

微小繰返しせん断履歴が砂の力学特性に与える影響

長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院

○吉田岬
齊藤悠耶
正会員 豊田浩史
高田晋

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、地震の規模が大きかったため、液状化や再液状化が発生した。それに伴い、住宅、道路、河川堤防、港湾施設等のライフラインに多大な被害が発生した。この液状化の被害では、同様の埋立地盤でも施工年代の違いにより、被害程度に差がみられた。施工から数百年経過した古い埋立地盤では、年代効果により液状化強度が高くなり、液状化が起りにくいと言われている。しかし、年代効果により土の粒子構造が変化するメカニズムが明らかになっていない。

年代効果をもたらすメカニズムの一つとして応力履歴やセメンテーションにより液状化強度が上昇することが知られている^{1), 2), 3)}。そのため、繰返しせん断履歴を与えて年代効果を再現する研究⁴⁾や微量のセメント添加により、年代効果によるセメンテーション効果を再現する研究⁵⁾が行われている。

本研究では、年代効果の1つの要因として応力履歴に着目し、微小繰返しせん断履歴が砂の力学特性に与える影響を明らかにする。供試体に微小繰返しせん断を作用させることで応力履歴を与える。この供試体と応力履歴を与えない供試体において、液状化試験、ベンダーエレメント (BE) 試験、微小ひずみ測定試験 (LSS) などを実施し、力学特性の違いについて、比較検討する。

2. 試験方法

2.1 試験装置

本研究では供試体サイズが直径 5cm、高さ 12.5cm の局所変位計付き三軸試験装置を用いた。局所変位計設置概略図を図-1 に示す。供試体の鉛直方向の局所変位計は、接着剤を用いて供試体を挟み込むように固定する。同様に、供試体の側方方向の局所変位計についても、接着剤を用いて供試体に固定する。局所微小ひずみ試験ではこれら局所変位計を用いて、繰返し振幅ひ

ずみ ε_a 、および局所側方ひずみ ε_r を直接測定し、せん断ひずみ ε_s 、せん断剛性 G_{lss} を算出する。

また、本試験装置には、ベンダーエレメントが内蔵されているキャップとペDESTALを用いた。そのため、供試体内にせん断波を送り、せん断弾性波速度 V_s を測定すると同時に、非破壊でせん断剛性 G_{be} を算出することが可能である。なお、供試体の排水量は、非接触式のギャップセンサーを組み込んだフロート式体積計を用いて計測を行った。

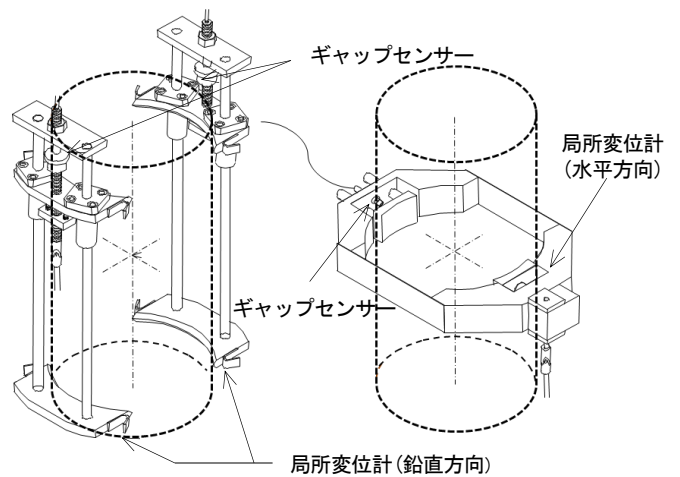


図-1 局所変位計設置図

2.2 試験ケース

本研究では長期圧密試料と比較を行うために、長期圧密試料で用いられた豊浦砂を使用する。また、相対密度 $D_r=40\%$ とする。以下に本研究で用いた試料である豊浦砂の物性値を表-1 に示す。

表-1 豊浦砂の物性値

土試料	豊浦砂
土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	2.650
最小間隙比 e_{min}	0.597
最大間隙比 e_{max}	0.990
細粒分含有率 F_c (%)	0
吸水率 (%)	-
砂分含有率 S_c (%)	100
礫分含有率 G_c (%)	0

供試体作製は漏斗堆積法と負圧法により行なった。漏斗堆積法によりモールドにゆるく試料を堆積させ、所定の相対密度、間隙になるように作製した。また、豊浦砂を自立させるため、負圧法により三軸試験装置上で作製した。

本圧密終了後、表-2 に示すひずみ振幅で排水繰返し載荷を行う。繰返し載荷は図-2 に示す方法で 10, 100, 1000 回載荷し、せん断履歴を与える。

表-2 微小繰返しせん断履歴試験ケース

	case1	case2	case3	case4
繰返し振幅ひずみ ϵ_a (%)	履歴なし	0.001	0.005	0.01

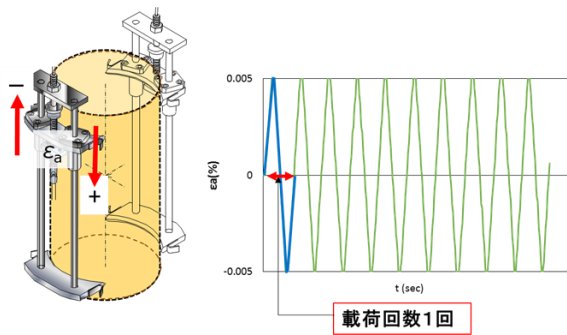


図-2 繰返し載荷方法

2.3 試験概要

本研究では、供試体内に-100kPa、供試体外に-80kPaの圧力かける二重負圧法を用いた。間隙係数 B が 0.95 を上回り、供試体が十分に飽和していることを確認した後、等方圧密を行い、以下の実験を行った。

2.3.1 液状化試験

軸ひずみ速度 0.5mm/min で、ひずみ制御により繰返しせん断載荷を行った。供試体に与える拘束圧は、初期平均有効主応力 $p'=50$ kPa(背圧 $U_b=200$ kPa)とした。なお、軸方向ひずみ $DA=5\%$ (圧縮方向と伸張方向の総和) に達した段階を液状化状態と判断した。

2.3.2 p' 一定排水三軸圧縮試験

排水単調載荷(軸ひずみ速度: 0.1mm/min)で、自動制御によりせん断を行った。供試体に与える拘束圧は、初期平均有効主応力 $p'=50, 100, 150$ kPa(背圧 $U_b=200$ kPa)とした。せん断中は有効拘束圧 p' が一定となるよう制御した。

2.3.3 LSS 試験

図-1 の局所変位計を用いて、排水単調載荷(軸ひずみ速度: 0.025mm/min)で、せん断を行った。供試体に与える拘束圧は、初期平均有効主応力 $p'=50$ kPa(背圧

$U_b=200$ kPa)とした。

せん断ひずみ ϵ_s は式(1)、せん断剛性 G_{lss} は式(2)を用いて算出する。ひずみが 0.001%以下の時、土は弾性体であると言われていることから、このときのせん断剛性 G_{lss} を初期せん断弾性係数 G_{0-lss} とする。

$$\epsilon_s = \frac{2}{3}(\epsilon_a - \epsilon_r) \quad (1) \quad G_{0-lss} = \frac{q}{3 \cdot \epsilon_s} \quad (2)$$

ここで、 q : 軸差応力 (kPa)

2.3.4 BE 試験⁶⁾

供試体内に非破壊のせん断波を送り、その速度 V_s と供試体の湿潤密度 ρ_s から、初期せん断弾性係数 G_{0-be} を式(3)より算出する。せん断波到達時間は“start-to-start”法、BE 間距離は“tip-to-tip”法を採用した。なお、BE 試験は、 p' 一定排水三軸圧縮試験と液状化試験、LSS 試験で、本圧密終了後と繰返し載荷の圧密後に実施した。

$$G_{0-be} = \rho_t V_s^2 \quad (3)$$

3. 試験結果および考察

3.1 液状化強度

繰返し載荷を 10, 100, 1000 回行ったときの砂の液状化強度曲線を図-3、図-4、図-5 に示す。また、繰返しせん断履歴を与えた砂供試体の液状化強度を図-6 に示す。図-6 より、本圧密では $\epsilon_a=0.005\%$ までは液状化強度にあまり変化が見られないことが確認できる。しかし、 $\epsilon_a=0.01\%$ で R_L の値に影響を与えることが確認された。また、繰返し載荷 10 回~100 回の液状化強度の値が更に増加したが、100 回~1000 回では液状化強度の値に変化がない結果が得られた。

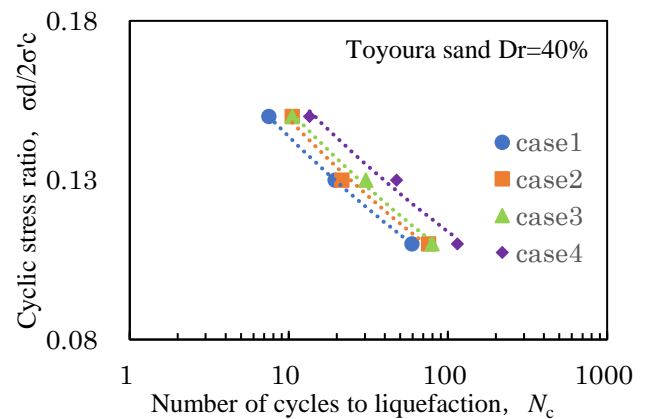


図-3 液状化強度曲線 (10 回)

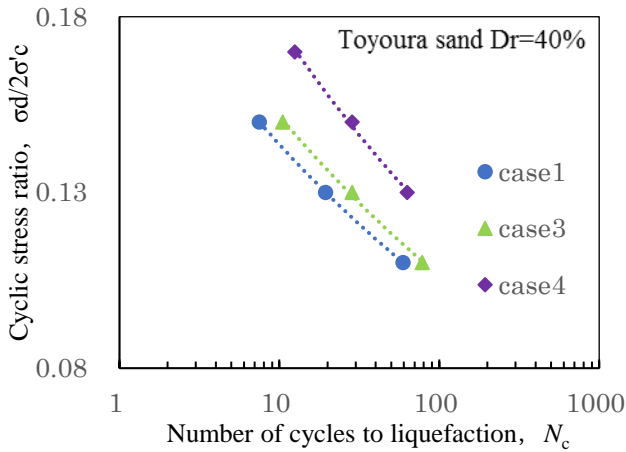


図-4 液状化強度曲線 (100回)

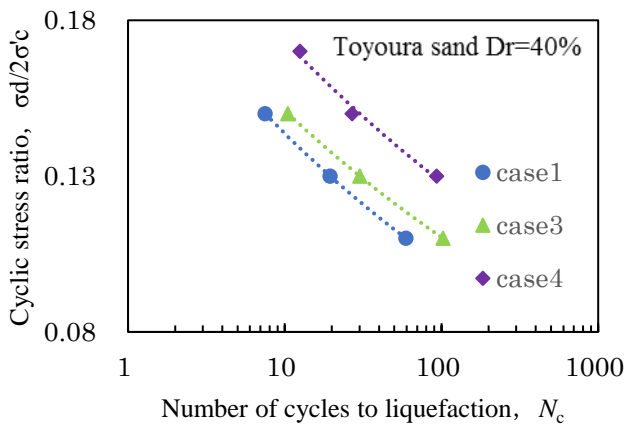


図-5 液状化強度曲線 (1000回)

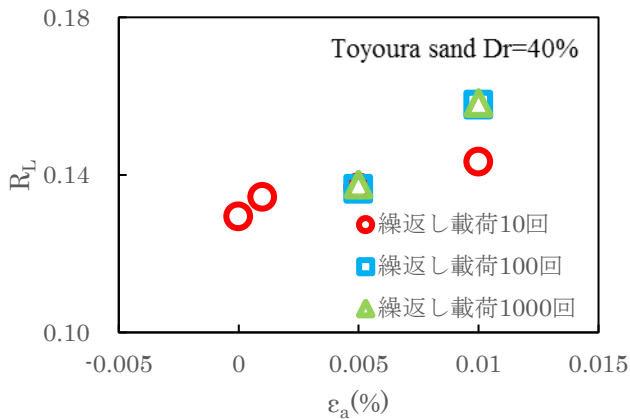


図-6 繰返し载荷を与えた砂供試体の液状化強度

3.2 繰返し履歴中の密度変化

微小繰返しせん断履歴試料では、間隙比 e に着目し、相対密度 Dr の変化によりせん断特性への影響を検討した。繰返し载荷を 1000 回行ったケースの繰返し履

歴中の相対密度の変化を図-7 に示す。最も影響が大きいと考えられる case4 で相対密度 Dr の増加は 1.0% 以下であった。繰返し履歴中の密度変化はかなり小さいことより、繰返し载荷 1000 回以下の試料では、せん断特性への密度の影響は小さいと考えられる。

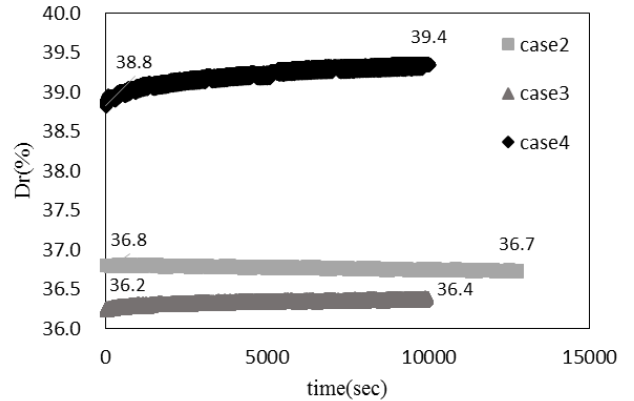


図-7 微小繰返しせん断履歴による相対密度の影響

3.3 波動伝播特性

本圧密終了後と繰返し载荷の圧密後に BE 試験を実施し、繰返しせん断履歴によるせん断剛性 G_{be} の増加率を式(4)を用いて算出する。载荷回数による G_{be} の増加率を図-8 に示す。繰返し载荷による増加率はひずみが大きい程増加し、最大で 1.11 倍の影響を受けた。

$$\frac{G_{\text{cycle_be}}}{G_{\text{c_be}}} \quad (4)$$

ここで、 $G_{\text{cycle_be}}$ ：繰返し载荷後の BE 試験より得られたせん断剛性 (MPa)、 $G_{\text{c_be}}$ ：本圧密後の BE 試験より得られたせん断剛性 (MPa)

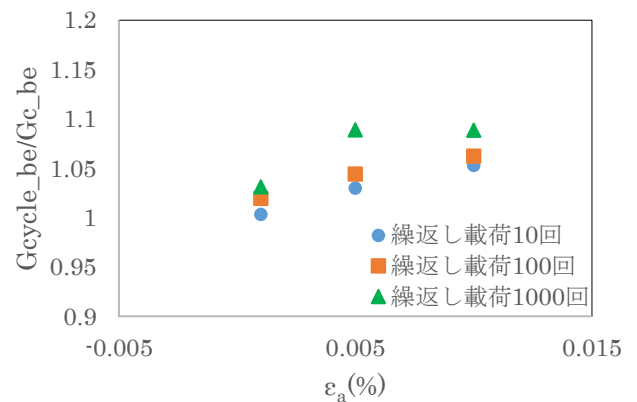
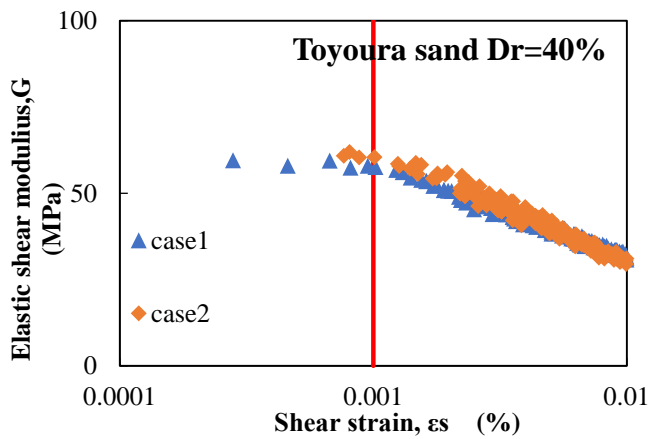


図-8 微小繰返しせん断履歴による G_{be} の増加率

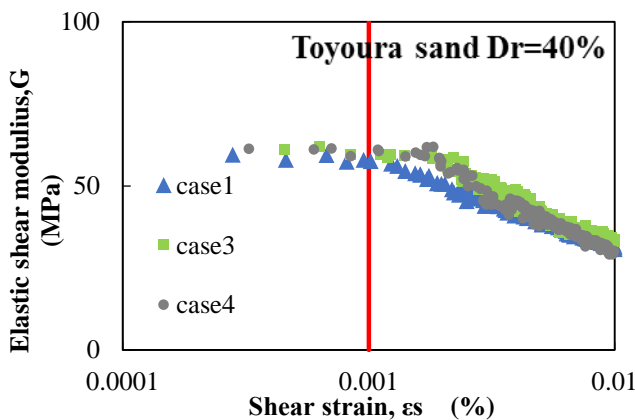
3.4 微小変位特性

繰返し载荷回数 1000 回における LSS 試験のせん断剛性 G_{1ss} とせん断ひずみ ε_s の関係を図-9 に示す。なお、図中の(a)は case1, case2, (b)は case1, case3, case4 をそれぞれまとめたものである。

case2 までは 0.001%の弾性域から徐々にせん断剛性は低下しているが、case3 と case4 では弾性域が約 0.002%伸びることが確認された。これは、弾性域 ($\varepsilon = 0.001\%$) とされているひずみより大きなひずみで繰返し载荷して履歴を与えたことにより、土粒子間がそれ以下のひずみでは変形しにくくなり、弾性域が伸びたと考えられる。



(a)



(b)

図-9 繰返し载荷による微小変形特性

4. まとめ

本研究より得られた知見は以下の通りである。

- (1) 緩い砂質土において、繰返しひずみ振幅 $\varepsilon_a = 0.01\%$ を 10 回以上与えると、液状化強度が増加した。

- (2) 繰返し振幅ひずみ $\varepsilon_a = 0.005\%$ 以上与えることでせん断剛性 G_{be} は増加し、 $\varepsilon_a = 0.01\%$ を 1000 回载荷すると 1.11 倍になった。

- (3) 弾性域 ($\varepsilon_a = 0.001\%$) 以上のひずみを与えることで、弾性域が 0.002%程度まで伸びた。

参考文献

- 1) 半澤秀郎, 岸田隆夫: 年代効果を受けた粘土の非排水強度特性, 土と基礎, Vol.30, No.12, pp. 5-10, 1982.
- 2) 土田孝, 湯怡新: 粘性土のセメンテーションによる強度発現メカニズム, 港湾技術研究所報告, Vol.38, No.2, pp.99-129, 1999.
- 3) Shibuya, S.: Assessing structure of aged natural sedimentary clays, Soils and Foundations, Vol.40, No.3, pp.1-16, 2000.
- 4) 谷本俊輔・佐々木哲也・石原雅規: 液状化判定法の課題—年代効果の問題を中心に—, 地盤工学会誌, Vol.64, No.8, pp. 18-21, 2016.
- 5) 奥村哲夫・成田国朝・大根義男: 人工的にセメンテーション効果を与えた砂の非排水繰返し強度, 土木学会論文報告書, Vol.29, No.2, pp.169-180, 1989.
- 6) 川口貴之, 三田地俊之, 澁谷啓, 佐野侑房: 室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数 G の評価, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.195-207, 2001.