

# 直接せん断試験による飽和砂の液状化について

新潟大学工学部 正員 小川正二  
 同 大学院 学生員 ○志田光雄  
 同 学生 鈴木俊一

## 1. まえがき

飽和砂の動的挙動を知るための実験としては、円筒形の三軸試験あるいは直接せん断試験が行なわれており、液状化の発生規準などは両者の方法によってかなり異なることが報告されている。いずれにせよ、これらの試験は無限の広さで上載荷重が存在している地盤中の一要素の挙動を対象としている。しかしながら特定の大きさの上部構造物のある場合には、構造物の隅角部直下などでは直交する三方向の応力の大きさの異なる状態が生ずることになる。これらの応力状態にある土要素が動的荷重を受ける時の挙動を知るためには、直交する三方向の応力を任意に変化させることのできる立方体供試体による試験が必要である。著者らはこのような応力状態を作り得る試験機を試作して実験を行なったので、ここにその結果の2・3を報告する。なお本実験では、水平振動のみを受ける地盤中の応力状態を考慮した。

## 2. 実験方法

本実験に用いた動的直接せん断試験機の概略を図-1に示す。この試験機の特徴は、試料が立方体で三方向に各々独立の応力がかげられることにある。供試体は1辺10cmで厚さ0.5mmの角柱形ゴムスリーブに包まれている。軸圧はベロフラムシリンダーを通して空気圧で載荷し、側圧は各々空気圧で円形ゴムベローズをふくらますことによって載荷される。側圧を均等に試料に伝達するためには、図-1に示すように円板に正方形板を取り付け、さらに円板と正方形板がせん断時にスムーズに動くようにその間にモリスデングリースを塗った。正方形板は圧密時の試料の変形を考慮して、1辺9.4cmとした。せん断応力は試料の上部にかかるようになっている。間ゲキ水圧、せん断力、せん断ビズミ、軸方向ヒズミ、円筒形セル内の水圧などはオシログラフに記録した。等方圧実験の容易さ、異方圧実験の場合でも試料の飽和の容易さを考慮して、供試体は円筒形セルの

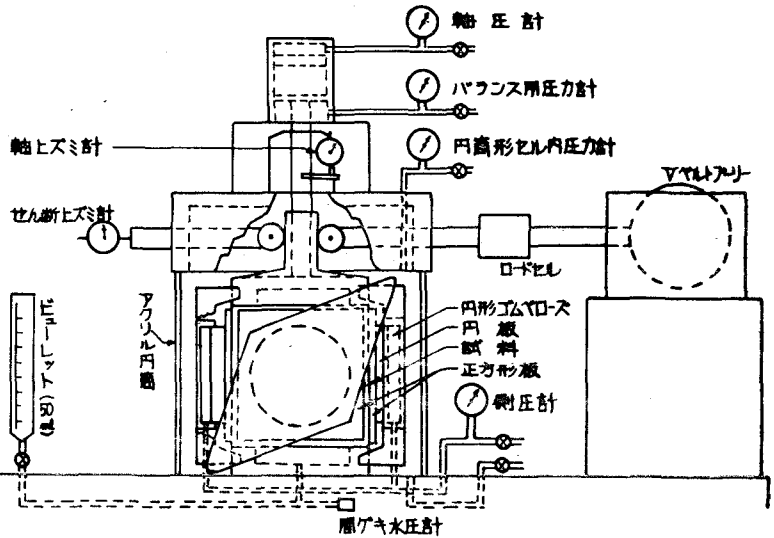


図-1 実験装置機構系統図

中に設置するようにした。

試料は新潟市昭和石油新潟製油所敷地内で採取された砂で、2mmフルイでふるって用いた。その物理的性質は、比重  $G_s = 2.76$ ，粒径  $D_{10} = 0.21\text{mm}$ ， $D_{60} = 0.36\text{mm}$ ，均等係数  $C_u = 1.71$ ， $e_{\max} = 0.991$ ， $e_{\min} = 0.616$  である。実験に用いた相対密度  $D_r$  は、 $D_r = 38\%$  と  $D_r = 90\%$  の2種類である。

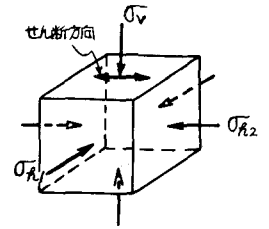


図-2

本実験はすべて、せん断力の振動サイクル数は0.53 Hzで、圧密非排水直接せん断試験を行なった。応力の記号は、図-2に示す通りである。

### 3. 実験結果

図-3は三方向に等しい圧力  $\sigma_c = 1.0\text{kg/cm}^2$  で圧密した後にバックフレッシヤ ( $U_s$ )  $1.0\text{kg/cm}^2$  かけ、正規圧密状態 ( $O.C.R. = 1$ ) にある試料に、 $\gamma = 1.03\%$  のせん断ヒズミを与えた時の実験結果である。

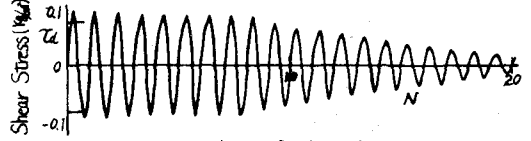
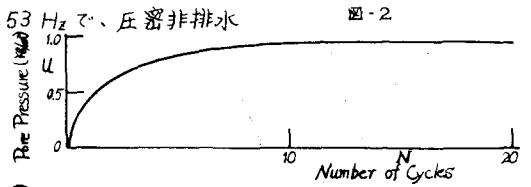


図-3 等方圧実験の結果

また図-4は、 $\sigma_v = 1.2\text{kg/cm}^2$ ， $\sigma_{h1} = 1.0\text{kg/cm}^2$ ， $\sigma_{h2} = 0.8\text{kg/cm}^2$  で異方圧密した試料 ( $K_0 = \sigma_{h2}/\sigma_{h1} = 0.67$ ) に  $U_s$  を  $1.0\text{kg/cm}^2$  かけ、かつ  $O.C.R. = 1$  となるようにして、 $\gamma = 2.79\%$  のせん断ヒズミを与えた時の実験結果である。

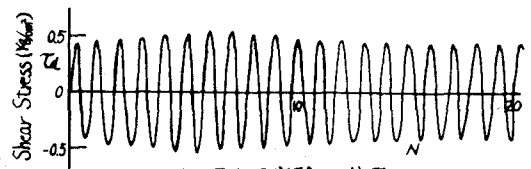
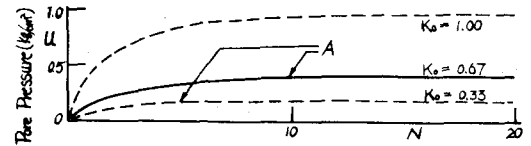


図-4 異方圧実験の結果

等方圧実験では、ある載荷回数(この場合には  $N = 8$ )になると、三軸試験などで見られるようにせん断力が低下しはじめるが、異方圧実験ではせん断力の低下は見られず、載荷回数が増大してもほぼ一定を保っている。一方間ゲキ水圧は、等方圧実験の場合には最終的にほぼ初期有効拘束圧に等しくなっているが、異方圧実験の場合には圧密時の最小主応力の値よりも低い値で一定になり、もはやそれ以上載荷回数が増大しても変化しなくなる。この間ゲキ水圧の最大値は、圧密時の主応力比  $K_0 = \sigma_{h2}/\sigma_{h1}$  (ただし  $\sigma_v > \sigma_{h1} > \sigma_{h2}$ ) の小なるほど小さくなる。これはある程度間ゲキ水圧が上昇して動的塑性平衡状態に達すると、もはや体積変化や構造の変化による間ゲキ水圧の変化が起り得ないことを示すものである。

### 4. 飽和砂の液状化

等方圧実験では、図-5に示すような  $\tau_d - \sigma'$  の関係より初期液状化を判定した。つまり応力径路の移動に伴い、ある載荷回数においてモビライズされた内部摩擦角は極大に達するという点である。異方圧実験では、前にも述べたように間ゲキ水圧が一定となり上昇しなくなる点(図-4のA点)を動的塑性平衡状態と考えることができるので、そこを液状化の規準とした。図-4に  $K_0$  がいろいろの場合をあげ、その点を示した。また  $K_0 = 1.00$  の場合を参考までにか

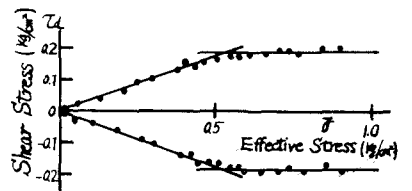


図-5  $\tau_d - \sigma'$  の関係

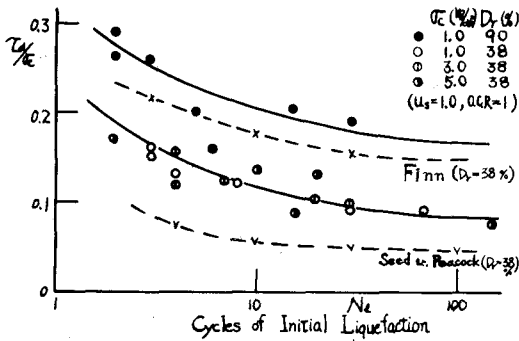


図-6  $\tau_d/\sigma_v - N_i$  の関係

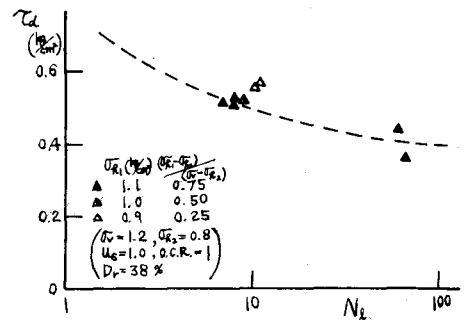


図-7

かけた。

図-6は、 $D_r = 38\%$ で  $\sigma_v = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ ,  $3.0 \text{ kg/cm}^2$ ,  $5.0 \text{ kg/cm}^2$  の場合と、 $D_r = 90\%$ で  $\sigma_v = 1.0 \text{ kg/cm}^2$  の時の  $\tau_d/\sigma_v$  と  $N_i$  (初期液化を生ずるに必要な繰返し回数) との関係を示すものである。この図から、供試体の挙動は砂の相対密度が等しい場合圧密圧  $\sigma_v$  による影響はなく同じ曲線の関係で表わされるが、相対密度がふえると同じ  $N_i$  でもせん断力が大きくなることがわかる。また  $D_r = 38\%$  の場合を Finn<sup>1)</sup> 及び Seed & Peacock<sup>2)</sup> と比較した結果、ほぼその中間の値を示した。間ゲキ水圧の上昇率は、三軸試験の場合と異なって  $N$  を対数で表わすと  $N_i$  まで直線的な関係にある。  $u$  と  $N$  との関係は、初期液化化までの  $N$  に対して次の関係式で表わされる。

$$u = \alpha \log_{10} N + \beta \quad (N \leq N_i) \quad (1)$$

しかし間ゲキ水圧の振動幅は  $\tau_d/\sigma_v$  の大きさにほぼ比例し、相対密度による影響はほとんど見られない(図-8)。 $\tau_d/\sigma_v$  と(1)式の  $\alpha$  及び  $\beta$  の関係を図示すると図-9のようになる。この関係を用いれば、応答計算によって土中に生ずるせん断力が求まり、液化化の生じる載荷回数を推定することができ。

図-7は、 $\sigma_v = 1.2 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_{h2} = 0.8 \text{ kg/cm}^2$  で、 $\sigma_{h1}$  をそれぞれ  $0.9 \text{ kg/cm}^2$ ,  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ ,  $1.1 \text{ kg/cm}^2$  で異方圧密し、 $u_s = 1.0 \text{ kg/cm}^2$  をかけ、かつ O.C.R. = 1 となるようにして行なった実験の結果である。図より全体的に  $\tau_d$  は等方圧実験の時より高い値を示し、 $\sigma_{h1}$  が  $\sigma_v$  に近づくとわずかではあるが小さくなるのがわかる。しかし、まだこの実験に関しては初期段階であるので、もう少し多くのデータを得てからでないとはっきりした結論を出すことはできない。

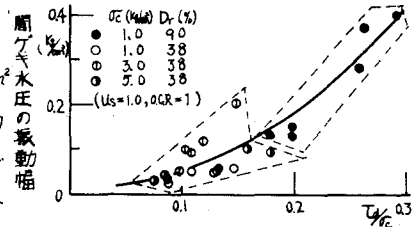


図-8

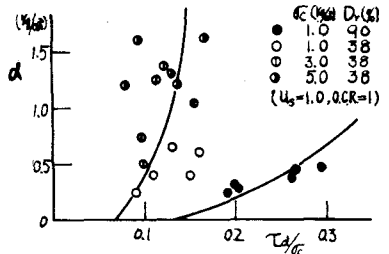


図-9

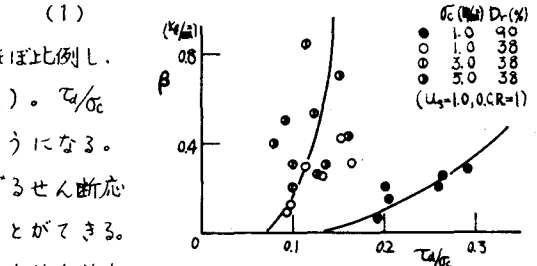


図-10 履歴曲線

### 5. せん断弾性係数, 減衰定数

地震時における地盤や構造物の応答解析を集中質点法で行なうためには、動的せん断弾性係数(剛性率)  $G$  と、減衰定数  $\delta$  が必要となる。これらは繰り返し応力を受ける土の履歴曲線より求められる。図-10は実験より求められた履歴曲線である。剛性率は、直線  $ab$  の勾配を表わす等価剛性率として求め、減衰定数は Jacobsen<sup>3)</sup>の方法により  $\Delta W / (4\pi W)$  で求めた(ただし  $\Delta W =$ 履歴曲線のループの全面積  $W = \Delta Oae$  の面積)。このようにして求めた  $G$  及び  $\delta$  は、初期液状化に達するまでは一定の値であり、 $N_e$  と  $G$  及び  $\delta$  との関係を求めると、図-11, 図-12 のようになる。この図から  $N_e$  が大きくなるにつれ、 $G$  は大きく  $\delta$  は小さくなることわかる。すなわち  $\delta$  が小さいほど、 $G$  は大きく  $\delta$  は小さくなる。図-13 及び図-14 に、最大せん断ヒズミと  $G$  及び  $\delta$  の関係を示した。この図から最大せん断ヒズミが大きくなるにつれ、 $G$  は小さく  $\delta$  は大きくなることわかる。また  $G$  は  $\sigma_c$  及び  $D_r$  によって異なるが、 $\delta$  はそれらの影響をほとんど受けないことわかる。

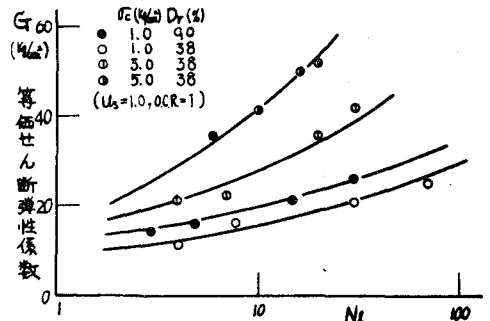


図-11

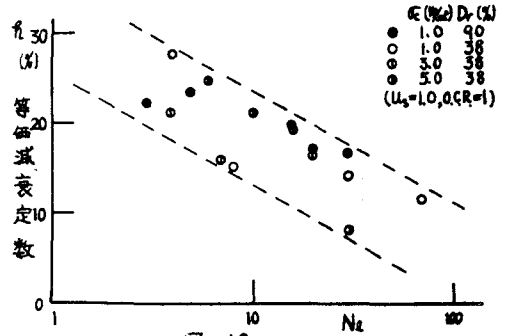


図-12

### 6. まとめ

(1)  $\sigma_c / \sigma_e - N_e$  関係は相対密度  $D_r$  が一定ならば一定の曲線になり、 $\sigma_c / \sigma_e$  の値は  $D_r$  が大きいほど大きい。

(2) 間ゲキ水圧は三軸試験の場合と異なって  $N$  の対数に比例して上昇し、 $u = \alpha \log_{10} N + \beta$  ( $N \leq N_e$ ) で表わされる。

(3)  $N_e$  が大きくなると、動的せん断弾性係数  $G$  は大きくなり、減衰定数  $\delta$  は小さくなる。また最大せん断ヒズミが大きくなるにつれ  $G$  は小さく  $\delta$  は大きくなる。

(4) 異方圧実験では等方圧実験のように  $u = \sigma_e$  にはならず、 $u < \sigma_e$  のある値に漸近する(図-4)。この値は  $K_0 = \sigma_{h2} / \sigma_e$  が小さいほど低く、かつせん断力は載荷回数が増大してもほとんど低下しないが、初期液状化の判定規準としては間ゲキ水圧が一定となる点を考えることができる。

### 参考文献

- 1) Finn 他 "Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests" Proc. A.S.C.E. SM4 1971
- 2) Seed & Peacock "Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions" Proc. A.S.C.E. SM3 1968
- 3) Jacobsen "Damping in Composite Structures" Proc. 2nd W.C.E.E. Tokyo Japan 1960