

非排水繰返しせん断履歴後の 再圧密実験と体積収縮特性のモデル化

仙頭紀明¹・風間基樹²・渦岡良介³

¹正会員 工修 東北大学助手 大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

E-mail:nsentoh@civil.tohoku.ac.jp

²正会員 博士(工学) 東北大学教授 大学院工学研究科(同上)

³正会員 博士(工学) 東北大学講師 大学院工学研究科(同上)

きれいな砂の液状化後に発生する再圧密体積ひずみと非排水繰返しせん断履歴の関係を、体積ひずみ速度を制御した再圧密試験により評価した。繰返しせん断履歴は中空ねじりせん断試験機を用いたハイブリッドオンライン実験手法に基づく不規則波とした。その結果、繰返しせん断中の履歴指標は従来、高い相関があるといわれている最大せん断ひずみよりもむしろ累加せん断ひずみが再圧密時体積ひずみと相関が高いことがわかった。さらに、再圧密体積ひずみは、相対密度が小さいほど、累加せん断ひずみが大きくなるほど大きくなることがわかった。これらの実験結果を基に、履歴指標、相対密度の影響を考慮することが可能な再圧密時の体積収縮特性を表現するモデルを提案した。

Key Words : *liquefaction, reconsolidation, volumetric strain, settlement, online testing method*

1. はじめに

これまでの地震時の砂地盤の液状化に伴う残留変形により、構造物やライフラインに多くの被害が発生している。液状化地盤の沈下に関しては、液状化後の再圧密時の体積収縮特性に関して多くの研究がなされ、砂の種類、密度、および地震中に砂地盤が受けた繰返し履歴により収縮量が変化することがわかっている。さらには、ポスト液状化時のせん断変形特性は、再圧密特性(有効応力-体積ひずみ関係)と密接な関係があることが指摘されており^{1),2)}、液状化の研究分野における重要な課題と位置づけられている。

液状化後の沈下に関しては、Lee and Albaisa³⁾はさまざまな地震被害事例を収集し、実地盤において数%から10%の体積ひずみが発生していたことを示した。また、被害事例に基づく分析は、Tokimatsu and Seed⁴⁾、Shamoto et al.⁵⁾らによっても行われている。その中で、Lee and Albaisa³⁾は、室内三軸試験により砂の過剰間隙水圧比が1に達しなければ、再圧密体積ひずみは粒子の大きさ、相対密度および過剰

間隙水圧比と相関が高いことを示した。なお、再圧密体積ひずみは有効応力が再び初期圧密応力に戻った時の体積ひずみ量で定義される。また、過剰間隙水圧比が1になってから、さらに繰返しせん断を与えると、再圧密体積ひずみと過剰間隙水圧比の相関は認められないことも示している。佐々木⁶⁾らは、理想的な1次元圧密状態を再現可能な中空ねじりせん断試験機を用いて、再圧密体積ひずみが0.5%を超える場合は、体積ひずみは繰返し载荷中に生じた最大せん断ひずみ γ_{max} と相関が高いことを示した。国生⁷⁾、Nagase and Ishihara⁸⁾、そして、Shamoto et al.⁹⁾の実験結果でも同様の最大せん断ひずみと再圧密体積ひずみの高い相関が指摘されている。Tokimatsu and Seed⁴⁾やIshihara and Yoshimine¹⁰⁾は実験事実をもとに、液状化後の地盤の沈下量についての簡易予測法を提案しており、実務上も利用されている。

しかしながら、上記の既往の研究で用いられた実験のほとんどは、一定振幅または不規則繰返し応力を制御した実験である。特に、緩い砂では、本来は負担することが困難なせん断応力を無理に供試体に作用させるため、せん断ひずみ振幅は急激に増加し、

実験の制御・測定上の限界に達して試験を終了することになる。オンライン実験では入力地震波の設定にもよるが、基本的にはひずみ制御実験であるためこのような制約を受けにくいといえる。実際の液状化地点の強震記録や振動台実験結果をみると、せん断応力（加速度応答）は、液状化してからはほとんど応答を示さず、大きなせん断ひずみが生じる。これは過剰間隙水圧が上昇し、供試体が軟化したことが原因である。言い換えると、緩い砂に対してその砂が負担できないような応力を载荷できないことを意味している。また、今後発生が予想される東南海、南海地震等のマグニチュードの大きい地震では大振幅で継続時間の長い地震動が予想される¹¹⁾ことから、最大せん断ひずみレベルに近い振幅での载荷が長く繰返されることが考えられる。したがって、このような、実現象を従来の要素実験で包含できていたかについては、疑問が残るところである。これらの問題点を解決するためには、ひずみ制御実験が考えられるが、与えるひずみ履歴パターンを実現象と対応させてどのように設定するかについては研究の余地がある。そこで本研究では後述するハイブリッドオンライン実験手法を用いることで、より地震時の载荷条件に近い繰返しせん断履歴を与えて再圧

密挙動を評価することとした。

一方、上記は液状化した後の再圧密体積ひずみ量に関する議論であるが、過剰間隙水圧が消散する再圧密過程での有効応力の変化に着目した収縮特性に関する研究は先に述べたように、ポスト液状化時のせん断変形挙動と密接に関係があるにも関わらず、あまり多くの研究がなされていない。吉田ら¹²⁾は繰返しせん断履歴を変化させた豊浦砂の再圧密過程の体積ひずみ-平均有効応力 ($\varepsilon_v - p'$) 関係を三軸試験より求めた。体積ひずみは消散直後の有効応力が小さい領域で大きく発達し、その領域で発達する体積ひずみは繰返し回数が大きい程大きくなる傾向があることを示した。仙頭ら¹³⁾は体積ひずみ速度を制御可能な装置を用いた液状化後の再圧密試験を行い、 $\varepsilon_v - \log p'$ 曲線はバイリニヤール関係を示すことを明らかにした。

再圧密過程の $\varepsilon_v - p'$ 関係に関するモデル化^{14), 15)}にもなされているものの、非排水せん断履歴の影響をどのように取り入れていくかについては、モデルによって様々であり、議論の余地がある。本研究では、非排水繰返しせん断における履歴指標に基づき再圧密過程の $\varepsilon_v - p'$ 関係を表現できる定式化を提案することを目的とする。

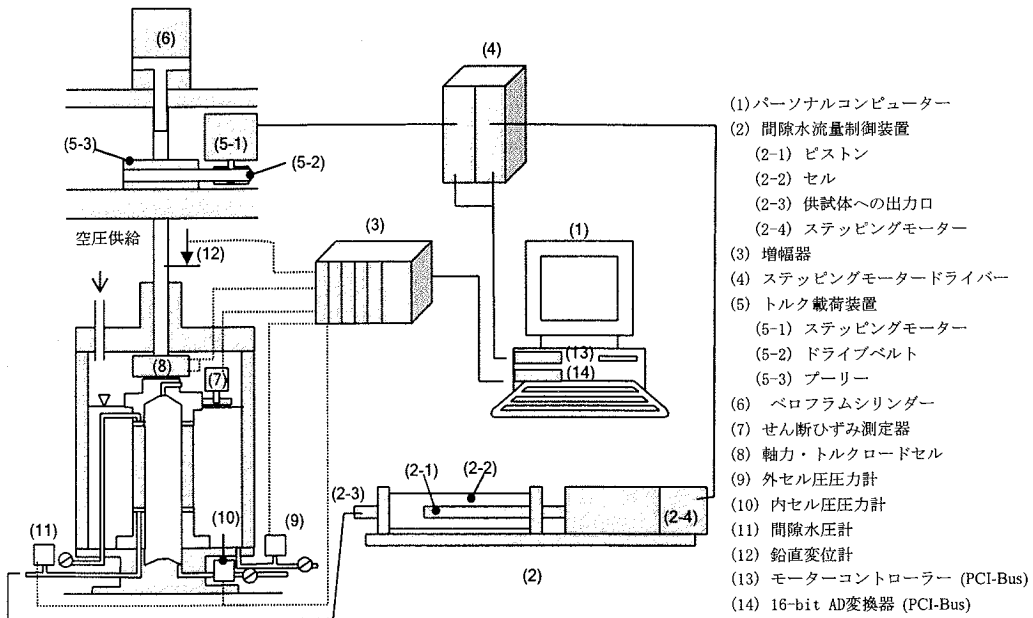


図-1 実験装置の構成

表-1 地盤モデル

層番号	層厚(m)	密度(t/m^3)	地下水位 ▽ ≡	せん断波速度 (m/s)	規準ひずみ (%)	平均有効応力 (kPa)	タイプ
1	@2.0	2.0		200	0.1	-	双曲線 モデル
2							
3							
4							
5							
6				-	100	要素実験	
7							
8							
9							
10							
基盤				400			弾性基盤

2. ハイブリッドオンライン実験

(1) 実験材料

実験には豊浦砂を用いた。砂の物理定数は、比重2.64, 平均粒径0.14mm, 細粒分含有率0%, 最大間隙比0.967, 最小間隙比0.596である。供試体は所定の相対密度になるよう空中落下法により作成した。

(2) 実験装置

図-1に実験装置の構成を示す。主要な装置は中空ねじりせん断試験機, 圧密制御と背圧载荷を目的とした間隙水流量制御装置, 計測・制御を行うパーソナルコンピューター(PC)である。中空ねじりせん断試験における供試体サイズは外径10cm, 内径6cm, 高さ10cmである。せん断ひずみの载荷は载荷軸に結合したプーリー(図中5-3)をドライブベルト(図中5-2)を介して, ステッピングモーター(図中5-1)により駆動する。せん断ひずみの载荷分解能は 2.5×10^{-6} /pulseである。間隙水流量制御装置は間隙水セル中にあるピストン(直径20mm; 図中2-1)の水平方向変位をステッピングモーターにより制御することで流量を制御する。間隙水の体積の制御分解能は 6.3×10^{-5} cc/pulseである。応答値の計測は各種センサー(図中7~12)からの電圧をアンプ(図中3)で増幅し, 16-bitのAD変換器(図中14)を介してデジタルデータとしてPCに取り込む。2つのステッピングモーターは図中13のコントローラにより制御される。

(3) 実験手順

空中落下法により作成した試料は, 有効拘束圧20kPaで予備圧密し, CO_2 および脱気水を流し, さらに背圧(100kPa)を载荷して飽和させる。供試体の

B値は0.95以上であった。供試体の圧密条件は, 有効拘束圧100kPaの等方圧密とした。圧密終了後は, 非排水条件にて, 後述する不規則繰返しせん断履歴をハイブリッドオンライン実験手法を用いて供試体に与えた。繰返し载荷終了後, 間隙水流量制御装置を用いて, 体積ひずみ速度を一定(0.05%/min)として, 等方応力状態を保ったまま排水させた。なお, 実地盤では境界条件によっては大きな動水勾配で間隙水が排水される現象も考えられる。しかし, ここでは単に ε_v-p 関係, 言い換えれば, 構成関係を求めることに主眼がおかれているため, 透水の影響により供試体内で不均質な間隙水圧分布が生じないように砂質土としてはかなり小さい体積ひずみ速度を設定した。体積ひずみ速度は, 今回対象とした透水性の良い砂と比べて低い透水性の粘性土(10<塑性指数<40)に適用されている定ひずみ圧密試験¹⁰⁾における軸ひずみ速度(0.05%/min以下)を参考に設定した。

(4) 実験方法

a) ハイブリッドオンライン実験を用いた不規則繰返しせん断载荷

不規則繰返しせん断载荷方法は, 基盤面から地震動を入力可能であること, および, 試料の密度などの状態が応答値に直接反映されるハイブリッドオンライン実験手法を用いることとした。地震応答に関するハイブリッドオンライン実験では, 運動方程式を時間方向に逐次積分する際に, 復元力を構成モデルを用いずに直接要素試験から求める。すなわち, せん断ひずみ増分を制御して与えて, せん断応力を計測する。その際の, 実験の制御・計測はPCと接続し, オンラインで行う。動的物性が把握できている層では構成モデルを用いるため, 要素実験と数値モ

表-2 実験ケース

ケース	入力波	入力波の最大 加速度(gal)	継続時間 (秒)	相対密度 D_{rc} (%)	原波に対する最大 加速度比率
1-1	神戸PI波 NS成分 GL-32.4m	150	30	54	0.276
1-2		250		54	0.46
1-3		350		54	0.645
2-1	人工地震波(ランダム位相)	100	120	54	0.31
2-2		150		52	0.462
2-3		250		51	0.77
3-1	神戸PI波 NS成分 GL-32.4m	250	30	76	0.46
3-2		350		78	0.645
3-3		450		76	0.828
4-1	人工地震波(ランダム位相)	150	120	76	0.462
4-2		250		78	0.77
4-3		325		78	1.0
5-1	人工地震波(神戸PI波 EW成分 GL-83.4m位相)	194.1	60	89	0.5
5-2		291.2		86	0.75
5-3		388.3		88	1.0
6-1	人工地震波(八戸波 NS成分位 相)	196.1	120	89	0.5
6-2		294.1		87	0.75
6-3		392.2		87	1.0

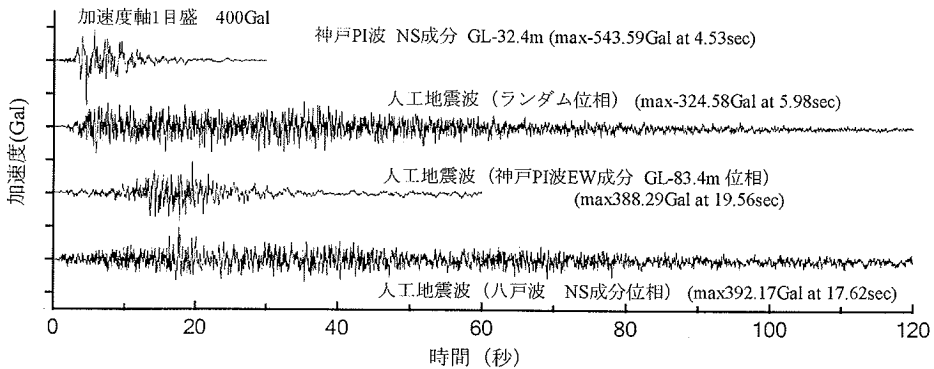


図-2 実験に用いた基盤入力加速度の時刻歴

デルが混在するハイブリッドな実験・解析手法である。オンライン実験の詳細については文献17)および18)等を参照されたい。

b) 想定地盤モデル

表-1に想定したモデル地盤を示す。モデルとしては弾性基盤上の10層の水平成層地盤を想定した。地盤は地表面より深度20mまでとし、各層厚は2mで地下水位は地表面に設定した。ここで設定した層厚は高振動数成分まで含めた地震応答を精度良く評価するという観点からすれば、厚すぎるように思われる。しかしながら、本研究では実物の応答予測というよりは、応答解析に近い不規則繰返しせん断履歴を供試体に作用させたかったこと、および、後述する積分時間間隔で安定した実験を行うために設定したものである。砂試料から直接復元力を得る層は8層目

とした。8層目を試験層としたのは、地盤の K_0 値を0.5と仮定した場合、8層目中心位置の平均有効応力が100kPaとなり、上述した実験の圧密条件と等しくなるためである。なお、本来ならば、 K_0 圧密をして、平面ひずみ状態を維持した状態で繰返しせん断を与える方が望ましいが、 K_0 の違いによらず平均有効応力が等しければ概ね液状化強度は等しい¹⁹⁾こと、および、実験制御の自由度が増加し煩雑になることを考慮して等方圧密状態にて繰返しせん断を行った。要素試験以外の層は図中に示すパラメーターを設定した双曲線モデルとした。なお、双曲線モデル層にて顕著な非線形化が発生しないように規準ひずみを0.1%と設定した。時間積分は中央差分法(第1ステップのみ線形加速度法)とし、積分時間間隔は0.005秒とした。レーリー減衰は剛性比例型とし、1

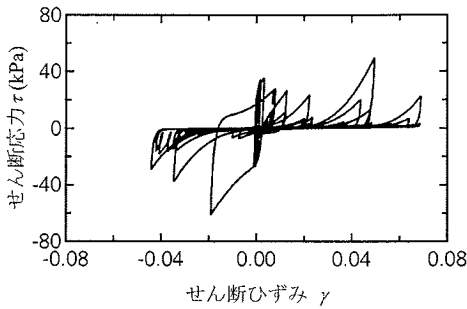


図-3 応力-ひずみ関係
(ケース 4-3, $D_{rc}=78\%$, ランダム波原波入力)

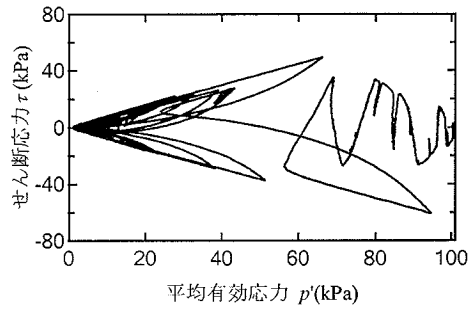


図-4 有効応力経路
(ケース 4-3, $D_{rc}=78\%$, ランダム波原波入力)

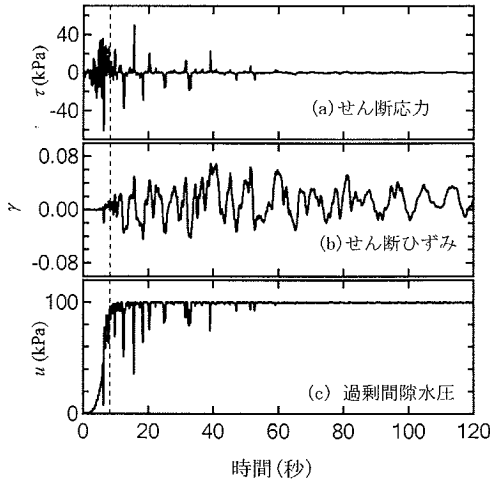


図-5 実験結果の時刻歴
(ケース 4-3, $D_{rc}=78\%$, ランダム波原波入力)

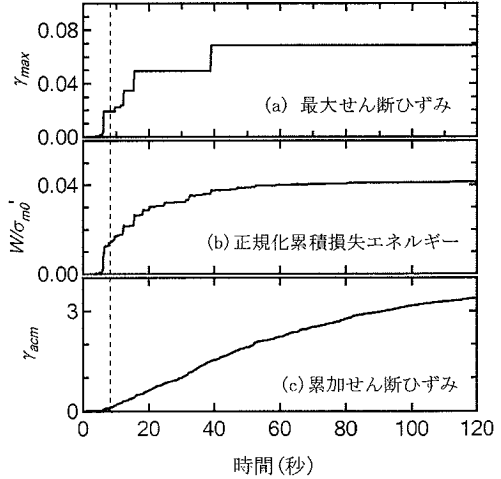


図-6 繰返しせん断履歴指標の時刻歴
(ケース 4-3, $D_{rc}=78\%$, ランダム波原波入力)

次モードで減衰定数 $h=0.01$ を設定した。

c) 実験ケース

実験ケースは表-2に示す砂の密度, 入力地震波, および入力加速度振幅を変化させた18ケースである。圧密終了時の相対密度 D_{rc} は緩詰めで51~54%, 中密詰めで76~78%, 密詰めで86~89%とした。基盤に入力する地震波は図-2に示す4タイプとした。神戸PIアレー記録GL-32.4mのNS成分波のみ観測地震波であるが, その他の波は建築基準法の告示スペクトルを用いて, 異なる位相を与えた人工地震波である。人工地震波を用いたことは, 地震波の強弱の指標をスペクトル強度ととらえたことに相当する。ただし, スペクトル強度だけでなく, 地震の継続時間や位相特性も液状化後の再圧密特性に影響を与えるものと考え, 以下の3つの位相を人工地震波の位相として選んだ。位相はそれぞれランダム位相, 神戸PIアレー記録GL-83.4mのEW成分位相, 八戸波NS成分位相である。図-2に示した地震波を原波として, 表-2に示す比率を乗じて入力加速度の大きさを調整

することで, 砂供試体に与えるせん断履歴を変化させた。なお, ここに示されるような人工地震波が現実に即しているかについては議論の余地があるものの, これらの人工地震波が実設計でも多く用いられていること, および, 通常考えているよりも繰返し回数が多く作用した場合の再圧密特性を調べるために選定したものである。

3. 実験結果と考察

(1) 非排水繰返しせん断履歴指標

図-3に応力-ひずみ関係, 図-4に有効応力経路, および図-5に実験結果の時刻歴の一例を示す。いずれも表-1中のケース4-3(相対密度78%, ランダム位相人工地震波, 原波入力)における8層目の結果である。過剰間隙水圧比が0.95に達する初期液状化(図-5中点線)までに, 2%近いせん断ひずみが発生し, 応力比(τ/p_0)で0.6を超えるような応答が発生

している。初期液状化から約60秒まではせん断応力にスパイク状の応答が見られ、サイクリックモビリティ現象を示している。さらにそれ以降では、応力点は有効応力経路上ではほぼ原点に近い位置にありながら、約40秒付近で得られたせん断ひずみ振幅を超えない程度の繰返しせん断ひずみが継続して発生している。

図-6には履歴指標として選んだ3つの指標（最大せん断ひずみ γ_{max} 、正規化累積損失エネルギー W/σ_{m0}' および累加せん断ひずみ γ_{acm} ）の時刻歴を示す。最大せん断ひずみは前述したように液状化後の体積ひずみと相関が高い指標として、簡易予測法にも用い

られている。ここでは、その時刻までに生じた最大の片振幅せん断ひずみ（絶対値）とした。正規化累積損失エネルギーは風間ら²⁰⁾により液状化した土の靱性評価を目標に提案された指標であり、以下の式によって表される。

$$\frac{W}{\sigma_{m0}'} = \frac{1}{\sigma_{m0}'} \cdot \int_0^t \tau(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}(t) dt \quad (1)$$

ここで $\dot{\gamma}(t)$ は時刻 t におけるせん断ひずみ速度である。累加せん断ひずみは有効応力解析で土の損傷を表現するために内部変数としてしばしば用いられる量である。なお、解析では軸差せん断成分も含むように、塑性偏差ひずみ増分の絶対値の累積値を用いている

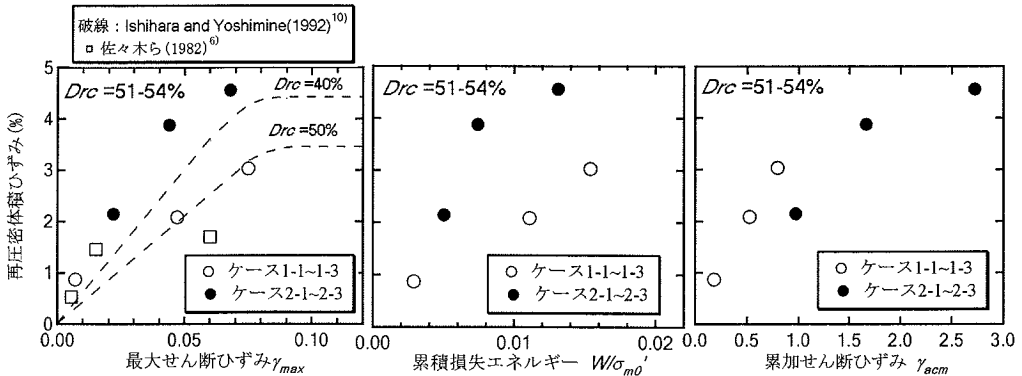


図-7 再圧密体積ひずみと繰返しせん断履歴指標の関係 ($Drc=51-54\%$)

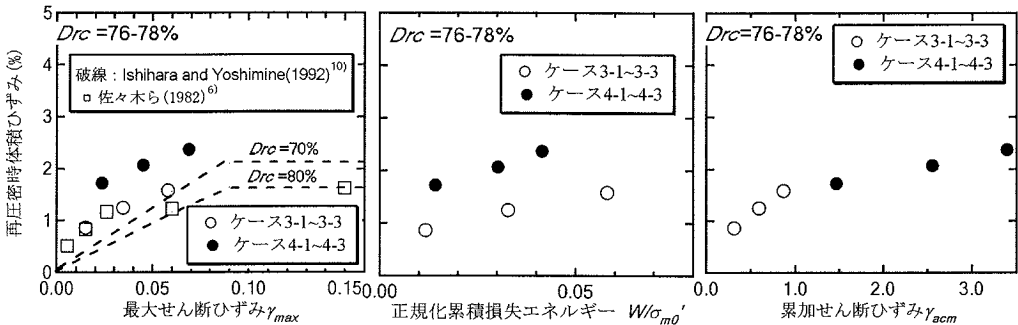


図-8 再圧密体積ひずみと繰返しせん断履歴指標の関係 ($Drc=76-78\%$)

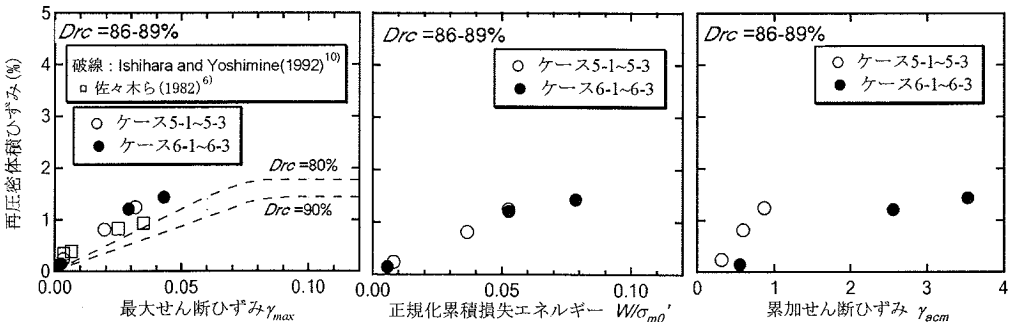


図-9 再圧密体積ひずみと繰返しせん断履歴指標の関係 ($Drc=86-89\%$)

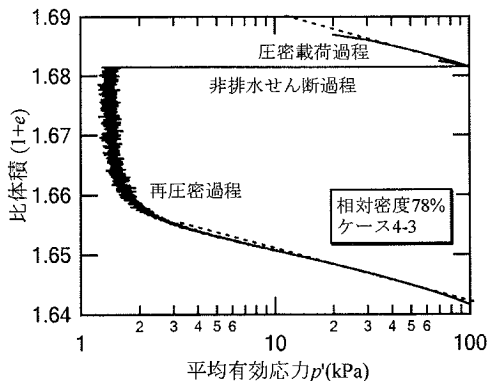


図-10 圧密，再圧密過程の比体積-平均有効応力関係の一例（ケース4-3）

もの²¹⁾もある。本実験結果の整理に用いた累加せん断ひずみは以下の式で定義した。

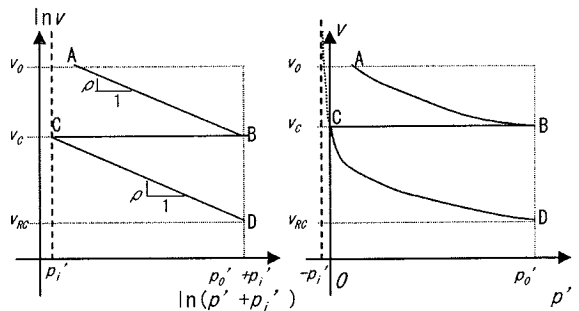
$$\gamma_{acm} = \int_0^t |\dot{\gamma}(t)| dt \quad (2)$$

3つの指標の時刻歴を比較してみると，最大せん断ひずみと正規化累積損失エネルギーは約40秒付近以降はそれぞれ増加傾向が頭打ちになるのに対し，累加せん断ひずみは常に増加する傾向を示す。完全に液化化した状態（約60秒）以降，せん断応力応答をほとんど示さなくなつてからの更なる繰返しが再圧密特性に影響を及ぼすかどうかが問題となる。この点については次節で述べる。

なお，緩い砂および密な砂の応答結果に関しても初期液化が生じた後のせん断ひずみの発達およびせん断応力の回復の傾向に違いが見られたものの，表-2に示した実験ケースについては測定上の限界（本装置に用いたセンサーのせん断ひずみ20%）に達して，途中で試験を終了することはなかった。緩い砂と密な砂の実験結果の詳細については参考文献22)，23)を参照されたい。

(2) 履歴指標と再圧密体積ひずみ

3つの非排水繰返しせん断履歴指標と再圧密過程で生じる体積ひずみの関係を各相対密度について図-7～9に示す。全体的な傾向としては，相対密度が小さいほど，それぞれの履歴量が大きいほど再圧密体積ひずみは大きくなる。また，図には本実験データと他の実験例を比較するため，最大せん断ひずみについてのみ既往の実験結果^{6),10)}も併せて示す。実験装置，砂の種類，繰返しせん断履歴の与え方が異なるため，単純な比較はできないが，対象としているきれいな砂では入力地震波のタイプによっては，



(a) p'_i を導入した $\ln v - \ln p'$ 関係

(b) 図(a)の軸を線形軸とした $v - p'$ 関係

A-B: 正規圧密過程， B-C: 非排水繰返しせん断過程
C-D: 液化化後の再圧密過程

図-11 再圧密時の体積収縮特性の模式図

本実験と既往実験結果は近い値を示しているものもある。しかしながら，詳細に結果を見ると，本実験では中密～緩い砂では，相対密度が等しくても， $\gamma_{max} - e_v$ 関係は一意にはならない。これは入力地震動の影響，特に地震動継続時間の影響を受けていると考えられる。つまり，最大せん断ひずみが発生してから，さらなる繰返し履歴が砂供試体に与えられたことを反映したものと考える。この傾向は正規化累積損失エネルギーについても同様である。一方， $\gamma_{acm} - e_v$ 関係は，Ishihara and Yoshimine¹⁰⁾が示した $\gamma_{max} - e_v$ 関係と同様な，履歴量の増加に伴う e_v の頭打ち傾向があるという視点でデータをみれば，多少のばらつきはあるにしろ， γ_{acm} は密度が等しければ，体積ひずみとほぼ一意の関係を読み取ることができる。よって，本論文では，3つの指標の中で γ_{acm} を指標として選択し，以降に液化化後の体積ひずみと関連付けたモデル化を示す。

4. 実験結果を表現するためのモデル化

(1) モデル化の概念

前章までの実験結果をもとにして，再圧密時の体積収縮特性を表現可能なモデルを示す。モデルは液化化後の再圧密体積ひずみのみならず，その消散過程の $e_v - p'$ 関係についてモデル化する。液化化後の体積収縮特性のモデル化は吉田・規矩¹⁴⁾や渦岡・八嶋¹⁵⁾によって提案されている。吉田・規矩は $e - \log p$ モデルの問題点である平均有効応力がゼロに近づくとき，間隙比が無限大になることを改善し，圧縮指数と対応付けたパラメーター c とIshihara and Yoshimine¹⁰⁾の簡易体積ひずみ予測法のチャートよ

り F_L 値と対応付けて得られる再圧密体積ひずみ ε_{vc} をパラメータとしたモデル化を提案している。一方、渦岡・八嶋は変相線到達後の偏差塑性ひずみ増分の累積値に応じて、体積弾性係数を低減させるモデルを提案した。これまでの研究からわかることは、再圧密時の体積ひずみを評価する際に重要なことは、(1)繰返しせん断履歴として何を選ぶか、(2)有効応力ゼロ付近の挙動をいかに表現するか、といえる。

提案するモデルは等方圧密時の構成関係²⁴⁾ ($\ln v - \ln p'$ 関係)と、有効応力ゼロ付近で無限大にならないように導入されたパラメータ p_i' ²⁵⁾を考慮するものである。また、 $\ln v - \ln p'$ 関係の勾配は図-10の圧密曲線の一例(ケース4-3, 相対密度78%, ランダム位相人工地震波, 原波入力)に示すように、液状化後の再圧密過程は正規圧密状態に近くなるという実験結果をもとに表現している。モデルの概念図を図-11に示す。同図(a)において p_i' を導入した $\ln v - \ln p'$ 関係(横軸は $\ln(p'+p_i')$)が両対数軸で線形であることを仮定する。いま、(b)に示されるように横軸を線形な p' 軸に戻したならば、結果として $p_i'=0$ であっても体積は無限大とならず、有限の体積 v_c を示すことになる。ここで v_c 、 v は非排水繰返し載荷直後および、消散時の p' における体積(比体積)を意味しており、その自然対数の差は有限変形理論に用いられる対数体積ひずみに相当する。実験結果の表現において、体積ひずみを有限変形または微小変形として扱っても、今回のような非排水せん断後の圧密過程1回のみを対象とする場合、違いはほとんどないため、対数体積ひずみをそのまま用いるものとする。以下に体積ひずみを表す式を示す。

$$\varepsilon_v = \ln \frac{v}{v_c} = \rho \cdot \ln \left(\frac{p'+p_i'}{p_i'} \right) \quad (3a)$$

$$p_i' = p_0' \times 10^{-x} \quad (3b)$$

$$x = f(\gamma_{acm}, D_{rc}) \quad (3c)$$

ここで、 ρ は $\ln v - \ln p'$ 関係における正規圧密領域の勾配、 p_0' は初期平均圧密応力、 p_i' は有効応力がゼロの場合に ε_v が無限大にならないために導入された数値計算上のパラメータである。このパラメータ p_i' に対して、実験結果に基づき物理的な意味を持たせる。 p_i' を履歴の大きさにより変化させ、 p_i' が小さい程大きな体積ひずみが生じるモデルとする。式(3b)に示すように、 p_i' が単位に依存しないように、 p_i' を初期有効応力 p_0' の 10^x 分の1で表現した。式(3b)中の x を式(3c)に示すように、実験結果に基づき累加せん断ひずみと相対密度の関数として表しておけば、液状化後の $\varepsilon_v - p'$ 関係が求められることになる。なお、吉田・規矩¹⁴⁾のモデルとの本質的な違いは、繰返しせん断履歴指標として繰返しせん断中の累加せん断ひずみを選らんだ点にある。ただし、本来は数値計算上の工夫のために導入した p_i' に対し履歴指標を関

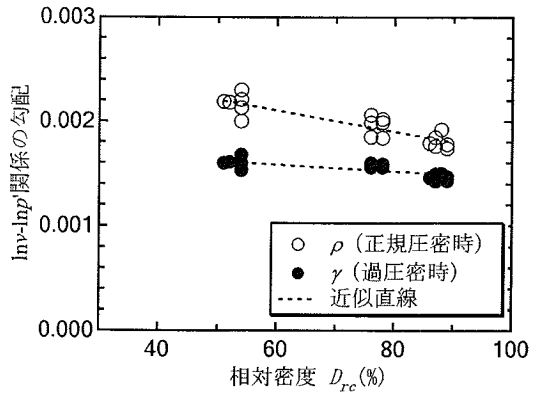


図-12 $\ln v - \ln p'$ 関係の勾配と相対密度の関係

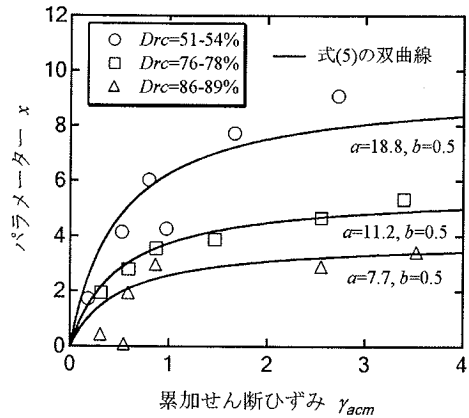


図-13 パラメータ x と累加せん断ひずみの関係

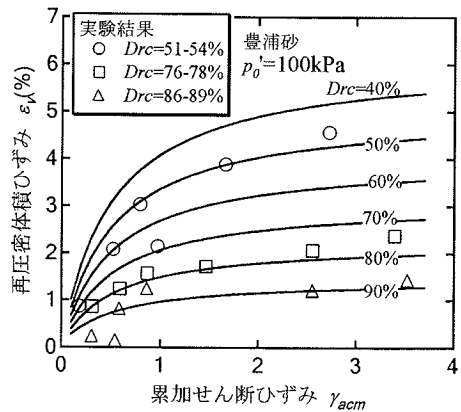


図-14 再圧密体積ひずみと累加せん断ひずみ関係のまとめ(相対密度40-90%)

断ひずみと相対密度の関数として表しておけば、液状化後の $\varepsilon_v - p'$ 関係が求められることになる。なお、吉田・規矩¹⁴⁾のモデルとの本質的な違いは、繰返しせん断履歴指標として繰返しせん断中の累加せん断ひずみを選らんだ点にある。ただし、本来は数値計算上の工夫のために導入した p_i' に対し履歴指標を関

連付けるといふ考え方は共通である。実際、式(3a)で $\rho=c$ 、 $p'=p_0$ および $\varepsilon_v=\varepsilon_{vc}$ において、 p'_i を求め、その p'_i を式(3a)に代入し、若干変形すれば吉田・規矩の式が得られる。

(2) 実験結果への適用

図-12には繰返しせん断前の等方圧密・除荷過程で測定した $\ln v-\ln p'$ 関係の勾配を示す。等方圧密過程の勾配 ρ は相対密度と相関が見られ、相対密度が増加すると減少する線形な関係となった。今回用いた豊浦砂のデータを線形近似すると

$$\rho = 0.00272 - 1.020 \times 10^{-3} \cdot (D_{rc} / 100) \quad (4)$$

なる実験式が得られた。実験の平均相対密度53, 77, 87%を用いて ρ を求めると、それぞれ0.00218, 0.00193および0.00183となった。これらの ρ と $p'_0(100\text{kPa})$ は固定しておいて、図7~9に示した再圧密時体積ひずみを用いて、式(3a)および(3b)を用いてパラメータ x を求めた。その時の $x-\gamma_{acm}$ 関係を図-13に示した。各密度のプロットを式(5)の双曲線関係で最小二乗近似した結果についても図中に示す。

$$x = \frac{a \cdot \gamma_{acm}}{1 + \gamma_{acm}/b} \quad (5)$$

係数 b は曲線形状を決める係数でありここでは相対密度によらず0.5とした。係数 a については相対密度(%)の関数として表現すれば、今回用いた豊浦砂の場合、式(6)のように表現される。

$$a = -0.32D_{rc} + 35.8 \quad (6)$$

相対密度が小さくなれば、係数 a は増加する線形な関係が得られた。以上により、豊浦砂について、相対密度およびせん断履歴(γ_{acm})が決まれば、再圧密体積ひずみおよび ε_v-p' 関係を求めることができる。図-14には相対密度を40%~90%まで変化させた豊浦砂($p'_0=100\text{kPa}$)における再圧密体積ひずみと累加せん断ひずみの関係をまとめて示した。

最後に、図-15~17に式(3a)、(3b)で求めた ε_v-p' 関係を実験結果とともに示す。モデルは図-13で示したように $x-\gamma_{acm}$ 関係を最小二乗近似によって求めているため、当然ながら再圧密体積ひずみは実験結果と比べて多少のばらつきが現れる。ただし、体積ひずみが急増する有効応力ゼロ付近の領域を含む非線形な再圧密過程の ε_v-p' 関係を相対密度の違いも含めて概ね表現できている。

なお、求めた変数 a, b の値は、豊浦砂の実験結果に基づいて求めたものであるため、その他の砂質土

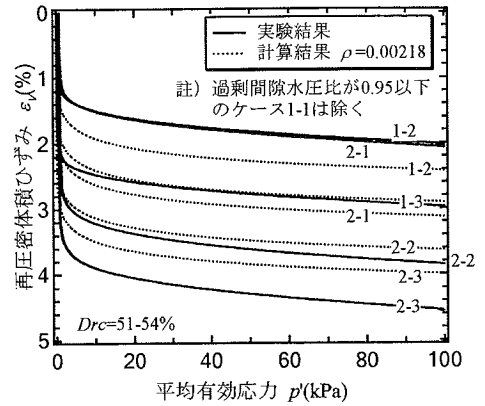


図-15 再圧密時の体積ひずみと有効応力の関係 (相対密度 51-54%)

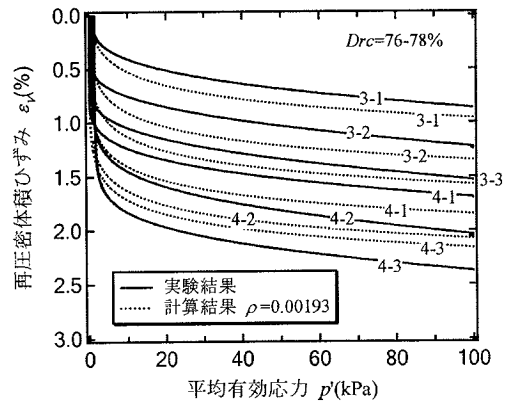


図-16 再圧密時の体積ひずみと有効応力の関係 (相対密度 76-78%)

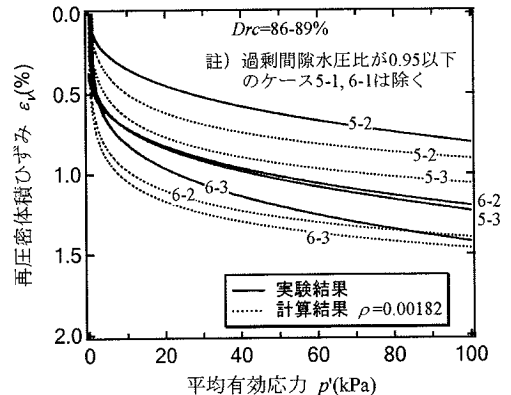


図-17 再圧密時の体積ひずみと有効応力の関係 (相対密度 86-89%)

への適用性については、検証されていない。多様な砂質土の予測を行うためにはさらなるデータの蓄積が必要である。

5. 結論

中空ねじり試験機を用いて、豊浦砂にハイブリッドオンライン実験手法により非排水不規則繰返しせん断履歴を与えた後、再圧密試験を行った結果、以下に示す知見が得られた。

- 1) 再圧密時の体積ひずみは、繰返しせん断中に生じる最大せん断ひずみよりも累加せん断ひずみと相関が高い。
- 2) 液状化後の再圧密時体積ひずみは砂の相対密度が小さくなるほど、非排水繰返しせん断中の累加せん断ひずみが増加するほど大きくなる。
- 3) 再圧密時の体積ひずみ-平均有効応力関係は有効応力ゼロ付近で無限大にならないパラメーター p_i を導入した両対数の比体積-有効応力関係を用いることで簡潔に表現される。
- 4) パラメーター p_i は相対密度および累加せん断ひずみの関数として表現できる。

謝辞：東北大学 堤成一郎助手にはモデル化に関して、多くの議論をいただきました。東京ソイルリサーチ(株) 福元俊一氏には入力地震波に関する議論をいただきました。実験に関しては東北大学大学院松谷明洋君、浅野隆司君、石丸真君に協力いただきました。また、この研究は文部科学省の科学研究費(若手研究B：課題番号14750408)の援助を受けました。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 吉田望, 安田進, 規矩大義: 砂の液状化後の挙動のモデル化, 第30回土質工学研究発表会, pp. 789-792, 1995.
- 2) 仙頭紀明, 大村洋史, 赤堀一彦: 地震後の浸透破壊を考慮した新しい流動変形予測法, 土と基礎, Vol.50, No.2, pp. 13-15, 2002.
- 3) Lee, K.L. and Albaisa, A.: Earthquake induced settlements in saturated sands, *Proceedings of ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.100, No.GT4, pp. 387-406, 1974.
- 4) Tokimatsu, K. and Seed, H.B.: Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking, *Proceedings of ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.113, No.8, pp. 861-878, 1987.
- 5) Shamoto, Y., Zhang, J-M. and Tokimatsu, K.: Methods for evaluating residual post-liquefaction ground settlement and horizontal displacement, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp. 69-83, 1998.
- 6) 佐々木勉, 龍岡文夫, 山田真一: 液状化による砂地盤の沈下予測法について, 第17回土質工学研究発表会, pp. 1661-1664, 1982.
- 7) 国生剛治, 吉田保夫, 西好一, 江刺靖行: 密な砂地盤の地震時安定性評価法の検討(その1) 密な砂の動的強度特性, 電力中央研究所報告, No.383025, pp. 37-40, 1983.
- 8) Nagase, H. and Ishihara, K.: Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp. 65-76, 1988.
- 9) Shamoto, Y., Sato, M. and Zhang, J-M.: Simplified estimation of earthquake-induced settlements in saturated sand deposits, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.1, pp. 39-50, 1996.
- 10) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.1, pp. 173-188, 1992.
- 11) 入倉孝次郎: 迫り来る東南海・南海地震に備えるための強震動の予測 最新の知見とその問題点, 土木学会誌, Vol.88, No.9, pp. 27-29, 2003.
- 12) 吉田望, 辻野修一, 稲童丸征巳: 液状化に伴う地盤沈下予測に関する基礎的研究, 第29回土質工学研究発表会, pp. 859-860, 1994.
- 13) 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介, 松谷明洋: 体積ひずみを制御した液状化した砂の再圧密試験, 第37回地盤工学研究発表会, pp. 1993-1994, 2002.
- 14) 吉田望, 規矩大義: 液状化解析に用いる体積変化特性モデルに関する検討, 第32回地盤工学研究発表会, pp. 889-890, 1997.
- 15) 渦岡良介, 八嶋厚: 液状化後の体積変形予測に対する砂の繰返し弾塑性モデルの適用性, 土木学会第56回年次学術講演会, III-A089, pp. 178-179, 2001.
- 16) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), 第4章 土の定ひずみ速度載荷による圧密試験, pp.389-409, 2000.
- 17) 日下部伸, 森尾敏, 有本勝二: オンライン地震応答実験による2層系砂地盤の液状化挙動, 土質工学会論文報告集, Vol.30, No.3, pp. 174-184, 1990.
- 18) 山口晶, 風間基樹, 日下部伸: 神戸沖合人工島地盤のオンライン地震応答解析, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp. 181-195, 2002.
- 19) 石原研而, 安田進: 液状化に及ぼす地震波の不規則性と初期拘束圧の影響, 土と基礎, Vol.23, No.6, pp. 29-35, 1975.
- 20) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司: 地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp. 161-177, 1999.

- 21) 金谷守, 西好一, 当麻純一, 大波正行: 有効応力に基づく地盤の非線形解析手法の開発とその検証, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp. 49-58, 1994.
- 22) 仙頭紀明, 渦岡良介, 風間基樹: 不規則地震履歴を受けた液状化砂の再圧密特性に関する一考察, 第38回地盤工学研究発表会, pp. 2007-2008, 2003.
- 23) 仙頭紀明, 石丸真, 浅野隆司, 風間基樹: レベル2地震動を入力した密な砂の地震応答ハイブリッドオンライン実験, レベル2地震動による液状化に関するシンポジウム論文集, 土木学会 地震工学委員会, レベル2地震動による液状化研究小委員会, pp. 385-390, 2003.
- 24) Hashiguchi, K.: Short communication on the linear relations of $V-\ln p$ and $\ln v-\ln p$ for isotropic consolidation of soils, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.19, pp. 367-376, 1995.
- 25) Hashiguchi, K. and Chen, Z.-P.: Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.22, pp. 197-227, 1998.

(2003. 9. 18 受付)

EXPERIMENT AND IDEALIZATION OF THE VOLUMETRIC COMPRESSION CHARACTERISTICS OF CLEAN SAND AFTER UNDRAINED CYCLIC SHEAR

Noriaki SENTO, Motoki KAZAMA and Ryosuke UZUOKA

The relation between liquefaction-induced reconsolidation volumetric strain and undrained shear loading history are studied by using hybrid online testing technique. Irregular cyclic shear was applied to clean sand specimen prior to reconsolidation test controlling volume strain rate constant. As a result, it was found that an accumulated shear strain is better index to explain liquefaction-induced reconsolidation volumetric strain. Furthermore, the volumetric strain increases with lower relative density, and larger accumulated shear strain. Finally, based on the tests results, an idealized relationship between reconsolidation volume change and effective stress is proposed.