

原位置不攪乱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

中央大学理工学部

正会員

國生 剛治

中央大学大学院

笹岡 里衣

中央大学理工学部

学生会員 ○林 夏希

中央大学理工学部

学生会員 小枝 千尋

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いえず、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うことが出来る三軸試験機を用い、 V_s と液状化強度 R_L について検討していく。

原位置不攪乱試験(以降、原位置試験)として千葉県旭砂、稲毛砂および茨城県潮来砂の不攪乱砂とその再構成砂による三軸 BE 試験を行い、年代効果が V_s と 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⁾

表-1 および図-1 に試験試料の物理特性と粒径加積曲線を示す。

旭砂採取場所は縄文海進により形成された砂丘であり堆積年数は約 4000～5000 年と推定される。採取にはトリプルチューブサンプラーを用いた。旭砂は今回用いた原位置試料の中で細粒分含有率 F_c が最も低く、非塑性砂質土であることが特徴である。稲毛砂の採取場所は千葉県の関東ローム層であり、堆積年数は数万年と考えられる。試料の採取にはジェルプッシュサンプラーを用いた。稲毛砂は今回用いた原位置試料の中で $F_c \approx 30\%$ で最も高く、 $I_p = 9$ の細粒土を含む。潮来砂は $F_c \approx 10\%$ で放射性炭素年代測定により堆積年数 710～770 年と推定される自然堆積地盤からブロックサンプリングで採取した。試料は乾燥させないように保存し、試験直前に直径 50mm、高さ 100mm にトリミングした。

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。脱気水通水後、バックプレッシャーを 196kPa、有効拘束圧を 98kPa で等方圧密する。圧密終了後に BE 試験を行い、その直後に同一供試体で液状化試験を行う。不攪乱試料の試験後、同一試料をモールド内で WT 法により不攪乱試料と同一密度を目標に再構成試料を作成し、同じ手順で BE 試験と液状化試験を行う。

BE 試験方法は、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ダスタルの発振部 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振部 BE に到達して生じた電圧信号がオシロスコープに送られる。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する。図

表-1 物理特性

	GL (m)	不攪乱 D _{ri} (%)	再構成 D _{ri} (%)	F_c (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	ρ_{dmin} (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	w_L (%)	w_P (%)	I_p (%)	堆積年数
旭	① -6.00	67	47	3.6	2.656	1.585	1.226	1.149	0.675	25	NP	-	4000～ 5000年
	② -6.00	77	63	2.2	2.659	1.643	1.321	1.013	0.618				
	③ -6.00	57	62	5.8	2.644	1.645	1.302	1.031	0.607				
稲毛	① -6.31	28	50	32.0	2.640	1.557	1.192	1.215	0.695	30	20	9	数万年
	② -6.19	46	78	23.8	2.625	1.711	1.303	1.015	0.535				
	③ -6.43	42	74	36.2	2.659	1.564	1.189	1.237	0.700				
潮来	① -2.30	47	36	9.3	2.692	1.589	1.233	1.184	0.694	33	29	4	710～ 770年
	② -2.25	50	50		2.662	1.473	1.136	1.344	0.807				
	③ -2.25	75	67		2.658	1.433	1.099	1.418	0.855				
	④ -2.25	54	43		2.697	1.512	1.175	1.295	0.784				

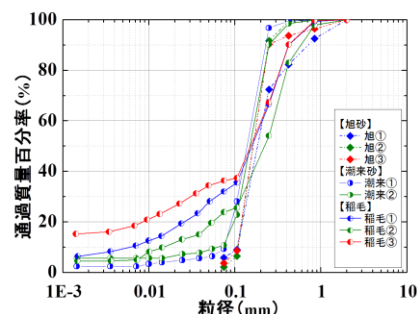


図-1 試料の粒径加積曲線

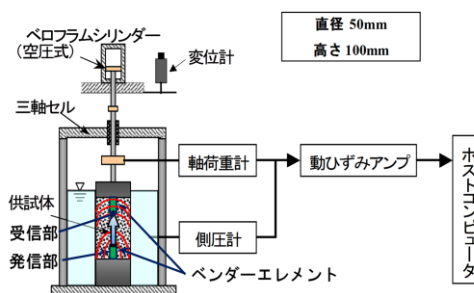


図-2 三軸試験機

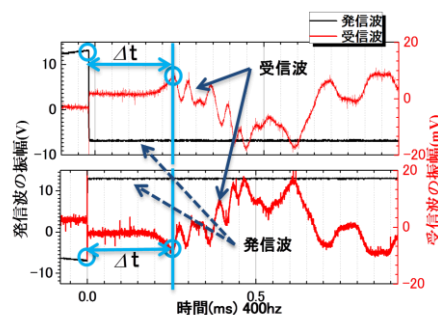


図-3 時間と発信波及び受信波の関係

キーワード せん断波速度 液状化強度 原位置不攪乱試験 年代効果

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

-3に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ていることが分かる。供試体の V_s の測定では、ファンクションジェネレーターからノコギリ波を1波発信し、受信波の振動方向の変化点までの時間差 Δt を読み取る。そして、圧密後の供試体高さ H から発信と受信 BE 素子の合計長さ $\Delta H=14\text{mm}$ を差し引いた実質伝播距離 H' を用いて、 V_s を次式により算出する²⁾。

$$H' = H - \Delta H \quad V_s = H' / \Delta t$$

測定は $f=100\text{Hz}$ および $f=300\text{Hz}$ の振動数のノコギリ波を用い振動方向を反転し2回行い、両者の平均を取ることで V_s を算出した。

液状化試験では応力振幅 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了した。

3. 試験結果

図-4は旭砂、潮来砂、稲毛砂の両振幅ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達する繰返し応力比 R_L と繰返し回数 N_c についての液状化強度曲線を示している。旭砂、潮来砂では不攪乱砂と再構成砂で強度に差はみられなかった。一方で、稲毛砂では再構成砂に比べ、不攪乱砂のほうが強度が明らかに大きい結果となった。

図-5、図-6は相対密度 D_r に対するせん断波速度 V_s 及び $N_c=10$ 回に対する液状化応力比 R_{L10} の関係を示している。不攪乱砂と再構成砂の変化割合を比較すると、いずれの砂についても D_r の変化に対して V_s の変化はばらつきが大きい、全体的には右上がりの傾向が見られる。また、 $D_r \sim R_{L10}$ 関係では多くの砂がほぼ同様な傾向を示すが、不攪乱稲毛砂のみが D_r が小さいにも関わらず非常に大きな R_{L10} を示す。

図-7は V_s と R_{L10} の直接的関係を示している。不攪乱砂、再構成砂ともに破線による既往の提案式³⁾⁴⁾と近い位置にプロットされている。不攪乱砂と再構成砂を比較すると、 V_s 、 R_{L10} ともに大きな差がみられず、 F_c が低く堆積年数数百年～数千年では年代効果が発現しなかったと考えられる。一方、稲毛砂の不攪乱砂と再構成砂を比較すると、 V_s 、 R_{L10} ともに大きな差がみられた。特に、 R_{L10} の差は顕著であり、 $I_p=9$ の細粒分が $F_c \approx 30\%$ 含まれていることにより、年代効果が発揮されやすかったためと考えられる。

4. まとめ

- 1) 堆積年代数百年～数万年の砂についての試験から、不攪乱試料と同程度の密度の再構成試料の液状化強度 R_L と S 波速度 V_s は大きな違いが現れる場合と現れない場合があることが分かった。
- 2) 細粒分が非塑性で F_c が小さい砂では数千年の堆積年数でも年代効果は発現しにくいとの結果となった。
- 3) すなわち、年代効果の発現には堆積年数だけでなく、細粒分含有率 F_c やその塑性指数 I_p が影響している可能性がある。

【謝辞】原位置試験を行うにあたり、千葉エンジニアリング株式会社、基礎地盤コンサルタンツ株式会社、潮来市の関係者の皆様には格別な便宜を図っていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

【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

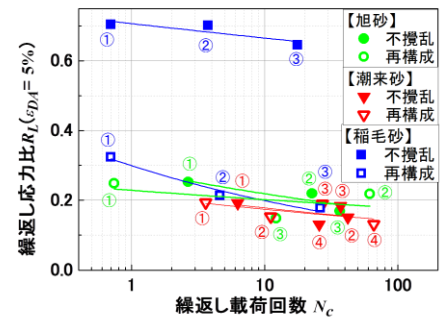


図-4 液状化強度曲線

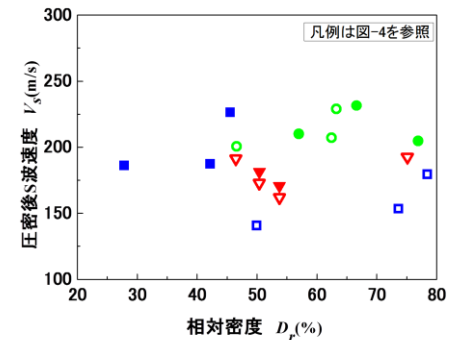


図-5 相対密度と圧密後せん断波速度の関係

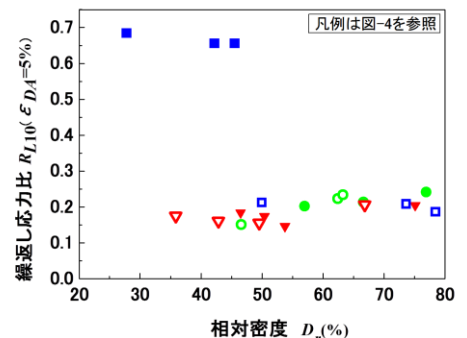


図-6 相対密度と応力比の関係

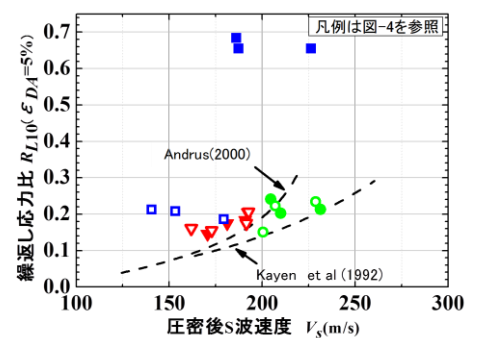


図-7 せん断波速度と応力比の関係