

繰返し三軸試験と弾性S波速度から求めたせん断剛性率

中部土質試験協同組合 ○久保 裕一
名城大学 小高 猛司

1. はじめに

我が国では南海トラフ地震のリスクが増大し、国民の関心も高い。巨大地震災害に備えるための耐震設計に必要なせん断剛性率は、地盤材料の動的変形特性を求める繰返し三軸試験（以下、繰返し三軸試験）などによって算出され、我々の組合にも数多く発注されている。しかしながら、この繰返し三軸試験にはベディングエラーの影響が懸念され、せん断剛性率が過小評価される可能性が指摘されている¹⁾。本報告では、プレート型圧電素子を用いてS波速度を生成し、供試体内部を通過したS波速度から得られるせん断剛性率と、繰返し三軸試験の等価ヤング率から得られるせん断剛性率を比較し、両者の値について検討を行った。

2. 実験方法

実験に使用した試料は、東海地方でサンプリング採取された乱れの少ない供試体8試料を用いた。一軸圧縮強度は100~200kPaであった。表-1に試料の諸元を示し、図1に粒度試験結果を示す。図から細粒分が卓越した試料であることが確認できる。塑性図では、概ねすべての点がA線付近に位置しており、高液性限界と分類された。

表 1 試料の諸元

試料名	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
液性限界 %	56.9	59.7	53.0	91.6	100.5	80.3	45.9	50.2
塑性指数	29.8	28.1	21.2	57.5	63.7	43.3	21.0	19.0
乾燥密度 g/cm ³	1.170	1.043	1.041	1.028	1.160	1.141	1.397	1.115
間隙比	1.293	1.532	1.544	1.624	1.330	1.377	0.920	1.396
飽和度 %	98.4	99.1	98.6	98.4	96.8	97.8	93.9	99.1

試験の概要は以下のものである。地盤工学会基準 JGS 0542 2020、土の変形特性を求めるための繰返し三軸試験（以下、繰返し三軸試験）に従い三軸セル内に直径5cm、高さ10cmの円柱供試体を設置する。供試体上下、側方には通水、排水のための濾紙を巻いた。飽和は二重負圧法を用い、土被り圧で12時間程度の等方圧密後（荷重制御）、排水状態のままプレート型圧電素子を用いてS波速度を計測（以下、S波速度測定）、その後、繰返し三軸試験を行った。

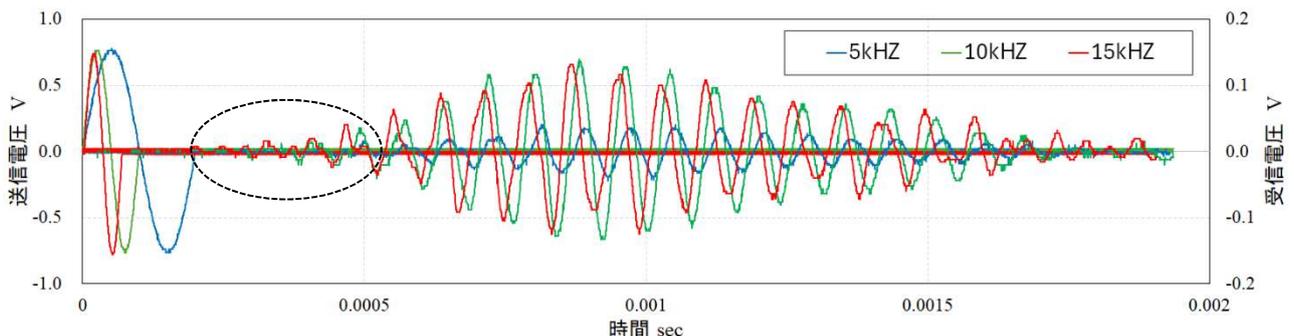


図 2 送受信電圧と時間関係

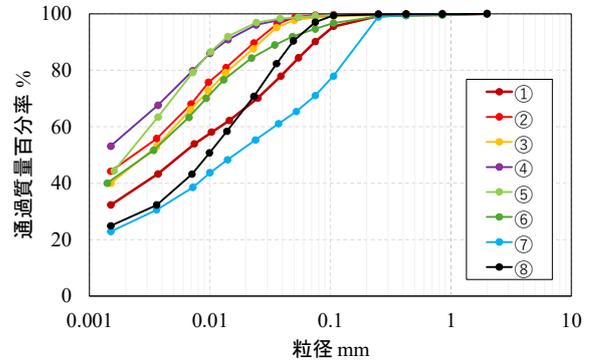


図 1 粒度試験結果

S波速度測定の概要について述べる。本測定では、プレート型圧電素子を用いて供試体上部キャップからせん断波を発生させ、下部ベDESTALで受信する。発信波と受信波の時間差をオシロスコープで計測し、time domain technique (T.D.法)を用いて弾性波速度を算出する。使用したプレート型圧電素子はドーナツ型で、外側の金属部分から弾性波S波を発信し、受信する。内側には直径2cmのポーラスストーンが埋め込まれており給排水を行う。このプレート圧着型はバンダーエレメント方式と異なり、突起部分がないため、礫質土など広範囲な試料に対応可能で、耐久性も高いのが特徴である。与えるせん断波については、地盤工学会基準、バンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法 JGS 0544-2020 に従い sin 波を1サイクル、5kHz、10kHz、15kHzの3種類与え、駆動電圧を8Vpp（10倍して振動子に印加）とした。同定法は国際一斉試験らの実験²⁾から start-to-start 法を採用した。また、せん断波速度は式-1から求めた。

$$G = \rho \times Vs^2 \quad \dots \text{式-1}$$

ρ : 供試体の密度 (g/cm³)

Vs : せん断波速度 (m/s)

G : せん断剛性率 (kPa)

繰返し三軸試験は前述の試験法に基づき、周波数0.2Hzのsin波、ひずみ制御により片振幅10⁻²程度までの軸ひずみを14段階程度与え、ギャップセンサーにより計測、ポ

アソン比を0.5と仮定し、 10^{-5} ~ 10^{-6} 間のひずみ領域より等価ヤング率からせん断剛性率を求めた。

near-field-effect の特定方法について述べる。near-field-effect とは、波長に対して供試体の伝播距離が短い場合にせん断波と比較して速度の大きい波が受信波形の初期部分に現れる現象を指す。正確な S 波速度測定には、この near-field-effect を正確に把握することが重要である。本報告では、5kHz、10kHz、15kHz の 3 種類の測定結果を基に、これらの受信波形を重ね合わせたところ、ほぼ同じ周期で到達する波が存在することが確認された。これらの波を near-field-effect と特定し、S 波の到達時間を算出した。代表的な送受信波形の例を図 2 に示す（送信電圧は 0.1 倍表示）。図からは周波数に関係なく波形周期が一致する部分（黒破線部分）が確認できる。この部分を near-field-effect とし、次の波を到達受信波とした。

3. 実験結果

図 3 に S 波速度測定から得られたせん断剛性率と、繰返し三軸試験から得られたせん断剛性率を示す。黒の破線は両者のせん断剛性率が一致することを示し、赤の破線は点から得られた近似直線を表している。図から、S 波速度測定によるせん断剛性率が全ての範囲で繰返し三軸試験によるせん断剛性率を概ね 20MPa 上回った。図 4 は間隙比と S 波速度測定から得られたせん断剛性率、繰返し三軸試験から得られたせん断剛性率の関係を重ねて示す。求められたせん断剛性率は概ね平行関係にあり、間隙比が小さくなるにつれ、せん断剛性率が増大することがわかる。また、各点のバラツキに着目すると、S 波速度測定から得られた値は、繰返し三軸試験から得られたものよりややバラツキが小さいことが確認される。これにより、S 波速度測定から得られたせん断剛性率は、繰返し三軸試験から得られるせん断剛性率よりも、より間隙比に応じたせん断剛性率を得る可能性があることを示唆している。

4. まとめ

東海地方で採取された粘性土を用いて、せん断剛性率の比較を行った。その結果、S 波速度測定から得られたせん断剛性率は繰返し三軸試験よりも約 20MPa 大きい値を示した。この差異の原因として、今回の繰返し三軸試験では、せん断剛性率をギャップセンサーで計測した片振幅軸ひずみ 10^{-5} 付近の弾性域としては比較的大きな領域での値で算出していることが挙げられる。また、LDT 計測のように供試体の側方ひずみを直接測定するのではなく、ペダスタルキャップと剛結したクランプ軸の動きを測定しているため、供試体上部のベディングエラーを含むひずみを用いていた可能性もある。一方、S 波速度測定については、以下のように考察される。near-field-effect の特定では 3 波を重ね合わせたが、何らかの要因により、早い波を到達波として計測している可能性も考えられる。また、S 波速度測定から得られた第 1 波の到

達波は、供試体内部の比較的硬質な部分や密詰な部分を通過した波で、サンプリング時の乱れが少ない部分を通過したとも考えられるため、供試体内部で最も高速な S 波速度が得られている可能性も考えられる。

今回の試験結果においては、S 波速度測定から得られるせん断剛性率は、サンプリング時の乱れの影響や室内試験の計測誤差を除外したせん断剛性率が得られていると考えられる一方で、地盤材料によらずに一律に約 20MPa 高いせん断剛性率が得られていることから、S 波速度測定は計測上の何らかの要因による過大評価も示唆される。今後は、さらに試験数を増やし、研究を進める予定である。

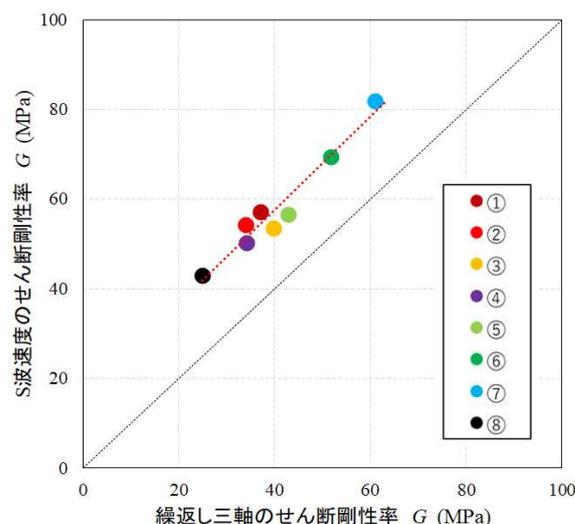


図 3 S 波速度と繰返し三軸のせん断剛性率

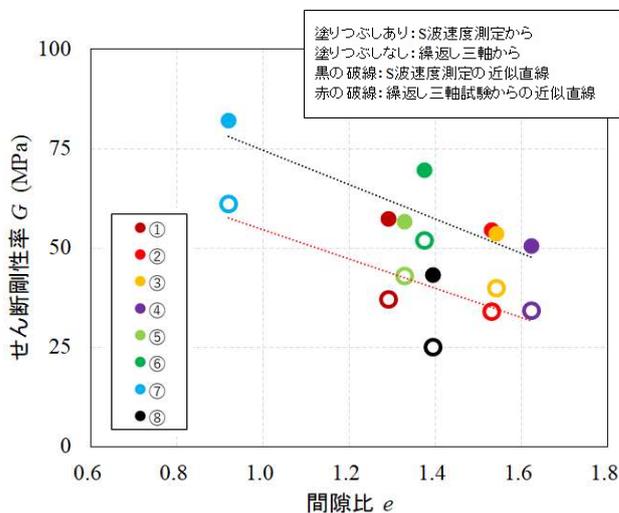


図 4 間隙比とせん断剛性率の関係

《引用・参考文献》

- 1) 龍岡文夫, 木幡行宏: ベディングエラー, 土と基礎. Vol. 42, No. 9, pp. 53~55, 1994.
- 2) Yamashita, S., Kawaguchi, T., Nakata, Y., Mikami, T., Fujiwara T and Shibuya, S.: Interpretation of international parallel test on the measurement of G_{max} using bender elements, Soil and Foundations, Vol. 49, No. 4, pp. 631-650, 2009.