

(54) 地震波荷重に対する砂の非排水応力～ひずみ関係

東京大学生産技術研究所 正員 ○ブラダン テージ B. S  
 西松建設(株)技術研究部 正員 佐藤 靖彦  
 東京大学生産技術研究所 正員 龍岡 文夫

1. まえがき： 地震波のような繰返し荷重に対する原地盤の挙動を室内試験で調べる際、非排水状態で単純せん断試験を行うのが直接的である。従来、単純せん断変形を与える試験機としてはSGI型、NGI型およびCambridge型があるが、いずれの試験機においても応力やひずみの測定が難しく、またひずみの非一様性も問題となっている<sup>1)</sup>。従来地震波荷重を入力する際、応力制御法を用いるのが一般的であるが、この方法では供試体の有効拘束圧が低くなると小さなせん断応力下で大ひずみが生じ、せん断ひずみ速度が非常に大きくなる。そのため、(i)慣性力等の影響が生じ、(ii)データサンプリングの数が少なく、(iii)有効応力径路が不自然になる。

本報告では、1968年の十勝沖地震で記録された加速度波形をせん断応力波形として供試体に入力し、非排水単純せん断条件下でひずみ制御方式のねじり試験を行い、その結果について考察を行った。

2. 試験装置および試験方法： 図-1に試験装置のシステム図を示した。非排水せん断中に側方向ひずみ ( $\epsilon_r$ ) および円周方向ひずみ ( $\epsilon_t$ ) を共にゼロ (単純せん断変形) にするため、(i)stopper③を固定し、軸方向ひずみ ( $\epsilon_a$ ) を止め、(ii)排水バルブを閉じ、(iii)供試体中空部の水の出入りを止めた。また載荷方向の反転は Relay Switch を用いて Micro Computer で制御した。データの記録は 16 bit Micro Computer で行った。詳細は文献(2)を参照されたい。

3. 試料および試験条件： 用いた砂は豊浦標準砂 ( $e_{max}=0.977, e_{min}=0.605$ ) で、空中落下法を用いて高さ20cm、外径10cm、内径6cmの中空円筒状の供試体を作成した。Membrane 力を小さくするため厚さ 0.02cmのものを用いた。B値が 0.98 以上の供試体のみを用いた。軸方向応力  $\sigma_{vo}' = 1.67 \text{ kgf/cm}^2$ 、側方向応力  $\sigma_{ro}' = 0.67 \text{ kgf/cm}^2$  (平均有効主応力  $\sigma_{vo}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ) まで異方圧密した後、ひずみ制御方式 (せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}_{at} \approx 0.1\%/min$ ) で非排水単純ねじりせん断試験を行った。

入力波として 1968年の十勝沖地震 ( $M=7.9$ ) の八戸で記録された N-S 成分 (震央距離189km、最大加速度  $\alpha_{max}=235 \text{ gal}$ ) を用いた<sup>3)</sup>。この波形は衝撃波に分類される<sup>4)</sup>。水平面上の最大せん断応力 ( $\tau_{ot}$ )  $\tau_{ot, max} = C \times \alpha_{max}$  とし、C(定数)を種々仮定して ( $\tau_{ot}$ )  $_{max}$  を設定した。

4. 試験結果および考察： 行った試験の一覧は表-1に示した。ここで、 $SR_{max} \{ = (\tau_{ot})_{max} / \sigma_{vo}' \}$  は最大せん断応力比、 $\gamma_{Dn}$  は両振幅せん断ひずみである。すべてのデータに対してメンブレン力による応力値の補正を行った。応力およびひずみの算定方法は文献(2)を参照されたい。

4-1 応力、ひずみの時刻歴： 図-2に Test No. CTER02の  $Ti$  me historyを示した。図-2(a)水平面上の正規化されたせん断応力 ( $\tau_{ot}$ )、(b)せん断ひずみ ( $\gamma_{at}$ )、(c)過

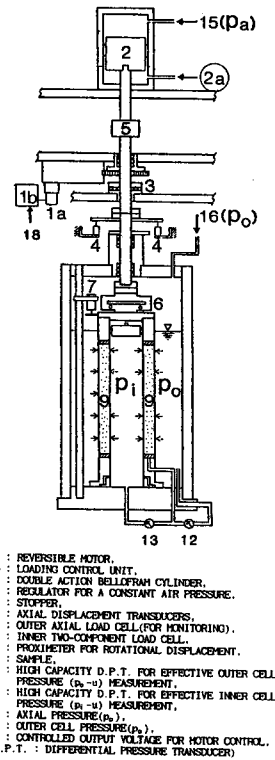


図-1 試験装置のシステム図

TEST No	$e_o$	$D_r(\%)$	$SR_{max}$	$\gamma_{Dn, max}(\%)$	$\gamma_{Dn}^*(\%)$	$(\tau/\sigma')_n$
CTER01	0.664	84.1	0.50	0.15	0.15	0.35
CTER02	0.671	82.2	0.80	4.90	0.77	0.59
CTER03	0.788	50.8	0.25	0.07	0.07	0.16
CTER04	0.653	87.1	0.70	0.24	0.24	0.43
CTER05	0.775	54.3	0.35	0.21	0.21	0.32
CTER06	0.776	54.0	0.40	>10.2	0.92	0.48

$\gamma_{Dn}^*(\%) = \gamma_{Dn} \text{ at } (\tau_{ot})_{max} \cdot (\tau/\sigma')_n : \tau_{ot}/\sigma'_{at} \text{ at } (\tau_{ot})_{max}$

表-1 地震波入力試験一覧表

剰間隙水圧( $du$ ), ( $d$ )は有効軸方向応力( $\sigma_v'$ )。ひずみ制御方式を探っているため、せん断ひずみの小さい間は応力の反転が速く、ひずみが増大するにつれて遅くなり、せん断応力の波形が乱れる。 $\tau_{at} = (\tau_{at})_{max}$ 時のひずみ $\gamma_{DA}$ および全地震波(反転回数392回)入力後の最大ひずみ $\gamma_{DAmax}$ は表-1に示した。同じ密砂(CTER01)、 $SR_{max} = 0.5$ の場合 $\gamma_{DAmax}$ は $\tau_{at} = (\tau_{at})_{max}$ 時で生じているため $\gamma_{DA} = \gamma_{DAmax}$ となっている。CTER02の場合 $\tau_{at} = (\tau_{at})_{max}$ 後 $du$ が蓄積され初期拘束

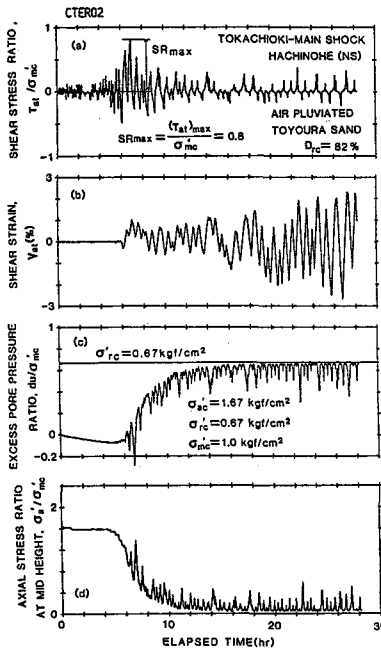


図-2 密砂の時刻歴

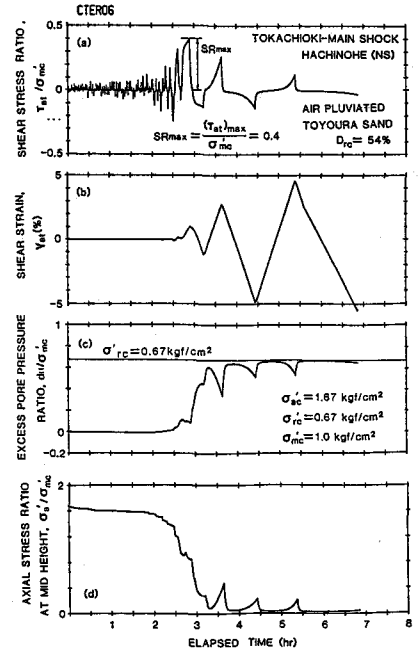


図-3 ゆるい砂の時刻歴

圧( $\sigma_v'$ )に近くなるにつれひずみが増大している。このような状態(液状化)では小さいせん断応力に対しても大ひずみが生じる。この現象は正弦波荷重に対してより顕著である<sup>5)</sup>。図-3(a)~(d)にTestNo. CTE R06のTime historyを示した。有効拘束圧が小さくなると小さなせん断応力でひずみが大きく進行するため図-3(a)の波形が乱れている。今回の装置では $\gamma_{at} = \pm 5\%$ までしか測定できないため $\tau_{at} = (\tau_{at})_{max}$ 後2波目で試験は終了している。

4-2 応力-ひずみ関係: 図-4および図-5にそれぞれ密砂(CTER02)とゆるい砂(CTER06)の $\tau_{at} \sim \gamma_{at}$ 関係を示した。4-1で述べたことはこの図でよりよく理解できる。繰返し載荷とともに $\tau_{at} \sim \gamma_{at}$ 関係が劣化していき、変則的な形になっていることがわかる。ゆるい砂ではこの傾向がより顕著になる。正弦波荷重に対するものは本質的には変わらない。このような劣化現象を考慮し、応力-ひずみ関係をモデル化することは非常に困難である。正弦波荷重に対しては有効応力比( $\tau_{at}/\sigma_v'$ ) $\sim \gamma_{at}$ 関係が双曲線関係で表現

できることが報告されている<sup>6)</sup>。図-6(a), (b), 図-7にそれぞれ密砂, ゆるい砂の $\tau_{at}/\sigma_v' \sim \gamma_{at}$ 関係を示した。不規則荷重に対してもやはりこの関係は双曲線型である。点A(図-6(a))を過ぎた

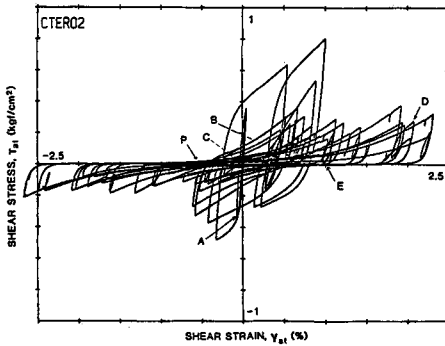


図-4 密砂の応力~ひずみ関係

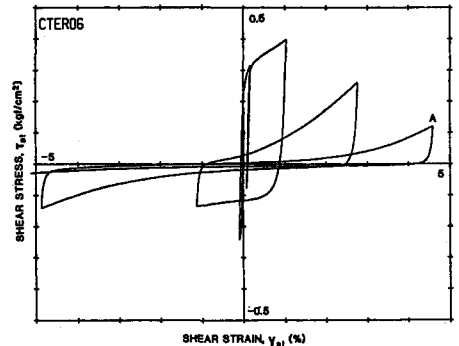


図-5 ゆるい砂の応力~ひずみ関係

ところから従来のMasing則が成り立っていないことがわかる。そこで、筆者らは前の反転点を超過する様な現象を考慮し、修正第2Masing則を提案した<sup>7)</sup>。しかし、 $\sigma_a' < 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\sigma_r' < 0.0$

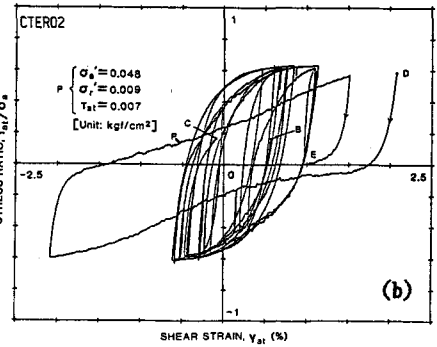
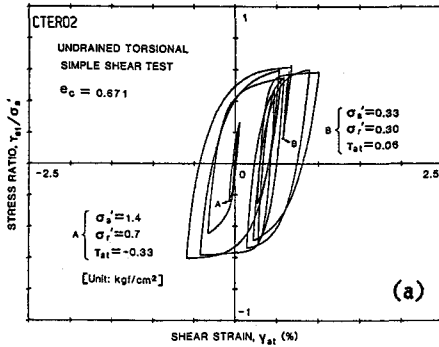


図-6 密砂の応力比～ひずみ関係

$4 \text{ kgf/cm}^2$  になると  $\tau_{s1}/\sigma_a' \sim \gamma_{s1}$  関係に乱れが生じ、双曲線関係より外れる(図-6(b), 図-7)。この様な現象は正弦波荷重の時も生じ、文献(5)に詳細に説明した。この応力比～ひずみ関係が乱れ、内側に倒れ込む最中の点Pでは  $\sigma_a' = 0.048$ ,  $\sigma_r' = 0.009$ ,  $\tau_{s1} = 0.007 \text{ kgf/cm}^2$  となっており非常に小さい値である。この応力レベルでは供試体の上, 中, 下で  $\sigma_a'$  が大きく異なる(図-7)が乱れの程度は変わらない。小さい応力レベルにおけるこのような現象は砂の本質的特性であるかどうかはまだ解らない。

4-3 有効応力径路: 図-8, 図-9にそれぞれ密, ゆるい砂の有効応力径路 ( $\tau_{s1} \sim \sigma_a'$ ) を示した。この両図において

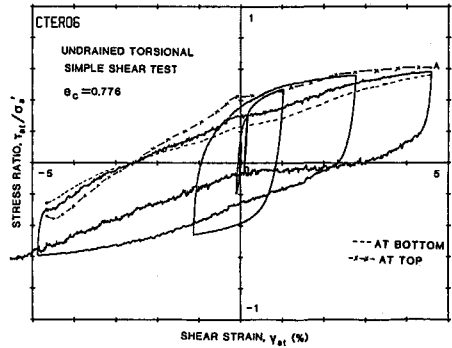


図-7 ゆるい砂の応力比～ひずみ関係

繰返し載荷とともに  $\sigma_a'$  が減少し、液化化過程に至る様子が見られる。他の試験では全地震波を入力しても過剰間隙水圧の蓄積が止まり、液化化に至らなかった。有効

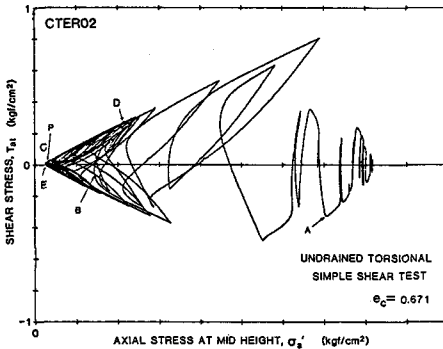


図-8 密砂の有効応力径路

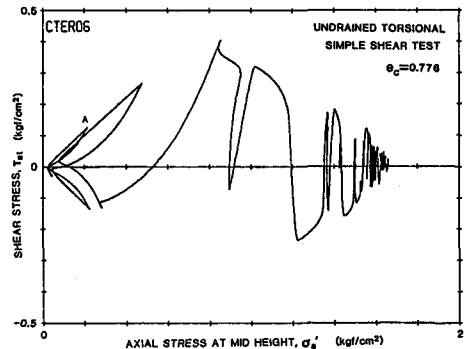


図-9 ゆるい砂の有効応力径路

応力径路が変相線(ダブルターン特性が負から正に変わる線)を越えた後の応力の反転において、 $\sigma_a'$  の変化が大きいことが分かる。図-10に  $\tau_{s1} = (\tau_{s1})_{\max}$  時の有効応力比 ( $\tau_{s1}/\sigma_a'$ ) と入力最大応力比  $SR_{\max}$  の関係を示した。同図に排水ねじり単純せん断試験<sup>2)</sup>より得られた変相角の値も記している。この図より、入力最大せん断応力 ( $\tau_{s1})_{\max}$  時に発生する有効応力比 ( $\tau_{s1}/\sigma_a'$ ) が変相角を越えると過剰間隙水圧の蓄積が顕著になり、その後の小さなせん断応力によってもひずみが生じるものと思われる。

4-4 静止土圧係数: 全ての実験において初期の異方圧密応力比  $\sigma_{r0}'/\sigma_{a0}'$  はほぼ 0.4 とした。図-11, 12にそれぞれ密, ゆるい砂の  $\sigma_a' \sim \sigma_r'$  関係を示した。両砂ともせん断初期において  $\sigma_r'$  の変化が少な

いにもかかわらず、 $\sigma_v'$ が急激に減少し、 $K_0$  ( $=\sigma_r'/\sigma_v'$ )が増加している。これは $K_0$ -圧密試験において除荷時に $K_0$ が増加する<sup>8)</sup>ことと類似している。密砂ではCyclic Mobilityを生じながら有効応力の減少とともに $K_0$ 値が1に近づく(すなわち等方状態になる)。ゆるい砂の場合有効応力の減少が激しいため早く等方状態に近づく。

4-5 主応力( $\sigma_v'$ )方向の回転: 図-13にゆるい砂の主応力方向が鉛直方向となす角度( $\alpha^\circ$ )とせん断ひずみの関係を示した。 $\sigma_r' < 0.04 \text{ kgf/cm}^2$ の時の乱れている部分(図中のA以降)を除くと主応力方向の90°の回転の大部分がひずみの

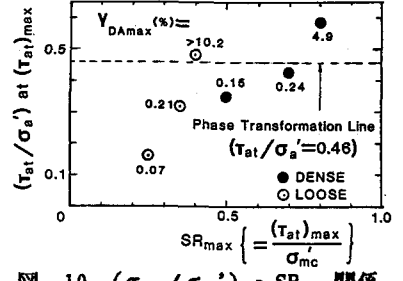


図-10  $(\tau_{at}/\sigma'_a)_n \sim SR_{max}$  関係

の変化が小さい内に終了していることが解る。 $\alpha = \pm 45^\circ$ の時供試体は等方応力状態にあることを意味している。すなわち、非排水繰返し単純せん断において主応力方向の連続的回転のみによって発生するひずみ量は二次的と考えて良いであろう。

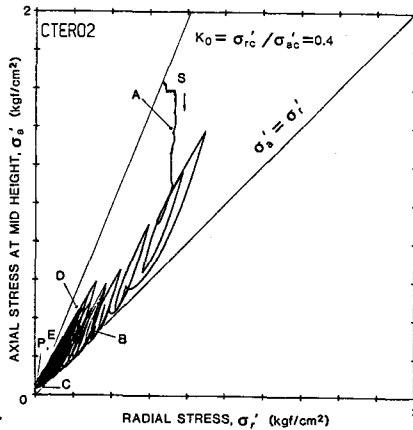


図-11 密砂の $\sigma'_a \sim \sigma'_r$ 関係

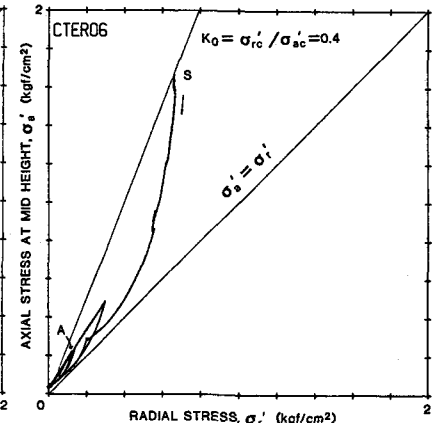


図-12 ゆるい砂の $\sigma'_a \sim \sigma'_r$ 関係

5. 結論: (1)ねじりせん断試験機を用いた非排水単純せん断試験法

を述べた。これを用いて地震波荷重を入力した試験を行った。(2)有効応力比( $\tau_{at}/\sigma'_a$ ) $\sim$ せん断ひずみ( $\gamma_{at}$ )関係はやはり双曲線型であることがわかった。(3)最大せん断応力の発生時で発揮される応力比が変相応力比を越えると、その後継続する小さい応力によってもひずみの蓄積が生じる。(4)液化化過程において静止土圧係数が1.0に近づく。(5)主応力方向の連続的回転時のひずみの変化が小さい。

謝辞: 実験を行うに当たりご協力を頂いた関東土質試験協同組合の吉家均氏に感謝いたします。

参考文献: 1)Saada, et. al (1980): "State of Art: Laboratory Shear Testing of Soils", ASTM. 2)堀井ら(1987): "中空ねじりによる砂の自動単純せん断試験", 第22回土質工学研究発表会. 3)土田ら(1969): "Strong-motion earthquake records on the 1968 Tokachi-oki earthquake and its aftershocks", 港湾技術研究所報告, No. 80, June. 4)石原ら(1975): "Sand Liquefaction in Hollow Cylinder torsion under irregular excitation," S&F, Vol. 15, No. 1, 5)フクナガら(1985): 非排水繰返しねじりせん断における砂の応力 $\sim$ ひずみ特性, 第40回土木学会, III. 6)例えば、フクナガら(1985): 非排水繰返しねじりせん断における砂のひずみ硬化特性, 第20回土質工学学会, 7)佐藤ら(1987): "排水・非排水繰返し三軸試験における応力-ひずみ履歴関係", 第22回土質工学学会. 8)大河内ら(1984): "Some Factors Affecting  $K_0$ -Values of Sand measured in Triaxial Cell", S&F, Vol. 24, No. 3.

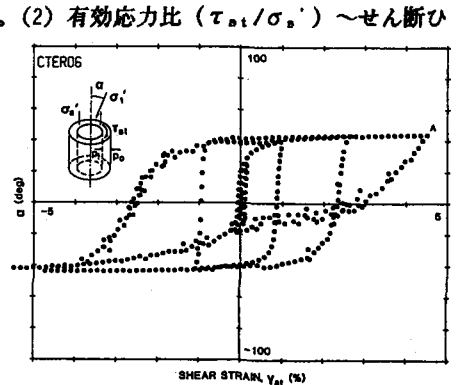


図-13 ゆるい砂の $\alpha^\circ \sim \gamma_{at}$ 関係