

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適用性

後藤 茂

(技術研究所)

吉見 吉昭

(常任顧問)

田地 陽一

(技術研究所)

§ 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値の比較的低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¹⁾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⁾等もある。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不攪乱試料の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て強度が上昇した後に試料の採取・運搬および供試体の成型を行い、拘束圧を加えた状態で融解することにより試料の乱れを防ぐものである。したがって、この方法では凍結および融解により試料の液状化特性が変化しないことが必要条件になっており、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等によりこの条件が満足される。しかし、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、千葉東方沖地震や釧路沖地震、ロマブリエタ地震等でも細粒分を含む砂地盤の液状化が観察されている。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、採取試料の品質の評価手順を明らかにした。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での品質評価をケースヒストリーとして示した。

§ 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

2.1 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

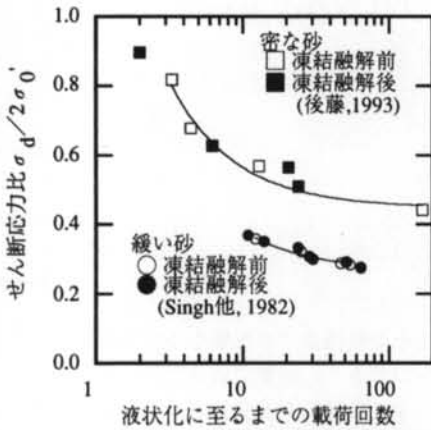


図-1 細粒分を含まない砂の凍結融解前後の液状化強度の比較

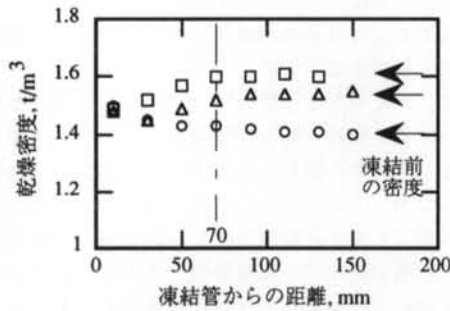


図-2 凍結試料密度の水平方向分布 (大型室内実験)

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⁾等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っ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たら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。

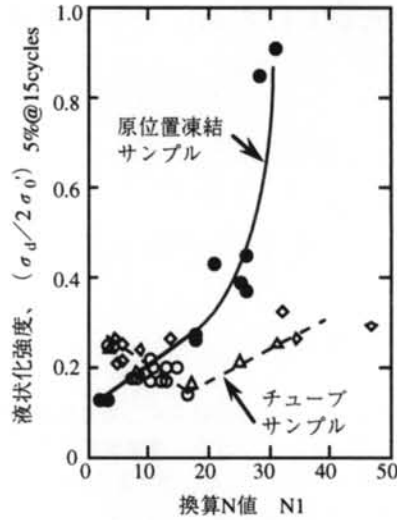


図-3 原位置凍結サンプルとチューブサンプルの液状化強度と換算N値の関係

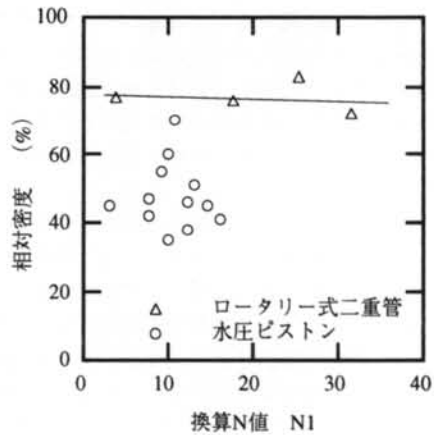


図-4 チューブサンプルの相対密度と換算N値の関係

2.2 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

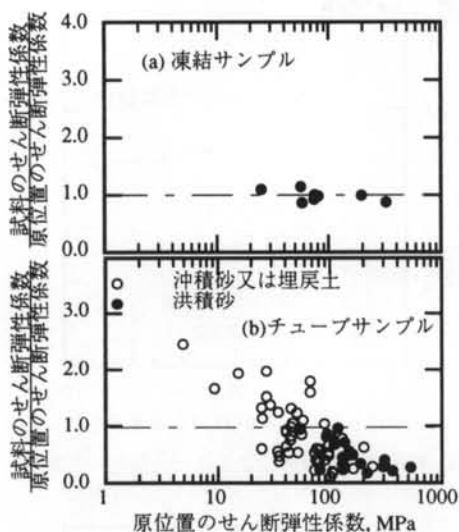


図-5 試料と原位置のせん断弾性係数の比較

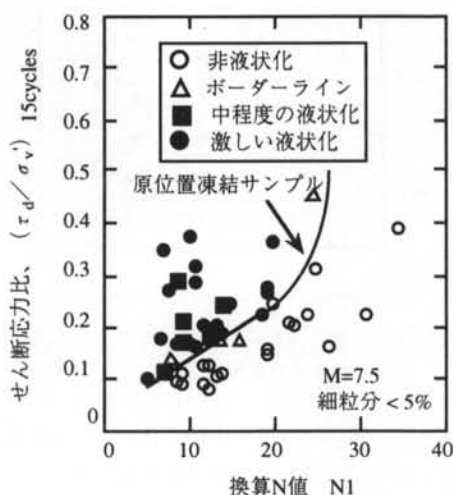


図-6 地震時液状化時刻に基づくせん断応力比と換算N値の関係

が高くなると凍結サンプルと比較して著しく液状化強度が低くなり、全体的にN1値の変化に対する変化が少ない。このようなチューブサンプルの液状化強度の傾向は地震時に液状化を生じた地盤の実例などは整合しにくいものである。

図-4はチューブサンプルの相対密度とN1値の関係を示したものであるが、試料の相対密度とN1値との相関は極めて悪く、特にロータリー式二重管サンプラーのものはN1値によらず相対密度が80%程度になって

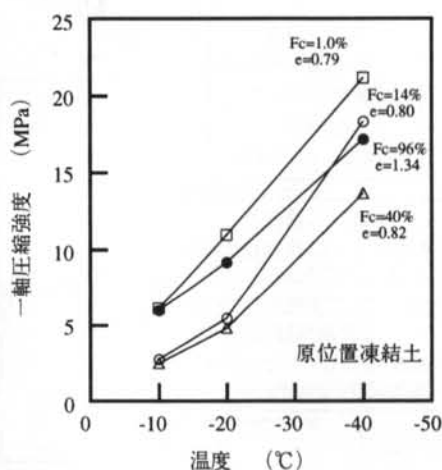


図-7 凍結土の温度と強度の関係

いる。

図-5は、凍結サンプルおよびチューブサンプルについて試料のせん断弾性係数(微小ひずみにおける値)とS波速度から求めた原位置のせん断弾性係数を比較したものである。試料の品質評価に原位置地盤と試料のせん断弾性係数を比較する方法が用いられており、乱れの少ない試料では両者の値が近くなる事が知られているが、図から明らかなように凍結サンプルのせん断弾性係数は原位置地盤の値とはほぼ等しい。それに反し、チューブサンプルのせん断弾性係数と地盤のせん断弾性係数の関係には大きなバラツキがあり、かつ、原位置のせん断弾性係数が低い領域では試料の弾性係数の方が高くなり、原位置のせん断弾性係数が高くなると逆に試料の弾性係数の方が低くなる傾向が見られる。これは、図-3に示した試料の液状化強度とN1値との関係において、N1値が低い場合にはチューブサンプルの強度が凍結サンプルの値を上回り、N1値が高くなるとチューブサンプルの方が低くなることと傾向的に一致している。

図-6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力とN1値の関係で示したものの¹⁰⁾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置の液状化強度に換算して示したものである。図から明らかなように、凍結サンプルの液状化強度とN1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。



図-8 凍結融解試験の手順

§3. 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有効性

3.1 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置凍結サンプリングでは地盤が凍結して高い固結強度を持った状態で試料の採取や運搬および供試体の成形を行うために、それらの作業での試料の乱れの生じる可能性は無視できるまで低くなっている。したがって、細粒分を含む砂地盤でも凍結により十分な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-7はきれいな砂と粘性土の一軸圧縮強度と供試体の温度の関係を示したものが、細粒分を含む砂でも十分温度が低ければ大きな固結強度を持つことがわかる。したがって、細粒分を含む砂地盤でもこれらの過程における乱れの生じる可能性は低く押さえることが出来るが、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。先に述べたように、試料の液状化強度は事前にせん断履歴を加えると変化するという研究結果³⁾もあり、細粒分を含む地盤での原位置凍結サンプリングの有効性は凍結膨張による液状化強度の変化が重要な論点になる。

3.2 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検討するために、豊浦砂に細粒分を混入した再構成試料を用いて室内液状化試験を実施した。図-8は試験のフローチャートであるが、基本的な考

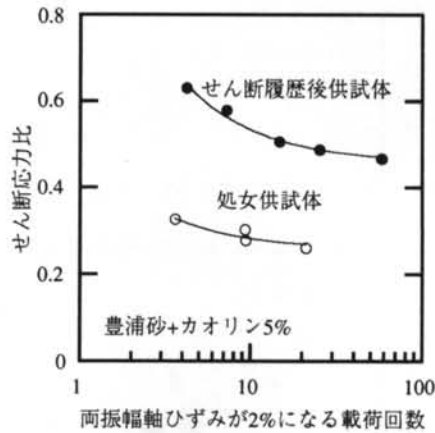


図-9 動的せん断履歴による液状化強度の上昇例

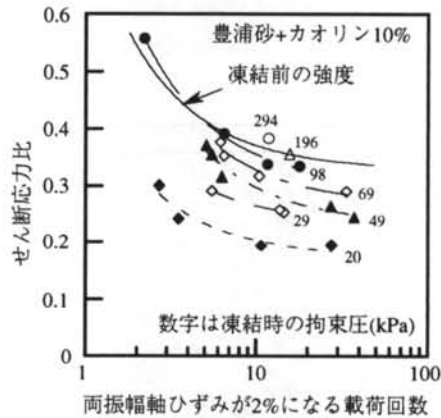


図-10 凍結融解試料の液状化強度に及ぼす凍結融解時の拘束圧の影響例

え方は同一条件で作成した供試体に凍結融解を経験させ、凍結前の液状化強度と融解後の値を比較しようとするものである。年代を経た実地盤は微視的な骨格構造が安定化しており、同密度でも再構成試料に比較して液状化強度が高く、そのような液状化強度の高い地盤ほど試料の乱れにより強度が変化しやすい。このことは図-3に示したN1値と試料の液状化強度の関係において、N1値が大きいほど凍結サンプルとチューブサンプルの液状化強度の差が大きいことから示唆されている。そこで、今回の実験では再構成試料の骨格構造の安定化をはかるために、供試体に図-8に示した手順中の動的せん断履歴を加えている。動的せん断履歴とは排水条件下で中ひずみの繰返しせん断を与えることであり、図-9に示すよ

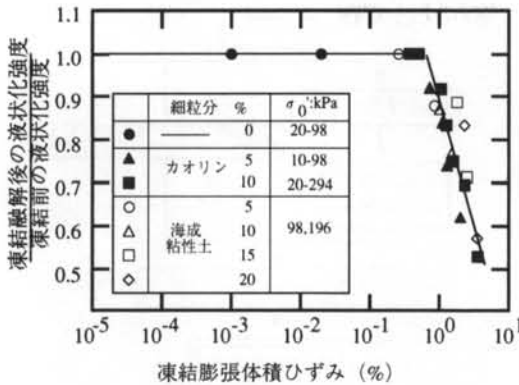


図-11 凍結融解前後の液状化強度比と凍結時の膨張ひずみの関係

うに両振幅軸ひずみが0.1%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。ちなみにこの過程における供試体の密度変化は相対密度で数%の増加であり、試料の液状化強度の上昇は密度の増加に起因するものではない。動的せん断履歴を経た供試体は吸排水を自由に行える状態で一次的に凍結させており、その時の凍結速度は約14 mm/hである。凍結させた供試体は吸排水自由の状態ですべて融解した。凍結融解前後の液状化強度は非排水繰返し三軸試験により求めている。

図-10は融解後の試料の液状化強度の例であるが、凍結融解時の拘束圧が小さいほど強度が低下している。凍結融解による強度の変化を凍結融解前後の液状化強度の比として表し、凍結時の膨張体積ひずみとの関係として示したのが図-11である。但し、ここでは載荷回数15回で両振幅軸ひずみが2%になるせん断応力比を強度として用いている。図には試験を行った全試料の結果が示してあるが、細粒分の種類や含有率および凍結融解時の拘束圧の違いに関わらず両者は一意的な関係を示し、体積ひずみが0.7%以下では液状化強度は変化していない。このことは、ある程度までは凍結膨張が生じても試料の乱れが生じないことを意味しており、細粒分を含む砂地盤に原位置凍結サンプリングを適用する場合の基準を示していると考えられる。また、それ以上の凍結膨張を生じた試料でも液状化強度は一挙に変化せず、膨張ひずみの増加とともに液状化強度が一様に低下していることから、このような試料でも膨張ひずみを媒介に補正を行うことにより、凍結前の液状化強度が推定できる可能性を示唆している。

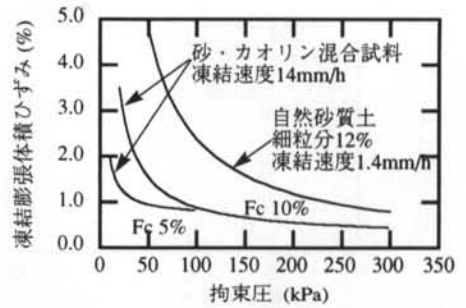


図-12 凍結膨張ひずみと拘束圧の関係

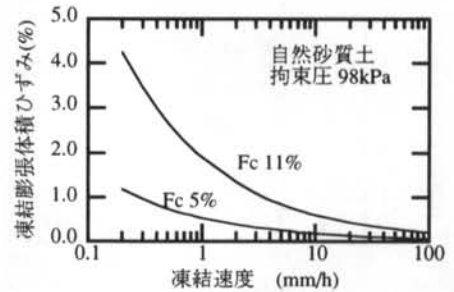


図-13 凍結膨張ひずみと凍結速度の関係

3.3 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が氷に相変化するときに生じる9%の体積膨張が原因となって土の凍結膨張が生じる。しかし、通常の地盤凍結は比較的ゆっくりした現象であるため、透水性の良い地盤では一次的に凍結させること等により相変化に伴う体積膨張分の間隙水を排除し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重要である。これは、土粒子表面の吸着水の凍結が起因となって凍結面で吸水力が生じ、土が膨張すると考えられている。

多くの土の凍結膨張試験結果をもとに膨張ひずみを凍結時の外的要因等で定式化したものに高志他の研究¹¹⁾があり、高志は試料を吸排水自由な状態で一次的に凍結した場合に生じる膨張ひずみを拘束圧と凍結速度をパラメータとした(1)式で表した。

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

ここで、 ε_f ：凍結膨張ひずみ、 σ'_n ：拘束応力、

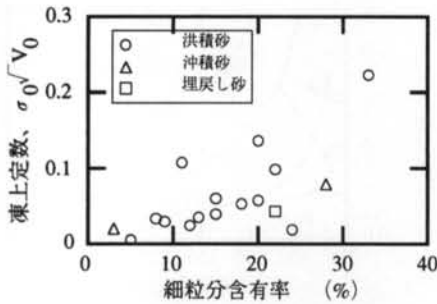


図-14 凍上定数と細粒分含有率の関係

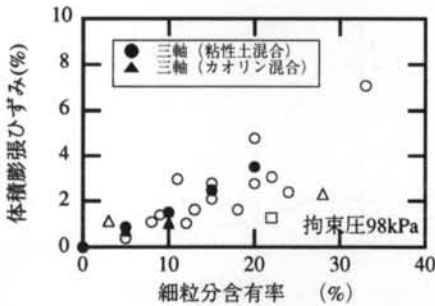


図-15 側方ひずみ拘束状態と三軸状態の凍結膨張ひずみの比較

V : 凍結速度, $\epsilon_0, \sigma_0, V_0$: 土固有の定数である。

図-12は凍結膨張ひずみと拘束圧の関係を示したものであり、先に述べた豊浦砂に細粒分を混入した試料の試験結果と自然地盤から採取した試料をより小さい速度で凍結させた結果が示してある。凍結膨張ひずみは、高志の式で表されるように、拘束圧と逆比例の関係を示している。図-13は凍結膨張ひずみと凍結速度の関係を示したものであり、ひずみの値自体は試料により異なっているが、(1)式のように凍結速度が小さくなると凍結膨張ひずみが大きくなる傾向が見られる。したがって、(1)式によって土の凍結膨張ひずみの拘束圧と凍結速度の依存性は表現することができ、試料の凍結膨張性は(1)式の定数によって表すことができる。図-14は、凍結膨張性を示す(1)式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(1)式で表現できるが、膨張ひずみ自体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。なお、ここに述べた研究結果の

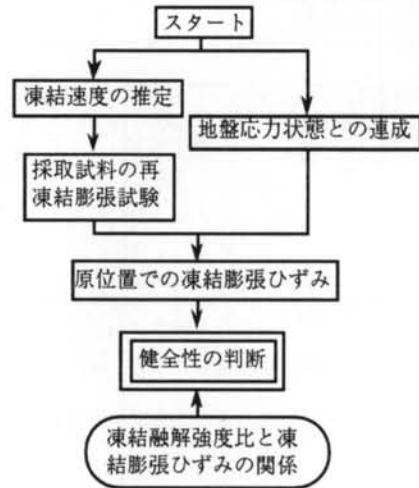


図-16 凍結融解の影響の検討手順

多くは試料が側方に変形できない一次元凍結膨張ひずみであるが、前節で述べた試験では三軸セルを用いているため試料が側方に変形できる。そこで、両者の相異を検討するために、図-15に両者の凍結膨張ひずみと細粒分含有率の関係を示した。図から明らかのように、三軸状態での体積膨張ひずみは一次元凍結膨張軸ひずみと適合しており、凍結膨張を体積ひずみとして捉えれば両者を区別する必要がないことがわかる。

3.4 細粒分を含む砂地盤での凍結サンプルの信頼性の検討方法

これまでの検討で明らかになったように、凍結サンプリングを行って細粒分を含む砂地盤から試料を採取した場合に、地盤に凍結膨張が生じると採取試料の液状化強度が原地盤のものとは異なる可能性がある。このような液状化強度の変化は凍結時に試料が経験した膨張ひずみと密接な関係があることから、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。但し、図-11の凍結融解前後の液状化強度比が1.0を上回らないことから明らかのように、年代を経て骨格の安定した地盤では凍結膨張を生じた試料の液状化強度は凍結前に比較して低くなることから設計に用いる場合には安全側の値になっている。

図-16はこの検討手順のフローを示したものである。液状化強度を求める供試体と同じサンプルから

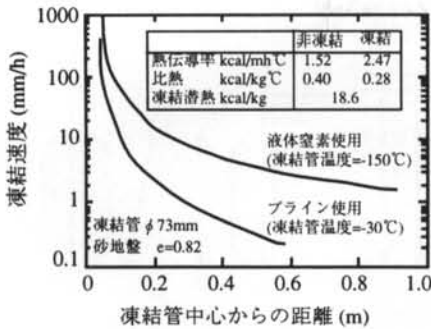


図-17 凍結速度の解析結果例

切り出した試料をいったん融解し、凍結膨張試験を行って凍結膨張特性を求め、この凍結膨張特性から試料が原位置で生じた凍結膨張ひずみを求めるためには原位置での凍結速度と凍結時に試料が受けていた拘束圧の値が必要になる。地盤が凍結したときの凍結速度については試料の密度等から求める熱定数を用いて熱伝導解析を行うことにより求めることができるのでその値で凍結膨張試験を行えばよい。図-17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率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必要であるが、多少の位置の違いによる凍結速度の相異は小さい。凍結膨張ひずみを示す(1)式にある凍結速度の値を入れると(2)式のように拘束圧だけの関数になる。一方、凍結時の拘束圧 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ため(3)式ようになる。地盤を等方弾性体と仮定すると凍結膨張に対する未凍結地盤の反力は(4)式で示すように膨張ひずみ ϵ_{fr} の関数になる。これらの式を用いて拘束圧を消去すると原位置での凍結膨張ひずみを示す(5)式が得られる。

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

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

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

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

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。

こうして求めた凍結膨張ひずみを用いて図-11の液状化強度比と膨張ひずみの関係を参照して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。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のみに成立するが、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性が高い。

一方、図-11の液状化強度比と凍結膨張ひずみの関係に置いて強度比が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は論理的に可能である¹³⁾。但し、図-11の関係は微視的な骨格構造を安定化させた試料に対する試験結果に基づいており、比較的液状化強度の高い地盤に対して有効であり、原位置と試料のせん断波速度を比較するなどして試料の液状化強度が凍結融解により低下したと考えられる場合のみに補正を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

4.1 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の原位置凍結サンプリングについて述べる。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確認するための現場実験であり、地盤構成等は参考文献14)で詳細に述べてある。図-18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

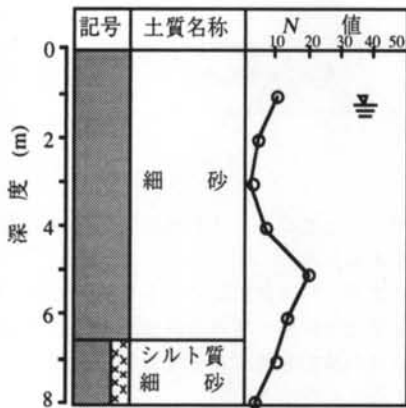


図-18 サンプルング場所の土質性状

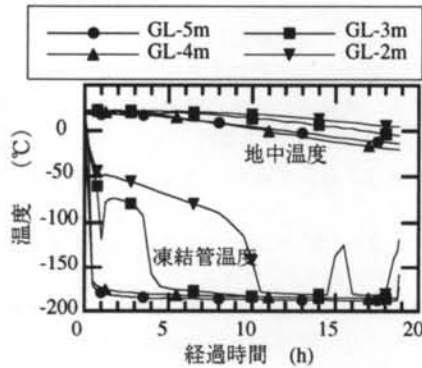


図-19 実測温度の経時変化

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流入させる方式で行い、約1昼夜にわたる地盤冷却により所定の凍結領域を造成させた。図-19に地盤凍結中の熱電対による温度の実測値を示す。

4.2 試料採取

凍結中心から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試料採取を行ったが、図-20に示すように今回は凍結土柱全体を地盤

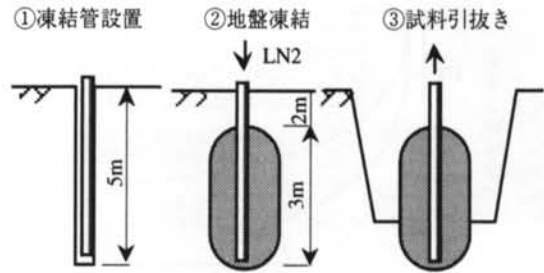


図-20 試料採取方法の概念図



図-21 採取された試料の形状

から引きあげることにより凍結試料を採取した。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、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と費用が小さいことが利点である。但し、凍結土柱を抜き上げるために地盤を掘削する必要があり、地盤が乱される領域が広くなるのが欠点である。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あげたが、GL-4m～-5m付近まで掘削を行わなければならなかった。図-21に採取された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。

4.3 試料の品質評価

図-22に採取した試料の粒度分布を示すが、採取

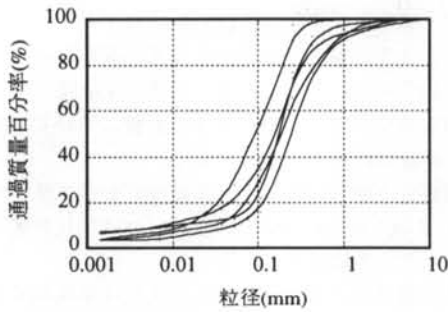


図-22 試料の粒度分布

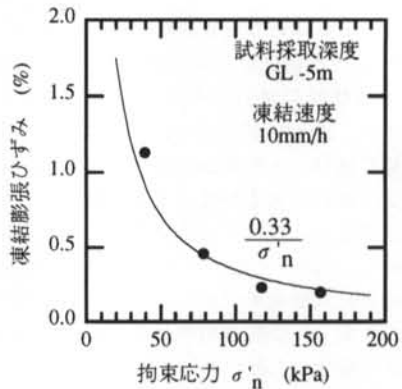


図-25 採取試料の凍結膨張試験結果

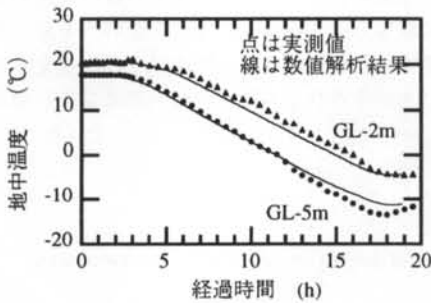


図-23 地中温度の実測値と解析結果の比較

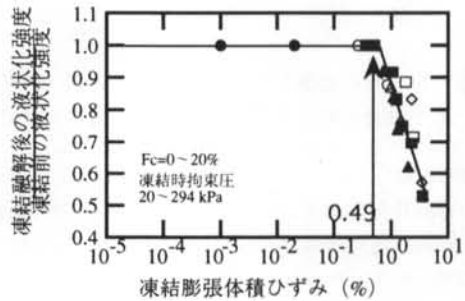


図-26 採取試料の凍結膨張ひずみと強度比の関係

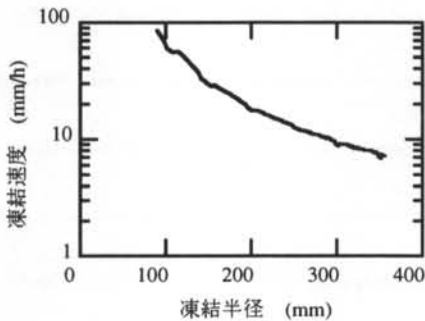


図-24 数値解析で求めた凍結速度分布

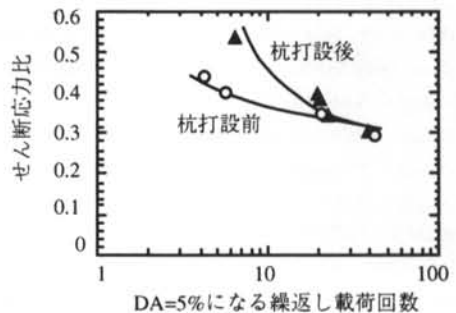


図-27 採取試料の液状化試験結果例

した細砂層は20~30%程度の細粒分が含まれたため、凍結膨張による影響を先に述べた3.3の手順に従い検討した。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潜熱を考慮した熱伝導解析を行った。図-23は地中温度の実測値と解析結果を示したものだが、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-24は試料の位置に対する解析で求めた凍結速度の分布であるが、力学試験には用いない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で凍結膨張試験を行い、凍結膨張ひずみと拘束圧の関係を求めた。図-25に試験結果を示すが今回の試料では両者の関係は(6)式のようにになった。

$$\epsilon_{fr} = \frac{0.33}{\sigma'_r} \quad (6)$$

次に地盤の変形係数については、N値を用いて $E=700(\text{kPa}) \times N$ から求まる値を用いた。また、検

討に必要なそれ以外の定数は $K_0=0.5$, $\mu=0.3$ と通常よく用いられる値を用いた。以上の値を(6)式に代入すると凍結時に試料に生じた凍結膨張ひずみは0.49となり、図-26に再掲した凍結融解前後の強度比と凍結膨張ひずみの関係に示すように試料は凍結融解により液状化強度が変化する可能性は極めて低いと判断できる。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-27は採取試料の液状化試験結果であり、試料の健全性が保たれたせいもあってこの事例の目的である杭の打設による液状化強度の上昇が表れている。

§ 5. 結論

細粒分を含む砂地盤から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の問題点を検討

<参考文献>

- 1) Seed, H.B., Singh, S., 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., 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., Hosaka, Y.: "Effect of sample disturbance on dynamic properties of sand," Soils and Foundations, Vol.26, No.1, pp.53-64, 1986
- 4) Muliis, J. P., Seed, H. B., Chan, C. K., Mitchell, 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., 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., 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., Ohara, J.: "In situ liquefaction resistance of clean sands over wide density range," Geotechnique, Vol.44, No.3, pp.479-494, 1994
- 9) 安田進, 山口勇: "室内および原位置で求めた動的せん断定数", 砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価に関するシンポジウム発表論文集, pp.115-118, 1984
- 10) Tokimatsu, K., 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
- 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) 丁戒公利, 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., 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

した。凍結による地盤の固結強度の上昇については細粒分を含む場合でも問題はなく、凍結融解が試料の液状化強度に与える影響が問題の中心になることが明らかになった。凍結融解の影響についての得られた結論は以下の通りである。

- ①細粒分を含む砂地盤でも凍結時の膨張体積ひずみが0.7%以下であれば凍結融解により液状化強度が変化する可能性は極めて小さい。
- ②凍結融解による液状化強度の変化は凍結融解前後の液状化強度比で表したとき凍結時の膨張ひずみと一意的な関係がある。
- ③熱伝導解析等で求まる原位置での凍結速度や凍結膨張試験等で求まる地盤の凍結膨張特性を用いれば原位置で生じた地盤の凍結膨張ひずみを推定することができ、そのひずみ量から試料の品質の判断ができる。