

北海道の未利用熱活用に資する高熱伝導舗装を用いた無散水融雪

Snow melting without sprinkling water using high-heat-conductive pavement that contributes to the utilization of unused heat in Hokkaido

美寺寿人¹, 佐伯竜彦², 岡田明也³, 野本孝史⁴, 浅野宏⁵

¹Hisato MITERA, ²Tatsuhiko SAEKI, ³Akiya OKADA, ⁴Takashi NOMOTO, ⁵Hiroshi ASANO

¹東邦産業（株）, ²新潟大学, ³太平洋セメント（株）, ⁴エヌシー（株）, ⁵新潟太平洋生コン（株）

¹Toho Sangyo Co., Ltd., ²Niigata University, ³Taiheiyo Cement Co., Ltd., ⁴NC Co., Ltd., ⁵Niigata Taiheiyo Namakon Co., Ltd.

1. はじめに

これまで北海道や多積雪地における無散水融雪施設では、必要な放熱量（設計放熱量）が大きいために、下水熱や地中熱などの低温度の熱エネルギーを利用することが難しいと言われてきました。一般的に、コンクリートの熱伝導率は $1.6\text{W/m}\cdot\text{K}$ として設計上取り扱われています。

本論文では、この値を 2 倍、3 倍に向上し、任意の熱伝導率にコントロールする試験内容と、このことにより北海道での未利用熱の活用ができることを示すとともに、これまで舗装体の熱伝導率を「定数」として取扱って、ロードヒーティングの施設設計が行われてきましたが、「変数」として取り扱うことができることで、施設設計の自由度が広がり、全体最適な設計をすることが可能になることを報告します。

2. 熱伝導率をコントロールする意義

2. 1 アルミナを用いた高熱伝導コンクリート

(1) 熱伝導率向上の必要性

無散水融雪は、図-1 のロードヒーティング断面模式図のように、舗装体内に設置された放熱管内に加熱された不凍液や地下水などを流し、その熱エネルギーが、放熱管から舗装体に熱伝導して路面が温められることにより、路面の雪を融雪する仕組みとなっています。

これまで北海道や多積雪地における無散水融雪施設では、必要な放熱量（設計放熱量）が大きいために、低温度である下水熱や地中熱などの再生可能熱エネルギーの温度だけでは、不凍液を必要な設計温度に温めることができず、不凍液を設計温度まで温めるためにヒートポンプや化石エネルギーの利用に頼らざるを得ないと言われてきました。

この課題を解消する方法として、舗装体の熱伝導率を大

幅に向上することで、必要な設計温度を低くすることができ、未利用熱の活用ができます。その理由は、後述の 2. 2 (1) において、詳細に記述します。

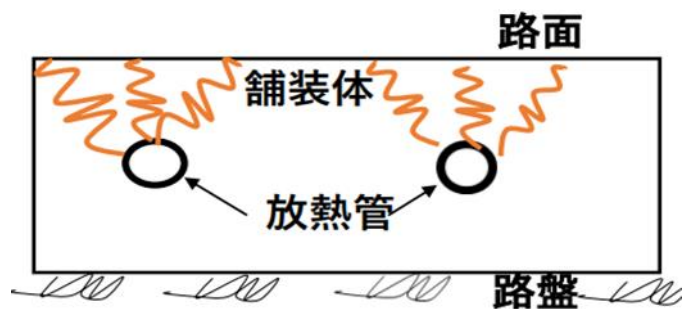


図-1 ロードヒーティング断面模式図

(2) コンクリートの骨材に着目¹

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) に着目しました。

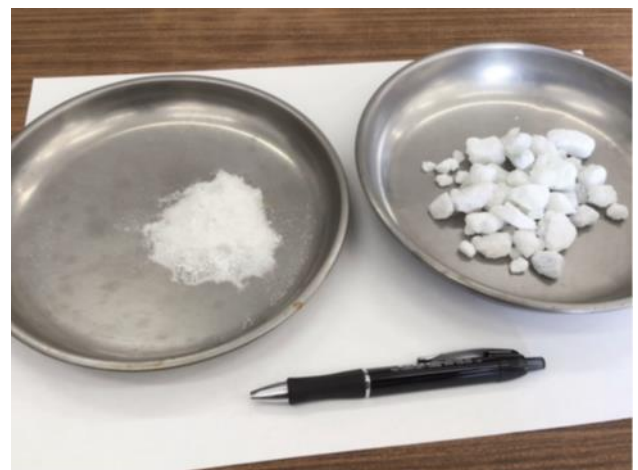


写真-1 使用したアルミナ骨材

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为原料に、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ます。

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、研磨剤などに使われています。

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ます。前頁写真-1 は、本研究で使用したアルミナ骨材です。左は細骨材、右は粗骨材として使用し、表面には、微細な凹凸があります。

(3) 高熱伝導コンクリートの製造

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ました。

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（IDAY 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/mm² を保証するものとししました（水セメント比 35%、細骨材率 s/a=42%、単位セメント量 C=471kg/m³）。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、骨材は工場で通常使用しているコンクリート用骨材を使用しました。

また、アルミナは、日本軽金属（株）社製のアルミナ「36W/m K（25℃）」を使用し、その粒度については、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ました。

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-2 で示した置換率（混入率）に応じた 6 ケースとしました。

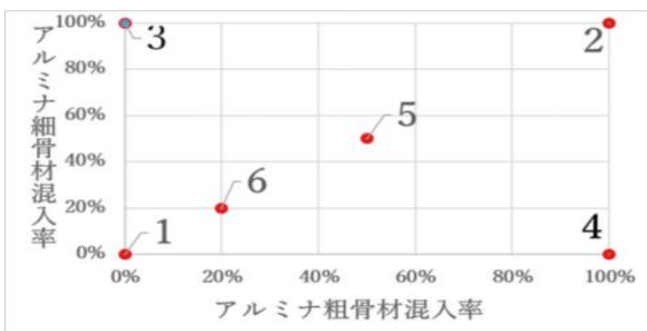


図-2 各ケースの置換（混入）率図

アルミナ細骨材置換率：アルミナ粗骨材置換率

No1： 0：0 No2： 100：100 No3： 100：0

No4： 0：100 No5： 50：50 No6： 20：20

(4) 熱伝導率

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す。（測定方法：円板熱流計法 ASTM E1530（準拠））



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・3・4・5・右端はNo.6）

また、各ケースの熱伝導率試験の結果を表-1に示します。

表-1 アルミナ混入体積率と熱伝導率表

No.	熱伝導率 W/m K	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 Kという非常に高い値が得られました。

(5) 熱伝導率をコントロール

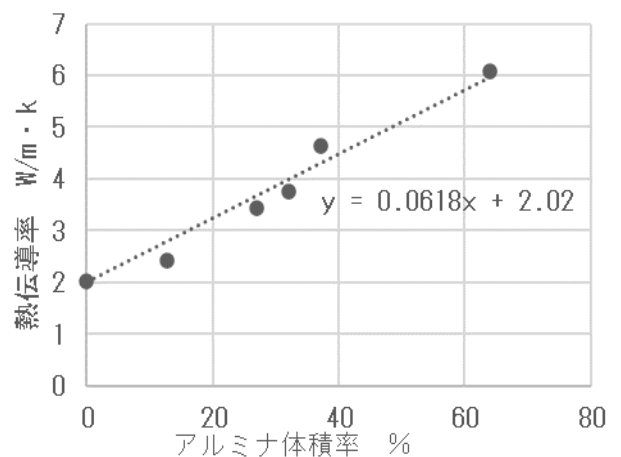


図-3 アルミナ混入体積率と熱伝導率の関係図

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図-3に整理しました。

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-3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ります。

式-1は、熱伝導率とアルミナ混入体積率の相関式です。

$$\text{熱伝導率}(W/m\ K)=0.0618(W/m\ K\ \%) \times$$

$$\text{アルミナ混入体積率}(\%)+2.02(W/m\ K) \dots\dots\dots \text{式-1}$$

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ます。

(6) 曲げ強度¹

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に示します。

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%

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します。

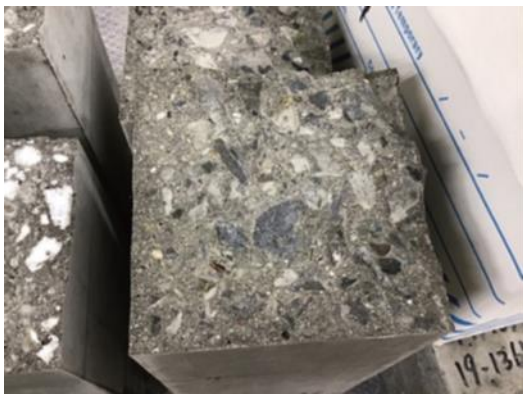


写真-3 No.1 (標準配合) : 砕石粗骨材が割れることなく、そのまま残っている



写真-4 No3 (置換率細骨材100%粗骨材0%) : 砕石粗骨材が割れているものもある

写真-3は標準配合NO.1の破断面写真。写真-4は強度比が最大のNO.3の破断面写真です。

曲げ強度の増加の要因として、アルミナ骨材の表面形状（微細な凹凸がある）により、砕石粗骨材と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ます。

(7) 生コン工場での実機による製造に向けて

生コン工場の実機で製造する上での課題の一つとして、アルミナ骨材の粒度調整が挙げられます。試験練りで使用した骨材は、数種類のアルミナ製品をJIS基準に適合する粒度分布になるように、試験室でブレンドして使用しましたが、一般的な生コン工場では、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ます。

その解決策として、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ました。

その結果、標準配合における骨材の比表面積を算出し、それに合わせた一種類のアルミナ製品を置換する配合設計により、試験室レベルでは強度8.87 N/mm² (標準配合比1.27)・熱伝導率3.84W/m・K (アルミナ混入体積率:28.5%)・性状について一定の成果が得られました。

写真-5は、一種類の製品を使用して製造した生コンのスランプ試験時の写真です。性状は良好でした。



写真-5 アルミナ中粒を使用した時の性状写真

また、標準配合と一種類の製品（アルミナ中粒）を使用した配合の二つを比較するために凍結融解試験を行いました。結果を表-3に示します。空気量は4.5%です。

表-3 凍結融解試験結果表
凍結融解試験 (JIS A 1148)

NO	試験開始時		試験終了時				
	質量 (g)	たわみ一次振動数 (Hz)	質量 (g)	たわみ一次振動数 (Hz)	質量減少率 (%)	相対動弾性係数 (%)	耐久性指数 DF
標準	9732	2382	9722	2350	0.10	97.4	97.4
アルミナ中粒使用	11195	2668	11180	2640	0.13	97.9	97.9

全ての供試体において300サイクルまでに相対動弾性係数が60%以上の値（今回は、97%以上）を示し、問題はありませんでした。

2. 2 未利用熱活用方策

(1) 未利用熱の活用^{2,3}

舗装体の熱伝導率が高いと、設計上必要な不凍液の放熱管入口温度を低くすることができます。

高熱伝導舗装が低温度の未利用熱エネルギーの利用拡大に資することを、下水熱を利用した融雪技術における設計手法を参照しながら、有効であることを示します。

令和3年6月23日に国土技術政策総合研究所は、「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」を策定し公開しました。

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・K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、2.4W/m・Kと従来技術の中央値である1.6W/m・K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ます。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ます。

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の箇所です。

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

…式-2

各変数は、以下の通りです。

qu : 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・K) q : 必要熱量 (W/m²) a' : ユニット面積 (m²) λ_p : 放熱管熱伝導率 (W/m・K) 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°C)

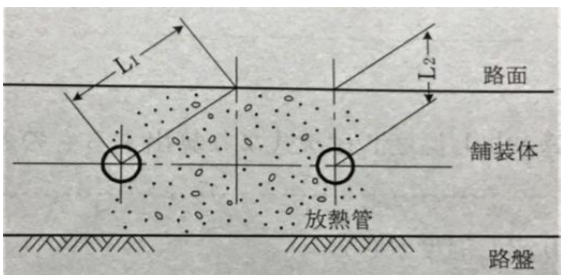


図-3 放熱管と舗装体、路面（出典：要領より）

図-3は放熱管と路面の位置関係を表しています。式-2における舗装体の熱伝導率が関係するのは第1項の

$$qu \cdot \frac{L_1 + L_2}{2\lambda}$$

のみです。

したがって、式-2の放熱管平均通水温度 \bar{T} は、「放熱管から路面までの距離 L_1 、 L_2 」が長くなると大きくなり、「舗装体の熱伝導率 λ 」が大きくなると、小さくなることを表しています。

図-4は、ロードヒーティングの模式図です。熱源によって、温められた不凍液が、ロードヒーティング部の放熱管内を流れる過程で舗装体に放熱をし、熱エネルギーを奪われ温度が低下して、熱源に戻って、また、温められるという循環をしています。各温度は、それぞれのポイントの温度を定義しています。

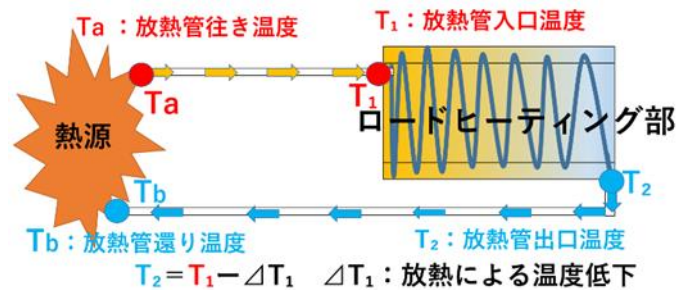


図-4 ロードヒーティング模式図

要領より、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ります。

$$T_a = \bar{T} (\text{放熱管平均通水温度}) + 1/2 \cdot \Delta t_1 (\text{放熱による温度低下}) + \Delta t_2 (\text{送水管からの温度低下})$$

$$T_b = \bar{T} - 1/2 \cdot \Delta t_1$$

なお、 Δt_1 、 Δt_2 とも舗装体の熱伝導率とは無関係です。

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ます。この事例をもとに、ヒートポンプでの下水熱利用の困難な地域である北海道の道央地区を想定して、その適用性について考察を行います。

設計条件は、以下の通りです。

- ・融雪対象面積：200m²・単位面積当たり必要熱量 q ：250W/m²（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度以内にしたため
- ・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°C（推定値）・舗装版厚：280mm

熱伝導率を1.6～6 W/m・Kの間で変化させた場合の各種数値を次頁表-4に示します。

表一4 熱伝導率と放熱管行き温度・還り温度の表

熱伝導率λ (W/mK)	放熱管行き温度Ta(°C)	放熱管還り温度Tb(°C)
1.6	16.84	11.92
2.4	12.1	7.18
2.5	11.72	6.81
2.75	10.9	5.98
3	10.21	5.29
4	8.32	3.4
5	7.18	2.26
6	6.42	1.5

札幌を対象にした単位面積当たり必要熱量:250W/m²の条件での12°Cの下水熱を活用したヒートポンプスの設計事例(車道面積200m²)において、熱伝導率を1.6～6 W/m K の場合の、必要な放熱管行き温度と放熱管温度を算出して表示してあります。

表一4の見方として、熱伝導率が、1.6 W/m K の時の放熱管入り口温度は、16.84°Cが必要な温度となり、熱伝導率が、6 W/m K の場合は、その値が6.42°Cとなります。

このように熱伝導率を1.6 W/m K から6 W/m K に大きくすると、設計放熱管入口温度を約10°C低下することができるのです。

活用できる下水熱を12°Cとしますと、熱の不可逆性で12°C以上にはヒートポンプスでは温めることが不可能ですので、熱伝導率が1.6～2.4 W/m K の範囲では設計放熱管入り口温度が12°C以上となり、必要な設計温度12°C以下を満足しません。

熱伝導率を2.5 W/m K 以上にすることによって、放熱管入口温度を12°C未満にすることができます。

熱伝導率1.6～2.4 W/m K の範囲では12°Cの下水熱の活用ができませんが、熱伝導率2.5 W/m K 以上にすることによって、単位面積当たり必要熱量q :250w/m²の条件をクリアできることがわかります。

また、熱伝導率が6 W/m K の場合に放熱管行き温度が7°C以下になります。このことは、7°C付近の低温度の熱エネルギーの利用も可能となることを示し、北海道や厳寒多雪地域などのヒートポンプスが導入できなかった地域において導入が可能になると考えます。

(2) 放熱管や放熱線の防護力の強化

また、[放熱管の配置]に関しては、従来路面からの設置深さを10cm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ました。この対応策として、図一5の模式図のように、熱伝導率をアップして設置深さをより深くしたり、通常15～20cmという横方向の設置間隔を伸ばすことが可能となり、防護力を

増強することができます。

図一5 舗装体断面図の防護力強化の模式図



(3) トータルコストの低減(全体最適な設計)^{2,3}

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、約300円/kgと高価(推定値)であるため、熱伝導率が6 W/m K のコンクリートは、1m³当り約77万円と高価で、舗装材そのものはコストが高くなるという課題があります。

一方、熱源である下水熱を利用して、不凍液を温めるために下水道管内に採熱管を敷設します。この採熱管の費用も高価なものです。

そこで、ヒートポンプスにおいて、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1 W/m K 上げるため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と、従来より舗装材のコストは高くなりますが、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、トータルコストの縮減が可能となります。

全体最適な設計が可能となるのです。

以下に、ガイドラインを参照して示します。

採熱管の敷設延長は、式一3で求められます。

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

…式一3

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 K) T:下水温度(°C)

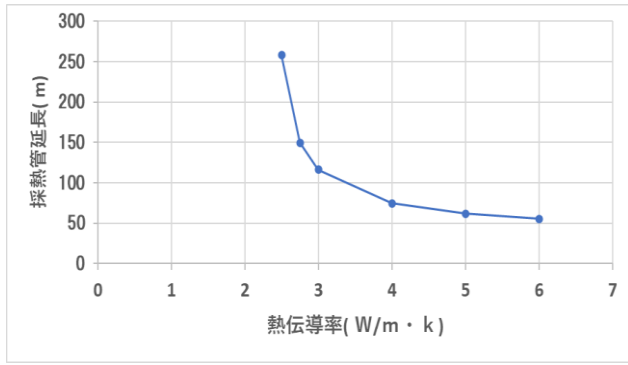
Ta:放熱管行き温度(°C) Tb:放熱管還り温度(°C)

そこで、熱伝導率を2.1～6 W/m²の間で変化させた場合の各種数値と採熱管延長の関係を表一5に示します。

表一5 熱伝導率と放熱管行き・還り温度と採熱管延長の表

熱伝導率λ (W/m-K)	放熱管行き温度 T (a °C)	放熱管還り温度 Tb (°C)	採熱管延長 L(m)
1.6	16.84	11.92	-
2.4	12.1	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

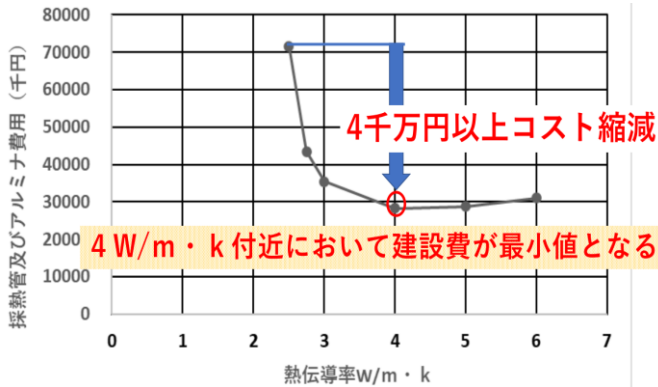
図一6は、熱伝導率と採熱管延長の関係を表しています。



図一6 高熱伝導Coの熱伝導率と採熱管延長

熱伝導率が4 W/m² K付近までは採熱管延長の減少率が大きく、それ以上は減少率が小さくなるのがわかります。

また、図一7は、熱伝導率と「採熱管+アルミナの費用」の関係を表しています。



図一7 熱伝導率と「採熱管+アルミナの費用」の関係図

図一7より、舗装体の熱伝導率が、4 W/m² K 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、4千万円 (200千円/m²) 以上のコスト縮減が図れます。また、4 W/m² K 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ます。

このように「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い、部分最適ではなく全体最適な設計を行うことができますようになります。

3. 今後の課題等

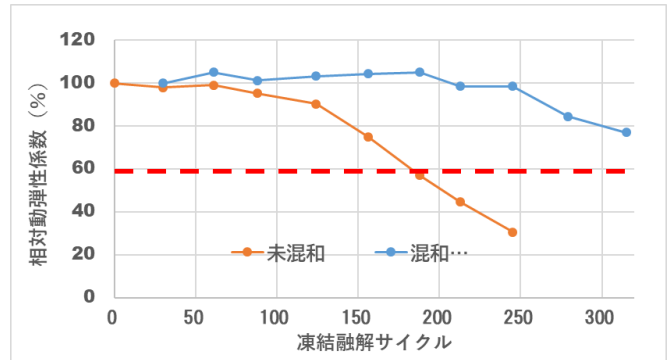
3.1 熱伝導率の向上の方策⁴

アルミナは高価な材料であることから、コスト縮減が課題でした。

そこで、熱伝導率の低い空気 (0.0257 W/m² K) に着目して、コンクリートの空気量を低減した比較試験を、細骨材・粗骨材をすべてアルミナに置換した配合のケースで行い、空気量を7.9%から2.6%に少なくした場合、熱伝導率は6.08 W/m² K から7.70 W/m² K に向上しました。

一方、空気量は耐凍害性の機能として、5%程度を目安に配合することになっています。

そこで、耐凍害性混和剤として開発されたパラフィン を主成分とする「パラフィン系混和剤⁵」を用いて、新たに空気量3%で混和剤の有無による凍結融解試験を行い、図一8のような結果となりました。



図一8 アルミナ中粒使用コンクリート (空気量3%) における混和剤有無の凍結融解サイクルと相対動弾性係数

未混和のものが180サイクル時点で相対動弾性係数60%を下回るのに対して、混和した方は300サイクル時点で、80~70%程度と大幅に耐凍害性が向上して、その有効性を確認しました。

3.2 現場での試験施工に向けて

このように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、未利用熱活用の建設コストの低減や脱炭素、省エネ化が図れ、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考えます。

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ます。

未利用熱エネルギーの活用による循環型社会の構築などにつながるためにも、関係者の皆様に導入の検討をお願いいたします。

《参考文献》

- 1: 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, 令和2年度北陸地方整備局事業研究発表会, 令和2年9月
- 2: 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)
- 3: 美寺寿人, 佐伯竜彦: 高熱伝導コンクリート舗装に関する研究について, 土木施工2021Nov, pp. 30-34
- 4: 美寺寿人・五十嵐悠介・浅野宏・佐伯竜彦: 高熱伝導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, 第76回セメント技術大会講演資料, 令和4年5月
- 5: 岡田明也, 丸田浩, 中村浩章, 早川隆之: 特殊パラフィンエマルジョンによる凍害抑制技術, コンクリート工学, Vol. 60, No. 10, pp902-908