

砂・粘土混合土におけるせん断弾性係数に及ぼす拘束圧依存性の影響

山口大学大学院 学生会員 ○濱田直樹
 山口大学大学院 正会員 兵動正幸
 東京大学大学院 正会員 山田 卓
 山口大学大学院 正会員 中田幸男

1. はじめに

地盤を構成する土はその支配的な土粒子の大きさをもとに、大きく砂質土と粘性土に分類され、実務における設計に用いる基本的な考え方が大きく異なる。これは地盤のせん断弾性係数 G の評価に対しても同様であり、対象地盤が砂質土か粘性土かによって異なる評価式が適用されている。しかし、実際の地盤は純粋な砂や粘土だけで構成されていることは稀で、様々な性質を持つ砂や粘土が混ざり合っている場合が多い。したがって、このような砂と粘土の混合土に対して既存の砂または粘土に適用されるせん断弾性係数の評価式を直接用いることは難しく、砂と粘土に共通した特性を考慮して評価することが望ましいと考えられる。本研究では、ベンダーエレメント試験 (BE 試験) により様々な細粒分含有率を有する砂・粘土混合土のせん断弾性係数を求め、細粒分含有率と土の圧縮性に着目したせん断弾性係数の評価方法について検討を行った。

2. 試料および試験方法

本研究で用いた砂・粘土混合試料は、粒度調整した珪砂 ($F_c=0\%$) と岩国粘土 ($F_c=98\%$ $I_p=49$) を細粒分含有率 F_c が 0, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100% になるように混合して作製されたものである。 $F_c=20\%$ 以上では予圧密法 (予圧密力 50kPa) で予圧密試料を作製した後にトリミングによって供試体を作製した。また、 $F_c=15\%$ 以下では突固めエネルギー $E_c=22, 504\text{kJ/m}^3$ で湿潤突固め法によりそれぞれの細粒分含有率で密度の異なる二つの供試体を作製した。供試体寸法は直径 5cm, 高さ 10cm である。各供試体を三軸セルにセットし、有効拘束圧 $\sigma'_c=20\text{kPa}$ の等方応力状態で飽和の後、 $\sigma'_c=50, 100, 200, 400\text{kPa}$ の有効拘束圧を等方応力条件で与え、それぞれの拘束圧条件下において BE 試験を行った。BE 試験では下部ペダスタルに設置された BE に電圧 $V=20\text{V}$, 周波数 $f=2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30\text{kHz}$ の正弦波を入力した。BE 試験より得られた送受信波電圧時刻歴より start-to-start 法¹⁾ でせん断弾性波伝達時間 Δt (sec) を決定し、せん断弾性波速度 $V_s=L/\Delta t$ (m/sec) およびせん断弾性係数 $G=\rho_s \times V_s^2$ (N/m²) を求めた。ここで、 L はベンダーエレメントの先端間の距離 (m), ρ_s は湿潤密度 (kg/cm³) である。

3. 試験結果と考察

地盤材料のせん断弾性係数 G は次式のように表されることが多い²⁾。

$$G = A \cdot f(e) \cdot (\sigma'/\sigma'_r)^n \quad (1)$$

ここで、 A は G と同じ単位をもつ実験定数、 $f(e)$ は間隙比関数、 σ' は平均有効主応力、 σ'_r は基準応力である。また、 n は G の拘束圧依存性の程度を表すパラメータであり、多くの場合に $n \approx 0.5$ とされている²⁾。これまでに提案されている式(1)に準じた G の評価式における間隙比関数 $f(e)$ は $f(e)=(B-e)/(1+e)$ と定義される場合が多く、この式によると B の値によって適用可能な間隙比の上限が与えられるので、砂から粘土に至る広範な間隙比を有する土の G を連続的に評価することが難しい。本研究では式(1)における $A \cdot f(e)$ を実験定数 α とし、また基準応力を $\sigma'_r=100\text{kPa}$ と規定してせん断弾性係数 G の評価方法を検討した。ここで、基準応力が $\sigma'_r=100\text{kPa}$ であるので、 α は $\sigma'_r=100\text{kPa}$ のときのせん断弾性係数 G となり、これを基準せん断弾性係数 G_r とする。また、 $\sigma'_r=100\text{kPa}$ における供試体の間隙比を基準間隙比 e_r と定義する。

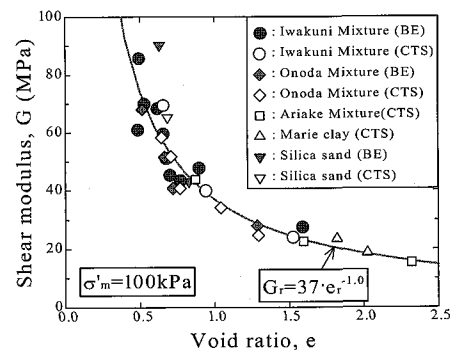


図-1 せん断弾性係数と間隙比の関係

図-1 は、平均有効主応力 $\sigma'_m=100\text{kPa}$ におけるせん断弾性係数 G と間隙比 e の関係、すなわち基準せん断弾性係数 G_r と基準間隙比 e_r の関係を示したものである。図中には本研究で行った岩国粘土混合土の BE 試験結果と併せて山田ら³⁾ が細粒分含有率 $F_c=0\sim 100\%$ 、塑性指数 $I_p=N.P.\sim 111$ の広範な粒度および塑性を有する土を用いて行った BE 試験および中空ねじりせん断試験の結果をプロットしている。図より、物性の違いによらず $\sigma'_m=100\text{kPa}$ における G と e の関係は一義的であることがわかる。この G と e の関係を近似すると $G=G_r=37 \cdot e_r^{-1.0}$ (MPa) となり、基準せん断弾性係数 G_r が決定される。次に G の拘束圧依存性を評価するために n と細粒分含有率の関係を図-2 に示す。ここで、 n は $\log G - \log \sigma'$ 関係における傾きである。図中には図-1 における小野田粘土混合土の BE 試験結果を併せてプロットした。図より、 n の値は $F_c=50\sim 100\%$ の範囲において $n \approx 1$ で一定であることがわかる。これは善ら⁴⁾、山田ら³⁾

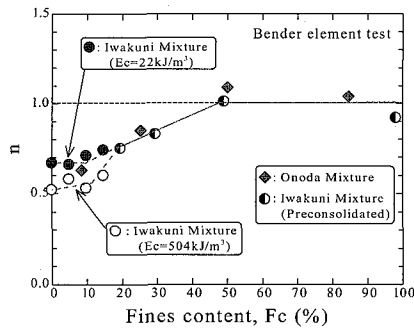
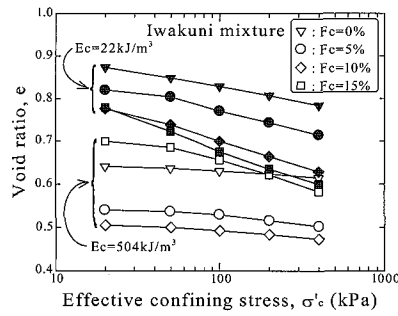
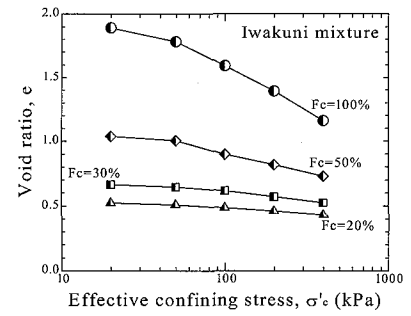


図-2 n と細粒分含有率の関係



(a) 突固め供試体



(b) 予圧密供試体

図-3 間隙比と有効拘束圧の関係

の結果と一致するものである。 $F_c=50\%$ 以上の砂・粘土混合土では粘土が構造の主体であるため、これらの試料の G の拘束圧依存性は砂の影響を受けず粘土の特性のみが発揮されたと考えられる。 $F_c=20\sim50\%$ の範囲では n の値は F_c の減少と共に直線的に低下し、 $F_c=0$ の値に近づく傾向が認められる。この直線関係を近似すると、 $F_c=20\sim50\%$ の範囲における n は $n=0.01 \cdot F_c + 0.5$ で求められる。 $F_c=0\sim20\%$ の範囲においても F_c が低いものほど n が小さい傾向があるが、同じ F_c であっても異なる E_c で作製された供試体の n の値が異なることがわかる。砂が構造の主体を成すと考えられる $F_c < 20\%$ では、同一 F_c であっても砂の骨格構造の違いにより様々な密度状態が存在する。したがって、初期密度の違いによって G の拘束圧依存性が異なると思われる。

図 - 3 (a), (b) はそれぞれ突固め供試体と予圧密供試体の間隙比 e と有効拘束圧 σ'_c の関係を示したものである。図 - 3 (a) において細粒分含有率 F_c が等しい突固め供試体を比較すると、突固めエネルギー E_c が小さい方の初期間隙比が大きく、拘束圧の変化に対する間隙比変化量が大きいことがわかる。また、図 - 3 (b) では細粒分含有率 F_c が高い供試体ほど初期間隙比が大きく、拘束圧増加に対する間隙比の変化が大きいことは明らかである。ここで、 G の拘束圧依存性と試料の圧縮性の関係を検討するために、図 - 3 (a), (b) より有効拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kPa}$ から $\sigma'_c=400\text{kPa}$ における体積圧縮係数 m_v を求めて n との関係を示すと図 - 4 のようになる。図中、細粒分含有率の値ごとにプロットしている。図より、 $F_c=50\%$ 以上では m_v の値によらず $n \approx 1$ であり、 $F_c=20\%$ 以下では n は m_v の低下にしたがって直線的に減少する。これより $F_c=20\%$ 以下の n は体積圧縮係数 m_v をパラメータとして $n=1.1 \cdot m_v + 0.5$ で与えられる。

以上の結果より、本研究で提案する様々な細粒分含有率を有する砂・粘土混合土のせん断弾性係数 G の評価式は次式で与えられる。

$$G = G_r \cdot (\sigma'/\sigma'_r)^n \text{ (MPa)} \quad (2)$$

$$G_r = 37 \cdot e^{-1.0} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

$$n = \begin{cases} 1.0 & (50\% > F_c > 100\%) \\ 0.01 \cdot F_c + 0.5 & (50\% > F_c > 20\%) \\ 1.1 \cdot m_v + 0.5 & (20\% > F_c) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 σ'_r は基準応力で $\sigma'_r=100\text{kPa}$ 、 G_r および e_r はそれぞれ $\sigma'=100\text{kPa}$ におけるせん断弾性係数および間隙比である。図-5 は本研究による提案式

(2), (3), (4) による G の予測値と BE 試験による実験値を比較したものであり、両者は比較的良く一致することがわかる。したがって、式(2), (3), (4)を用いることにより広範な細粒分含有率を有する砂・粘土混合土の G を連続的に評価することが可能となる。

- 4. まとめ** 1) せん断弾性係数の拘束圧依存性は細粒分含有率および体積圧縮係数の影響を受けることを示した。
2) 細粒分含有率と土の圧縮性を考慮した砂・粘土混合土のせん断弾性係数の評価式を提案した。

【参考文献】1) 川口貴之, 三田地利之, 澁谷啓, 佐野信房: 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. 2) 例えば, Hardin, B. O. and Richart, F. E. Jr.: Elastic wave velocities in granular soils, Journal of SMF Div., Proc ASCE, Vol.95, No.SM6, pp.1531-1537, 1969. 3) 山田卓, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 村田秀一: 広範な粒度と塑性を有する土の動的変形特性, 土木学会論文集, No.806/III-73, pp.155-168, 2005. 4) 善功企, 山崎浩之, 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, 港湾技術研究所報告, Vol.26, No.1, 1997.

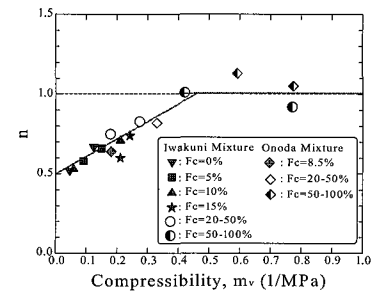


図-4 n と体積圧縮係数の関係

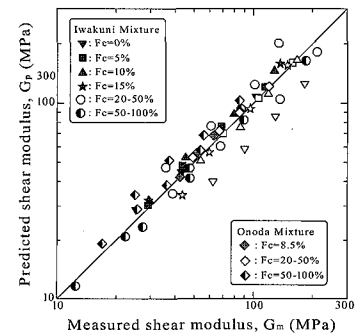


図-5 G の予測値と実験値の比較