

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

後藤 茂¹・田地陽一²

¹正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

²正会員 工修 同 (同)

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検討方法を提案した。細粒分を含む地盤では凍結・融解により採取試料の液状化強度が影響を受けることが懸念されていたが、凍結融解による液状化強度の変化は凍結時の試料の膨張ひずみと一意的な関係があることが明らかにされた。今回提案する検討方法はその関係に原位置で試料が経験した凍結膨張ひずみを対比させることを主体にしており、原位置で経験した膨張ひずみの評価は熱伝導解析による凍結速度の推定や凍結膨張試験による試料の凍結膨張性の推定および地盤内応力と凍結膨張ひずみの連成解析からなっている。また、実際に行われた細粒分を含む地盤での原位置凍結サンプリングに対して上記の品質評価をおこなった事例も示した。

Key Words: liquefaction, sampling, freezing, freeze-thaw, quality evaluation

1. はじめに

砂質土地盤の液状化強度は主に二通りの方法で推定されている。その一つは原位置試験結果から液状化強度を推定する方法であり、標準貫入試験のN値と液状化強度の関係がよく用いられている。この関係は多くの地震による液状化事例をもとに検証・改良されてきたものであり、N値の比較的小さい範囲での信頼性は低くない。しかし、標準貫入試験自体が地震時の地盤の液状化を再現するものでなく、N値の高い範囲での事例が欠落していること、力学的意味が不明確であること等から液状化検討結果に関して微妙な判断が求められる場合や検討対象が重要構造物である場合等では、より詳細な検討方法が必要とされる。

もう一つの液状化強度の推定方法は、地盤から採取した不攪乱試料を用いて非排水繰返しせん断試験を行う方法である。非排水繰返しせん断試験は、せん断に伴って発生する過剰間隙水圧が累積し、有効拘束応力が失われ破壊に至るという点で地震時の砂地盤の状態を再現するものであり、液状化に至る過程や液状化後の沈下等を検討することも可能である。しかし、この方法では、不攪乱試料が原位置の地盤の液状化特性を具備していることが必要不可欠

であり、採取試料の特性が原位置地盤のものと異なるるとき、言い換えるなら採取により試料の乱れが生じている場合には検討結果の信頼性が失われる。

砂の液状化特性は各種の要因によって変化の生じやすい特性である。Seedらりはブロックサンプルに比較してチューブサンプルの試料は液状化強度が低下することを示しており、事前にせん断を加えると液状化強度が変化することを明らかにした研究^{2),3)}や、同じ砂を用いた同密度の供試体でも作製方法により液状化強度が異なることを示した研究⁴⁾などもある。これらの研究は砂の液状化強度が粒度や密度だけでなく微視的な骨格構造等の影響を受けて変化することを示すものであり、地盤の液状化強度評価のためには微視的な骨格構造をも変化させない高品質な不攪乱試料採取方法の必要性を示唆している。

細粒分を含まない飽和砂地盤に対しては原位置凍結サンプリングの有効性が認識されている。この方法は地盤を凍結させることにより固結強度を上昇させ、試料の採取や運搬および供試体成形による乱れを防ぐものである。したがって、この方法では凍結により上昇した固結強度が十分に高いことと、凍結・融解により試料の液状化特性が変化しないことが必要である。試料採取時の凍結地盤の固結強度について定量的に議論された研究はほとんどないが、

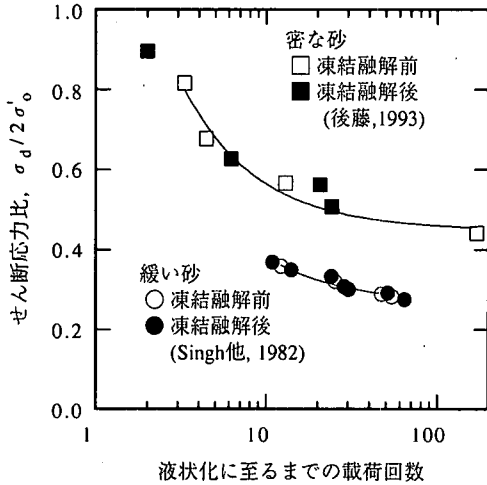


図-1 細粒分を含まない砂の凍結融解前後の液状化強度の比較

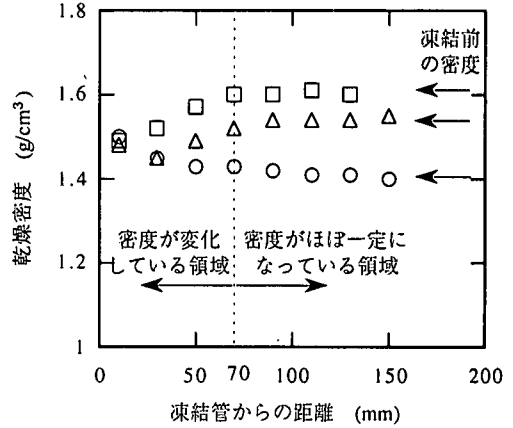


図-2 凍結試料密度の水平方向分布 (大型室内試験)⁶⁾

実際の凍結サンプリング結果に関する多くの報告から凍結サンプリングを行う凍結地盤の温度範囲では凍結による固結強度が上記乱れを抑止するのに十分であることが実証されている。一方、凍結融解による影響に関しては、細粒分を含まない砂地盤では排水を許しながら凍結を行うことにより影響が避けられることが知られているが、細粒分を含む砂地盤では排水を許した状態の凍結でも凍結膨張ひずみが生じる場合があるため、採取試料の液状化強度に影響を与えることが懸念されている。

細粒分を含む砂地盤の液状化は近年湾岸の埋立地等で問題になっており、千葉県東方沖地震や釧路沖地震、ロマプリエタ地震等でも細粒分を含む砂地盤の液状化が報告されている。したがって、湾岸地域の開発を進めている昨今では細粒分を含む砂地盤の液状化強度評価方法の重要性が増加している。

本研究では原位置凍結サンプリング法を細粒分を含む砂地盤に適用したときの問題点を検討し、凍結・融解が試料の液状化強度に与える影響に着目した採取試料の品質評価手法を提案した。また、実際に行った細粒分を含む地盤での凍結サンプリングにおいて上記の品質評価をおこなった事例も示した。

2. 細粒分を含まない砂地盤に対する原位置凍結サンプリングの有効性

(1) 原位置凍結サンプリングの健全性

原位置凍結サンプリングは既に砂地盤の液状化強

度の推定に用いられている方法であり、細粒分をほとんど含まない砂地盤に対するサンプリングの基礎的な項目についてはSeedら⁵⁾、吉見ら⁶⁾、後藤⁷⁾などの研究により明らかにされている。例えば、図-1は細粒分を含まない砂試料の凍結融解前後の液状化強度を比較したものであり^{5),7)}、試料は事前に排水条件下の繰返しせん断履歴(動的せん断履歴)を加えて液状化強度を上昇させてある。図から明らかなように、密な砂と緩い砂ともに排水を許した凍結融解によつては液状化強度が変化していない。図-2は原位置凍結サンプリングで採取したきれいな砂試料の密度の水平方向分布を示したものである⁶⁾。凍結管近傍は凍結管の設置等に起因した乱れにより密度が変化しているものの、凍結管から多少離れば試料は凍結前の密度程度になっており、この部分を液状化試験に用いればよいことが分かる。

(2) チューブサンプリングとの比較

図-3は原位置凍結サンプリングにより採取された試料(以降では凍結サンプルと呼ぶ)と通常チューブサンプリングにより採取された試料(以降ではチューブサンプルと呼ぶ)の液状化強度を比較したものであり⁸⁾、凍結サンプルの液状化強度(15回の繰返しせん断で両振幅軸ひずみが5%になるせん断応力比)と地盤の応力換算N値であるN1値との関係を実線で示し、チューブサンプルの同様の関係を破線で示した。チューブサンプルの液状化強度はN1値が10以下では凍結サンプルの液状化強度より高く、N1値が高くなると凍結サンプルに比較して著しく液状化強度が低くなる。全体的にチューブサンプルはN1値の変化に対する液状化強度の変化が少なく、このような傾向は地震時に液状化を生じた

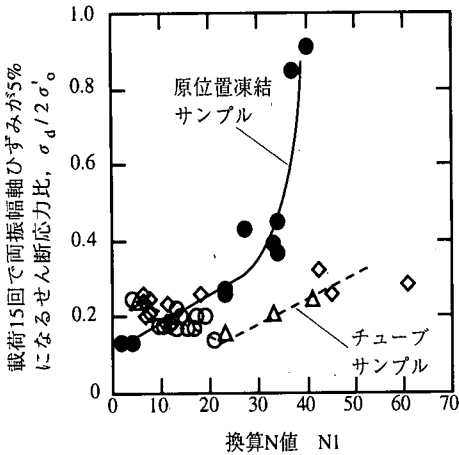


図-3 原位凍結サンプルとチューブサンプルの液状化強度と換算N値の関係⁹⁾

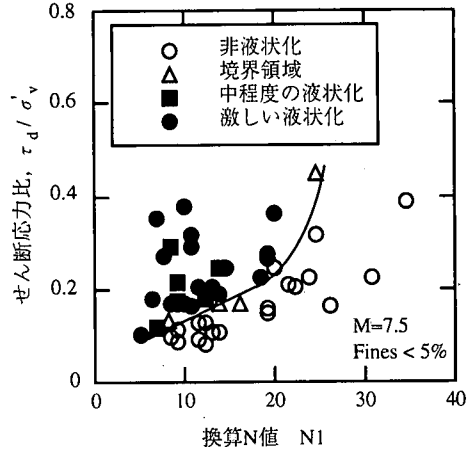


図-4 地震時液状化事例に基づくせん断応力比と換算N値の関係⁹⁾

地盤の実例などとは整合しにくいものである。

図-4 は実地震による液状化発生の有無を地盤に作用したせん断応力比とN 1 値の関係で示したものであり、図中の曲線は図-3 に示した凍結サンプルの載荷回数15回の液状化強度を原位の液状化強度に換算して示したものである⁹⁾。図から明らかなように、凍結サンプルの液状化強度とN 1 値との関係は実地震による液状化発生の有無の境界をよく示している。

3. 細粒分を含む砂地盤に対する原位凍結サンプリングの有効性

(1) 細粒分を含む地盤での問題点

細粒分を含まない砂の原位凍結サンプリングでは凍結による固結強度によって試料の採取や運搬および供試体の成形作業での試料の乱れを防げることが実証されており、細粒分を含む砂地盤でも同程度の固結強度が得られれば上記過程による乱れの生じる可能性は極端に低くできることになる。図-5 は原位で凍結した砂質土と粘性土の一軸圧縮強さと供試体の温度の関係を示したものである¹⁰⁾が、細粒分を含む砂でも十分温度が低ければ軟岩レベルの大きな固結強度を持つため、上記の過程における乱れの生じる可能性を抑制することができる。

一方、細粒分を含む砂では凍結時に膨張ひずみを生じる可能性があることが知られている¹¹⁾。先に述べたように、試料の液状化強度は事前にひずみ履歴を受けると変化するという研究結果²⁾もあり、細粒分を含む地盤での原位凍結サンプリングの信頼性

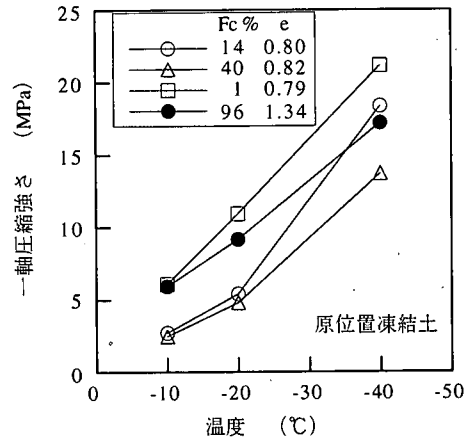


図-5 原位凍結土の強度と温度の関係¹⁰⁾

は凍結膨張を経験することによる液状化強度の変化が重要な論点になる。

(2) 試料の液状化強度と凍結膨張の関係

細粒分を含む砂の液状化強度に対する凍結融解の影響を定量的に検討した例は少ないが、健全度 (Sample quality index) と呼ぶ凍結融解による試料の液状化強度の変化を示す指標を導入することにより、凍結融解による液状化強度の変化を定量的に明らかにした研究がある⁷⁾。健全度とは、図-6 に示すように、凍結融解前に供試体に施した動的せん断履歴 (排水条件下の繰返しせん断履歴) による液状化強度の上昇分が凍結融解後にどの程度残されているかを示すものであり、健全度が1.0であれば液状化強

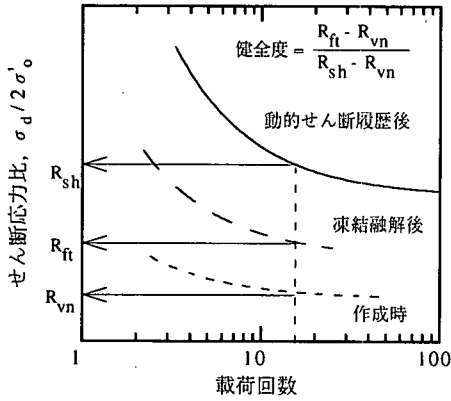


図-6 凍結融解前後の試料の液状化強度変化を示す健全度の求め方

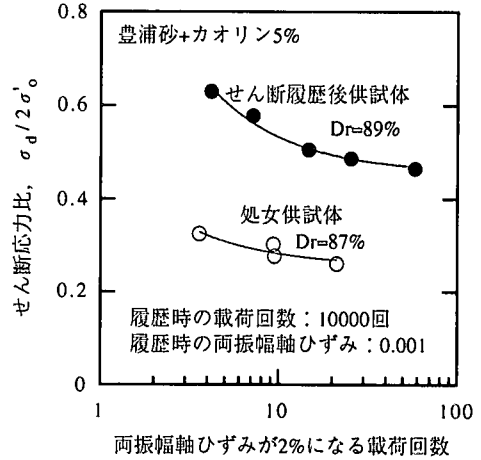


図-7 動的せん断履歴による試料の液状化強度の上昇

度は凍結融解により変化しなかったことを示す。

供試体に動的せん断履歴を加えているのは微視的な骨格構造の安定性が高い状態を攪乱供試体で再現するためであり、図-7に示すように両振幅軸ひずみが 1×10^{-3} 程度のせん断を1万回加えることにより試料の液状化強度は2倍程度に上昇している。この過程における供試体の密度変化は相対密度で数%の増加でしかなく、試料の液状化強度の上昇は微視的な骨格構造の安定化によるものだと考えられる。

図-8は細粒分の種類や量および凍結時の拘束圧を変化させたときの砂質土試料の健全度を凍結時の膨張ひずみとの関係でプロットしたものであり、両者には一意的な関係が見られる。凍結時の体積ひずみが 7×10^{-3} 以下では液状化強度は変化しておらず、凍結融解の液状化強度に与える影響に関しては凍結膨張が生じたか否かの判断ではなく、どの程度の凍結膨張が生じたかの定量的な議論が必要であることを示している。また、この研究は微視的な骨格構造の安定による液状化強度を扱っているため、比較的液状化強度の高い地盤が主たる対象と考えられるが、後に述べる沖積地盤の事例でも同様の液状化強度特性があらわれており、埋立直後の極めて緩い地盤のようなものを除けば同様の検討が可能であると考えられる。

(3) 凍結膨張ひずみを支配する要因

土が凍結するとき排水が許されないと間隙水の氷への変態に伴って生じる9%の体積膨張が原因となって土の凍結膨張が生じるが、通常の地盤凍結は比較的ゆっくりとした現象であるため、砂地盤のように透水性の良い地盤では一次的に凍結させることにより相変化に伴う体積膨張分の間隙水を排除し

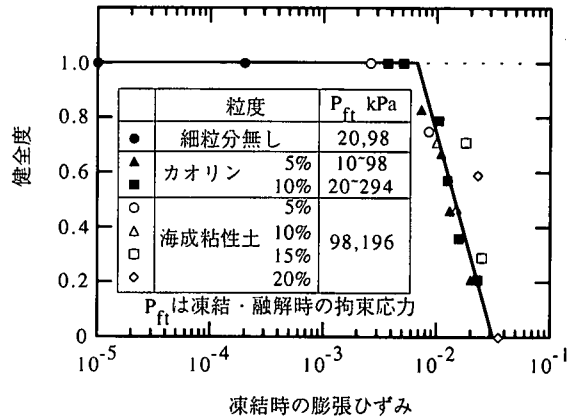


図-8 凍結融解による試料の液状化強度変化を示す健全度と凍結時の膨張ひずみの関係

ながら凍結させることができる。一方、細粒分を含む地盤では吸排水が自由に行える凍結でも膨張を生じる場合があり、原位置凍結サンプリングの適用性の検討のためにはこちらの方が問題になる。

土の凍結膨張特性を凍結時の外的要因で定式化したものに高志らの研究¹¹⁾がある。これは多くの土を吸排水自由な状態で一次的に凍結した試験結果をもとに凍結膨張ひずみを拘束圧と凍結速度をパラメータとした式(1)で表したものである。

$$\varepsilon_f = \varepsilon_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma'_n} \left(1 + \sqrt{\frac{V_0}{V}} \right) \quad (1)$$

ここで、 ε_f は凍結膨張ひずみ、 σ'_n は拘束応力、 V は凍結速度、 $\varepsilon_0, \sigma_0, V_0$ は土固有の定数である。

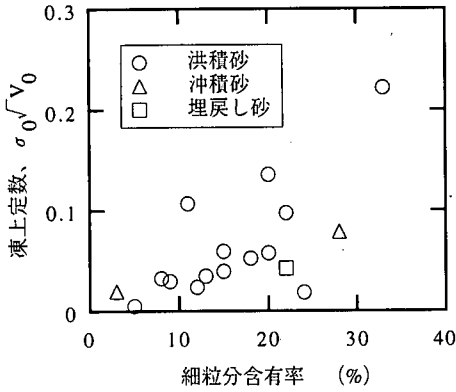


図-9 凍結膨張性を示す定数と試料の細粒分の関係¹⁰⁾

土の凍結膨張のしやすさは式(1)の定数 $\epsilon_0, \sigma_0, V_0$ によって表されるため、検討をおこなう試料毎に定数 $\epsilon_0, \sigma_0, V_0$ の値を求める必要がある。

図-9は凍結膨張性を示す式(1)の定数と試料に含まれる細粒分含有率の関係を示したものであり¹²⁾、細粒分が増えると凍結膨張性が高くなる傾向が表れているが、両者の関係にはかなりのバラツキがある。したがって、現状では凍結膨張ひずみの拘束圧依存性や凍結速度依存性は式(1)で表現できるが、試料の凍結膨張性を示す定数は試料を凍結させて測定すること以外では推定値に誤差が生じると考えねばならない。

(4) 細粒分を含む砂地盤での凍結サンプルの信頼性の検討手順

これまでの検討で明らかになったように、凍結サンプリングにより細粒分を含む砂地盤から試料を採取した場合に、試料の液状化強度が原位置のものから変化するか否かは試料が経験した凍結膨張ひずみと密接な関係がある。従って、原位置で凍結時に地盤に生じた凍結膨張ひずみを推定することにより採取された試料の健全性を検討することができる。

図-10は今回提案する検討手順のフローを示したものであり、基本的には原位置で地盤に生じた凍結膨張ひずみを推定し、試料の健全度と膨張ひずみの関係と対比することにより試料の健全性を検討するものである。具体的な手順としては液状化強度を求める供試体と同じサンプルから切り出した試料をいったん融解し、室内凍結膨張試験を行って凍結膨張特性を求める。室内凍結膨張試験は標準化されたものはないが、吸排水が自由な状態で凍結・融解できること、一次的に凍結できること、試験時の拘

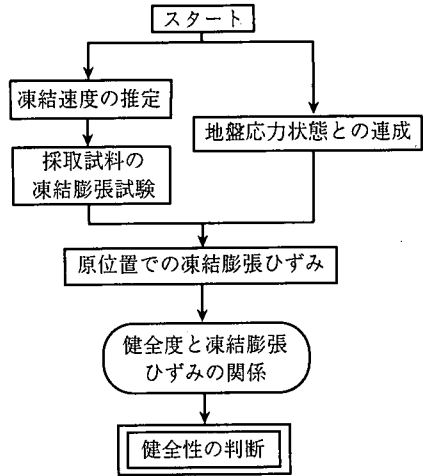


図-10 試料の健全性の検討手順

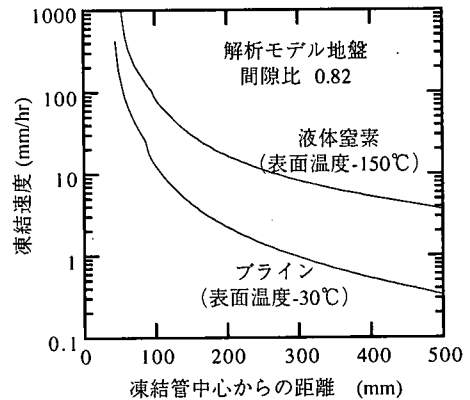


図-11 砂地盤の凍結速度の解析結果例

束応力を一定に保てること等が必要である。また、試験時の凍結速度を原位置で地盤が凍結する時の値と同程度にすることにより式(1)の凍結速度の影響を除去することができる。

地盤が凍結するときの凍結速度については試料の密度等から求まる熱定数を用いて熱伝導解析を行うことにより容易に求めることができる。図-11は液体窒素またはブラインにより地盤を冷却したときの凍結速度の解析値と凍結管からの距離の関係を示したものであり、凍結管から離れるにしたがい、距離に関する凍結速度の変化が小さくなっている。したがって、原位置凍結サンプリングで実施した地盤の凍結速度は冷却方法を考慮して熱伝導解析を行い、試料の採取位置での値を用いることが望ましいが、多少の位置の違いによる

凍結速度の相異は小さいと考えて良い。通常の凍結サンプリングによる凍結土柱の大きさが $\phi 1\text{ m}$ 程度であることを考えれば、液体窒素を用いて急速に冷却する場合で 10 mm/h 程度、 -30°C 程度のブラインを用いる場合で 1 mm/h 程度の凍結速度を用いることが妥当であろうと考えられる。

多くの場合、 ε_0 の値は無視し得るほど小さいので、式(1)に凍結速度の値を代入すると拘束圧だけの関数になり、凍結管から同心円状に凍結が進む場合は水平方向の応力 σ'_r を用いて式(2)で表せる。

$$\varepsilon_{fr} = \frac{\alpha}{\sigma'_r} \quad (2)$$

ここで、 ε_{fr} は凍結進行方向の凍結膨張ひずみである。水平方向の応力 σ'_r としては静止土圧および凍結膨張に対する未凍結側地盤の反力が作用するので σ'_r は式(3)のように表せる。

$$\sigma'_r = K_0 \sigma'_v + \Delta\sigma'_r \quad (3)$$

ここで、 K_0 は静止土圧係数、 σ'_v は有効鉛直応力、 $\Delta\sigma'_r$ は凍結に対する地盤反力である。

地盤を等方弾性体と仮定すれば凍結膨張に対する未凍結地盤の反力 $\Delta\sigma'_r$ は式(4)で示すように膨張ひずみ ε_{fr} の関数になる。

$$\Delta\sigma'_r = \frac{E}{1+\mu} \varepsilon_{fr} \quad (4)$$

ここで、 μ と E はそれぞれ地盤のポアソン比と変形係数である。

これらの式を用いて拘束圧 σ'_r を消去すると原位置での凍結膨張ひずみを示す式(5)が得られる。

$$\varepsilon_{fr} = \left(\frac{1+\mu}{2E} \right) \left(\sqrt{(K_0 \sigma'_v)^2 + \frac{4E\alpha}{1+\mu}} - K_0 \sigma'_v \right) \quad (5)$$

式(5)により求まる原位置での凍結膨張ひずみを図-8の試料の健全度と膨張ひずみの関係に参照することにより、試料の液状化強度が凍結融解によって影響を受けたか否かを判断することができる。

また、凍結試料の融解時に生じる収縮ひずみが凍結時の膨張ひずみと等しいとして試料の品質を判断することも考えられる¹³⁾。このような判断は凍結融解による残留ひずみが凍結膨張ひずみに比較して著しく小さい場合にのみ成立するが、凍結融解による残留ひずみは凍結時に凍結面で発生する吸水力に起因した未凍結側の土の圧密ひずみが主であることから、圧密によるひずみが小さい土では成立する可能

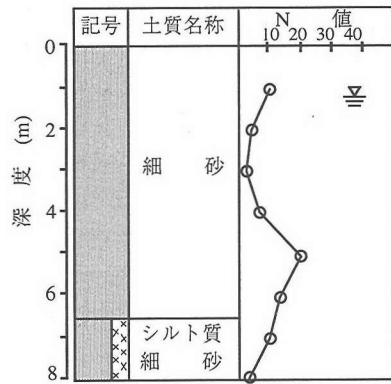


図-12 サンプリング実施地点の土質柱状図

性が高い。

一方、図-8の健全度と凍結膨張ひずみの関係において健全度が1.0以下になった場合でも両者に直線的な関係が見られることから、凍結膨張ひずみを媒介にして、試料の液状化試験結果から原位置の液状化強度を推定することも論理的に可能である¹³⁾。但し、このような補正は試料の試験結果から得られた液状化強度を上昇させる結果になるので、試料の液状化強度が凍結融解により低下した確認の得られている場合のみに行うことが妥当であろう。

4. 実際のサンプリングでの検討例

(1) 地盤の概要と原位置凍結

ここでは千葉県木更津市で行った細粒分を含む砂地盤での原位置凍結サンプリング事例について述べる。この事例は杭を打設することによる周辺地盤の液状化強度の上昇を評価するためにおこなった現場実験であり、地盤構成等は参考文献¹⁴⁾に詳細に述べてある。図-12に試料採取地点の土質柱状図を示すが、不攪乱試料のサンプリングの対象にしたのはGL-6m以浅の細砂層であり、地下水位はGL-1.3mである。凍結管は外径が73mmの2重管であり、地盤にボーリングで切孔して立て込んだ。今回は試料採取対象をGL-2m～-5mとしたので長さ5.3mの凍結管を上部2mに断熱処理を施して用いた。地盤の凍結状態の管理のために凍結管表面と凍結管中心から30cmの地点に熱電対を埋設して凍結期間中の温度を計測した。熱電対の設置深度はGL-2.0、-3.0、-4.0、-5.0mの4深度であるが、断熱処理の確認のためにGL-1.5mにも設置した。地盤の冷却は凍結管に液体窒素を循環させる方式を用い、約1昼夜にわたる地

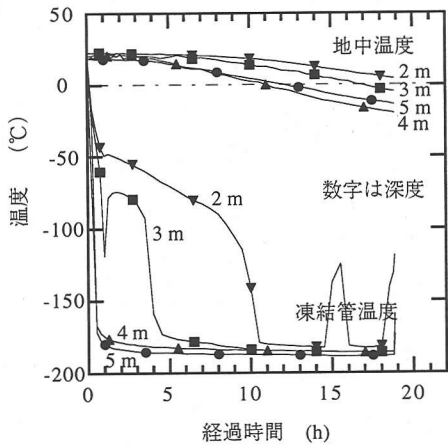


図-13 熱電対による温度の実測値の経時変化

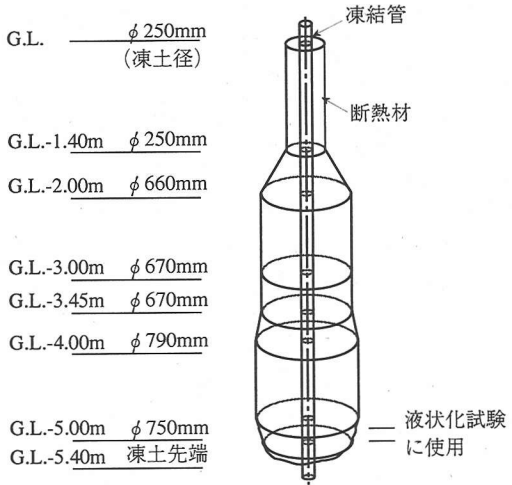


図-15 凍結採取試料の形状概略図

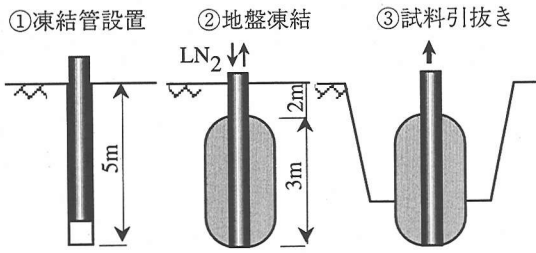


図-14 凍結試料採取の概念図

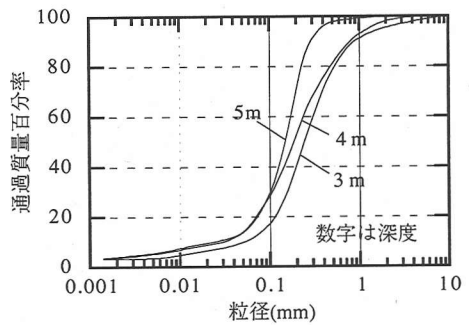


図-16 採取試料の粒度分布例

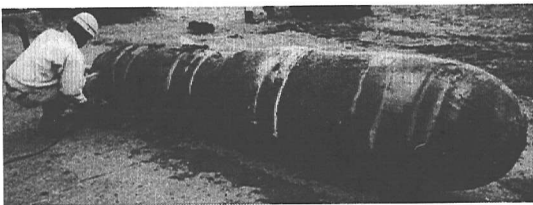


写真-1 凍結採取試料の外観

盤冷却により所定の凍結領域を造成させた。図-13に地盤凍結中の熱電対による温度の実測値を示す。

(2) 試料採取

凍結管中心から30cmに設置した熱電対の温度が0℃以下になったことを確認した後に、図-14に示すように、今回は凍結土柱全体を地盤から抜きあげることにより試料を採取した。この方法は採取深度が

比較的浅い場合に適した方法であり、経済性に優れているだけでなく、凍結試料をコアリングする場合に比較して試料に外力を作用させないことが特長である。但し、凍結土柱を抜きあげるために地盤を掘削する必要があり、周辺地盤の乱される領域が広くなる欠点がある。今回は周辺地盤をバックホーで掘削し、トラッククレーンで試料を抜き上げたが、G.L.-4m～-5m付近まで掘削を行わなければならなかった。写真-1に採取試料の外観を示し、図-15に凍結土柱の形状を示すが、約18時間の地盤冷却により直径約80cmの凍結土柱試料が得られた。採取した試料はカッター等でハンドリングが容易な大きさに切り分けて実験室に運搬した。

(3) 試料の品質評価

図-16に採取した試料の粒度分布を示すが、採取した細砂層には20%程度の細粒分が含まれていた

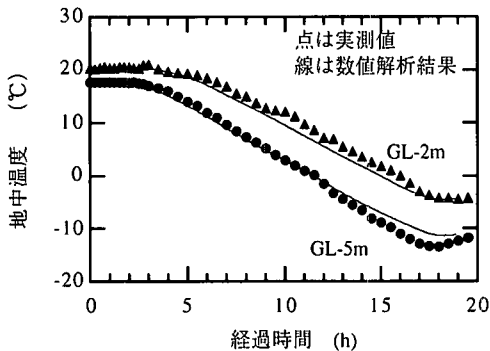


図-17 凍結中の典型的な地中温度の経時変化と解析結果の比較

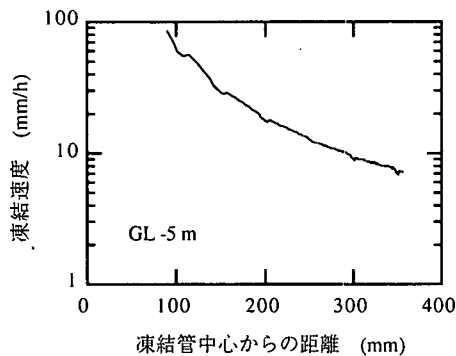


図-18 地盤凍結時の凍結速度の解析結果

ため、液状化試験に用いたGL-5.0m付近の試料について先に述べた手順に従い試料の健全性を検討した。まず、採取試料の間隙比から決まる熱定数と実測による凍結管表面温度を用いて土の潜熱を考慮した熱伝導解析を行った。図-17は地中温度の実測値と解析結果を示したのだが、解析結果と実測値は良い対応を示していることがわかる。図-18は解析で求めた凍結速度の試料の位置に対する分布であるが、凍結管の近傍を除けば試料が10mm/h程度の速度で凍結したことがわかる。そこで、凍結速度10mm/hで吸排水を自由にした状態での一次元凍結膨張試験を行い、凍結膨張ひずみと拘束圧の関係求めた。図-19に試験結果を示すが、今回の試料では凍結膨張性を表す定数 α が0.33になった。また、土被り厚から有効鉛直応力 $\sigma'_n=50\text{kPa}$ となり、地盤の変形係数については実測値がなかったため、N値を用いて $E=700(\text{kPa})\times N$ から求まる値を用いることとし、 $N=19$ であるから $E=13300\text{kPa}$ とした。それ以外の定数は $K_0=0.5$ 、 $\mu=0.3$ と通常よく用いられる値を用いた。

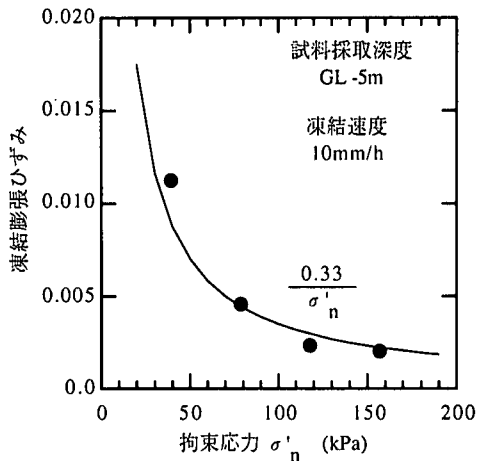


図-19 採取試料の凍結膨張試験時の膨張ひずみと拘束応力の関係

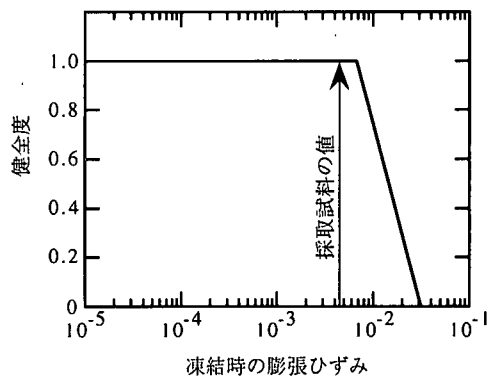


図-20 採取試料の健全度の検証

以上の値を式(5)に代入すると凍結時に試料に生じた凍結膨張ひずみは0.0046となった。図-20は前に示した健全度と凍結膨張ひずみの関係に今回の試料の膨張ひずみを付記したものである。図から明らかなように健全度が1.0の範囲に入っており、試料が健全である可能性は極めて高いと判断した。

採取された試料の力学試験結果は参考文献¹⁴⁾に詳しく述べてあるが、図-21は採取試料の液状化試験結果であり、採取試料と同密度に再構成した供試体の試験結果も示してある。凍結採取試料に比較して再構成試料の液状化強度は低くなっている。前述のように、同密度・同粒度であっても液状化強度が異なるのは試料の微視的な骨格構造の安定性が異なるためであり、これまでの研究^{15),16)}でも年代を経た地層の試料では凍結採取試料に比較して再構成試料

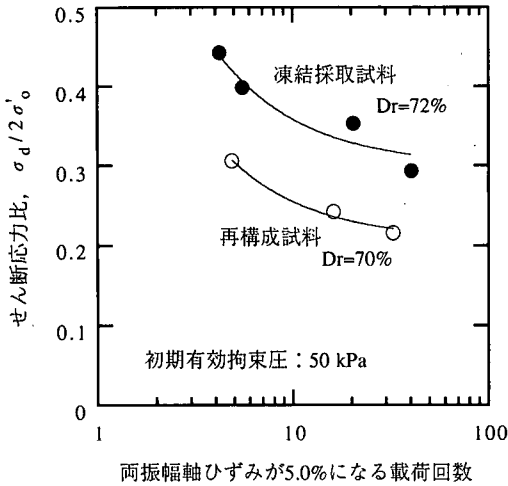


図-21 凍結採取試料と同密度に再構成した試料の非排水繰返し三軸試験結果の比較

の液状化強度が極めて低くなることが明らかにされている。今回の地層は沖積層であり比較的年代が若かったため両者の差は大きくはないが、試料に健全性が保たれたため両者の液状化強度の差があらわれたと考えることができる。

図-22は原位置と供試体とで測定したせん断波速度Vsの比較であり、凍結採取供試体のVsの値は原位置のものとはほぼ等しくなっている。但し、図に付記した再構成供試体の値もほぼ同レベルになっており、両供試体での差は顕著でない。採取試料の健全性の確認にVsを用いる事例は少なくないが、Vsは液状化強度に比較して試料の変化に敏感でなく、図は今回のように年代が若く微視的骨格構造の安定化がそれほど進んでいない地盤に対しては乱れの影響を明確に表さない場合もあることを示唆している。

5. 結論

原位置凍結サンプリングを用いて不攪乱試料を採取する場合に乱れを生じる可能性のある要因を検討した結果、細粒分を含む砂地盤では凍結融解が試料の液状化強度に与える影響が支配的であることがわかった。そこで、原位置で地盤が経験した凍結膨張ひずみを推定し、既に提案されている凍結融解による試料の健全度と凍結時の膨張ひずみの関係と対比させることにより試料の信頼性を評価できることが明らかになり、原位置の凍結膨張ひずみの推定方法を含めた凍結試料の信頼性の検討方法を提案した。

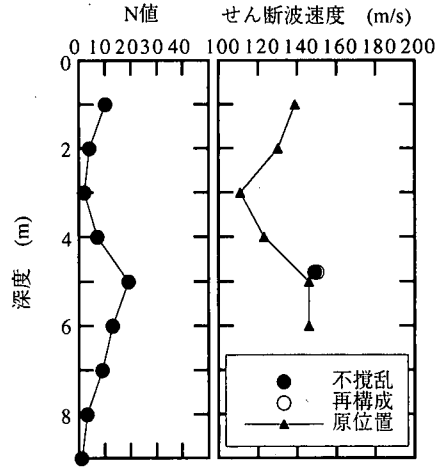


図-22 地盤のN値および供試体と原位置試験のせん断波速度の比較

実際におこなわれた細粒分を含む地盤での原位置凍結サンプリングの事例において今回提案した方法により試料の信頼性の評価を行い、試料が健全である可能性が高いと判定できた。採取試料の試験結果でも凍結採取試料には微視的な骨格構造の安定性による液状化強度が見られ、試料が高品質であることが検証された。

謝辞：本研究を実施するに当たり東京工業大学名誉教授吉見吉昭先生に貴重な御意見と御指導を賜りました。謹んで感謝いたします。凍結膨張試験の実施では清水建設技術研究所了戒公利氏の、せん断波速度の測定では同所西尾伸也氏のご助力を頂きました。心より感謝致します。凍結サンプリングの事例は清水建設の「杭打設による地盤改良効果」プロジェクトとしておこなわれたものであり、同所の社本康広氏、桂豊氏はじめ関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) Seed, H.B., Singh, S. and Chan, C.K., Vilela, T.F. : Consideration in undisturbed sampling of sand, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.108, No.GT2, pp.265-283, 1982.
- 2) Finn, W.D.L., Bransby, P.L. and Pickering, D.J. : Effect of strain history on liquefaction of sand, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.96, No.SM6, pp.1917-1934, 1970.
- 3) Tokimatsu, K. and Hosaka, Y. : Effect of sample disturbance on dynamic properties of sand, *Soils and*

- Foundations*, Vol.26, No.1, pp.53-64, 1986.
- 4) Mulilis, J. P., Seed, H. B., Chan, C. K., Mitchell, J.K. and Arulanandan, K. : Effect of sample preparation on sand liquefaction, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.103, No.GT2, pp.91-108, 1977.
 - 5) Singh, S., Seed, H.B. and Chan, C.K. : Undisturbed sampling of saturated sands by freezing, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.108, No.GT2, pp.247-264, 1982.
 - 6) Yoshimi, Y., Hatanaka, M. and Oh-oka, H. : Undisturbed sampling of saturated sands by freezing, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.3, pp.59-73, 1978.
 - 7) Goto, S. : Influence of a freeze and thaw cycle on liquefaction resistance of sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.148-158, 1993.
 - 8) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. and Ohara, J. : In situ liquefaction resistance of clean sands over wide density range, *Geotechnique*, Vol.44, No.3, pp.479-494, 1994.
 - 9) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. : Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT *N*-value and fines content, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, pp.56-74, 1983.
 - 10) 後藤茂, 赤川敏, 了戒公利: 室内試験における凍結土の強度および変形特性, 清水建設研究所報, 第33巻, pp.37-49, 1980.
 - 11) 高志勤, 益田稔, 山本英夫: 土の凍結膨張に及ぼす凍結速度、有効応力の影響に関する研究, 雪氷, 第36巻, 第2号, pp.1-20, 1974.
 - 12) 了戒公利, 後藤茂, 赤川敏: 一定拘束応力下における飽和土の凍上特性, 清水建設研究所報, 第33巻, pp.27-36, 1980.
 - 13) Yoshimi, Y. and Goto, S.: Liquefaction resistance of silty sand based on in situ frozen samples, *Geotechnique*, Vol.46, No.1, pp.153-156, 1996.
 - 14) 田地陽一, 社本康広, 後藤茂: 杭打設による埋立地盤の地盤改良効果, 清水建設研究報告, 第64号, pp.13-21, 1996.
 - 15) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O. and Makihara, Y. : Undrained cyclic shear strength of a dense Niigata sand, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.4, pp.131-145, 1984.
 - 16) Goto, S., Shamoto, H. and Tamaoki, K. : Dynamic properties of undisturbed gravel sample by in-situ frozen, *Proc. of the 8th Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp. 233-236, 1987.

(1999.1.21受付)

EVALUATION ON APPLICABILITY OF IN-SITU FREEZING SAMPLING METHOD FOR SANDS CONTAINING FINES

Shigeru GOTO and Youichi TAJI

The applicability of the in situ freezing sampling method for sands containing fines is discussed in this paper. Procedures for evaluating in situ frozen sample quality of sands containing fines are proposed based on the fact that the reduction in liquefaction resistance can be uniquely related to the volumetric expansion during freezing for sands containing up to 20% fines. Based on the heat conduction analysis of the ground and frost expansion tests of the soil, an analytical solution, which forms the key of the proposed procedure, is then obtained by coupling the frost expansion strain and confining stress. This paper also presents a case history in which this sample quality evaluating procedure was applied in actual freezing sampling on ground containing fines.