

ベンダーエレメント併用繰返し三軸試験によるせん断剛性の応力依存性評価

千葉エンジニアリング(株) 正会員 ○若月 洋朗 玉山大助
 室蘭工業大学大学院 正会員 木幡 行宏
 千葉エンジニアリング(株) フェロー会員 三田地 利之

1. はじめに

舗装構造設計を性能照査型の理論的設計法で行うとき、舗装各層と路床の変形係数を正確に把握することが重要になってくる。変形係数は、応力やひずみレベルによって異なる値を示すため、その力学モデル構築のための研究¹⁾²⁾が盛んに行われている。また、特に素地を路床とする場合については、自然状態の土の物理・力学特性の多様性から、原位置試験や室内実験など種々のデータに基づくモデル検討³⁾の取り組みも行われている。そこで、本研究では、変形係数の応力依存性モデルを設定する新たな手法を検討する目的で、“ベンダーエレメント併用繰返し三軸試験”によって得られた豊浦砂と沖積粘土のせん断剛性率 G の応力依存性の評価を行った。

2. 試験試料とデータの取得方法

豊浦砂は購入材を用い、沖積粘土は東京湾岸地域に分布する沖積粘土層を対象とした。地盤構成と PS 検層によるせん断波速度 V_s 及び、サンプリング位置 (GL-25,-30,-40,-50m) を図-1 の模式柱状図に示した。この沖積粘土は路床とはなり得ない程の深い位置にあるが、今回応力依存性の評価のために“自然地盤のサンプルを用いる”、“PS 検層データとの比較を行う”、“土性がほぼ同一で拘束圧が異なるサンプルで実験データを得る”といった目的から、データ取得の対象とした。沖積粘土の 4 サンプルは、土性から上部 3 試料・下部 1 試料に区分される。各部について、サスペンション方式の PS 検層で得られたせん断波速度 V_s と湿潤密度 ρ_t から $G = \rho_t \cdot V_s^2$ によってせん断剛性率 G (以下 G_F) を求めた。豊浦砂と沖積粘土の力学試験は、ベンダーエレメントを装着した供試体を用いて地盤工学会基準【JGS0542】に基づく繰返し三軸試験 (以下 CTX 試験) を行い、その途中段階で【JGS0544】によるせん断波速度を測定 (以下 BE 試験) した。これを“ベンダーエレメント併用繰返し三軸試験 (以下 CTX-BE)”と呼ぶ。CTX-BE 試験の圧密圧力は、沖積粘土では採取試料の有効土被り圧に設定し、豊浦砂 (相対密度 $D_r=80\%$) については比較のために同レベルの 100,200,400 kPa とした。せん断波速度 V_s の測定は、1 試料につき CTX の繰返し載荷前の初期 V_{s0} 、繰返し載荷途中段階の任意の 3 段階後と最終繰返し載荷後の V_s (片振幅せん断ひずみは豊浦砂で 0.3%~0.4%、沖積粘土で 2%程度) の計 5 回とし、それぞれ G を求めた。なお、BE 測定時は圧密終了後もしくは直前の繰返し載荷段階から非排水状態を保つようにした。

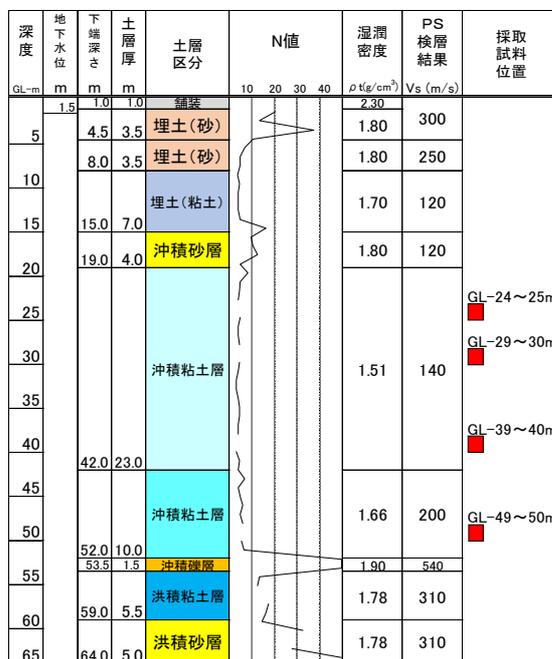


図-1 模式柱状図 (サンプル位置)

豊浦砂 (相対密度 $D_r=80\%$) については比較のために同レベルの 100,200,400 kPa とした。せん断波速度 V_s の測定は、1 試料につき CTX の繰返し載荷前の初期 V_{s0} 、繰返し載荷途中段階の任意の 3 段階後と最終繰返し載荷後の V_s (片振幅せん断ひずみは豊浦砂で 0.3%~0.4%、沖積粘土で 2%程度) の計 5 回とし、それぞれ G を求めた。なお、BE 測定時は圧密終了後もしくは直前の繰返し載荷段階から非排水状態を保つようにした。

表-1 沖積粘土の物理指標

採取試料 深度	ρ_s (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	w_n (%)	e	D_{50} (mm)	W_L (%)	IP
GL-25m	2.691	1.526	80.7	2.187	0.0021	99.3	56.3
GL-30m	2.654	1.503	87.1	2.304	0.0018	101.1	54.9
GL-40m	2.652	1.498	87.5	2.321	0.0031	93.9	50.3
GL-50m	2.705	1.656	59.0	1.597	0.0034	70.8	39.6

3. 室内試験及び原位置計測結果

(1) 試験試料の物理指標

沖積粘土の各サンプルの物理指標は表-1 に示した。上部 3 試料の物理特性はほぼ同一である。下部試料は上部試料と異なり、含水比→低い、間隙比→小さい、IP→小さい、とやや硬い状態にあると言える。

キーワード 路床, せん断剛性率, 応力依存性, ベンダーエレメント, 繰返し三軸試験

連絡先 〒262-0033 千葉県千葉市花見川区幕張本郷 1-30-5 千葉エンジニアリング(株) TEL 043-275-2311

(2)せん断剛性率 G の計測結果の比較

沖積粘土では、3 種類の計測方法によって G_0 を得ており 図-2 に深度方向の計測値 (G_F, G_{GOCTX}, G_{GOBE}) を示した. 図-3 に CTX 試験の $G \sim \gamma$ 関係図を示し, 同図上に G_0 の計測結果と BE 試験を行う直前の繰返し段階 (青く着色) を示した. 図-4 は, 豊浦砂と沖積粘土の正規化した G_{CTX}/G_{GOCTX} とせん断ひずみ γ との関係図である. CTX 試験の G_{GOCTX} , G_{CTX} は, 沖積粘土の上部 3 試料と下部 2 試料では明確な違いが確認されたが, $G_{CTX}/G_{GOCTX} \sim \gamma$ には両試料に大きな差異は見られなかった. また, 豊浦砂と沖積粘土の $G_{CTX}/G_{GOCTX} \sim \gamma$ については, それぞれで傾向の違う結果が確認された.

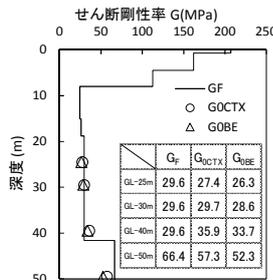


図-2 G_F, G_{GOCTX}, G_{GOBE} の比較

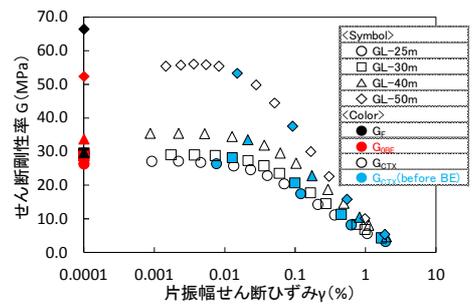


図-3 CTX 試験による $G \sim \gamma$

4. せん断剛性率 G の応力依存性の評価

BE 試験による圧密終了直後の G_{GOBE} 及び任意の繰返し载荷直後の G_{BE} (4 ケース/1 供試体) と, この時の平均有効主応力 p' の関係を 図-5 に示した. p' の数値は BE 試験時の応力状態をもとに式-(1)~(3)により求めた.

$$p' = (\sigma'_a + 2\sigma'_r) / 3 \quad \dots (1)$$

$$\sigma'_a = \sigma'_c + \sigma_d - \Delta u \quad \dots (2)$$

$$\sigma'_r = \sigma'_c - \Delta u \quad \dots (3)$$

ここに, p' : BE 試験時の平均有効主応力(kPa), σ'_a : BE 試験時の軸方向有効応力(kPa), σ'_r : BE 試験時の側方向有効応力(kPa), σ'_c : 供試体の圧密圧力(kPa), σ_d : BE 試験直前に残留する軸差応力(kPa), $\Delta u (=u - u_b)$: BE 試験直前の過剰間隙水圧(kPa), u : BE 試験直前の供試体の水圧測定値(kPa), u_b : 供試体の背圧(=100kPa)とした. 図-5 は, 豊浦砂, 沖積粘土ともに G_{GOBE} が圧密圧力に対して単調増加する関係と, 繰返し载荷後の G_{BE} が有効応力の減少に応じて低下する関係を表している. 豊浦砂と 2 種の沖積粘土で傾向は異なるが, それぞれの有効応力とせん断剛性率は一義的な関係にある.

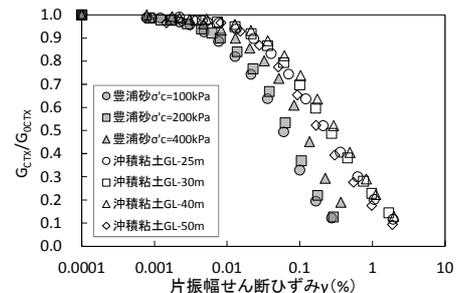


図-4 $G_{CTX}/G_{GOCTX} \sim \gamma$

5. 路床の弾性係数モデルへの適用について

舗装設計便覧によると, 舗装構造の理論的設計法で用いる変形係数は, レジリエントモデュラス (以下 Mr) によって望ましいとある. よって, CTX-BE 試験から得た $G \sim p'$ 関係を路床の弾性係数モデル (MEPDG 一般化モデル²⁾) に適用するためには, 応力値の置換え (平均有効主応力 $p' \Rightarrow$ 主応力和 θ または偏差応力 σ_d) が必要である. 併せて他の手法で得られた変形係数を含め, Mr とのキャリブレーションファクターの検討が必要と考えられる.

6. まとめ

本研究の成果をまとめると以下のようである.

- 豊浦砂と沖積粘土で実施した CTX-BE 試験の計測結果から, 圧密圧力の違いだけでなく繰返し応力が载荷されひずみレベルが大きくなり有効応力が変化しても, 有効応力とせん断剛性率 G_{GOBE}, G_{BE} は一義的な関係を示した.
- 豊浦砂と土性の違う 2 種の沖積粘土の $G_{GOBE}, G_{BE} \sim p'$ 関係には異なる個別の傾向がある.
- CTX-BE 試験による計測結果を路床の弾性係数モデルに適用するためには, 応力値の置換えが必要である. 併せて他の手法で得られた変形係数を含め, Mr とのキャリブレーションファクターの検討が必要である.

今後の展望として, 路床となり得る実地盤サンプルを用いた実験の実施とデータの比較検証, CTX-BE 試験データを路床の弾性係数モデルへ適用するための検討を行っていききたい.

参考文献

1)藤波潔, James MAINA, 井上武美, 松井邦人, 菊田征勇: 粒状材層の弾性係数の応力依存性を考慮した舗装の構造解析, 土木学会舗装工学論文集 第9巻 2004 2)竹内康, 木幡行宏, 関根悦夫: 室内実験結果を用いたアスファルト舗装の路床の弾性係数算出法の検討, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol68, No.2, 45-53, 2012 3)中島剛志, 竹内康, 牧恒雄, 遠藤桂: 関東ロームにおける弾性係数の応力依存性に関する実験的研究, 土木学会第57回年次学術講演会, 2002 4)土木学会: 舗装工学ライブラリー13b 路床・路盤材料の特性と評価, 2015

図-5 BE 試験による G と p' の関係

