

凍結工法に適用する凍上・解凍沈下予測手法の検討 —遠心模型凍上実験—

鹿島建設(株) 正会員 ○小原 隆志, 吉田 輝  
正会員 川野 健一, 森川 誠司, 大野 進太郎

1. はじめに

地盤凍結工法における凍上や解凍時の地盤変状を評価する予測技術は、近年のシールドの大断面・大深度化に伴う凍結土量の大規模化によって、その重要度を増してきている。人工凍結による凍上現象は、熱伝達やアイスレンズの発達に伴う土中水の浸透問題を含んだ拘束圧条件下での変形問題であるため、予測解析にはこれらの問題を統一的に扱うことが可能な手法が必要である。そこで筆者らは、熱・力学・浸透流連成弾塑性 FEM による解析手法を開発し<sup>1)</sup>、その信頼性を確認する目的で、実工事レベルでの土被り圧における凍上・解凍沈下現象を再現した。本編では、実規模の拘束圧下で凍結・融解を可能とする遠心力载荷装置を用いた凍結実験装置の概要と実験結果について報告する。

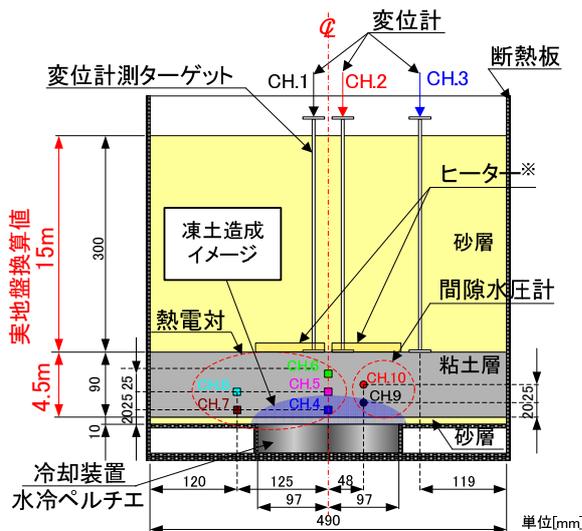
2. 実験装置及び実験方法

写真 1 は今回開発した遠心力载荷試験用の凍結実験装置である。回転するプラットフォーム上の土槽内部を冷却するために、水冷式ペルチエを冷却装置として採用した。電力によりペルチエ表面の冷却板温度を低下させ土槽内の地盤を凍結させる一方で、ペルチエ背面側に生じた放熱を循環水で冷却する。ここで熱を与えられた循環水はスリッピングを介して地上側の冷凍機により再冷却され、水冷ペルチエ内に循環される。これらの冷却装置は地上上部で制御可能であり、冷却能力の範囲内で任意に凍結・解凍を行うことができる。

図 1 に実験模型図を示す。地盤は上下の砂層と粘土層（凍上層）で構成され、粘土層表面に沈下板を、粘土層内部に熱電対をそれぞれ複数配置した。凍結は地盤底部の中央に配置した冷却装置によって行い、粘土層下端から凍土を造成した。表 2 に示す実験ケースの内、ケース 2 では、途中、粘土層上端からのヒーター加熱によって一時的に凍土を強制解凍した後、再凍結を行った。最終的には、循環水を温水に切り替え冷却装置表面の温度を上昇させることで凍土を解凍した。下部の砂層は凍結解凍時の吸排水層として設けた。なお、遠心加速度は 50G とし、粘土層には実規模換算で 15m 程度の土被りが作用する状態で実験を行った。遠心場で



写真 1 実験装置



※実験ケース2の強制解凍で使用

図 1 実験模型図

表 1 模型地盤及び計測項目

地盤材料	砂層: 豊浦砂	土粒子密度 $\rho_s=2.64\text{g/cm}^3$ 単位体積重量, $\gamma=19\text{kN/m}^3$ 砂層下端面の鉛直有効応力 $\sigma'_v=140\text{kN/m}^2$
	粘土層: 藤ノ森粘土	土粒子密度 $\rho_s=2.67\text{g/cm}^3$ 液性限界 $w_L=44.1\%$ 塑性限界 $w_P=16.5\%$ 凍結膨張率 $\xi=12\%$ at $\sigma'_v=150\text{kPa}$ 単位体積重量, $\gamma=18\text{kN/m}^3$ 地盤作成時の先行圧密により過圧密状態, OCR=1.5~2.4 層厚 $h=4.5\text{m}$
計測項目	粘土層 表面沈下量	変位計×3箇所
	地盤内部温度	熱電対×5箇所
	間隙水圧	間隙水圧計×2箇所

\*応力・寸法値は実規模に換算した値

表 2 実験ケース

実験ケース	実験方法及び目的
1	凍結～解凍 凍上・解凍沈下の基本的挙動の確認⇒本編で報告
2	凍結～ヒーター強制解凍～再凍結～解凍 凍結融解繰り返し時の挙動確認及び解析との整合性確認⇒大野ら <sup>1)</sup>

キーワード 凍結工法, 凍上, 解凍沈下, 遠心力载荷試験

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 TEL 042-489-7416

の熱伝導の相似則については、 $1/n$  模型では温度勾配が  $n$  倍になるため、浸透現象と同じく時間経過は実物挙動の  $1/n^2$  と解釈されるが、顕熱や潜熱に関わる熱容量は  $1/n^3$  となるため、統一的な相似とはならない。本編ではケース 1 の結果について報告する（ケース 2 については大野ら<sup>1)</sup>を参照されたい）。

### 3. 実験結果（ケース 1）

図 2 は、遠心载荷開始時刻から粘土層の沈下量や間隙水圧が収束するまでの圧密過程（0～1.5hr）、凍結過程（1.5～7.1hr）、解凍過程（7.1～8.5hr）の各計測値の経時変化（時間軸は試験時間）を示したものである。なお、各センサのチャンネル No. と設置位置は図 1 に示す通りである。

凍結過程では土槽底部からの冷却によって地盤内温度が徐々に低下する様子が分かる。初期温度 21℃からペルチエの表面温度は約 1.8hr で 0℃以下になり最終的には -9.1℃に達した。地盤内の温度分布から粘土層では CH.5 付近（ペルチエ表面から 30mm 程度）まで凍結されたと判断できる。また、2.2hr 付近に見られるペルチエと CH.4 の温度の一時的な増加は、地盤内の氷の生成（相変換）に伴う潜熱の吸収によるものと推察される。CH.1 及び CH.2 では、3.2hr 付近から凍上が始まり凍結終了時の最大凍上量は実規模換算で約 2.0cm であった。凍土から離れた位置にある CH.3 は凍結中の変位がほとんど生じていない。凍結開始後に水圧が上昇し始めるのは、粘土層下部の凍上によって上部の未凍結部が圧密作用を受けたためと考えられる。凍土範囲にある CH.9 はセンサ凍結により 4.5hr 付近から計測値が大きく乱れている。

解凍過程では、解凍開始直後から大きな沈下が発生し、凍土が完全に解凍した後も緩やかな残留沈下が生じている。CH.1 及び CH.2 では最大沈下量（解凍開始時から終了時までには発生した変位）は実規模換算で約 5.6cm であり、凍上量に対して 2.8 倍もの沈下量が発生した。特に、凍上変位が生じなかった CH.3 についても大きな沈下が発生している。実工事においても、凍上量に対して解凍時の沈下量の方が大きくなるケース<sup>2)</sup>があるのは、鉛直及び水平方向に生じる凍上に対し、鉛直方向のみに生じる沈下の方が影響が集中するためと解釈できる。本実験結果では、凍上量と解凍沈下量の関係は 1 : 3 であった。

### 4. おわりに

開発した凍結遠心実験装置により、凍結工事が行われる実際の土被り圧条件下での地盤の凍結・解凍実験を行った。その結果、凍結前に比べ残留沈下が生じる解凍沈下現象を再現することができた。

### 参考文献

- 1) 大野ら：凍結工法に適用する凍上・解凍沈下予測手法の検討—熱・力学・浸透流連成 FEM 解析—，土木学会第 66 回年次学術講演会，2011 年。（講演予定）
- 2) 山田正男：地盤凍結と強制解凍による凍上・沈下の一考察，土木学会論文報告集，第 234 号，pp.97-109，1975 年。

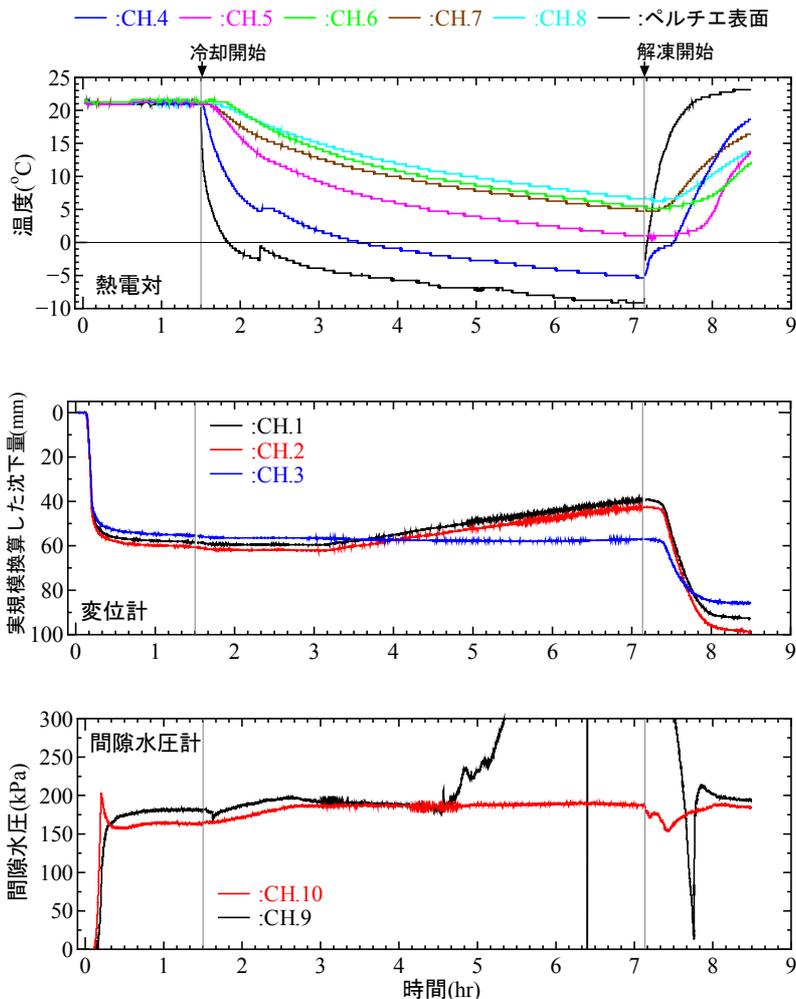


図 2 実験結果（ケース 1，圧密過程～凍結過程～解凍過程）