

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760549

研究課題名(和文) 透水・保水性舗装の蒸発冷却効果の予測と評価に関する研究

研究課題名(英文) Study on Estimation and Evaluation of Evaporative Cooling Effect for Porous Pavement

研究代表者

北野 博亮(Hiroaki, Kitano)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80293801

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：市街地における夏季の暑熱緩和のためには、人工排熱の低減に加えて、水分蒸発による冷却も必要であると考えられる。本研究では、市街地の舗装に透水・保水性材料を用いた場合の蒸発冷却効果の予測を可能とし、その性能評価を行うために、ポーラスコンクリートの熱・水分物性値をその空隙率から推定する近似式を提案し、数値解析による各種舗装の熱水分性状の把握と保水性舗装の蒸発冷却効果の評価を行った。

研究成果の概要(英文)：It is thought that by replacing with permeable pavements increases the evaporative cooling of surfaces and the extensive use of permeable paving could improve the urban climate. In this study, moisture properties of porous concrete were measured and approximate equations were obtained. Numerical analysis on thermal behavior of various pavement materials using the simultaneous heat and moisture transfer model are conducted. Evaporative cooling effect evaluation for porous pavements were conducted.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：透水性舗装 蒸発冷却 ポーラスコンクリート

1. 研究開始当初の背景

近年は夏季の熱帯夜の出現日数の増加や昼間の気温、構造物・地表面温度の上昇が問題となっている。建物空調や交通等からの人工排熱の増加や、地表面被覆の人工化による熱容量の増大と地表水分の蒸発量低下が主な原因と考えられている。足永らは、東京23区の夏季の人工排熱量は全天日射量の約18%に達し、そのうちの8割以上を顕熱排熱が占めると報告している。さらに、地表面が透水性の低いコンクリートやアスファルト等で被覆されると地表の日射受熱はほぼ顕熱の形で大気に放熱されることになる。夏季の暑熱緩和のためには、人工排熱の低減に加え、大気への排熱・放熱に占める潜熱の割合を増大させることが必要であると思われる。

国内における保水性舗装の蒸発冷却効果に関する研究としては、都市熱環境の予測・評価を目的とし、実験的に求めた材料内部の平均含水率と表面の蒸発効率の関係から、地盤や保水性舗装からの蒸発量を予測する手法が提案されている。これらは都市熱環境の予測評価には十分であるかもしれないが、材料内の含水率分布を考慮していないため、舗装材料の蒸発量予測や評価のためには予測精度が十分とはいえない。一方、松本の熱水分同時移動方程式によれば、材料内の熱水分性状と蒸発量の予測が可能であり、ALCを設置した屋根面の蒸発冷却効果の解析や地盤の熱水分性状解析などが行われ、その予測精度の高いことが確認されている。この解析を行うためには、材料の水分伝導率や水分特性曲線等の熱・水分物性が必要であるが、それらが測定されている材料が少ないことが問題である。

国外では、Kooiらが松本の熱水分同時移動方程式と同等の解析法を提案している。その他、目立った研究は見当たらない。

2. 研究の目的

本研究では、地表面を透水・保水性能を有する材料で舗装することによる水分蒸発とそれに伴う冷却効果について、その効果の予測を可能とし、保水性舗装の熱的な性能設計手法を確立することを目的としており、夏季屋外空間の酷暑緩和、それに伴う建物の熱負荷低減することを目指している。本申請研究では、各種透水性舗装材料の熱および水分物性を測定・推定し、数値計算による蒸発冷却効果の予測を可能とすること、およびその性能評価を目的としている。

3. 研究の方法

透水・保水性舗装材料のポーラスコンクリートを対象として、その蒸発冷却効果の予測を可能とし、その性能評価を行うために以下の点を明らかにする。

- ・ポーラスコンクリートの透水性・保水性の測定と評価
- ・ポーラスコンクリートの熱・水分物性値をその空隙率から推定する方法の検討

- ・蒸発冷却効果を高める方法の検討
- ・数値解析による各種舗装の熱水分性状の把握と保水性舗装の蒸発冷却効果の評価

4. 研究成果

(1) ポーラスコンクリートの熱水分物性

空隙率の異なるポーラスコンクリートの平衡含水率曲線（水分特性曲線）と液相水分伝導率を材料の絶乾空隙率から簡易に推定するため、以下の実験を行った。

空隙率の異なる数種のポーラスコンクリート試験体（以下 POC 試験体）を作製した。碎石にはポーラスコンクリートとしては小粒径の8号(1.0 - 2.5mm)碎石を用いた。

① 水分特性曲線

水分特性曲線の測定は、相対湿度98%以下の低含水率域と高含水率域に分けて行なった。

低含水率域について、簡易デシケータ法によって吸湿過程の平衡含水率の測定を行った。フラスコ内に飽和塩水溶液を封入し、23°Cに設定した恒温恒湿室内で試験体の質量ほぼ一定となる時点の質量と、絶乾質量から平衡含水率を求めた。用いた塩と平衡する湿り空気の相対湿度は、MgCl₂・6H₂O: 33%RH, NaCl: 75%RH, KNO₃: 93%RH, K₂SO₄: 97.6%RHである。

一方、高含水域については、図1のような約40×40×160 mmのPOC試験体を用いて、土柱法により求めた。23°Cに設定した恒温恒湿室内において、試験体底面から72時間の自由吸水を行い、試験体を取り出し、下端から20mm間隔で切断し、各々の含水質量とその絶乾質量から体積含水率を求めた。

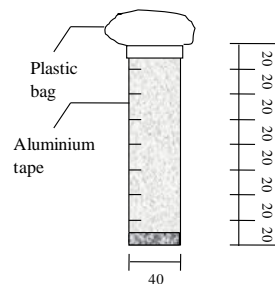


図1 ポーラスコンクリート試験体

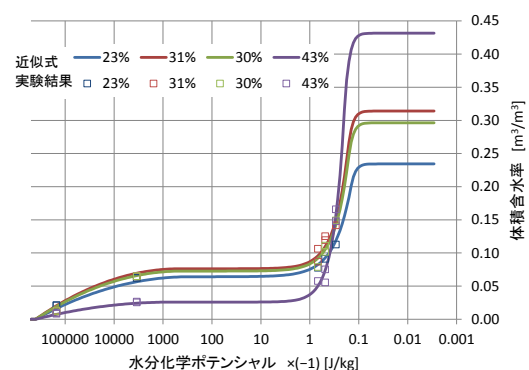


図2 平衡含水率の実験結果と水分特性の近似曲線

図2に8号砕石を骨材に用いたポーラスコンクリートの水分特性曲線の近似曲線と実験の測定結果を示した。また、それに対応する水分特性曲線の近似式を式(1)~式(5)に、式中のパラメータの値を表1に示した。この近似式は材料の絶乾空隙率をパラメータとしたものであり、任意の空隙率に対して概ね妥当な水分特性曲線を得られるものと考えられる。

$$\varphi = 0 \quad \mu < b_{\varphi 0} \quad \text{式(1)}$$

$$\varphi = a_{\varphi 0}(\ln(-\mu))^2 + a_{\varphi 1} \ln(-\mu) + a_{\varphi 2} \quad b_{\varphi 0} < \mu < b_{\varphi 1} \quad \text{式(2)}$$

$$\varphi = a_{\varphi 3}(-\mu)^{a_{\varphi 4}} + a_{\varphi 5} \quad b_{\varphi 1} < \mu < b_{\varphi 3} \quad \text{式(3)}$$

$$\varphi = a_{\varphi 6}(\ln(-\mu) - \ln(-b_{\varphi 4}))^{a_{\varphi 7}} + \Phi_0 \quad b_{\varphi 3} < \mu < b_{\varphi 4} \quad \text{式(4)}$$

$$\varphi = \Phi_0 \quad b_{\varphi 4} < \mu \quad \text{式(5)}$$

表1 水分特性曲線の近似式のパラメーター

$a_{\varphi 0} = \left[a_{\varphi 4} (a_{\varphi 2} - \Phi_0) - \frac{a_{\varphi 2}}{\ln(-b_{\varphi 0})} \{ a_{\varphi 4} \ln(-b_{\varphi 1}) + \left(\frac{b_{\varphi 2}}{b_{\varphi 1}} \right)^{a_{\varphi 4}} - 1 \} \right] \div \left[\ln(-b_{\varphi 0}) \{ a_{\varphi 4} \ln(-b_{\varphi 1}) \left(\frac{b_{\varphi 2}}{b_{\varphi 1}} \right)^{a_{\varphi 4}} - 1 \} - \ln(-b_{\varphi 1}) \{ a_{\varphi 4} \ln(-b_{\varphi 1}) + 2 \left(\frac{b_{\varphi 2}}{b_{\varphi 1}} \right)^{a_{\varphi 4}} - 2 \} \right]$
$a_{\varphi 1} = a_{\varphi 0} \ln(-b_{\varphi 0}) + \frac{a_{\varphi 2}}{\ln(-b_{\varphi 0})}$
$a_{\varphi 2} = -0.14197 \Phi_0 + 0.10065$
$a_{\varphi 3} = \frac{2a_{\varphi 0} \ln(-b_{\varphi 1}) + a_{\varphi 1}}{a_{\varphi 4} (-b_{\varphi 1})^{a_{\varphi 4}}}$
$a_{\varphi 4} = -2.1729 \Phi_0 - 1.0112$
$a_{\varphi 5} = \Phi_0 - a_{\varphi 3} (-b_{\varphi 2})^{a_{\varphi 4}}$
$a_{\varphi 6} = \frac{a_{\varphi 3} (-b_{\varphi 3})^{a_{\varphi 4}} + a_{\varphi 5} - \Phi_0}{(\ln(-b_{\varphi 3}) - \ln(-b_{\varphi 4}))^{a_{\varphi 7}}}$
$a_{\varphi 7} = \frac{a_{\varphi 3} a_{\varphi 4} (-b_{\varphi 3})^{a_{\varphi 4}} (\ln(-b_{\varphi 3}) - \ln(-b_{\varphi 4}))}{a_{\varphi 3} (-b_{\varphi 3})^{a_{\varphi 4}} + a_{\varphi 5} - \Phi_0}$
$b_{\varphi 0} = -4 \times 10^5$
$b_{\varphi 1} = -30.290 \Phi_0 - 46.833$
$b_{\varphi 2} = -0.10995 \Phi_0 - 0.11365$
$b_{\varphi 3} = -0.13194 \Phi_0 - 0.13638$
$b_{\varphi 4} = -0.001$

② 液相水分伝導率

水分移動のうち液相水分の移動が支配的な高含水率域の液相水分伝導率を測定した。平衡含水率測定と同様の自由吸水試験を行い、鉛直方向の体積含水率分布の経時変化を測定し、その結果から液相水分伝導率を同定した。液相水分伝導率は、熱水分同時移動方程式を用いた計算結果と液相水分伝導率測定実験の結果の含水率との誤差が最小となるように同定した。ここで、気相水分伝導率については、式(6)に示した水蒸気拡散係数から換算した値を用いた。

$$D_v = \frac{\Phi_0 - \varphi}{\tau} 2.56 \times 10^{-5} (T/298.2)^{1.75} \quad \text{式(6)}$$

図3に同定した液相水分伝導率を、図4に実験結果と計算結果の含水率分布を示した。計算結果は、実験結果と概ね一致していることから、妥当な液相水分伝導率を同定できたと考えられる。図3の近似式を式(7)、式(8)に、式中のパラメータの値を表2に示した。

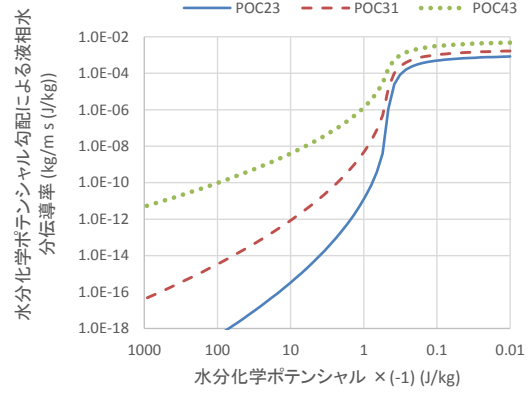


図3 水分化学ポテンシャル勾配による液相水分伝導率

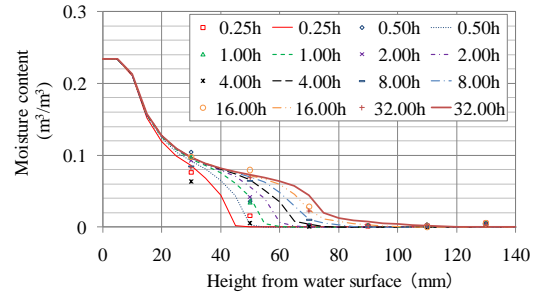


図4 実験および計算結果の含水率分布の比較 (POC23)

$$\log_{10}(\lambda'_{\mu l}) = a_{\lambda \mu l 1} (\log_{10}(-\mu) + a_{\lambda \mu l 2})^{1/2} + a_{\lambda \mu l 3} \quad (\mu < b_{\lambda \mu l 0}) \quad \text{式(7)}$$

$$\log_{10}(\lambda'_{\mu l}) = 0.3 (\log_{10}(-\mu) + a_{\lambda \mu l 0})^{-1} + \log_{10}(b_{\lambda \mu l 1}) \quad (b_{\lambda \mu l 0} < \mu) \quad \text{式(8)}$$

表2 水分化学ポテンシャル勾配による液相水分伝導率の近似式のパラメーター

$a_{\lambda \mu l 0} = -b_{\lambda \mu l 0} + 0.774596(a_{\lambda \mu l 2} + a_{\lambda \mu l 3})^{1/4} (-a_{\lambda \mu l 1})^{-1/2}$
$a_{\lambda \mu l 1} = 17.301 \Phi_0 - 11.774$
$a_{\lambda \mu l 2} = 5.2629 \times 10^{-2} \Phi_0 + 0.30324$
$a_{\lambda \mu l 3} = \log_{10}(-b_{\lambda \mu l 1}) - a_{\lambda \mu l 1} (a_{\lambda \mu l 2} + b_{\lambda \mu l 0})^{1/2} - 0.38730 (-a_{\lambda \mu l 1})^{1/2} (a_{\lambda \mu l 2} + b_{\lambda \mu l 0})^{-1/4}$
$b_{\lambda \mu l 0} = \log_{10}(7.2482 \times 10^{-2} \Phi_0 + 0.47225)$
$b_{\lambda \mu l 1} = 3.7777(\Phi_0 - 1)$

以上の結果を用いることで、8号砕石を用

いたポーラスコンクリートに関しては、任意の絶乾時の空隙率から、水分特性曲線および液相水分伝導率を近似的に得ることが可能となった。

(2) 各種舗装システムの熱特性・数値解析による各種舗装の熱水分性状の予測と評価
得られたポーラスコンクリートの水分物性値を用いて、各種舗装の熱水分性状の解析を行った。

図5に示したように、土壌の上に直接100mm厚の舗装がある場合を想定し、地盤深さ15mまでを解析対象とした。外界気象条件として、東京の拡張アメダス気象データ(2005)を用いた。多孔質材料の舗装と土壌の解析には熱水分同時移動方程式を適用し、水平方向の熱水分移動を無視し、鉛直方向1次元の熱と水分のそれぞれの収支式(式(9)と式(10))を用い、舗装表面の境界条件式として式(11)と式(12)を用いた。

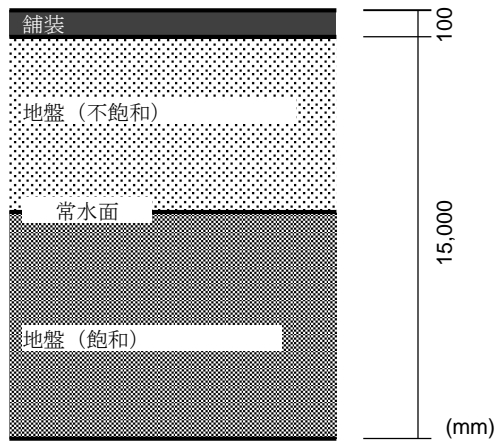


図5 各種舗装システムの熱特性の解析対象

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial z} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial z} \right) \quad \text{式(9)}$$

$$\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda'_{\mu} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial z} - g \right) \quad \text{式(10)}$$

$$(\alpha + r\alpha'_{\tau})(T_o - T_s) + r\alpha'_{\mu}(\mu_o - \mu_s) + q_{sol} + q_{noc} = -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial z} - r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial z} \quad \text{式(11)}$$

$$\alpha'_{\tau}(T_o - T_s) + \alpha'_{\mu}(\mu_o - \mu_s) + J_p = -\lambda'_{\tau} \frac{\partial T}{\partial z} - \lambda'_{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial z} - g \right) \quad \text{式(12)}$$

ここで、 T 温度(K), c 比熱(J/kgK), ρ 密度(kg/m³), t 時間(s), λ 熱伝導率(W/mK), r 気化熱(J/kg), λ'_{Tg} 温度勾配による気相水分伝導率(kg/m s K), μ (自由水基準の)水分化学ポテンシャル(J/kg), $\lambda'_{\mu g}$ 水分化学ポテンシャル勾配による気相水分伝導率(kg/m s(J/kg)), ρ_w 水密度(kg/m³), ϕ 体積含水率(m³/m³), g 重力加

速度(m/s²), λ'_{τ} 温度勾配による水分伝導率(kg/m s K), λ'_{μ} 水分化学ポテンシャル勾配による水分伝導率(kg/m s(J/kg)), α 総合熱伝達率(W/m²K), α'_{τ} 温度差による水分伝達率(kg/m²s K), α'_{μ} 水分化学ポテンシャル差による水分伝達率(kg/m²s(K/kg)), q_{sol} 日射吸収量(W/m²), q_{noc} 実効放射(W/m²), J_p 降雨量(kg/m²s)。

添え字 S 表面, o 外気

自由水基準の水分化学ポテンシャルと温度 T , 水蒸気圧 p_v との関係は次式で表される。

$$\mu = R_v T \ln \left(\frac{p_v}{p_{vs}} \right) \quad \text{式(5)}$$

ここで、 R_v 水蒸気のガス定数(J/kg K), p_{vs} 飽和水蒸気圧(Pa)。

降雨時の舗装表面に関しては、降雨によって舗装表面に最大1mmの水膜が形成され、それ以上は降雨があっても、排水されるものと仮定した。

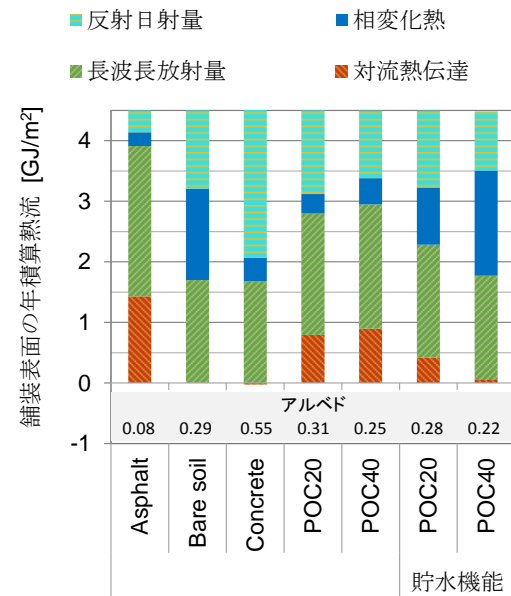


図6 舗装表面から大気側への年積算熱流

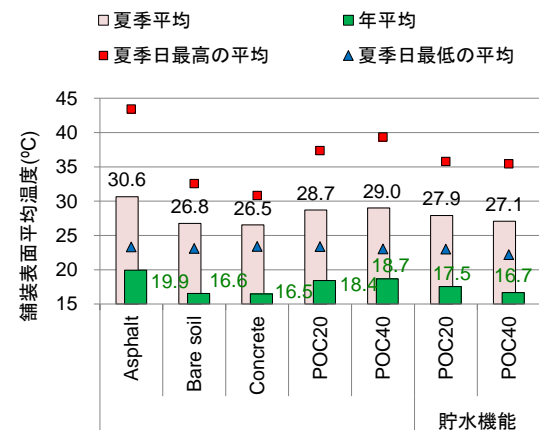


図7 舗装表面平均温度

(4) ポーラスコンクリート舗装による都市街

路空間の暑熱緩和効果

都市街路空間の簡易な熱および水分収支モデルを用い、舗装底面に不透水層を設けて貯水機能を持たせたポーラスコンクリート（以下、POC）舗装による夏季の温熱環境の改善効果について検討した。計算対象地域を名古屋中心部の栄地区とし、ここでの南北に伸びる平均的な街路空間を想定した。図 8 に想定した 2 次元の街路空間を示す。街路空間の寸法は建物群高さ 23.3m、道路幅員 23m であり、街路樹等の植栽はないものとした。この 2 次元街路空間を対象として、熱収支および水分収支モデルにより街路空間内の温湿度計算を行った。

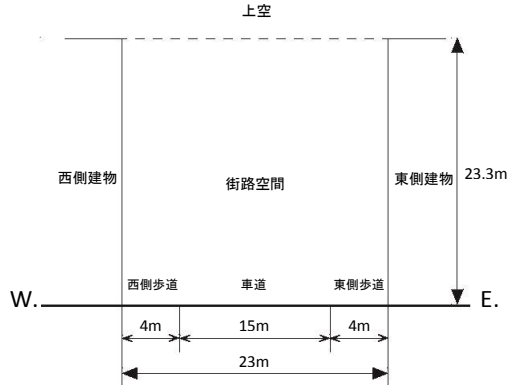


図 8 計算対象概念図

計算の外界気象条件として、晴天日が続いた 2000 年 8 月 22 日～8 月 30 日の 9 日間の時間別平均値を用いた。図 9 にその外気温と水平面全日射量の日変動を示す。車道はアスファルト舗装とし、歩道は舗装底面に不透水層を設けた POC 舗装とした。尚、POC 舗装は計算開始時に材料内部の水分が飽和状態から始まるものとし、その後水分供給は行われなないものとした。街路空間の上空大気との換気回数については 7 回/h であると仮定し、POC 舗装の日射吸収率を 0.3～0.9 の間で変化させて計算を行った。

東側歩道表面の日最高温度を図 10 に示し、東側歩道の舗装内の各日 0:00 の保水量を図 11 に示す。いずれの日射吸収率の場合でも、舗装内の保水量が 43.2 (飽和) から 30kg/m² 程度まで減少する間は、舗装表面が十分に濡れた状態にあり、一定の割合で保水量が減少し、舗装表面の日最高温度は日射吸収率に応じた一定値となる。このとき日射吸収率が高いほど蒸発量は大きく、日射吸収率が 0.3 増加する毎に舗装表面最高温度が 4℃ 程度上昇していることがわかる。保水量が 30kg/m² を下回ると、蒸発量は低下して日射吸収率によらず同程度の値となる。

歩行者の温熱環境評価のために、東側歩道上の SET*を算出した。図 12, 13 に 2 日目の街路空間の絶対湿度、東側歩道上の MRT および SET*の計算結果を示す。日射吸収率を 0.9 から 0.3 とすることで、14:00 の時点で、街路空間の絶対湿度がわずかに低下するが、MRT

は歩道表面での反射日射量の増大により 6℃ 程度高い 62.6℃ となり、結果として SET*の最高値 (14:00) は日射吸収率が高いほど低く、34.3℃ (日射吸収率 0.9) ～35.1℃ (日射吸収率 0.3) となった。

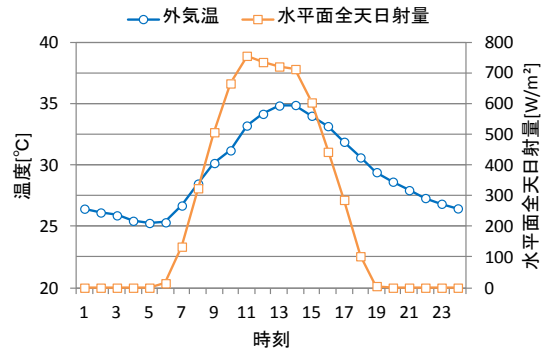


図 9 計算対象日の外気温と水平面全日射量

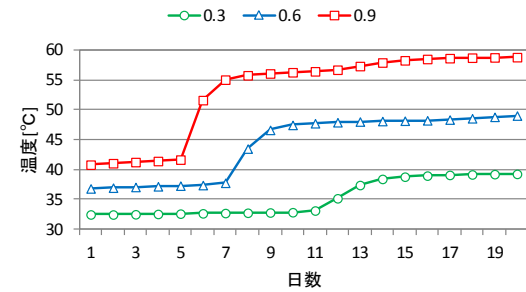


図 10 東側歩道表面の日最高温度

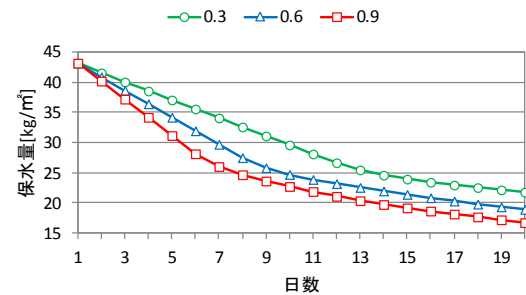


図 11 東側歩道の舗装内の保水量(0:00)

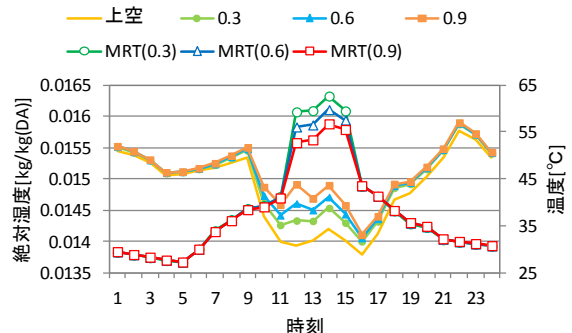


図 12 街路空間内の絶対湿度と東側歩道の MRT(日射考慮)

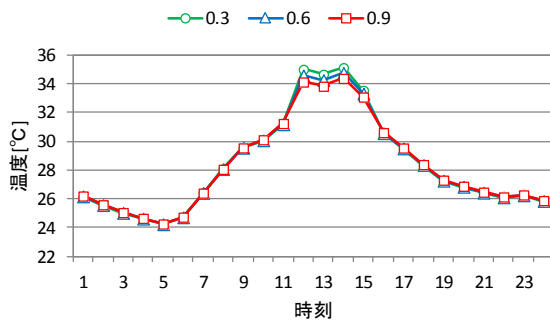


図 13 東側歩道の SET*(日射考慮)

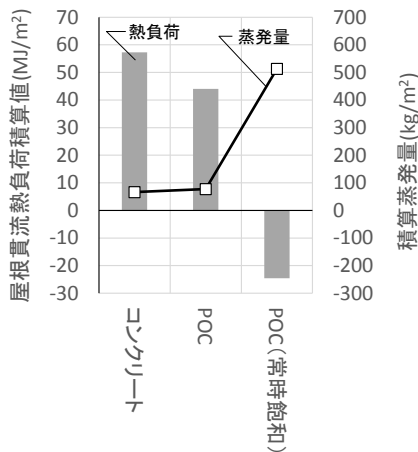


図 14 夏期(7~9月)の屋根貫流熱負荷と蒸発量の積算値

(5) 保水性舗装材料を屋根の防水仕上げ材に用いた場合の夏季冷房熱負荷低減効果

建物屋根の防水仕上げ材としてコンクリートが用いられているが、空隙率が大きく屋根荷重を軽減できるポーラスコンクリートでも、その機能を十分に果たすことができる。多孔質材料であるポーラスコンクリートを防水押さえとすることで、空隙内に降雨を保水できることから、雨水の蒸発冷却による夏期の屋根貫流熱負荷の低減が期待できる。

そこで、保水性舗装材料に関して得られた成果を応用し、屋根防水仕上げ材にポーラスコンクリートを用いた場合の夏季の屋根貫流熱負荷低減効果について、数値計算によって検討を行った。

図 14 に防水仕上げ材 (100mm) にコンクリート (基準) とポーラスコンクリートを用いた場合、および防水仕上げ材のポーラスコンクリートが常に水で飽和している場合の夏期 (7月1日から9月30日) 3ヶ月間の屋根貫流熱負荷積算値および期間積算蒸発量を示した。防水仕上げ材をコンクリートからポーラスコンクリートへ変更することで夏期の屋根積算貫流熱負荷を低減できるが、その低減量は夏季3ヶ月の積算値で13MJ/m²程度である。また、この期間の積算蒸発量の差も10kg/m²とわずかである。一方、ポーラスコンクリートを常時飽和状態に保った場合の計算結果は、蒸発量がコンクリートの場合の約7.7倍の446kg/m²となり、屋根の冷房貫流熱負荷の積算値が82MJ/m²低減され、積算値が-24.6MJ/m²

となる。

さらに、排水ドレインに堰を設け、降雨をポーラスコンクリートの空隙内に貯水可能とした場合や、雨水貯水タンクから屋根に給水が可能なシステムを想定した場合について検討を行い、その効果を把握した。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 7件)

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- 1) 北野博亮・永井久也・岩田剛: 防水仕上げ材にポーラスコンクリートを敵用した場合の夏季冷房負荷低減効果, 空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会, 15, pp.137-140, 2014.3.17
- 2) 森洋平, 永井久也, 北野博亮, 岩田剛: ポーラスコンクリート舗装の暑熱緩和効果に関する研究 その2。建物壁面の鉛直温度分布の影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, 51, pp.429-432, 2013.2.19
- 3) 森洋平・永井久也・北野博亮・岩田剛: ポーラスコンクリート舗装による都市街路空間の暑熱緩和効果, 日本建築学会学術講演梗概集, D1, pp.861-862, 2012.9.14
- 4) 北野博亮, 永井久也: A Study of the Evaporative Cooling Effect of Porous Pavements, 査読あり, Proceedings of the 5th International Building Physics Conference, pp.1185-1190, 2012.5.30
- 5) 森洋平, 北野博亮, 永井久也, 岩田剛: ポーラスコンクリート舗装による都市街路空間の暑熱緩和効果に関する研究, 空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会, 13, pp.157-160, 2012.3.14
- 6) 森洋平・北野博亮・永井久也: ポーラスコンクリート舗装の暑熱緩和効果に関する研究 その1。簡易モデルによる街路空間の暑熱緩和の検討, 日本建築学会東海支部研究報告集, 50, pp.417-420, 2012.2.19
- 7) 森洋平, 北野博亮, 永井久也: 多孔質舗装の蒸発冷却効果に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, D1, pp.675-676, 2011.8.23

6. 研究組織

(1)研究代表者

北野 博亮 (KITANO, Hiroaki)

三重大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80293801