

礫混じり砂のせん断弾性係数と液状化強度に与える礫粒度の影響

地盤工学研究室 檀原 志織
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

液状化は、地下水位が高く、緩く堆積した砂地盤で一般的に発生する。しかし、過去に発生した北海道南西沖地震や兵庫県南部地震では、礫を含んだ地盤で液状化が発生した。砂に関する液状化の研究はこれまでに多く行われてきているが、礫を含んだ地盤に関する研究はほとんどない。また、液状化の発生を抑制する対策工法の1つにプレローディング工法がある。これは、あらかじめ地盤を過圧密状態にし、密度を増大させて液状化強度の増大をはかる工法である。しかし、砂は静的载荷によって密度があまり増加しないため、砂地盤で効果を発揮するメカニズムは不明確である。

これらを踏まえて本研究では、礫分含有率 G_c 、過圧密比 OCR 、礫の粒度に着目し、それぞれのパラメータが液状化特性や波動伝播特性、微小変形特性に及ぼす影響について調べた。試験は、年代効果や乱れの影響を受けない理想的な状態として、室内で砂に礫を混ぜた供試体を作製し、 V_s を求めることができるベンダーエレメント (BE) 試験と、変形係数が得られる微小ひずみ測定 (LSS) 試験を行った。

2. 試験概要

供試体サイズが直径 10cm、高さ 20cm の中型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、バネ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は O リングの拘束力により供試体を挟み込むように設置している。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 (式(1)) を求める。せん断弾性係数 G は式(2)を用いて算出する。

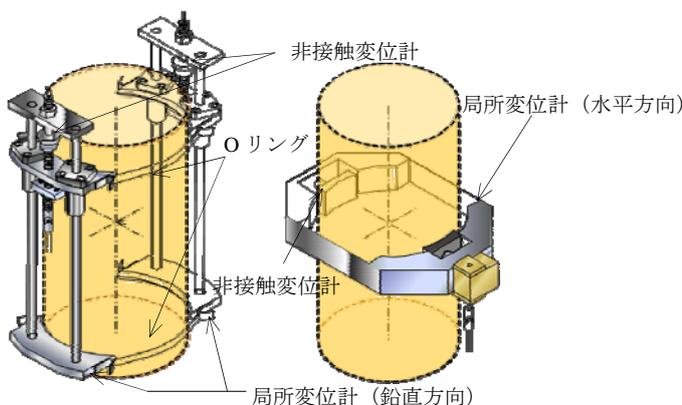


Fig. 1 局所変位計設置図

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

ここで、 q : 軸差応力、 ε_s : せん断ひずみ

(1) 試験ケース

使用する礫の粒度を、2~4.75mm ($G_{max}=4.75mm$) と 4.75~9.5mm ($G_{max}=9.5mm$) とした。各 G_{max} でそれぞれ液状化試験と微小ひずみ試験を実施する。 G_c については最低限のケースで傾向をつかむため、 $G_c=0\%$ 、20%、40%とし、さらに各 G_c で $OCR=1, 2, 4$ の試験ケースを行う。

OCR は、① 有効拘束圧 $\sigma_c' = 50kPa$ で予備圧密 $\rightarrow \sigma_c' = 200kPa$ で圧密 $\rightarrow \sigma_c' = 100kPa$ まで排水除荷 ($OCR=2$)、② $\sigma_c' = 50kPa$ で予備圧密 $\rightarrow \sigma_c' = 400kPa$ で圧密 $\rightarrow \sigma_c' = 100kPa$ まで排水除荷 ($OCR=4$) という流れで拘束圧を制御することにより変化させた。

(2) 礫分を用いたケースの間隙比調整

供試体の間隙比調整は、 $D_r=75\%$ の豊浦砂の乾燥密度 ρ_d を基準に、Walker・Holtz の礫補正式¹⁾で、礫とそれ以外の土の乾燥密度 ρ_{d0} を算出し、礫補正した乾燥密度 ρ_{d0}' を用いて供試体全体の質量を求めた。

$$\rho_{d0}' = \frac{\rho_{d0}\rho_{d1}}{P\rho_{d0}/100 + (1-P/100)\rho_{d1}} \quad (3)$$

ここに、

ρ_{d0} : 礫以外の土の乾燥密度 (g/cm³)

ρ_{d1} : 礫粒子の乾燥密度 (g/cm³)

ρ_{d0}' : 礫とそれ以外の土の混合物の乾燥密度 (g/cm³)

$P (=G_c)$: 礫分混入割合 (%)

(3) 試験方法

液状化試験は、軸ひずみ速度 1%/min の条件で、ひずみ制御により繰返しせん断を行った。本研究では、軸方向ひずみ $DA=2\%$ (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。これは、本来なら $DA=5\%$ に達した段階を液状化状態と定義²⁾ することが多いが、礫分含有率が大きくなるとネッキングの影響で $DA=5\%$ に至らない場合があるためである。微小ひずみ測定試験は、供試体に局所変位計を設置し、軸ひずみ速度 0.05%/min の条件で、圧密排水条件で単調载荷を行うものである。軸ひずみ 1% に達した段階で軸ひずみ速度を 0.5%/min に変更し、ピーク強度の測定に移行した。なお BE 試験は、液状化試験と微小ひずみ測定試験で、所定の有効拘束圧で圧密後に実施した。

(4) 供試体作製方法

試験で用いた供試体は、乾燥締固め法を採用した。炉乾燥させた豊浦砂と礫を、所定の供試体重量を計算後、10層に分け、各層の粒子の配向性を無くすため、直径 0.3cm の棒で突き刺すように締め固める方法である。負圧法を用いて供試体を自立させた。また、ベンダーエレメントの周りに空隙が

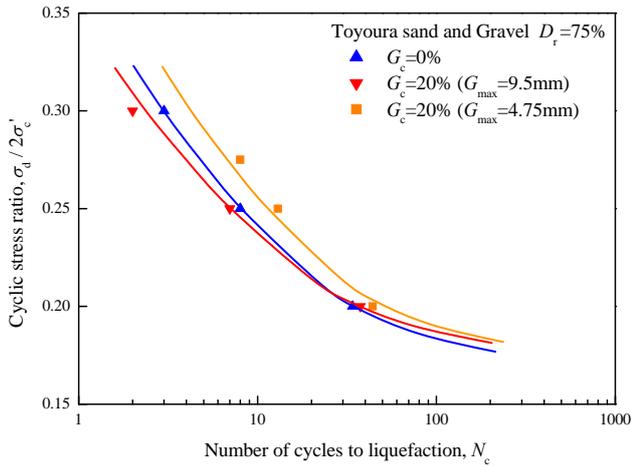


Fig. 2 砂および礫混じり砂の液状化強度曲線 (OCR=1)

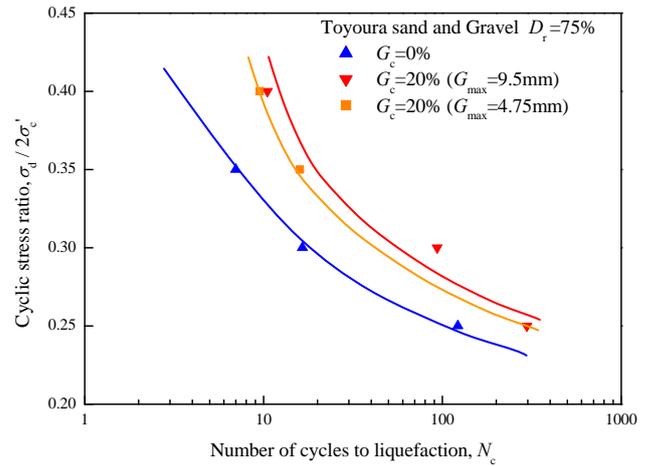


Fig. 3 砂および礫混じり砂の液状化強度曲線 (OCR=2)

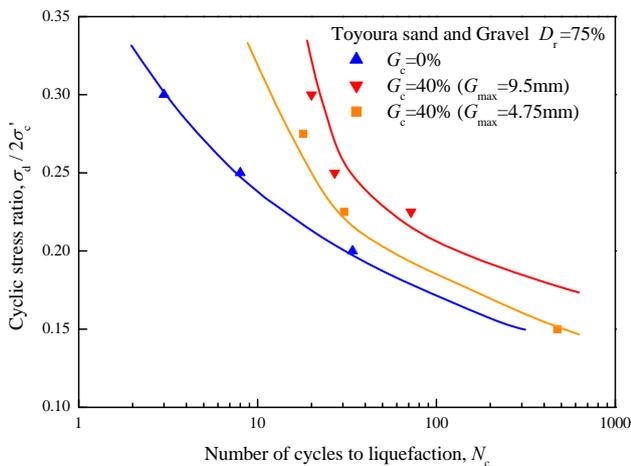


Fig. 4 砂および礫混じり砂の液状化強度曲線 (OCR=1)

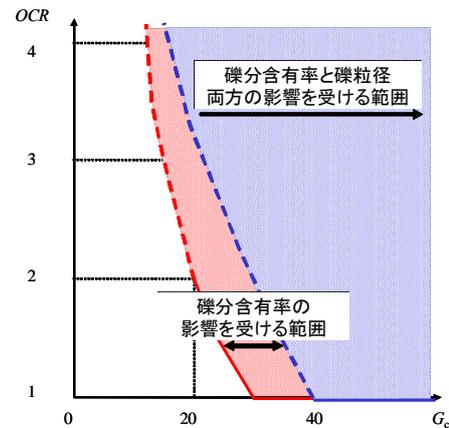


Fig. 5 各パラメータと液状化強度の影響線

できないようにするため、供試体上下1層を豊浦砂のみの層としてキャッピングを行った。

4. 試験結果

(1) 過圧密された礫混じり砂の液状化特性

密詰めめの砂と礫混じり砂 ($G_c=20\%$) を対象とした飽和非排水繰返し三軸試験の試験結果について、軸方向ひずみ $DA=2\%$ の時の繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ と、繰返し载荷回数 N_c の関係を Fig. 2, 3 に示す。図より、 $OCR=1$ のケースでは、 $G_c=0\%$ と 20% で液状化強度に大きな差は見られない。しかし $OCR=2$ になると、 $G_c=0\%$ よりも $G_c=20\%$ の方が、液状化強度が大きくなるのがわかった。また、密詰めめの砂と礫混じり砂 ($G_c=40\%$) を対象とした飽和非排水繰返し三軸試験の試験結果について Fig. 4 に示す。図より、 $G_c=40\%$ のケースでは、 $OCR=1$ でも $G_c=0\%$ より液状化強度が大きい。加えて、粒径の大きいケース ($G_{max}=9.5\text{mm}$) の方が、粒径の小さいケース ($G_{max}=4.75\text{mm}$) より液状化強度は大きくなった。

これらの結果をまとめたものを Fig. 5 に示す。Fig. 5 は礫分含有率と礫粒径が液状化強度 R_L に影響を与える範囲を示している。この図より、 OCR が小さいケースにおいては、礫分含有率 G_c が小さい範囲 ($G_c=20\%$) では液状化強度は $G_c=0\%$ の場合とほとんど変わらず影響はないと言える。しかし $OCR=2$ のケースでは $G_c=20\%$ でも、液状化強度は $G_c=0\%$ の場

合より大きくなっていることが読み取れる。つまり、 $OCR=1$ では礫分が $G_c=30\%$ 以上で液状化強度に礫分の効果が現れるが、 OCR が大きくなると $G_c=20\%$ でも影響が見られるようになった。これらのことから、液状化強度は礫分含有率と OCR に大きく影響されており、礫分を含んだ砂では G_c と OCR の相乗効果で、大きな液状化強度を発揮すると考えられる。すなわち、礫混じり砂においてプレローディングは、過圧密効果と礫分効果の両効果が期待できる場合があり、液状化対策として有効であるといえる。

(2) 波動伝播特性と微小変形特性

(a) BE 試験

礫分含有率がせん断弾性波伝播に与える影響を調べるために、中型三軸試験装置を用いて波動伝播法によるせん断波測定試験 (以下、BE 試験という) を行い、せん断弾性係数を求める。BE 試験によるせん断弾性波速度 V_s (m/sec) は次式で求めた。

$$V_s = \frac{L}{\Delta t} \quad (4)$$

ここで、せん断波到達時間 Δt (sec) は、”start-to-star” 法²⁾を用いて波形記録から同定することとした。BE 間距離 L (= 供試体高さ H - 供試体貫入長 L_c , cm) は、対になる BE 先端間の距離をとる ”tip-to-tip” 法²⁾を採用した。また、せん断弾性係数 G_0 は次式で算定した。

$$G_0 = \rho_t V_s^2 \quad (5)$$

ここで、 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$ は土の湿潤密度である。

・試験結果

BE 試験は、礫分含有率を 0, 20, 40%に調整した供試体を、それぞれ $p' = 100 \sim 400 \text{ kPa}$ で圧密後と $p' = 100 \text{ kPa}$ に除荷後 ($OCR=2, 4$) において、排水量が落ち着いたことを確認し、非排水条件で実施している。

Fig.6 は、礫分含有率を 0, 20, 40%と変化させたケースの V_s と礫分含有率の関係を示している。図より、BE 試験で求めた V_s は、礫分含有率が増加するにつれて上昇している。また、 V_s の値は $G_c=20\%$ までの範囲では礫粒径の大きさによらずほぼ一緒であり、 $G_c=40\%$ になると、礫粒径の大きい方の V_s が大きくなった。

Fig.7 は OCR を変化させたケースのせん断波速度と OCR の関係である。図より、 OCR を変化させても、 V_s は変化していないことが分かる。この傾向は、他の礫分含有率のケースにおいても同様であった。

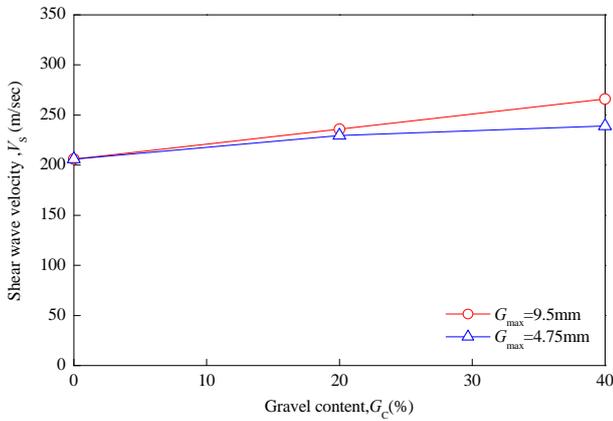


Fig. 6 せん断波速度と礫分含有率の関係 ($OCR=1$)

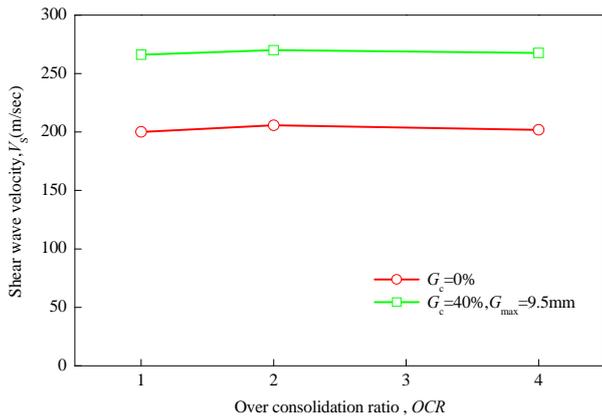


Fig. 7 せん断波速度と OCR の関係

(b)LSS 試験

局所変位計付き中型三軸試験装置を用いて局所ひずみ測定試験 (Local Small Strain 以下、LSS 試験という) を行い、せん断弾性係数 G_0 (MPa) を求めることを目的とする。

LSS 試験では、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、微小領域のせん断ひずみを求める。なお ε_a は、ベッティングエラーを軽

減させるため Fig.8 に示すように供試体上下 2.5cm 離れた $H_s=15\text{cm}$ の範囲の軸変位を計測した。

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r \quad (6)$$

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3} \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_r) \quad (7)$$

ここで、 q : 軸差応力、 ε_s : せん断ひずみである。これより各種変形係数を求める。

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad (8)$$

$$E = \frac{q}{\varepsilon_a} \quad (9)$$

$$G = \frac{q}{3 \cdot \varepsilon_s} \quad (10)$$

ここで、 ν : ポアソン比、 E : ヤング係数、 G : 土のせん断弾性係数である。

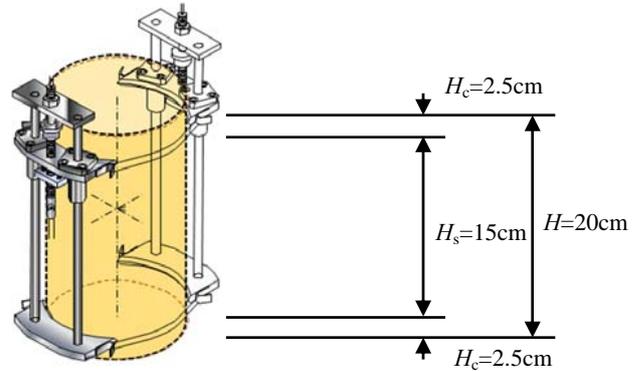


Fig. 8 ベッティングエラーを考慮した局所変位計設置位置

・試験結果

Fig.9, 10 は、LSS 試験で得られた初期せん断弾性係数 G_0 (軸ひずみ $10^{-3}\%$ におけるせん断弾性係数)と礫分含有率 G_c , 礫粒径の関係について示したものである。図より、せん断弾性係数 G_0 は礫分含有率 G_c が増加するにつれて上昇していることが分かる。また、 $OCR=1, 4$ 共に、せん断弾性係数 G_0 は $G_c=20\%$ までの範囲で礫粒径の大きさによらず、ほぼ同じであり、 $G_c=40\%$ になると、礫粒径の大きい方の G_0 が大きくなった。この傾向は Fig.6 のせん断波伝播特性と等しい傾向である。また Fig.11, 12 は、 $G_c=0\%$ と $G_c=40\%$ ($G_{\max}=9.5\text{mm}$) で OCR に着目した割線せん断弾性係数とせん断ひずみの関係である。図より、 $G_c=0\%$ では、過圧密効果による剛性の変化はあまり見られない。しかし、 $G_c=40\%$ ($G_{\max}=9.5\text{mm}$) では、 OCR の大きいほうが、せん断弾性係数が大きくなっていることがわかる。

以上の結果からも、(1) で述べたように、礫混じり砂においてプレローディングは、過圧密効果と礫分効果の両効果が期待できることが言える。

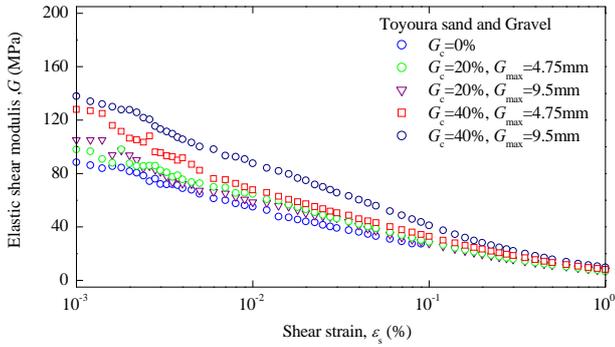


Fig.9 割線せん断弾性係数とせん断ひずみの関係 (礫分含有率, 礫粒径を変化させたケース : OCR=1)

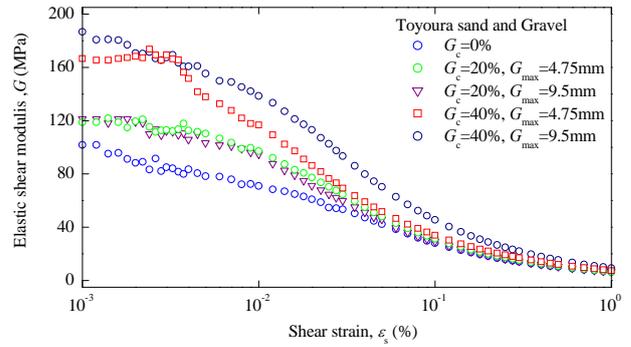


Fig.10 割線せん断弾性係数とせん断ひずみの関係 (礫分含有率, 礫粒径を変化させたケース : OCR=4)

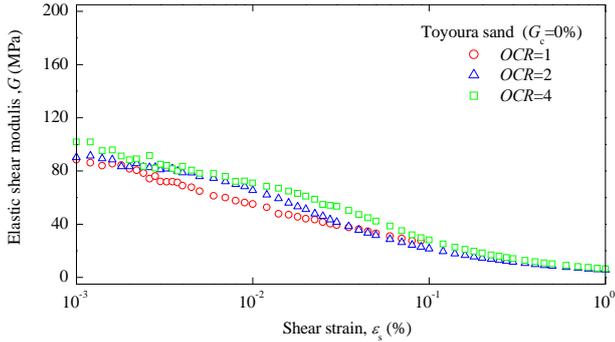


Fig.11 割線せん断弾性係数とせん断ひずみの関係 (OCRを変化させたケース : G_c=0%)

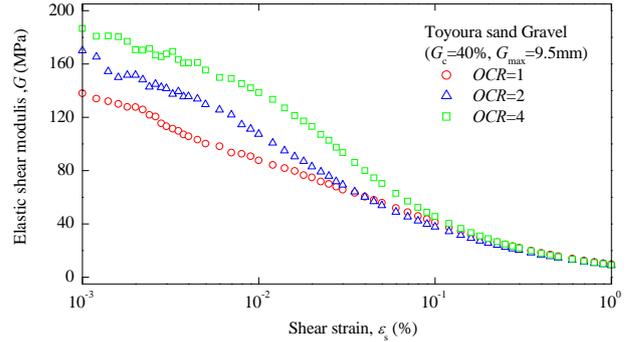


Fig.12 割線せん断弾性係数とせん断ひずみの関係 (OCRを変化させたケース : G_c=40%, G_max=9.5mm)

(3)液状化強度とせん断弾性係数の関係

液状化強度 R_L と, BE 試験で得られる V_s から算出するせん断弾性係数 G_0 , 0.003%割線せん断弾性係数³⁾ の関連性を調べた. Fig.13 は V_s から得られるせん断弾性係数と液状化強度の関係を表している. 図より, V_s から算出する G_0 では V_s が OCR の影響をほとんど受けないため, 液状化強度の推測に結びつけることは困難であると言える. 次に, Fig. 14 は 0.003%割線せん断弾性係数と液状化強度の関係を表したものである. 図より, 割線せん断弾性係数では液状化強度と直線的な関係があることが確認できたため, どのひずみレベルで特に高い相関性を示すかを検討した. その結果, Fig.14 の 0.003%ひずみレベルでは割線せん断弾性係数 $G_{0.003}$ と R_L の関係はばらつきがやや大きいものに対し, Fig.15 に示す 0.009%ひずみレベルの場合ではばらつきが小さく収まった. 0.009%前後のひずみレベルを調べたところ, 同程度のばらつきに収まった範囲は 0.008~0.010%ひずみレベルであり, この範囲が液状化強度と特に高い相関性が見られることが明らかとなった.

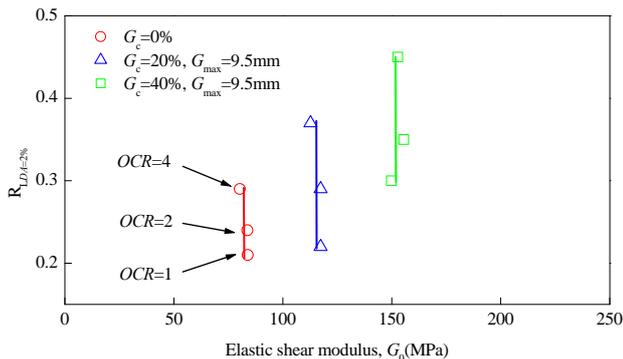


Fig.13 V_s から得られるせん断弾性係数と液状化強度

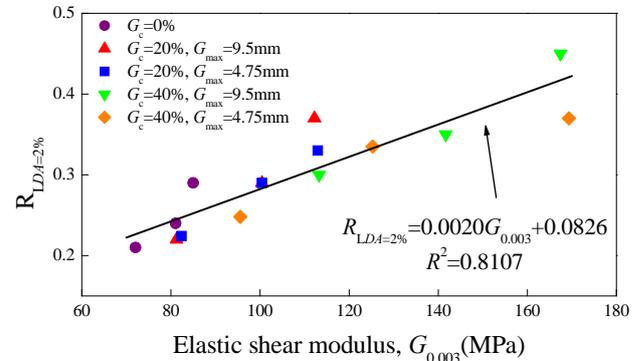


Fig.14 0.003%割線せん断弾性係数と液状化強度

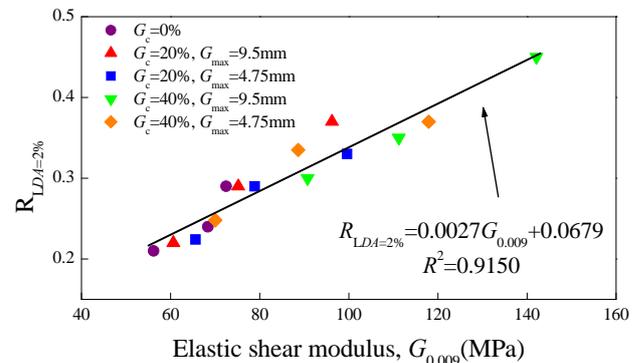


Fig. 15 0.009%割線せん断弾性係数と液状化強度

5. せん断波速度と間隙比の関係

Fig.16～Fig.18 は、BE 試験と LSS 試験で得られたせん断弾性係数と間隙比の関係を示している。図には、礫分のない豊浦砂で得られた G_0 から定数を決定した、経験式による線も図示している。一般的にこの関係式⁴⁾は、同じ試料を用いて間隙比を変化させた場合の間隙比とせん断波速度で導き出される関係式であるが、礫含有率や礫粒径を変化させた場合でも成り立つことが図より分かる。過圧密比を大きくした場合には礫分の大きい範囲で関係式からやや遠ざかるものの、この式を用いることにより、礫を含まない供試体でせん断弾性係数を求めれば、礫を含む供試体のせん断弾性係数を間隙比によって推定できる可能性がある。

$$G_0 = 6400F(e)(\sigma'_0)^{0.5} \quad (11)$$

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \quad (12)$$

ここに、

G_0 : せん断弾性係数 (kPa) σ'_0 : 有効拘束圧 (kPa)

$F(e)$: 間隙比関数

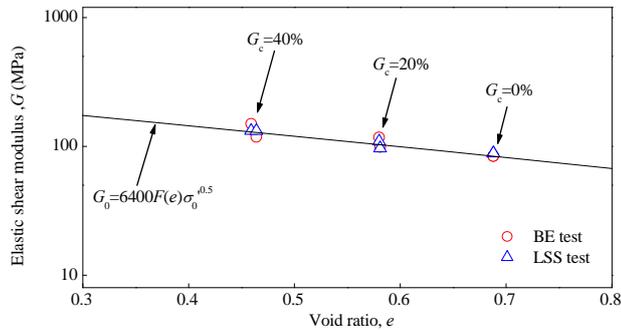


Fig. 16 せん断弾性係数と間隙比の関係(OCR=1)

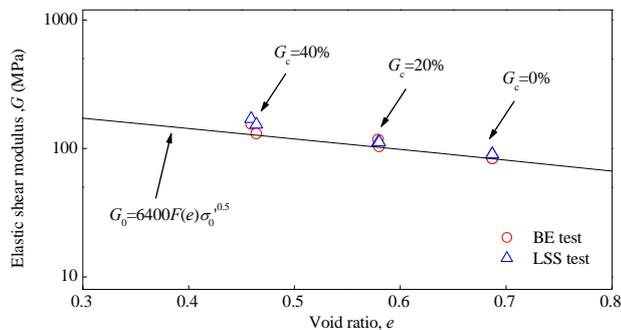


Fig. 17 せん断弾性係数と間隙比の関係(OCR=2)

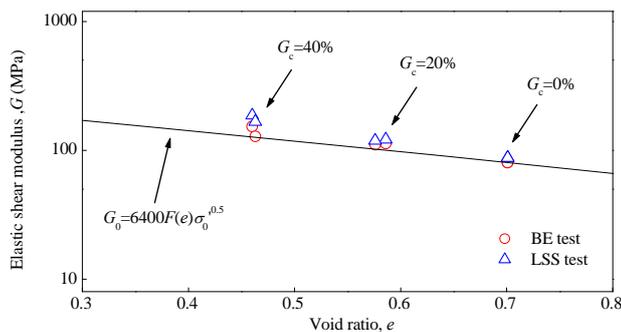


Fig. 18 せん断弾性係数と間隙比の関係(OCR=4)

6. 実務への応用

液状化強度と高い相関性が見られたひずみレベル (0.008～0.010%) の割線せん断弾性係数 $G_{0.008} \sim G_{0.010}$ を用いることで、礫分や応力履歴を受けた地盤の液状化強度を推定できる可能性があると言える。実地盤のせん断弾性係数 G_0 に関しては、PS 検層などから得たせん断波速度 V_s から G_0 を算出する方法があるが、あるひずみレベルの G を測定する地盤調査法はない。そこで、割線せん断弾性係数を初期せん断弾性係数で正規化して、OCR で場合分けした正規化 $G-\varepsilon_s$ 関係を Fig.16 に示した。推定方法としては、Fig.19 の関係を用いて、求めたいひずみレベルの割線せん断弾性係数 (ここでは、 $G_{0.009}$) の初期せん断弾性係数 G_0 からの低下率 (図より、低下率=0.6) を調べる。次に、原位置試験で得られた V_s から算出した G_0 を、低下率を用いて $G_{0.009}$ へ変換する。そして $G_{0.009}$ を Fig.15 に示した関係式に代入することで、 R_L が推定できる。なお、Fig.19～21 に示すように、低下率は OCR 毎に異なることが明らかである。そのため、この関係を適用する際には応力履歴を考慮して推定する必要がある。また、この低下率は G_c と礫粒径を 1 つにまとめた平均の値となっている。つまり、この方法では G_c 毎や粒径等で V_s の値に差が見られなければ液状化強度に差は現れないことになる。しかしながら、BE 試験結果からでも、 R_L はほぼ推定できることが確認でき、この場合分けは妥当であるといえる。

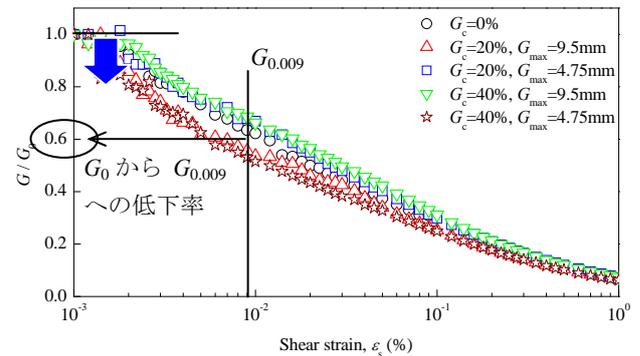


Fig. 19 正規化 $G-\varepsilon_s$ 関係(OCR=1)

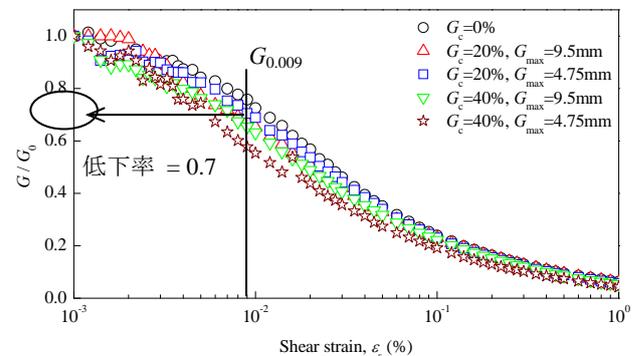


Fig. 20 正規化 $G-\varepsilon_s$ 関係(OCR=2)

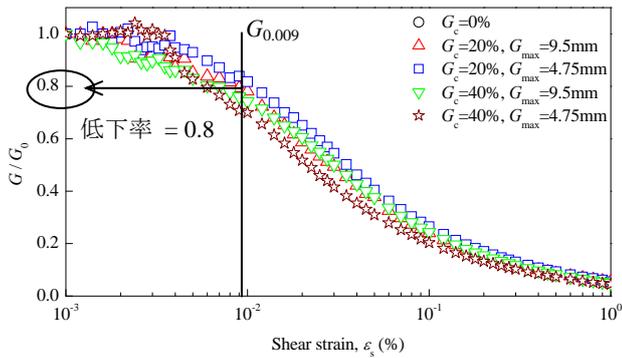


Fig. 21 正規化 $G-\varepsilon_s$ 関係($OCR=4$)

6. 結論

(1)砂及び礫混じり砂の液状化特性について

過圧密比が大きくなると、礫分が少なくても、液状化強度に影響を及ぼすようになることを影響線で示すことができた。この結果から、礫混じり砂においてプレローディングは、過圧密効果と礫分効果の両効果が期待できる場合があり、液状化対策として有効であることが明らかとなった。

(2)液状化強度とせん断弾性係数の関係について

液状化強度 R_L は、せん断ひずみ $0.008 \sim 0.010$ %の割線せん断弾性係数 $G_{0.008} \sim G_{0.010}$ と良い相関性があるといえる。つまり、この割線せん断弾性係数から液状化強度を推定することができる可能性がある。そこで、割線せん断弾性係数を初期せん断弾性係数で正規化して、 OCR で場合分けした正規化 $G-\varepsilon_s$ 関係を示した。この関係と原位置調査結果 (V_s) を用いることで、液状化強度を推定する手法を示すことができた。

参考文献

- 1) 社団法人土質工学会編：土質試験法（第2回改訂版），pp. 291-294，1979.
- 2) 永瀬英生，岡二三生：3.液状化メカニズムの定義，土と基礎，講座 液状化メカニズム・予測法と設計法，pp.47-50，2002.
- 3) 中村浩士：礫混じり砂のせん断剛性と液状化強度に与える礫分の影響，長岡技術科学大学大学院 工学研究科修士論文，pp.138-150
- 4) Kokusho, T.: Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, Soils and Foundations, Vol.20, No.2, pp.45~60, 1980.