

未利用熱エネルギーの利用拡大に繋がる高熱伝導舗装の研究について

東邦産業㈱

○美寺 寿人

新潟太平洋生コン㈱

浅野 宏

福田道路㈱技術研究所

畑山 良二

1. はじめに

舗装材であるコンクリートとアスファルト合材の熱伝導率を向上することができれば、放熱能力の向上に伴い、既存のロードヒーティング技術の適用範囲の拡大や省エネルギー化に資すると考える。

本研究は、融雪技術における熱エネルギーの効率的な利用に資するために、一般的な数値を大幅に上回る高い熱伝導性を有する舗装材を開発することを目的とした。

そこで、舗装材の骨材として、化学的に安定かつ高い熱伝導性を有する酸化アルミニウム (Al_2O_3) (以下「アルミナ」と呼ぶ) に着目した。

本報文では、アルミナの置換率により熱伝導率を一定の範囲内でコントロールできることを確認した試験結果概要と、このことがロードヒーティングの設計に及ぼす意義、そして実用化に向けた取り組みを報告する。

2. アルミナについて

汎用的なアルミナは、資源的に埋蔵量が豊富なボーキサイトを原料に、抽出精製されており、安価に大量生産できることから産業分野で広く使用されている。

特性として、高融点で耐食性、絶縁性、耐摩耗性に優れていることから、ファインセラミックスの基本的な素材として絶縁碍子(がいし)、研磨剤などに使われている。

また、セラミックス素材の中では、比較的高い熱伝導性を有していることから、放熱材としても使用されている。



写真-1 使用したアルミ

写真-1 は、本研究で使用したアルミナ骨材である。

左は細骨材、右は粗骨材として使用した。また、表面には、微細な凹凸がある。

3. コンクリート

一般的にコンクリートの熱伝導率は $1.6\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ と言われている。コンクリートの熱伝導率を向上することができれば、放熱能力の向上に伴い、既存のロードヒーティング技術の適用範囲の拡大や省エネルギー化に資するものと考ええる。

3. 1. 各配合ケースと曲げ強度及び熱伝導率試験結果

コンクリートの標準配合は、新潟太平洋生コン㈱工場 (以下、「工場」と呼ぶ) で品質確認及び出荷実績のある「早期交通開放型コンクリート舗装 (1DAY PAVE)」の配合を基本とし、曲げ強度 $4.50\text{N}/\text{mm}^2$ を保証するものとした。(水セメント比 35%、細骨材率 $S/A=42\%$ 、 $C=471\text{ kg}/\text{m}^3$)

使用するセメントの種類は早強ポルトランドセメント（太平洋セメント㈱社製）とし、骨材は工場で通常使用しているコンクリート用骨材を使用した。また、アルミナについては、日本軽金属㈱社製のアルミナ「36 W/m・K (25℃)」を使用した。

アルミナの粒度については、標準配合で使用した骨材と同等になるよう調整したものを使用した。

基本となる工場の配合を No. 1 とし、アルミナ骨材の効果を最大限見極めるために、No. 2～6 の配合として合計 6 ケースとした。

各ケースの材齢 7 日での曲げ強度試験（JIS A 1106）結果と標準配合に対する強度比及び熱伝導率試験の結果を表－1 に示す。

表－1 曲げ強度試験・熱伝導率試験結果

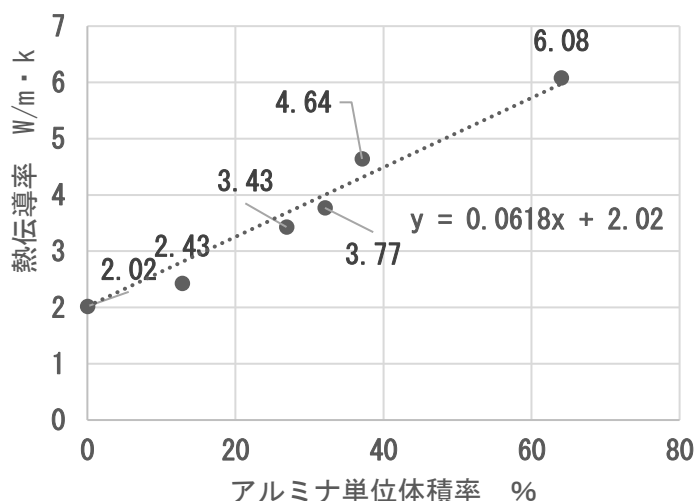
No.	曲げ強度 N/mm ²	標準配合に対する強度比	熱伝導率 W/m・K	アルミナ 単位体積率%	置換概要
1	7.17	1.00	2.02	0	標準配合
2	9.12	1.27	6.08	64.0	細骨材100%・粗骨材100%
3	9.30	1.30	3.43	26.9	細骨材100%・粗骨材0%
4	8.94	1.25	4.64	37.1	細骨材 0%・粗骨材100%
5	8.57	1.20	3.77	32.1	細骨材 50%・粗骨材50%
6	8.58	1.20	2.43	12.8	細骨材 20%・粗骨材20%

各配合とも、標準配合と比べて約 1.2 倍以上の曲げ強度を確認できたため、強度面においては問題なしと推測する。また、「No. 1」の標準配合と比べて、骨材をすべてアルミナに置換した「No. 2」の配合の熱伝導率は、従来の天然骨材ではありえない「6.08」という非常に高い値が得られた。

3. 2. コンクリートについての考察

曲げ強度の増加の要因として、アルミナ骨材の表面の形状（微細な凹凸がある）により、セメントペーストやモルタルとの付着力は工場で使用している天然骨材と比較して高いことが推測される。

また、各配合の「熱伝導率」と、各々の配合で置き換えたアルミナの「単位体積率」には、図－1 に示す通りアルミナの粒径の大小に関係なく比例関係があることを確認した。このことは、アルミナの量を変えることで、ある一定の範囲で熱伝導率をコントロールできることを意味している。



図－1 アルミナ単位体積率と熱伝導率の関係

4. アスファルト合材

一般的にアスファルトはコンクリートより熱伝導率が低いと云われている。

しかし、コンクリートと同様に熱伝導の良いアスファルトが製造されれば、より効果的な融雪を行うことができる。

そこで、アスファルト合材の骨材にアルミナを用いた試験を実施して、アルミナの適用性と置き換えたアルミナの量と熱伝導率に比例関係がみられるのか確認した。

4. 1. 各配合ケースと熱伝導率試験結果

アスファルトにはポリマー改質アスファルトⅡ型を使用した。

また、それぞれ置換量を変えてマーシャル安定度試験を行って各配合を決定して製造し、熱伝導率試験を実施した。その結果を表－2に示す。

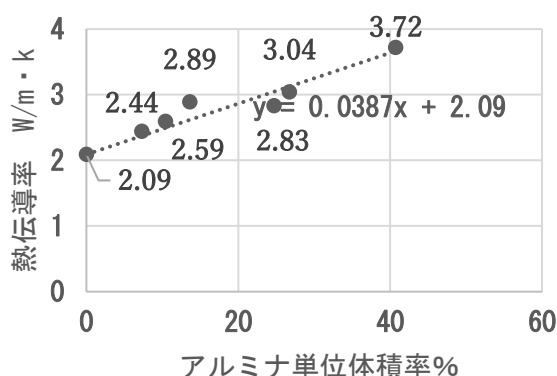
表－2 熱伝導率試験結果

No.	熱伝導率 W/m・K	アルミナ 単位体積率%	置換概要
1	2.09	0	標準配合
2	2.83	24.7	細砂・粗砂分の全量をアルミナ細骨材で置換
3	2.44	7.3	粗砂を0%として調整 アルミナ3-1使用
4	2.89	13.6	7号碎石を0%として調整 アルミナ5-3使用
5	2.59	10.4	粗砂を0%として全量置換 アルミナ中粒使用
6	3.04	26.7	7号碎石と粗砂を0%として調整 アルミナ5-3、中粒使用
7	3.72	40.7	7号碎石・粗砂・細砂を0%として調整 アルミナ5-3、中粒、3-1使用

4. 2. アスファルトについての考察

各配合の「熱伝導率」と、各々の配合で置き換えたアルミナの「単位体積率」には、図－2に示す通りアルミナの粒径の大小に関係なく比例関係があることを確認した。このことは、コンクリートと同様にアルミナの量を変えることで、ある一定の範囲で熱伝導率をコントロールできることを意味している。

また、今回の結果から、アスファルトの方がコンクリートより、アルミナの混入率の増加に対して熱伝導率の増加が小さくなる結果となった。



図－2 アルミナ単位体積率と熱伝導率の関係

5. 熱伝導率のコントロールがロードヒーティングの設計に及ぼす意義について

これまでは、舗装体の熱伝導率は固有の数値として取扱って設計していた。しかし、アルミナの量を変えることで、ある一定の範囲で熱伝導率をコントロールできるとしたらどのような設計ができるのであろうか。

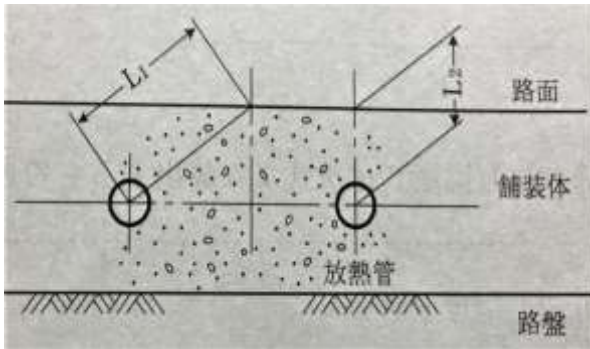
ロードヒーティングの設計図書である「路面消・融雪施設等設計要領 H20.5」における熱伝導率が用いられる設計の個所は、放熱管入口温度 T_1 の個所で、次のように掲載されている。

路面で設計必要熱量を放熱するのに適切な放熱管入口温度は次式により算定するものとする。

$$T_1 = \bar{T} + 1/2 \cdot \Delta T_1$$

T_1 : 放熱管入口温度 (°C)、 $\bar{T}$: 放熱管平均通水温度 (°C)、 ΔT_1 : 放熱による温度低下 (°C)

$$\text{また、} \bar{T} = q_u \cdot \frac{L_1 + L_2}{2\lambda} + q \cdot \frac{a}{2\pi \cdot \lambda_p \cdot L} \cdot \ln \frac{d_o}{d_i} + T_m \quad \text{-----式 (2.12)}$$



図—3 放熱管と舗装体、路面

図—3 は、放熱管と路面の位置関係を表している。

式 (2. 12) における舗装体の熱伝導率が関係するのは第 1 項のみで、各変数は、以下の通りである。

q_u : 上部放熱量 (熱効率を考慮しない融雪または凍結防止に必要な熱量 : W/m^2)

L_1 : 放熱管中心から路面までの最長距離 (m)

L : 放熱管中心から路面までの最短距離 (m)

λ : 舗装体の熱伝導率 ($W/m/^\circ C$)

→国際単位系では ($w/m \cdot k$)

[参考値として、コンクリート 1.4～1.8、アスファルト 1.2～1.6]

式 (2. 12) は、放熱管平均通水温度が、「放熱管から路面までの距離」が長くなると大きくなり、「熱伝導率 λ 」が大きくなると小さくなることを表している。

このことから「熱伝導率」を変数として取り扱うことで、[放熱管の配置]や[放熱管入口温度]の設計を施設全体が全体最適となるような設計を行うことができるようになるのである。

例えば、[放熱管の配置]に関しては、従来路面からの設置深さを 10 cm 以内に配置していることが多く、重荷重により放熱管が破損するケースが見られた。

この対応策として、熱伝導率をアップして設置深さをより深くすることが可能となる。

また、[放熱管入口温度]に関しては、従来のコンクリートでは、必要な放熱管入口温度より低い温度の地中熱を利用することができなかったケースにおいて、熱伝導率を大きくすることで、必要な放熱管入口温度を低減することによって、いわゆる未利用熱の活用が可能となるケースも考えられる。

6. コンクリートにおける実用化に向けた取り組みについて

アルミナ骨材の課題の一つとして、骨材の粒度調整に手間がかかることがある。今回の試験練りで使用した骨材は、各製品を試験室でブレンドして使用したが、一般的な生コン工場における実機による製造では、骨材貯蔵ヤードの数的な制約から、一つの骨材ヤード（一種類の製品だけ）のみを使用することが求められる。そのため、これまでに数種類の製品について試験練りを行い、試行錯誤を繰り返してきた。

その結果、コンクリート舗装については、試験室レベルでは一定の成果（配合設計）が得られ、現場での試験施工の段階に入ったと考えている。

本研究が未利用熱エネルギーの活用による地球環境の改善や循環型社会の構築、そして質の高い道路空間の形成につながるためにも、道路管理者の皆様に現場実装・チャレンジの場の提供を求めて報文発表とします。

最後に

本研究を進めるにあたって、新潟大学工学部 佐伯竜彦教授に多大なご助言をいただきました。

また、日本軽金属(株)、日軽産業(株)及び太平洋セメント(株)に多大なご協力をいただきました。

ここに記して御礼申し上げます。