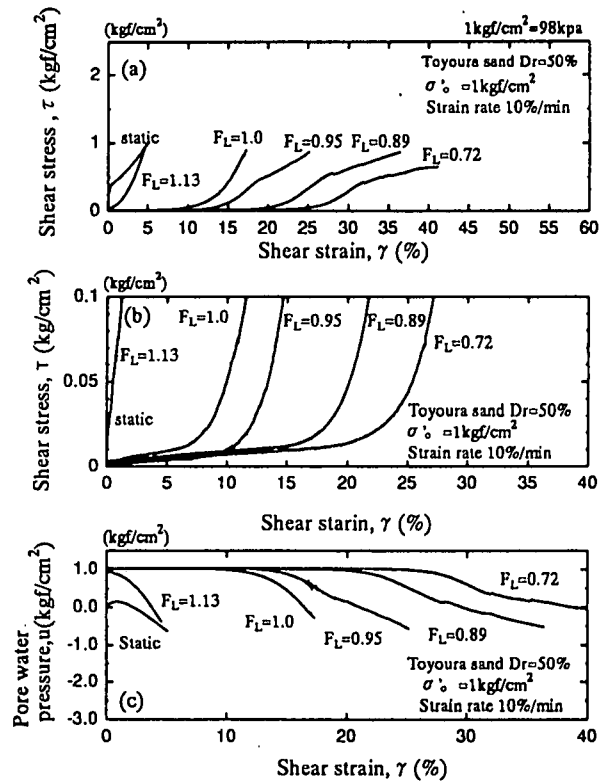


Fig.3 Stress-strain curves and strain-pore pressure curves (Toyouira sand, $D_r=50\%$, method2, $N=20$)

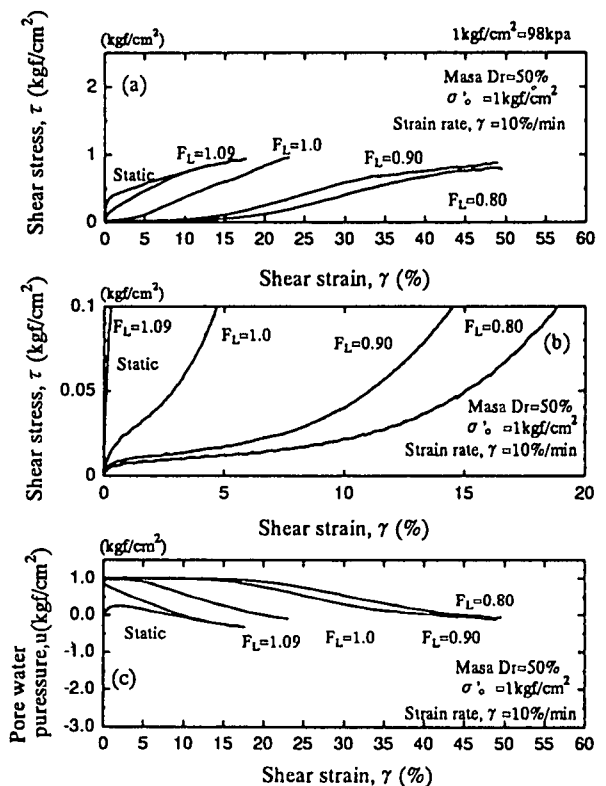


Fig.4 Stress-strain curves and strain-pore pressure curves (Masa, $D_r=50\%$, Method2, $N=20$)

した後に残るせん断抵抗が大きくなった。なお、豊浦砂での方法1と方法2の結果を比較してみると、両者で同様の結果となった。

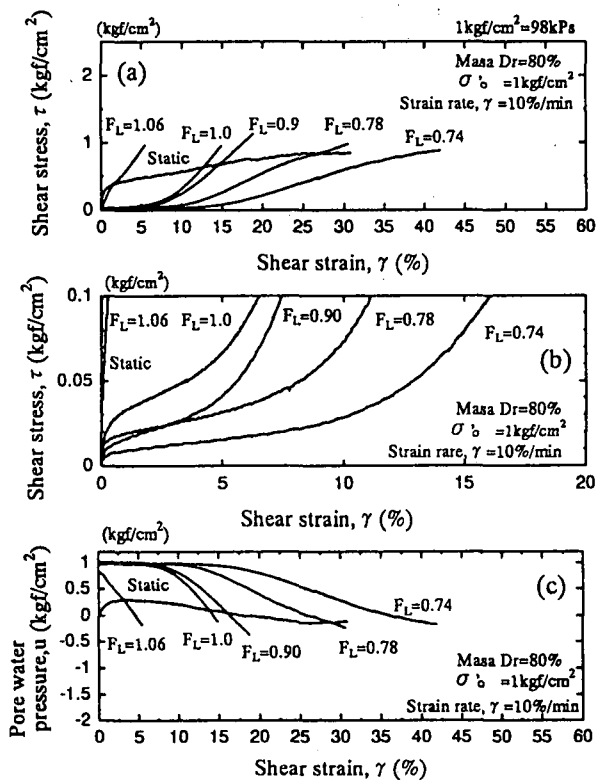


Fig.5 Stress-strain curves and strain-pore pressure curves (Masa, Dr=80%, Method2, N=20)

4. F_L とせん断剛性低下率の関係

Fig 2~5 に示した液状化にともなうせん断剛性の低下割合を定量的に示すため、単調載荷時のせん断弾性定数と、繰返しせん断を加えなかった“static”のせん断弾性定数との比をとってみた。ただし、液状化した供試体の応力~ひずみ関係は、Fig 6 に示すような通常の応力~ひずみ関

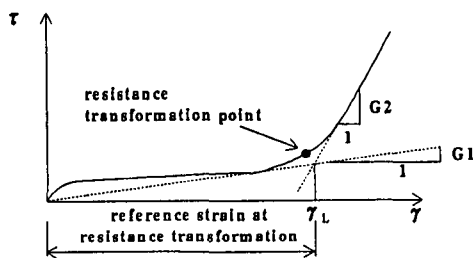


Fig.6 Procedure of cyclic loading

係の逆向きの非線形となっており、バイリニアで近似できそうであった。そこで、せん断剛性が回復するまでのせん断ひずみ“微小抵抗領域 γ_L ”前後の接線係数 G_1 、 G_2 を求めて、液状化後のせん断弾性定数としてみた。また、static の供試体では $\gamma=10^{-3}$ のせん断ひずみ時の割線係数を取り、液状化しない場合のせん断弾性定数を $G_{0,i}$ とした。このように小さいひずみ時の割線係数をとったのは、構造物を建設したときに地盤内で発生するひずみはこの程度の小ささであると考えたからである。なお、既往の実験¹⁾では、 G_1 として、 $\gamma=3\%$ での割線係数でとっていたため、豊浦砂ではこの値(G_1) $\gamma=3\%$ でも整理してみた。Fig 7 に、

まず、豊浦砂について(G_1) $\gamma=3\%/G_{0,i}$ と F_L の関係を示す。これに見られるように、液状化にともなうせん断剛性は $1/1000$ 以下に低下し、 F_L が小さい、つまり液状化の程度が激しいほど低下した。図には既往の実験結果¹⁾も示したが、今回の実験結果とほぼ同じ値となっており、実験装置の妥当性がまず確かめられた。

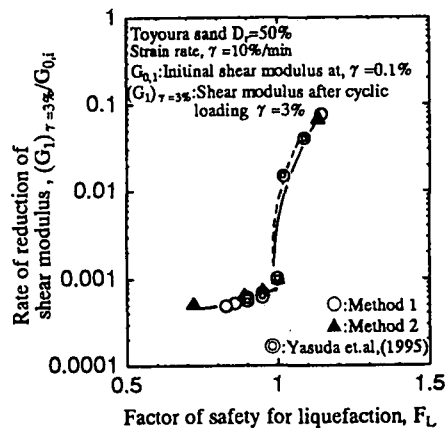


Fig.7 Relationships between (G_1) $\gamma=3\%/G_{0,i}$ and F_L (Toyoura sand, Dr=50%)

次に、Fig 8、9 に豊浦砂、まさ土における $G_1/G_{0,i}$ と F_L の関係を示す。

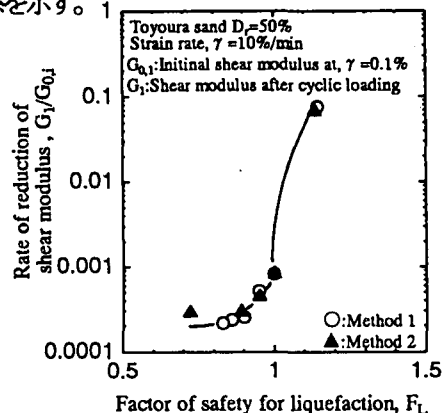


Fig.8 Relationships between $G_1/G_{0,i}$ and F_L (Toyoura sand, Dr=50%)

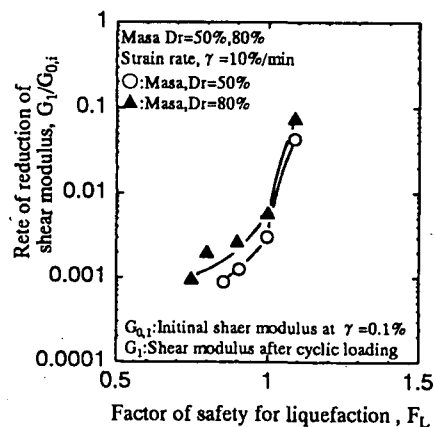


Fig.9 Relationships between $G_1/G_{0,i}$ and F_L (Masa, Dr=50%, 80%)

Fig 7 と Fig 8 とを比較してみると、 $G_1/G_{0,i}$ の方が (G_1) $\gamma=3\%/G_{0,i}$ より少し小さくなった。これは、Fig 10 からわかるように、 γ_L までの接線の方が $\gamma=3\%$ の割線より小さく

なるためと考えられる。

次に、Fig 7、8において方法1と方法2の結果を比べてみると、ほぼ同様の値となっており、どちらの方法を用いても結果は同様になることが窺えた。さらに、Fig 9によると、まさ土では $F_L=1.0$ のせん断剛性の低下割合は $1/200 \sim 1/300$ 程度となっており、豊浦砂に比べて液状化にともなうせん断剛性の低下割合は少なくなった。また、密なほど低下割合は小さくなった。次に Fig 10、11 には γ_L と F_L の関係を示す。

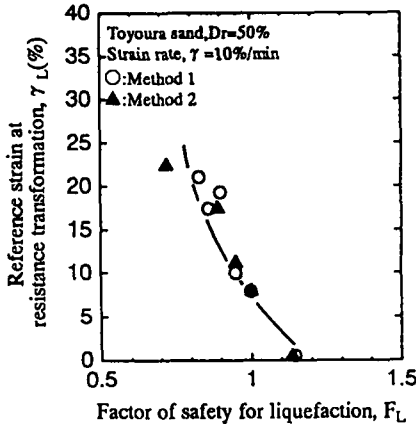


Fig.10 Relationships between γ_L and F_L (Toyoura sand, $Dr=50\%$)

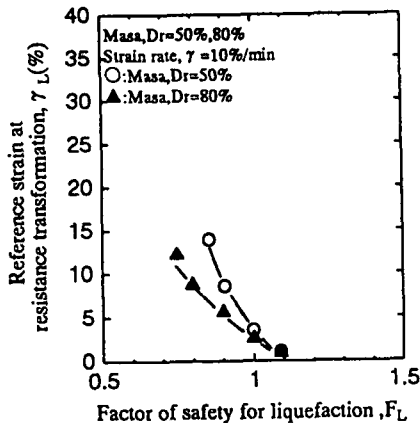


Fig.11 Relationships between γ_L and F_L (Masa, $Dr=50\%, 80\%$)

これらに見られるように、液状化の程度が激しくなるほど微小抵抗領域は大きくなった。また、同じ F_L に対して、まさ土は豊浦砂に比べて微小抵抗領域が小さくなった。

5. 応力～ひずみ関係の定式化

G_1 、 G_2 について、 γ_L との関係を両対数で表すと、Fig 12、13 となった。これらに見られるように、両者の間には両対数紙上で直線関係がありそうである。そこで、図に示したような直線を仮定すると、次式が得られた。

$$\text{豊浦砂: } G_1 = 0.010 / \gamma_L^{1.09} \quad (2)$$

$$\text{まさ土: } G_2 = 0.024 / \gamma_L^{1.12} \quad (3)$$

$$\text{豊浦砂: } G_1 = 0.333 / \gamma_L^{1.134} \quad (4)$$

$$\text{まさ土: } G_2 = 0.190 / \gamma_L^{0.970} \quad (5)$$

したがって、

$$\text{豊浦砂: } \tau = 0.010 / \gamma_L^{1.09} \quad (\gamma \leq \gamma_L) \quad (6)$$

$$\tau = 0.010 / \gamma_L^{1.09} + 0.333(\gamma - \gamma_L) / \gamma_L^{1.134} \quad (\gamma > \gamma_L) \quad (7)$$

$$\text{まさ土: } \tau = 0.024 / \gamma_L^{1.12} \quad (\gamma \leq \gamma_L) \quad (8)$$

$$\tau = 0.024 / \gamma_L^{1.12} + 0.190(\gamma - \gamma_L) / \gamma_L^{0.970} \quad (\gamma > \gamma_L) \quad (9)$$

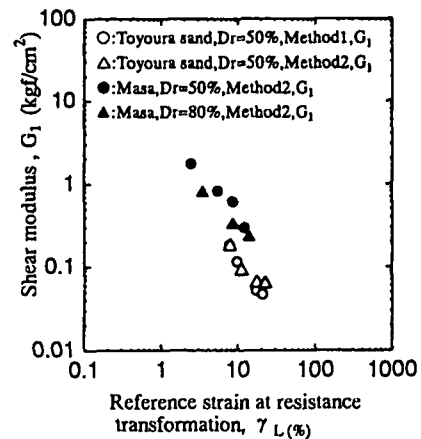


Fig.12 Relationships between γ_L and G_1

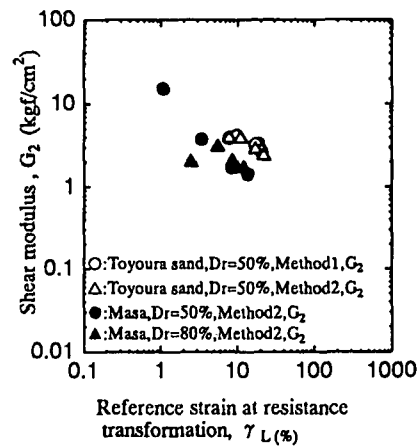


Fig.13 Relationships between γ_L and G_2

6. まとめ

液状化したまさ土の剛性は液状化以前の剛性と比べてかなり低下し、液状化が激しく発生した場合更に大きく低下することがわかった。砂はまさ土に比べて液状化後の剛性低下率、微小抵抗領域ともに大きいことがわかった。また、方法1と方法2において剛性低下率、微小抵抗領域共にほぼ同じ結果が得られた。

今回は2種類の土での実験しか行っていないが、今後他の種類の土についても実験を継続し、液状化にともなうせん断剛性の低下に関する一般的な関係を求めたいと考えている。

謝辞: 本研究は東京電機大学総合研究所の研究活動の一環として行った。関係者各位に感謝する次第である。

《参考文献》

- 1) S. Yasuda, H. Nagase, N. Yoshida, H. Kiku and T. Masuda : Stress-strain Relationships of Liquefied sands, Proc. of the 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, pp.811-816, 1996