

## 圧電素子を用いた弾性波速度計測による砂の剛性把握

宇都宮大学 学生会員 ○木村樹  
宇都宮大学 正会員 海野寿康, 吉直卓也

### 1. 研究背景と目的

現在, 地盤中に伝播させたせん断波速度から地盤の強度を求めることが可能な地盤調査手法<sup>1)</sup>が開発され, これらの技術により非破壊で地盤状態の推定が可能となってきた。これらの調査技術は, 地盤改良工事の施工における品質調査に応用できる可能性がある。

本研究では, せん断波速度と地盤状態の相関性把握の為の基礎データ収集のため, 三軸圧縮試験及びベンダーエレメント試験(以下 BE 試験)を行った。具体的には, 相対密度を変化させた砂の供試体のせん断波速度 $V_s$ を計測し, せん断波速度から算出したせん断剛性率 $G$ と強度定数や相対密度などの相関を把握した。

### 2. 試験概要

本研究では, 試料に豊浦砂を用い, 三軸圧縮試験及び BE 試験の 2 種類の方法からせん断剛性率 $G$ を求めた。三軸試験からせん断剛性率を求める方法として, 圧縮試験の応力~ひずみ関係における初期部分の接線勾配を変形係数 $E$ とし, 次式で算出した。

$$G = E/2(1 + \nu) \quad (1)$$

ここで, ポワソン比 $\nu$ は Hoque ら(1998)による豊浦砂の試験結果<sup>2)</sup>をもとに 0.17 とした。三軸圧縮試験は JGS 0523 に準拠した圧密非排水三軸試験を行った。相対密度 $Dr=15\sim90(\%)$ で 5 パターンの供試体を作成し, 各相対密度において有効拘束圧 $\sigma'_c=30,50,100,150(\text{kPa})$ で試験を行った。圧密は 3t 法により行い, 軸圧縮過程における載荷速度は 0.12%/min)である。

BE 試験は, 地盤工学会基準(案)である JGS 0544:2011<sup>3)</sup>に準拠して行った。BE 試験とは, 2 枚の圧電素子を供試体の両端に埋め込み, せん断波を供試体端で送信し, 他端で伝播したせん断波を受信することで, 供試体のせん断波速度を直接的に計測する試験である。

BE 試験でせん断剛性率を算出する方法は, 圧密終了後にせん断波の伝播時間 $\Delta t(\text{ms})$ を求め, 式(2)を用いて

せん断波速度 $V_s(\text{m/s})$ を算出し, 式(3)を用いてせん断剛性率を求めた。図-1 は具体的な算出方法である。

$$V_s = L/\Delta t \quad (2)$$

$$G = \rho_t V_s^2 \quad (3)$$

$L(\text{mm})$ はせん断波速度測定時の供試体高さ $H_{vs}(\text{mm})$ から送信用 BE の挿入長 $L_{tr}(\text{mm})$ と受信用 BE の挿入長 $L_{re}(\text{mm})$ を引いた値である。せん断波の伝播時間 $\Delta t$ は, 送信波と受信波の立ち上がり点 $\Delta t_s(\text{ms})$ と送信波と受信波のピーク点 $\Delta t_p(\text{ms})$ の平均値から測定システムの遅延時間 $\Delta t_d(\text{ms})$ を引いて求めた。 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$ はせん断波速度計測時における供試体の湿潤密度である。

本試験に用いた BE 装置の圧電素子は, 幅 12(mm), 厚さ 2(mm), 挿入長 3(mm)であり, トップキャップに送信用 BE 圧電素子を, ペDESTAL に受信用 BE 圧電素子をそれぞれの中央部に取り付けた。写真-1 は本研究で用いた BE 装置である。供試体は, 三軸試験と同様に相対密度 $Dr=15,30,50,70,90(\%)$ で 5 パターンの供試体を作成し, 有効拘束圧 $\sigma'_c=50(\text{kPa})$ で試験を行った。送信電圧の周波数 $f=5,10,15,20,25(\text{kHz})$ の 5 種類の異なる周波数で実施した。

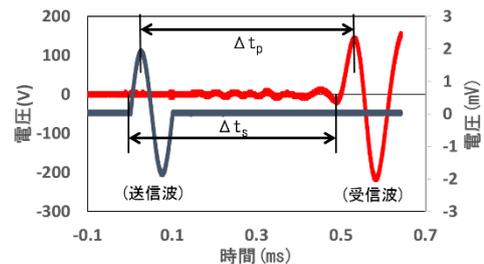


図-1  $\Delta t_s$ と $\Delta t_p$ の測定法



写真-1 左:上から撮影, 右:正面から撮影  
ベンダーエレメント装置

キーワード ベンダーエレメント, せん断波速度, せん断剛性率

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部 TEL. 028-689-7044

3. 試験結果

図-2 は各相対密度において有効拘束圧 $\sigma'_c=50(\text{kPa})$ で実施した圧密非排水三軸試験の結果である。相対密度が大きくなると軸ひずみ 15(%)時の軸差応力が増加していることがわかる。一方、軸ひずみ 1(%)時の軸差応力の比較では、相対密度  $Dr=69.52,88.84(\%)$ で軸差応力に大きな違いはみられない。

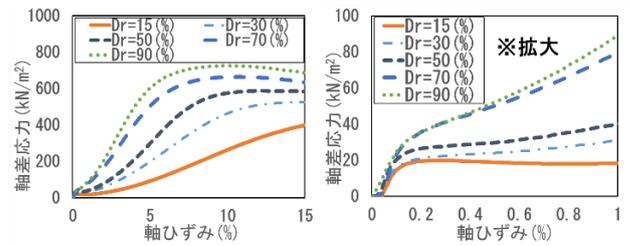
この圧密非排水三軸試験の結果を用いてせん断剛性率を求める。図-3 は、圧密非排水三軸試験で求めた応力～ひずみ関係から算出したせん断剛性率を相対密度ごとに初期の有効拘束圧で整理したものである。 $Dr=69.52,88.84(\%)$ で実施した $\sigma'_c=30,50(\text{kPa})$ ではせん断剛性率に大きな違いは無かったが、その他の条件では相対密度及び有効拘束圧とせん断剛性率の間に正の相関性がみられた。

表-1 はBE試験で求めたせん断波速度 $V_s$ と、有効拘束圧 $\sigma'_c=50(\text{kPa})$ の条件で実施した圧密非排水三軸試験と BE 試験の両試験で得られたせん断剛性率の一覧であり、その値をもって図-4 にせん断剛性率と相対密度の関係を示す。有効拘束圧 $\sigma'_c=50(\text{kPa})$ における相対密度  $Dr=14.58(\%)$ の時のせん断剛性率  $G$  は  $59.33(\text{MPa})$ であり、相対密度を上げた  $Dr=88.61(\%)$ の時のせん断剛性率  $G$  は  $79.72(\text{MPa})$ の値をとる。なお、本研究の BE 試験で得られたせん断剛性率は既往の研究<sup>4)</sup>と同程度の結果となった。三軸試験と BE 試験のどちらも相対密度とせん断剛性率に正の相関性が示されたが、圧密非排水三軸試験で算出したせん断剛性率の方が大きな値となる。両試験で得られた相対密度ごとのせん断剛性率の差は相対密度が増加するにつれて大きくなる傾向にある。

4. 結論

本研究より得られた知見は以下の通りである。

- BE 試験での相対密度  $Dr=14.58(\%)$ 時のせん断剛性率  $G$  は  $59.33(\text{MPa})$ 。相対密度  $Dr=88.61(\%)$ 時のせん断剛性率  $G$  は  $79.72(\text{MPa})$ となった。
- 圧密非排水三軸試験と BE 試験の両試験で得られたせん断剛性率は、いずれも相対密度及び有効拘束圧との正の相関性があった。
- 相対密度が高い砂試料では、BE 試験と圧密非排水三軸試験で求めたせん断剛性率に違いがある。



左：軸ひずみ 15(%)，右：軸ひずみ 1(%)

図-2  $\sigma'_c=50(\text{kPa})$ の応力～ひずみ関係

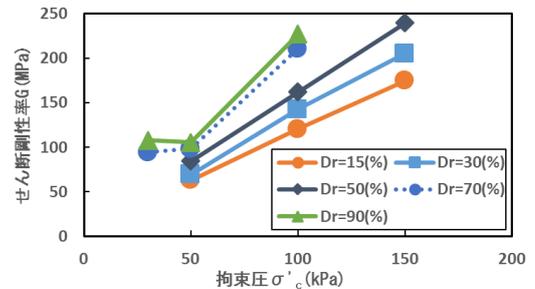


図-3 三軸試験でのせん断剛性率の比較

表-1 三軸試験と BE 試験結果の比較

	Dr (%)	せん断剛性率G (MPa)	せん断波速度Vs (m/s)
圧密非排水三軸試験	15.15	62.87	
	29.89	69.18	
	49.38	84.39	
	69.52	98.23	
	88.84	105.4	
ベンダーエレメント試験	14.58	59.33	179.5
	30.54	63.42	183.3
	51.09	72.72	194.0
	70.00	77.58	196.8
	88.61	79.72	197.7

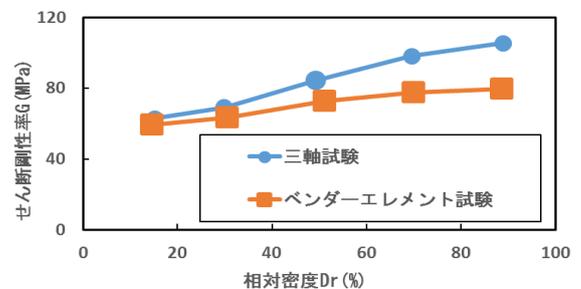


図-4 三軸試験と BE 試験結果の比較

参考文献

1)地盤工学会(2001) 『地盤工学への物理探査技術の適用と事例』 pp.63-409, 丸善. 2)Hoque, E and Tatsuoka F. (1998):Anisotropy in the elastic deformation of materials, Soils and Foundations , 38-1 , pp.163-179  
 3)地盤工学会：ベンダーエレメント方による土のせん断波速度測定方法,新規制定地盤工学会基準 JGS 0544:20114)長岡技術科学大学：小林信治, 豊田浩史「ベンダーエレメントを用いた三軸試験における土の剛性率測定」  
<http://geotech1.nagaokaut.ac.jp/?plugin=attach&refer=Thesis%20%28~2010%29&openfile=ken07403.pdf>

(2018年1月10日閲覧)