

# 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

地盤工学研究室 中村 浩士  
指導教員 豊田 浩史

## 1. はじめに

調査対象地盤において原位置の液状化強度を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。他のサンプリング方法では、運搬時等の乱れの影響を受けてしまうため、室内試験で求まる変形係数はPS 検層で得られるそれと比べ小さい値を求めてしまう。そこで本研究では、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ていくことで供試体を作製して、 $V_s$ 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。ここでは、礫分含有率の増加と過圧密比 (OCR) が液状化特性に及ぼす様々な影響を調べるために、波動伝播特性と微小変形特性に着目して、実験的検討を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。



Fig. 2 供試体状況 ( $G_c=50\%$ )

## 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。

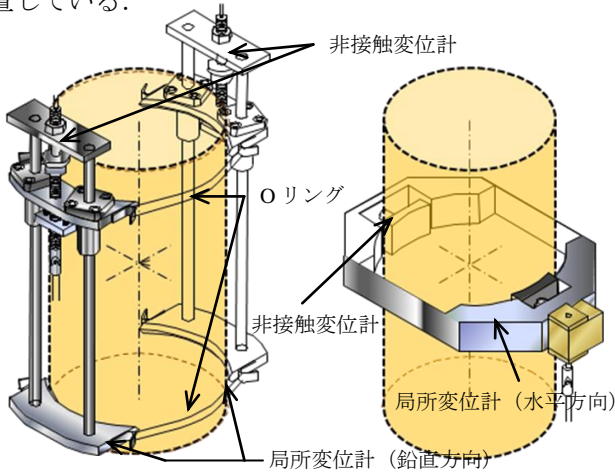


Fig. 1 局所変位計設置図

### (1) 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  $\rho_d$  を基準に、Walker・Holtzの礫補正式<sup>1)</sup>で、礫とそれ以外の土の混合物の乾燥密度  $\rho_{d0}'$  を算出し、その  $\rho_{d0}'$  を用いて供試体全体の質量を求めた。9.5mm ふるいを通過した礫を用いた。なお、メンブレンペネトレーション (以下、メンペネとする) の影響は、 $G_c$ の最も高いケースの飽和非排水繰返し三軸圧縮試験のメンブレンコンプライアンス比  $C_{RM}$  を計算したところ、メンペネの閾値 ( $C_{RM}=0.1\sim 0.25$  程度)<sup>2)</sup> よりも低い値を示した。メンペネが試験結果に与える影響は少ないと判断した。Fig.2 は  $G_c=50\%$ の時の供試体状況である。

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

ここに、

$\rho_{d0}$ : 礫以外の土の乾燥密度 ( $g/cm^3$ )

$\rho_{d1}$ : 礫粒子の乾燥密度 ( $g/cm^3$ )

$\rho_{d0}'$ : 礫補正した乾燥密度 ( $g/cm^3$ )

$P(=G_c)$ : 礫分混入割合 (%)

### (2) 試験ケース

Table.1~2 に試験ケースを示す。また Fig.3 は試験で用いた豊浦砂と礫および礫混じり砂の粒径加積曲線である。図には礫分含有率 30%のケースを図示している。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。

Table 1 液状化試験ケース

供試体	初期相対密度 $D_n / OCR$	礫含有率 $G_c$ (%) / 最大粒径 $G_{max}$ (mm)	間隙比 (圧密後) $e_c$	繰返し片振幅 $\sigma_d$ (kPa)	有効応力 $p'$ (kPa)
Toyoura sand	75 / 1	0 / 2.0	0.699	40~60	100
Toyoura sand and Gravel	75 / 1	10 / 9.5	0.640	30~60	
		20 / 9.5	0.584	40~60	
		30 / 9.5	0.527	40~50	
		50 / 9.5	0.394	50~70	
	75 / 2	20 / 9.5	0.579	60	
75 / 4	20 / 9.5	0.587	60		

Table 2 微小ひずみ測定試験ケース

供試体	初期相対密度 $D_n / OCR$	礫含有率 $G_c$ (%) / 最大粒径 $G_{max}$ (mm)	初期間隙比 $e_i$	間隙比 (圧密後) $e_c$	圧密圧力 $p$ (kPa)
Toyoura sand	75 / 1	0 / 2.0	0.695	0.705	100
Toyoura sand and Gravel	75 / 1	10 / 9.5	0.643	0.640	
		20 / 9.5	0.586	0.584	
		30 / 9.5	0.526	0.527	
		40 / 9.5	0.468	0.467	
	75 / 2	20 / 9.5	0.582	0.579	
75 / 4	20 / 9.5	0.591	0.587		

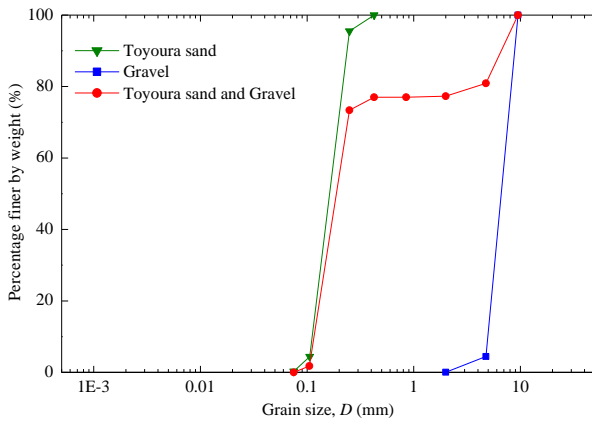


Fig. 3 豊浦砂と礫混じり砂の粒径加積曲線

### (3)試験方法

液状化試験は、軸ひずみ速度 0.1%/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。

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 0.005%/min の条件で、圧密排水条件で単調載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 0.05%/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、せん断過程の前に実施した。

### (4)供試体作製方法

試験で用いた供試体は、乾燥締め固め法を採用した。炉乾燥させた豊浦砂と礫を、含水比 0%として、所定の供試体重量を計算後、10層に分け、各層の土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、ペDESTALとキャップに装着してあるベンダーエレメントの周りに空隙ができないようにするため、供試体上下1層ずつを豊浦砂のみの層としてキャッピングを行った。

## 3. 試験結果

### (1)礫混じり砂の液状化特性

・軸差応力とせん断ひずみ関係について

密詰めの礫混じり砂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。

Fig.4 (a) ~ (d) の応力-ひずみ関係 ( $\sigma_d=40\text{kPa}$ ) に着目する。図より、(a) の  $G_c=0\%$  から (c)  $G_c=20\%$  のケースまでは液状化に至るまでの繰返し挙動は等しい傾向を示していることが分かる。また、礫分含有量が増加して行くにつれて、圧縮側および伸張側でひずみの進展が押さえられる傾向にある。(c) の  $G_c=20\%$  までは圧縮側のひずみが 4%付近で増加幅が小さくなっている。(d) の  $G_c=30\%$  では、圧縮側のひずみが 3%以降増加しなくなり、伸張側でのみひずみが進展していくことが分かった。これは、礫分含有率が増加するに従い、礫同士の噛み合わせ効果で圧縮側のひずみの進展が抑制されるためと考えられる。 $G_c=30\%$  を越えるとその傾向が顕著になり、Fig.5 の  $G_c=50\%$  の応力-ひ

ずみ関係 ( $\sigma_d=50\text{kPa}$ ) では、圧縮側のひずみが 0.5%以上増加しなくなり、伸張側でのみひずみが進展するようになる。その後、ひずみが圧縮側に戻らない状態で軸差応力が繰返していることが分かる。それからの挙動は一定の間隔を保ちながら伸張側でひずみが増加し、最終的にはネッキングの影響で伸張側にひずみが急激に増加して  $DA=5\%$  に達した。 $G_c=50\%$  の応力-ひずみ関係 ( $\sigma_d=70\text{kPa}$ ) では、供試体上部でネッキングが進行したため、 $DA=5\%$  まで試験を行わずに試験を途中で終了した。

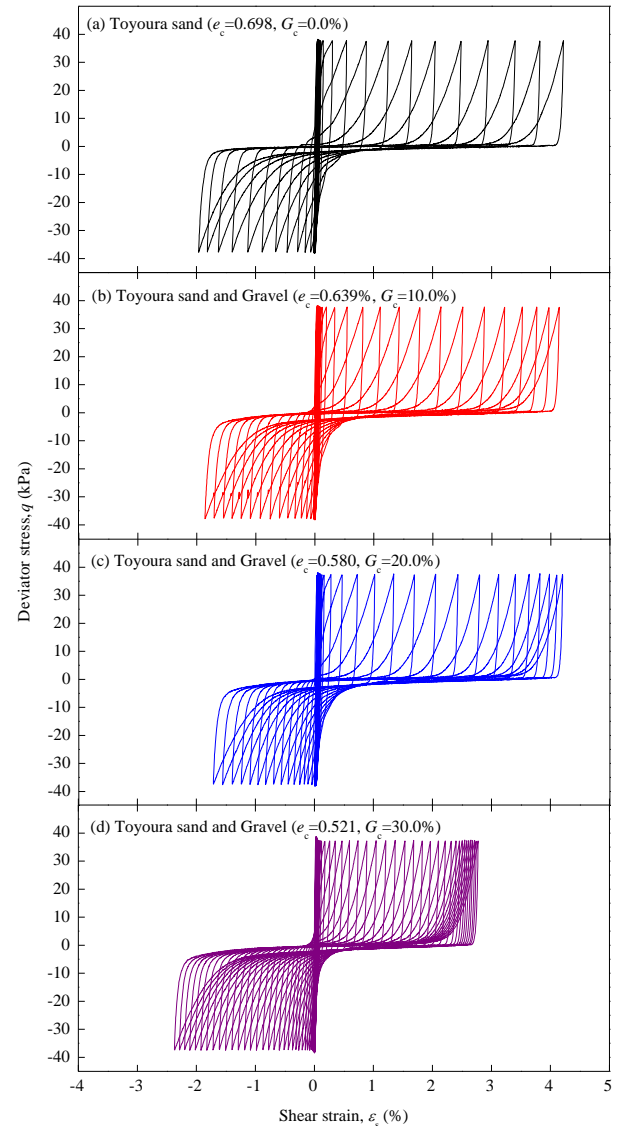


Fig. 4 軸差応力とせん断ひずみ関係 ( $\sigma_d=40\text{kPa}$ )

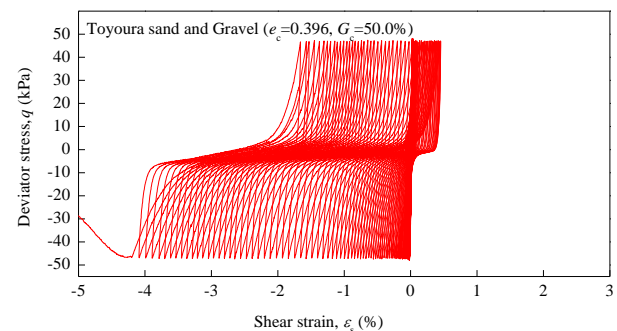


Fig. 5 軸差応力とせん断ひずみ関係 ( $\sigma_d=50\text{kPa}$ )

・軸差応力と平均有効主応力関係について

Fig.6 (a) ~ (d) の有効応力経路 ( $\sigma_d=40\text{kPa}$ ) では、(c) の  $G_c=20\%$  まではほぼ等しいひずみの進展傾向を示しているが、 $G_c=20\%$  と  $G_c=30\%$  を比較すると (d)  $G_c=30\%$  ではサイクリック・モビリティに至るまでの繰返し回数が増加していることから、 $G_c=30\%$  を越えると液状化に至るまでの繰返し挙動で異なる傾向を示すことがわかった。

Fig.7 ( $\sigma_d=40\text{kPa}$ ) の有効応力経路では、礫分含有率を増加させると  $p'=2\text{kPa}$  程度残留した状態でサイクリック・モビリティに至っていることがわかる。しかしながら、繰返しせん断応力を大きくした、Fig.7 ( $\sigma_d=50\text{kPa}$ ) の有効応力経路をみると、 $G_c=0\%$  同様に、 $p'=0\text{kPa}$  付近まで減少していることから、完全液状化状態に達していることがわかる。

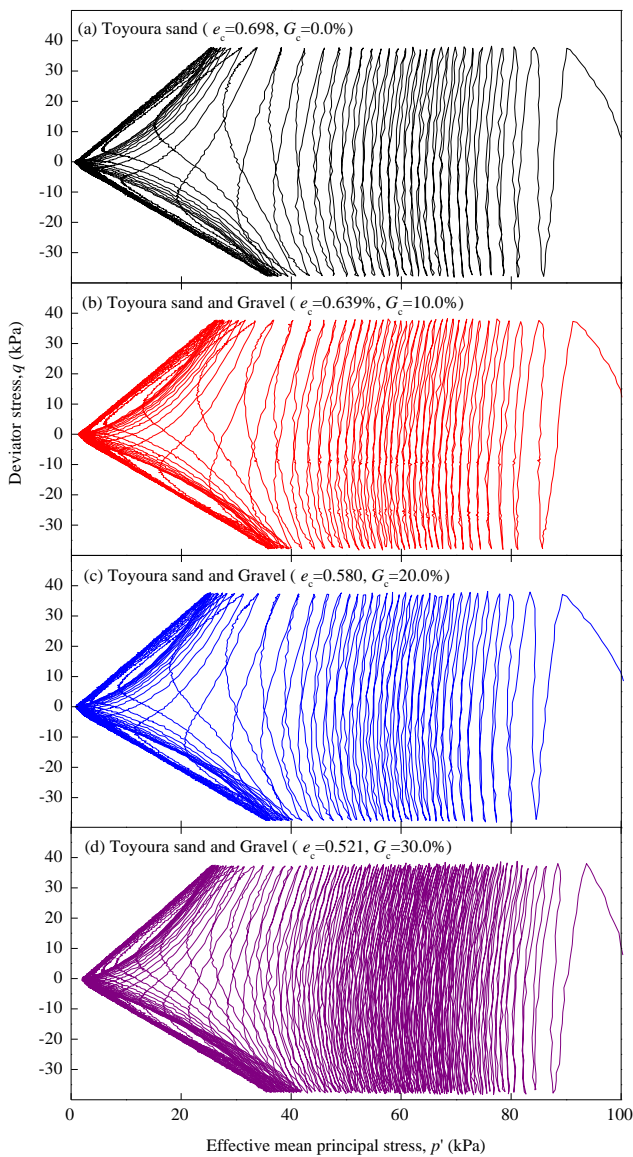


Fig. 6 軸差応力と平均有効主応力関係 ( $\sigma_d=40\text{kPa}$ )

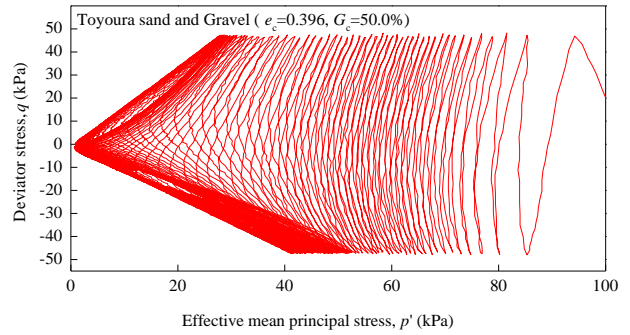


Fig. 7 軸差応力と平均有効主応力関係 ( $\sigma_d=50\text{kPa}$ )

・液状化強度曲線について

密詰め礫混じり砂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、繰返し載荷回数  $N_c$  の関係を Fig.8 に示す。図より、 $G_c=0\%, 10\%, 20\%$  のケースでは液状化強度曲線がほぼ等しく、 $DA=2\%$  における繰返し載荷回数  $N_c=20$  回で定義される液状化強度比  $R_L$  の値も、約  $R_L=0.230$  と等しくなった。このことから、 $G_c=20\%$  までの範囲であれば  $G_c$  が変化しても曲線が狭い範囲に集中する傾向にあると言える。しかし、礫分含有率が  $30\%$  を越えると液状化強度曲線が急激に右側にシフトし液状化強度比が  $R_L=0.250$  と増加していることが分かる。このことから、細粒分を含んでいない礫混じり砂であっても礫分含有率がある範囲まで (ここでは  $G_c=20\%$ ) であれば液状化強度は増加せず、礫分が液状化強度に与える影響は小さいことが分かった。しかし、礫分が質量で  $30\%$  を越えると液状化強度が急激に増加することから、礫分含有率がある範囲を越えると、液状化強度に対して礫分が大きく依存してくると言える。

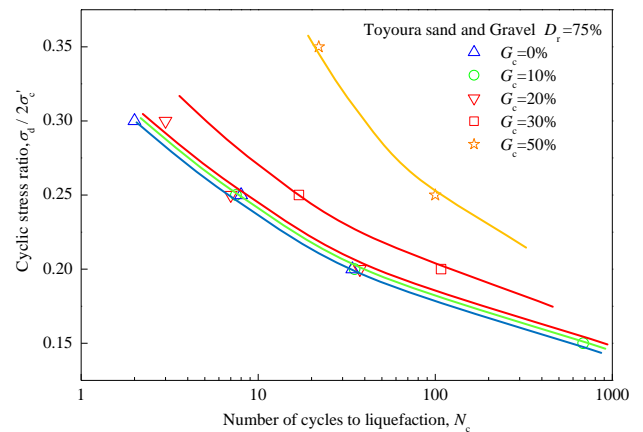


Fig. 8 砂質土および礫混じり砂の液状化強度曲線

(2) 礫混じり砂の波動伝播特性

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弾性波測定試験 (以下、BE 試験という) と、同試験装置を用いてせん断波速度とせん断弾性係数を求め、両者を比較検討する

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。

$$V_s = \frac{L}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで、せん断波到達時間  $\Delta t(\text{sec})$  は、”start-to-star”法<sup>3)</sup>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<sup>3)</sup>を採用した。また、せん断剛性  $G_0$  は次式で算定した。

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

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

### (a) BE 試験結果

BE 試験では、礫分含有率が 0~50% に調整した供試体を、それぞれ  $p' = 100\text{kPa}$  で圧密後、排水量が落ち着いたことを確認し、非排水条件で BE 試験を実施したものである。

Fig.9 は、礫分含有率を 0~50% 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共に上昇している。特に  $G_c = 50\%$  のケースでは急激に  $V_s$  が増加している。これは、礫分を増加させると礫を選んで弾性波が伝播することから  $V_s$  が増加したのではないかと考えられる。

Fig.10 の 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。

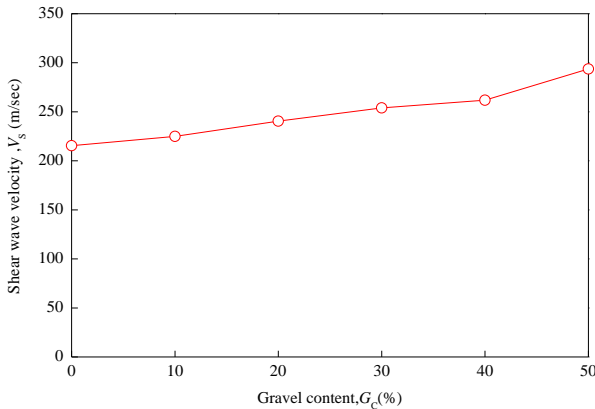


Fig. 9 せん断波速度と礫分含有率の関係

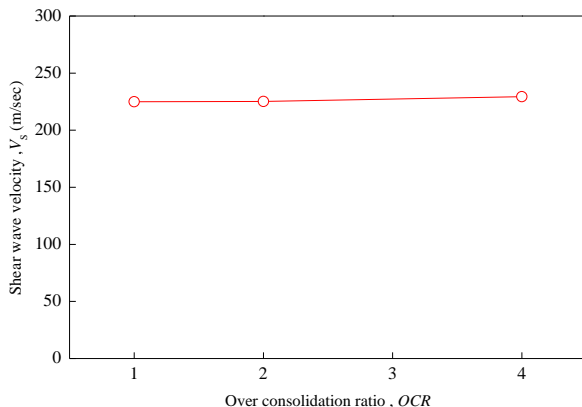


Fig. 10 せん断波速度と OCR の関係

### (2) 礫質土の微小変形特性

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  $\varepsilon_a$  (%), および局所側方ひずみ  $\varepsilon_r$  (%) を直接測定し、微小領域のせん断ひずみを求める。なお  $\varepsilon_a$  は、ベッティングエラーを軽減させるため Fig.11 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。

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r \quad (4)$$

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3} \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_r) \quad (5)$$

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

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad (6)$$

$$E = \frac{q}{\varepsilon_a} \quad (7)$$

$$G = \frac{q}{3 \cdot \varepsilon_s} \quad (8)$$

ここで、 $\nu$ : ポアソン比,  $E$ : ヤング係数,  $G$ : 土のせん断剛性である。

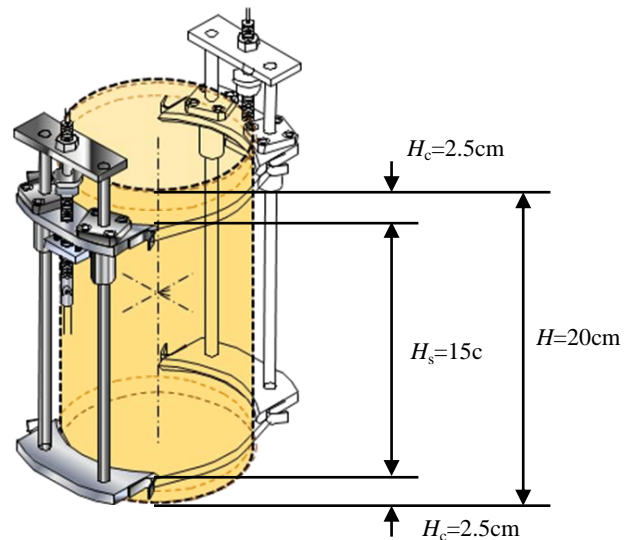


Fig. 11 ベッティングエラーを考慮した局所変位計設置位置

### (a) LSS 試験結果

Fig. 12 は、LSS 試験で得られた初期せん断剛性  $G_0$  (軸ひずみ  $10^{-3}\%$  におけるせん断剛性) と礫分含有率  $G_c$  の関係について示したものである。図より、せん断剛性  $G_0$  は礫分含有率  $G_c$  が増加するにつれて共に上昇していることが分かる。また、 $G_c = 50\%$  ではせん断弾性係数が急激に増加する傾向にある。この傾向は Fig.8 のせん断弾性波伝播特性と等しい傾向である。  $G_c = 0\%$

のせん断剛性は LSS 試験 ( $G_0=89\text{MPa}$ ) と Fig. 8 の BE 試験 ( $G_0=91.5\text{MPa}$ ) でほぼ等しい結果となった. 一般的に, 豊浦砂のような比較的土粒子が小さく, 均等係数の低い均一な砂では, 動的 (BE 試験) および静的 (LSS 試験) な弾性変形係数の値にそれほど大きな違いはなく, 均等係数が高く粒径の大きな礫質土などと比較すればその違いは無視できる程度<sup>4)</sup>であると認識されている. このことから, BE 試験においても妥当な値が計測できていると考えられる. 以上の関係から, 土のせん断剛性には礫分含有率の大小関係が大きく依存していると言える.

Fig. 13 は,  $G_c=20\%$  で OCR に着目した割線せん断剛性とせん断ひずみの関係である. 図より, OCR を加えても初期せん断剛性  $G_0$  (せん断ひずみ  $10^{-3}\%$  における割線せん断剛性) はほとんど変化しないことがわかる.

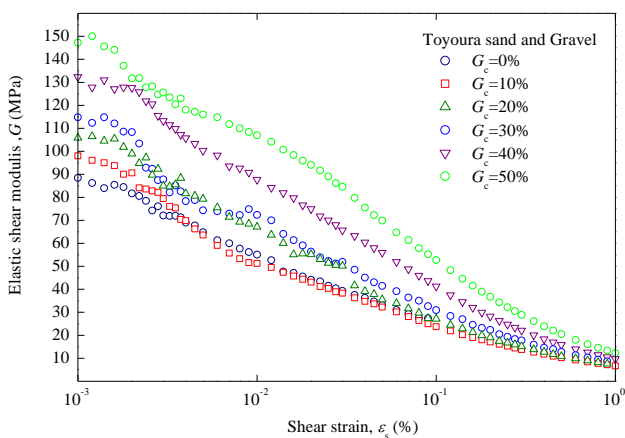


Fig. 12 割線せん断剛性とせん断ひずみの関係 (礫分含有率を変化させたケース)

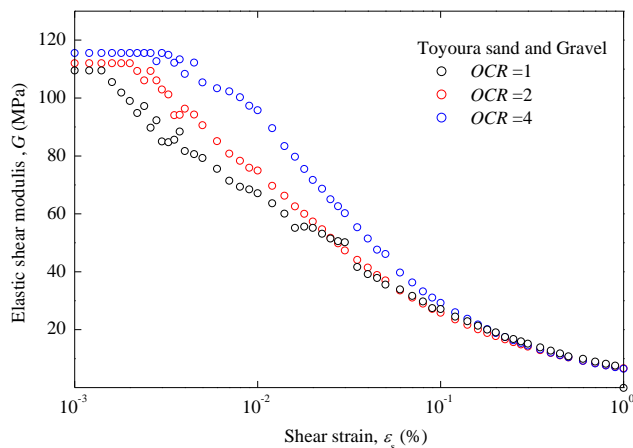


Fig. 13 割線せん断剛性とせん断ひずみの関係 (OCR を変化させたケース)

### (b) 圧密排水試験結果

局所ひずみ測定試験と合わせて実施した圧密排水試験 (CD 試験) の結果を Fig. 14 に示す. なお, 図中の応力-ひずみ曲線において, 軸ひずみ 2% 付近にみられる変相挙動は, 横方向の局所変位計を緩めたことと, せん断速度を変更したためである. この挙動は応力-ひずみ曲線全体の中ではわずかなものであるため, 試

験結果に与える影響は小さいと判断し, 特別な補正は行っていない. 図より, 礫分の増加により圧密排水強度も増加していることがわかる. 前述の通り, せん断弾性伝播特性やせん断弾性特性は, 礫分が増加すると  $G_c=50\%$  では増加幅が急激に増加する傾向にあったが, 圧密排水条件の単調載荷においても, 礫分が増加するに伴いピーク強度も共に増加し,  $G_c=50\%$  では  $G_c=40\%$  のケースに比べて急激に強度増加する傾向を示した. 以上の関係から, 圧密排水強度においても礫分含有率の大小関係が強度に影響を与えていると言える.

Fig. 15 に示した OCR を変化した場合の CD 試験結果では, OCR=1 の排水強度と OCR=2, OCR=4 のケースの排水強度が等しいことがわかる. Fig. 16 は, せん断ひずみ 0.005% 未満の範囲に着目したものである. せん断ひずみ 0.001% まではどのケースも同じ初期勾配であるが, OCR=2, 4 のケースでは OCR=1 のケースに比べ立ち上がりの傾きが急である. しかし, せん断ひずみ 1% を越えると両試験ケースは収束し, ピーク強度は等しくなった. このことから, OCR を変化させることにより, 礫混じり砂においては, 比較的小さい領域のひずみの増加に影響を与えている可能性が考えられる.

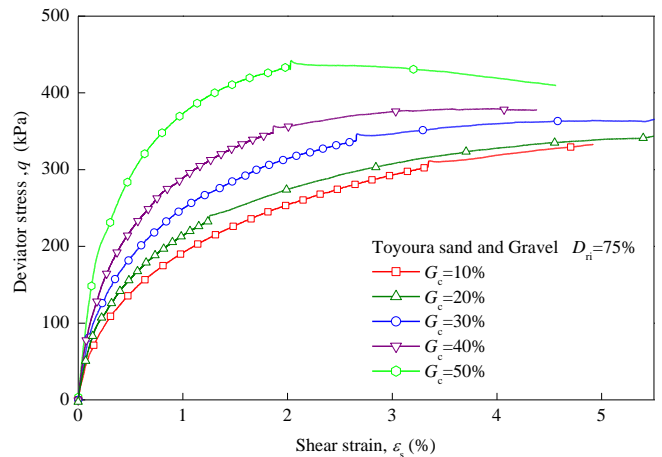


Fig. 14 軸差応力とせん断ひずみの関係 ( $D_n=75\%$ )

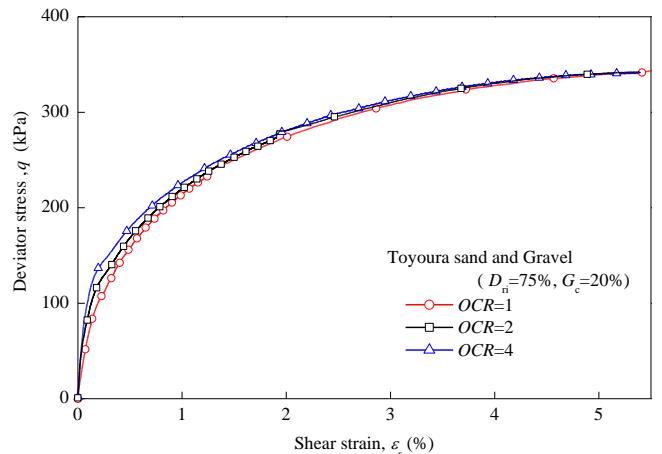


Fig. 15 軸差応力とせん断ひずみの関係 ( $D_n=75\%$ )

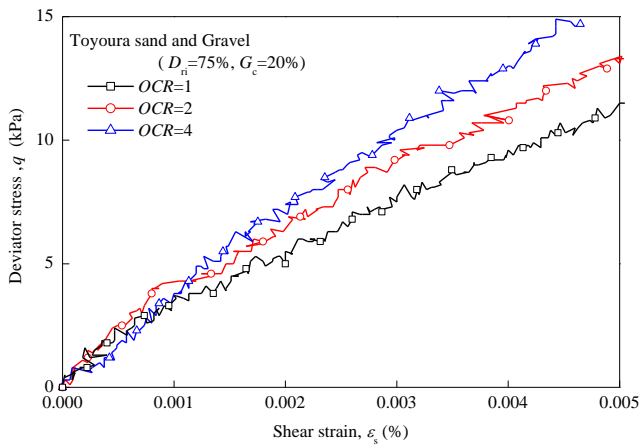


Fig. 16 軸差応力とせん断ひずみの関係 (微小領域)

#### 4. 礫混じり砂の液状化特性と波動伝播特性および微小変形特性の関係

##### (1) 波動伝播特性および微小変形特性の関係

本研究で得られた液状化特性と波動伝播特性、微小変形特性の関係性について述べる。

Fig.17 は、礫分含有率を 0%~50% の範囲で変化したケースの BE 試験と LSS 試験で求めた  $G_0$  と礫分含有率の関係を示している。図より、両試験で求めた  $G_0$  は、礫分含有率が増加するにつれて共に上昇している。特に  $G_c=50\%$  のケースでは急激に  $V_s$  が増加している。 $G_c$  が増加するほど両試験での  $G_0$  の値がひらいていることがわかる。これは、LSS 試験が供試体全体のせん断変形を直接計測しているのに対して、BE 試験の伝播は土粒子のかみ合わせで最も硬い部分を通じたものを計測している<sup>4)</sup> という違いにより、LSS 試験より BE 試験の値の方が大きくなるものと考えられる。

Fig. 18 は、OCR を変化した場合の BE 試験結果と LSS 試験結果の比較である。図より、BE 試験と LSS 試験では、OCR を変化させても、せん断剛性  $G_0$  に変化を及ぼさなかった。

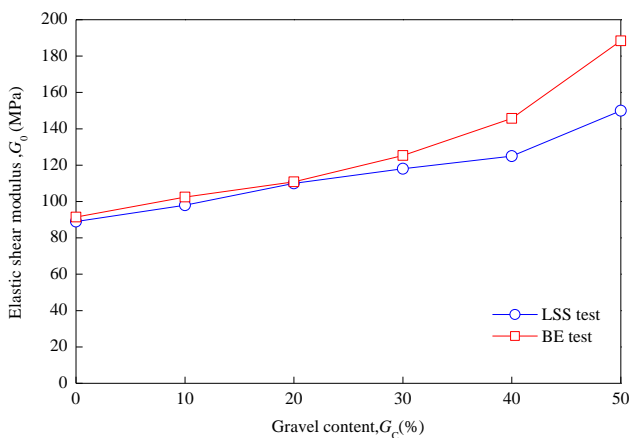


Fig. 17 せん断剛性と礫分含有率の関係

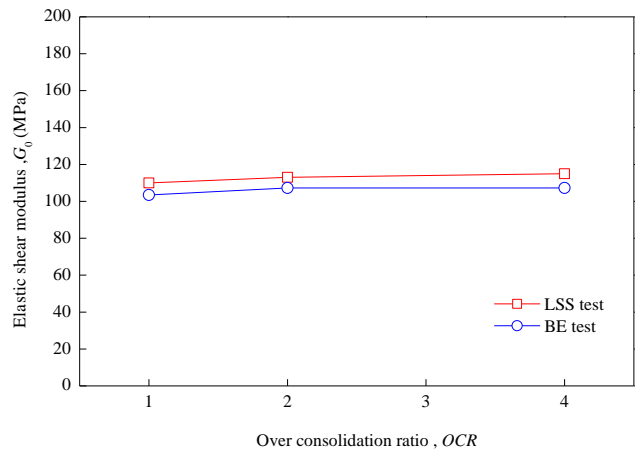


Fig. 18 せん断剛性と OCR の関係

##### (2) 液状化強度と波動伝播特性および微小変形特性

Fig. 19 は、 $DA=2\%$  の液状化強度  $R_L$  と、礫分含有率の関係を Fig. 20 は、 $R_L$  と OCR の関係を示したものである。Fig. 19 より、 $G_0$  は礫分含有率とともに、ほぼ一律に増加しているようであるが、 $R_L$  は  $G_c=30\%$  以降急激に増加しており、傾向が  $G_c$  により変化している。一方、Fig.20 の OCR を変化したケースでは、同じ  $G_0$  であっても OCR が増加すると  $R_L$  も増加することから両者の関係性は小さいと言える。

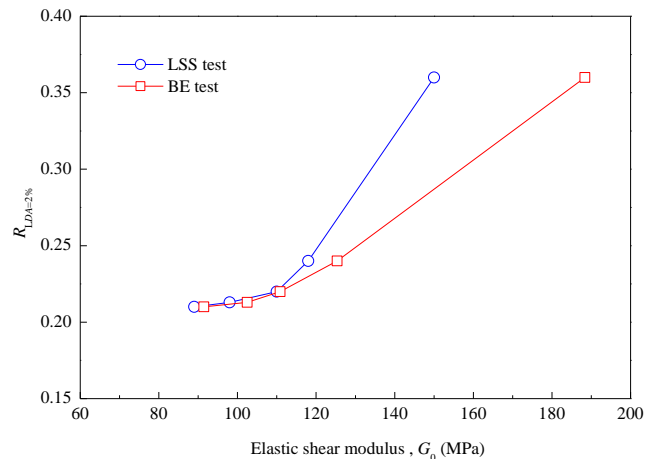


Fig. 19 液状化強度とせん断剛性の関係 ( $G_c$  について)

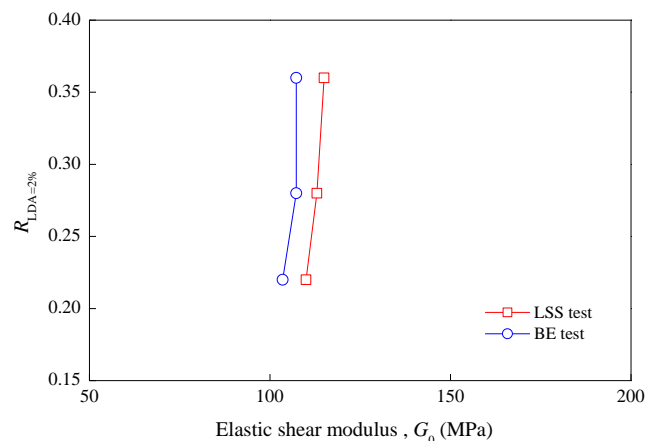


Fig. 20 液状化強度とせん断剛性の関係 (OCR について)

### (3)液状化強度と割線せん断弾性係数

Fig.21 と Fig.22 は、礫分含有率および OCR の割線せん断剛性  $G_{0.003}$  (せん断ひずみ 0.003%) と液状化強度の関係を示している。図より、液状化強度と礫分含有率の関係は、 $G_c=20\%$ までは、割線せん断剛性の増加は小さく、30%を越えると  $R_L$ が増加傾向を示し、50%では  $R_L$ が急激に増加していることが分かる。したがって、 $R_L$ と  $G_{0.003}$ の関係は直線的となり、増加傾向が等しいことが分かる。また、これは OCR を変化させた場合も同様に直線関係であることが分かる。このことから、礫分および OCR を変化させた液状化強度は、少し大きいひずみレベルの割線せん断剛性と良い相関性を有していると言える。

このことから、割線せん断剛性と液状化強度の関係を用いることにより、 $R_L$ の推定を行うことができる可能性があると言える。

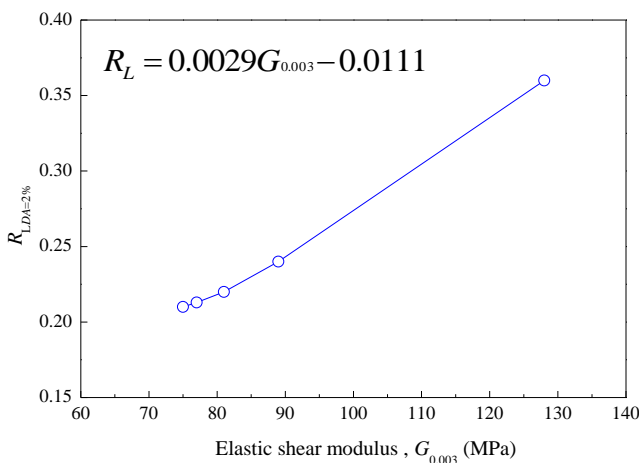


Fig. 21 液状化強度と割線せん断剛性の関係 ( $G_c$ について)

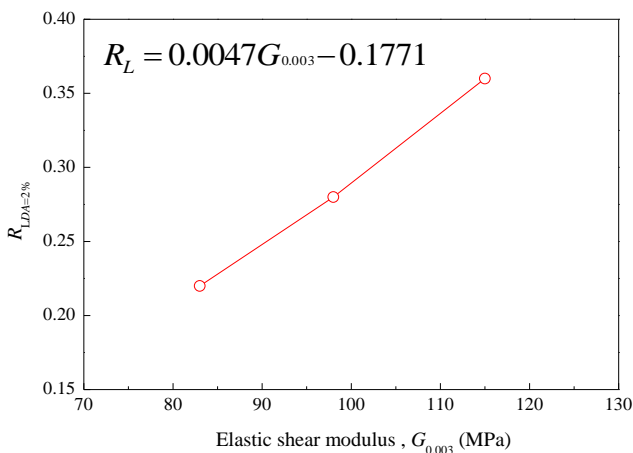


Fig. 22 液状化強度と割線せん断剛性の関係 (OCR について)

### (3)液状化強度と排水強度の関係

Fig. 23 は、排水強度と DA=2%の液状化強度の関係を示している。図より、礫分が少ない範囲では、排水強度の増加量は小さく、礫分が 30%を越えると急激に増加していることが分かる。このことより、排水強度と液状化強度に関しても、直線的な関係となっている。Fig.24 は、OCR を変化させた場合の排水強度と液状化強度の関係を示している。図より、OCR を加えてもピ

ーク強度は等しいことが分かる。これより、ピーク強度と液状化強度には関係性がないことが分かる。

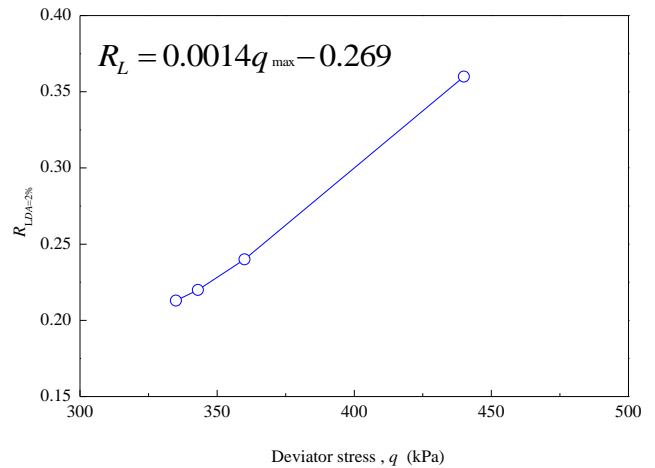


Fig. 23 液状化強度と排水強度の関係 ( $G_c$ について)

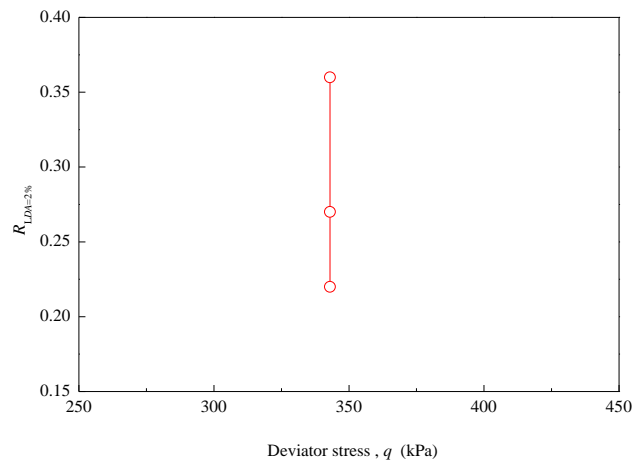


Fig. 24 液状化強度と排水強度の関係 (OCR について)

### (4)せん断波速度と間隙比の興味深い関係

Fig.25 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(2)による線も図示している。一般的にこの関係式<sup>5)</sup>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、礫分を変化させた場合でも成り立つことが図より分かる。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することが可能である。

$$G_0 = 7350F(e)(\sigma_0')^{0.5} \quad (9)$$

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \quad (10)$$

ここに、

$G_0$  : せん断剛性 (kPa)       $\sigma_0'$  : 有効拘束圧 (kPa)

$F(e)$  : 間隙比関数

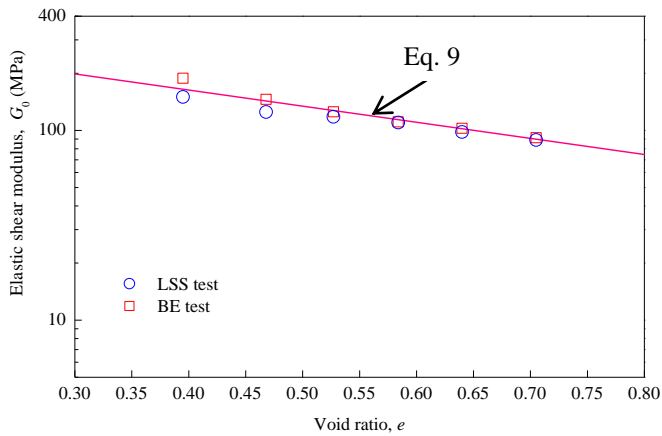


Fig. 25 せん断剛性と間隙比の関係

## 5. 結論

本研究より、初期せん断剛性と液状化強度の間には、礫分に対してはある程度の関連性が見られたが、 $OCR$ に関しては関連性が小さかった。そこで、少し大きなひずみレベル（せん断ひずみ 0.003%）の割線せん断剛性と液状化強度との関係性を調べたところ、礫分と $OCR$ の両方のケースで液状化強度と関連性があることが確認できた。また、せん断波速度と間隙比の関係には、礫分の異なる試料を用いても、既存の間隙比補正式が適用できることが確認できた。このことから、礫を含まない供試体で $G_0$ を求めることができれば、礫を含んだ供試体の $G_0$ を推知することが可能であると言える。

## 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，pp.730～749，2009.
- 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，pp. 195-207，2001.
- 4) 古関潤一，堤千花，佐藤剛司：動のおよび静的に求めた乾燥豊浦砂の弾性変形係数，生産研究，58巻6号，2006.
- 5) Kokusho, T.: Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, Soils and Foundations, Vol.20, No.2, pp.45～60, 1980.