

ベンダーエレメント試験を用いた繰返し载荷中の各種砂のせん断波速度の観察

宇都宮大学 学生会員 ○佐藤 颯
宇都宮大学 正会員 海野 寿康 非会員 吉直 卓也

1. 研究の背景と目的

現在、インフラの維持管理が社会問題となっており、公共構造物では健全度調査が行われている。一方、土構造物や地盤についても同様なことが言えるように考えられるが問題は顕著化していない。他方、地盤工学分野においても徐々に物理探査による地盤調査の普及が進んでいる。せん断波計測による地盤の健全度調査等がメジャーであり、効果的に活用されている。

一方、各種载荷履歴等のある土や地盤に対して、せん断波計測による土質物性や力学特性の把握が有効かどうかは、情報量が十分ではなく、未知な部分が多い。特に地震など災害後の土の健全度評価に上記のせん断波計測が有効かどうか検討した事例はほとんどない。

以上のような背景から、本研究では、室内試験上でせん断波速度計測による土の物性把握について検討を行った。具体的には、液状化履歴を受けた供試体に対し、ベンダーエレメント試験によるせん断波速度の計測を実施し、せん断波速度の挙動を観察した。

2. 試験に使用した試料

本研究では、豊浦砂（土粒子密度：2.643g/cm³，最大間隙比 $e_{max}=0.977$ ，最小間隙比 $e_{min}=0.605$ ）を使用した。また、豊浦砂とセメント（普通ポルトランドセメント）を配合し、セメント改良砂を模した供試体も作製した。

3. 試験概要

せん断波速度と液状化強度を求めるためにベンダーエレメント試験（以下 BE 試験）と圧密非排水三軸試験及び繰返し非排水三軸圧縮試験を行った。試験に用いた供試体はいずれも直径 5cm，高さ 10cm の円柱形である。各供試体の条件として、圧密後の乾燥密度が 1.507g/cm³，1.574g/cm³ となることを目標に作製した。それぞれ相対密度 $Dr=60\%$ と 80% に相当する。セメント配合した供試体は、豊浦砂とセメントを混ぜた状態で乾燥密度が 1.507g/cm³ となるように作製した。表-1

キーワード ベンダーエレメント試験，せん断波速度，液状化，繰返し载荷，地盤改良土

に試験ケースを示す。载荷履歴を与える前の相対密度 60%，80%の豊浦砂の試験を Case-1,Case-2，载荷履歴を与える前の相対密度 60%のセメント砂の試験ケースを Case-3 とした。なお，载荷履歴を与え再圧密した試験ケースには Case-1'のように'をつけて表記する。

BE 試験は，地盤工学会基準である(JGS 0544-2020)¹⁾に準拠して行った。また，圧密非排水三軸圧縮試験は(JGS 0523-2020)²⁾に準拠して行った。圧密後の供試体に载荷速度 0.125mm/min で载荷し軸ひずみ 15%に至った時点で試験を終了した。

繰返し非排水三軸試験は(JGS 0541-2020)³⁾に準拠して行った。载荷は，周波数 0.05Hz で sin 波を与え，軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ に至った時点を液状化と定義した。

各ケース 3 本ずつ試験を実施し，液状化強度比 R_{L20} を求めた(Case-1~3)。その後，求めた R_{L20} で载荷履歴を与え再圧密した供試体に対し，再び载荷履歴を与え，再圧密後の液状化強度比 R_{L20}' を求めた (Case-1'~3')。

4. 試験結果

圧密非排水三軸圧縮試験により得られた強度定数と BE 試験により得られたせん断波速度 V_s を表-2 に示す。内部摩擦角 φ の増加によりせん断波速度は増加する。粘着力 c の増加によりせん断波速度は増加する。以上より，本研究で使用した試験機は問題なくせん断波速度を測定できると言える。

BE 試験により求めたせん断波速度と繰返し载荷中に発生する過剰間隙水圧比の関係を図-1(Case-1，Case-2)，図-2(Case-3)に示す。

表-1 試験ケース

	$\rho_d(g/cm^3)$	$Dr(\%)$	セメント量(%)
Case-1	1.507	60	0
Case-1'	1.521	64	0
Case-2	1.574	80	0
Case-2'	1.589	84	0
Case-3	1.507	60	1
Case-3'	1.539	69	1

Case-1, Case-2 では、繰返し载荷により過剰間隙水圧比が 0.6 以上となった辺りから急激に V_s が低下している様子が観察できる。セメント添加の Case-3 では、ほぼ一定量で V_s が低下している。Case-1 で $\Delta V_s=7.76\text{m/s}$, Case-2 で 16.3m/s , Case-3 で 107.6m/s 減少した。液状化強度と同じように Case-3 において V_s の低下が大きい。

载荷履歴の有無による供試体の液状化強度比 R_{L20} とせん断波速度 V_s を表-3 に示す。载荷履歴を与えた供試体において、Case-1 では $\Delta R_{L20}=0.012$, Case-2 では 0.097 , Case-3 では 0.328 減少した。豊浦砂のみの Case-1 及び Case-2 では液状化強度の減少は極めて少ない値だが、セメントを添加した Case-3 は、液状化強度は大きく減少した。次に、せん断波速度と相対密度の関係を図-3 に示す。再圧密した供試体は Case-1 において、 $Dr=60\%$ から $Dr=64\%$, Case-2 において $Dr=80\%$ から $Dr=84\%$, Case-3 において $Dr=60\%$ から $Dr=69\%$ に上昇した。ここで、载荷履歴を受けた後の供試体は、相対密度が増加した一方で、せん断波速度は低下する結果となった。ここで、セメント固化の Case-3 の強度低下は、液状化に伴いセメントによる土粒子間の固着が失われたことによるものと現状考えている。

5. 結論

- 本研究によって得られた知見は以下の通りである。
- 繰返しせん断に伴う過剰間隙水圧比の上昇により有効応力が減少するが、その際、せん断波速度の低下が確認できた。ただし、豊浦砂のみの場合、過剰間隙水圧比 0.6 以上になると急激せん断波速度が低下した一方で、セメント配合した場合、载荷履歴に比例し一定量でせん断波速度が減少した。
 - 载荷履歴及びその後の再圧密した土では、体積ひずみの発生に伴い、相対密度が増加したが、液状化強度、並びにせん断波速度は低下している。

6. 参考文献

1)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説―二分冊の2，JGS 0544-2020 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 pp.832-835. 2)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説―二分冊の2，JGS 0523-2020 土の圧密非排水($\bar{C}U$)三軸圧縮試験方法 pp.616-619. 3)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説―二分冊の2，JGS 0541-2020 土の繰返し非排水三軸試験方法 pp.769-775

表-2 強度定数とせん断波速度

試験ケース	Case-1	Case-2	Case-3
粘着力 c	0	0	100
内部摩擦角 φ	36.5	38	25.5
せん断波速度 V_s	219.33	229.39	324.5

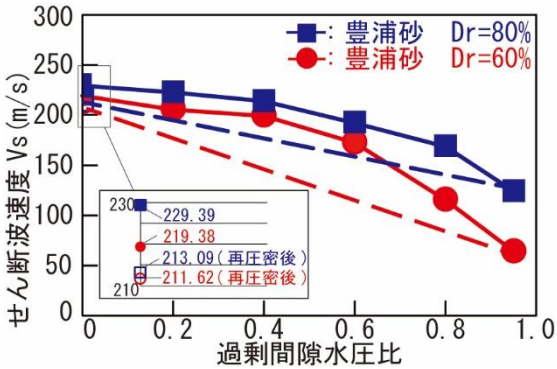


図-1 過剰間隙水圧比とせん断波速度 V_s の変化

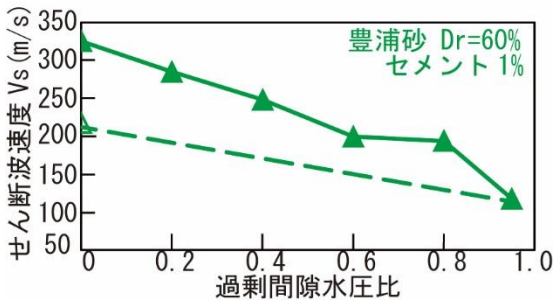


図-2 過剰間隙水圧比とせん断波速度 V_s の変化
(豊浦砂 $Dr=60\%$ セメント 1%)

	R_{L20} (R_{L20}')	V_s (m/s)
Case-1	0.135	219.38
Case-1'	0.123	211.62
Case-2	0.252	229.39
Case-2'	0.155	213.09
Case-3	0.539	324.50
Case-3'	0.211	216.90

表-3 液状化強度比とせん断波速度 V_s

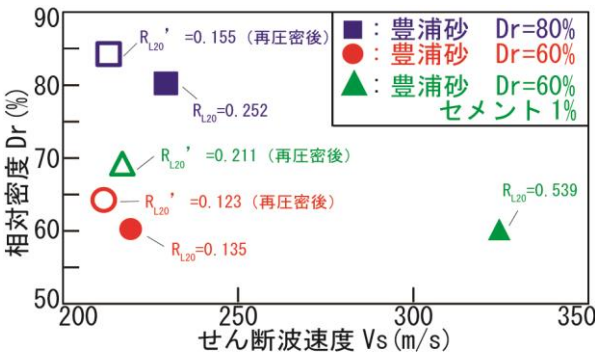


図-3 相対密度 Dr とせん断波速度 V_s