

岩盤切土斜面安定に関する凍結融解の影響検討

高橋 信之^{1*}・星野 吉昇¹・岡部 豊二²・高橋 章³・小野 丘⁴

¹東電設計株式会社 土木本部開発環境部（〒110-0015 東京都台東区東上野三丁目3-3）

²東京電力株式会社 千葉支店千葉工事センター（〒290-0055 千葉県市原市五井東二丁目15-10）

³東京電力株式会社 建設部土木・建築技術センター（〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1-3）

⁴北海学園大学 工学部社会環境工学科（〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目）

*E-mail: bnobuyu@tepsco.co.jp

寒冷地における岩盤切土斜面は経年的な凍結融解作用により劣化し、斜面の安定性が損なわれる可能性がある。経年切土斜面の維持管理のため、凍結・融解現象に伴う劣化状況を解明することを目的とし、凍結現象の発生確認のための室内試験、および現地の実測凍結速度を模擬した繰り返し室内凍結・融解試験を行った。その結果、試験に用いた供試体では、凍結過程にアイスレンズの発生・成長が確認でき、凍上量と吸水量がほぼ等しく凍上性を有していると判断できること、凍上量は凍結・融解回数に関わらずほぼ一定であること、融解後に元に戻らず変位が一部残留すること、潜在的なクラックが存在する場合、繰り返し凍結・融解により材料が分離する場合があること、等の知見が得られた。

Key Words : freeze-thaw, ice lens, freezing rate, cut rock slope, laboratory experiment

1. はじめに

寒冷地における岩盤切土斜面は経年的な凍結融解作用により劣化し、斜面の安定性が損なわれる可能性がある。凍上に関する研究は主に土質材料を対象としたものが多く、岩を対象とした凍上に関する研究は十分に行われていないのが現状である。本論文は、経年岩盤切土斜面の維持管理のため、凍結・融解現象を解明することを目的として実施した現地調査および室内試験結果について報告する。

2. モデル地点の地質および温度変化状況

モデル地点として長野県に位置する標高1,500mの切土斜面を選定した。当地点の地質は、秩父帯に属する堆積岩類であり、砂岩を主体とし、泥岩の薄層を不規則に挟んでいる。地質構造は概ね斜面に対し流れ盤であり、地質構造に調和的に熱水脈が発達し、熱水により粘土～砂状に劣化した弱層（岩盤等級はD級に相当）が法勾配と同程度の傾斜で存在する。

地表面、および斜面表面から地山深度方向に地中温度計が設置されており、温度変化の特徴は以下のとおりである¹⁾。地表面の最高温度は約20℃（夏期）、最低温度は約-15℃（冬期）で、年間の地表面温度変化量は約

35℃である。また、11月中旬より0℃以下を観測し、12月中下旬から地表面温度は0℃以下となり、翌年の3月下旬から4月初旬まで継続する。一方、地中深部においても季節的な温度変化が生じており、深度4.35mにおける夏期と冬期の温度変化量は最大10℃である。また、地中温度が0℃以下となる凍結深度は、近年で最も気温が低い1999年度の冬期で2.85mで浅である。

3. 凍結・融解作用の影響確認のための現地調査

(1) 調査対象箇所

モデル斜面の凍結・融解作用の影響範囲並びにメカニズムを解明するために、ボーリング調査を行い、凍結の影響のある時期（冬期：2月）と無い時期（秋期：11月）にボアホールスキャナー撮影により孔内の観察を行った。また、凍結・融解の影響の無い秋期に採取したボーリングコアを用いて、次項の室内凍結・融解試験を実施した。

ボーリング調査位置は、強度低下がほぼ収束しているD級岩や凍上現象が発生しにくい透水性が極端に低い新鮮な岩は対象から除外し、CL～CM級岩盤（砂岩）を対象とした。なお、当該箇所の岩盤変位計測結果によれば、冬期における変位量は年毎に異なるが1mm～3mm程度であり、凍上が発生している可能性がある。

(2) 調査内容

冬期のボーリング削孔に際しては、アイスレンズ（凍結面へ周辺の水が吸い寄せられて氷として析出し、レンズ状となったもの）が融解しないよう不凍液を用い、コア採取後直ちにコアを割り観察した。また、秋期に削孔したボーリング孔（冬期に冷気が流動しないように保護した）および冬期に削孔したボーリング孔内のボアホールスキャナーによる観察を行った。

(3) 調査結果

現地調査のコア観察および画像観察の結果、アイスレンズは確認できなかった。この原因として調査時における地盤内の水分量が少なかったことが可能性として考えられる。

4. 室内凍結・融解試験

切土斜面の岩が凍結・融解作用を受けることによる影響を把握するために、ボーリングコアを用いて室内凍結・融解試験を実施した。

(1) 凍結速度の設定

凍結・融解試験における温度勾配²⁾、凍結速度²⁾は図-1のように定義される。アイスレンズ形成は、一般に凍結速度による影響が大きく、温度勾配による影響は小さいため、本試験ではモデル斜面の地中凍結速度と一致させた。

凍結速度を求めるため、図-2のように深度、経過時間と地中温度の関係を整理し、凍結速度を求めた。

地中温度のイソプレット図の一例を図-3に示す。図-3において、例えば「薄い水色」は「温度-2 ~ 0」, 「紫色」は「温度0 ~ 2」の温度ゾーンを表し、両者の境界（赤線で示す）が0線の深さ、時刻を表す。

本地点の凍結速度の平均値は1.3mm / 時間となる。

(2) 試験方法

a) 試験ケース

試験は次の2種類を立案し、実施した。

- ・ アイスレンズの発生確認試験：0線停止凍結試験
- ・ アイスレンズの成長確認試験：繰り返し凍結・融解試験

「0線停止凍結試験」は、供試体の内部で0線を停止させてアイスレンズ発生の有無を確認する試験であり、今回の砂岩が材料特性として凍上性を有しているかどうか

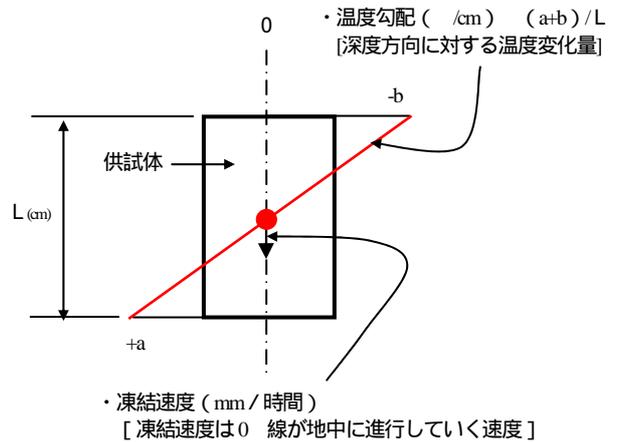


図-1 温度勾配と凍結速度

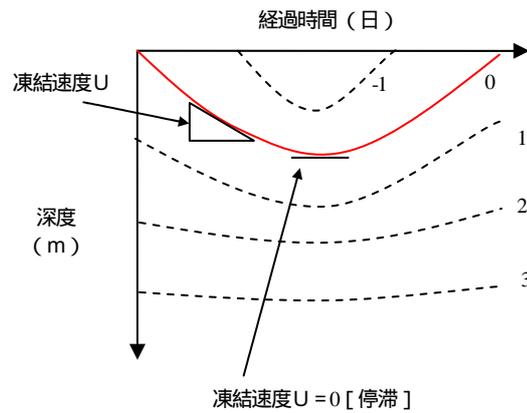


図-2 地中温度のイソプレット図

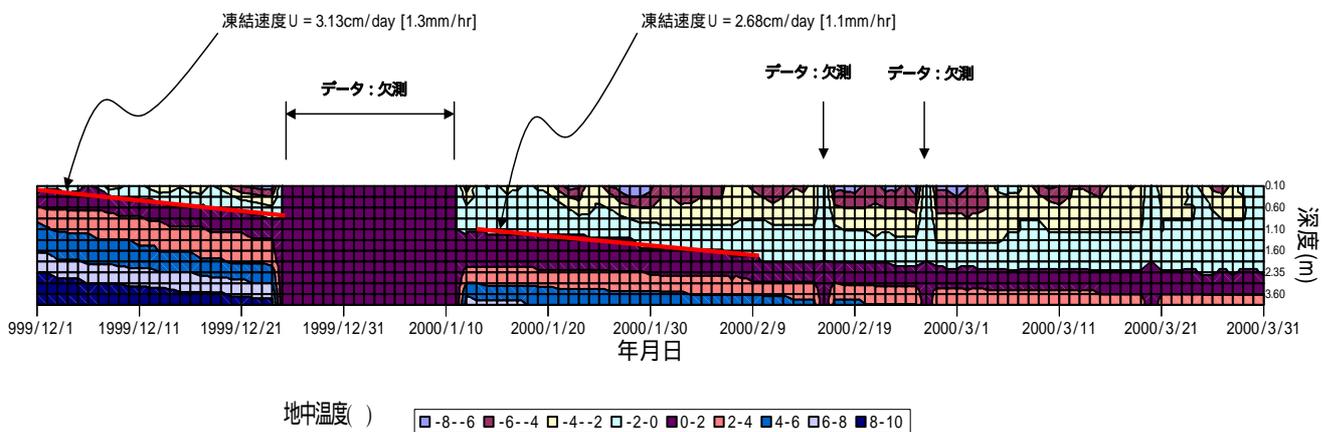


図-3 N2観測孔におけるイソプレット図 (1999年~2000年)

かを確認することを目的とする。

「繰り返し凍結・融解試験」は、現場の凍結速度を模擬した条件下で繰り返し凍結・融解履歴を与えた場合に、アイスレンズの発生・成長および吸水・凍上が観察されるかどうかを確認することを目的とする。

b) 試験概要

凍結・融解試験は図-4 に示す凍結三軸試験装置により行った。供試体には鉛直応力 (10 ~ 15kPa) だけを与え、供試体上・下端面から温度降下・上昇して、下端面から吸水させる。また、供試体周囲には水分の蒸発が生じないようにグリスを塗布し、供試体上面には初期の氷核形成を助けるためにキャップと供試体上端面との間に飽和砂を敷く。

c) 0 線停止凍結試験方法

両端面温度降下式²⁾により、図-5(1)に示すように凍結速度 1.3mm/時間、温度勾配 1.0 /cm とし、0 線を供試体上端面より 48mm の位置に停止するよう設定し、試験を行った。

d) 繰り返し凍結・融解試験方法

両端面温度降下方式により、図-5(2)に示すように凍

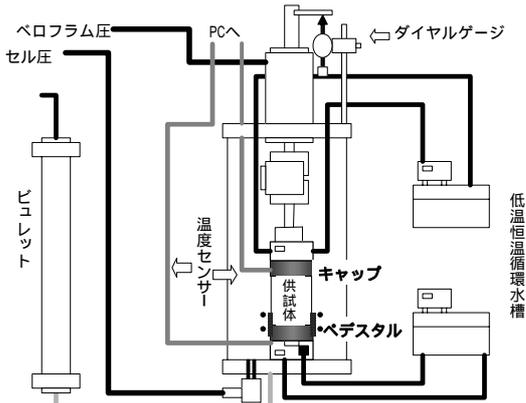


図-4 凍結三軸試験装置

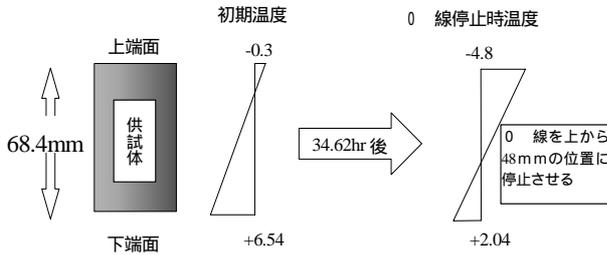


図-5(1) 0 線停止試験方法

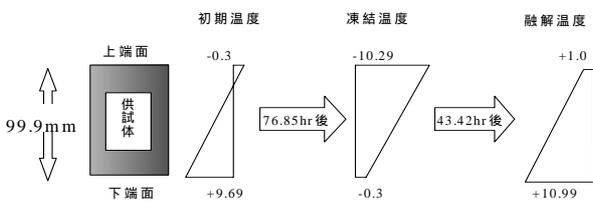


図-5(2) 凍結・融解繰り返し試験方法

結速度 1.3mm/時間、温度勾配 1.0 /cm とし、0 線が供試体下端面を通過するまで温度を降下した後、融解速度を 2.6mm/時間として完全に融解させる。

(3) 試験結果

a) 0 線停止凍結試験

0 線停止凍結試験の温度、鉛直変位および吸水量の結果を図-6 に示す。上端面より 48mm の位置で 0 線を停止させたところ、上端面より約 40mm の位置に薄いアイスレンズが約 115 時間後に目視で確認された。しかし、その後発生したアイスレンズの下側の供試体表面とメンブレンとの間に氷が発生したため、凍結開始から 121 時間後に 0 線を上端面から 30mm の位置に移動して凍結試験を継続した (図-6 の水色の線の右側)。このとき異常な吸水が計測されたが、これは融解の影響で融解水が供試体の外へ排水されたためと思われる。このため急激な吸水量を除外し、推定吸水量として求めた結果を図-6 の細線で示す。0 線を上端面から 30mm に移動させた後にも新たにアイスレンズの発生・成長を再度確認した。

図-6 において、初期の 40 時間までの鉛直変位量は氷核形成のために供試体上面に敷いた飽和砂分の凍上量であると考えられ、凍結時間が約 100 時間を越えた後に発生している変位量はアイスレンズによる凍上変位量と考えられる。図-6 から、断面積当たりの推定吸水量はほぼ鉛直変位量と一致しており、かつアイスレンズが認められることから、この試料は凍上性があると判断される。

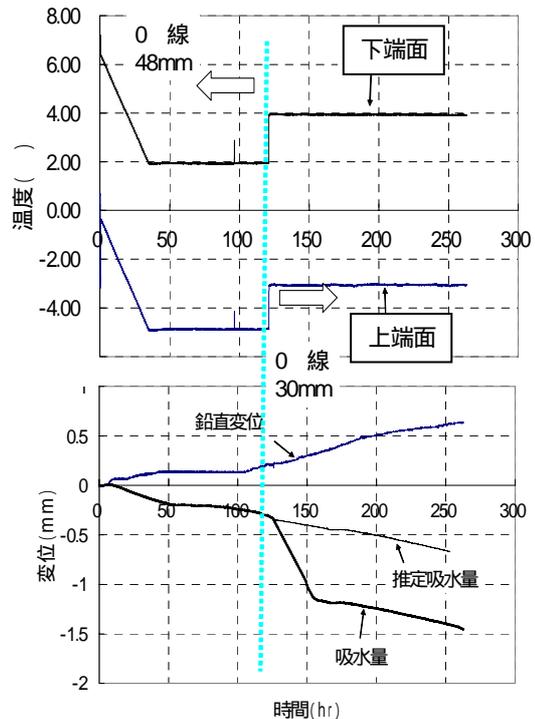


図-6 0 線停止凍結試験結果

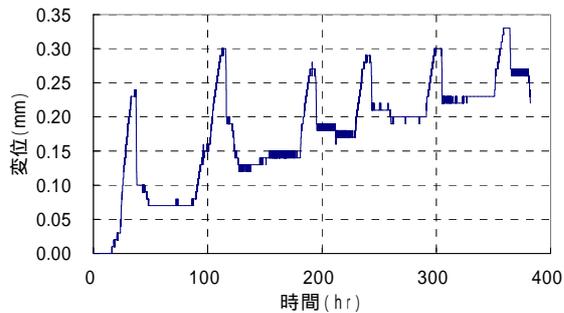


図-7 繰り返し凍結・融解試験結果（凍上変位だけを抽出）

b) 繰り返し凍結・融解試験

繰り返し凍結・融解試験の結果を図-7 に示す。凍結・融解繰り返しでの2回目の試験後に下面から30mmの位置にアイスレンズが発生して材料が分離した。この箇所は元々存在した供試体の潜在的なクラック部である。試料が分離したので3回目以降の凍結履歴は分離部分をカットした短い供試体を用いて行った試験結果である（カット後の供試体の高さは57.45mm）。図-7は試験開始時に発生している飽和砂分の凍結による鉛直変位量を差し引いて、凍上変位だけを抽出して連続的に示したものである。同図より、1、2回目の変位量に比べ3～6回目の変位量が小さくなっているが、これは供試体を短くしたことによる。

そこで凍上量と初期の供試体高さの比を凍上率とし、凍上率と残留変位量でまとめた結果を表-1 に示す。表-1より、繰り返しによる凍上率に大きな変化は見られず、原地盤においても凍上による変位量はほぼ一定の比率で発生し、融解後は変位の一部が残留すると考えられる。

5. まとめと考察

以上の結果より、次の知見が得られる。

表-1 凍上率と残留変位

履歴回数	最大凍上量	飽和砂分の凍上量	残留変位	供試体高さ (mm)	実質凍上量 (mm)	凍上率 (%)	実質残留変位量
一回目	0.26	0.03	0.10	99.90	0.23	0.230	0.07
二回目	0.32	0.09	0.15	99.90	0.23	0.230	0.06
三回目	0.33	0.19	0.24	57.45	0.14	0.244	0.05
四回目	0.35	0.23	0.27	57.45	0.12	0.209	0.04
五回目	0.31	0.21	0.23	57.45	0.10	0.174	0.02
六回目	0.31	0.21	0.25	57.45	0.10	0.174	0.04

- ・ 冬期における削孔直後のボーリングコア観察およびボーリング孔のポアホールスキャナー観察では、アイスレンズを直接観察することはできなかった。この原因として調査時における地盤内の水分量が少なかったことが可能性として考えられる。
- ・ 今回用いた岩石試料の0線停止凍結試験結果より、アイスレンズの発生・成長を確認することができた。これより、原地盤の材料特性として凍上性があると判断される。
- ・ 凍結・融解の繰り返し回数が増加しても、凍結・融解による凍上量（変位量）に大きな変化は見られず、原地盤においても凍上による変位量はほぼ一定の比率で発生し、融解後は変位の一部が残留すると考えられる。
- ・ 潜在的なクラックが存在する場合、繰り返し凍結・融解履歴を与えることにより試料が分離する可能性があること確認された。

参考文献

- 1) 日比野悦久, 神野恵介, 高橋 章, 高橋信之, 岡部豊二, 小野 丘: 寒冷地における長大切土斜面の安定性評価, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (社)土木学会, pp.355-360, 2004.
- 2) 小野丘, 山本英夫, 伊豆田久雄: 土の凍結と地盤工学 4.凍上試験法, 土と基礎 NO. 545, (社)地盤工学会, pp.47-52, 2003年6月.

FREEZE-THAW INFLUENCE TO THE STABILITY OF CUT ROCK SLOPE

Nobuyuki TAKAHASHI, Yoshinobu HOSHINO, Toyozzi OKABE, Akira TAKAHASHI and Takashi ONO

Instability of cut rock slope due to the seasonal freeze-thaw action should be considered in cold regions to preserve it. Laboratory tests and field observations were carried out to investigate a durability of frozen-thawed rock slope. Segregation of ice lens was observed in the intact rock specimen in the laboratory indicating the frost susceptibility of the rock, and the frost heave rates were obtained similarly for each cyclic freeze-thaw process, which caused residual displacement in the sample. It was shown as well that the rock specimen had possibility to separate from its potential crack as a result of the cyclic freeze-thaw processes.