

## 飽和砂の繰り返し載荷による液状化現象の研究

### LIQUEFACTION OF SATURATED SANDS DURING CYCLIC LOADING

柴田 徹\*・行友 浩\*\*

By Toru Shibata and Hiroshi Yukitomo

#### 1. ま え が き

飽和したゆるい砂は、比較的速い繰り返しせん断をうけると液状化現象 (Liquefaction) を生じることがよく知られている。それは繰り返し載荷による内部摩擦の減少に起因するせん断破壊と、間げき水圧の上昇による砂中有効応力の減少に起因する破壊が同時に進行するものと説明されており、この報文では主として後者について考察を行なうことにする。

従来から砂の液状化に関する研究は、地震時の地盤災害と関連して数多く行なわれており、たとえば Seed らによる一連の成果をみると、液状化発生の重要な要素は i) 砂の密度、ii) 砂に働く有効上載圧力、iii) 地震によって起こされるせん断応力の大きさおよび iv) せん断力の繰り返し回数であることが明らかにされている。しかしこれら液状化発生を支配する諸要素の相互関係について、定量的な解析をしたものはきわめて少ない現状である。

そこでまず地震時に地中の土要素がうける応力状態を単純化して与え、これに所定のせん断応力を繰り返して加えた際に飽和砂中に発生し、かつ累加していく過剰間げき水圧について考察する。ついで液状化は土要素に加わる有効垂直応力が次第に減少し、やがて破壊包絡線に到達する過程と理解して、液状化発生の繰り返し回数をせん断応力と垂直応力の関数として表示する。さらにその結果を適用して、平均主応力一定の繰り返し三軸試験ならびに Peacock-Seed (1968) によって行なわれた繰り返し単純せん断試験データを検討し、各種の実験結果が矛盾なく説明できることを述べる。

#### 2. 繰り返し載荷をうける砂の応力軌跡

地震時における飽和砂の液状化機構を実験室で調べるためには、まず地震をうけたときに地盤内の土の要素に加わる応力や変形状態を考察し、土の供試体に対して、実験室でもそれと同じ応力や変形を与えることが望ましい。ところで地盤内の土の要素は、地震時には主として下部から伝達されるせん断波によって変形をうけるといわれる。したがって土要素は、地震中に何回も方向を変える一連の周期的せん断応力や変形をうけることになり、図-1 に描くような現象を生じるであろう<sup>1)</sup>。すなわち水平な地表面をもつ場合に

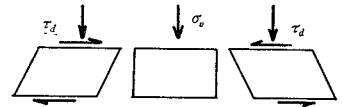


図-1 単純化した地震時地盤内の応力状態

は、せん断面に作用する垂直応力  $\sigma_v$  は一定のまま、方向が逆転するせん断応力  $\tau_d$  を繰り返す。そしてこのような応力や変形状態は、室内で三軸圧縮試験機あるいは単純せん断試験機等を用いて再現することが可能である。

図-2 は Peacock-Seed によって行なわれたゆるい砂の繰り返し単純せん断試験の記録<sup>1)</sup> をそのまま引用したものであり、試験条件は相対密度  $R_d \approx 50\%$ 、初期有効垂直応力  $\sigma_v = 5.0 \text{ kg/cm}^2$ 、繰り返しせん断応力  $\tau_d = 0.35 \text{ kg/cm}^2$ 、振動数は 1 c.p.s. である。図-2 (a) は与えたせん断応力の時間的変化、図-2 (b) はそのときに発生する過剰間げき水圧の増加を示し、この例では 24 サイクル目に  $\sigma_v = 5.0 \text{ kg/cm}^2$  の値とほぼ等しくなっている。また 図-2 (c) は繰り返し載荷中のひずみ変化であり、24 サイクルを過ぎると変形量が急増する様子が明瞭にうかがえる。

図-3 は 図-2 の記録をもとにして、 $\tau \sim \sigma_v'$  座標上に描いた有効応力軌跡と破壊包絡線であり、この図によ

\* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

\*\* 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

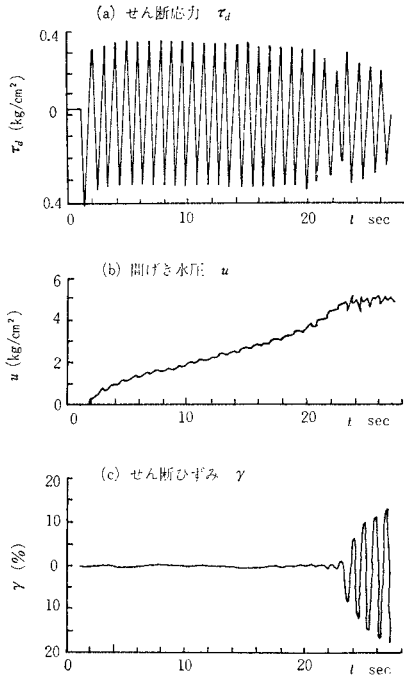


図-2 繰り返し単純せん断試験の記録例 (Peacock-Seed による)

れば、垂直応力  $\sigma_v$  が一定の状態でも回も方向を変える周期的せん断応力をうけると、過剰間げき水圧が累加されて増加するために有効垂直応力  $\sigma_v'$  は徐々に減少し、その有効応力軌跡は左方に進行し、ついに破壊包絡線に到達した状態で液化化が始まる過程をみることができる。

図-4 は Seed-Lee による三軸繰り返し試験結果<sup>2)</sup> を、上述のような観点から整理して描いた有効応力軌跡で、初期間げき比 0.87 の砂に 0.17% の軸ひずみを圧縮側と伸張側に繰り返し与えた結果である。この場合は一定量のひずみが繰り返されているので、有効応力の減少とともにせん断応力も徐々に低下して、その有効応力軌跡は 2本の破壊包絡線にはさまれるような形で原点に近づいていく。

地震時には、繰り返される応力やひずみは上述のような単純なものではないが、一応 図-3, 4 に示した有効応力軌跡をもとにして、次節では繰り返し載荷をうける砂の液化化現象を解析的に扱うことにする。

### 3. 液化化現象の解析

解析を簡単にするために、図-1 の応力状態ならびに図-3 の応力軌跡を理想化した図-5 をもとにして、以下の考察を進めよう。すなわち 図-5 (a) は載荷条件を全応力表示のモール円であらわしたものであり、仮りに ① を圧縮 (compression), ② を伸張 (extension) 状

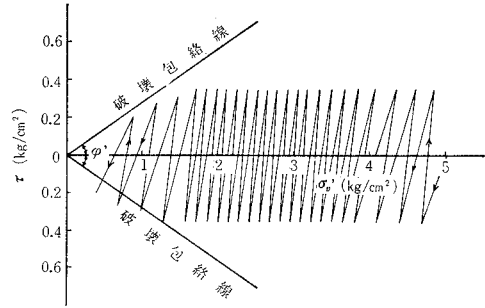


図-3 繰り返し単純せん断試験による有効応力軌跡

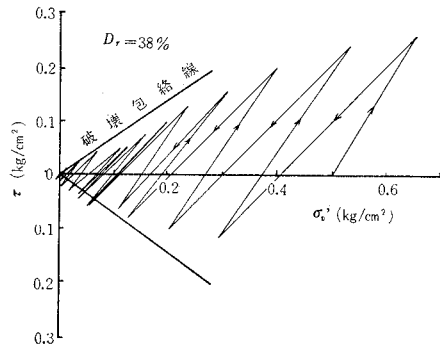


図-4 ひずみ制御型・繰り返し三軸試験による有効応力軌跡 (Seed-Lee のデータを解析)

態とよぶことにする。① と ② ではそれぞれ最大、最小主応力  $\sigma_1, \sigma_3$  の大きさは等しいが、せん断応力の方向が逆転している点で異なっている。また 図-5 (b) はそのときの有効応力軌跡であり、圧縮から伸張に移る過程と、伸張から圧縮に移る過程では直線の傾斜を変えて表わしてある。

いま地盤内の土要素を考えて平面変形を対象とする。砂質土について平面変形時の中間主応力  $\sigma_2$  を調べた従来の試験結果、たとえば Cornforth によればせん断中

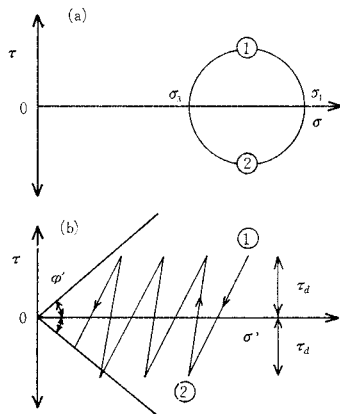


図-5 (a) 載荷条件の全応力モール円表示 (b) 理想化した有効応力軌跡

の  $\sigma_2$  は密度によっても異なるが、 $\sigma_2/(\sigma_1+\sigma_3)=(0.3\sim 0.4)$  の値を示している<sup>3)</sup>。そこで簡単のために  $\sigma_2=(\sigma_1+\sigma_3)/2$  が成立するものと仮定する。このように仮定すれば、平均主応力  $\sigma_m$  は常に  $\sigma_m=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3=(\sigma_1+\sigma_3)/2$  となり、 $(\sigma_1+\sigma_3)/2=\sigma_v$  とおくと、垂直応力  $\sigma_v$  に変化がなければ  $\Delta\sigma_m=\Delta\sigma_v=0$  である。

つぎに土中に発生する間げき水圧の変化  $\Delta u$  は

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= \Delta\sigma_m + \left(\frac{D}{C}\right) \cdot \Delta\tau_{oct} \\ \Delta\tau_{oct} &= \frac{1}{3} \sqrt{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

で与えることができる。ここに、 $D$ : dilatancy 係数、 $C$ : 圧縮係数である。いま  $D/C=\alpha$  とおき、 $\Delta\sigma_m=0$  の条件を用い、図-5 (a) を参照して ①→② あるいは ②→① の過程に発生する  $\Delta u$  の一般的な表示を求めると、

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= \alpha \cdot \Delta\tau_{oct} \\ &= \sqrt{\frac{8}{3}} \cdot \alpha \cdot \tau_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

となる。ただし、 $\tau_d$ : 繰り返しせん断応力である。また ①の圧縮から ②の伸張に移る場合と、その逆の場合とでは図-5 (b) に示したように  $\alpha$  の値に差があるので、前者のそれを  $\alpha_1$ 、後者を  $\alpha_2$  とすれば、1 サイクル中に発生する過剰間げき水圧  $\Delta \bar{u}$  は結局

$$\Delta \bar{u} = \sqrt{\frac{8}{3}} (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \tau_d \dots\dots\dots(3)$$

となる。

ところで式(2)中の  $\alpha$  値は作用する  $\tau_d$  の大きさによって一定ではなく、 $\tau_d$  が大きいほど  $\alpha$  も大となることは従来の研究成果より明らかであり、砂質土について  $\sigma_m$  を一定に保持したせん断試験結果をみると、 $\Delta u/\sigma_m \sim \Delta\tau_{oct}/\sigma_m$  関係が放物線で近似できるものが多い。また理論的にも微小な非線形性をもつ弾性体では  $\Delta\sigma_m=0$  ならば

$$\Delta u \propto (\Delta\tau_{oct})^2$$

なる関係がえられている<sup>4)</sup>。これらは  $\alpha(=\Delta u/\Delta\tau_{oct})$  が  $\Delta\tau_{oct}/\sigma_m$  に比例して増加することにほかならず、ゆえに

$$(\alpha_1 + \alpha_2) = a \left( \frac{\tau_d}{\sigma_v} \right) - b \dots\dots\dots(4)$$

なる仮定が許されよう。ただし、 $a, b$  は土の種類、密度によってきまる係数である。

式(4)を式(3)に代入すれば

$$\Delta \bar{u} = \sqrt{\frac{8}{3}} \left\{ a \left( \frac{\tau_d}{\sigma_v} \right) - b \right\} \tau_d \dots\dots\dots(5)$$

つぎに1 サイクル中に発生する  $\Delta \bar{u}$  が繰り返し過程を通じていかに変化するかを調べたところ、繰り返しの初期を除いてはほぼ一定値とみなしても差し支えないことがわかったので、その過程に  $\Delta \bar{u}$  を不変と仮定す

る。このようにすれば液状化を発生するに要する繰り返し回数  $n_l$  は、図-5 (b) を参照して次式で与えられることになる。

$$\begin{aligned} n_l &= (\sigma_v - \tau_d \cdot \cot \varphi') / \Delta \bar{u} \\ &= \sqrt{\frac{3}{8}} \left\{ \left( \frac{\sigma_v}{\tau_d} \right) - \cot \varphi' \right\} / \left\{ a \left( \frac{\tau_d}{\sigma_v} \right) - b \right\} \dots\dots(6) \end{aligned}$$

ここに、 $\varphi'$ : 砂の有効内部摩擦角である。

式(6)が提案式であって、液状化発生までの繰り返し回数  $n_l$  は地盤中の土要素に作用している鉛直応力  $\sigma_v$  と、せん断応力  $\tau_d$  の関数となり、 $\sigma_v$  が大きくなるほど、また  $\tau_d$  が小さくなるほど液状化は起こり難いことを示している。そして液状化を生じない限界の  $\tau_d/\sigma_v$  は式(6)にて  $n_l \rightarrow \infty$  とすれば

$$\left( \frac{\tau_d}{\sigma_v} \right)_{crit.} = \left( \frac{b}{a} \right)$$

で与えられる。

#### 4. 実験方法と試料

繰り返し三軸試験機を用いた飽和砂の液状化の研究は、従来から谷本<sup>5)</sup>、小川<sup>6)</sup>あるいはSeed<sup>2)</sup>らによって行なわれている。ところで2, 3.にも述べたように地中の土要素に作用する応力状態は、鉛直応力  $\sigma_v$  が一定とみなしうるものとすれば、三軸試験もその状態を再現できるものが望ましい。ところがこれまでは試験装置の複雑さから、 $\sigma_v$  = 一定の条件で圧縮と伸張にまたがる高速繰り返し三軸試験は行なわれていない。もちろん従来の研究にみられるように、側圧  $\sigma_3$  を一定にして長軸方向の応力のみを周期的に変化せしめて与え、等方応力成分による間げき水圧の発生量を加減して補正することも可能であろうが、今回提案している式の検照には好都合とはいえない。

図-6 (a), (b) は筆者らの行なった試験と従来の試験の状態を、全応力表示のモール円を用いて比較表示しており、いずれも ①⇔② の繰り返しが行なわれる。以上の目的から、本研究では文献7)ですでに紹介済みの

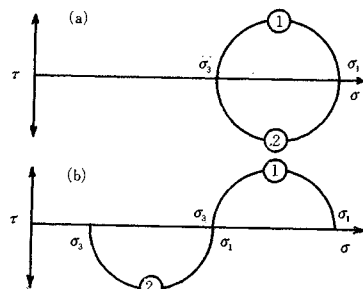


図-6 (a) 筆者らの試験条件  
(b) 従来の研究にみられる試験条件

試験機を一部改良して使用した。

すなわちこの試験機は長軸方向圧力と側圧とをそれぞれ独立に、かつ周期的に与えることができるので、これら両繰り返し圧力の位相をずらせて与える——長軸方向圧力  $\sigma_a$  が増加するとき側圧  $\sigma_r$  は減少、 $\sigma_a$  が減少するとき  $\sigma_r$  が増加となるように操作して、図-6 (a) に示した応力を与えるものである。ただしこの場合には  $\sigma_r$  の変動が  $\sigma_a$  に影響をおよぼさないように、载荷ピストンの直径を供試体のそれに等しくした。

実験は  $\sigma_v=0.5, 1.0 \text{ kg/cm}^2$  の場合につき、それぞれ繰り返しせん断応力  $\tau_d$  を種々に変えて行なった。選ん

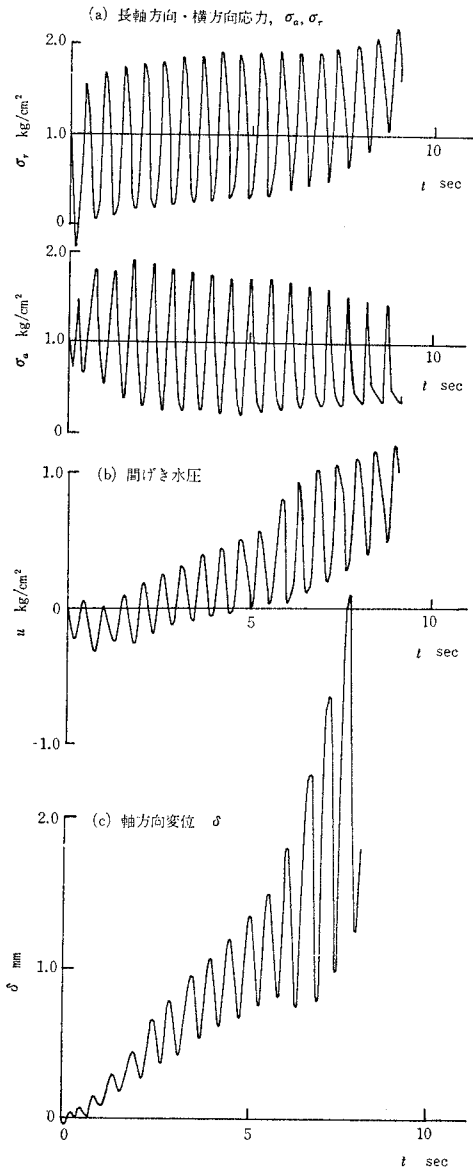


図-7 繰り返し三軸試験の記録例 ( $\sigma_v=1.0, \tau_d=0.39 \text{ kg/cm}^2, f=2 \text{ c.p.s.}$ )

だ  $\tau_d$  の大きさは、 $\sigma_v=0.5 \text{ kg/cm}^2$  に対して  $\tau_d=0.17 \sim 0.23 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_v=1.0 \text{ kg/cm}^2$  に対して  $\tau_d=0.31 \sim 0.39 \text{ kg/cm}^2$  の範囲である。繰り返し回数は全試験を通じて  $2 \text{ c.p.s.}$  とした。図-7 は試験記録の例として  $\sigma_v=1.0 \text{ kg/cm}^2, \tau_d=0.39 \text{ kg/cm}^2$  の場合を示している。動ひずみ計を用い電磁オシログラフに記録した側圧  $\sigma_r$ 、軸圧  $\sigma_a$ 、間げき水圧  $u$  および差動変位計を用い電磁オシログラフに記録した供試体の軸方向変位  $\delta$  の時間による変化が描いてあり、繰り返し数の増加とともに  $u, \delta$  ともに増加する様子をうかがうことができる。

試料は水で飽和した豊浦の標準砂であり、粒子の比重は  $2.64$ 、最大・最小間げき比はそれぞれ  $0.95, 0.64$  である。この試料を突き固めることなく直径  $3.5 \text{ cm}$ 、高さ  $8.0 \text{ cm}$  のゆる詰めめの三軸供試体を成形する。今回の実験では初期間げき比をほぼ  $0.78$  としたので、相対密度  $D_r$  は  $D_r \approx 55\%$  に相当する。

### 5. 実験結果の検討

前節で述べた繰り返し三軸試験機を用いて行なった結果、応力軌跡の例を 図-8 (a),(b) に示す。応力軌跡

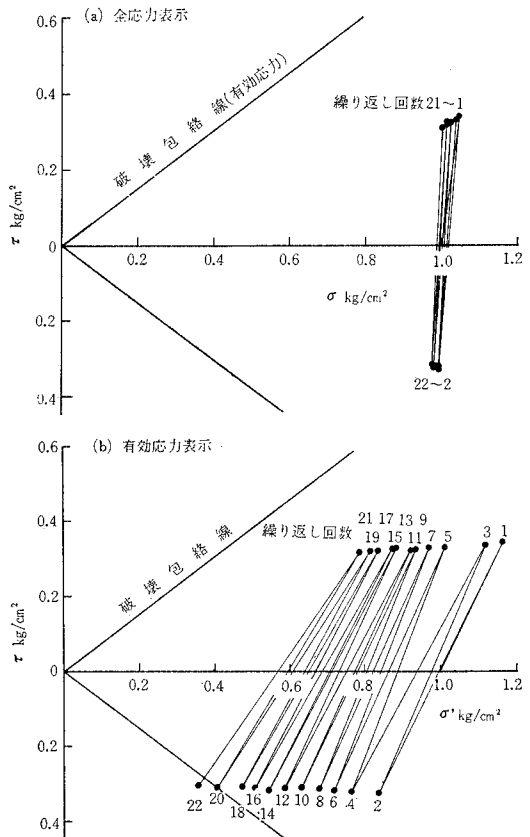


図-8 応力軌跡の例 ( $\sigma_v=1.0, \tau_d=0.31 \text{ kg/cm}^2$ )

を全応力表示した 図-8 (a) をみれば、垂直応力を  $\sigma_v = 1.0 \text{ kg/cm}^2$  として、ほぼ完全に  $\sigma_v =$  一定の繰り返しせん断試験が行なわれていることがわかる。図-8 (b) は有効応力軌跡であり、繰り返し回数  $n=20$  で静的試験より求めた破壊包絡線に達して初期液状化の状態が発生する。

図-9 (a), (b) は砂の密度と垂直応力  $\sigma_v$  をそれぞれ一定とし、繰り返しせん断応力  $\tau_d$  の大きさを変えたときの間げき水圧の平均値ならびに軸方向変位振幅を繰り返し回数  $n$  に対してプロットしたものである。図中矢印で示した点は初期液状化の発生回数に対応しており、間げき水圧と変位振幅が急に増大するのは初期液状化を過ぎてから数回後である。実際に試験中に供試体の変状を観察していると、初期液状化の発生時点では顕著な変化

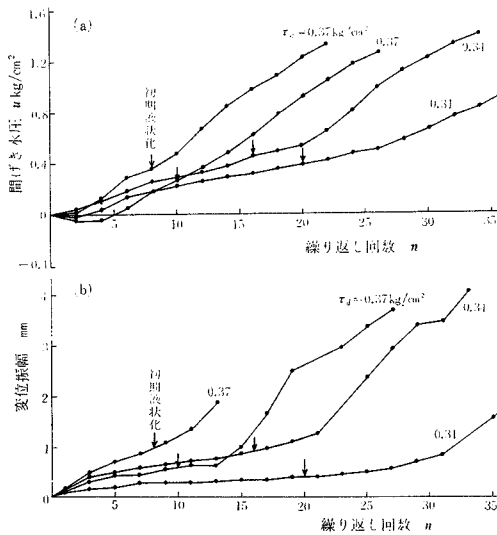


図-9 (a) 間げき水圧の推移  
(b) 軸方向変位振幅の推移

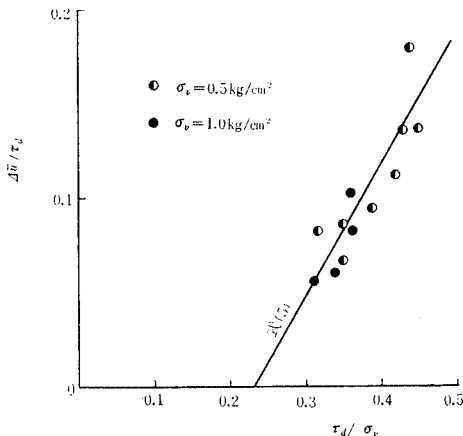


図-10 1 サイクル中に発生する間げき水圧  $\Delta \bar{u}$  と  $\tau_d, \sigma_v$  の関係 (縦軸は  $\sqrt{3/8}$  倍の値)

は認められないが、それから数回後に三軸ゴムスリーブ中があたかも液体で満たされるような完全液状化が発生した。

図-10 は 図-9 (a) より初期液状化発生までの各サイクルごとの間げき水圧の増分  $\Delta \bar{u}$  の平均値を求め、 $\Delta \bar{u}/\tau_d$  と  $\tau_d/\sigma_v$  の関係にプロットしたもので、 $\sigma_v = 0.5, 1.0 \text{ kg/cm}^2$  のおのおのについて単一の直線上にならぶとみても差し支えないので、これより式 (5) あるいは式 (6) 中の係数  $a, b$  を求めることができる。そしてこれらの  $a, b$  値ならびに静的試験による  $\phi'$  値を用いて、式 (6) を計算した結果は 図-11 中の実線にて示してある。なお  $\phi'$  は静的試験で求めた値であるから動態時には減少することが予想されるが、式 (6) による限りでは  $\phi'$  は繰り返し回数  $n_l$  にほとんど影響を与えない。

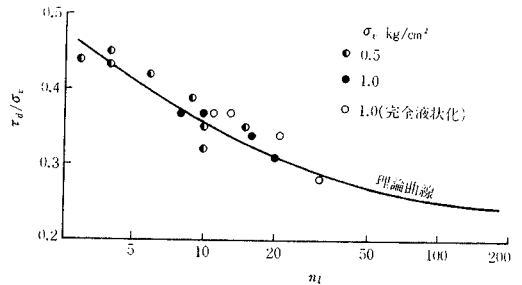


図-11  $\tau_d/\sigma_v$  比と液状化を生じた繰り返し回数  $n_l$  の関係

図-11 には  $\sigma_v = 0.5, 1.0 \text{ kg/cm}^2$  について、初期液状化発生に対する  $\tau_d/\sigma_v$  と繰り返し回数  $n_l$  の関係がプロットしてあり、式 (6) を表わす曲線は実験値の傾向と量的にもよく一致している。図中の  $\circ$  印は  $\sigma_v = 1.0 \text{ kg/cm}^2$  に対する完全液状化発生点を参考のために示しており、初期液状化から完全液状化までの繰り返し回数は、 $\tau_d/\sigma_v$  比の大きさによって変動するようにみえる。またこの試料の相対密度  $D_r = 55\%$  に対する液状化が発生しない限界の  $(\tau_d/\sigma_v)_{crit}$  は、図-10 の直線と横軸との切片より 0.23 であることもわかる。

筆者らの実験では砂の密度を種々に変えたときの液状化現象の違いを明らかにする段階には至っていないが、これについては Peacock-Seed が単純せん断試験機を用いた繰り返し試験を行なっているので、次節でその結果を検討する。

## 6. Peacock-Seed による実験結果の検討

3. で考察した結果を用いて、Peacock-Seed<sup>2)</sup> により報告された単純せん断繰り返し試験のデータを解析する。まず砂の密度を3種類 ( $D_r = 50, 80, 90\%$ ) に変え、

鉛直応力  $\sigma_v$  とせん断応力  $\tau_d$  の大きさを種々に組み合わせさせた結果について調べる。この場合、 $D_r$  が小さいほど、 $\tau_d$  が大きいほど、また  $\sigma_v$  が小さいほど液状化が起こりやすいと報告されているが、前述の式(6)によれば液状化発生回数  $n_l$  は  $\tau_d/\sigma_v$  の関数になるので、図-11と同様にすべてのデータを  $\tau_d/\sigma_v \sim n_l$  関係に整理してみる。その結果が図-12(a),(b),(c)にプロットされており、与えた  $\sigma_v$  の値によって記号を区別している。これによると  $\sigma_v$  が  $2.0 \sim 8.0 \text{ kg/cm}^2$  の範囲では、密度が同じであれば、 $\tau_d/\sigma_v \sim n_l$  の間には一義的な関係のあることがわかる。また図-12の3枚の図を比較すると、密度が高くなるほど同じ  $n_l$  に対する  $\tau_d/\sigma_v$  の値は大きくなっている。

さて図-12の実験結果を式(6)を用いて説明する

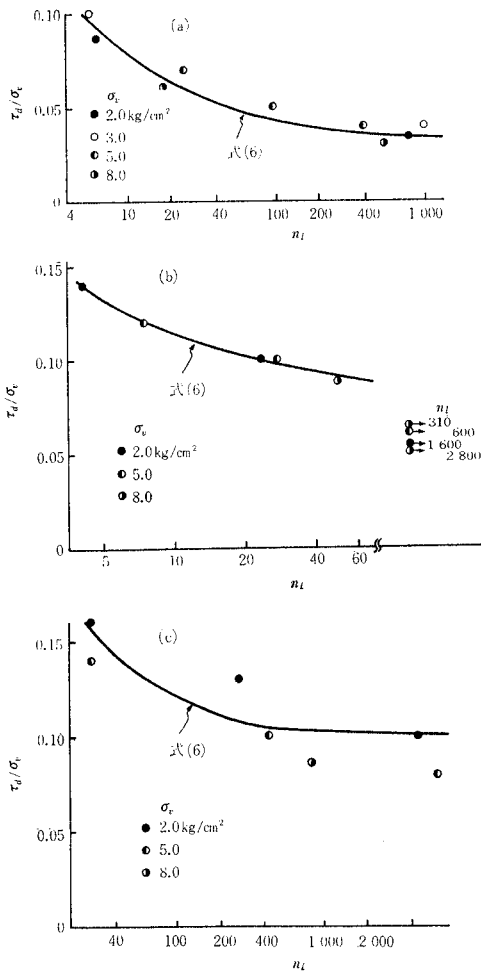


図-12 (a) 繰り返し単純せん断試験による液状化の解析結果 ( $D_r=50\%$ )  
 (b) 繰り返し単純せん断試験による液状化の解析結果 ( $D_r=80\%$ )  
 (c) 繰り返し単純せん断試験による液状化の解析結果 ( $D_r=90\%$ )

ためには、式に含まれる係数  $a, b$  に関するより詳細な調査が必要であるが、これらはともに砂の密度、粒径等の関数であり、とくに密度の影響をうけやすいと予想される。図-13は図-10を作成したのと同じ要領で、試験記録より1サイクルごとの間引き水圧変化  $\Delta \bar{u}$  を求め、 $\Delta \bar{u}/\tau_d \sim \tau_d/\sigma_v$  関係にまとめたものであって、各密度に対して引かれた直線から係数  $a, b$  を求め、かつその特性の一部を知ることができる。すなわち式(4)の仮定が近似的ではあるが妥当性を欠かないこと、および密度が高くなるほど係数  $a, b$  はともに小さくなる傾向をもつことである。そして液状化が発生しない限界の密度では、 $a, b$  はゼロになる。

以上のようにして求めた  $a, b$  を用いて式(6)を計算した結果は、図-12中の実線で描いた曲線であり、それぞれの密度に対して実験値の示す傾向をよく表わしているといえよう。ただし計算にあたって有効内部摩擦角  $\phi'$  は同じ砂試料に対して別途求められた値、すなわち  $D_r=50, 80, 90\%$  に対しそれぞれ  $\phi'=35, 38.5, 40^\circ$  とした。図によれば  $n$  が非常に大きくなると実測値は式(6)から推定される  $\tau_d/\sigma_v$  値よりも小さくなる傾向が

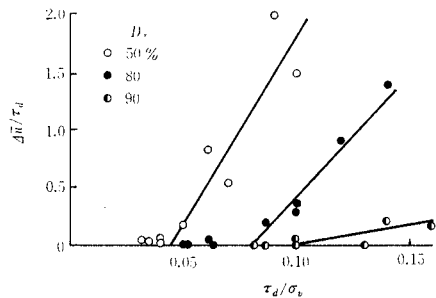


図-13 1サイクル中に発生する間引き水圧  $\Delta \bar{u}$  と  $\tau_d, \sigma_v$  の関係

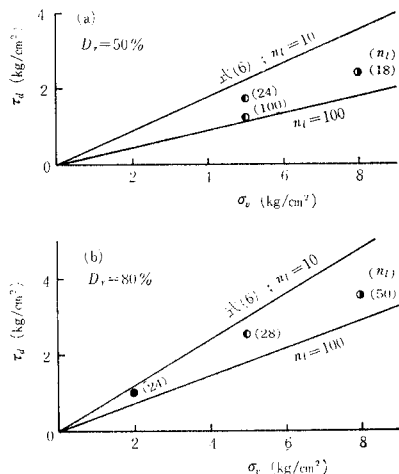


図-14 繰り返しせん断応力  $\tau_d$  と鉛直応力  $\sigma_v$  の関係

みられる（とくに  $D_r=80\%$  の場合に著しい）が、その原因の一つとして数 100 回以上の繰り返しを与えると砂粒子が破碎されてせん断抵抗が減少することが考えられる。しかし実地震の記録等より、ここで考慮すべき地震動としてはせいぜい数 10 回までの  $n$  を対象にすればよいと思われる。

つぎに液状化発生時の繰り返しせん断応力  $\tau_d$  と鉛直応力  $\sigma_v$  の関係を調べる。式 (6) によれば回数  $n_l$  を指定すれば  $\tau_d/\sigma_v$  の値が定まるので、これを  $\tau_d \sim \sigma_v$  関係に図示したものが 図-14 (a), (b) である。この図は 2 種類の密度につき、それぞれ  $n_l=10, 100$  に対して  $\tau_d$  と  $\sigma_v$  の対応が示してあるほか、 $n_l < 100$  の実験結果もプロットしてある。そして実測値はいずれも 2 本の直線で囲まれる範囲内に入っている。なお実験によれば  $\sigma_v$  が大きくなると原点を通る直線からはずれて、接線の傾斜が次第にゆるくなる曲線であらわされているが、静的せん断試験でも拘束圧が約  $7 \text{ kg/cm}^2$  以上になると砂粒子の破碎が観測されることから、高圧力のもとの繰り返し載荷は  $\varphi'$  の低下をさらに助長するものと考えられる。

## 7. む す び

地震時に飽和砂が液状化する現象を、単純化した応力状態を想定して解析し、その成果を用いて鉛直応力一定の条件での三軸繰り返しせん断試験ならびに単純せん断繰り返し試験データを検討した。

すなわち飽和砂の繰り返しせん断による液状化の発生は、砂のダイレイタンスに起因した有効応力の減少にともなうせん断破壊状態への接近過程と考え、液状化発生に要する繰り返し回数  $n_l$  を、繰り返しせん断応力  $\tau_d$  と鉛直応力  $\sigma_v$  との比  $\tau_d/\sigma_v$  値の関数で式 (6) のように表現した。その結果は  $\tau_d/\sigma_v \sim n_l$  関係をあらわす実験値の傾向と量的にもほぼ完全に一致し、したがって  $\tau_d$  が大きいほど、また  $\sigma_v$  が小さいほど液状化が発生しやすいという事実を矛盾なく説明することができた。また液状化を支配する要因の一つに砂の密度があり、これの影響については基本式に含まれる 2 つの係数を変えることで処理できるとした。これらの係数は砂の等方圧下

の体積変化とダイレイタンスを表わす指標であるから、砂の密度、粒径、粒形等によってきまるべき性質のものであるが、土質工学上の意義については、今後さらに多くの実験によって明らかになると思われる。

この報文で検討したデータは三軸と単純せん断試験によるものであるが、これら両試験の結果にはかなりの差があること——たとえば同じ  $\tau_d/\sigma_v$  でも三軸試験は単純試験にくらべて液状化が起こり難いことが報告されている。これは単純せん断では供試体全体が変形をうけるのに対して、三軸試験の場合はせん断領域が限定されるためと筆者らは考えているが、基礎地盤の耐震設計に結びついた土質試験法の開発という観点からも、このような試験法による差異の原因は早急に究明すべき問題であろう。

なお実地震は不規則な震動を地盤に与えるので、ここで述べたような単純化した応力状態をもとにした解析原理をそのままの形で適用できないことはいうまでもなく、そのためには不規則震動を考慮した友沢の研究<sup>9)</sup>などは参考になる。

この研究は昭和 44 年度文部省科研費（特定研究：担当者 赤井浩一教授，総合研究：代表者 後藤尚男教授）により一部補助をうけたことを付記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) Peacock, W.H., & H.B. Seed : Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions, Proc. ASCE, Vol. 94, No. SM 3, 1968, pp. 689-708.
- 2) Seed, H.B., & K.L. Lee : Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading, Proc. ASCE, Vol. 92, No. SM 6, 1966, pp. 105-134.
- 3) Cornforth, D.H. : Some Experiments on the Influence of Strain Conditions on the Strength of Sand, Géotechnique, Vol. 14, No. 2, 1964, pp. 143-167.
- 4) 佐藤忠信：京都大学工学部提出予定修士論文，1971.
- 5) 谷本喜一・植村隆晴：飽和砂の流動化について，土木学会第 24 回年次講演会講演集，第 3 部，pp. 141-142.
- 6) 小川正二・柳沢栄司・長池政彦：振動応力を受ける飽和砂の液状化機構について，第 4 回土質工学研究発表会講演集，1969，pp. 79-82.
- 7) 柴田 徹・行友 浩：振動時における飽和砂の強度特性，京都大学防災研究所年報，第 12 号，1969，pp. 89-96.
- 8) 友沢好規：地盤の地震応答計算とその応用，土質工学学会関西支部第 7 回セミナーテキスト，1969，pp. 33-36.

(1970. 2. 6・受付)