

堆積年代の古いシルト質砂とその再構成試料の 繰返しせん断特性

谷本 俊輔¹・地蔵 智樹²・川口 剛³・荒木 裕行⁴・佐々木哲也⁵

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 研究員 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム（〒305-8516
茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:s-tanimo@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人土木研究所 交流研究員 同上
E-mail:t-jizou44@pwri.go.jp

³正会員 国立研究開発法人土木研究所 元交流研究員 同上（現 八千代エンジニアリング株式会社）
E-mail:kawaguchi@yachiyo-eng.co.jp

⁴正会員 国立研究開発法人土木研究所 専門研究員 同上
E-mail:h-araki55@pwri.go.jp

⁵正会員 国立研究開発法人土木研究所 上席研究員 同上
E-mail:t-sasaki@pwri.go.jp

これまでの震災経験から、堆積年代の古い地盤ほど液状化被害が生じにくいことが知られており、これは、液状化に対する「年代効果」によるものと考えられている。液状化に対する年代効果に関して、実務上の扱いとしては、造成・堆積年代の違いが定性的な判断指標として考慮されることがあるものの、その定量評価にあたっては多くの課題が残されている。

そこで、本研究では、洪積層から採取した乱れの少ないシルト質砂とその再構成試料を対象として、中空ねじりせん断試験装置を用いた一連の繰返しせん断試験を行った。その結果、堆積年代の古い地層からの不攪乱試料とその再構成試料では、非排水繰返しせん断を受けたときの挙動の粘り強さが大きく異なることに加え、繰返しせん断中の負のダイレイタンスの累積速度と低拘束圧域における圧縮特性が大きく異なることを明らかにした。

Key Words : Liquefaction, Aging effect, Silty sand, Cyclic shear test

1. はじめに

これまでの震災経験から、堆積年代の古い地盤ほど液状化被害が生じにくいことが知られており、これは、液状化に対する「年代効果」によるものと考えられている。東北地方太平洋沖地震による東京湾沿岸北部の液状化発生範囲が埋立地の平面範囲とよく対応していた¹⁾ことはよく知られているとおりであり、年代効果が表れた典型的事例として挙げることができる。その後、若松・先名²⁾は東北地方太平洋沖地震による液状化発生箇所を東北地方、関東地方にわたって網羅的に調査し、液状化の発生範囲は埋立地等の人工造成地盤や河川による堆積地形に多く、台地や丘陵地帯では谷埋造成地に多いと結論付けている。これも、液状化の発生に対して造成・堆積年代が強く影響を及ぼしていることを示唆している。

ここで、造成・堆積年代の異なる地盤に関する液状化

の評価方法について、実務的な取扱いの現状を簡単に紹介しておく、例えば、平成24年に改定された道路橋示方書³⁾では、堆積年代の比較的古い洪積層については原則として液状化の判定を行う必要はないとされており、液状化の判定対象から除外している。また、既設構造物の耐震診断や防災ハザードマップの作成のように、液状化被害の可能性を広域的かつ概略的に評価するような場面では、微地形区分による液状化危険度の区分がなされることがある^{例えば4)}。このように、造成・堆積年代の違いは定性的な判断指標として考慮されることがある。しかし、その定量評価にあたっては多くの課題が残されている。

土木研究所では過去に、数多くの凍結サンプリング試料の液状化試験データを収集し、細粒分含有率 $FC < 10\%$ の砂に関する繰返し三軸強度比 R_L と有効上載圧 100kN/m^2 相当に換算した N 値 N_L の結果をとりまとめている⁵⁾。そ

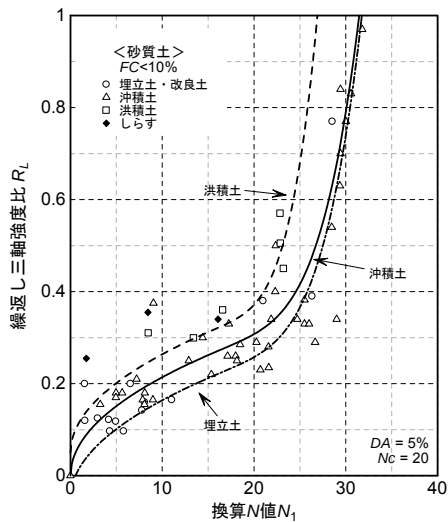


図-1 凍結サンプリング試料の液状化試験により得られた
繰返し三軸強度比 R_L と換算 N 値 N_1 の関係⁶⁷⁾

の結果は図-1のとおりであり、同じ N_1 に対しても造成・堆積年代が古くなるにつれて R_L が大きくなる傾向が認められることから、少なくとも定性的には液状化強度に対する年代効果が表れていると考えることができる。しかし、定量的に見るとその差は必ずしも大きいものではなく、たとえば洪積砂であっても、この R_L を機械的に F_L の計

算式に当てはめれば、液状化が生じると判定されるケースが少なからず出てくる。その一方で、洪積砂が各種構造物の液状化被害を引き起こした事例はこれまでに報告されておらず、評価法と実態との間に乖離が認められる。

また、著者ら⁸⁾が行った東京湾沿岸域の鉛直アレー観測地点における地震記録の波形処理解析からは、深さ方向に見ても液状化の発生範囲が人工地盤に限定的であったとの推定結果が得られているが、その一方で、同サイトの人工埋立層と自然堆積層では繰返し三軸強度比 R_L には顕著な差がなく、現行の液状化判定法に基づくと、造成・堆積年代の区別なく液状化が発生するとの判定結果が得られている。

以上の事実から、造成・堆積年代による土の液状化特性の違いが、従来の液状化判定法の枠組みでは適切に区別できていない可能性が考えられる。したがって、年代効果の有無による液状化特性の違いを調査・試験によって適切に区別し、評価・設計法に適切に取り込むためには、まず、年代効果の有無による基本的な力学特性の違いから把握することが必要である。そこで、本報では、洪積層から採取したシルト質砂とその再構成試料を対象としてひずみ制御による繰返しせん断試験を行うことで、年代効果の有無による土の力学特性の違いを評価した結果を報告する。

表-1 供試体の物理・安定化特性

供試体名		4-c, 5-c	4-d1, 5-d1	4-d2, 5-d2
物理	土質区分	細粒分質砂	細粒分質砂	細粒分質砂
	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.714	2.712	2.707
	50%粒径 D_{50} (mm)	0.1294	0.1172	0.1191
	均等係数 U_c	48.16	72.47	61.45
	細粒分含有率 FC (%)	31.3	35.8	33.7
	塑性指数 IP	N.P.		
安定化	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.707		
	最小間隙比 e_{min}	0.562		
	最適含水比 w_{opt} (%)	12.9		

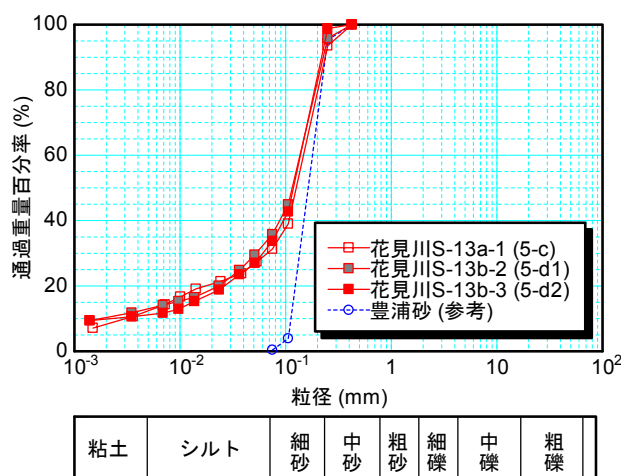


図-2 粒径加積曲線

2. 試験方法

(1) 試料の採取方法と物理特性

試験対象試料は、千葉市内を流れる花見川の河口付近右岸に位置する花見川緑地⁹⁾(千葉県千葉市美浜区打瀬地先)で採取された乱れの少ない試料の一部である。試料採取深度はG.L.-34.0~34.8mであり、当該深度における標準貫入試験N値は32、PS検層によるS波速度 $V_s=311\text{m/s}$ であった。ボーリングコアを観察したところ、採取対象層

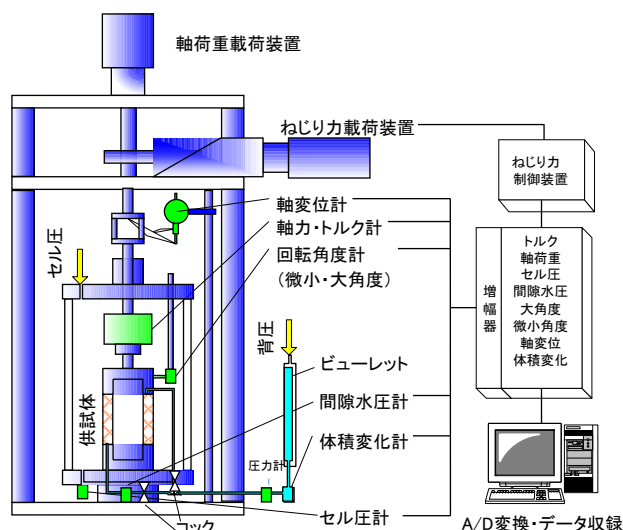


図-3 中空ねじりせん断試験装置の概要

表-2 各载荷ステージのひずみ振幅

载荷 ステージ	せん断ひずみ 片振幅 γ_{sd} (%)
1	0.001
2	0.002
3	0.005
4	0.01
5	0.02
6	0.05
7	0.1
8	0.2
9	0.5
10	1
11	2
12	5

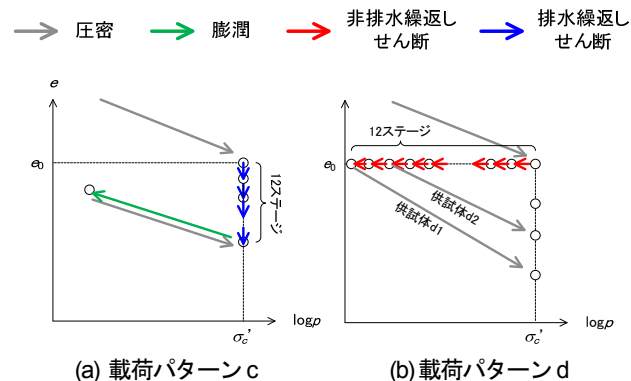


図-4 载荷手順の概念図

は均質な細砂から成り、よく締まっていたもののセメンテーションの発達には認められなかった。試料採取はロータリー式三重管サンプラー（いわゆるチューブサンプリング）により行っており、採取後に現場で水抜きを行った後、ドライアイスにより凍結させて試験室に搬送した。

供試体の物理・安定化特性を表-1、粒径加積曲線を図-2に示す。粒径は $0.1\sim0.2\text{mm}$ が主体であり、その主成分は豊浦砂に比べるとやや細かい。また、細粒分含有率 $FC=31.3\sim35.8\%$ と細粒分を多く含むものの非塑性であることが特徴である。試験に供した3供試体の粒度分布はよく一致しており、供試体ごとのばらつきは小さい。

(2) 载荷方法および試験ケース

液状化は非排水に近い条件下での繰返しせん断履歴に対するダイレイタンスの累積によって生じるため、本質的な挙動の違いを理解するためには、ダイレイタンスの累積状況を詳細に把握したいところである。その一方で、体積を一定とする非排水条件では、時々刻々のダイレイタンスの累積状況の測定が不可能である点に難しさがある。

そこで、本研究では、中空ねじりせん断試験装置を用いて、ひずみ制御による繰返しせん断試験を排水条件および非排水条件で実施することとした。海野ら⁹⁾が指摘するように、繰返しせん断による体積収縮量がせん断応力履歴よりもせん断ひずみ履歴とよい相関を示すため、同一材料に対して同一のせん断ひずみ履歴を与える実験を排水条件および非排水条件の下で実施することで、非排水繰返しせん断挙動だけでなく、それを影で操るダイレイタンスの変化とあわせて把握できると考えたためである。試験装置の概要を図-3に示す。三軸試験でなく中空ねじりせん断試験としたのは、排水条件によらず同一のせん断ひずみ履歴を与えることができるためである。

繰返しせん断試験の载荷方法は、パターンc、パターンdの2種類とした。载荷パターンcは、繰返しせん断中のダイレイタンスの累積状況を詳細に把握することを目的として、排水条件で実施したものである。その手順は次のとおりである。

c1) 軸差せん断を与えないように注意しつつ、所定の圧密応力 σ_c' （等方）に達するまで軸応力とセル圧を段階的に増加させる。以降、この圧密過程を初期圧密と呼ぶこととする。初期圧密過程における圧縮特性を把握するため、状態量を連続的に計測する。

c2) 排水条件下でひずみ制御により繰返しせん断を与える。1ステージの繰返し回数は5サイクルとし、全12ステージにわたってひずみ振幅を漸増させる。各ステージにおけるひずみ片振幅 γ_{sa} は表-2のとおりである。ただし、 γ_{sa} が 0.1% 程度のひずみ振幅までは、

表-3 試験ケース

供試体名	材料No.	供試体 作製方法	拘束圧 σ'_c (kN/m ²)	載荷方法	排水条件	載荷 ステージ	初期圧密後 の間隙比 e_c	初期圧密後の 乾燥密度 ρ_{dc} (kN/m ³)
4-c	4	トリミング 法	210	c	排水	12	0.915	1.417
4-d1				d	非排水	12	0.915	1.416
4-d2						10	0.886	1.435
5-c	5	突き 固め法	210	c	排水	12	0.905	1.424
5-d1				d	非排水	12	0.870	1.450
5-d2						10	0.872	1.446

ひずみ制御により一定振幅を精度よく与え続けることが難しかったため、応力制御により載荷した。
c3) 背圧を調整することで供試体を段階的に膨潤させた後、段階的に σ'_c まで圧密させる。この過程においても状態量を連続的に計測する。

また、載荷パターンdは液状化特性の把握を目的とし、非排水条件で実施したものである。その手順は以下のとおりである。

d1) 上記c1)と同一の手順により供試体を圧密させる。

d2) 非排水条件下でひずみ制御により繰返しせん断を与える。1ステージの繰返し回数は5サイクルとし、表-2に示す全12ステージにわたってひずみ振幅を漸増させる。ただし、供試体名にd2を付したケースでは10ステージで繰返しせん断を終了する。また、 γ_{sa} が0.1%程度のひずみ振幅までは、応力制御により載荷する。各載荷ステージの終了後、供試体を圧密させることなく、非排水条件のままで次の載荷ステージに移行した。

d3) ビューレット側に設けた圧力計で監視しつつ、供試体とビューレットの前後での水圧差が5kN/m²となるように背圧を増加させた後、排水コックをゆっくり開放する。その後、背圧を段階的に減少させることで供試体を σ'_c まで圧密させ、そのときの状態量の変化を連続的に計測する。

参考までに、 $e \cdot \log p$ 空間上で見た載荷手順のイメージを図-4に示す。圧密応力 σ'_d は、想定される原位置の平均有効応力として210kN/m²とした。

試験ケース一覧を表-3に示す。試験対象は、上述の原位置採取試料(材料No.4)とその再構成試料(材料No.5)であり、本報では便宜的に前者を不攪乱試料、後者を再構成試料と呼ぶこととする。ただし、不攪乱試料と言ってもチューブサンプリング試料であり、採取時の乱れの影響を受けている可能性は否定できない。しかしながら、完全に乱された再構成試料とは異なり、原位置での長期的な時間経過、応力履歴の影響がある程度は残っているものと考えられるため、再構成試料による試験結果との対比により、少なくとも定性的には年代効果の影響を把握することができると考えられる。

不攪乱試料については、トリミング法により供試体を作製し、試験機に設置して20kN/m²の拘束圧の下で融解させた後に飽和させた。供試体は表-3に示す4-c、4-d1、4-d2の3つである。

再構成試料は、試験後の不攪乱試料を一度完全に乱し、密度を一致させて突き固めることにより作製したものである。不攪乱状態での試験後の3供試体を混ぜ合わせていないため、不攪乱試料4-c、4-d1、4-d2を再構成したものがそれぞれ5-c、5-d1、5-d2に対応している。供試体作製にあたっては、不攪乱試料の初期状態(初期圧密前の拘束圧20kN/m²の状態)における含水比に一致するように含水調整した上で、不攪乱試料の初期状態における乾燥密度を目標として密度を調整した。その後、供試体を試験機に設置し、20kN/m²の拘束圧の下で飽和させた。細粒分の多い試料を湿潤状態で突き固めることによって供試体を作製したが、飽和過程における体積収縮傾向(コラプスの進行)は見受けられなかった。

初期圧密後の間隙比 e_c 、乾燥密度 ρ_{dc} は表-3に示すとおりであり、表-1の最大乾燥密度 ρ_{dmax} から算出される締固め度 D_c は、不攪乱、再構成の全試料を含めて82~85%であった。なお、初期圧密過程では、不攪乱試料に比べて再構成試料の方が大きな体積圧縮を生じたため、結果的に、不攪乱試料よりも再構成試料の ρ_{dc} がわずかながら大きくなっている。

3. 試験結果

(1) $G \cdot \gamma$ 関係

試験結果から $G \cdot \gamma$ 関係を整理したものを図-5に示す。ここでは、ひずみレベルの増大に伴う剛性低下度合いを強調するため、縦軸(G)を対数で表示している。また、同図には各ステージの最終サイクルだけでなく、全サイクルの試験結果を示している。

まず、小ひずみ域($\gamma_{sa}=10^{-3}\%$ オーダー)のせん断弾性係数 G_0 に着目する。速度検層に基づく原位置でのせん断弾性係数 G_0 は190MN/m²程度であった。同一材料で同程度の密度を有する供試体4-d1、5-d1を比較すると、不攪

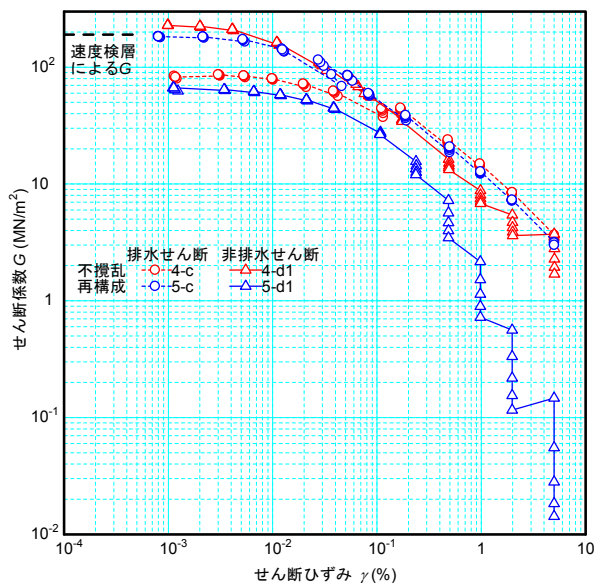


図5 $G \cdot \gamma$ 関係

乱試料4-d1の G_0 が原位置と同程度、再構成試料5-d1の G_0 が原位置の半分程度である。一方、同一材料で同程度の密度を有する供試体4-c、5-cと比較すると、不攪乱試料4-cの G_0 が原位置の半分以下、再構成試料5-cの G_0 が原位置と同程度となっている。この解釈は難しいが、不攪乱試料が採取時の乱れを受けていたことによる影響や、不攪乱試料と再構成試料の初期圧密後における密度の違いの影響、密度のみを合わせた再構成試料では原位置の粒子構造を再現できていないことによる影響などが考えられる。いずれにせよ、年代効果によって G_0 が増加するといった単純な関係を見出すことはできない。

次に、ひずみレベルの増大に伴う剛性低下に着目する。排水繰返しせん断を与えたケースでは、過剰間隙水圧が

上昇しないため、試験結果には単にひずみ依存性の違いのみが反映されることとなる。最終サイクル ($\gamma_{SA}=5\%$, 5サイクル目) のときの G/G_0 を求めると、不攪乱試料4-cで0.039, 再構成試料5-cで0.016であった。不攪乱試料の方が剛性低下度合いが小さく、年代効果の影響である可能性も考えられるが、むしろ、ひずみレベルが大きくなるほど両供試体の G が近い値を示していることから、 G/G_0 の差は単なる G_0 の差であるとも見ることができ、有意な差とは言い難い。

一方、非排水繰返しせん断を与えたケースでは、ひずみ依存性に加えて過剰間隙水圧の影響が試験結果に反映されることとなる。最終サイクル ($\gamma_{SA}=5\%$, 5サイクル目) における G/G_0 を求めると、不攪乱試料4-d1で0.0074, 再構成試料5-d1で0.00022と顕著な差が生じている。再構成試料については、ひずみレベルの増大に伴う剛性低下もさることながら、 $\gamma_{SA}=0.5\%$ 以降では同一ひずみ振幅でサイクル数を重ねることによる剛性低下も顕著である。

(2) 非排水繰返しせん断に対する応力・ひずみ関係および有効応力経路

不攪乱試料と再構成試料に非排水条件下で12ステージまで繰返しせん断を与えたケース (4-d1, 5-d1) について、せん断応力 τ ・せん断ひずみ関係 γ および有効応力経路を図6に示す。

図から明らかなように、不攪乱試料4-d1は平均有効応力 p が一時的にゼロ付近まで低下するものの、有効応力の回復を伴う大きなせん断応力の発現 (サイクリックモビリティ) が顕著であり、粘り強い挙動を示している。図5に示すように、 $G \cdot \gamma$ 関係が排水繰返しせん断 (4-c) による結果と遜色ないものとなっているのは、このためで

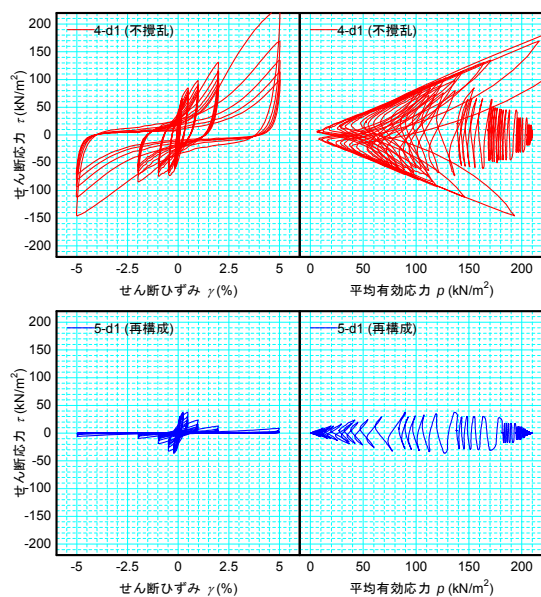


図6 $\tau \cdot \gamma$ 関係および有効応力経路 (非排水条件)

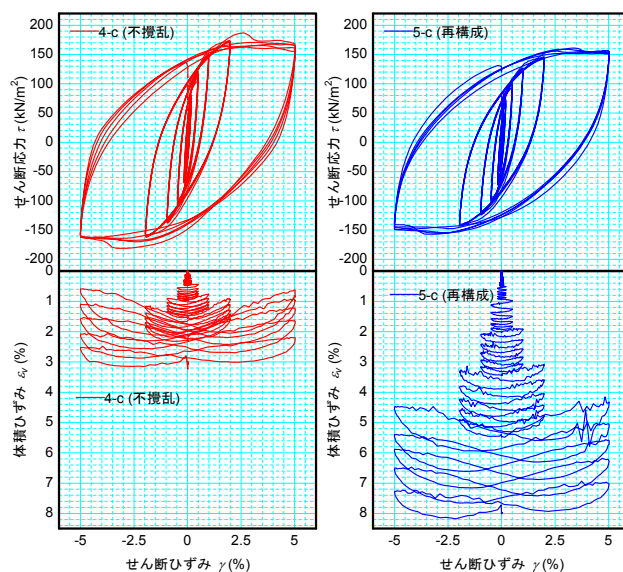


図7 $\tau \cdot \gamma$ 関係およびひずみ経路 (排水条件)

ある。一方、再構成試料5-d1は水圧上昇後の有効応力の回復が乏しく、発揮されたせん断応力も小さなものとなった。

(3) 排水せん断に対する応力・ひずみ関係およびひずみ経路

不攪乱試料と再構成試料に排水条件下で12ステージまで繰返しせん断を与えたケース (4-c, 5-c) について、 $\tau \cdot \gamma$ 関係およびひずみ経路 ($\varepsilon \cdot \gamma$ 関係) を図-7に示す。なお、本報に示す体積ひずみ ε_v は、全て初期圧密終了時をゼロとして算出している。

$\tau \cdot \gamma$ 関係のループ形状は両供試体でよく似ている。し
いて言えば、不攪乱試料では12ステージ目 ($\gamma_{SA} = 5\%$) の

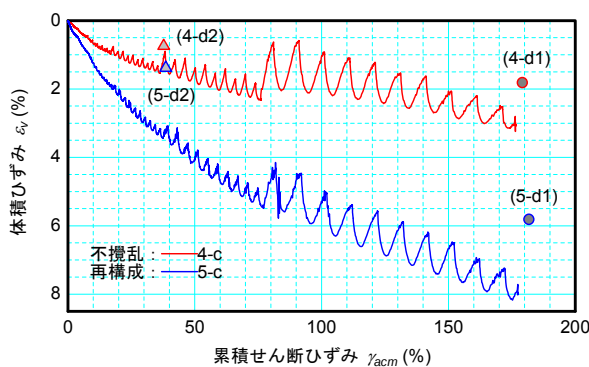
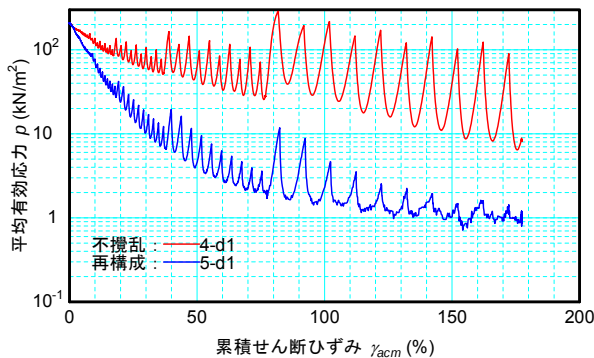
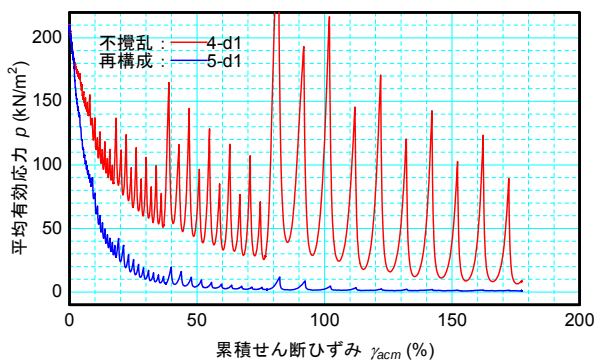


図-8 累積せん断ひずみ γ_{acm} と体積ひずみ ε_v の関係



(a) 縦軸を対数表示



(b) 縦軸を実数表示

図-9 累積せん断ひずみ γ_{acm} と平均有効応力 p の関係

第1サイクルで、 τ が一度ピークを示したのちに低下する傾向 (ひずみ軟化) が認められる点と、せん断ひずみ最大時に発揮されるせん断応力が再構成試料に比べて不攪乱試料の方がわずかに大きい点に違いがある。

次に、ひずみ経路に着目する。ダイレイタンシーには、非可逆的に収縮側へと累積する成分と、半サイクルのせん断の載荷・除荷に伴って膨張・収縮を繰返す成分があり、ここでは前者を累積成分、後者を増減成分と呼ぶこととする。両供試体を比較すると、累積成分の大きさに顕著な差が生じており、最終的な体積収縮量は不攪乱試料では3%程度であるのに対し、再構成試料では8%程度に達した。ダイレイタンシーの累積成分は、せん断に対する土粒子の微視構造の攪乱に起因するものであるため、年代効果による微視構造の安定度合いの違いが表れたものと考えられる。

(4) 体積収縮と過剰間隙水圧の累積

せん断履歴の累積に伴う体積ひずみの累積状況を図-8に示す。せん断履歴の指標は次式により算出される累積せん断ひずみ γ_{acm} とした。

$$\gamma_{acm} = \int |\dot{\gamma}| dt \quad (1)$$

ここに、ドット ($\dot{\cdot}$) は時間微分を表す。排水繰返しせん断を行ったケースでは、測定されたダイレイタンシーの連続的な変化を示している。非排水繰返しせん断を行ったケースでは、繰返しせん断後の圧密排水が終了した時点の体積ひずみのみを示している。

累積成分の進行速度が再構成試料に対して不攪乱試料の方が遅いことは、前述のとおりである。その一方で、増減成分の振幅は、両供試体で同程度である。ダイレイタンシーの増減成分は土粒子同士の幾何学的な干渉によって生じるため、微視構造よりも粒子径、粒度組成、粒子形状等により決まっていると考えられる。

12ステージまで非排水繰返しせん断を行ったケースにおける最終的な体積収縮量は不攪乱試料で1.8%、再構成試料で5.8%である。きれいな砂に対する石原・吉嶺¹⁰⁾の試験結果によれば、非排水繰返しせん断後の体積ひずみはせいぜい4%程度であり、これに比べると再構成試料5-d1の体積ひずみはやや大きい。しかし、近年の石原ら¹¹⁾の試験結果によれば、細粒分を多く含む土ほど非排水繰返しせん断後に大きな体積ひずみを生じる傾向があり、大きなもので6%を超えていることから、これと調和的な結果が得られていると言える。

なお、いずれの供試体についても、非排水繰返しせん断後の体積収縮量は、排水繰返しせん断後のそれに比べて小さい。せん断中の体積収縮量には拘束圧依存性があり¹²⁾、拘束圧が小さいほど収縮傾向が弱まるため、非排水繰返しせん断に伴う平均有効応力 p の低下によって、

ダイレイタンシーの累積速度が低下した結果であると考えられる。

次に、非排水繰返しせん断による過剰間隙水圧の累積傾向として、累積せん断ひずみ γ_{am} と平均有効応力 p の関係を図-9に示す。同図(a)では縦軸(p)を対数で表示し、(b)では実数で表示している。

図-8に見られたダイレイタンシーの累積傾向と同様に、全サイクルを通じた有効応力の低下速度は、再構成試料に比べて不攪乱試料の方が明らかに遅い。また、有効応力の増減成分の振幅は、同図(a)のように p を対数表示すれば、再構成試料のおおよそ $p < 1.5 \text{ kN/m}^2$ の範囲を除き、不攪乱試料と再構成試料で概ね一致している。有効応力の増減成分はダイレイタンシーの増減成分に起因するものであり、ダイレイタンシーの増減成分の振幅が不攪乱試料と再構成試料で同程度であったことを考えると、これは、非排水せん断中に生じているダイレイタンシー(実際には測定することができないが)と平均有効応力の対数 $\log p$ が概ね比例することを示唆している。ただし、実数表示で見れば、再構成試料に比べて不攪乱試料の p の増減成分の振幅は非常に大きい。したがって、非排水

繰返しせん断中の非可逆的な収縮傾向が強い再構成試料では、ダイレイタンシーの増減成分が有効応力の増減に寄与しにくく、その結果としてサイクリックモビリティの発現が弱まったものと理解される。逆に、非可逆的な収縮傾向が弱い不攪乱試料では、ダイレイタンシーの増減成分が有効応力の増減に寄与しやすく、サイクリックモビリティを発現しやすいため、挙動の粘り強さが生まれたものと理解することができる。

なお、水圧上昇後の低拘束圧域における $\epsilon_v \cdot \log p$ 関係の線形性(あるいは $e \cdot \ln p$ 関係の線形性)が存在するかどうかについて、砂の構成モデルに関する既往の研究では、 $p \approx 0$ 付近では線形とならないとの指摘¹³⁾¹⁴⁾や、セル圧と間隙水圧の差として得られる平均有効応力の測定精度に限界があるとの指摘¹⁵⁾もある。構成モデルを扱う上では $p \approx 0$ 付近でのモデル化が重要であり、シビアな評価が要求されるが、ここで述べた $\epsilon_v \cdot \log p$ 関係の線形性は、定性的な挙動の理解のためのラフな見方であることを断っておく。

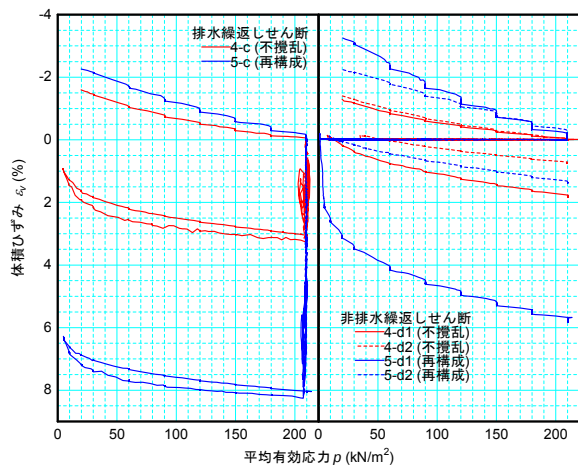
(5) 圧縮特性

初期圧密～繰返しせん断～繰返しせん断後の圧縮・膨潤過程における体積ひずみ ϵ_v ・平均有効応力 p 関係を図-10に示す。同図(a)では横軸(p)を実数で表示し、(b)では対数で表示している。いずれも左図は排水繰返しせん断(载荷パターンc)を行ったケース、右図は非排水繰返しせん断(载荷パターンd)を行ったケースである。繰返しせん断中の体積ひずみの累積や有効応力の低下については前述のとおりであるため、ここでは特に言及しない。

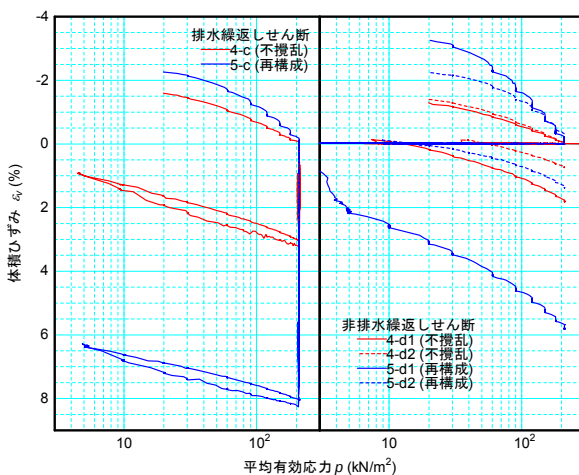
初期圧密過程における圧縮曲線($\epsilon_v \cdot p$ 関係)に着目すると、再構成試料よりも不攪乱試料の方がゆるい勾配を示しており、圧縮性($d\epsilon_v/dp$)が小さいことが分かる。これは応力履歴(過圧密比)の違いによるものと捉えるのが素直であり、一種の年代効果と言えるのかもしれない。

排水繰返しせん断後の圧密過程については、いずれのケースも、初期圧密過程に比べて著しい圧縮性の変化が認められない。 p を対数で表示した図-10(b)で見れば、繰返しせん断後の方がどちらかと言えば勾配がゆるくなっており、密実化や過圧密化が影響した可能性も考えられる。

一方、非排水繰返しせん断後の圧密過程に着目すると、12ステージ目($\gamma_{sf}=5\%$)までのせん断履歴を与えた再構成試料5-d1では、繰返しせん断直後の圧縮曲線が著しく非線形であり、低拘束圧域(概ね $p < 20 \text{ kN/m}^2$)に極めて高い圧縮性を示す領域が出現しているのが特徴的である。砂が非排水繰返しせん断を受けた後に低拘束圧域で高い圧縮性を示す傾向は、例えば仙頭ら¹⁴⁾の実験においても確認されている。これに対して、12ステージ目($\gamma_{sf}=5\%$)までの非排水繰返しせん断履歴を与えた不攪乱試料4-d1に



(a) 横軸を実数表示



(b) 横軸を対数表示

図-10 体積ひずみ ϵ_v ・平均有効応力 p 関係

については、初期圧密時と同程度の圧縮性を示している。

ところで、圧縮性の増加が非排水繰返しせん断中のどの時点から生じ始めるのかは、興味深い点である。10ステージ目 ($\gamma_d=1\%$) までのせん断履歴を与えた再構成試料 5-d2 では、過剰間隙水圧比がちょうど 0.95 程度に達した時点で繰返しせん断を終了することとなったが、微視構造の不安定な再構成試料であっても、この程度のせん断履歴を受けた直後では圧縮曲線が概ね線形である。したがって、著しい圧縮性の増加は、それ以降に受けるせん断履歴によって生じているようである。

4. 考察

以上の試験結果に基づくと、年代効果の有無による土の力学特性の差異とそのメカニズムは、次のように説明することができる。

年代効果を有し、微視構造が安定している場合は、繰返しせん断による負のダイレイタンスの累積速度が遅く、また、低拘束圧域における圧縮性の増加も生じにくい。そのため、正のダイレイタンスが平均有効応力の増加に寄与しやすい。このため、非排水繰返しせん断に対して顕著なサイクリックモビリティを発揮し、水圧上昇後も粘り強い挙動を示すことができる。

一方、弱齢で微視構造が安定していない場合は、繰返しせん断による負のダイレイタンスの累積速度が早い。また、水圧上昇後のせん断履歴の累積によって低拘束圧域における圧縮性の急増が生じることがあり、その場合は正のダイレイタンスが平均有効応力の増加に寄与しにくくなる。その結果として、水圧上昇後のサイクリックモビリティの発現が弱く、急激な剛性低下を生じることとなる。

その他、水圧上昇後の低拘束圧域における土の圧縮性の高まりは、地震動後の圧密挙動(ポスト液状化過程)に対しても悪影響を及ぼす。大林・佐々木¹⁰⁾の模型実験のように、液状化後の水圧消散過程では、砂層上部に圧密がほとんど進行しない(有効応力がほとんど回復しない)領域がしばらくの間残存することがあり、このような間隙水圧の深さ方向分布は、自重圧密が完了していない地盤の自重圧密過程で、圧密係数 $c_v (=k/m_v \gamma_w)$ 、 k : 透水係数、 m_v : 体積圧縮指数、 γ_w : 水の単位体積重量)が増加する場合に形成されることが知られている¹⁷⁾¹⁸⁾。本報に示した再構成試料 5-d1 では、繰返しせん断中に圧縮性が急激に増加したものと見られるが、繰返しせん断後の圧密過程で見れば、圧縮性 (m_v) が急激に低下していくこととなるため、圧密中の c_v の増加をもたらすこととなる。このように、非排水繰返しせん断に伴う圧縮性の変化は、地震動後に有効応力がほとんど回復しない領域の長時間に

わたる継続をもたらし、地盤に流動的な大変形が生じさせることで液状化被害に関与している可能性も考えられる。

今後、今回の試験で見られたような年代効果による挙動の違いを、どのような調査・試験によって把握することができるか、液状化判定や各種構造物の耐震性評価にどのような形で取り込むことができるかについて、さらなる検討を続けていく必要がある。

5. まとめ

本研究では、年代効果の有無が異なる2種類のシルト質砂を対象に、ひずみ制御による繰返しせん断試験を行い、その力学特性の違いを詳細に調べた。得られた知見は次のとおりである。

- 年代効果を有する不攪乱試料は、非排水繰返しせん断を受けたときにサイクリックモビリティを顕著に発揮し、水圧上昇後も粘り強い挙動を示した。その結果、不攪乱試料に非排水繰返しせん断を与えたときの $G \cdot \gamma$ 関係は、排水繰返しせん断を与えた場合に比べて遜色のないものとなった。
- 年代効果によってサイクリックモビリティの発現状況に差異が生じた原因は、繰返しせん断履歴に対する負のダイレイタンスの累積速度の違いと、水圧上昇後の低拘束圧域における圧縮性の急変の有無にある。
- せん断弾性係数、排水強度といったせん断特性や、正のダイレイタンスの大きさに対しては、年代効果による著しい差異が認められなかった。

今後、今回の試験で見られたような年代効果による挙動の違いを、どのような調査・試験によって把握することができるか、液状化判定や各種構造物の耐震性評価にどのような形で取り込むことができるかについて、さらなる検討を続けていく必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局、(公社)地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書，2011.8.
- 2) 若松加寿江，先名重樹：2011 年東北地方太平洋沖地震による東北地方と関東地方の液状化発生地点とその特徴，第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2281-2290，2014.12.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.3.
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：レベル 2 地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル，2012.2.
- 5) 国土庁防災局震災対策課：液状化地域ゾーニングマニュアル（平成 10 年度版），1999.1.

- 6) 松尾修, 東拓生: 液状化の判定法, 土木技術資料, No.39, Vol.2, pp.20-25, 1997.2.
- 7) 松尾修: 道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題, 土木学会論文集, No.757/III-66, pp.1-20, 2004.
- 8) 谷本俊輔, 川口剛, 佐々木哲也: 鉛直アレー記録に基づく埋立地盤の液状化発生深度の評価, 第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2301-2310, 2014.12.
- 9) 海野寿康, 風間基樹, 渦岡良介, 仙頭紀明: 同一繰返しせん断履歴における乾燥砂と飽和砂の体積収縮量の関係, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp.757-766, 2006.11.
- 10) Ishihara, K. & Yoshimine, M.: Evaluation of settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.173-188, 1992.
- 11) 石原研而, 原田健二, 酒井運雄: 攪乱・不攪乱試料に基づく液状化による体積変化特性, 第 48 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1865-1866, 2013.7.
- 12) 國生剛治: 地震地盤動力学の基礎 エネルギー的視点を含めて, 鹿島出版会, 2014.1.
- 13) 吉田望, 規矩大義: 液状化解析に用いる砂の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発表講演集, pp.889-890, 2007.7.
- 14) 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介: 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, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp.307-317, 2004.
- 15) 渦岡良介, 仙頭紀明, 清水智子, 加村晃良, 風間基樹: 有効応力解析における最小有効応力の設定方法と沈下の簡易予測, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.3, pp.806-811, 2007.8.
- 16) 大林淳, 佐々木康: ポスト液状化地盤の体積圧縮特性とボイリング継続時間, 土木学会論文集, No.680/III-55, pp.169-182, 2001.6.
- 17) 三笠正人: 軟弱粘土の圧密-新圧密理論とその応用, 鹿島出版会, 1963.10.
- 18) 佐々木康, 中山修, 柳畑亨: 液状化後の地盤内間隙水圧消散解析への自重圧密理論の適用〜河川堤防の地震被害軽減策の合理化を目指して〜, JICE REPORT, Vol.18, pp.18-25, 2010.12.

(2009.7.1 受付)

CYCLIC SHEAR CHARACTERISTICS OF SILTY SAND SPECIMENS WITH OR WITHOUT AGING EFFECT

Shunsuke TANIMOTO, Tomoki JIZO, Tsuyoshi KAWAGUCHI, Hiroyuki ARAKI and
Tetsuya SASAKI

Based on the past earthquake disasters, the liquefaction damage seems to non-easily occur on the old-age ground due to “aging effect”. On the practical work, depositional age is used as a qualitative index for several judgements as aging effect against liquefaction. However, there are many problems to evaluate quantitatively aging effect against liquefaction.

In this study, a series of cyclic torsional shear tests was conducted for undisturbed specimens and re-constitutive specimens of silty sand, which were obtained from diluvium deposit. As the result, the significant differences between specimens with or without aging effect were confirmed at the ductility behavior in undrained cyclic loading, the accumulating velocity of contractive volumetric strain in cyclic loading, and the consolidation characteristics at the range of low confining pressure after undrained cyclic loading.