

凍結サンプリング試料と再構成試料の解凍・圧密時の変形特性

東京大学生産技術研究所 古関潤一
東京ソイルリサーチ 飯島正敏

1. はじめに

三軸液状化試験用の高品質な原位置試料採取法として、凍結サンプリング法が細粒分の少ない砂質地盤に適用されている。一方で、レベル2地震動を対象とした液状化判定では、細粒分の多い砂質地盤の液状化強度も適切に評価する必要がある。このような地盤は透水性が低いため、凍結時に体積膨張する間隙水が十分に排水されなくなり、凍結サンプリング法でも土粒子骨格の構造が乱れてしまうことが懸念されており、凍結時の膨張ひずみに基づいた信頼性評価手法がすでに提案されている¹⁾。しかし、凍結時の膨張ひずみを計測することは一般には容易ではない。ここでは、凍結時の乱れの程度を簡易的に評価できる手法の開発を目指した研究の一環として、凍結サンプリングした2種類の砂質試料の解凍時変形特性とその後の圧密過程における微小変形特性を、同程度の液状化強度を有する再構成供試体の変形特性と比較した結果を報告する。

2. 試験に用いた凍結サンプリング試料

宮城県名取川右岸および千葉県利根川右岸河川敷で凍結サンプリングされた2種類の試料を用いて試験を行った。それぞれの採取深度は16.25~16.85mおよび11.50~11.95mで、以下では名取川砂、利根川砂と称する。利根川砂は文献2)の対象試料と同一のものである。

凍結試料から直径5cm、高さ10cmのコア抜きを行い、冷却したマイターボックス及びストレートエッジを用いて上下端面を再整形したものを試験時の供試体として用いた。以下ではこれを凍結サンプリング供試体と称する。各試料の物性値と粒度分布を表1と図1に示す。

名取川砂はほぼ細砂分で構成されており、その中に貝殻が混ざっていることが特徴的である。ボーリング調査結果によれば試料採取深度付近では細粒分が10%前後含まれていたが、本研究で用いた試料には細粒分が1%程度しか含まれておらず、凍結サンプリングを実施した地点と原位置調査を行った地点の層構成が異なっている可能性が高い。

利根川砂も貝殻を含んだ試料であるが、6%程度の細粒分を含んでいる。ボーリング調査結果でも同様な細粒分含有率が得られており、凍結サンプリングを実施した地点と原位置調査を行った地点の層構成はほぼ同一であると考えられる。

本研究では、試験終了後の試料を炉乾燥させて再構成供試体として繰返し使用した。その際の粒子破碎の影響を名取川砂について図1に示す。5回使用した後では初期状態よりも粒度分布が若干細粒側に移動し、細粒分含有率が約2%増加した。しかし、この範囲における繰返し使用が以下の三軸試験結果へ及ぼす系統的な影響は明確には見られなかった。

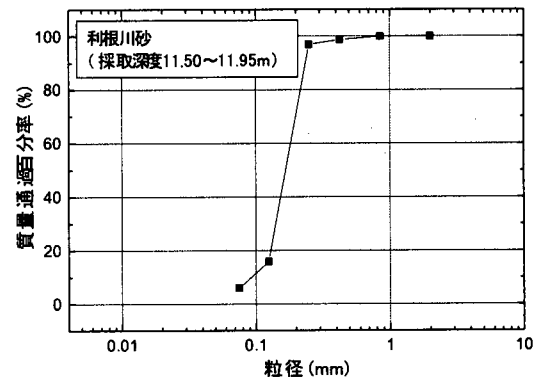
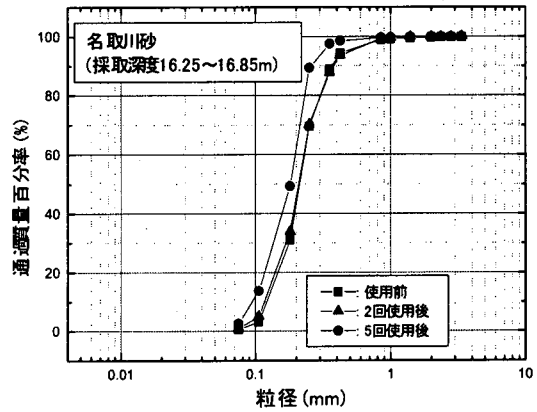


図1 試料の粒度分布

表1 試料の採取深度と物性値

	名取川砂 (16.25~16.85m)	利根川砂 (11.50~11.95m)
土粒子密度: ρ_s (g/cm ³)	2.667	2.738
乾燥密度: ρ_d (g/cm ³)	1.292~1.355	1.410~1.503
間隙比	0.928~1.062	0.822~0.942
細粒分含有率: F_c (%)	0.6	6.0
推定有効上載圧 (kPa)	140	110

キーワード 凍結サンプリング, 解凍ひずみ, 再構成供試体, 繰返し三軸試験, 微小変形特性

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所 TEL 03-5452-6421

名取川砂の再構成供試体は、凍結サンプリング供試体の乾燥密度の平均値 1.32g/cm^3 を目標値として、あらかじめ検定により得られた回数だけ所定の高さからロッドを自由落下させて乾燥状態の試料を5層に分けて突き固めるロッキング法で作製した。一方、江戸川砂の場合にはこの方法では目標乾燥密度 (1.46g/cm^3) が得られなかったため、含水比 10%の湿潤状態で10層に分けてランマーで締め固めるウェットタンピング法で再構成供試体を作製した。

3. 試験方法

三軸試験装置と再構成供試体の凍結装置³⁾の模式図を図2に示す。三軸試験では、ACサーボモーターで駆動する高精度な軸載荷装置を用いて軸ひずみ片振幅 0.001%の微小ひずみレベルでの繰返し載荷を行い、得られた軸応力~軸ひずみ関係から鉛直ヤング率を求めた。軸ひずみの測定にはLDT (Local Deformation Transducer) を用いた供試体側面での局所変位計測と、容量 2mm の非接触変位計を用いた外部変位計測 (キャップの鉛直変位計測) を併用した。単に液状化強度を求めるだけの試験では、軸載荷装置として空圧ペロフラムシリンダーを用いた。

再構成供試体を凍結させる場合には、有効拘束圧 30kPa を作用させた状態で -20°C の不凍液を銅製のペDESTAL内を循環させて供試体の底部を冷却することにより行った。その際には、 $1^\circ\text{C}\sim 10^\circ\text{C}$ に冷却した空気を循環させたデシケーター内に三軸セル全体を入れて、供試体周囲の温度を十分に下げた。凍結時には、図3に示すように軸ひずみを非接触変位計およびLDTで測定し、水平ひずみは上・中・下部に設置した計3組の非接触変位計で測定した。また、供試体側面の温度変化を赤外線式温度計で測定した。

凍結供試体 (凍結サンプリング供試体および凍結させた再構成供試体) の解凍は常温で行い、凍結時と同様なひずみ測定および温度測定を実施した。解凍後の有効拘束圧が 30kPa となるようにセル圧と背圧、軸力を調整した。

有効拘束圧 30kPa を保ったまま二重負圧法により供試体を飽和させて、B値が0.96以上であることを確認した。その後、原位置推定有効上載圧 σ_v' (名取川砂は 140kPa 、利根川砂は 110kPa) と等しい有効拘束圧 σ_0' まで等方圧密 (凍結サンプリング供試体の場合は再圧密になる) し、非排水繰返し三軸試験を行った。

再構成供試体の一部では、等方圧密後に排水状態で軸方向に一定振幅の繰返しせん断履歴を与えて、凍結サンプリング供試体と同程度の液状化強度が得られる履歴の条件について検討した。さらに、その条件下での解凍時変形特性および微小変形特性を計測し、凍結サンプリング供試体と比較した。

4. 非排水繰返し三軸試験結果

名取川砂の非排水繰返し三軸試験結果を図4に示す。凍結サンプリング供試体の場合、繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma_0' = 0.45$ で両振幅軸ひずみ ϵ_{d1} が5%となる繰返し回数は約30回であった。これと比較した場合、再構成供試体で排水繰返しせん断履歴を与えない場合の液状化強度は著しく低かった。再構成供試体に両振幅軸ひずみ $\epsilon_{d1} = 0.1\%$ (こ

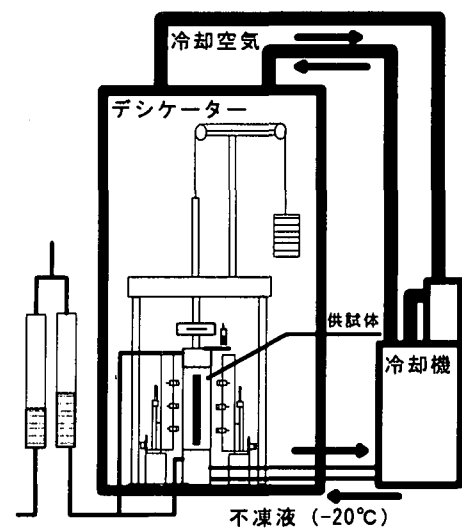
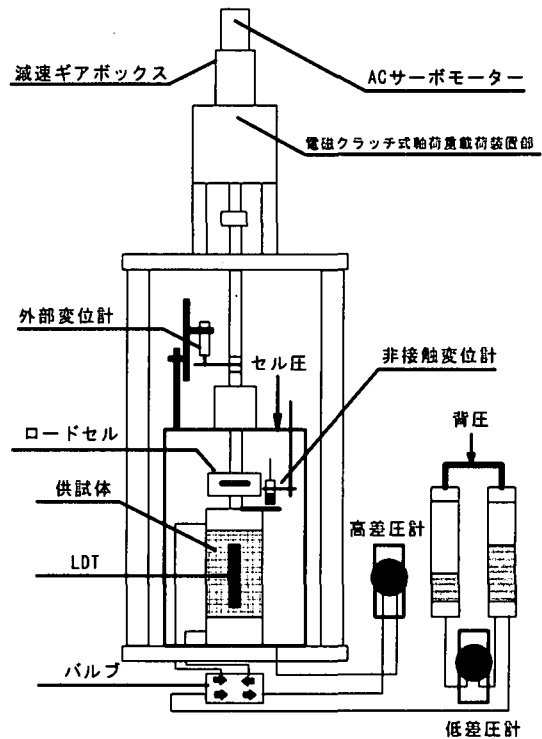


図2 三軸試験装置と再構成供試体の凍結装置

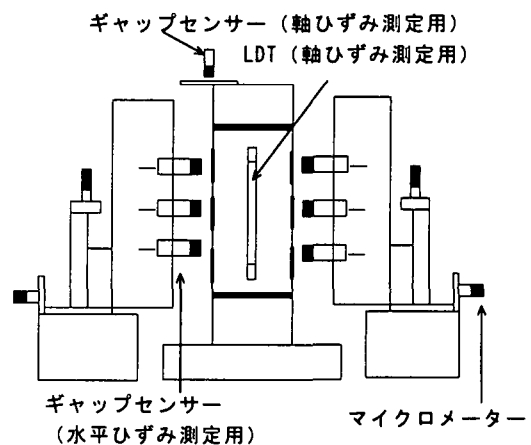


図3 凍結・解凍時におけるひずみ測定の模式図

れは片振幅軸応力 $\sigma'_a = 50\text{kPa}$ に相当する)で排水繰返しせん断履歴を与えると液状化強度が増加したが、履歴の繰返し回数を6000回から30000回まで増やしても、凍結サンプリング供試体と同じ液状化強度は得られなかった。そこで、排水繰返しせん断履歴の軸応力片振幅 σ'_a を70kPaに増やして12000回の履歴を与えたところ、凍結サンプリング供試体と同程度の液状化強度が得られた。今回の試験のように数千回以上の排水繰返しせん断履歴を与える場合、繰返し回数よりも繰返し応力振幅(またはひずみ振幅)のほうが液状化強度に及ぼす影響が大きかった。

利根川砂の非排水繰返し三軸試験結果を図5に示す。ただし、凍結サンプリング供試体の試験結果は文献2)による。この場合には、再構成供試体に軸ひずみ両振幅 $\epsilon_{DA} = 0.1\%$ で5000回の排水繰返しせん断履歴を与えると、凍結サンプリング供試体と同程度の液状化強度が得られた。

凍結サンプリング供試体の液状化強度 R_L を繰返し回数20回で両振幅軸ひずみ5%が生じる繰返しせん断応力比として、換算N値($=1.7N/(\sigma'_{v0} + 0.7)$)、ただし σ'_{v0} の単位は kgf/cm^2 との関係を文献4)による既往データと比較したものを図6に示す。名取川砂の結果は既往データの傾向とほぼ整合したが、前述したように凍結サンプリングを実施した地点と原位置調査を行った地点の層構成が異なっている可能性が高いため、この結果は参考程度にとどめる必要がある。一般に細粒分含有率が低下するとN値が増加する傾向を考慮すると、凍結サンプリング供試体の低い細粒分含有率に対応する本来のプロット位置は図示したものよりも右側に移動して、既往データよりも低めの液状化強度が得られたことになる。

一方、利根川砂の場合には、前述したように凍結サンプリングを実施した地点と原位置調査を行った地点の層構成はほぼ同一であると考えられるが、図6よりこの場合の液状化強度も既往データより低めであったことがわかる。

以上のように、凍結サンプリング供試体の室内試験で得られた液状化強度と、試料採取地点の近傍で実施した原位置試験結果の関係を検討する際には、試料の粒度などを比較することにより、対象とする層構成の整合性について十分に照査する必要がある。

5. 凍結・解凍時の変形特性

凍結サンプリング供試体および凍結させた再構成供試体の解凍終了時の軸ひずみと水平ひずみ(3箇所測定した平均値)を図7に示す。利根川砂の凍結サンプリング供試体のひずみ量は他と比べて著しく小さく、軸ひずみが0.02%程度、水平ひずみが0~0.15%の範囲であった。この場合の軸ひずみと水平ひずみの経時変化の例を図8に示す。非接触変位計で測定した軸ひずみと水平ひずみは、解凍開始直後に一旦増加してから減少する傾向を示した。なお、LDTで測定した軸ひずみは解凍直後に伸張側の値を示したが、これはLDT自体の温度変化の影響を受けたためと考えられたため、

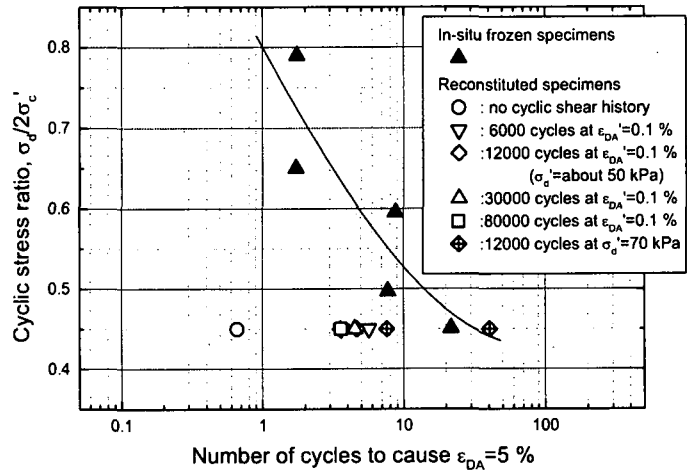


図4 名取川砂の三軸液状化試験結果

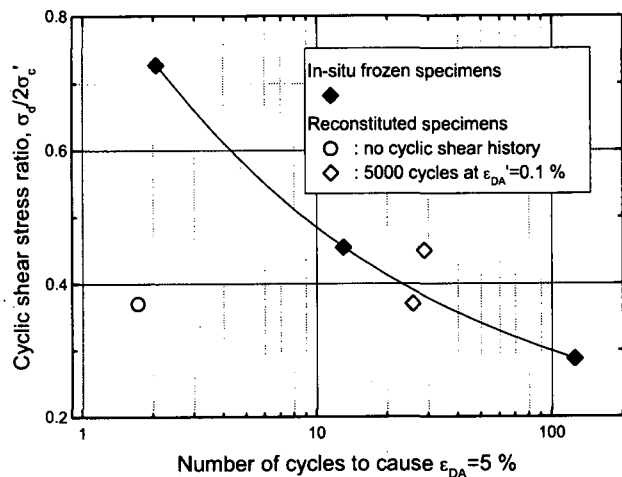


図5 利根川砂の三軸液状化試験結果
(凍結サンプリング供試体の結果は文献2)による)

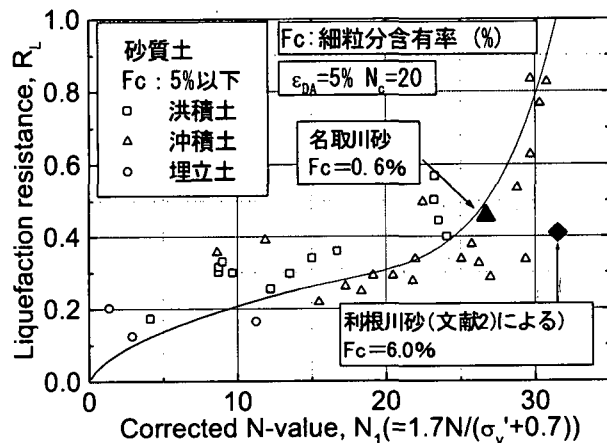


図6 換算N値と凍結サンプリング供試体の液状化強度の関係(松尾ら⁴⁾に加筆)

図7のプロットには採用しなかった。温度変化の影響の補正方法や、凍結・解凍時のベディングエラーの影響について、今後検討する必要がある。

利根川砂の再構成供試体の圧密後に軸ひずみ両振幅 $\epsilon_{DA}'=0.1\%$ で5000回の排水繰返しせん断履歴を与えた場合、その後有効拘束圧30kPaに戻してから凍結させて、凍結サンプリング供試体と同じ条件で解凍すると、図7より軸ひずみが0.2%程度、水平ひずみは-0.05%程度(伸張側)生じた。前述したように、このような排水繰返しせん断履歴を与えることにより凍結サンプリング供試体と同程度の液状化強度が得られたが、解凍時の変形特性はかなり異なっていた。

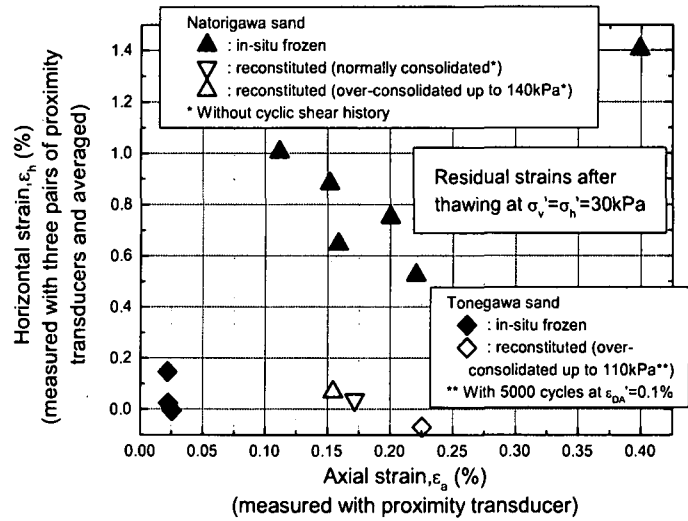


図7 凍結サンプリング供試体と再構成供試体の解凍終了時ひずみ量

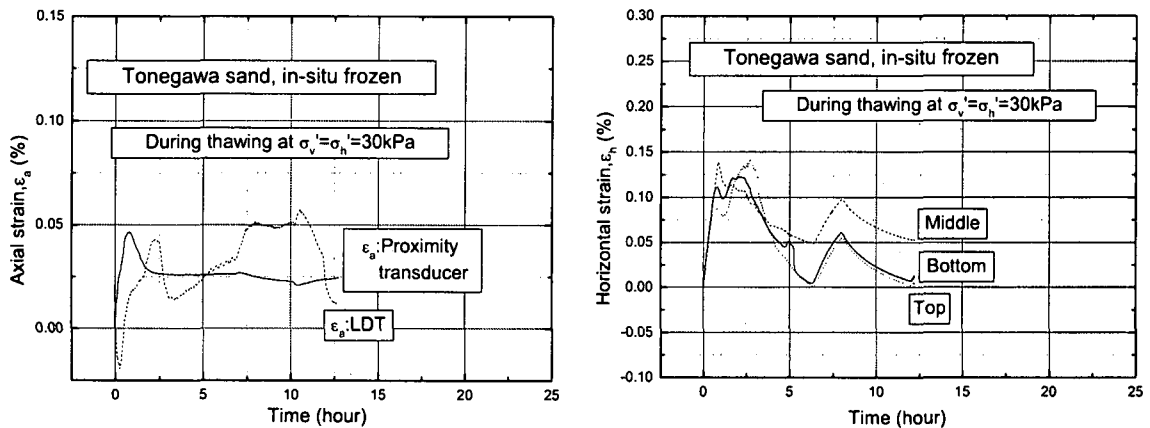


図8 解凍ひずみの経時変化の例(利根川砂凍結サンプリング供試体)

上記の利根川砂再構成供試体の凍結時に生じたひずみの経時変化を図9に示す。供試体の下部から凍結させたため、水平ひずみは下部から順に伸張側に増加した。水平ひずみはその後減少する傾向を示し、凍結開始後90時間における値は0~-0.05%(伸張側)の範囲であった。一方、軸ひずみは水平ひずみよりもはるかに大きな値が伸張側に生じ、非接触変位計による測定値は-0.6%を超えてオーバースケールしてしまった。なお、LDTによる軸ひずみの測定値は、凍結開始後30時間以降は-0.2%程度でほぼ一定の値を示したが、図中にも示したようにそれ以前の段階で供試体側面の温度が急激に変化しているため、前述したLDT自体の温度変化の影響について補正を行う必要がある。

図7より、名取川砂の凍結サンプリング供試体では、他とは傾向の異なる一供試体を除くと、解凍時の軸ひずみは0.1~0.2%程度、水平ひずみは0.5~1.0%程度で、水平ひずみのほうが大きく生じた。一方、名取川砂の再構成供試体では、凍結前に等方圧密の履歴を与えた場合と与えない場合

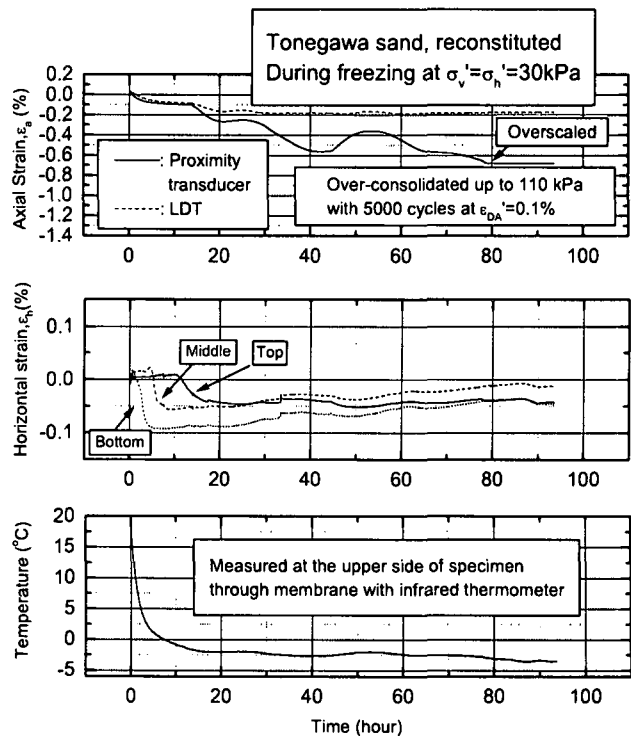


図9 凍結ひずみの経時変化の例(利根川砂再構成供試体)

の2ケースについて計測を行ったが、解凍時の水平ひずみはいずれも0.1%以下で、軸ひずみ(0.15%程度)よりもかえって小さかった。原位置ではほぼ水平方向に凍結が進行して排水も行われたと考えられるのに対して、今回用いた再構成供試体では軸方向にこれらの現象が生じたことが、解凍時の変形挙動の違いにも影響を及ぼしていることが考えられる。凍結速度や凍結時の拘束圧の影響も含めて、今後も検討を継続する必要がある。

なお、Goto⁹⁾の結果に基づけば、凍結時膨張ひずみが0.7%程度を超えると試料の健全度が低下し始めることから、図11に示した名取川砂の再構成供試体は、凍結による乱れの影響を受けた可能性が考えられる。凍結・解凍履歴が液状化強度に及ぼす影響については今回の試料に対しては検討していないため、今後はこの点も含めて、解凍ひずみと凍結ひずみの相関関係や、解凍ひずみに基づいて試料の乱れの評価を行う可能性について、検討をすすめる予定である。

6. 等方圧密時の微小変形特性

名取川砂の凍結サンプリング供試体を等方圧密する過程で測定した、微小ひずみレベルにおける鉛直ヤング率の応力状態依存性の例を図10に示す。供試体間での間隙比の違いの影響や圧密中の間隙比変化の影響を補正するために、排水状態および非排水状態で測定した鉛直ヤング率 E_v および E_{vu} を図中に示した間隙比の関数 $f(e)$ で除して示した。両対数軸上では測定時の有効拘束圧との間にほぼ直線関係が得られ、その勾配を示す m の値は0.56であった。

名取川砂の再構成供試体における同様な測定結果の例を図11に示す。図10と比較すると、 m の値は約0.5でありあまり変わらないものの、低拘束圧側では再構成供試体の $E_{vu}/f(e)$ および $E_v/f(e)$ のほうが凍結サンプリング供試体よりも大きかった。しかし、次に述べるように、これらの関係は異なる供試体間でのばらつきの影響を大きく受ける。

図12に、名取川砂の各供試体の圧密終了時(有効拘束圧140kPa)における $E_{vu}/f(e)$ と、再構成供試体に排水繰返しせん断履歴を与えた場合の $E_{vu}/f(e)$ の変化を示す。ただし、この図のみ $E_{vu}/f(e)$ の表示が対数軸でないことに留意されたい。圧密終了時における $E_{vu}/f(e)$ は繰返し回数0の位置に示したが、特に凍結サンプリング供試体では値が大きくばらつき、再構成供試体と比較してどちらの $E_{vu}/f(e)$ が大きいかは明確には判断できなかった。また、再構成供試体に排水繰返しせん断履歴を与えると載荷回数の増加に伴い $E_{vu}/f(e)$ が増加したが、その増加傾向は供試体によって異なった。これらの点について今後の検討が必要である。

なお、原位置の試料採取深度付近で実施したPS検層ではS波速度213~223m/secが得られており、これをせん断剛性率 G_{vh} に換算すると約90MPaとなる。前述した m の値が0.5程度であることを考慮して G_{vh} が $(\sigma'_v \cdot \sigma'_h)^{m/2} = (\sigma'_v \cdot \sigma'_h)^{0.25}$ に比例すると仮定し、また、原位置での静止土圧係数 $K_0 (= \sigma'_{h0} / \sigma'_{v0})$ が0.5であったと仮定すると、140kPaの等方応力状態に換算した G_{vh} は約107MPaとなる。さらに、異方性の影響を無視して非排水ポアソン比を0.5と仮定し、凍結サンプリング供試体の圧密終了時の $f(e)$ の平均値(=約0.71)を用いて上

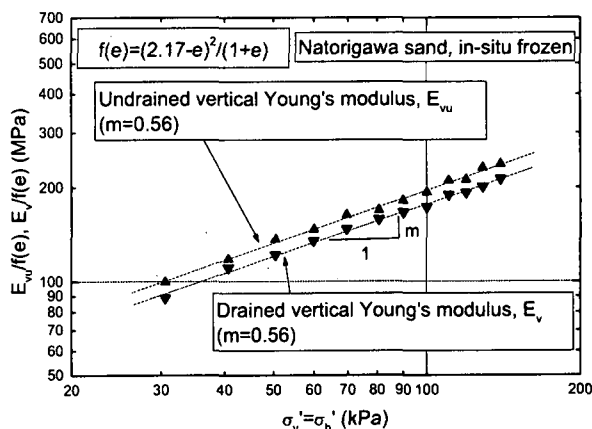


図10 名取川砂凍結サンプリング供試体の鉛直ヤング率の例

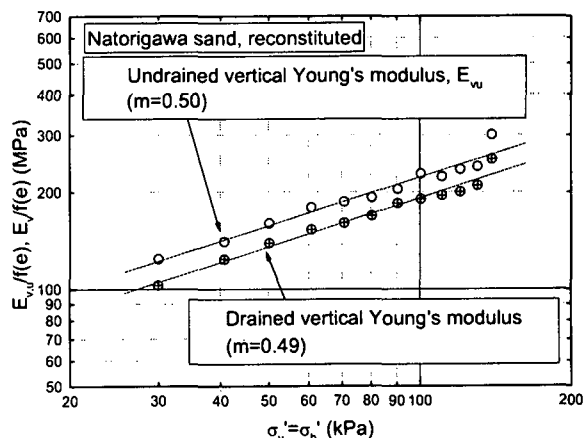


図11 名取川砂再構成供試体の鉛直ヤング率の例

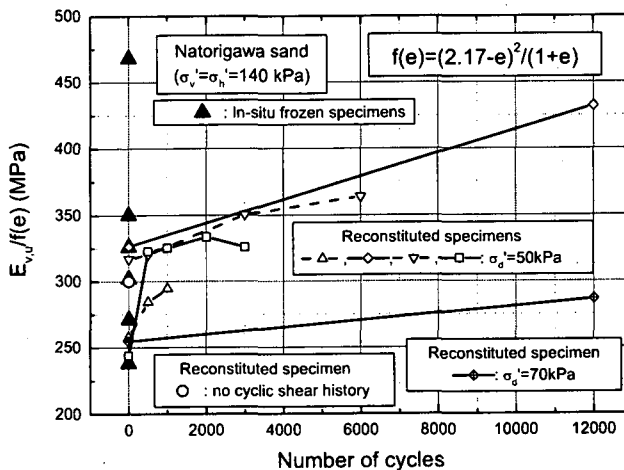


図12 名取川砂の圧密終了時の非排水鉛直ヤング率の比較

記の等方応力状態での G_{vh} の値を $E_{vw}/f(e)$ に換算すると約 450MPa となる。この換算値は図 12 に示した三軸試験結果の上限値に近く、凍結サンプリング供試体の $E_{vw}/f(e)$ の値は 1 例を除いて PS 検層結果からの換算値の 50～80% 程度であった。

利根川砂の場合、原位置の試料採取深度付近で実施した PS 検層では S 波速度 230～240m/sec が得られている。上記と同様な仮定のもとで $f(e)$ の平均値のみ 0.89 に変更し、110kPa の等方応力状態での $E_{vw}/f(e)$ に換算すると約 480MPa となる。一方、今回実施した三軸試験結果は図 13 となり、対応する $E_{vw}/f(e)$ は半分以下の値であった。ただし、三軸試験の本数が凍結サンプリング供試体も再構成供試体も各 1 本と限られている点に留意する必要がある。

以上の比較においては、PS 検層が動的な測定であるのに対し、三軸試験では微小変形特性を静的に測定していることにも留意する必要がある。堀ら⁹⁾は、同一供試体の三軸試験で動的および静的に測定した微小変形特性を比較し、静的な測定による剛性のほうが低くなることを報告している。今回の三軸試験でも S 波速度の計測も実施した⁷⁾が、その後の検討により測定精度に問題がある可能性が判明した。今後は、原位置と室内での S 波速度の比較や、これらの動的な計測値から換算した微小変形特性と静的な測定により得られた値の比較などについて、継続して検討する予定である。

7. まとめ

2 種類の凍結サンプリング試料を用いた検討結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 凍結サンプリング供試体と同じ密度となるように作製した再構成供試体に両振幅軸ひずみ 0.1% 程度で排水繰返しせん断履歴を数千回以上与えることにより、凍結サンプリング供試体と同程度の液化化強度が得られた。これに必要な履歴条件は試料によって異なり、繰返し回数よりも応力振幅(またはひずみ振幅)の影響のほうが大きかった。
- 2) 1) の条件で排水繰返しせん断履歴を与えた場合でも、凍結させた再構成供試体の解凍時の変形特性は凍結サンプリング供試体とかなり異なっていた。原位置ではほぼ水平方向に凍結が進行して排水も行われたと考えられるのに対して、今回用いた再構成供試体では軸方向にこれらを行ったことが、このような解凍時の変形挙動の違いに影響を及ぼしていることが考えられ、凍結速度や凍結時の拘束圧の影響も含めて、今後も検討を継続する必要がある。
- 3) 等方圧密する過程で静的に測定した微小変形特性の応力状態依存性の定性的な傾向は、凍結サンプリング供試体と再構成供試体の間であまり違いはなかった。間隙比の違いの影響を補正した非排水鉛直ヤング率 $E_{vw}/f(e)$ の値は、特に凍結サンプリング供試体で大きくばらつき、再構成供試体の値との間の大小関係は明確には判断できなかった。動的な測定である PS 検層結果からの換算値は、今回の三軸試験における静的測定結果の上限値に近く、名取川砂の三軸試験結果の多くは PS 検層結果からの換算値の 50～80% 程度となり、利根川砂では半分以下の値となった。

謝辞

本研究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(当時)のご好意によりご提供いただいた。ここに記して深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 後藤茂, 田地陽一(1999): 細粒分を含む砂地盤に対する原位置凍結サンプリングの信頼性の評価, 土木学会論文集, No. 631/III-48, pp. 119-158.
- 2) 浦野泉ら(1998): 凍結サンプリングされた砂質土の液化化過程における弾性的変形特性の変化, 土木学会第 53 回年講第 3 部門, pp. 218-219.
- 3) 飯島正敏ら(2001): 凍結サンプリングされた砂質試料の融解・凍結時の変形特性, 土木学会第 56 回年講第 3 部門, pp. 152-153.
- 4) 松尾修, 村田健司(1997): 砂質土の試料採取法による液化化抵抗の違い, 第 32 回地盤工学会, pp. 711-712.
- 5) Goto, S. (1993): Influence of a freeze and thaw cycle on liquefaction resistance of sandy soils, Soils and Foundations, Vol. 33, No. 4, pp. 148-158.
- 6) 堀智仁ら(2002): 凍結サンプリング試料と再構成試料の初期剛性と液化化強度, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp. 521-522.
- 7) 飯島正敏ら(2002): 凍結サンプリング試料と再構成試料の液化化特性と変形特性の比較, 第 37 回地盤工学会, pp. 525-526.

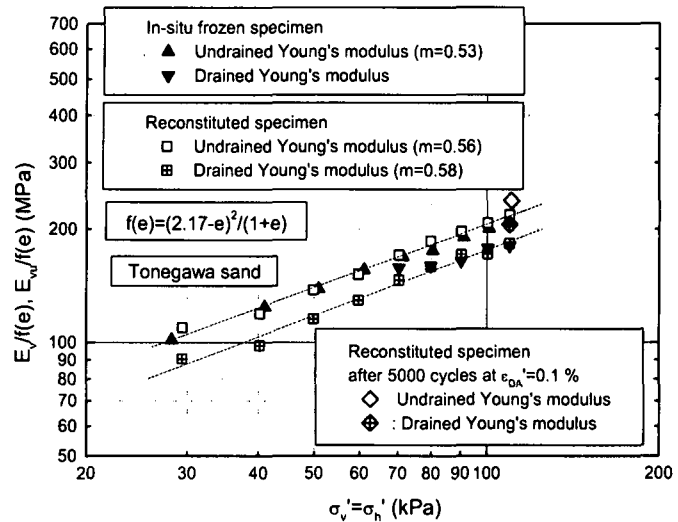


図 13 利根川砂の鉛直ヤング率
(凍結サンプリング供試体および再構成供試体)