

簡易なベンダーエレメント試験による砂のせん断剛性の評価 Evaluation for Shear Modulus of Sand by Simplified Bender Element Test

○小林亮太¹, 山田雅一², 道明裕毅², 實松俊明³, 太田宏³

*Ryota Kobayashi¹, Masaichi Yamada², Yuki Domyo², Toshiaki Sanematsu³, Hiroshi Ota³

Abstract: In a variety of stress state, the shear modulus of sand was estimated by simplified Bender element test using the Lissajous figures. In K_0 condition, the obtained shear modulus roughly corresponded to the past test results. Also even in the anisotropic condition other than the K_0 condition, it was confirmed that the obtained shear modulus roughly corresponded to the evaluation equation of the past by the resonance method test.

1. はじめに

室内で土の変形特性を求めるベンダーエレメント試験(以下 BE 試験)は、非破壊試験であること、BE 自体が小さいため比較的容易に他の試験機と併用できることから有用な試験法である。一方、地盤工学会による BE 試験法の基準では、5 種類の周波数で、かつ、送信波と受信波の初動の周期が等しくなる周波数で実施することが望ましいとされている¹⁾。この送受信波が等しい周期を持つような周波数は、対象となる試料や応力状態によって異なり、特に、時々刻々と応力状態を変化させた状況で BE 試験を行う場合に、これらの条件を満足させることは難しい。そこで、筆者らは、セメント安定処理土に対して提案された、より簡易な送信周波数の同定法を用いた BE 試験によるせん断剛性の評価法²⁾を異方応力状態の砂に適用することで、砂のせん断剛性を検討した。

2. 試験方法

異方応力状態におけるせん断剛性 G_B の評価法を検討するために、Table 1 に示す条件で三軸試験を行った。各試験ケースとも初期荷重として K_0 条件で目標となる有効鉛直応力 σ'_v まで荷重を行い、その後、 K_0 、有効水平応力 σ'_h 一定、あるいは平均有効主応力 σ'_m 一定の条件で目標となる有効鉛直応力 σ'_v まで除荷あるいは荷重を行った。なお、 K_0 条件では 2 重セルで計測した側方ひずみが生じないように水平応力を制御している³⁾。試料には豊浦砂を用いており、Table 2 に物性値を示す。各供試体の初期相対密度は 50% 程度を目標とした。BE 試験は三軸試験の荷重・除荷中に実施しており、送信波はリサージュ図形によって確認した送信波と受信波の周期が等しくなるときの周波数を用いている。詳細は文献 4) を参照されたい。

3. 試験結果

Figure 1 に各試験ケースで得られた有効鉛直応力 σ'_v と

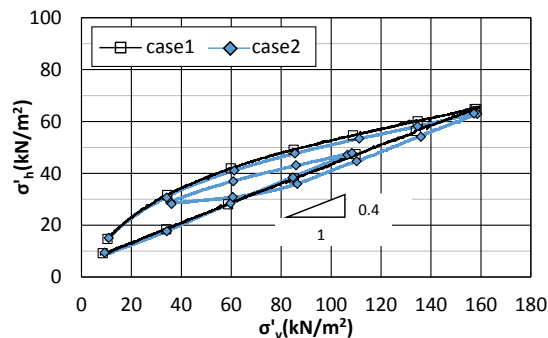
有効水平応力 σ'_h の関係を示しており、初期荷重後に K_0 荷重(除荷)した結果を(a)、初期荷重後に σ'_h 一定、または σ'_m 一定で σ'_v を荷重(除荷)した結果を(b)に実線で示した。同図には BE 試験によりせん断波速度 V_s を測定した応力状態をプロットで併せて示している。同図より、初期荷重時において K_0 が 0.4 程度の値を示していることが分かる。

Table 1. Test case

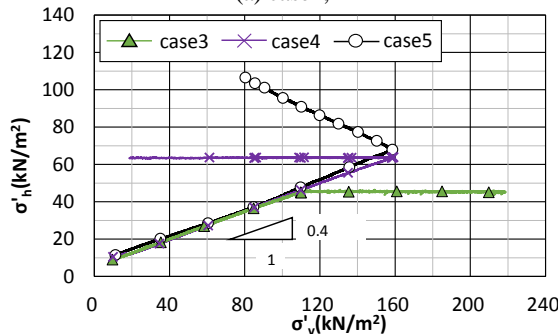
Case No.	relative density D_r (%)	initial loading		subsequent initial loading	
		stress condition	target σ'_v (kN/m^2)	stress condition	target σ'_v (kN/m^2)
case1	50	K_0	160	K_0	160→10
case2			110	K_0	110→35→160→10
case3			110	constant σ'_h	110→220
case4			160	constant σ'_h	160→85→160→20
case5			160	constant σ'_m	160→80

Table 2. Physical properties

Sample	Soil particle density (g/cm^3)	Maximum void ratio	
		e_{\max}	Minimum void ratio e_{\min}
Toyoura sand	2.631	0.97	0.62



(a) case 1, 2



(b) case 3, 4, 5

Figure 1. Stress pass

1: 日大理工・院(前)・建築 2: 日大理工・教員・建築 3: 鹿島技術研究所

4. せん断剛性 G_B の評価

BE 試験によって得られたせん断波速度 V_s を用いて、せん断剛性 G_B は(1)式により算出される。

$$G_B = \rho \cdot V_s^2 \quad (\text{kN/m}^2) \quad (1)$$

ここに、 ρ : 土の湿潤密度 (g/cm^3), V_s : せん断波速度 (m/s) である。

異方応力状態における本試験法の妥当性を確認するために、土圧係数 $K=0.5$, $\sigma'_v=200\text{kN/m}^2$ で行われた既往の BE 試験結果⁵⁾と比較した。Figure 2 には、初期载荷中におけるせん断剛性 G_B を平均有効主応力 σ'_m の影響を取り除くために $\sigma'_m{}^{0.44}$ で除した値と間隙比 e の関係を示す。同図より、リサーチ図形を用いた本試験法で得られたせん断剛性 G_B と既往の試験結果が比較的良好に対応していることから、異方応力状態において本試験法によるせん断剛性 G_B の評価方法の妥当性が概ね確認された。

Figure 3 には各試験ケースで得られたせん断剛性 G_B と平均有効主応力 σ'_m の関係を示している。供試体の鉛直方向での圧縮を载荷、伸張を除荷としてそれぞれ示している。同図にはきれいな砂を対象とした共振法で得られた、せん断ひずみ γ が 10^5 レベルにおけるせん断剛性 G_I の評価式⁶⁾を、SI 単位に換算した(2)式を併せて示した。

$$G_I = 11090 \cdot F(e) \cdot \sigma'_m{}^{0.44} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2)$$

ここに、 $F(e)$: 間隙比関数 ($= (2.17 \cdot e)^2 / (1+e)$) である。なお、各図の縦軸はせん断剛性 G を間隙比関数で除している。Figure 3 より、载荷、除荷によらず BE 試験から得られたせん断剛性 G_B は(2)式よりやや低く評価されているものの、概ね対応する結果が得られた。ただし、平均有効主応力 σ'_m が低い試験結果においてはせん断剛性 G_B が低く評価される点もみられた。これは、拘束圧が低くなるに従ってせん断剛性 G に不連続性が生じ、拘束圧依存性が異なることが指摘されていることから⁷⁾、低拘束圧による影響が一因であると思われる。

5. おわりに

本報をまとめると下記の通りである。

- 1) 異方応力状態の砂においてもリサーチ図形を用いたベンダーエレメント試験を行うことで、せん断波速度 V_s を簡易に測定することができた。
- 2) 異方応力状態で得られたせん断波速度 V_s から求めたせん断剛性 G_B と、既往のせん断剛性の評価式は概ね対応した。

参考文献

1) 地盤工学会：ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法，新規規定地盤工学会基準・同解説(2013年度版)，

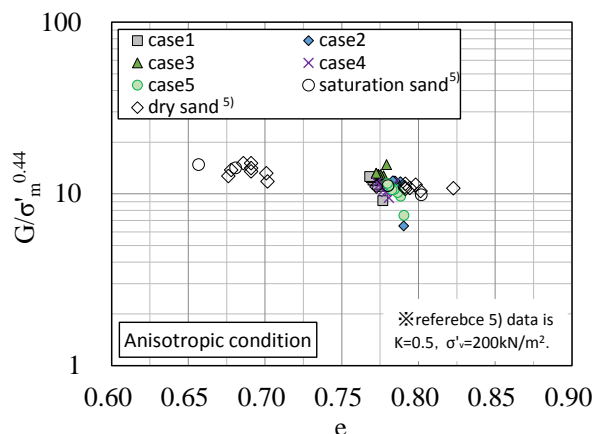


Figure 2. Relationship between $G/\sigma'_m{}^{0.44}$ and e

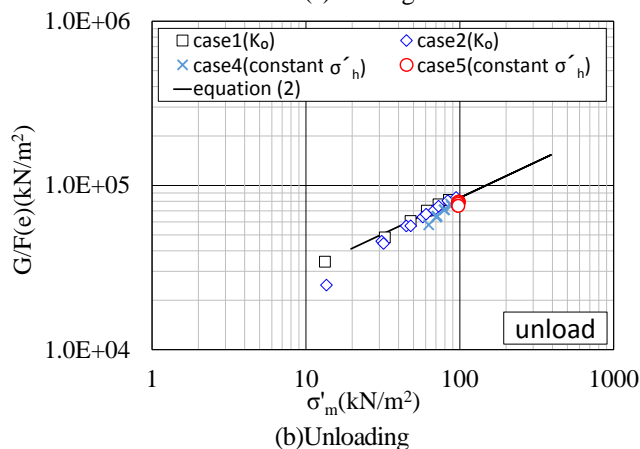
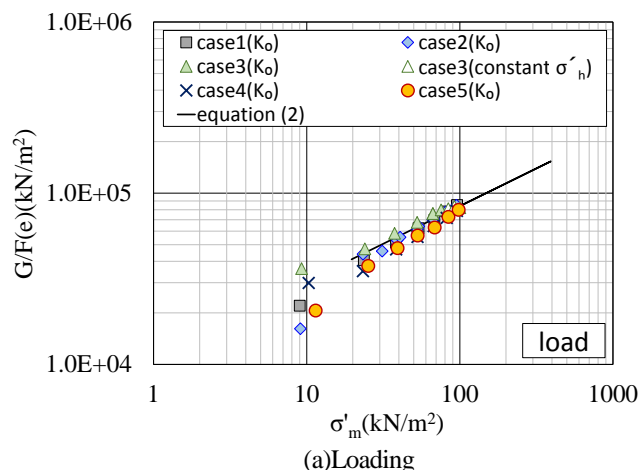


Figure 3. Relationship between $G/F(e)$ and σ'_m

JGS0544, 2014.

- 2) 山田雅一 他：セメント安定処理粘土の初期せん断弾性係数の評価，第12回地盤改良シンポジウム論文集，pp.117-122, 2016.
- 3) 太田宏 他：山留め壁に作用する土圧-変位関係の繰返し挙動 その1. 三軸試験装置と繰返し载荷試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1, pp.665-666, 2009.
- 4) 小林亮太 他：ベンダーエレメント試験による砂のせん断剛性の評価—その1 リサーチ図形を用いた試験法の検討—，日本建築学会大会学術講演梗概集，2018.
- 5) Yamashita, S. et al. : Interpretation of International parallel test on the measurement of G_{max} using bender elements, Soils and Foundations, Vol.49, No.4, pp.631-650, 2009.
- 6) Iwasaki, T. et al. : Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, Soils and Foundations, Vol.17, No.3, pp.19-35, 1977.
- 7) 奥村哲夫 他：低拘束圧下における砂質土の動的変形特性，土木学会論文集，第364号，pp.67-76, 1985.