

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

地盤工学研究室 小林信治
指導教員 豊田浩史

1. はじめに

これまで土の剛性率 G を求めるためには、ヤング率 E とポアソン比 ν を三軸圧縮試験より算出してきた。しかし、この試験方法では、ヤング率の測定精度はよいが、ポアソン比 (式-1) の測定精度にはばらつきがあるため、剛性率 G (式-2) の測定精度も悪くなる問題点をもつ。

そこで本研究では、剛性率 G を直接求めることが可能なベンダーエレメントに着目した。ベンダーエレメントは、ヨーロッパを中心に徐々に普及しつつあり、各種室内試験装置に取り付けが可能で、近年わが国においても様々な室内試験が行われている。本研究ではベンダーエレメントを三軸試験装置に取り付け、土の剛性率測定方法について検討を行った。

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

2. ベンダーエレメントとは

ベンダーエレメントの仕様を表 1 に示す。ベンダーエレメントとは厚み方向に分極された圧電素子を、弾性補強かつ電極の役割を果たすニッケルなどのシム材の両面に貼り合わせた構造となっている。材質は PZT (チタン酸ジルコン酸鉛) である。この構造のベンダーエレメントに電圧を印加させると上部の圧電素子は縮み、下部の圧電素子は伸びる。また、変形を与えると電圧を発生させる特性も有している。

表 - 1. ベンダーエレメントの仕様

材質	高さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)
PZT	12~20	10~12	0.5~1.0

3. ベンダーエレメント試験

図 1 にせん断波速度の計測フローチャートを示す。データロガーではファンクションジェネレーターより発生した電気信号とせん断波発振部のベンダーエレメント波形、受振部のベンダーエレメント波形の 3ch を計測する。また、土の剛性率 G はせん断波速度 V_s と密度 ρ より式 (3) より算出することができる。

$$G = \rho \times V_s^2 \quad (3)$$

- ※ ρ : 供試体の密度 (g/cm^3)
 V_s : せん断波速度 (m/sec)
 G : 剛性率 (kPa)

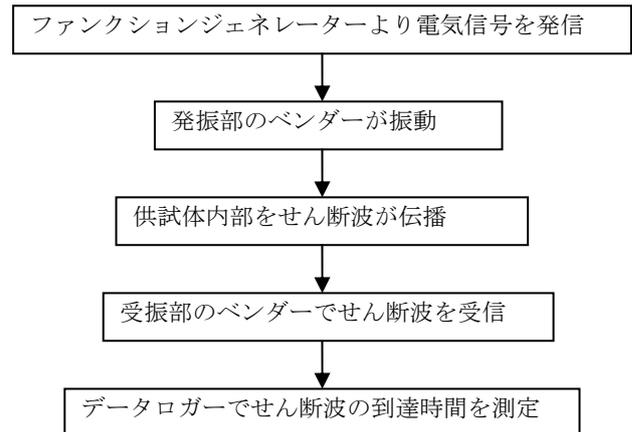


図 - 1. 計測フローチャート

3.1 伝播時間の同定法

せん断波速度 V_s をベンダーエレメント試験より求めるわけだが、ここで重要となってくるのが伝播時間の同定法である。同定法としては以下の 3 種類が挙げられる。

- time domain technique (T.D.法)
送信時間と到達時間の差を伝播時間とする。
- cross correlation (C.C.法)
相互相関関数の最大地点を伝播時間とする。
- frequency domain technique (F.D.法)
周波数特性を利用して伝播時間を求める。

本研究では送信・受信波形からせん断波の送信・受信時間を読み取りその差を伝播時間とする T.D.法を用いた。また、T.D.法における到達時間を送信波形と受信波形の立ち上がり点の時間差を到達時間とする (S-S 方式) を用いて到達時間を決定し、せん断波速度 V_s を求めた。また、受信波形の立ち上がり点としては図 2 に示す地点が候補としてあげられる。今回の計測では必ずしも計測された第一波がせん断波とは限らなかったため、方向や大きさからせん断波でないと判断できた場合には、図 2 における C 点を受信波形の立ち上がり点として定めた。

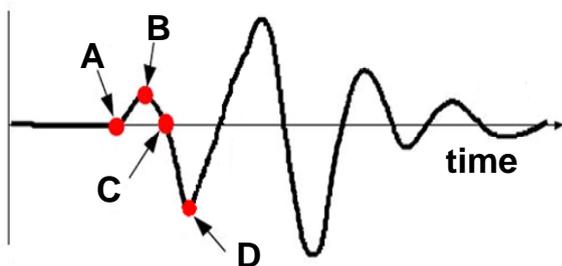


図 - 2. 受信波形の立ち上がり点

3.2 周波数を与える影響

計測の結果，入力周波数が異なると，入力波形の振れ幅が異なることや，受信波形の波形に影響を与えることが分かった．特に受信波形では入力周波数の影響により受信波形の到達時間の読み取りに誤差が生じる．

まず，入力電圧の周波数により入力波形の振れ幅が異なることについては両振幅 20V を入力してベンダーエレメントの振れ幅や周波数によってどの程度振れ方が異なるかを検討した．その結果，入力電圧の周波数が 15kHz 以上では，緩やかに振幅が下降していくことが分かった．図 3 に入力電圧と周波数の関係のグラフを示す．

入力周波数が受信波形に与える影響について，入力周波数を 8 段階に変化させて検討した．これにより 10kHz～20kHz で安定した波形を得ることができた．また，図 4 に各周波数における到達時間を示す．これより 10kHz 以上ではほぼ安定した到達時間を得られることがわかる．よって，本研究では 10kHz～20kHz の周波数を用いて試験を行った．

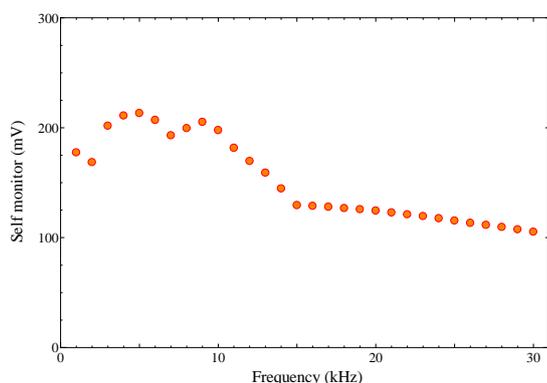


図 - 3. 入力電圧と周波数の関係

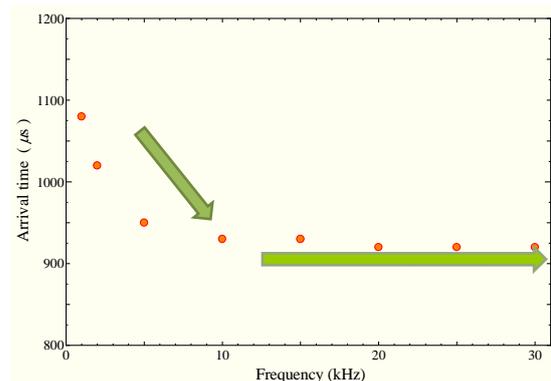


図 - 4. 到達時間と周波数の関係

4. 信号処理

伝播時間の読み取り精度は，土の剛性率のばらつきに直接影響を与える．受信波形に大きなノイズがのっている場合，伝播時間を精度よく決定することは困難になる．そこで受信波形からノイズを除去する必要がある．受信波形からの信号処理方法としては不規則な雑音の除去，大まかな信号の変化の把握を目的とした信号波形の平滑化処理，同期加算を行う処理である雑音の抑圧処理，フーリエ変換，アダマール変換，ハール変換などの変換処理を行う信号波形の変換処理が挙げられる．

本研究では雑音の抑圧処理法を用いてノイズ除去を行った．これにより受信波形からノイズ成分を取り除くことができ，真値である信号波形成分を用いて伝播時間を決定することが可能となった．

5. 試験結果

以上の検討結果をふまえた上で，ベンダーエレメント試験を行った．試験試料として豊浦砂を用いた．図 4 に豊浦砂の粒径加積曲線および密度を示す．供試体作製方法としては空中落下法を用いて，あらかじめ所定の間隙比になるように落下高さを決定し，豊浦砂を一定の高さより鋼製ノズルを用いて自由落下させた．

試験条件を表 2 に示す．今回の試験では四段階の軸力で供試体を圧密し，密詰め・緩詰めともに飽和と乾燥の二種類の条件でそれぞれ試験を行った．間隙比は飽和供試体，乾燥供試体ともに間隙比を密詰め ($e=0.7\sim0.725$) 緩詰め ($e=0.8\sim0.825$) 程度に調整し供試体を作製した．また，入力周波数の検討を行った結果，入力する電気信号の周波数を 10 kHz, 15 kHz, 20kHz とし，K 値を 1.0, 0.5 と変化させ試験を行った．

図 5 に実際に計測された密詰め・飽和・ $K=1$ 軸力 50kPa での受信波形を一例として示す。ここで、表 3(a)に密詰め・飽和・ $K=1$ 、表 3(b)に密詰め・乾燥・ $K=1$ の試験結果を示す。また、表 4(a)に密詰め・飽和・ $K=0.5$ 、表 4(b)に密詰め・乾燥・ $K=0.5$ の試験結果を示す。緩詰め試験結果として、表 5(a)に緩詰め・飽和・ $K=1.0$ 、表 5(b)に緩詰め・乾燥・ $K=1.0$ を示す。表 6(a)に緩詰め・飽和・ $K=0.5$ 、表 6(b)に緩詰め・乾燥・ $K=0.5$ を示す。

ここで伝達距離 ΔS はベンダーエレメントの中央間距離である。よって伝達距離 ΔS は供試体高さからベンダーエレメント一枚分を除いた値となる。剛性率 G の計算に用いる密度 ρ は飽和条件では湿潤密度 ρ_t を用いて計算を行い、乾燥条件では乾燥密度 ρ_d を用いて計算を行った。また、どの試験結果からも軸力が大きくなるにつれ間隙比が小さくなり、せん断波速度 V_s は速くなり、剛性率 G は大きくなっている。

図 6(a),(b)に今回の試験結果より整理した密詰めにおける飽和条件と乾燥条件でのせん断波速度 V_s 、剛性率 G と軸力の関係を示す。図 6(a)よりせん断波速度 V_s で比較した際には乾燥条件のせん断波速度 V_s が大きいことが分かる。しかし、図 10(b)で示したように剛性率 G で比較すると同程度の剛性率 G を得られることが分かった。よって飽和・乾燥条件ではせん断波速度 V_s は異なっても、剛性率 G は同程度になることが分かった。

図 7(a),(b)に密詰め条件での K 値の違いにおける剛性率 G を軸力と平均有効主応力で整理した図を示す。これらの図より、軸力で整理すると軸力が増加するにつれて、剛性率 G の差が大きくなることが分かる。しかし平均有効主応力で整理すると平均有効主応力が増加するにつれ、ほぼ同じ関係式で表すことができる。よって、平均有効主応力で整理すると剛性率 G を K 値の違いによらず一つにまとめることができることが分かった。

表-2. 試験条件

	σ_a (kPa)	K-Value	Specimen Condition	Input Wave (MHz)
$e=0.697$	50, 100	1, 0.5	Saturated	10, 15, 20
	200, 400		Dry	
$e=0.799$	50, 100	1, 0.5	Saturated	10, 15, 20
	200, 400		Dry	

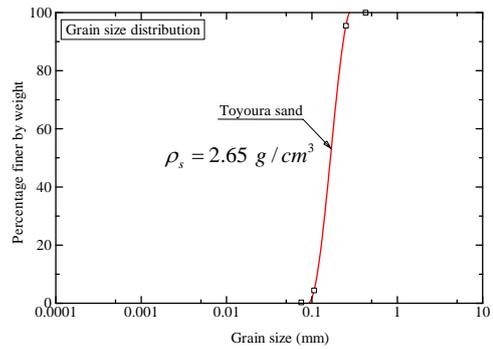


図-4. 豊浦砂の粒径加積曲線

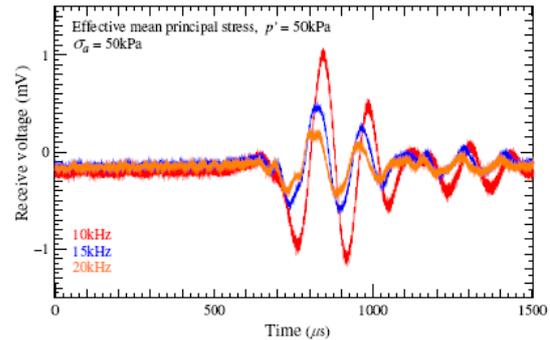


図-5. 計測された受信波形一例

表-3(a). 密詰め・飽和・ $K=1$ 試験結果

σ_a (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	e	Δ_t (msec)	Δ_s (mm)	V_s (m/sec)	G (MPa)
50	1.540	1.956	0.711	0.65	115.40	177.54	61.64
100	1.542	1.957	0.709	0.54	115.09	213.13	88.89
200	1.546	1.959	0.705	0.44	114.69	260.66	133.11
400	1.550	1.962	0.700	0.36	113.88	316.33	196.29

表-3(b). 密詰め・乾燥・ $K=1$ 試験結果

σ_a (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	e	Δ_t (msec)	Δ_s (mm)	V_s (m/sec)	G (MPa)
50	1.546	1.959	0.704	0.54	115.54	213.96	70.79
100	1.547	1.960	0.703	0.46	115.51	251.11	97.57
200	1.548	1.961	0.702	0.38	115.49	303.92	143.00
400	1.549	1.961	0.702	0.32	115.48	360.87	201.67

表-4(a). 密詰め・飽和・ $K=0.5$ 試験結果

σ_a (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	e	Δ_t (msec)	Δ_s (mm)	V_s (m/sec)	G (MPa)
50	1.521	1.944	0.732	0.68	115.79	170.28	56.36
100	1.523	1.945	0.730	0.57	115.18	202.07	79.42
200	1.526	1.947	0.727	0.49	114.07	232.80	105.50
400	1.529	1.949	0.724	0.41	112.66	274.78	147.12

表-4(b). 密詰め・乾燥・ $K=0.5$ 試験結果

σ_a (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	e	Δ_t (msec)	Δ_s (mm)	V_s (m/sec)	G (MPa)
50	1.554	1.964	0.696	0.54	115.57	214.02	71.16
100	1.558	1.967	0.691	0.46	115.46	251.00	98.15
200	1.562	1.969	0.687	0.40	115.36	288.39	129.90
400	1.567	1.972	0.681	0.36	115.22	320.04	160.53

表-5(a). 緩詰め・飽和・K=1.0 試験結果

σ_a (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	e	Δ_t (msec)	Δ_s (mm)	V_s (m/sec)	G (MPa)
50	1.448	1.899	0.820	0.70	117.59	167.99	53.58
100	1.451	1.900	0.817	0.56	117.57	209.95	83.75
200	1.454	1.902	0.812	0.46	117.53	255.50	124.19
400	1.459	1.905	0.806	0.38	117.45	309.07	182.00

表-5(b). 緩詰め・乾燥・K=1.0 試験結果

σ_a (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	e	Δ_t (msec)	Δ_s (mm)	V_s (m/sec)	G (MPa)
50	1.450	1.899	0.818	0.56	115.58	206.39	61.75
100	1.450	1.900	0.817	0.48	115.56	240.75	84.06
200	1.452	1.901	0.815	0.42	115.52	275.05	109.83
400	1.454	1.902	0.812	0.34	115.45	339.55	167.68

表-6(a). 緩詰め・飽和・K=0.5 試験結果

σ_a (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	e	Δ_t (msec)	Δ_s (mm)	V_s (m/sec)	G (MPa)
50	1.433	1.889	0.838	0.72	115.45	160.34	48.58
100	1.436	1.891	0.835	0.60	115.32	192.20	69.85
200	1.439	1.893	0.832	0.50	115.19	230.37	100.44
400	1.442	1.895	0.827	0.42	114.96	273.72	141.97

表-6(b). 緩詰め・乾燥・K=0.5 試験結果

σ_a (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	e	Δ_t (msec)	Δ_s (mm)	V_s (m/sec)	G (MPa)
50	1.451	1.900	0.816	0.58	114.99	198.26	57.04
100	1.456	1.903	0.810	0.50	113.68	227.36	75.25
200	1.462	1.907	0.802	0.44	111.86	254.23	94.51
400	1.473	1.914	0.789	0.36	109.03	302.86	135.08

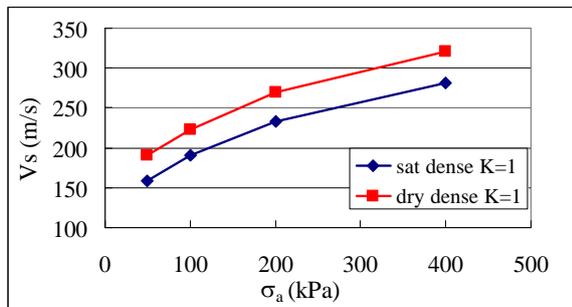


図-6 (a). 軸力とせん断波速度の関係

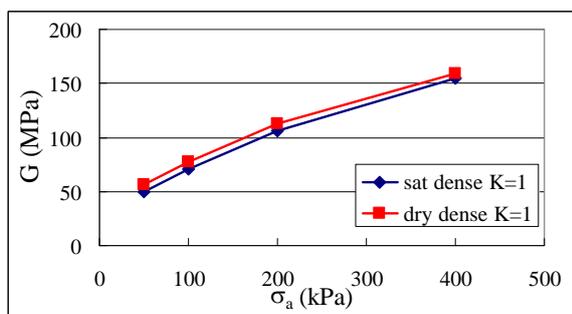


図-6(b). 軸力と剛性率の関係

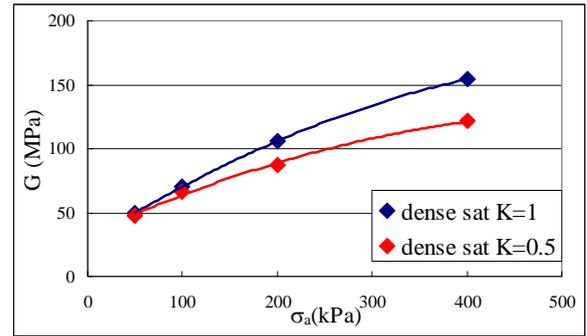


図-7(a). 軸力と剛性率の関係

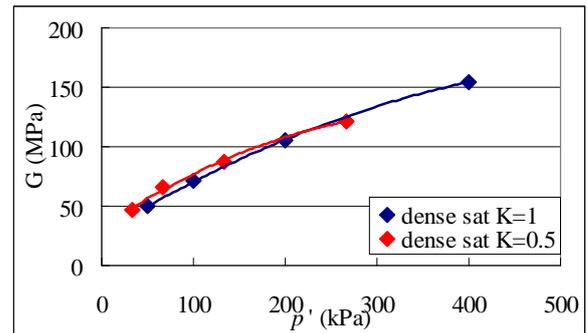


図-7(b). 平均有効主応力と剛性率の関係

6. まとめ

- 正確な剛性率を求めるための入力周波数は、高さ12cm程度の三軸供試体では、10~20kHzが望ましい。
- 受信波形からのノイズ除去は雑音抑圧処理を用いることによりノイズを大幅に低減できる。このノイズ除去を行うことにより受信波形からのせん断波到達時間の読み取り精度が良くなった。
- 今回構築したベンダーエレメント試験方法は、砂に対して既往の研究結果と同程度の剛性率を得られることを確認した。

7. 今後の検討

今後は、微小ひずみ三軸試験とベンダーエレメント試験を用いて、ポアソン比 ν の直接測定精度の検証。および粘性土におけるベンダーエレメント試験の適用性を検討する。また、不飽和土についてベンダーエレメント試験を実施する。