

# 小規模凍結サンプリングによる液状化地盤の試料採取の簡易的分析

長岡技術科学大学 大学院 ○野田 悠斗  
長岡技術科学大学 正会員 志賀 正崇・池田 隆明・高田 晋  
基礎地盤コンサルタンツ株式会社 正会員 武政 学・小林 陵平

## 1. はじめに

高品質な地盤試料を採取することは、実際の地盤の物理的特性・科学的特性を把握するために非常に重要である。しかし、従来用いられてきた手法であるチューブサンプリングなどは、サンプリング時に乱れが生じてしまい、正しい地盤の特性を把握することができない<sup>1)</sup>。そのため、地盤試料を高品質に採取する手法として、地盤を凍結させた上で試料を採取する方法である凍結サンプリングが開発された。凍結サンプリングは最も高品質な試料を得られる方法として知られているが、1か所あたり数千万円以上ととても高額であるため、発電所などの重要施設でのみ行われているのが実情である。こうしたことから筆者の一部は、より安価で、必要な面積が小さく、高品質な地盤試料を採取する方法として小規模凍結サンプリングが開発されてきた<sup>2)3)</sup>。

図-1 に小規模凍結サンプリングの標準的な手順を示す。小規模凍結サンプリングではまず、指定深度まで掘削した後、孔底から凍結管兼掘削管をセルフボーリングにより静的に貫入させる。セルフボーリング時には掘削管が貫入される部分の土を排出する必要があるため、別により径の小さい送水管を掘削管の内部に入れ、清水を還流させる。

指定の貫入深さに到達した後、一旦送水管を除去し、液体窒素を還流させる別の二重管を凍結管内に挿入する。この二重管の外管は先端が閉塞されており、液体窒素は凍結管内に漏れることはない。液体窒素の還流とともに、凍結土塊は凍結管の周囲から徐々に形成される。熱絶縁のためのウレタンフォームに設置された熱電対によって、凍結管から複数の距離での温度を計測し、最外部の温度が 0℃ を下回った段階で、還流を終了させ、凍結土塊の引き上げを行う。

本手法は過去、加圧土層などを用いた室内実験では一定程度成功しているものの、近年の地震で液状化が確認された緩い砂質土地盤での現場試験は限られている。そこで、後述する令和 6 年能登半島地震で液状化した新潟市立曾野木小学校を調査対象地とし、液状化した実際の砂地盤での適用可能性を検討する目的で、小規模凍結サンプリングの現場試験を実施した。

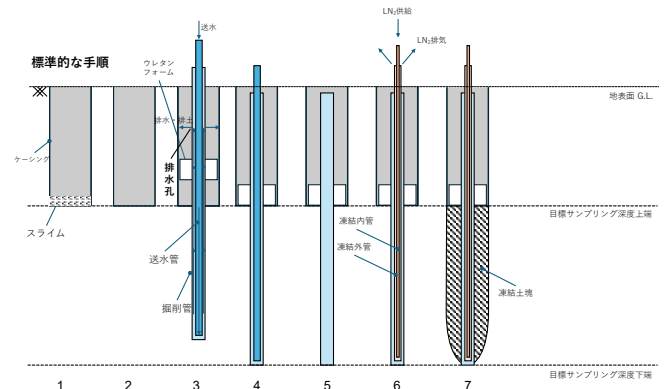


図-1 小規模凍結サンプリングの標準的な手順

## 2. 調査対象地周辺の地理的状況とサウンディング試験結果

曾野木小学校周辺では、地面の隆起や沈下、噴砂、電柱や門扉などの傾斜など、液状化による被害が多く発生した<sup>4)</sup>。図-2 に、曾野木小学校の位置する旧地形<sup>5)</sup>と微地形<sup>6)</sup>を表した地図を示す。曾野木小学校の位置する天野地区は、信濃川の右岸に位置し、旧河道、自然堤防、後背湿地から構成されている。旧河道部分は 1860 年に河道ではなくなり<sup>7)</sup>、1909 年には曾野木小学校の前身となる曾野木尋常小学校が建設された<sup>8)</sup>。

小規模凍結サンプリングの前段階として、ボーリング調査と標準貫入試験を小学校の校庭で行った。

ボーリング調査により得られた柱状図を図-3 に示す。図-3 より、細砂の層が G.L. -0.35m から G.L. -5.80m に存在しており、地下水位は G.L. -0.85m に存在している。細砂の層の平均 N 値はおよそ 9 であり、G.L. -3.0m 付近に腐食土の挟み層が存在していた。一方、G.L. -5.80m 以深は G.L. -7.70m まで有機質土が堆積し、G.L. -9.60m まで砂質シルト層が堆積している。

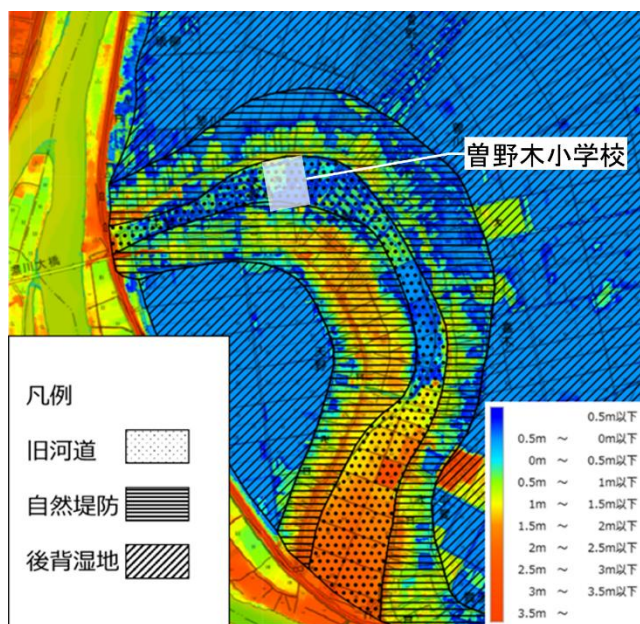


図-2 天野地区の旧地形と微地形

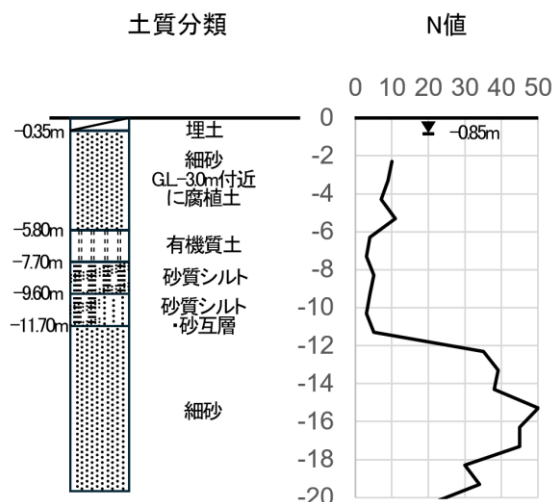


図-3 ボーリング柱状図

また本研究ではスクリーウェイトサウンディング試験 (SWS) と簡易コーン貫入試験 (PDCPT) も

実施した。SWS による深度-換算 N 値を図-4 に、PDCPTにより得られた深度-換算 N 値を図-5 に示す。なお試験値から換算 N 値への変換には稲田<sup>9)</sup>と岡田<sup>10)</sup>の提案した式を用いた。また後述する小規模凍結サンプリングを実施した区間を灰色で示す。

SWS による換算 N 値は、深度が G.L. -3.5m までは 1 から 7 と比較的小さいが、G.L. -3.5m から G.L. -6.0m まではほとんどの深度で 10 を超えており、G.L. -6.0m 以降はほとんど 1 となっている。この急激な換算 N 値の低下は、図-3 における細砂と有機質土の境界に対応すると考えられる。

PDCPT による換算 N 値は、G.L. -0.2m、G.L. -0.3m で 8 を記録した後大きく減少し、G.L. -5.0m まで徐々に増大している。換算 N 値の絶対値は異なるものの、ボーリング調査での細砂に相当する深度において、深度が上昇するごとに換算 N 値が上昇する傾向は SWS でも PDCPT でも見られた。

上記の複数の結果を踏まえ、地表面を除き飽和した細砂が G.L. -1m 付近から G.L. -6m 付近に位置すると考えられる。また G.L. -3.0m 付近に腐植土層がわずかに存在する。腐植土は間隙比が大きく、他の層と比較してより凍結速度が速く、同じ条件で凍結を行うと他の層より凍結土塊の径が大きくなると考えられ、土塊引き上げの際の妨げになることが想定され

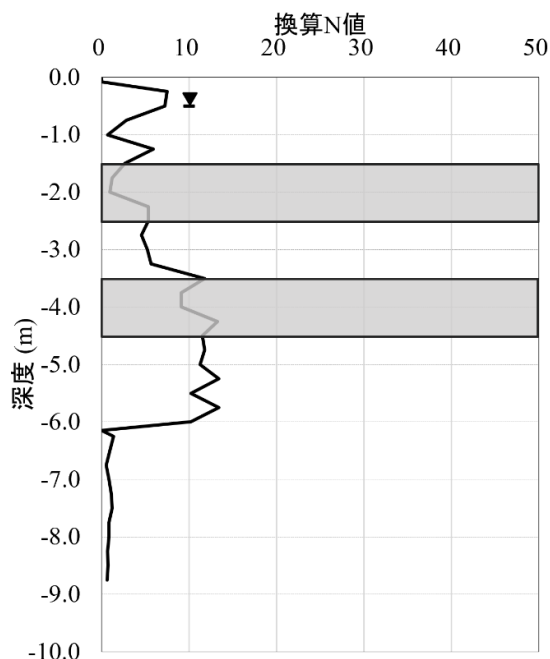


図-4 SWS による深度-換算 N 値

た. そのため, 小規模凍結サンプリングによる試料の採取は, 腐植土層を避け, 細砂の存在が確認できた深度範囲から, G.L. -1.5m から G.L. -2.5m と, G.L. -3.5m から G.L. -4.5m の 2 つの区間で小規模凍結サンプリングを実施することとした.

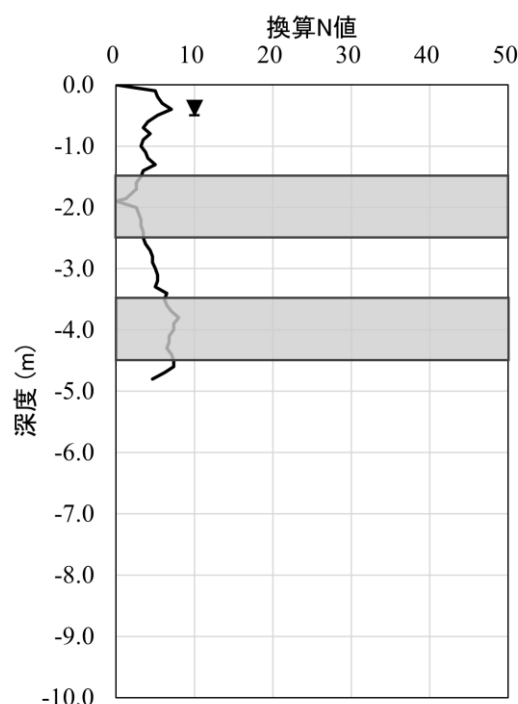


図-5 PDCPT による深度-換算 N 値

### 3. 採取したサンプルに関する分析

採取した試料を図-6 および図-7 に示す. 図-6 から,



図-6 G.L. -1.5m の試料

G.L. -1.5m の試料は土塊の径が均一であることがわかる. 一方で, 先端部の凍結土塊は一部が欠損していた. また, 図-7 から, G.L. -3.5m の試料は土塊の形状が不定であり, 上部と下部の径が小さく歪な形となっていることがわかる.



図-7 G.L. -3.5m の試料

図-9 と図-10 に G.L. -1.5m におけるサンプリングの状況, G.L. -3.5m におけるサンプリングの状況をそれぞれ示す. 標準的な手順の場合, 凍結土塊は最下端以外では径が一定であり, 最下端では径が小さくなりすばむ傾向がある. G.L. -1.5m の試料も概ね同様の形状であったが, 最下端には凍結土塊が存在しない状態であった. この原因としては, 図-9 の 4 並びに 5 ステップに示すように, 途中に設けた排水孔から砂粒子を多く含む泥水が逆流し, 残存したスライムが掘削管の中に堆積, その後挿入した凍結管が最下端まで到達できなかったためであると考えられる.

一方, 図-10 に示す G.L. -3.5m の試料は, ステップ 2 で孔内が清水で希釈されたためスライムが孔底に堆積した. その後ステップ 4 で示すように断熱用のウレタンフォームが孔底に届かなかったため, ステップ 5 で掘削管を上下させたり追加の送水を行った. このことにより掘削管末端部に乱れが生じた. 最終的な形状としては, ①スライムによって乱された状態で堆積した領域, ②比較的原地盤の状態を



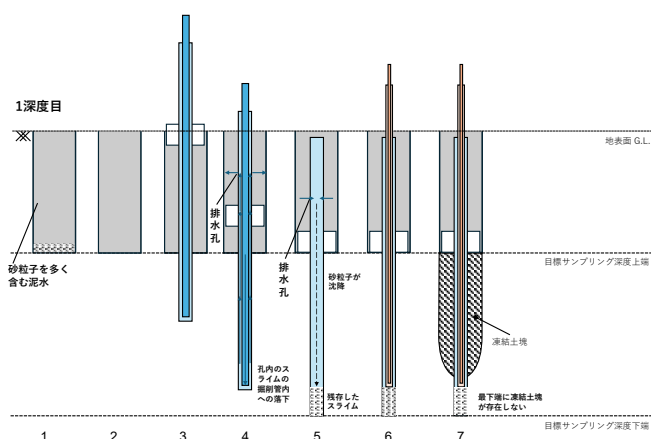


図-9 G.L. -1.5m におけるサンプリングの状況

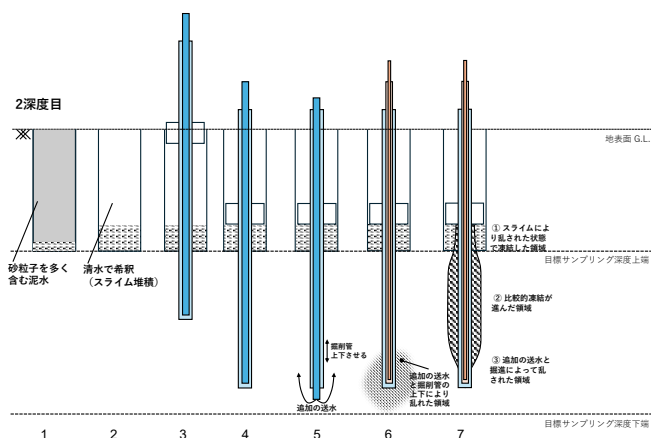


図-10 G.L. -3.5m におけるサンプリングの状況

保ったまま凍結が進んだ領域、③追加の送水と屈伸によって乱された領域、の3領域に別れたサンプルが得られたと推察される。

#### 4. 結論

本稿では、高品質な地盤試料を採取する方法として開発された小規模凍結サンプリングを、実際の液化した砂地盤での適用可能性を検討する目的で現場実験を行った。その事前段階として標準貫入試験とボーリングによる土質区分の調査も実施した。

ボーリング調査の結果から、腐植土の挟み層を避け、細砂のみでサンプリングを行うことができる G.L. -1.5m から-2.5m の層と G.L. -3.5m から-4.5m の層で小規模凍結サンプリングを行った。採取した試料は、G.L. -1.5m では土塊の径が均一であったが、最下端が欠損していた。これは掘削管内にスライムが堆積し、凍結管が最下端まで挿入できなかったこと

が原因であると考えられる。一方、G.L. -3.5m では土塊の形状が不定であった。この理由としては、孔底に堆積したスライムによって目標深度下端まで掘削管が挿入できず、孔底のスライムと追加の送水ならびに掘削管を上下させたことによる乱れによって、不定な形状が形成されたと考えられる。

#### 謝辞

本研究の現地調査に際しては、曾野木小学校ならびに新潟市教育委員会の皆様に多大なるご協力を賜りました。ここに記して深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 公益社団法人 地盤工学会：地盤調査の方法と解説—二分冊の1—, p.217, 丸善出版
- 2) 小林陵平・湯川浩則・清田隆：小規模凍結サンプリングの実用化に向けた基礎実験，第54回地盤工学研究発表会，pp.175-176, 2019.
- 3) 謝沛宸・清田隆・片桐俊彦・志賀正崇・武政学：複合式セルフボーリング凍結管の挿入時の挙動に関する模型実験，第57回 地盤工学研究発表会，2021.
- 4) 石川敬祐・安田進：2024 年能登半島地震 地震被害調査—速報—, 02—, [https://committees.jsce.or.jp/eec205/system/files/Ishikawa\\_TDU\\_2024NotoEq\\_02.pdf](https://committees.jsce.or.jp/eec205/system/files/Ishikawa_TDU_2024NotoEq_02.pdf) (2025 年 10 月 14 日閲覧)
- 5) 国土交通省：国土数値情報，<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html> (2025 年 10 月 1 日閲覧)
- 6) 国土地理院：地理院地図，<https://maps.gsi.go.jp/> (2025 年 10 月 1 日閲覧)
- 7) 新潟市：江南区の歴史 - 新潟市，<https://www.city.niigata.lg.jp/konan/about/history.html> (2025 年 10 月 14 日閲覧)
- 8) 新潟市：学校紹介 - 新潟市立曾野木小学校，<https://sonokie.city-niigata.ed.jp/syoukai.html> (2025 年 10 月 14 日閲覧)
- 9) 稲田倍穂：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について，土と基礎，Vol.8, No.1, pp.13-18, 1960.
- 10) 岡田勝也・杉山友康・村石尚・野口達雄：盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング試験結果の相関性，土と基礎，Vol.40, No.411, pp.11-16, 1992.