

投稿論文 (和文)
PAPERS

過剰間隙水圧の発生を伴う繰返しせん断履歴を受けた飽和砂の液状化強度特性

石黒 健¹・飯島 健²・嶋田三朗³

¹正会員 工博 前田建設工業(株)技術本部技術研究所(〒179 東京都練馬区旭町 1-39-16)

²正会員 工修 同上

³正会員 工博 同上

繰返しせん断履歴を受けた飽和砂の液状化強度に対する履歴時過剰間隙水圧の影響を調べる目的で、一連の中空ねじり試験を実施した。この結果、履歴後の供試体の液状化強度が、従来より指摘されている履歴ひずみや履歴回数以外に、履歴時過剰間隙水圧(履歴時の有効応力)の影響を受けて変化すること、履歴時過剰間隙水圧を抑制するほど履歴後の液状化強度が増大し、履歴効果が向上することが明らかとなった。

Key Words : *liquefaction, cyclic shear history, excess pore-water pressure*

1. はじめに

世界でも有数の地震多発国であるわが国では、飽和砂地盤の液状化現象が第一級の工学的問題として多くの関心を集めており、これを防ぐための液状化対策に関しても、さまざまな工法原理に基づく対策工法が提案、実用化されている。現在液状化対策の中で最も豊富な実績を有しているのは地盤の密度を高める締固め工法であり¹⁾、そのひとつに、振動ロッドを用いて原地盤を直接振動させ密実化を図る振動棒締固め工法(ロッドコンパクション工法)がある。本工法は比較的多くの施工実績を有しているながら、振動締固め施工の土質力学的なメカニズムはいまだ解明されておらず、改良効果の信頼性も必ずしも十分とは言えない。

振動締固めによる改良効果をさらに高めるような施工方法を模索するために、この工法を土質力学的な見地から見直してみる。振動締固め施工は砂地盤に対する繰返しせん断履歴の付与に置き換えることが可能であろう。このような考え方は、例えば Youd^{2),3)}や Drnevich・Richart⁴⁾、斎藤・木村・平間・北村^{5),6)}の研究の中に幾つか見出すことができる。これらの研究成果は、繰返しせん断履歴の効果が履歴時のひずみの大きさや履歴の繰返し回数に依存すること、すなわち振動締固め効果が加振力や加振時間に依存することを明らかにしている。ただし、これらの研究ではいづれも乾燥砂、もしくは飽和砂に対する排水条件下での繰返しせん断履歴を取り扱っているが、実際の施工状況は必ずしもこれに対応しない。緩い飽和砂地盤の中に振動ロッドを貫入し強力な

大型パイプロを用いて加振を加えると、振動ロッド近傍の地盤内に過剰間隙水圧が発生して、いわば「人為的な液状化」が生じてしまう⁷⁾からである。原位置の振動締固め施工は、非排水条件もしくは部分排水条件のもとで行われているものと考えてよからう。この施工時過剰間隙水圧が振動締固め効果に及ぼす影響についてはいまだ明らかにされておらず、谷本・野田⁸⁾や斎藤ら^{5),6)}、あるいは Drnevich・Richart⁴⁾や Suzuki・Toki⁹⁾の室内試験例の中に、施工時過剰間隙水圧の発生による改良効果の低下を示唆する報告が幾つか見られる程度である。施工時過剰間隙水圧を抑制することで振動締固め効果の向上が図られるのかどうか。再び繰返しせん断履歴という観点に立つならば、飽和砂の繰返しせん断過程において発生する履歴時過剰間隙水圧を抑制することにより、履歴後の液状化強度が増大するか否かを調べればよいことになる。

一方、繰返しせん断履歴の影響を取り扱った研究は、人為的な振動締固め施工以外に視点を置くもののほうがむしろ数多い。これらを概観すると、地震履歴の影響を論じた Finn・Bransby・Pickering¹⁰⁾や Seed・Mori・Chan¹¹⁾の研究を始めとして、Ishihara・Okada^{12),13)}、Towhata・Ishihara¹⁴⁾、Suzuki・Toki⁹⁾、Vaid・Chung・Kuerbis¹⁵⁾の研究、供試体作製方法の影響を論じた Mulilis・Seed・Chan・Mitchell・Arulanandan¹⁶⁾の研究、海底砂地盤に対する波浪の影響を取り扱った西・金谷¹⁷⁾の研究、あるいは原位置液状化強度の評価手法への適用を試みた Tokimatsu・Uchida¹⁸⁾の研究などその研究目的も多岐にわたっている。これらの中にも履歴時過

剰間隙水圧の影響を示唆するものが見られるが、これに視点を絞った研究例は皆無といえる。履歴時過剰間隙水圧の影響を検討することは、振動締固め以外の工学的視点、例えば飽和砂地盤が過剰間隙水圧の発生を伴うような大地震履歴を受けた後の再液化化の問題といった観点からも工学的に意義深いものと思われる。

本文では、繰返しせん断履歴時の過剰間隙水圧の発生（有効応力の低下）が履歴後の液化強度に及ぼす影響を取りあげる。冒頭で述べたように、研究の最終目的は飽和砂地盤において振動締固めを行った際に発生する施工時過剰間隙水圧が改良効果に及ぼす影響を明らかにし、その抑制効果を調べることにある。そのための第一段階としてまず、一連の中空ねじり試験を実施したのでその結果について報告する。

2. 実験方法および実験条件

実験は中空ねじり試験装置を用いて行った。図-1は実験のフローを示したものであるが、緩い飽和砂地盤に対する振動締固め施工を室内で定性的に再現する目的で以下のような実験手順を採用した。

- ① 水中落下法により緩詰めめの供試体を作製する（初期相対密度 D_{r0} は平均値 $46\% \pm 3\%$ の範囲内に調整）。
- ② 飽和化の後、初期有効拘束圧 σ'_0 を加えて圧密を行う（背圧は 4.0 kgf/cm^2 (392 kPa) に統一）。
- ③ 供試体内に過剰間隙水圧が発生した状態のもとで、応力制御およびひずみ制御にて動的な繰返しせん断履歴を加える。この際の履歴時過剰間隙水圧 Δu_{pre} の設定方法を示すために図-2 (a)~(c) を準備した。

供試体内部に Δu_{pre} が発生した状態で繰返しせん断履歴を加える方法としてまず、排水コックを閉じた状態で図 (a) に示すような履歴時せん断応力 τ_{pre} を供試体に加え、図 (b) に示すように過剰間隙水圧が目標値に達した時点で手動によりコックを微調整し、 Δu_{pre} をできるだけ一定に保つ方法（図では目標過剰間隙水圧比 75%。以後、コック制御法と称する）を試行した。ところがこの方法では、図 (b) のごとく過剰間隙水圧（履歴中の有効応力）を一定に保つことが難しく、また今回のような緩詰め試料では、特に目標とする履歴時過剰間隙水圧比が大きい場合、コック制御のわずかな時間遅れによって Δu_{pre} が急増して σ'_0 に至り、瞬発的な液化化によって供試体が大変形をきたして実験不能となるといった問題が生じた。そこで本実験では、これと有効応力的に全く等価な方法、すなわち履歴中の有効応力 σ_{pre}' を Δu_{pre} 発生時と等しい値に保つ方法（以後、セル圧制御法と称する）を採用した。図 (c) にその手順を示す。初期有効拘束圧 σ'_0 で圧密終了後（この時点で間隙水圧 U は背圧 σ_{BP} に等しい）、非排水条件下にて目

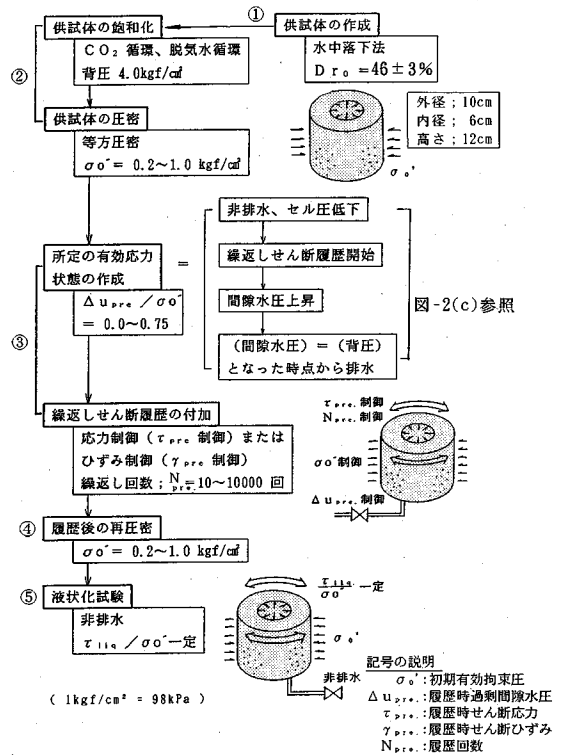


図-1 実験のフロー

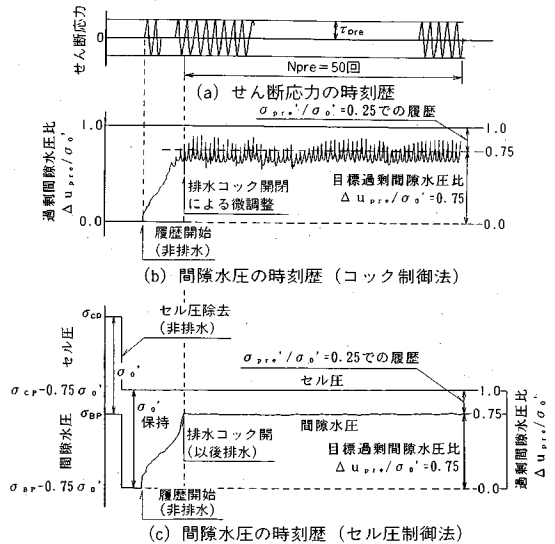


図-2 コック制御法とセル圧制御法の考え方

標 Δu_{pre} 分のセル圧を全応力的に低下させる。非排水条件のため、この状態では間隙水圧 U も背圧 σ_{BP} から同じ値だけ低下し供試体の有効応力は圧密時と変わらない。次に、排水コックを閉じた状態で繰返しせん断履歴 τ_{pre} を加える（周波数 0.1 Hz）。過剰間隙水圧が蓄積上

表—1 実験ケースおよび実験条件

試験シリーズ	制御方法	初期有効拘束圧 σ'_0	履歴時のせん断応力 τ_{pre}	履歴時のせん断応力比 τ_{pre} / σ'_0	履歴時の過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre} / \sigma'_0$	履歴ひずみ γ_{pre}	履歴回数 N_{pre}	試験概要および試験の目的
A	A-1	1.0kgf/cm ² =Const.	0.27kgf/cm ² =Const.	0.27(=Const.)	パラメータ (0.0~0.75)	試験条件 で変化	50回	・初期有効拘束圧、履歴時のせん断応力一定。 ・履歴時の水圧比をパラメータとして、履歴時の有効応力状態と履歴後の液状化特性の関係を調べる。
	A-2	1.0kgf/cm ² =Const.	試験条件 で変化	試験条件 で変化	パラメータ (0.0~0.75)	パラメータ (0.3~8.0%)	50回	・A-1と同様の試験を、履歴時のせん断応力比、水圧比の様々な組合せについて幅広く実施。 ・履歴時はひずみ制御で実施。
	A-3	1.0kgf/cm ² =Const.	0.27kgf/cm ² =Const.	0.27(=Const.)	パラメータ (0.0~0.75) 排水条件による変動	試験条件 で変化	50回	・A-1と同一条件の試験を、水圧制御方法のみを変えて実施。 ・水圧制御方法の妥当性をチェック。
B	B-1	パラメータ (0.2~2.0 kgf/cm ²)	0.27kgf/cm ² =Const.	試験条件 で変化	パラメータ (0.0~0.75)	試験条件 で変化	50回	・Aと同様の試験を、初期有効拘束圧と履歴時の水圧比をパラメータとして実施。 ・履歴時のせん断応力は一定であるが、履歴時のせん断応力比は試験によって異なる。
	B-2	パラメータ (0.2~2.0 kgf/cm ²)	パラメータ (0.15~0.51 kgf/cm ²)	試験条件 で変化	0.0(=Const.) (排水条件)	試験条件 で変化	50回	・Aと同様の試験を、初期有効拘束圧と履歴時のせん断応力を共にパラメータとして実施。 ・履歴時の排水条件は完全排水条件に固定。
C	C-1	1.0kgf/cm ² =Const.	試験条件 で変化	試験条件 で変化	パラメータ (0.0, 0.75 の2種類)	パラメータ (0.3~8.0%)	パラメータ (50, 200 回の2種類)	・A-2と同様の試験を、水圧比0.0, 0.75の2条件のもとで、履歴回数を変えて実施。
	C-2	1.0kgf/cm ² =Const.	0.38kgf/cm ² =Const.	0.38(=Const.)	0.0(=Const.) (排水条件)	0.5% (=Const.)	パラメータ 10~1000回	・履歴時の有効応力状態を固定。 ・履歴回数のみをパラメータとする。

* Aシリーズ: σ'_0 一定、Bシリーズ: σ'_0 パラメータ、Cシリーズ: N_{pre} パラメータ (1kgf/cm² = 98kPa)

昇し、目標過剰間隙水圧比に達した時(供試体内の間隙水圧 U がもとの背圧 σ_{BP} と等しくなった時点)で排水コックを開く。この点以降、供試体は設定した過剰間隙水圧 Δu_{pre} 発生時と全く等しい、しかも一定の有効応力状態のもとで履歴を受けることになる。例えば図(c)では、図(b)と等価な履歴時有効応力比 = 25% の状態で履歴が与えられている。

実験は基本的に図(c)のセル圧制御法を採用したが、図(b)のコック制御法による実験も同一条件で何点か実施し、セル圧制御法との比較を行った。この結果、履歴時のひずみや履歴後の相対密度、液状化強度など、両者は概ね同傾向を示すことが確認された。なお、ひずみ履歴を受けた砂の液状化強度は、履歴終了時の残留ひずみの影響を強く受けるとの指摘^{(3), (14)}がある。本実験では、履歴中の供試体のひずみ量をペンレコーダー上でモニターし、履歴過程の最後の数波でせん断応力を徐々に低下させることにより履歴終了時の残留ひずみがゼロとなるように調整を行った。

④ 履歴終了後再びセル圧を増加させ、もとの有効拘束圧 σ'_0 に戻して再圧密を行う(図(b)のコック制御法における履歴終了後の Δu_{pre} の消散に対応)。

⑤ 供試体を非排水状態とし、せん断応力比 τ_{liq} / σ'_0 にて液状化試験を実施する(周波数0.1Hz)。

実験は初期有効拘束圧 σ'_0 、履歴時過剰間隙水圧 Δu_{pre} 、履歴時せん断応力 τ_{pre} 、および履歴時せん断ひずみ γ_{pre} (本文ではすべて両振幅の値で表現)をパラメータとして行った。履歴繰返し回数 N_{pre} は、図—2(a)

に示すように目標過剰間隙水圧比に達し排水コックを開いた時点からの履歴回数とし、50回を基本としたが、繰返し回数の影響を検討する目的でこれをパラメータとした実験も実施している。実際の振動締め固め施工での繰返し回数は明白ではないが、原位置では9Hz程度の振動数で秒~分単位の振動締め固めが行われていることから、実験上の制約も勘案し $N_{pre} =$ 数十~数百回を採用した。実験条件を表—1にまとめる。なお実験はすべて豊浦標準砂を用いて行った。

3. 繰返しせん断履歴による体積変化特性

砂の液状化強度はまず、その平均的な密度、例えば相対密度によって第一義的に決定され、一般的に密度の高い砂ほど液状化強度は大となる。本章では、様々な条件下で繰返しせん断履歴を受けた砂の体積変化(密度変化)特性について検討を加える。

体積変化特性を論ずる前に繰返しせん断履歴時の供試体のせん断変形量に着目する。まず、履歴時に砂が置かれている応力状態を表すための座標として、履歴の原動力としてのせん断応力 τ_{pre} を縦軸に、履歴の結果としての履歴時過剰間隙水圧 Δu_{pre} を横軸にとり、両軸を初期有効拘束圧 σ'_0 で正規化した過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre} / \sigma'_0$ ~ せん断応力比 τ_{pre} / σ'_0 座標を考える。図—3は、この座標上に履歴ひずみ γ_{pre} の等値線(コンター)を描いた結果である(各プロットの右側に各点のひずみ量を記した)。図中の○印は初期有効拘束圧を1.0kgf/cm² (98

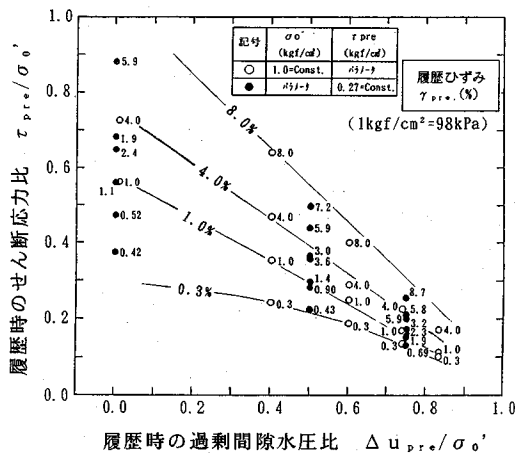


図-3 履歴ひずみ γ_{pre} のコンター

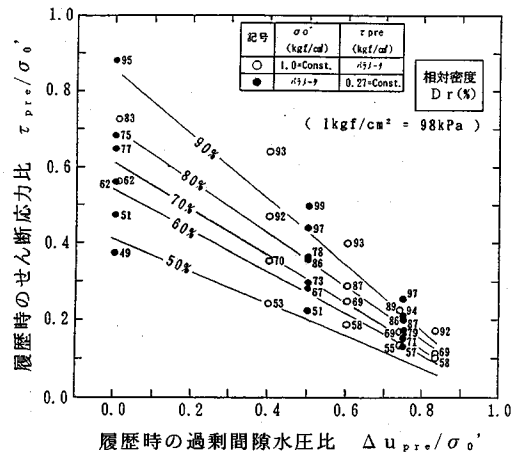


図-4 相対密度 D_r のコンター

kPa) に固定し履歴時のせん断応力を変化させたケース (A-2), ●印は逆に初期有効拘束圧を変化させ、履歴時のせん断応力を一定としたケース (B-1) であり、繰返しせん断履歴時の過剰間隙水圧比やせん断応力比をパラメトリックに変えて実験を行った。図中の○と●では試験条件が異なるにもかかわらず、図-3の座標上の同じ位置において同等の履歴ひずみが発生している。履歴ひずみ γ_{pre} のコンターを本座標上にほぼ一意的に定めることができ、本座標が履歴時の供試体の応力-変形状態を表現するための適切な座標となることを表すものといえる。

図より、履歴時の過剰間隙水圧比が同じであれば履歴時のせん断応力比が大きいほど、また履歴時のせん断応力比が同じであれば過剰間隙水圧比が大きい (液状化状態に近い) ほど履歴時の供試体のひずみ量が大きくなること分かる。過剰間隙水圧比が大きいほど供試体の有効応力は小さく、よってせん断剛性も小となるため、この結果は当然といえる。またコンターの幅は右側ほど狭く、過剰間隙水圧比が大きい領域ではせん断応力のわずかな変化に対して履歴ひずみが敏感に変化することが指摘される。このような領域では実験誤差の影響により○と●との整合性はやや悪い。

次に、繰返しせん断履歴による供試体の密度変化に着目する。図-4は図-3と同じ座標上に履歴後の相対密度 D_r のコンターを描いたものである (ただし履歴回数 $N_{pre}=50$ 回を与えた後の値。図-3と同様、各プロットの右側に各点の相対密度値を記した)。履歴後の D_r も履歴ひずみと同傾向を示し、過剰間隙水圧比が大きいほど、またせん断応力比が大きいほど履歴後の相対密度は大となる。換言すれば、せん断応力が一定であれば液状化に近い状態で繰返しせん断履歴を受けた砂ほどその後の密度増加が大であることを示している。また液状化に

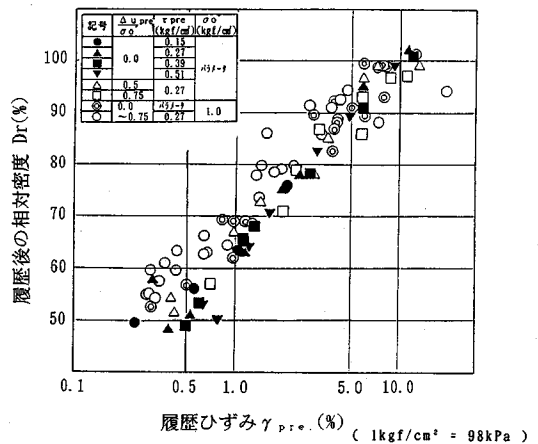


図-5 履歴ひずみ γ_{pre} と相対密度 D_r の関係

近い領域では、履歴ひずみと同様、せん断応力のわずかな変化が履歴後の相対密度を大きく変化させている。

以上の結果は、履歴時のせん断ひずみ γ_{pre} と履歴後の相対密度 D_r に密接な関係があることを示唆している。図-5は、図-3,4の各データにB-2シリーズの結果を加え、これらを $\gamma_{pre} \sim D_r$ 関係としてプロットし直したものである。試験条件の差異にかかわらず両者は比較的良好な相関性を示しており、履歴ひずみが大いほど履歴後の相対密度も大となること分かる。ただし図中の黒塗りのプロット (排水履歴試料) に比べて白抜きのプロット (Δu_{pre} を与えた試料) ではそのばらつきが大であり、前述した理由により Δu_{pre} の大きな領域では若干のばらつきが生じている。なお図-5の関係は、初期 D_r が40%~50%程度の緩い飽和砂に対するものであり、両者の関係は当然初期相対密度によって異なる。

以上をまとめると、繰返しせん断履歴時のひずみ量は履歴時過剰間隙水圧が大きい (液状化状態に近い) ほど、

また砂に加わるせん断応力が大であるほど大きな値となり、これに対応して履歴後の相対密度も高くなる。図-5に示したような γ_{pre} と D_r の関係は排水条件下でのひずみ履歴効果に関する従来の研究^{2), 20)}の中でも既に指摘されているが、履歴中に過剰間隙水圧が発生するような条件下においてもその傾向は同様であることがわかる。

4. 繰返しせん断履歴を受けた飽和砂の液状化強度特性

(1) 履歴時過剰間隙水圧が液状化強度に及ぼす影響

本章では、繰返しせん断履歴時の諸条件（履歴ひずみ、履歴時せん断応力、履歴時過剰間隙水圧、初期有効拘束圧など）が履歴後の液状化強度に及ぼす影響を調べた結果について報告する。

まず、図-3, 4に記した繰返しせん断履歴の後、液状化試験を実施した結果について述べる。なお、本来は種々の繰返しせん断履歴を与えた砂の液状化カーブを各々求める必要があるが、試験個数の制約上不可能であったために、便宜的に同じせん断応力比を与えた液状化試験において液状化（両振幅せん断ひずみ $DA=3\%$ で定義）に至るまでの繰返し回数（以下、単に液状化回数 $N_{T=3\%}$ と表現する）を液状化強度を表す一指標として採用した⁹⁾。液状化試験時のせん断応力比 τ_{liq}/σ'_0 はすべて0.38に固定した。ただし σ'_0 は試験条件によって変化するため、せん断応力 τ_{liq} そのものは各々異なる。このせん断応力比は、水中落下法により作製した緩詰め供試体が20波で液状化に至るせん断応力比0.16の2.5倍程度のかかなり大きめの値に相当している。

前章で述べた履歴ひずみや履歴後の相対密度に関する整理と同様に、 $\Delta u_{pre}/\sigma'_0 \sim \tau_{pre}/\sigma'_0$ 座標上に液状化回数 $N_{T=3\%}$ のコンターを描いた結果を図-6に示す（図中の各プロットの右側の数字が各点での $N_{T=3\%}$ の値を表している）。図-4では、履歴後の相対密度が履歴時の過剰間隙水圧比が大きいほど、また履歴時のせん断応力比が大きいほど大となる直線的な右下がりのコンターを示したのに対して、履歴後の液状化抵抗を表す液状化回数のコンターは必ずしもこれに対応していない。図に示すように、左上（排水条件）に頂上をもつ山の峰のようなコンターとなる点が特徴的である。すなわち、

- ① 履歴後の液状化回数は履歴時過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ が小さいほど大きく、履歴効果の最適条件は排水条件かつせん断応力比が適度な大ききとなる図の左上の領域に存在する。逆に履歴時過剰間隙水圧比が大きい右下の領域では履歴効果は小さい。
- ② また同一の $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ であれば、液状化回数 $N_{T=3\%}$ は履歴時のせん断応力比の増加に対していったん増加の後再び減少する傾向を示す。

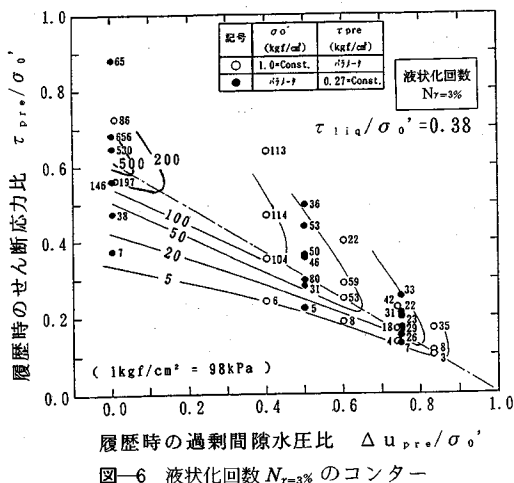


図-6 液状化回数 $N_{T=3\%}$ のコンター

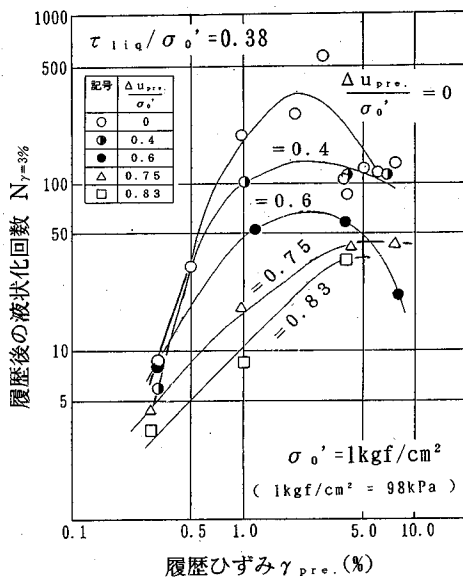


図-7 履歴ひずみ γ_{pre} と液状化回数 $N_{T=3\%}$ の関係

等を指摘することができる。

図-7は履歴ひずみ γ_{pre} を横軸に、液状化回数 $N_{T=3\%}$ を縦軸にとって、両者の関係を履歴時過剰間隙水圧比ごとにまとめた結果を示す（ただし、初期有効拘束圧はすべて 1.0 kgf/cm^2 (98 kPa)）。この図より次の所見が得られる。

- ① 図-5の相対密度の場合と異なり、同じ履歴ひずみであっても、履歴時過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ が小さく履歴中の有効応力が大であるほど、すなわち完全排水に近い条件にて履歴を与えた場合ほど履歴後の液状化強度は大きくなる。
- ② 繰返しせん断履歴を受けた砂の液状化強度は、履歴ひずみに対してピークを有し、履歴後の液状化強度を最

大ならしめる最適な履歴ひずみの値が存在する。

(図-6中に一点鎖線で示した山の峰に相当)

③ 履歴時過剰間隙水圧の大きさが異なっても、②で述べた最適履歴ひずみの大きさには顕著な差は見られない。その値は1~数%の範囲にある。

本結果は、繰返しせん断履歴を受けた飽和砂の液状化強度が履歴ひずみ γ_{pre} (もしくは相対密度 D_r) だけではなく、履歴時過剰間隙水圧 Δu_{pre} との組み合わせによって変化することを表している。そこで、履歴時過剰間隙水圧比と履歴後の液状化強度(液状化回数)との関係を示すために図-8を準備した。図は、図-7中の最適ひずみ領域付近 ($\gamma_{pre}=1\sim4\%$) における $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ と $N_{\tau=3\%}$ の関係をプロットしたものである。同一の γ_{pre} を与えた(あるいは図-5より、同一相対密度となった)供試体でありながら、 $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ が小さいほど履歴後の液状化回数は大となっており履歴時過剰間隙水圧の抑制効果を端的に表すものといえる。

以上の結果は同時に、飽和した砂を最も効率的に締固めるための条件が「排水条件」にあることを示唆しており、振動棒締固め工法の施工時過剰間隙水圧を除去することで締固め効果の向上が図られることを暗示している。ただし、この関係はあくまで同一の γ_{pre} 、同一の密度という条件下で成立するものであり、排水条件下での繰返しせん断によって非排水時と同等の履歴ひずみが達成されることが前提となる。すなわち振動締固め施工の観点から見ると、過剰間隙水圧の除去によって有効応力 σ_{pre}' が回復すると同時に地盤に伝達されるせん断応力 τ_{pre} も同時に増大し、図-3,4において地盤の応力状態が右下から左上へと変化して同一の γ_{pre} 、 D_r コンター上を動くことが前提となる。例えば飽和砂を用いた振動台実験を行うと、液状化した層がそれより上方の砂層にせん断力を伝えなくなるような現象がしばしば観察される(龍岡¹⁹⁾など)が、このような現象を考えると、振動ロッド周辺での施工時の液状化を押さえることで周辺地盤へのせん断応力の伝達度が大きく増すことは容易に予想される。

次に、有効応力的な視点から得られたデータについて考察を加える。図-3, 4, 6の横軸である履歴時過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ は、履歴時の有効応力 $\sigma_{pre}' (= \sigma'_0 - \Delta u_{pre})$ との間に $\Delta u_{pre}/\sigma'_0 = 1 - \sigma_{pre}'/\sigma'_0$ の関係がある。図の座標系の横軸をこの履歴時有効応力比 σ_{pre}'/σ'_0 に置き換えると、横軸の向きが反転する ($\Delta u_{pre}/\sigma'_0 = 1.0$ で $\sigma_{pre}'/\sigma'_0 = 0$, $\Delta u_{pre}/\sigma'_0 = 0$ で 1.0 となる)。例えば図-3を横軸 σ_{pre}'/σ'_0 、縦軸 τ_{pre}/σ'_0 の座標で取り直すと、等履歴ひずみ線は $\gamma_{pre}=1\%$ 以上の範囲においてはある傾き(変換後の縦軸と横軸の比率 τ_{pre}/σ_{pre}') を持つ右上がりの直線で近似できそうである。例えば飽和砂の動的変形特性に関する従来の研究成果によると、砂のせん

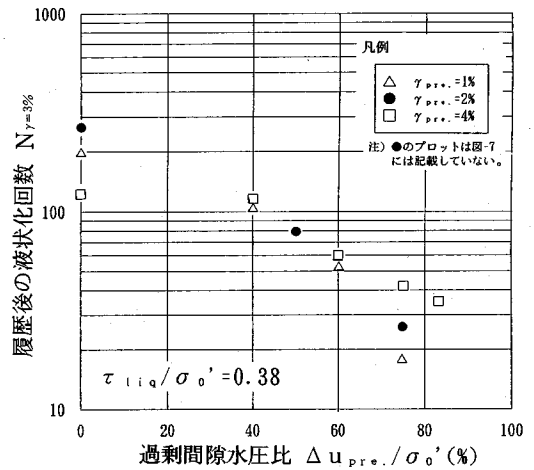


図-8 過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ と液状化回数 $N_{\tau=3\%}$ の関係

断剛性 G の値 ($=\tau/\gamma$) は有効拘束圧 σ' の m 乗に比例し、 m の値はせん断ひずみの大きさに応じて変化する。龍岡¹⁹⁾によると、 $\gamma > 1\%$ の領域では m の値は 1.0 に近く、 $G (= \tau/\gamma)$ が σ' に比例する(すなわち、せん断ひずみ γ が τ/σ' に比例する)ことになる。図-3中の直線的なコンターはこの関係に対応しており、また、履歴ひずみが 0.3% のコンターが上に凸の曲線となる結果も、この領域では $m < 1.0$ となる事実に対応するものといえる。

図-9は、この傾き $\eta_{pre} = \tau_{pre}/\sigma_{pre}'$ (以後、履歴時有効せん断応力比と称する)と履歴ひずみ γ_{pre} との関係を表したものであるが、両者は正の良い相関を示すことが分かる。なお履歴ひずみが数%を越えるような履歴条件では、排水繰返しせん断に伴う密実化が履歴中に生じ、供試体の相対密度は $90\sim 100\%$ に達する。龍岡²⁰⁾は、砂の静的破壊包絡線の傾きが相対密度の増加に伴い増大すること、さらに大振幅のひずみ履歴を受けた砂では、その静的強度特性が緩い砂とは異なることを示唆している。また西・金谷・飯島²¹⁾は、同一相対密度であっても繰返しせん断履歴がもたらす構造変化により静的強度比の増加や排水せん断時のダイレイタンス特性の変化が生ずることを明らかにしている。例えば本試料を用いて別途実施した緩詰め試料 ($D_r=50\%$) の静的非排水せん断試験では、破壊線に相当する有効せん断応力比として 0.6 程度の値が得られているが、図-9を見ると、履歴ひずみが大きい場合にはこれを越えるせん断応力が供試体に加えられている。この結果は、大振幅の繰返しせん断履歴を受け密実化が進むような砂においては、履歴中に既に、その静的強度が緩い砂、あるいは履歴を受けない砂のそれとは異なったものとなっていることを暗示している。例えば、両振幅ひずみ 5% で排水せん断時の

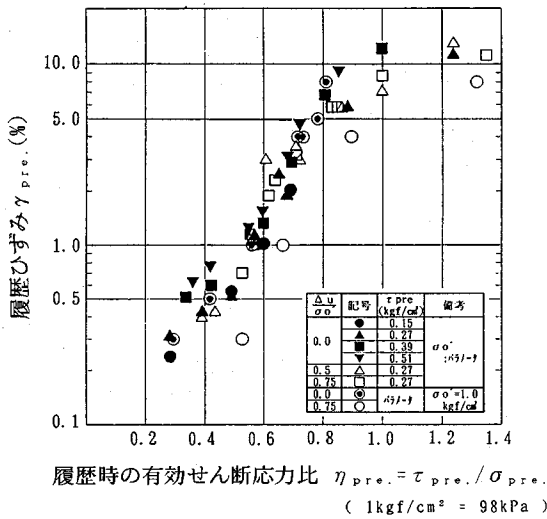


図-9 履歴時有効せん断応力比 η_{pre} と履歴ひずみ γ_{pre} の関係

破壊を規定するならば、図-9より破壊時の有効せん断応力比は0.8程度となり、破壊応力比が緩詰め試料より30%程度増加したことになる。さらに、このような密な供試体に対して10%を越えるような履歴ひずみを与えるためには、有効応力比で1から1.3というかなり大きな応力比が必要となる。従来の破壊の定義からいえば、このような領域では供試体を破壊しながら繰返しせん断（振動締め）を与えていることになる。

図-10は、 η_{pre} に対して履歴後の液状化回数 $N_{T=3\%}$ をプロットした結果を示す。図では排水条件下での履歴と、液状化状態に近い履歴（履歴時過剰間隙水圧比75%相当）の両者を比較して示した。図中には、初期有効拘束圧、履歴時のせん断応力、履歴時過剰間隙水圧の組合せが各々異なるケースでの試験結果をすべて併記したが、試験条件の違いに関わらず、繰返しせん断履歴を受けた砂の履歴後の液状化回数が「履歴時有効せん断応力比 η_{pre} と履歴時過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ （もしくは履歴時有効応力比）の組合せ」によってほぼ定まることがわかれる。あるいは図-9に示したように、有効せん断応力比 η_{pre} と履歴ひずみ γ_{pre} にはほぼ1対1の関係があるため、「履歴ひずみ γ_{pre} と履歴時過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ の組み合わせ」で履歴後の液状化強度が決まると言ってもよからう（図-7参照）。

以上の考察により、繰返しせん断履歴を受けた飽和砂の体積変化特性および液状化強度特性は、履歴時有効せん断応力比 η_{pre} と履歴時過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ 、あるいは履歴ひずみ γ_{pre} と履歴時過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre}/\sigma'_0$ といった指標の組み合わせによって、履歴時の排水条件とは無関係に統一的に評価しうるものと結論される。

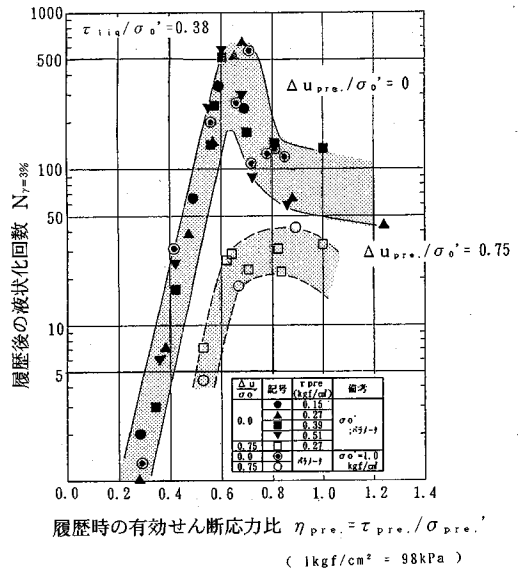


図-10 履歴時有効せん断応力比 η_{pre} と液状化回数 $N_{T=3\%}$ の関係

最後に、図-6中に一点鎖線で記した「液状化回数のコンターの尾根線」について若干の考察を加える。前述したように、繰返しせん断履歴による液状化強度の増加は、排水条件下ほど著しく、かつ、一点鎖線に相当する履歴時有効せん断応力比 η_{pre} （図では0.6程度の値をとる。これは図-3の履歴ひずみコンターでは2%付近に対応し、図-7中の最適ひずみに相当する）を境として増加から減少の傾向に転ずる。このような現象は、排水条件または非排水条件下でひずみ履歴を与えた砂に対して行われた Suzuki ら^{9), 22), 23)}の実験においても同様に見受けられ、そこでは砂の構造変化といった因子の関与が示唆されている。また Ishihara ら¹²⁾、Towhata ら¹⁴⁾、Vaid ら¹⁵⁾もこの様な砂の構造の変化点が非排水履歴においては変相線に一致すること、これを境として履歴後の砂の強度-変形特性が大きく異なることを明らかにしている。図-9にて述べたように、せん断応力比 $\eta_{pre} = 0.6$ は、緩詰め試料の非排水せん断における変相線から破壊線付近のせん断応力比に相当しており、過剰間隙水圧の発生を伴うような繰返しせん断履歴においても、前述した既往の成果と同様、履歴中の有効せん断応力比が変相線以内にある場合と越えた場合とで履歴効果に違いが見られるようである。

(2) 履歴回数の影響

繰返しせん断履歴効果に関する従来の研究によると、履歴回数は履歴効果を左右する重要なファクターとなる。以下では、履歴回数が増加した場合の履歴時過剰間隙水圧の影響を調べた結果について述べる。図-11, 12

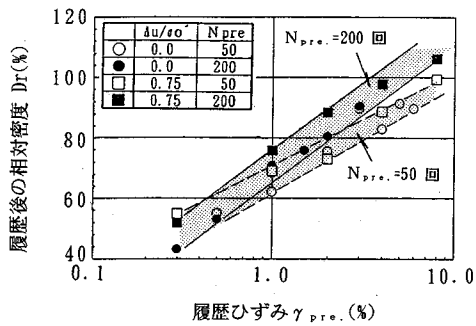


図-11 履歴ひずみ γ_{pre} と相対密度 D_r の関係

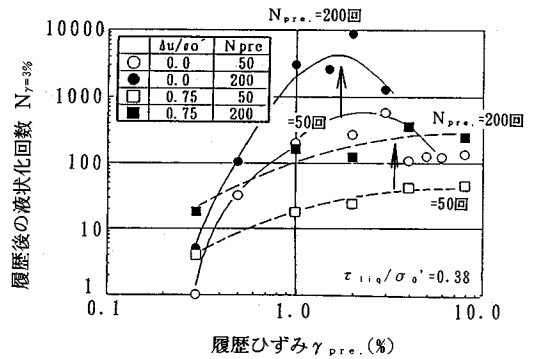


図-12 履歴ひずみ γ_{pre} と液状化回数 $N_{7=3\%}$ の関係

は、A-2と同様の実験を履歴回数 $N_{pre}=200$ 回の条件で実施し、 $N_{pre}=50$ 回の場合と比較した結果 (C-1) を示す。図-11は、図-5にならない履歴ひずみ γ_{pre} と履歴後の相対密度 D_r の関係を示したものである。図-5で見られた両者の正の相関は履歴回数を50回から200回に増やした場合においても同様に見られ、その傾きは履歴回数の増加に伴って若干大きくなるようである。一方、履歴後の液状化強度について図-7と同様の整理を行ったものが図-12である。図より、履歴時の過剰間隙水圧比が0% (○, ●印), 75% (□, ■印) いずれの場合も、従来の指摘通り履歴回数の増加に伴い履歴後の液状化回数が増加している。また履歴時過剰間隙水圧の影響は履歴回数が増えても同様に現れ、排水条件下のほうが履歴効果がより高いことが指摘される。さらに先に述べた「履歴後の液状化強度を最も高める最適な履歴ひずみ」の値には大きな変化は見られず、履歴回数の増加に伴い履歴後の $N_{7=3\%}$ カーブがそのままシフトした形で変化していることがうかがえる。

次に履歴回数の影響のみを抽出するために、履歴時の過剰間隙水圧比を0% (排水条件)、履歴ひずみを $\gamma_{pre}=0.5\%$ で一定とし、履歴回数のみを10回から1000回まで変化させた実験 (C-2) を行った。なお履歴ひずみが1%を越えるような領域では、履歴回数を多くすると供試体にネッキングが生ずるような現象が一部見られた。そのため、ここでは $\gamma_{pre}=0.5\%$ を採用している。図-13は履歴回数 N_{pre} と履歴後の相対密度 D_r の関係、および N_{pre} と履歴後の液状化回数 $N_{7=3\%}$ の関係を同一図面上にプロットした結果を示している。図より、履歴回数が増えるにつれて相対密度も若干は増加していくものの、その増加量は履歴回数 $N_{pre}=1000$ 回で初期の約10%程度と、それほど大きなものではないことが分かる。また、履歴回数の増加に伴って履歴後の液状化回数 $N_{7=3\%}$ も次第に増加しているが、前述したようにこの間の密度増加はわずかであるため、強度増加はこれ以外の要因によってもたらされているものと考えられる。

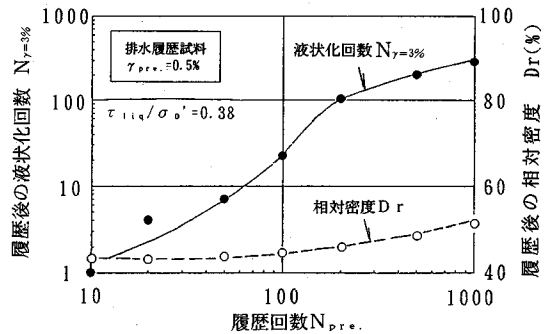


図-13 履歴回数 N_{pre} と D_r , $N_{7=3\%}$ の関係

5. 履歴時過剰間隙水圧が砂の内部構造に及ぼす影響

図-14は、繰返しせん断履歴による相対密度の増加が履歴後の液状化強度の増加にどの程度寄与しているかを検討した結果を示す。図は、図-13のデータ (○印、右肩の数字は各々の N_{pre} を表す) とともに、履歴回数 $N_{pre}=50$ 回のデータ (ただし $\Delta u_{pre}/\sigma'_0=0$ (●印), $=0.75$ (□印) の2条件)、および空中落下法によって落下高さを変えることで様々な相対密度を持つ供試体を作製し、履歴を与えずに液状化試験を行った場合の結果 (×印) の4者を相対密度 D_r と液状化回数 $N_{7=3\%}$ の関係としてとりまとめたものである。図より、同じ相対密度であっても液状化回数は空中落下試料、過剰間隙水圧比75%の履歴試料、排水履歴試料の順に大となっており、また排水履歴試料においても、履歴回数の増加に伴いさらに液状化回数が増大していくことが分かる。この結果は、繰返しせん断履歴を受けた砂では相対密度の変化のみでは説明できないほどの液状化強度の向上 (すなわち砂の構造変化に起因する強度増加) がもたらされるとの従来の知見を支持すると同時に、履歴時過剰間隙水圧 (履歴時の有効応力状態) の違いによる履歴効果の変化もまた、密度以外の因子、すなわち砂の構造変化に起因して

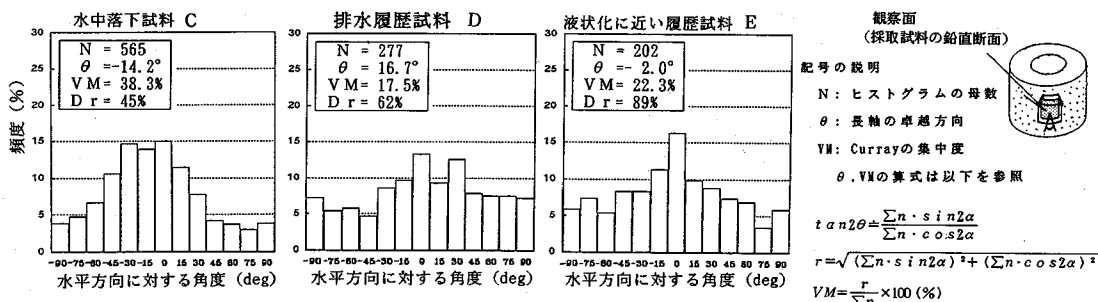


図-15 砂粒子の長軸方向のヒストグラム

いることを示唆するものといえる。例えば図中の点A, Bは各々「排水条件」および「 $\Delta u_{pre}/\sigma'_v = 75\%$ 」の2条件で履歴を受けた供試体に相当するが、両者は同一の相対密度でありながら液状化回数は全く異なっている。そこで、図中のA, Bに相当する履歴を与えた供試体を用いて動の変形試験を実施し、砂の内部構造を表す指標の一つとされる微小ひずみ時のせん断剛性率 G_0 (西・飯島²⁴⁾, Tokimatsu・Yamazaki・Yoshimi²⁵⁾, Drnevich・Richart⁴⁾など)を求めた。なお G_0 の値は、セル内に設置した微小回転角計と内部トルク計により計測し、 $\gamma = 10^{-5} \sim 10^{-4}$ でのせん断剛性値を用いて $\gamma = 10^{-6}$ での値を外挿的に求めた。A, Bの2点、すなわちA:排水条件下で適度な履歴 ($\gamma_{pre} = 1\%$) を与えた試料, B:履歴時の過剰間隙水圧比75%のもとで同じ履歴ひずみを与えた試料、に対して G_0 値を求めると、試料Aで $G_0 = 1430 \text{ kgf/cm}^2$ (140.14 MPa)、試料Bで $G_0 = 1110 \text{ kgf/cm}^2$ (108.78 MPa) となり排水履歴試料Aのほうが G_0 値が大となる結果となった。A, Bの両供試体は履歴後の相対密度 D_r がほぼ等しいことから、この G_0 値の違いは両者の構造 (粒子配列など) の違いを示唆するものであり、A, Bでの液状化回数の差異は、このような砂の構造の違いによってもたらされたものと推察される。

砂の内部構造をより直接的な形で調べる方法として鈴木・鈴木²³⁾が行った走査型電子顕微鏡 (SEM) による構造観察を挙げることができる。そこで、図-14中の点D, Eの2供試体および水中落下法により作製した処女供試体Cを対象としてSEMによる構造観察を実施した。構造観察はD, Eに相当する繰返しせん断履歴を供試体を与えた後、以下の手順に従って実施した。

- ① 負圧を加えて供試体を自立させ、さらに CO_2 を循環させて不飽和化する。
- ② メンブレンの上から注射器によって固化剤 (樹脂系接着剤) を注入し、固結後に試料を切り出す。
- ③ 試料を割裂し、SEM用供試体 (1 cm × 1 cm × t 2 mm) を作製する (観察面の方向については図-15参照)。
- ④ 走査型電子顕微鏡による観察と写真撮影 (倍率 50

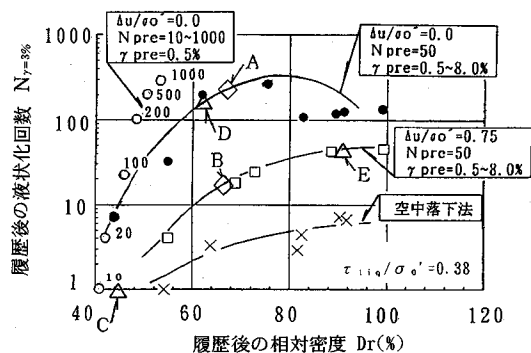


図-14 各種の履歴供試体における $D_r \sim N_{L=3\%}$ 関係

倍) を実施し、粒子の長軸、短軸方向の明瞭なもののみを選定してデジタイザーにより長軸配列方向を測定する。

測定結果に対しては、水平軸と長軸とのなす角 α のヒストグラムを求めるほかに、Curry²⁶⁾ の提案する長軸の卓越方向 θ と集中度 VM (図中に掲載) を計算し、砂の内部構造を表す一指標とした。なお VM は粒子配列の集中の度合いを表し、VM が小さいほど粒子のランダム性が強く砂の内部構造が強固であると考えられている (鈴木・鈴木²³⁾)。観察結果を図-15に示す。図は水平を0度、鉛直を90度として砂粒子の長軸方向の分布をヒストグラムに表したものである。まず水中落下試料Cについて見ると、砂粒子の長軸方向の分布には水平方向への集中が見られ、水中での自然堆積の過程を如実に反映する結果となった。次に排水履歴を加えたDの試料では長軸方向はどの方向にも平均して現れるようになり、初期状態からのランダム化の傾向が認められる。この結果は、排水条件下での履歴を受けることによって、供試体の内部構造が砂粒子同士が複雑に噛み合った強い構造 (等方的な粒子配列) へと変化したことを裏づけている。一方、過剰間隙水圧比75%という液状化に近い状態で履歴を与えた試料Eにおいては、砂粒子の長軸方向の分布は水平方向への集中傾向を依然として呈しており、初期状態からの構造強化の度合いがDに比べて

相対的に低い結果となった。このような粒子配列の違いは前述した動的変形試験の結果に対応するものと思われる。ただし集中度 VM で見ると、排水履歴を受けた試料 D (17.5%) と過剰間隙水圧発生下で履歴を受けた試料 E (22.3%) との差は比較的小さく、定量的に明確化するまでには至らなかった。

6. 結 論

本研究にて得られた結論を以下にまとめる。

(1) 初期相対密度 40%~50% 程度のゆるい飽和砂に対して様々な有効応力状態のもとで繰返しせん断履歴を与え、履歴による密度変化を調べた結果、履歴後の相対密度 D_r は従来の研究成果と同様に履歴ひずみ γ_{pre} の大きさと正の相関を有すること、また履歴ひずみ γ_{pre} や履歴後相対密度 D_r を、履歴時有効せん断応力比 $\eta_{pre} = \tau_{pre}/\sigma_{pre}'$ によって統一的に評価できることが分かった。

(2) 繰返しせん断履歴を受けた飽和砂の液状化強度は、従来から指摘されている履歴ひずみ γ_{pre} 、履歴回数 N_{pre} 以外に履歴時過剰間隙水圧 Δu_{pre} (履歴時の有効応力 σ_{pre}') の影響を受けて変化し、 Δu_{pre} が小さいほど、 σ_{pre}' が大きいほど履歴後の液状化強度は大となること、また履歴後の液状化強度特性を、履歴時有効せん断応力比 η_{pre} と履歴時過剰間隙水圧比 $\Delta u_{pre}/\sigma_0'$ の組み合わせによって統一的に評価できることが分かった。

(3) 履歴条件の違いによる液状化強度の差異は供試体の密度変化のみでは説明できず、砂の内部構造の違いが関与していることが示唆された。このような内部構造の変化を、直接的には砂粒子の長軸方向の配向性の変化により、間接的には微小ひずみ時のせん断剛性率 G_0 の変化により検討した。特に排水条件下での履歴では砂粒子のランダム化の傾向が強く、これが液状化強度や G_0 の向上をもたらしているものと推察された。

本研究で実施した一連の中空ねじり試験によって、履歴時過剰間隙水圧を抑制することで履歴後の液状化強度が増大すること、すなわち振動締固め施工時に発生する過剰間隙水圧の除去により締固め効果の向上がもたらされることが示唆された。今後は模型実験や現場実験レベルでの検証を行い、本研究成果のより実務的な応用を試みていく予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり (財) 電力中央研究所企画部 西 好一博士より貴重な御助言をいただいた。末筆ながら記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土質工学会:液状化対策の調査・設計から施工まで, 第4章 液状化対策, 4.3 液状化対策工法の選定, 4.3.1 現状

- 調査結果, pp.152-160, 1993.
- 2) Youd, T.L. : Densification and Shear of Sand During Vibration, *Jour. of the Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, Vol.96, No.SM3, pp.863-880, 1970.
- 3) Youd, T.L. : Compaction of Sands by Repeated Shear Straining, *Jour. of the Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, Vol.98, No.SM7, pp.709-725, 1972.
- 4) Drnevich, V.P. and Richart, F.E. : Dynamic Prestraining of Dry Sand, *Jour. of the Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, Vol.96, No.SM2, pp.453-469, 1970.
- 5) 斉藤 二郎, 木村 薫, 平間 邦興, 北村 仁: 振動履歴を受けた砂質土の液状化現象に関する 2, 3 の検討, 第14 回土質工学研究発表会, pp.585-588, 1975.
- 6) 斉藤 二郎, 平間 邦興, 木村 薫, 北村 仁: ネジリ振動による砂質地盤の締固め試験 (その2) 一動的単純せん断試験装置による室内試験結果一, 大林組技術研究所報, No.17, pp.39-44, 1978.
- 7) 石黒 健: 吸水一振動締固め工法に関する現場検証実験, 地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集, pp.221-226, 1991.
- 8) 谷本喜一, 野田 耕: 飽和砂層の振動締固めについて, 第2 回土質工学研究発表会講演集, pp.195-198, 1967.
- 9) Suzuki, T. and Toki, S. : Effects of Preshearing on Liquefaction Characteristics of Saturated Sand Subjected to Cyclic Loading, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp.16-28, 1984.
- 10) Finn, W.D.L., Bransby, P.L., and Pickering, D.J. : Effects of Strain History on Liquefaction of Sand, *Jour. of the Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, Vol.96, No.SM6, pp.1917-1934, 1970.
- 11) Seed, H.B., Mori, K. and Chan, C.K. : Influence of Seismic History on Liquefaction of Sands, *Jour. of the Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol.103, No.GT4, pp.257-269, 1977.
- 12) Ishihara, K. and Okada, S. : Effects of Stress History on Cyclic Behavior of Sand, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.4, pp.31-45, 1978.
- 13) Ishihara, K. and Okada, S. : Effects of Large Preshearing on Cyclic Behavior of Sand, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.3, pp.109-125, 1982.
- 14) Towhata, I. and Ishihara, K. : Undrained Strength of Sand Undergoing Cyclic Rotation of Principal Stress Axes, *Soils and Foundations*, Vol.25, No.2, pp.135-147, 1985.
- 15) Vaid, Y.P., Chung, E.K.F. and Kuerbis, R.H. : Preshearing and Undrained Response of Sand, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.4, pp.49-61, 1989.
- 16) Mulilis, J.P., Seed, H.B., Chan, C.K., Mitchell, J.K. and Arulanandan, K. : Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction, *Jour. of the Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol.103, No.GT2, pp.91-108, 1977.
- 17) 西 好一, 金谷 守: 波浪によるひずみ履歴を受けた海底砂地盤の力学的特性, 電力中央研究所報告, U 89012, 1989.
- 18) Tokimatsu, K. and Uchida, A. : Correlation Between Liquefaction Resistance and Shear Wave Velocity, *Soils and Foundations*, Vol.30, No.2, pp.33-42, 1990.

- 19) 龍岡文夫：新体系土木工学 18 土の力学 (Ⅲ) 圧密・せん断・動的解析, pp.220-222, pp.257-321, 1981.
- 20) 龍岡文夫：砂の三軸・伸張試験—主として応力経路に関して—, 第 20 回土質工学シンポジウム発表論文集, pp.61-70, 1975.
- 21) 西 好一, 金谷 守, 飯島 健：中ひずみせん断履歴を受けた飽和砂の力学的特性, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集, pp.159-164, 1988.
- 22) 鈴木 輝之, 土岐 祥介：飽和砂の液状化特性に及ぼす非排水せん断履歴の影響, 土質工学会論文報告集, Vol.25, No.3, pp.178-186, 1985.
- 23) 鈴木 輝之, 鈴木 利文：飽和砂の再液状化強度に及ぼす密度と構造の変化の影響, 土質工学会論文報告集, Vol.28, No.2, pp.187-195, 1988.
- 24) 西 好一, 飯島 健：せん断ひずみ履歴の大きさが砂の初期せん断剛性率に及ぼす影響, 第 24 回土質工学研究発表会講演集, pp.805-806, 1989.
- 25) Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi, Y.: Soil Liquefaction Evaluations by Elastic Shear Moduli, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.25-35, 1986.
- 26) Curray, J.R. : The Analysis of Two Dimensional Orientation Data, *Jour. of Geology*, Vol.64, pp.117-131, 1956.

(1993.7.28 受付)

LIQUEFACTION CHARACTERISTICS OF SATURATED SAND SUBJECTED TO CYCLIC PRESHEARING WITH THE GENERATION OF EXCESS PORE-WATER PRESSURE

Takeshi ISHIGURO, Takeshi IIJIMA and Saburo SHIMADA

A series of hollow cylindrical torsional shear tests have been carried out to investigate the influence of excess pore-water pressure generating at preshearing on the liquefaction resistance of saturated sand. Consequently, the liquefaction resistance of saturated sand was cleared to be affected by three factors, pre-shear strain (effective shear stress ratio), excess pore-water pressure (effective stress condition) at preshearing, and the number of cycles. And the increase of liquefaction resistance was confirmed to be achieved by restraining the excess pore-water pressure.