

凍上対策のための熱伝導解析に関する一検討

A Consideration on Heat Conduction Analysis for Frost Heave Countermeasures

土木研究所寒地土木研究所	○正 員	山木正彦 (Masahiko Yamaki)
同 上	正 員	畠山 乃 (Osamu Hatakeyama)
同 上	正 員	佐藤厚子 (Atsuko Sato)
日特建設株式会社	正 員	池田 淳 (Jun Ikeda)
同 上		飯塚孝之 (Takayuki Iiduka)
日本基礎技術株式会社	正 員	中村 剛 (Tsuyoshi Nakamura)

1. はじめに

北海道のような寒冷地における切土のり面は、冬期間の凍上現象やその後の融解、春先の融雪水の影響を受けて崩壊する事例が多々確認される。写真-1は凍上により損傷したグラウンドアンカー頭部の様子である。凍上により隆起した切土のり面が受圧構造物を押し上げ、引張材が塑性域まで変状した結果である。

凍上とは、温度の低下によって形成された地中の凍結面に未凍土側（主に深度方向）から水分が移動し、その凍結面で水の層（アイスレンズ）が成長した結果生じる地盤の隆起である。凍上現象の理論は十分に確立されていないのが現状だが、「温度」、「水分」、「土質」の3つの要素（条件）が全て揃うことで発生すると言われている。簡単に述べると、地中に凍結面を生じさせる「温度」と、アイスレンズを形成する「水分」、アイスレンズを形成するに適度な透水性を有する「土質」である。つまりは、これら3要素のどれか1つ以上の条件を取り除くことが対策の基本的な考えとも言える。

本報では、これら3要素のうち温度に着目し、断熱による凍上対策の基礎的検討を行った。具体的には、寒地土木研究所が所有する苫小牧施工試験フィールドにおいて、断熱材の有無による地中温度の差異を計測し、それらの結果を基に2次元FEM熱伝導解析による再現解析を実施した。併せて、解析で凍結深を予測する際、付与する温度条件に関して過去の気象データから設定する手法を試みたので報告する。

2. 現地計測

2.1 概要

寒冷地において、冬期および春期の地中温度がどのような分布を呈しているか把握するために、寒地土木研究所が所有する苫小牧施工試験フィールドにおいて、地中温度計測を行った。計測に際しては、断熱対策の有無やその効果の範囲も把握するために、ゴムマット（厚さ2cm）を敷設したケースの計測も行っている。得られた計測結果は、2次元FEM熱伝導解析の基礎データとした。

2.2 地盤条件

当該地盤は凍上に関する試験フィールドとして造成されたもので、強い凍上性が認められる火山灰質粘性土（凍上速度 $U_f=0.78\text{mm/h}$ ）で表層90cmが置換されている。造成時の締固め度は99.8%で、コーン指数は667kN/m²



写真-1 凍上によるグラウンドアンカー頭部の損傷

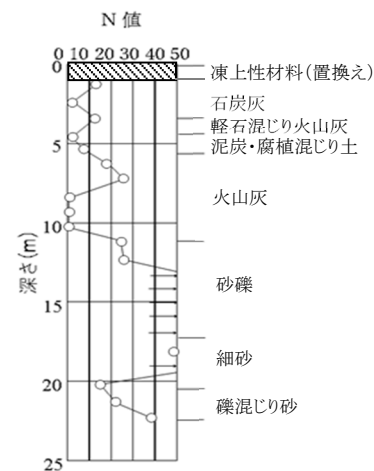


図-1 原位置地盤構成

であった。90cm以深は、石炭灰、軽石混じり火山灰、泥炭・腐植混じり土、火山灰と比較的軟らかい土質が続く、12m以深は比較的硬い土質となっている（図-1）。

なお後述する熱伝導解析においては、深度5mまでをモデル化しているが、そこでは簡略化のため、全て置換えした火山灰質粘性土として扱っている。

2.3 原位置気象条件

一時間毎の気温と日平均気温の累積値を図-2に示す。11/1から12/24のデータは直近の道路テレメータデータを使用し、それ以外は原位置で計測した気温データである。原位置の気温は、高さ約1.5mの位置で百葉箱内に格納した熱電対で計測している。

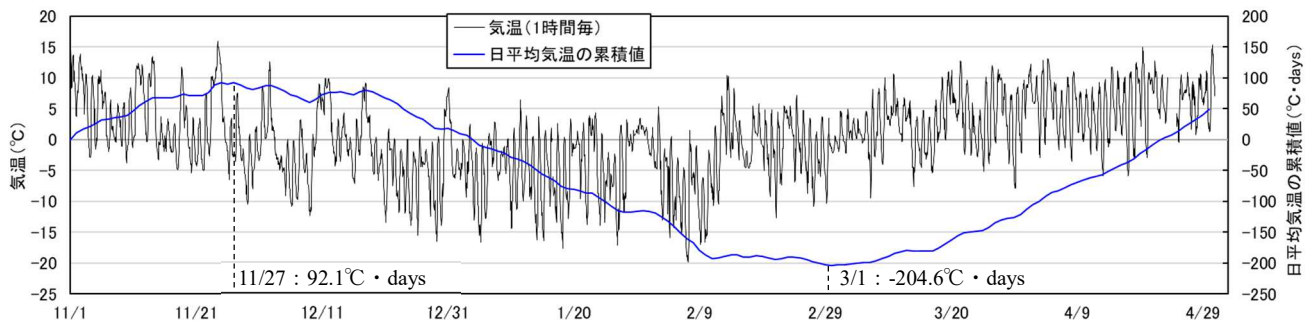


図-2 原位置の気温と日平均気温の累積値

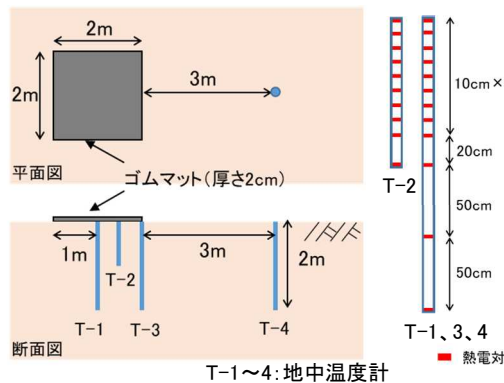


図-3 計測概略図

図中には本期間における日平均気温の累積値の最大値と最小値およびその日付を記している。これらより本期間における凍結指数は $297^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 程度となる。苫小牧市の10年確率凍結指数は $370^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 、20年確率凍結指数は $410^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 程度である²⁾ことから、本期間の気温は比較的高めであったといえる。

なお、温度計測しているエリア(図-3)は適宜除雪を行い、積雪深は常時10cm以下の状態を維持している。

2.4 計測条件

当該地盤に断熱材として厚さ2cmの黒色のゴムマットを敷設した2m×2mのエリア(以降、対策エリアと称する)と、無対策の素地部のエリアを設け、それらの地中温度を計測した。

対策エリアにおいては、その中央とそこから50cmと1m(対策エリアの縁)の距離に地中温度計(T-1、T-2、T-3)を設置し、素地部においては対策エリアの縁から3mの距離に地中温度計(T-4)を設置した。地中温度計T-1、T-3、T-4は深度2mとし、地中温度計測深さは地表面0cmから100cmまでは10cm間隔、さらに150cmと200cmの位置とし、地中温度計T-2は地表面0cmから100cmまで10cm間隔である(図-3参照)。その他、地表面の放射熱(放射熱)の影響を知るために、素地部において地表面+10cmの位置の温度を計測している。なお計測は熱電対により、1時間毎にロガーに自動記録されるものである。

これらの他、メチレンブルー凍結深度計をT-1、T-4付近に設置し、データの補完を行っている。

2.5 計測結果

2.5.1 外気温と地表面温度

一般に凍上が問題となる場合、その対策範囲として凍結深を算出することが基本となる。凍結深の算出に当た

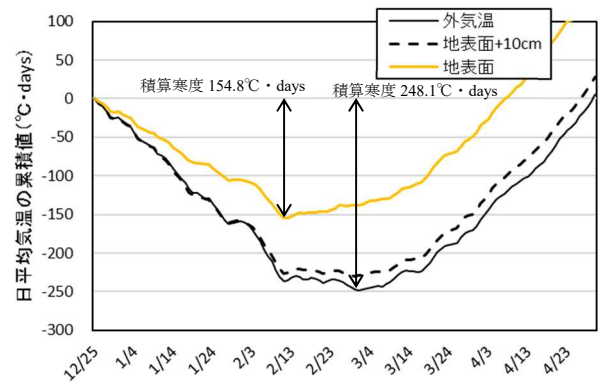


図-4 計測位置の違いが累積温度に及ぼす影響

っては地盤の種々の熱定数が必要となるが、実用上よく用いられる凍結深推定式の修正 Berggren 式³⁾では凍結指数が重要なパラメータの一つである。

凍結指数は測定された外気温から得られるが、実用上は、近傍の AMeDAS 等の観測データが利用されることが多い。これら観測データは気象庁の基準類に準拠し所定の高さの気温を測定したものである。しかし、地中温度を問題とする場合、所定の高さの外気温ではなく、地表面の温度を把握することが素直であると思われる。

図-4は原位置において熱電対で計測した素地部地表面、素地部地表面+10cmと外気温の日平均気温の累積値(積算寒度)である。外気温は高さ約1.5mの位置で百葉箱内に格納した熱電対で計測し、それ以外は曝露した熱電対で計測している。ここでは熱電対により計測を開始した12/25を基準($0^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)とし、図中には外気温と地表面温度の積算寒度の最大値を記している。この図より、外気温と地表面+10cmは近い温度状態であるが、地表面温度はそれらより高く、その程度は積算寒度で3～4割ほど低くなっている。このことは、地表面は放射熱(放射熱)の影響で外気温より高いこと、またその影響は地表面+10cmではほぼなくなることを示している。

一般的な外気温(観測データ)は地表面温度より低いことから、外気温により得た凍結指数により算出する凍結深は、過大に見積もっている可能性を示唆している。今後、合理的な凍上対策に資するべく検討を継続する。

2.5.2 地中温度計測結果

計測を開始した12/25と凍結が最も深く入った2/7の地中温度コンターを図-5に示す。等温線は、深さ方向に計測された温度を基に、温度勾配から算出している。図にはメチレンブルー凍結深度計(F-1、F-2)による計測結果を併記している。

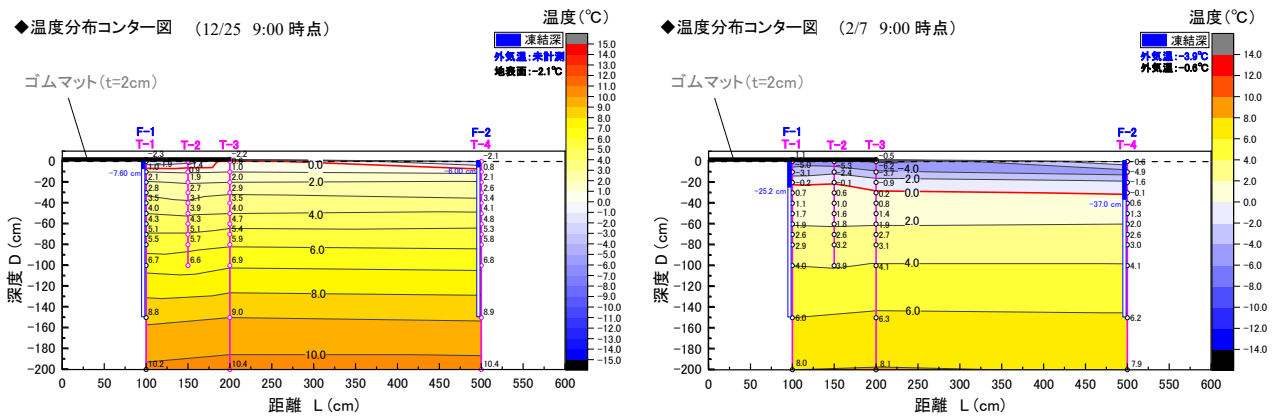


図-5 地中温度コンター図 (左: 12/25、右: 2/7)

表-1 各材料の熱物性値

		湿潤密度, ρ_t	含水比, w	乾燥密度, ρ_d	熱伝導率, λ	凍結潜熱, L	体積熱容量, C	体積含水率, w_v
		(g/cm^3)	(%)	(g/cm^3)	($\text{J}/\text{sec} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$) ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	(J/m^3)	($\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$)	(%)
火山灰質粘性土	未凍土	1.601	42.5	1.124	0.420	1.60E+08	2.80E+06	47.7
	凍土	—	—	—	0.600		1.80E+06	—
ゴムマット	—	—	—	—	0.270	0.00	2.46E+06	0.0

計測期間において素地部で最大 37cm 程度の凍結が確認された。対策エリア中央においては 25cm 程度であったことから、厚さ 2cm のゴムマットで凍結深を 3~4 割程度低減できたことになる。しかし、対策エリアの縁(中央から 1m 離れた T-3 の位置)では対策効果がみられず、冷気が回り込む結果が確認された。断熱により凍上対策を行う際に、その範囲の設定には留意が必要である。

3. 熱伝導解析による原位置地中温度の再現

3.1 解析条件

原位置地中温度の再現を目的に、2 次元 FEM 熱伝導解析 (TEMP/W) を実施した。解析に使用した各材料の熱物性値を表-1 に示す。

熱伝導率 λ は熱伝導率計による実測値を用いた。その他の値は次のように算出している。

凍結潜熱 L ⁴⁾

$$L \approx 3.35w \cdot \rho_d \quad (1)$$

体積熱容量 C ⁵⁾

$$\text{未凍土 } C_u = \rho_d(0.17 + 1.0w/100) \times 4.186 \times 10^6 \quad (2)$$

$$\text{凍土 } C_f = \rho_d(0.17 + 0.5w/100) \times 4.186 \times 10^6 \quad (3)$$

体積含水率 w_v

$$w_v = \rho_d \cdot w \quad (4)$$

断面モデルを図-6 に示す。解析にあたっては、計測した地中温度を参考に、初期状態として地盤内の温度を 8°C で一様とした。その後徐々に地表面温度を低下させ、地表面温度が 0°C に達した後に、境界条件として地表面に図-4 の「地表面」に相当する温度を付与している。

3.2 解析結果

対策エリア(ゴムマット)中央と素地部(図-6 の A 点と D 点)の計測結果と解析結果を図-7 に示す。凍結深度は 0°C 位置とし、またメチレンブルー凍結深度計の結果も併記している。

これらの図より、素地部、対策エリアともに、本解析

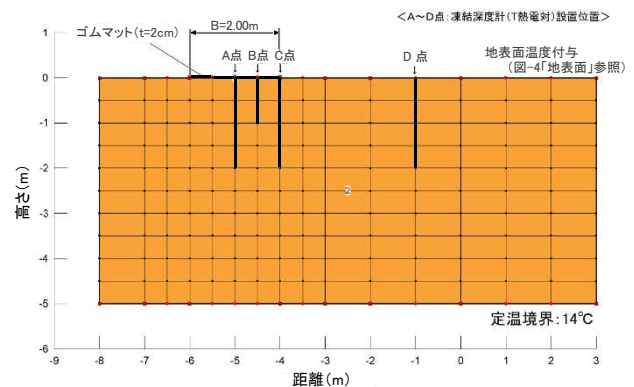


図-6 解析断面モデル

手法により概ね良い再現ができています。しかし、一時的に温度が上昇したタイミング(図-2、4 参照(日付では 1/31 前後))の凍結指数 $100^\circ\text{C} \cdot \text{days}$ 付近では実測値と解析値で乖離がみられる。解析では付与する温度は計測データをフィッティングしたものであるため、熱電対ほど敏感に反応しないものと考えられる。また、両図を比較すると、傾向としては対策エリアの方が解析値より実測値の凍結深度が浅いようである。これは使用したゴムマットが黒色であるために生じた、解析では加味できない日射による熱吸収の影響と推測される。

その他、メチレンブルー凍結深度計と熱電対では凍結指数 $100^\circ\text{C} \cdot \text{days}$ での結果に差異が確認される。メチレンブルー凍結深度計では、一時的な温度変化や急速な融解といった温度変化に追従できないようである。

4. 熱伝導解析の温度付与手法一般化の検討

先述の通り、当該地点の地中温度を再現する上で、本解析手法の妥当性が示された。ここでは、より一般化した温度境界条件による再現を試みる。

凍上対策に際して凍結深度を予測する場合を考えると、気象を予測するより、過去の気象データを利用することが簡便と思われる。当該地近傍の道路テレメータで入手

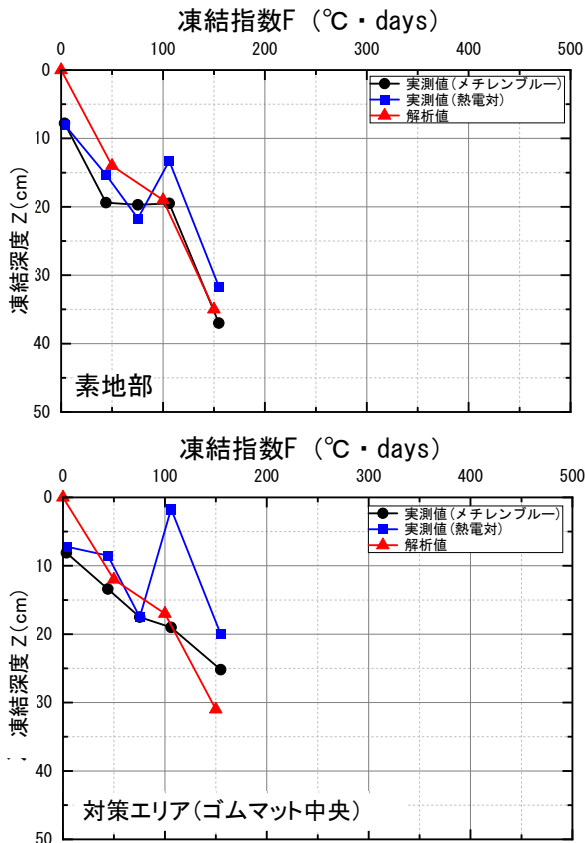


図-7 凍結深の解析値と実測値比較 (再現解析)

できた過去 12 年分の気温データから、凍結期間における日平均気温の累積値の最急勾配を算出し平均したところ-5℃であった。図-8 にその算出手法を例示する。ここでは最急勾配は-4.9℃となる。

地表面の温度境界を-5℃、地中(深度 5m)の温度境界を+14℃とし⁹⁾、先述の 3. と同様の解析を行い、図-7 と同じ関係で整理を行った結果を図-9 に示す。ここでは凍結指数 1200℃・days までの結果を記している。

図より、凍結指数 150℃・days までに着目すると、若干解析値が実測値より凍結深が大きめに出ており、その傾向は対策エリアにおいて顕著である。理由としては、道路テレメータによる気温を基に設定した地表面温度(-5℃)を付与しているため、先述した輻射熱(放射熱)の影響が加味されていないことに加え、黒色ゴムマットの熱吸収の影響が考えられる。しかし結果としては、凍結深を若干大きめに算出しているため、安全側の評価ともいえる。その他、本解析において、凍結指数が大きいほどゴムマット 2cm の断熱効果は消失する傾向にある。

今後、本解析手法により、凍結指数に応じた断熱対策の規模と範囲について試算を行うほか、気温と地表面温度の関係整理から、より合理的な凍上対策手法について検討を行う予定である。

5. まとめ

- ①地表面温度は輻射熱(放射熱)の影響により通常測定される気温より高く、本調査においては、積算寒度で 3~4 割程異なった。
- ②熱伝導解析において、過去の日平均気温の累積値の勾配から付与する温度境界を設定する手法を検討した結

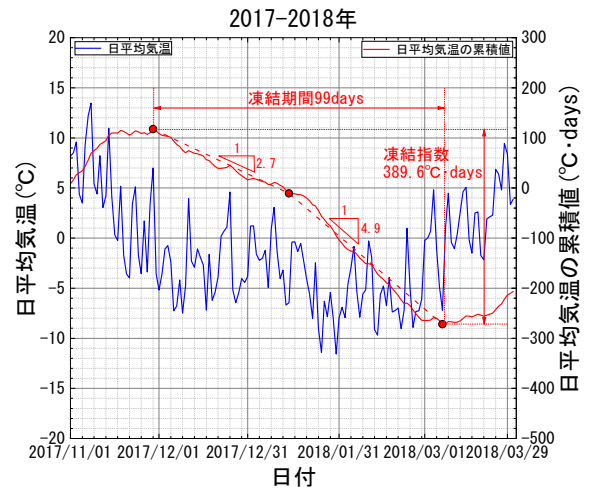
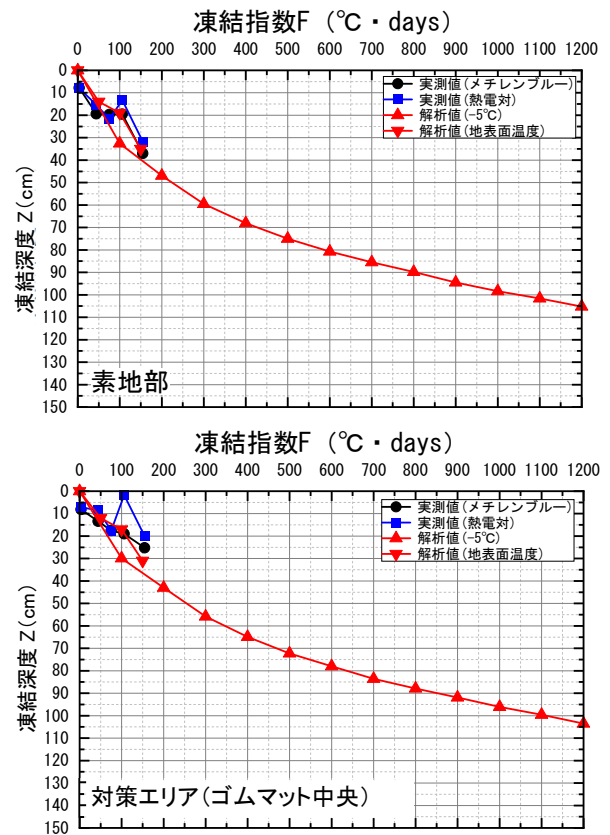


図-8 日平均気温の累積値の最急勾配の算出

図-9 凍結深の解析値と実測値
(図-7 に異なる温度条件の結果を追記)

果、凍結深は過大に出る傾向ではあったが、適用可能性が示された。

【参考文献】1) 社団法人地盤工学会北海道支部凍上対策工の調査・設計法に関する研究委員会：斜面の凍上対策の調査・設計マニュアル(案)，2016。2) 日本道路協会：道路土工要綱，p.383，2009。3) 久保宏：道路舗装の凍上とその対策，土と基礎，Vol.29，No.2，pp.9-14，1981。4) 地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学，p.33，2009。5) 伊福部宗夫：北海道における道路の凍上・凍結深および置換率に関する研究，土木試験所報告，第 26 号，p.19，1962。6) 林啓二，鈴木輝之，豊田邦男，萬隆：二次元 FEM 熱伝導解析の道路構造物への適用，地盤工学会北海道支部技術報告集，第 48 号，pp.277-282，2008。