

粒調碎石の熱伝導率測定

○複合技術研究所

正会員 石塚真記子

鉄道総合技術研究所

正会員 小島謙一，

正会員 富永真生

鉄道・運輸機構 正会員 丸山修， 正会員 青木一二三，石山民一

はじめに

鉄道路盤の凍上対策工を設計する上で、凍結深さの予測は重要であり、そのパラメーターとなる土の熱伝導率は正確に把握する必要がある。土の熱伝導率測定にはプローブ法が適用されるが、従来プローブ法の測定対象の多くは畑や森林など、締め固められていない比較的乾燥密度の低いやわらかな土の現場、あるいはそれを再現した室内試験であった。プローブ法は測定結果の解析に熱伝導プローブ直径 0 とする境界条件を適用した近似解を用いているため、その直径は極力小さいことが望ましい。このような条件を満たすプローブは、直径 2mm 程度の細い金属管にヒーターと温度計を内蔵した棒状であるが、剛性が低く、締め固めによる载荷に非常に弱いので、鉄道路盤を想定した $D=90\%$ 以上の碎石層に埋め込んだ場合、破損は避けられない。また、破損しない程度の締め固めにより、プローブ周辺の試料を充填した場合、締め固め度は所定の値よりも小さくなることが予想される。

本研究では、高い乾燥密度における土の熱伝導率を単一プローブ法で測定することを目的として、高乾燥密度用モールドを考案¹⁾し、実際に $D=90, 95\%$ に締め固めた粒調碎石の熱伝導率を凍結・未凍結状態において測定した。試験後、供試体とセンサーの接触状態は感圧式フィルムを用いて確認した。

実験方法

試料：試料は鉄道路盤材として用いられる予定の粒調碎石の 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 Mg m^{-3} 、最適含水比 $w_{\text{opt}}=6.2\%$ 、土粒子密度 2.716 Mg m^{-3} であった。

高乾燥密度用モールド¹⁾：高乾燥密度用モールドによる供試体作製法は、所定の条件の供試体を 2 個に分けて作製し、プローブと熱電対を挟み込む方法である。

この方法の利点は、供試体の締め固めに伴う载荷荷重をセンサー類に加えずに済むことである。今回作製した供試体は、組みあがり 160mm 角の立方体である。

寸法は、粒調碎石の最大粒径 40mm を 4 倍した 160mm を基準寸法とし、底面が縦・横 160mm、深さ 80mm のモールドで、同形の 2 個が一组となる。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、試料を締め固め、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。ただし、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、土と土の接触状態は重要であるため、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った。

単一プローブ法と比較法による熱伝導率測定法：熱伝導プローブは、直径 1.3 mm、長さ 15 cm の金属管の全長にヒーター、中心位置に温度計を設けてある。測定中、供試体の初期温度を一定に保つ必要があるため、恒温チャンバーを用いて未凍結 20°C 、凍結 -10°C の恒温状態を維持した。ヒーターに 120 秒間一定電圧を与えて加熱したときの温度上昇と時間の関係、投下した熱量から熱伝導率 $k (\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1})$ を算定した²⁾。また、単一プローブには構造に起因する個体差があるため、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²⁾を適用した。比較法の基準物質は 1% 寒天ゲルとし、水の熱伝導率³⁾ $0.561 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ 、氷の熱伝導率³⁾ $2.2 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ として計算した。土の熱伝導率には、乾燥密度依存性、含水比依

Table 1 試験条件一覧

Case No.	Specimen No.	D %	w %	T °C
1	1	95	6.2	20
2	1	95	6.2	-10
3	2	95	6.2	20
4	2	95	6.2	-10
5	3	95	4.7	20
6	3	95	4.7	-10
7	4	90	6.2	20
8	4	90	6.2	-10
9	5	90	6.2	20

キーワード：熱伝導率、粒調碎石、凍上、プローブ法、高乾燥密度用モールド

連絡先：makiko@igi.co.jp，〒102 - 0072 東京都千代田区飯田橋 4-6-9-6F，TEL：03-5276-5276，FAX：03-5276-5309

存性、温度依存性があることが知られているため、締め固め度、含水比、温度を **Table 1** のように設定した。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℃の測定を実施したため、試験条件は Case No. 1～9 の 9 個である。

結果と考察

粒調碎石の熱伝導率：供試体作製後、まず未凍結 20℃、次に凍結-10℃において、それぞれ温度が安定してから測定を行った。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 **Fig. 1** に示す。横軸はデータサンプリングの行数、右軸は加熱直前の温度(Initial Temp.)と加熱開始後の温度(Heated Temp)、左軸はこれらの差分 ΔT である。 ΔT (●) は 3 つの波形(加熱・加熱停止あわせて 240 s)を描き、測定を 3 回行ったことがわかる。加熱停止後、供試体温度を回復させるため、前回の加熱停止から次回の測定まで、約 120 分の測定間隔をとっている。これらの事項は全 Case 同様である。

Fig. 2 に測定結果(凡例: -)と各 Case の算術平均値(●: 20℃, ▲: -10℃)を示す。尚、試験後の供試体の状態等より、凍上が起こっていないことを確認しているため、所定の締め固め度における熱伝導率が得られたものと考えられる。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。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、水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。一方、D=90 % (Specimen No. 4, 5) では D=95 % とは反対に凍結時の熱伝導率が未凍結時よりも低い。これは、この試料の締め固め特性より、D=90 % という締め固め度が必ずしも密詰めではないことが原因であると考えられるため、以下供試体内部の微視的な考察を述べる。凍結・未凍結のいずれも、充填が粗な場合には土粒子同士が接触していない部分が生じ、固相の接触による熱伝導率は密な充填の供試体よりも低くなると考えられる。一方、液状水が土粒子を架橋している部分では、その分高い熱伝導率が得られると考えられる。しかし、水の冷却・凍結に伴い、土粒子表面全体を濡らしていた液状水が氷を形成するために集合し、土粒子表面に乾いた箇所が生じ、液状水が形成する架橋が破断する箇所が増加するなどの状況が、粒子間距離が遠い D=90 % では起こりやすいと考えられる。

プローブの接触状態：センサー表面と土、土と土の接触を確認するため、試験終了後に供試体接合面を再び開き、感圧式フィルム(富士フィルム プレスケール, 超低压用, 測定範囲 5～25 kg, フィルムの厚さ A 105 μ , C 95 μ)を挟み、接触状態を確認した。**Fig. 3-(a)** フィルムの白黒画像(点線は感圧して濃い色を呈した位置)、**Fig. 3-(b)** にセンサー設置時の写真を示した。センサーと土の接触は比較的明瞭に、土と土の接触もある程度確認できた。

まとめと今後の課題

凍結状態-10℃、未凍結状態 20℃において D=90, 95 % の粒調碎石の熱伝導率を測定した。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、D=90 % (Specimen No. 4, 5) では凍結時の熱伝導率が未凍結時よりも低い傾向がみられた。これらの原因として水の微視的挙動の違いが考えられた。

今後、①0℃前後における粒調碎石の熱伝導率特性の解明、②単一プローブ法、サーモ TDR 法等を用いた熱特性の直接測定による土の乾燥密度依存性の解明、③土の熱伝導率測定における適切な供試体寸法(REV; 代表要素サイズ)の検討等を実施したいと考えている。

<文献>1)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(投稿中), 2)粕渕ら(1982):「土壌の熱伝導に関する研究」, 農技研報 B, 33, p. 1～54, 3)国立天文台編(2002):理科年表, 丸善

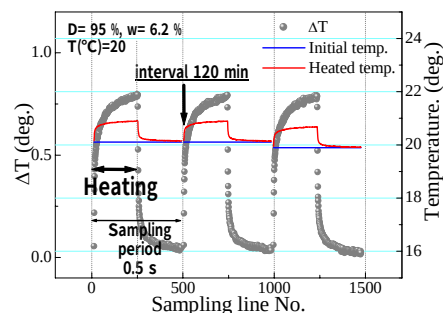


Fig. 1 熱伝導率測定例

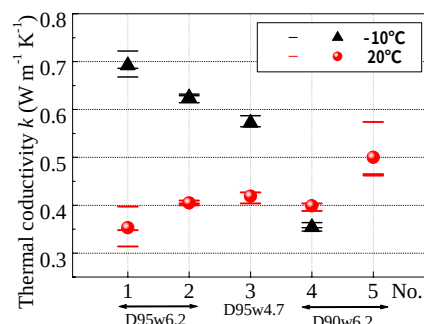


Fig. 2 粒調碎石の熱伝導率

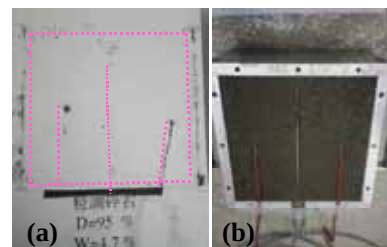


Fig. 3 接触状態の確認