

三軸試験での砂のせん断剛性の評価 -ベンダーエレメント試験による検討- Estimation of Shear Modulus of Sands during triaxial test -Investigation of 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, 溜井一基¹
*Ryota Kobayashi¹, Masaichi Yamada², Yuki Domyo², Toshiaki Sanematu³, Hiroshi Ota³, Kazuki Tamei¹

Abstract: In this study, we conducted a bender element test during triaxial test by using the lissajous response and using the identified resonance frequency, it is possible to easily and accurately obtain the shear modulus.

1. はじめに

本研究では、掘削時における地盤のリバウンド問題に着目し、砂の荷重および除荷過程における変形特性の評価を目的としている。そこで、本報では三軸試験機による砂の荷重・除荷過程において、同時にBE試験を実施した。

室内土質試験で変形特性を求める方法には、静的荷重法、振動試験法、波動試験法がある。その中で、波動試験法として位置付けられ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、応力状態の変化する地盤の変形特性を把握するために本報で行う三軸試験中における変形特性の測定において有用な試験法である。また、砂質土と粘性土に対する BE 試験法は既に標準化されている。ただし、標準化されている試験法では、5kHz~50kHz の範囲における 5 種類程度の異なる周波数で実施することが望ましいとされており、応力状態の変化する圧密試験中において、同じ応力状態でいくつもの周波数で BE 試験を行うことは困難である。そこで張らの研究²⁾によって提案されたセメント安定処理土に対する初期せん断弾性係数の評価法を適用し、この張らによる手法を用いた BE 試験を三軸試験中に実施し、砂地盤に対する適用の検討を行う。その初期段階として、乾燥砂及び飽和砂を対象とし、等方圧密試験中に BE 試験を実施し、本評価法が砂試料に対し適用可能かどうかを検討する。

2. 試験概要

2.1 試験装置

装置はBEに任意の電圧波形を発生させるファンクションジェネレータと、せん断波を受信するオシロスコープを三軸試験装置に組み合わせたもので、送信波と受信波をPCに転送することが可能である。本試験に用いたBEは、幅10mm、自由長(供試体貫入部)3mm、厚み0.9mmであり、キャップ(φ5cm)とペダスタル(φ5cm)の中央部分に取り付けた。試験装置の概略図は住吉ら⁴⁾を参照されたい。

2.2 試料

試験に用いた試料は、豊浦砂($\rho_s=2.631\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=0.97$, $e_{\min}=0.62$)である。

2.3 試験方法および試験条件

軸対称応力条件下での任意の等方応力状態における乾燥砂及び飽和砂の初期せん断剛性を評価するために、等方圧密試験を実施した。供試体(直径5cm, 高さ10cm)は空中落下法で作製し、初期の相対密度 D_r は50%とした。飽和砂に関しては、間隙係数 B が96%以上であることを確認した。等方圧密試験は、等方応力状態を保ったまま、それぞれFig.1, Fig.2に示すような応力経路で乾燥砂においては、鉛直応力 σ'_v =側方応力 $\sigma'_h=300\text{kN/m}^2$ 、飽和砂においては、鉛直応力 σ'_v =側方応力 $\sigma'_h=200\text{kN/m}^2$ まで段階的に荷重し、その後同じ応力経路で除荷した。各段階での圧密終了後にBE試験を実施した。

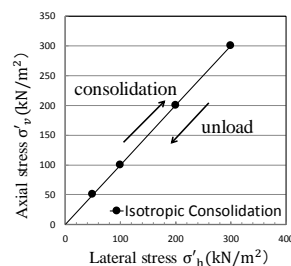


Fig.1 stress pass (dry sand)

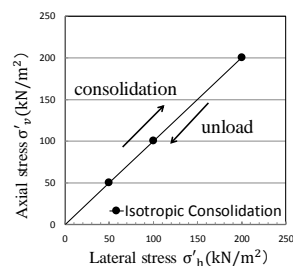


Fig.2 stress pass (saturated sand)

BE試験は、リサーチ応答を用いて同定した共振周波数を用い実施した。リサーチ応答を用いた共振周波数の同定法に関しては張らの報告²⁾を参照されたい。本システムによるリサーチ応答を用いた弾性波速度の評価法のフローチャートをFig.3に示す。

せん断波の伝播時間の同定は時間領域法(T.D.法)¹⁾とし、伝播時間 Δt は、送信波と受信波の立ち上がり点の時間差 Δt_s (start-to-start)と送信波と受信波のピーク点の時間差 Δt_p (peak-to-peak)の平均値から測定システムの遅延時間 Δt_d を差し引いて求めた。

本報試験中におけるBE試験によって得られた波形の一例をFig.4に示す。Fig.4より受信波形を明確に確認できることが見て取れる。また、送信波と同じ周波数の受信波が第一波目で容易に確認することができることを見て取り、BE試験において問題とされてきた伝播時間の同定に高度な工学的判断が必要とされる問題に対して進展が得られたことが確認できる。

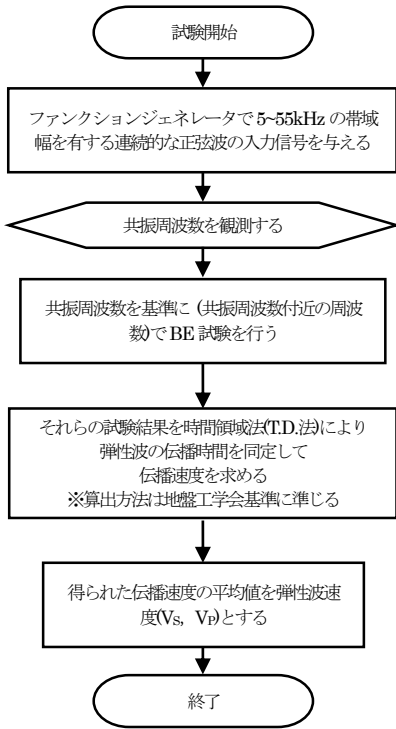


Fig.3 Method for determininf of time-domain

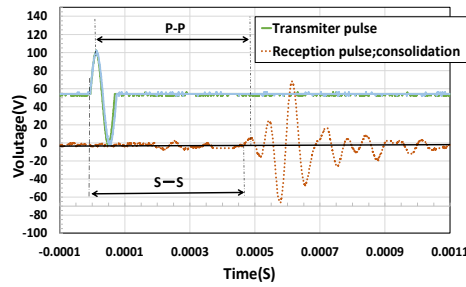


Fig.4 Example of transmitter pulse and reception pulse

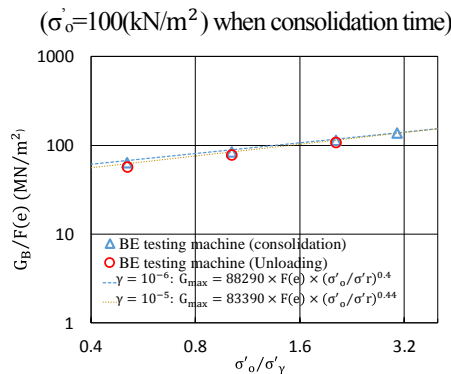


Fig.5 $D_r=50\%$ for $G_B/F(e) \sim \sigma'_o/\sigma'_r$ concernment (Dry sand)

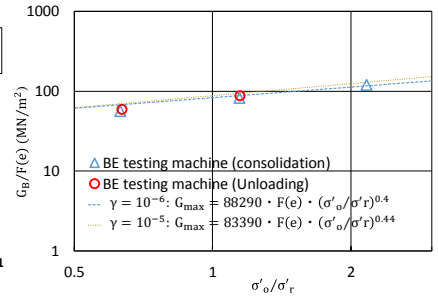


Fig.6 $D_r=50\%$ for $G_B/F(e) \sim \sigma'_o/\sigma'_r$ concernment (Saturated sand)

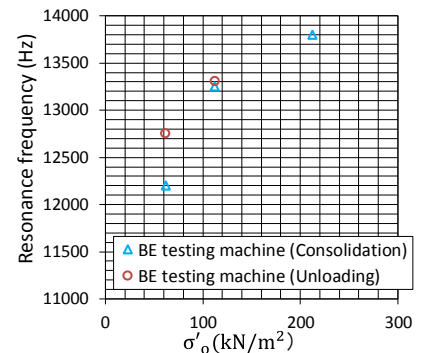


Fig.7 Variation of esonance frequency

3. 試験結果

BE 試験によるせん断波速度 V_s から得られるせん断剛性 G_B は(1)式から求められる。

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

ここに、 ρ : 土の密度($\text{kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$), V_s : せん断波速度(m/s)である。等方応力状態での土の初期せん断剛性 G_{\max} は(2)式で表される⁹⁾。

$$G_{\max} = A \cdot F(e) \cdot (\sigma'_o/\sigma'_r)^n \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2)$$

ここに、 A : 材料定数(kN/m^2), $F(e)$: 間隙比関数で $F(e) = (2 \cdot 17 - e)^2 / (1 + e)$, σ'_o : 有効拘束圧, σ'_r : 基準応力($=98.1 \text{ kN/m}^2$), n : 指数である。

Fig.5 と Fig.6 には、 $G_B/F(e)$ と正規化した有効拘束圧 σ'_o の関係を示す。ここで、 $\sigma'_o = \sigma'_v = \sigma'_h$ となる。同図中には岩崎ら³⁾がきれいな砂に対して共振法試験を行い、せん断ひずみ $\gamma = 10^{-6}$ と $\gamma = 10^{-5}$ に対する G_{\max} の提案式を併せ示した。両図より本試験で得られた G_B は共振法試験で得られた初期せん断剛性と良い対応を示している。この結果から共振周波数を用いた BE 試験を行うことにより正確なせん断波速度を評価できることがわかる。

Fig.7 に飽和砂に対する試験の際に得られた共振周波数の変化を示す。Fig.7 から圧密応力の増加に伴って共振周波数は変化していることが分かる。時間領域法(T.D.法)においては伝播時間の同定に高度な工学的判断が必要となる場合が

ある。従って、地盤工学会基準による試験法を採用すると、応力状態が変化する過程でのせん断波速度の評価が困難となる。このようなケースで正確に BE 試験を行うためには、リサーチ応答を用いて測定時に共振周波数を把握する必要がある。今後、砂地盤の挙動の更なる把握のため、 K_0 圧密試験を行う予定であるが、その試験に対しても圧密中において共振周波数を容易に同定できるリサーチ応答を用いた共振周波数の同定法は有用であると考えられる。

4. まとめ

本報告をまとめると以下の通りである。

- (1) 等方圧密試験中の砂試料においてリサーチ応答を用いることによって共振周波数を求めることができる。
- (2) リサーチ応答を用いた BE 試験から得られた砂試料のせん断剛性は、共振法試験で得られた初期せん断剛性の実験式とほぼ整合した。

【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、新規制定地盤工学会基準・同解説(2013 年度版), JGS 0544, 2014.
- [2] 張文思他：安定処理土の弾性波速度システムの開発、日本大学大学院理工学部研究科建築学専攻修士論文梗概集, 2016.
- [3] Iwasaki, T. and Fumio, Tatsuoaka, Solis and Foundations, Vol.17, No.3, pp.19-35, 1977.
- [4] 住吉良子他：ベンダーエレメントによる砂のせん断剛性の評価、平成20年度日本大学理工学部 学術講演会予稿集, pp. 46, 2008
- [5] Hardin, B.O. and Richart, F.E., Dynamic prestraining of dry sand, Jr. of ASCE, Vol.89, pp.33-65. 1963