

粒度特性とせん断波速度を考慮した内部摩擦角の推定法の提案

鉄道総合技術研究所 正会員 ○富田 佳孝 佐藤 武斗 松丸 貴樹 高木 翔太

1. はじめに 道路や鉄道などの線状構造物では一部の損傷が全体機能の喪失に繋がることから、各構造物の耐震性能を把握した上で相対的に弱点箇所を抽出することが望ましい。一方で、膨大な数に及ぶ既設盛土から安定性の低い盛土を抽出するには机上調査や現場踏査だけでは十分なスクリーニングができず、ボーリング調査や強度試験を実施するコストが膨大となることが懸念される。

本研究では既設盛土のスクリーニング手法として、せん断波速度を活用した既設盛土の強度推定法を提案することを目的に、既設盛土材料の三軸圧縮試験およびせん断波速度測定を実施した。

2. 粒度特性と密度を考慮した内部摩擦角の推定法 理論的根拠の明確な最上の強度式¹⁾を基に、粒度特性や密度に着目した三軸圧縮試験を実施し、内部摩擦角の推定式の検討を行った。最上は、粒状体の力学特性について、三軸応力状態の場合に式(1)に示す関係を得た。

$$\sin \phi = \frac{3k}{2(1+e) + k} \quad (1)$$

ここに、 ϕ ：内部摩擦角（度）、 e ：初期間隙比、 k ：強度特性を表す定数である。定数 k は対象とする盛土材料に応じて設定する必要がある。定数 k を設定するため、図1に示す既設盛土材料の三角座標による分類から代表的な9種類を用いて飽和三軸圧縮試験を実施する。試験条件として、直径50mm、高さ100mmの供試体を作製し、所定の拘束圧(25kPa・50kPa・75kPa)まで等方圧密した後に、飽和状態により排水条件にて、鉛直軸ひずみ0.05%/minで単調に載荷した。

内部摩擦角と初期間隙比の関係について、図2に示す。内部摩擦角は粘着力 $c_d=0$ として拘束圧毎に算定した内部摩擦角の平均値を用いた。砂分含有率が高い土質は間隙比が大きく、内部摩擦角が相対的に小さいが、細粒分含有率や礫分含有率が高い土質は間隙比が小さく、内部摩擦角が大きい傾向がみられた。細粒分や礫分含有率の高い土質では砂分含有率が高い土質と比べ、空隙に微細な粒子が入り込み密実となることが推察される。

上記を踏まえて、粒径加積曲線の概形を反映する均等係数に着目した。定数 k —均等係数 U_c 関係を図3に示す。同図には礫分含有率15%未満の土質の近似直線を併せて示している。諸戸²⁾は数多くの試験結果から土質毎の定数 k を算出しており、礫質土では定数 $k=0.7\sim 1.3$ 、砂質土では定数 $k=0.9\sim 1.0$ を変域として示した。図3では均等係数が小さい砂質土では $k=0.9\sim 1.0$ 程度、均等係数が大きく礫を多く含む土質では定数 $k=0.8\sim 1.0$ 程度であり、諸戸が示した変域を概ね包括する。上記を考慮して、定数 k を均等係数 $\log_{10} U_c$ の関数で表現することとした。定数 k と均等係数 $\log_{10} U_c$ の一次回帰直線として、 $k=-0.068 \log_{10} U_c + 0.9$ を導出した。したがって、内部摩擦角の推定式は式(2)で与えられる。

$$\sin \phi = \frac{3(-0.068 \log_{10} U_c + 0.9)}{2(1+e) + (-0.068 \log_{10} U_c + 0.9)} \quad (2)$$

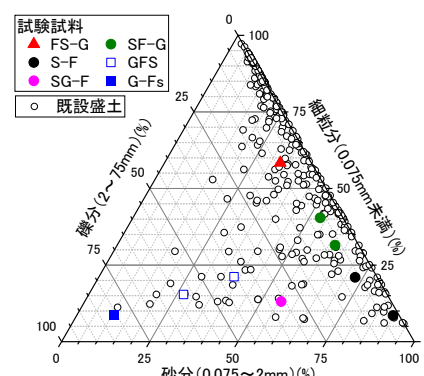


図1 既設盛土材料の三角座標による分類

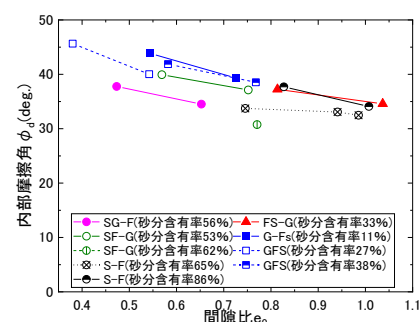


図2 内部摩擦角—間隙比

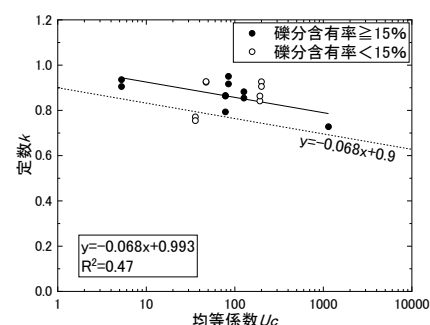


図3 定数 k —均等係数 U_c

キーワード せん断波速度、盛土、均等係数、間隙比、内部摩擦角

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 鉄道総合技術研究所 基礎・土構造 TEL 042-573-7261

式(2)より得られた内部摩擦角の推定値と実験値の比較を図4に示す。推定式は概ね安全側に評価できることが確認された。

3. せん断波速度を用いた内部摩擦角の推定法 せん断波速度から得られる間隙比を用いて、式(2)から内部摩擦角を推定する手法を提案する。ここで、せん断波速度とせん断弾性係数関係は $G=\rho_d V_s^2$ で表され、またせん断弾性係数 G を評価する実験式は数多く提案されており、間隙比 e と平均主応力 σ'_m の影響を考慮した次式で表現される。

$$G=CP_A^{1-n}f(e)\sigma'_m{}^n \quad (3)$$

ここで、 C および n は実験定数、 $f(e)$ は間隙比 e の関数、 P_A は基準応力であり平均有効応力 σ'_m と同じ次元を持つ。実験定数を算出するため、図1で示した礫質土を除く5試料の三軸圧縮試験時に、ディスクトランスデューサー³⁾によるせん断波速度計測を実施した。また、 n は G の拘束圧依存性の程度を表す関数であるが、多くの場合に $n \approx 0.5$ とされている。間隙比 e の関数は多様な密度への適用が可能な Jamiolkowski ら⁴⁾による $f(e) = e^a$ (a :実験定数) の関数を採用した。計測は等方応力条件で実施し、有効拘束圧 25kPa で整理を行った。

初期間隙比とせん断弾性係数の関係を図5に示す。また、同図には近似曲線をプロットしている。実験定数 C 、間隙比 e の指数 a を算出するため、式(3)を図5の近似式で整理した結果、間隙比 e の指数 a が -0.971 となり、Ottawa 砂⁵⁾: -1.051 と近い値となっている。また、実験定数 $C=520$ となり、Ottawa 砂: $C=547$ と近い値となっている。ここで実験定数 $C=520$ とし、間隙比 e の指数 a は簡略化するため、 $a=-1.0$ として近似的に取り扱い、せん断弾性係数 G は式(4)で表現される。

$$G=520P_A^{0.5}e^{-1}\sigma'_m{}^{0.5} \quad (4)$$

さらに、式(4)に $G=\rho_d V_s^2$ 、 $\rho_d = \rho_s/(1+e)$ を代入し、間隙比 e について整理すると、式(5)となる。

$$e = \frac{1}{\frac{\rho_s V_s^2}{520\sigma'_m{}^{0.5}P_A^{0.5}} - 1} \quad (5)$$

式(5)より得られた間隙比 e の推定値と実測値の比較を図6に、間隙比の推定値を式(2)に代入して算定した内部摩擦角の推定値と実測値の比較を図7に示す。ここで、図4の赤プロットは図7と同試料を用いている。内部摩擦角の推定式は間隙比の大きい土質は過小評価する傾向であるが、安全側に評価できている。室内試験と表面波探査の整合を確認した上で、せん断波速度分布による面的な強度評価が可能となる。

4. まとめ 本研究では、粒度特性とせん断波速度から既設盛土の強度を概略的に推定できる手法を検討した。推定式は間隙比の大きい土質は過小評価する傾向にあるが、安全側に評価できることが確認できた。推定法の適用にあたっては室内試験と現場試験のせん断波速度の整合を確認し、適用する必要がある。

謝辞 ディスクトランスデューサーによるせん断波速度計測方法は東京大学の桑野玲子教授に詳細な情報を提供いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献 1) 最上武雄：土質力学，1982。2) 諸戸靖史：砂や礫の内部摩擦角，土と基礎，Vol.31, No.8, pp.5～10, 1983。3) Laxmi Prasad Suwal et al.: Disk shaped piezo-ceramic transducer for P and S wave measurement in a laboratory soil specimen, Soils and Foundations, Vol.53, No.4, pp.510-524, 2013。4) Jamiolkowski, M, Leroueil, S., Lo Presti, D.C.F: Theme lecture: Design parameters from theory to practice, Proceedings of Geo-Coast'91, pp.1-41, 1991。5) Salgado, R Bandini, P, and Karim, A: Shear Strength and Stiffness of Silty Sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.126, No.5, pp.451-462, 2000。

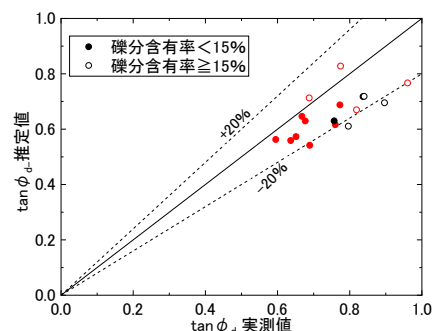


図4 内部摩擦角の推定と実測の比較

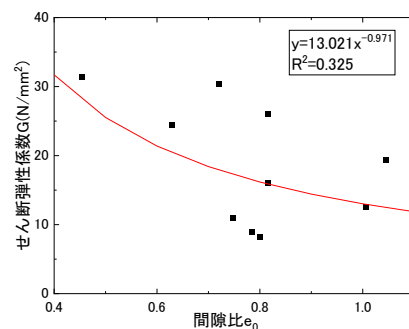


図5 せん断弾性係数と間隙比

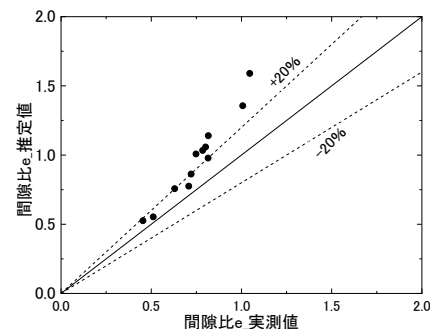


図6 間隙比の推定と実測の比較

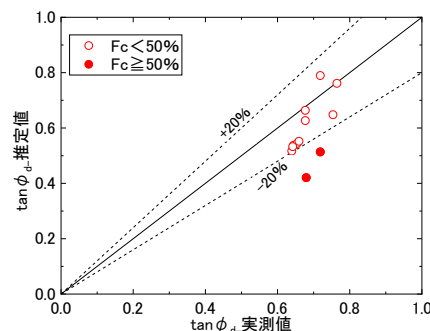


図7 内部摩擦角の推定と実測の比較