

礫混じり砂の変形特性を考慮した液状化強度推定手法

地盤工学研究室 大森 洋介
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発生するのが一般的である。しかし1995年に発生した兵庫県南部地震では、礫質土地盤が液状化したことが報告されている。この地震後、礫質土でも液状化判定が必要となり、現在 N 値による液状化強度推定手法が提案されているが、礫質土地盤において N 値の適用には誤差が大きいのが現状である。

また、液状化判定業務では、ボーリング孔を用いた PS 検層も用いられている。この試験から得られるせん断波速度 V_s は、 N 値や土の物性値と関係性が高いパラメータであり、その関係を活用した地盤健全性評価システムの開発も進められている。調査対象地盤において、原位置の液状化強度を正確に求めるためには不攪乱試料を凍結サンプリングする必要がある。しかしながら、凍結サンプリングは大変高価であり、適用できる機会はほとんどない。そこで本研究では、せん断波速度 V_s やせん断弾性係数 G から、サンプリングが難しい礫混じり砂の液状化強度を正確に判定できるかについて検討する。実験では、礫分量をパラメータとし、飽和非排水繰返し三軸試験（液状化試験）や V_s を求めることができるベンダーエレメント (BE) 試験、変形係数が得られる局所微小ひずみ測定 (LSS) 試験を行った。また、豊島らの研究で行ってきた、豊浦砂部分の初期相対密度 $D_{ri}=75\%$ での結果²⁾と比較するため、 $D_{ri}=35\%$ に設定し、密度の違い、加えて過圧密比による影響についても検討した。それぞれの試験において、砂に礫を混ぜて作製し、年代効果や乱れの影響を受けない理想的な状態の同一供試体を用いることで、試験結果を比較・検討する。

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、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。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。

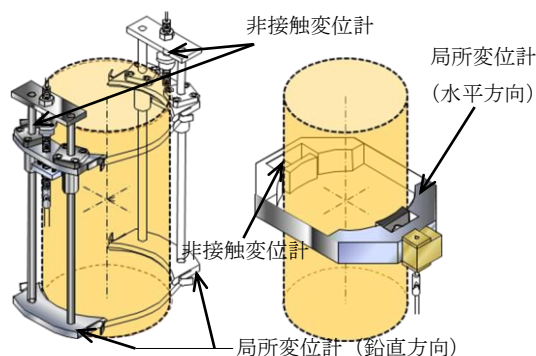


Fig. 1 局所変位計設置図

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

ここで、 q : 軸差応力、 ε_s : せん断ひずみ

(1) 試験ケース

使用する礫は、4.75~9.5mm に粒度調整した角礫を用いた。また、礫分含有率 G_c を 0%, 10%, 20%, 30%, 40% と変化させ、これらの影響を調べる。供試体には、背圧 200kPa を載荷し、圧密応力 100kPa の等方状態からせん断を開始する。

(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、相対密度 $D_{ri}=35\%$ の豊浦砂の乾燥密度 ρ_d を基準に、Walker・Holtz の礫補正式³⁾ (式(3)) 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。これにより、砂骨格部分の D_{ri} を保ったまま、礫分量を変化させることができ、砂に対する純粋な礫分混入の影響を調べることができる。

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

ここに、

- ρ_{d0} : 礫以外の土の乾燥密度 (g/cm^3)
- ρ_{d1} : 礫粒子の乾燥密度 (g/cm^3)
- ρ_{d0}' : 礫とそれ以外の土の混合物の乾燥密度 (g/cm^3)
- P : 礫分混合率 (%)

(3) 供試体作製方法

試験で用いた供試体は、炉乾燥させた豊浦砂と礫を、非常に緩く堆積させた後、ハンマーで側面を軽く叩き、所定の密度まで締め固めることで作製した。また、端面を滑らかにするために、BEの周りに空隙が生じないようにするために、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) 試験方法

二重負圧法により供試体を飽和させた後、圧密を行い、以下の試験を行なった³⁾。

① 供試体の過圧密化

OCRは、先行圧密応力をせん断試験前の圧密応力で除したものとする。二重負圧法により供試体を飽和させた後、所定のOCRになるように、圧密、除荷を行う。

② 液状化試験

軸ひずみ速度1mm/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。

③ LSS試験

Fig. 1の局所変位計を用いて、排水単調载荷(軸ひずみ速度:0.05mm/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 G を初期せん断弾性係数 G_0 とする。

④ BE試験⁴⁾

供試体内にせん断波を送り、その速度(V_s)と供試体の湿潤密度 ρ_t から、 G_0 を算出(式(4))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、液状化試験とLSS試験は、別供試体で行っているが、BE試験は、液状化試験とLSS試験において、圧密後に実施している。

$$G_0 = \rho_t V_s^2 \quad (4)$$

3. 試験結果

(1) 礫混じり砂の液状化特性

礫分含有率 G_c を、0%、10%、20%、30%、40%と変化させたときの液状化強度曲線の $OCR=1$ の場合をFig. 2に $OCR=4$ の場合をFig. 3に示す。ここで、軸方向ひずみ $DA=5\%$ での繰返し载荷回数が20回に相当する繰返しせん断応力比を液状化強度 R_L と定義した。これらふたつのグラフを比べると、過圧密比の影響により R_L が増加することがわかる。加えて、礫分含有率が大きくなると、過圧密による影響も大きくなることを見て取れた。この傾向は $D_{ri}=75\%$ の状態と同様の傾向を示した。

Fig. 4, Fig. 5に、繰返しせん断応力比 $\sigma_d'/2\sigma_c'$ と G_c の関係を示す。豊浦砂供試体の R_L と礫混じり砂供試体の R_L を比較することで、礫分混入の影響がわ

かる。なお、図中には、豊浦砂供試体($G_c=0\%$)の R_L を破線による補助線で示す。図より、 $OCR=1$ の場合では $G_c=20\%$ まではほぼ液状化強度が変化せず、 $G_c=30\%$ 以上で R_L の増加が見られた。これに対しての $OCR=4$ 場合ではの G_c 増加に従い、 R_L の増加が見られた。

以上より、緩い礫質地盤では $G_c=20\%$ から礫分混入の影響が出始め、 $G_c=40\%$ では、礫分混入による影響が顕著になると言える。これらの傾向は密な礫地盤でも同様の傾向が見られた。

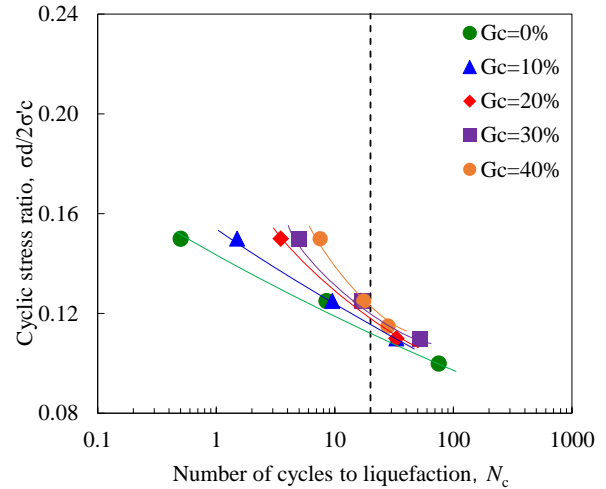


Fig. 2 液状化強度曲線 (礫分含有率別)

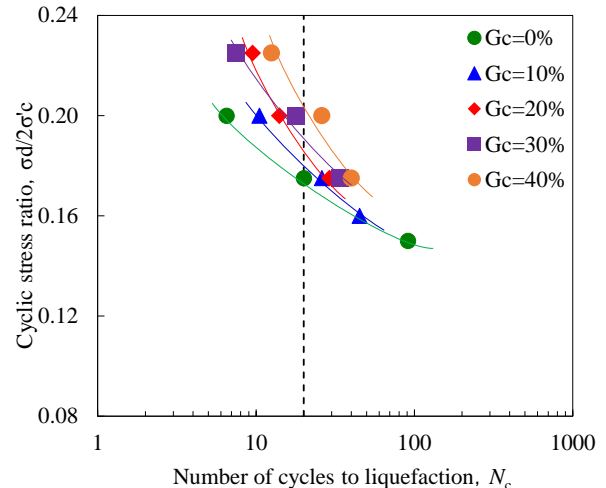


Fig. 3 液状化強度曲線 (礫分含有率別)

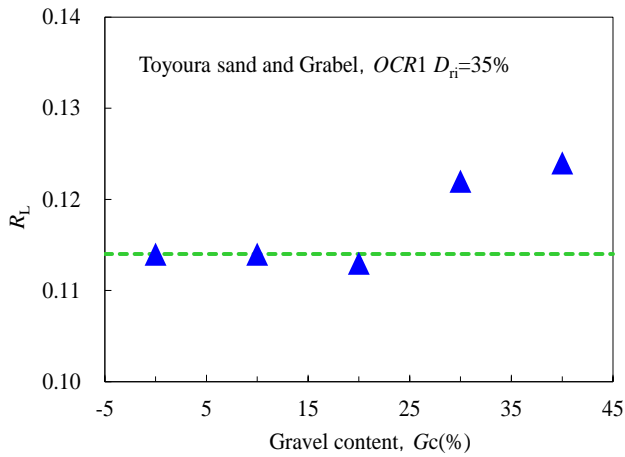


Fig. 4 液状化強度に与える礫分含有率の影響 (OCR=1)

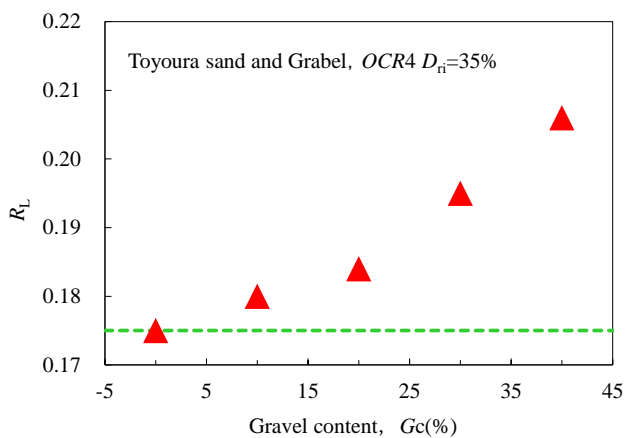


Fig. 5 液状化強度に与える礫分含有率の影響 (OCR=4)

(2) 礫混じり砂の変形特性

せん断弾性係数 G とせん断ひずみ ε_s の関係を $OCR=1$ の場合を Fig. 6 に、 $OCR=4$ の場合を Fig. 7 に示す。Fig. 6 より、 $G_c=30\%$ までは、礫分の増加に従い、比例的に初期せん断弾性係数 G_0 の値が大きくなっていくのに対して、 $G_c=40\%$ では非常に大きな値となった。この傾向は $OCR=4$ の場合も同様となった。

また、割線弾性係数の低下の傾向について見てみると、 $OCR=1$ の場合はせん断ひずみの増加に従い、直線的に低下していくのに比べ、 $OCR=4$ の場合では過圧密の影響を受けて弾性域が増えることで低下しにくい傾向を示した。この傾向については $D_{ri}=75\%$ の状態と同様の傾向である。

以上の結果から、礫混じり砂の変形特性として、初期せん断弾性係数 G_0 は過圧密比に左右されず、礫分含有率 G_c のみに依存することがわかった。

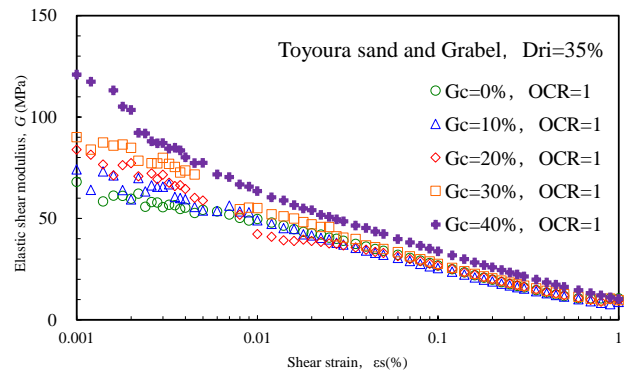


Fig. 6 礫混じり砂の変形特性 (OCR=1)

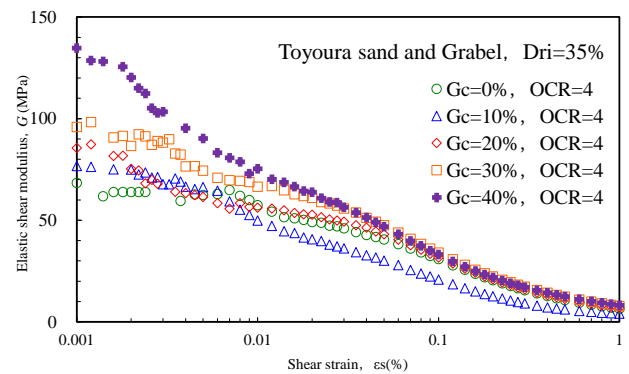


Fig. 7 礫混じり砂の変形特性 (OCR=4)

(3) BE 試験と LSS 試験による初期せん断弾性係数の比較

Fig. 8 に、礫混じり砂供試体による初期せん断弾性係数 G_0 と G_c の関係を示し、BE 試験と LSS 試験の比較を行う。図より、BE 試験による G_0 より LSS 試験による G_0 が少し大きくなっているのがわかる。 $G_c=20\%$ までは、BE 試験による G_0 と LSS 試験による G_0 はどちらもわずかに上昇する傾向にある。対して $G_c=30\%$ からは、BE 試験による G_0 よりも LSS 試験による G_0 が大きく増加している。

この理由として、BE 試験では、供試体全体的な変形を伴わないせん断波伝播から G_0 を算出するため、礫かみ合わせ効果に依存しないが、LSS 試験では、供試体をせん断することで G_0 を算出するため、礫によって生じるかみ合わせ効果に依存するためだと考えられる。 $G_c=40\%$ 、 $OCR=4$ で、BE 試験による G_0 と LSS 試験による G_0 に大きな差が生じたのは、礫分量の増加、過圧密化によって礫同士のかみ合わせが非常に強くなったためだと予想される。

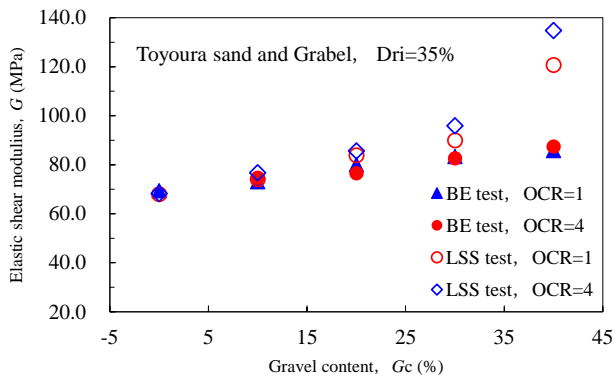


Fig. 8 初期せん断弾性係数に与える礫含有率の影響

4. 液状化強度とせん断弾性係数の関係

(1) 液状化強度と LSS 試験によるせん断弾性係数との関連性

今年度行った $D_{ri}=35\%$ の結果と昨年度の $D_{ri}=75\%$ の結果⁴⁾において、 R_L と LSS 試験による様々なひずみレベルでの G との関連性を調べた。

その一部として、Fig. 9 に R_L と $\varepsilon_s=0.001\%$ の G ($G_{0.001}=G_0$) の関係を、Fig. 10 に R_L と $\varepsilon_s=0.008\%$ の G ($G_{0.008}$) の関係をそれぞれ示す。 R_L と $G_{0.0X}$ を直線で近似し、近似式を図中に記載している。また、近似直線にどれだけフィットするかを表す R^2 乗値を合わせて記載している。 R^2 乗値を見ると、 R_L とより相関が良いのは、 G_0 よりも $G_{0.008}$ であることが分かる。この R^2 乗値を、用いる G において使用したせん断ひずみとの関係を Fig. 11 に示す。図より、せん断ひずみが 0.008% から 0.015% 程度の範囲での G と R_L は、非常に高い相関性を持つことが分かる。つまり、このひずみレベルでの G が分かれば、 R_L を精度よく予測できると言える。

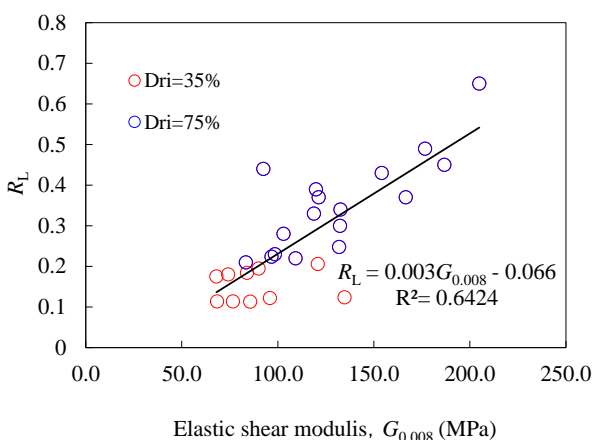


Fig. 9 液状化強度とせん断弾性係数の関係 ($\varepsilon_s=0.001\%$)

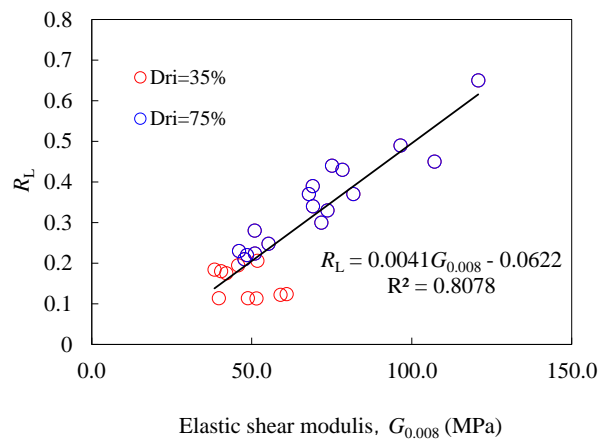


Fig. 10 液状化強度とせん断弾性係数の関係 ($\varepsilon_s=0.008\%$)

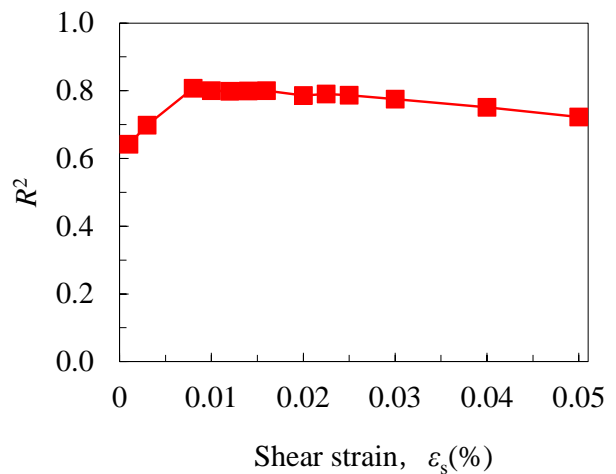


Fig. 11 せん断ひずみの違いが液状化強度と割線せん断弾性係数の関係に与える影響

(2) 実務への応用

任意のひずみレベルでの G を求めるためには、三軸試験を行う必要があるが、そのためには凍結サンプリングなどによって不攪乱試料が必要となり、高コストとなる。そこで、比較的安価に行える現場試験として、BE 試験と試験原理が同様である PS 検層を用いることで、 G_0 は容易に得られる。

Fig. 12 に、LSS 試験による結果を、 G_0 を基準として正規化した $G/G_0-\varepsilon_s$ として示す。図のように、 $OCR=1$ の場合では、礫分量や相対密度によらず一本の直線になることが分かる。よって、 G_0 から任意のひずみによる G までの低下率は、礫分量や相対密度によらず一定である。つまり、現場試験より得られる V_s から G_0 を求めれば、任意のひずみレベルでの G が分かり、 R_L を予測することができる。 $OCR=4$ の場合には、せん断ひずみによる G の低下が小さくなっている。少しばらついているが、 OCR ごとにこの低下率の平均値を取ってみる。この結果として、

$G_{0.008}$ の時の OCR と G/G_0 の関係を示したグラフを Fig. 13 に示す。この図より、 OCR が大きくなると G/G_0 も大きくなる、つまり低下率が減少していることがわかり、低下率は OCR に依存している。

Fig. 13 の結果より過圧密比を考慮して液状化強度推定式を算出すると、式(5)のようになる。

$$R_L = 0.00023 G_0 \{0.04(OCR) + 0.63\} - 0.062 \quad \dots (5)$$

式(5)に必要な過圧密比を代入することで、礫を含む幅広い粒径の地盤において、 G_0 がわかれば、液状化強度を推定することができる。

しかし、 R_L を高い精度で予測するには、原地盤の OCR を評価する必要があるが、工事記録に残っている以外、大変難しい問題である。これらのことは、今後の課題となる。

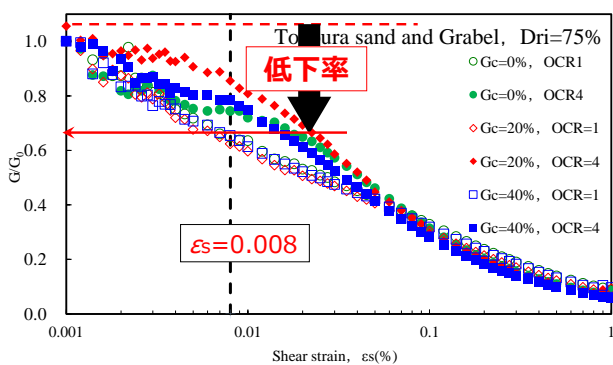


Fig. 12 正規化 $G-\varepsilon_s$ 関係

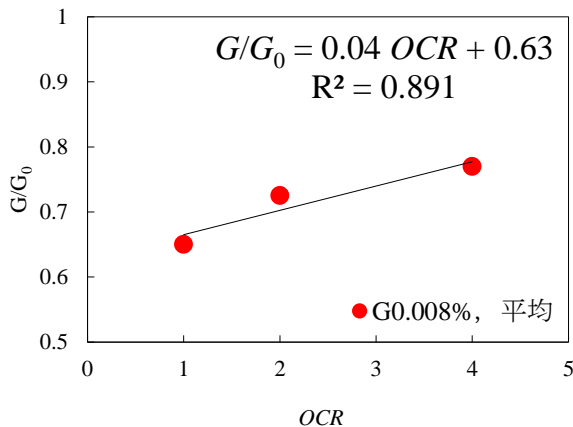


Fig. 13 正規化 $G-\varepsilon_s$ と過圧密の関係

5. 結論

(a) 礫質土の液状化特性

礫分が質量比で 20% を超えると、液状化強度の増加の傾向が大きくなる。この傾向については初期相対密度に関係なく、同様の傾向を示した。また、過圧密化によって液状化強度は増加し、この傾向も初期相対密度に左右されない。

(b) 礫質土の変形特性

初期せん断弾性係数は、礫分含有率の増加により増加するが、過圧密化によつての増加は小さい。また、過圧密化の影響により、礫質土の弾性領域が大きくなることで、正規圧密の状態に比べ、割線せん断弾性係数はせん断ひずみで低下しにくい傾向を示す。

(c) 波動伝播と微小変形試験から得られた初期せん断弾性係数

波動伝播特性から得られた初期せん断弾性係数と微小変形特性から得られた初期せん断弾性係数は、礫分が増加するほど差が見られ、微小変形特性から得られる初期せん断弾性係数の方が大きくなる。

(d) 液状化強度に関連する波動伝播特性と微小変形特性

液状化強度は、せん断ひずみ 0.008%~0.015% のひずみレベルの割線せん断弾性係数と良い相関性がある。このことから、割線弾性係数を利用して、幅広い密度において液状化強度を推定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、正規化 $G-\varepsilon_s$ を示したところ、相対密度による影響は見られず、過圧密比による影響が見られた。結果として、原位置調査結果 (V_s) と過圧密比を用いることで、幅広い密度において液状化強度を推定する手法を示した。

参考文献

- 1) 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，国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震災害研究官，土木学会論文集，No.757/III-66，pp1~20，2004。
- 2) 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。
- 3) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説，第6章，土の液状化強度特性を求めるための繰返し非排水三軸試験，pp730~749，2009。
- 4) 豊島克亘：礫混じり砂のせん断弾性係数と液状化強度に与える礫形状の影響，長岡技術科学大学大学院，修士論文，2014。