

異方応力状態でのせん断波速度に及ぼす 伝播方向と堆積方向の影響

山下聡¹・堀智仁²・鈴木輝之³

¹正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部 土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

E-mail: yamast@mail.kitami-it.ac.jp

²学生会員 北見工業大学大学院 工学研究科 土木開発工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

³フェロー会員 工博 北見工業大学教授 工学部 土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

異方応力状態でのせん断波の伝播速度に及ぼす伝播方向と供試体の堆積方向の影響を明らかにするために、水平方向に堆積した試料から供試体の軸方向が鉛直および水平方向となる堆積方向の異なる三軸供試体を作製し、異方応力状態でバンダーエレメントを用いてせん断波速度を直交する3方向から求め比較した。その結果、せん断波速度は堆積面に平行な応力よりも垂直な応力により依存する。また、異方応力状態でも鉛直および水平方向に伝播または振動する二つのせん断波速度はほぼ等しいことが明らかにされた。

Key Words : anisotropic stress, bender element test, propagating direction, sand, shear wave velocity

1. まえがき

堆積構造や応力状態の異方性により、せん断波速度 V_S または土を等方弾性体と仮定し次式で求めた初期せん断剛性率 G_{max} は、せん断波の伝播・振動方向によって異なることが知られている^{1),2),3)}。

$$G_{max} = \rho V_S^2 \quad (1)$$

ここに、 ρ は土の湿潤密度である。

既報⁴⁾で砂質土の初期剛性に及ぼす堆積構造の異方性の影響を調べるために、堆積方向の異なる三軸供試体を作製し、バンダーエレメントを用いてせん断波速度を直交する3方向から求め比較した。その結果、等方応力状態では、堆積面に対して平行に伝播・振動するせん断波から得られた初期せん断剛性 G_{PP} は、堆積面に対して垂直または平行に伝播し、平行または垂直に振動するせん断波から得られた初期せん断剛性 G_{NP} および G_{PN} よりもやや高く、また、 G_{NP} と G_{PN} は等方応力状態では等しいことが明らかにされた。なお、 G の第1, 2添え字はそれぞれ堆積面に対するせん断波の伝播方向と振動方向を表し、堆積面に垂直な方向を N 、平行な方向を P としている。

一方、異方応力状態での G_{max} はせん断波の伝播・振動方向の応力に依存し、それと垂直な方向の応力には依存しないとされており^{1),2),3)}、せん断波から求めた異方応力状態での初期せん断剛性率は、一般に次式で表される⁵⁾。

$$\frac{G_{ij}}{p_r} = S_{ij} F(e) \left(\frac{\sigma_i'}{p_r} \right)^{n_i} \left(\frac{\sigma_j'}{p_r} \right)^{n_j} \quad (2)$$

ここに、 G_{ij} は初期せん断剛性であり、 i, j はそれぞれせん断波の伝播方向、振動方向を表す。 S_{ij} は材料定数、 $F(e)$ は間隙比関数、 σ_i' はせん断波の伝播方向の有効応力、 σ_j' はせん断波の振動方向の有効応力、 p_r は基準応力、 n_i と n_j は指数定数である。

ここで、水平方向に堆積する供試体では異方応力状態においても、鉛直方向に伝播し水平方向に振動するせん断波の速度 V_{VH} と水平方向に伝播し鉛直方向に振動するせん断波の速度 V_{HV} はほぼ等しいとされている⁶⁾が、異なる堆積方向での関係は明らかにされていない。また、せん断波の伝播・振動方向に働く有効応力に対する依存性を表すパラメータ n_i と n_j の関係も、等しいと仮定する場合⁵⁾や n_i が n_j よりもやや大きいとしている場合¹⁾など、明確な結論には至っていない。

そこで本研究では、堆積方向の異なる供試体を作製し、バンダーエレメントを設置した三軸試験装置を用いて異方応力状態でせん断波速度を直交する3方向から求めることで、異方応力状態でのせん断波速度に及ぼす伝播方向と堆積方向の影響を詳細に調べた。

2. 試料と試験方法

(1) 試料と供試体作製法

用いた試料は、豊浦砂($\rho_s=2.645\text{g/cm}^3$, $e_{max}=0.966$, $e_{min}=0.608$, $D_{50}=0.18\text{mm}$, $U_c=1.69$)および北海道常呂郡端野町

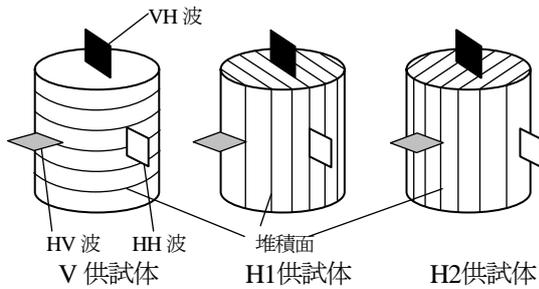


図-1 ベンダーエレメントの設置方向と堆積面の関係

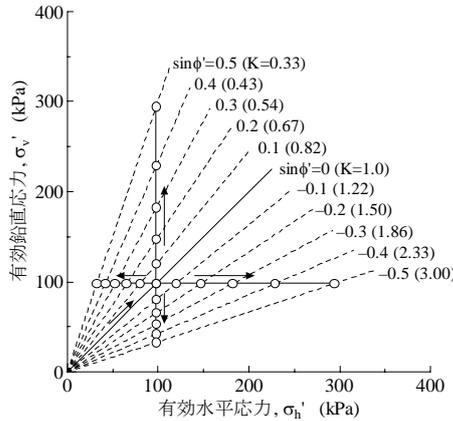


図-2 圧密時の応力経路

の土取場から採取した屈斜路火山灰(屈斜路軽石流堆積物)を粒径2 mm以上の礫分と0.075 mm以下の細粒分を除いた砂分火山灰 ($\rho_s=2.562\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=1.973$, $e_{\min}=1.253$, $D_{50}=0.48\text{mm}$, $U_c=4.46$: 以下, 屈斜路火山灰)である。

供試体の作製には2種類の方法を用いた。一つは乾燥砂を漏斗を用いてモールド内に堆積させた後、電動バイブレータで締め固める乾燥振動法(dry-vibration method: DV法)である。他方は多重ふるい落下装置(MSP)を用いてコンテナ内に試料を堆積させ、凍結後供試体を作製するMSP-F法である⁴⁾。この時、供試体軸方向が堆積面と直交するV供試体と平行なH供試体を作製した。相対密度はDV法では80%、MSP-F法では豊浦供試体は60%、屈斜路供試体は80%である。供試体寸法は高さ70mm、直径70mmである。

(2) ベンダーエレメント試験

せん断波速度は3対のベンダーエレメント(以下BEと略)を用いて図-1に示すように3種類のせん断波速度(V_{VH} , V_{HH} , V_{HV})を測定した。ここで、Vの第1, 2添え字はそれぞれせん断波の伝播方向と振動方向を表し、鉛直方向(供試体の軸方向)をV、水平方向(供試体の軸方向に直角な方向)をHとする。1対のBEは、キャップとペダスタルに埋め込まれている。他の2対は、30 kPaの負圧を与えた状態で(凍結供試体の場合は解凍後)、供試体側面に取り付けた。キャップおよびペダスタルに埋め込まれているBEは、幅10mm、長さ20mm、厚さ0.5mmの圧電セラミックスにエポキシ樹脂で厚さ0.5mmのコーティングを施した

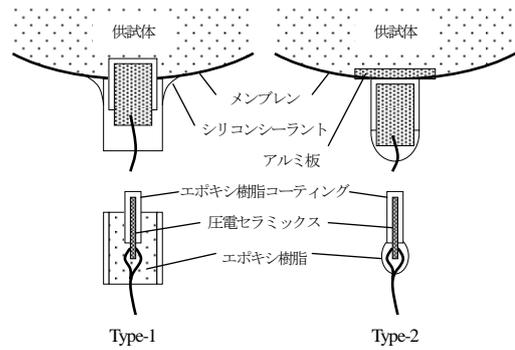


図-3 側方ベンダーエレメントの設置方法



写真-1 ベンダーエレメントの設置状況

もので、供試体への貫入量は約3mmである。また、側面に取り付けたBEは幅5mm、長さ10mm、厚さ0.5mmと同様に0.5mmのコーティングを施している。

BEを設置後、セルを組み立て、CO₂および脱気水により飽和させ、有効拘束圧 $\sigma'_c=98.1\text{kPa}$ (背圧98.1kPa)の等方応力状態から図-2に示すように有効鉛直応力 σ'_v または有効水平応力 σ'_h 一定で圧縮または伸張方向に異方圧密を $\Delta\sin\phi'=(\sigma'_v-\sigma'_h)/(\sigma'_v+\sigma'_h)=0.1$ 間隔で ± 0.5 まで行い、それぞれの段階で3方向からせん断波速度を測定した。図中には圧密時の主応力比 $K(=\sigma'_h/\sigma'_v)$ の値も示している。なお、図-1には凍結供試体での堆積面に対するBEの設置方向も示しているが、堆積面に対するBEの設置方向の違いにより2種類のH供試体がある。

ここで、BEの供試体側面への設置方法として図-3に示すType-2の方法を採用した。既報⁴⁾で用いたType-1は、供試体作製後、30kPaの負圧を与えた状態でメンブレンに小さな切れ目を入れ、BEの先端をその切れ目から挿入する方法である。しかし、この方法では貫入部に粗い材料が存在する場合など、設置が困難なこと、さらに貫入時にBE周辺部を乱す可能性がある。一方、Type-2は予めBEよりも少し大きめに穴を開け、内側から金属板(アルミ板)を接着したメンブレンを用いる。BEは、供試体作製

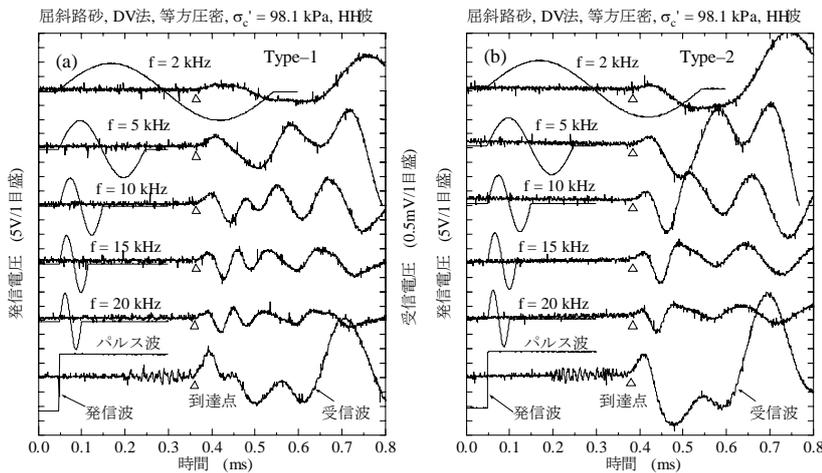


図-4 発信波形と受信波形の一例 (a)Type-1 (b)Type-2

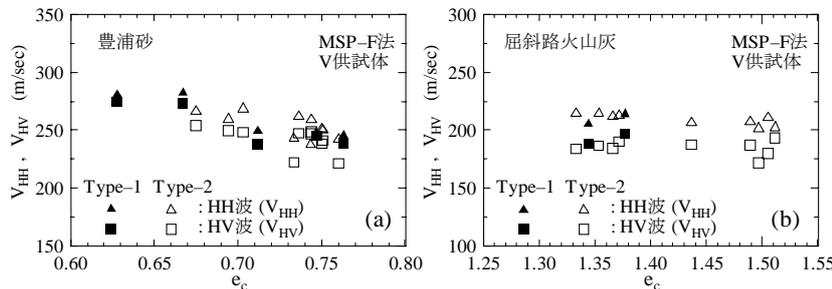


図-5 Type-1とType-2の比較 (a)豊浦砂 (b)屈斜路火山灰

後、写真-1に示すように瞬間接着剤で金属板に固定する⁷⁾。この方法では、供試体作製後に乱れを与えることがない。また、粗い材料でも試験が可能である。

供試体内を伝播するせん断波速度は、±10Vの電圧変化を発信側BEに与え、受信側BEに到達する時間を測定することで求めた。BE間を伝播するせん断波伝達有効距離は2つのBEの先端間距離とし、Type-2のBEでは金属板間距離とした。到達時刻は発信波および受信波の立ち上がり点の時間差とした。

図-4は、既報で用いたType-1と本実験でのType-2のBEで求めたHH波の発信・受信波形の一例を示したものである。発信電圧は複数の周波数による正弦波($f=2\text{kHz}\sim 20\text{kHz}$)とパルス波を与えたが、周波数が低い場合、受信波の立ち上がり点が不明確であること、パルス波ではせん断波の到達前にP波等によるノイズが発生することから、せん断波速度は読み取りが容易な発信周波数 $f=10, 15, 20\text{kHz}$ で得られた値の平均値を用いた。なお、Type-1とType-2の設置方法の違いによる受信波形の精度にほとんど差はない。また、図-5は、豊浦砂と屈斜路火山灰のV供試体を用いてType-1とType-2のBEによって等方応力状態での V_{HH} と V_{HV} を求め比較したものである。なお、図中には目標の密度が得られなかった供試体のデータも示している。Type-2においても V_{HH} は V_{HV} よりもやや高い。また、ばらつきはあるもののType-1とType-2による差は認められない。

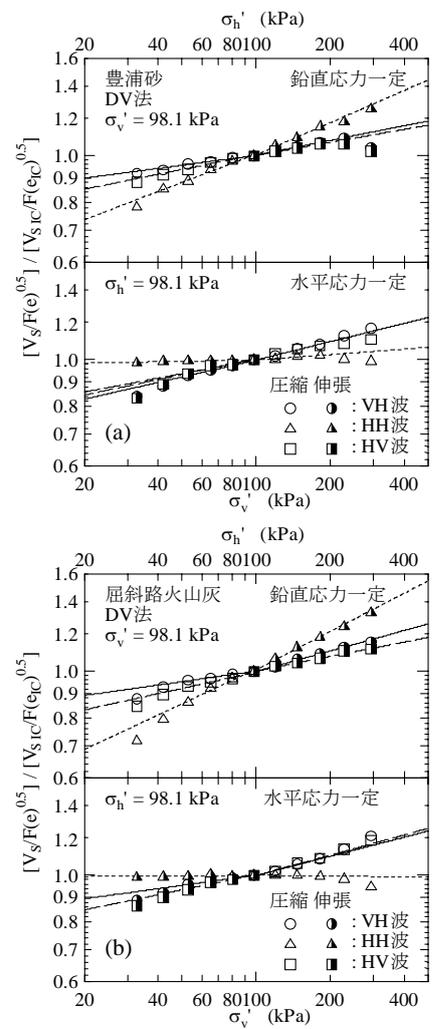


図-6 せん断波の伝播方向の影響 (DV法) (a)豊浦砂 (b)屈斜路火山灰

3. 試験結果

(1) 圧密時の異方応力の影響

図-6は、DV法で作製した豊浦および屈斜路供試体に対して、鉛直または水平応力一定で圧縮または伸張方向に異方圧密して求めた3方向のせん断波速度 V_s と水平応力 σ'_h または鉛直応力 σ'_v との関係を示したものである。なお、縦軸のせん断波速度は、データのばらつきおよび異方圧密時の密度変化の影響を除き、鉛直または水平方向の応力の変化によるせん断波速度の変化を分かりやすく示すために、それぞれの圧密段階で求めた間隙比関数 $F(e)$ の平方根で除したせん断波速度を等方応力状態での値 $[V_{s,c} F(e_c)^{0.5}]$ で正規化して示している。なお、豊浦砂と屈斜路火山灰の間隙比関数は以下の式を用いた。

$$\text{豊浦砂}^8) : F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e) \quad (4)$$

$$\text{屈斜路火山灰}^9) : F(e) = e^{-2} \quad (5)$$

図から、両試料において鉛直応力一定で水平応力を変化させ異方圧密を行った場合は、 V_{HV} および V_{HH} よりも V_{HH} の方が水平応力の変化に強く依存している。一方、

表-1 せん断波の伝播・振動方向と堆積面との関係

供試体 (MSP-F法)	VH波		HH波		HV波	
	伝播方向	振動方向	伝播方向	振動方向	伝播方向	振動方向
V供試体	垂直	平行	平行	平行	平行	垂直
H1供試体	平行	垂直	平行	垂直	垂直	平行
H2供試体	平行	平行	垂直	平行	平行	平行

表-2 主応力方向と堆積面との関係

供試体(MSP-F法)	鉛直応力	水平応力
V供試体	垂直	平行
H1供試体	平行	垂直～平行
H2供試体	平行	垂直～平行

表-3 指数定数 n_v と n_h の値

供試体 (MSP-F法)	試料	VH波		HH波		HV波	
		n_v	n_h	n_v	n_h	n_v	n_h
V供試体	豊浦	—	—	0.07	0.32	0.33	0.11
	屈斜路	0.27	0.17	0.05	0.43	0.24	0.18
H1供試体	豊浦	—	—	-0.03	0.47	0.16	0.30
	屈斜路	0.20	0.23	0.02	0.43	0.22	0.28
H2供試体	豊浦	—	—	-0.04	0.45	0.21	0.29
	屈斜路	0.26	0.26	0.02	0.48	0.25	0.24

水平応力一定で鉛直応力を変化させた場合は、 V_{VH} と V_{HV} は鉛直応力に依存しているのに対し、 V_{HH} はほとんど変化していない。このように、Roesler¹⁾が指摘したようにせん断波速度はせん断波の伝播および振動方向の応力に依存し、それと垂直な方向の応力にはほとんど依存しないことが確認された。しかし、 V_{VH} と V_{HV} は鉛直応力または水平応力の変化に対してはほぼ同様な傾向を示しているものの、水平応力よりも鉛直応力に対する依存性がやや高いようである。

(2) せん断波の伝播・振動方向と堆積面の関係

DV法で作製した供試体では、 V_{VH} と V_{HV} はほぼ等しく、また水平応力よりも鉛直応力に対する依存性がやや高くなった。しかし、本実験では供試体の上下端と側面に取付けたBEの設置方法や形状が異なっていること、供試体上下方向での密度分布が不均質になっていることも考えられるので、必ずしも明確に結論付けることは出来ない。そこで、異方応力状態でのせん断波速度に及ぼす伝播方向と堆積方向の影響をより詳細に調べるために、MSP-F法で作製した凍結ブロック試料から供試体の軸方向が堆積面に対して鉛直(V供試体)および水平(H供試体)となる堆積方向が異なる供試体を作製し、同様な試験を行った。また、表-1は各供試体でのせん断波の伝播・振動方向と堆積面との関係を、表-2は供試体に働く主応力方向(鉛直、水平応力)と堆積面との関係を示している。

なお、凍結供試体で供試体の軸方向に伝播するせん断波速度を測定する場合、供試体が凍結した状態でBEを貫

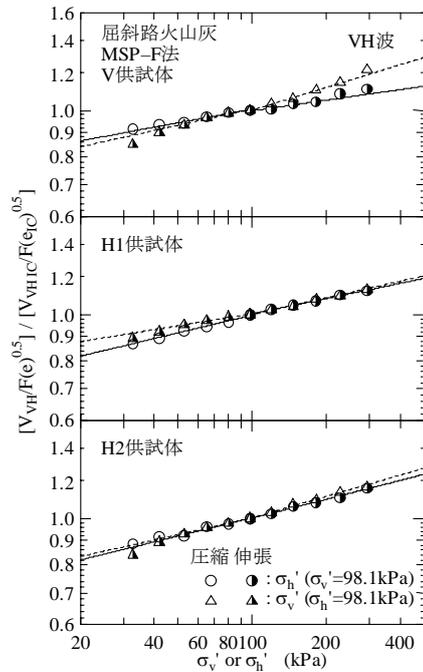


図-7 鉛直・水平応力に対する依存性 (VH波, 屈斜路火山灰)

入させるため、予めBEを埋め込むための溝を供試体の上下端に施す必要がある。凍結状態で屈斜路供試体よりも硬質であった豊浦供試体では、溝を施すことによってBE周辺での構造の乱れまたは密度の低下が大きかったためか、受信波の読み取りが困難な場合があったので、豊浦供試体では V_{HV} と V_{HH} のみを測定した。

図-7～9は、堆積方向の異なる3種の供試体に対してVH波、HV波、HH波で求めたせん断波速度と鉛直応力または水平応力との関係を図-6と同様に等方応力状態での値(V_{VHIC} , V_{HVIC} , V_{HHIC})で正規化して示したものである。図中のラインは両対数紙上でせん断波速度と水平または鉛直応力との関係がほぼ直線関係であった $-0.3 < \sin\phi' < 0.3$ ($1.86 > K > 0.54$)の範囲のデータから求めたもので、その傾きの2倍が式(2)における指数定数 n_v , n_h を表す。得られた、指数定数をまとめると表-3のようになる。なお、圧縮時と伸張時に求めた傾きがやや異なったので、平均値を示している。

図-7, 8に示した V_{VH} および V_{HV} の場合、両試料において鉛直および水平の両応力に依存しているが、V供試体では確実に水平応力よりも鉛直応力により依存し、H1供試体では逆に鉛直応力よりも水平応力に対する依存性が僅かに高いようである。また、豊浦供試体の方がその差が大きい。H2供試体では、明確な差は認められない。言い換えれば、堆積面が水平なV供試体では、せん断波速度は堆積面に平行な応力よりも垂直な応力に対する依存性が確実に高い。

一方、図-9に示した V_{HH} の場合は、DV法で作製した供試体と同様に水平応力に大きく依存しているが、鉛直応力にはほとんど依存していない。また、V供試体よりもH

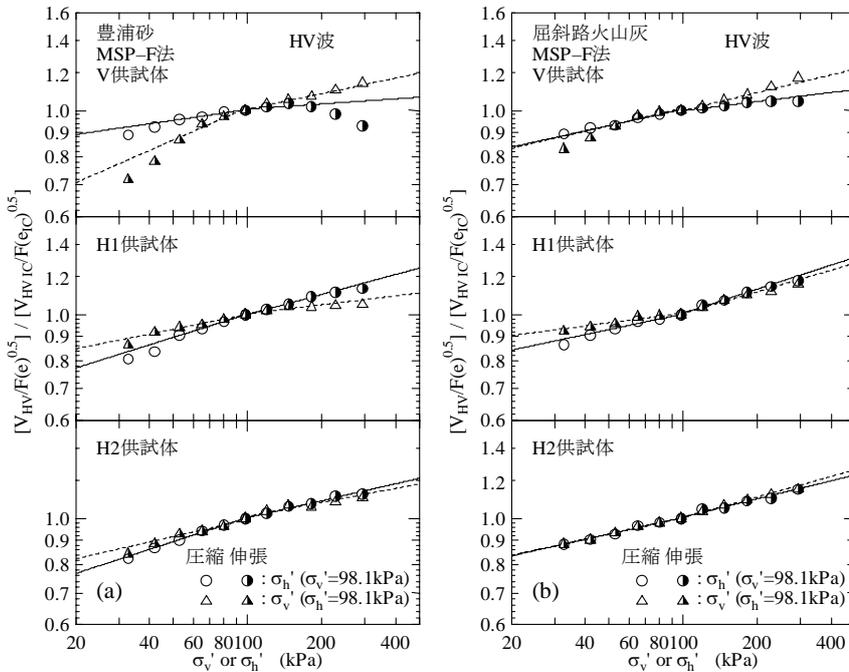


図-8 鉛直・水平応力に対する依存性 (HV波) (a)豊浦砂 (b)屈斜路火山灰

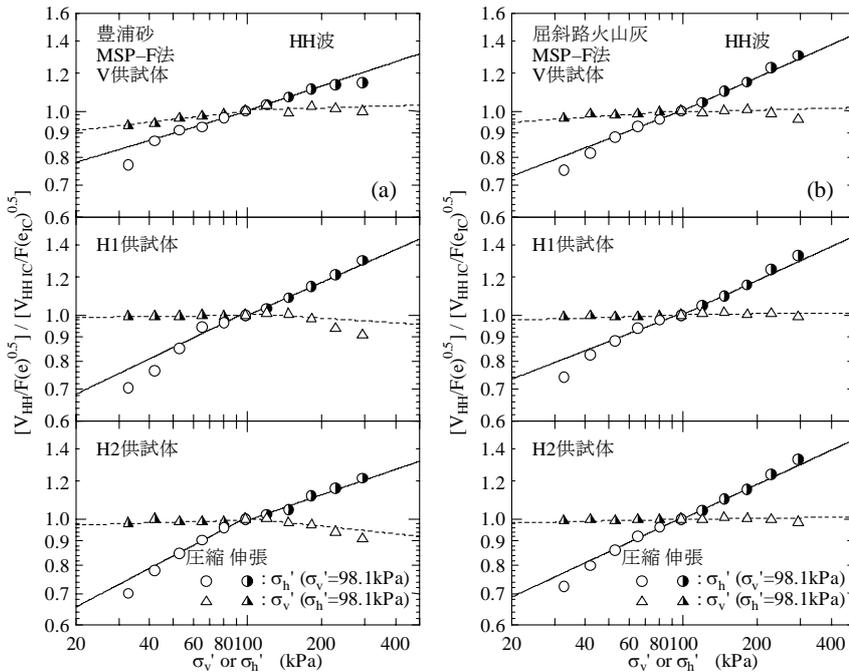


図-9 鉛直・水平応力に対する依存性 (HH波) (a)豊浦砂 (b)屈斜路火山灰

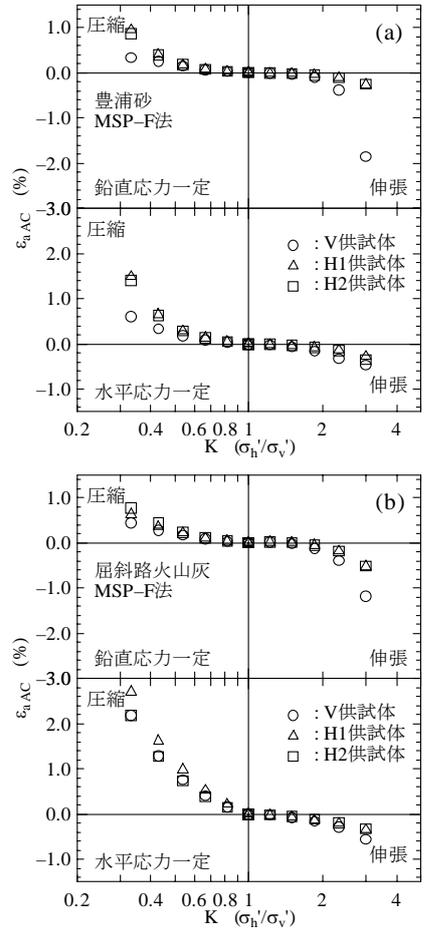


図-10 異方圧密時の軸ひずみ (a)豊浦砂 (b)屈斜路火山灰

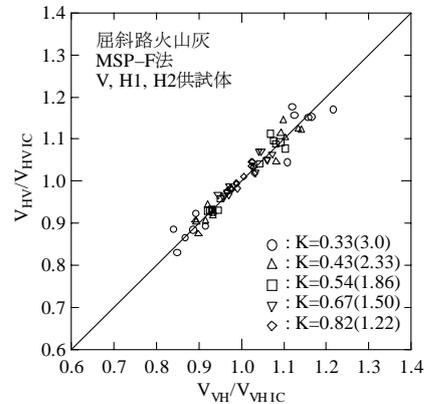


図-11 V_{VH} と V_{HV} の関係

供試体の方が水平応力に対する依存性が特に豊浦供試体においてやや高い。

ここで、せん断波の伝播・振動方向と堆積面との関係は、表-1に示したように V_H 波および V_V 波の場合、 V 供試体と $H1$ 供試体では伝播・振動方向の何れかは堆積面に対して垂直な方向である。それに対し、 $H2$ 供試体では共に平行な方向である。したがって、 V 供試体では堆積面に垂直な鉛直応力に、 $H1$ 供試体の場合も堆積面に垂直な応力が存在する水平応力に対する依存性が高いことから、せん断波速度は堆積面に対して平行な応力よりも垂

直な応力により依存するといえる。一方、 HH 波の場合は、 V 供試体は伝播・振動方向に働く応力は堆積面に対して平行な応力のみであるのに対し、 $H1$ 、 $H2$ 供試体では伝播または振動方向の応力の何れかは堆積面に対して垂直な方向となるので $H1$ 、 $H2$ 供試体の方が水平応力に対する依存性がやや高かったものである。

また、鉛直応力と水平応力に対する変化が V 供試体の方がその差が顕著であるのは、表-2に示したように V 供試体の場合、供試体上下端および周面に働く応力は堆積面に垂直または平行な応力のみであるのに対し、 H 供試

体の場合は供試体周面に働く応力は堆積面に垂直な応力から平行な応力まで変化するので、V 供試体のような顕著な違いが認められなかったと考えられる。

さらに、屈斜路火山灰よりも豊浦供試体の方が鉛直および水平応力の変化に対する相互の差が大きかったのは、異方圧密によって導入された異方性の程度の差によるものと考えられる。

図-10は、異方圧密時の主応力比 K と圧密時に発生した軸ひずみ ϵ_{AC} との関係を示している。V供試体はH供試体よりも圧縮しにくく伸張しやすい供試体であり、豊浦供試体ではV供試体とH供試体の圧密時の軸ひずみは明らかに異なるが、屈斜路供試体ではその差が少ない。したがって、異方圧密によってもたらされた誘導異方性は豊浦供試体の方が大きかったため、豊浦砂の方が鉛直応力と水平応力に対する依存性の差が大きく現れたものと考えられる。

最後に、 V_{VH} と V_{HV} の関係について、図-11は屈斜路供試体での等方応力状態でのせん断波速度で正規化した異方応力状態での V_{VH} と V_{HV} を比較したものである。図に示すように、圧密時の主応力比によらず、堆積方向が異なっても伝播・振動方向が同一面上の V_{VH} と V_{HV} はほぼ等しいことが分かる。

4. 結論

- (1) 堆積構造によらずせん断波速度は、せん断波の振動および伝播方向の応力に依存し、それと垂直な方向の応力にはほとんど依存しない。また、伝播・振動方向の応力に関しては、せん断波速度は堆積面に平行な応力よりも垂直な応力により依存する。
- (2) 異方圧密によってもたらされた誘導異方性の影響が大きい豊浦供試体の方が屈斜路供試体よりも鉛直応力と水平応力に対する依存性の差が大きい。

- (3) 異方応力状態でも伝播・振動方向が同一面上にある V_{VH} と V_{HV} は堆積構造によらず等しい。

参考文献

- 1) Roesler, S.K.: Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.105, No.7, pp.871-880, 1979.
- 2) Yu, P. and Richart, F.E.Jr.: Stress ratio effects on shear modulus of dry sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.110, No.3, pp.331-345, 1984.
- 3) Stokoe, K.H.II, Hwang, S.K., Lee, N.K.J. and Andrus, R.D.: Effect of various parameters on the stiffness and damping of soils at small to medium strains, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Netherlands, pp.785-816, 1995.
- 4) 山下 聡, 喜多川俊介, 堀 智仁, 鈴木輝之: 堆積構造と応力の異方性が砂質土の初期せん断剛性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.319-329, 2001.
- 5) Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. and Lo Presti, D.C.F.: Remarks on stiffness at small strains of six Italian clays, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*; Balkema, Netherlands, pp.817-836, 1995.
- 6) Fioravante, V. and Capoferri, R.: On the use of multi-directional piezoelectric transducers in triaxial testing, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.24, No.3, pp.243-255, 2001.
- 7) Fioravante, V.: Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.4, pp.129-142, 2000.
- 8) Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y.: Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.1, pp.39-56, 1978.
- 9) 星和則, 山下聡, 鈴木輝之: ベンダーエレメントを用いた砂と火山灰質土のせん断波速度測定, 第35回地盤工学研究発表会, pp.271-282, 2000.

(2002. 5. 7 受付)

EFFECTS OF PROPAGATING AND PLUVIATION DIRECTIONS ON SHEAR WAVE VELOCITY UNDER ANISOTROPIC STRESS CONDITION

Satoshi YAMASHITA, Tomohito HORI and Teruyuki SUZUKI

To examine the effect of the propagating directions of shear waves and the pluviation directions of specimen on the shear wave velocity of sand, the shear wave velocity in three different directions was measured by the bender element method under anisotropic stress conditions. The triaxial specimens were cut from the frozen sand blocks in the directions of vertical and horizontal. Test results showed that; 1) the shear wave velocity more depends on the normal stress than the parallel stress relative to the bedding plane, 2) the velocities of two kinds of shear waves, whose propagating or vibrating directions are vertical and horizontal directions, are almost same under anisotropic stress conditions irrespective of the fabric anisotropy.