

## 10 凍結サンプリング試料の室内試験と原位置試験による初期剛性の比較

### Comparison of initial stiffnesses obtained from in-situ and laboratory tests on freezing sampling specimens.

堀智仁\*, 山下聡\*\*, 鈴木輝之\*\*\*

Tomohito HORI, Satoshi YAMASHITA and Teruyuki SUZUKI

原位置試験と室内試験で得られた剛性を比較するうえで、室内試験での剛性の適切な測定方法や応力状態を調べるために、4地点から採取した凍結サンプリング試料と再構成試料を用いて、種々の拘束圧で等方および異方圧密した供試体に対して、ベンダーエレメント試験と繰返し三軸試験を行い、原位置試験の結果と比較した。また、試料の乱れが液状化強度および、初期剛性に及ぼす影響を調べた。その結果、原位置試験と室内試験の結果を比較すると、繰返し三軸試験による剛性は原位置試験による剛性よりも低かった。それに対し、ベンダーエレメント試験では、異方応力状態の下で求めた剛性は原位置の結果に近いことから、原位置試験と室内試験を比較して試料の乱れを評価する場合、原位置と同じ異方応力状態で求めたせん断波速度による比較が最良であることが明らかになった。

キーワード：試料の乱れ、砂質土、異方圧密、S波速度、原位置試験

Sample disturbance, Sandy soil, Anisotropic consolidation, Secondary wave velocity, In-situ test

#### 1. はじめに

サンプリングおよび室内試験に至る過程で、砂試料が乱れを受けると、室内試験結果に直接影響し、その結果を用いて設計した構造物の工費や安全性を大きく左右する。従って、採取された試料がどの程度の品質でどれくらい乱されているかを判定することは非常に重要である。

試料の乱れを評価する方法の一つとして、原位置および室内試験において測定可能であるせん断剛性を比較する方法がある。通常、室内試験では繰返し三軸試験から初期剛性を求めている。しかし、室内試験で繰返し三軸試験により初期剛性を求めた場合、メンブレン貫入やベディングエラー等のため剛性が過小に評価されることや、原位置試験ではせん断波速度から剛性を求めるため、不均質な材料では硬質部分を早くせん断波が伝播することによって剛性が過大に評価されることが指摘されている<sup>1)</sup>。また、原位置試験と室内試験では剛性の測定方法や応力状態の違いにより、原位置試験と室内試験から得られる剛性が異なる可能性がある。

そこで、本研究では、凍結サンプリング試料に対して、等方応力および異方応力状態で3方向のせん断波速度と繰返し三軸試験から剛性を求め、原位置試験の結果と比較することによって、測定方法と応力状態の違いが初期剛性に及ぼす影響を調べた。さらに、凍結サンプリング試料と再構成試料の液状化強度と初期剛性を比較し、試料の乱れが液状化強度と初期剛性に及ぼす影響を調べた。

#### 2. 試料と試験方法

##### 2.1 試料と供試体作製法

試験に用いた試料は、国内の4地点から凍結サンプリング法で採取した試料である。凍結サンプリング試料(以下、不攪乱試料と記す)は、東扇島の埋め立て地盤<sup>2)</sup>、名取川および淀川の沖積地盤<sup>3)</sup>、江戸川の洪積地盤<sup>3)</sup>から採取したものである。図-1に用いた試料の採取場所、図-2に粒度分布、表-1に物理的性質等をそれぞれ示す。

再構成供試体の作製には、漏斗を用いてモールド内に試料を堆積させたのち、電動バイブレーターで所定の密度に締め固める乾燥振動法(dry-vibration method: DV method)を用いた。供試体寸法は、直径50mm、高さ100mmである。

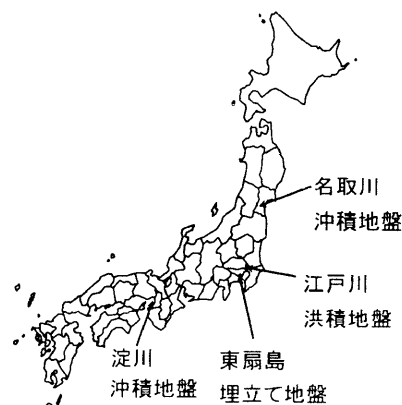


図-1 試料の採取場所

\* 北見工業大学大学院

Student, Kitami Institute of Technology

\*\* 北見工業大学工学部 助教授

Aso.Prof., Kitami Institute of Technology

\*\*\* 北見工業大学工学部 教授

Prof., Kitami Institute of Technology

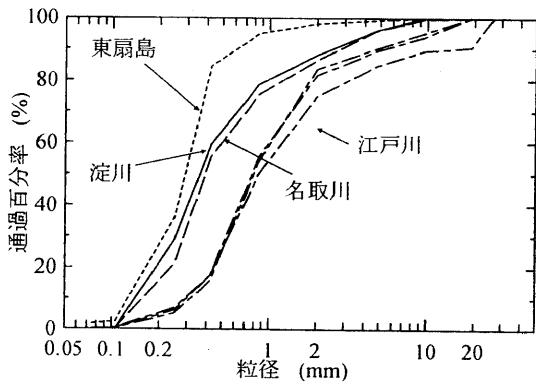


図-2 試料の粒度分布

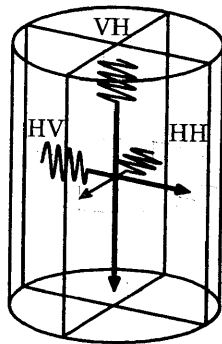


図-3 せん断波の伝播・振動方向

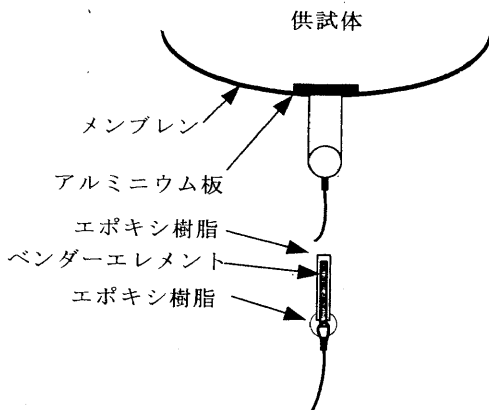


図-4 ベンダーエレメント設置方法

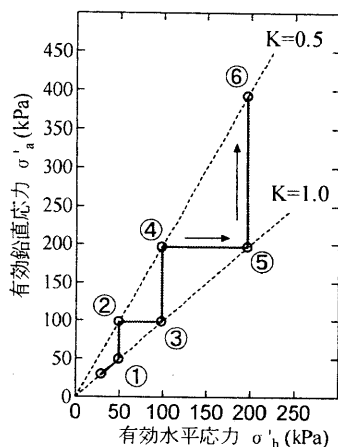


図-5 圧密時の応力経路

表-1 試料の物理的性質

試料名	採取深度 (m)	$\sigma'_{v \text{ in-situ}}$ (kPa)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$U_c$	$F_c$ (%)
東扇島	9.25 - 9.30	97.1	2.727	1.036	0.654	2.54	1.89
名取川	7.45 - 7.60	77.3	2.637	0.921	0.592	3.13	0.06
淀川	9.70 - 9.85	95.5	2.631	1.005	0.59	3.67	0.16
江戸川	15.15 - 15.30	150.2	2.701	-	-	2.87	0.02

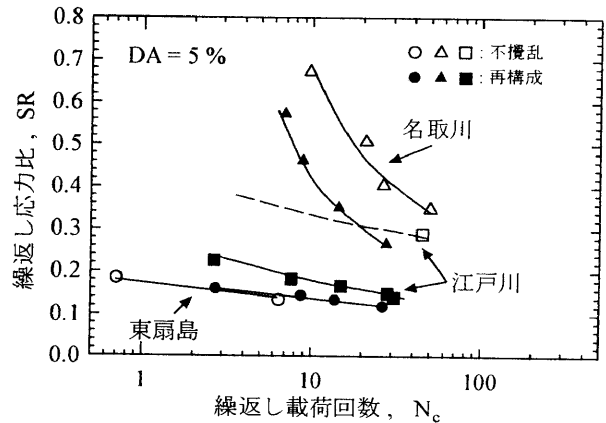


図-6 不攪乱試料と再構成試料の液状化強度

## 2.2 ベンダーエレメント試験および繰返し载荷試験

せん断波速度は3対のベンダーエレメント (以下, BE と記す) を用いて, 図-3 に示す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添え字はせん断波の伝播方向, 第2添え字は振動方向を表し, 鉛直方向を V, 水平方向を H とする。鉛直方向のせん断波速度を測定する BE は, キャップとペDESTAL に埋め込まれている。水平方向は図-4 に示す Fioravante<sup>4)</sup> が提案する方法で, 供試体側面に取り付けた。この方法は, あらかじめ BE より少し大きめに穴をあけ, 内側からアルミ板を接着したメンブレンを用いる。BE は供試体を作製後, 瞬間接着剤でアルミ板に固定する。この方法を適用することによって, BE を供試体に貫入させる方法と比べ, 試料に乱れを与えることがなく, また, 粒径の粗い試料でも試験が可能になる。

BE を設置後, セルを組み立て, 拘束圧 30kPa のもとで CO<sub>2</sub> および脱気水により飽和させ, 図-5 に示す応力経路の等方 ( $K=1.0$ ) および異方応力状態 ( $K=0.5$ ) の各段階において, BE により3方向のせん断波速度を測定し, 式 (1) によって初期剛性を求めた。さらに片振幅軸ひずみ ( $\epsilon_a$ )<sub>SA</sub> = 10<sup>-5</sup> 程度の微小繰返し载荷を非排水状態で与え, 繰返し载荷試験による初期剛性を式 (2) によって求めた。

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

$$G_{CTX} = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{E}{3} \quad (2)$$

ここで,  $\rho$  は供試体の湿潤密度,  $E$  は等価ヤング率,  $\nu$  はポアソン比である。非排水状態でのポアソン比は  $\nu=0.5$  と仮定した。

### 3. 不攪乱試料と再構成試料の比較

試料の乱れが液状化強度に与える影響を調べるために、原位置の有効土被り圧で等方圧密した不攪乱試料と再構成試料の液状化強度を比較したのが、図-6である。図より、埋め立て地盤である東扇島試料では、不攪乱試料と再構成試料の結果を比較すると、ほとんど差はない。沖積地盤の名取川試料では、載荷回数 20 回の応力比で比較すると、不攪乱試料に比べ再構成試料の液状化強度が約 3 割減少している。洪積地盤の江戸川試料も同様に、再構成試料の液状化強度が約 5 割減少している。このことから、再構成試料の液状化強度は、古い年代に堆積した試料ほど大きく減少する傾向があるようである。すなわち、原地盤においてセメンテーション・長期圧密・繰返し履歴などの年代効果によって形成された堆積構造が再構成することによって失われたため、洪積地盤から採取した江戸川試料の液状化強度は著しく低下し、反対に堆積して間もない東扇島試料では、堆積構造が発達する以前の地盤であったため不攪乱試料と再構成試料の液状化強度の結果にほとんど変化が見られなかったと考えられる。なお、江戸川試料においては、不攪乱試料の結果が一点しかないため、再構成試料の結果から推定して求めた。

次に、試料の乱れが初期剛性に及ぼす影響を調べるために、不攪乱試料と再構成試料の初期剛性を比較した。図-7は、図-6に示した液状化試験を行う前に行った微小繰返し (CTX) 試験 ( $e_a=10^{-5}$ ) とベンダーエレメント (BE) 試験から求めた初期剛性  $G$  と圧密後の間隙比  $e$  との関係を示したものである。図中に示したラインは、式 (3) で示す岩崎・龍岡<sup>6)</sup>が細粒分を含まないきれいな砂に対して共振法試験で求めた  $\gamma=10^{-6}$  の初期剛性  $G$  と間隙比  $e$  との関係を示したものである。

$$G = 900 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} p^{0.4} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (3)$$

図-7より、BE 試験で求めた初期剛性  $G$  は、東扇島試料では液状化強度と同様に不攪乱試料と再構成試料の差はほとんど生じていない。一方、名取川試料では BE 試験から求めた初期剛性は再構成試料の方が 1 割程度減少している。液状化強度の低下が最も大きかった江戸川試料では 4 割程度減少している。

Seedら<sup>6)</sup>は、過去に強度を増加させるようなひずみ履歴を受けていない場合には、乱れが液状化強度に与える影響が小さく、過去にひずみ履歴を受けて強度が増加した砂は乱れが液状化強度に与える影響が大きくなることを示している。また、時松ら<sup>7)</sup>は液状化強度を著しく低下させるような乱れは同時に初期剛性も低下させることを指摘している。ベンダーエレメントによる初期剛性の結果は Seedらや時松らの指摘と同様に、試料の乱れによって液状化強度が低下した試料は剛性も低下している。それに対し、CTX 試験から求めたヤング率  $E$  は、不攪乱試料と再構成試料の差は僅かであり、試料の乱れによる剛性の低下が少ない。この原因として、凍結した供試体

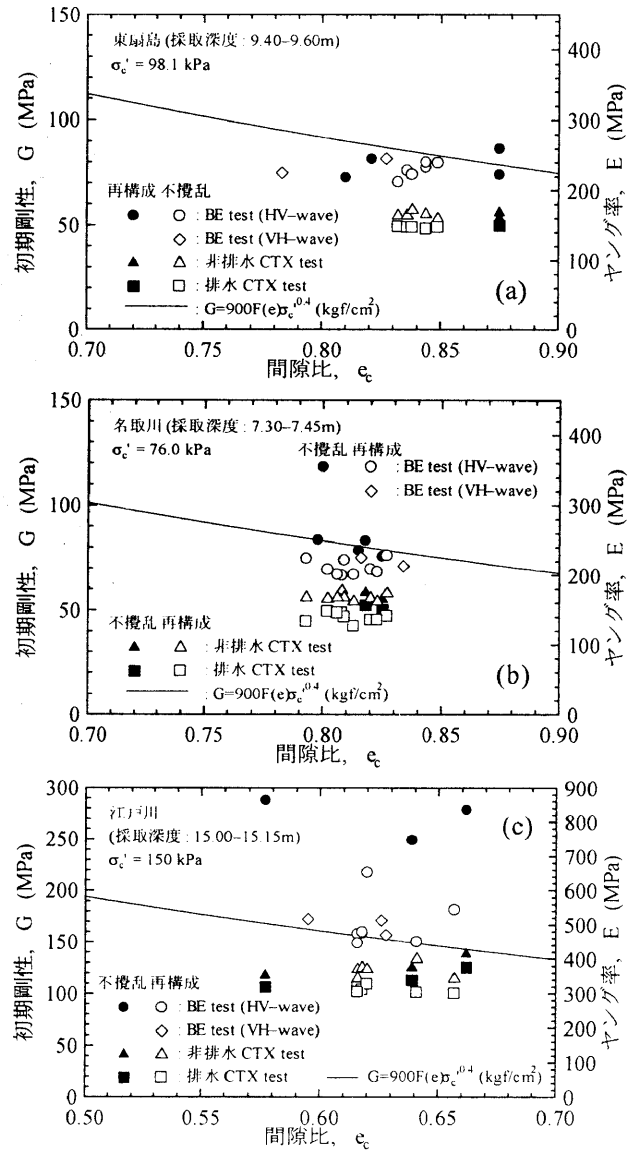


図-7 不攪乱試料と再構成試料の初期剛性の比較  
(a) 東扇島試料, (b) 名取川試料, (c) 江戸川試料

を成形する際に供試体表面の凹凸が避けられないため、ベディングエラーやメンブレン貫入の影響によって不攪乱試料の初期剛性が過小評価されたことが考えられる。

### 4. 等方応力および異方応力状態の初期剛性の比較

図-8 および図-9 は、不攪乱試料に対して、図-5 の応力経路の各段階における 3 方向のせん断波速度から求めた初期剛性 ( $G_{VH}$ ,  $G_{HH}$ ,  $G_{HV}$ ) と有効鉛直応力  $\sigma'_v$  および有効水平応力  $\sigma'_h$  との関係を示したものである。江戸川試料においては、粒径が大きく、ベンダーエレメントが突出したキャップおよびペDESTALに設置することが困難であるため、鉛直方向 ( $G_{VH}$ ) の BE 試験を行わなかった。

等方応力状態 ( $K=1.0$ ) と異方応力状態 ( $K=0.5$ ) で求めた結果を比較すると、有効水平応力  $\sigma'_h$  との関係を示した図-8 では、せん断波の伝播・振動方向がともに水平である  $G_{HH}$  は  $K=1.0$  と  $0.5$  で差がない。それに対して、 $G_{VH}$ ,  $G_{HV}$  は、試料によって多少ばらつきはあるが、有効水平

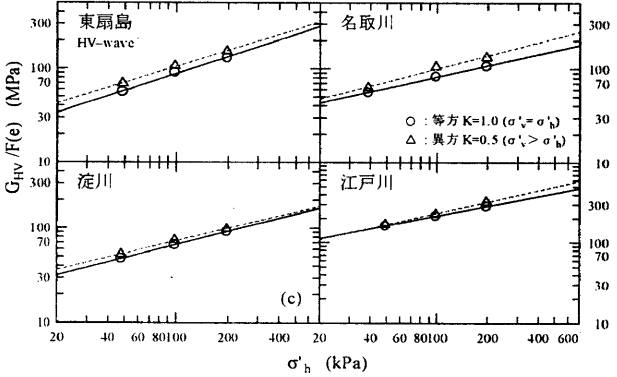
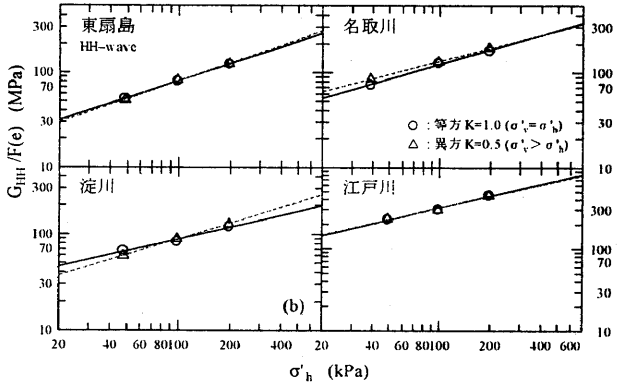
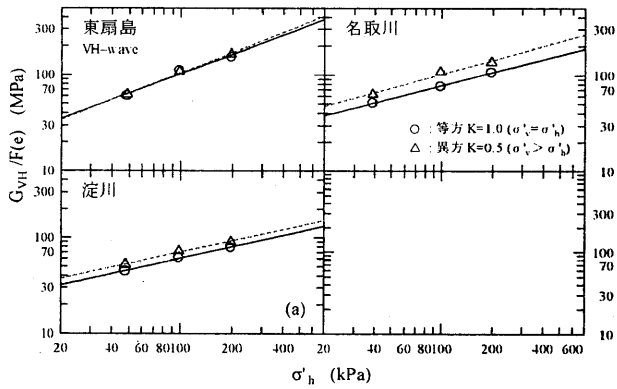


図-8 初期剛性と有効水平応力との関係

(a)  $G_{VH}$ , (b)  $G_{HH}$ , (c)  $G_{HV}$

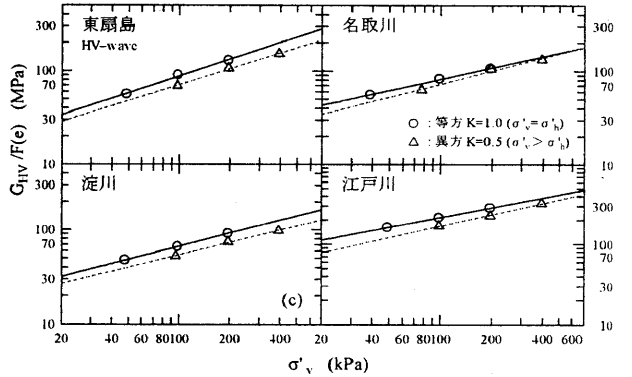
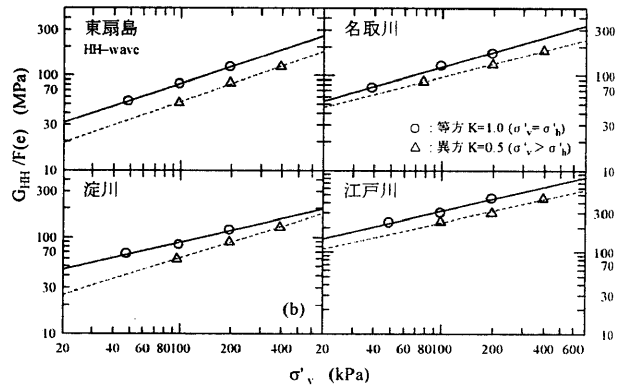
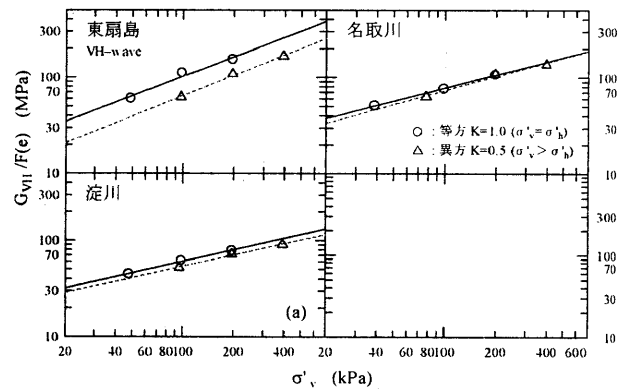


図-9 初期剛性と有効鉛直応力との関係

(a)  $G_{VH}$ , (b)  $G_{HH}$ , (c)  $G_{HV}$

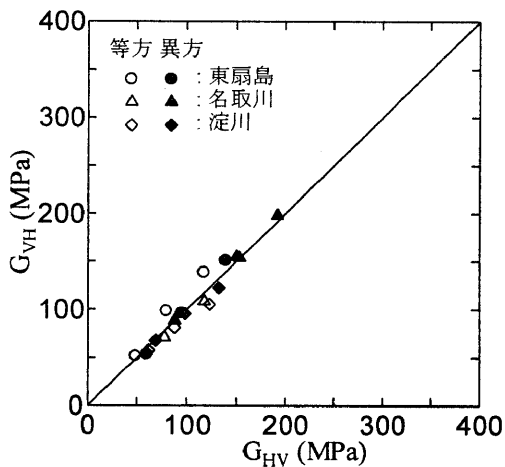


図-10  $G_{HV}$  と  $G_{VH}$  の比較

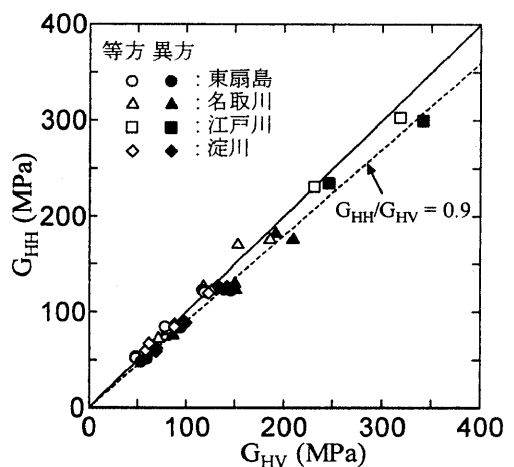


図-11  $G_{HV}$  と  $G_{HH}$  の比較

応力  $\sigma'_h$  が等しくても有効鉛直応力  $\sigma'_v$  が大きい  $K=0.5$  の方が  $K=1.0$  よりも高くなっている。また、有効鉛直応力  $\sigma'_v$  との関係を示した図-9 では、 $K=1.0$  と  $0.5$  の差は  $G_{HH}$  の方が、 $G_{VH}$  と  $G_{HV}$  よりも大きい。すなわち、同じ有効

鉛直応力  $\sigma'_v$  では、有効水平応力  $\sigma'_h$  が  $K=0.5$  よりも大きい  $K=1.0$  の方が、 $G_{HH}$  の有効水平応力  $\sigma'_h$  に対する依存性が大きい。これは、異方応力状態での初期剛性はせん断波の伝播・振動方向の応力に依存し、それと垂直な方向

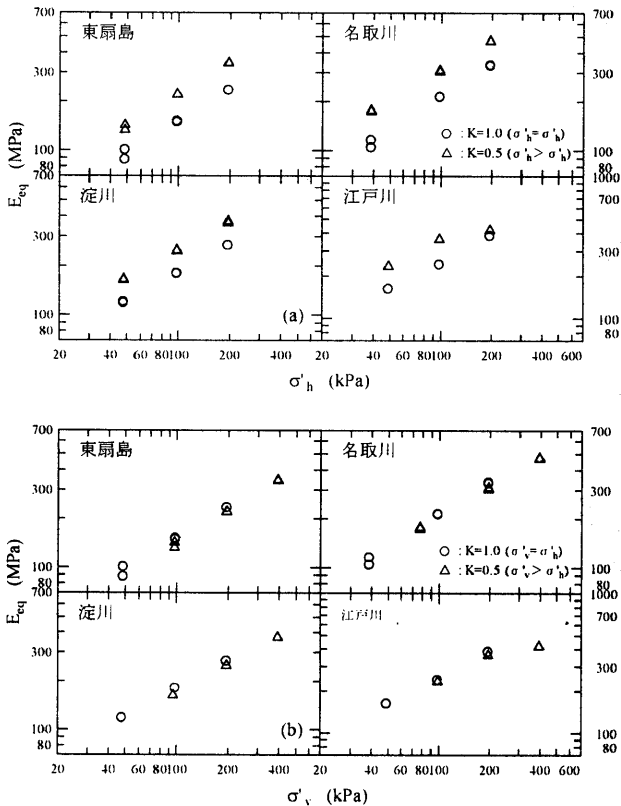


図-12 繰返し三軸試験での等価ヤング率の応力依存性  
(a)  $E_{eq}$  と  $\sigma'_h$  との関係, (b)  $E_{eq}$  と  $\sigma'_v$  との関係

の応力には依存しないとされているため<sup>8)</sup>, 水平応力が等しい場合は, 鉛直応力の増加に対して  $G_{HH}$  が依存せず, 鉛直応力が等しい場合には,  $G_{HH}$  は  $G_{VH}$ ,  $G_{HV}$  よりも水平応力により依存したためである。

図-10 および図-11 は, 3方向のせん断波速度から求めた剛性を比較したものである。図-10 より,  $G_{VH}$  と  $G_{HV}$  の間には明瞭な差がなかった。また,  $G_{HH}$  と  $G_{HV}$  を比較した図-11 では, 等方応力状態では  $G_{HH}$  と  $G_{HV}$  はほぼ等しい。それに対し, 異方応力状態では,  $G_{HV}$  が 1 割ほど高くなっていることがわかる。この理由として, 前述のようにせん断波は伝播・振動方向の応力に依存するため, 鉛直応力の増加にともない  $G_{VH}$  と  $G_{HV}$  はほぼ等しい量だけ増加し,  $G_{HH}$  は依存しないため増加しなかったことが考えられる。

図-12 は, 非排水繰返し三軸試験から求めた等価ヤング率  $E_{eq}$  と有効水平応力  $\sigma'_h$  および有効鉛直応力  $\sigma'_v$  との関係を示したものである。有効水平応力  $\sigma'_h$  との関係を示した図-12(a) では, 鉛直応力が大きい  $K=0.5$  の等価ヤング率が高くなっている。一方, 有効鉛直応力  $\sigma'_v$  との関係を示した図-12(b) では, 全ての試料で水平応力に関わらず, 等価ヤング率は有効鉛直応力のみ依存して増加していることがわかる。また, 等方応力と異方応力状態での等価ヤング率を比較すると, 等方応力状態の方がやや高いが大きな差はない。

これらのことから不攪乱試料においても BE による剛性は伝播・振動 2 方向の応力に依存し, CTX 試験による等価ヤング率は載荷方向の応力のみ依存する<sup>9)</sup> ことが

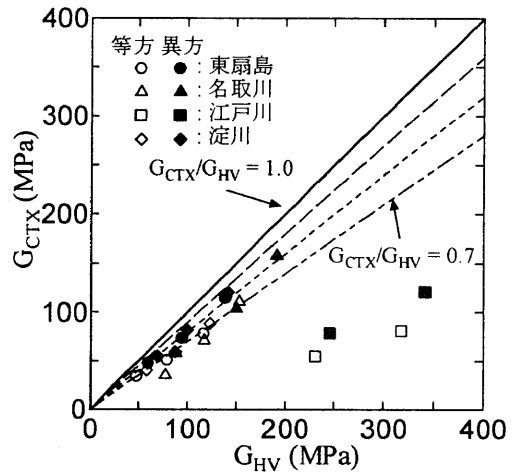


図-13  $G_{CTX}$  と  $G_{HV}$  の比較

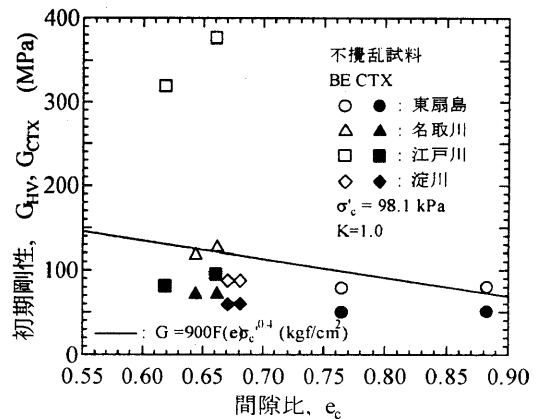


図-14 初期剛性と間隙比との関係

わかった。

図-13 は, CTX 試験および BE 試験によって求めた剛性を比較したものである。図より, CTX 試験から求めた剛性は, BE 試験から求めた剛性よりも低い。特に江戸川試料では, CTX 試験による剛性が非常に低くなっている。また, 異方応力状態で求めた剛性は, 等方応力状態よりも  $G_{CTX}/G_{HV}=1.0$  に近づいている。

図-14 は, BE 試験から求めた剛性と測定時の間隙比との関係を示したものである。図に示されているように, 江戸川試料以外の結果は岩崎・龍岡の提案式とほぼ一致しているのに対し, 江戸川試料の結果はそれらよりもはるかに高いことがわかる。この理由として, 江戸川試料では, 粗い材料を多く含むため硬質な部分をせん断波が早く伝播したことが考えられる。そこで, せん断波の伝播経路に礫のような粗い材料が含まれる場合せん断波速度が速くなることを検証するために, 江戸川試料を用いて 2mm 以下の試料で供試体を作製し, 図-15 に示したようにせん断波の伝播経路に実際に試料の中に含まれていた粒径 20mm 程度の礫を配置して試験を行った。試験の再現性を保つために同じ礫を使用し, できるだけ同じ状態になるように礫を配置した。図-16 は礫を配置した結果である。図より, CTX 試験から求めた初期剛性は, 礫の有無に関わらず, 結果に差が認められない。それに対して, BE 試験では礫を配置した結果は 2~3 倍大きく, 図

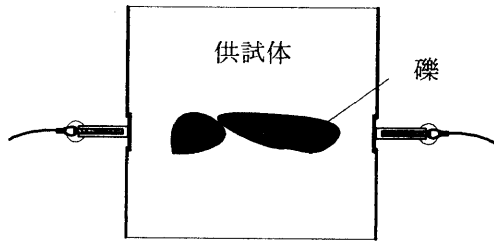


図-15 せん断波の伝播経路に礫を配置

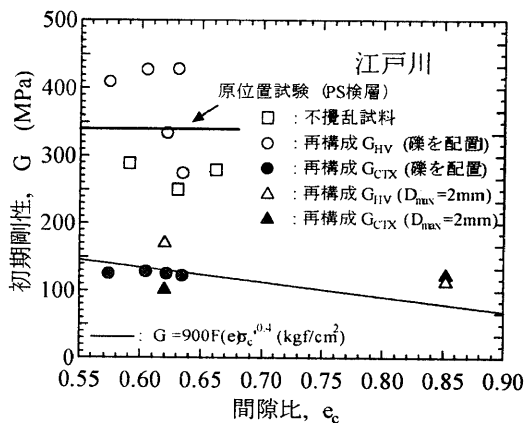


図-16 伝播経路に礫を配置した結果

中の線で示した原位置試験の結果以上の値が得られている。また、礫を配置した結果は、試験ごとに結果がばらついている。この原因として、礫を配置した後に、電動パイプレーターで所定の密度に締め固めるため、試験ごとに礫の配置や接触の有無等の条件が異なり、結果にばらつきが生じたことが考えられる。

以上のことから、大きな礫を含む試料では、せん断波速度から求めた初期剛性は CTX 試験から求めた剛性よりも過大評価される恐れがあることや、礫の状態によっては結果が大きく異なることが明らかになった。

### 5. 原位置試験および室内試験のせん断波速度の比較

図-17 は、原位置試験  $V_F$  と室内試験  $V_L$  のせん断波速度を比較したものである。図では、過去に行われた不攪乱試料での CTX 試験と原位置でのサイスミックコーン試験または、PS 検層試験 (サスペンション法) の結果も追加している。CTX 試験の結果からせん断波速度を算出する式として、式 (1) と式 (2) から、式 (4) を導出し、せん断波速度を求めた。なお、淀川試料においては、過去に室内試験が行われていないため、PS 検層の結果と本研究の結果のみを示した。

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (4)$$

図-17 より、CTX 試験から求めたせん断波速度  $V_L$  は、すべての試料において、過去に行われた試験結果にほぼ一致している。また、等方 ( $K=1.0$ ) と異方 ( $K=0.5$ ) 応

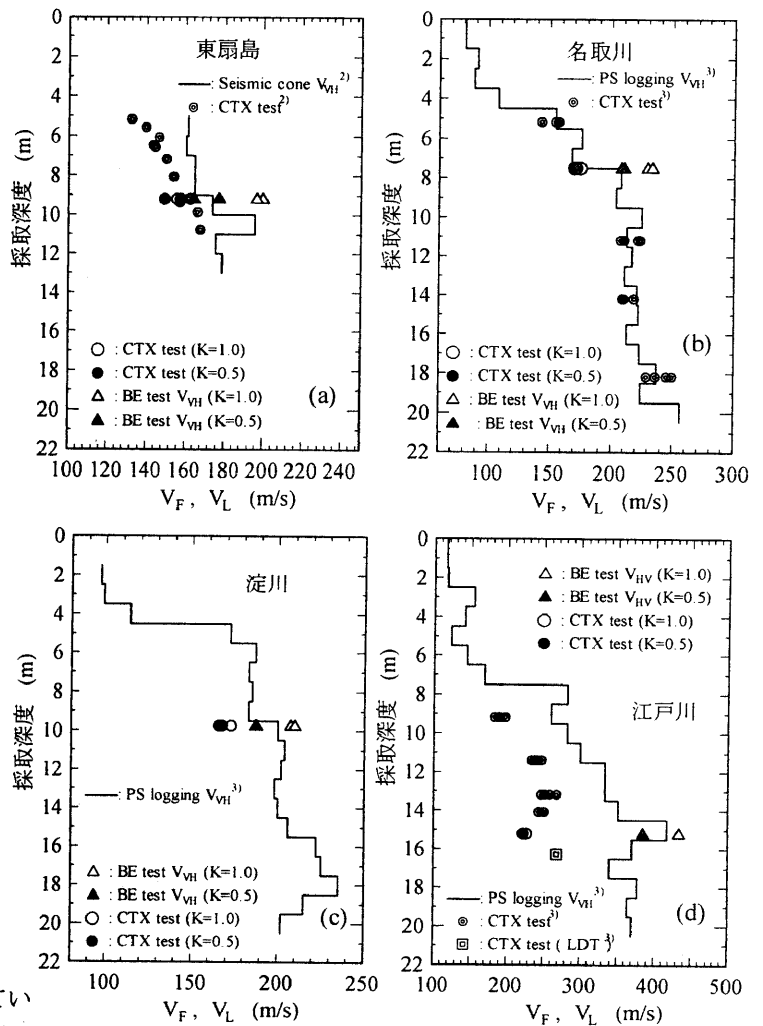


図-17 原位置試験と室内試験の比較  
(a) 東扇島, (b) 名取川, (c) 淀川, (d) 江戸川

力状態の結果を比較すると、応力状態の相違による差は見られない。原位置試験の結果と比較すると、東扇島、名取川および淀川試料は原位置試験でのせん断波速度  $V_F$  よりもやや低い。それに対して、江戸川試料では、非常に低くなっている。これは、先述したように江戸川試料では、礫を多く含んでいるため原位置のせん断波速度が過大評価されたことが考えられる。

一方、BE 試験から求めたせん断波速度は、等方応力状態では、原位置試験結果よりも大きい。原位置の静止土圧係数を  $K=0.5$  と仮定して求めた異方応力状態での結果は、東扇島および名取川では原位置のせん断波速度に近い値である。

図-18 は等方および異方応力状態で求めた CTX 試験と BE 試験のせん断波速度と原位置試験のせん断波速度を比較したものである。図-18(a) に示した CTX 試験の結果では、等方応力と異方応力状態で求めた結果を比較すると、等方応力状態で求めた結果の方が原位置試験と室内試験が等しい  $V_{CTX}/V_F=1.0$  に近いが、応力状態の相違による差は僅かである。また、原位置試験の値  $V_F$  が大きい試料ほど室内試験による  $V_{CTX}/V_F$  が低くなっている。

一方、等方応力および異方応力状態で求めた BE 試験と原位置試験の結果を比較した図-18(b) では、等方応力

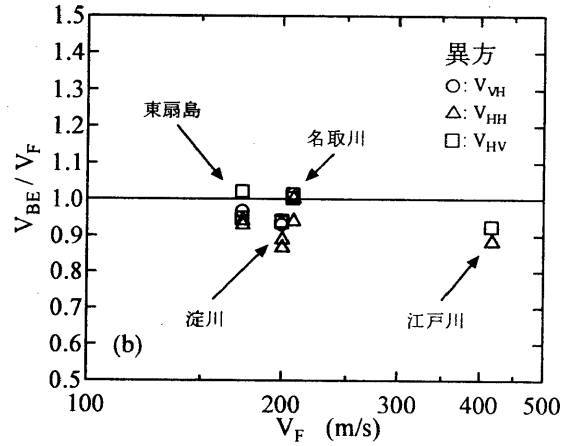
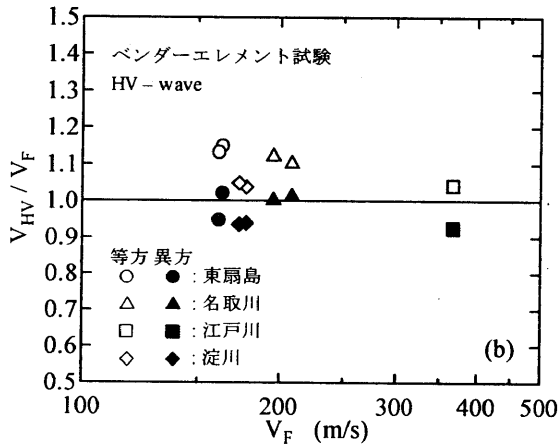
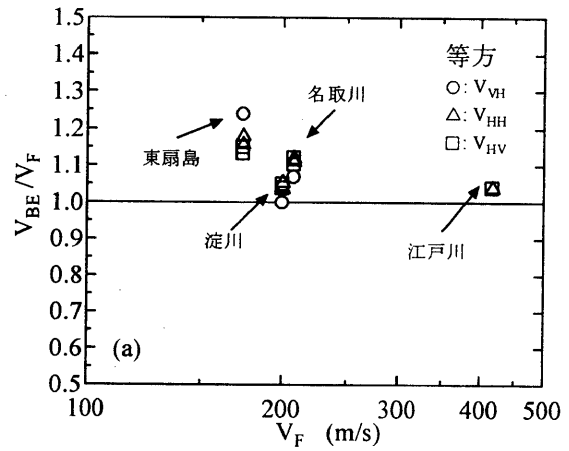
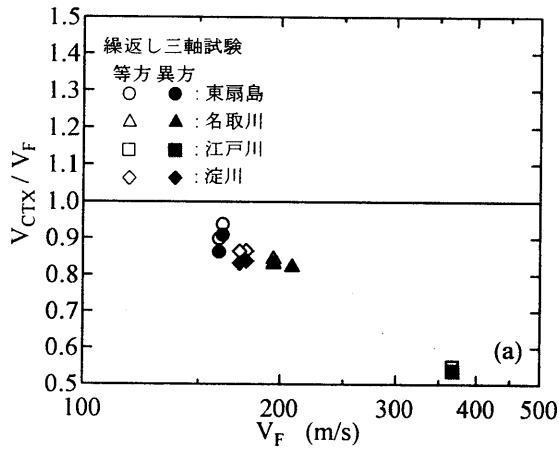


図-18 室内試験と原位置試験の比較

図-20 原位置試験とBE試験のせん断波速度の比較

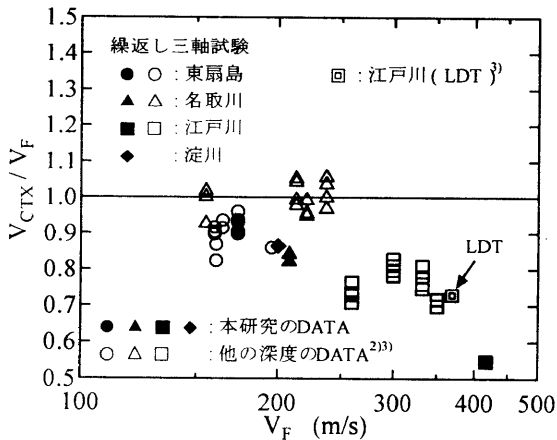


図-19 原位置試験とCTX試験の比較

-18(a)の等方応力のデータに、異なる深度で採取された不攪乱試料に対して行われた試験結果も追加している。なお、LDTのデータは江戸川試料の一点(回マーク)のみである。図-19より、名取川試料については、原位置試験と室内試験の結果がほぼ等しい。しかし、それ以外の試料では、原位置試験の結果が大きい試料ほど、CTX試験の結果が低くなっている。LDTを用いた試験の結果を見ると、従来の非接触変位計(Gap Sensor)で求めた結果と比較すると、ほとんど差がないことがわかる。したがって、原位置試験と室内試験の不一致の要因は、単にベディングエラーの影響だけではないということがわかった。

状態の結果よりも異方応力状態で求めたせん断波速度の方が、 $V_{HV}/V_F=1.0$ に近いことがわかる。

図-18(a)に示したように、CTX試験の結果が低くなった原因として、原位置試験では硬質な部分をせん断波が早く伝播することによってせん断波速度が過大評価されたことや、CTX試験では供試体の軸変位を非接触変位計を用いてキャップの変位から測定しているため、ベディングエラーの影響により初期剛性が過小評価されたことが考えられる。

ベディングエラーの影響を受けずに供試体の軸変位を求めることができる方法として、局所ひずみ測定装置LDT(Local Deformation Transducer)がある。LDTを用いて行われた試験の結果を図-19に示す。図-19には、図

図-20は等方および異方応力状態で求めた3方向のせん断波速度と原位置試験のせん断波速度の比と原位置試験の結果との関係を示したものである。図-20(a)で示した等方応力状態で求めたせん断波速度は、全体的に $V_{BE}/V_F=1.0$ のラインより上に分布しており、BE試験のせん断波速度が高い。それに対して、図-20(b)の異方応力状態で求めた試験結果は、室内試験と原位置試験の結果が等しい $V_{BE}/V_F=1.0$ 付近に分布している。また、3方向のせん断波速度のうち $V_{VH}$ および $V_{HV}$ は、 $V_{BE}/V_F=1.0$ に近いことがわかる。なお、今回比較に用いた原位置試験(サスペンション法)の結果は $V_{VH}$ に相当する。

室内試験と原位置試験で得られた剛性が等しい( $V_L/V_F=1.0$ )試料が乱れのないサンプリング試料である

とすれば、CTX 試験では多くの試料で、原位置試験の結果よりも低い ( $V_{CTX}/V_F < 1.0$ ) ため、サンプリング試料のほとんどは、乱れていることになる。特に江戸川試料では、原位置試験に比べ室内試験の結果が非常に低いことから、“乱れた試料である”と判断される。それに対して、BE 試験では、原位置と同じ異方応力状態で求めた  $V_{VH}$  および  $V_{HV}$  は、原位置試験の結果に近い値 ( $V_{BE}/V_F \approx 1.0$ ) であるから、“乱れの影響は少ない試料である”という全く異なった見解が得られる。

以上のことから、室内試験と原位置試験から求めた初期剛性を比較して試料の乱れを評価する場合、室内試験においても、繰返し載荷ではなく、原位置試験と同様に実際にせん断波の伝播速度から初期剛性を評価する必要がある。また、求めるせん断波速度は、異方応力状態の下で求める  $V_{VH}$  または  $V_{HV}$  とすべきであると考えられる。

## 6. 結論

(1) 液化強度を大きく低下させるような乱れは、同時にベンダーエレメント試験から求めた初期剛性も低下させることがわかった。また、再構成試料の液化強度およびベンダーエレメント試験の初期剛性の低下量は、古い年代に堆積した試料ほど大きいことが明らかになった。

(2) 繰返し三軸試験から求めた初期剛性は、不攪乱試料と再構成試料を比較すると、どの試料においても差は少なかった。これは不攪乱試料では、凍結した試料を成形する際に、供試体表面の凹凸が避けられないため、ベディングエラーおよびメンブレンペネトレーションの影響により剛性が過小評価されたことが考えられる。

(3) 不攪乱試料において、異方応力状態の初期剛性はせん断波の伝播・振動方向の応力に依存し、それと直角な方向の応力の影響は小さい。また、等価ヤング率は載荷方向の応力のみ依存するということがわかった。

(4) 原位置試験および室内試験において、せん断波の伝播経路に礫層や礫分を多く含む層が存在する場合、初期剛性を過大評価し、また、礫の状態によっては結果が大きく異なることから、礫を含む試料に対してせん断波から初期剛性を評価する場合注意が必要である。

(5) 原位置試験と室内試験の結果を比較すると、繰返し三軸試験から求めたせん断波速度は、原位置試験の結果が高い試料ほど CTX 試験の結果は相対的に低かった。それに対し、BE 試験によるせん断波速度の場合、異方応力状態で求めた  $V_{VH}$ 、 $V_{HV}$  は、原位置の結果に近いこと

から、原位置試験と室内試験を比較して試料の乱れを評価する場合、原位置に近い異方応力状態で求めたせん断波による比較が最良であると考えられる。

謝辞：今回試験に用いた凍結サンプリング試料は、国土交通省土木研究所よりご提供いただきました。末筆ではありますが記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Tanaka, Y. · Kudo, K. · Nishi, K. · Okamoto, T. · Kataoka, T. · Ueshima, T. (2000): Small strain characteristics of soils in Hualian, Taiwan, *Soils and Foundations*, 40(3), pp.111-125.
- 2) Yamashita, S. · Shibuya, S. · Tanaka, Y. (1997): A case study for characterizing undrained cyclic deformation properties in young sand deposit from in-situ and laboratory tests, *Soils and Foundations*, 37(2), pp.117-126.
- 3) 建設省土木研究所動土質研究室・(社) 全国地質調査業協会連合会 (1998): 地盤の液化抵抗の評価に関するサウンディング・サンプリング手法の実証実験報告書.
- 4) Fioravante, V. (2000): Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing, *Soils and Foundations*, 40(4), pp.129-142.
- 5) Iwasaki, T. · Tatsuoka, F. (1977): Effect of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, *Soils and Foundations*, 17(3), pp.19-35.
- 6) Seed, H.B., · Singh, S. · Chang, C.K., · Vilela, T.F. (1982): Considerations in undisturbed sampling of sands, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 108(2), pp.265-283.
- 7) 時松孝次 · 保坂吉則 · 吉見義昭 (1985): 弾性せん断剛性をを用いた砂試料の質評価の可能性について、昭和 60 年度サンプリングシンポジウム, pp.29-32.
- 8) Roesler, S.K. (1979): Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 105(7), pp.871-880.
- 9) Hardin, B.O. · Bladford, G.E. (1989): Elasticity of articulate materials, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 115(6), pp.788-805.

To examine the effects of sample disturbance on initial stiffness and liquefaction strength of sand specimen, the bender element tests and the cyclic triaxial tests were performed on undisturbed and reconstituted sand samples from four different sites. The specimens were isotropically and anisotropically consolidated, and then the shear wave velocities were measured in three different directions (VH, HH, HV-wave). These laboratory test results were compared to the results of in-situ seismic survey. To obtain comparable laboratory and in-situ stiffness, the laboratory shear wave velocity should be measured in the stress condition similar to the in-situ condition.