

セメント安定処理砂の初期せん断弾性係数の評価
 -ベンダーエレメント試験を用いた検討-

Evaluation of Initial Shear Modulus of Cement-Treated Soils
 -Study on Using Bender Element Test-

○大木建人¹, 山田雅一², 道明裕毅²

*Kento Oki¹, Masaichi Yamada², Yuki Domyo²

Abstract: The objective of this study is to obtain the mechanical properties of cement-treated soils by the cement stabilization. To this end, the bender element test and the unconfined compression tests were performed by means of the samples of cement-treated Toyoura sand. In this paper, the relation between initial shear modulus and unconfined compressive strength are investigated by performing the bender element tests to cement-treated sands.

1.はじめに

セメント安定処理地盤の設計や品質管理は一軸圧縮強度で評価する場合が多い¹⁾。また、セメント安定処理地盤の変形解析では地盤剛性として一軸圧縮試験から得られる変形係数を用いた線形解析が行われている。この変形係数は、変形係数と一軸圧縮強度の関係式²⁾から推定され、変形係数の値は安定処理土の非線形性とベディングエラーの影響により過小評価されている³⁾。地盤材料の変形特性を求める室内試験法として、波動試験法であるベンダーエレメント(BE)試験はせん断波(S波)速度と疎密波(P波)速度を測定することで、弾性係数であるせん断弾性係数G、ポアソン比ν、ヤング率Eを算出することができる。地盤工学会では、BE試験方法については、せん断波(S波)速度の測定方法が標準化されている⁴⁾。しかし対象とする地盤材料は、粘性土と砂質土であり、セメント安定処理土については規定されていない。そこで、山田ら⁵⁾は、ベンダーエレメント試験による波動試験を用いた簡易なセメント安定処理土の初期せん断弾性係数の評価法を提案している。

本報告では、提案した初期せん断弾性係数の評価法を材齢約20年のセメント安定処理砂供試体に適用したので、その試験結果について報告する。

2.試験概要

2.1.試料

本試験で用いられた試料は、粒度を調整した標準的試料である豊浦砂である。安定材にはセメント系固化材を用い、実施工の仕様と材料分離の抑制を考慮して混和材にはベントナイト($\rho_s=2.60\text{g/cm}^3$)を用いた。

本試験では、Table 1 に示したセメント系固化材とベン

Table 1. Production conditions of sample

Sample	Relative density Dr (%)	Stabilizer amount C (kg/m ³)	Water-to-stabilizer ratio W/C (%)	Bentonite-to-stabilizer ratio B/C (%)	Age (days)
豊浦改良砂	60	50	80	3	6569
		100	100		6138~6634
		160	100		6808

トナイトの配合条件で作製したセメント安定処理砂供試体に対して、BE試験と一軸圧縮試験を行った。固化材添加量Cは乾燥試料土1m³に対する固化材量であり、豊浦砂は相対密度Drが60%の飽和砂を想定している。供試体は一軸圧縮試験用の円柱供試体(直径5cm, 高さ10cm)を地盤工学会基準JGS 0821に準拠して作製した。供試体の養生方法は、地下水面以下の安定処理地盤を想定して所定材齢まで水中養生した。

3.ベンダーエレメント(BE)試験

3.1.試験方法

BE試験によりセメント安定処理砂のせん断波速度Vsを求めて、初期せん断弾性係数G_{max}(= $\rho_s V_s^2$)を評価する。ここで、 ρ_s は供試体の湿潤密度である。弾性波速度測定システムを用いたセメント安定処理土に対する弾性波速度の評価法をFigure 1に示す⁶⁾。

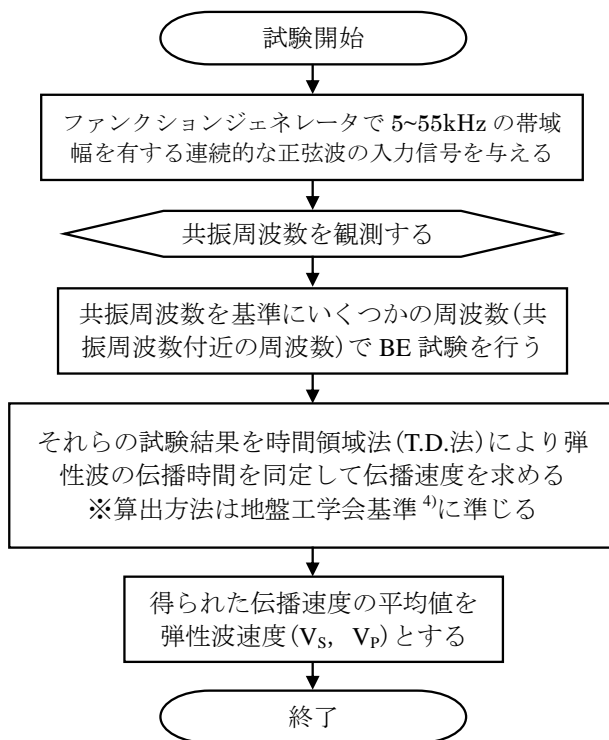


Figure 1. Method for determining of time-domain

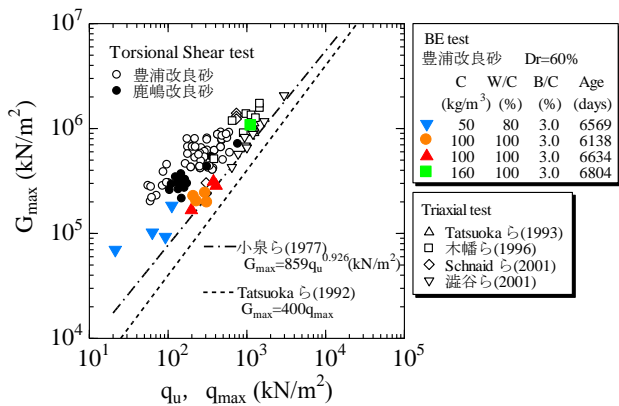


Figure 2. Relation between G_{max} and q_u
(Type of test method)

3.2.初期せん断弾性係数と一軸圧縮強度の関係

一般に、地盤材料の初期せん断弾性係数 G_{max} は次式で表される。

$$G_{max} = A \cdot \sigma_r' \cdot \left(\frac{\sigma_m'}{\sigma_r'} \right)^n \quad (\text{kN/m}^2) \quad (1)$$

ここに、 A は実験定数、 σ_m' は平均有効主応力 (kN/m^2)、 n は指数であり、 σ_r' は基準応力 ($=98 \text{ kN/m}^2$) である。

Figure 2 に、BE 試験方法から得られた $G_{max} \sim q_u$ 関係の試験結果を示す。一軸圧縮強度は拘束圧がゼロの状態での排水三軸圧縮強度と見なせる⁷⁾ことから、Tatsuoka ら⁸⁾による人工的に固結した試料に対する三軸圧縮試験で得られた初期最大ヤング係数 E_{max} と三軸圧縮強度 q_{max} の関係式を示した。Tatsuoka らは人工的に固結した試料は $E_{max}/q_{max} > 1000$ ($= G_{max}/q_{max} > 400$ 、ポアソン比 ν を 0.25 と仮定した。) になるとしており、その下限値である $G_{max} = 400q_{max}$ の曲線を破線で示した。また、小泉ら⁹⁾ は室内での弾性波速度試験に基づいたセメント安定処理土のせん断波速度 V_s と一軸圧縮強度 q_u の関係式を提案しており、これを $G_{max} \sim q_u$ 関係に換算して同図中に一点鎖線で示した。同図中には、本試験結果と、静定荷荷法で得られた中空ねじりせん断試験結果²⁾と三軸試験結果を併せ示す。三軸試験のデータは、Tatsuoka ら¹⁰⁾、木幡ら¹¹⁾および Schnaid¹²⁾らの $G_{max} \sim q_{max}$ の関係の試験結果である。さらに、澁谷¹³⁾らの一軸圧縮試験による $G_{max} \sim q_u$ 関係の試験結果を示した。また、試料の詳細については、文献 10~13) を参照されたい。同図より、本試験結果から得られた $G_{max} \sim q_u$ 関係は、既往の中空ねじりせん断試験結果と三軸試験結果と比較すると、全体的に低めに評価されているものの、概ね既往の研究結果と良い対応を示している。

Figure 3 に、本試験結果とセメント安定処理粘土を対象とした BE 試験結果を併せ示す。なお、図中に示した安定処理粘土の試験結果⁶⁾は、固化材添加量 ($C=50 \sim 200 \text{ kg/m}^3$) と試験材齢 (10~2247 日) を影響因子として行ったもので

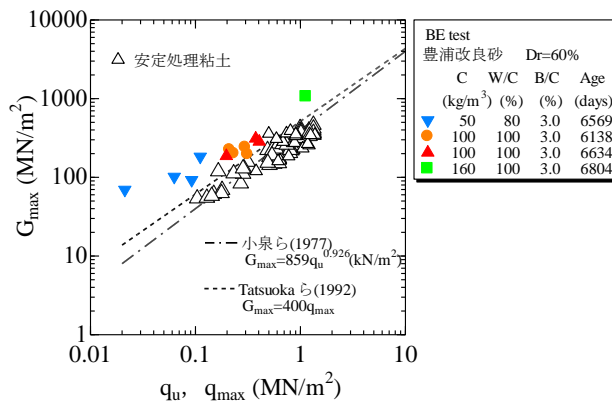


Figure 3. Relation between G_{max} and q_u
(Type of soil)

ある。同図より、BE 試験から得られたセメント安定処理砂の $G_{max} \sim q_u$ 関係は、セメント安定処理粘土の結果に比べて、上位の位置にプロットされていることが見て取れる。

4.まとめ

本研究をまとめると以下のとおりである。

- ① BE 試験から得られたセメント安定処理砂の $G_{max} \sim q_u$ 関係は、既往の中空ねじりせん断試験結果と三軸試験結果と比較すると、全体的に低めに評価されているものの、概ね既往の研究結果と良い対応を示した。
- ② BE 試験から得られたセメント安定処理砂の $G_{max} \sim q_u$ 関係は、セメント安定処理粘土の結果に比べて、上位の位置にプロットされる。

【参考文献】

- 1) 例えば、建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針改訂作業委員会：改訂版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—、日本建築センター、2002。
- 2) 例えば、セメント改良土の物性と試験方法に関する研究委員会：セメント及びセメント系固化材を用いた固化処理土の調査・設計・施工方法と物性評価に関するシンポジウム発表論文集、地盤工学会、pp.83-162, 375-380, 2005。
- 3) 木幡行宏 他：セメント系安定処理土の強度・変形特性について、セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集、地盤工学会、pp.1-19, 1996。
- 4) 地盤工学会：<https://www.jiban.or.jp/index.php>
- 5) 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。
- 6) 張文思 他：ベンダーエレメント試験を用いた安定処理土の弾性波速度の評価方法に関する研究、日本大学大学院理工学研究科建築学専攻修士論文梗概集、2016。
- 7) 龍岡文夫：土質試験の課題と試験結果の評価—東京湾横断道路計画における土質工学の諸問題と室内土質試験—、土質工学会、「昭和 61 年度最近の土質・基礎に関する講習 8 会」講演資料、1986。
- 8) Tatsuoka, F. et al. : Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests, Theme Lecture 1, Proc. Ninth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp.101-170, 1992。
- 9) 小泉泰通 他：セメントスラリーの軟弱地盤への適用について、第 12 回土質工学研究発表会、pp.1289-1292, 1977。
- 10) Tatsuoka, F. et al. : Measuring small strain stiffness of soft rocks, Proc. Int. Symp. On Geotech. Engr. Of Hard Soils-Soft Rocks, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 809-816, 1993。
- 11) 木幡行宏 他：セメント改良砂質土の変形・強度特性に及ぼす養生日数の影響、セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集、地盤工学会、pp. 137-142, 1996。
- 12) Schnaid, F. et al. : Characterization of cemented sand in triaxial compression, J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, Vol. 127, No. 10, pp. 857-868, 2001
- 13) 庄谷啓 他：セメント混合砂の変形・強度特性における時硬化および拘束圧履歴依存性、土木学会論文集、No. 87III-56, pp. 249-257, 2001。