

砂と種々の細粒土から成る混合土のせん断弾性係数に及ぼす細粒分の影響

山口大学大学院 正会員 兵動正幸 中田幸男 吉本憲正
山口大学大学院 学生会員 ○立場晴司 金郁基

1. まえがき 実地盤に存在する砂質土の多くは細粒分を含み、そのせん断挙動も細粒分含有率の影響を受ける。これまでの筆者らによる細粒分を有する砂質土の単調及び繰返しせん断試験結果¹⁾より、せん断強度に対する細粒分の寄与率²⁾は粗粒分と細粒分の粒径比により決定できることが明らかとなった。しかし、微小ひずみ域の変形特性に与える細粒分の影響については、未だ明確ではなくその領域における影響を調べることは重要である。本研究では、三河珪砂と塑性の異なる2種類の細粒土(岩国粘土、鳥取シルト)の混合土に対して一連のベンダーエレメント試験(BE試験)を行い、せん断弾性係数に及ぼす細粒分の影響を調べ、その寄与率を評価した。さらに実験結果に基づき、細粒分の影響を考慮した混合土のせん断弾性係数の評価式を提案した。

2. 試料及び試験方法 (1)試料の物理的性質 用いた試料は、粗粒土試料として粒度調整した三河珪砂($D_{50}=0.861\text{mm}$, $e_{\max}=0.853$, $e_{\min}=0.524$)、細粒土として山口県岩国港で採取した岩国粘土、鳥取県西部地震の際に境港市竹内工業団地において液状化により噴出した鳥取シルトの2種類である。図-1に用いた試料の粒径加積曲線を示す。これらの粗粒土と細粒土を種々の割合で混合し、様々な細粒分含有率からなる混合土試料を作製した。試料は乾燥重量比で調整し、三河珪砂-岩国粘土混合土、三河珪砂-鳥取シルト混合土の混合割合はそれぞれ4通りとした。

(2) 供試体作製方法及び間隙比 供試体は、混合土の全試料に対して湿潤突固め法を用いて、所定の3種類の突固めエネルギー($E_c=22, 113, 504\text{kJ/m}^3$)で突固めることにより作製した。供試体寸法は直径5cm、高さ10cmとした。図-2に間隙比 e と細粒分含有率 F_c の関係を示す。図には最大と最小の突固めエネルギーによる結果を示している。細粒分含有率の増加に伴い、岩国粘土混合土の場合は $F_c=15\%$ 付近で突固めエネルギーの違いに拘わらず間隙比が収束するのに対し、鳥取シルト混合土の場合は、それぞれの突固めエネルギー毎に異なる間隙比をとり、細粒分の増加に伴い間隙比が低下する傾向が認められる。これは、筆者ら¹⁾が以前に示したように、 $F_c=15\%$ 程度で岩国粘土が砂の間隙を充填し尽くし、砂は最も緩い状態となるからと考えられる。一方、砂のように粒状体の構造を有する鳥取シルトの場合は、砂同様独自の構造を作り異なる間隙比を持つからと思われる。これらの供試体に対し、所定の拘束圧を加え、BE試験を行った。有効拘束圧 $\sigma'_c=50, 100, 200, 400\text{kPa}$ の4種に対し、それぞれ周波数 $f=2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20\text{kHz}$ のせん断波を送信し、start to start(送信し始めた部分から、受信し始めた部分)の読み取り法により伝達距離 L を伝わる送受信波の時刻 Δt を求めた。そして、せん断弾性波速度 $V_s=L/\Delta t$ 、せん断弾性係数 $G=\rho_s \cdot V_s^2$ をそれぞれ算出した。

3. ベンダーエレメント試験結果及び考察

(1) ベンダーエレメント試験結果と寄与率の決定 細粒分を含む砂は同一の突固めエネルギーにおいても細粒分含有率の違いにより間隙比が異なり、間隙比をパラメータに砂と同一の尺度で評価することは困難である。そこで、細粒分の一部を粗粒分の骨格と等価とみなす Thevanayagam ら²⁾が提案した等価骨格

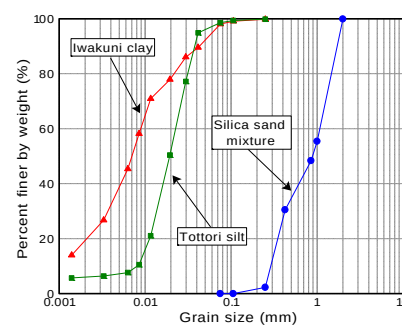


図-1 粒径加積曲線

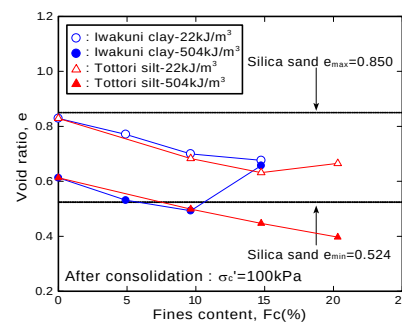


図-2 間隙比と細粒分含有率の関係

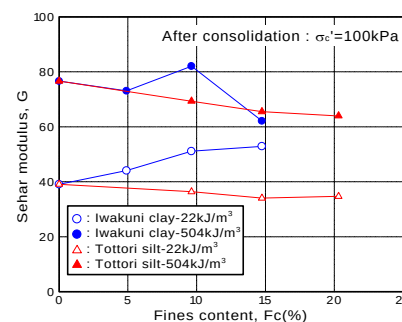


図-3 せん断弾性係数と細粒分含有率の関係

キーワード ベンダーエレメント試験、せん断弾性係数、等価骨格間隙比、寄与率

連絡先 755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院理工学研究科環境共生系専攻 Tel:0836-85-9344

間隙比 $e_{ge} = \{e + (1-b)f_c\} / \{1 - (1-b)f_c\}$, $f_c = V_{sf}/V_s$ の概念を用いる。ここに、 V_{sf} は細粒分の体積、 V_s は土粒子全体の体積、 b は細粒分が骨格形成に寄与する割合を示し、これを寄与率と呼び 0～1 まで変化する。 $b=1$ のときは通常の間隙比であり、 $b=0$ のときは細粒分の存在を無視した、いわゆる砂骨格間隙比を表す。図-3 に、図-2 の初期状態に対応するせん断弾性係数 G と細粒分含有率 F_c の関係を示す。一般的に土は間隙比の低下に伴い G が増加すると考えられるが、混合土においては F_c の増加に伴う間隙比の減少に対して、必ずしも G は増加せず、逆に低下することもあることが図の結果から観察される。岩国粘土混合土の場合突固めエネルギーが最大の場合、 G は $F_c=10\%$ 付近でばらつきと考えられる増加が認められるものの、全体的には F_c の増加により低下するのに対し、締め固め最終的に $F_c=15\%$ 付近では時に収縮する傾向があるのに対し、突固めエネルギーが最小の場合は、 G は F_c の増加に伴い増加し、 $F_c=10\%$ 付近で突固めエネルギーの違いによらずほぼ一定の値に収束する傾向が認められる。一方、鳥取シルト混合土の場合は、いずれの突固めエネルギーにおいても G は、 F_c の増加に伴い間隙比の減少に拘わらず単調に低下する様子が認められる。図-4 に岩国粘土および鳥取シルト混合土のすべての実験結果について、 G と等価骨格間隙比 e_{ge} の関係を掲げた。ここで、それぞれの寄与率は、岩国粘土混合土 $b=0.59$ 、鳥取シルト混合土 $b=0.26$ であることが別の検討から明らかとなった。その結果図に示されるように、細粒分の違いに拘わらず適切な寄与率 b を用いることにより、 G と等価骨格間隙比の間に良好な対応関係が存在することが明らかとなった。

(2) 細粒分の寄与率を考慮したせん断弾性係数の評価式の作成

本研究の実験結果を用いることより、細粒分の影響を考慮したせん断弾性係数を評価する式を提案した。Hardin and Richart ら³⁾が提案した一般的なせん断弾性係数の評価式は次式で表される。ここに、 A は実験定数、 $f_{(e)}$ は間隙比関数、 σ' は平均有効主応力、 σ'_r は基準応力、 n はせん断弾性係数の有効拘束圧依存性を示すパラメータである。本研究では細粒分の影響を考慮するために、図-4 に示す寄与率を決定した $\sigma'_c=100\text{kPa}$ 時の G - e_{ge} 関係から基準評価式を作成し、間隙比関数を等価骨格間隙比関数に置き換えた。本研究で用いた三河珪砂から得られる実験定数は $A=24.38$ であった。図-5 に岩国粘土混合土についての G - σ'_c 関係を両対数座標で示す。図中、有効拘束圧の増加に伴うせん断弾性係数の増加を傾き n として検討したところ、岩国粘土混合土の場合 $n=0.63$ 、鳥取シルト混合土 $n=0.57$ となった。以上より、細粒分の影響を考慮したせん断弾性係数の評価式を次式で表すことができる。図-6 は実験値と式(2)によるせん断弾性係数の予測結果の対応をプロットしたものである。図のようにプロットが対角線上にあることから評価式の妥当性が確認でき、この評価式により細粒分の寄与率を考慮したせん断弾性係数の予測が可能であることが明らかとなった。

$$G = Af_{(e)} \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_r} \right)^n \quad (1), \quad G = A \left[\frac{e + (1-b)f_c}{1 - (1-b)f_c} \right] \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_r} \right)^n \quad (2)$$

4. 結論 本研究では、三河珪砂に塑性の異なる岩国粘土と鳥取シルトをそれぞれ混合した試料に対して BE 試験を実施した。実験結果から得られたせん断弾性係数と等価骨格間隙比の関係より、微小ひずみ域における細粒分の寄与率を明らかにした。さらに、細粒分の寄与率を評価し、細粒分の影響を考慮したせん断弾性係数を予測できる式を作成した。

参考文献 1) Kim, Uk-Gie.ら：骨格間隙比に着目した細粒分混じり砂のせん断強度，第 43 回地盤工学研究発表会公演集，pp.335-336，2008。
2) Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S. & Liang, J. : Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. J. Geotech. Geoenviron. Engng 28, No. 10, 849-859, 3) Hardin, B.O. and F.E. Richart Jr. : Elastic wave velocities in granular soils, Jour. Of SMF Div., Proc. ASCE, Vol.89, No.SM1, Proc. Paper 3407, Feb., pp.33-65, 1963. 2002

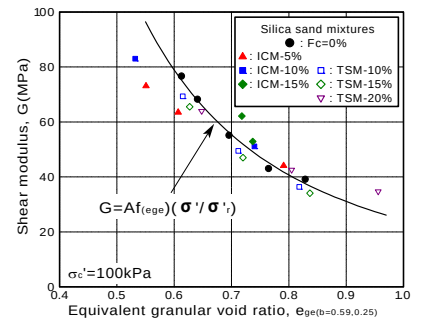


図-4 せん断弾性係数と等価骨格間隙比の関係

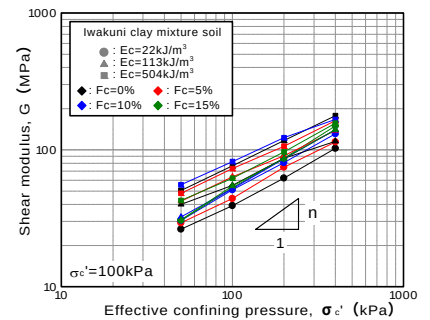


図-5 せん断弾性係数と有効拘束圧の関係

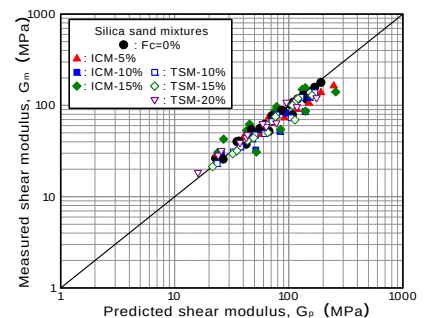


図-6 実験値と計算値の関係