

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

地盤工学研究室 豊島 克亘
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、礫分量や礫形状 (円礫 : Pebble, 角礫 : Rubble), 過圧密比をパラメータとし、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、それぞれの試験を、室内で砂に礫を混ぜて作製した、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、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。なお、同装置にはベンダーエレメントが内蔵してある。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 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。

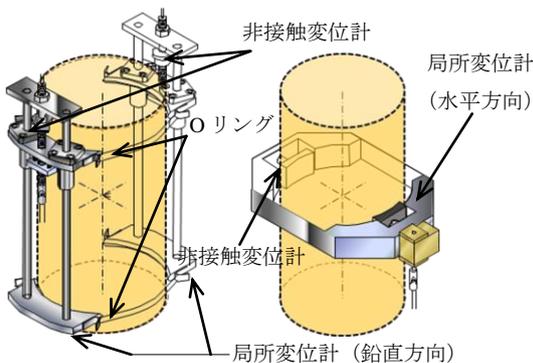


Fig. 1 局所変位計設置図

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

ここに、 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 に粒度調整した円礫と角礫とした。豊浦砂にこれらの礫をそれぞれ混入することで礫混じり砂供試体を作製し、礫形状の影響を検討する。また、礫分含有率 P を 0~40%, 過圧密比 OCR を 1~4 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。



(a) 円礫 (b) 角礫

Fig. 2 使用した礫

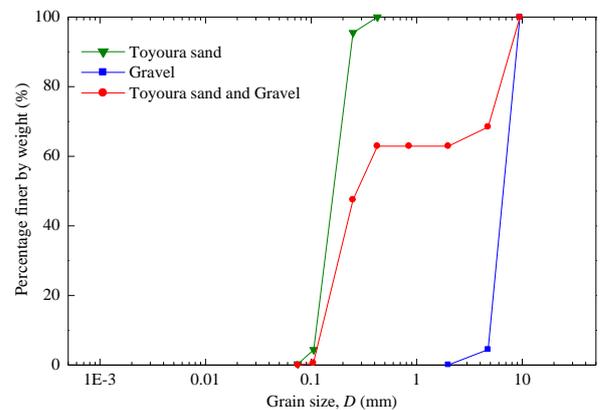


Fig. 3 礫混じり砂の粒径加積曲線 ($P=40\%$)

(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 $D_r=75\%$ の豊浦砂の乾燥密度 ρ_d を基準に、Walker・Holtz の礫補正式¹⁾ (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_r 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、土粒子の配向性を無くすために直径 3mm の棒で突き刺すように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、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。供試体側面は滑らかになっており、メンブレンペネトレーションの影響はないものとする。

(4) 試験方法

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 $DA=2\%$ (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、礫分量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。

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: 0.05mm/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たことから、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³⁾

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、BE 試験は、液状化試験と LSS 試験で、せん断前に実施した。

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

4. 試験結果

(1) 礫混じり砂の液状化特性

Fig. 4 に、 P を 0% から 40% まで変化させた液状化強度曲線を、Fig. 5 に、OCR を 1, 2, 4 と変化させた液状化強度曲線をそれぞれ示す。凡例の Pebble, Rubble は、混入した礫の種類を示し、以下も同様とする。図より、礫混じり砂の液状化強度は、礫分量の増加や OCR の増加によって大きな値となった。

Fig. 6, Fig. 7 に、繰返しせん断応力比 $\sigma_d'/2\sigma_c'$ と P 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 ($P=0\%$) の R_L を破線による補助線で示す。図より、礫分を混入したすべてのケースで、破線よりも大きな R_L を示しており、礫分の混入によって R_L が増加することが分かる。また、 P の増加に伴って円礫混じり砂供試体、角礫混じり砂供試体共に R_L が増加している。ただし、 $P=10\%$ までは、破線との差は小さく、礫分混入の影響は小さいと言える。混入する礫形状の違いが表れたのは $P=20\%$ からである。 $P=20\%$ では、円礫混じり砂供試体の R_L よりも角礫混じり砂供試体のほうが R_L は大きくなり、 $P=40\%$ ではその差が顕著となる。

過圧密化によって各ケースが R_L に与えた影響を調べるため、それぞれのケースが過圧密化によってどれだけ R_L が増加したかを、 P との関係で Fig. 8 に示す。縦軸は、OCR=4 の R_L から OCR=1 の R_L を引いたものであり、豊浦砂供試体 ($P=0\%$) での過圧密化による R_L の増分を、破線による補助線で示す。図より、礫分を混入したすべてのケースで、破線よりも大きな過圧密化による R_L の増分を示しており、礫分を混入したケースの方が過圧密効果を強く受けることが分かる。ただし、 $P=10\%$ までは、破線との差は小さく、礫分混入による過圧密効果の影響は小さいと言える。混入する礫形状の違いが、過圧密効果の違いに表れたのは $P=20\%$ からである。 $P=20\%$ では、円礫混じり砂供試体での過圧密化による R_L の増分よりも、角礫混じり砂供試体での過圧密化による R_L の増分のほうが大きくなり、 $P=40\%$ ではその差が顕著となる。

以上より、 $P=20\%$ から礫分混入・礫形状の影響が出始め、 $P=40\%$ では、礫分混入・礫形状による影響が顕著になると言える。つまり、礫分の混入と礫形状の両方の影響を受ける $P=40\%$ 、OCR=4 の角礫混じり砂供試体では、非常に大きな R_L となると言える。

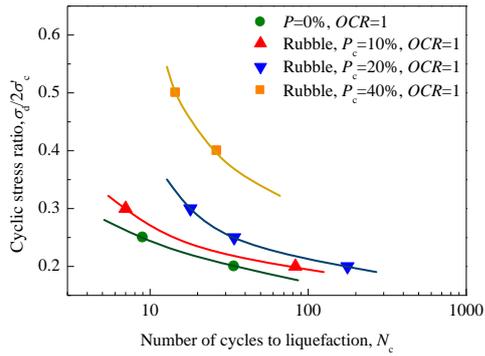


Fig. 4 液状化強度曲線（礫分含有率別）

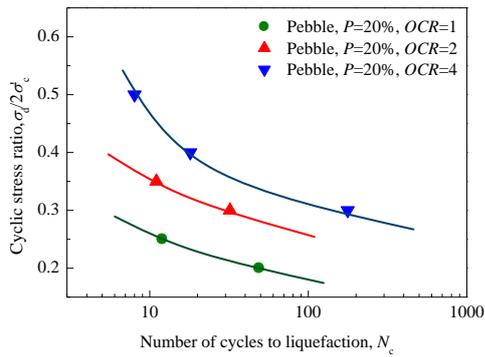


Fig. 5 液状化強度曲線（過圧密比別）

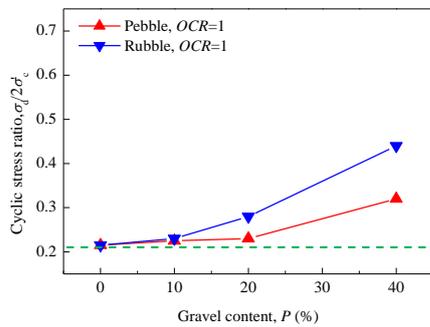


Fig. 6 液状化強度に与える礫分含有率の影響 (OCR=1)

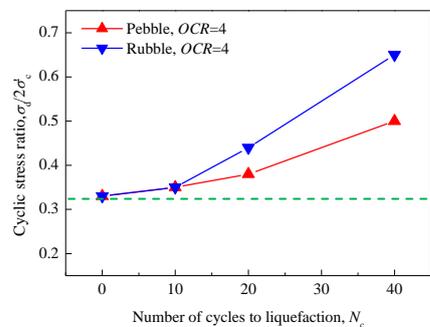


Fig. 7 液状化強度に与える礫分含有率の影響 (OCR=4)

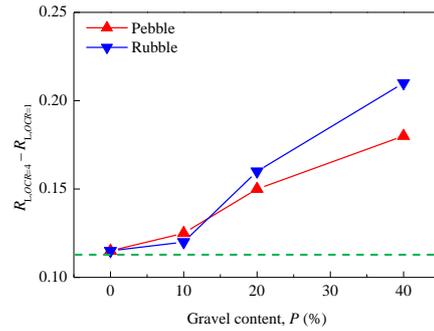


Fig. 8 液状化強度に与える過圧密化の影響

(2) 礫混じり砂の波動伝播特性

Fig. 9, Fig. 10 にそれぞれ、BE 試験より得られた、礫混じり砂による V_s と OCR の関係と礫混じり砂による G_0 と OCR の関係を示す。これは、①有効拘束圧 $p'=50\text{kPa}$ で予備圧密 $\rightarrow p'=100\text{kPa}$ で圧密 ($OCR=1$) \rightarrow BE 試験を実施、② $p'=50\text{kPa}$ で予備圧密 $\rightarrow p'=400\text{kPa}$ で圧密 $\rightarrow p'=100\text{kPa}$ まで排水除荷 ($OCR=4$) \rightarrow BE 試験を実施した結果から、①と②を比較することで礫混じり砂による V_s , G_0 に与える OCR の影響が分かる。BE 試験はそれぞれ $p'=100\text{kPa}$ 測定した。図より、それぞれの P で、 OCR によらず V_s , G_0 はほぼ一定となっており、BE 試験から得られる V_s , G_0 は、過圧密比に依存しないことが分かる。

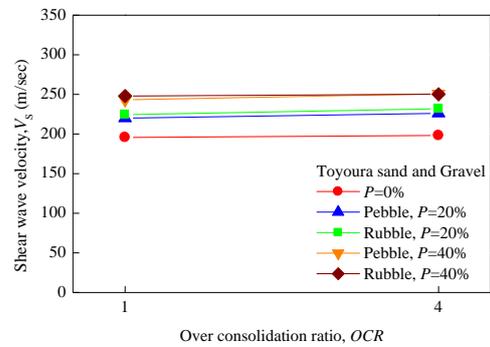


Fig. 9 せん断波速度と過圧密比の関係

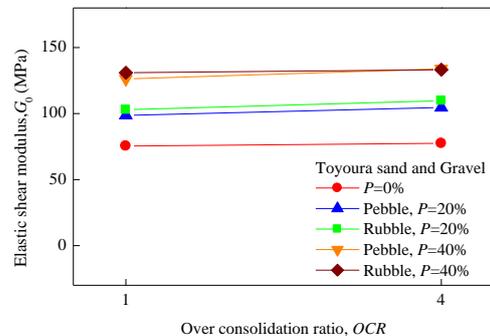


Fig. 10 初期せん断弾性係数と過圧密比の関係

同じ図より、礫分混入、礫形状の影響を見ていく。図より、 P の増加によって V_s 、 G_0 ともに増加している。しかし、同じ礫分量で比べると、礫粒形状の違いによって V_s 、 G_0 に違いは見られない。

(3) 礫混じり砂の微小変形特性

Fig. 11～Fig. 15 に、LSS 試験より得られた割線せん断弾性係数とせん断ひずみの関係を示す。

Fig. 11 と Fig. 12 は、 OCR 別に $P=0\%$ から $P=40\%$ までの LSS 試験結果である。図より、礫分の増加に伴い、 G_0 、 G は増加していることが分かる。

Fig. 13～Fig. 15 は、 $P=0\%$ 、 20% 、 40% と礫分量ごとの LSS 試験結果である。白抜きのプロットが $OCR=1$ 、塗りつぶしてあるものが $OCR=4$ の結果である。また、緑のプロットを礫分混入なし、赤が円礫混じり砂、青が角礫混じり砂である。図より、 G_0 、 G に与える過圧密化の影響が分かる。 $P=20\%$ までは、過圧密化による G_0 の増分は小さく、 $P=40\%$ のケースでは、過圧密化によって大きく G_0 が増加していることから、 G_0 に与える過圧密化の影響は、礫分量の大小関係に大きく依存していると言える。過圧密化の影響が特に表れたの

は、弾性領域（せん断ひずみ 0.001% 以下）よりもひずみレベルが大きな非線形領域である。ここでは、過圧密供試体の方が G は大きくなっていることが分かる。また、礫分量が多いケースの方が、この傾向は顕著である。

Fig. 14 と Fig. 15 から、 G_0 、 G に与える礫形状の違いの影響が分かる。図より、 $P=20\%$ では、礫形状の影響は見られない。しかし、 $P=40\%$ では、円礫混じり砂よりも角礫混じり砂の方が、 G_0 、 G が少し大きくなるようである。

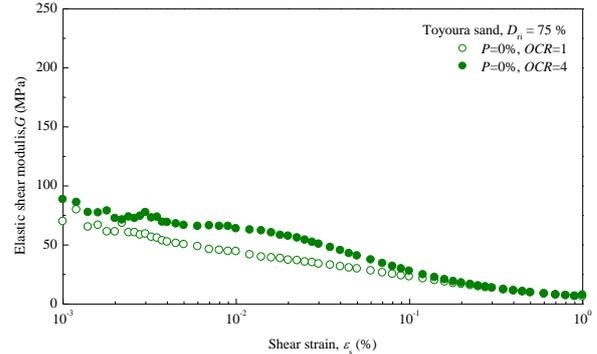


Fig. 13 割線せん断弾性係数とせん断ひずみの関係 ($P=0\%$)

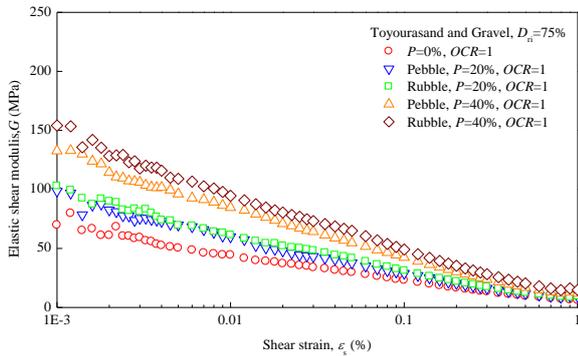


Fig. 11 割線せん断弾性係数とせん断ひずみの関係 ($OCR=1$)

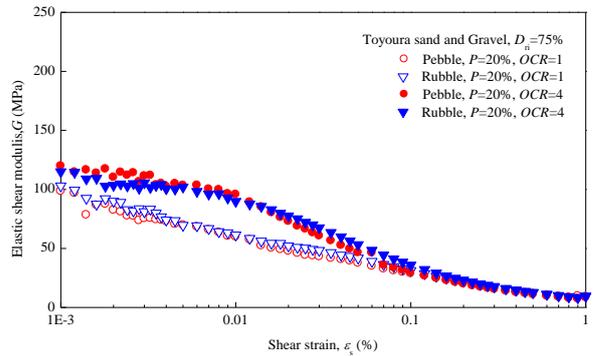


Fig. 14 割線せん断弾性係数とせん断ひずみの関係 ($P=20\%$)

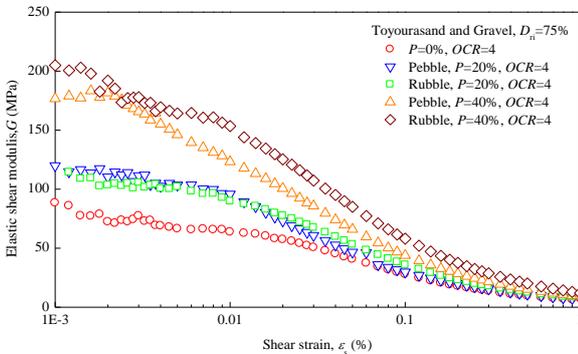


Fig. 12 割線せん断ひずみとせん断ひずみの関係 ($OCR=4$)

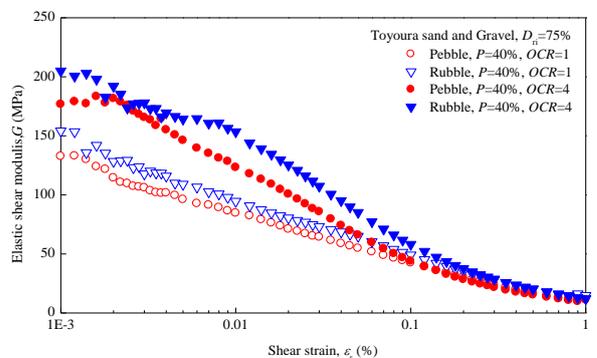


Fig. 15 割線せん断弾性係数とせん断ひずみの関係 ($P=40\%$)

(4) BE 試験と LSS 試験による初期せん断弾性係数の比較

Fig. 16, Fig. 17 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、 $P=20\%$ までは、BE 試験による G_0 と LSS 試験による G_0 に大きな差はない（両試験結果が概ね一致する）。対して $P=40\%$ では、BE 試験による G_0 よりも LSS 試験による G_0 が非常に大きな値となる。さらに、LSS 試験の G_0 は、 $P=40\%$ で円礫混じり砂よりも角礫混じり砂の方が大きな値となる。

これらの理由として、BE 試験によるせん断波の伝播では、あまりかみ合わせ効果に依存せず、LSS 試験では、供試体全体をせん断することで G_0 を算出するため、礫形状や過圧密化によって生じる、かみ合わせ効果に依存するためだと考えられる。 $P=40\%$ 、 $OCR=4$ 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。

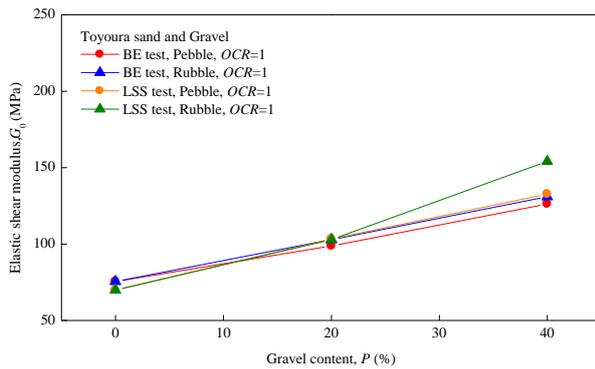


Fig. 16 初期せん断弾性係数に与える礫分含有率の影響 ($OCR=1$)

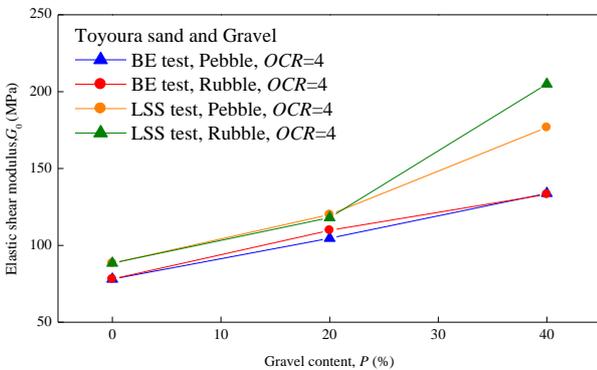


Fig. 17 初期せん断弾性係数に与える礫分含有率の影響 ($OCR=4$)

5. 液状化強度とせん断弾性係数の関係

(1) 液状化強度と LSS 試験による割線せん断弾性係数との関連性

R_L と、LSS 試験における様々なひずみレベルでの G (以下、 $G_{0.0X}$ とする) との関連性を調べた。その一部として、Fig. 18 に R_L と $\epsilon_s=0.001\%$ の G ($G_{0.001}=G_0$) の関係を、Fig. 19 に R_L と $\epsilon_s=0.02\%$ の G ($G_{0.02}$) 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 $G_{0.02}$ であることが分かる。

この R^2 乗値を、 G を得るせん断ひずみの関係として Fig.20 に示す。図より、せん断ひずみが 0.01% から 0.03% 程度の範囲での G と R_L は、非常に高い相関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。

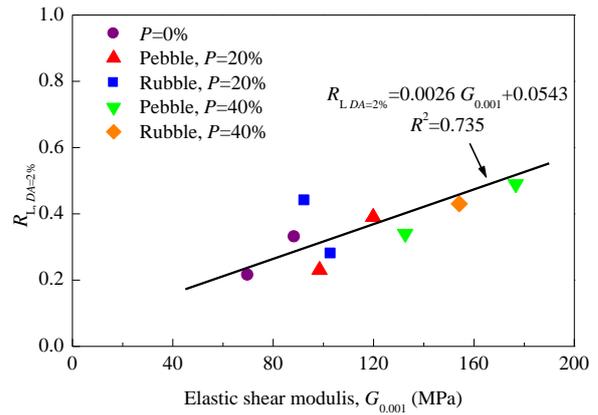


Fig. 18 液状化強度とせん断ひずみ 0.001% の割線せん断弾性係数の関係

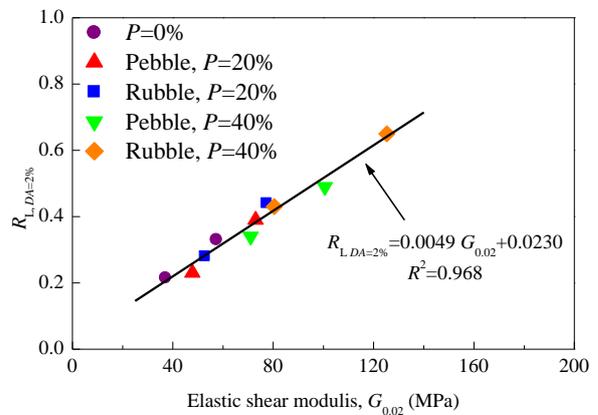


Fig. 19 液状化強度とせん断ひずみ 0.02% の割線せん断弾性係数の関係

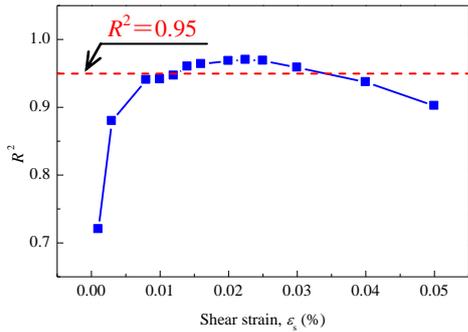


Fig. 20 せん断ひずみの違いが液状化強度と割線せん断弾性係数の関係に与える影響

(2) 実務への応用

5(1)より、任意のひずみレベルでの G が分かれば、その G を Fig.18 や Fig.19 に示したような近似式に適用することで、 R_L を予測できることが分かった。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で採取できる不攪乱試料を用いる必要があり、高コストとなる。

そこで、比較的安価に行える現場試験であり、BE 試験と試験方法が同機構である PS 検層に着目した。Fig.21 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 の値ごとに礫分量、礫形状によらず一本の曲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、礫形状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。

ただし、4(4)で述べたように、BE 試験と LSS 試験の G_0 が一致する $P=20\%$ までが適応範囲となる。また、 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。

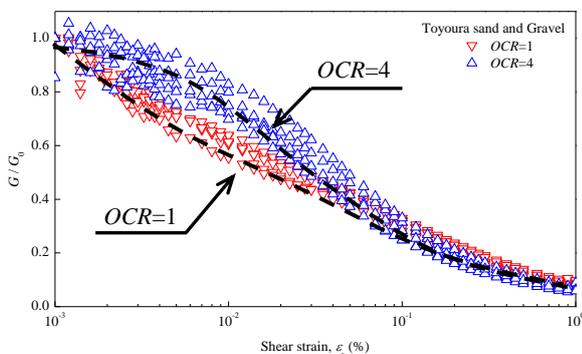


Fig. 21 正規化 $G - \varepsilon_s$ 関係

6. 結論

(a) 礫混じり砂の液状化特性

礫分の混入や過圧密化によって、 R_L は増加する。また、円礫混じり砂供試体よりも角礫混じり砂供試体の方が R_L は大きくなる。しかし、これら影響の大きさは、 P によって異なる。

過圧密化による R_L の増分は、砂供試体よりも礫混じり砂供試体の方が大きく、円礫混じり砂供試体よりも角礫混じり砂供試体の方が大きい。

(b) 礫混じり砂の波動伝播特性

礫分の混入によって V_s , G_0 は増加する。しかし、過圧密化や礫の形状の影響は受けない（これらによって V_s , G_0 は増加しない）。

(c) 礫混じり砂の微小変形特性

礫分の混入によって、 G_0 , G は増加する。

過圧密化の影響は、弾性域 ($\varepsilon_s \leq 0.001$) では小さく、弾性域よりも大きなひずみレベルで、OCR が大きい方が、 G は大きくなる。

$P=20\%$ までの範囲では礫形状の影響はあまり見られないが、 $P=40\%$ では円礫混じり砂よりも角礫混じり砂の方が G_0 , G は大きくなる。

(d) 礫混じり砂の液状化特性および波動伝播特性、微小変形特性の関連性

BE 試験と LSS 試験で求まる G_0 は、 $P=20\%$ までにはほぼ等しく、 $P=40\%$ では、BE 試験よりも LSS 試験で求まる G_0 の方が大きくなる。

液状化強度は、 $\varepsilon_s = 0.02\%$ 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 G_0 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、精度よく液状化判定を行うことが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るための繰返し非排水三軸試験，pp730～749，2009.
- 3) 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，pp195～207，2001.