温水循環加温システムを有する 排水性舗装橋梁道路中の熱・水分移動

HEAT AND MASS TRANSFER IN A DRAINAGE BRIDGE ROAD EQUIPPED WITH A HYDRONIC ROAD HEATING SYSTEM

藤本明宏¹・寺崎寛章²・HUMAYUN Md. Kabir³・福原輝幸⁴

Akihiro FUJIMOTO, Hiroaki TERASAKI, Kabir Md. HUMAYUN and Teruyuki FUKUHARA

¹正会員 工博 元福井大学大学院研究員（現土木研究所寒地土木研究所）（〒910-8507 福井市文京3丁目9-1）

²正会員 工博 福井大学特命助教 福井大学大学院工学研究科（〒910-8507 福井市文京3丁目9-1）

³Member of the Institution of Engineers, Bangladesh, Khulna University of Engineering & Technology
(Khulna-9203, Bangladesh)

⁴正会員 工博 福井大学教授 福井大学大学院工学研究科（〒910-8507 福井市文京3丁目9-1）

In order to better understand heat and mass transfer in drainage bridge road equipped with a hydronic road heating system (HRHS), a series of experiments were conducted using a test piece of a bridge road with the HRHS, a drainage pavement, and a rainfall simulator. Main experimental outputs are the hydraulic conductivity of the porous pavement, percolation velocity, vertical temperature profile in a bridge road and aggregate temperature associated with the heat injection from the HRHS and precipitation. It is concluded that (i) the proposed experimental method and Dupuit's approximations can be a good combination to identify the hydraulic conductivity and percolation performance, (ii) percolation velocity is more than 100 times larger than rainfall intensity, (iii) thermal interactions between aggregate, percolation fluid and void air should be considered to evaluate the performance of the HRHS as an anti-icer or melting equipment.

Key Words : *hydronic road heating system, drainage pavement, heat and mass transfer, hydraulic conductivity, percolation velocity*

1. はじめに

密粒度舗装の湿潤路面では、ハイドロプレーニング現象に加えて、凍結によるスリップ事故に注意を払う必要がある。速やかに降雨や融雪水を浸透・排出させる排水性舗装は、ハイドロプレーニング現象の防止に効果的である。その他に排水性舗装は、前方車両や対面車両の水はねによるドライバーの視認性低下の抑止、粗な路面テクスチャによるすべり摩擦係数の増大¹⁾および車両通過に伴う騒音低減の効果が有り、2005年から積雪寒冷地を含めて全国的に一般国道での施工が広がった。その施工実績は2005年で5千万 m²に上る²⁾。一方、舗装内に埋設した熱交換パイプに温水を循環させることで路面を加温する無散水融雪システム（以下、温水循環加温（Hydronic Road Heating）システム、HRHS）は、凍結防止剤の削減、路面の積雪や凍結の回避に有効な手段の

一つである。HRHS は、橋梁やトンネル坑口など局所的な凍結や積雪の抑止策として導入されることが多く、地中、地下水、河川水、川や湖沼の貯留水などの自然熱エネルギーを利用することで、電気式ロードヒーティングと比較して安価なランニングコストが特徴の一つである。こうした HRHS の特徴や現状については参考文献³⁾を参照されたい。本研究では、HRHS を有する排水性舗装（以下、HRHS drainage pavement, HRHS-DP）に着目しているので、排水性舗装および HRHS-DP に関する既往の研究を以下に述べる。積雪寒冷地における排水性舗装の適用性に関する研究として、杉村⁴⁾は、排水性舗装の路面温度が密粒度舗装のそれより低く、路面凍結や路面積雪が発生し易いことを観測した。早坂⁵⁾は、一般国道39号線における野外観測より、降雪後の路面温度は排水性舗装が密粒度舗装より低下し易いことを報告した。日本道路公団⁶⁾は、排水性舗装は骨材間の空隙部に雪が詰まるため、密粒度舗装より白く観えるが、そのすべり摩

図-1 温水循環加温システムを組み入れた排水性舗装橋梁道路の概要

擦係数は密粒度舗装に比べて高いことを報告した。また、凍結防止剤の持続時間は両舗装で異なることも示した。久保・寺田⁷⁾は、路面温度と塩濃度の関係が排水性舗装と密粒度舗装で異なることを示した。また、同じ場所に密粒度舗装と排水性舗装を敷設したとしても、降雪強度によっては排水性舗装のみで積雪が発生した事例を紹介した。

次に、HRHS-DPに関する研究について述べる。HRHSは、人口密度の高い降雪地帯を数多く有する日本で先進的に発展してきた技術であり、HRHS-DPに関する研究は国外では見当たらない⁸⁾。藤森・佐野⁹⁾は、排水性舗装の底部に異なる断面を有したレール状の加工物を接着させ、その加工物の空隙に温水を通過させる新しい無散水融雪システムを提案した。彼らは、実験から排水性舗装上の積雪の融解時間と通水条件（流体温度と流量）の関係を明らかにし、提案したシステムの有効性を証明した。山口ら¹⁰⁾は、室内実験からHRHSの凍結防止・融雪性能について、密粒度舗装と排水性舗装で比較検証した。その結果、凍結防止性能については両舗装に違いが無いが、融雪性能については密粒度舗装に比べて排水性舗装は完全融雪までに多くの時間を要することを明らかにした。このように既往の研究では、主に密粒度舗装と排水性舗装との比較を通じてHRHS-DPの凍結防止・融雪性能を定性的に検証するに留まっている。

HRHS-DPの舗装表面では、密粒度舗装と同様に気象や交通の熱的影響、HRHSからの骨材や空隙を介した熱供給および降雨や融水に伴う熱損失が同時に作用する。したがって、HRHS-DPの凍結防止・融雪性能を評価するには、舗装内の排水挙動およびそれに伴う浸透水や骨材中の熱移動を明らかにする必要がある。また、HRHSの規模やコスト削減を行うためには、HRHS-DPの熱・水分移動モデルが不可欠となるが、上述したように理論構築の根拠となる現象の解明は不十分である。特に降雨強度と排水性舗装内部の鉛直浸透速度との関係や、浸透水と骨材を同じ温度と見做して扱って良いか、あるいは個別に扱うべきかなど、モデル構成を決めるための知見に乏しい。

そこで本研究では理論モデル構築のために排水性アス

ファルト混合物の透水係数や鉛直浸透速度を求めるための実験方法を提案すると共に、この種の研究では初めてとなる骨材温度と排水温度の同時測定結果を示し、HRHS-DPの熱・水分移動特性を明らかにすることを目的とする。

2. HRHSを有する排水性舗装橋梁道路

図-1は、HRHSを組み入れた排水性舗装橋梁道路の概要を示す。当道路は、表層の排水性アスファルト混合物、中層の基層および下層の床版で構成される。排水性アスファルト混合物は透水層である。雨水や融雪水は、排水性アスファルト混合物内を鉛直（z）方向に浸透してその底部に達した後、基層上を主流（x）方向に移動し、下流端面から排出される。基層および床版は不透水層であり、基層には道路を加温するための熱交換パイプ（heat exchange pipe, HEP）が埋設される。

3. 室内実験

本研究では、HRHSを組み入れた排水性舗装橋梁道路の熱・水分移動を明らかにするために透水実験、鉛直浸透実験、降雨透水実験および熱・水分移動実験を実施した。実験には全て同じ排水性アスファルト混合物を使用し、その大きさは縦0.30 m、横0.30 mおよび高さ0.03 mである。骨材の最大粒径は13 mm、平均粒径は7.5 mm、間隙率は20%である。

(1) 透水実験

アスファルト混合物の透水係数 k (m/s) は、図-2に示す実験装置を用いて求めた。ただし、舗装上部にある降雨シミュレーターを使用しなかったために図中の破線で示した水面形とは異なり、水深は上流端（左側）から下流端（右側）に向かって単調減少する。実験に用いた排水性アスファルト混合物は、底部および主流と平行する2つの側面を遮水し、それ以外の側面（上流端と下流端）および上面を開放した。実験では、排水性アスファルト混合物内部の水位を一定に保つために、上流端と下流端に2.1 mmと1.1 mmの堰をそれぞれ設置した。排水量は、最小目盛0.1 gの電子重量計を用いて測定された。

k の値はDupuitの近似に従うとして次式で与えられる。

$$k = \frac{2qL}{(h_1^2 - h_2^2)} \quad (1)$$

ここに、 q ：単位幅あたりの排水量（ m^2/s ）、 h_1 および h_2 ：上流端（ $x=0$ ）および下流端（ $x=L$ ）の水深（m）および L ：上流端から下流端までの距離（m）である。なお、本実験の水面勾配は1/30であり、Dupuitの近似の

図-2 透水実験および降雨透水実験の装置

適用範囲にある¹¹⁾。また、本実験のレイノルズ数（代表長さ：平均粒径，代表速度：浸透流速）は10～20の範囲にあり，ダルシー則が使えるものと見なした。

(2) 鉛直浸透実験

図-3は，鉛直浸透実験の装置である。同装置は，上面と底面のみが開放された排水性アスファルト混合物（側面はすべて不透水板で遮断），降雨シミュレーター，排水性アスファルト混合物の質量と排水性アスファルト混合物を浸透通過した雨水の質量をそれぞれ測定する2つの電子重量計（最小目盛0.1 g）で構成される。降雨シミュレーターは，雨水タンクの水位を常に一定に保ち，タンク底部に取り付けた複数の針から点滴で水を落下させる装置である。

実験では，電子重量計の自動計測を開始後，降雨シミュレーターを稼働させ，一定強度の雨水を排水性アスファルト混合物上面に滴下させた。本実験に用いた電子重量計の計測間隔は全て1秒である。排水性アスファルト混合物上面における雨水の浸透開始時刻および排水性アスファルト混合物底面における雨水の排水開始時刻は，排水性アスファルト混合物の質量が増加し始める時刻，および排水性アスファルト混合物下方にある貯水槽の質量が増加し始める時刻とした。前者の質量変化は図中の下側の電子重量計により，後者のそれは上側の電子重量計により，それぞれ独立して求められる。この2つの重量変化開始時刻の差を浸透通過時間 t_p (s)とした。

実験では，降雨強度 W_r (mm/h)および排水性アスファルト混合物内部の水分状態が鉛直浸透速度 U_w (m/s)に及ぼす影響を調べるために， W_r は10～90 mm/hの範囲で6ケース，排水性アスファルト混合物の初期水分状態は乾燥と湿潤の2ケースとした。ここで湿潤とは，排水性アスファルト混合物を冠水させた後に一日放置し，重力水を排水性アスファルト混合物内から除去

図-3 鉛直浸透実験の装置

した状態とする。

(3) 降雨透水実験

式(1)から得られる k の妥当性を検証するために，図-2に示す透水実験装置（降雨シミュレーターを装着）を用いた。(1)の透水実験と違って，排水性アスファルト混合物上面に滴下された雨水は，上・下流端から排水される。排水量は下流側のみ電子重量計によって測定した。実験は，排水量が平衡状態になるまで行われ，実験条件は $W_r = 15, 40$ および 85 mm/hの3ケースとした。実験での W_r の再現性は高いので，予備実験を行い， W_r は排水性アスファルト混合物の上にトレイを設置し，滴下時間とトレイ内貯水量を測定し求めた。

(4) 熱・水分移動実験

a) 実験装置

図-4は，熱・水分移動実験の装置である。本実験では舗装表層に厚さ30 mmの排水性アスファルト混合物，基層として厚さ70 mmのシリカコンクリートおよび床版として厚さ40 mmの普通コンクリートで構成される供試体を橋梁道路に模して用いた。基層にはHEPを埋設しており，その直径は15 mm，HEP間のピッチは100 mmおよび被り厚は82.5 mmである。供試体の上面および底面は大気と接し，供試体の側面は熱損失を抑制するために50 mm厚の断熱材で覆った。供試体の中央（HEPの中間）には，鉛直方向の温度分布 $T(z)$ を測定するために13本の熱電対を埋設した。また，排水性アスファルト混合物底面の下流端下部には，図-4の拡大図に示されるように2本の熱電対を設置した。その熱電対の1つは骨材表面 T_{ag} (°C)を測定する。もう一つは，排水性アスファルト混合物直下流の排水温度 T_{wout} (°C)を測定する。その他，室内温度を温湿度計で，排水性アスファルト混合物上面および床版下面に入射する長波放射熱フラックスを放射収支計で，それぞれ測定した。排水量は0.1g読みの電子重量計で求めた。これらの計測データは，データロガーによって1秒間隔で自動記録された。

図-4 熱・水分移動実験の装置

b) 実験手順

実験手順は、以下のとおりである。(i)供試体を温度制御された実験室に放置し、実験開始時の供試体を室内と同じ温度にする、(ii)水中でポンプを用いて熱交換流体（温水）を HEP に送る、(iii)供試体の $T(z)$ が平衡状態に達した後、降雨シミュレーターを移動させ、供試体上面に雨水を与える、(iv) $T(z)$ が定常になった時点で降雨シミュレーターを停止し、実験を終了する。

c) 実験条件

室内温度は5℃、熱交換流体の温度は30℃、その流量は0.6 L/min、降雨の温度は5℃（室内温度と同じ）、その強度 W_r は15、40および85 mm/h の3ケースとした。

図-5 排水量の計算値と測定値の比較

4. 実験の結果

(1) 透水および降雨透水実験

式(1)より求めた排水性アスファルト混合物の透水係数 k の値は、0.075 m/s であった。この k の値の再検証および適用範囲を明らかにするために、降雨シミュレーターを取り付けた図-2の実験装置を用いて、下流端からの排水量について計算結果と実験結果を比較した。 W_r は15から85 mm/h の間で6種類変化させた。

単位幅当りの排水量 q は次式で計算される。

$$q = \frac{k}{2L} (h_1^2 - h_2^2) + \frac{W_r L}{2} \quad (2)$$

結果を図-5に示す。縦軸は式(2)により計算された q の値を、横軸は q の測定値をそれぞれ表す。両者は45度の傾きを持つ直線関係にあり、少なくとも上記の降雨強度の範囲において k の値は0.075 m/s となる。

(2) 鉛直浸透実験

図-6は、乾燥状態と湿潤状態における W_r と U_w の関係を示す。 U_w は、以下の式によって求めた。

$$U_w = D_p / t_p \quad (3)$$

ここに、 D_p ：排水性アスファルト混合物の厚さ (m) および t_p ：(2)に記したように雨水が排水性アスファルト混合物内の通過に要する時間 (s) である。

U_w は W_r の増加とともに対数的に増大し、同じ W_r では乾燥状態より湿潤状態で大きい。この理由として、乾燥状態では雨水が骨材に浸透しながら下方へ移動するが、湿潤状態では骨材浸透がないために雨水の下方移動が早まったことが考えられる。この関係は、式(4)および(5)で表現される。

$$\text{乾燥} : U_{wd} = 0.0016 \ln(W_r) - 0.0037 \quad (4)$$

$$\text{湿潤} : U_{ww} = 0.0024 \ln(W_r) - 0.0047 \quad (5)$$

図-6 降雨強度と鉛直浸透速度の関係

ここに、添え字 d および w は乾燥状態および湿潤状態をそれぞれ意味する。以上より、 U_w は舗装の水分状態に依存するとともに、 W_r の100倍以上大きいことが分かった。この U_w と W_r の関係を知ることによって、 W_r を熱・水分移動解析の境界条件に組み込み込むことが可能になった。

(3) 熱・物質移動実験

a) 供試体の鉛直温度分布

図-7(a)～(c)は、実験期間にわたる $T(z)$ の時間変化であり、それぞれ $W_r = 15, 40$ および 85 mm/h の実験結果を示す。図中の凡例に示す0 h, 1 h, 3 h, 9 h および12 h は、実験開始時、実験開始から1時間、3時間、9時間および12時間後の $T(z)$ である。また、1 hR および6 hR は降雨開始から1時間および6時間後の $T(z)$ をそれぞれ示す。

$t = 0 \text{ h}$ の $T(z)$ は、いずれの条件でも 5°C で一様であった。実験開始後、HEP に約 30°C の熱交換流体を通水させたことで、 $T(z)$ は時間とともに供試体全体にわたり上昇し、 $t = 12 \text{ h}$ で温度平衡状態となった。 $t = 6 \text{ hR}$ の排水性アスファルト混合物表層の温度、 $T(z = -5 \text{ mm})$ に着目すると、図-7(a)の $W_r = 15 \text{ mm/h}$ では降雨によって 5°C 程度の温度低下が認められる。図-7(b)および(c)を観ると、 $W_r = 40 \text{ mm/h}$ で約 8°C 、 85 mm/h で約 9°C の温度低下が生じた。また、供試体底面付近でも温度低下が認められ、降雨浸透の熱的影響は全域に及ぶが、供試体温度は HEP からの熱供給を受けて周囲気温よりも高い状態で平衡になることが分かった。加えて、供試体底面から周囲空気への熱移動（熱損失）が容認できた。

以上より、HRHS-DP の凍結防止・融雪性能に及ぼす降雨浸透の影響は、降雨強度が大きいほど無視できないことが明確になった。

b) 排水性アスファルト混合物の下流端下部における骨材温度および排水温度

図-8は、 $W_r = 85 \text{ mm/h}$ での排水性アスファルト混合物の下流端下部における骨材温度 T_{ag} ($^\circ\text{C}$) および排水温度 T_{wout} ($^\circ\text{C}$) の経時変化である。実験開始時の T_{ag} は

図-7 供試体の鉛直温度分布の時間変化

5.2°C であった。HEP からの熱供給は、実験開始より2, 3時間に亘る T_{ag} の急激な上昇を引き起こし、約5時間後に T_{ag} は 17.9°C で定常状態となった。降雨開始後、約 5.1°C の雨水の浸透に起因して、 T_{ag} は 10.1°C に低下した。一方、 T_{wout} は降雨開始直後に 7.8°C となった後は、約 6°C を推移した。温度平衡状態の T_{ag} は T_{wout} より 4°C 程度高い。この事を排水性アスファルト混合物の熱・水分移動

図-8 排水性舗装の下流端下部における骨材温度および排水温度の時間変化

理論では浸透水と骨材を一体として取り扱うことができない，すなわち排水性アスファルト混合物内部では骨材-浸透水-空気間の熱移動理論の構築が不可欠であることが明らかになった．

以下に，降雨が HRHS-DP の凍結防止・融雪性能に及ぼす熱的影響を定量的に考察する．ここでは，凍結防止・融雪熱フラックス（舗装表面の伝導熱フラックス） Q_c (W/m^2) に対する降雨によって舗装から奪われる熱フラックス（降雨損失熱フラックス） Q_r (W/m^2) の比 R_l を評価する． R_l は次式で求められる．

$$R_l = \frac{Q_r}{Q_c} = \frac{(\rho c)_w W_r (T_{wout} - T_{rain})}{-\lambda_p \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} \right)_{z=0}} \quad (6)$$

ここに， $(\rho c)_w$ ：水の体積熱容量 ($\text{J/m}^3\text{K}$)， T_{rain} ：降雨温度 ($^{\circ}\text{C}$) および λ_p ：不飽和状態における排水性アスファルト混合物の熱伝導率 ($= 0.95 \text{ W/mK}$)¹²⁾である．なお， $z=0 \text{ mm}$ における $\Delta T/\Delta z$ は図-7(c) の $z=-5 \text{ mm}$ と -25 mm との間の $\Delta T/\Delta z$ で近似した．その結果，温度平衡状態 ($t=6\text{hR}$) において $Q_c = 166 \text{ W/m}^2$ および $Q_r = 108 \text{ W/m}^2$ となり， $R_l=0.66$ となった．

5. おわりに

温水循環式加温システム (HRHS) を組み込んだ排水性舗装橋梁道路の熱・水分移動特性を明らかにするために，透水実験および降雨シミュレーターを用いた鉛直浸透・降雨浸透実験に加えて熱・水分移動実験を行った．得られた主な知見は以下の通りである．

- (1) 透水実験および降雨浸透実験方法と Dupuit の近似の組み合わせは，排水性アスファルト混合物の透水係数 k を求めること，および k に対する降雨強度の適用範囲の評価に有効である．
- (2) 鉛直浸透速度 U_w は降雨強度 W_r の100倍以上大きく，

同じ W_r でも乾燥舗装よりも湿潤舗装で U_w は大きくなる．

- (3) 降雨開始後の温度平衡状態における降雨損失熱フラックスは凍結防止・融雪熱フラックスの66%に相当し，HRHS-DP 中の熱移動に対して降雨浸透の影響は無視できない．
 - (4) HRHS-DP の骨材温度と浸透水温度との差は有意であることから，排水性アスファルト混合物内部では浸透水と骨材に対する熱移動の理論化が必要になる．
- 以上，本実験によって HRHS-DP の熱・水分移動理論構築の方向性を示すこと，およびその検証データを得ることができたので，今後は HRHS-DP における骨材-浸透水-空気間の伝熱理論の構築を目指す．

参考文献

- 1) 石田樹・田高淳：国際摩擦指標 (IFI) による舗装路面のテクスチャとすべり摩擦の評価，寒地土木研究所月報，No. 640，pp. 36-39，2006．
- 2) 日本道路協会舗装委員会環境・再生利用小委員会：排水性舗装発生材の再生利用確立に向けた直轄国道試験施工の中間報告，日本道路協会，p. 1，2005．
- 3) 福原輝幸：道路・歩道における消・融雪技術の現状と課題，日本雪工学会誌，Vol. 24，No. 4，pp. 67-70，2008．
- 4) 杉村佳昭：珪石骨材を用いた高熱伝導型排水性舗装（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．
- 5) 早坂保則：高規格幹線道路における排水性舗装の冬期路面管理 ―一般国道39号美幌町美幌バイパスにおける調査―，北海道開発土木研究所月報，Vol. 581，pp. 35-40，2001．
- 6) 日本道路公団保全交通部：高速道路の冬期道路管理における取組み，道路行政セミナー（2000. 12），pp. 38-43，2000．
- 7) 久保和幸・寺田剛：排水性舗装の冬期路面管理に関する研究，土木研究所成果報告書，No. 24，pp. 1-10，2009．
- 8) PIARC Technical Committee 2.4 Winter Maintenance: Snow and ice databook，2014．
- 9) 藤森章記・佐野正典：二層構造式排水性舗装の融雪機能に関する検討，近畿大学理工学部研究報告，No. 38，pp. 87-91，2002．
- 10) 山口正敏・横山孝男・安彦宏人・堀野義人・沼澤喜一：排水性舗装体内放熱管による融雪特性―その1―，寒地技術論文・報告集，Vol. 22，pp. 244-247，2006．
- 11) 佐藤邦明・竹下貞雄：不圧地下水流におけるDupuitの公式の原点，土と基礎，土質工学会誌，Vol. 39，No. 12，pp. 49-52，1991．
- 12) 田中貴子・藤本明宏・福原輝幸：排水性舗装の熱伝導率の水分依存性，雪氷研究大会（2010・仙台），p. 41，2010．

(2015. 9. 30受付)