

## 粒状人造黒鉛を混合した新たな地盤材料の熱伝導率の評価(その1)

信州大学工学部 正会員 河村 隆, 正会員 梅崎健夫  
 信州大学工学部 学生会員〇山本拓斗  
 武田設備株式会社 上原謙吾  
 富士黒鉛工業株式会社 菅原 豪

**1. はじめに** 積雪寒冷地では、路面凍結による自動車のスリップや歩行者の転倒などの事故が多く発生する。熱伝導率が高い人造黒鉛を混合した新しい地盤材料を路盤材や埋戻し材に用いることにより、「地中熱」や「下水熱」が路面に効率良く伝達され、凍結防止に繋がると考えられる。このような工法の実用化には、地盤材料の熱伝導率の評価が必要である。本文は、サーマルプローブ法による試験装置を新たに作製した。まず、装置の有効性を検証するために、増粘剤を混合した水に対して測定を行った。次に、相対密度の異なる豊浦砂および粒状人造黒鉛に対して測定を実施した。

**2. 測定原理と試験方法** サーマルプローブ法は、試料中に挿入したプローブに熱量を加えたときの温度上昇が、プローブに接する試料の熱伝導率に依存することを利用した手法である。プローブに一定の熱量  $Q$  を加えたときの、プローブの温度の経時変化を測定することにより、熱伝導率は次式によって算定できる。

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi\Delta T} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$ : 熱伝導率 (W/m・K),  $Q$ : プローブの単位長さ当たりの熱量 (W/m),  $t_1, t_2$ : 時間 (s),  $\Delta T$ :  $t_1, t_2$  間のプローブの上昇温度 (°C) である。

写真-1, 図-1 に試験装置の概略を示す。装置は、試料を充填したステンレス製の円筒容器、供試体に挿入するサーマルプローブ、安定化直流電源、熱電対・デジタル温度計および電流・電圧計から構成されている。プローブは、図-1 (b) に示すように、長さ 150 mm、直径 3 mm の銅管内に全長にわたってヒーター線 (コンスタンタン線) を、中央に熱電対 (T 型) を設置し、それらの固定、絶縁のためにパラフィンを充填したものである<sup>1), 2)</sup>。

試料には、増粘剤として食品添加物のキサンタンガムを質量比 0.25~1.5% で混合した水 (検定用) および豊浦砂と粒状人造黒鉛 (最大粒径 2 mm) を用いた。図-2, 表-1 に試料の粒度分布と物理特性を示す。ステンレス容器にプローブをセットした後、炉乾燥試料を 3~10 層に分けて静的にタンパーの自重を加えることによって締固めて供試体とした。層数を変えることにより、相対密度の異なる供試体を作製した。恒温室 (23±1°C) 内に静置し、プローブ内の熱電対の温度が一定になったのを確認した後、試験を行った。熱量  $Q$  が 1~12 W/m で一定となるように安定化直流電源を調整し、温



写真-1 ステンレス容器 (人造黒鉛)

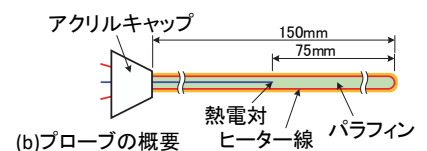
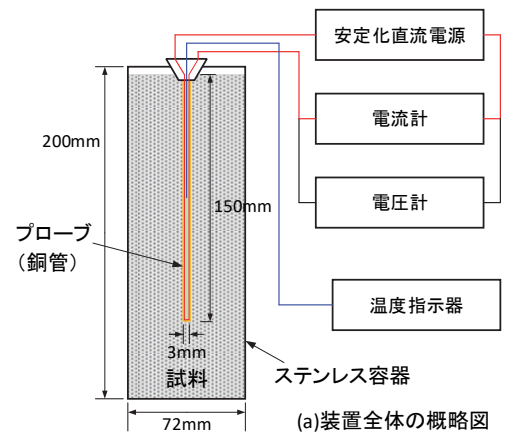


図-1 試験装置の概略

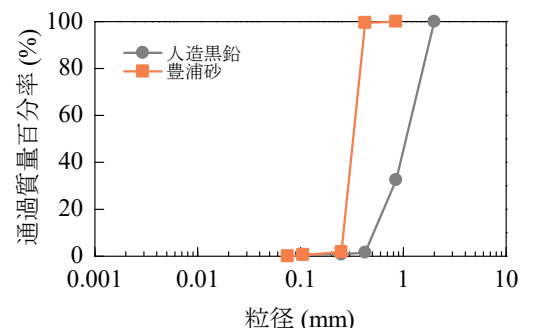


図-2 試料の粒度分布

表-1 物理特性

試料	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{max}$	$e_{min}$
人造黒鉛	2.097	1.72	1.21
豊浦砂	2.648	0.97	0.62

度、電流、電圧を測定した。

**3. 試験結果および考察** 図-3 にプローブの温度上昇の経時変化の一例を示す。試料、熱量が異なる場合においても、それぞれ概ね直線的に温度が上昇する。この関係の直線部分の傾き  $\Delta T / \ln(t_2/t_1)$  を求め、(1)式に代入することにより熱伝導率  $\lambda$  を求めた。山下らの報告<sup>1)</sup>を参考に、熱伝導率を求める際のデータの採用時間を試験開始後1~10分間とした。

図-4 に、熱量  $Q$  と熱伝導率  $\lambda$  の関係の一例を示す。加えた熱量によらず、条件毎にほぼ同じ値の熱伝導率を求めることができる。異なる熱量の条件から得られた値の平均値をその試料の熱伝導率とした。

図-5 に、増粘剤を混合した水の測定結果として、増粘剤の混合率  $c$  と熱伝導率  $\lambda$  の関係を示す。混合率 0.5%以上の範囲において、両者の関係は直線となる。その外挿線の切片 ( $c=0\%$ ) は、 $20^\circ\text{C}$ における水の熱伝導率  $\lambda=0.60 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  とほぼ一致しており、精度良く測定されていることが示唆される。 $c=0.25\%$ における  $\lambda$  が水の値よりも高いのは、粘性が低い水のため対流が生じたためであると考えられる。

図-6 に、豊浦砂・人造黒鉛の相対密度  $Dr$  と熱伝導率  $\lambda$  の関係を示す。図中には、所らの豊浦砂に対する結果<sup>2)</sup>も示した。本試験装置においても同程度の値が測定されている。 $Dr>50\%$ における熱伝導率は、人造黒鉛の方が豊浦砂よりも大きく、 $Dr=90\%$ において約2倍である。いずれの試料においても、 $Dr$  が大きいほど  $\lambda$  は大きくなり、人造黒鉛の場合、 $Dr=57\%$ から92%に増加すると、 $\lambda$  は約2倍に増加する。

**4. まとめ** 地盤材料の熱伝導率を測定するために、サーマルプローブ法の試験装置を新しく作製した。得られた主な知見は以下の通りである。(1)加えた熱量によらず、条件毎にほぼ同じ熱伝導率が得られることと、増粘剤を混合した水の測定結果から、本装置は熱伝導率を精度良く測定できると考えられる。(2) $Dr>50\%$ における熱伝導率は、人造黒鉛の方が豊浦砂よりも大きく、 $Dr=90\%$ において約2倍である。(3)いずれの試料においても、相対密度が大きいほど熱伝導率は大きくなり、人造黒鉛の場合、 $Dr=57\%$ から92%になると熱伝導率は約2倍に増加する。

**謝辞** 試験装置の作製にあたり、所哲也先生(北海学園大学准教授)にご指導いただいた。信州大学地域防災センター：信州における防災減災プロジェクト2022年度支援事業の支援を受けた。ここに付記して謝意を表します。

【参考文献】1) 畢春蕾ほか：凍上対策に用いる粒状材料の熱伝導率，土木学会論文集 No.785/III/70, pp.83-92, 2005. 2) 所哲也ほか：砂の熱伝導率の水分依存性，土木学会第67回年次学術講演会，pp.15-16, 2012.

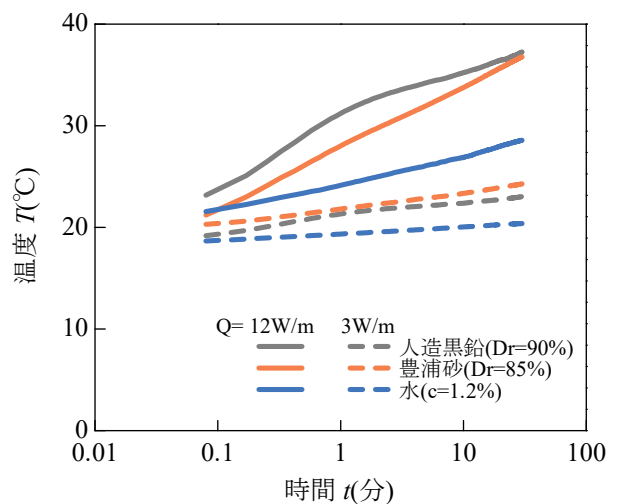


図-3 プローブの温度の経時変化の一例

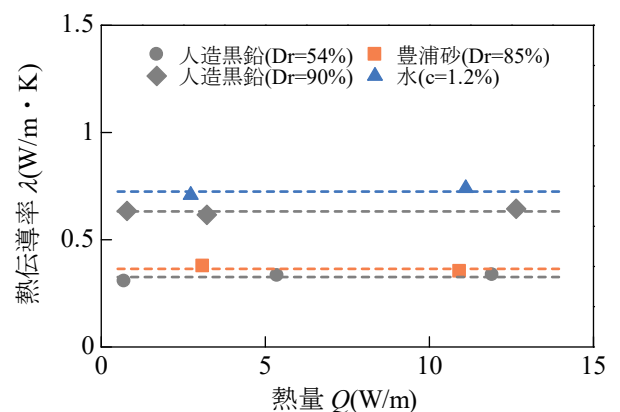


図-4 熱量と熱伝導率の関係の一例

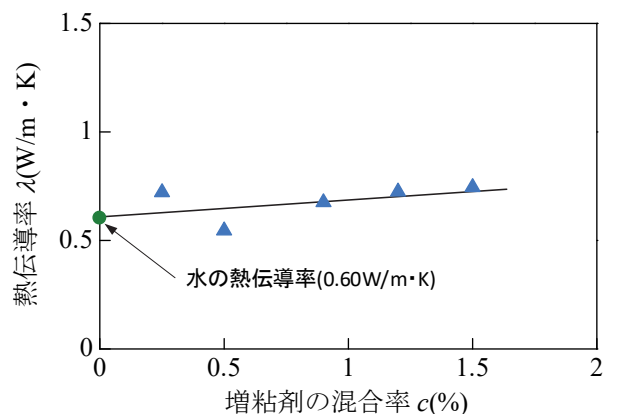


図-5 増粘剤を混合した水による検定

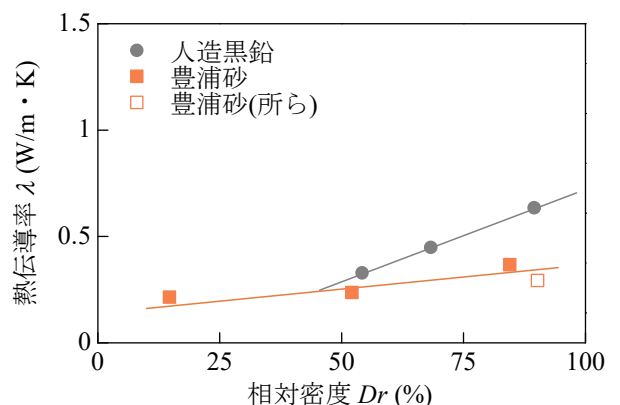


図-6 相対密度と熱伝導率の関係