

密度の異なる礫混じり砂の割線せん断弾性係数と液状化強度の関係

地盤工学研究室 小川 秀成
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

液状化判定業務では、ボーリング孔を用いた PS 検層が広く用いられている。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が進められている。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微小ひずみ測定 (LSS) 試験を行った。また、昨年度まで行ってきた、豊浦砂部分の相対密度 $D_{ri}=75\%$ での結果³⁾と比較するため、 $D_{ri}=35\%$ に設定し、密度の違い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。

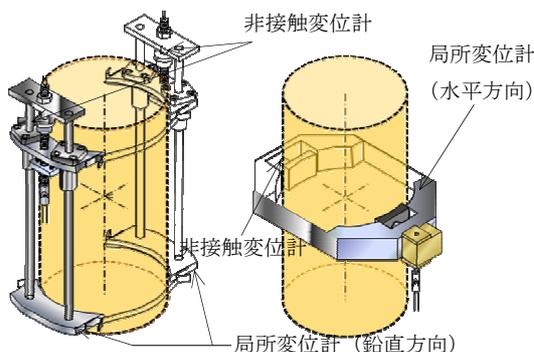


Fig. 1 局所変位計設置図

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

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 P を 0%, 10%, 20%, 30% 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¹⁾ (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。

① 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。

② 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：0.05mm/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。

③ BE 試験⁴⁾

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(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

Fig.2 に、礫分含有率 P が、0%、10%、20%、30% のときの液状化強度曲線を示す。礫分含有率 P が、0%、10%、20% の液状化曲線は大変似ていることがわかる ($P=20\%$ の繰返しせん断応力比 0.15 を除く)。一方、礫分含有率 P が 30% の結果は、少し液状化強度が大きくなっているようである。ここで、軸方向ひずみ $DA=5\%$ での繰返し載荷回数が 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。また、 R_L と礫分含有率 P の関係を Fig.3 に示す。 $P=0\%$ の R_L と礫を混入したケースの R_L を比較することで、砂供試体に対する礫分混入の影響が分かる。図より、 $P=20\%$ までは、液状化強度は変化せず。 $P=30\%$ になると増加している。つまり、緩い礫混じり砂の液状化強度は、礫分が 20% 以下だと、砂のみと変わらないといえる。

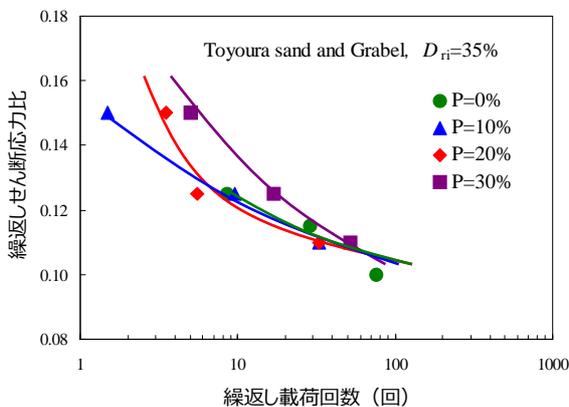


Fig. 2 液状化強度強度曲線 ($DA=5\%$)

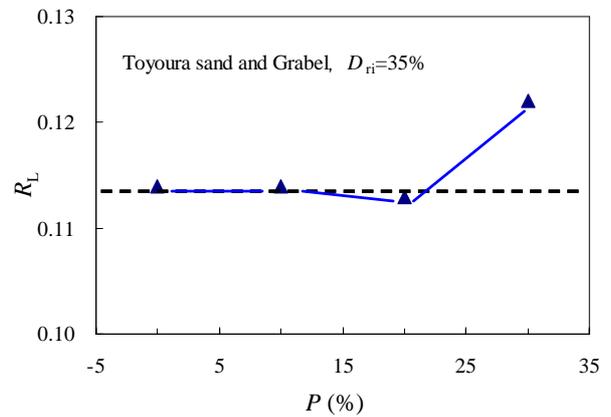


Fig. 3 液状化強度に与える礫分含有率の影響

(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 Fig. 4 に示す。図より、 $P=20\%$ までは、大きな変化は無いが、 $P=30\%$ になると G が少し増加していることが分かる。これは、礫分の混入量が大きくなるにつれ、礫粒子のかみ合わせによる影響が顕著に出たからだと考えられる。

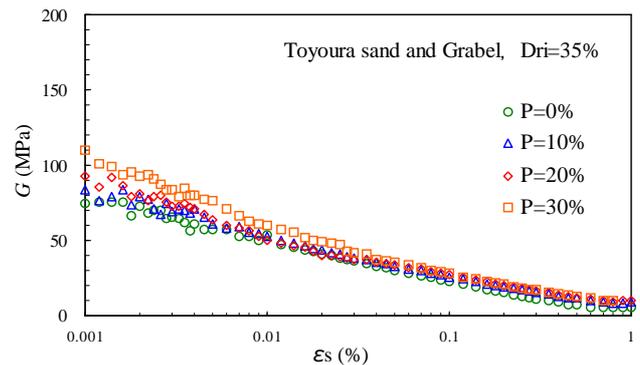


Fig. 4 礫混じり砂の変形特性

(3) BE 試験と LSS 試験による初期せん断弾性係数の比較

Fig.5 に、礫混じり砂供試体による初期せん断弾性係数 G_0 と P 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。 $P=20\%$ 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 $P=30\%$ では、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。

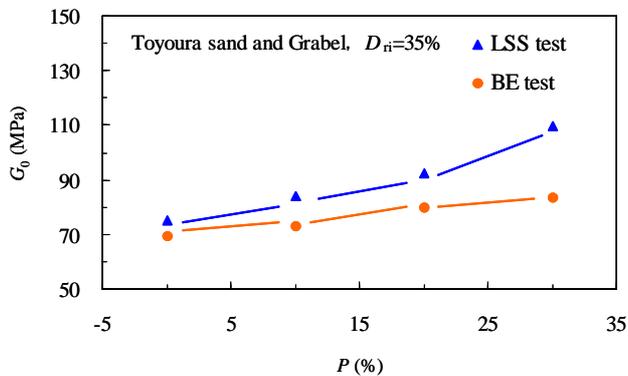


Fig. 5 初期せん断弾性係数に与える礫分含有率の影響

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。

例として Fig. 6 に、せん断ひずみ $\varepsilon_s=0.001\%$ のときの R_L と G の関係を示す。ここで、 R_L と G 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。

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として Fig.7 に示す。図より、せん断ひずみが 0.01% から 0.05% 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。

今回は試験ケースが少なかったため、 G と R_L の相関が高いひずみレベルの範囲で、相対密度に寄らず 1 本の直線で近似出来ているかについて検討を行なった。例えば、Fig. 6 のせん断ひずみ 0.001% では、 $D_{ri}=35\%$ で別の線が引けるような結果となっている。しかしながら、Fig. 8 のせん断ひずみ 0.04% のときの R_L と G においては、そのような傾向は小さくなっていることがわかる。Fig. 8 より、 R_L と G は直線関係にあり、この直線式を用いることにより、密度に関係なく液状化強度の推測が行なえる。

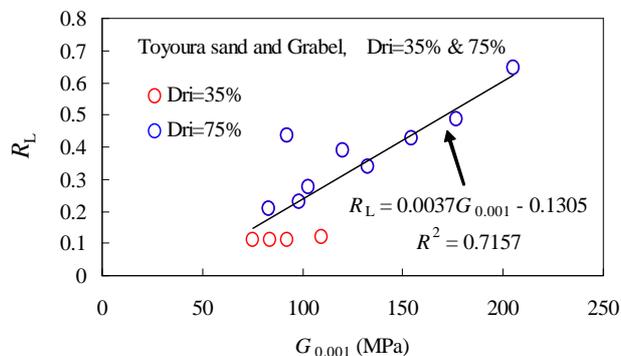


Fig. 6 液状化強度とせん断弾性係数の関係 ($\varepsilon_s=0.001\%$)

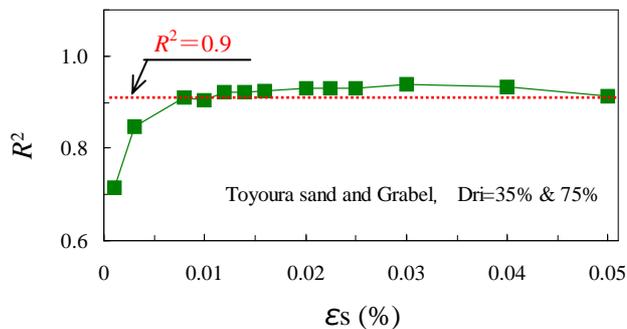


Fig. 7 せん断ひずみの違いが液状化強度と割線せん断弾性係数の関係に与える影響

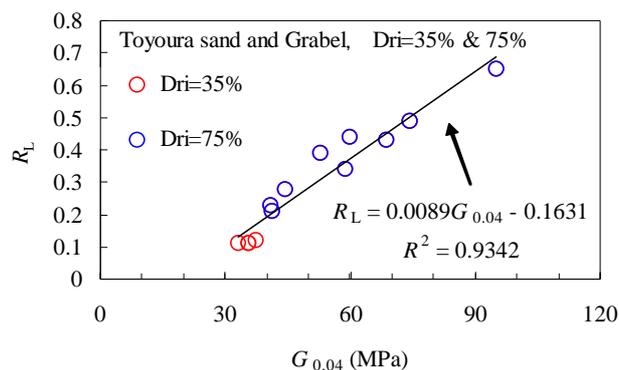


Fig. 8 液状化強度とせん断弾性係数の関係 ($\varepsilon_s=0.04\%$)

(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 試験と試験方法が同機構である PS 検層に着目して、 G_0 は容易に得られると考える。

Fig.9 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、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。この低下率から $G_{0.04}$ を求め、4. (1) の回帰直線式に適用することにより、現場試験より得られる V_s から G_0 を求めれば、幅広い密度において R_L を予測することができる。

しかし、地盤の応力履歴などについては考慮できていないため、今後新たに応力履歴などについての実験を行い、4. (1) の直線式の妥当性を再検討することが必要である。

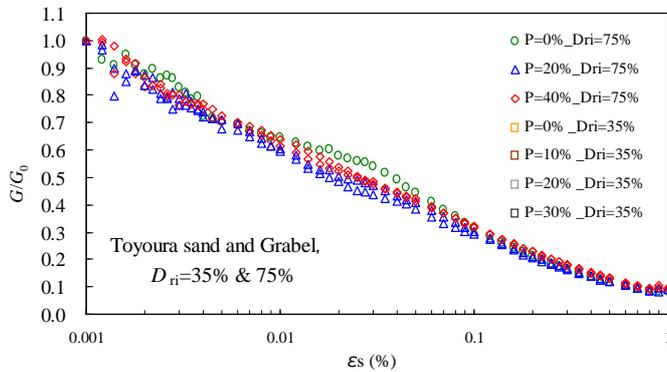


Fig. 9 正規化 $G-\varepsilon_s$ 関係

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、液状化強度が増加してくる。

(b) 礫質土の変形特性

割線せん断剛性は礫分が質量比で 20% まではわずかに増加し、30% に到達すると大きく増加する。

(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より、微小変形特性から得られた初期せん断弾性係数が大きくなり、その差は、礫分の増加に伴い大きくなる。

(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 0.04% 程度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。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 $G-\varepsilon_s$ 関係を示した。これらの関係と原位置調査結果 (V_s) を用いることで、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。

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) 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するための繰返し非排水三軸試験，pp. 730~749，2009.
- 3) 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.
- 4) 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.