飽和砂の液状化への変動せん断応力および過圧密の影響

(Influences of the shapes of cyclic shear stress (wave)
and overconsolidation on sand liquefaction)

小 川 正 二* (Shoji Ogawa)
三 井 澄 夫** (Sumio Mitsui)
和 田 正*** (Tadashi Wada)

キーワード：圧密非排水せん断／液状化／過圧密／
間ゲキ圧／繰返し荷重／砂／動的
IGC: D7/D6/D8

1. ま え が き

地震時における飽和砂層の液状化の発生の可能性を知るためには、室内において飽和砂供試体に単一波形の繰返しせん断応力を載荷する実験が行なわれている。しかしながら、実際の地震の際に、地中の一要素に作用するせん断応力は非常に複雑なものである。このような複雑な波形のせん断応力を砂供試体に与える実験は非常に難しく、わずかに Ishihara and Yasuda (1972)¹⁾ の研究にみられるだけのようである。

Seed and Idriss (1972)²⁾ は砂地盤の液状化の可能性を検討するのに際して、等価平均せん断応力の概念を導入し、その大きさは地震時に地中の一要素に生じる最大せん断応力の 65% であるとしている。彼らの考え方はこの大きさの等価せん断応力の単一波形を繰り返して載荷すれば、複雑なせん断応力波形の影響を考慮し得るとするものである。また、Shibata et al. (1972)³⁾ は飽和砂に異なる大きさのせん断応力を与える実験を行ない、Ishihara and Yasuda (1972)¹⁾ は新潟地震のときに記録された地震波に相似したせん断応力を与える三軸試験を行なっている。その結果として、液状化を生じるに必要なせん断応力は Seed and Idriss の提案した値より小さいことを示している。

著者らも飽和砂供試体に軸圧と側圧を同周期、あるいは異なる周期で載荷する三軸試験を行なった。後者の実験では大きさの異なる軸圧と側圧を載荷している。このことによって、45° 面上のせん断力はより複雑になり、この変動せん断応力を繰り返して載荷することができる。

また、供試体を正規圧密状態、過圧密状態として、液状化への砂の過圧密比の影響も調べた。

2. 試 験 方 法

2.1 試 験 機

試験機の概略は 図-1 に示すとおりであり、軸圧、側圧は油圧で与えており、軸圧載荷用のピストンの直径と供試体の直径を等しくして、軸圧と側圧をまったく独立して載荷することができる。

図-1 試験装置 (三軸室)

軸圧はピストン上部にとりつけた荷重計で測定し、側圧は三軸室の底部にとりつけた圧力計で測定する。また、間ゲキ水圧は供試体の底部に連結した間ゲキ水圧計で測定する。

軸圧と側圧の繰返しサイクル数は 1~10Hz の範囲で独立に、しかも、任意の大きさで変化させることができる。また、軸圧と側圧を同サイクルで繰り返して載荷するときには、位相差を 0, 90°, 180° の 3 段階に変化させることができ、波形は正弦波である。

* 新潟大学工学部土木工学科 助教授 (長岡市学校町 1 の 2)

** 日本道路公団

*** 新潟大学工学部土木工学科

・この論文に対するディスカッションは昭和 52 年 10 月 1 日までにご投稿下さい。

2.2 試料および供試体

実験には、新潟市内の2か所から採取した砂を用いたが、その物理的性質は表-1に示すようにほとんど同じである。

表-1 砂の物理的性質

採取地	最大粒径 (mm)	比重	D ₁₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	e _{min}	e _{max}	試料番号
昭和石油 精 油 所	1.2	2.75	0.18	0.39	0.59	1.01	試料(1)
万代島	1.2	2.67	0.17	0.38	0.59	1.01	試料(2)

これらの試料をあらかじめしゃ沸して、モールド内に水を満たし、その中にてん充して、所定の間ゲキ比を得るようにした。このようにして作成した供試体を真空吸引して自立させて脱型し、直径および高さを測定した。この際、供試体の下部からはたえず給水している。その後、三軸室などをセットし、真空吸引・給水を中止すると同時に拘束圧を加えて圧密した。供試体の間ゲキ比は圧密による排水量の補正を行なって最終的なものとした。

繰返し応力を载荷する前に、排水バルブを閉じて非排水状態として拘束圧を増大させた。このときのB係数の平均値は0.95であり、ほぼ飽和しているとみなせる。なお、実験を始めるときには、バックプレッシャーをかけて、初期有効拘束圧力(σ_0)を圧密圧力(σ_c)と等しくしている。

また、過圧密状態にするためには、圧密に用いた拘束圧力を一定にしたままバックプレッシャーによって間ゲキ水圧を増大させて初期有効拘束圧力を減少させた。

実験に用いた圧密圧力は1.0, 2.0, 5.0 kg/cm²で、過圧密比(σ_c/σ_0)は1, 2, 5とした。

2.3 載 荷 方 法

2.2に述べたような供試体について次のような三種類の方法で繰返し応力を载荷した。

(i) 側圧を一定にし、軸圧のみを周期的に変動させる。

(ii) 軸圧と側圧の位相差を180°として、両者を周期的に変動させる。

(iii) 軸圧と側圧のサイクル数の比を2:1, 5:1として、両者とも周期的に変動させる。

したがって、45°面上のせん断応力(τ_d)は次のようになる。

(i) の場合

$$\tau_d = \sigma_d/2 = (\sigma_{1d}/2) \sin wt$$

(ii) の場合

$$\tau_d = \sigma_d/2 = (\sigma_{1d} \sin wt + \sigma_{3d} \sin wt)/2$$

図-2 $n=2, 5$ のときの理想的な波形

$\sigma_{1d} = \sigma_{3d}$ のときには

$$\tau_d = \sigma_d/2 = \sigma_{1d} \sin wt$$

となる。

(iii) の場合

$$\tau_d = \sigma_d/2 = (\sigma_{1d} \sin nwt - \sigma_{3d} \sin wt)/2$$

ここに、

σ_d : 軸差応力

σ_{1d} : 軸圧の変動部分

σ_{3d} : 側圧の変動部分

w : 振動数 (この実験では、 4π)

n : 軸圧と側圧のサイクル数の比 (この実験では、1, 2, 5)

(iii) の実験で、(a) $\sigma_{1d} = \sigma_{3d}$, $n=2$, および (b) $\sigma_{1d} = \sigma_{3d}/2$, $n=5$ としたときの理想的な波形は図-2のようになるはずである。

$$\sigma_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2 \quad Dr = 55 \% \quad \text{O.C.R.} = 2$$

図-3 σ_{1d} = 変動, σ_{3d} = 一定のときの実験結果

図-4 σ_{1d} と σ_{3d} が位相差 180° で変動したときの実験結果

3. σ_3 = 一定, および σ_{1d} , σ_{3d} が位相差 180° で変動する実験

3.1 実験結果

σ_3 = 一定の実験は, Seed and Lee (1966)⁴⁾, 谷本・植村 (1970)⁵⁾ など多くの研究者によって行なわれており, また, σ_{1d} , σ_{3d} が位相差 180° で周期的に変動する実験は柴田・行友 (1970)⁶⁾ などによって行なわれているが, ここでは, 4 に述べる結果と比較するために, 著者らの実験結果についても述べる。

図-3 は σ_3 = 一定 (すなわち, $\sigma_{3d} = 0$) で, σ_{1d} のみが変動した場合, 図-4 は σ_{1d} , σ_{3d} が位相差 180° で変動した場合の σ_{1d} , σ_{3d} , 間ゲキ水圧 (u), 軸ヒズミ (ϵ_a) の時間 (t) による変化を示している。これらの結果は前掲の研究者の結果と同様な傾向を示しており, すでに

図-5 初期液状化状態附近の間ゲキ水圧の凹み現象

図-6 三つの方法で決めた初期液状化時の $\sigma_d/2\sigma_0(\tau_d/\sigma_0) - N_l$ 関係

知られているように, ある載荷回数までは, σ_{1d} , ϵ_a はほとんど同じ大きさであるが, その載荷回数になると, 軸ヒズミ (ϵ_a) は急激に増大し, σ_{1d} はもはや一定の大きさを保つことができなくなる。また, この附近になると, σ_{1d} , u の一サイクル中の変化は 図-5 のようになり, 軸圧が増大しているにもかかわらず, 間ゲキ水圧は一定の値になったり, 低下したりする現象, いわゆる凹み現象が現われる。この現象は矩形波載荷の場合には, 間ゲキ水圧の飛び出し現象として現われることが確認されている⁴⁾⁵⁾。Seed and Lee はこの現象は σ_d の符号が変わるとき, すなわち, $\sigma_d = 0$ のときに生じると述べているが, 著者らの実験によれば, 必ずしも $\sigma_d = 0$ のときに生じるものではなく, 静的なセン断試験においてみられると同様にダイレイタ

ンシーに起因するものと考えられる。なお, 動的試験の場合には, この後に, 土粒子構造が完全に崩壊して完全液状化状態になる。

3.2 初期液状化の定義

Seed and Lee⁴⁾ によれば, 「液状化とは土が急激に広いヒズミの範囲にわたって変形に対する抵抗力を失うこと, すなわち, 砂の場合には, 有効拘束圧力がゼロになった状態」と定義されているが, 一般には, 有効拘束圧力がゼロになる以前の初期液状化状態に達したときを液状化発生基準としており, 現象的には, 次のような条件のときを示している。

- (i) 最大セン断応力の作用している応力状態が動的破壊線に一致したとき。すなわち, その後の載荷においては, 軸差応力あるいは最大セン断応力は減少する。
- (ii) 軸ヒズミ振幅が急激に増大し始めるとき。
- (iii) 間ゲキ水圧の凹み, あるいは飛び出し現象の生じるとき。または, 間ゲキ水圧が急激に増大し始めるとき。

いま, O.C.R. = 2 の供試体について, 側圧 (σ_3) = 一定, 圧密圧力 (σ_c) = 1.0 kg/cm² の条件で行なった実験の結果より, 上記の三つの方法で定めた初期液状化を生じるのに要する載荷回数 (N_l) と $\sigma_d/2\sigma_0$ との関係を示すと 図-6 のようになる。なお, σ_0 は載荷時の有効拘束圧力である。これらを見ると, (i) の基準で定めた $\sigma_d/2\sigma_0 - N_l$ 関係が多少上側にあるが, 三つの曲線はほぼ一致し, 現象的には, 三つの基準のうちどの基準によって初期液状化を判定してもさしつかえないといえる。

3.3 飽和砂中に発生する間ゲキ水圧

飽和砂に繰り返して応力を載荷すると, 図-3 のように, 間ゲキ水圧は徐々に増大する。 $\sigma_{1d} = 0$ に対応す

のような関係では $D_r=40\%$, 70% の値に D_{55}/D_{40} , D_{55}/D_{70} をかけると $D_{55}\%$ の実験と一致することも知られており、この場合もほぼ一致する。しかし、この場合は、過圧密比 $O.C.R.=2$ の試料について行なった実験結果であり、正規圧密状態で行なった実験結果より幾分大きな (τ_d/σ_0) を示している。

4. σ_{1d} と σ_{3d} の変動サイクル数の比を 2 : 1, 5 : 1 としたときの実験

4.1 実験結果

本実験に用いた装置では前述のごとく任意波形のセン断力を載荷することができないので、軸力と側圧の変動サイクル数の比を変えることによって 45° 面上のセン断応力を複雑化させた。すなわち、側圧の 1 サイクル中に軸力を 2 および 5 サイクルで変動させ、それを繰り返して載荷した。図-10 は σ_{1d} と σ_{3d} の変動サイクル数の比が 2 : 1 のときの実験結果の一例である。軸ヒズミの増大、 τ_d の減少という現象はこの場合にも認められるが、セン断応力波形が複雑になるために間ゲキ水圧の凹みを確認することはむずかしい。そこで、初期液状化の判定は $\tau_d-\sigma'$ 関係より行なった。

4.2 変動セン断力をうけるときの等価平均セン断応力

3 に述べたように、単一のセン断応力を繰り返してうける場合には、 τ_d/σ_0-N_L 関係を求めるときに τ_d としては最大セン断応力をとればよいが、実際地震のときに生じるようなランダムなセン断応力波を対象とするときには、 τ_d としてどのような値を用いるべきかが問題となる。

Seed and Idriss²⁾ は地震時の地盤の液状化の可能性を検討するときに、地震によって生じる最大セン断応力 τ_{max} に対し、

$$\tau_{av}=0.65\tau_{max} \quad (2)$$

を等価平均セン断応力と定義し、この大きさのセン断応力が繰り返して作用すると考えた。しかしながら、この

図-12 τ_d/σ_0-N_L 関係への過圧密比 (O.C.R.) の影響
方法では、小さなセン断応力が液状化に与える影響を考慮することができない。Shibata et al.³⁾, Ishihara and Yasuda⁴⁾ の実験でも Seed and Idriss の提案している $0.65\tau_{max}$ という等価平均セン断応力は必ずしも妥当でないことがわかっている。

そこで著者らは種々の大きさのセン断応力が作用しているときの等価平均セン断応力 $av\tau_d$ を次のように表わした。

$$av\tau_d = \sum(n_i \cdot \tau_{di}) / mN_L \quad (3)$$

ここに、 τ_{di} : (1) 式の $(\tau_d/\sigma_c)_{crit}$ に対応する τ_d より大きいセン断応力、 n_i : 液状化が生じるまでに載荷された τ_{di} の回数、 mN_L : 液状化が生じるまでに載荷された限界セン断応力以上の大きさのセン断応力の載荷回数の総和 ($=\sum n_i$)

このようにして、等価平均セン断応力を求め、 $av\tau_d/\sigma_c$ と N_L との関係を求めると、図-11 のようになる。この図には、単一波形のセン断応力を繰り返した場合の結果も示してあるが、両者は非常によく一致していることがわかる。

したがって、種々の大きさのセン断応力が任意に生じる地震時の地盤の液状化の可能性を検討するときにも、上記の考え方によってセン断応力の応答波形より $av\tau_d$ を求めれば、単一波形のセン断応力を与える実験から求めた τ_d/σ_c-N_L 関係より、液状化の発生する載荷回数 mN_L を求めることができる。

5. 液状化への過圧密の影響

Seed and Peacock (1971)⁸⁾ は過圧密比 (O.C.R.) を変化させて単純セン断試験を行ない、その影響を示している。しかし、彼らはその差異は過圧密によって静止土圧係数 K_0 が変化するためであると述べている。一方、土岐・北郷 (1974)⁹⁾ は乾燥砂について動的繰返し三軸試験を行ない、その変形は以前にうけた応力履歴の影響を大きくうけることを示している。そこで著者らも応

図-11 変動セン断応力をうけるときの $av\tau_d/\sigma_c-N_L(mN_L)$ 関係と過圧密比 (O.C.R.=2) の影響を修正した τ_d/σ_c-N_L 関係

図-13 等方圧密したときの D_r - σ_c 関係

力履歴の影響の一つとして過圧密比の影響を調べた。

図-12 には O.C.R. = 1, 2, 5 のときの τ_d/σ_0 と N_t との関係が示されているが、明らかに過圧密比が大きいほど同じ載荷回数で液状化を生ずるのに要する τ_d/σ_0 は大きいことがわかる。しかし、O.C.R. = 1 と 2 の場合の差に比べると、O.C.R. = 2 と 5 の差はかなり小さい。これは O.C.R. = 5 の場合には、バックプレッシャーを与えたときに、有効拘束圧力の低下による体積膨張がかなり大きいためであると考えられる(図-13)。O.C.R. = 2 の場合にはバックプレッシャーによる有効拘束圧力の低下の際の体積膨張による相対密度の変化が液状化に要する τ_d/σ_0 に与える影響は実験精度の影響に比較してあまり大きくないと考えられるので、柴田・行友⁶⁾ の正規圧密砂の液状化の推定法にならって、バックプレッシャーによる間ゲキ水圧は繰返し応力載荷によって生じたものと仮定する。

したがって、実験より(1)式が求まれば、バックプレッシャー u_B は N 回の載荷によって生じることになるから、

$$u_B = \Delta u \times N, \quad N = \frac{u_B}{\Delta u}$$

となる。この回数と過圧密状態にある砂の実験で求めた液状化までの載荷回数の和をあらたに N_t とする。このようにして、O.C.R. = 2 の砂について求めた N_t と τ_d/σ_c の関係を示すと、図-11 の黒丸で示したようになり、正規圧密状態にある砂の $\tau_d/\sigma_c - N_t$ 曲線にはば一致する。

同様の補正を O.C.R. = 5 の砂の実験結果について行なうと、O.C.R. = 5 の場合の (τ_d/σ_c) は正規圧密の場合の $(\tau_d/\sigma_c)_{crit}$ より小さくなり、(1)式の{ }内の値が負になる。したがって、O.C.R. = 2 の場合の考え方が適用できなくなる。これは図-13に示されているように、バックプレッシャーによる間ゲキ水圧を与えて、有効拘束圧力を低下させるときに、供試体が膨張し、過圧密の効果が減少するためと思われる。

6. む す び

以上に述べた結果を要約すると次のようになる。

(1) 初期液状化状態附近においては間ゲキ水圧の凹みが生じるが、これはダイレイタンスによるものと考えられる。

(2) 初期液状化の判定は

(i) 最大せん断応力 ($\tau_d = \sigma_d/2$) の減少

(ii) 軸ひずみの急激な増大

(iii) 間ゲキ水圧の凹み現象、あるいは急激な増大の三つの基準のいずれにしたがって行なっても、 $\tau_d/\sigma_c - N_t$ 曲線はほとんど同じになる。

(3) 45° 面上に作用するせん断応力が種々異なる大きさの組み合わせの場合でも、 $(\tau_d/\sigma_c)_{crit}$ より大きいせん断応力 τ_{di} について等価平均せん断応力

$$av\tau_d = \frac{\sum(n_i \cdot \tau_{di})}{mN_t}$$

$$mN_t = \sum n_i$$

を求め、 $av\tau_d - mN_t$ 曲線を求めれば、単一波形のせん断応力を繰返してうけたときの $\tau_d/\sigma_c - N_t$ 曲線と一致する。

(4) したがって、異なる大きさのせん断応力が作用する地震時の地盤の液状化の可能性はせん断応力の応答波形より $av\tau_d$ を求めれば、単一波形のせん断応力を繰返して載荷したときの $\tau_d/\sigma_c - N_t$ 曲線に基づいて判定することができる。

(5) 同じ N_t で液状化が発生するのに要するせん断応力は過圧密比の大なるほど大きくなる。しかし、過圧密比が1と2の場合の $\tau_d (= \sigma_d/2)$ の差に比較すると、過圧密比が2と5の場合の τ_d の差はかなり小さい。

(6) 過圧密比が2の砂について、バックプレッシャーによる間ゲキ水圧はせん断応力の繰返し載荷によって生じるものとして、その補正を行なうと、過圧密比が1と2の場合の $\tau_d/\sigma_c - N_t$ 曲線はほぼ一致する。

本研究の一部(O.C.R. = 2の場合)は昭和46年の第16回土質工学シンポジウムのときの一斉試験によって行なわれたものである。

また、昭和44~46年度文部省科学研究費(特定研究・東北地区研究班)の補助を受けて行なわれた。ここに、深謝の意を表します。

記 号 説 明

A =(1) 式の係数
 $D_r, D_{40}, D_{55}, D_{70}$ =圧密後の相対密度
 n =軸圧と側圧のサイクル数の比
 n_i =初期液状化までの τ_{di} の載荷回数
 N =繰返し応力の載荷回数
 N_i =初期液状化までの繰返し応力の載荷回数
 ${}_m N_i = \sum n_i$
 u =間ゲキ水圧
 Δu =間ゲキ水圧の増加率
 u_B =バックプレッシャーによる間ゲキ水圧
 ε_a =軸ヒズミ
 σ_d =軸差応力
 σ_{1d} =軸圧の変動部分
 σ_{3d} =側圧の変動部分
 σ_c =圧密圧力
 σ_c =繰返し応力載荷時の初期有効拘束圧力
 $\tau_d=45^\circ$ 面上のせん断応力 ($=\sigma_d/2$)
 $\tau_{av}, \sigma_v \tau_d$ =等価平均せん断応力
 τ_{di} =初期液状化までの任意の大きさのせん断応力
 τ_{max} =最大せん断応力

参 考 文 献

- 1) Ishihara, K. and Yasuda, S. (1972): "Sand liquefaction due to irregular excitation," Soils and Foundations, Vol.12, No. 4, pp.65-77.
- 2) Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971): "Simplified procedure for evaluating liquefaction potential," Jour. of Soil Mech. and Found. Div. ASCE, Vol. 97, No. 9, pp.1249-1273.
- 3) Shibata, T., Yukitomo, H. and Miyoshi, M. (1972): "Liquefaction process of sand during cyclic loading," Soils and Foundations, Vol.12, No.1, pp.1-16.
- 4) Seed, H.B. and Lee, K.L. (1966): "Liquefaction of saturated sands during cyclic loadings," Jour. of Soil Mech. and Found. Div. ASCE, Vol.92, No. SM 6, pp.105-134.
- 5) 谷本喜一・植村隆晴 (1970): 周期載荷をうける飽和砂の破壊, 「土木学会論文報告集」, No.183, pp.63~72.
- 6) 柴田 徹・行友 浩 (1970): 飽和砂の繰返し載荷による液状化現象の研究, 「土木学会論文報告集」, No.180, pp.83~89.
- 7) 吉見吉昭・大岡 弘 (1971): リングねじりせん断試験機による飽和砂の液状化実験, 第16回土質工学シンポジウム, 土質工学会, pp.27~32.
- 8) Seed, H.B. and Peacock, W.H. (1971): "Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics," Jour. of Soil Mech. and Found. Div. ASCE Vol.97, No. 8, pp.1099-1119.
- 9) 土岐祥介・北郷 繁 (1974): 乾燥砂の変形特性に及ぼす動的繰返し応力の影響, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 14, No.1, pp.95~103.

(原稿受付, 1976.1.19)