

(III-32) 液状化試験における砂のせん断波速度特性 — 有効鉛直応力および有効水平応力の影響 —

山梨大学工学部 学生会員 松枝 修平

山梨大学工学部 正 会 員 後藤 聡

1. はじめに 地盤中のせん断波の伝播速度は、波の伝播方向および振動方向の応力に依存し、その他の応力の方向の影響は受けないと確認されている¹⁾。つまり、地盤中のせん断波速度は経験的に次式で示される。

$$V_s = A \sqrt{f(e)} \left(\frac{\sigma_v'}{p_a} \right)^n \left(\frac{\sigma_h'}{p_a} \right)^m \quad (1)$$

A : 材料定数, $f(e)$: 間隙比の関数
 n, m : 定数
 p_a : 基準応力(100kPa)

一方、繰返し非排水三軸試験における砂の液状化時のせん断波伝播速度は、供試体の応力状態に依存することが確認されている²⁾。本研究では、上式(1)を用いて、砂の液状化時のせん断波速度と三軸供試体に作用する有効水平応力および有効鉛直応力の関係を実験的に求めた。その結果、液状化時においてもせん断波の伝播速度は上式(1)で表現できることが確かめられたので、ここに報告する。

2. 実験方法および実験条件 本研究では、平均粒径 $D_{50}=0.113\text{mm}$ 、土粒子の密度 $\rho_s=2.64\text{g/cm}^3$ の豊浦標準砂を用いた。また、表-1 に各試験の実験条件を示す。試験方法は、空中落下法により高さ/直径が 120/60mm の供試体を作成し、飽和度を確認した後、有効拘束圧 $\sigma_c'=10\sim 100\text{kPa}$ の範囲で載荷、除荷および再載荷の等方圧密試験を行った。また、液状化試験後に供試体中の間隙水を排水し、供試体の有効応力を回復させる、有効応力回復試験を行った。せん断波の発振および受振には、ベンダーエレメント(BE)を用いた。BE は供試体中に 5mm 挿入するよう三軸セルのキャップおよびペデスタルに取り付けた。また、せん断波の入力波には $\pm 10\text{V}$ 、 5kHz の正弦波を用いた。本研究では、等方圧密過程、液状化試験時および液状化試験後の有効応力回復過程におけるせん断波速度をそれぞれ測定した。図-1 に、No.1 の $e\text{-}\log\sigma_c'$ 曲線を示す。図中の□、◇ および△は、せん断波速度の測定点を示す。また、液状化試験時には、供試体の等方応力状態(軸差応力 $q=0$)、圧縮応力状態($q=q_{\max}$, $q>0$)および伸張応力状態($q=q_{\min}$, $q<0$)の時にせん断波速度をそれぞれ測定した。

3. 試験結果および考察 以下に、実験結果および考察を示す。

①等方圧密過程のせん断波速度 等方応力状態の供試体のせん断波速度は、式(1)と同様に経験的に、式(2)のように示さ

$$V_s = A_c \sqrt{f(e)} \left(\frac{\sigma_c'}{p_a} \right)^{n_c} \quad (2)$$

A_c : 等方圧密時の材料定数
 n_c : 等方圧密時の定数

れる¹⁾。なお、本研究で用いた間隙比の関数は、 $f(e)=(2.17-e)^2/(1+e)$ である³⁾。図-2 に、供試体密度の補正をした、等方圧密過程のせん断波速度 $V_s/\sqrt{f(e)}$ と基準応力で無次元化した有効拘束圧 σ_c'/p_a の関係を示す。図-2 より、式(2)の A_c, n_c を求めた。表-2 に図-2 より求めた定数 A_c および n_c と、同様にして求めた有効応力回復過程の定数 A_{PL} および n_{PL} をそれぞれ示す。なお、添え字 C (Consolidation)および PL (Post Liquefaction)は等方圧密過程および有効応力回復過程をそれぞれ示す。表-2 より、等方圧密過程では定数 A_c および n_c は実験ケースによらずほぼ等しいことがわかる。

表-1 実験条件

試験番号	間隙比 e_0	相対密度 D_r	初期有効拘束圧 $\sigma_{c0}'(\text{kPa})$
No.1	0.685	76.3	98.1
No.2	0.805	43.3	98.1
No.3	0.667	83.3	100

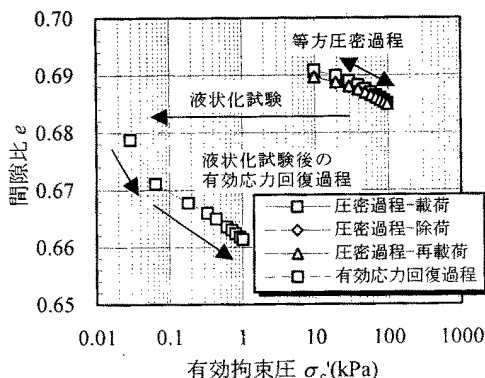


図-1 $e\text{-}\log\sigma_c'$ 曲線

せん断波速度、液状化試験、ベンダーエレメント、砂質土、密度、初期有効拘束圧

〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11 E-mail: goto@ccn.yamanashi.ac.jp

表-2 等方圧密および液状化試験時の諸定数

試験番号	試験過程							
	等方圧密過程		液状化試験				有効応力回復過程	
	A_c	n_c	A_L	k_L	n_L	m_L	A_{PL}	n_{PL}
No.1	191	0.246	227	0.5	0.164	0.082	170	0.299
No.2	197	0.253	192	0.5	0.169	0.084	193	0.218
No.3	196	0.246	247	0.5	0.164	0.082	191	0.347

②液状化試験時のせん断波速度 等方応力状態において、式(1)と式(2)を比較すると、 $n+m=n_c$ が成り立つ。また、 n および m を $k=m/n$ で表すと、定数 n および m は、定数 n_c および k を用いて、式(3)および式(4)でそれぞれ表現できる。

$$n = \frac{1}{1+k} n_c \quad (3), \quad m = \frac{k}{1+k} n_c \quad (4)$$

このとき、式(1)の n および m を上式(3)および式(4)でそれぞれ表し、液状化時にも式(1)が成り立つと仮定すると、液状化試験中のせん断波速度 V_{sL} は、次式(5)のように表現できる。なお、添え字 L (Liquefaction) は液状化試験時を意味する。

$$V_{sL} = A_L \sqrt{f(e)} \left(\frac{\sigma_v'}{p_a} \right)^{\frac{1}{1+k_L} n_c} \left(\frac{\sigma_h'}{p_a} \right)^{\frac{k_L}{1+k_L} n_c} \quad (5)$$

表-2 に、定数 k_L および n_c と式(3)および式(4)を用いて、 n_L および m_L を計算した結果を示す。なお、 k は文献 4) より概ね 0.5-1.0 であると推定でき、本研究では $k_L=0.5$ を用いた。

図-3 および図-4 に、No.1 における液状化試験時の $V_s/\sqrt{f(e)}$ と p'/p_a および全試験ケースにおける $V_s/\sqrt{f(e)}$ と $(\sigma_v'/p_a)^{n_L} (\sigma_h'/p_a)^{m_L}$ の関係をそれぞれ示す。図-3 より、文献 2) で確認されるように、供試体伸張応力状態 ($\rightarrow$) は、供試体等方応力状態および圧縮応力状態 ($\rightarrow$) と傾向が異なることがわかる。つまり、供試体応力状態の影響がみられる。この傾向は、No.2 および No.3 でも確認された。一方、図-4 では、せん断波速度に与える供試体応力状態の影響がほとんど見られない。以上から、液状化試験時のせん断波速度は、式(5)を用いることで、供試体の応力状態に関係なくほぼ一意的に表現できる。

4. まとめ 本研究で行った液状化試験時のせん断波速度の測定から、①土の有効応力が大きく変化するような液状化時においても、式(1)が適用できることがわかった。また、②液状化試験時の有効鉛直応力および有効水平応力の乗数 n_L , m_L は、式(5)のように、等方圧密過程から推定することが可能であるとわかった。

参考文献 1) Roesler, S. K. (1979) : Anisotropic Shear Modulus due to Stress Anisotropy, J.SMFE., ASCE, Vol.105, No. GT7, pp.875-880. 2) 松枝修平, 後藤聡(2000) : 液状化試験中のせん断波速度の変化に関する一考察, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, 第三部門. 3) Hardin, B. O. and Richart, F.E. (1963) : Elastic Wave Velocities in Granular Soils, J. ASCE, Vol.89, No.1, pp.33-65. 4) Fioravante, V. (2000) : Anisotropy of Small Strain Stiffness of Ticino and Kenya Sands from Seismic Wave Propagation Measured in Triaxial Testing, Soil and Foundations, Vol. 40, No.4, pp.129-142.

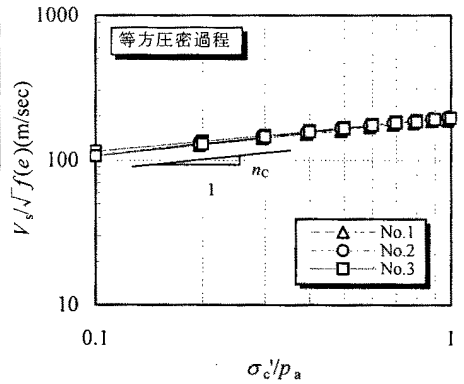


図-2 供試体密度の影響を補正した等方圧密過程のせん断波速度

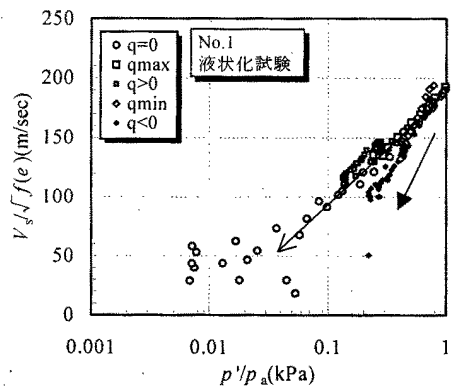


図-3 供試体密度を補正した液状化試験中のせん断波速度(No.1)

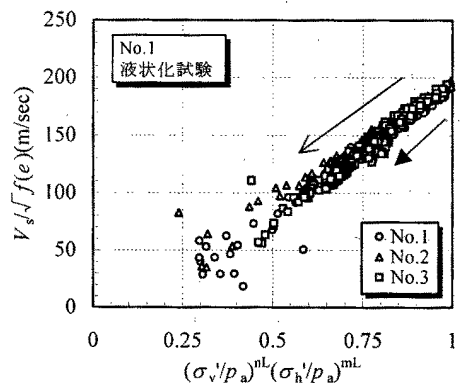


図-4 供試体密度および有効応力を補正した液状化試験時のせん断波速度