

地盤の地中温度と凍上量の推定について

長岡工業高等専門学校 正会員 ○猪爪 高見, 正会員 岩波 基, 正会員 尾上 篤生

1. 背景・目的

新潟県長岡市蓮花寺の県道中永宮本線バイパスにおいて、路床の軟弱地盤改良に加えて凍上抑制工法として生石灰による安定処理を行った。安定処理区間とそうでない区間の2ヵ所で冬季間地中温度、凍上量、気温等の観測を行っている¹⁾。

一般的な凍上抑制工法は凍上し難い砂・砂利等への置換工法であるが、石灰系の安定処理工法も凍上抑制効果が有ると言われている²⁾。安定処理・置換工法共に地盤の凍結深から施工深さを決定するが、その際には実測値を用いる事が多い。その他の方法として、(1)式に示した Ardich 式を修正した修正 Berggren 式³⁾等もある。

$$Z = \alpha \sqrt{\frac{172800F}{(L/\lambda)_{eff}}} \tag{1}$$

Z : 凍結深さ(m), α : 補正係数, F : 凍結指数($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)
 $(L/\lambda)_{eff} = 2/X^2(L_1d_1(d_1/2\lambda_1) + L_2d_2(d_1/2\lambda_1 + d_2/2\lambda_2) + \cdots + L_nd_n(d_1/2\lambda_1 + d_2/2\lambda_2 + \cdots + d_n/2\lambda_n))$
 X : 予想凍結深さ(m), d_n : 各層の厚さ(m), λ_n : 各層の熱伝導率(W/mK), L_n : 各層の融解潜熱(J/m³)

高志らによって (2)式で示される通りに給排水ポンプモデルが既に提案されている⁴⁾。この式は凍結速度を一定とした実験式であるが、熱伝導解析から凍結速度を逐次算出し、凍上量を算出することで非定常問題を扱う事ができると考えられる。

$$v_w = \frac{dw}{dt} = \frac{U}{1+\Gamma} \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) - n_f \frac{\Gamma}{1+\Gamma} U \tag{2}$$

v_w : 給水速度, t : 時間, σ_0 , U_0 : 実験定数, n_f : 自由水体積含水率, σ : 有効応力, Γ : 凍ったときの体積膨張率, w : 給水量, U : 凍結速度

今後の凍上対策の設計に寄与する目的で、非定常で凍上量を解析するプログラムを構築し、その検証を行った。今回は、蓮花寺の試験施工区を対象として、現場計測結果を用いた熱伝導に関する数値解析結果の検証を行った。しかし、現地計測の結果は、凍結深が路床まで届いておらず、本プログラムに組み込んだ水の

融解潜熱および高志の式を用いた凍上量の予測計算が検証できていない。そこで、凍上試験機を用いた実験結果および、蓮花寺の道路を一般的な道路と仮定し、比較的気温の低い青森県三戸市の気温⁵⁾を用いて修正 Berggren 式の凍結深と比較を行った。

2. 計算方法

一般的な非定常熱伝導方程式の解法に差分法を用いた。時間微分項には、後退差分、その他の項には2次精度中心差分を用いて離散化し、陰解法を用いて計算している。陰解法における多元連立方程式の収束計算には、SOR 法を用いた。図1は、現場計測の状況と計算モデルの初期温度分布を示している。安定処理区間と未安定処理区間に分かれているが、今回は安定処理区間のみを対象として計算を行った。

さらに、凍結した場合に潜熱が湧き出す境界条件を与えている。融解潜熱³⁾は、(3)式に表される通りである。また、水が凍った場合、密度や熱伝導率、比熱といった物性値も変化させている。

$$L = 0.8 \times 4.186 \cdot \theta \tag{3}$$

L : 融解潜熱, θ : 自由水体積含水率

3. 現場計測結果との比較

表1は、各種物性値を示している。計算格子を2cmとし、温度の初期条件に測定値を与えた。境界条件は、

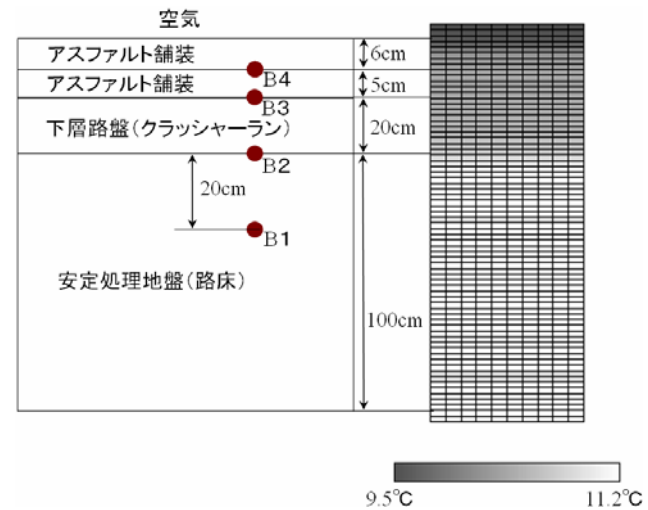


図1. 現場計測と初期温度分布

キーワード 凍上, 生石灰, 凍結深, 修正 Berggren 式, 熱伝導方程式

連絡先 〒949-5121 新潟県長岡市西片貝町 888 番地 長岡工業高等専門学校 TEL 0258-32-6437 (内線 7802)

表 1. 物性値

物質名	熱伝導率 W/(m・K)	単位堆積重量 kg/m ³	比熱 J/(kg・K)	含水比 (%)	σ_0 kPa	U_0 mm/h	引用
空気	0.0241	1.293	1006	0			理科年表
アスファルトコンクリート	1.153	1153	1626	0			
蓮花寺(切り土)		1811		32.8			
蓮花寺軟弱地盤	0.55	1706	2298	48.0	1.114	0.562	測定結果
蓮花寺軟弱地盤 (生石灰80kg/m ³ 混合)	0.55	1696	2639	43.7			
蓮花寺軟弱地盤 (生石灰100kg/m ³ 混合)		1685		42.64			
蓮花寺軟弱地盤 (生石灰120kg/m ³ 混合)		1675		41.532			

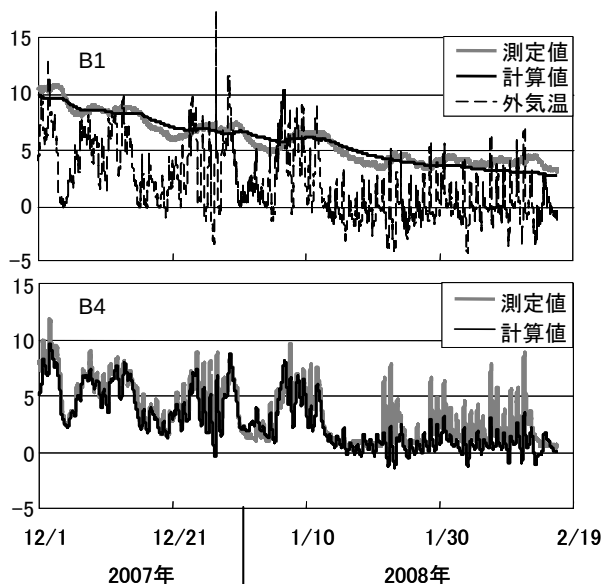


図 2. B1 (上), B4 (下) の地中温度時系列変化

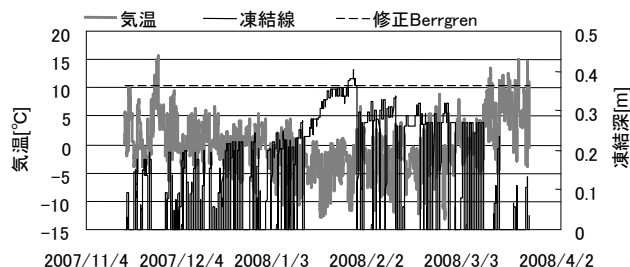


図 3. 三戸の気温と凍結深

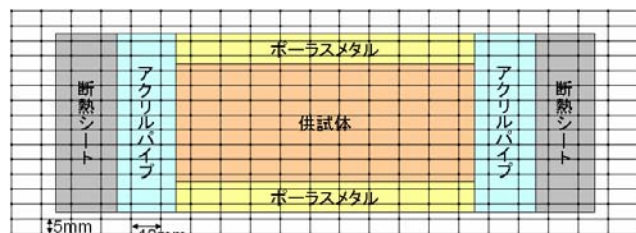


図 4. 計算モデル

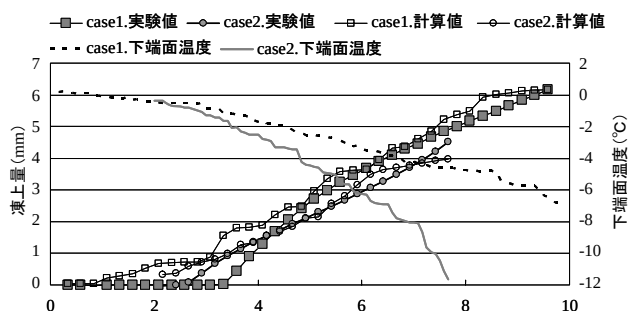


図 5. 凍上試験結果と計算結果の比較

上部に気温，側面は断熱境界，最下部を温度勾配一定とした．図 2 は，測定点 B1, B4 における計算結果を測定値と比較したグラフである．計算結果は概ね一致するように見受けられる．日射量，熱放射等の影響と思われるが，日中，夜間に地表面で誤差が多少生じた．

4. 修正 Berggren 式との比較

図 3 は，気温と凍結深のグラフである．但し，修正 Berggren 式の結果は，約 0.365m となったが，最深凍結深なので直線で示した．本解析結果の最大値の方が多少大きく見積もられたが，ほぼ同様の結果が得られた．さらに，今回のケースでは路床土が 1 年間に数十回凍結・融解を繰り返す事が分かった．

5. 室内凍上試験結果との比較

図 4 は，試験機に計算モデルを重ねた図である．室内凍上試験には，凍上性が大きいと考えられる未改良の軟弱地盤土を使用した．供試体直径 100mm，高さ 40mm で試験を行い計算結果との比較を試みた．物性値は表 1 に示される通りであり，実験条件の case1 として平均凍結速度 4mm/h，載荷応力 10kPa，case2 として平均凍結速度 8mm/h，載荷応力 20kPa とした．但し，非定常の凍上量を予測する事が目的なので，今回の実験では，凍結速度を一定として与えずに，降下温度を概ね一定として実験を行った．温度の初期条件および境界条件には，上・下・側面の測定温度を与えている．図 5 は，凍上量および温度の時系列のグラフである．直径 100mm の供試体でも，試験結果と計算結果を比較すると，概ね凍上現象が再現された．但し，サーマルショックの問題と考えられるが，初期の凍上で誤差が生じた．

6. おわりに

本プログラムで気温から地中温度を概ね再現することができた．三戸の気候では，日変動で路床土が年間に数十回凍結・融解を繰り返す事から，凍結・融解による軟弱化も考慮した設計が必要と考えられる．室内凍上試験結果を非定常で再現することができた．

参考文献

- 1) 福田誠，猪爪高見，新関敦生，東海林更二郎，ケオ・ヴィチエット：軟弱地盤の形成過程と生石灰安定処理による凍上抑制効果について，地盤工学会 全国大会，2006．
- 2) 川端伸一郎，神谷光彦，大沢正人：試験盛土における石灰安定処理の凍上抑制効果，土と基礎，Vol.46，No.4，1998．
- 3) 高見雅三：Excel/VBA による凍結深さの推定について，情報地質，第 17 巻，第 2 号，pp.142-145，2006．
- 4) 高志勤，益田稔：凍結面に吸排水を伴う定常厳密解とその応用，雪氷，Vol.37，No.1，1975，pp.12．
- 5) 気象庁ホームページ：http://www.jma.go.jp/jma/index.html．