

多層材料の熱特性を考慮した路床の凍結深さ算定方法

松丸 貴樹* 小島 謙一* 富永 真生**
丸山 修*** 石塚 真記子#

Calculation Method of Frost Penetration Depth for Railway Subgrade Considering Thermal Characteristics of Multilayer Materials

Takaki MATSUMARU Kenichi KOJIMA Masao TOMINAGA
Osamu MARUYAMA Makiko ISHIZUKA

In severely cold regions in Japan, a conventional countermeasure for frost heaving is to replace silt and volcanic cohesive soil layer with non-frost material. The depth for replacement is determined by frost penetration depth as obtained from one-dimensional analysis only using freezing index. Therefore, thermal characteristics of materials composing railway track-bed are not considered. This paper examines applicability of advanced Berggren method as a new design method of freezing penetration depth. In this method, it is possible to take thermal characteristics of multilayer materials into consideration. In addition, we introduce experiments for determination of thermal characteristics.

キーワード：凍結深さ、確率凍結指数、修正 Berggren 法、多層構造

1. はじめに

寒冷地に建設される鉄道路盤においては、凍上が重要な検討事項である。凍上現象は、気象・気温、地形・地質、路盤・路床材の水分特性・伝熱特性、地下水位などの条件が関係して複雑なメカニズムで発生する。現行の凍上対策の設計法（平成4年発刊 鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）¹⁾）は、(1)式に示すように凍結指数を用いて凍結深さを算定し、その深さまで非凍上性の材料（粒調碎石など）で置き換える凍上対策が基本となっている。

$$X = C\sqrt{F} \quad (1)$$

ここに、 X は凍結深さ（cm）、 F は凍結指数（ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ ）である。また C は定数であり、3～5としているが、一般に4としてよい。

本手法においては以下のような問題点がある。

- (1) 凍結深さの算定式（(1)式）におけるパラメータ C は定数であり、地盤の熱特性や地層構造に関係なく凍結指数で定まってしまう。

- (2) 例えば、置換えなどの対策効果について考慮することができず、合理的な設計ができない。

一例として、(1)式を凍上対策工の評価に用いた例を示す。図1は過去に国鉄技術研究所が千歳線において実施した凍上対策工の模式図である^{2), 3)}。試験は、昭和54年12月から55年3月に恵庭―長都間において、化学製品による断熱材や材料置換など4種類の凍上対策工に対して行われた。現在の手法（(1)式）を用い、現場試験サイトの最寄りの気象観測所（恵庭）のデータから凍結指数を563.4（ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ ）として凍結深さを計算すると、 $C=4$ の場合95.0cmとなる。ここでの凍結深さは道床バラスト上面から地中部の0 $^{\circ}\text{C}$ 線位置までの深さであるので、路床土のみの凍結深さは(a)～(c)で52.5cm、(d)で10cmである。試験では(a)のバラストマット工法のみ凍上が認められ、その他の工法では凍上がなかったことから考えると、各対策工の物性、特に断熱材の評価ができないこの手法では、過大な対策工となる場合があることがわかる。このように、検討地点の土質や対策工として用いる材料によっては適切な凍結深さが算定できず、現場の状況に応じた合理的な対策工の検討ができない。

本論文では、(1)・(2)の問題点を克服するために修正 Berggren法を基本とした凍結深さの算定手法について検討した。この手法により、現地の状況に即し、対策工の効果も評価した適切な凍結深さの算定が可能となる。ま

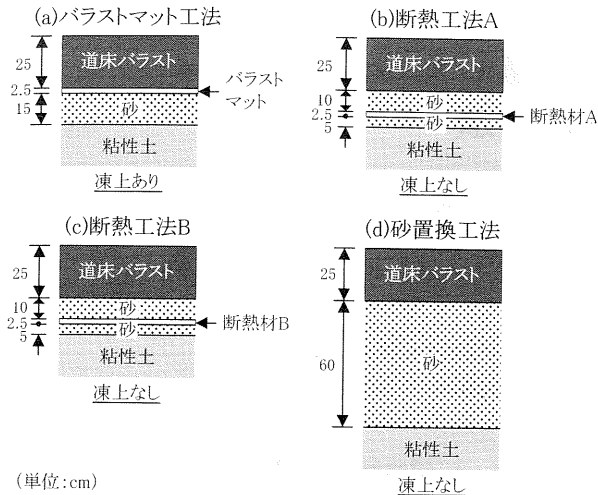
* 構造物技術研究部（基礎・土構造）

** ジェイアール九州コンサルタンツ株式会社
（前 基礎・土構造）

*** 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構

株式会社複合技術研究所

特集：構造物の設計技術

図1 施工実験における対策工断面模式図³⁾

た、本手法では現地土の特性が特に重要となるが、熱特性を求める適切な手法があまりないことから、設計定数として必要となる土の熱特性に関する室内試験法についても示す。

2. 鉄道路盤への修正 Berggren 法の適用

修正 Berggren 法^{4), 5)}は米国陸軍寒冷地研究所等で提案された手法である。本手法は1次元ではあるが、多層構造の熱伝導を評価することができる。そこで、鉄道路盤の凍上の検討への適用を試みた。

2.1 概要

修正 Berggren 法による凍結深さは(2)式により求めることができる。この式は(1)式と同様の構成ではあるが、(1)式で定数としていたパラメータ C を個々の材料の熱特性に応じて定めている点異なる。したがって、個々の材料の熱特性が適宜必要となるため、設計手法としてはやや煩雑な手法となる。

$$X = \lambda \sqrt{\frac{172800}{L/k}} \cdot \sqrt{F} \quad (2)$$

ここに、 λ ：体積熱容量に関する無次元係数、 k ：熱伝導係数 ($\text{cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$)、 L ：融解潜熱 (cal/cm^3) である。熱伝導係数 k や融解潜熱 L は各材料の値を層厚による重みをつけた平均値を用いている。

2.2 修正 Berggren 法を適用した凍結深さの算定方法

鉄道において修正 Berggren 法を適用し

た凍結深さの計算フローを図2に示す。計算に必要なのは、検討対象となる場所での気象条件および、断面の形状と路盤・路床土の熱特性である。

凍結深さの計算にあたっては、凍結深さ X を仮定した上で各パラメータを計算し、得られる凍結深さ X' と仮定した X が一致すれば、それが求められる凍結深さとなる。一致しなければ両者が一致するまで計算を繰り返す。すなわち、凍結深さは繰返し計算による収束計算によって求めることになる。

2.3 修正 Berggren 法の鉄道路盤への適用に関する検討

本手法の鉄道への適用を評価するために、前述の凍上対策工の事例を基に、修正 Berggren 法による凍結深さの検証を行った。解析に用いた路盤材・路床土および上記対策工の材料の熱定数を表1に示す³⁾。また、気象条件としては最寄りの気象観測所のデータから、凍結指数を $563.4 (^\circ\text{C} \cdot \text{day})$ 、凍結期間を $114 (\text{day})$ 、年平均気温を $6.7 (^\circ\text{C})$ とした。

計算結果（道床バラスト上面からの凍結深さ）を表2に、それぞれの断面における路床土の凍結深さを図3に示す。結果は修正 Berggren 法による計算とあわせて、従来法の(1)式で $C=4$ としたときの計算結果も示した。試

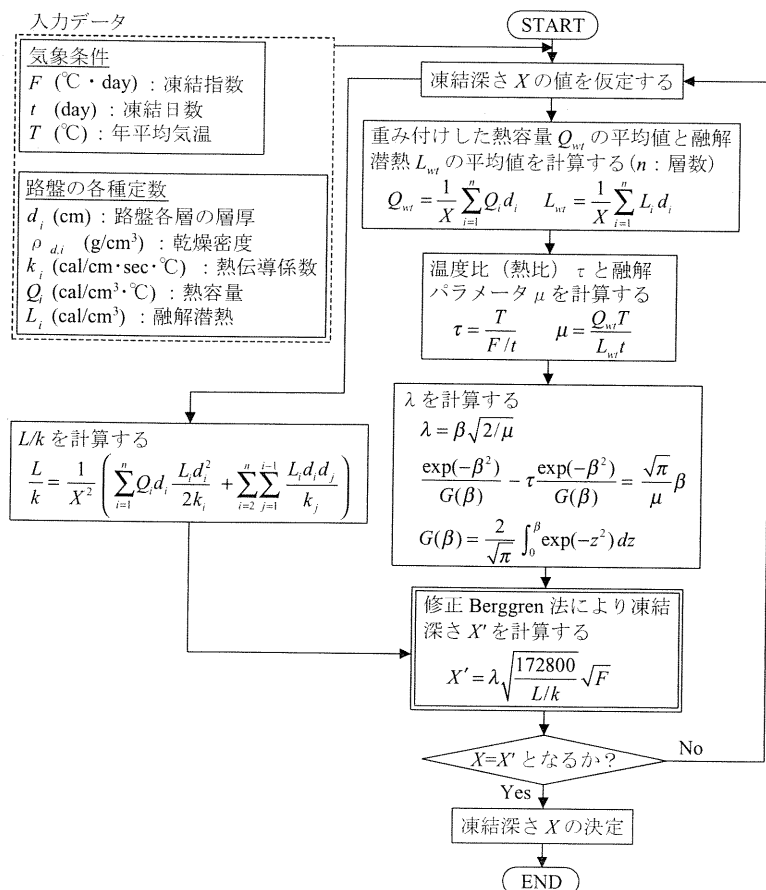


図2 修正 Berggren 法を適用した鉄道路盤の凍結深さの計算フロー

表1 熱定数の一覧³⁾

物性	記号	単位	砕石	砂	断熱材 A	断熱材 B	粘性土
乾燥密度	ρ_d	g/cm ³	1.5	1.6	0.040	0.036	1.4
含水比	w	%	2	15	0	0	50
熱伝導係数	k	cal/cm ² ・sec・°C	0.00131	0.00492	8.33×10^{-5}	6.39×10^{-5}	0.00544
熱容量	Q	cal/cm ³ ・°C	0.278	0.452	0.0051	0.0061	0.763
融解潜熱	L	cal/cm ³	2.4	19.2	0	0	56

表2 計算結果一覧

工法	修正 Berggren 法による凍結深さ (cm)	従来法による凍結深さ (cm)
バラストマット工法	60	95
断熱工法 A	49	95
断熱工法 B	48	95
砂置換工法	83	95

験結果は定性的な評価であったが、従来法とは異なり、対策工ごとの凍上対策効果の程度と修正Berggren法で求めた凍結深さの大きさの程度は概ね一致していることから、路床土の違いや対策工の効果を考慮した凍結深さの評価が可能であることが確認された。

3. 土質材料の熱伝導係数に関する室内試験^{6)~8)}

修正Berggren法では多層系地盤の熱伝導を考慮できる特徴があるが、材料ごとの熱定数を設定しなければならない。土質材料の熱特性は、現地においてプローブ等を設置することによる検討を行うことはあるものの室内試験レベルでは定まった手法はないことから、設計時において容易に定数を定めることはできない。凍上性の路床土のロームや粘性土、路盤や置換え工法に用いる粒調砕石の熱特性は含水状態や密度により異なる可能性があることから、現場の条件を基本に求めることが重要である。

3.1 試験方法

土の熱特性の測定は室内試験においても、従来から用いられているプローブ法により行うこととした。熱伝対プローブは、ヒーターや熱伝対のための金属の単線がパラフィンとともに数本封入されている。鉄道路盤のように締固め度の大きな土で適用するには、プローブと試料を一緒に締め固める必要があるが、プローブは非常に細く締固めに弱いため、締固め作業中にプローブが破損してしまうことがある。このため従来は金属管の厚みを増してプローブ自体を太く丈夫にするなどの方法が用いられてきたが、プローブの径を大きくすると、データを解析する際にプローブの直径をゼロとする仮定が成り立たなくなり、解析精度が低下する恐れがある。そこで、プローブの直径を大きくしないで済むよう図4に示すように、所定の寸法・乾燥密度・含水比の供試体を2個の高乾燥密度用モールドにわけて作成し、プローブと熱伝対

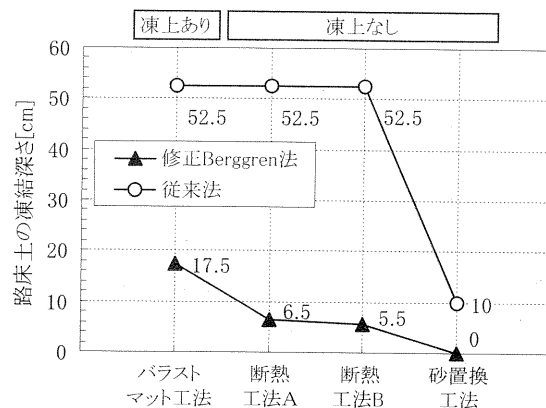


図3 各工法の路床土における凍結深さ

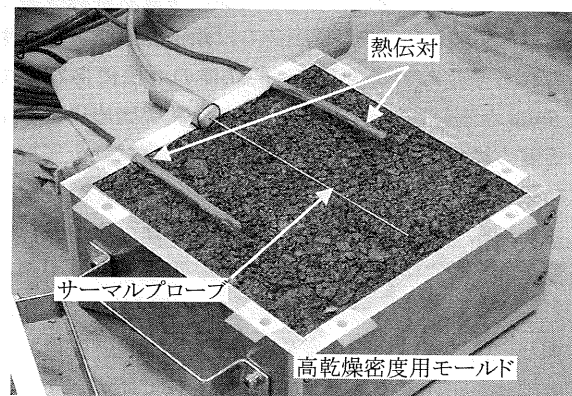


図4 高乾燥密度用モールド

をはさみ込む方法を用いて、粒調砕石や路床土の熱特性を測定することとした⁶⁾。この方法によれば、供試体の締固めに伴う载荷荷重をセンサー類に加えずに済むことができる。供試体寸法は、室内試験に用いる粒調砕石の最大粒径40mmを4倍した160mmを基準寸法とし、底面が縦・横160mm、深さ80mm、同形の2個が一組となるモールドを用いた。供試体作成は、まず各モールドの底面にはセンサー相当のスペーサーを設け、締固めを行い、上面にふたをつける。次にスペーサー面のふたを取り外し、接合面として2個をあわせてスペーサーがあった空間にセンサー類を挟み込む。プローブ法では、プローブからの熱拡散が360度の方向に放射状に起こると考えられるので、高乾燥密度用モールドの接合面におけるセンサー表面と土、および土と土の接触状態は重要となる。そこで、試験後に感圧式フィルムを挟み込み、接触状態の確認を行い、プローブと試料の接触状態が安定

特集：構造物の設計技術

していることを確認した⁶⁾。

熱伝導係数の測定は単一プローブ法により測定し、データ解析には比較法を用いた。単一プローブ法による熱伝導係数測定法は、土中に敷設された無限長、直径 ϕ の線熱源からの熱拡散を仮定した式の近似解を用いた試験法である。用いた熱伝導プローブは、直径1.3mm、長さ15cmの金属管にヒーターと温度計を設けてある。供試体を恒温状態に保ち、ヒーターを一定時間加熱したときのセンサー自体の温度上昇と時間の関係、加熱において投下した熱量から熱伝導係数を算定する。単一プローブは、構造に起因する個体差がある⁹⁾ため、補正を行う必要がある。今回はプローブ法の中でも最も精度が高いといわれている双子型プローブ法と同等の補正効果が得られる比較法⁹⁾を適用した。また、比較法で用いる基準物質の熱伝導係数は、未凍結時は水の熱伝導係数 $0.00134\text{cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$ 、凍結時は氷の熱伝導係数 $0.00526\text{cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$ とした¹⁰⁾。

3.2 実験ケース

提案した室内試験法により、実際の整備新幹線現場を想定した実験を行った。粒調碎石は鉄道路盤材として用いられる予定のものをを用い、供試体の寸法にあわせて31.5mmふるい通過分のみを採用した。突固めによる土の締固め試験(E-b法)および土粒子密度試験を実施した結果、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=2.09\text{g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt}=6.2\%$ 、土粒子密度 $G_s=2.72$ であった。土の熱伝導係数は、密度依存性・含水比依存性、温度依存性があるため、締固め度、含水比、温度を表3のように設定した。作製した供試体は締固め度や含水比が異なる5種類、1個の供試体において未凍結 20°C 、凍結 -10°C 時の測定を実施した(供試体5については 20°C のみである)。

粘性土系材料は、青森県七戸地区におけるロームと粘性土を用いた。供試体は現場で採取した攪乱試料を手でほぐし、現場乾燥密度、現場含水比に調製して作製した。現場乾燥密度と現場含水比は、現場にて100ccコアサンプラーで採取した試料から求めたところ、ロームが $\rho_d=1.09\text{g/cm}^3$ 、 $w=52\%$ 、粘性土 $\rho_d=0.82\text{g/cm}^3$ 、 $w=82\%$ である。試験ケースを表4に示す。それぞれの材料について再現性も考慮し、同一条件で2個の供試体を作成した。

3.3 測定結果

測定は 20°C 、 -10°C の状態においてそれぞれ3回繰り返した。熱伝導率測定中の温度上昇と加熱停止後の温度低下の例を図5に示す。横軸はデータサンプリングの行数、縦右軸は加熱直前の温度と加熱開始後の温度、縦左軸はこれらの差分 ΔT である。 ΔT (●)は0.5秒ごとの測定値であり3つの波形を描いているが、これは測定を3回行ったことを意味している。加熱停止後、供試体温

表3 実験ケース(粒調碎石)

ケース	D (%)	w (%)	温度条件
1	95	6.2	20°C 、 -10°C
2	95	6.2	20°C 、 -10°C
3	95	4.7	20°C 、 -10°C
4	90	6.2	20°C 、 -10°C
5	90	6.2	20°C

表4 実験ケース(粘性土系材料)

ケース	材料	温度条件
6	ローム	20°C 、 -10°C
7	ローム	20°C 、 -10°C
8	粘性土	20°C 、 -10°C
9	粘性土	20°C 、 -10°C

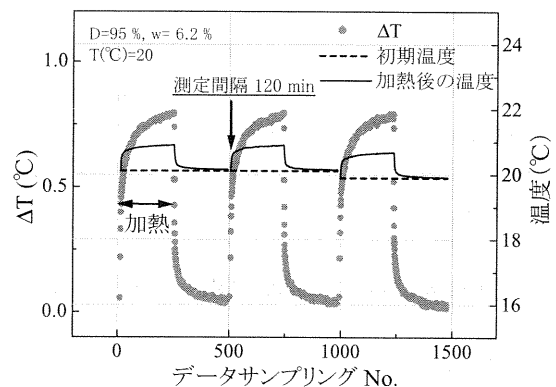


図5 熱伝導係数の測定例

度を回復させるため、前回の加熱停止から次の測定まで、約120分の測定間隔をとっている。これらの事項は全ケース同様である。

測定結果(凡例:—, —)と各ケースの算術平均値(●: 20°C , ▲: -10°C)を図6に示す。図6(a)の粒調碎石については、締固め度 $D=95\%$ (供試体1~3)では、凍結時の熱伝導係数が未凍結時よりも高くなる傾向が見られた。これは、凍結に伴い水が氷となったことで熱伝導係数が高くなること、氷が土粒子間を架橋することで媒質の連続性が増加することが原因と考えられる。一方、 $D=90\%$ (供試体4・5)では $D=95\%$ とは反対に凍結時の熱伝導係数が未凍結時よりも低い。この試料の締固め特性より、 $D=90\%$ という締固め度が必ずしも密詰めではないことが一因であると考えられる。なお、含水比による熱伝導係数の違い(ケース1・2とケース3)は顕著には現れなかった。

ロームと粘性土の熱伝導係数については、未凍結状態においては比較的安定した計測結果が得られている。しかし、凍結状態の場合には若干ばらついた熱伝導係数となった。本試験においては $+5\sim-5^\circ\text{C}$ の遷移領域をはずした -10°C という温度条件で試験を行ったが、試験中において温度が安定しない状況であり、微視的な構造の違いにより同一の温度下であっても間隙水の凍結の程度が

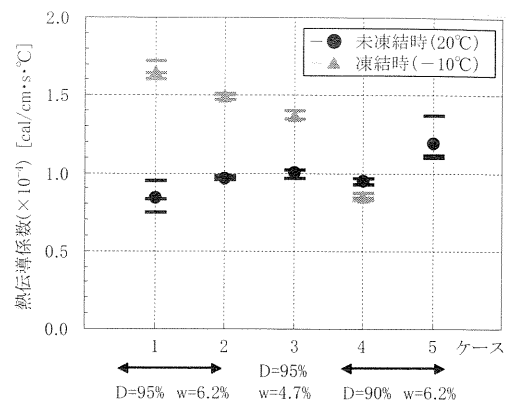
異なったためであると考えられる。

今回の測定では、凍結時（ -10°C ）のロームや粘性土を除き、熱伝導係数のバラツキは小さく安定した結果が得られた。これらの定数を用いて、七戸地区で施工された試験路盤における地温挙動¹¹⁾について2次元有限要素解析を実施したところ、解析は実測を概ね再現できることが確認されており¹²⁾、本測定結果は妥当なものであると考えられる。

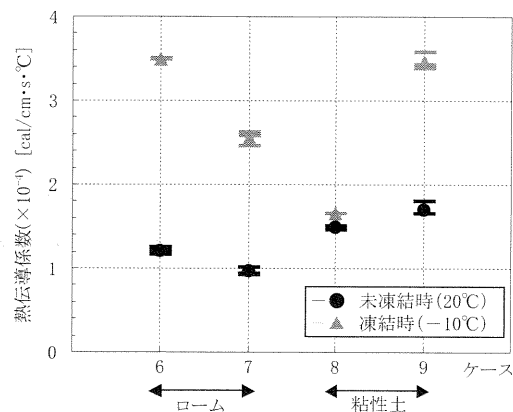
4. 凍結深さの計算例

実際の整備新幹線におけるコンクリート路盤上の省力化軌道構造を基に、修正Berggren法を用いた凍結深さの計算を行い、従来法との比較を行った。計算を行った軌道構造の断面の模式図を図7に示す。なお、図中のコンクリート版はコンクリート路盤における鉄筋コンクリート版を表している。通常コンクリート路盤におけるコンクリート版の厚さは30cmであるが、貯雪区間のRCスラブ分離型構造の中央部や、RCスラブにおける電柱部においてはコンクリート版の厚さが異なるため、凍結深さが変わることが想定される。そこで(a)～(c)のようにコンクリート版の厚さが10cm, 30cm, 70cmの3断面について検討を行うこととした。コンクリート版の下には30cmの粒調碎石層があり、その下に凍上性の路床土として粘土およびロームが存在する。これらの3断面において路床土が粘土およびロームの場合の凍結深さを算定する。

計算に用いた気象条件を表5に示す。ここでは実際に青森県の3地点における凍結指数を基に、確率統計の理論を導入し、再来年数を100年に設定して確率凍結指数を求めた。検討対象地点は八戸・三沢・十和田の3地点とし、八戸・三沢・十和田の順に凍結指数は大きくなり、年平均気温も低くなっている。土質材料の熱伝導係数は3で示した熱伝導係数の試験結果に基づき設定した。設定した入力物性値を表6に示す。前述のように熱伝導係数は凍結と未凍結の状態によって異なる。厳密にはそれぞれの状態で切り換える必要があるが、繰返し計算が増加し計算が煩雑になることから現実的ではない。ここでは計算過程において凍結状態も想定される粒調碎石については、 $D=95\%$ の凍結時・未凍結時の平均値（ケース1・2）とし、路床土については未凍結のものを用いた。なお、熱定数のうち、熱容量 Q と融解潜熱 L については測定が

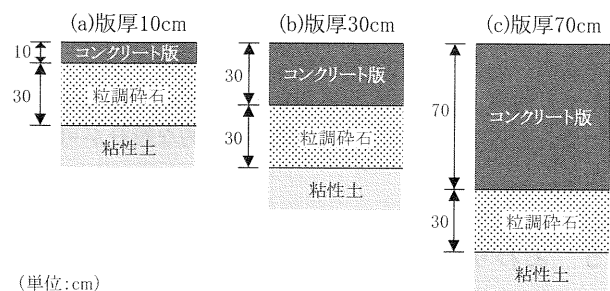


(a) 粒調碎石の熱伝導係数



(b) ローム・粘土の熱伝導係数

図6 熱伝導係数の測定結果



(単位: cm)

図7 計算対象とする断面の模式図

表5 気象条件

地点	凍結指数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$)	凍結日数 (日)	年平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)
八戸	324.4	110	10
三沢	360.7	114	9.9
十和田	495.0	125	9.4

表6 熱定数一覧

物性	記号	単位	コンクリート	粒調碎石	ローム	粘土
乾燥密度	ρ_s	g/cm^3	2.35	1.98	1.09	0.82
含水比	w	%	—	6.2	52.0	82.0
熱伝導係数	k	$\text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$	0.00611	0.00123	0.00109	0.00160
熱容量	Q	$\text{cal/cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$	0.6	0.430	0.605	0.644
融解潜熱	L	cal/cm^3	0	9.82	45.34	53.79

特集：構造物の設計技術

容易でないことから、次式によって定めている¹³⁾。

$$Q = (0.17 + 0.0075w) \cdot \rho_d \quad (3)$$

$$L = 0.8w\rho_d \quad (4)$$

ここに、 w は含水比(%), ρ_d は乾燥密度(g/cm^3)である。

計算結果を表7に示す。表中には作用ごとに路床土がロームと粘土の場合について示しており、(1)式で $C=4$ とした従来法による結果も示している。この表から、修正 Berggren 法を適用した計算では、気象条件のみならず、路盤の構成や路床土の違いに応じた凍結深さが算定されていることがわかる。ここでの凍結深さはコンクリート版上面を基準としたときの地中部の 0°C 線位置までの深さである。したがって、(a)で40cm, (b)で60cm, (c)で100cmを上回ると、路床土が凍結することを意味する。(c)版厚70cmの場合では路床土は凍結せず、ローム、粘土いずれのケースともに同じ凍結深さとなっている。

また、表7の結果をもとに路床土の凍結深さを計算し、それぞれの手法から求まる路床土の凍結深さの比(=修正Berggren法による路床土の凍結深さ/従来法による路床土の凍結深さ)を示したものを図8に示す。なお、路床土に凍結深さが到達していない(c)版厚70cmについてはここでは除いた。気象条件や軌道構造の断面により程度は異なるが、修正Berggren法による路床土の凍結深さは従来法に対してかなり小さくなるのがわかる。したがって対策工を検討するにあたり、修正Berggren法を用いることによってかなり合理的・経済的な設計が可能となる。

5. おわりに

寒冷地における凍上対策のための凍結深さの算定に際して、従来からの問題点である地盤の熱特性の評価と対策工の効果が定量的に検討できる手法として、修正 Berggren 法の導入を検討し、適用性を示した。また、土の熱特性について室内試験手法を示し、設計定数としての目安を提示した。試算により、非常に合理的・経済的な設計となることがわかった。今後は、置き換え工法以外の対策工(断熱工法やセメント安定処理土)についても検討を進める予定である。

文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 1992
- 2) 大井清一郎: 鉄道路盤における凍上対策, 土と基礎, pp.47-52, 1981

表7 凍結深さの算定結果 (単位: cm)

地点	路床土	修正 Berggren 法			$C\sqrt{F}$ ($C=4$)
		(a)版厚 10cm	(b)版厚 30cm	(c)版厚 70cm	
八戸	ローム	44.0	60.3	80.2	72.0
	粘土	43.6	60.3		
三沢	ローム	45.4	61.4	84.0	76.0
	粘土	44.8	61.2		
十和田	ローム	50.6	66.0	97.7	89.0
	粘土	49.8	65.4		

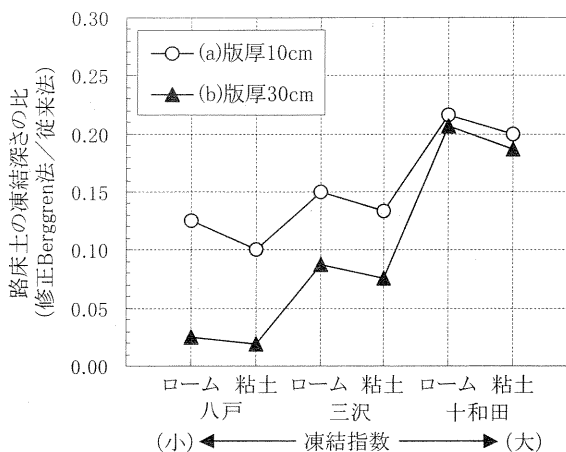


図8 路床土の凍結深さの比

- 3) 須長誠, 野口達雄, 大井清一郎: 千歳線における凍上対策工の効果測定, 鉄道技術研究所速報, 1983
- 4) Jumikis, Alfred R.: Thermal Geotechnics, Rutgers Uni. Press, pp.185-224, 1977
- 5) Aldrich, Harl.P.: Frost Penetration below Highway and Airfield, H.R.B. bulletin, 135, pp.124-149, 1976
- 6) 石塚真記子, 丸山修, 青木一二三, 小島謙一, 富永真生, 石山民一: 高い乾燥密度における土の熱伝導係数測定法, 第40回地盤工学研究発表会, 2005
- 7) 石塚真記子, 小島謙一, 富永真生, 丸山修, 青木一二三, 石山民一: 粒調碎石の熱伝導率測定, 第60回土木学会年次学術講演会, 2005
- 8) 小島謙一, 丸山修, 青木一二三, 野田軍治, 石塚真記子: 室内試験によるロームと粘性土の熱伝導率の測定, 第60回土木学会年次学術講演会, 2005
- 9) 粕渕辰昭: 土壌の熱伝導に関する研究, 農技研報 B, 33, pp.1-54, 1982
- 10) 理科年表, 国立天文台編, 丸善, 2002
- 11) 丸山修, 青木一二三, 野田軍治, 田村幸彦, 小島謙一: 鉄道路盤の凍上対策のための現地温度計測, 第60回土木学会年次学術講演会, 2005
- 12) 青木一二三, 丸山修, 小島謙一, 松丸貴樹, 堀井克己: 凍上対策のための鉄道路盤の実測地温挙動の熱伝導解析, 第61回土木学会年次学術講演会, 2006
- 13) 道路土工 排水工指針, 日本道路協会, pp.244-250, 1987