

飽和砂の非排水繰返し単純せん断時の応力・ひずみ関係

Stress-strain relation of saturated sand subjected to cyclic undrained simple shear

龍 岡 文 夫*・原 勝 重**・プラダン テージ, B.S.*

Fumio TATSUOKA, Katsushige HARA and Tej B.S. PRADHAN

1. ま え が き

地震時の砂地盤の液状化現象を数値解析するためには、液状化する過程での砂の詳細な応力～ひずみ関係が必要である。従来の砂の液状化の室内における実験的研究は、何回繰返し荷重を与えたら所与の砂の供試体が破壊（液状化）するかを調べ「疲労曲線」を求めるようないわば現象論的なものが多かった。それはそれで工学的には有用な方法であるが、現象のより本質的理解するために筆者らは砂が液状化してゆく過程をできる限り詳細に追跡することを試みた。その結果、せん断応力～せん断ひずみ履歴曲線はきわめて複雑で特異な型で劣化してゆくが、「せん断応力/有効拘束圧」比～せん断ひずみ履歴曲線は一貫して双曲線型であり、単純な法則に従っていることが判明した。

2. ねじりせん断試験法^{1)~3)}

地震時の水平地盤内の応力状態は単純せん断変形に近いと考えられる。仮にディスク型あるいは矩形の供試体を用いた「単純せん断試験」を理想的に行うことができればよいが、実際は供試体内応力・ひずみ分布を一様にするのは困難であり、一般には実験法、結果の解釈が非常に複雑となっている。

一方、図-1に模式的に示す中空円筒型供試体を用いるねじりせん断試験法には、(1)半径方向にひずみが若干非一様であること、(2)円筒の内圧と外圧が等しいときは円周方向の直応力は拘束圧に等しくなるため、 σ'_1 方向が水平面からなす角度 δ と $b = (\sigma'_2 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 - \sigma'_3)$ の間には常に $b = (\cos \delta)^2$ という関係がある、という制約条件がある。しかし、この点を除くと通常の「単純せん断試験」よりも実験精度の確保が容易である。

筆者らはこの10年弱この試験法の精度の向上を図ってきた。この間の改善点を要約すると以下のようになる。

- 1) 三軸セル、載荷装置を簡明にし、精度が出るようにした(写真1)。
- 2) 三軸セル内で軸力とトルクを相互干渉が少なく精度よく同時に測定できる小型ロードセルを谷ら⁴⁾の方法に基づいて製作した(詳しくは文献3)参照)。

- 3) 「有効拘束圧」=「全拘束圧」-「間隙水圧」を有効拘束圧のこの定義どおり差圧計で測定するようにした(詳しくは文献5)参照)。
- 4) メンブレン力に対する応力補正を弾性論に基づいて行うようにした(詳しくは文献3), 5)参照)。
- 5) 荷重, 圧力, 変位の測定とデータ処理を全てマイクロコンピュータを用いて自動化した。現在の測定精度はA/D変換の精度によって決定されているようで、現在この点を改良中である。

実験は次のようにして行った。空中落下法で作成してから飽和化した豊浦砂の中空円筒型供試体(高さ10 cm,

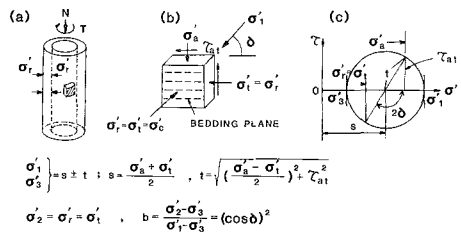


図1 ねじりせん断試験における応力状態

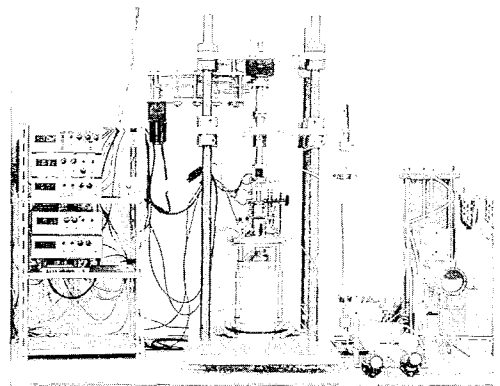


写真1 ひずみ制御ねじりせん断試験装置

*東京大学生産技術研究所 第5部

**梶谷調査工事(元受託研究員)

研究速報
 外径 10 cm, 内径 6 cm)をまず水平地盤内と同様に異方圧密する。今回は 1) 圧密後間隙比 $e=0.743$ (ゆるづめ) の供試体については $\sigma'_a=1.69\text{kgf/cm}^2$, $\sigma'_r=0.66\text{kgf/cm}^2$ で、2) $e=0.663$ (密づめ) の供試体については $\sigma'_a=1.78\text{kgf/cm}^2$, $\sigma'_r=0.62\text{kgf/cm}^2$ で異方圧密した。次に、供試体を非排水 (等体積) および高さ一定の状態にして、せん断ひずみ $\dot{\gamma}_{at}=0.5\%/分$ の定ひずみ速度繰返しせん断を行った。このようにすると供試体の断面積は常に一定であり、単純せん断変形状態とほぼ似た状態になる。

3. 実験結果 (図-2, 3)

いずれの実験でも図 2 (b), 3 (b)に示すようにせん

断応力 τ_{at} ~ せん断ひずみ γ_{at} 関係は複雑であるが、図 2 (c), 3 (c)に示すように $\tau_{at}/\sigma'_a \sim \gamma_{at}$ はなめらかな双曲線型の履歴曲線になっている。応力 ~ ひずみ関係の定式化 (モデル化) はこの関係を基本にすべきであろう。

$\tau_{at}/\sigma'_a \sim \gamma_{at}$ 関係から見ると、図 2 (a), 3 (a)に示す有効応力経路が繰返し載荷することに $|\tau_{at}|$ のピーク状態での τ_{at}/σ'_a の値が増加してゆく型になっていることが理解できる。特に載荷中 ($|\tau_{at}|$ の増加中) に σ'_a が増加してゆく状態での有効応力経路が外側に徐々に拡大してゆく理由が理解できる。すなわち、たとえば図 2 (c), 3 (c)で点 a に対して次の回の繰返し載荷で点 a と同一の τ_{at}/σ'_a の値になる点 b の γ_{at} の値は点 a での γ_{at} よりも小さい。図 2 (a), 3 (a)および図 2 (b), 3 (b)を見てわかるように、このときの σ'_a の値は点 a のときよりもはるかに小さくなっているから、点 b での

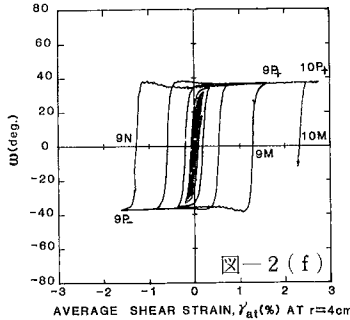
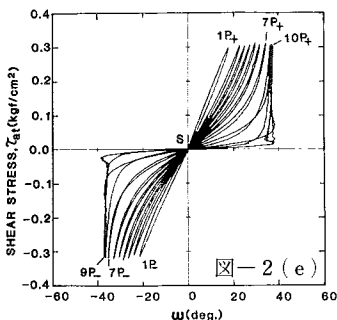
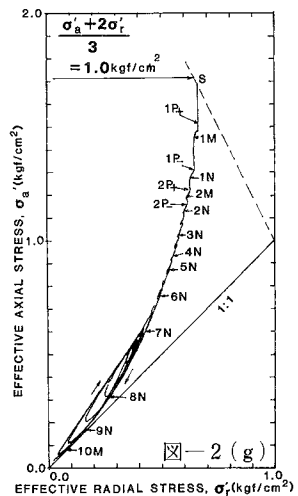
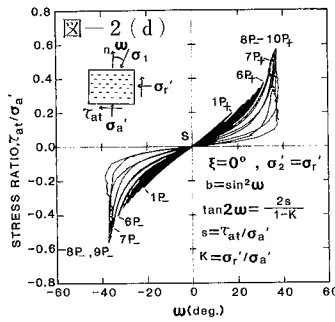
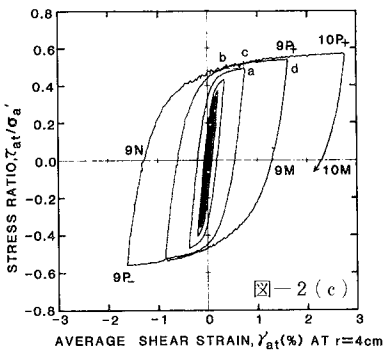
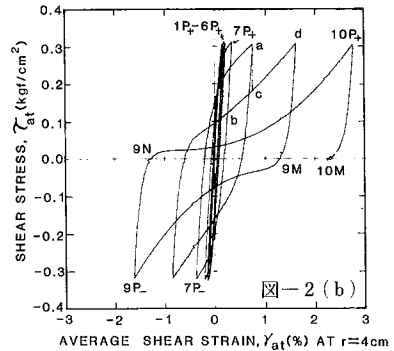
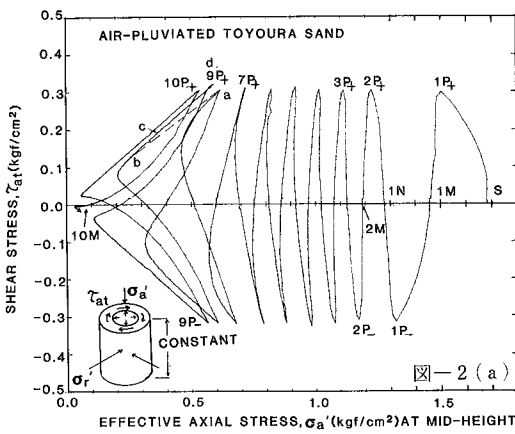


図 2 ゆるづめ砂の実験結果 ($\omega=90^\circ-\delta$)

研 究 速 報

τ_{at} は点 a での τ_{at} よりもはるかに小さい。点 b から点 c (このときの γ_{at} は点 a の γ_{at} と同一), 次に点 d (このときの τ_{at} は点 a での τ_{at} と同一) まで τ_{at}/σ'_a が増加しつつ γ_{at} が増加してゆく。したがって τ_{at} の振幅が一定のとき, 繰返し載荷するごとに $|\tau_{at}|/\sigma'_a$ の値は増加してゆくことになる。以上まとめると, $\tau_{at}/\sigma'_a \sim \gamma_{at}$ 関係の定式化と, γ_{at} に伴う σ'_a の変化の仕方を定式化することがこの種のモデル化の基本になるものと思われる。

図 2 (d)~(f), 3 (d)~(f) は最大主応力 σ'_1 の鉛

直方向からなす角度 ω の変化のようすをあらわしたものである。図 2 (g), 3 (g) は (σ'_a, σ'_r) の変化のようすをあらわしている。これから, (1) 載荷初期で供試体が異方応力状態 ($\sigma'_a > \sigma'_r$) にあるときは τ_{at}/σ'_a の増加に伴って ω も連続的に変化しているが, τ_{at}/σ'_a の増加と γ_{at} の増加に伴ってその変化率も減少してゆく傾向にあること, (2) 繰返し載荷により等方応力状態 ($\sigma'_a = \sigma'_r$) になるに従って, τ_{at} の方向の反転時に ω は約 90° 不連続的に変化するようになることがわかる。

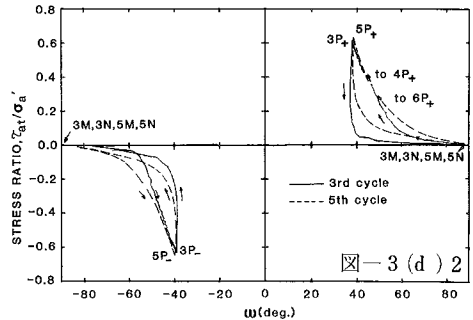
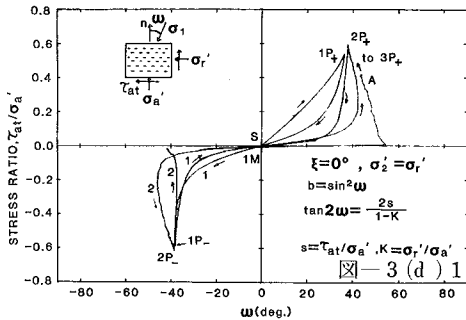
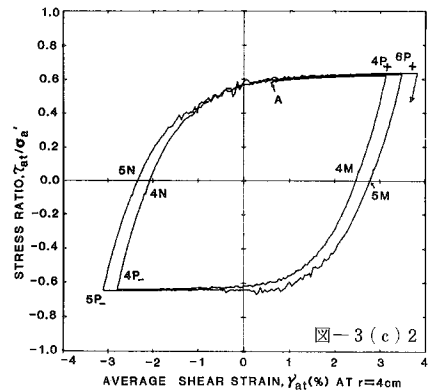
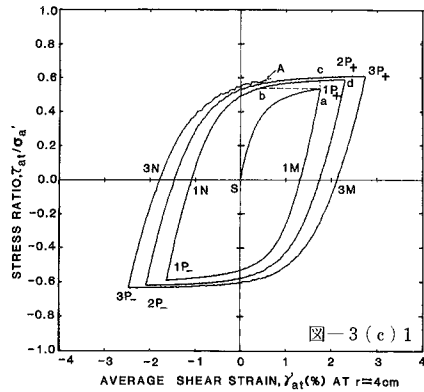
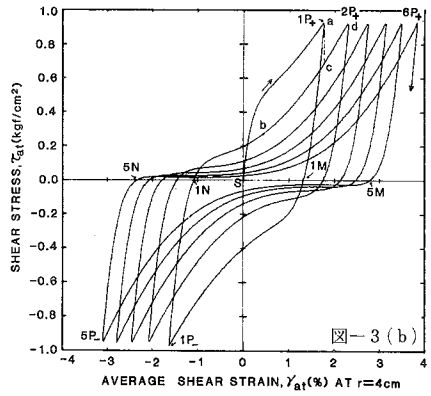
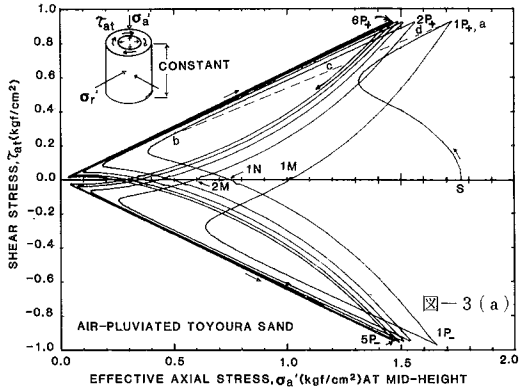


図 3 密づめ砂の実験結果(続く), ($\omega = 90^\circ - \delta$)

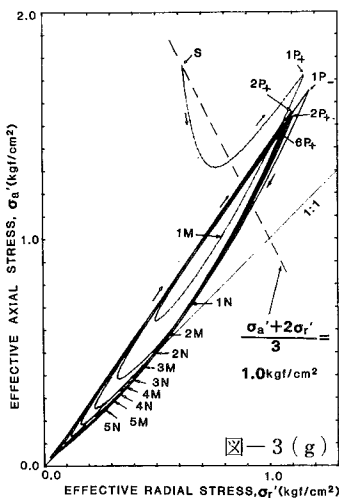
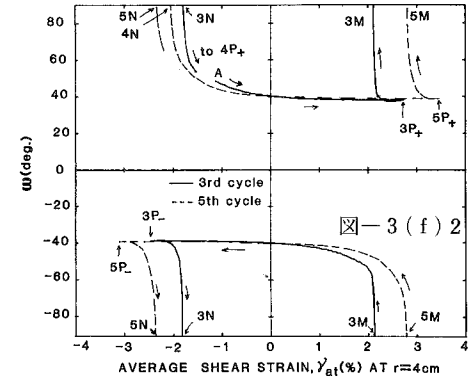
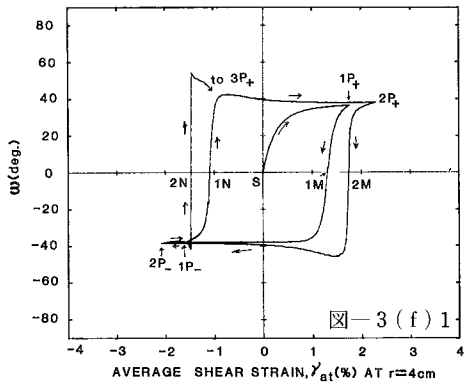
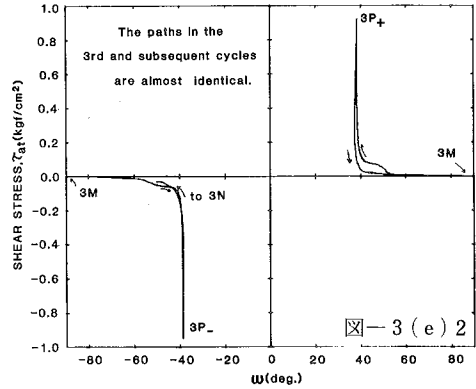
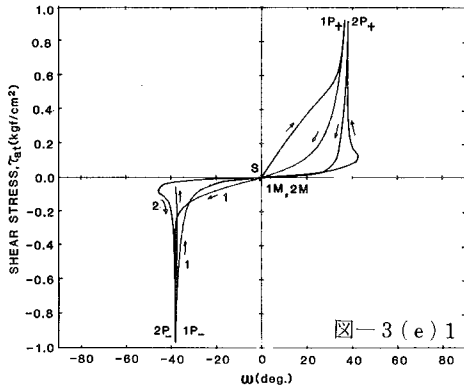


図3 密づめ砂の実験結果(続き)

4. あとがき

実験精度をできるだけ向上させたねじりせん断試験を行うことにより、繰返し非排水せん断中の砂の応力比 (τ_{at}/σ_a') ~ せん断ひずみ (γ_{at}) 関係は非常に規則正しい双曲線型履歴曲線になっていることが判明した。今後

これの定式化を、 γ_{at} の変化に伴う σ_a' の変化を定式化することによって $\tau_{at} \sim \gamma_{at}$ 関係の予測が可能になる方法の研究を行う予定である。(1986年7月7日受理)

参考文献

- 1) Tatsuoka, F., Muramatsu, M. and Sasaki, T. (1982), "Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test," Soils and Foundations, Vol. 22, No. 2, June, pp. 55~70
- 2) 孔憲京・ブラダン テージ, B.S.・龍岡文夫・田村重四郎 (1986), "極低圧下での砂の動的変形特性 I, II, III," 生産研究, 第38巻, 2号 (24~27頁, 28~31頁), 3号 (11~14頁)
- 3) Tatsuoka, F., Sonoda, S., Hara, K., Fukushima, S. and Pradhan T.B.S., (1986), "Failure and deformation of sand in torsional shear," Soils and Foundations, Vol. 26, No. 4 (to appear)
- 4) Tani, Y., Hatanaka, Y. and Nagao, T. (1983), "Development of small three component dynamometer for cutting force measurement," Bulletin of Japanese Society of Mech, Eng., Vol.26, No. 214, April, pp. 650~658
- 5) Fukushima, S. and Tatsuoka, F., (1984), "Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressures," Soils and Foundations, Vol. 24, No. 4, pp. 30~48