

高熱伝導コンクリート舗装に関する研究について

未利用熱エネルギーの利用拡大のために、熱伝導率をコントロール

防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 客員研究員 美寺 寿人
新潟大学 工学部 社会基盤工学プログラム 教授 佐伯 竜彦

はじめに

「もし、コンクリートの熱伝導率が2倍、または3倍に、つまり放熱能力が2倍、3倍になるとどうことが起こるのでしょうか。」

例えば、路面融雪施設に関して、下水熱などの低温度エネルギーを利用することができなかった北海道において、未利用熱エネルギーを活用できるようになったり、既に下水熱などを利用している地域において、建設コストを低減できるかもしれません。

路面融雪施設のロードヒーティングにおけるコンクリート舗装の機能は、車両の荷重に対して放熱管を防護する耐荷機能と併せて、放熱管からの熱を路面に伝える熱伝導機能を有しています。

一般的にコンクリートは熱伝導率が $1.6\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ とされています。

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、コンクリートの放熱能力を大幅に高めて、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て始めました。

本稿では、コンクリートの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概要と、その熱伝導率の向上がロードヒーティングの設計に及ぼす効果についての考察を報告します。

熱伝導率の大きい骨材を使用

舗装材であ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と考える。

そこで、舗装材であるコンクリートの骨材として、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。

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が

子、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。

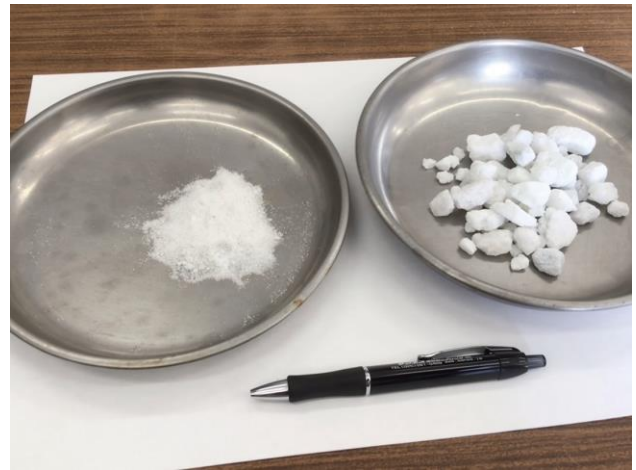


写真-1 使用したアルミナ骨材

コンクリートの各配合ケースと熱伝導率及び曲げ強度試験結果

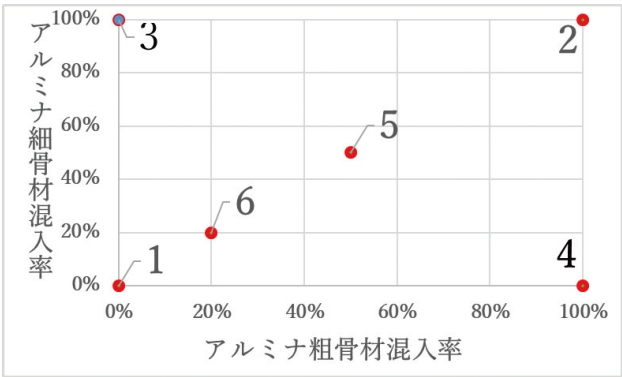
そこで、骨材として着目したアルミナを用いてコンクリートを製造することにした。

コンクリートの標準配合は、新潟太平洋生コン(株)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、道路設計で定められている設計基準曲げ強度 4.50N/mm^2 を保証するものとした(水セメント比35%、細骨材率 $s/a=42\%$ 、単位セメント量 $C=471\text{kg/m}^3$)。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(株)社製)とし、骨材は工場で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(株)社製のアルミナ「 $36\text{W/m}^{\circ}\text{C}(25^{\circ}\text{C})$ 」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図－1で示した置換率(混入率)に応じた 6 ケースとした。



図－1 各ケースの置換(混入)率図

No1: 0:0 標準配合 置換なし

No2: 100:100 全量置換

No3: 100:0 細骨材全量置換

No4: 0:100 粗骨材全量置換

No5: 50:50 両骨材50%置換

No6: 20:20 両骨材20%置換

写真－2は、各ケースの熱伝導率を測定するためのサンプルである。

各ケースの熱伝導率試験の結果を表－1に示す。



写真－2 熱伝導測定用サンプル(直径 5cm の八角形、厚さ 3cm)

左から No.1・2、右端は No.6

表－1 熱伝導率試験結果表

No.	熱伝導率 W/m℃	アルミナ混入 体積率%	置換概要
1	2. 02	0	標準配合
2	6. 08	64. 0	細骨材 100%・粗骨材 100%
3	3. 43	26. 9	細骨材 100%・粗骨材 0%
4	4. 64	37. 1	細骨材 0%・粗骨材 100%
5	3. 77	32. 1	細骨材 50%・粗骨材 50%
6	2. 43	12. 8	細骨材 20%・粗骨材 20%

「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」W/m℃という非常に高い値が得られた。

また、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の結果を表－2に示す。

表－2 曲げ強度試験結果表

No.	曲げ強度 N/mm ²	標準配合に対 する強度比	アルミナ混入 体積率%	置換概要
1	7. 17	1. 00	0	標準配合
2	9. 12	1. 27	64. 0	細骨材 100%・粗骨材 100%
3	9. 30	1. 30	26. 9	細骨材 100%・粗骨材 0%
4	8. 94	1. 25	37. 1	細骨材 0%・粗骨材 100%
5	8. 57	1. 20	32. 1	細骨材 50%・粗骨材 50%
6	8. 58	1. 20	12. 8	細骨材 20%・粗骨材 20%

曲げ強度の増加について

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。

これについて、標準配合と強度比が最大だったNo.3の破断面の写真を示す。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。



写真－3
No1(標準配合):砕石粗骨



写真－4
No3:砕石粗骨材が割れているものもある

なお、耐久性、耐候性を調べる為に、試験練りで練り混ぜられたアルミナコンクリートを、35cm×35cm×12cm(B×W×H)で成形し、屋外環境で暴露試験を行っている(写真－5)



写真-5 屋外暴露試験状況(撮影日2021年8月2日)

※ 写真右は砂、砂利の100%を置換、写真左は砂、砂利の50%を置換したもの1年9か月経過したが、目視ではコンクリート表面には変化が見られない

熱伝導率のコントロールについて

熱伝導率の増加について各ケースの場合のアルミナ混入体積率と熱伝導率の関係を次頁図-2に整理した。

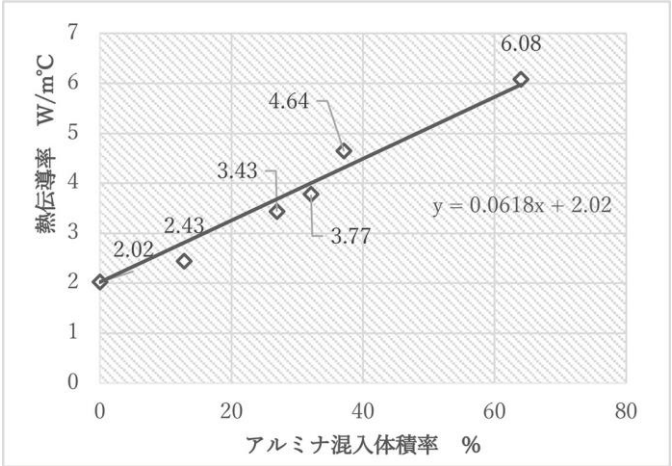


図-2 アルミナ混入体積率と熱伝導率の関係図

各配合の「熱伝導率」と、各々の配合で天然骨材と置き換えたアルミナの「混入体積率」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ように見える。

式-1は、熱伝導率とアルミナ混入体積率の相関式である。

熱伝導率(W/m°C) = 0.0618(W/m°C/%) ×
アルミナ混入体積率(%) + 2.02(W/m°C) …………… 式-1

また、この試験後にアルミナの粒度を変えたものを使用して、様々な置換割合で製造したものについて熱伝導率の測定を行った。その結果を表-3に示す。

表-3 アルミナ混入体積率と熱伝導率表

各配合	X：アルミナ 混入体積率 (%)	Z：測定した 熱伝導率 (W/m°C)	Y：相関式1に よる熱伝導率 (W/m°C)	誤差(%) 100 × (Z - Y) / Y
A 配合：(w/c = 43.8%)	3.0	2.22	2.21	+ 0.5
B 配合：(w/c = 58.3%)	6.0	2.22	2.39	- 7.1
C 配合：(w/c = 35%)	6.3	2.43	2.41	+ 0.8
D 配合：(w/c = 35%)	28.5	3.84	3.78	+ 1.6
E 配合：(w/c = 35%)	48.5	4.93	5.02	- 1.8

B配合の誤差が-7.1%と大きな数値であったことは、水セメント比が大きく、熱伝導率の小さい水の占める割合が大きいことが影響したものと推測する。一方、その他のケースは概ね、相関式に合致していると言える。

以上のことから、アルミナの混入体積率を変えることで、ある一定の範囲(熱伝導率2～6)でコンクリートの熱伝導率をコントロールできるものと推測できる。

このことは、路面融雪技術の高熱伝導機能舗装材として、より厳密に設計することができることにつながり、未利用熱エネルギー活用の適用範囲の拡大や省エネ化に繋がるものと思う。

なお、各地域で使用されている天然骨材が異なることから、実際の設計にあたっては、相関式を作成して設計する必要がある。

熱伝導率の向上がロードヒーティングの設計に及ぼす効果についての考察

熱伝導率をコントロールすることができるが、アルミナの価格(工場渡し)が従来の骨材と比べて、200～300円/kgと高価(推定値)であるため、舗装材そのものはコストが高くなるという課題がある。

この章の考察では、前段で舗装材のコストは高くなるが、その他の採熱設備などのコストが安くなることによって、全体最適な設計が可能となることを。

後段では、低温度の未利用熱エネルギーの利用拡大に資するために、高熱伝導舗装が下水熱を利用した融雪技術において有効であることを示していきたい。

令和3年6月23日に国土技術政策総合研究所が、「下水の熱を利用した車道融雪技術を開発～省エネ・低コストな車道融雪技術を実現～」と題して、「ヒートポンプレスで低LCC と高COPを実現する下水熱融雪システム」の導入ガイドライン(案)「以下、ガイドラインという」を策定し公開した。

本技術は、高い熱伝導性能を持つ採熱管や舗装等を利用することで、ヒートポンプ等の熱を増幅する機器を使用せず、下水から回収した下水熱だけを用いる事により、従来よりも省エネ・低コストで車道

融雪を可能とする技術です。実証の結果、従来技術である電熱ヒーター式と比べると、エネルギー消費量が約93%削減するとともに、総費用(年価換算値)は約14%削減すると試算されました。この新たな技術の導入により、都市部において従来よりも省エネ・低コストな車道融雪が可能となります。

ガイドライン公開時の記者発表資料を加工して作成

そこで、このガイドラインで示されている新たな技術を適用して、考察を進める。

まず、この技術に適用されている高熱性能舗装としての材質として、「①熱伝導率を2.1W/m℃以上」(ガイドラインでは、骨材として熱伝導率が高い珪石・珪砂を採用して、2.4 W/m℃と従来技術の中央値である1.6W/m℃より40%向上する結果が得られている)「②曲げ強度を対象道路において要求される性能を満たすこと」などが規定されている。このことに対して、これまで示してきた本研究成果によって、①②とも規定条件を満たしていると言える。

考察にあたってはガイドラインを参照して、熱伝導率が関係する箇所について説明を行う。

熱伝導率が用いられる設計の箇所は、「路面消・融雪施設等設計要領設計要領」(以下、「要領」と呼ぶ)から放熱管平均通水温度 $\bar{T}$ の式-2の箇所である。

$$\bar{T} = q_u \cdot \frac{L_1 + L_2}{2\lambda} + q \cdot \frac{\alpha'}{2\pi \cdot \lambda_p \cdot L} \cdot \ln \frac{d_o}{d_i} + T_m$$

…式-2

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/m²)

L_1 : 放熱管中心から路面までの最長距離(m)

L_2 : 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℃)

q : 必要熱量W/m²、 α' : ユニット面積m²、 λ_p : 放熱管熱伝導率W/m℃、 d_o : 放熱管外形m、 d_i : 放熱管内径m、 L : 放熱管延長m

T_m : 路面温度(0℃)

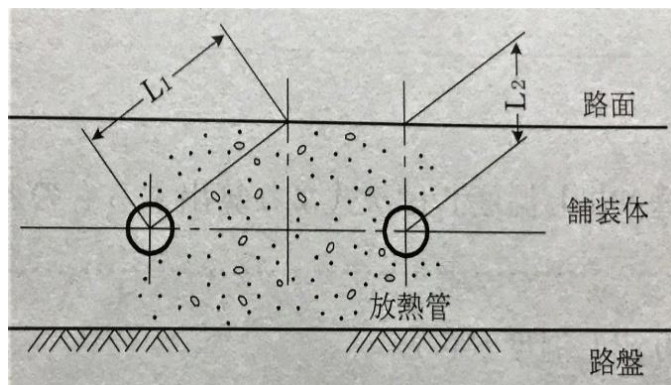


図-3 放熱管と舗装体、路面(出典:要領より)

なお、図-3は放熱管と路面の位置関係を表している。

式-2は、舗装体の熱伝導率 λ が大きくなると放熱管平均通水温度 $\bar{T}$ が減少することを表している。

また、放熱管行き温度 T_a と放熱管還り温度 T_b は、次のような関係がある。

$T_a = \bar{T}$ (放熱管平均通水温度) + $1/2 \cdot \Delta t_1$ (放熱による温度低下) + Δt_2 (送水管からの温度低下)

$T_b = \bar{T} - 1/2 \cdot \Delta t_1$ なお、 Δt_1 、 Δt_2 とも舗装体の熱伝導率とは無関係である。

また、採熱管敷設延長は、式-3で求められる。

$$\text{採熱管敷設延長 } L = \frac{Q}{N\pi D U} \frac{1}{\ln \frac{(T - T_a) - \ln \frac{(T - T_b)}{(T - T_a) - (T - T_b)}}{1}}$$

…式-3

Q : 全体必要熱量(W) N : 採熱管本数(本)

D : 採熱管外径(m) U : 総括熱伝達係数(W/m²℃)

T : 下水温度(℃)

ガイドラインには、導入検討例として、新潟市において実証研究施設を設置した際の検討例が掲載されている。

この事例をもとに全体最適な設計について考察を行うとともに、ヒートポンプレスでの下水熱利用の困難な地域である北海道を想定して、その適用性について考察を行う。

(1)新潟市の事例の検討及び考察

・融雪対象面積: 200m²

・単位面積当たり必要熱量 q : 123W/m²

・上部放熱量 q_u : 110.68W/m² ・総必要熱量24,100W/m²

・熱伝導率2.1W/m℃ ・放熱管の種類及び口径: SUS15A

・放熱ユニット面積15m²以内 ・放熱管設置間隔: 150mm

・管内流速及び送水量: 0.7m/s ・下水温度8.0℃

・舗装版厚: 280mmなどとなっている。

図-4はコンクリート舗装における放熱管などの敷設位置を表している。

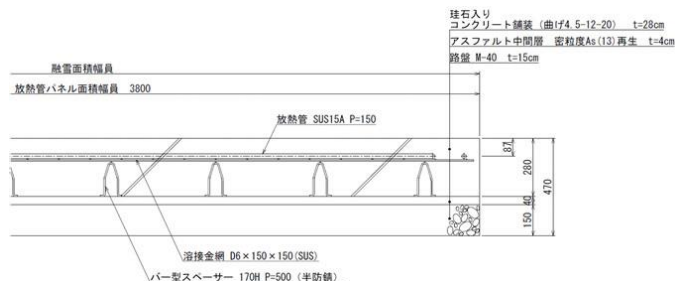


図-4 コンクリート舗装厚28cmでのパネル構成例

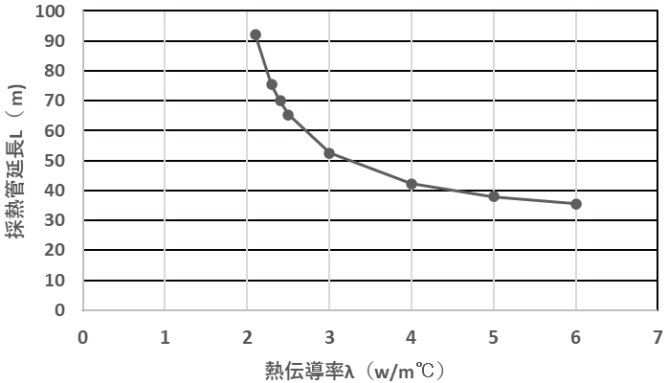
出典:ガイドラインより

また、熱伝導率を2.1~6の間で変化させた場合の各種数値を表-4に、熱伝導率と採熱管延長の関係を図-5に示す。

表－4 熱伝導率と放熱管行き・還り温度と採熱管延長
(太字で斜字は、ガイドライン掲載事例)

熱伝導率λ (W/m℃)	放熱管行き温度 T (a℃)	放熱管還り温度 Tb (℃)	採熱管延長 L (m)
2.1	6.84	4.08	92.2
2.3	6.38	3.62	75.4
2.4	6.18	3.42	70
2.5	5.99	3.23	65.4
3	5.24	2.48	52.5
4	4.31	1.55	42.3
5	3.75	0.99	37.9
6	3.38	0.62	35.5

「新潟市」

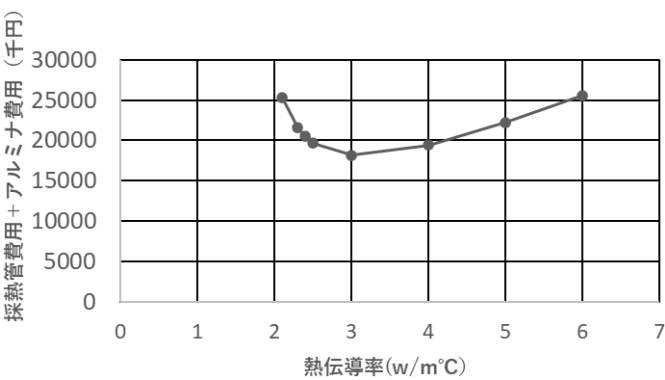


図－5 高熱伝導Coの熱伝導率と採熱管延長

図－5より、熱伝導率が3W/m℃付近までは採熱管延長の減少率が大きく、それ以上になると減少率が小さくなることがわかる。

そこで、ヒートポンプレスにおいて、建設費に占める割合が多いとされる採熱管費用に着目して、採熱管設置費用(材工共)を270千円/m(推定値)、熱伝導率を1W/m℃上げるための高熱性能舗装材のアルミナ費用をプラス20千円/m²(推定値)として経済性を検討する。図－6は、熱伝導率と採熱管及びアルミナの費用の関係を表している。

「新潟市」



図－6 熱伝導率と採熱管費用+アルミナ費用

前掲図－6より、高熱性能舗装の熱伝導率が、3W/m℃付近において「採熱管設置費用+アルミナ費用」が最小となり、検討例(2.1W/m℃)よりもコスト縮減が図れるものと推測され、それ以上の熱伝導率の向上はオーバースペックとなることを示している。

(2)北海道での検討及び考察

(1)の新潟市の事例を参考にして、北海道の道央地区を想定して同様の検討を行う。下線部は、新潟市の事例の場合から変更したものである。

- ・融雪対象面積:200m²
- ・単位面積当たり必要熱量q:250W/m(2 道央地区)
- ・上部放熱量qu:225W/m²
- ・総必要熱量50,000W/m²
- ・放熱管の種類及び口径:SUS15A
- ・放熱ユニット面積12.5m²以内 熱源水の放熱による温度低下を5度以内にすため
- ・放熱管設置間隔:150mm・管内流速及び送水量:0.7m/s
- ・下水温度12℃(推定値)・舗装版厚:280mmなどとする

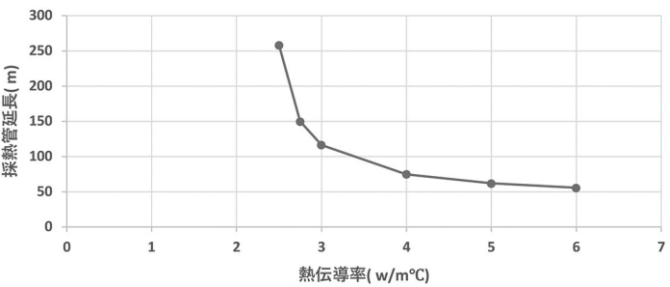
熱伝導率を1.6～6の間で変化させた場合の各種数値を表－5に、熱伝導率と採熱管延長の関係を図－7に示す。

「北海道」

表－5 熱伝導率と放熱管行き・還り温度と採熱管延長

熱伝導率λ (W/m℃)	放熱管行き温度 T (a℃)	放熱管還り温度 Tb (℃)	採熱管延長 L(m)
1.6	<u>16.84</u>	11.92	-
2.4	<u>12.1</u>	7.18	-
2.5	11.72	6.81	257.9
2.75	10.9	5.98	149.8
3	10.21	5.29	116.5
4	8.32	3.4	74.8
5	7.18	2.26	62
6	6.42	1.5	55.7

「北海道」

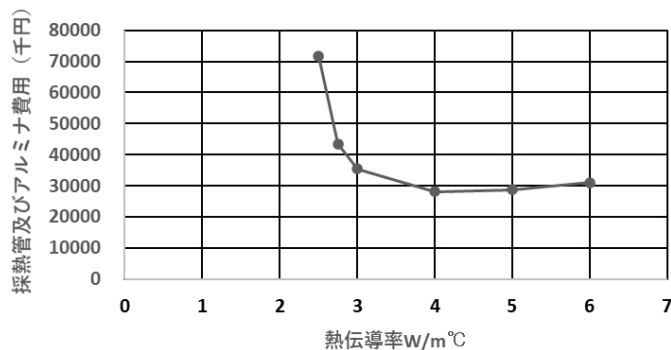


図－7 高熱伝導Coの熱伝導率と採熱管延長

表－5より、熱伝導率 $1.6\sim 2.4\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ の範囲では 12°C の下水熱の活用ができないが、熱伝導率 $2.5\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ 以上によって、単位面積当たり必要熱量 $q:250\text{w/m}^2$ の条件をクリアできることがわかる。

また、図－7より、熱伝導率が $4\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ 付近までは採熱管延長の減少率が大きく、それ以上になると減少率が小さくなることがわかる。図－8は、熱伝導率と採熱管及びアルミナの費用の関係を表している。

「北海道」



図－8 熱伝導率と採熱管費用＋アルミナ費用

図－8より、高熱性能舗装の熱伝導率が、 $4\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ 付近において「採熱管設置費用＋アルミナ費用」が最小になると推測される。それ以上の熱伝導率の向上はオーバースペックとなることを示している。

しかし、表－5から熱伝導率が $6\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ の場合に放熱管行き温度が 7°C 以下になる。このことから、 7°C 付近の低温度の熱エネルギーの利用も可能となり、北海道や厳寒多雪地域などでのアルミナを使用した高熱伝導コンクリートのポテンシャルは高いものとする。

おわりに

このように、部分最適ではなく全体最適な設計として、路面に熱を伝える舗装材に、価格は高いが品質が安定している工業製品であるアルミナを骨材として用いることで、建設コストの低減や省エネ化が図れるものとする。また、これまでヒートポンプが導入できなかった地域において可能となり、未利用熱エネルギーの利用拡大により、再生エネルギー活用地域の拡大に繋がるケースもあるものとする。

この研究が、持続可能な社会の発展に寄与できれば幸いである。

《参考文献》

「令和2年度北陸地方整備局事業研究発表会」【美寺寿人・五十嵐祐司・佐伯竜彦・上石勲「高熱伝導コンクリートに関する研究」】
国土技術政策総合研究所資料 第1158号2021年3月 BDASH
プロジェクトNO.35 ヒートポンプで低LCCと高COPを実現する下水熱融雪システム導入ガイドライン(案)

本論文に関する問い合わせ先

東邦産業株式会社

(超高熱伝導舗装研究会)

美寺寿人 (MITERA HISATO)

〒951-8124 新潟市中央区医学町通2番町10番地1

e-mail:hisato@tohos.co.jp