

愛媛大学大学院 学生会員 ○河田 皓介
愛媛大学大学院 フェロー会員 森 伸一郎

1. はじめに

構造物の耐震設計や地震時の地盤の挙動評価、液状化予測を行う際には地震応答解析が実施される。このプログラムの一つとして等価線形解析を行う、「SHAKE」が挙げられ、解析のパラメータの一つに土の繰返し変形特性（せん断剛性 G 、履歴減衰比 h 等）がある。この変形特性はせん断ひずみ γ の増大に伴って G と h は非線形挙動を示すことが知られており、これを求める方法として推定モデルを用いる方法がある。これは、使用方法が簡便なことから研究や実務で広く用いられている。これは既往の研究で得られた試験結果を基にした経験式と呼ばれるもので、土質や物理特性、原位置の情報などをパラメータとして用いるもので、様々な式が提案されている。これらの使用法は様々であるが、実際に解析に用いる際の条件等の変化による用いる基準は無く、解析を行う人の判断に任されている。そこで、既往の研究で得られた変形特性試験結果と、中空ねじり試験機を用いて実施した試験結果から推定モデルの適用性を評価し、等価線形解析を行う際に用いる変形特性モデルの使用法の提案を行った。

2. 既往の変形特性モデル

本研究で適用性評価の対象とした G/G_0 、 $h \sim \gamma$ の変形特性モデルは一般に①安田・山口の式 (1985)¹⁾、②土木研究所の式 (1980)^{2), 3)}、③港湾基準の式 (1987)⁴⁾、④兵動・山田の式 (2005)⁵⁾ である。これらの式の特徴としては①は不攪乱試料を用いた試験結果から平均粒径 D_{50} と平均有効主応力 σ'_m (kgf/cm²) を変数とするモデルである。②は沖積砂質土、粘性土に分けられており、砂質土に関しては豊浦砂の試験結果を定数とし σ'_m を変数として与えている。また粘性土は用いる定数が γ が 0.05 % 以上と未満で分けられているのみで変数は σ'_m である。③は塑性指数 f_p の大きさによって定数が決められており、 σ'_m を変数としている。最後に④は砂分を考慮した塑性指数 f_p^* を求めそれを変数とするモデルである。

3. 変形特性試験結果

試験結果は既往の文献 9 編⁶⁾ から 65 試料分の変形特性試験結果を得た。また、中空ねじり試験機を用いて 14 試料に対して試験を実施した。実施した試験で用いた試料は高松港湾域と土佐軟弱地盤で採取した広範囲な粒度を持つ不攪乱試料を 11 試料、再構成試料を 3 試料用いた。試料作製方法として不攪乱試料はトリミング法、再構成試料は空中落下法を用いた。また、文献から引用した試験結果のうち、13 試料については $h \sim \gamma$ を得ることができなかった。文献および実施試験で得られた試料は礫分を含む砂質土から粘性土までの広範囲な粒度を持つ土が用いている。試料を地盤工学会の基準で大分類すると砂質土が 40 試料、粘性土が 39 試料であった。また、砂質土のうち、中間土は 10 試料である。試料の物性値の範囲は $c_c=2 \sim 100$ (%), $m_c=2 \sim 75$ (%), $f_p=k m \sim 280$, $D_{50}=0.001 \sim 3$ (mm) であった。既往の試験で使用している試験機は振動三軸試験機と中空ねじり試験機である。試験時の拘束圧の範囲は 29 ~ 490 (kPa) である。図-1 (a), (b) に変形特性試験結果のデータベース ($G/G_0 \sim \gamma$) を示す。(a) は文献から、(b) は実施した試験から得たものである。これらは、試験結果に H-D モデルをフィッティングしたものである。

4. 既往の変形特性モデルの適用性評価

変形特性モデルを適用するための判定基準に豊浦砂の一斉試験結果を用いた。これは同一の材料、条件で試験を行っていることからそのばらつきは機械や人的な要因によるものと判断できる。このバラツキを適用範囲とし G/G_0 、 $h \sim \gamma$ の任意のせん断ひずみで標準偏差を求め、各試験結果の適用範囲として設定した。また、適用性を評価するせん断ひずみ γ を 0.01, 0.1,

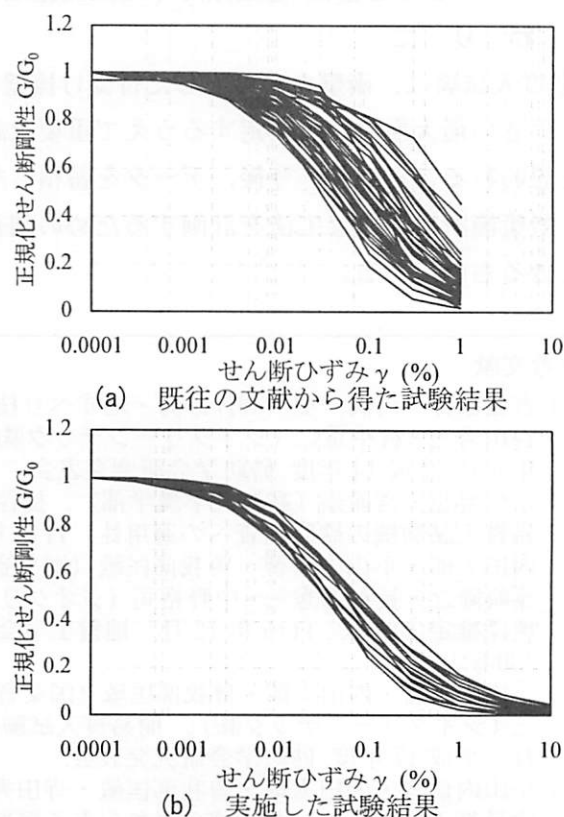


図-1 変形特性試験結果のデータベース

1 (%)とした。定めた各モデルを試験結果に適用し、その適用できた割合を得点として、点の高い方を適用性が良いと判断した。図-3に安田・山口の式適用結果 $G/G_0 \sim \gamma$ の一例を示す。図の白抜きが試験結果、黒塗りが推定値であり、点線は試験結果に標準偏差を考慮した曲線である。図より、0.01, 0.1(%)では適用の範囲内にあるが、1(%)は適用の範囲外である。図-4にモデルの適用割合を示す。図の良が標準偏差の範囲内にあったもの、不良は範囲外のもの、無はデータや条件がそろわず、適用できなかった割合である。図より明らかに山田・兵動の式の無の割合が高い。これは、 f_p^* という特殊な土質が必要なためである。図-5に各モデルに対する全試料の得点を示す。図-6に各モデルに対する土質別の得点を示す。図-5より、兵動・山田の式は広範囲な粒度に対して適用性は良いが、使用には特殊なパラメータが必要なのが注意点である。また、次いで安田・山口式の適用性が良い。図-6から土木研究所の式は砂質土に対して適用性が良い。全体としての適用性は高くないが、港湾基準の式は粘性土において適用性が良い。これらの結果から、等価線形解析で、変形特性モデルを用いる場合、物理試験結果が無く、土質柱状図のみがある場合には安田・山口の式がよい。また、物理試験結果が $k_m \leq f_p$ 以上の場合には山田・兵動の式がよく、それ以外の場合には土木研究所の式を用いるのがよい。

6. 結論

中間土を含む広範囲な粒度の変形特性試験結果をデータベース化し、変形特性モデルの適用性を評価した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 兵動・山田の式は f_p^* が無いと適用できないが、適用できれば広範囲粒度での推定精度が高い。
- (2) 安田・山口の式は広範囲な粒度分布を持つ土質に対して適用性が良い。
- (3) 土木研究所の式は典型的砂質土について適用性が良いが、粘性土・中間土に対しては適用性が良くない。
- (4) 港湾基準の式は粘性土に対して適用性が良い。
- (5) 等価線形解析に用いる変形特性を求めるためのモデルを提案した。

参考文献

- 1) 安田 進, 山口 勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会, pp.539-542, 1985
- 2) 岩崎 敏男, 龍岡 文夫, 吉田 精一: 地盤の動的変形特性に関する実験的研究-(II)-広範囲なひずみ領域における砂の動的変形特性-, 土木研究所報告, 第153号, pp.57-121, 1980
- 3) 岩崎 敏男, 常田 賢一, 吉田 精一: 沖積粘性土の動的変形・強度特性について, 第15回土質工学研究発表会, pp.625-628, 1980
- 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, pp.42-113, 1987
- 5) 山田 卓, 兵動 正幸, 中田 幸男, 吉本 憲正, 村田 秀一: 広範囲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
- 6) 市川 巧, 竹中 直人: 砂の乱さない試料と再調整試料の排水条件下での動的変形特性, 第28回土質工学研究発表会概要集, pp.911-912, 1993 ほか7編

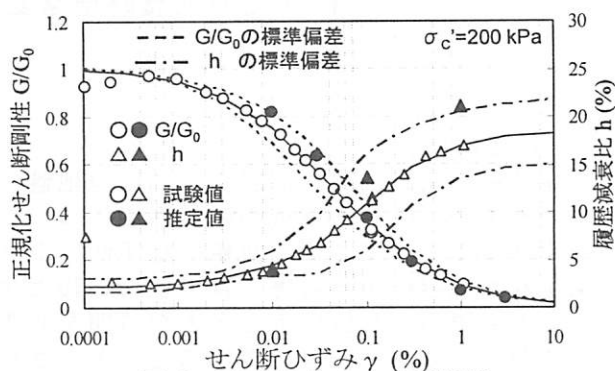
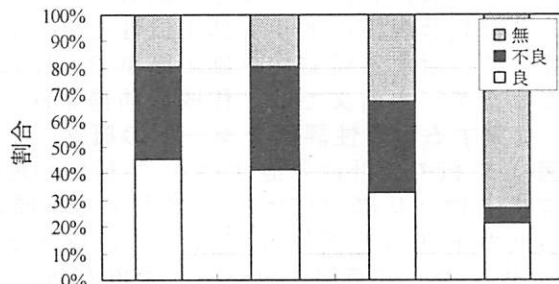


図-3 安田・山口の式適用例



安田・山口 土木研究所 港湾基準 山田・兵動
変形特性モデル名

図-4 変形特性モデルの適用割合

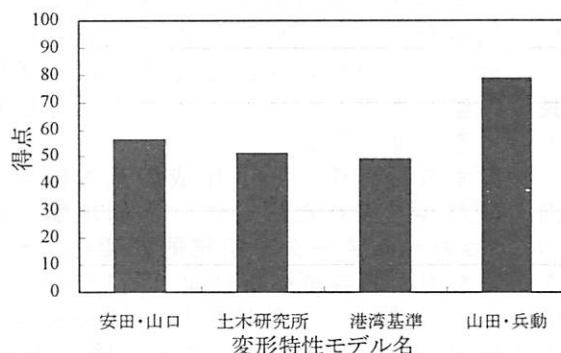


図-5 変形特性モデルの全試料に対する得点

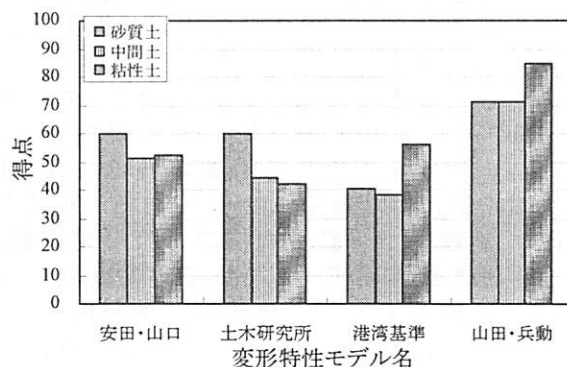


図-6 変形特性モデルの土質別の得点