

III-57 飽和砂の液状化と有効拘束圧

東京大学工学部	正 員	石原 研而
東京大学工学部	正 員	吉田 喜忠
東京大学大学院	学生員	○ 李 相一

まえがき

水で飽和された水平な地盤内の土の要素に作用する有効応力は、平時に於ては鉛直方向に $\gamma' H$ 、水平方向に $K_0 \gamma' H$ である。ただし、 γ' は土の水中重量、 H は深さ、 K_0 は静止土圧係数である。地震時に砂地盤が完全に液状化したと仮定すると、鉛直方向の有効応力は $\gamma' H$ だけ減って、これが水圧に転換される。又、水平方向の有効応力は $K_0 \gamma' H$ だけ減少し、その代り水圧は $\gamma' H$ だけ増えることになる。何故なら、液状化状態では水平方向の応力と鉛直方向のそれが等しくなければならぬからである。ここで注目すべきは、鉛直方向の全応力は変化しないのに対し、水平方向では全応力が $(1-K_0) \gamma' H$ だけ増加することである。（ここで言う全応力は静水圧を除いた部分を指す）従って、平時に於ては $(1-K_0) \gamma' H$ は軸差応力が働いて異方圧密されていた土が、地震によって徐々に等方圧縮状態に移行してくるのである。これも、主応力比 $K = \sigma_3 / \sigma_1$ (σ_1, σ_3 は夫々鉛直、水平応力) で表わすと、平時に $K = K_0$ であったものが、液状化状態では $K = 1.0$ になってくるとも意味する。この主応力比の変化にともない、平均圧力 $\bar{\sigma}$ は $2(1-K_0) \sigma_1 / 3$ だけ増加し、軸差応力は $(1-K_0) \sigma_1$ だけ減少する。このような応力変化の特徴は側方変位が拘束された状態で土がせん断を受ける時に現われるものと考えられる。従って地震時に於る水平な砂地盤の液状化の難易は、この平均圧力の増加と、軸差応力の減少に伴う間隙水圧の増加を、振動のみによる間隙水圧の上昇に加算して考えないといけないことになる。

一定拘束圧のもとで飽和砂にくり返し力を加え、ある回数後に液状化を生ずるせん断力を求めてみると、単純せん断装置を用いた結果が三軸圧縮装置による値の約 $1/3$ で両者の間に大きな差異がある。この原因としては、単純せん断箱の隅に於る空隙の存在が指摘されている。しかし、単純せん断試験では側方変位が拘束された状態でくり返しせん断が加えられる為に、上述のように平均圧力の増加と軸差応力の減少が同時に起っており、従って、三軸圧縮試験結果との間に差異が生じたものと考えられる。

以上の差異を検討する為、三軸ねじりせん断試験を色々の応力状態で行ったので、以下に報告する。

実験方法

既に報告済みの三軸ねじりせん断装置を用いて、図-1に示す如く、次の三種類の実験を行った。

1) ICT試験(等方圧密ねじりせん断試験)

ICT試験は、 σ_1 は拘束圧で一様に試料を圧密しておいて、ねじりせん断応力 τ をくり返し加える試験で、これは従来の三軸圧縮装置を用いた試験の応力状態と同じものである。

ii) ACOT試験(異方圧密側方拘束ねじりせん断試験)

ACOT試験は、 σ_1 と $\sigma_3 = K_0 \sigma_1$ で異方圧密しておき、その後セルのコックを肉けて側方変位を拘束した状態でねじりせん断を加えるものである。試料の径とロッドの径を等しくしておき、鋼製のセルを用いてセルの膨張を最小限に止めることにより、この状態が現出できる。これは単純せん断試験と同じ応力状態の試験と見ることができる。

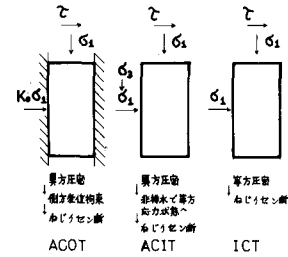


図-1, 三種類の試験条件

iii) ACIT試験(異方圧密等方ねじりせん断試験)

$\sigma_1 > \sigma_3$ 状態でまず圧密しておき、その後非排水状態にして σ_3 を σ_1 まで上げ、等方応力状態にする。この時、過剰間隙水圧 u^* が発生し、有効拘束応力が低下してくる。この状態からくり返しねじりせん断を加える。この試験は前記の ACOT 試験の代用として用いた。

実験結果と考察

実験に用いた砂は相模川産の川砂で、比重 2.70, $D_{10} = 0.22 \text{ mm}$, $U_c = 2.1$, $e_{\max} = 1.08$, $e_{\min} = 0.53$ で、実験を行った試料の間隙比はゆるぶめで 0.85, 中ぶめで 0.74, 密ぶめで 0.62 各平均である。

実験は全て、くり返しせん断ひずみ $\pm 0.3\%$ としで行った。軸方向力は $\sigma_1 = 1.0, 1.5, 2.0$ の 3 段階、主応力比は $K_0 = 1.00, 0.75, 0.50, 0.33$ の 4 段階に変化させた。

以上の 3 種類の試験につき測定された間隙水圧の平均値をくり返し回数に対してプロットしてみると図-2 のようになる。この図は相対密度 41.8% に対する結果である。この図より、ICT 試験が最も間隙水圧を発生しにくく液状化が遅れることが分る。

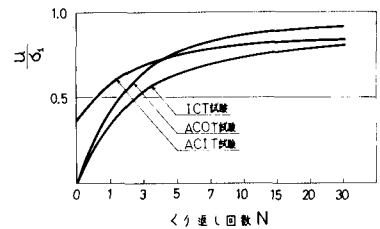


図-2, 三種類の試験結果の比較

次に ACOT 試験と ACIT 試験を比較すると、くり返し数 $N = 5$ までは当然のことながら ACIT 試験の方が水圧上昇が大きい。しかしそれ以後になると、両者の結果がほぼ等しくなると見なしでよい。この 2 つの試験に於る間隙水圧変化の様子を比較する為に応力パクトルを描いたものが図-3 である。この ACIT 試験では $\sigma_1 = 2.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ でまず試料を圧密し、次に非排水にして等方応力状態にしてから、くり返しせん断を加えた。この図からも明らかなように、5 回目のくり返しで大体 2 つの試験の応力状態が一致してくることが分る。以上の考察により、くり返し 10 回以後の挙動が問題になる液状化の実験では、ACOT 試験のかわりに近似的に ACIT 試験を用いても差しつかえないことが結論される。

図-3 の ACIT 試験の応力経路を見ると、これは有効拘束力が等方圧密時の圧力より u^* だけ小

さい値からスタートしたときのICT試験に外ならない。従って、この U^* の値が分っていればICT試験の結果からACIT試験の結果を推定することが可能になるわけである。

そこで、砂の密度および K_0 の値を変えて U^* を求める実験を行った。その結果をまとめたものが図-4である。この図より U^* の値は K_0 が小さいほど大きくなることとわかる。又、間隙比によって U^* はさほど変化しないことも分る。前に述べた平均圧力の増加 $2(1-K_0)\sigma_1/3$ を同じグラフにプロットしてみると図-3の点線の如くなる。この理論値は中程度の密度を有する砂の U^* の値とよく一致することが分る。従って $D_r=42\%$ の場合の U^* の測定値とこの理論値との差は、前述の軸差応力の除荷に伴って発生した間隙水圧であると見なすことができる。要約すると、 U^* の値は、非排水状態に於る平均圧力の増加にほぼ等しいと見なしてよいことが分る。

以上、側方拘束状態のねじり試験と三軸ねじり試験との関係を吟味し、後者の試験結果に U^* だけ補正を加えることにより、前者の結果を推定できることを示した。

次に三軸ねじり試験 (ICT試験) と軸差応力を変化させるタイプの従来の三軸くり返し試験 (ICT試験と呼ぶことにする) とを比較してみよう。

どちらも等方圧密状態からスタートしてくり返し力を加える点では同じである。ただ、ICT試験では主応力の方向が変化しないのに反し、ICT試験では主応力方向の変化が交互に起っている。この違いが無視できるとすればICT試験をICT試験で置きかえても差しつかえないであろう。これが許されるとすると、特別に作製したねじりせん断装置を用いる必要はなく、普通の三軸試験装置により、ICT試験の結果を推定することができる。そして、これに U^* による補正を施せば、ACIT試験、ひいてはACOT試験の結果を予想できる。つまり、三軸圧縮装置及び単純せん断装置による結果の差異を説明でき、しかも実際の水平地盤で生ずる液状化の条件をより正確に求めることができることになる。このような考え方より、 $D_r=61.8\%$ の時の U^* の値を用いて、Lee & Seed が三軸圧縮装置で求めた $D_r=65\%$ の結果に補正を施したものが図-8に示してある。

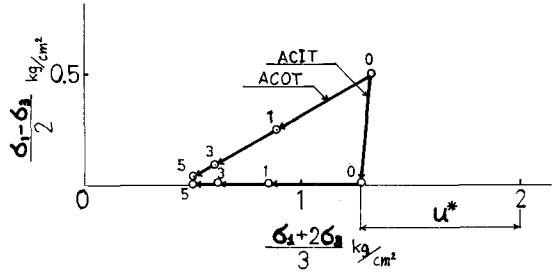


図-3 ACOT・ACIT両試験の有効応力経路

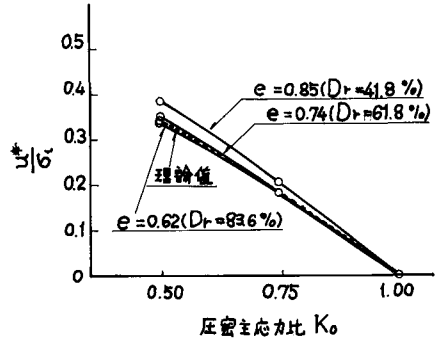


図-4 $U^*/\sigma_1 \sim K_0$

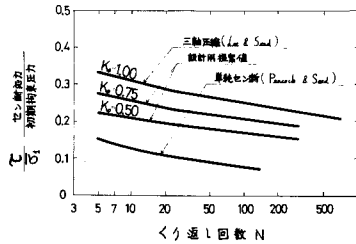


図-5 各 K_0 値につきくり返しせん断強度の提案値

この補正は次のようにして行った。例えば $N=20$ の時の等方圧密セン断試験の結果も $\tau/\bar{\sigma}_1=0.3$ とすると、 $\bar{\sigma}_1$ が u^* だけ小さい値からスタートした場合の結果は $\tau=0.3(\bar{\sigma}_1-u^*)$ となる。従って、 $\tau/\bar{\sigma}_1=0.3(1-u^*/\bar{\sigma}_1)$ も選んでプロットすれば、これが側方拘束状態に於る $\tau/\bar{\sigma}_1$ の値を与えることになる。図-5では $K_0=0.50$ と 0.75 の時の値を図-4から選んで補正した曲線が引いてある。実際の地盤では $K_0=0.50$ であることが多いので、図-5のこの値に着目すると、これは三軸圧縮試験で得られた値より約 32 % 小さい値となっている。Seed は 45 % 小さい値を用いることを提案しているのと比較すると興味深い。

図-5に於て、この補正値と単純セン断試験値の間にはなお 50 % 程度の差がある。これは前に述べた、セン断箱内の応力の不均一性その他による差異であると思われる。

結論

- (1) 側方拘束三軸ねじりセン断試験の代用として、ACIT試験を用いることを提案した。これは異方圧密した後で、非排水で等方応力状態にしてから、軸方向くり返し応力も加える試験である。この両者は、くり返し回数が5回以上になるとほぼ同じ結果を与えることが判明した。
- (2) ACIT試験で非排水除荷の際に生ずる残留間隙水圧 u^* を、間隙比、主応力比を変えて求めた。
- (3) 上の結果に基づいて、等方圧縮三軸セン断試験結果を補正したところ、液状化も生じるセン断応力は約 32 % 減少することが示された。

参考文献

- (1) W. H. Peacock & H. B. Seed; Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions '68 ASCE
- (2) K. L. Lee & H. B. Seed; Liquefaction of Saturated Sand during Cyclic Loading '66 ASCE
- (3) 谷本, 菅, 大浦; 真砂土の液状化発生条件について 昭45 土木学会第25回年次学術講演会講演集
- (4) 石原, 吉田, 李; 飽和砂の流動化と主応力比変化の関係 昭46 第6回土質工学研究発表会
- (5) 石原, 川口, 吉田; 三軸ねじり装置を用いた飽和砂のくり返しセン断特性 昭45 第5回土質工学研究発表会
- (6) 李, 石原, 吉田; 側方拘束状態での飽和砂の動的特性 昭46 第11回地震工学研究発表会