

## 鉄道路盤の凍結深さの算定における砕石層の熱特性の評価

複合技術研究所 国際会員 石塚真記子, 堀井克己

キーワード: 凍上, 粒調砕石, 熱伝導率

鉄道総合技術研究所 国際会員 小島謙一, 正会員 松丸貴樹

鉄道・運輸機構 正会員 丸山修, 国際会員 青木一三, 非会員 野田軍治

## はじめに

寒冷地の鉄道路盤を設計するにあたり凍結深さの検討が必要である。現在の鉄道の方法では路盤の材料や構造による熱特性の違いを考慮していない。そこで、より合理的な設計を行うために、材料の熱特性を考慮した修正 Berggren 法を用いた検討を行ったところ、粒調砕石の熱伝導率に対する感度が高いことがわかった。本報告では、単一プローブ法により密に充填した粒調砕石の熱伝導率を測定し、これらを基に現場における凍結深さを算定した。

## 計算方法と実験方法

想定した現地盤は八戸ローム, 設計断面はスラブ軌道(コンクリート版, 粒調砕石, 八戸ローム<sup>1)</sup>)である(Fig. 1)。

従来, 凍上深さ  $x_i$  の推定式として次式が知られている<sup>2)</sup>。

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

$F$  (・day) は積算寒度(0 以下の気温の日平均とそれぞれが持続する日数を乗じたもの),  $C$  は現行の鉄道の設計において一般に  $C=4$  である。(1) 式は気象情報のみに基づいており, 対策工を施した前後の土質の違いや複数の材料が成層した多層地盤の熱特性を考慮することなどが困難であるため, より適切な評価手法として修正 Berggren 法<sup>3)</sup>を採用した。この方法は, (1) 式のパラメータ  $C$  を材料の熱特性に基づいて設定する方法である。

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

$X$ : 凍結深さ(cm),  $\lambda$ : 体積熱容量に関する無次元係数,  $k$ : 熱伝導係数 ( $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $L$ : 潜熱( $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3}$ )である。過去に路床の熱定数を中心に検討をすすめてきたが, 路盤を構成する材料の熱伝導率が凍結深さに大きな影響(10cm 以上の差)を与えることがわかったため, 路盤材料に用いる粒調砕石の熱伝導率測定を実施した。試料は, 路盤材料と同じ粒調砕石の 31.5mm 篩通過分とした。突き固めによる土の締め固め試験(E-b 法), 土粒子密度試験を実施したところ, 最大乾燥密度  $2.086 \text{ Mg m}^{-3}$ , 最適含水比  $w_{\text{opt}}=6.2\%$ , 土粒子密度  $2.716 \text{ Mg m}^{-3}$ であった。尚, 熱伝導率測定方法に関する詳細は文献 4), 5), 6)を参照されたい。

## 結果と考察

土の熱伝導率には, 乾燥密度依存性, 含水比依存性, 温度依存性があることが知られているため, 諸条件を Table 1 のとおり設定し, 結果をあわせて示した。作製した供試体は Specimen No. 1~5 の 5 個, 各供試体で未凍結 20, 凍結-10, 融解後 20 の測定を実施し, 試験ケースは Case No. 1~12 の 12 個である。各ケースの熱伝導率もあわせて Table 1 に示した。乾燥密度, 含水比に関する依存性はあまり明確にみられなかった。D=95% (Specimen No. 1~3) では, 凍結時の熱伝導率が未凍結時よりも高くなる傾向がみられたが, 原因として, 凍結に伴い水が氷となることで熱伝導率が高くなること, 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, などが考えられる。

Fig. 2 に熱伝導率を供試体ごとに, 凍結前( ), 凍結時( ), 融解後( )を示した。これらの測定結果  $0.29\text{--}0.76 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  は, 当初文献値から想定していた熱伝導率の中程度にあたり, オーダーはほぼ同じであることがわかった。これは想定対策厚に換算すると 10~70cm に相当する。

置換厚の設計値を定める上で, 解析を簡便にするため, D=95%,  $w=6.2\%$  の凍結・未凍結の平均値  $0.513 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  を採用することにした。また, Fig. 2 をみてもわかるとおり, おおむね全体の平均値自体  $0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  程度であること

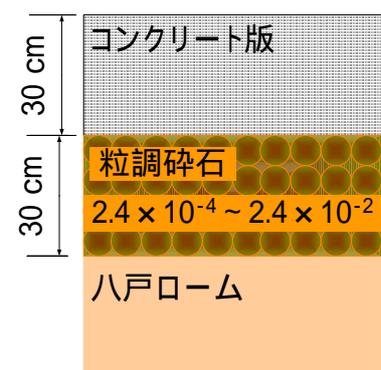


Fig. 1 スラブ軌道断面  
(感度解析の想定断面)

Evaluation of heat characteristic of gravel layer in calculation of frozen depth of trackbed, Makiko Ishizuka, Katsumi Horri, Integrated Geotechnology Institute Limited, Ken-ichi Kojima, Takaki Matsumaru, Railway Technology and Research Institute, Hifumi Aoki, Osamu Maruyama, Gunji Noda, Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency

から、適正な値であると考えられる。尚、熱伝導率は物性値の特性上、算術平均を用いて差し支えないと考えられる。

今回設定した設計値 Table 2 を用いて粒調碎石の対策厚を算定した (Fig. 3)。新たな設計値は、F=567 (札幌における凍結指数 100 年確率) を、F=284 (青森における凍結指数 30 年確率) をとした。式 (1) の対策厚は熱伝導率  $k$  に依存しないため、F=567, 284 の場合をそれぞれ横線 ( - , - ) とした。式 (1) の従来法と熱伝導率を考慮した修正 Berggren 法による結果を比較すると、後者の方法は対策厚さを 30cm 以上少なくすることができることがわかった。

まとめ

単一プローブ法により粒調碎石の凍結・未凍結時の熱伝導率を測定し、設計値を得た。材料の熱特性を考慮した修正 Berggren 法に適用し、凍結深さの検討を行ったところ、従来法と比較して合理的な設計が可能であることがわかった。

Table 1 試験条件と結果一覧

Case No.	Specimen #	T	D %	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w %	k (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
1		20				0.35
2	1	-10				0.69
3		20	95	1.98		0.34
4	2	20			6.2	0.41
5		-10				0.63
6	3	20				0.50
7		20	90	1.88		0.40
8	4	-10				0.35
9		20				0.29
10		20				0.42
11	5	-10	95	1.98	4.7	0.57
12		20				0.76

Table 2 熱物性の設計値

	記号	単位	コンクリート	粒調碎石
乾燥密度	$\rho_d$	Mg m <sup>-3</sup>	2.35	1.98
含水比	w	%	-	6.2
熱伝導率	k	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	2.56	0.51
熱容量	Q	MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	2.51	1.80
融解潜熱	L	MJ m <sup>-3</sup>	0.00	41.09

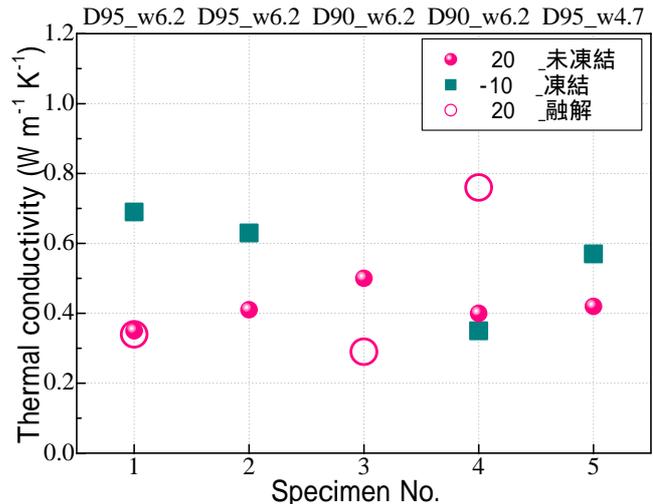


Fig. 2 粒調碎石の熱伝導率

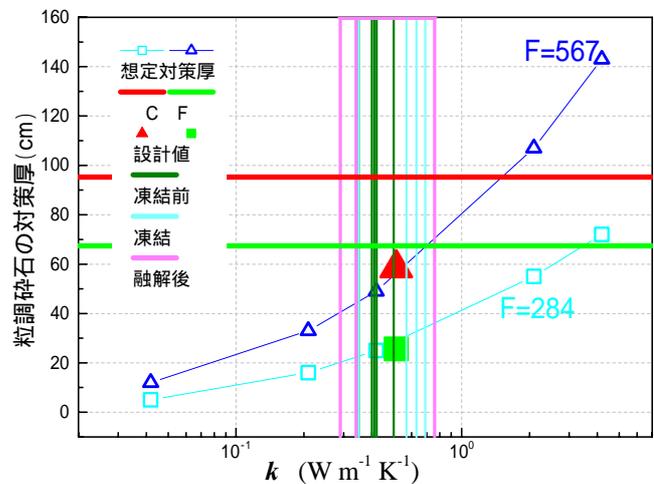


Fig. 3 粒調碎石の対策厚と熱伝導率

## 文献

- 1) 小島ら (2005): 「室内試験を用いた八戸ロームの熱伝導率の検討」, 第 40 回地盤工学研究発表会 (函館), (社) 地盤工学会
- 2) 石原 (1988): 「土質力学」, 丸善
- 3) 日本道路協会 (1987): 「道路土工 排水工指針」, (社) 日本道路協会
- 4) 石塚ら (2005): 「高い乾燥密度における土の熱伝導率測定法」, 第 40 回地盤工学研究発表会 (函館), (社) 地盤工学会
- 5) 石塚ら (2005): 「粒調碎石の熱伝導率測定」, 第 60 回土木工学会 (早稲田), (社) 土木学会
- 6) 粕淵ら (1982): 「土壌の熱伝導に関する研究」, 農技研報 B, 33, p. 1 ~ 54