

# 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

Aging effect on liquefaction strength versus S-wave velocity relationship for sand containing fines by triaxial bender element tests

土木工学専攻 18 号 佐藤寛明

Hiroaki SATO

## 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。一方、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  $R_L$  の相関関係について検討している。まず基礎的試験として相対密度  $D_r=30$ 、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、以前の試験結果との整合性、及び各パラメータが与える影響について検討した。また堆積年代が既知の原位置不攪乱試料のせん断波速度  $V_s$  と液状化強度  $R_L$  を測定し、さらに、原位置密度に調整した再構成試料との比較により、年代効果が砂のせん断波速度  $V_s$  と液状化強度  $R_L$  に与える影響について検討した。

## 2. 試料

基礎的試験に用いた千葉県富津砂と千葉県浦安砂の粒径加積曲線を図-1 に、物理特性を表-1 に示す。

原位置不攪乱試料は埼玉県久喜市菖蒲町台地先の「加須低地」と呼ばれる沖積低地 GL-5.35~6.90m 間で採取した。表-2 に原位置採取試料の物理特性を示すが、低塑性細粒分を大量に含んでいることが分かる。この地点は、N 値が 2~5 を示す砂質シルトであり、その堆積年代は約 2000 年前と推察される<sup>1)2)</sup>。内径 70~80mm、高さ 120mm の塩ビチューブの先端にテーパをつけ、チューブ先端の砂を掻き出しながら、木ヅチによる軽い圧入により地盤中に水準計を使ってなるべく鉛直に押し込むことによりブロックサンプリングをした。

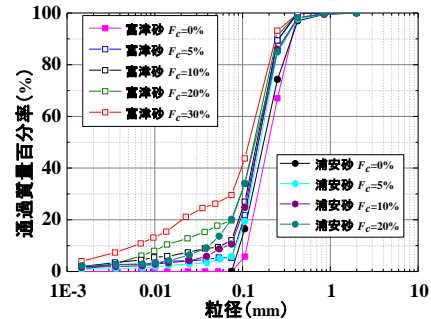


図-1 試料の粒径加積曲線

表-1 物理特性 (富津砂・浦安砂)

	$F_c$ (%)	$\rho_s$	$\rho_{dmax}$	$\rho_{dmin}$	$e_{max}$	$e_{min}$
		( $g/cm^3$ )	( $g/cm^3$ )	( $g/cm^3$ )		
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	1.521	1.186	1.249	0.753
	5	2.694	1.553	1.236	1.180	0.735
	10	2.701	1.623	1.262	1.140	0.664
	20	2.665	1.629	1.232	1.163	0.636

表-2 物理特性 (原位置採取試料)

	$\rho_s$	$\rho_{dmax}$	$\rho_{dmin}$	$e_{max}$	$e_{min}$	$D_r$ (%)	$F_c$ (%)	$w_L$ (%)	$w_p$ (%)	$I_p$
	( $g/cm^3$ )	( $g/cm^3$ )	( $g/cm^3$ )							
久喜①	2.605	1.118	0.840	2.102	1.330	76	64			
久喜②	2.573	1.082	0.803	2.203	1.379	58	45	48	41	7
久喜③	2.614	1.188	0.880	1.970	1.200	52	63			

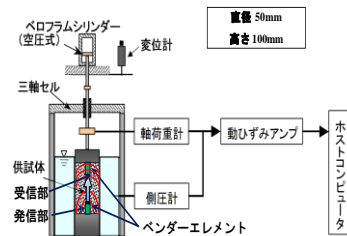


図-2 三軸試験機

## 3. 試験方法

試験には BE 試験と液状化試験が同時に行える図-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。基礎的試験では圧密後相対密度  $D_r$  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固めるドライタンピング法により作製した。一方、原位置試料を用いた試験では、まず採取した原位置不攪乱試料をトリマーとマイターボックスで直径 50mm、高さ 100mm の供試体に成形した。その後、あらかじめ供試体の底面に同じ形状の穴をあけてから BE の付いたペダスタル上にセットし、上から BE 付きのキャップ

プを押し込んだ。また再構成試料については、試験が終わった不攪乱試料を炉乾燥させ、原位置密度になるように、試料を5層に分けてモールド内でウェットタンピング法により供試体を作製した。脱気水を通水してからその後、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、液状化試験直後、及び液状化排水後（再圧密後）の3回にわたりBE試験により $V_s$ の計測を行った。

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・受信電圧波形を圧密後、再圧密後は1MHz、液状化試験直後は500kHzでサンプリングし、デジタルデータとしてパソコンに集録する。

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。そのため、千葉県富津砂を用い、直径50mm、高さ110、100、80mmの3つの高さの供試体を作製し、98kPaの有効応力で等方圧密してBEのキャリブレーション試験を行った。3点から最小自乗法による近似曲線を引き、縦軸のS波伝播時間がゼロとなる横軸座標を読み取り $D_r=50\%$ では $\Delta H=3.5\text{mm}$ 、 $D_r=70\%$ では $\Delta H=7.3\text{mm}$ と求められた。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、受信波の初動までの時間差を読み取る。そして、供試体の高さ $H$ から $\Delta H$ 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。

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

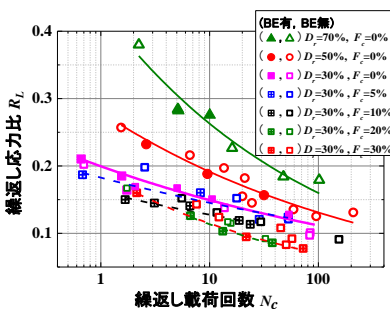


図-3 室内調整試料の液状化強度曲線 (富津砂)

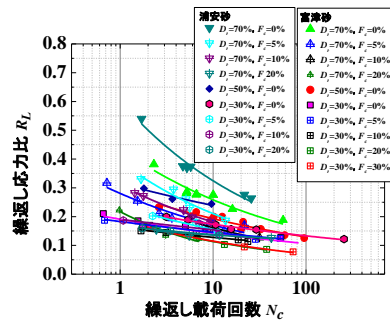


図-4 室内調整試料の液状化強度曲線 (富津砂・浦安砂)

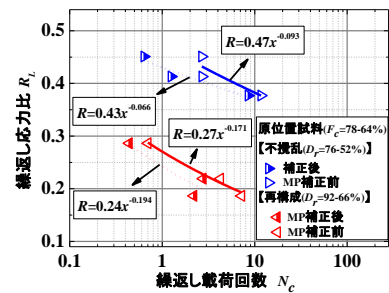


図-5 原位置不攪乱試料と再構成試料の液状化強度曲線

測定は $f=400\text{Hz}$ 近辺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とせん断波速度 $V_s$ を算出した。

液状化試験では一定応力振幅 $\sigma_d$ 、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 $\epsilon_{DA}$ が10%以上に達した時点で試験を終了した。

#### 4. 三軸液状化試験結果

図-3は富津砂( $D_r=30, 50, 70\%$ ,  $F_c=0, 5, 10, 20, 30\%$ )の両振幅ひずみ $\epsilon_{DA}=5\%$ に達する応力比 $R_L$ と繰返し回数 $N_c$ についてのMP補正<sup>3)</sup>後の液状化強度曲線である。BEの有無により応力比 $R_L$ はほとんど影響を受けないことが分かる。

図-4は富津砂( $D_r=30, 50, 70\%$ ,  $F_c=0, 5, 10, 20, 30\%$ )と浦安砂( $D_r=30, 50, 70\%$ ,  $F_c=0, 5, 10, 20\%$ )のMP補正後の液状化強度曲線である。 $F_c=0\%$ で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、浦安砂の方は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 $FU$ <sup>4)</sup>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、富津砂及び浦安砂の試験結果からは $F_c=0\%$ においては、 $D_r=30, 50, 70\%$ 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。

図-5は原位置不攪乱試料の同様な関係を示している。この図から再構成試料の液状化強度に比べ不攪乱試料の液状化強度ははるかに大きいことが明確に分かる。

## 5. BEによるせん断波速度 $V_s$ と液状化強度 $R_L$ の関係

図-6は富津砂 ( $D_r \cong 30, 50, 70\%$ ,  $F_c = 0, 5, 10, 20, 30\%$ ) と浦安砂 ( $D_r \cong 30, 50, 70\%$ ,  $F_c = 0, 5, 10, 20\%$ ) 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、 $V_s$  にくらべて変化量が大きい。富津砂と浦安砂を比較すると、 $F_c = 0$  の場合の近似曲線<sup>5)</sup>に示すとおり浦安砂は  $D_r$  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。 $D_r \cong 30\%$  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  $D_r \cong 70\%$  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は富津砂 ( $D_r \cong 30, 50, 70\%$ ,  $F_c = 0, 5, 10, 20, 30\%$ ) と浦安砂 ( $D_r \cong 30, 50, 70\%$ ,  $F_c = 0, 5, 10, 20\%$ ) の応力比  $R_{L10}$  ならびに圧密後せん断波速度  $V_s$  の細粒分含有率  $F_c$  に対する関係を示す。 $V_s$  は  $F_c$  が高くなるにつれ相対密度  $D_r$  によらず減少する傾向があり、 $F_c = 20\%$  以上になると変化はほとんど目立たなくなる。一方、 $R_{L10}$  では  $D_r \cong 70\%$  のときは  $V_s$  と同様な傾向を示しているが  $D_r \cong 30\%$  では矢印に示すように  $F_c$  による変化があまり見られないことがわかる。

図-8は原位置不攪乱試料と再構成試料の応力比  $R_{L10}$  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。原位置採取不攪乱試料と再構成試料を比べると  $R_{L10}$ 、 $V_s$  共に低下しているが、特に  $R_{L10}$  の低下が著しく、不攪乱と再構成の違いは  $V_s$  より  $R_L$  に大きく表れることが分かる。また、今回の相対密度の範囲 ( $D_r = 50 \sim 90\%$ ) においては再構成試料の  $R_L$ 、 $V_s$  は共に  $D_r$  によらずほぼ一定値を示す結果が得られた。

図-9は原位置不攪乱試料と再構成試料の応力比  $R_{L10}$  ならびに圧密後せん断波速度  $V_s$  の細粒分含有率  $F_c$  に対する関係を示す。原位置採取不攪乱試料と再構成試料を比べると  $R_{L10}$ 、 $V_s$  共に低下しており、特に  $R_{L10}$  の低下が著しく、不攪乱と再構成の違いは  $V_s$  より  $R_L$  に大きく表れることが分かる。細粒分含有率の範囲 ( $F_c = 60 \sim 80\%$ ) においては不攪乱試料と再構成試料では  $R_{L10}$ 、 $V_s$  は共に  $F_c$  によらずほぼ一定値を示す結果が

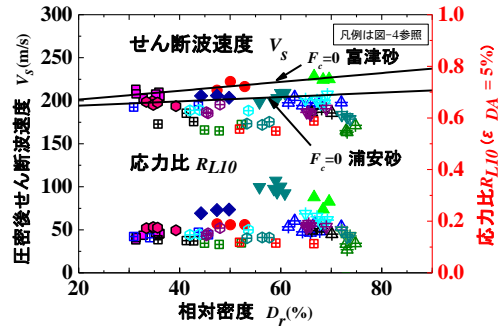


図-6 室内調整試料の相対密度とせん断波速度及び応力比の関係

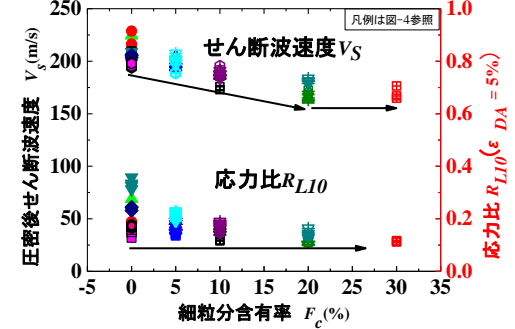


図-7 室内調整試料の細粒分含有率とせん断波速度及び応力比の関係

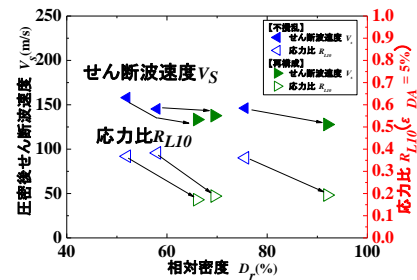


図-8 原位置不攪乱試料と再構成試料の相対密度とせん断波速度及び応力比の関係

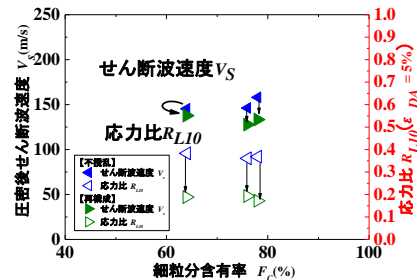


図-9 原位置不攪乱試料と再構成試料の細粒分含有率とせん断波速度及び応力比の関係

得られた。

図-10に富津砂、図-11に浦安砂の応力比  $R_{L10}$  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す。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、類似的な傾向を示すことが確認できる。 $F_c = 0\%$  (塗りつぶし記号で表す) 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 $D_r$ が変化する場合とは2本の実線カーブで示すとおり変化傾向が異なる。一方、浦安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 $R_{L10}$ は富津砂と同様な低下傾向を示すが、 $F_c=0\%$ で $D_r$ が変化する場合と細粒分を加えた場合とでは富津砂とは異なり、1本の実線カーブで示せる可能性がある。つまり、細粒分の有無による骨格構造の変化、また砂による粒子形状の違いが $V_s \sim R_{L10}$ 関係を変化させる可能性が示された。

両図にある大きな星印は原位置不攪乱採取試料とそれを攪乱してから同じ密度に詰め直した再構成試料の試験から得られたそれぞれの結果の平均値を表わしている。この結果から、 $R_{L10} \sim V_s$ 関係において原位置採取不攪乱試料は再構成試料に比べて $R_{L10}$ 、 $V_s$ 共に大きく、図の上方にプロットされている。これは、年代効果を受けた砂の特性と考えられるが、今後、さらに多地点での採取試料によりデータを強化し確認していく必要がある。

## 6. 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). 富津砂、浦安砂の室内調整試料の試験から、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). 富津砂、浦安砂の室内調整試料の試験から、せん断波速度 $V_s$ は同じ $D_r$ で細粒分含有率 $F_c$ が高くなると減少する傾向があり、 $F_c=20\%$ 以上になると変化はほとんど目立たなくなる。一方、応力比 $R_{L10}$ では $D_r=70\%$ で細粒分含有率 $F_c$ を増加させると $V_s$ と同様な傾向を示すが $D_r=30\%$ では $F_c$ による変化があまり見られず一定な値となる。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。
- 3).  $F_c=0\%$ での $V_s \sim R_{L10}$ 関係は、砂により異なる傾向

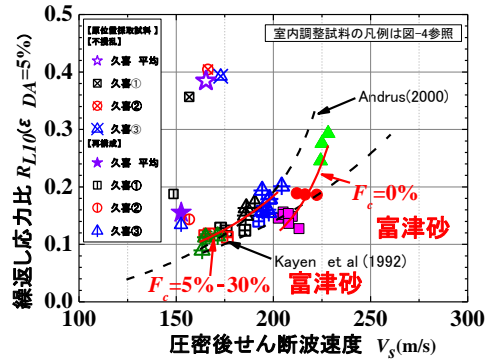


図-10 せん断波速度及び応力比の関係（富津砂と原位置試料）

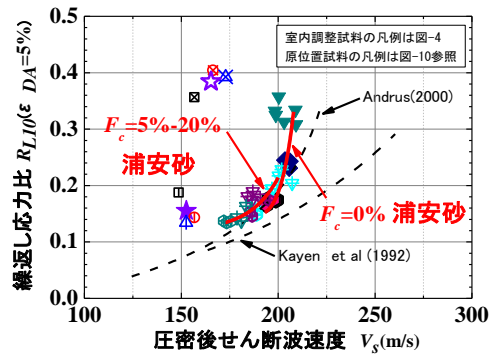


図-11 せん断波速度及び応力比の関係（浦安砂と原位置試料）

を示す。また富津砂と浦安砂では細粒分を加えると変化傾向が異なり、 $V_s \sim R_{L10}$ 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。

- 4). 約2000年前に堆積した低塑性の不攪乱試料の試験から、攪乱試料に比べて不攪乱試料の液状化強度曲線 $R_{L10}$ とS波速度 $V_s$ は明らかに大きく、特に $R_{L10}$ の違いは大きいことがわかった。したがって $V_s$ をパラメータとして原位置液状化強度に及ぼす年代効果を評価できる可能性があるが、今後さらなるデータの集積が必要である。

**参考文献：** 1) 石原武志 須貝俊彦：荒川低地上流域とその周辺地域における更新世末期以降の地形発達史 2) 中西利典、田辺晋、木村克己、中島礼、内山美恵子、柴田康之：埼玉県三郷市彦成地区の沖積層コア (GS-MHI-1) の堆積相・珪藻化石群集組織・物性・放射性炭素年代値 3) 國生剛治、鈴木雄飛：砂の液状化強度とコーン貫入抵抗の関係における有効拘束圧の影響、土木学会論文集 4) 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 No. 463/III-22, 95-103, 1993 5) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972): Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98 (SM6), 609-624