

計熱伝導率という新しい概念を！  
未利用熱エネルギーの活用に資する高熱伝導コンクリート

New concept of design thermal conductivity!

High thermal conductivity concrete for utilizing waste heat energy

美寺寿人 東邦産業株式会社  
佐伯竜彦 新潟大学工学部  
岡田明也 太平洋セメント株式会社  
野本孝史 エヌシー株式会社  
浅野宏 新潟太平洋生コン株式会社

## 100万円の生コン！？

圧縮力に強く耐火・耐水性が大きいコンクリートの機能に、新たな機能を持ったコンクリートを開発して、その価値が社会に受け入れられれば100万円/m<sup>3</sup>の生コンがあっても、良いのではないかとという素朴な思いから、新たに金属のような熱伝導性の高い機能を加えた新しいコンクリートを開発することにチャレンジしました。

ちなみに、この開発のパソコンのフォルダー名は【100万円コンクリート】です。

## 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、下水熱や地中熱などの低温度の熱エネルギーをヒートポンプで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1.6W/m・Kとして設計上取り扱われています。

本稿では、「この値を大幅に向上するコンクリートの開発」と「無散水融雪施設の舗装コンクリートとして使用することで、低温度の熱エネルギーをヒートポンプで活用できること」。そして、革新的な設計手法として「施設の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. 高熱伝導コンクリートの開発<sup>1</sup>

### 2-1 コンクリートの骨材に着目

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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）（以下「アルミナ」と呼ぶ）に着目しました。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。



写真-1 使用したアルミナ骨材

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。

### 2-2 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(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  $4.5\text{N/mm}^2$  を保証するものとし、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)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)製のアルミナ「 $36\text{W/m}\cdot\text{K}$  ( $25^\circ\text{C}$ )」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-1 で示した体積置換率に応じた 6 ケースとしました。

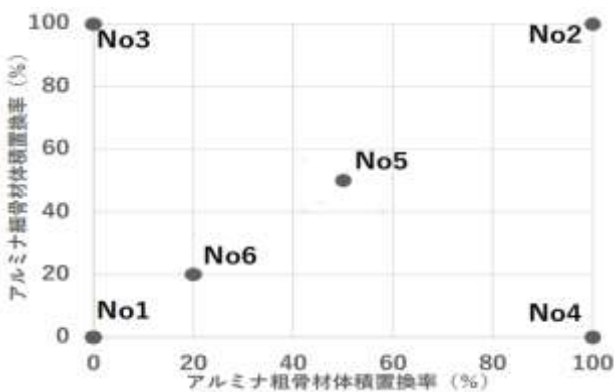


図-1 各ケースの体積置換率図

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

### 2-3 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。(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・6)

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 細骨材 : 粗骨材
1	2.02	0	標準配合 0 : 0
2	6.08	64.0	100% : 100%
3	3.43	26.9	100% : 0%
4	4.64	37.1	0% : 100%
5	3.77	32.1	50% : 50%
6	2.43	12.8	20% : 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「 $6.08\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 」という非常に高い値が得られました。

### 2-4 熱伝導率をコントロール

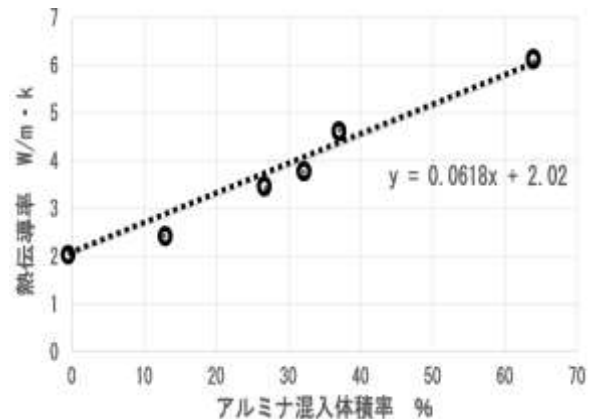


図-2 アルミナ混入体積率と熱伝導率の関係図

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前頁図-2 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-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。

$$\text{熱伝導率(W/m}\cdot\text{K)} = 0.0618(\text{W/m}\cdot\text{K}\cdot\%) \times \text{アルミナ混入体積率}(\%) + 2.02(\text{W/m}\cdot\text{K})$$

…………… 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。

## 2-5 曲げ強度

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 <sup>2</sup>	標準配合 に対する 強度比	アルミナ 混入体積 率%	置換概要 細骨材：粗骨材
1	7.17	1.00	0	標準配合 0：0
2	9.12	1.27	64.0	100%：100%
3	9.30	1.30	26.9	100%：0%
4	8.94	1.25	37.1	0%：100%
5	8.57	1.20	32.1	50%：50%
6	8.58	1.20	12.8	20%：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 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。



写真-3 No.1（標準配合 0：0）  
（通常の碎石粗骨材が割れることなく、残っている）



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

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、碎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。

### 3. 未利用熱をヒートポンプで活用

#### 3-1 熱伝導率向上の意義

無散水融雪は、図-3 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温かい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。



図-3 ロードヒーティング断面模式図

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な熱エネルギーの温度だけでは、不凍液等を必要な設計温度に温めることができず、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、不凍液等の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。次の3-2で示します。

#### 3-2 未利用熱活用<sup>2,3</sup>

高熱伝導コンクリート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<sup>4</sup>に基づいて計算した結果を用いて示します。

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し（それによって、路面の融雪を行う）、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。

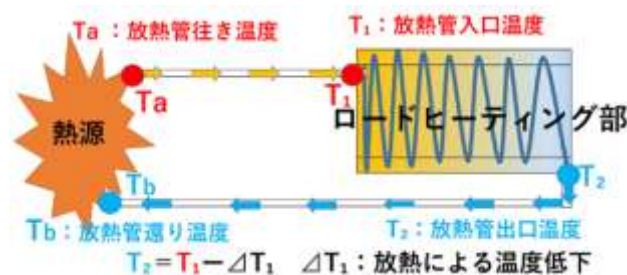


図-4 ロードヒーティング模式図

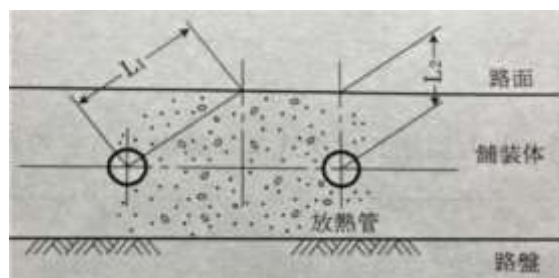


図-5 放熱管と舗装体、路面（出典：要領より）

図-5は放熱管と路面の位置関係を表しています。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」（以下、「要領」と呼ぶ）から放熱管平均通水温度 $\bar{T}$ の式-2です。

$$\bar{T} = qu \cdot \frac{L_1 + L_2}{2\lambda} + q \cdot \frac{\alpha}{2\pi \cdot \lambda_p \cdot L} \cdot \ln \frac{d_o}{d_i} + T_m \quad \dots \text{式-2}$$

式-2における舗装体の熱伝導率が関係するのは第1項のみです。

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

1項の変数は、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/m<sup>2</sup>） L1: 放熱管中心から路面までの最長距離（m） L2: 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）

この第1項は、「放熱管から路面までの距離 L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>」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。

したがって、式-2の放熱管平均通水温度 $\bar{T}$ や放熱管行き温度の値にも同じことが言えます。

計算モデル例として、ヒートポンプでの再生可能エネルギーの一つである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：200m<sup>2</sup>・単位面積当たり必要熱量 q：250W/m<sup>2</sup>（道央地区）・上部放熱量 q<sub>u</sub>：225W/m<sup>2</sup>・総必要熱量 50,000W・放熱管の種類及び口径：SUS15A・放熱ユニット面積 12.5m<sup>2</sup>・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）

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表－3 に示します。

表－3 熱伝導率と放熱管行き温度・還り温度の表

熱伝導率 λ (W/m・K)	放熱管行き温度 T <sub>a</sub> (℃)	放熱管還り温度 T <sub>b</sub> (℃)
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

表－3 の見方として、熱伝導率が 1.6 W/m・K の時の放熱管行き温度は、16.84℃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℃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、設計放熱管行き温度を約 10℃低下させることができます。

活用できる下水熱を 12℃としますと、熱の不可逆性で 12℃以上にはヒートポンプ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 の範囲ではヒートポンプでの利用はできないことになります。

熱伝導率を 2.5 W/m・K 以上にすることによって、放熱管行き温度を 12℃未満にすることができます。

つまり、熱伝導率 1.6～2.4 W/m・K の範囲では 12℃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/m<sup>2</sup>の条件をクリアできるのです。

また、熱伝導率が 6 W/m・K の場合に放熱管行き温度が 7℃以下になります。

このことは、7℃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が導入できなかった地域において未利用熱である再生可能エネルギーの導入が期待できます。

### 3-3 高熱伝導コンクリートの実証試験

前項で、熱伝導率を向上すると低温度の熱源でも利用可能となることを計算上示しました。

そこで、このことを実証試験により確認しました。



写真－5 使用した恒温槽



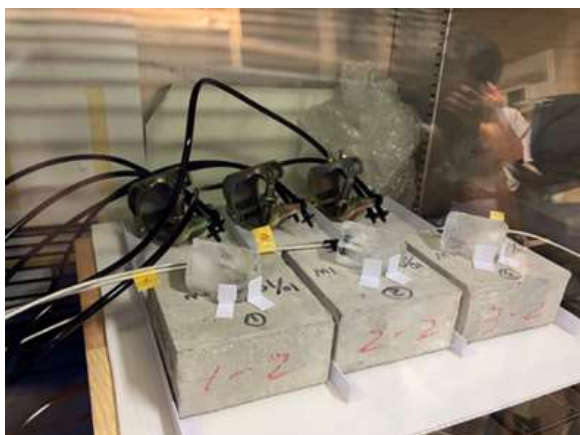
図－6 熱供給ポンチ絵

写真－5 の恒温槽をマイナス 1℃に設定し、マイナス 1℃に冷やした 3 種類の熱伝導率の異なるサンプル（10 cm×10 cm×5 cmの直方体）の上に氷を置き、図－6 のポンチ絵のようにサンプルの底面に同流量の水温度約 10℃の水を流して熱を供給し、氷の融解する状況を観察しました。

試験の様子



写真—6 は、試験開始時の状況です。



写真—6 試験開始時

サンプルは、向かって左から

- 1-2: 普通コンクリート(熱伝導率 2.0w/m・k)
  - 2-2: 高熱伝導コンクリート(熱伝導率 6.1 w/m・k)
  - 3-2: 高熱伝導コンクリート(熱伝導率 3.4 w/m・k)
- の順番で配置しました。



写真—7 試験終了時

試験開始から約 6 分後にサンプル 2-2 に溶け始めの兆候が見られ、約 7 分後にサンプル 3-2 に同様の兆候が見られたが、サンプル 1-2 は、約 16 分後によくわずかではあるが兆候が見られました。このことにより、熱伝導率を高めることにより、同じ熱エネルギーの下で、放熱量(熱伝導)が大きくなることを確認しました。

写真—7 は、試験終了時(開始から約 23 分後)の状況です。

#### 4. 全体最適な設計<sup>2,3</sup>

##### 4-1 部分最適から全体最適へ

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(生コン工場渡し)が従来の骨材と比べて、約 300 円/kg(推定値)と高価であるため、熱伝導率が 6 W/m・K のコンクリートは、1m<sup>3</sup> 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ります。

一方、再生可能エネルギーを利用する場合、採熱部に多額の費用が掛かると言われています。

例えば、再生可能エネルギーの一つである下水熱を熱源としてヒートポンプで利用する場合には、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。

そこで、【3-2 未利用熱活用】で想定した北海道の道央地区の場合の熱伝導率に対する放熱管行き温度・還り温度の値を用いて、採熱管延長を求め、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 向上するアルミナ費用を 20 千円/m<sup>2</sup>(放熱管を含む舗装上部の厚さ 10 cmを高熱伝導コンクリートで施工する場合)として検討しました。

以下に、熱伝導率を 2.1~6 W/m・K の間で変化させた場合の熱伝導率と採熱管延長の関係を図-7 に示します。熱伝導率が 4 W/m・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。

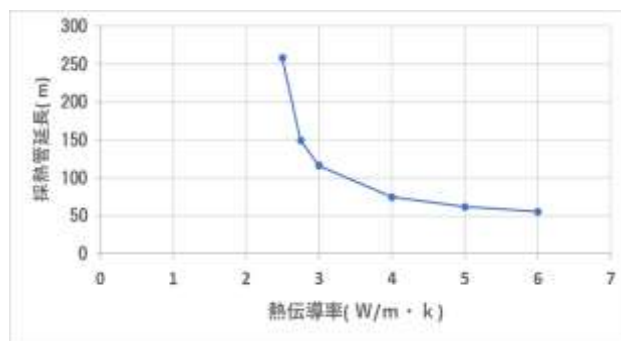


図-7 高熱伝導 Co の熱伝導率と採熱管延長

また、図-8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。

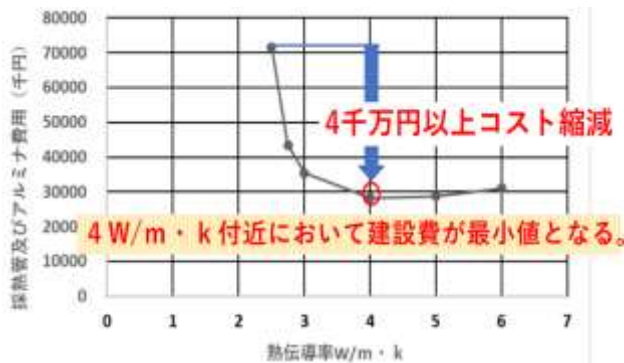


図-8 熱伝導率と「採熱管+アルミナの費用」の関係図

図-8より、舗装体の熱伝導率が、4 W/m·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/m<sup>2</sup>）以上のコスト縮減が図れます。また、4 W/m·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。

このようにコンクリート舗装材のコストは高くなります【部分最適ではない】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【全体最適】となるのです。

## 2-2 革新的な設計手法

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、前項で示したように【変数】として取り扱うことができることで、放熱管の配置や放熱管入口温度の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ります。

## 5. 今後の課題等<sup>4,5</sup>

### 5-1 熱伝導率の向上の方策

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す。

そこで、熱伝導率の低い空気 (0.0257 W/m·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/m·K から 7.70 W/m·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系を主成分とする「パラフィン系混和剤<sup>6</sup>」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-9のような結果となりました。

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。今後、さらに検討を進めていきたいと思ひます。

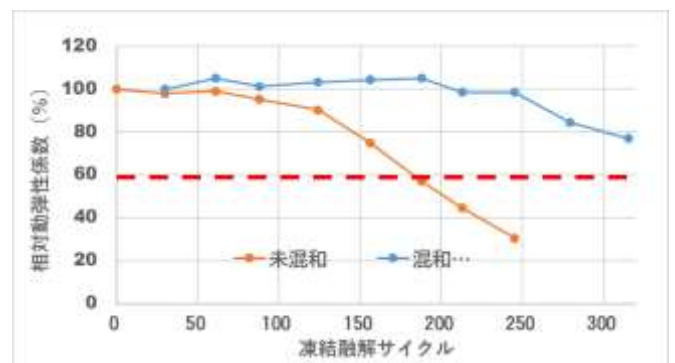


図-9 アルミナ中粒使用コンクリート（空気量 3%）における混和剤有無の凍結融解サイクルと相対動弾性係数

### 5-2 現場での試験施工に向けて

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、未利用熱活用施設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が得られ、現場での施工の段階に入ったと考えています。

高熱伝導コンクリートが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寄与することを願って報告いたします。

《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 ヒートポンプレスで低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: 美寺寿人・佐伯竜彦・岡田明也・野本孝史・浅野宏: 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, 第38回寒地技術シンポジウム報告論文, 令和4年11月
- 6: 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

本論文に関する問い合わせ先

東邦産業株式会社

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

TEL 025-228-0168

e-mail: hisato@tohos.co.jp