

室内調整試料を用いた三軸ベンダーエレメント試験による 砂の液状化強度と S 波速度の関係

中央大学工学部	正会員	國生	剛治
中央大学工学部	学生会員	○小枝	千尋
中央大学大学院		笹岡	里衣
中央大学工学部	学生会員	林	夏希

1. はじめに

一般に長い年月を経て形成された自然堆積土は時間経過により骨格構造が含有鉱物の化学反応などにより安定し、液状化強度が増大する年代効果があると考えられる。しかし、通常行われている再構成試料による室内力学試験では年代効果を考慮しているとは言い難いため、原位置液状化強度の評価において年代効果を考慮することは重要である。年代効果を反映している可能性のある簡便な原位置パラメータとして、せん断波速度 V_s があげられる。

本研究では同一供試体でベンダーエレメント（以降、BE）試験と液状化試験を行える三軸試験機を用い、 V_s と液状化強度の関係を調べた。基礎的試験として室内調整試料を用いた試験と普通ポルトランドセメント（以降、セメント）を添加し、疑似的に年代効果を再現する加速試験を行い、年代効果が V_s , R_L に与える影響について検討した。

2. 試験試料と試験方法¹⁾

本研究に用いた試料は千葉県富津砂で、**図-1** に粒径加積曲線、**表-1** に物理特性をそれぞれ示す。

試験には**図-2** のような供試体直径 50mm、高さ 100mm の小型三軸試験機を用いた。圧密後相対密度 D_r が 50% になるように、試料を 5 層に分けてモールド内で締固め、供試体を作製する。セメントを添加しない場合は通気法にて、添加する場合は二重負圧法にて供試体を飽和させる。供試体飽和後、有効拘束圧 98kPa で等方圧密し、圧密終了後に同一供試体内で BE 試験および液状化試験を行う。ただし、加速試験の場合は、通水開始（養生開始）から 24 時間後に試験を行う。

BE 試験では、ファンクションジェネレーターから発信した電圧信号をペDESTALの発信部 BE およびデジタルオシロスコープに送り、また供試体中を伝播したせん断波がキャップの受信部 BE に到達して生じた電圧信号をオシロスコープに送る。これらの発・受信電圧波形をデジタルデータとしてパソコンに集録し、両者の時間差 Δt を読み取る。 V_s の算出には次式 (1) を用いる。

$$V_s = H' / \Delta t \quad (1)$$

ここで、 H' とはせん断波の実質伝播距離であり、供試体高さ H から発・受信のベンダーエレメント長さ 14mm を差し引いた長さである²⁾。発信波の周波数は 100Hz、300Hz とし、逆位相の波も含め発・受信波データをサンプリングし、それら 4 つのデータから得られたせん断波伝播時間 Δt の平均で発信、受信間の実質の伝播距離 H' を除し、 V_s を求める。**図-3** に BE 試験での発信波及び受信波の波形を例示しているが、発信波の振動方向の反転により対称的な受信波が得られ、S 波を計測していることが分かる。

液状化試験では一定応力振幅 σ_d 、周波数 $f=0.05\text{Hz}$ で非排水繰返し载荷を行い、両振幅軸ひずみ ε_{DA} が 10% 以上に達した時点で試験を終

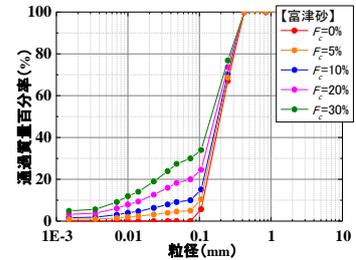


図-1 試料の粒径加積曲線

表-1 富津砂供試体の物理特性

F_c (%)	C_c (%)	ρ_s (g/cm^3)	ρ_{dmax} (g/cm^3)	ρ_{dmin} (g/cm^3)	D_r (平均) (%)	V_s (m/s)	R_{L10}	a	b
0.0	2.700	1.625	1.277	45.7	199.60	0.187	0.30	0.18	
0.5	2.702	1.627	1.305	49.6	201.79	0.189	0.30	0.20	
5	0.0	2.691	1.654	1.246	53.2	186.99	0.163	0.25	0.15
0.5	2.697	1.666	1.277	52.3	201.98	0.177	0.23	0.15	
10	0.0	2.685	1.704	1.248	55.4	178.68	0.142	0.20	0.15
0.5	2.690	1.688	1.262	55.0	192.15	0.177	0.27	0.17	
20	0.0	2.672	1.712	1.188	55.3	163.48	0.126	0.18	0.15
0.5	2.678	1.689	1.222	58.1	181.24	0.151	0.23	0.17	
30	0.0	2.664	1.708	1.128	60.9	152.19	0.124	0.19	0.17
0.5	2.666	1.606	1.037						

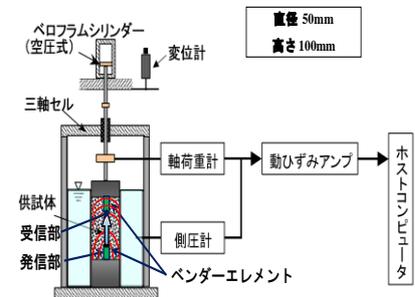


図-2 三軸試験機

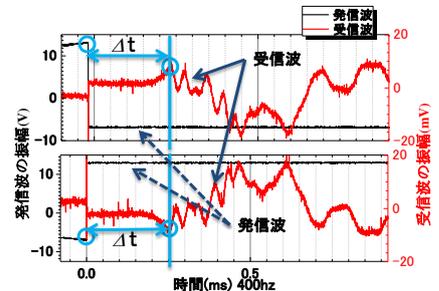


図-3 時間と発信波及び受信波の関係

キーワード せん断波速度 液状化強度 細粒分含有率 加速試験

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学工学部都市環境学科地盤工学研究室 Tel 03-3817-1799

了した。

3. 試験結果

図-4は富津砂 ($D_r=50\%$, $F_c=0, 5, 10, 20, 30\%$, $C_c=0, 0.5\%$)の両振幅ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達する繰返し応力比 R_L と载荷繰返し回数 N_c の関係を片対数グラフで示している。図中のカーブは式 $R_L=aN_c^{-b}$ で近似した液状化強度曲線である。 F_c の増加に伴い R_L は低下するが、 $F_c=20, 30\%$ ではほぼ同じ曲線になることがわかる。セメントを添加した加速試験について、 $F_c=0\%$ では強度の増加傾向はみられない。一方 $F_c \neq 0\%$ の場合、 F_c 一定下では $C_c=0\%$ から $C_c=0.5\%$ になると R_L が増加していることが分かる。

図-5、図-6は F_c に対する V_s および $N_c=10$ 回に対する液状化応力比 R_{L10} の関係を示している。 F_c の増加に伴い、 V_s , R_{L10} 共に減少するが、セメントを含まない $C_c=0\%$ の場合、 $F_c=0\sim 20\%$ での変化率は R_{L10} で33%であるのに対し V_s では18%であり、 V_s の変化率の方が小さいことがわかる。一方 $C_c=0.5\%$ の場合、 F_c の増加に対する V_s , R_{L10} の減少割合は $C_c=0\%$ に比べて小さくなる。 $F_c=0\sim 20\%$ での変化率は R_{L10} で20%、 V_s で10%であり、やはり V_s の変化率の方が小さい。また、 F_c が増加するほど、同じ F_c の下での C_c の変化に対する V_s , R_{L10} の変化割合が大きくなる傾向がみられる。これは固結作用による V_s , R_{L10} の増加が C_c のみでは決まらず、 F_c が密接に関係していることを示している。

図-7は V_s と R_{L10} の直接的関係を示している。 V_s が大きくなるにつれて R_{L10} が増加傾向にある。また、今回得られた結果は図中に破線で示す既往の研究³⁴⁾で提案されたカーブと類似の傾向を示した。同じ F_c について比較すると、 $C_c=0\%$ が0.5%になり固結作用が現れると $F_c=0, 5, 10, 20\%$ についてそれぞれ図中の直線のような変化が現れ、変化割合は F_c が大きいくほど大きくなる。しかも、すべてのプロットが狭い帯の範囲に含まれることが分かる。今後さらにデータを追加する必要はあるが、これより、一種類の土については F_c の大小に関わらず R_L に与える固結効果(年代効果)を、 $V_s \sim R_L$ 関係を使って概略評価できる可能性が示された。

4. まとめ

- 1) D_r 一定下では細粒分含有率 F_c の増加により繰返し応力比 R_{L10} とせん断波速度 V_s は共に低下する傾向があることが分かった。
- 2) セメントを添加した加速試験により、セメント含有率 C_c の増加に伴い V_s , R_{L10} は共に増加する傾向がある。また、 F_c が大きいくほど $C_c=0\%$ から0.5%とした時の V_s , R_{L10} の増加割合が大きくなることから、細粒分が多いほど、よりセメントによる固結作用が顕著になると考えられる。
- 3) 同じ F_c についての V_s と R_L の関係を $C_c=0\%$ と0.5%について比べることにより、同一の砂については年代効果による固結作用が液状化応力比 R_L に及ぼす影響を V_s の変化により評価できる可能性が示された。

【参考文献】

1) 佐藤寛明(2012): 三軸ベンダーエレメント試験による細粒分を含む砂の液状化強度とS波速度に及ぼす年代効果, 中央大学大学院理工学研究科修士論文
 2)Viggiani, G.,and Atkinson, J. H. (1995a): Interpretation of bender element tests, *Geotechnique*,45(1), 149-154 3)Kayen, R. E., Mitchell, J. K., Seed, R. B., Lodge, A., Nishio, S., and Coutinho, R. (1992): Evaluation of SPT-, CPT-, and Shear Wave-Based Methods for Liquefaction Potential Assessment Using Loma Prieta Data, *Proceedings, Fourth Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities* 4) Andrus, R.D.,and Stokoe,H.S. II (2000): Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity, *Jornal of Geotech. & Geoenviron. Eng.*, ASCE, Vol.126, No.11, 1015-1025

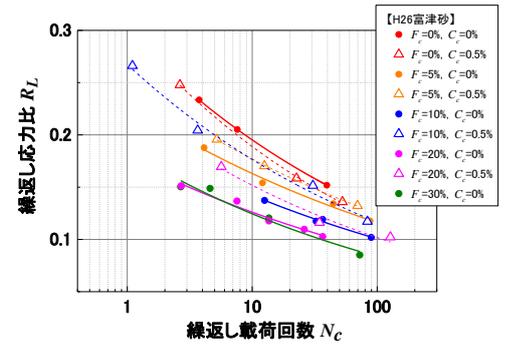


図-4 液状化強度曲線

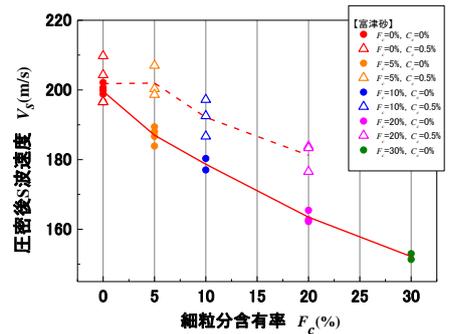


図-5 細粒分含有率と圧密後せん断波速度の関係

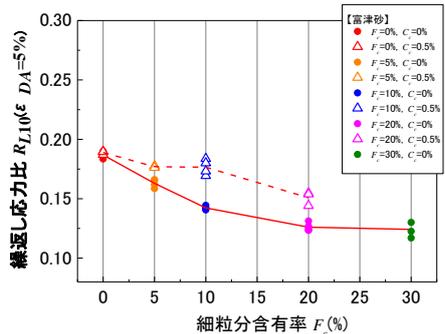


図-6 相対密度と応力比の関係

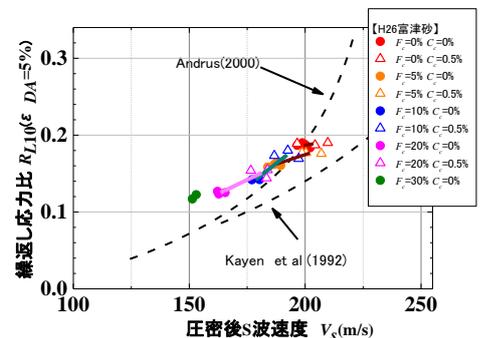


図-7 せん断波速度と応力比の関係