

側方拘束状態での飽和砂の動的特性

東京大学大学院 ○ 李 相一

東京大学工学部 石原 研而

東京大学工学部 吉田 喜忠

まえがき

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⁽²⁾の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⁽³⁾を用いた結果が三軸圧縮試験装置⁽²⁾⁽³⁾による値の約 $1/3$ で、両者の間ほど大きな差異がある。この原因としては単純せん断箱の角に於ける空隙の存在などが指摘されているが、その外、主応力比の変化が大きく関係していると考えられる。単純せん断箱に砂をつめ σ_1 なる鉛直応力で圧密すると、水平方向には $K_0 \sigma_1$ (ただし、 K_0 は静止土圧係数) なる応力が働く。しかし、非排水でくり返しせん断を加えていくと側圧が次第に増加し、液状化を起した時点では鉛直圧力は等しくなると、一樣は液体圧が四方から加わった状態になってくる。この間、主応力比 $K = \sigma_3 / \sigma_1$ は K_0 から 1 まで徐々に変化するが、これはどうもなおさず、圧密時に加わっている軸差応力の除荷に他ならない。この除荷による間隙水圧の上昇が加算される為に、単純せん断装置を用いる場合の方が速く液状化が発生すると考えられる。これについては既に報告⁽⁴⁾してあるので、今回は、この除荷による間隙水圧上昇を考慮して、三軸圧縮試験の結果をいかに補正すべきかという点について考えてみることにする。

実験方法

既に報告⁽⁵⁾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。

i) ICT試験(等方圧密ねじりせん断試験)

ICT試験は、 σ_1 なる拘束圧で一樣に試料を圧密しておいてねじりせん断応力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。

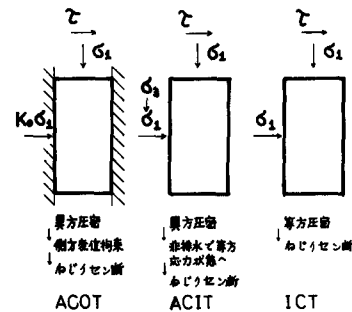


図-1, 三種類の試験条件

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、その後にセルのゴックを肉じて側方変位を拘束した状態でねじりせん断力をくり返し加えるものである。試料の径とロー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ものである。これは単純せん断試験と同じ応力状態の試験と見なしてよい。

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

しねじリセン断を加える。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づめで 0.85 ± 0.03 , 中づめで 0.74 ± 0.03 である。

実験は全て、くり返しセン断ひずみ $\pm 0.3\%$ として行った。軸方向力は $\sigma_1 = 1.0, 1.5, 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 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。

図-2 は多くのACOT試験に於ける間隙水圧 u とくり返し回数 N との関係を示したもので、図中の実線は平均値を示している。試料は全て $K_0 = 0.5$ で圧密してからしねじリセン断を加えた。

次に、ICT試験の結果が図-4に示してある。

ACIT試験の結果は図-3に示してあるが、これは $K_0 = 0.5$ で圧密した後で σ_3 を増して σ_1 に等しくした時の値である。 $N = 0$ の時の縦軸の値がその時発生した間隙水圧の量を示している。

以上の3種の試験に於けるそれぞれの平均値をまとめて図示したものが図-5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。

次にACOT試験とACIT試験とを比較すると、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が見なしてよいであろう。この2つの試験に於ける間隙水圧変化の様子を比較する為に応力ベクトルを描いたものが図-6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、くり返しセン断を加えた。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知れる。

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試験の代

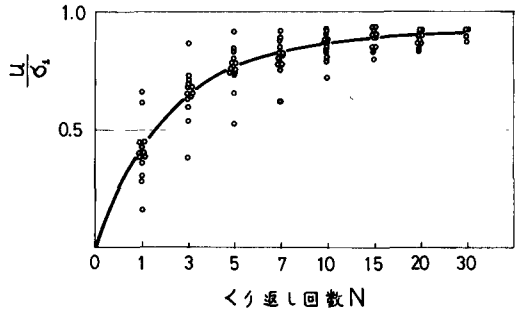


図-2 ACOT試験に於ける $u/\sigma_v \sim N$

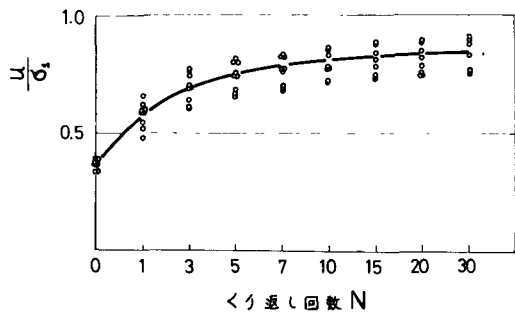


図-3 ACIT試験に於ける $u/\sigma_v \sim N$

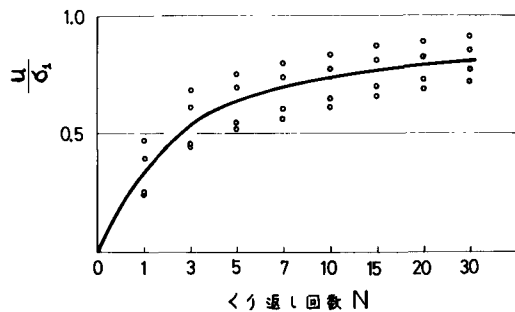


図-4 ICT試験に於ける $u/\sigma_v \sim N$

りに近似的にACIT試験を採用しても差しつかえないことが結論される。ここで注意すべき点は、ACIT試験は普通の三軸試験で軸方向力を変化させることにより実行しうることである。特別に作製したねじりセン断装置によつてACOT試験をわざわざ行わなくても、普通の三軸セン断試験装置によつて側方拘束状態に相当する試験を行うことができるのである。

図-6のACIT試験の応力経路を見よ、これは有効拘束圧力が圧密時の圧力より u^* だけ小さい値からスタートした時のICT試験に他ならない。従つて、 u^* の値を求めておけば、今まで行われてきた多くの等方圧密くり返しセン断試験の結果を補正して用いることができることになる。

図-7に示してあるのは、間隙比と K_0 の値を変化させて求めた u^* の値である。この図より、 u^* の値は大体、軸差応力の32～38%の範囲にあることが知れる。

$Dr = 61.8\%$ の時のこの値を用いて、Lee & Seedが三軸圧縮装置で求めた $Dr = 65\%$ の結果に補正を施したものが図-8に示してある。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結果を $\tau/\bar{\sigma}_1 = 0.3$ とすると、 $\bar{\sigma}_1$ が u^* だけ小さい時からスタートした場合の結果は $\tau = 0.3 (\bar{\sigma}_1 - u^*)$ となる筈である。従つて $\tau/\bar{\sigma}_1 = 0.3 (1 - u^*/\bar{\sigma}_1)$ を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-8では $K_0 = 0.50$ と 0.75 の時の値を図-7から選んで補正した曲線が引いてある。実際の地盤では $K_0 \neq 0.50$ であることが非常に多いので、図-8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-8に於て、この補正值と単純セン断試験値との間にはなお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誤差であると思われる。

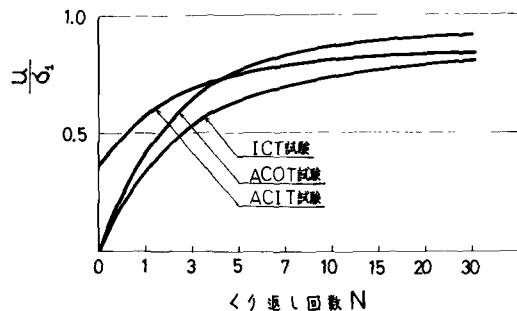


図-5 三種類の試験結果の比較

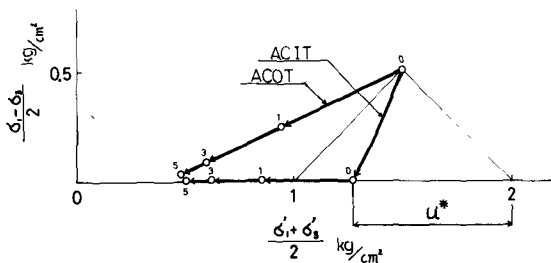


図-6 ACOT・ACIT両試験の有効応力経路

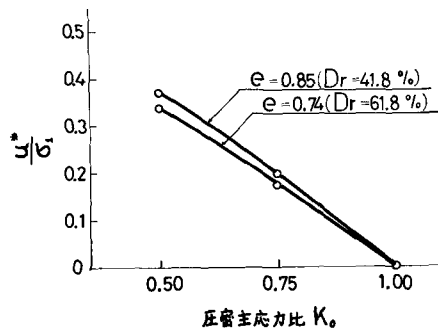


図-7 $u^*/\bar{\sigma}_1 \sim K_0$

結論

(1) 側方拘束三軸ねじりせん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、軸方向力くり返し応力を加える試験である。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) これに基づいて、等方圧縮三軸せん断試験結果を補正したところ、液状化を生じるせん断応力は約32%減少することが示された。

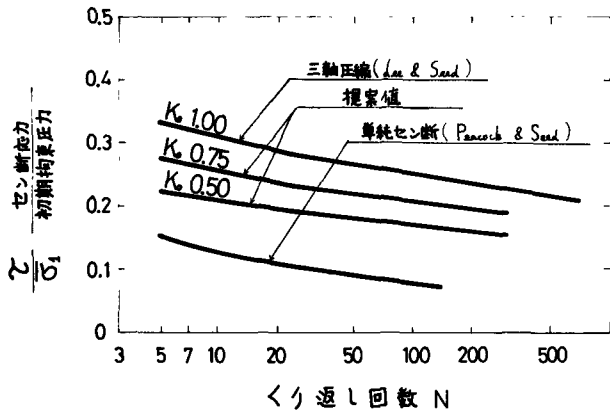


図-8 各 K_0 値につきくり返しせん断強度の提案値

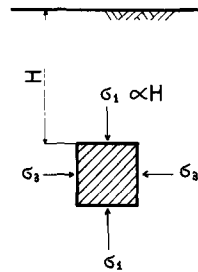


図-9. 地盤内応力状態

$$K_0 = \sigma_3 / \sigma_1 \approx 0.5$$

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せん断特性 昭45 第5回土質工学研究発表会