飽和砂の液状化特性に及ぼす非排水せん断履歴の影響

(Effects of Undrained Preshearing on Liquefaction) Characteristics of Saturated Sand

鈴木 輝 之* (Teruyuki Suzuki)

土 岐 祥 介** (Shosuke Toki)

キーワード：液状化／間隙圧／繰返し荷重／三軸圧縮試験／砂／動的／履歴 (IGC : D6/D7)

1. ま え が き

飽和砂地盤は、地震力によって液状化したり、あるいは液状化に至らないまでも過剰間隙水圧上昇などの履歴を受けることによってその後の液状化特性が変化する。この問題を最初に取り上げたのは Finn ら¹⁾の研究であろう。その後 Seed ら²⁾、石原ら^{3), 4)}の研究によって、履歴効果に関する基本的特性はある程度とらえられてきた。

しかし履歴効果が現れる機構の明確な説明、あるいは定量的な検討は未だ不十分なようである。更に試験機内で確認された現象が原地盤でそのまま生じるかという大きな問題点も残されている。いずれにしても試験機内での現象を正確にとらえ、飽和砂の液状化特性に及ぼすせん断履歴の影響の現れ方に関する基本的な特性を明らかにしておくことは重要な問題と考えられる。

著者らは、規則的な繰返し応力を受ける乾燥砂の体積ひずみ、および飽和砂の液状化特性において、事前に加えられたせん断履歴の影響がどのように現れてくるかを調べる基本的な実験を繰返し三軸試験によって行い次のような結果を得ている^{5), 6)}。

1) 三軸試験でのせん断方向を圧縮側と伸張側に分けると、以前に加えたせん断応力の影響の現れ方は、その応力の方向が引続き加える応力の方向と同一方向であるか反対方向であるかによって全く異なる。

2) このせん断履歴を各々同一方向せん断履歴と反対方向せん断履歴と呼ぶと、同一方向せん断履歴は引続き繰返し応力の下での体積ひずみあるいは過剰間隙水圧発生を小さくし、反対方向せん断履歴はこれらを大きくするように働く。

3) 同一方向せん断履歴の影響は、履歴として加わる荷重の小さいうちから現れるのに対して、反対方向せん断履歴の影響は、履歴荷重が同一方向せん断履歴の場合に比べてかなり大きくなしないと現れない。

4) これら2種のせん断履歴の影響は独立に存在し、両方の影響が同時に存在する場合は、それらは重ね合って現れる。

上記の結果は、履歴荷重を主に排水条件のもとで加える一連の試験から得られた。しかし地盤が地震力などの動的荷重を履歴荷重として受けるときには、非排水条件の下で履歴荷重を受けその後再圧密されるという過程を経ると思われる。

本研究は、圧密(等方)→非排水せん断→再圧密(等方)という履歴を受けることによって、規則的な繰返し応力の下での液状化特性がどのように変化するかを繰返し三軸試験によって実験的に調べたものである。なお実験としては比較検討の目的で排水条件でのせん断履歴を加えた場合についても一部行っている。

本実験の結果、液状化履歴も含めた非排水せん断履歴の効果を評価するためには、上記の基本的性質の他に、次のような事項も考慮する必要があることが分かった。

1) 再圧密の際に生じる構造特性の変化、2) 再圧密による密度の増加、3) 供試体上部におけるゆるく不安定な部分の形成。本文中ではこれらの因子がどのように影響して履歴効果が現れてくるかを述べている。

2. 本 研 究 の 方 法

2.1 試料および供試体作製

試料、実験装置および供試体作製法の詳細については既に報告している⁷⁾ので、ここではその概略を述べる。用いた試料は一度水洗いした後に約 60°C の温度で炉乾燥した豊浦砂で、最大、最小間隙比は各々 $e_{\max}=0.985$, $e_{\min}=0.617$ であった。用いた実験装置は電磁弁による空気圧切換え方式の繰返し三軸試験機で、供試体の形状は直径 50mm、高さ 114mm の円柱形である。供試体の作製は、まず多重フルイ落下装置⁸⁾によりモールド内

* 北見工業大学工学部土木工学科 助教授 (北見市公園町 165)

** 北海道大学工学部土木工学科 教授 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
(1984.10.25 原稿受付・討議期限 1986.4.1, 要請があれば1か月の
期限延長可能)

それまでわずか 0.2% 程度であった軸ひずみは、A' 点から B' 点へ 10% 以上も急増し、更に次の等方応力に戻った段階（図中 C 点）で過剰間隙水圧は拘束圧に等しい C' 点まで増加している。図-1 中で軸ひずみ急増点と呼んでいるのは、図-2 中の A 点（A', A'' 点に対応）のことである。このように急激な液状化が生じるのは、本実験で用いた多重ふり落下法によって作製された供試体が強い初期構造異方性をもつことに主な原因がある⁸⁾。

以上のように、前载荷において非排水条件で矩形波の動的繰返し応力を加える場合は、液状化の発生によって急激な変形が生じるので、実験 3 と実験 4 の前载荷では軸力载荷ピストンにストッパーを設けて、伸張方向へ軸ひずみが急増してこのストッパーが最初に作動した時点で载荷をとめた。これを図-2 で説明すると、A' 点から B' 点に至る軸ひずみ量をストッパーによって種々の大きさに規制し、C 点の等方応力に戻った時点で载荷を終了させた。図-2 から分かるように、軸ひずみ急増点以前での圧縮方向への軸ひずみは無視し得る程度に小さい。したがって実験 1~4 の前载荷におけるせん断ひずみは伸張方向にだけ生じたと見なすことができる。

次に実験 5 の前载荷では、圧縮側と伸張側の両方にストッパーを設け、軸ひずみ急増点を過ぎてからも 5 サイクルの载荷を行った。この場合軸ひずみ急増後は液状化が発生して、ストッパーで設定した大きさの軸ひずみが繰返し生じる。

以上の実験装作でストッパーを用いるのは軸ひずみ急増点を過ぎる場合であるが、実験 4 あるいは実験 5 の場合で、軸ひずみ急増点以前で過剰間隙水圧が所定の値になった時点で前载荷をとめる実験もいくつか行った。

3. 前载荷における変形

3.1 前载荷における残留間隙水圧

種々の前载荷のもとでの残留間隙水圧の大きさを調べておくことは、前载荷の影響を検討するうえで重要である。なお本文中での残留間隙水圧は、せん断応力がゼロに戻ったときに残留している過剰間隙水圧を指している。

実験 2~4 の前载荷において、せん断応力を加え終わって再び等方応力に戻した時点での残留間隙水圧比 u_{Pre}/σ_0 と最大せん断ひずみ γ_{Pre} との関係をプロットすると図-3 が得られる。ここでせん断ひずみは、軸方向ひずみ ε_z と体積ひずみ ε_v （非排水条件の場合はゼロとおく）から、 $\gamma_{Pre} = (3\varepsilon_z - \varepsilon_v)/2$ の関係を用いて計算した。なお γ_{Pre} は圧縮試験と伸張試験とで符号が逆になるが、本文中では両試験結果の比較の都合で絶対値で表している。

図-3 前载荷での残留間隙水圧と最大せん断ひずみの関係

図-3 によれば、実験 2 と実験 3 の $u_{Pre}/\sigma_0 - \gamma_{Pre}$ 関係はほぼ同一曲線で表される。この 2 つの実験の前载荷条件で異なるのは载荷速さだけである。このように、本実験の前载荷における残留間隙水圧には、動的载荷と静的载荷の载荷速さの違いの影響が現れてこないことが分かる。

次に実験 4 では、軸ひずみが急増する最後の 1 サイクルの応力が加わる前に、既に何サイクルかの载荷によって残留間隙水圧は上昇しているの、最大せん断ひずみ γ_{Pre} が同じであっても、1 サイクルの载荷しか行わない実験 2 および実験 3 の場合より残留間隙水圧は大きくなる。

以上のように前载荷で発生する残留間隙水圧 u_{Pre} の大きさは最大せん断ひずみ γ_{Pre} によって一義的には決まらない。しかし u_{Pre} が拘束圧に等しくなるときの γ_{Pre} は実験 2, 3 および 4 の 3 つの実験とも $\gamma_{Pre} = 2.5\%$ でほぼ一致している。前述のように実験 2~4 の γ_{Pre} は伸張側で発生しているので、参考のために同一供試体で行った静的三軸伸張試験の結果を述べると、破壊時のせん断ひずみ $\gamma_f = 10\%$ 、ダイレイタンスが負から正へ転換するときのせん断ひずみ $\gamma_c = 7.3\%$ である。このように実験 2~4 の前载荷で残留間隙水圧が拘束圧に等しくなるときの最大せん断ひずみは、大よそ同一供試体の静的試験で得られる γ_f の 1/4, γ_c の 1/3 程度の大きさであることが分かる。

なお本文中では上記のように残留間隙水圧が拘束圧に等しくなった状態を液状化と定義している。後述するように、前载荷すなわち履歴荷重のもとでの液状化発生によって、再载荷における液状化特性に及ぼすせん断履歴の影響の現れ方は大きく異なる。

次に実験 5 の前载荷ではストッパーによって発生するせん断ひずみ振幅の最大値を規制している。この場合のストッパーの設定値は 1% 以上の種々の大きさにとったが、軸ひずみ急増後にストッパーが作動し始めてからの

図-4 前荷荷での体積ひずみと最大せん断ひずみの関係

5 サイクルの荷重過程で、例外なく過剰間隙水圧比 $u_{pre}/\sigma_0 = 1.0$ となり液状化が発生した。なお、ストップパーの設定値を 1% 以下にとった場合には、同様な荷重を行っても液状化は発生しないことが認められた。

3.2 前荷荷で生じる体積ひずみ

一般に本実験で荷重したような前荷荷では、粒子構造の変化と同時に密度も変化する。この両者の変化は独立して生じるものではないが、履歴効果をもたらす因子としては区別して考えることもできる¹⁰⁾。また密度変化の問題は、地震荷重によって砂地盤が液状化したり、あるいは過剰間隙水圧上昇があった後の排水に伴う地盤沈下の問題にもつながる¹¹⁾。各実験の前荷荷で生じた体積ひずみ（実験 1 以外では再圧密の過程で発生） $\varepsilon_{v,Pre}$ と最大せん断ひずみ γ_{Pre} の関係を図-4 (a), (b) に示す。なお同図中には $\varepsilon_{v,Pre}$ を相対密度の変化 ΔD_r に換算した目盛も併記している。これらの図から次のようなことが言える。

1) 静的なせん断を行った実験 1 と実験 2 では、 γ_{Pre} が 5~6% とかなり大きくても $\varepsilon_{v,Pre}$ は 1.3% 程度である。

2) 同じく静的せん断の場合、同一の γ_{Pre} に対する $\varepsilon_{v,Pre}$ の値は実験 2 よりも実験 1 の場合のほうが約 25% ほど大きい。この違いが現れる原因としては、有効平均主応力の大きさの違いがまず考えられるが、それ以上に実験 1 ではせん断の過程で $\varepsilon_{v,Pre}$ が生じるのに対して実験 2 では再圧密の過程で $\varepsilon_{v,Pre}$ が生じるという機構的な違いが挙げられよう。

3) せん断応力を非排水条件で加える実験 2~4 において、荷重速さおよび荷重数の違いにもかかわらず、有効拘束圧がゼロとなる以前 ($\gamma_{Pre} \leq 2.5\%$) では、 $\varepsilon_{v,Pre} - \gamma_{Pre}$ 関係は一本の曲線で表される。

4) せん断応力を非排水条件で加え（実験 2~5）、その応力の下で有効拘束圧ゼロの状態になったときの $\varepsilon_{v,Pre}$ は γ_{Pre} だけでは決まらず、荷重速度および液状化発生後の荷重数によって異なる。すなわち静的にせん断するとき（実験 2）よりも動的にせん断するとき（実験 3 および 4）のほうが $\varepsilon_{v,Pre}$ が大きく、更に同じ動的せん断の場合でも、有効拘束圧がゼロとなつてからすなわち液状化が発生してから荷重数の多いほう（実験 5）が $\varepsilon_{v,Pre}$ は大きくなる。

5) 実験 5 で最後の荷重方向を圧縮側にした場合と伸張側にした場合とで、 $\varepsilon_{v,Pre}$ に違いは現れていない。最後のせん断方向が前荷荷終了後の構造特性に影響することは考えられるが、体積ひずみには影響しないと言うことができよう。

4. 残留間隙水圧に及ぼす前荷荷の影響

4.1 静的な前荷荷を受けた場合

以前に受けた前荷荷による履歴効果は、再荷重第 1 サイクルにおける残留間隙水圧および変形に顕著に現れる。ここで、履歴効果が前荷荷で生じた密度変化と構造変化によってもたらされると考えると、後者の影響を理解するためには、再荷重で発生した残留間隙水圧を三軸圧縮側と伸張側で生じた成分に分離することが有効と考えられる⁶⁾。

図-5 (a) は、前荷荷で静的に 1 サイクルのせん断応力を加えた実験 1 と実験 2 における再荷重第 1 サイクルの残留間隙水圧を、圧縮側での成分 u_{c1}/σ_0 と伸張側での成分 u_{e1}/σ_0 に分離し、各々を前荷荷での最大せん断ひずみ γ_{Pre} に対してプロットしたものである。

この図によれば、 γ_{Pre} の増加に伴い u_{c1}/σ_0 と u_{e1}/σ_0 はともにまず減少し、 γ_{Pre} が大よそ 0.3% を越えたところから u_{c1}/σ_0 だけが増加に転じている。著者らが既に報告している実験結果によれば、本実験の再荷荷での

(a) 静的な前荷荷の場合

(b) 動的な前荷荷の場合

(c) 動的な前荷荷の場合 (液状化発生後 5 サイクル荷荷)

図-5 再荷荷第1サイクルでの残留間隙水圧と前荷荷での最大せん断ひずみの関係

荷重条件で、 $\gamma_{Pre} \leq 0.3\%$ の範囲では再荷荷による発生間隙水圧を小さくするように働く同一方向せん断履歴の影響だけが現れることになる⁹⁾。

したがって図-5において $\gamma_{Pre} \leq 0.3\%$ で u_{c1}/σ_0 、 u_{e1}/σ_0 ともに減少しているのは同一方向せん断履歴の影響によるものとして理解できる。一方、 γ_{Pre} が 0.3% を越すと再荷荷での変形を大きくするように働く反対方向せん断履歴の影響も同時に現れるため、 γ_{Pre} のせん断方向と反対側の、三軸圧縮側での残留間隙水圧 u_{c1}/σ_0 が増加に転じる。

以上のように、前荷荷として静的なせん断応力を加える実験1と実験2においては、せん断履歴が同一方向せん断履歴と反対方向せん断履歴に分けられ、更にその両者の影響の重ね合わせが成り立つという前述の基本的性質に従った形で履歴効果が現れていることが分かる。

次に図-5(a)の実験1と実験2の曲線を比較すると、上記のように両曲線の定性的な傾向は同じであるが、定量的に一致しているわけではない。実験1と実験2における履歴荷重の条件の最大の違いは排水条件である。履歴荷重を排水条件で受ける場合と非排水条件で受ける場合との違いがなぜ現れてくるかを適切に説明することはできないが、その原因を推測するならば次のようなことが挙げられよう。

- 1) 有効応力の違い、特に実験2では $\gamma_{Pre} \geq 2.5\%$ になると、有効拘束圧ゼロの状態でせん断変形を受ける。
- 2) 再圧密時の挙動の違い。すなわち再圧密による体積変化がある実験2のほうが、せん断履歴の影響がより消える。

これらの内容の詳細な検討は今後の課題として残るが、いずれにしても、履歴効果を、事前に受けた最大せん断ひずみ γ_{Pre} の大きさだけで一義的に表すことはできないようである。ちなみに、図-5(a)の横軸を前荷荷で加えられた有効せん断・垂直応力比の最大値 $(\tau/\sigma')_{max}$ に置き換えても同様の結果が得られることも確かめられている。

4.2 動的な前荷荷を受けた場合

図-5(b)は、前荷荷として動的繰返し応力を非排水条件で加えた実験3と実験4の再荷荷第1サイクルでの残留間隙水圧を、図-5(a)と同じようにプロットしたものである。図-1に示すように、図-5(b)中の実験3の前荷荷と図-5(a)中の実験2の前荷荷とでは、荷重速度が異なるだけでその他の荷荷条件はすべて同じである。

図-5(a)と(b)の比較から次のことが言える。

- 1) $\gamma_{Pre} \leq 2.5\%$ の範囲では、前荷荷の荷重速度の違いの影響はそれほど顕著ではないが、 $\gamma_{Pre} \geq 2.5\%$ となったとき、すなわち前荷荷で液状化が発生した場合に

は、 γ_{Pre} が同じであっても、それを矩形波で動的に加えた場合と、静的に加えた場合とで、再載荷時の残留間隙水圧はかなり異なってくる。

2) 前載荷で液状化が発生した場合 ($\gamma_{Pre} \geq 2.5\%$)、その前載荷を動的に加えるほうが、静的に加えるよりも再載荷第1サイクルでの圧密側と伸張側の残留間隙水圧の差が小さくなっている。

3) 更に前載荷で液状化が発生した場合 ($\gamma_{Pre} \geq 2.5\%$)、その前載荷を動的に加えたときは、再載荷第1サイクルで発生する全残留間隙水圧 $u_1/\sigma_0 = u_{c1}/\sigma_0 + u_{E1}/\sigma_0$ が、前載荷を静的に加えたときに比べて小さくなっている。例えば、実験2と実験3、4の u_1/σ_0 の値は、 $\gamma_{Pre} = 2.0\%$ のとき各々 0.12 と 0.11 であるのに対し、 $\gamma_{Pre} = 5.0\%$ のとき各々 0.20 と 0.13 である。

図-4 (b) から分かるように、動的な前載荷を加える実験3と実験4では前載荷で $\gamma_{Pre} \geq 2.5\%$ となり液状化が発生すると、再圧密時の体積ひずみが急増する。この再圧密は等方圧で行っているの、ここでの体積ひずみが大きいほど、その変形過程での構造の等方化が進み、その結果圧縮側と伸張側での残留間隙水圧の差が小さくなっていると考えられる。更に再圧密による大きな体積ひずみの発生すなわち密度の増加は、再載荷時の残留間隙水圧そのものを小さくしていると思われる。以上のように、動的な履歴を加えその荷重の下で液状化が発生した場合には、再圧密で大きな体積ひずみが生じ、その体積ひずみによる密度の増加およびそれが生じる過程での構造の変化が履歴効果をもたらす因子として無視できないことが分かる。

図-5 (c) は、前載荷で軸ひずみ急増点を過ぎてからもストッパーで設定した両振り軸ひずみを5サイクル加えた実験5における、再載荷第1サイクル目の残留間隙水圧と前載荷での最大せん断ひずみ振幅 γ_{Pre} (5サイクル載荷) との関係を示す。

図-5 (c) でまず分かることは、同じ γ_{Pre} に対して再載荷第1サイクルでの残留間隙水圧 $u_1/\sigma_0 (u_{c1}/\sigma_0 + u_{E1}/\sigma_0)$ が、図-5 (b) に示す実験3および実験4の場合に比べて大きいことである。図-4 (b) から分かるように、同じ γ_{Pre} に対する実験5の再圧密時の密度増加は、実験3および実験4の場合よりかなり大きい。すなわち、前載荷での密度増加の大きいほうが、再載荷での残留間隙水圧が大きいという結果になっている。図-5 (c) におけるこの結果は、これまでに述べた同一方向せん断履歴および反対方向せん断履歴の影響や再圧密時の構造変化だけでは説明できない。

ここで考えられることは、土岐ら¹²⁾、Emery ら¹³⁾ が示している、液状化発生後に供試体上部にゆるい部分が形成されていることの影響である。すなわち、供試体の

平均密度は高くなっているが、上部にゆるい部分が形成されているために、両載荷における残留間隙水圧が大きくなっているということである。実験5の前載荷では、液状化の発生後に更に繰返し変形を生じさせる段階で、供試体上部に変形が集中してくる様子が観察されており、このことから供試体上部にゆるい部分が形成されることが十分に考えられる。

以上のように、前載荷で液状化発生後も5サイクルの変形を生じさせた場合には、同じ γ_{Pre} に対して非常に大きな体積変化 $\varepsilon_{v,Pre}$ (図-4 (b) によれば、実験3、4の場合の約2~3倍) が発生し密度が増加するにもかかわらず、供試体上部のゆるい部分の形成の効果が卓越して再載荷時の残留間隙水圧が大きくなっていると理解できる。

5. 液状化強さに及ぼす前載荷の影響

5.1 静的な前載荷を受けた場合

本実験では再載荷時の繰返し応力比を $\sigma_D/2 \cdot \sigma_0 = 0.115$ に固定しているので、液状化強さの変化は液状化回数の変化として表現される。なおこの繰返し応力比の大きさは本実験で用いた初期相対密度 $D_{r0} = 50\%$ の処女供試体を20回の載荷数で液状化させる応力比に相当する。以下においてこの20回の液状化回数が種々の前載荷すなわちせん断履歴を受けることによってどのように変化するかを述べる。

図-6 (a) は、静的な前載荷を加えた実験1と実験2における前載荷での最大せん断ひずみ γ_{Pre} と、再載荷時の液状化回数 N_{LR} の関係を示している。この図から分かるように、再載荷時の液状化回数は、前載荷でのせん断ひずみ γ_{Pre} の増加に伴って最初は急速に増加し、その後 $\gamma_{Pre} = 0.3 \sim 0.5\%$ のところでピークが現れて減少に転じている。

図-6 (a) における液状化回数 N_{LR} の変化傾向は、図-5 (a) に示す残留間隙水圧の変化に対応しており、構造変化によってもたらされる同一方向せん断履歴と反対方向せん断履歴の影響が液状化回数にも強く現れた結果として理解できる。一方、図-6 (a) と図-4 (a) の比較から分かるように、 γ_{Pre} の増加に伴って、前載荷での体積ひずみ(収縮)は増加一方の変化をするのに対して、再載荷での液状化回数 N_{LR} はピークが現れている。このように $\varepsilon_{v,Pre}$ と N_{LR} の変化は対応しておらず、静的な前載荷を加える実験1と実験2では、前載荷による履歴効果は主として構造変化によってもたらされ、密度の変化の影響は小さいものであることが分かる。

5.2 動的な前載荷を受けた場合

図-6 (b) は、矩形波の動的繰返し応力を前載荷として加えた実験3と実験4における再載荷時の液状化回数

(a) 静的な前荷荷の場合

(b) 動的な前荷荷の場合

(c) 動的な前荷荷の場合 (液状化発生後5サイクル荷荷)

図-6 再荷荷での液状化回数と前荷荷での最大せん断ひずみの関係

N_{LR} の変化を示す。この図から分かるように、前荷荷でのせん断ひずみ γ_{Pre} の増加とともに N_{LR} は初め増加し、 $\gamma_{Pre}=0.3\%$ 付近でピークが現れて減少している。

図-6 (b) におけるこの傾向は、図-6 (a) に示す静的な前荷荷を加えた場合と同様に、過剰間隙水圧発生を小さくし液状化抵抗を増加させる同一方向せん断履歴と、過剰間隙水圧発生を大きくし液状化抵抗を低下させる反対方向せん断履歴の双方の影響が現れていることを示している。

また図-6 (b) において γ_{Pre} が約 3% を越えると、 N_{LR} の低下傾向が、図-6 (a) の静的な前荷荷の場合に比べて鈍くなっている。この傾向は、図-4 (b) から分かるように動的な前荷荷を加える実験3と実験4では、前荷荷で $\gamma_{Pre} \geq 2.5\%$ になり液状化が発生すると再圧密による密度増加が静的な前荷荷を加える場合に比べて非常に大きくなることに起因していると考えられる。このように前荷荷で液状化が発生するときには、再圧密による密度増加の影響が顕著に現れる場合のあることが分かる。

次に、図-6 (b) 中の実験3と実験4の曲線を比較して見る。両実験の前荷荷の違いは荷数であるが、実験3の前荷荷では、実験4の前荷荷の中で軸ひずみ急増点を越えて大きな軸ひずみが発生する最後の1サイクルの荷荷だけを行なったとも言える。図-2 から分かるように軸ひずみ急増点以前の荷荷による軸ひずみは 0.2% 以下である。このように、多数回の小さなひずみ履歴の影響が大きな履歴を経過しても残るという事実は注目される。

図-6 (c) は、前荷荷で軸ひずみ急増点を越えてからストッパーで設定した両振り軸ひずみを5サイクル加えた実験5での $N_{LR}-\gamma_{Pre}$ 関係を示す。この図によれば、実験5では再圧密による密度の増加が実験3および実験4の場合より大きいにもかかわらず (図-4 (b) 参照)、液状化回数 N_{LR} の低下がこの両実験より更に著しい。実験5におけるこのような液状化抵抗の変化は、図-5 (c) に示す残留間隙水圧の変化に対応しており、前述したように一度液状化が発生することによって供試体上部に密度が小さく構造的に不安定な部分が形成され、その部分の体積収縮特性によって再荷荷時の液状化特性が支配されているとすることで説明されよう。

また図-5 (c) に示す再荷荷第1サイクルにおける残留間隙水圧成分 u_{c1}/σ_0 , u_{E1}/σ_0 の特性からして、前荷荷を圧縮側で終わらせる場合と伸張側で終わらせる場合とで、再荷荷開始時の構造が違っていると考えられるが、図-6 (c) に示す N_{LR} にはその違いの影響が現れていない。これは、両振り繰返しせん断応力を加えた場合には、構造異方性の影響が圧縮側と伸張側で相殺されるため全残留間隙水圧の大きさすなわち液状化強さには現れてこないことによると考えられる⁷⁾。

以上に述べた供試体上部の体積収縮性の強さに起因すると考えられる再液状化強さの低下は、静的な前荷荷を加える実験1および実験2で顕著に現れている反対方向せん断履歴の影響による液状化強さの低下とは機構的に異なったものと理解すべきであろう。

5.3 液状化回数比による再荷荷時液状化強さの検討

図-7 は、実験1~5の全実験で得られた N_{LR}/N_L -

図-7 再載荷での液状化回数比と前載荷での最大せん断ひずみの関係

γ_{Pre} 関係を示している。ここで N_{LR} は再載荷時の液状化回数, N_L は処女供試体の液状化回数(本実験の場合は20回)である。図中には前述の Seed, Mori, Chan²⁾ と Finn, Bransby, Pickering¹⁾ の結果も示してある。

Seed らの実験では、大型の振動台実験装置を用いて、 $D_{r0}=54\%$ の供試体に 5~15 サイクルで液状化が発生するような振動を加え、液状化発生前に加振を中止し再圧密するという履歴を 5 回加えた後に、同じ大きさの振動を液状化が発生するまで加えている。その結果、5 回にわたる再圧密による相対密度の増加は、全体でわずかに 1% 程度であるが、液状化回数は処女供試体の液状化回数の 8~10 倍になることを示している。

一方、Finn らは単純せん断試験機を用いて、 $D_{r0}=60\%$ のオタワ砂について実験 5 とほぼ同様の載荷過程で実験を行っている。ただし前載荷での液状化発生後の載荷数は、実験 5 では 5 サイクル、Finn らの実験では 15 サイクルである。ちなみに実験 4 はこの載荷数を 1 サイクルとした実験と見なすことができる。

図-7 によれば、実験 1~5 の再載荷における液状化強さは、小さなせん断履歴による液状化強さの増加を調べた Seed らの結果と、片振幅 $\pm 0.5\%$ 以上の比較的大きなせん断ひずみ振幅の液状化履歴を受けたときの再液状化強さの低下を調べた Finn らの結果の間に入っている。

図-7 の結果から、せん断履歴の影響の現れ方は、履歴荷重の条件によって変化するが、まず小さなせん断履歴による液状化強さの増加について見ると、この履歴によって液状化に至るまでの載荷数は、ピークにおいて処女供試体のその 10 倍程度までは増加し得ることが推測される。次に、液状化履歴を受けたときの再液状化回数は、履歴荷重の載荷数および γ_{Pre} の大きさに加えて、

液状化状態になってからの載荷数にも強く影響されるが、図-7 に示す範囲では、再液状化回数は履歴を受けていない処女供試体の液状化回数の 1/5 程度まで低下し得ることが認められる。

図-7 にまとめた結果はあくまでも試験機内での現象であり、これらの結果が実地盤の挙動にどのように結びつくかという大きな問題が残されていることは最初に述べたところである。また再液状化強さが密度の増加とともに増加一方の変化をするという大原らの報告¹⁴⁾ もあり、再液状化特性について一般的な結論を出すには更に検討が必要と思われる。しかし三軸試験機や単純せん断試験機を用いたいくつかの実験において、液状化履歴も含めて大きなせん断履歴による液状化強さの低下が確認されるという事実は注目すべきことと考える。

6. ま と め

相対密度 50% のゆる詰め砂について、非排水条件の下で受けたせん断履歴が液状化特性に及ぼす影響を実験的に研究した。本文中ではまず種々の前載荷すなわち履歴荷重の下での挙動を調べ、次いでその結果と再載荷時の液状化特性の変化との関連性を考察した。主な結果をまとめると次のようになる。

(1) 静的せん断応力を前載荷として加えた場合は、構造の変化によってもたらされる同一方向せん断履歴と反対方向せん断履歴の影響が、前載荷で生じたせん断ひずみ γ_{Pre} の大きさに応じて卓越して現れる。この場合、再載荷時の液状化強さは、 γ_{Pre} の増加に伴って初めは増加し、その後 γ_{Pre} がある限界値に達したところでピークが現れて減少に転じ、履歴を受けていない処女供試体の液状化強さより小さくなる。本実験のケースでは、

このピークが現れる限界の γ_{Pre} は大よそ 0.3% であり、反対方向せん断履歴の影響が現れ始める γ_{Pre} の値にはほぼ一致している。

(2) 近似矩形波の動的せん断応力を前載荷として加えた場合には、前載荷の下での液状化の発生を境として、履歴効果の現れ方は次のように違ってくる。

a) 前載荷において液状化の発生にまで至らない場合には、上記(1)の場合と同様に、同一方向せん断履歴と反対方向せん断履歴の影響が各々独立して現れるため、再載荷時の液状化回数 N_{LR} と γ_{Pre} の関係曲線にピークが現れる。

b) 前載荷で液状化が発生した場合の再液状化強さは、履歴荷重の載荷数および γ_{Pre} の大きさに加えて、液状化状態になってからの載荷数に強く影響される。液状化状態での載荷数が増加すると、再圧密の際に著しい密度の増加が生じるが、その密度増加の影響よりも供試体上部にゆるく不安定な構造が作られることの影響が卓越するため、再液状化強さは小さくなる。この不安定な構造の形成による液状化強度の低下は、(1)で述べた反対方向せん断履歴による液状化強度の低下とは機構的に異なったものと考えられる。

(3) せん断履歴を受けることによる液状化強さの変化は、履歴荷重の条件によって異なるが、本研究の範囲で推測すれば次のようになる。まず、小さなせん断履歴を受けた供試体の液状化回数は、履歴を受けていない供試体の液状化回数の最大 10 倍程度までなり得る。一方、液状化に至る大きなせん断履歴を受けた供試体の再液状化回数は、履歴を受けていない供試体の液状化回数の 1/5 程度まで低下し得る。

(4) 以上において述べた、非排水条件で加えられた履歴荷重による効果をもたらす因子は次のようになる。

- a) せん断変形に応じた微視的構造変化
- b) 再圧密の過程で生じる構造の変化
- c) 再圧密による密度の変化
- d) 供試体上部におけるゆるく不安定な構造の形成

これらの因子の影響は履歴荷重の条件に応じて種々の形で組み合わされて現れるが、一般的には履歴荷重の下で液状化が発生しない場合、あるいは静的せん断応力を履歴とした場合には a) と b) の効果が主として現れ、また動的な履歴荷重の下で液状化が発生した場合には更に c) と d) の効果も現れてくると言える。

謝 辞

本研究を行うにあたり、多大な御指導・御援助をいただいた北海道大学工学部北郷 繁教授（現在名誉教授）、北見工業大学土木工学科小山道義教授に深じんの謝意を表します。また実験とデータの整理を行ってくれた北見工業大学土木工学科卒業生安藤智章、横沢雅彦、米田

賢の諸君に感謝致します。

記 号 説 明

- D_{r0} = 初期相対密度
- N_L = 履歴を受けていない供試体の液状化回数
- N_{LR} = 再載荷における液状化回数
- u_1 = 再載荷第 1 サイクルにおける残留間隙水圧 (kN/m²)
- u_{c1} = 再載荷第 1 サイクルの圧縮側応力による残留間隙水圧 (kN/m²)
- u_{E1} = 再載荷第 1 サイクルの伸張側応力による残留間隙水圧 (kN/m²)
- u_{Pre} = 前載荷のせん断過程終了時の残留間隙水圧 (kN/m²)
- γ_{Pre} = 前載荷における最大せん断ひずみ (%)
- $\varepsilon_{v, Pre}$ = 前載荷における体積ひずみ (%)
- σ_0 = 初期等方拘束 (圧密) 圧 (kN/m²)
- σ_D = 繰返し軸差応力 (kN/m²)

参 考 文 献

- 1) Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J. (1970): "Effect of strain history on liquefaction of sand," Proc. ASCE, Vol. 96, No. SM6, pp. 1917—1934.
- 2) Seed, H. B., Mori, K. and Chan, C. K. (1977): "Influence of seismic history on liquefaction of sands," Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT4, pp. 257—270.
- 3) Ishihara, K. and Okada, S. (1978): "Effect of stress history on cyclic behavior of sand," Soils and Foundations, Vol. 18, No. 4, pp. 31—45.
- 4) Ishihara, K. and Okada, S. (1982): "Effects of large pre-shearing on cyclic behavior of sand," Soils and Foundations, Vol. 22, No. 3, pp. 109—125.
- 5) 鈴木輝之・土岐祥介(1983): 繰返し応力を受ける乾燥砂の体積変化に及ぼすせん断履歴の影響, 「土質工学会論文報告集」, 第 22 巻, 第 2 号, pp. 113—122.
- 6) Suzuki, T. and Toki, S. (1984): "Effects of preshearing on liquefaction characteristics of saturated sand subjected to cyclic loading," Soils and Foundations, Vol. 24, No. 2, pp. 16—28.
- 7) 鈴木輝之・土岐祥介(1981): 繰返し三軸試験における乾燥砂の残留体積変化, 「土質工学会論文報告集」, 第 21 巻, 第 4 号, pp. 131—139.
- 8) Miura, S. and Toki, S. (1982): "A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand," Soils and Foundations, Vol. 22, No. 1, pp. 61—77.
- 9) Mulilis, J. P., Seed, H. B., Chan, C. K., Mitchell, J. K. and Arulamandan, K. (1977): "Effect of sample preparation on sand liquefaction," Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT2, pp. 91—108.
- 10) 土岐祥介・北郷 繁(1973): 繰返し応力を受ける乾燥砂の間隙比変化と変形, 「土質工学会論文報告集」, 第 13 巻, 第 3 号, pp. 77—86.
- 11) Lee, K. L. and Albaisa, S. (1974): "Earthquake induced settlement in saturated sands," Proc. ASCE, Vol. 100, No. GT4, pp. 387—406.
- 12) 土岐祥介・三浦清一・谷沢房郎(1981): 相対密度と砂の力学的特性に関する 2, 3 の考察, 「砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム (土質工学会)」, pp. 79—86.
- 13) Emery, J. J., Finn, W. D. L. and Lee, K. W. (1972): "Uniformity of saturated sand specimens," ASTM, STP523, pp. 182—194.
- 14) 大原資生・山本哲朗(1981): 振動台による再液状化試験, 「第 36 回土木学会年次学術講演会講演概要集」, 第 III 部, pp. 76—78.