

2018年スラウェシ島地震の現地土の細粒分がせん断弾性係数に及ぼす影響

富山県立大学大学院 学生会員 ○寺迫 太陽
 富山県立大学 正会員 兵動 太一
 中央開発株式会社 掛川 智仁
 九州大学 正会員 ハザリカ ヘマンタ
 九州大学大学院 学生会員 前田 翼

1. はじめに

2018年、インドネシアでスラウェシ島地震が発生し、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。本稿では、地盤流動が確認されたエリアの一つである Sibalaya で採取された現地土を用いてベンダーエレメント(以下、BE)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ゆる詰めの中積砂層・シルト層が液状化し、緩斜面において側方流動が発生させたことまでは、既往調査結果より明らかとなっている¹⁾ため、非塑性細粒分を多く含有する現地土を用いて複数の細粒分含有率(0~75%)に再配合した供試体で試験を行い、細粒分がせん断弾性係数 G に与える影響を調査した。

せん断弾性係数 G は地盤の変形予測解析や地震応答解析において用いられる値であり、液状化強度とも密接な関わりを持つ²⁾。このせん断弾性係数 G を間隙比 e 、有効拘束圧 σ'_0 の関数で評価する式は様々な研究者によって提案されているが粒径の揃った砂³⁾や粘性土のみ⁴⁾に対する評価式が多く、実地盤の粒度は広く分布しており、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。本稿では混合土でよく用いられる等価骨格間隙比 e_{gc} を用いたせん断弾性係数 G の評価を試みた。

2. 試験試料

本研究では、Sibalaya で採取された非塑性細粒分を多く含む試料(Sibalaya1-8, $F_c \approx 75\%$)を用いた。細粒分が及ぼす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(0,10,20,30,40,50,75%)に調整した試料で試験を行った。表-1 に試験試料の物理的性質を示す。ここで、 $F_c=0\%$ と75%の土粒子密度が同程度の値であったため、全試料の土粒子密度を $2.67(\text{Mg}/\text{m}^3)$ とした。

表-1 試料の物理的性質

細粒分含有率 $F_c(\%)$	0	10	20	
土粒子密度 $\rho_s(\text{Mg}/\text{m}^3)$	2.67			
塑性指数 I_p	NP			
50%粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.25	0.23	0.18	
均等係数 U_c	2.8	3.0	16.8	
細粒分含有率 $F_c(\%)$	30	40	50	75
土粒子密度 $\rho_s(\text{Mg}/\text{m}^3)$	2.67			
塑性指数 I_p	NP			
50%粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.12	0.096	0.075	0.022
均等係数 U_c	31.3	40.3	38.6	35.7

3. ベンダーエレメント試験

湿潤突固め法で突固め仕事量 $E_c=50\text{kJ}/\text{m}^3$ で作製した供試体($\phi=50\text{mm}, h=100\text{mm}$)を三軸セル内にセットし、二重負圧法で通水した後、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、有効拘束圧 50kPa を載荷した。

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送受信することにより、伝搬時間 $\Delta t(\text{ms})$ を測定し、せん断弾性係数 G を算出する。 Δt の決定には Start-to-Start 法を用いた。式(1)を用いてせん断弾性係数 G を算出した。

$$G = \rho_t * (L/\Delta t)^2 / 1000 (\text{MN}/\text{m}^2) \quad (1)$$

ここで、 L はせん断弾性波伝搬距離=BE 間の距離 (mm)、 ρ_t は土の湿潤密度(Mg/m^3)を表す。

4. 試験結果

図-2 に有効拘束圧 50kPa でのせん断弾性係数 G と間隙比 e の関係を示す。図より、細粒分含有率によるばらつきが大きく、 G と e の間に相関はみられない。そこで、式(3)の混合土の細粒分の一部が粗粒分の骨格構造、強度に寄与すると考える等価骨格間隙比 e_{gc} ⁵⁾ の概念を用いた評価を試みた。

$$e_{ge} = \frac{e + (1-b)F'_c}{1 - (1-b)F'_c} \quad (2)$$

ここで、 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($0 < b < 1$)を、 F'_c は体積比で表される細粒分含有率を示す。

図-3 にせん断弾性係数 G と等価骨格間隙比 e_{ge} の関係を示す。また、せん断弾性係数 G の評価式は通常、式(3)³⁾の形で表される。

$$G = A * f(e) * \sigma'_{0n} \quad (3)$$

ここで、 A は実験定数を、 $f(e)$ は間隙比の関数を、 n は G の有効拘束圧依存性である実験定数を示す。本研究では $f(e)$ に式(4)³⁾の間隙比 e を等価骨格間隙比 e_{ge} に変更した関数を、 n に 0.5 ³⁾⁴⁾を用い、実験定数 A を変化させることによって e_{ge} を用いた G の評価式の提案を試みた。

$$f(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (4)$$

$F_c=0\%$ の場合は寄与率 b に依らず $e_{ge}=e$ のため、プロットが移動することはない。そのため、式(3)の実験定数 A を $F_c=0\%$ のプロットが乗るように決定した式(5)を用いて細粒分を含む試料の寄与率 b の検討を行った。

$$G = 4650 \frac{(2.17 - e_{ge})^2}{1 + e_{ge}} (\sigma'_m)^2 \quad (\text{in kPa}) \quad (5)$$

全ての F_c で同一の b としたとき、式(4)の曲線上にプロットされなかったため、骨格構造が変化する F_c 毎に b をそれぞれ変化させ、 $F_c=10, 20\%$ で $b=0.2$ 、 $F_c=30, 40\%$ で $b=0.5$ 、 $F_c=50, 75\%$ で $b=1.1$ に決定した。このように、細粒分含有率が増加すると寄与率 b も増加し、 $F_c \geq 50\%$ で 1 を超えた。これは骨格の支配が粗粒分から細粒分に完全に移行したためだと考えられる。

4. まとめ

本研究では、2018年スラウェシ島地震の非塑性細粒分を多く含有する現地土を用いて様々な細粒分含有率に再配合し、BE試験を行った。その結果、細粒分含有率が広範囲の場合、等価骨格間隙比 e_{ge} を用いて有効拘束圧 50kPa でせん断弾性係数 G の評価を行う際は、骨格構造が変化する F_c 毎によって場合分けを行い、寄与率 b を決定することによって式(5)を用いて関係を示すことができた。

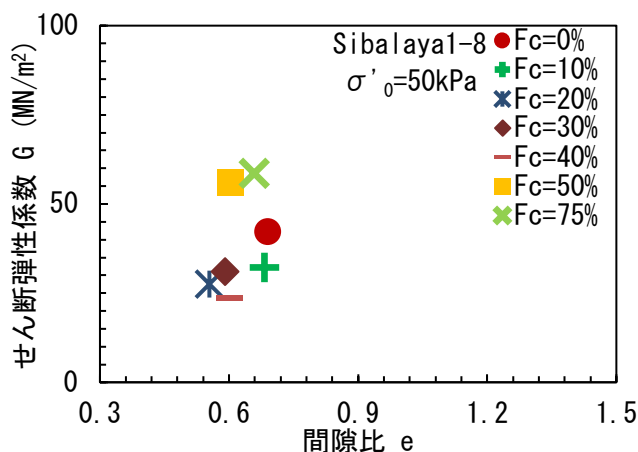


図-2 せん断弾性係数と間隙比の関係

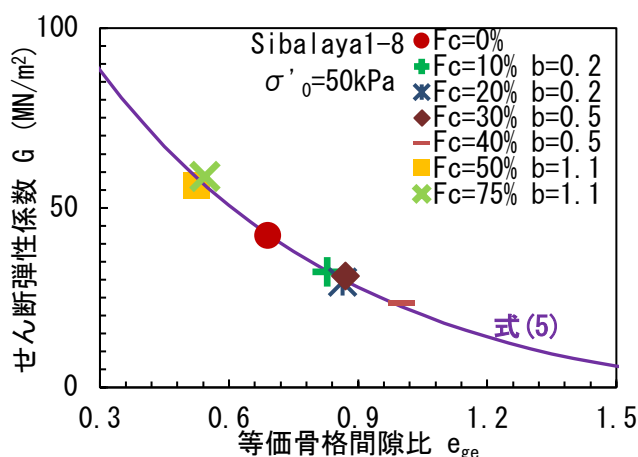


図-3 せん断弾性係数と等価骨格間隙比の関係

5. 参考文献

- 1) 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) Tokimatsu, K., Yamazaki, T., Yoshimi, Y.: Soil Liquefaction Evaluations By Elastic Shear Moduli, Soils And Foundations, Vol.26, No.1, pp.25-35, 1986
- 3) Hardin, B. O. and Richart, Jr. F. E.: Elastic wave velocities in granular soils, Proc. ASCE, Vol.89, SM1, pp.33-65, 1963
- 4) 善功企, 山崎裕之, 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
- 5) Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S. and Liang, J.: Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silt, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol.128, No.10, pp.849-859, 2002

謝辞:本研究は JSPS 科研費基盤研究(B) ZOH02244 の助成を受けたものです。ここに謝意を表します。