

細粒分含有砂の液状化強度～S波速度関係についての三軸ベンダーエレメント試験

中央大学理工学部 正会員 國生剛治
 中央大学理工学部 学生会員 ○奈佐利香子
 中央大学理工学部 佐藤寛明
 中央大学理工学部 金森大樹

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、S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、せん断波速度 V_s と液状化強度の相関関係について検討している。¹⁾ 今回は相対密度 $D_r \approx 30, 50, 70\%$ 、細粒分含有率 $F_c = 0, 5, 10, 20, 30\%$ 、飽和度 $S_r = 100\%$ の条件で2種類の砂を用いて三軸 BE 試験を行い、せん断波速度 V_s と液状化強度 R_L を測定し、各パラメータが与える影響について検討した。

2. 試験試料と試験方法

本研究に用いた試料は細粒分含有率 $F_c = 0\%$ の千葉県富津砂及び千葉県浦安砂にマサ土から取り出した細粒分を混合した土であり、図-1 に粒径加積曲線、表-1 に物理特性を示す。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、圧密後相対密度 D_r が目標値になるように、試料を5層に分けてモールド内で締め固めるドライタンピング法により作製した。脱気水通水後バックプレッシャーを 196kPa、有効拘束圧を 98kPa で等方圧密し、圧密終了後に BE 試験を行なった。

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する。液状化試験では応力振幅 σ_d 、周波数 $f = 0.05\text{Hz}$ で非排水繰返し載荷を行い、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。

図-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 S 波の受信波が得られていることが分かる。BE 試験では発信・受信部の BE は端面から 7.0mm 供試体内部まで挿し込まれており、S 波が発信・受信される2点間の実質の伝播距離をあらかじめ決めておく必要がある。千葉県富津砂を用い、BE のキャリブレーション試験を行った。その結果、 $D_r \approx 50\%$ では $\Delta H = 3.5\text{mm}$ 、 $D_r \approx 70\%$ では $\Delta H = 7.3\text{mm}$ と求められたため、今回は $D_r \approx 30, 50\%$ においては $\Delta H = 3.5\text{mm}$ 、 $D_r \approx 70\%$ においては $\Delta H = 7.3\text{mm}$ を用いデータを整理した。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を読み取る。そして、供試体の高さ H から ΔH を差し引いた補正高さ H' を用いて、せん断波 V_s を次式により算出する。

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

$f = 400\text{Hz}$ 及びその周辺の振動数のノコギリ波を振動方向を反転し2回発信し、両者の測定値の平均を取ることでせん断波速度 V_s を算出した。

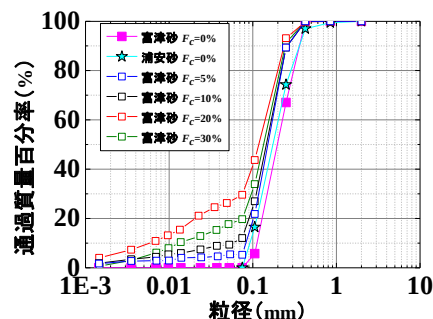


図-1 試料の粒径加積曲線

表-1 物理特性

	$F_c(\%)$	土粒子密度	最大密度	最小密度	最大間隙比	最小間隙比
富津砂	0	2.715	1.620	1.289	1.106	0.676
	5	2.723	1.655	1.268	1.147	0.645
	10	2.735	1.722	1.238	1.209	0.588
	20	2.699	1.780	1.195	1.258	0.516
	30	2.674	1.739	1.092	1.449	0.538
浦安砂	0	2.667	1.517	1.182	1.256	0.758

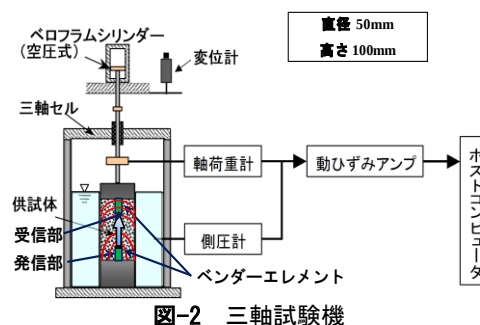


図-2 三軸試験機

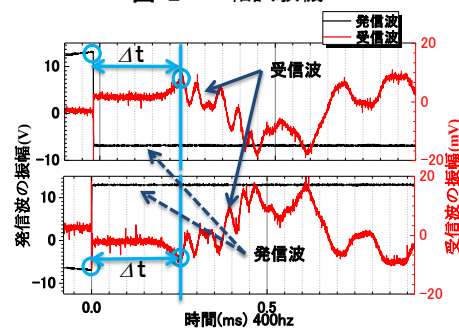


図-3 時間と発信波及び受信波の関係

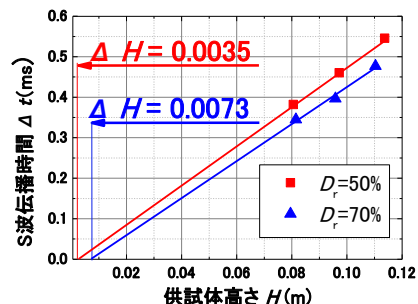


図-4 較正試験結果

キーワード 液状化 S波速度 細粒分

連絡先 〒112-0003 東京都文京区春日1丁目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. 三軸試験結果

図-5 は富津砂 ($D_r \approx 30, 50, 70\%$, $F_c = 0, 5, 10, 20, 30\%$) と浦安砂 ($D_r \approx 30, 50, 70\%$, $F_c = 0\%$) の MP 補正後の液状化強度曲線である。 $F_c = 0\%$ の富津砂と浦安砂の同程度の密度の試験結果を比較すると、浦安砂の方が強度が高い結果となった。その原因を探るため、富津砂と浦安砂の顕微鏡写真による粒子形状の分析を試みた。その結果、この粒子形状を表す凹凸係数 $FU^{(2)}$ が富津砂の方が 1.0 に近い値を示すため、丸みを帯びていることが分かった。また、富津砂の試験結果からは $F_c = 0\%$ においては、 $D_r \approx 30, 50, 70\%$ で液状化強度に大きな違いが表れるが、 F_c が増加するにつれて、 D_r による強度の違いが目立たなくなる傾向が読み取れる。

4. BE 試験結果

図-6 は富津砂 ($D_r \approx 30, 50, 70\%$, $F_c = 0, 5, 10, 20, 30\%$) と浦安砂 ($D_r \approx 30, 50, 70\%$, $F_c = 0\%$) の繰返し载荷回数 $N_c = 10$ 回の際の応力比 R_{L10} ならびに圧密後せん断波速度 V_s の相対密度 D_r に対する関係を示す。 R_{L10} と V_s は共に D_r が高くなるにつれ増加する傾向があり、特に R_{L10} は、 V_s に比べて変化量が多い。富津砂と浦安砂を比較すると、浦安砂は D_r による V_s の変化がほとんど目立たないが、富津砂は若干増加傾向が読み取れる。また、細粒分を増加させると V_s と R_{L10} は共に減少する傾向が読み取れる。 $D_r \approx 30\%$ のときは、細粒分による R_{L10} の変化はほとんど見られないが、 $D_r \approx 70\%$ のときは、細粒分が増加するにつれ R_{L10} が大幅に減少する傾向が読み取れる。

図-7 には応力比 R_{L10} と圧密後せん断波速度 V_s の直接的関係を異なる記号のプロットで示している。これらのプロットは、図中に描いた他の研究者による既往の提案カーブ（破線）と、類似した傾向を示すことが確認できる。（塗りつぶし記号で表す） $F_c = 0\%$ の富津砂と浦安砂を比較すると、両者共に V_s の変化幅に比べて R_{L10} の変化幅が大きいこと、さらに砂により両者の相関関係が異なることが分かる。また、富津砂に細粒分を加えていくと（白抜きに十記号で表す）、 V_s と R_{L10} が共に低下傾向を示すが、 $F_c = 0\%$ で D_r が変化する場合は 2 本の実線カーブで示すとおり変化傾向が異なる。つまり、細粒分の有無による骨格構造の変化が $V_s \sim R_{L10}$ 関係を変化させる可能性が示された。

5. まとめ

今回行った BE 試験と三軸液状化試験から、以下の知見が得られた。

- 1) 応力比 R_{L10} 、せん断波速度 V_s 共に D_r が高くなるにつれ増加する傾向があり、特に応力比 R_{L10} は、せん断波速度 V_s に比べて変化割合が大きい。つまり、 V_s 値は液状化判定のための敏感なパラメータとは言えない
- 2) $F_c = 0\%$ の $V_s \sim R_{L10}$ 関係は、砂により異なる傾向を示す。つまり、 $V_s \sim R_{L10}$ 関係は普遍的なものではなく、個別の砂に特有なものであると考えられる。
- 3) 同じ D_r で F_c を増加させるほど、 R_{L10} 、 V_s 共に減少する。 $F_c = 0\%$ で D_r を変化した場合と、 $D_r \approx 30 \sim 70\%$ で $F_c = 5 \sim 30\%$ まで増加させた場合では、 $V_s \sim R_{L10}$ 関係は一致せず異なる傾向を示す。すなわち、 $V_s \sim R_{L10}$ 関係は砂の粒子構造により異なる可能性がある。

【参考文献】

- 1) 國生剛治, 佐藤寛明, 金森大樹: 原位置採取砂の三軸ベンダーエレメント試験による液状化強度～S 波速度の関係に与える年代効果, 地盤工学研究発表会 No.808, 2012
- 2) 吉村優治, 小川正二: 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法, 土木学会論文集 No.463/III-22, 95-103, 1993

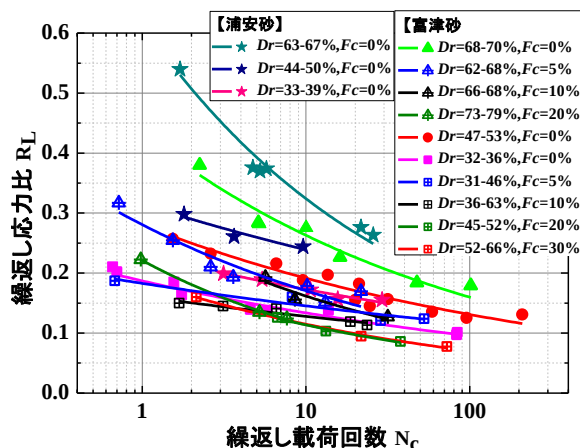


図-5 液状化強度曲線

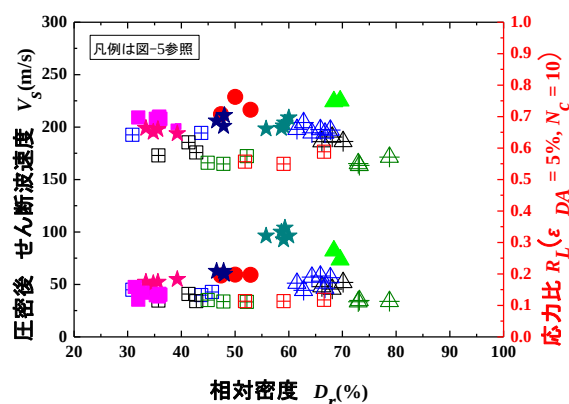


図-6 相対密度とせん断波速度及び応力比の関係

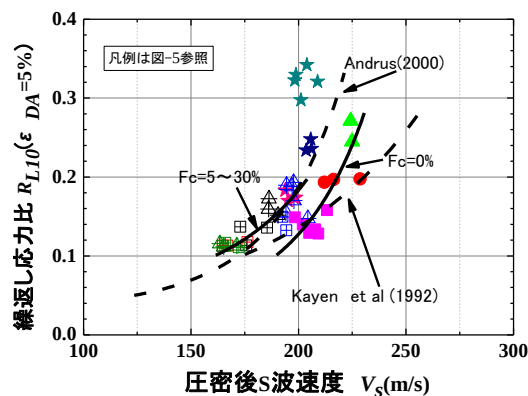


図-7 せん断波速度と応力比の関係