

凍結サンプリング試料と再構成試料のせん断波速度と液状化強度

Shear wave velocity and liquefaction strength of freezing sampling and reconstituted specimens

北見工業大学大学院 ○学生員 堀 智仁 (Tomohito Hori)
 北見工業大学工学部 正 員 山下 聡 (Satoshi Yamashita)
 北見工業大学工学部 フェロー 鈴木 輝之 (Teruyuki Suzuki)

1. まえがき

砂質土地盤の液状化に対する安定性を検討するために必要な液状化強度やせん断剛性を正確に室内試験から評価するためには、サンプリング時に試料が受ける乱れを正確に評価する必要がある。

供試体の乱れを評価する方法の一つとして、原位置試験で測定したせん断波速度から求めた初期剛性と室内で求めた初期剛性とを比較する方法がある。しかし、試料の乱れの影響が少ないとされている凍結サンプリング試料においても、原位置試験による初期剛性が高い試料ほど室内試験による初期剛性の方が低くなるという報告がされている¹⁾。この原因として、室内試験で繰返し載荷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な部分を早くせん断波が伝播するため剛性が過大に評価されることが指摘されている²⁾。

そこで、本研究ではベンダーエレメントを用いて凍結サンプリング試料と再構成試料の初期剛性を求め、繰返し三軸試験および原位置試験から求めた結果と比較することによって試料の乱れ評価の方法を検討した。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を比較し、試料の乱れが液状化強度特性に及ぼす影響を調べた。

2. 試料と試験方法

試験に用いた試料は豊浦砂と、国内の3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）は東扇島の埋立地盤³⁾、名取川沖積地盤¹⁾および江戸川洪積地盤¹⁾から採取したものである。図-1に用いた試料の粒度分布を示す。再構成供試体の作製には、乾燥振動法(dry-vibration method: DV method)を用いて、不攪乱試料と同程度の密度になる

よう締め固めた。供試体寸法は、直径50 mm 高さ100 mm である。

供試体作製後、拘束圧30 kPa のもとでCO₂および脱気水により飽和させ、豊浦砂では有効拘束圧 $\sigma'_c = 98.1$ kPa、不攪乱試料およびその再構成試料では原位置の有効土被り圧 $\sigma'_{v, in-situ}$ で等方圧密を1時間程度行った。圧密終了後、ベンダーエレメントによって水平方向(HV-wave)のせん断波速度を測定し、供試体の初期剛性を求めた。さらに片振幅ひずみ $(\varepsilon_a)_{SA} = 10^{-5}$ 程度の微小繰返し載荷を非排水状態で与え、繰返し載荷試験による初期剛性も求めた。

3. ベンダーエレメントの設置方法

本研究では、ベンダーエレメントの供試体側面への設置方法として図-2に示す Type-2の Fioravante⁴⁾が提案する方法を採用した。既報⁵⁾では、図-2の Type-1に示すベンダーエレメントを供試体の側面に貫入する方法⁶⁾を採用した。この方法は、供試体作製後メンブレンに切れ目を入れてベンダーエレメントを貫入させるため、ベンダーエレメントの周辺部分の構造が乱れる可能性（密度化の影響）がある。また、粒径の大きな試料ではベンダーエレメントを貫入することが困難な場合がある。

一方、Type-2はあらかじめベンダーエレメントより少し大きめに穴を開け、内側からアルミ板を接着したメンブレンを用いる。ベンダーエレメントは、供試体を作製後、瞬間接着剤でアルミ板に固定する。この方法では、Type-1と異なり供試体作製後に供試体に乱れを与えることがなく、また、粗い材料でも試験が可能である。

図-3は、豊浦砂を用いてベンダーエレメントの設置方法が初期剛性に及ぼす影響を示したものである。図中に示したラインは、式(1)で示す岩崎・龍岡⁷⁾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 $\gamma = 10^{-6}$ でのせん断剛性率 G と間隙比 e との関係を示したものである。

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

供試体の鉛直方向に伝播するせん断波速度(VH-wave)から求めたDV法で作製した供試体の初期剛性(○マーク)は、岩崎・龍岡の提案式とほぼ一致している。一方、ベンダーエレメントを直接供試体に貫入するType-1(●マーク)はそれらよりも僅かに高い程度で大きな差はない。アルミ板を使用するType-2(▲マーク)も、Type-1とほぼ同じ値である。これらのことより、アルミ板を用いるType-2の方が試料に乱れを与えることなく、信頼で

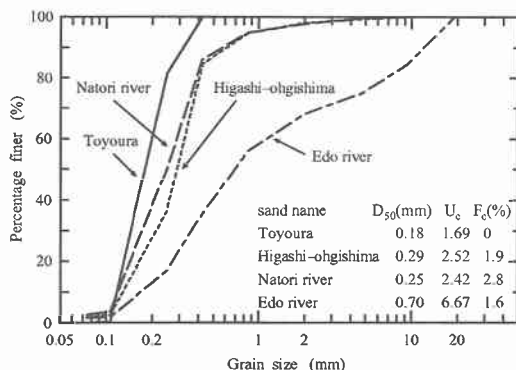


図-1 用いた試料の粒度分布

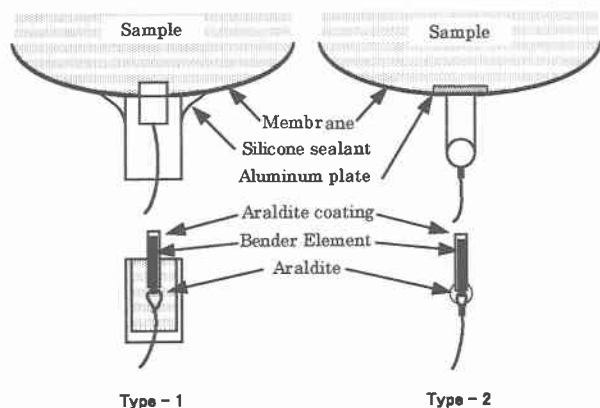


図-2 ベンダーエレメント設置方法

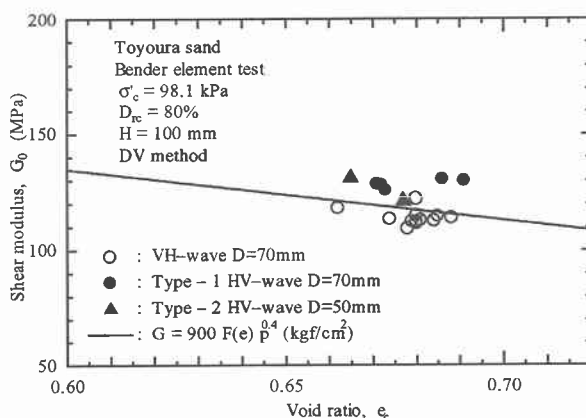


図-3 初期剛性に及ぼすBE設置方法の影響

きる初期剛性が求められると考えられる。

4. 凍結サンプリング試料と再構成試料の比較

4. 1 液状化強度と初期剛性の比較

図-4は、不攪乱試料と同程度の密度に締め固めた再構成試料の液状化試験結果の比較である。東扇島試料では不攪乱試料と再構成試料の液状化強度特性にほとんど差はない。一方、名取川試料では、繰返し載荷回数20回に対する応力比で比較すると、不攪乱試料が0.44で、再構成試料が0.3と、液状化強度が約3割減少している。江戸川試料では、不攪乱試料が0.31で、再構成試料が0.16と、液状化強度が約5割減少している。なお、江戸川の不攪乱試料の液状化試験結果が一点しかないため、再構成試料の液状化強度曲線から推定して求めた。

東扇島は埋め立て後、約30年経過した地盤で、名取川は、沖積地盤、江戸川は洪積地盤である。再構成試料の液状化強度の低下は、古い年代に堆積した地盤から採取した試料ほど、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。

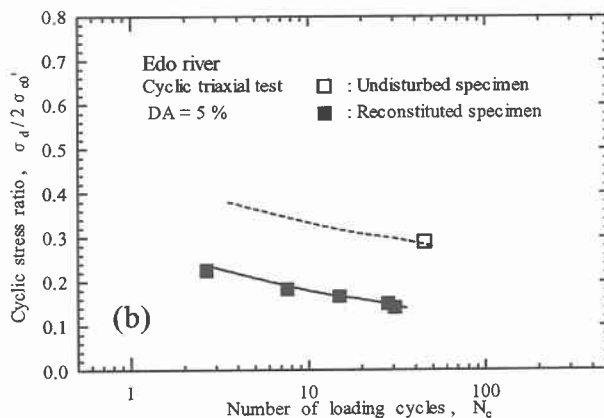
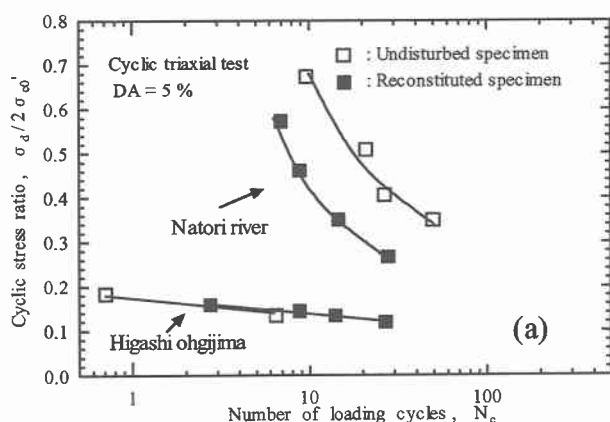


図-4 凍結サンプリング試料と再構成試料の液状化強度特性 (a) 東扇島 名取川、(b) 江戸川

図-5は凍結サンプリング試料と再構成試料のせん断剛性と液状化強度の変化を示したものである。縦軸は液状化試験での載荷回数20回に対する応力比で、横軸は繰返し三軸試験とベンダーエレメント試験から求めた初期剛性を示している。江戸川試料においては、剛性が大きいため、他の試料とは別のスケールで図示している。なお、図に示した値は複数の供試体で行った試験結果の平均値を示したものである。

東扇島試料では、繰返し三軸試験 (CTX) から求めた初期剛性とベンダーエレメント (BE) から求めた初期剛性は、BE の方が高いが、不攪乱試料と再構成試料では液状化強度および初期剛性はほぼ同じ値となっている。一方、名取川試料では液状化強度の低下にともない初期剛性は CTX では僅かな減少、BE では大幅に減少している。江戸川試料でも、同様のことが確認できる。BE から求めた剛性の減少の大きさを見ると、名取川試料が約10%の減少で、江戸川試料は45%の減少であった。

Seed ら⁸⁾ は、過去にその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は小さく、過去にひずみ履歴を受けて強度が増加した砂においては、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⁹⁾ は、液状化強度を著しく低下させるような乱れは同時にせん断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

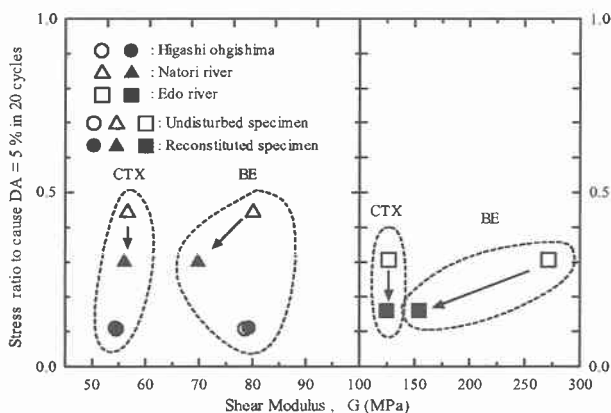


図-5 初期剛性と液状化強度の変化

低下しているが、繰返し三軸試験より求めた初期剛性は、不攪乱試料と再構成試料では、あまり差が認められなかった。

このように、繰返し載荷から求めた初期剛性とせん断波速度から求めた剛性の変化が異なる原因は、凍結供試体と再構成供試体でのベディングエラーの相違などが考えられるが、今後検討する必要がある。

4. 2 原位置試験結果との比較

図-6は、過去に行われた異なる深度から採取した不攪乱試料での繰返し三軸試験と原位置でのサイスミックコーン試験または、P S検層試験から求めた初期剛性に、再構成試料の結果を追加したものである。

三軸試験から求めた初期剛性（○、●マーク）は、過去に行われた試験結果（◎マーク）にどの試料においてもほぼ一致している。一方、ベンダーエレメントから求めた初期剛性は、東扇島および名取川では原位置試験で求めたものよりもやや高くなっている。この原因として考えられることのひとつとして、室内試験は原位置の有効土被り圧で等方圧密して試験を行っているのに対し、原位置は $K<1$ の異方応力状態にあり、応力状態の相違の影響が考えられる。ここで、異方応力状態での微小ひずみ

時のせん断剛性率 G_0 は一般に以下の式で表現できる¹⁰⁾。

$$\frac{G_0}{p_r} = S_{vh} F(e) \left(\frac{\sigma_v'}{p_r} \right)^{n_v} \left(\frac{\sigma_h'}{p_r} \right)^{n_h} \quad (2)$$

ここで、 S_{vh} は材料定数、 $F(e)$ は間隙比関数、 σ_v' と σ_h' は有効鉛直・水平応力、 p_r は基準応力、 n_v と n_h は指数定数である。

そこで、等方応力状態でベンダーエレメント試験から求めた初期剛性から異方応力状態での初期剛性を $K=(\sigma_h'/\sigma_v')=0.5$ 、 $n_v=n_h=0.25$ として推定した値が図中の▽、▼マークである。等方応力状態で求めた値よりもやや初期剛性が低下しているが、凍結試料においては原位置せん断波から求めたものよりもやや高い。

江戸川試料の結果を比較すると、繰返し三軸試験より求めた剛性が非常に低くなっている。また、ベンダーエレメントによる剛性も原位置試験による剛性より若干低い。この原因として考えられることは、原位置試験ではせん断波が最も早く到達した速度から剛性を評価するため粗い材料を含む江戸川試料では原位置試験から求めた初期剛性が高くなったものと考えられる。

そこで、せん断波の伝播経路に礫のような粗い材料が多く含まれる場合、せん断波の伝播速度が速くなることを検証するために、粗い材料を含む江戸川試料を用いてベンダーエレメント試験を行った。試験では、2mm以下の試料を用いて供試体を作製し、図-7に示すようにせん断波の伝播経路に意図的に大きな礫を配置した。

図-8は図-6の結果に礫を配置した場合の結果を追加したものである。さらに、比較のために2mm以下の砂分だけで供試体を作製した結果も追加している。礫を配置した結果（◆マーク）は、再構成試料の初期剛性（▲マーク）と比較すると約2～3倍大きく、原位置試験による初期剛性に近い結果が得られた。一方、2mm以下の砂分だけの供試体の結果（◇マーク）は、再構成試料の結果と比較するとやや低く、せん断波の伝播経路での礫の有無によって結果が大きく異なっていることが分かる。また、礫がある場合の結果は、試験ごとに結果が広い範

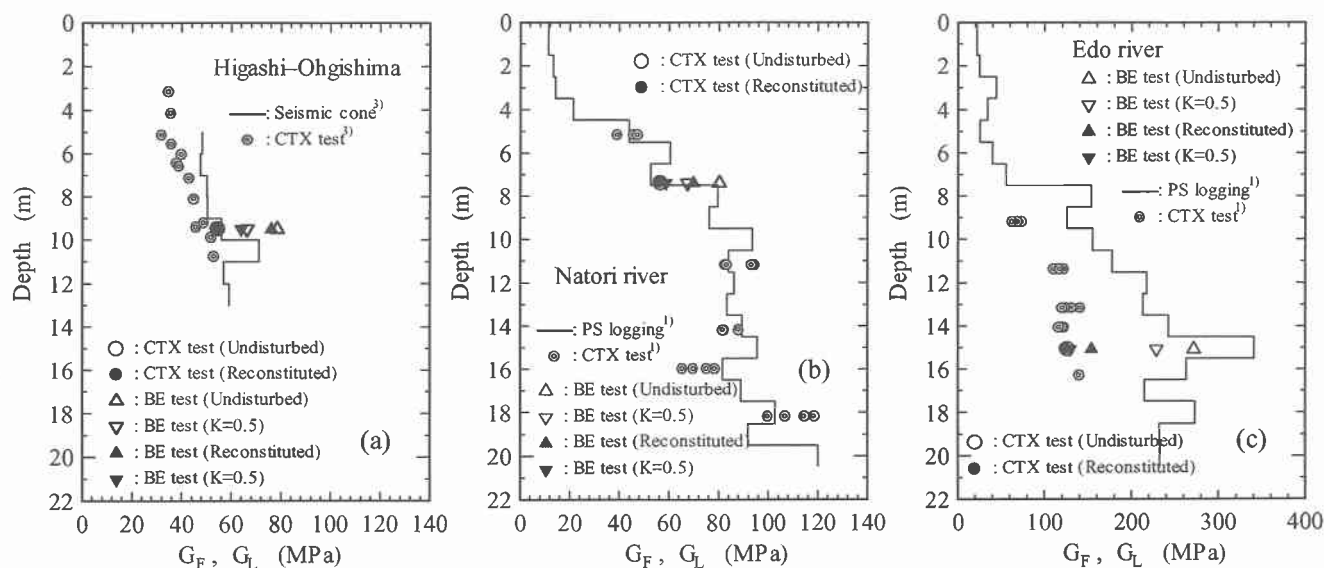


図-6 室内試験と原位置試験による初期剛性の比較 (a) 東扇島、(b) 名取川、(c) 江戸川

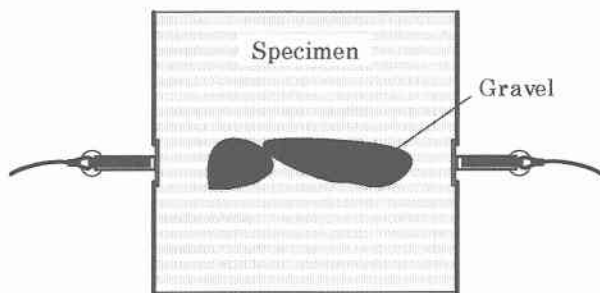


図-7 セン断波の伝播経路に礫を配置

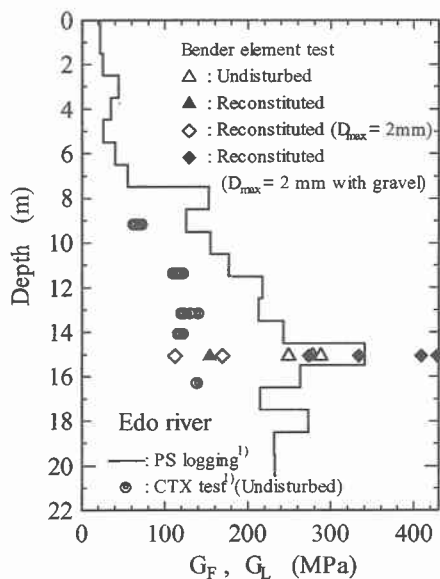


図-8 初期剛性に及ぼす礫の影響

困にばらついている。これより、原位置試験および室内試験において、礫分を含む試料から初期剛性を求める際に、室内試験においてもせん断波速度が過大評価される可能性があることや、礫の状態によっては結果が大きく異なることが分かった。

以上のことから、粗い材料を含む試料では、せん断波速度から求めた初期剛性は原位置試験および室内試験において、繰返し試験から求めた剛性よりも過大に評価される恐れがある。しかし、試料の乱れの有無や液状化強度を初期剛性から推定する場合には、原位置試験と同じせん断波速度を室内試験でも求める必要があると考えられる。

4. 結 論

原位置凍結サンプリング法で採取した不攪乱試料と再構成試料の液状化強度および初期剛性を求め比較した結果、以下のことが明らかにされた。

(1) 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その差は少なかった。この原因についてはまだ不明であるため、今後現有する他の凍結サンプリング試料も含めてさらに検討する必要がある。

(2) 沖積地盤や洪積地盤から採取した凍結サンプリング試料と、その再構成試料の試験結果は、液状化強度特

性、ベンダーエレメント試験から求めた初期剛性ともに明確な強度および剛性の低下を確認できた。したがって、このような地盤では、室内試験と原位置試験でのせん断波速度の比較から試料の乱れを評価できると考えられる。一方、埋め立て地盤のように緩く堆積した地盤では、凍結サンプリング試料と再構成試料の結果に差がほとんど生じないため、せん断波速度では乱れを評価できない可能性があり、今後さらなる検討が必要である。

(3) 古い年代に堆積した地盤ほど、セメンテーション・長期圧密・繰返し応力ひずみ履歴等の年代効果によって形成された堆積構造により液状化強度および剛性の増加が高いことが分かった。

(4) 原位置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、初期剛性を過大に評価する可能性があると考えられる。

謝 辞

今回用いた名取川および江戸川凍結サンプリング試料は旧国土交通省土木研究所動土質研究室(松尾 修 室長)から提供を受けたものである。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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): 地盤の液状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。
- 2) Tanaka et al. (2000): Small strain characteristics of soils in Hualian, Taiwan, *Soils and Foundations*, 30(3), 111-126.
- 3) Yamashita et al. (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), 117-126.
- 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), 129-142.
- 5) 山下ら(2001): 原位置試験と室内試験によるせん断波速度と液状化強度の関係, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 41, 161-168.
- 6) Lo Presti et al. (1999): Anisotropy of small strain stiffness of undisturbed and reconstituted clays, *Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Balkema, 1, 3-10.
- 7) Iwasaki & Tatsuoka (1977): Effect of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, *Soils and Foundations*, 17(3), 19-35.
- 8) Seed et al. (1982): Considerations in undisturbed sampling of sands, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 108(GT2), 265-283.
- 9) 時松ら(1985): 弾性せん断剛性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, 29-32.
- 10) Jamiolkowski et al. (1995): Remarks on stiffness at small strains of six Italian clays, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, 2, 817-836.