

リサイクル材を最大限活用した高効率熱伝導融雪パネルの開発とその評価

福井大学学術研究院工学系部門

建築建設工学分野

助教 寺崎寛章

1. 研究背景および目的

本研究に関わる無散水融雪パネル(融雪平板)は、コンクリートに埋設した管に温水を通水することで融雪を行う。散水とは異なり、足元を濡らすことなく雪を融かすことが可能なため、福井を初めとする暖地積雪地域の人通りの多い駅前などで多く採用されている。特に地中熱を熱源とするシステム(無散水融雪システム)に融雪平板は用いられ、現在では永平寺大野道路や北近畿豊岡自動車など、冬期のスリップ事故防止のために広く利用されている(図-1を参照)^{1),2)}。この地中熱利用無散水融雪システムはCO₂排出削減効果に優れ、ランニングコストおよびライフサイクルコストは安価である一方、従来のボイラー式や電熱線式融雪システムに比べて、初期コストが高いことが普及の妨げとなっている。

一方、福井県では敦賀火力発電所から排出される副産物であるフライアッシュの利用促進を産官学一体となって取り組んでいる³⁾。それに応えるべく、当該研究室でも県内企業と協力して、早期からフライアッシュの積極的な利用に取り組み研究開発を進めてきた。フライアッシュに関して、例えば佐藤ら⁴⁾はフライアッシュを混和したコンクリートの耐久性の向上と維持管理コストの低減に関して報告しており、福上と水越⁵⁾はフライアッシュを混和することにより、ブリーディング抑制効果が期待できることを示し、仲井ら⁶⁾はフライアッシュを混和することで銅スラグ細骨材の置換率 60%の配合においてもフレッシュ性状を改善できることを示した。しかしながら、フライアッシュを混和した融雪平板の融雪性能および伝熱性能に関する知見が不足しているのが現状である。同様の理由により、フライアッシュ以外の比較的安価なリサイクル材である電気酸化スラグや副産物のアルミ灰を混入した高効率融雪平板の開発も進んでいない。本研究では耐久性などの既往の知見が存在し、地産地消の観点から敦賀火力発電所から排出される副産物であるフライアッシュにとりわけ着目して研究を実施する。

そこで本研究では、

- (1)フライアッシュを混和した融雪平板の基礎的な伝熱特性を調べる、
 - (2)従来の融雪平板と改良した融雪平板を実施工する、
 - (3)冬期に融雪比較実験を行う、
 - (4)融雪モデルを構築するとともに、融雪モデルを用いて改良融雪平板の性能を評価する、
- ことを目的とする。



a) 永平寺大野道路



b) 北近畿豊岡自動車道

図-1 融雪平板の施工事例

2. リサイクル材混和試験体の作製

本研究で対象とする融雪平板は骨材と混和材の組み合わせにより、普通骨材コンクリート(NCo)、フライアッシュ混和普通骨材コンクリート(FNCo)、珪石骨材コンクリート(SCo)およびフライアッシュ混和珪石骨材コンクリート(FSCo)の合計 4 種類を対象とした。ここで珪石骨材は福井県内で採取される石材であり、例えば、杉村⁷⁾によって普通骨材に比べて熱伝導率が高いことが知られており、融雪効率の向上が期待できる。

リサイクル材をコンクリート材料として利用した高熱伝導パネルの開発を行うために、まず各種配合パターンで試し練りを行って供試体を作製した。詳細は紙面の都合上割愛するが、本試験における配合設計条件は以下のとおりである。

- 1)水セメント比は40%とする。
- 2)フライアッシュはセメント質量の20%(最大置換率)を置換する。
- 3)使用する骨材は福井県産および兵庫県産とする。
- 4)目標空気量は $2.0 \pm 1.0\%$ とする。
- 5)目標スランプフローは $50 \pm 5.0\text{ cm}$ とする。

また使用材料は表-1 に示すとおり福井県産のフライアッシュを使用した。

表-1 使用材料一覧

材料種類	記号	材料名	密度(g/cm ³)	製造業者又は産地
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	太平洋セメント(株)
混和材	FA	フライアッシュ	2.21	敦賀セメント(株)
	LS	石灰石微粉末	2.71	
細骨材	S1	砕砂(細)	2.60	福井県産
	S2	砕砂(粗)	2.60	
粗骨材	G1	15 mm 碎石	2.62	福井県産
	G2	20 mm 碎石	2.62	
練混ぜ水	W	水道水	1.00	—

またコンクリートの配合は水セメント比(W/C)=40%、細骨材率(s/a)=45.1%(フライアッシュを混和したものは44.0%)、空気量=2.0%を基準として練混ぜを行った。セメント、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用する際には、粗骨材は表乾状態にして使用し、細骨材は表面水率をJIS A 1111により測定して使用した。なお、スランプフロー試験(JIS A 1150)、空気量試験(JIS A 1128)、フレッシュコンクリート温度測定(JIS A 1156)を行い、品質を確認した。

供試体は表-2 に示すように高温・高湿度を維持することで強度発現を促進させる蒸気養生とし、養生後は屋外に静置させた。

表-2 蒸気養生方法

前置(通気前)		昇温		最高温度	保持時間	総養生時間
温度	時間	温度	時間			
30℃	1:00	15℃/h	1:40	55℃	1:30	4:10

3. リサイクル融雪平板の物性値

本研究ではまず作製する融雪平板が所定の強度を有しているかどうかを調べるために、圧縮強度試験を実施した。試験体(φ100×200 mmの円柱)を各3検体ずつ、合計12検体作製し、JIS A 1108:2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」⁸⁾に基づいて油圧式圧縮試験機(1000 kN)を用いて試験は行われた。図-2および図-3は圧縮試験の様子と各試験体の圧縮強度(N/mm²)の結果を示す。NCo および FNCο の圧縮強度は珪石骨材を入れることによって 47.0 および 46.6%増加した。これは珪石の骨材強度が高いために圧縮強度が高くなった一方で(SCο>NCo, FSCο>FNCο), 材齢 14 日で試験を行った本試験ではフライアッシュ混和コンクリートの初期強度が低い(強度発現が遅い)ために NCo>FNCο, SCο>FSCο となったと考えられる。なお、フライアッシュの置換率が高くなるにつれて圧縮強度は低下するが、材齢が長くなる場合は普通コンクリートと同等以上の強度が発現することも報告されていることから、融雪平板製作上は問題にはならないと考えられる。



図-2 圧縮強度試験の様子

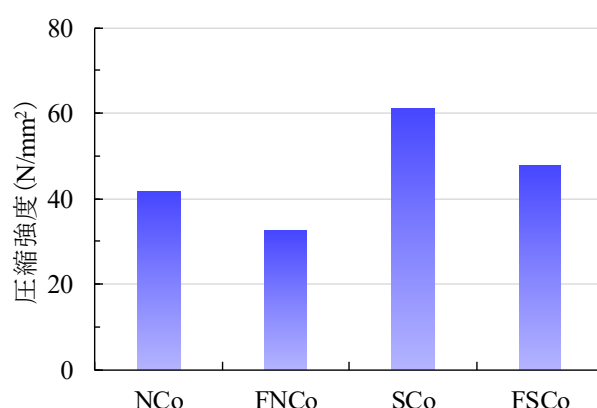


図-3 各試験体の圧縮強度の比較

次に熱伝導率を測定するために、試験体(縦 400×横 100×高さ 100 mm の角柱)を各 3 検体ずつ、合計 12 検体作製した。また Haupin⁹⁾による非定常熱線法(熱線の発熱量と温度上昇量から熱伝導率を求める非定常法)の原理をもとに考案された迅速熱伝導率計(Kemtherm QTM-D3 京都電子工業)を用いて、各試験体の熱伝導率を測定した。試験にあたってはヒーター電流値を設定し、1 検体につき 4 分間隔で測定し、その平均値を試験結果とした。

図-4 および図-5 は熱伝導率測定の様子と各試験体の熱伝導率(W/m/K)の結果を示す。NCo および SCο の熱伝導率はフライアッシュを混和することによって 3.7 および 7.7%低下した。なお、土井ら¹⁰⁾や李と李ら¹¹⁾が指摘しているように、実験データは限られるものの本供試体においても圧縮強度と熱伝導率は正の相関を有すると思われる。



図-4 熱伝導率測定の様子

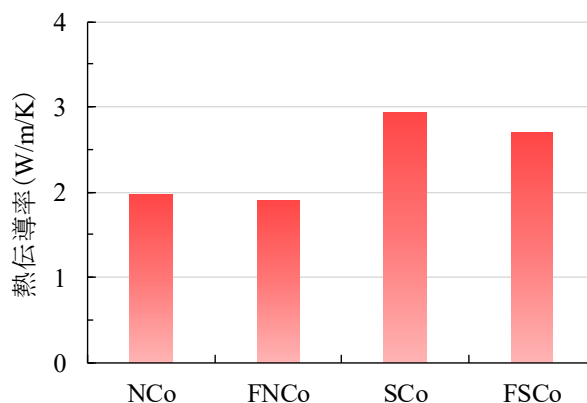


図-5 各試験体の熱伝導率の比較

4. 地中熱利用無散水融雪システムの概要

次に本研究で導入する無散水融雪システムの概要について説明する。本システムは大別して放熱部(融雪平板)、送水部および採熱部(地中熱交換器)から構成される。本研究では上述の4種類(NCo, FNCo, SCo および FSCo)の融雪平板(幅 1.9×長さ 2.4×厚さ 0.1 m)を合計 6 枚作製して図-6 のように配置した。採熱部は長さ 95 m のポリエチレン管(外径: 42 mm, エスロハイパーAW, セキスイ化学製)を2条埋設したダブルU チューブを地中熱交換器として利用した。

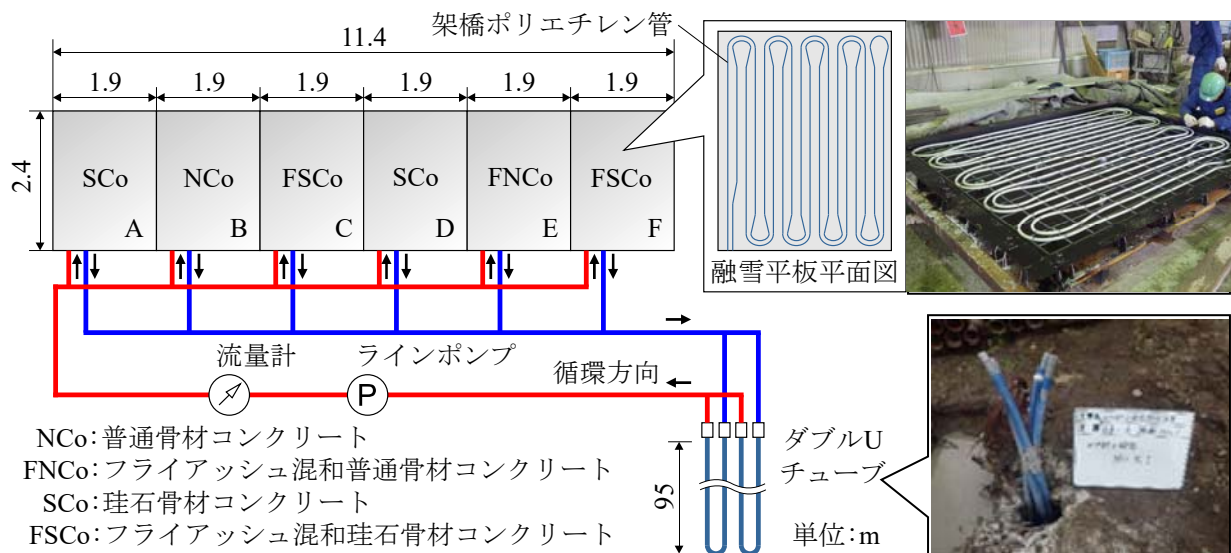


図-6 無散水融雪システムの概要

次に、本無散水融雪システムの施工について説明する(図-7 を参照)。まず福井大学構内の普通舗装を開削し、送水管を埋設した。次に、砕石を敷き均し、基礎コンクリートを打設した。硬化後、上述した 6 枚の融雪平板を据え付け、融雪平板の配管と採熱部を送水管で接続した。また排水溝を設けた後、融雪平板上にアスファルト乳剤(タックコート)を散布し、上部をアスファルト舗装で仕上げた。最後に、送水部にラインポンプを設置した後、耐圧試験を実施し、漏水がない事を確認した。なお、本システムは外気温が 3℃以下になると稼働し、その後 5℃以上になると停止するように自動制御される。

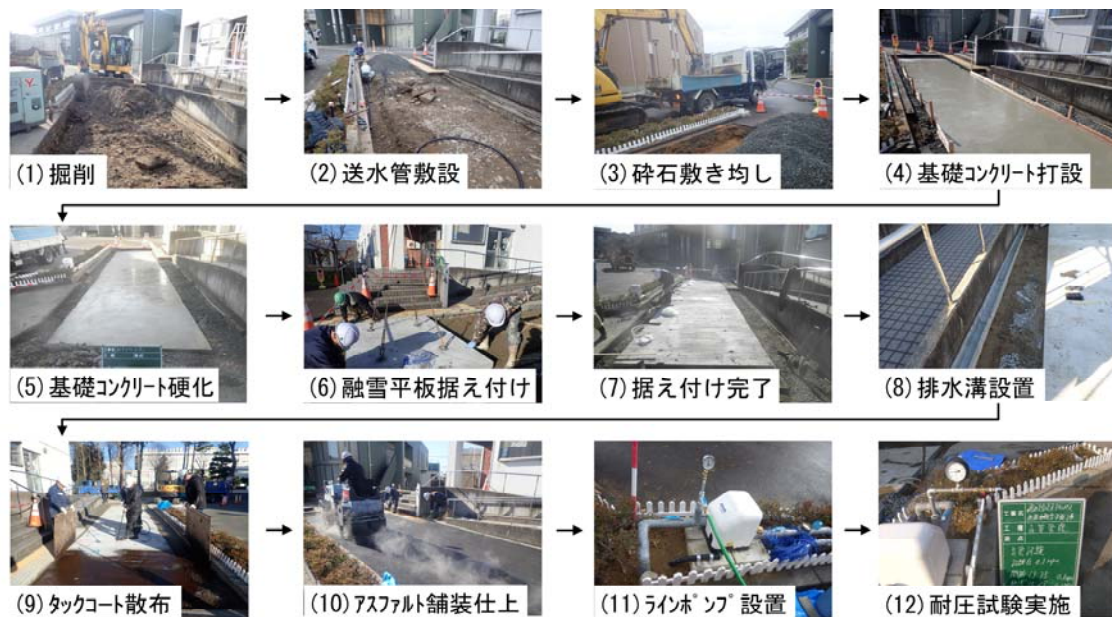


図-7 融雪平板の施工フロー

5. 野外融雪試験

本融雪実験は2020年2月5日から3月5日に行われた。実験期間中はK型熱電対により、外気温(℃)、表面下10mm地点の各融雪平板内温度 T_p (℃)および循環水の地中熱交換器出入口部温度(℃)をそれぞれ計測した。以後、下添え字に4種類の融雪平板の略号(NCo, FNCο, SCοおよびFSCο)を付記する。また、降雪時のシステム稼働前後の舗装表面温度の経時変化を調べるため、赤外線サーモグラフィ(R300, NEC Avio 赤外線テクノロジー製)を用いて熱分布画像を撮影した。

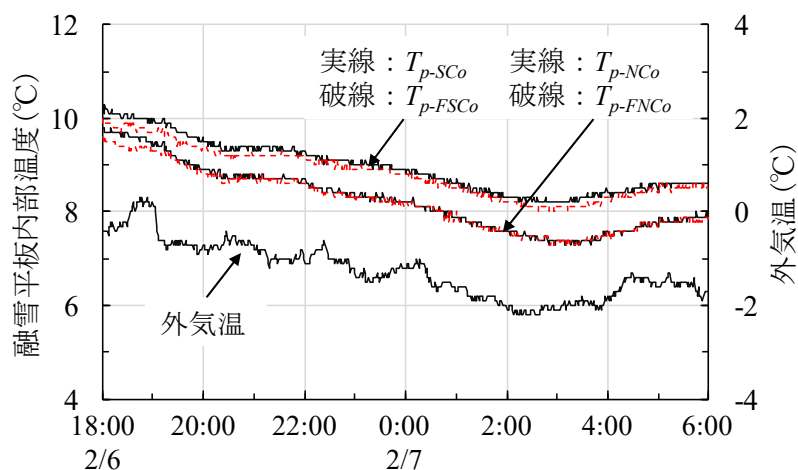
なお、福井地方気象台のデータに基づけば、2019年度冬季(2019年12月から2020年3月)の福井市における累計降雪深は表-3に示すように僅か7cmであり、過去10年間において最も少なく、記録的な暖冬であった。

表-3 当該年度の降雪条件

	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度
累計降雪深(cm)	397	237	208	117	244	132	130	383	45	7
降雪日数(合計)	51	40	34	24	35	16	24	34	10	3
降雪日数(月平均)	13	10	9	6	9	4	6	9	3	1
降雪日の日降雪深(cm) ^{※1}	7.8	5.9	6.1	4.9	7.0	8.3	5.4	11.3	4.5	2.3
最低気温(℃)	-4.3	-5.1	-4.7	-4.0	-3.1	-5.2	-2.5	-5.1	-2.0	-2.9
平均気温(℃) ^{※2}	-1.0	-1.0	-0.1	-0.3	0.6	1.0	0.4	-1.6	0.7	2.2
氷点下平均気温(℃) ^{※2}	-1.9	-2.1	-1.7	-1.6	-1.2	-2.7	-1.6	-1.8	-1.1	-1.4
降雪日の平均気温(℃) ^{※2}	-1.4	-1.9	-1.6	-1.4	-0.7	-2.6	-0.6	-1.7	-0.4	-0.4
冬日日数	50	41	43	43	29	26	29	46	22	11

※1：年度平均 ※2：年度最低値

ここでは2019年度冬期において最も気温が低下した2月6日18:00～2月7日6:00における融雪状況と融雪平板内温度について述べる。図-9は T_p (図-6中の融雪平板B, C, DおよびE)および外気温の経時変化を示す。外気温が氷点下(0℃以下)の場合でも、各 T_p は7℃以上を推移した。また実験期間中の最低気温(-2.2℃)を記録した2月7日2:20の $T_{p-SCο}$ および $T_{p-FSCο}$ は T_{p-NCo} および $T_{p-FNCο}$ より約1℃高く、フライアッシュの有無による温度差は0.2℃以下であり、その差は小さかった。

図-9 2月6日18:00～2月7日6:00の T_p

また非常に短時間ではあるものの、降雪が生じた 2 月 10 日における NCo と FNCo(あるいは SCo と FSCo)の融雪状況には差異はなく、良好に融雪が行われていることが可視画像および熱分布画像からも明瞭に分かる(図-10 を参照)。したがって、フライアッシュを混和した場合においても融雪性能に大きな差は生じないと考えられる。

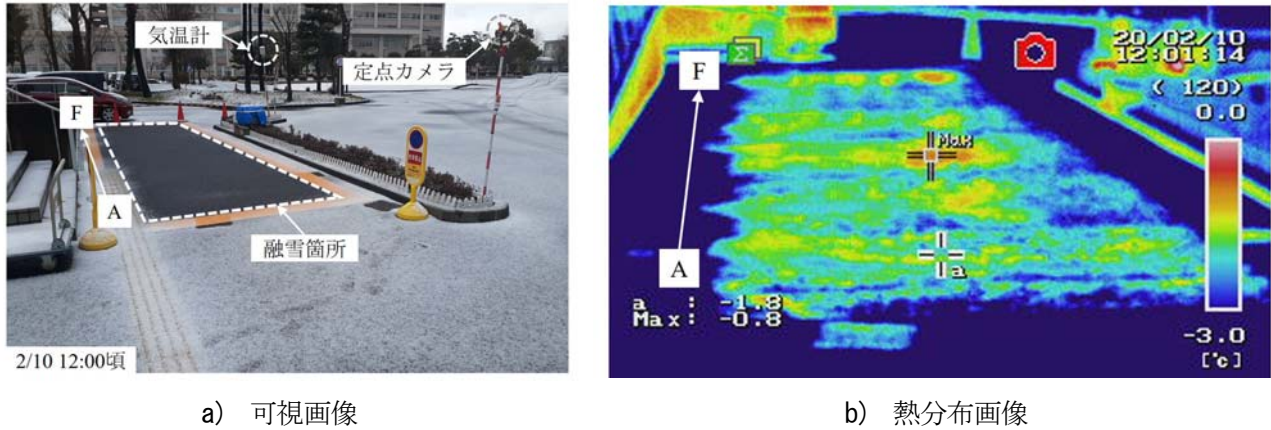


図-10 降雪後の融雪状況

6. 融雪モデル概要

本研究では直交座標系の三次元伝熱モデルを構築し、有限差分法により融雪平板温度およびその内部の流体温度を計算する。なお、モデル化に際して、工学的に許容できる範囲内で現象を単純化し、簡便に計算するため、以下の仮定条件に基づく伝熱モデルを構築した。

- (i) 融雪平板内の熱伝導率は一様として扱う。
- (ii) ポリエチレン管の円弧上の曲げ加工を無視し、矩形状に簡略化して要素分割を行う。
- (iii) ポリエチレン管内の水温は管軸方向についてのみ変化し、断面方向は一様である。
- (iv) 配管内の流体要素サイズについては、管の断面積が等しくなるような矩形断面とする。

次に代表例として、融雪平板内のポリエチレン管内の y 方向に流れる流体要素およびその周辺の融雪平板要素の熱移動を以下に述べる。流体要素の熱収支は流体要素間の熱伝導、顕熱移動および周辺の融雪平板要素との熱貫流によって規定され、以下の式(1)により表される。

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dV_w = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial y} \right) dy dA_{xz} - (\rho c)_w F \frac{\partial T_w}{\partial y} dy - q_\alpha \quad (1)$$

ここに、 $(\rho c)_w$ ：流体要素の体積熱容量(J/m³/K)、 dV_w ：流体要素の体積(m³)、 T_w ：流体要素の温度(°C)、 t ：時間(s)、 λ_w ：流体要素の熱伝導率(W/m/K)、 dA_{xz} ：流体要素の流れ方向の面積(m²)、 F ：流量(m³/s)および q_α ：流体要素から周辺の融雪平板要素への貫流熱量(W)をそれぞれ示す。

流体要素の x 方向左側に隣接する要素の熱収支は融雪平板内要素間の熱伝導および流体要素との熱貫流によって規定され、以下の式(2)により表される。

$$(\rho c)_p \frac{\partial T_p}{\partial t} dV_p = \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} dA_{yz} + q_\alpha + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) dy dA_{xz} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) dz dA_{xy} \quad (2)$$

ここに、 $(\rho c)_p$ ：融雪平板要素の体積熱容量(J/m³/K)、 dV_p ：融雪平板要素の体積(m³)、 T_p ：融雪平板要素の温度(°C)、 λ_p ：融雪平板要素の熱伝導率(W/m/K)および dA ：融雪平板要素の各方向の面積(m²)をそれぞれ示す。なお、融雪平板上の雪氷層の熱収支(水、氷および空気収支)については藤本ら¹²⁾の路面雪氷状態モデルを参照されたい。

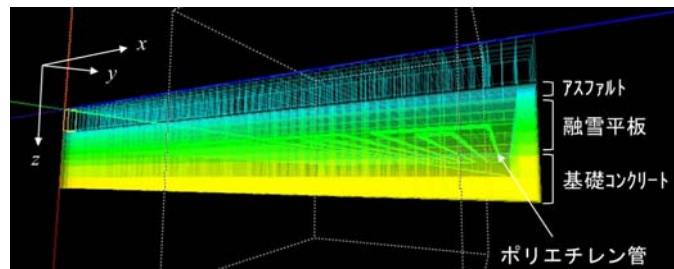


図-11 解析モデル概要

7. 融雪シミュレーション

2019 年度は極めて少雪であったため、図-12 に示すように筆者ら¹³⁾が過去に計測した 2011 年度冬期の観測データ(2012 年 2 月 2 日 0:00~12:00)を用いて解析を行った。なお、初期条件として積雪深 H (mm) は 0 mm, 初期アスファルト表面温度は 2.0 °C, 融雪平板への流入水温は 9°C とし、熱伝導率は上記の実験で得られた値を用いた。その結果、図-13 に示すように普通コンクリート舗装では時間の経過とともに H が増大するのに対して、FSCo 上の H は最大でも 30mm 程度に抑制されていることが分かる。なお同図には示さないが、SCo 上の H の経時変化も FSCo のそれと概ね同じであった。

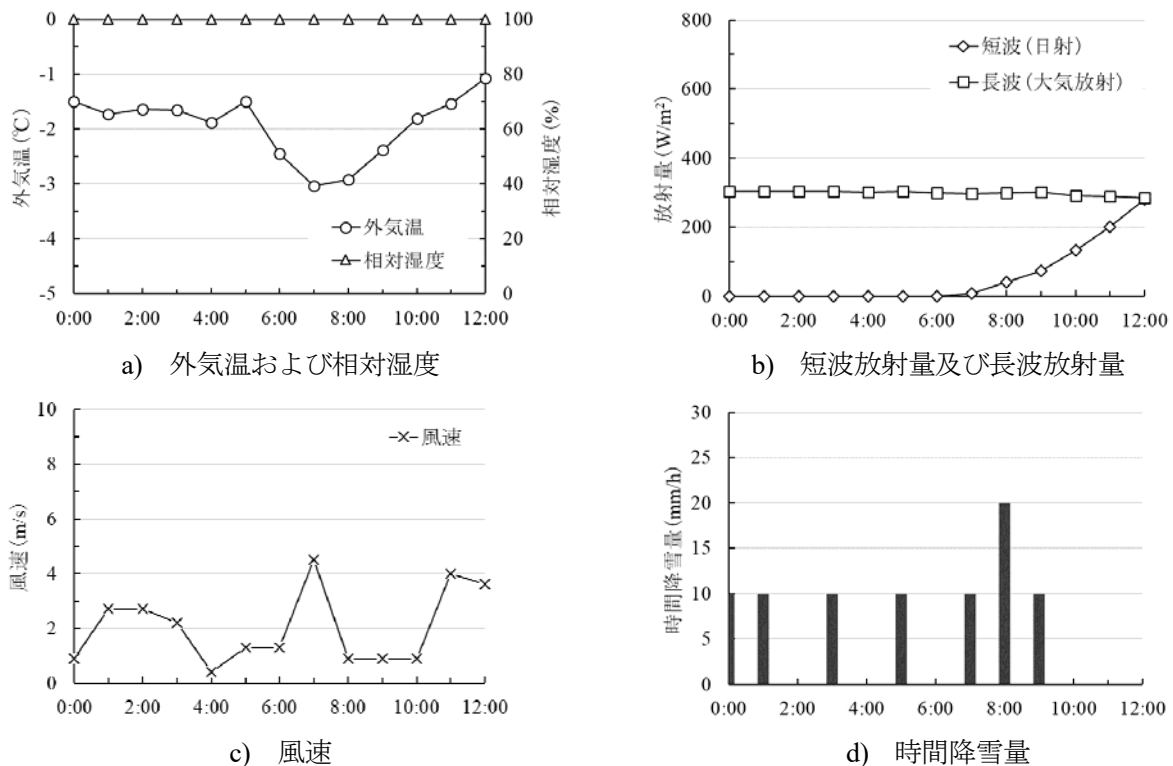


図-12 気象条件

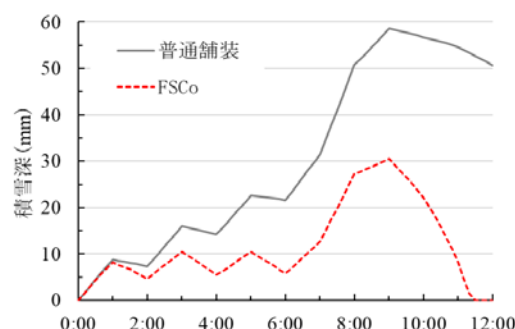


図-13 普通コンクリート舗装および FSCo 上の積雪深の経時変化

したがって、フライアッシュを混和した場合においても融雪性能に大きな差は生じないと考えられる。なお、詳細な計算条件は紙面の都合上割愛するが、フライアッシュを利用することで融雪平板の材料費は 6% 程度削減されることより、融雪平板のコスト削減効果も期待できることを付記する。

8. まとめ

本研究では地産地消の観点からフライアッシュを混和した融雪平板の開発を目指し、フライアッシュを混和した融雪平板の基礎的な伝熱特性を調べ、フライアッシュ混和融雪平板を用いた冬期に融雪比較実験を行った。また融雪モデルを構築し、融雪シミュレーションを行った。以下に、得られた知見を列挙する。

- 1) フライアッシュを混和することによって各供試体の熱伝導率は 3.7 および 7.7% 低下した。
- 2) しかしながら、2019 年度冬期は少雪であったため、十分な融雪実験はできなかったものの、本実験に限れば、フライアッシュ混和融雪平板の融雪性能は混和しないものと大差はなかった。
- 3) また融雪モデルを構築し、融雪シミュレーションを行った結果、2) と同様の結果が得られた。

今後はその他の材料の各種試験を行い、実験及び解析の両面から引き続き高効率融雪平板の開発を行う。

参考文献

- 1) 宮川昌樹，松島健朗：地中熱を利用したトンネル坑口融雪設備の性能調査について，国土交通省平成 26 年度近畿地方整備局研究発表会論文集，新技術・新工法部門，No. 10，pp. 1-5，2014.
- 2) 星田慎一：無散水融雪設備のコスト縮減について，国土交通省平成 30 年度近畿地方整備局研究発表会論文集，イノベーション部門 II，No. 07，pp. 1-5，2018.
- 3) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会：北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会 報告書，pp. 1-195，2013.
- 4) 佐藤道生，有菌大樹，蓮見亮，皆川浩，久田真：調査情報および設備重要度を考慮した発電所の維持管理費用算定手法，土木学会論文集 E2，68(4)，pp. 225-237，2012.
- 5) 福上大貴，水越陸視：銅スラグ細骨材を多量に用いたフライアッシュ II 種併用コンクリートの基礎的性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36，No. 1，pp. 1774-1779，2014.
- 6) 仲井一平，高本直樹，河合慶有，氏家勲：銅スラグ細骨材とフライアッシュを使用した乾燥収縮ひび割れ抑制コンクリートの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37，No. 1，pp. 463-468，2015.
- 7) 杉村佳昭：珪石骨材を用いた高熱伝導型排水性(低騒音)舗装に関する研究，福井県・雪対策建設技術研究所年報「地域技術」，Vol. 15，pp. 13-18，2002.
- 8) 日本規格協会：コンクリートの圧縮強度試験方法，pp. 1-5，2018. (https://webdesk.jsa.or.jp/preview/pre_jis_a_01108_000_000_2018_j_ed10_ch.pdf，2019 年 10 月 1 日参照)
- 9) Haupin, W. E.: Hot wire method for rapid determination of thermal conductivity, American ceramic society bulletin, Vol. 39, No. 3, pp. 139-141, 1960.
- 10) 土井文好，太田福男，斉藤辰彦：超高強度コンクリートの熱的性質に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 1，pp. 109-114，1993.
- 11) 李柱国，李慶濤：コンクリートの圧縮強度と熱伝導率の関係に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36，No. 1，pp. 2050-2055，2014.
- 12) 藤本明宏，渡邊洋，福原輝幸：輻射一透過を伴う路面薄雪氷層の融解解析，土木学会論文集 E，Vol. 63，No. 2，pp. 202-213，2007.
- 13) 藤本明宏，寺崎寛章，福原輝幸：熱・氷・水分・空気収支法による屋根雪荷重モデル，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol. 70，No. 4，pp. I567-I572，2014.