

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震や2010年から2011年にニュージーランドで発生した一連の地震などの大規模な地震では、液状化や再液状化による被害が多数報告されている。東北地方太平洋沖地震では、同じ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、施工年代が若い地盤では被害が起きやすいと言われているが、年代効果の影響により土の粒子構造が変化するメカニズムは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効果により液状化強度が増加することが知られており、これまで、あらかじめせん断履歴を与えることやセメント添加により、年代効果を再現する研究が行われてきている。

一方、田中ら¹⁾は、三軸試験における圧密過程を長期に実施すると、14日～54日圧密を行った供試体において液状化試験における繰返し回数(DA=5%)が増加し、ベンダーエレメント試験によって得られるせん断波速度は長期圧密中変化しないという結果を得ている。

本研究では、長期圧密試料を年代効果再現試料で再現したいと考え、長期圧密試料と年代効果再現試料の力学特性の違いについて比較検討することを目的に、年代効果におけるセメンテーション効果とせん断履歴に着目した。そこで、手軽かつ安価なセメント添加によりセメンテーション効果を与えた供試体(以後、セメンテーション供試体)とあらかじめせん断履歴を与えた供試体力学特性を明らかにするため、せん断特性、液状化特性、波動伝搬特性、微小変形特性などの各試験を実施した。

2. 試験方法

2.1 試験装置

供試体サイズが直径5cm、高さ12.5cmの三軸試験装置を用いた。Fig. 1に局所変位計設置概略図を示す。供試体横方向の局所変位計は、接着剤により供試体に固定する構造になっている。また、鉛直方向の局所変位計についても、接着剤により供試体を挟み込むように固定している。局所微小ひずみ(LSS)試験ではこれら局所変位計を用いて、局所軸ひずみ 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 (式(1))を求める。また、せん断剛性 G は(式(2))を用いて算出する。さらに、本三軸試験装置にはベンダーエレメント(BE)が内蔵されており、

供試体内にせん断波を送ることで、非破壊で、せん断剛性 G_0 を算出できる。

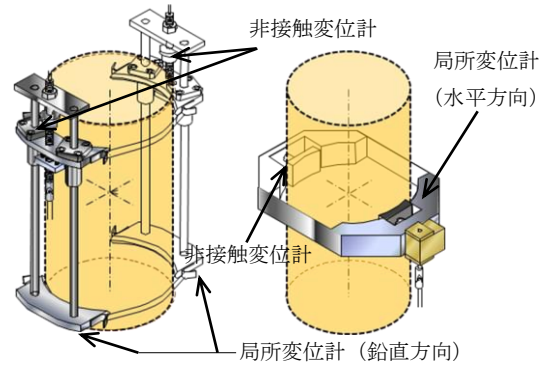


Fig. 1 局所変位計設置図

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3} \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_r) \quad (1) \quad G = \frac{q}{3 \cdot \varepsilon_s} \quad (2)$$

ここで、 q : 軸差応力、 ε_s : せん断ひずみ

2.2 試験ケース

本研究では長期圧密試料と比較するために、長期圧密試料で用いられた豊浦砂を使用し、相対密度 $D_{ri}=40\%$ とする。以下に各年代効果再現試料の供試体条件を示す。

2.2.1 セメンテーション効果を与えた供試体

セメンテーション供試体は砂供試体に添加したセメントを水和反応させないまま、三軸試験の通水過程を行うとセメント分が流出してしまう可能性が考えられる。そのため、水中養生用モールド(Fig.2)を使用し、水和反応をあらかじめ反応させてから三軸試験装置に設置する。本研究で用いるセメントは早強ポルトランドセメントを使用し、強度の増加率が大きい3日以上養生期間をとる必要があると考え、水中養生は20℃の恒温室で強度の増加が落ち着いていると考えられる4日間で行う。セメンテーション供試体におけるセメント分含有率Ccは豊浦砂の乾燥質量に対して、0%、0.1%、0.3%、0.5%、1.0%を添加し、この5ケースで各試験を行った。

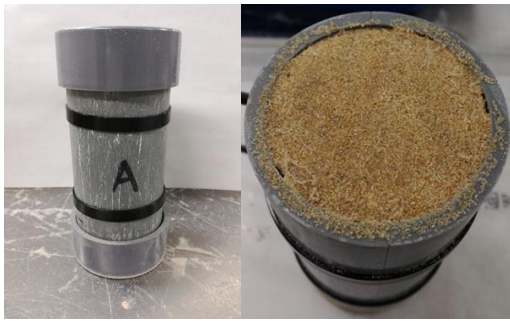


Fig.2 水中養生用モールド

2.2.2 微小繰返しせん断履歴を与えた供試体

本圧密終了後、Talbe.1 に示すケースで行う。繰返し載荷は Fig.3 に示す方法で 10, 100, 1000 回載荷し、せん断履歴を与える。

Talbe.1 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

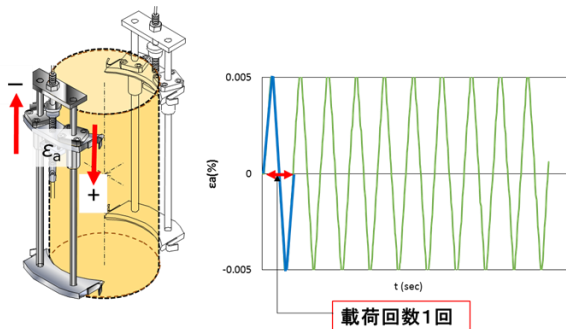


Fig.3 繰返し載荷方法

2.3 試験方法

二重負圧法により供試体を飽和させた後、背圧 200kPa を載荷し、50kPa 圧密を行い、以下の試験を行なった。

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を行い、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) でせん断を行う。せん断中、有効拘束圧 p' は一定となるよう制御した。

2.3.3 LSS 試験

Fig. 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) でせん断を行う。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 を初期せん断弾性係数 G_0 とする。

2.3.4 BE 試験²⁾

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、 G_0 を算出 (式(3)) 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、圧密終了後に実施した。

$$G_0 = \rho_t V_s^2 \quad (3)$$

3. 試験結果

3.1 セメンテーション供試体

3.1.1 液状化特性

$DA=5\%$ に達した時の繰返し載荷回数とせん断応力比により作製した液状化曲線を Fig.4 に示す。

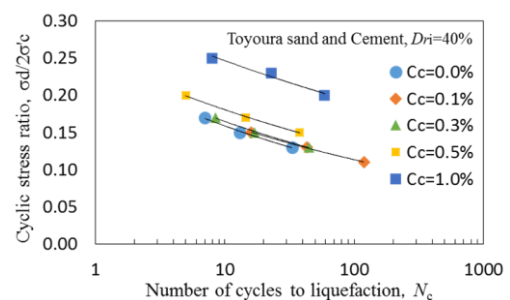


Fig.4 各セメント含有率の液状化曲線

液状化曲線上で繰返し載荷回数 20 回のせん断応力比が液状化強度 RL であり、セメント含有率との関係を Fig.5 に示す。セメント含有率が 0.5% 以上で液状化強度が増加する傾向が確認できた。これは、セメンテーション効果により砂粒子間の結合が強まり、土粒子構造が安定したと考えられる。

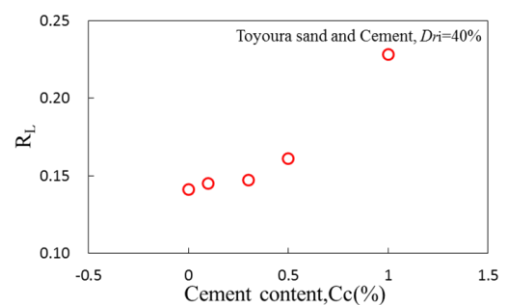
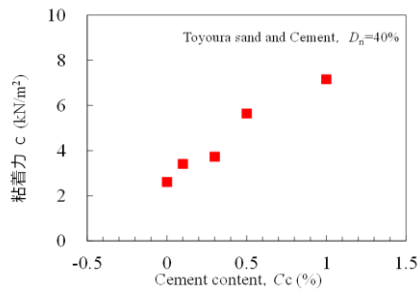


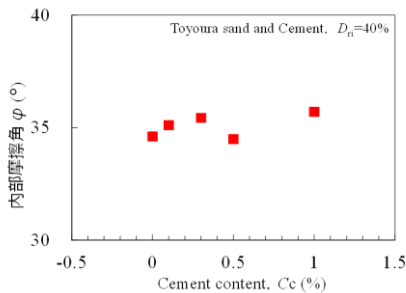
Fig.5 各セメント含有率の液状化強度

3.1.2 せん断特性

p' 一定排水三軸圧縮試験の結果によって得られた粘着力 C と内部摩擦角 ϕ とセメント含有率 Cc との関係を Fig. 6 の(a)に粘着力、(b)に内部摩擦角を示す。セメントを添加により、粘着力が増加する傾向が見られた。しかし、セメントを添加しても内部摩擦角に変化はほとんど見られない結果となった。



(a) 粘着力



(b) 内部摩擦角

Fig.6 各セメント含有率のせん断特性

3.2.3 微小変形特性と波動伝播特性

初期せん断剛性 G_0 と BE 試験により得られたせん断は速度から求めた G とのセメント含有率による影響を Fig.7 に示す。 $C_c=0.3\%$ から G が増加した。更に、セメント含有率の増加に伴いせん断剛性も増加していることから、砂粒子間の結合力がセメンテーション効果として影響を与えていると考えられる。

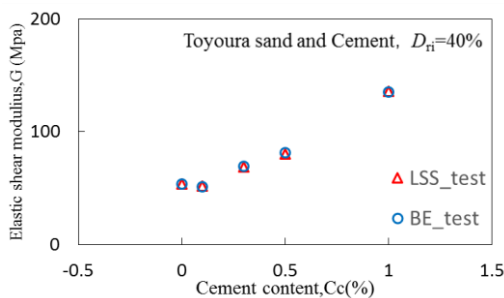


Fig. 7 Cc による G への影響

3.2 微小繰返しせん断履歴を与えた供試体

3.2.1 液状化強度

繰返しせん断履歴を与えた砂供試体の液状化強度を Fig.8 に示す。繰返し载荷を与えることで液状化強度が増加した。また、繰返し振幅ひずみ $\epsilon_a=0.01\%$ では、繰返し载荷 100 回で更に液状化強度が増加したが 1000 回での増加は見られなかった。

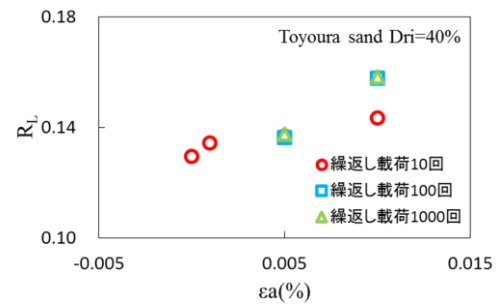


Fig. 8 Cc による G への影響

3.2.2 せん断特性

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 回行ったケースの相対密度への影響を Fig.9 に示す。相対密度に変化が見られなかったため、粘着力 C と内部摩擦角 ϕ に影響はほとんどないと考えられる。

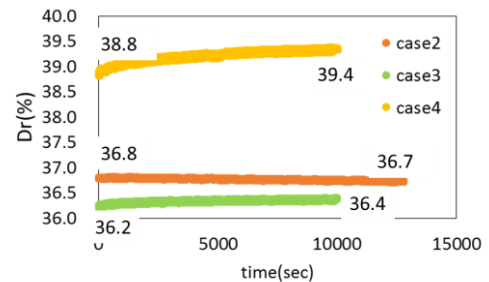


Fig.9 微小繰返しせん断履歴による Dr の影響

3.2.3 波動伝播特性

本圧密終了時と繰返し载荷後に BE 試験を実施し、繰返しせん断履歴によるせん断剛性 G の増加率を式 (4) を用いて算出する。 Fig.10 に载荷回数による G の増加率を示す。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)

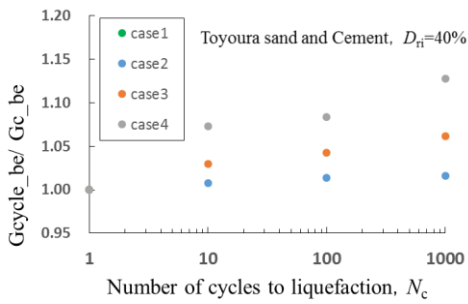


Fig. 10 微小繰り返しせん断履歴によるGの増加率

3.2.4 微小変形特性

繰返し载荷回数 1000 回における LSS 試験のせん断剛性 G とせん断ひずみ ϵ_s の関係を Fig.11 の(a)に case1, case2 を, (b)に case1, case3, case4 を示す.

case2 までは 0.001% の弾性域から徐々に G は低下しているが, case3 と case4 では弾性ひずみに約 0.002% の伸びが確認された. これは, 弾性域 ($\epsilon = 0.001\%$) 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.

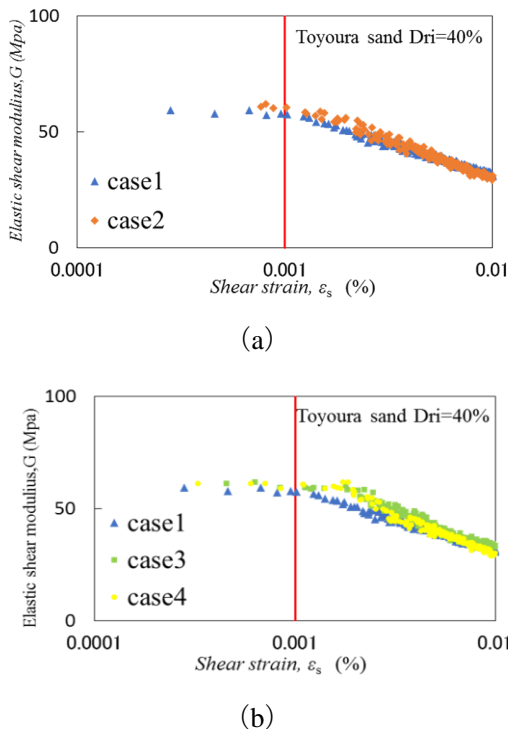


Fig. 11 繰返し载荷による微小変形特

4. まとめ

4.1 セメンテーション効果が砂の力学特性に与える影響

各試験より得られた結果から, セメント含有率 Cc によるセメンテーション効果の影響を以下に示す.

- (1) セメント含有率 Cc=0.5% 以上で, 土粒子間がセメンテーション効果により固結し, 土粒子構造が安定したため液状化強度が増加した.
- (2) 粘着力 C は, Cc=0.1% からセメンテーション効果

影響を受け, 増加する傾向が見られた.

- (3) せん断履歴 G は, Cc=0.3% からセメンテーション効果の影響を受け増加し, Cc=1.0% では 2.25 倍になった.

4.2 微小繰り返しせん断履歴が砂の力学特性に与える影響

- (1) 繰返し振幅ひずみ $\epsilon_a=0.01\%$ 与えることで液状化強度 RL が増加するが, 100 回以上の繰返し载荷を行っても変化は確認できなかった.
- (2) 繰返し振幅ひずみ $\epsilon_a=0.005\%$ 以上与えることでせん断剛性 G は増加し, $\epsilon_a=0.01\%$ を 1000 回载荷すると 1.11 倍になった.
- (3) 弾性域 ($\epsilon_a=0.001\%$) 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.

5. 結論

以上の結果を用いて, 既往の研究である長期圧密試験とセメンテーション及び微小繰り返しせん断履歴が砂の力学特性に与える影響を比較したものを Table.2 に示す.

Table.2 各供試体が砂の力学特性に与える影響

供試体条件		長期圧密	セメンテーション	繰返しせん断履歴
液状化強度	RL	増加	増加	増加
供試体条件		長期圧密	セメンテーション	繰返しせん断履歴
せん断特性	C		増加	変化なし
	Φ		変化なし	変化なし
せん断剛性	G	変化なし	増加	微増
弾性域		伸びる	変化なし	伸びる

各供試体において, 液状化強度に影響を与えていることが確認できる. セメンテーション効果は, 長期圧密試験では変化が見られていない, 粘着力とせん断剛性に増加が確認され液状化強度を増加させるメカニズムにおいて長期圧密とは異なる挙動を示した. 微小繰り返しせん断履歴は, 長期圧密で確認された弾性域の伸びを確認することができたが, せん断剛性を与えるひずみが大きい程, 増加する傾向がある. よって, 現段階の長期圧密試験の再現はセメンテーション効果及び, 微小繰り返しせん断履歴では不可能である. しかし, 長期圧密を 54 日以上実施して, せん断剛性の増加が確認されるようなら, 微小繰り返しせん断履歴を与えることにより長期圧密を再現できる可能性があると言える.

参考文献

- 1) 田中将平: 長期圧密が砂の力学特性に与える影響, 修士論文
- 2) 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, pp195~207,