

## 中間土に対するひずみ依存の変形特性モデルの適用性評価

オリエンタルコンサルタンツ (元・愛媛大学大学院生) 正会員 ○河田 皓介  
愛媛大学 フェロー 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。この代表格として等価線形解析プログラム SHAKE が挙げられるが、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。せん断ひずみ  $\gamma$  に依存する繰返し変形特性を設定するのに実際の土の試験結果を用いる代わりに推定モデルによる方法があり、簡便なことから研究や実務で広く用いられている。この推定モデルは、既往の研究や試験の結果を基にした経験式であり、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<sup>1)~5)</sup>。これらの式の適用範囲や相対的な適用性に関する知見はなく、解析者の判断に任されている。そこで、既往の研究による変形特性試験結果と著者らが中空ねじり試験機を用いて実施した試験結果の両方を用いて、これら推定モデルの適用性を比較検討し、変形特性モデルの使用法を提案した。

## 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、一般によく利用されているもので、(1)安田・山口の式(1985)<sup>1)</sup>、(2)土木研究所の式(1980)<sup>2), 3)</sup>、(3)港湾基準の式(1987)<sup>4)</sup>、(4)兵動・山田の式(2005)<sup>5)</sup>である。これらの式の特徴を述べる。(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  $\sigma'_m$  (kgf/cm<sup>2</sup>) 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  $\sigma'_m$  を変数として与えている。また、粘性土に対しては、用いる定数が  $\gamma$  が 0.05 % 以上と未満で分けられているのみで、変数としては  $\sigma'_m$  である。(3)は塑性指数  $I_p$  の大きさによって定数が決められており、 $\sigma'_m$  を変数としている。(4)は砂分を考慮した塑性指数  $I_p^*$  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

既往の文献 9 編<sup>6)</sup>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 試料を用いて繰返し変形特性試験を実施した。これらの試料は、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 11 の不攪乱試料を、3 つの再構成試料を用いた。不攪乱試料はトリミング法、再構成試料は空中落下法により作製した。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では、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られている。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  $F_c=2 \sim 100$  (%),  $P_c=2 \sim 75$  (%),  $I_p=NP \sim 280$ ,  $D_{50}=0.001 \sim 3$  (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 ( $G/G_0 \sim \gamma$ ) 試験結果の全データを示す。(a) は文献、(b) は実施試験から得たものであり、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

変形特性モデルを良否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、試験条件であることから、そ

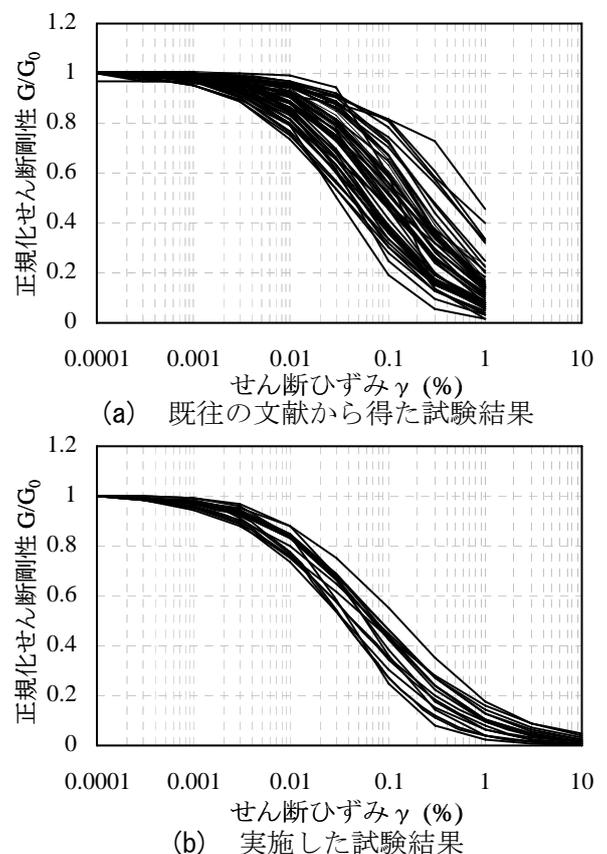


図-1 変形特性試験結果のデータベース

キーワード 中間土, 変形特性, モデル, 剛性, 減衰

連絡先 790-8577 愛媛県松山市文京町3 愛媛大学大学院理工学研究科 mori@dpc.chime-u.ac.jp

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。このばらつきを適用範囲とし  $G/G_0$ ,  $h \sim \gamma$  の任意のせん断ひずみで標準偏差を求め、その標準偏差以内に試験結果が収まった場合には適用性があると判断することとした。また、適用性を評価するせん断ひずみ  $\gamma$  を 0.01, 0.1, 1 (%)とした。各モデルを試験結果に適用し、適用性があると判断され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・山口の式の適用結果として  $G/G_0 \sim \gamma$  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、適用範囲内にあるが、1(%)は適用範囲外にある。

図-4 にモデルの適用割合を示す。この図では、良が標準偏差の範囲内のもの、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ものである。図より明らかに山田・兵動の式の無の割合が高い。これは、 $I_p^*$ という特殊な土質定数が必要なためである。図-5 に各モデルの全試料に対する得点を示す。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最も適用性は良いが、使用には特殊なパラメータが必要なことに注意する必要がある。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、地震応答解析で変形特性モデルを用いる場合、物理試験結果がなく、土質柱状図のみがある場合には安田・山口の式が適している。また、物理試験結果が  $NP \leq I_p$  以上の場合には山田・兵動の式が適している、それ以外では土木研究所の式を用いるのが適している。

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  $I_p^*$ がないと適用できないが、条件が揃い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。
- (4) 港湾基準の式は粘性土に対して適用性が良い。
- (5) 地震応答解析に用いる変形特性を設定するための各種推定モデルの適用に当たっての指針を提案した。

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

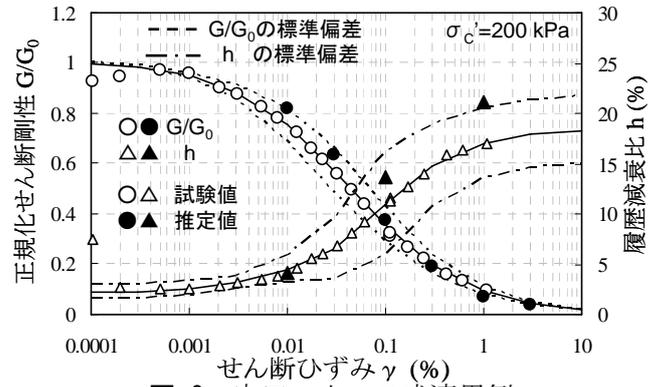
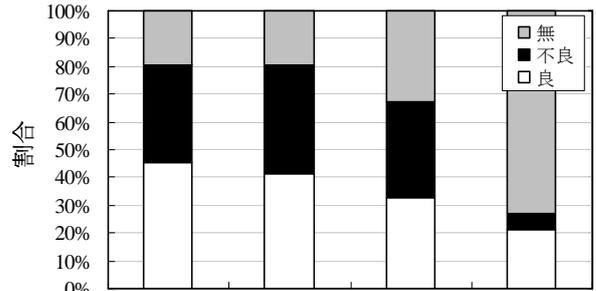
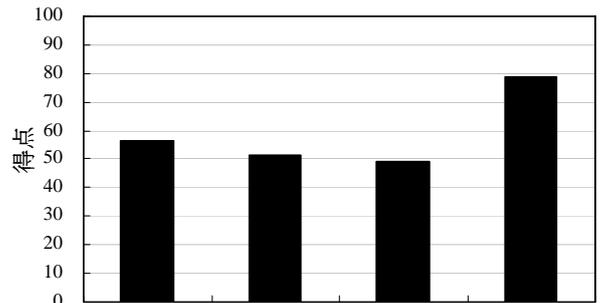


図-3 安田・山口の式適用例



安田・山口 土木研究所 港湾基準 兵動・山田  
変形特性モデル名

図-4 変形特性モデルの適用割合



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-5 変形特性モデルの全試料に対する得点

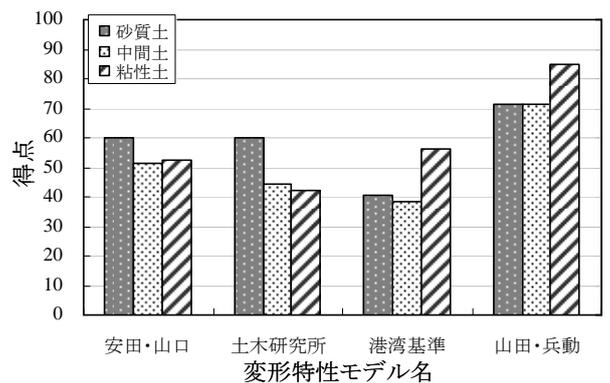


図-6 変形特性モデルの土質別の得点