

非塑性シルトの液状化強度におよぼす サンプリング方法の影響

沼田 淳紀¹・嶋本 栄治²・染谷 昇³

¹正会員 工修 飛鳥建設株式会社 技術研究所主任研究員 (〒270-0222 千葉県関宿町木間ヶ瀬 5472)

²正会員 工修 飛鳥建設株式会社 技術研究所主任 (〒270-0222 千葉県関宿町木間ヶ瀬 5472)

³飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県関宿町木間ヶ瀬 5472)

地盤の液状化強度を求めるには、良質な不攪乱試料を採取し、液状化試験を実施する必要がある。良質な不攪乱試料の採取方法として、細粒分を含まない砂や礫地盤に対しては原位置凍結サンプリングが良いとされている。しかしながら、細粒分の多い地盤に対しては凍結サンプリングは不向きであるとされ、特に、海岸埋立地で問題となる N 値の低い非塑性シルト地盤に対しては、トリプルチューブサンプリングも不向きである場合がある。そこで、直径 30cm の圧密土槽に非塑性シルトの模型地盤を作成し、模型地盤より凍結、シンウォールチューブ、ブロックなどの各サンプリング方法で試料を採取し、液状化特性の比較検討を行った。

Key Words : liquefaction, silt, fines, sampling, reclaimed ground, triaxial test, sample disturbance, freezing

1. はじめに

地盤の非排水繰返し強度（以降、液状化強度と呼ぶ。）を求めるためには、不攪乱試料を用いた液状化試験が必要となる。液状化特性を求めるための不攪乱試料の採取は、原位置の密度だけではなく、応力・ひずみ履歴効果を反映する微視的構造をも全く変えないで採取しなければならない¹⁾。このような良質な試料の採取方法として、細粒分の少ない砂・礫に対しては原位置凍結サンプリング法があげられる。しかしながら、凍結サンプリング法は、細粒分含有率が 5 ~ 10%以下で、ある程度の拘束圧があれば液状化強度に与える影響は少ないが、細粒分含有率が多い場合には試料に凍結膨張が生じるために不向きであるとされている²⁾。

一方、1987 年千葉県東方沖地震では海岸埋立地で液状化によるシルトの噴砂が多く確認されたが³⁾、このような非塑性シルトの液状化特性を求めるための不攪乱試料の採取方法は、凍結サンプリング方法を含めそれほど明確になっていない。

そこでここでは、非塑性シルトの液状化強度を求めるためのサンプリング方法を検討する目的で、圧密土槽で模型地盤を作成し、凍結サンプリングを含む種々の方法で不攪乱試料を採取・保管し、液状化試験を実施し比較検討を行った。

2. 試験に用いた試料⁴⁾

試験に用いた試料は、函館市浅野町の海岸埋立地で採取されたシルトである。図-1に用いた試料の粒

度組成を示す。図中には、比較のために液状化しやすい土の粒度組成として港湾基準⁵⁾に示される粒度組成の範囲を示した。液状化の可能性ありの下限值に近く、細粒だが粘土分が少なく均等粒径な土である。また、用いた試料は、非塑性である。

3. 試験方法

試験は、圧密土槽で圧密を行った後に、4 種類の方法で試料を採取・保管し、繰返し非排水三軸試験（以降、液状化試験と呼ぶ。）を実施した^{4),6)}。試験に用いた圧密土槽の概略図と試験の流れ図を図-2と図-3に示す。

圧密土槽により作成された模型地盤は、以下の 4 種類の方法で不攪乱試料の採取・保管を行った。

BS シリーズ：試料を直接 5 つに分割して切り出し、ブロックサンプリングを行った。採取した試料は、パラフィンを塗布して保管した。三軸試験のさいに試料を成形し供試体とした。なお、圧密土槽ご

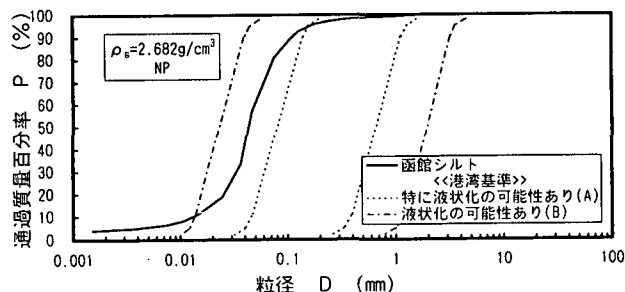


図-1 用いた試料の粒度組成

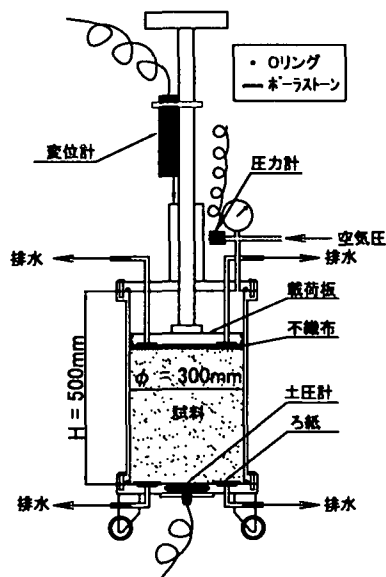


図-2 圧密土槽概略図

とのばらつきを検討する目的で、5本採取した試料の内1つは、TNシリーズと同様に、切り出した試料にシンウォールチューブを貫入し保管した。

TNシリーズ：試料に、剛な板に取り付けた5本のシンウォールチューブを同時に貫入し、貫入後チューブごと掘り出し、ラッピングし保管した。三軸試験のさいには、試料をチューブより押し出し、上下端面のみ成形し供試体とした。なお、BSシリーズと同じ目的で、5本採取した試料の内1本は、TFシリーズと同様に凍結した。

TFシリーズ：TNシリーズと同様にシンウォールチューブを用いて採取し、ラッピングされたチューブごと冷凍庫で凍結した。三軸試験のさいには、凍結状態の試料をチューブより押し出し、上下端面のみを成形し供試体とした。成形後の凍結供試体は、三軸試験機にセットした後に解凍した。なお、TNシリーズと同じ目的で、5本採取した試料の内1本は、TNシリーズと同様に未凍結とした。

FFシリーズ：土槽圧密後、98kPaの圧密圧力下でドライアイスで圧密土槽下部より凍結を行った。試料の上部は、排水が可能である。凍結時間は24時間とした。凍結された試料はラッピングし冷凍庫で保管し、三軸試験のさいに所定の寸法に切り出した。凍結供試体は、三軸試験機にセット後解凍した。

なお未凍結試料は、移動、保管、成形、試験機への設置などの取り扱いを極めて慎重に行った。シンウォールチューブの寸法は内径75mm、液状化試験の供試体寸法は直径75mm、高さ150mmである。

供試体の体積は、有効拘束圧29kPaで自立した状態で測定した。TFとFFの凍結された供試体については、解凍前後の体積の測定を行った。液状化試験前の供試体のB値は、いずれも0.95以上である。供試体の圧密は、有効拘束圧98kPaで24時間行った。このような供試体について非排水状態で0.1Hzの液状化試験を実施した。

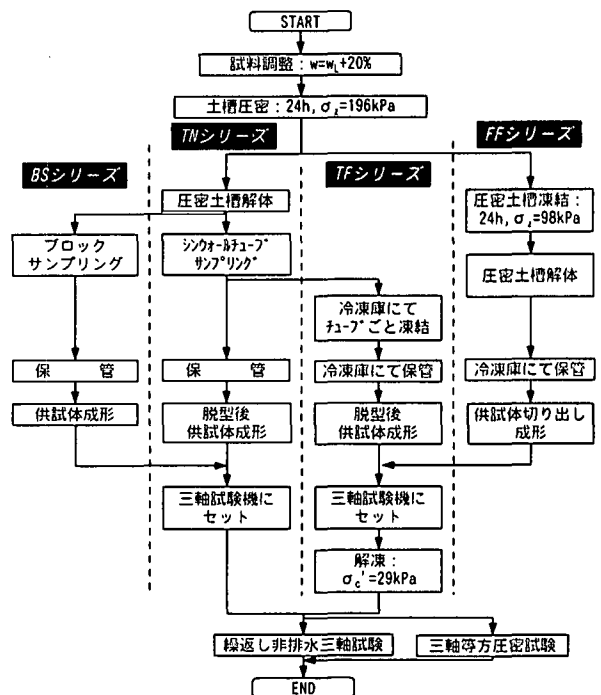


図-3 試験のフロー図と試料の採取・保存方法

4. 供試体の密度

図-4に、有効拘束圧 $\sigma_v'=29\text{kPa}$ における各供試体の乾燥密度を示す。黒塗りの点は凍結時の乾燥密度であり、白抜きと×印は解凍後または未凍結供試体の乾燥密度である。それぞれの印は、土槽圧密の各模型地盤ごとに形を揃えてある。

TFとFFより、乾燥密度は変化し、明らかに解凍することで体積収縮が認められる。しかしながら、白抜きの○□△より、解凍後の乾燥密度は凍結しなかった供試体とほぼ同じであり、凍結解凍することで密度変化が生じるが、解凍後には元の密度に戻ることがわかる。また、未凍結と解凍後の乾燥密度は、いずれもほぼ3ヶの模型地盤が作成されたTN(内1回は追加実験)におけるばらつきの範囲内で、いずれの採取・保管方法によってもほぼ同等である。

TFの解凍時収縮体積ひずみは、FFより平均で2%大きく生じた。FFは、凍結時に間隙水の体積膨張による排水がある程度可能であるが、TFはシンウォールチューブごと冷凍庫にて凍結しているため、供試体の周囲から凍結され、内部の排水が不可能となる。このため、凍結時の体積膨張量が大きくなり、TFの解凍時の収縮体積ひずみが、FFよりも大きくなったと考えられる。

なお、FFでは凍結時に鉛直方向の変位を測定しているが、これによる膨張体積ひずみは1.7%であった。ちなみに、豊浦砂を用いて同じ測定を行った場合には0.009%であり、体積膨張はほとんど認められなかった。

5. 液状化強度

図-5に液状化試験によって求められた繰返し強度曲線を示す。(a)(b)(c)は、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_v'$ が0.95、両振幅軸ひずみDAが1%および

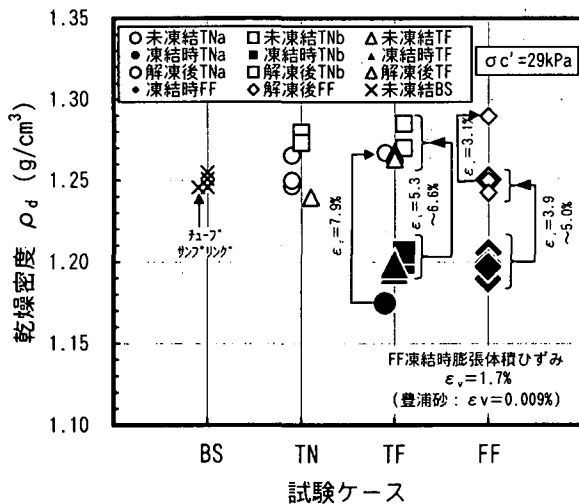


図-4 各採取保管方法によって得られた供試体の密度 ($\sigma'_c = 29\text{kPa}$)

5%にそれぞれ至るまでの繰返し回数と繰返しせん断応力比 $R = \sigma_v / (2 \sigma'_v)$ との関係である。

(c)の $DA=5\%$ についてみると、BSとTNの繰返し強度曲線は全く同じである。一方、凍結を行ったTFとFFの繰返し強度曲線は、BSやTNと比べ大きくなっている。さらに、TFとFFでは若干異なり、Rの大きなところではTFの方がFFより大きく、Rの小さなところでは同じである。このような傾向は、BS、TN、TFシリーズ中で1本だけ別の方法によったもの(図中、印を小さく示した。)についても全く同様であり、破壊基準を変えた(a)や(b)についても同様である。したがって、シンウォールチューブサンプリングを行ってもブロックサンプリングと液状化強度は全く変わらないといえる。一方、試料を凍結した場合には液状化強度は、2割から3割程度増加し、さらに、凍結方法により繰返し強度曲線が異なることがわかる。

後藤ら⁷⁾が示した膨張体積ひずみと液状化強度の低下率の関係では、圧密時にFFで生じた1.7%の膨張体積ひずみにより液状化強度が1割程度低下することになるが、本試験では逆に凍結解凍することで液状化強度が増加した。後藤ら^{7),8)}の関係は、締固めた供試体に動的なせん断ひずみ履歴を与えることであらかじめ微視的構造が強化された供試体を用いられているので、凍結解凍により液状化強度は低下したと考えられる。今回の結果は、密度も低く埋立地盤のように若齢で微視的構造がまだ不安定である状態と考えられ、凍結解凍することで体積膨張と収縮が生じ、かえって微視的構造が強化され液状化強度が増加したものと考えられる。

6. 有効応力経路と応力ひずみ関係

図-6と図-7に、各シリーズの $DA=5\%$ に至るまでの $\sigma_v / (2 \sigma'_v) \div 0.22$ における有効応力経路と応力ひずみ関係を示す。

BSとTNは、ほぼ同様の有効応力経路と応力ひずみ関係である。これらの有効応力経路は原点から離れたところで $DA=5\%$ に至り、塑性指数 I_p が大きな試料の場合の有効応力経路⁹⁾に類似している。さらに、圧縮側では収縮性、伸張側では膨張性の挙動

を示し、ひずみは伸張側が大きく構造の異方性が顕著である。一方、TFとFFではBSと異なった関係となっている。FFの有効応力経路は、原点近くで $DA=5\%$ に至り、破壊線の勾配は伸張側よりも圧縮側が大きいが、破壊線に至るまでの過剰間隙水圧蓄積過程では圧縮と伸張側の有効応力経路の形状がほぼ対称となり、応力ひずみ関係もBSやTNと比較すると圧縮側と伸張側で対象型に近い。TFは、載荷初期の1波目程度まではBSやTNに類似し、それ以降はFFに類似している。

このような傾向は、応力比の異なった場合も全く同様である。したがって、BSとTNでは、液状化特性に対して全く同様の供試体得られると考えられ、シルトの不攪乱サンプリングには、ブロックサンプリングと同様な結果が得られるシンウォールサンプリングが有効であると考えられる。一方、試料を凍結した場合には、凍結解凍により密度はほとんど変わらないが、微視的構造が変化し、その構造変化が有効応力経路や応力ひずみ関係に表れて変化し、この結果液状化強度も変化するものと考えられる。特に、ここで示したように緩い若齢の地盤のような場合、液状化強度は凍結サンプリングすることで大きくなるので注意が必要である。

7. まとめ

緩い若齢の非塑性シルトの液状化強度におよぼす不攪乱試料の採取方法について、圧密土槽に模型地盤を作成し種々の採取・保管方法を行い検討し以下のことがわかった。

- (1)凍結した試料は、密度はほとんど変化しないが、液状化強度はブロックサンプリングされたものと比べ2割から3割大きくなった。
- (2)シンウォールチューブで採取する方法は、ブロックサンプリングされたものと、有効応力経路、応力ひずみ関係、および、繰返し強度曲線のいずれにおいても差異が認められず、有効な採取方法と考えられる。

参考文献

- 1)吉見 吉昭: 第二版 砂地盤の液状化, 技報堂, 177pp., 1991.5.
- 2)時松 孝次, 大原 淳良: 地盤の熱的問題 8.凍結の応用 8.2凍結サンプリング, 土と基礎, 38-11(394), pp.61-68, 1990.11.
- 3)森 伸一郎, 沼田 淳紀, 境野 典夫, 長谷川 昌弘: 埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, 39-2(397), pp.17-22, 1991.2.
- 4)沼田 淳紀, 嶋本 栄治, 染谷 昇: 非塑性シルトのサンプリング方法の検討(その1: 土槽圧密), 土木学会第54回年次学術講演会概要集, 第3部, 投稿中, 1999.9.
- 5)日本港湾協会: 13章 砂質土の液状化, 港湾の施設の技術上の基準・同解説 改訂版(上巻), pp.203-209, 1989.6.
- 6)嶋本 栄治, 沼田 淳紀, 染谷 昇: 非塑性シルトのサンプリング方法の検討(その2: 液状化特性), 土木学会第54回年次学術講演会概要集, 第3部, 投稿中, 1999.9.
- 7)後藤 茂, 吉見 吉昭, 田地 陽一: 細粒分を含む砂地盤に対する原位凍結サンプリングの適用性, 清水建設研究報告, 第67号, pp.11-20, 1998.4.
- 8)Shigeru GOTO: Influence of a freeze and thaw cycle on liquefaction resistance of sandy soils, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.33, No.4, pp.148-158, 1993.12.
- 9)兵動 正幸, 内田 一徳: 粘性土の動的性質 2.粘性土の動的問題の分類, 土と基礎, Vol.46, No.6, pp.53-58, 1998.6.

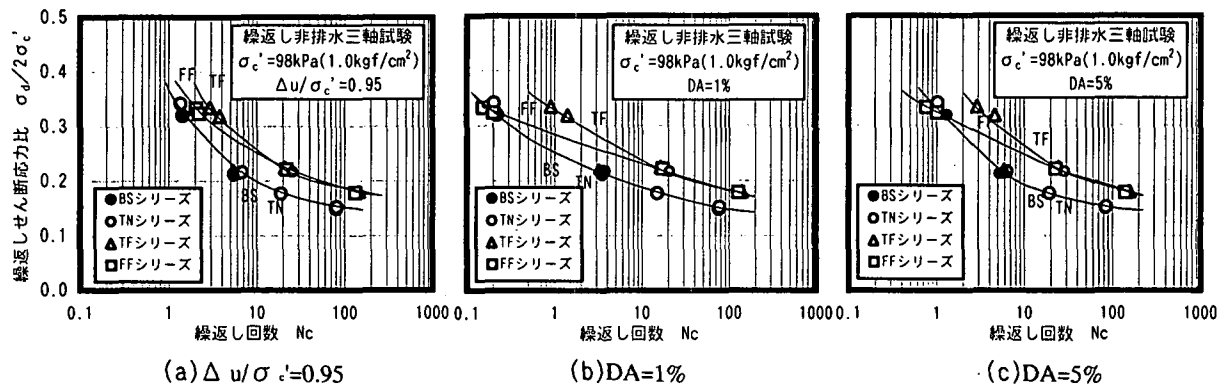


図-5 繰返し強度曲線

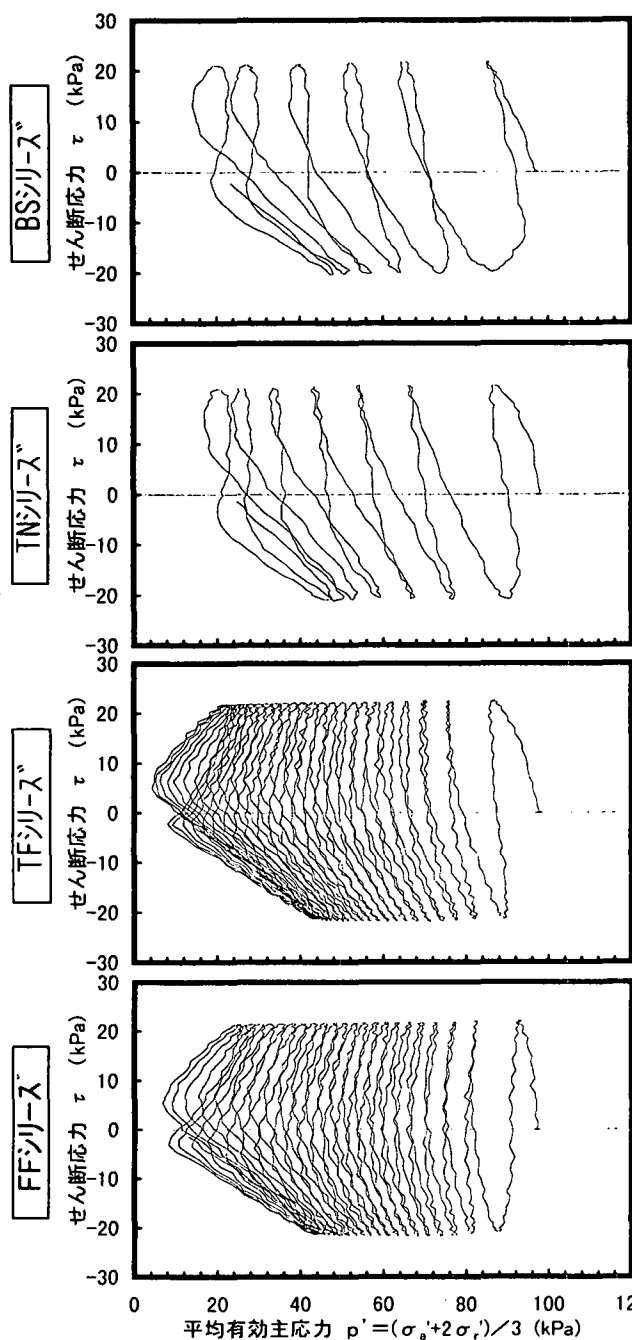


図-6 有効応力経路

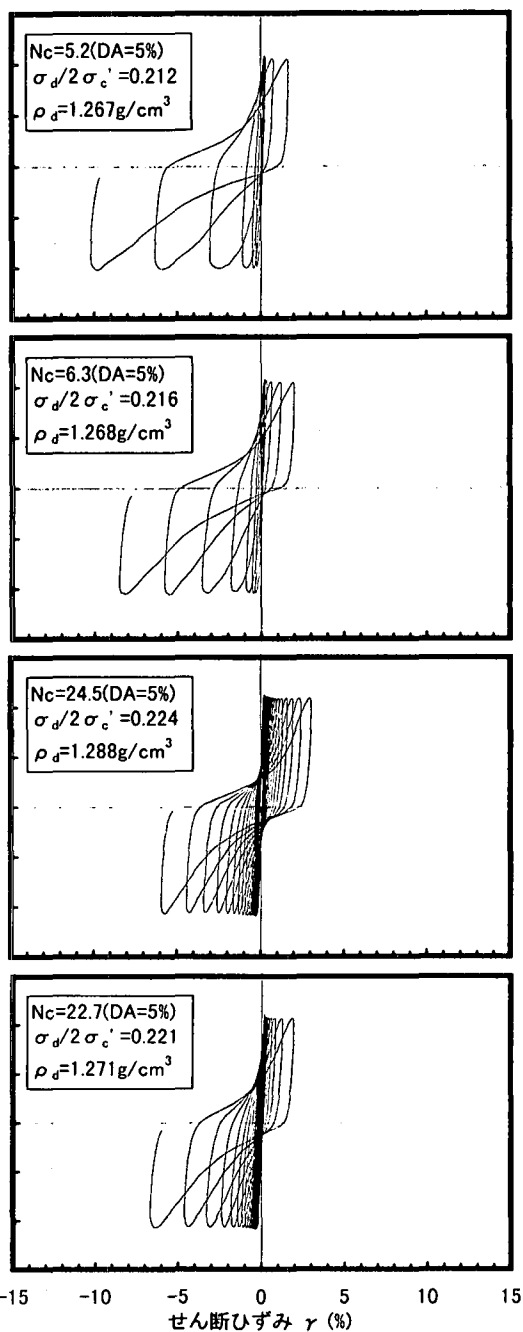


図-7 応力ひずみ関係