

# 細粒分含有率を変化させた現地土のせん断弾性係数に及ぼす影響

寺迫 太陽<sup>1</sup>・兵動 太一<sup>2</sup>・掛川 智仁<sup>3</sup>・ハザリカ ヘマンタ<sup>4</sup>・前田 翼<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 富山県立大学大学院 工学研究科 環境・社会基盤工学専攻

(〒939-0398 富山県射水市黒河 5180)

E-mail: u157008@st.pu-toyama.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 富山県立大学講師 工学部 環境・社会基盤工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180)

E-mail: t.hyodo@pu-toyama.ac.jp

<sup>3</sup> 中央開発株式会社 (東京都新宿区西早稲田 3-13-5)

E-mail: kakegawa@ckcnet.co.jp

<sup>4</sup> 正会員 九州大学教授 工学研究院 社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: hazarika@civil.kyushu-u.ac.jp

<sup>5</sup> 学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: maeda.tsubasa.704@s.kyushu-u.ac.jp

2018年スラウェシ島地震では、液状化に起因する大規模な地盤流動が発生した。従来、液状化を主因とする死者は多くは出ないと考えられていたが本地震では多くの死者・行方不明者が確認された。地震発生後に行われたトレンチ調査によって、流動層にシルト層が含まれている事が確認された。本研究では地盤流動が起きた Sibalaya で採取した細粒分を多く含む現地試料を用いてベンダーエレメント試験を行い、せん断弾性係数  $G$  を算出した。細粒分による影響を調査するため、同試料の細粒分含有率を変化させた供試体を作製、試験を行った。その結果、せん断弾性係数  $G$  は細粒分含有率が 0,25%と 50,75%で似た傾向を示し、二極化した。また、せん断弾性係数  $G$  の評価に等価骨格間隙比を用いる際、広範囲の細粒分含有率では、寄与率を個別に決めることで明確な関係を得る事ができた。

**Key Words:** *fine content, 2018 Sulawesi Earthquake, bender element test, shear modulus*

## 1. はじめに

2018年、インドネシアでスラウェシ島地震 ( $M_w=7.5$ ) が発生した。地震、液状、津波によって死者・行方不明者 4,547人、被災者 172,999人、住宅損壊 100,405戸、経済的損失は5兆 IDR (約370億円) の被害が確認された<sup>1)</sup>。また、本地震では液状化に起因する世界で類を見ない大規模な地盤流動が確認された。従来、液状化を主因とする死者は多くは出ないと考えられていたが本地震では多くの死者・行方不明者が確認された。

本稿では、本地震の液状化に起因する大規模な地盤流動が確認されたエリアの一つである Sibalaya で採取された現地試料を用いて、複数の有効拘束圧下においてベン

ダーエレメント試験を行い、せん断弾性係数  $G$  を算出した。地震発生後に行われたトレンチ調査によって流動層にシルト層が含まれていたことや、細粒土やシルトが互層となっている地層が複数確認された<sup>1)</sup>ため、本研究では高細粒分含有率の現地試料を用いて試験を行った。また、細粒分が動的特性に与える影響を調査するため、複数の細粒分含有率 (0, 25, 50, 75%) に再配合した供試体で試験を行った。

本研究で算出したせん断弾性係数  $G$  は様々な研究者によって評価する実験式が提案されている。粒径の揃っているきれいな砂<sup>2)3)</sup>や粘性土のみ<sup>4)5)</sup>に対する評価式は数多く提案されてきたが、幅広い細粒分含有率に対する評価式の提案はまだ少ない。兵動ら<sup>6)</sup>は細粒分を 0~30%含

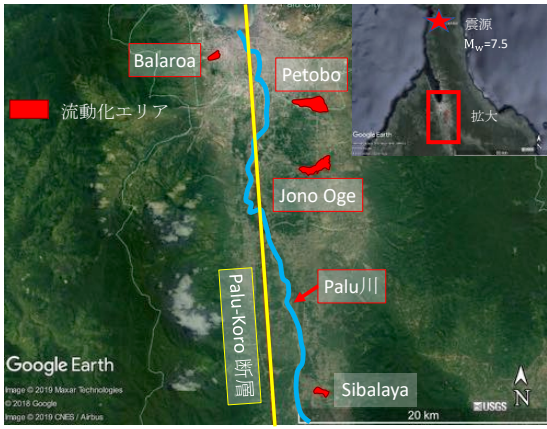
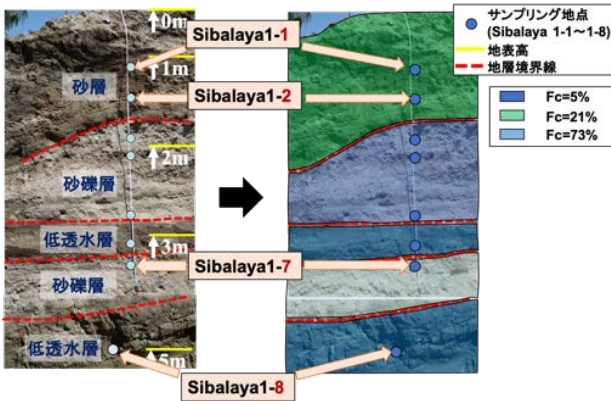


図-1 流動化エリア (Google Earth に加筆修正)



(a) 試料採取地点



(b) サンプルング地点の地層

図-2 サンプルング地点

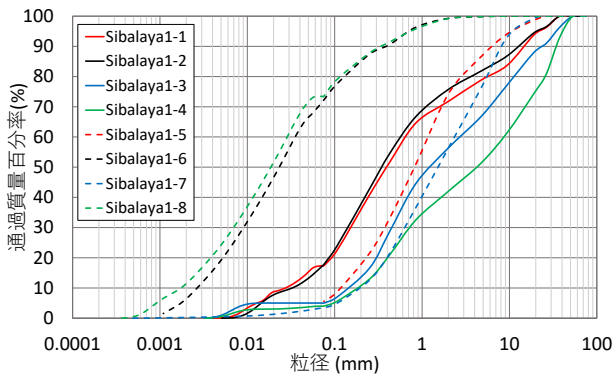


図-3 粒径加積曲線 (Sibalaya1-1~8)

表-1 試験試料の物理的性質

細粒分含有率 $F_c$ (%)	0	25	50	75
土粒子密度 $\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2.67	2.66	2.66	2.67
50%粒径 $D_{50}$ (mm)	0.25	0.14	0.075	0.022
均等係数 $U_c$	2.8	17.5	38.6	35.7
分類	砂	細粒分 質砂	細粒土	細粒土

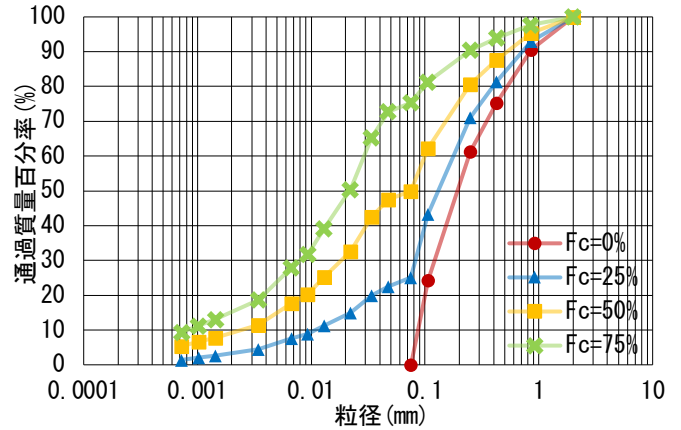


図-4 粒径加積曲線 (試験試料)

有したしらすに対して等価骨格間隙比  $e_{eq}$  を用いてせん断弾性係数  $G$  を評価する実験式の提案を行った。よって本稿でも等価骨格間隙比  $e_{eq}$  を用いてせん断弾性係数  $G$  を評価することを試みた。

## 2. 現地及び試験試料

### (1) 現地試料

本研究では、流動化エリアの一つである Sibalaya で地盤流動により生じた地層から 8 点試料を採取し、上から Sibalaya1-1~8 と名付けた。図-1 に流動化エリアを、図-2 にサンプルング地点を、図-3 に粒径加積曲線を示す。図-2, 3 より、砂礫層と低透水層が交互に重なりあてることがわかる。本研究ではサンプルング地点の最下層に位置し、細粒分を多く含む Sibalaya1-8 ( $F_c=73.4\%$ ) の現地試料を用いて試験を行った。

### (2) 試験試料

前述のように、試験には Sibalaya1-8 の試料を用いた。試料の礫分が少量であり、本研究で用いた供試体の寸法が  $\phi=50\text{mm}$ ,  $h=100\text{mm}$  のため試料を 2mm 以下に調整し、試験に用いた。また、細粒分による影響を調査するため、粗粒分と細粒分を分けて再配合し、複数の細粒分含有率 (0, 25, 50, 75%) に調整した供試体で試験を行った。表-1 に試験試料の物理的性質を、図-4 に粒径加積曲線を示す。

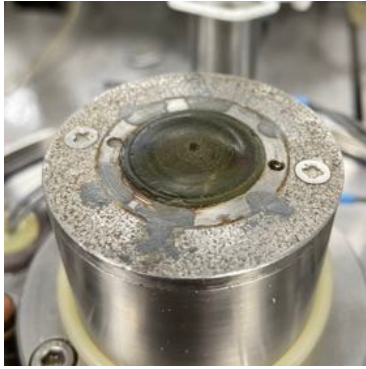


図5 ベンダーエレメント(ディスク型)

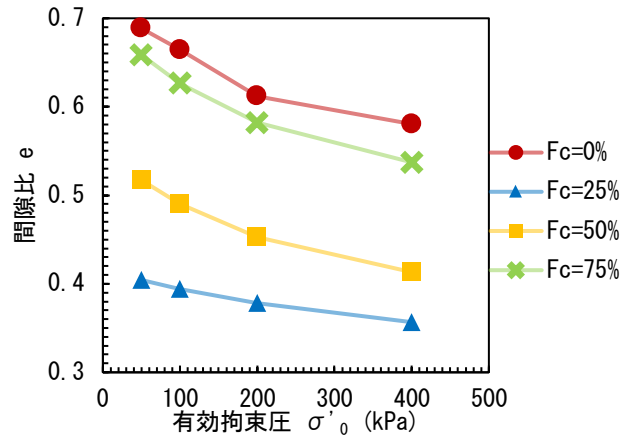


図6 間隙比 e と有効拘束圧の関係

### 3. 試験概要

#### (1) 供試体作製方法

本研究の試料は細粒分含有率が大きく、空中落下法による密度管理が困難であったため、湿潤突固め法で供試体を作製した。まず、粗粒分に対し所定の割合になるように細粒分を調整して混合した。そして、所定の含水比になるように水分を加え、十分に攪拌した。ここで、細粒分含有率が 0% の場合は含水比 10%、細粒分を含む試料の場合は含水比 15% に調整し、細粒分を水に馴染ませるため、水分を加えた後に十時間以上静置した。次に  $\phi=50\text{mm}$ ,  $h=100\text{mm}$  の二つ割りモールドに試料を 3 層に分け入れて投入し、ランマーを各層に対して所定の回数落下させることにより供試体を作製した。細粒分含有率が 0% の場合は自立させるために凍結させた。湿潤突固め法により与えられる突固め仕事量は以下の式(1)で表される。

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \quad (1)$$

ここに、 $W_R$  はランマーの重量 (kN),  $H$  は落下高さ (m),  $N_L$  は層数,  $N_B$  は一層あたりの突固め回数,  $V$  はモールドの容積 ( $\text{m}^3$ ) を表す。本研究では、サンプリング時点の現地試料 (Sibalaya1-8) は液状化前より密になっていると仮定し、液状化前の状態に近づけるため、サンプリング時点よりゆる詰になるよう突固め仕事量を調整し、供試体を作製した。0.015kN の重量のランマーを使用し、落下高さは 5cm とした。突固め回数は下層への転圧エネルギー集中を避けるため、1層目を 1回、2層目を 4回、3層目を 8回と層ごとに異なる回数で突き固めた。供試体にも与えられた突固め仕事量は  $50\text{kJ/m}^3$  となった。これらの方法で作製した供試体を三軸セル内にセットし、二重圧法で通水させた後、背圧を 100kPa 加えて供試体の飽和を図った。その後、全ての供試体で B 値が 0.95 以上であることを確認した。

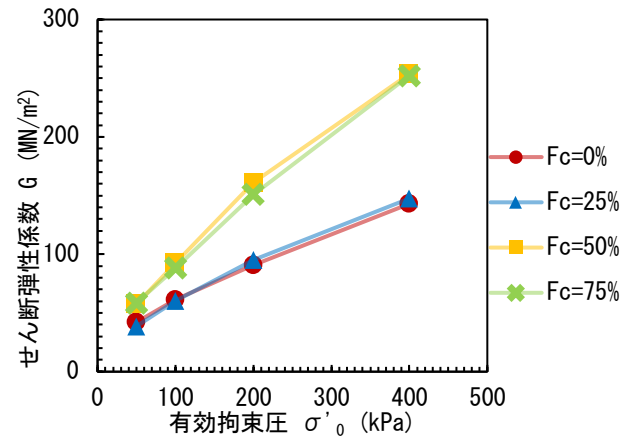


図7 せん断弾性係数 G と有効拘束圧の関係

#### (2) ベンダーエレメント試験

ベンダーエレメント (以下、BE) 試験は供試体の両端に設置した BE を用いて供試体を伝搬する弾性波を発信・受信することにより、伝搬時間を測定し、せん断弾性係数  $G$  を算出する。突起形の BE が主流ではあるが、本研究ではディスク型の BE (図-5) を供試体の両端に設置し、弾性波を発生させ、試験を行った。ディスク型 BE では P 波と S 波の両方の計測が可能であるが、本稿では S 波の結果のみ記載する。有効拘束圧を 50, 100, 200, 400kPa と段階的に载荷させ、それぞれの等方圧密条件下で BE 試験を行った。送信電圧  $\pm 60\text{V}$  の正弦波で周波数を 2.5~25kHz と変化させ、せん断弾性波を発生させた。せん断弾性波伝搬時間の決定には start-to-start 法を用いた。式(2)及び(3)を用いてせん断弾性波速度  $V_s$  とせん断弾性係数  $G$  を算出した。

$$V_s = L / \Delta t \quad (2)$$

$$G = \rho_t * V_s^2 \quad (3)$$

ここに、 $L$  はせん断弾性波伝搬距離 (BE 間の距離),  $\Delta t$  はせん断弾性波伝搬時間,  $\rho_t$  は土の湿潤密度を表す。

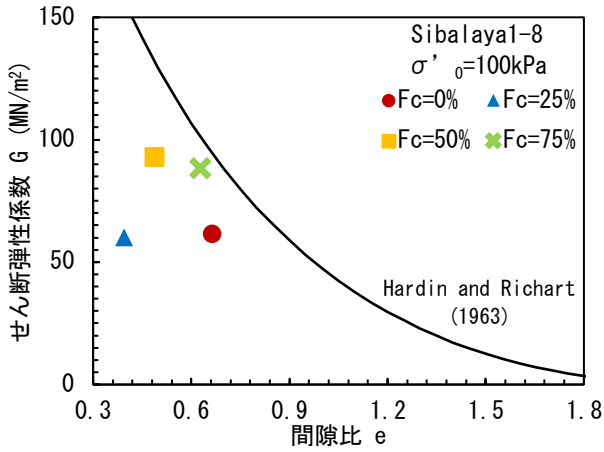


図8 せん断弾性係数Gと間隙比eの関係

#### 4. 試験結果及び考察

図-6に間隙比eと有効拘束圧の関係を示す。間隙比eは細粒分含有率が0%の場合が一番大きく、25%で最も小さくなり、50%、75%では細粒分含有率の増加に伴い間隙比は大きくなった。このことから、同じ突固め仕事量でも供試体を作製した際には、最適に締まりうる細粒分含有率が存在することがわかる。本研究の試験試料では細粒分含有率25%で最も供試体が密になった。

図-7にせん断弾性係数Gと有効拘束圧の関係を示す。図より、細粒分含有率が0、25と50、75%でせん断弾性係数Gの値が二極化していることがわかる。既往の研究<sup>6)</sup>では間隙比が等しい場合、30%までは細粒分含有率の増加によってせん断弾性係数Gは低下すると報告されている。本研究では、細粒分含有率が25%の間隙比が大幅に小さくなったため、細粒分含有率の増加によるせん断弾性係数Gの低下と、間隙比の低下によるせん断弾性係数Gの増加によって、細粒分含有率が0%と25%のせん断弾性係数Gが同程度の値になったと考えられる。既往の研究<sup>7,8)</sup>では、非活性細粒分において細粒分含有率が30%付近からせん断強度の挙動を細粒分が支配する事が報告されている。このことから、本研究の試料でも細粒分含有率が25%から50%の間でせん断弾性係数Gの挙動が粗粒分から細粒分に変化したと考えられる。しかしながら範囲が広いと、正確な傾向を得るには細粒分含有率をさらに細分化して実験を行う必要がある。

図-8に有効拘束圧100kPaでのせん断弾性係数Gと間隙比eの関係を示す。併せてHardin and Richart<sup>2)</sup>がオタワ砂に対して提案した実験式(式(4))も示す。

$$G = 6930 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^2 \quad (\text{in kPa}) \quad (4)$$

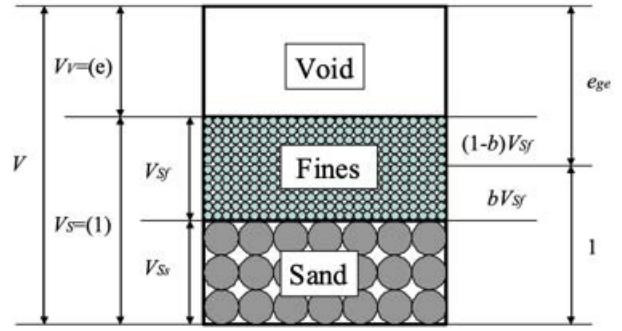


図-9 土の構成模式図

(出典：兵動ら 2011<sup>6)</sup>)

ここに、 $\sigma'_m$ は平均有効主応力を表す。

図より、細粒分含有率によるばらつきが大きく、Hardin and Richartが提案した実験式のような関係を確認することはできない。よって、間隙比eでは細粒分含有率が0、25、50、75%のせん断弾性係数Gの評価を行う事ができなかった。

#### 5. 等価骨格間隙比 $e_{ge}$ を用いたせん断弾性係数Gの評価

##### (1) 細粒分を含む土の骨格構造

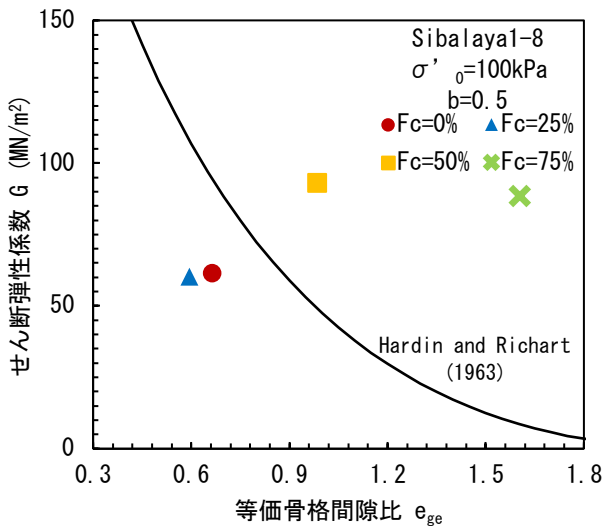
前述の通り、せん断弾性係数Gと間隙比eには明確な関係を得ることができなかった。そこで、間隙比の解釈を拡張した骨格間隙比 $e_g$ および等価骨格間隙比 $e_{ge}$ <sup>9)</sup>の概念を用いて評価を試みた。細粒分を含む土を考える時、図-9<sup>6)</sup>のような間隙、細粒分、粗粒分と三つに分けて考える事ができる。骨格間隙比 $e_g$ は細粒分を完全に空隙とみなし、粗粒分のみが骨格構造に寄与すると考える。それに対し、等価骨格間隙比 $e_{ge}$ は細粒分の一部が粗粒分の骨格構造に寄与すると考える。骨格間隙比 $e_g$ および等価骨格間隙比 $e_{ge}$ はそれぞれ式(5)および(6)で表される。

$$e_g = \frac{V_v + V_{sf}}{V_{ss}} \quad (5)$$

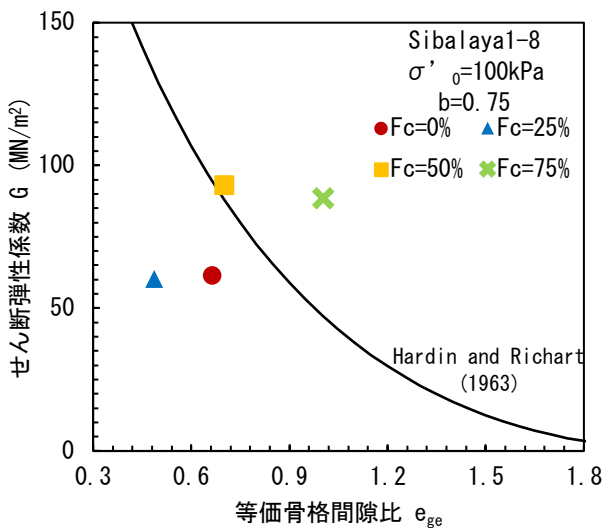
$$e_{ge} = \frac{e + (1 - b)F'_c}{1 - (1 - b)F'_c} \quad (6)$$

$$F'_c = \frac{V_{sf}}{V_s} \quad (7)$$

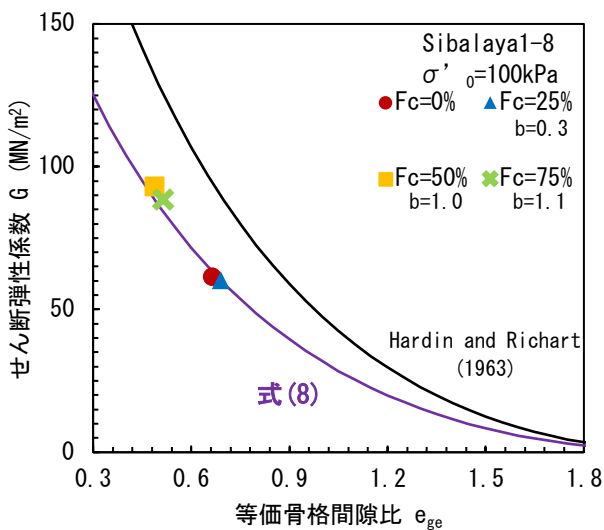
ここに $V_v$ は間隙の体積を、 $V_{sf}$ は細粒分の体積を、 $V_{ss}$ は粗粒分の体積を、bは細粒分が粗粒分の骨格形成に寄与する割合である寄与率を、 $V_s$ は土粒子の体積を表す。



(a)  $b=0.5$  の場合



(b)  $b=0.75$  の場合



(c) それぞれ別の寄与率  $b$  を決めた場合

図-9 せん断弾性係数  $G$  と等価間隙比  $e_{ge}$  の関係

なお、式(6)に示される  $F_c'$  は式(7)の体積比で表される細粒分含有率である。本稿では粗粒分と細粒分の土粒子密度が同じだと仮定し、質量比で計算を行なった。式(6)より、寄与率  $b$  が1では通常の間隙比  $e$  と等しい値を示し、寄与率  $b$  が0では骨格間隙比  $e_g$  と等しくなる。本研究では細粒分を多く含むため、骨格間隙比  $e_g$  では細粒分の影響を正しく評価できないと考え、等価骨格間隙比  $e_{ge}$  を用いてせん断弾性係数  $G$  の評価を試みた。

## (2) せん断弾性係数 $G$ の評価

図-9に有効拘束圧が100kPaでのせん断弾性係数  $G$  と等価間隙比  $e_{ge}$  の関係を示す。図-9(a)の寄与率  $b=0.5$  の場合、細粒分含有率が0, 25%では同程度の関係を示すが50, 75%では間隙比が大きく、細粒分が与える影響を過小に評価してしまう。図-9(b)の寄与率  $b=0.75$  の場合では、細粒分含有率が25%で  $b=0.5$  の場合と比較すると、図-9(a)とは反対に細粒分が与える影響を過大に評価している。これらから、細粒分含有率が0, 25, 50, 75%では寄与率  $b$  を一定に与える事が難しいため、それぞれ別の寄与率  $b$  を決める必要があると考えられる。

図-9(c)に有効拘束圧が100kPaでの細粒分含有率ごとにそれぞれ別の寄与率  $b$  を決めた場合のせん断弾性係数  $G$  と等価間隙比  $e_{ge}$  の関係を示す。細粒分含有率が25%で  $b=0.3$ , 50%で  $b=1.0$ , 75%で  $b=1.1$  に決定した。ここで、細粒分含有率が75%の寄与率  $b$  が1.0より大きくなっているのは、細粒分が粗粒分より骨格構造に寄与したためである。細粒分含有率が0%の場合は寄与率を変化させても等価骨格間隙比  $e_{ge}$ =間隙比  $e$  のため、グラフのプロットが移動することはない。そのため、Hardin and Richart<sup>2)</sup>の式(4)の実験定数を変化させ、式(8)の形で実験式へのプロットを試みた。

$$G = 4650 \frac{(2.17 - e_{ge})^2}{1 + e_{ge}} (\sigma'_m)^2 \quad (\text{in kPa}) \quad (8)$$

実験定数を変化させたものの、細粒分含有率が0, 25, 50, 75%の場合では寄与率  $b$  を個別に決定することによってせん断弾性係数  $G$  と等価骨格間隙比  $e_{ge}$  の間に明確な関係を得る事ができた。

このことから、広範囲に広がる細粒分含有率のせん断弾性係数  $G$  を等価骨格間隙比  $e_{ge}$  で評価する場合には、寄与率  $b$  を個別に決定する事が有用であると考えられる。しかしながら、本稿では有効拘束圧が100kPaのみと限定的であることと、細粒分含有率の間隔が大きかったため、さらに細分化して細粒分含有率を変化させて試験を行い、正確な傾向を得る必要がある。

## 6. 結論

本研究では、2018年スラウェシ島地震の液状化に起因する地盤流動が起きたエリアの細粒分を多く含む現地試料を用いて細粒分含有率を変化させ、湿潤突固め法で供試体を作製してBE試験を行い、以下の結論を得た。

①同じ突固め仕事量では、供試体を密にする最適な細粒分含有率が存在する。

②せん断弾性係数 $G$ は細粒分含有率が0%, 25%で同程度の値を、50%, 75%でも同程度の値を示し、二極化している。これは、非活性細粒分において細粒分含有率が30%付近からせん断強度の挙動を細粒分が支配する既往の研究の報告と一致している。

③細粒分含有率が広範囲の場合、等価骨格間隙比 $e_{eq}$ を用いて有効拘束圧が100kPaでのせん断弾性係数 $G$ の評価を行う際は、寄与率 $b$ の値を個別に決定することによって明確な関係を得る事ができた。

**謝辞：**本研究はJSPC 科研費基盤研究(B)ZOH02244の助成を受けたものです。本研究の遂行にあたり、中央大学國生剛治名誉教授、東京大学清田隆准教授には御助言をいただきました。ここに謝意を表します。

## REFERENCES

- 1) 独立行政法人 国際協力機構(JICA), 液状化地すべり(内陸部)に関する国内支援委員会:インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクトドラフトファイナルレポート, 技術提案書, 2021
- 2) Hardin, B. O. and Richart, Jr. F. E. : Elastic wave velocities in granular soils, Proc. ASCE, Vol. 89, SM1, pp. 33-65, 1963
- 3) Iwasaki, T. and Tatsuoka, F. : EFFECTS OF GRAIN SIZE AND GRADING ON DYNAMIC SHEAR MODULI OF SANDS, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 17, No. 3, pp. 19-35, 1977
- 4) Kokusho, T. Yoshida, Y. and Esashi, Y. : Dynamic properties of soft clay wide strain range , Soils and Foundations, Vol. 22 No. 4, pp. 1-18, 1982
- 5) 善幸企, 山崎宏之, 梅原靖文: 地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所, Vol. 26, No. 1, 1987.
- 6) 兵動太一, 山田卓, 兵動正幸, 岡林巧: しらすのせん断弾性係数と細粒分の評価, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol. 67, No. 2, pp174-185, 2011
- 7) 渡辺真吾, 兵動正幸, 東佳佑, 梶山慎太郎: 広範な粒度から成る砂・細粒土混合土の非排水繰り返しせん断特性の評価, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol. 71, No. 4, pp. 301-316, 2015
- 8) Thevanayagam, S. : Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands, Journal of geotechnical. and geoenvironmental engineering, Vol. 124, No. 6, pp. 479-491, 1998.
- 9) Thevanayagan, S. Shenthnan, T. Mohan, S. and Liang, J. : Undrained fragility of clean sande, silty sands, and sandy silt, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 128, No. 10, pp. 849-859, 2002

## EFFECT OF VARYING FINE CONTENT ON THE SHEAR MODULUS OF FIELD SOILS

Taiyo TERASAKO, Taichi HYODO, Tomohito KAKEGAWA ,  
Hemanta HAZARIKA and Tsubasa MAEDA

The 2018 Sulawesi earthquake caused large-scale ground movement due to liquefaction. Although it is conventionally believed that liquefaction does not cause many fatalities, many fatalities and missing persons were confirmed in this earthquake. Trench investigations conducted after the earthquake confirmed the presence of a silt layer in the fluidized bed. In this study, bender element tests were conducted using field samples with high fine-grain content collected at Sibalaya, where the ground flow occurred, and shear modulus was calculated. In order to investigate the effect of fine-grain content, specimens with different fine-grain content were prepared and tested. The shear modulus was polarized, showing a similar trend at 0 and 25% fine-grain content and a similar trend at 50 and 75% fine-grain content. When the equivalent granular void ratio was used to evaluate the shear modulus, a clear relationship was obtained for a wide range of fine-grain content by giving the contribution ratios separately.