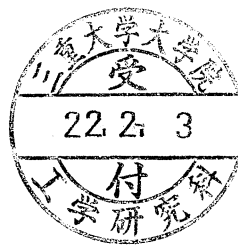


平成 21 年度

修士論文

ポーラスコンクリート舗装の
蒸発冷却効果に関する研究



指導教員

石川幸雄 教授

三重大学大学院工学研究科建築学専攻

岡田陽介

目次

第1章 序論	p.1
1.1 はじめに	p.2
1.2 既往の研究	p.2
1.3 研究の目的	p.3
第2章 熱・水分移動に関する基礎理論	p.4
2.1 はじめに	p.5
2.2 多孔質材料内の拡散方程式	p.5
2.3 解析に用いる熱・水分移動ポテンシャルと拡散方程式	p.5
2.4 支配方程式	p.6
2.5 境界条件式	p.7
2.6 第2章のまとめ	p.10
第3章 ポーラスコンクリートの熱・水分物性値の測定	p.11
3.1 はじめに	p.12
3.2 ポーラスコンクリート試験体の調合と練り混ぜ	p.12
3.3 空隙率・密度	p.14
3.3.1 測定方法	p.14
3.3.2 測定結果	p.15
3.4 熱伝導率	p.17
3.4.1 測定方法	p.17
3.4.2 測定結果	p.20
3.5 日射反射率	p.22
3.5.1 測定方法	p.22
3.5.2 測定結果	p.24
3.6 平衡含水率	p.26
3.6.1 測定方法	p.26
3.6.2 測定結果	p.30
3.6.3 平衡含水率の関数近似	p.34
3.7 液相水分伝導率	p.36
3.7.1 測定方法	p.36
3.7.2 測定結果	p.37
3.7.3 液相水分伝導率の同定方法	p.45
3.7.4 液相水分伝導率の同定結果・関数近似	p.46
3.8 第3章まとめ	p.49

第4章 ポーラスコンクリートの屋外蒸発冷却実験	p.50
4.1 はじめに	p.51
4.2 実験装置	p.51
4.3 実験試料	p.52
4.4 測定方法	p.52
4.5 測定結果	p.54
4.6 数値解析	p.67
4.6.1 解析方法	p.67
4.6.2 初期条件	p.67
4.6.3 計算条件	p.69
4.6.4 解析結果	p.70
4.7 第4章まとめ	p.85
第5章 結論	p.86
付録	p.89
記号説明	p.90
参考文献	p.94
謝辞	p.95

第1章

序論

1.1 研究の背景

地球の環境問題には様々なものがあるが、地球温暖化のひとつに都市部の気温が郊外よりも高くなるヒートアイランド現象が挙げられる。これは、建物空調や交通等からの人工排熱の増加に加えて、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、樹木の減少によって起こるアーバンドーム（都市部がはげ山と同様の状態になる現象）による土中の保水力低下などが主な原因と考えられている。このヒートアイランド現象は、冬季に顕著にあらわれるが、近年は夏季の熱帯夜の出現日数の増加や異常気象の増加、昼間の気温や構造物・地表面温度の上昇によって、高齢者の衰弱死、日射病による患者の増加が問題となっている。今や、ヒートアイランド現象は我々の生命をも危ぶむ深刻な環境問題となってしまった。

今後建築に携わっていく者にとって、我々人間が引き起こしてしまったこの深刻なヒートアイランド現象による問題をどのように受け止め、そしてどのように対処していくかが今後の最重要課題となっていくと考えられる。

1.2 既往の研究

国内における保水性舗装の蒸発冷却効果に関する研究の多くは、屋外実験によって蒸発量や冷却効果の例を示しているだけであり、塗装材料の蒸発冷却特性について一般性のある評価をしているとはいえない。蒸発効率（蒸発比）^①を材料固有（湿潤状態）の一定値とみなし、それを指標として性能評価・蒸発量の予測などを行う研究も見られる。

しかし、保水性材料からの蒸発量とその冷却効果は、材料内の含水率分布や材料の水分特性に依存するので、これらの影響が考慮されていない手法では、湿潤状態から絶乾状態に至るまでの過渡的な蒸発量の予測は不可能である。

都市熱環境の予測・評価を目的とし、谷本ら^②や梅干野^③らは、実験的に求めた材料内部の含水率と表面の濡れ率や蒸発比の関係から、地盤や保水性舗装からの蒸発量を予測する手法を提案している。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、舗装材料の蒸発量予測や評価には、予測精度が十分に高いとはいえない。

松本の熱水分同時移動方程式^④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^⑤や地盤の熱水分性状解析^⑥などが行われ、その予測精度が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などの熱・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^⑦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。

1.3 研究の目的

ヒートアイランド現象の主な原因の一つとして、都市化に伴う道路舗装などの地表面の不
透水化が挙げられる。そのような地表面を透水・保水性能を有する材料で舗装することによ
る水分蒸発およびそれに伴う蒸発冷却効果に着目し、その効果の把握と予測を可能とし、透
水・保水性舗装の熱的最適設計手法を確立し、ヒートアイランドの緩和と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。本研究では、透水性舗装材料として、ポーラスコンクリートを対象とし、調合が異なる数種類の材料の熱および水分特性を測定し、把握することを目的とする。

第2章

熱・水分移動に関する基礎理論

2.1 はじめに

多孔質体の空隙は、通常何らかの形で湿氣的につながっており、多孔質体を取り巻く外界の温湿度の変動に応じてその含水率は変化し、また、水分の拡散・移動が生じている。多孔質体内部の水分は大別して、固体実質と何らかの結合がある広義の液相成分と、空隙内に存在する水蒸気、すなわち気相成分に分けられる。これらの水分は、一般的に並列的に移動・拡散するとともに、材料内の温湿度変化に応じて、相変化（蒸発・凝縮）が生じ、それに伴う相変化熱によって、材料内の温度に影響を及ぼす。このように、熱と水分は互いに大きく影響しあっており、それぞれを独立なものとして扱うことはできず、同時移動の現象として取り扱わなければならない。このような多孔質材料中の熱・水分の同時移動現象を記述する熱・水分同時移動方程式に関する研究は多く行われているが、いずれも最終的には、温度と含水率或いは水分の化学ポテンシャルを移動ポテンシャルとし、水分の移動に関しては、水蒸気と液水の二相流と考え、熱移動に関しては、固体部の熱伝導に相変化を含めた熱収支を考える基礎方程式が導かれる。

本章では、本研究の基礎となる移動の駆動力として温度と水分化学ポテンシャルを用いる松本の理論を示し、多孔質材料内の熱・水分同時移動の基礎式を提示する。さらに舗装表面の境界条件について述べる。

2.2 多孔質材料内の拡散方程式

多孔質体は、固体実質部、液相水分、気相水分の三成分で構成される連続体とみなす。また、固体実質部の変形は無視し得ると仮定する。

材料内に存在する水分（気相・液相）の平衡状態が崩れると、これらの水分はそれぞれのメカニズムに従って同時に移動する。いずれの形態の水分に対しても、移動の駆動力は水分の化学ポテンシャルの差である。このような多相系の均一混合体に非平衡熱力学の方法を水分移動過程に適用すると、熱、水分、乾燥空気の流れと駆動力の構成関係が得られる。

2.3 解析に用いる熱・水分移動ポテンシャルと拡散方程式

水分は液相、気相間で平衡していると仮定し、その水分化学ポテンシャルを μ とすると、熱および気相水分、液相水分の拡散方程式は次のように表すことができる。

$$q = -\lambda \nabla T \quad (2.1a)$$

$$J_{gw} = -\lambda'_{Tg} \nabla T - \lambda'_{\mu g} (\nabla \mu - F_w) \quad (2.1b)$$

$$J_{lw} = -\lambda'_{Tl} \nabla T - \lambda'_{\mu l} (\nabla \mu - F_w) \quad (2.1c)$$

ここで、 λ : 熱伝導率 [$\text{W/m}^2 \text{K}$]

$\lambda'_{Tg}, \lambda'_{Tl}$: 温度勾配に関する気相、液相水分伝導率 [kg/msK]

$\lambda'_{\mu g}, \lambda'_{\mu l}$: 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相、液相水分伝導率 [kg/ms (J/kg)]

ここで、式 2.1b と式 2.1c を足し合わせると全水分流に対する拡散方程式は以下のようになる。

$$J_w = -\lambda'_T \nabla T - \lambda'_\mu (\nabla \mu - F_w) \quad (2.2)$$

ただし、

$$\lambda'_T = \lambda'_{Tg} + \lambda'_{Tl}, \lambda'_\mu = \lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l}$$

水分伝導率 λ'_T 、 λ'_μ は含水率または水分化学ポテンシャルおよび温度の関数であり、その値は乾燥状態から飽水状態までの含水率の全範囲にわたって、含水率および温度に強く依存し、常数として取り扱うことは一般に出来ない。

2.4 支配方程式

多孔質体内の微小容積について、以下に示す仮定を行い、熱および水分の収支式をたてる。

- 1) 多孔質内部の水分は気・液相間で常に平衡している。(水分の局所平衡仮定)
- 2) 多孔質体内は均質(Homogeneous)であり、等方性(Isotropic)を有する。
- 3) 履歴(Hysteresis)は存在しない。

(1) 水分収支式

多孔質体の微小容積について、水分収支式をたてると、気相および液相水分のそれぞれについての水分収支は以下となる。

$$\frac{\partial(\Phi_0 - \psi)\rho_{gw}}{\partial t} = -\nabla J_{gw} - W \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial\psi\rho_{lw}}{\partial t} = -\nabla J_{lw} + W \quad (2.4)$$

ここで、 ρ_{gw} 、 ρ_{lw} : 気相、液相水分の密度 [kg/m^3]

Φ_0 : 乾燥時材料内の空隙率 ψ : 材料の体積含水率

$\Phi_0 - \psi$: 含水率 ψ のときの空隙率 t : 時間 [s]

W : 水蒸気から液水に相変化水分量 [$\text{kg/m}^3 \text{s}$]

2.3 および 2.4 式の和より水分収支式は以下ようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t}[(\Phi_0 - \psi)\rho_{gw} + \rho_{lw}] = -\nabla J_w \quad (2.5)$$

通常 $(\Phi_0 - \psi)\rho_{gw} \ll \rho_{lw}$ であるので $(\Phi_0 - \psi)\rho_{gw}$ の寄与は無視できる。また、含水率は温度依存が小さいことから $\psi \cong f(\mu)$ とおけるので、水分収支式は次式となる。

$$\rho_{lw} \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla(\lambda'_T \nabla T) + \nabla \lambda'_{\mu} (\nabla \mu - F_w) \quad (2.6)$$

また、水蒸気から液水への相変化水分量 W は、次式となる。

$$W = \nabla(\lambda'_{Tg} \nabla T) + \nabla\{\lambda'_{\mu g}(\nabla \mu - F_w)\} \quad (2.7)$$

2.6 式は温度 T を含むから、水分収支式のみで水分の解析はできず、温度 T に関する関係式が必要である。

(2) 熱収支式

熱収支を同様に微小容積について考えると次式で表すことができる。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + r W \quad (2.8)$$

ここで、 $c\rho = (1 - \Phi_0)\rho_s c_s + \psi\rho_{lw} c_{lw}$

式 2.7 を代入すると、

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[(\lambda + \gamma\lambda'_{Tg})\nabla T] + \nabla[\gamma\lambda'_{\mu g}(\nabla \mu - F_w)] \quad (2.9)$$

式 2.6 及び式 2.9 を多孔質材料内の熱水分性状解析における基礎方程式とする。

2.5 境界条件式

空気と接する材料の表面では、対流による熱伝達層と相似な水分伝達層が生じる。気体内拡散方程式を用い、対流熱伝達率と相似な取り扱いをすることによって、湿気伝達率 $\alpha'_m[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s Pa})]$ が定義できる。伝達層を流れる水分流 $J_w = J_{gw}[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ は以下ようになる。

$$J_w = \alpha'_m(p_0 - p_i) \quad (2.10)$$

ここで、 p_0 、 p_i ：固体表面、空気の水蒸気圧[Pa]

熱と水分の拡散の相似性より

$$\frac{\alpha_c}{\alpha'_m C_m \rho_m R_v T} = Le \quad (2.11)$$

ここで、 α_c ：対流熱伝達率[W/m²K] C_m ：湿り空気の定圧比熱[J/kg K]

ρ_m ：湿り空気密度[kg/m³] R_v ：水蒸気の気体定数

L_e ：ルイス数[-] ($L_e = (a/D)^{1-n}$, $n \cong 1/3$) 通常 ($L_e \cong 1$) と近似できる

a ：湿り空気の温度伝導率[m²/s]

D ：湿り空気中の水蒸気の拡散係数[m²/s]

次に、式 2.10 を温度と水分化学ポテンシャルを用いて表す。

$$J_w = \alpha'_\mu(\mu_0 - \mu_i) + \alpha'_T(T_0 - T_i) \quad (2.12)$$

$$\text{ただし、}\alpha'_\mu = \alpha'_m \left(\frac{\partial p}{\partial \mu} \right)_T, \alpha'_T = \alpha'_m \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_\mu \quad (2.13)$$

ここで、 μ_0 、 μ_i ：空気、固体表面の水分化学ポテンシャル[J/kg]

T_0 、 T_i ：空気、固体表面の絶対温度[K]

α'_μ 、 α'_T ：水分化学ポテンシャル、温度勾配による水分伝達率[kg/(ms J/kg)]、[kg/msK]

p ：水蒸気圧[Pa]

空気と接する固体表面での水分移動は、式 2.2 と式 2.13 を併せて以下のようになる。

$$\alpha'_\mu(\mu_0 - \mu_i) + \alpha'_T(T_0 - T_i) + J_p = -\lambda'_\mu \left(\frac{\partial \mu}{\partial n} \right)_s - n F_w \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s \quad (2.14)$$

ここで、 J_p ：降雨量[kg/m²s] n ：固体表面の内向法線ベクトル

次に空気と接する材料表面での熱収支を考える。水分の相変化に伴う熱、水分移動に伴う顕熱移動を考慮してエンタルピー流を考える。

$$q_{s(a)} + q_r + J_{gw(a)} H_{gw} + J_{lp} = q_{s(s)} + J_{gw(s)} H_{gw} + J_{lw(s)} H_{lw} \quad (2.15)$$

ここで、 $J_{gw(a)}$ ：空気層側の気相水分伝達による表面水分流[kg/m²s]

J_p ：降雨による液相の表面水分流[kg/m²s]

$J_{gw(s)}$: 材料側の気相水分の表面水分流[kg/m²s]

$J_{lw(s)}$: 材料側の液相水分の表面水分流[kg/m²s]

$q_{s(a)}$: 空気層側の対流伝達による表面熱流[W/m²]

q_r : 日射吸収、低温放射による表面発熱[W/m²]

$q_{s(s)}$: 材料側の熱伝導による表面熱流[W/m²]

また、これらはそれぞれ以下のように表される。

$$q_{s(a)} = \alpha_c(T_0 - T_i) \quad (2.16a)$$

$$q_r = \alpha_r(T_0 - T_i) + q_{sol} + q_{noc} \quad (2.16b)$$

$$J_{gw(a)} = \alpha'_\mu(\mu_0 - \mu_i) + \alpha'_T(T_0 - T_i) \quad (2.16c)$$

$$J_{gw(s)} = -\lambda'_{\mu g} \left(\frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - nF_w \right) - \lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (2.16d)$$

$$J_{gw(s)} = -\lambda'_{\mu l} \left(\frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - nF_w \right) - \lambda'_{Tl} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (2.16e)$$

ここで、 α_r : 放射熱伝達率[W/m²K]

q_{sol} : 日射吸収量[W/m²] q_{noc} : 夜間放射量[W/m²]

水分に関する境界条件式は上記表現形式を用いて示す。

$$J_{gw(a)} + J_p = J_{gw(s)} + J_{lw(s)} \quad (2.17)$$

式 2.15 および式 2.17 から $J_{lw(s)}$ を消去して整理すると以下ようになる。

$$q_{s(a)} + q_r + rJ_{gw(a)} = q_{s(s)} + rJ_{gw(s)} \quad (2.18)$$

ただし、 $r = H_{gw} - H_{lw}$ を用いた。

2.15 式のそれぞれの項を書き直すと、以下のような空気と接する固体表面の熱に関する境界条件式となる。

$$\begin{aligned} & (\alpha + r\alpha'_T)(T_0 - T_i) + r\alpha'_\mu(\mu_0 - \mu_i) + q_{sol} + q_{noc} = \\ & -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s - r\lambda'_{Tg} \left(\frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - nF_w \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

異種材料境界における熱および水分境界条件式は、以下のようになる。

$${}_A\mu = {}_B\mu (= \mu), {}_AT = {}_BT (= T)$$

$$-{}_A\lambda'_\mu \left(\frac{\partial {}_A\mu}{\partial n} \Big|_b - nF_w \right) - {}_A\lambda'_T \frac{\partial {}_AT}{\partial n} \Big|_b = -{}_B\lambda'_\mu \left(\frac{\partial {}_B\mu}{\partial n} \Big|_b - nF_w \right) - {}_B\lambda'_T \frac{\partial {}_BT}{\partial n} \Big|_b \quad (2.20)$$

$$-({}_A\lambda + r_A\lambda'_{Tg}) \frac{\partial {}_AT}{\partial n} \Big|_b - r_A\lambda'_{Tg} \left(\frac{\partial {}_A\mu}{\partial n} \Big|_b - nF_w \right) = -({}_B\lambda + r_B\lambda'_{Tg}) \frac{\partial {}_BT}{\partial n} \Big|_b - r_B\lambda'_{Tg} \left(\frac{\partial {}_B\mu}{\partial n} \Big|_b - nF_w \right) \quad (2.21)$$

2.6 第2章のまとめ

本章では、材料とその周辺環境における熱負荷および熱・水分性状を予測するための基礎となる材料内の躯体および周辺環境における熱・水分の移動方程式を示した。松本によって定式化されたこの基礎理論式は、局所平衡の仮定において、熱および水分の移動ポテンシャルとして温度および自由水基準の水分化学ポテンシャルを用いて表現したものである。この基礎式は躯体および材料内部の水分状態が蒸気拡散支配状態から飽水状態にわたるすべての含水率の範囲に対して適用できるものであり、熱移動について伝導、対流、水分移動に伴う熱流を、水分の移動は液状水、水蒸気の形で起こるものを含んだ式となっている。

これによって熱および水分の移動ポテンシャルとして温度、水分化学ポテンシャルを用いた基礎式により統一的に材料と周辺環境における熱・水分性状の解析を行うことができる。

第3章

ポーラスコンクリートの 熱・水分物性値の測定

3.1 はじめに

本章では、透水・保水性能を有するポーラスコンクリート舗装の蒸発冷却効果の把握とその予測を可能とするために、屋外実験で使用したポーラスコンクリートの熱・水分物性値を測定、同定した結果を示す。本章では、3.3 で種々のポーラスコンクリートの調査結果、3.2 で空隙率・絶乾密度の測定方法・結果、3.4 で熱伝導率の測定方法・結果、3.5 で日射反射率の測定方法・結果、3.6 で平衡含水率の測定方法・結果、それら関数近似した結果、3.7 で液相水分伝導率の測定方法・結果、それらを同定した結果を示す。

3.2 ポーラスコンクリート試験体の調合と練り混ぜ

・調合

本実験で用いた種々のポーラスコンクリートの調合を述べる。一般に透水性舗装として用いられる碎石は6号（粒径5～13mm）碎石である。しかし本実験では、主に8号（粒径1.25～2.5mm）、7号（粒径2.5～5mm）の碎石を用いたポーラスコンクリートを使用している。これは、6号碎石を用いたポーラスコンクリートは空隙径が大きいため保水性が期待できないためである。また、一般に透水性舗装⁸⁾として用いられる場合には15～20%程度の空隙率が多いが、本実験では歩道および建物外溝を対象とし、またその熱特性の把握を目的としているため舗装としては大きめの値（設計空隙率15～35%）を設定している。ゆえに、本研究では主に8号（粒径1.25～2.5mm）、7号（粒径2.5～5mm）碎石の空隙率15～35%のポーラスコンクリートを用いて実験を行った。試験体の調合表を表3.2.1に示した。試験体名は用いた骨材の種類と設計空隙率と水セメント比で表した。

日射反射率の測定では、ポーラスコンクリートだけでなく、一般に舗装で用いられることの多い普通コンクリート(NC)、およびアスファルト(AS)についても測定を行った。使用した比較用のアスファルトには、再生密粒度アスファルトを用いた。表3.2.2に再生密粒度アスファルトの配合表、表3.2.3に普通コンクリートの調合結果を示す。

・練り混ぜ

ポーラスコンクリートの練り混ぜには揺動攪拌式ミキサを用いた。コンクリート、セメント、混和剤の使用材料を表3.2.4に示した。ペースト先練り方式としてまず、水（混和剤混入）およびセメントを投入し2分間練り混ぜた後、骨材を投入しセメントと骨材が均質となる2分間練り混ぜた。試料の打ち込み後、材齢2日で脱型した。脱型後、試験体の強度を高めるために2週間の水中養生を行った。

表 3.2.1 試験体の調合

試験体名称	設計空隙率 (%)	水セメント比 (%)	砕石	設計単位量 (kg/m ³)				測定値	
				水	セメント	砕石	混和剤	絶乾密度(kg/m ³)	空隙率(%)
6号30%(46)	30	46	6号	80	175	1512	-	1703.8	37.7
7号20%(30)	20	30	7号	117	390	1512	0.39	1745.2	36.5
7号25%(30)	25	30	7号	105.4	351.4	1455	0.39	1768.8	34.9
7号30%(46)	30	46	7号	80	175	1512	-	1644.7	40.3
8号15%(30)	15	30	8号	149.2	497.2	1482	0.9	1945.1	23.4
8号20%(30)	20	30	8号	124.9	416.2	1482	0.75	1839.4	31.4
8号25%(30)	25	30	8号	100.6	335.2	1482	0.61	1830.1	29.6
8号30%(46)	30	46	8号	92	200	1512	-	1555.7	41.1
8号35%(30)	35	30	8号	52	173.3	1482	0.31	1549.2	43.2
6号+8号30%(46)	30	46	6号+8号	46	175	1512	-	1765.6	34.5

表 3.2.2 再生密粒度アスファルト配合表 (%)

アスファルト	6号砂石	7号砂石	粗砂	細砂	粉体	再生骨材
5.8	21.7	9.4	5.7	5.7	9.5	42.4

表 3.2.3 普通コンクリート調合表

使用粗骨材	W/C (%)	単位重量(kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
6号・7号	60	180	300	700	1050

表 3.2.4 使用材料

材料		種類	
セメント		普通ポルトランドセメント (密度: 3.20 g/cm ³)	
骨材	6号	三重県 佐奈山産 砕石	粒径 5 ~ 13 mm、表乾密度 2.70 g/cm ³ 実績率 56.0 %
	7号		粒径 2.5 ~ 5 mm、表乾密度 2.70 g/cm ³ 実績率 53.3 %
	8号		粒径 1.25 ~ 2.5 mm、表乾密度 2.70 g/cm ³ 実績率 54.4 %
混和材 (SP)		高性能AE減水材 (ポリカルボン酸系)	

3.3 空隙率・密度

3.3.1 測定方法

測定は水中重量と絶乾重量から求める方法で行った。水中重量の測定は2ヶ月間浸水と真空ポンプの2通りの方法で行った。2ヶ月間浸水方法は、80×80×160mmの試験体をそれぞれ2本ずつ用いて、試験体の空隙内の空気を取り除くため、2ヶ月間精製水に浸し、空隙中の空気を取り除いた試験体を精製水中で水中重量の測定を行った。2ヶ月間浸水方法で用いた試験体は、6号30%(46)、7号20%(30)、7号25%(30)、7号30%(46)、8号15%(30)、8号20%(30)、8号35%(30)、8号30%(46)、6号+8号30%(46)の8種類である。真空ポンプ方法は、40×40×160mmの試験体をそれぞれ2本ずつ用いて、真空ポンプを用いて空隙内の空気を取り除いた試験体を精製水中で水中重量の測定を行った。真空ポンプ方法で用いた試験体は8号20%(30)、8号25%(30)の2種類である。水中重量 M_v を測定した試験体を、設定温度80℃の乾燥機で24時間乾燥させ、絶乾状態にし、絶乾重量 M_d を測定する。また、それらの試験体のみかけの体積 V_a を測定し、式3.3.1から絶乾密度を算出する。また、式3.3.2から試験体の実質部の体積 V_s を算出し、式3.3.3から空隙率を算出した。ここで、試験体の乾燥温度を80℃としたのは、80℃以上であると、結晶水（ゲル水）が熱分解することが考えられるからである。また、試験体は舗装として利用することから、舗装表面温度は夏季の日射がピーク時のとき、80℃以上に上昇する可能性が極めて低いことからである。

$$\rho = \frac{M_d}{V_a} \quad (3.3.1)$$

$$V_s = \frac{M_d - M_w}{\rho_w} \quad (3.3.2)$$

$$\Phi_0 = \frac{V_a - V_s}{V_a} \quad (3.3.3)$$

ここで、 Φ_0 ：試験体の絶乾空隙率(m^3/m^3) V_s ：実質部の体積 (m^3)

V_a ：試験体のみかけの体積（空隙を含む）(m^3)

M_d ：試験体の絶乾重量(kg)

ρ_w ：水の密度(kg/m^3)

M_v ：試験体の水中重量(kg)

ρ ：絶乾密度 (kg/m^3) ρ_w ：1000(kg/m^3)

3.3.2 測定結果

試験体の空隙率測定結果は図 3.3.1 に示す。試験体は 2 本ずつ計測し、測定結果の図には 2 本の平均を示した。測定した空隙率が設計空隙率より 5～15%程高い値となっているが、設計空隙率には硬化したセメント内の微細な空隙を含まないことと、試験体の打設時の締め固めが十分でないことが考えられる。また、空隙率・絶乾密度で使用した試験体は型枠から脱型してそのまま測定を行った試験体[7 号 25%(30)、8 号 15%(30)、8 号 20%(30)、8 号 25%(30)、8 号 35%(30)]と型枠から脱型して切断した試験体[6 号 30%(46)、7 号 20%(30)、7 号 30%(46)、8 号 30%(46)、6+8 号 30%(46)]の 2 通りの作製方法がある。このとき、脱型してそのまま測定を行った試験体の測定空隙率と設計空隙率の誤差が+8.5%、型枠から脱型して切断した試験体の測定空隙率と設計空隙率の誤差は+10.02%であった。これは、切断した試験体は、切断面のセメントペーストを水で洗い流すため、切断面のセメントペースト比率が試験体全体のそれより低くなり、切断した試験体が脱型してそのまま測定を行った試験体より空隙率の誤差が高くなったと考えられる。また、8 号 20%(30)試験体の水中重量測定は 2 ヶ月間浸水と真空ポンプの 2 通りを行った。図 3.3.2 に 2 通りの水中重量測定の結果を示す。2 ヶ月間浸水測定では、空隙率が 37.0%であるのに対し、真空ポンプ測定は 31.4%であった。これは、2 ヶ月間浸水測定では空隙中の空気が十分抜けきっていなかったことが考えられる。また、図 3.3.3 から絶乾密度が高い程、空隙率が低くなる傾向にあり、絶乾密度は空隙率と比例の関係にあると言える。

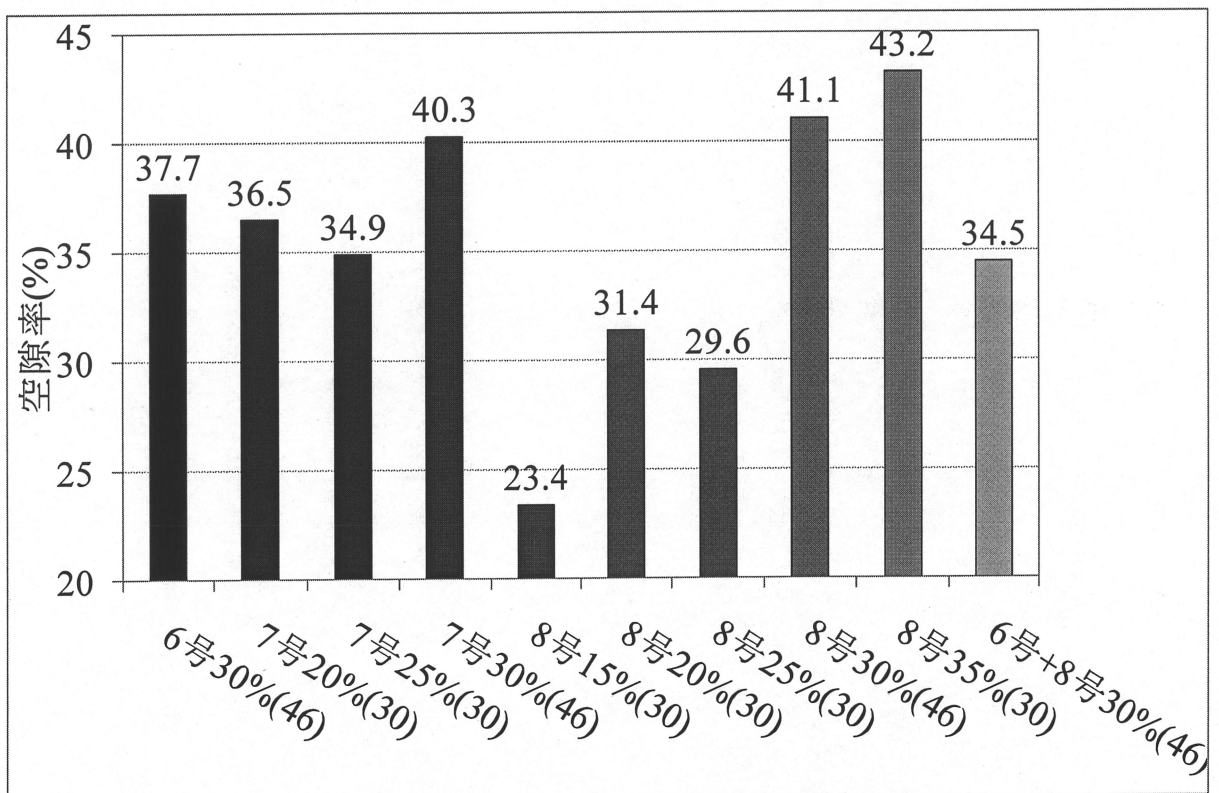


図 3.3.1 試験体の空隙率の測定結果

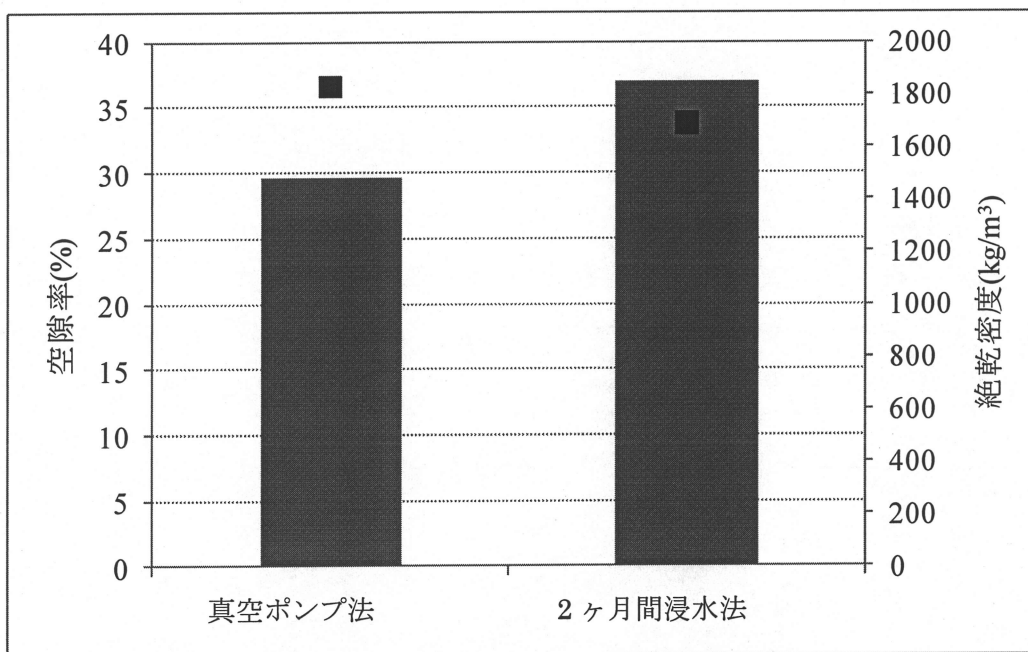


図 3.3.2 8号 20%(30)水中重量測定比較

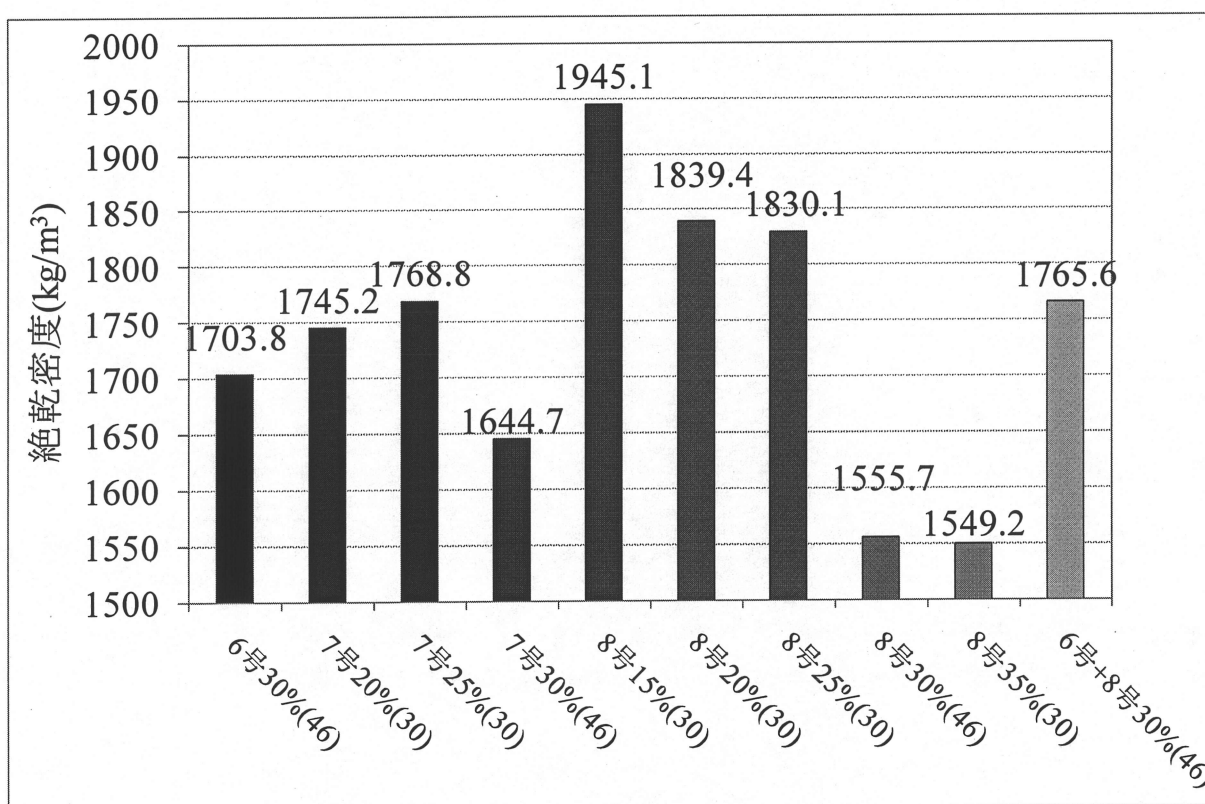


図 3.3.3 試験体の絶乾空隙率の測定結果

3.4 熱伝導率

3.4.1 測定方法

実験はプローブ法によって迅速熱伝導率計を用いて測定を行う。以下にプローブ法の基本原理を述べる。

図 3.4.1 のように、無限円筒とみなせる形状（実際は直方体でもよい）の試料の中心に細いヒータ線を直線状に張り、ヒータ線に一定電力（熱量）を与え続けると、ヒータ線の温度は時間とともに指数関数的に上昇する（図 3.4.2、図 3.4.3）。

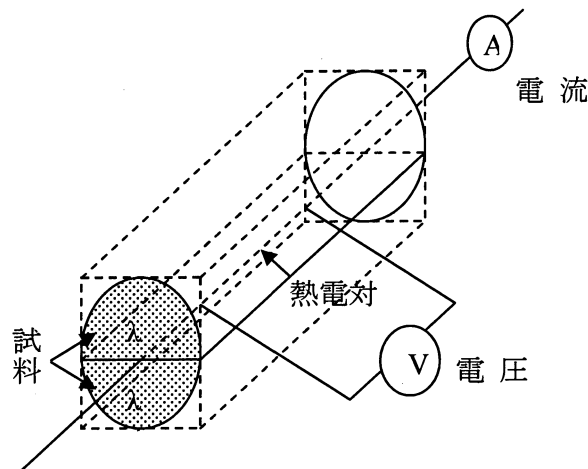


図 3.4.1 通常熱線法

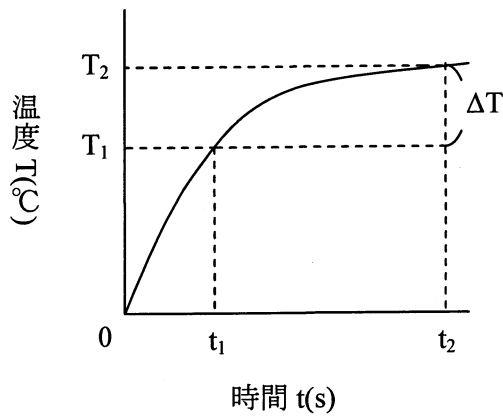


図 3.4.2 時間と温度上昇

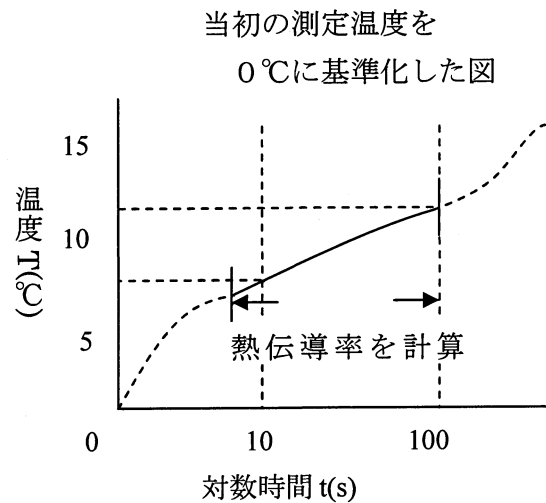


図 3.4.3 $(\ln t)$ と温度の関係

この時間に対する温度上昇の割合から試料の熱伝導率 λ_N が求められる。

$$\lambda_N = \frac{q \ln(t_2 / t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} = \frac{q \ln(t_2 / t_1)}{4\pi\Delta T} \quad (3.4.1)$$

式 3.4.1 は、理論値に 1%以内で近似するという条件($r/2\sqrt{\alpha t} < 0.17$)で求めた式である。

ここで、 $q = 0.86 R I^2 = 0.86 V I / L$

q : ヒータ線 1m あたりの発熱量 (kcal/m h)

V : 電圧 (V)

I : 電流 (A)=一定

L : 電圧 V を測定しているヒータ線の長さ (m)

R : ヒータ線 1m あたりの抵抗 (Ω)

r : 半径 (m)

α : 試料の熱拡散率 (m^2/h)

t_1, t_2 : サンプルング時間 (s)

T_1, T_2 : サンプルング時間 t_1, t_2 における温度($^{\circ}\text{C}$)

式 3.4.1 を書き直すと、式 3.4.2 のようになる。

$$\lambda_N = 0.00277 I^2 R \cdot \ln(t_2 / t_1) / (V_2 - V_1) \quad (3.4.2)$$

ここで、 V_1, V_2 : K 熱電対の mV 出力

$$V_1 = \eta T_1$$

$$V_2 = \eta T_2$$

η : K 熱電対の熱電能 (-10 \sim 200 $^{\circ}\text{C}$ で $\eta = 0.0405 \text{mV}/^{\circ}\text{C}$ とした)

通常の熱線法では、ヒータ線を試料 2 枚ではさんで測定 (図 3.4.1) するが、図 3.4.4 のように、一方を熱伝導率既知で、断熱性に富んだ試験体に置き換えて測定した場合、試料の熱伝導率は式 3.4.3 で示される。

$$\lambda_p = K \frac{I^2 \ln(t_2 / t_1)}{V_2 - V_1} - H \quad (3.4.3)$$

ここで、 K と H は、プローブによって定まる定数で、ヒータ線の抵抗や熱電対の熱電能、熱伝導率既知試験体の熱伝導率などが含まれる。各プローブの K, H の値を用いて式 3.4.3 を計算すれば、試料の熱伝導率 λ_p は簡単に求めることができる。

図 3.4.4 を実用化したものがプローブ法である。プローブ法でも温度と時間の関係は熱線法と同様の傾向を示す。また同一試料に対して、熱線法と同じ熱伝導率値が求まる。

以上のようにプローブ法は、非定常測定法であるにもかかわらず、フラッシュ法やオング

ストローム法とは異なり、熱拡散率とは無関係に直接、熱伝導率を求めることができる。

また以下にプローブ法の測定手順を述べる。

1. 付属のレファレンスプレート（一定の熱伝導率値）で、プローブの定数を決定する。
2. 試験体のヒータ電流値を設定する。（主に 0.25A^2 ）
3. プローブを試験体の上にのせ測定する。多少の誤差があるので、試験体をそれぞれ5回ずつ測定し、測定した値の平均値によって熱伝導率を決定する。

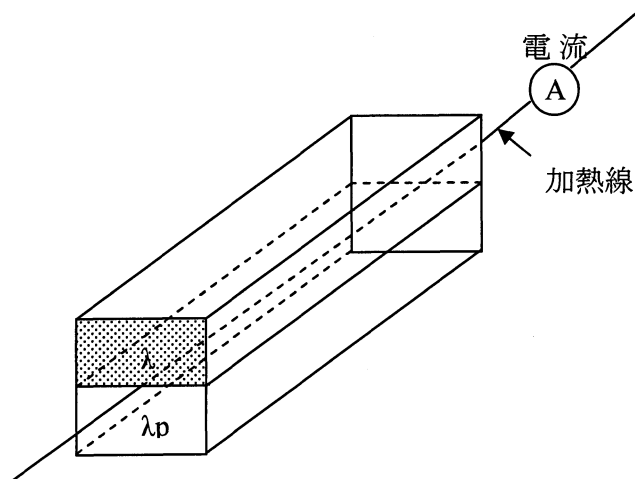


図 3.4.4 プローブ法

3.4.2 測定結果

各試験体の熱伝導率の測定結果を表 3.4.1 に、比較した図を図 3.4.5 に示す。普通コンクリートの熱伝導率が 1.637(W/mK)であるのに対して、測定に用いたポーラスコンクリートの熱伝導率が最大で 0.898(W/mK)であった。ポーラスコンクリートは普通コンクリートより熱を通しにくい。また、測定に用いた 5 つの試験体を比較すると、空隙率が高いほど熱伝導率が低くなる結果となった。更に、図 3.4.6 に示すようにプロット数は十分ではないが、 $R=0.856$ (R : 相関係数)である。これらのことから、空隙率と熱伝導率は比例の関係にあるといえる。

表 3.4.1 試験体の熱伝導率の測定結果

試験体の種類	1回目	2回目	3回目	4回目	平均
	(W/m K)	(W/m K)	(W/m K)	(W/m K)	(W/m K)
6号30%(46)	0.826	0.8503	0.7922	0.8322	0.82518
7号20%(30)	0.6403	0.6592	0.6477	0.6439	0.64778
7号30%(46)	0.4899	0.5114	0.5065	0.5204	0.50705
8号30%(46)	0.5159	0.542	0.5209	0.5339	0.52818
6+8号30%(46)	0.8969	0.8694	0.9101	0.9173	0.89843

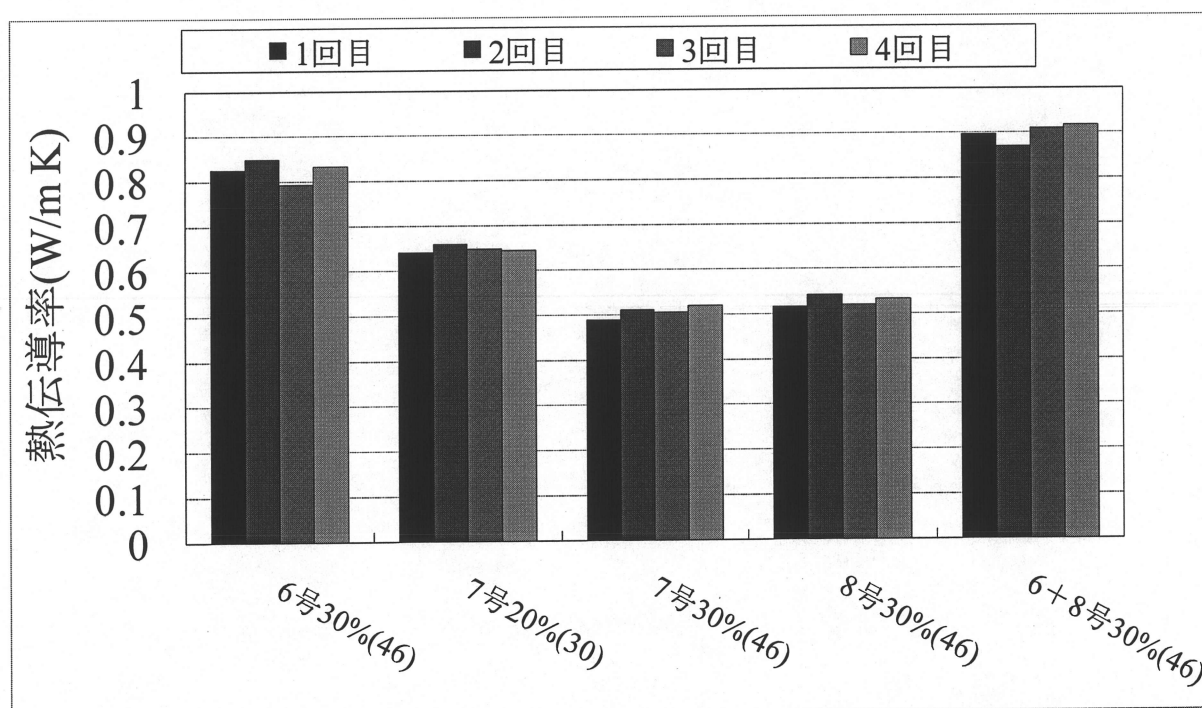


図 3.4.5 熱伝導率測定結果

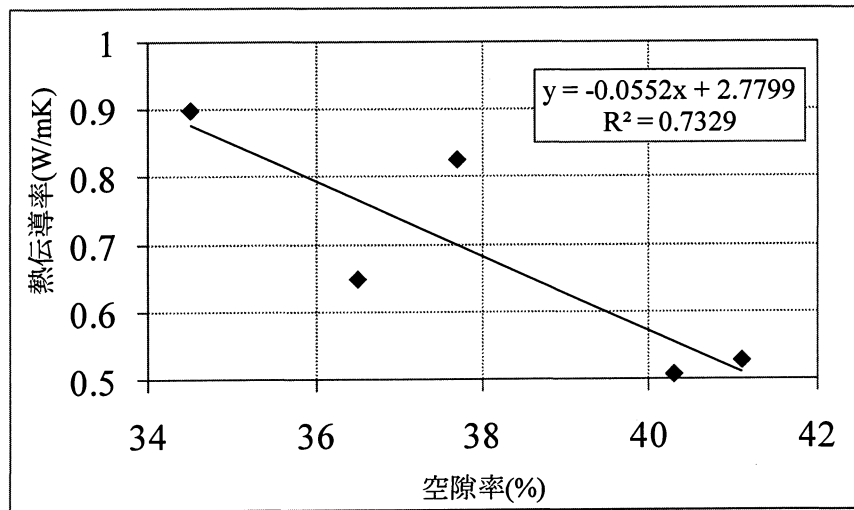


図 3.4.6 空隙率と熱伝導率の関係

3.5 日射反射率

3.5.1 測定方法

約 $300 \times 300 \times 100(\text{mm})$ のポーラスコンクリート（以下 試験体）を用いて実験を行った。試験体の種類は 6 号 30%(46)、7 号 20%(30)、7 号 25%(30)、7 号 30%(46)、8 号 15%(30)、8 号 25%(30)、8 号 35%(30)、8 号 30%(46)、6 号+8 号 30%(46) と一般に舗装に使用される普通コンクリートとアスファルトの 11 種類を用いた。

図 3.5.1 のように試験体の下にベニヤ板をつや消し黒塗リスプレーで塗装した黒のベニヤ板を敷き、アルベドメーターを用いて計測した。測定項目は、黒ベニヤ板、黒ベニヤ板と試験体の水平面上向き全天日射量と反射日射量である。これらの測定項目から、黒ベニヤ板、黒ベニヤ板と試験体の日射反射率（式 3.5.1）を求め、試験体を置いた場合と置かない場合の日射反射率から、均等拡散反射を仮定して、式 3.5.4 から試験体の日射反射率を算出した。実験日は快晴日であり、太陽高度 $47.58 \sim 53.41^\circ$ の範囲で測定を行った。なお、日射反射率の測定の湿潤測定は、試験体に約 1 分間の十分な水分供給を行って測定した。

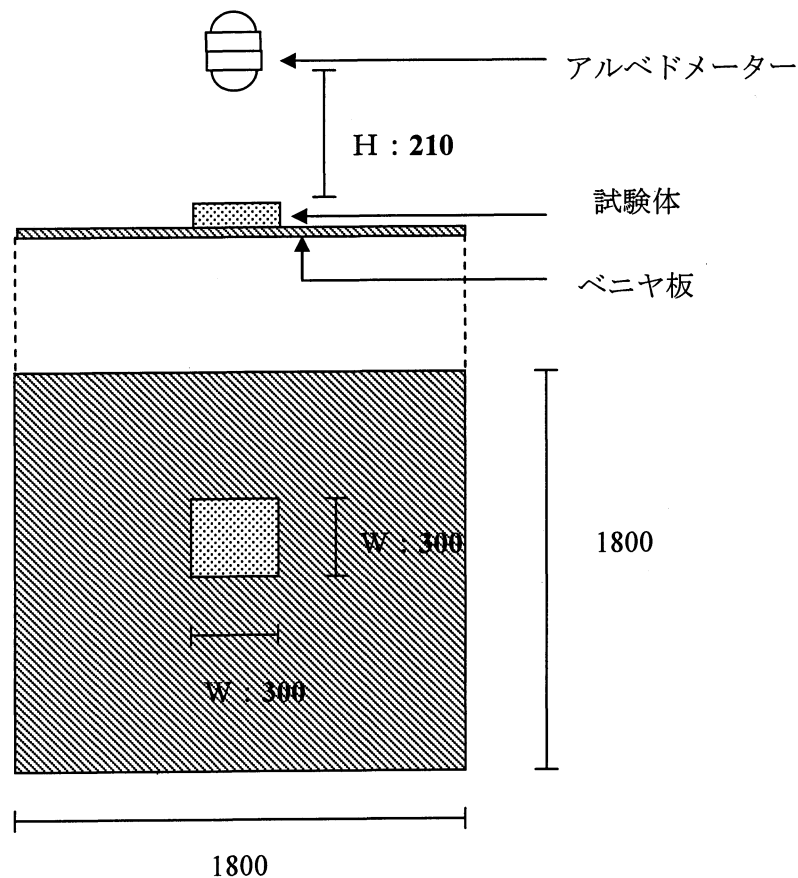


図 3.5.1 日射反射率測定方法

反射率の定義から

$$R_s = \frac{I_{r_s}}{I} \quad (3.5.1)$$

全ての面が均等拡散反射面と仮定すると、試験体の反射日射量は黒ベニヤ板と試験体+黒ベニヤ板の反射日射量から式 3.5.2 のように表すことができる。

$$I_{r_{bs}} = (1 - \varphi_s) I_{r_b} + \varphi_s I_{r_s} \quad \Leftrightarrow \quad I_{r_s} = \frac{I_{r_{bs}} - (1 - \varphi_s) I_{r_b}}{\varphi_s} \quad (3.5.2)$$

式 3.5.1 に式 3.5.2 を代入すると式 3.5.3 のように示すことができる。

$$R_s = \frac{I_{r_{bs}} - (1 - \varphi_s) I_{r_b}}{I \varphi_s} = \frac{\frac{I_{r_{bs}} - (1 - \varphi_s) I_{r_b}}{I}}{\varphi_s} \quad (3.5.3)$$

それぞれの日射反射率を用いて表すと試験体の日射反射率は式 3.5.4 となる。

$$R_s = \frac{R_{bs} - (1 - \varphi_s) R_b}{\varphi_s} \quad (\because \quad R_b = \frac{I_{r_b}}{I}, \quad R_{bs} = \frac{I_{r_{bs}}}{I}) \quad (3.5.4)$$

このとき、立体角投射率は式 3.5.5 で表すことができる。

$$\varphi_s = \frac{4}{\pi} \frac{W}{\sqrt{W^2 + 4H^2}} \tan^{-1} \frac{W}{\sqrt{W^2 + 4H^2}} \quad (3.5.5)$$

ここで、 R : 反射率 (-)

I_r : 反射日射量 (W/m^2)

I : 水平面上向き全天日射量 (W/m^2)

φ : 立体角投射率 (-)

W : 試験体の幅 (m)

H : 試験体表面と下向き日射計の距離 (m)

添え字として、 b : 黒ベニヤのみ

s : 試験体のみ

bs : 黒ベニヤと試料

3.5.2 測定結果

表 3.5.1、3.5.2 に日射反射率・吸収率の測定結果を示す。試験体が乾燥状態のときの日射反射率はアスファルトが最も低く(0.08)、次いでポーラスコンクリート(0.25~0.34)、普通コンクリート(0.57)の順であった。図 3.5.2 に空隙率と日射反射率の関係を示した。この図から、ポーラスコンクリートは空隙率が低い程、日射反射率が高い傾向にあった。また、湿潤状態の時も、日射反射率の低い順に変化はなかった。ここで、道路舗装を考えたとき、湿潤状態にあるポーラスコンクリート舗装は日射を吸収し、十分な蒸発冷却が望める。しかし乾燥状態のとき、普通コンクリート舗装よりポーラスコンクリート舗装の方が日射吸収率が高いため、ポーラスコンクリート舗装の表面温度の方が高くなると言える。

表 3.5.1 日射反射率測定結果

試験体の種類	状態	黒ベニヤ +試験体の反射率	黒ベニヤの反射率	試験体の反射率
6号30%(46)	乾燥	0.0927	0.0481	0.274
	湿潤	0.0788	0.0630	0.143
7号20%(30)	乾燥	0.1061	0.0633	0.280
	湿潤	0.0789	0.0647	0.137
7号25%(30)	乾燥	0.1413	0.0539	0.278
	湿潤	0.0693	0.0363	0.121
7号30%(46)	乾燥	0.0952	0.0545	0.261
	湿潤	0.0767	0.0599	0.145
8号15%(30)	乾燥	0.1526	0.0548	0.306
	湿潤	0.0812	0.0436	0.140
8号25%(30)	乾燥	0.1648	0.0529	0.340
	湿潤	0.0759	0.0423	0.128
8号30%(46)	乾燥	0.0983	0.0586	0.260
	湿潤	0.0749	0.0600	0.136
8号35%(30)	乾燥	0.1301	0.0540	0.249
	湿潤	0.0714	0.0430	0.116
6号+8号30%(46)	乾燥	0.1084	0.0629	0.294
	湿潤	0.0798	0.0566	0.174
コンクリート	乾燥	0.1374	0.0313	0.569
	湿潤	0.0981	0.0624	0.243
アスファルト	乾燥	0.0517	0.0438	0.084
	湿潤	0.0630	0.0618	0.068

表 3.5.2 日射反射率・吸収率測定結果

試験体名称	日射反射率		日射吸収率	
	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤
6号30%(46)	0.27	0.14	0.73	0.86
7号20%(30)	0.28	0.14	0.72	0.86
7号25%(30)	0.28	0.12	0.72	0.88
7号30%(46)	0.26	0.14	0.74	0.86
8号15%(30)	0.31	0.14	0.69	0.86
8号25%(30)	0.34	0.13	0.66	0.87
8号30%(46)	0.26	0.14	0.74	0.86
8号35%(30)	0.25	0.12	0.75	0.88
6号+8号30%(46)	0.29	0.17	0.71	0.83
コンクリート	0.57	0.24	0.43	0.76
アスファルト	0.08	0.07	0.92	0.93

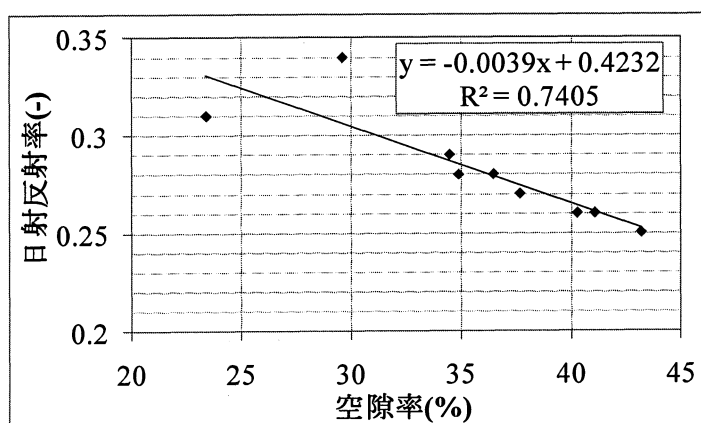


図 3.5.2 空隙率と日射反射率の関係

3.6 平衡含水率

3.6.1 測定方法

ポーラスコンクリート内の水分状態には以下の4つの水分が存在する。

1. 固体実質の結晶内部や実質部と空隙の界面に存在する水分（吸着水）
2. 固体内の毛細管力で保持される水分（毛管水）
3. 大きな毛細管、空隙に存在する重力水
4. 空隙内に存在する水蒸気

主に3の水分が大部分を占めるが、重力をうける条件下では、飽和湿空気に平衡した多孔質材料であっても、すべての空隙が液水で満たされることはないので、平衡含水率の測定を相対湿度98%以下（測定1）と高含水率域（測定2）に分割して行い、試験体内の鉛直方向の含水率分布を測定し、含水率－水分化学ポテンシャル関係を得た。

ここで、自由水基準の水分化学ポテンシャルは式3.6.1で表される。

$$\psi = e^{\frac{\mu}{R_v T}} \quad (3.6.1)$$

ここで 水分化学ポテンシャル $\mu = R_v T \ln(\phi)$ [J/kg]

R_v : 水蒸気のガス定数 [J/kmol K] = R/M_v = 461.643

R : 一般ガス定数 [J/kmol K] = 8316.96 M_v : 水の分子量 [kg/kmol] = 18.016

ϕ : 相対湿度 P_v/P_{vs} [nd] P_v : 水蒸気圧 [Pa]

P_{vs} : 飽和水蒸気圧 [Pa] T : 温度 [K]

・ 測定1（低含水率域）

低含水率域の測定では、乾燥した試験体を、一定の湿り空気（水蒸気を含んだ空気）中に置き、湿り空気と試験体内の水分とを平衡させ、一定量の水分が材料内に保持されときの含水率である体積含水率と水分化学ポテンシャルとの関係を測定した。

測定は約 20×20×5(mm)のポーラスコンクリート試験体を用いて実験を行った。使用したポーラスコンクリートの種類は保水性能が期待できる 8 号 15%(30)、8 号 25%(30)、8 号 30%(46)、8 号 35%(30)の 4 種類である。

23℃に設定した恒温恒湿室内で、デシケータ法⁹⁾によって測定した。図 3.6.1 のようにフラスコの中に飽和塩水溶液を入れ、試験体をナイロン糸でつるし、ゴム栓で密封し、定期的に試験体の質量を計測し、試験体の質量の変化が無くなる（平衡状態）まで計測を行った。飽和塩水溶液と平衡した湿り空気と平衡状態に達した試験体の質量と絶乾質量から体積含水率を算出し、式 3.6.1 から水分化学ポテンシャルと体積含水率の関係（平衡含水率）を得た。なお、計測間隔は 24～48 時間とし、1 種類の試験つき 2 本ずつ計測を行った。使用した飽和塩水溶液を表 3.6.1 に示す。

表 3.6.1 飽和塩水溶液と相対湿度

飽和塩種類	化学式	相対湿度	溶解重量	
			水(ml)	溶媒(g)
塩化マグネシウム六水和物 Magnesium Chloride	MgCl ₂ 6H ₂ O	33.07%±0.18%	150	300.6
塩化ナトリウム Sodium Chloride				
硝酸カリウム Potassium Nitrate	KNO ₃	93%	150	39.6
硫酸カリウム Potassium Sulfide				
	K ₂ SO ₄	97.59%±0.53%	150	21.6

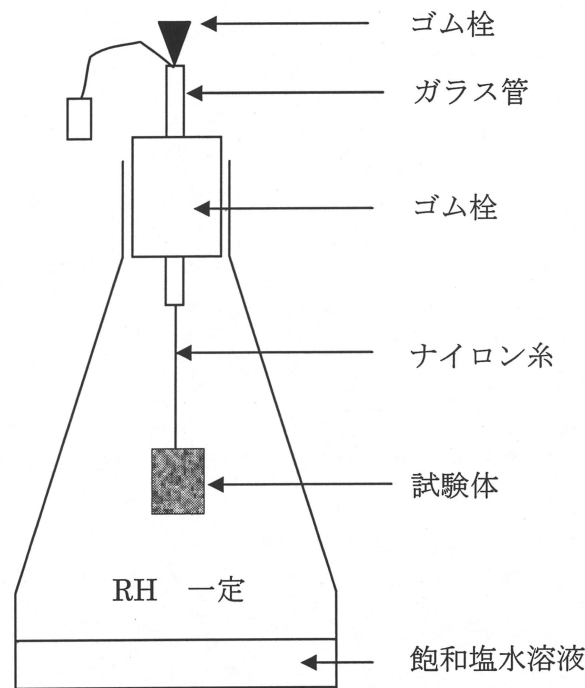


図 3.6.1 デシケータ法

・測定 2（高含水率域）

40×40×200(mm)のポーラスコンクリート試験体を用いて実験を行った。使用したポーラスコンクリートの種類は保水性能が期待できる 8 号 15%(30)、8 号 20%(30)、8 号 25%(30)、8 号 30%(46)、8 号 35%(30)の 5 種類である。

試験体が下端から吸水した水分が試験体表面から蒸発しないように試験体の側面にアルミテープを巻き、上端はポリエチレン袋で断湿した。図 3.6.2 のように 23℃に設定した恒温恒湿室内で試験体底部を 20mm の精製水で常に浸水し、試験体内の液水の移動がほぼなくなる 72 時間つけておいた 8 号 30%(46)は 2 ヶ月間。水位を常に一定にするために、試験体を載せたステンレスパットからの排水量より多い量の水分を給水した。定常状態になった試験体を精製水から取り出し、下端から 20mm 刻みに切断して、水を含んだ各々の質量を測定した。それらを 80℃に設定した乾燥機で 24 時間乾燥させ、絶乾状態にし、絶乾質量を測定した。測定した吸水質量と絶乾質量から含水率を求めた。

空隙内の湿り空気が飽和し、温度分布がない条件下での鉛直方向一次元の水分収支式は、気相水分の容量を無視すると、式 3.6.2 のように表すことができる。

$$\frac{\partial \phi \rho_w}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\mu l} \left(\frac{\partial \mu}{\partial z} - g \right) \right) \quad (3.6.2)$$

ここで、 ψ : 含水率 (%) μ : 水分化学ポテンシャル (J/kg)
 t : 時間 (s) z : 水面からの高さ (mm)
 g : 重力加速度 (m/s^2)

定常状態に達した材料内の水分化学ポテンシャルの分布は、式 3.6.3 で表すことができる。

$$\mu = -g z \quad (3.6.3)$$

この水面からの高さ z と水分化学ポテンシャルの関係と測定した材料の含水率分布から、体積含水率と水分化学ポテンシャルの関係（平衡含水率）を得た。

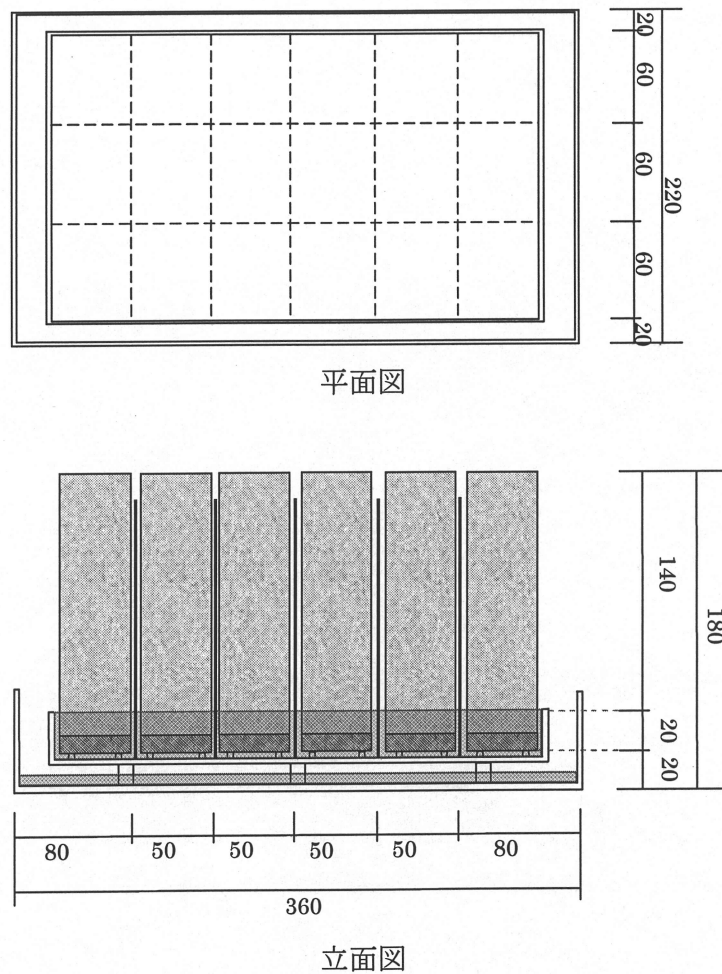


図 3.6.2 高含水率域測定方法

3.6.2 測定結果

・測定1（低含水率域）

図 3.6.3～図 3.6.6 に平衡含水率低含水率域の測定結果を示す。結果は、2 本の試験体の測定結果とその平均値で示す。また、図 3.6.7～図 3.6.11 に体積含水率と水分化学ポテンシャルの関係を示す。水分化学ポテンシャルと相対湿度の関係は式 3.6.1 より算出したものを表 3.6.2 に示す。同一種の 2 本の試験体の体積含水率誤差は最大 $0.001(\text{m}^3/\text{m}^3)$ 程度であり、測定結果に大きな誤差はみられなかった。図 3.6.11 から空隙率が低い試験体の体積含水率が高いという傾向が得られた。

表 3.6.2 相対湿度と水分化学ポテンシャルの関係

相対湿度(%)	水分化学ポテンシャル(J/kg)
33	-1.5158×10^5
75	-3.8934×10^4
93	-9.8214×10^3
97.5	-3.4615

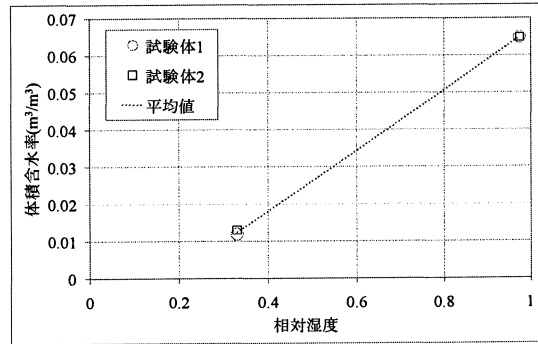
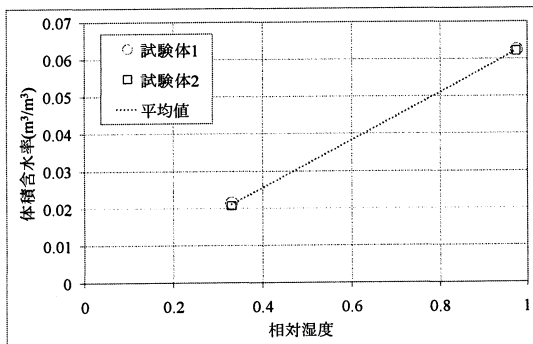


図 3.6.3 8号 15%(30) 体積含水率－相対湿度

図 3.6.4 8号 25%(30)体積含水率－相対湿度

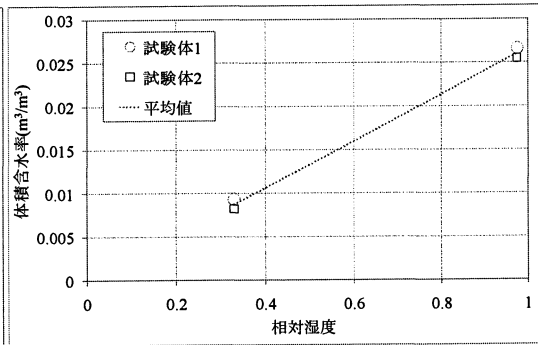
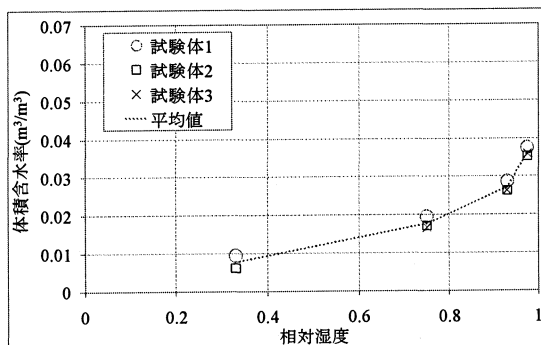


図 3.6.5 8号 30%(46) 体積含水率－相対湿度

図 3.6.6 8号 35%(30)体積含水率－相対湿度

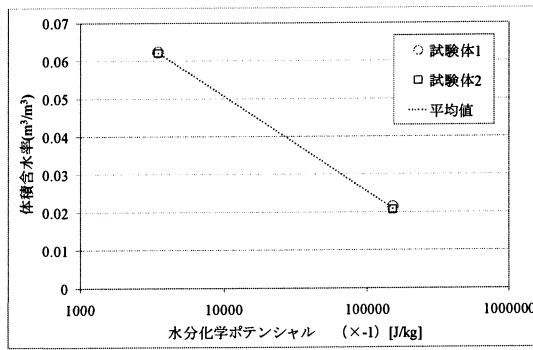


図 3.6.7 8号 15%(30)

体積含水率－水分化学ポテンシャル関係

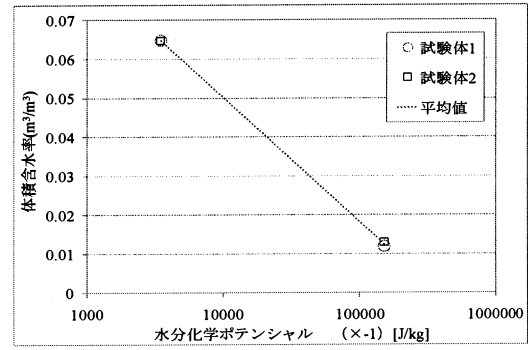


図 3.6.8 8号 25%(30)

体積含水率－水分化学ポテンシャル関係

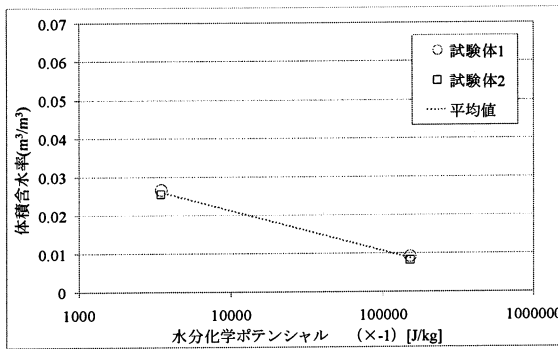


図 3.6.9 8号 30%(46)

体積含水率－水分化学ポテンシャル関係

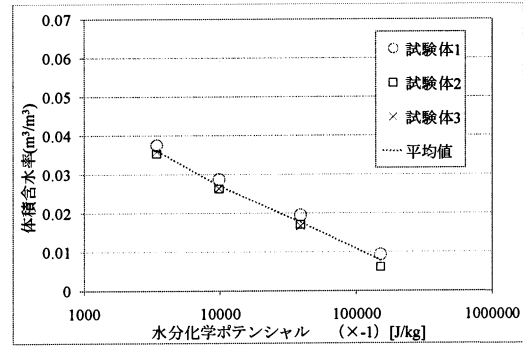


図 3.6.10 8号 35%(30)

体積含水率－水分化学ポテンシャル関係

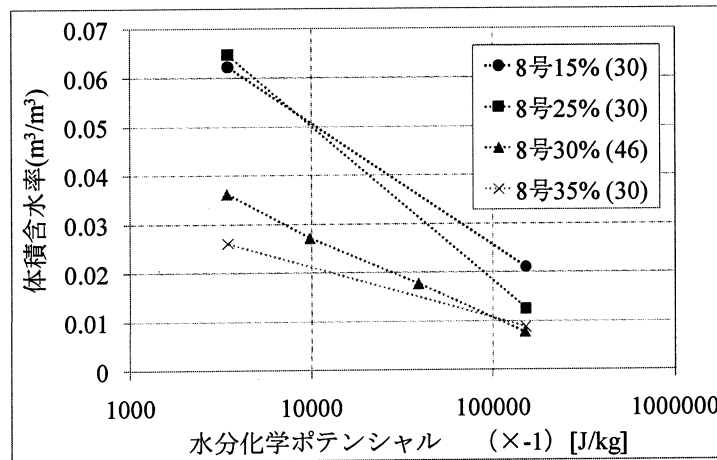


図 3.6.11 低含水率域の水分化学ポテンシャル－体積含水率関係

・測定2（高含水率域）

図3.6.12～図3.6.18に平衡含水率高含水率域の測定結果を示す。結果は、2本の試験体の測定結果のプロットで示す。水面からの高さのプロットは30、50、70、90、110、130mmであり、それぞれ試験体を20mm間隔に切断したときの中心高さを採用した。ただし、水面からの高さ10mmのときは、試験体を切断した際、液水が重力により流出し、正確な含水率を測定できないためプロットから外すとする。

図3.6.12～図3.6.17より測定結果は底からの高さが高くなるにつれて体積含水率が低くなる傾向となった。8号15%(30)と8号25%(30)の結果について水面からの高さが110mmのときの体積含水率が130mmのときより低い結果となった。これは、実験開始前に乾燥させた試験体の温度が十分低下する前に実験を開始したことが原因と考えられる。

図3.6.18は全ての試験体の体積含水率を比較した図である。試験体の空隙率が低い程体積含水率が高くなる傾向にあり、水面からの高さが50～70mmのときに顕著に表れていた。2ヶ月間浸水させた8号30%は水面からの高さが90mmより高い位置で72時間浸水させた他の試験体より体積含水率が高くなった。これは、8号30%(46)が平衡状態に近い状態にあると考えられるが、水面近くの含水率が低い結果となった。

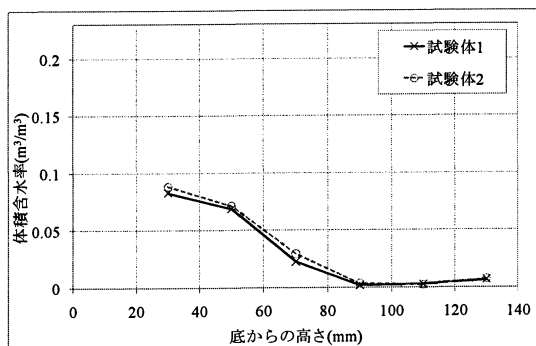


図 3.6.12 8号15%(30)

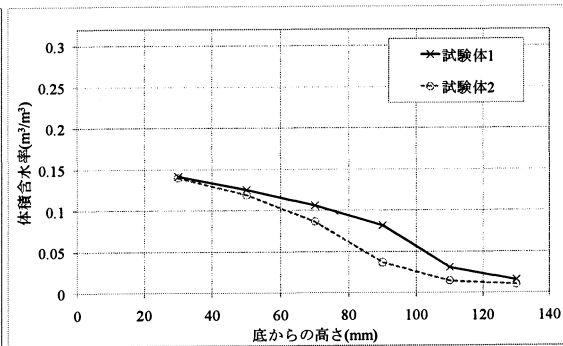


図 3.6.13 8号20%(30)

底からの高さ－水分化学ポテンシャル関係 底からの高さ－水分化学ポテンシャル関係

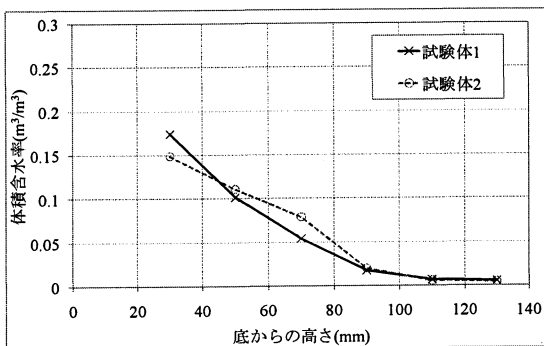


図 3.6.14 8号25%(30)

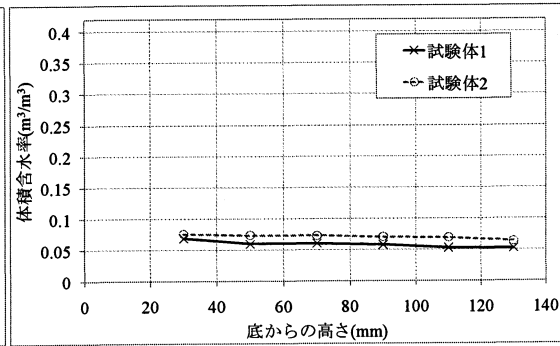


図 3.6.15 8号30%(46)

底からの高さ－水分化学ポテンシャル関係 底からの高さ－水分化学ポテンシャル関係

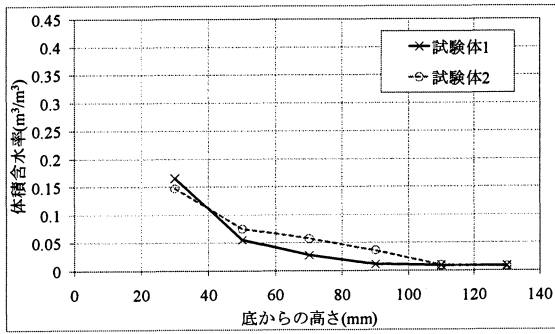


図 3.6.16 8号 35%(30)

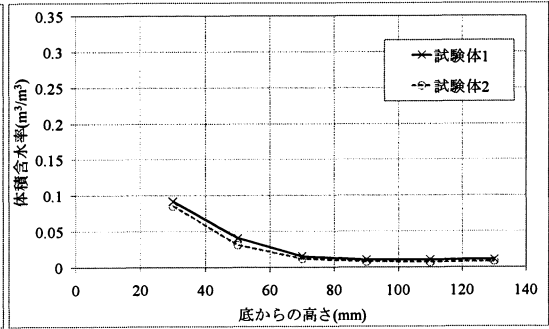


図 3.6.17 7号 25%(30)

底からの高さ－水分化学ポテンシャル関係 底からの高さ－水分化学ポテンシャル関係

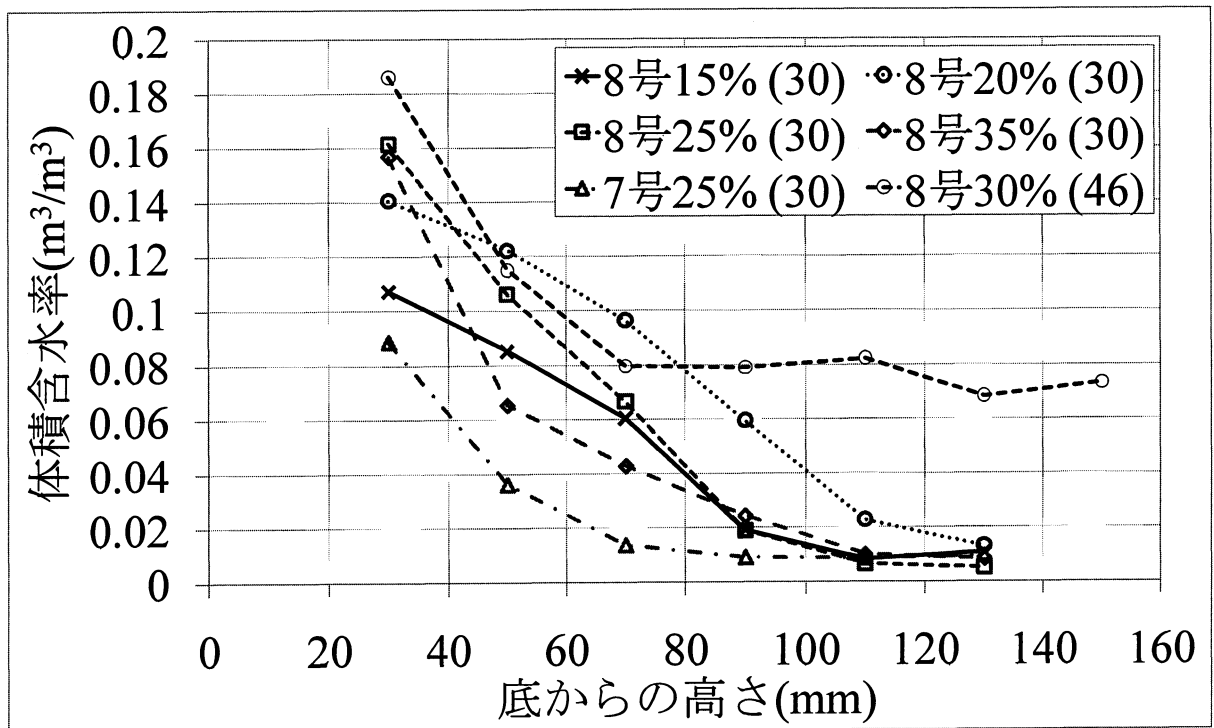


図 3.6.18 全ての試験体の底からの高さ－水分化学ポテンシャル関係

3.6.3 平衡含水率の関数近似

低含水率域と高含水率域の測定結果をもとに平衡含水率と水分化学ポテンシャル関係の関数近似を行う。平衡含水率と水分化学ポテンシャル関係の関数近似においては近似式の関数形を式3.6.4のように定め、水分化学ポテンシャル μ が $b_0 \sim b_3$ の各境界で関数が連続であり、かつ全ての境界で、勾配が一致するように係数を同定した。

図3.6.19～図3.6.25に試験体各種の平衡含水率の近似曲線と実験の測定結果を示した。図の近似式は式3.6.4に、式中の係数値は表3.6.3に示した。

$$\begin{cases} \phi = 0 & (\mu < b_0) \\ \phi = a_0 \ln(-\mu) + a_1 + a_2(-\mu)^{a_3} & (b_0 \leq \mu < b_1) \\ \phi = a_4(-\mu)^{a_5} + a_6 & (b_1 \leq \mu < b_2) \\ \phi = a_7(\ln(-\mu) - \ln(-b_3))^{a_8} + \Phi_0 & (b_2 \leq \mu < b_3) \\ \phi = \Phi_0 & (b_3 \leq \mu) \end{cases} \quad (3.6.4)$$

表 3.6.3 平衡含水率の近似式の係数値

	8号15%(30)	8号20%(30)	8号25%(30)	8号30%(46)	8号35%(30)	7号25%(30)
a ₀	2.09E-03	1.95E-02	1.45E-04	5.66E-01	-1.15E-03	5.66E-05
a ₁	7.24E-02	3.56E-01	7.61E-02	3.87E+02	2.97E-02	2.40E-02
a ₂	-3.98E-03	-2.70E-01	-1.34E-03	-3.87E+02	-4.09E-08	-1.35E-04
a ₃	2.46E-01	6.33E-02	3.18E-01	1.46E-03	1.00E+00	4.08E-01
a ₄	8.65E-03	7.53E-03	1.25E-02	2.08E-02	2.07E-02	4.78E-03
a ₅	-1.22E+00	-1.67E+00	-1.36E+00	-1.44E+00	-1.40E+00	-2.07E+00
a ₆	7.02E-02	8.91E-02	7.30E-02	5.60E-02	2.62E-02	2.37E-02
a ₇	-1.35E-06	-2.19E-05	-1.43E-04	-3.59E-04	-1.26E-03	-4.26E-02
a ₈	1.17E+01	1.02E+01	9.15E+00	8.86E+00	8.15E+00	5.32E+00
b ₀	-5.00E+05	-3.50E+05	-3.50E+05	-3.50E+05	-3.50E+05	-3.50E+05
b ₁	-3.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
b ₂	-1.08E-01	-1.56E-01	-1.44E-01	-1.68E-01	-1.44E-01	-1.56E-01
b ₃	-1.00E-02	-1.78E-02	-2.17E-02	-2.65E-02	-2.65E-02	-4.80E-02

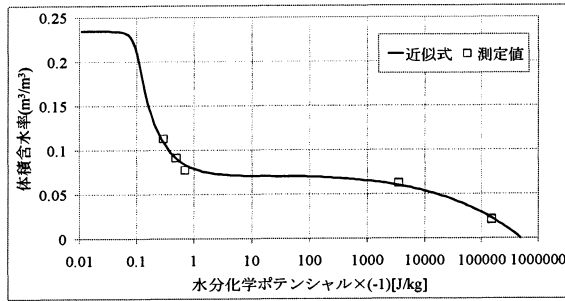


図 3.6.19 8号 15%(30)

水分化学ポテンシャル－体積含水率関係

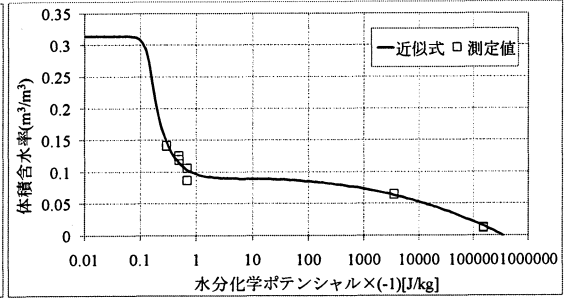


図 3.6.20 8号 20%(30)

水分化学ポテンシャル－体積含水率関係

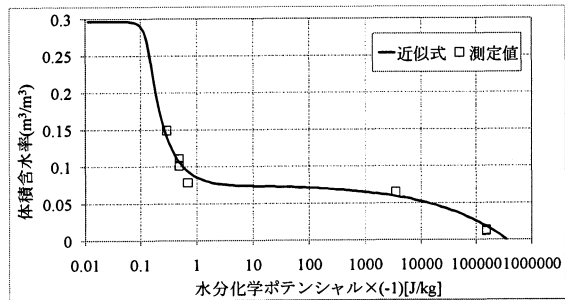


図 3.6.21 8号 25%(30)

水分化学ポテンシャル－体積含水率関係

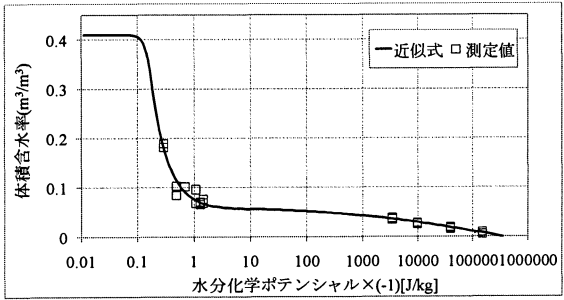


図 3.6.22 8号 30%(46)

水分化学ポテンシャル－体積含水率関係

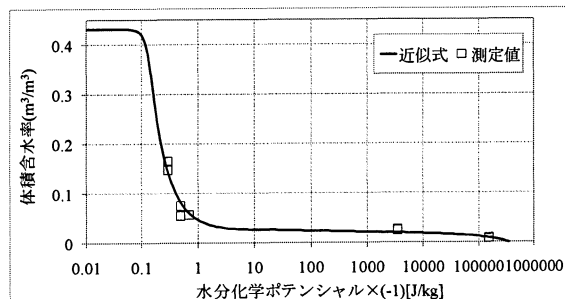


図 3.6.23 8号 35%(30)

水分化学ポテンシャル－体積含水率関係

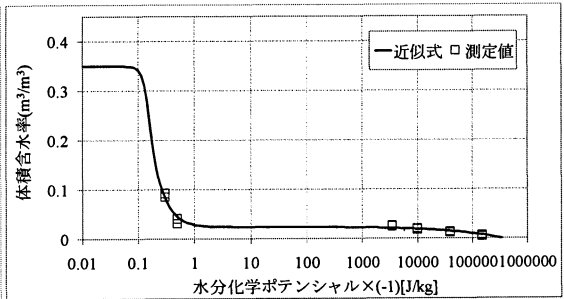


図 3.6.24 7号 25%(30)

水分化学ポテンシャル－体積含水率関係

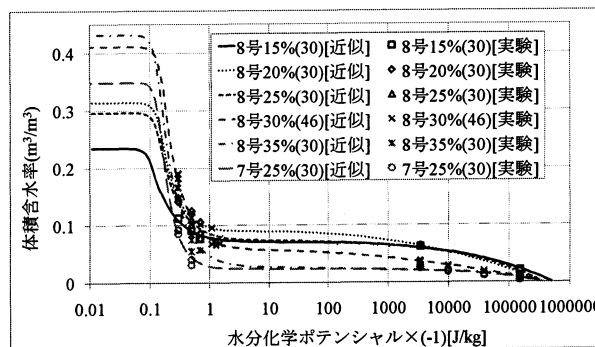


図 3.6.25 全試験体の水分化学ポテンシャル－体積含水率関係

3.7 液相水分伝導率

3.7.1 測定方法

液相水分の移動が支配的な高含水率域の水分伝導率を測定した。平衡含水率測定と同様に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、その結果から水分伝導率を同定した。約 40×40×180(mm)のポーラスコンクリート試験体を用いて実験を行った。使用したポーラスコンクリートの種類は保水性能が期待できる 8 号 15%(30)、8 号 20%(30)、8 号 25%(30)、8 号 30%(46)、8 号 35%(30)、7 号 25%(30)の 6 種類である。ここで、8 号 30%(46)の試験体のみ約 40×40×180(mm)の試験体を使用した。

測定方法は、3.6 の平衡含水率の高含水率域と同様の自由吸水実験を行った。自由吸水を行った試験体を一定の時間で取り出し、鉛直方向の体積含水率分布の経時変化を測定した。このときの取り出した時間は試験体の種類によって変化させた。(表 3.6.1)

表 3.6.1 浸水時間

試験体種類	浸水時間							
8号15%(30) 8号35%(30)	0	0.5h	1h	2h	4h	8h	16h	32h
8号20%(30) 8号25%(30) 7号25%(30)	0.08h	0.25h	1h	3h	9h	24h	48h	72h
8号30%(46)	6h	12h	36h	60h	132h			

3.7.2 測定結果

図 3.7.1～図 3.7.9 に 8 号 15%(30)試験体の測定結果を示す。時間が経つにつれ水面からの高さ 40～90mm で体積含水率が高くなった。

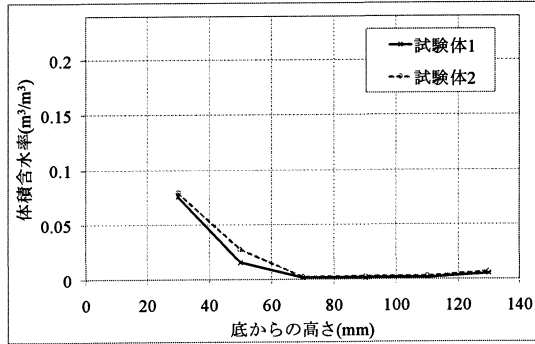


図 3.7.1 実験開始から 0.25h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

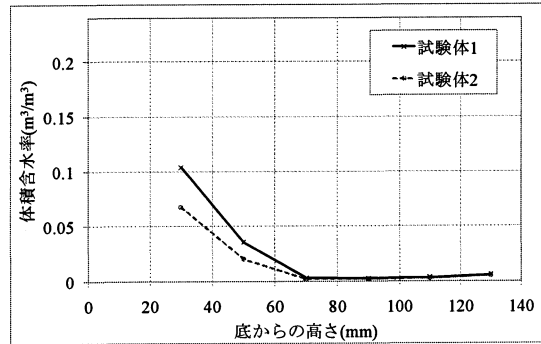


図 3.7.2 実験開始から 0.5h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

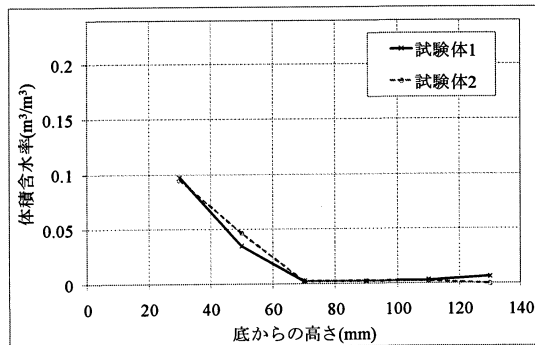


図 3.7.3 実験開始から 1h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

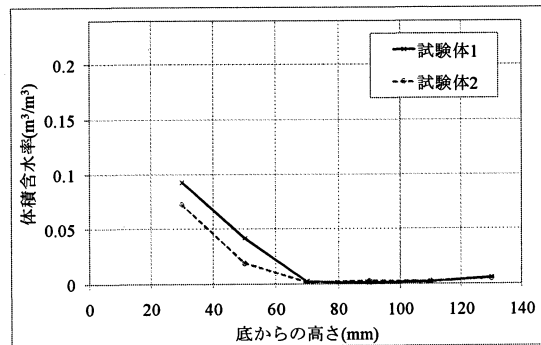


図 3.7.4 実験開始から 2h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

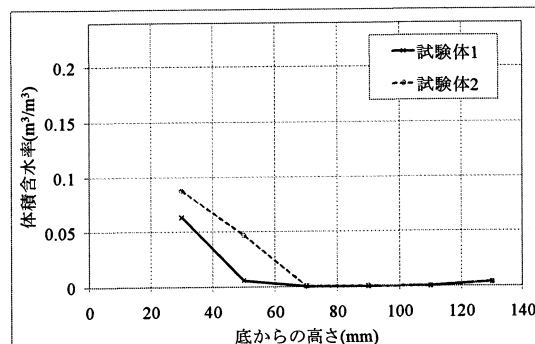


図 3.7.5 実験開始から 4h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

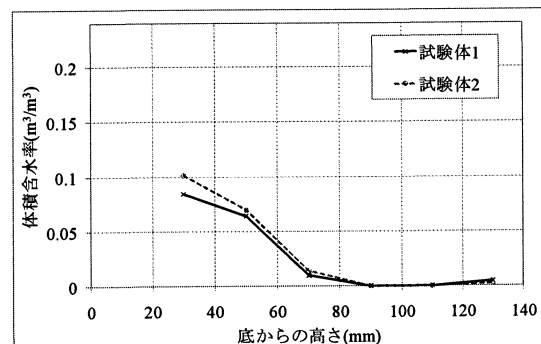


図 3.7.6 実験開始から 8h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

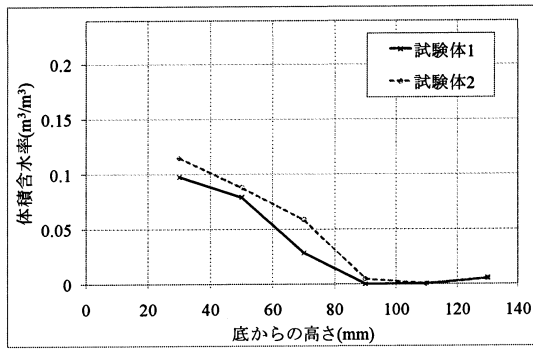


図 3.7.7 実験開始から 16h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

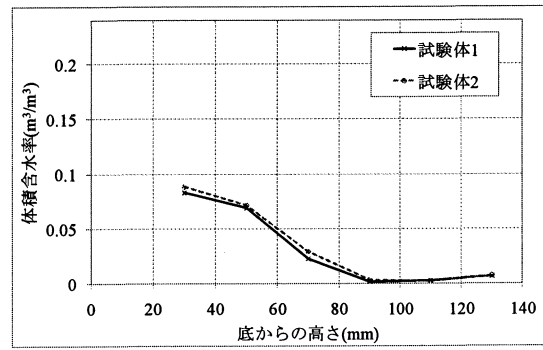


図 3.7.8 実験開始から 32h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

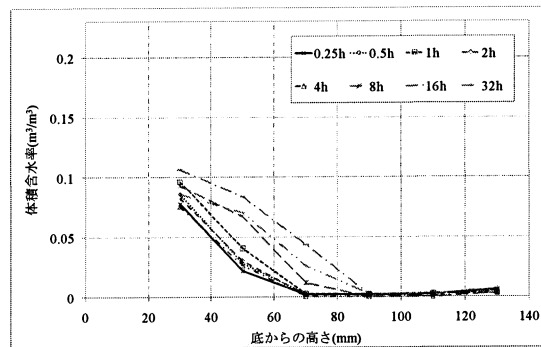


図 3.7.9 8 号 15%(30)試験体の水面からの高さ－体積含水率関係

図 3.6.10～図 3.6.17 に 8 号 20%(30)試験体の測定結果を示す。時間が経つにつれ全ての高さにおいて体積含水率が高くなった。特に水面からの高さ 70mm では、実験開始から 48 時間後の体積含水率が約 $0.1\text{m}^3/\text{m}^3$ 増加した。

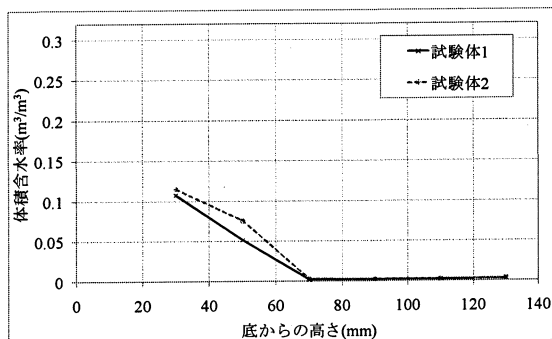


図 3.7.10 実験開始から 0.08h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

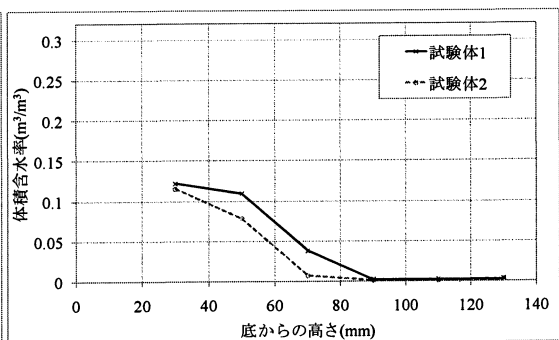


図 3.7.11 実験開始から 0.25h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

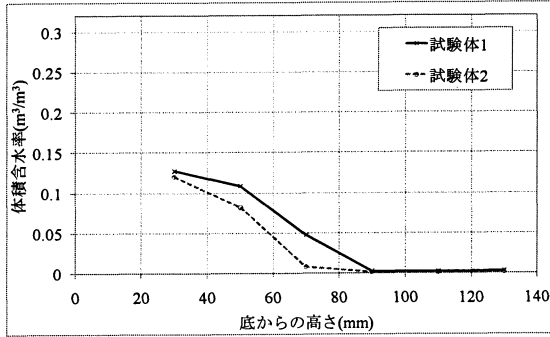


図 3.7.12 実験開始から 1h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

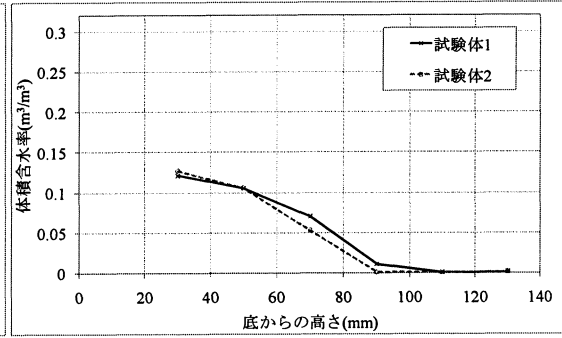


図 3.7.13 実験開始から 3h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

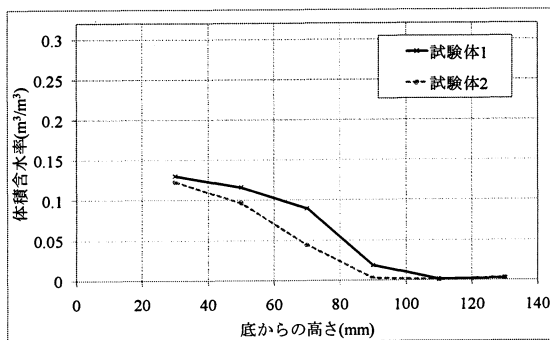


図 3.7.14 実験開始から 9h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

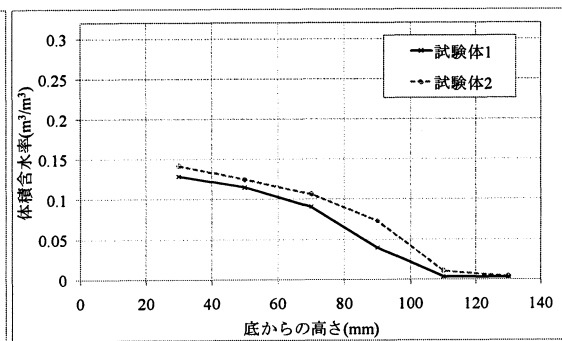


図 3.7.15 実験開始から 24h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

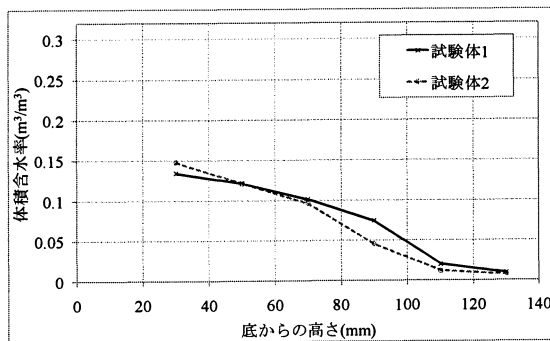


図 3.7.16 実験開始から 48h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

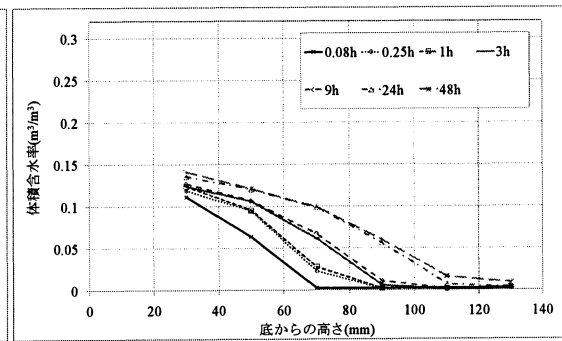


図 3.7.17 8号 20%(30)試験体の
水面からの高さ－体積含水率関係

図 3.7.18～図 3.7.25 に 8 号 25%(30)試験体の測定結果を示す。時間が経つにつれ全ての高さにおいて体積含水率が高くなった。同時間の 2 本の試験体の体積含水率誤差は 24 時間以外ほぼ一致していた。

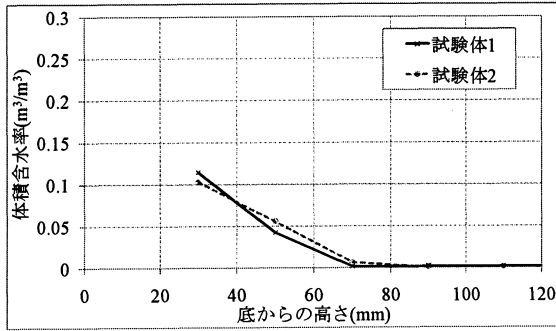


図 3.7.18 実験開始から 0.08h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

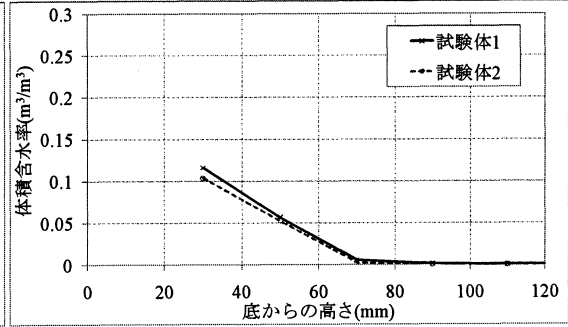


図 3.7.19 実験開始から 0.25h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

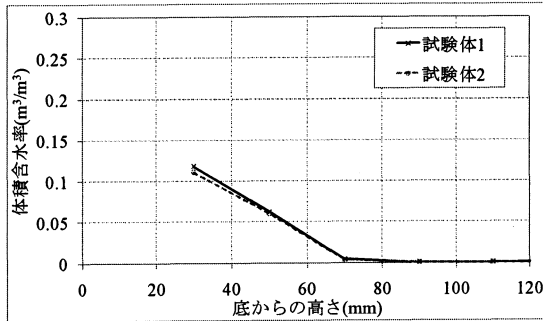


図 3.7.20 実験開始から 1h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

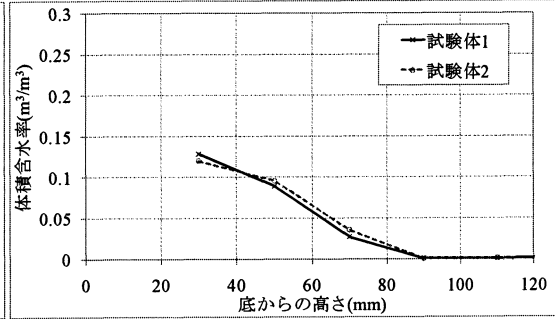


図 3.7.21 実験開始から 3h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

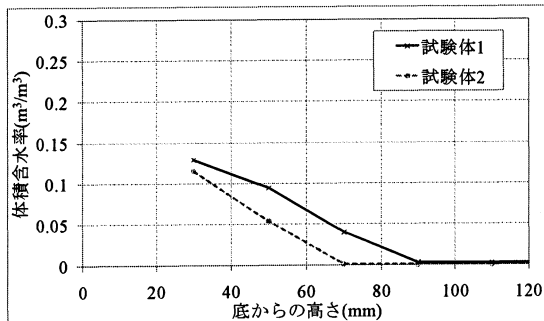


図 3.7.22 実験開始から 9h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

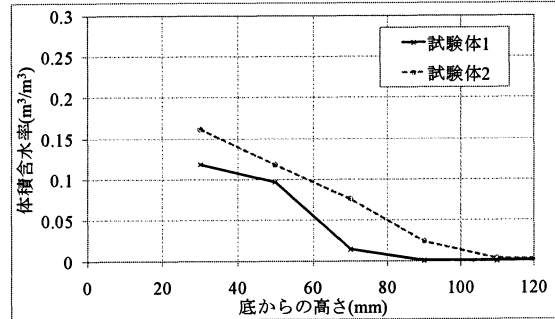


図 3.7.23 実験開始から 24h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

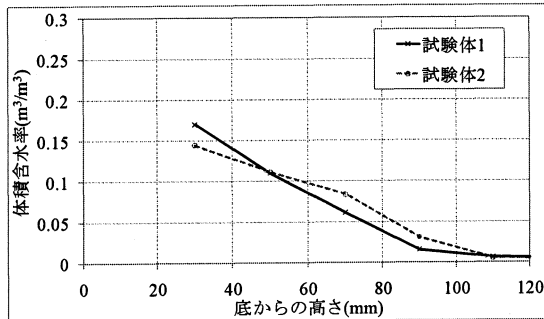


図 3.7.24 実験開始から 48h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

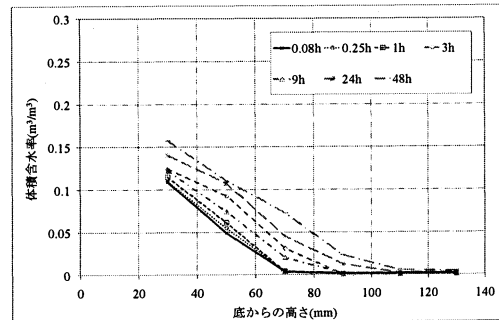


図 3.7.25 8号 25%(30)試験体の
水面からの高さ一体積含水率関係

図 3.7.26～図 3.7.31 に 8 号 30%(46)試験体の測定結果を示す。同時間の 2 本の試験体の体積含水率にばらつきがみられた。これは測定方法に改善の余地があると考えられる。また、浸水時間が他の試験体より長かったため、水面からの高さが 100mm 以上のときの体積含水率が他の試験体より高くなった。

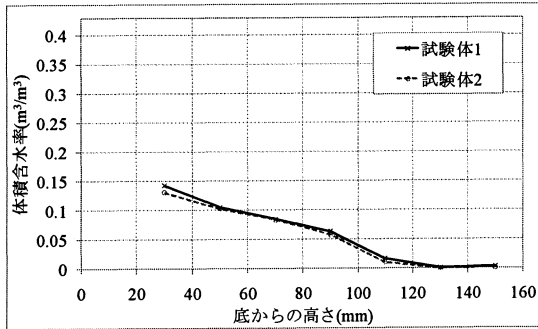


図 3.7.26 実験開始から 6h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

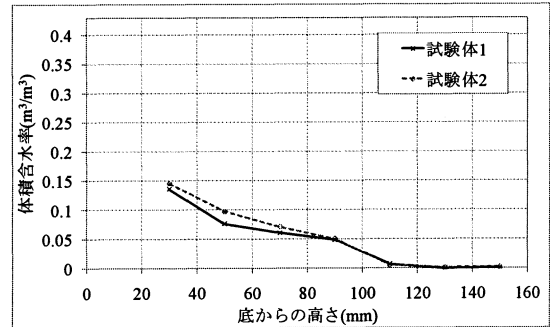


図 3.7.27 実験開始から 12h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

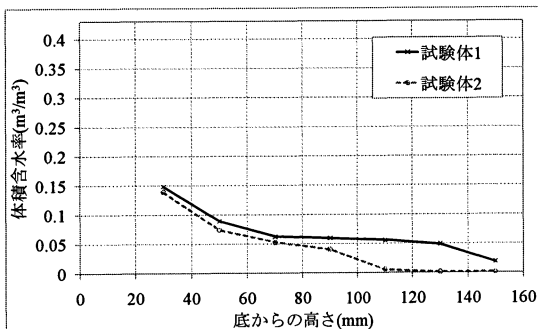


図 3.7.28 実験開始から 36h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

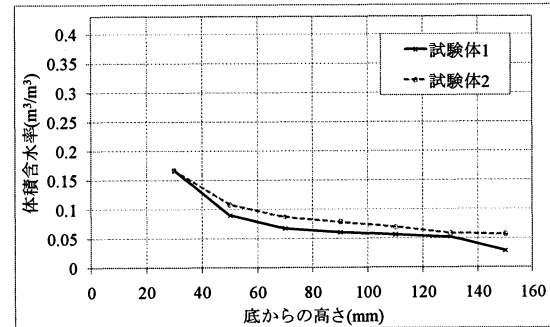


図 3.7.29 実験開始から 60h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

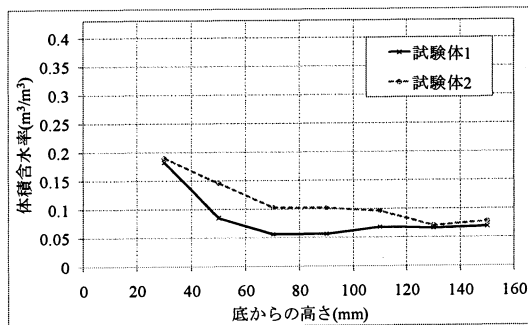


図 3.7.30 実験開始から 132h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

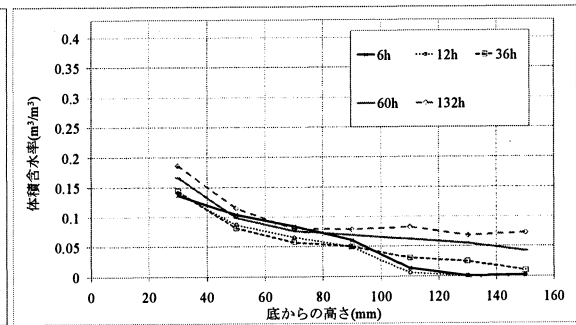


図 3.7.31 8 号 30%(46)試験体の
水面からの高さ－体積含水率関係

図 3.7.32～図 3.6.40 に 8 号 35%(30)試験体の測定結果を示す。時間が経つにつれ、体積含水率が上昇する傾向はみられなかった。図 3.7.40 から試験体内の含水率分布が時間経過に対しあまり変化が見られなかったことから、実験開始間もなく、試験体内が平衡状態に達したと考えられる。

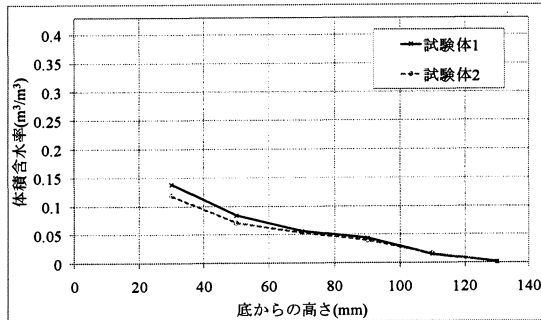


図 3.7.32 実験開始から 0.25h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

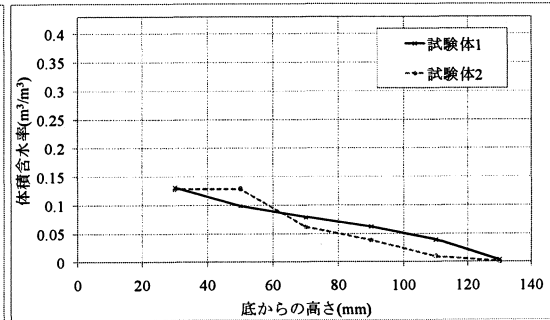


図 3.7.33 実験開始から 0.5h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

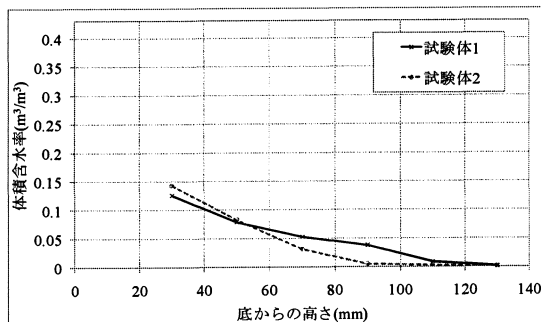


図 3.7.34 実験開始から 1h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

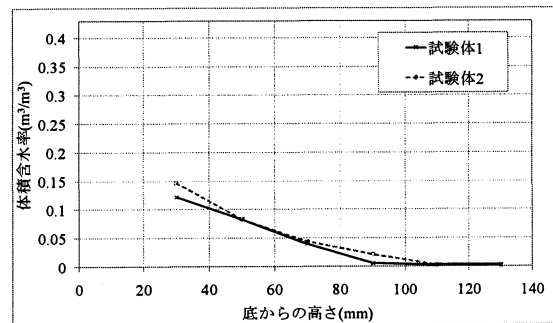


図 3.7.35 実験開始から 2h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

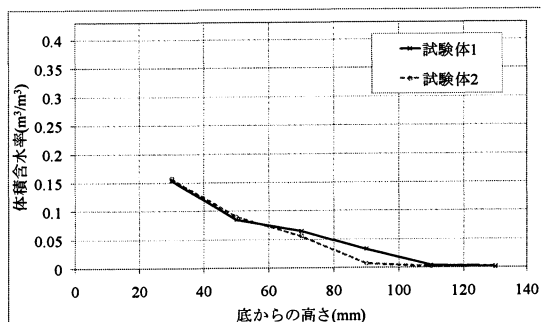


図 3.7.36 実験開始から 4h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

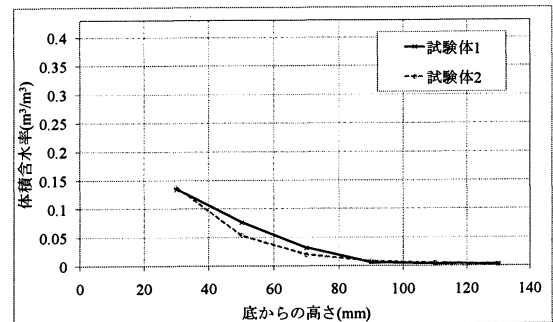


図 3.7.37 実験開始から 8h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

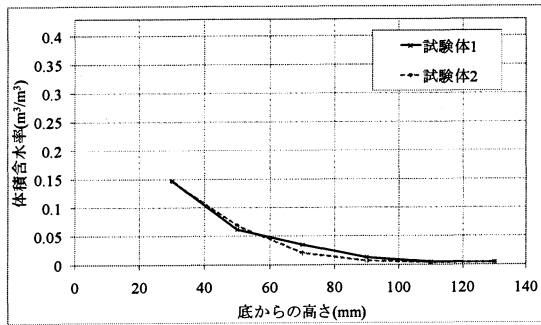


図 3.7.38 実験開始から 16h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

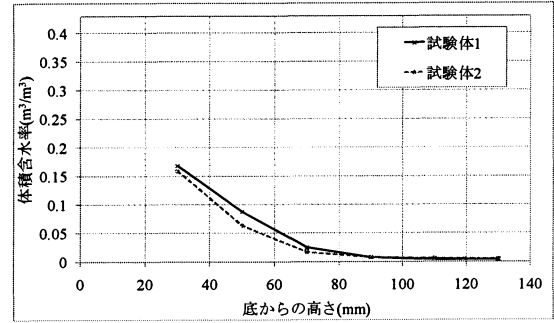


図 3.7.39 実験開始から 32h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

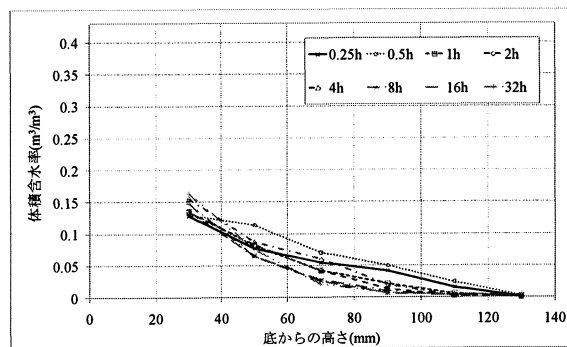


図 3.7.40 8号 35%(30)試験体の水面からの高さ一体積含水率関係

図 3.6.41～図 3.6.48 に 7 号 25%(30)試験体の測定結果を示す。時間が経つにつれ、体積含水率が上昇する傾向はみられ、測定段階に改善の余地があると考えられる。また、試験体の調合の際に、砕石とセメントペーストが均等になっていないことが原因に考えられる。

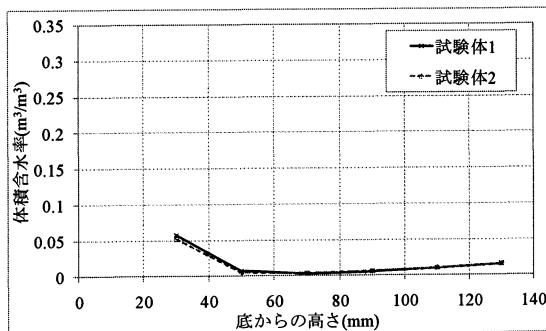


図 3.7.41 実験開始から 0.08h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

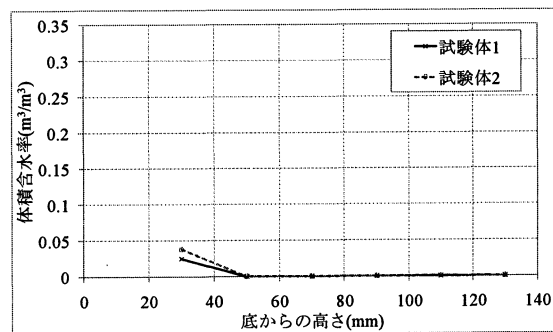


図 3.7.42 実験開始から 0.25h 後の
水面からの高さ一体積含水率関係

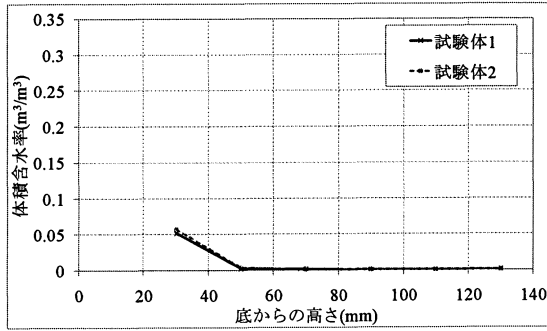


図 3.7.43 実験開始から 1h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

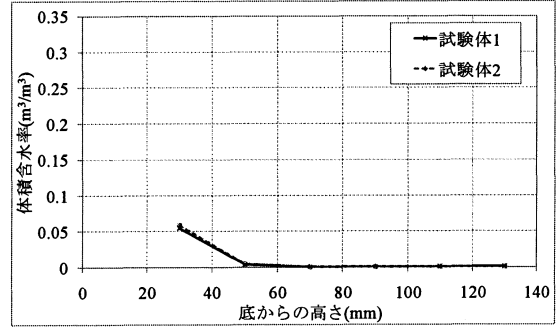


図 3.7.44 実験開始から 3h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

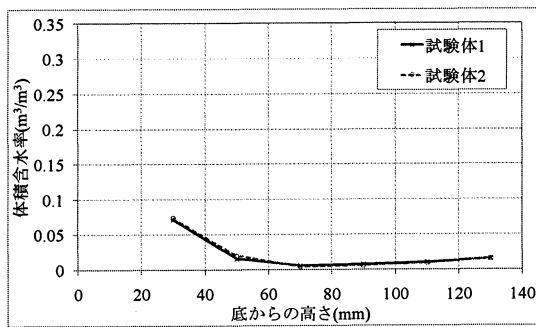


図 3.7.45 実験開始から 9h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

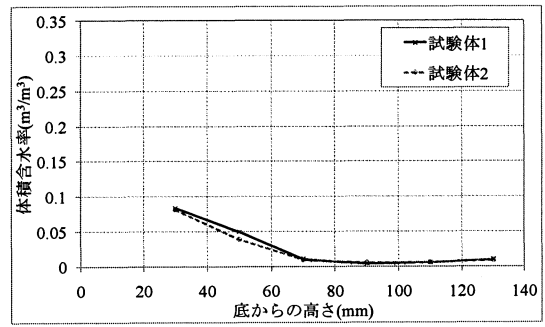


図 3.7.46 実験開始から 24h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

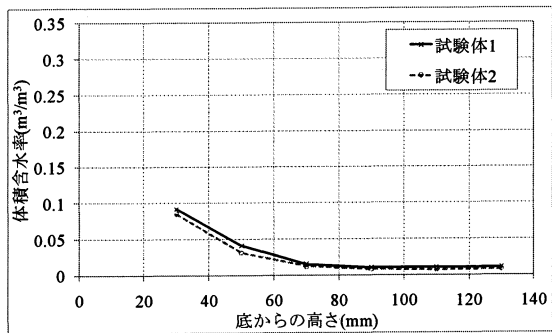


図 3.7.47 実験開始から 48h 後の
水面からの高さ－体積含水率関係

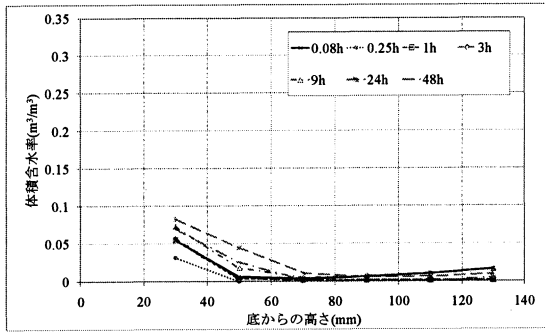


図 3.7.48 7号 25%(30)試験体の
水面からの高さ－体積含水率関係

3.7.3 液相水分伝導率の同定方法

液相水分伝導率は、式 3.7.1 に示す熱水分同時移動方程式¹⁰⁾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がほぼ一致するように同定した。ここで、試験室内温度が一定値であることから、試験体内温度が一樣であるとし、気相水分伝導率については、ポーラスコンクリートは空隙径の大きい連続空隙が空隙の大部分を占めることから、拡散の抵抗が小さいと考え、式 3.7.2 に示す水蒸気拡散係数の理論式から D_v の値を用いた。

$$\begin{aligned} \text{熱収支式} \quad c\rho \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left((\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial z} \right) \\ \text{水分収支式} \quad \rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda'_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda'_\mu \left(\frac{\partial \mu}{\partial z} + g \right) \right) \end{aligned} \quad (3.7.1)$$

$$\text{水蒸気拡散係数} \quad D_v = \frac{\psi_0 - \psi}{\tau} 2.56 \times 10^{-5} (T/298.2)^{1.75} \quad (3.7.2)$$

ここで、 z ：水面からの高さ[mm] g ：重力加速度[m/s²]
 ρ_w ：液水の密度[kg/m³] a ：日射吸収率[-]
 c ：比熱[J/kg K] r ：気化熱[J/kg]
 t ：時間[s] T ：温度[K]
 λ ：熱伝導率[W/m K] λ'_T ：温度勾配に対する水分伝導率[kg/m s K]
 λ'_{Tg} ：温度勾配に対する気相水分伝導率[kg/m s K]
 λ'_μ ：水分化学ポテンシャル勾配に対する水分伝導率[kg/m s (J/kg)]
 $\lambda'_{\mu g}$ ：水分化学ポテンシャル勾配に対する気相水分伝導率[kg/m s (J/kg)]
 μ ：水分化学ポテンシャル[J/kg] ρ ：密度[kg/m³]
 ρ_w ：液水の密度[kg/m³] ψ ：含水率[m³/m³]
 ψ_0 ：絶乾空隙率[m³/m³]

3.7.4 液相水分伝導率の同定結果・関数近似

図3.7.49～図3.7.54に同定した試験体の液相水分伝導率、式3.7.3にそれに対応した近似式、表3.7.2に近似式の係数値を示した。ただし、8号30%(46)の近似式は式3.7.4に示す。また、平衡含水率や液相水分伝導率の近似曲線と熱水分同時移動方程式の計算結果から水分伝導率測定実験の結果の含水率がほぼ一致するように同定した。

計算結果と実験結果を図3.7.55～図3.7.60に示した。図の記号は実験結果、曲線は計算結果を示す。8号15%(30)、8号20%(30)、8号25%(30)、8号30%(46)試験体の計算結果は実験結果と概ね一致していることから、同定した液相水分伝導率の値は妥当であるといえる。しかし、8号35%(30)と7号25%(30)試験体の計算結果は実験結果と一致し、液相水分伝導率の値は同定できなかった。これは、実験結果において、実験開始後間もなく試験体内が平衡状態となったことが原因と考えられる。

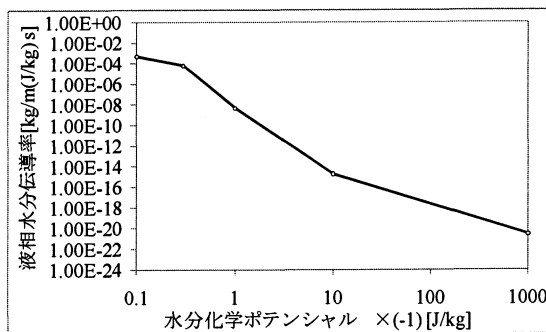


図 3.7.49 8号15%(30)試験体
液相水分伝導率近似曲線

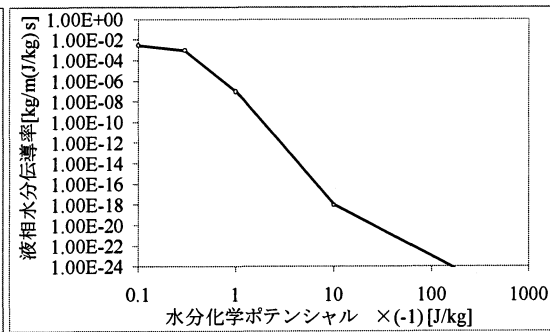


図 3.7.50 8号20%試験体(30)
液相水分伝導率近似曲線

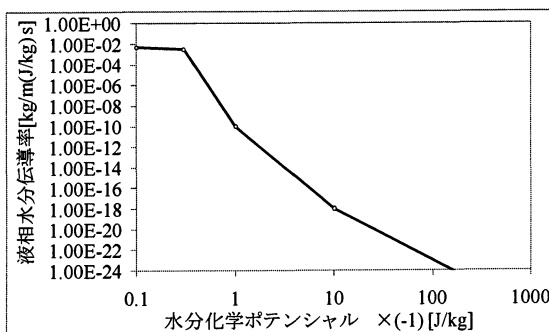


図 3.7.51 8号25%試験体(30)
液相水分伝導率近似曲線

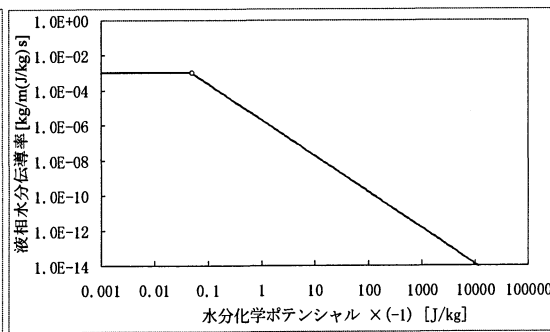


図 3.7.52 8号30%試験体(46)
液相水分伝導率近似曲線

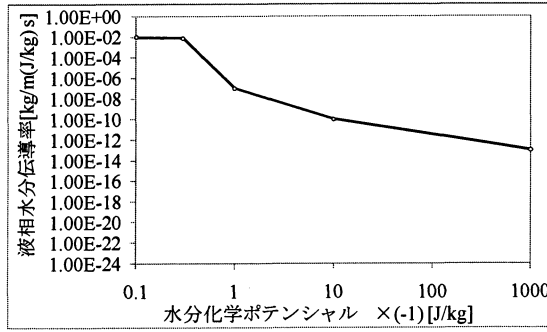


図 3.7.53 8号 35%試験体(30)
液相水分伝導率近似曲線

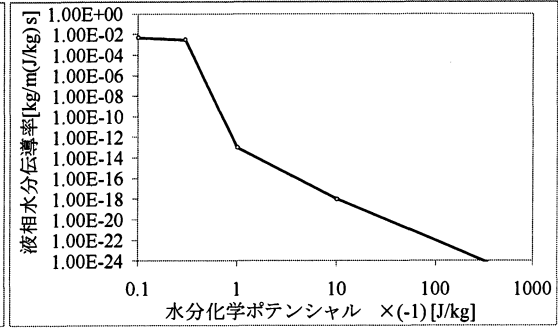


図 3.7.54 7号 25%試験体(30)
液相水分伝導率近似曲線

液相水分伝導率近似曲線に対応した近似式

$$\left\{ \begin{array}{ll} \log_{10}(\lambda'_{\mu}) = A_1 \log_{10}(-\mu) + A_2 & (\mu < B_1) \\ \log_{10}(\lambda'_{\mu}) = A_3 \log_{10}(-\mu) + A_4 & (B_1 \leq \mu < B_2) \\ \log_{10}(\lambda'_{\mu}) = A_5 \log_{10}(-\mu) + A_6 & (B_2 \leq \mu < B_3) \\ \log_{10}(\lambda'_{\mu}) = A_7 \log_{10}(-\mu) + A_8 & (B_3 \leq \mu < B_4) \\ \log_{10}(\lambda'_{\mu}) = A_9 & (B_4 \leq \mu) \end{array} \right. \quad (3.7.3)$$

表 3.7.2 液相水分伝導率曲線の近似式の係数値

	8号15% (30)	8号20% (30)	8号25% (30)	8号30% (46)	8号35% (30)	7号25% (30)
A ₁	-2.91313132	-5.00000000	-5.00000000	0.00000000	-1.50000000	-5.00000000
A ₂	-11.81969695	-13.00000000	-13.00000000	0.00100000	-8.50000000	-13.00000000
A ₃	-6.38700481	-11.00000000	-8.00000000	-2.05807386	-3.00000000	-5.00000000
A ₄	-8.34582346	-7.00000000	-10.00000000	-5.67822867	-7.00000000	-13.00000000
A ₅	-7.90350520	-7.65000000	-14.29991432	-	-9.37710709	-20.03738218
A ₆	-8.34582346	-7.00000000	-10.00000000	-	-7.00000000	-13.00000000
A ₇	-1.91374057	-1.00000000	-0.46497352	-	-0.20220332	-0.46497352
A ₈	-5.21390285	-3.52290000	-2.76600352	-	-2.20263783	-2.76600352
A ₉	-3.30016227	-2.52287875	-2.30102999	-	-2.00043451	-2.30102999
B ₁	-10	-10	-10	-0.05	-10	-10
B ₂	-1	-1	-1	-	-1	-1
B ₃	-0.3	-0.3	-0.3	-	-0.3	-0.3
B ₄	-0.1	-0.1	-0.1	-	-0.1	-0.1

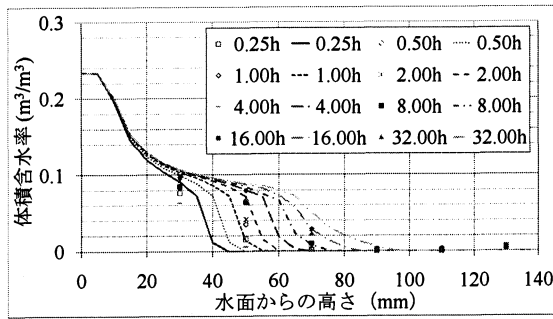


図 3.7.55 8号 15%(30)試験体の含水率推移
実験結果と計算結果

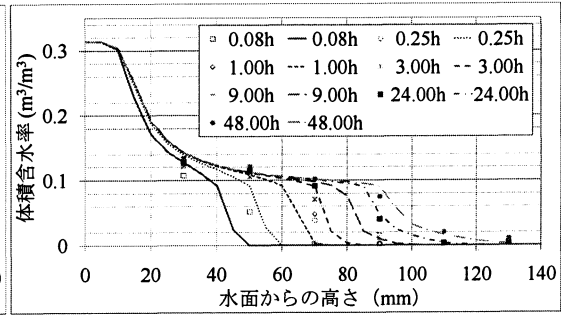


図 3.7.56 8号 20%(30)試験体の含水率推移
実験結果と計算結果

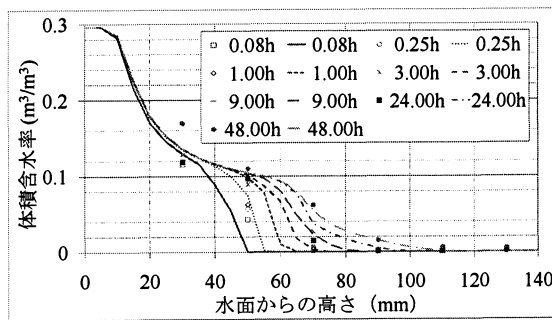


図 3.7.57 8号 25%(30)試験体の含水率推移
実験結果と計算結果

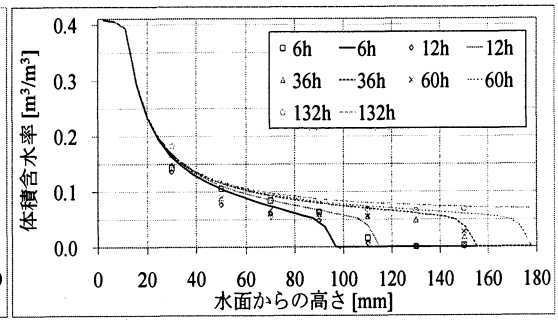


図 3.7.58 8号 30%(46)試験体の含水率推移
実験結果と計算結果

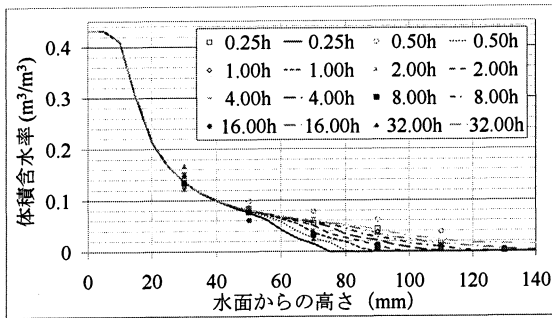


図 3.7.59 8号 35%(30)試験体の含水率推移
実験結果と計算結果

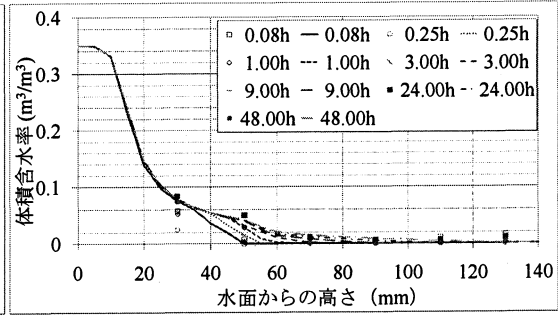


図 3.7.60 7号 25%(30)試験体の含水率推移
実験結果と計算結果

3.8 第3章のまとめ

本章では、透水・保水性能を有するポーラスコンクリート舗装の蒸発冷却効果の把握とその予測を可能とするために、ポーラスコンクリートの熱・水分物性値を測定、同定を行った。

3.3 の空隙率・絶乾密度測定では、絶乾密度が高い程、空隙率が低くなる傾向にあり、絶乾密度は空隙率と比例関係にある結果となった。また、水中重量の測定においては、2ヶ月間浸水測定より真空ポンプ測定の方が、空隙内の空気を抜くことができ、設計空隙率に近い測定を行うことができた。

3.4 の熱伝導率測定では、普通コンクリートと比較したとき、ポーラスコンクリートは空隙を所持する分、普通コンクリートより熱を通しにくい結果となった。また、種々のポーラスコンクリートで比較したとき、空隙率が高い程、熱伝導率が低くなる結果となり、空隙率と熱伝導率は比例の関係にあると言える。

3.5 の日射反射率測定では、空隙が日射反射率に大きく依存しており、空隙率が低い程、日射反射率が高い結果となった。ポーラスコンクリートの日射反射率は普通コンクリートより低く、湿潤状態の時も同様であった。ゆえに、道路舗装を考えたとき湿潤状態にあるポーラスコンクリート舗装は普通コンクリート舗装より日射を吸収し、十分な蒸発冷却が望める。

3.6 の平衡含水率測定では、低含水率域と高含水率域に分割して測定を行った。低含水率域の測定結果は、空隙率が低い試験体の体積含水率が高いという傾向が得られた。高含水率域の測定結果は、底からの高さが高くなるにつれて、体積含水率が低くなる傾向となった。8号15%(30)と8号25%(30)の結果について、水面からの高さが110mmのときの体積含水率が130mmのときより低い結果となった。これは、実験開始前に乾燥させた試験体の温度が十分低下する前に実験を開始したことが原因と考えられる。平衡含水率の関数近似では、水分化学ポテンシャルが全ての値で関数が連続となり、かつ全ての境界で、勾配が一致するように係数が同定できたと言える。

3.7 の液相水分伝導率測定では、8号15%(30)、8号20%(30)、8号25%(30)、8号30%(46)試験体の測定結果は、時間変化に伴い、体積含水率が上昇する傾向がみられた。8号35%(30)と7号25%(30)試験体の測定結果はそのような傾向はみられなかった。これは、実験開始後間もなく試験体内が平衡状態に達したことが考えられる。液相水分伝導率の同定では、8号15%(30)、8号20%(30)、8号25%(30)、8号30%(46)試験体の計算結果は実験結果と概ね一致していることから、同定した液相水分伝導率の値は妥当であるといえる。しかし、8号35%(30)と7号25%(30)試験体の計算結果は実験結果と一致しなかった。これは、実験開始後間もなく、試験体内が平衡状態に達し、液相水分伝導率の値が高くなりすぎたことが原因として考えられる。

第4章

ポーラスコンクリートの 屋外蒸発冷却実験

4.1 はじめに

本章では、第3章と同様の調合で作製したポーラスコンクリートを用いて、屋外蒸発冷却実験を行った。この実験からポーラスコンクリート舗装による水分蒸発冷却の効果を把握する。さらに、本実験で得られた実験結果と熱水分同時移動方程式による数値計算の結果とを比較し、第3章で測定した種々のポーラスコンクリートの水分物性値の妥当性を検討する。

4.2 実験装置

約 $300 \times 300 \times 100\text{mm}$ のポーラスコンクリート試験体をアクリル容器に入れ、その周囲をポリスチレンフォームで断熱し、更にアルミテープによって断湿した。屋外実験の実験設置を図4.2.1に示した。実験装置は試験体下部を浸水させた試験体（図4.2.1(a) 浸水試験体）と、容器底面に貯水せず排水するタイプの試験体（図4.2.1(b) 排水試験体）を用いた。

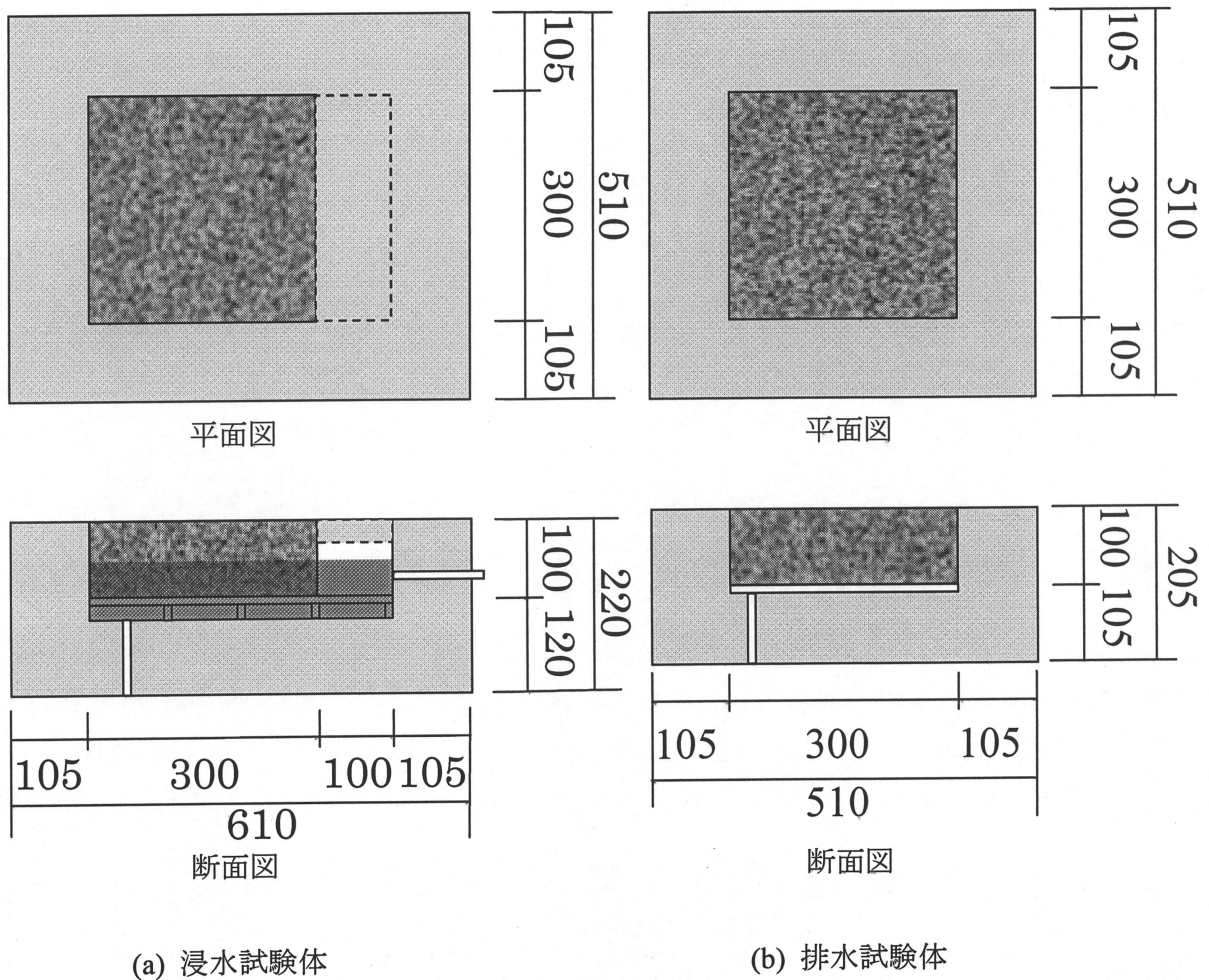


図 4.2.1 実験装置

4.3 実験試料

本実験で用いたポーラスコンクリート試験体は第3章と同様の調合を行った。試験体8号15%、8号25%、8号35%、7号25%を屋外実験に用いた。これら試験体の調合と密度及び絶乾空隙率測定結果は表4.3.1に示す。設計空隙率に比べ、測定した絶乾空隙率は8~15%程度高い値となっているが、これは、設計空隙率には硬化したセメント内の微細な空隙を含まないことと、試験体の打設時の締め固めが十分でないことが原因と考えられる。

表 4.3.1 調合・空隙率・密度

試験体名称	8号15%	8号25%	8号35%	7号25%
設計空隙率 (m^3/m^3)	0.15	0.25	0.35	0.25
設計単位重量 (kg/m^3)				
水	149	100	52	105
セメント	497	335	173	351
砕石	1,482	1,482	1,482	1,455
密度 (kg/m^3)	1,810	1,686	1,556	1,769
絶乾空隙率 (m^3/m^3)	0.305	0.377	0.431	0.349

4.4 測定方法

約 $300 \times 300 \times 100\text{mm}$ のポーラスコンクリート試験体実験装置（浸水試験体と排水試験体）を、日射が常時当たる屋外実験場（三重県津市 三重大学工学部院生棟屋上）に設置した。本実験では、各種ポーラスコンクリートの屋外実験により熱応答を測定する。実験は材料への水分の供給方法として、舗装下部に貯水し毛管現象によって舗装表面の蒸発面へ水分を供給する浸水試験体を用いてポーラスコンクリート舗装表面温度の測定を行った。給水は水道水として、浸水試験体の浸水深さが常時一定となるような給水を行った。

本実験の測定項目は、ポーラスコンクリート試験体温度、浸水温度、外気温度、相対湿度、風速、大気放射および全天日射量等である。また、ポーラスコンクリート試験体の測定箇所は浸水試験体表面温度（孔）[a]、浸水試験体表面温度（外）[b]、浸水試験体底面温度（中央）[c]、水温[d]、水槽底面温度[e]、断熱材底面温度（中央）[f]、排水試験体表面温度（孔）[g]、排水試験体表面温度（外）[h]、排水試験体底面温度（中央）[i]、排水試験体底面温度（西角）

[j]、断熱材底面温度（中央）[k]であり、測定箇所を図 4.4.1 に示した。ポーラスコンクリート試験体表面の熱電対はそれぞれのポーラスコンクリートと同様の調合のセメントを用いて接着した。浸水深さは 50, 60, 70, 80mm とした。図 4.4.2 に実験で用いた試験体(a)と実際の測定の様子(b)を示した。

本実験は、浸水実験と排水実験を行った。浸水実験では、浸水試験体の種々の温度と排水試験体が乾燥状態にある乾燥試験体の種々の温度を測定した。排水実験では、排水試験体を用いて、雨天後を仮定し、排水試験体の種々の温度推移を測定した。実験は約 1 分間の水没後の排水過程を測定した。重力によって排水されない水分を含んだ状態を初期条件とした。

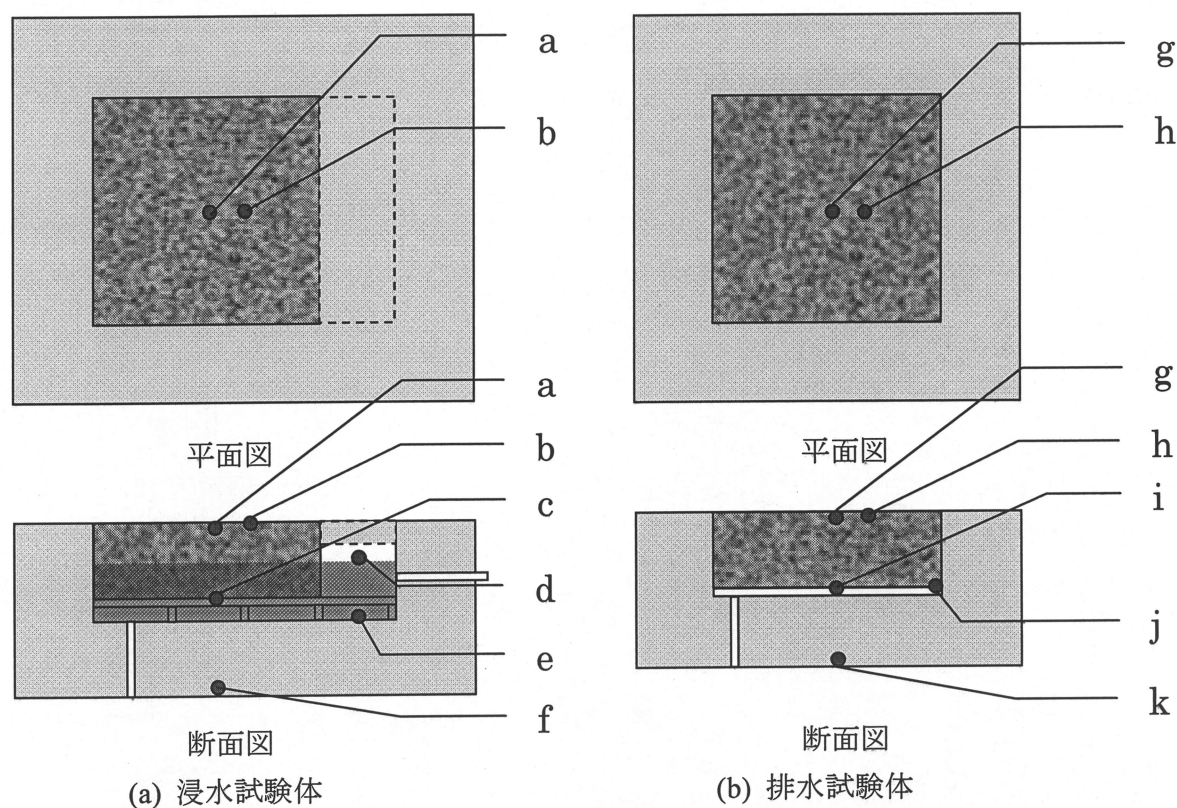
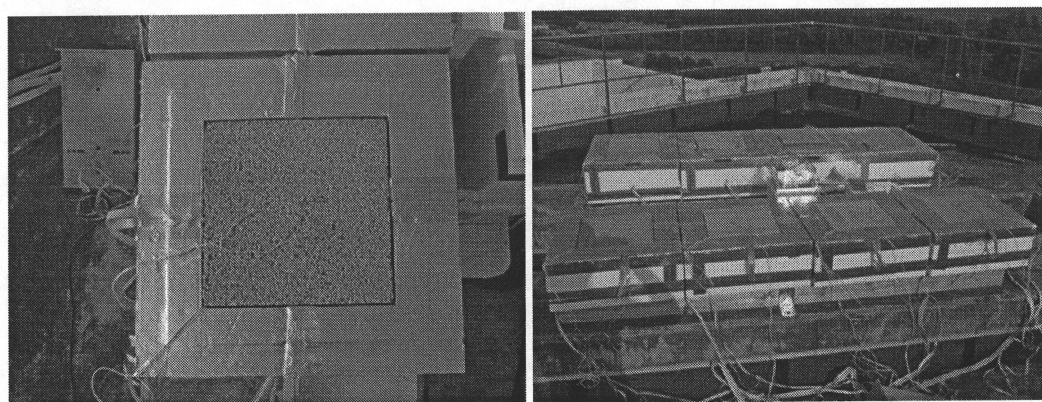


図 4.4.1 測定箇所



実験で用いた試験体(a)

実際の測定の様子(b)

図 4.4.2 測定写真

4.5 測定結果

図4.5.1から図4.5.14に、2009年9月13日に浸水深さ50mmの浸水実験を行ったポーラスコンクリート試験体の種々温度と気象条件の測定結果を示した。測定日は晴れであり、乾燥試験体表面温度は40℃以上にまで上昇した。

図4.5.1から図4.5.8に浸水試験体と乾燥試験体の測定箇所〔a〕から〔k〕の温度と気象条件を示した。浸水・乾燥試験体表面温度は日射量・外気温に比例して上昇した。浸水・乾燥試験体の断熱材底面温度も日射量・外気温に比例して高くなった。

図4.5.9から図4.5.12にポーラスコンクリート種類別に浸水試験体と乾燥試験体の表面温度と気象条件を、図4.5.13と図4.5.14に浸水試験体表面平均温度と乾燥試験体表面平均温度と気象条件を示した。図4.5.9から図4.5.12より、全ての種類のポーラスコンクリートの浸水試験体と乾燥試験体に同様の温度推移がみられた。0時から9時までは、ほぼ同じ温度であるが、9時以降日射量が増すにつれ、乾燥試験体表面温度が浸水試験体表面温度より高くなり、その後も同様の傾向となった。また、試験体別に表面温度を比較すると、8号25%と35%試験体は日射量がピーク時に浸水試験体と乾燥試験体に約10℃の温度差が見られたが、8号15%と7号25%は約3℃に留まった。図4.5.14より、種類別の乾燥試験体表面温度に1℃以上の温度差がないことから、これは、調合時のセメント量に依存しているとみられ、セメント量が多い試験体である程、浸水試験体の温度が低下しなかった。

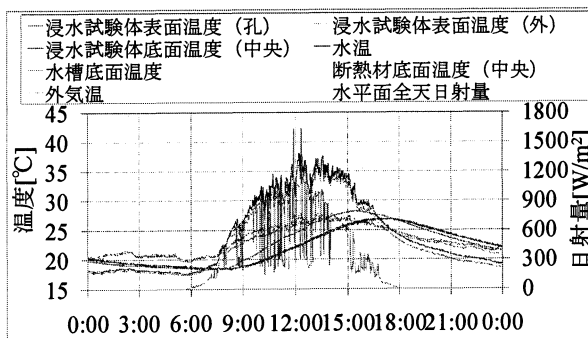


図 4.5.1 浸水深さ 50mm 浸水実験

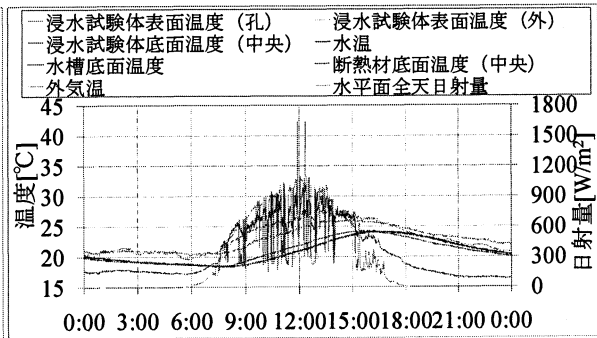


図 4.5.2 8号 15%乾燥試験体温度と気象条件

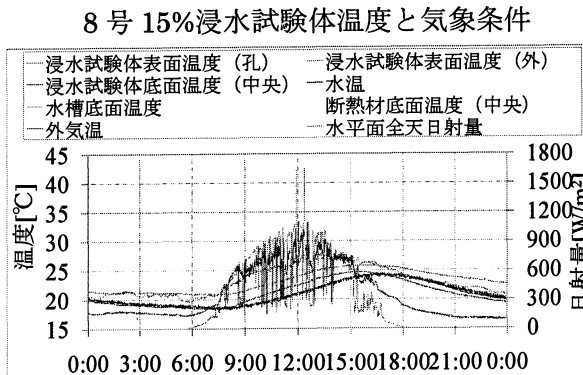


図 4.5.3 浸水深さ 50mm 浸水実験

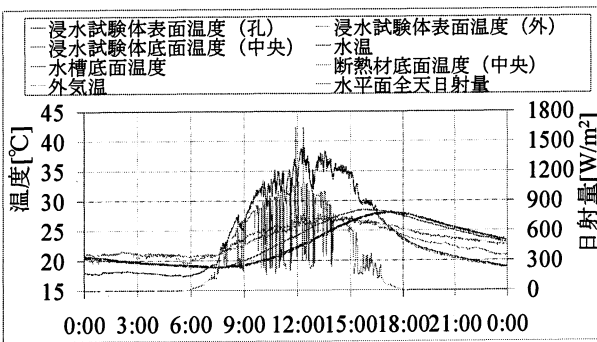


図 4.5.4 8号 25%乾燥試験体温度と気象条件

8号 25%浸水試験体温度と気象条件

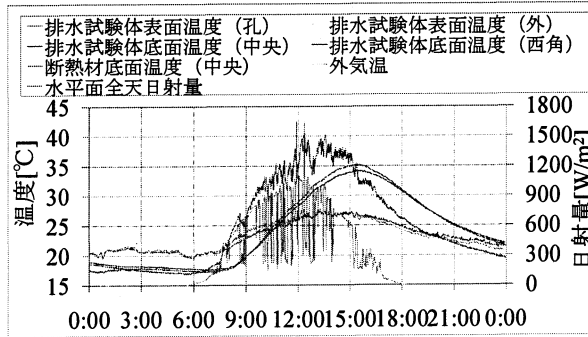


図 4.5.5 浸水深さ 50mm 浸水実験
8 号 35%浸水試験体温度と気象条件

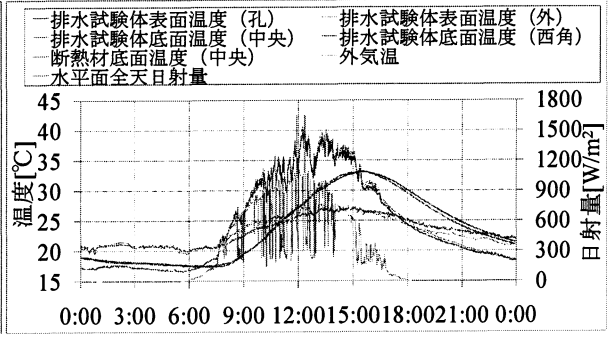


図 4.5.6 8 号 35%乾燥試験体温度と気象条件

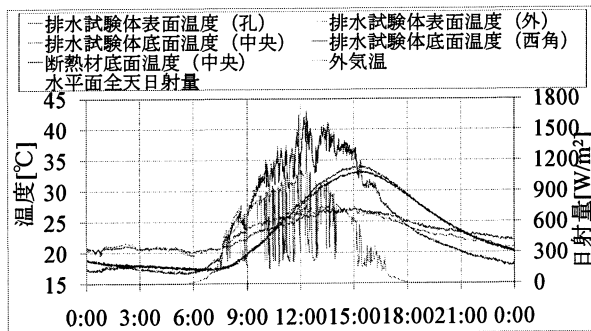


図 4.5.7 浸水深さ 50mm 浸水実験
7 号 25%浸水試験体温度と気象条件

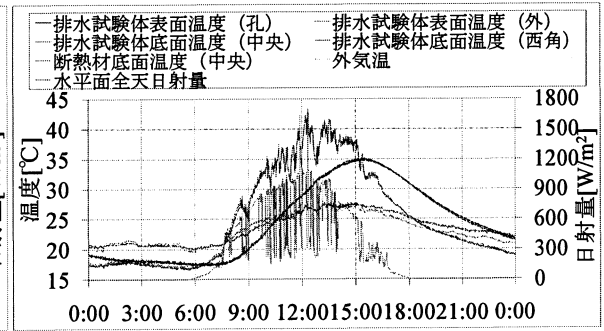


図 4.5.8 7 号 25%乾燥試験体温度と気象条件

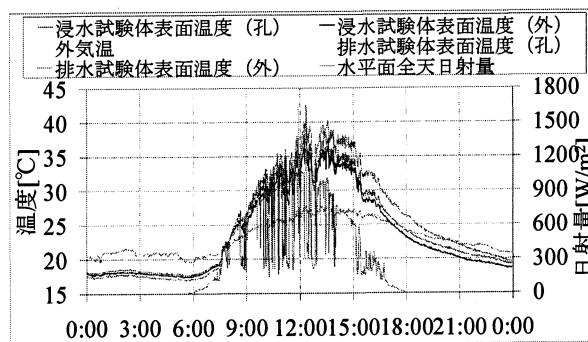


図 4.5.9 浸水深さ 50mm 浸水実験
8 号 15%試験体表面温度と気象条件

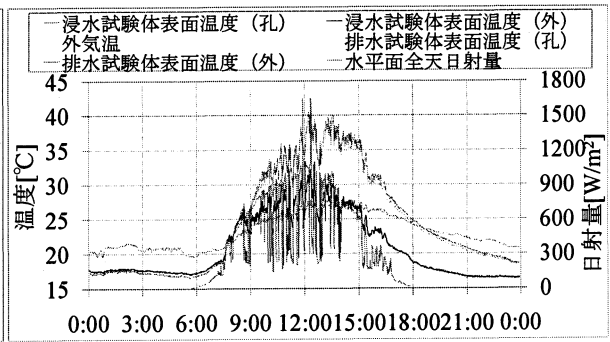


図 4.5.10 浸水深さ 50mm 浸水実験
8 号 25%試験体表面温度と気象条件

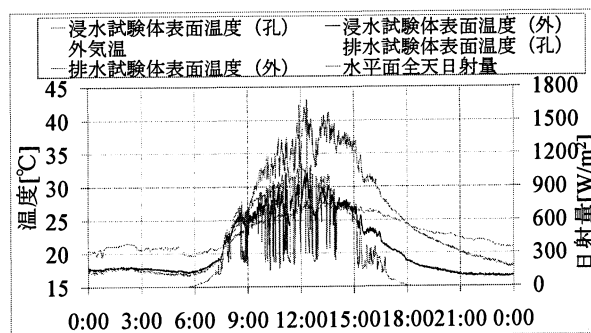


図 4.5.11 浸水深さ 50mm 浸水実験
8 号 35%試験体表面温度と気象条件

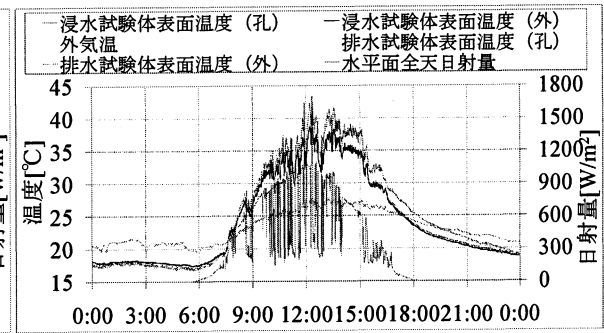


図 4.5.12 浸水深さ 50mm 浸水実験
7 号 25%試験体表面温度と気象条件

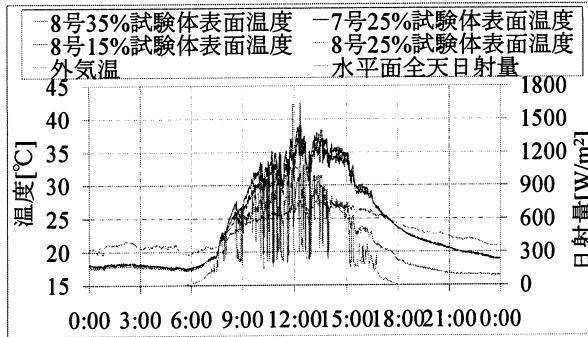


図 4.5.13 浸水深さ 50mm 浸水実験
浸水試験体表面平均温度と気象条件

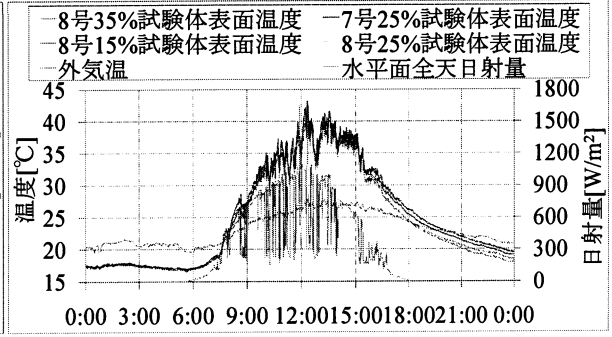


図 4.5.14 乾燥試験体表面平均温度と気象条件

図 4.5.15 から図 4.5.28 に、2009 年 9 月 6 日に浸水深さ 60mm の浸水実験を行ったポーラスコンクリート試験体の種々温度と気象条件の測定結果を示した。測定日は快晴であり、乾燥試験体表面温度は 50℃近くまで上昇した。

図 4.5.15 から図 4.5.22 に浸水試験体と乾燥試験体の測定箇所（[a]から[k]）の温度と気象条件を示した。50mm の測定では浸水・乾燥試験体表面温度は日射量に比例したが、60mm の測定では比例せず、午後 2 時に試験体表面温度が最大となった。試験体底面温度は、熱容量の関係から表面温度に遅れて温度推移する関係となった。ところが、浸水試験体底面温度の 1 日の温度変化は約 10℃前後であるが、乾燥試験体底面温度は約 25℃前後であった。これは、浸水の影響であると考えられる。

図 4.5.23 から図 4.5.26 にポーラスコンクリート種類別に浸水試験体と乾燥試験体の表面温度と気象条件を、図 4.5.27 と図 4.5.28 に浸水試験体表面平均温度と乾燥試験体表面平均温度と気象条件を示した。

図 4.5.23 から図 4.5.26 より、試験体別に表面温度を比較すると、8 号 35%試験体は日射量がピーク時に浸水試験体と乾燥試験体に約 7℃の温度差が見られたが、8 号 15%、35%と 7 号 25%は約 3℃に留まった。これは、目視により 8 号 35%以外の試験体表面が濡れておらず、試験体表面に水分が供給できていなかったと考えられる。図 4.5.28 より、乾燥試験体表面温度はほぼ一致しており、乾燥試験体表面は絶乾状態であることが言える。

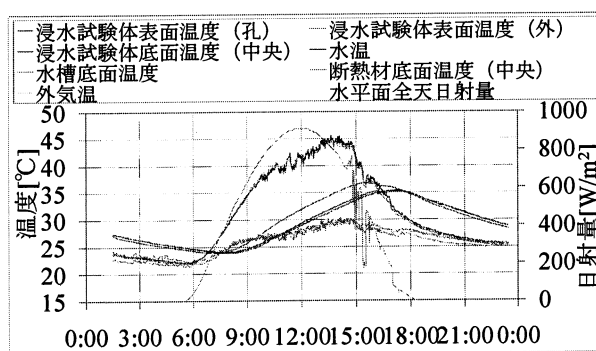


図 4.5.15 浸水深さ 60mm 浸水実験
8 号 15%浸水試験体温度と気象条件

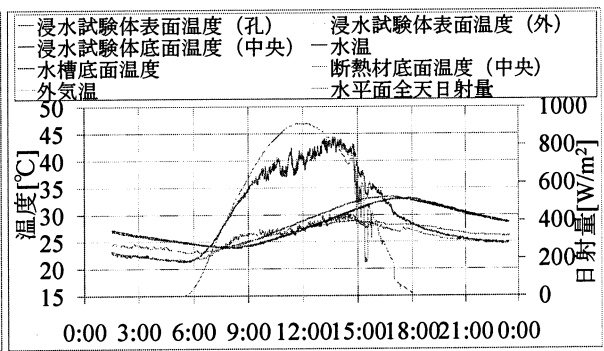


図 4.5.16 8 号 15%乾燥試験体温度と気象条件

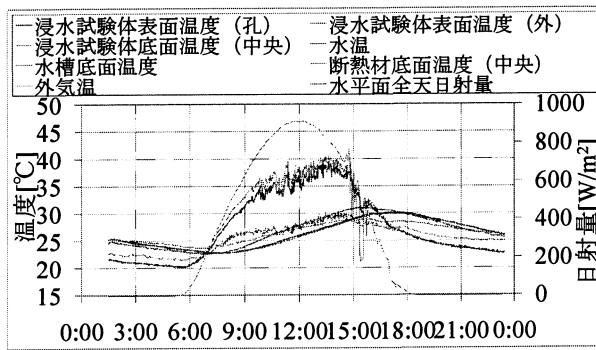


図 4.5.17 浸水深さ 60mm 浸水実験
8 号 25%浸水試験体温度と気象条件

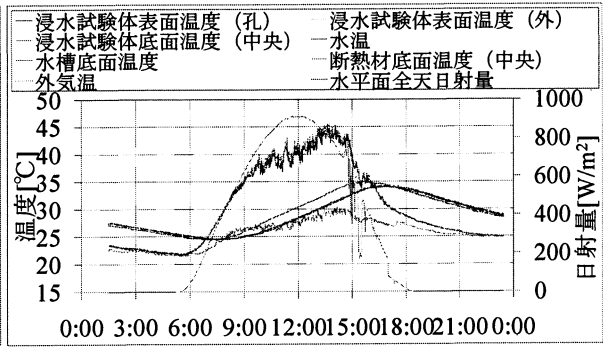


図 4.5.18 8 号 25%乾燥試験体温度と気象条件

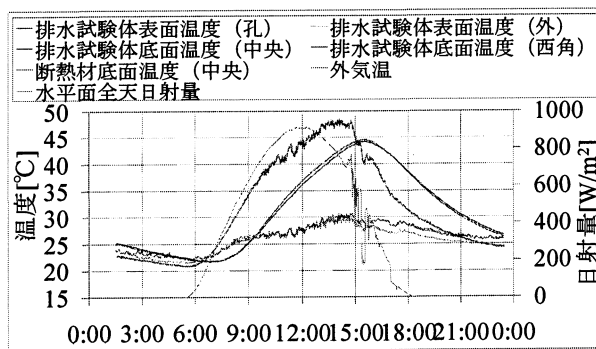


図 4.5.19 浸水深さ 60mm 浸水実験
8 号 35%浸水試験体温度と気象条件

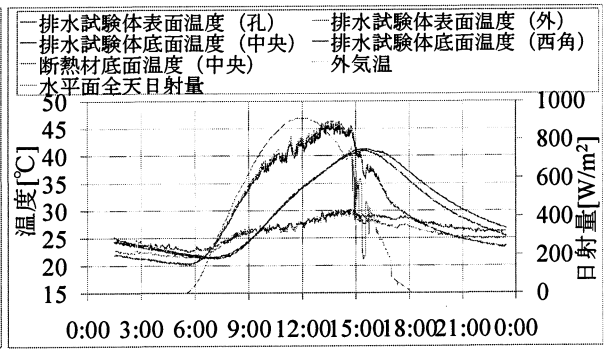


図 4.5.20 8 号 35%乾燥試験体温度と気象条件

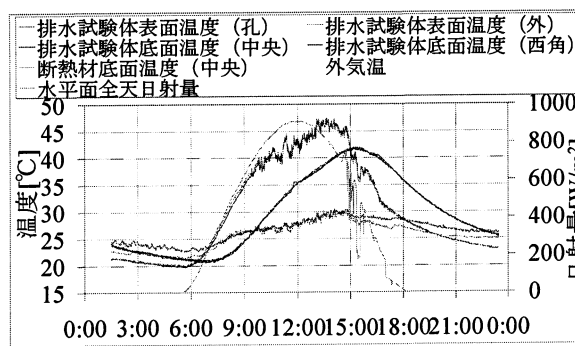


図 4.5.21 浸水深さ 60mm 浸水実験
7 号 25%浸水試験体温度と気象条件

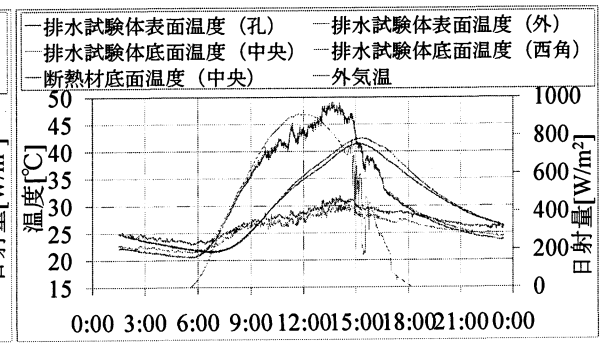


図 4.5.22 7 号 25%乾燥試験体温度と気象条件

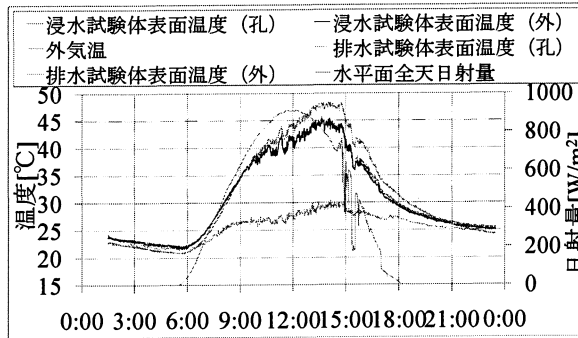


図 4.5.23 浸水深さ 60mm 浸水実験
8 号 15%試験体表面温度と気象条件

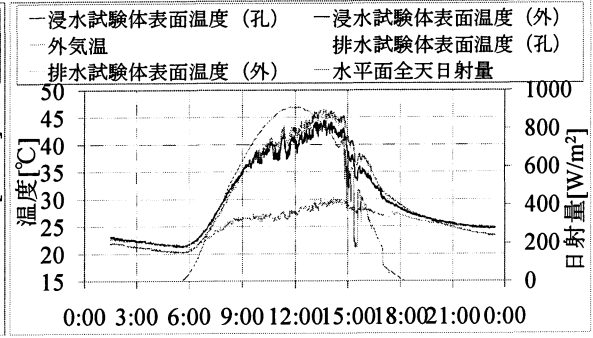


図 4.5.24 浸水深さ 60mm 浸水実験
8 号 25%試験体表面温度と気象条件

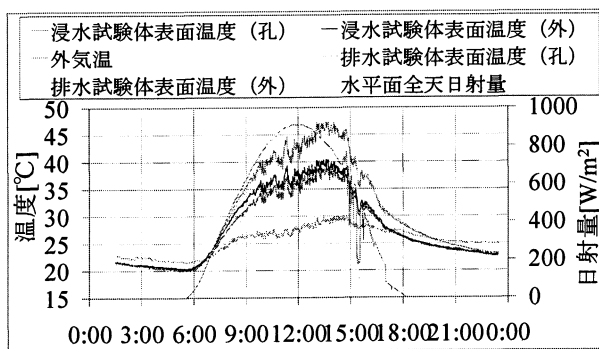


図 4.5.25 浸水深さ 60mm 浸水実験
8 号 35%試験体表面温度と気象条件

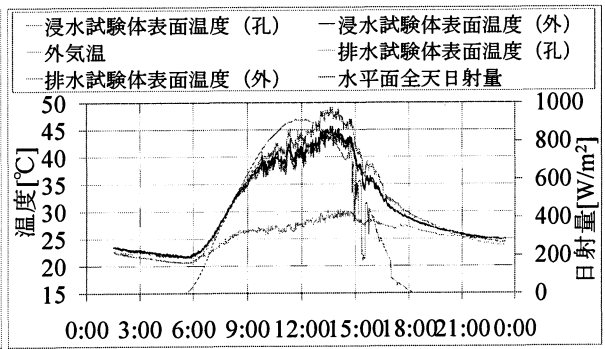


図 4.5.26 浸水深さ 60mm 浸水実験
7 号 25%試験体表面温度と気象条件

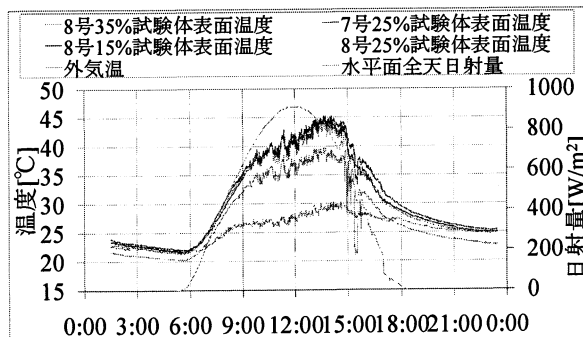


図 4.5.27 浸水深さ 60mm 浸水実験
浸水試験体表面平均温度と気象条件

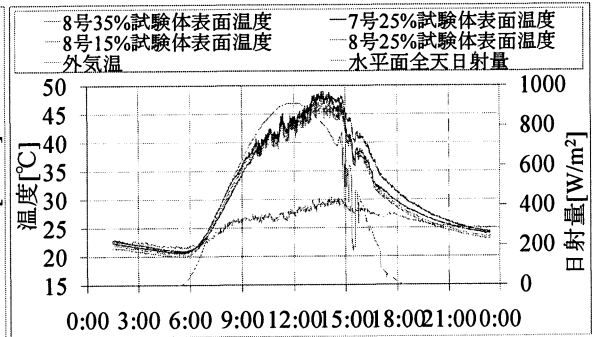


図 4.5.28 乾燥試験体表面平均温度と気象条件

図 4.5.29 から図 4.5.42 に、2009 年 9 月 17 日に浸水深さ 70mm の浸水実験を行ったポーラスコンクリート試験体の種々温度と気象条件の測定結果を示した。測定日は晴れ日であり、乾燥試験体表面温度は 50℃ 近くまで上昇した。

図 4.5.29 から図 4.5.36 に浸水試験体と乾燥試験体の測定箇所 ([a] から [k]) の温度と気象条件を示した。浸水・乾燥試験体表面温度は日射量・外気温に比例して上昇した。浸水・乾燥試験体の断熱材底面温度は気温とほぼ一致した。

図 4.5.37 から図 4.5.40 にポーラスコンクリート種類別に浸水試験体と乾燥試験体の表面温度と気象条件を、図 4.5.41 と図 4.5.42 に浸水試験体表面平均温度と乾燥試験体表面平均温度と気象条件を示した。

図 4.5.37 から図 4.5.40 より、全ての種類のポーラスコンクリート試験体表面温度について浸水深さ 50mm と 60mm と比較して、日射量ピーク時の浸水試験体の大きな温度低下がみられた。特に空隙率の大きい 8 号 25%と 8 号 35%浸水試験体の表面温度が乾燥試験体よりも約 10℃低下した。これは、液相水分伝導率の実験結果から、8 号 25%と 8 号 35%は高さ 30mm のときの試験体の体積含水率が $0.12(\text{m}^3/\text{m}^3)$ と他より高いため、十分な水分供給によって試験体表面の含水量が高くなり、面積当たりの蒸発冷却効率が高くなったと考える。

同様に、図 4.5.41 より、全ての種類の浸水試験体表面温度を比較すると、液相水分伝導率の実験結果から、高さ 30mm のときの試験体の体積含水率が高い順（8 号 25%、8 号 35%、7 号 25%、8 号 15%）に温度低下が大きくなった。

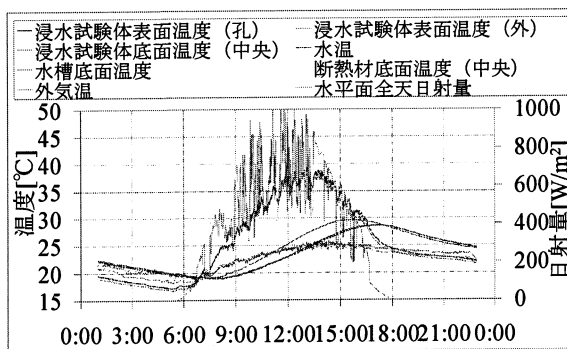


図 4.5.29 浸水深さ 70mm 浸水実験
8 号 15%浸水試験体温度と気象条件

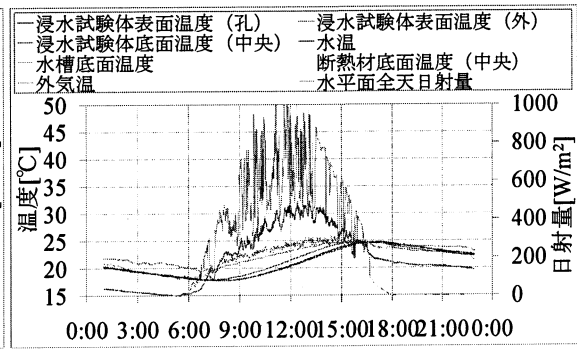


図 4.5.30 8 号 15%乾燥試験体温度と気象条件

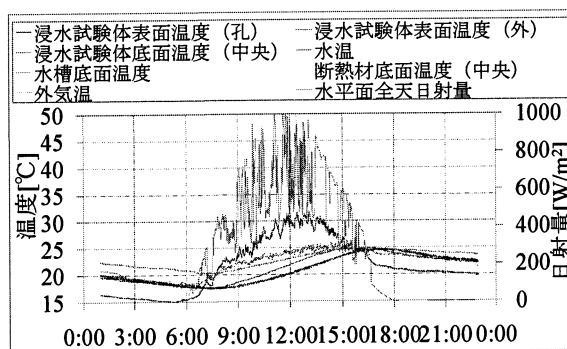


図 4.5.31 浸水深さ 70mm 浸水実験
8 号 25%浸水試験体温度と気象条件

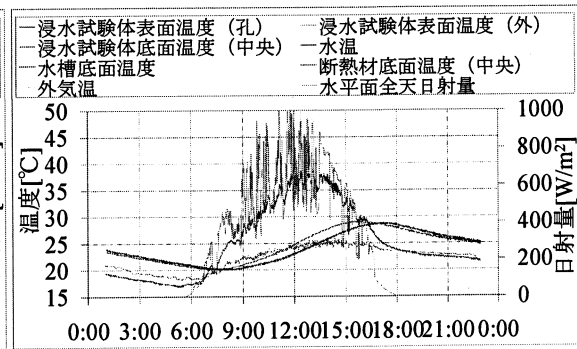


図 4.5.32 8 号 25%乾燥試験体温度と気象条件

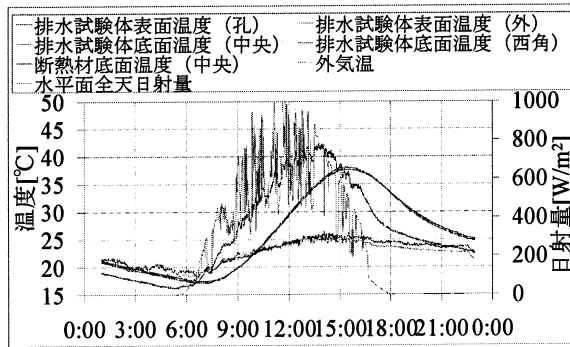


図 4.5.33 浸水深さ 70mm 浸水実験
8 号 35%浸水試験体温度と気象条件

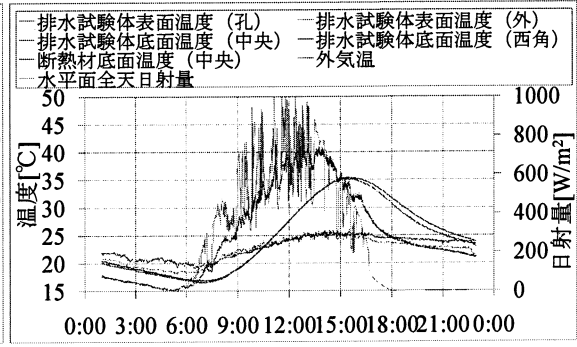


図 4.5.34 8 号 35%乾燥試験体温度と気象条件

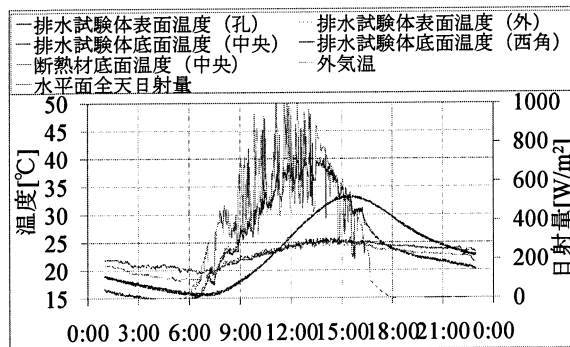


図 4.5.35 浸水深さ 70mm 浸水実験
7 号 25%浸水試験体温度と気象条件

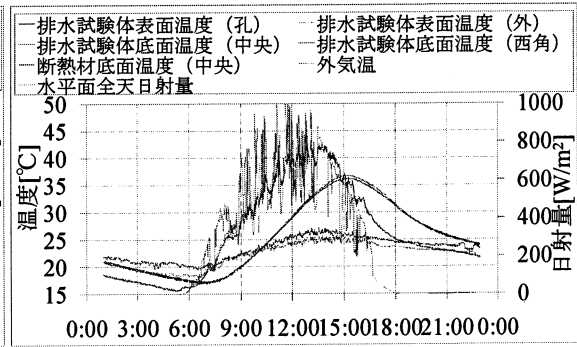


図 4.5.36 7 号 25%乾燥試験体温度と気象条件

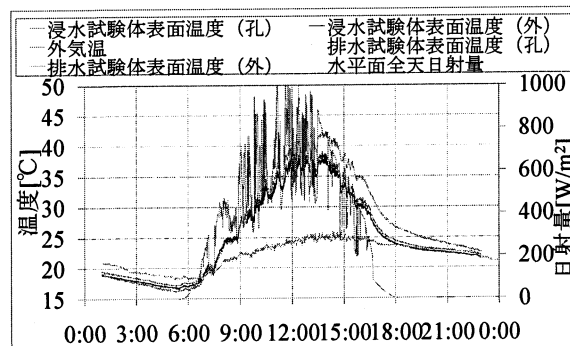


図 4.5.37 浸水深さ 70mm 浸水実験
8 号 15%試験体表面温度と気象条件

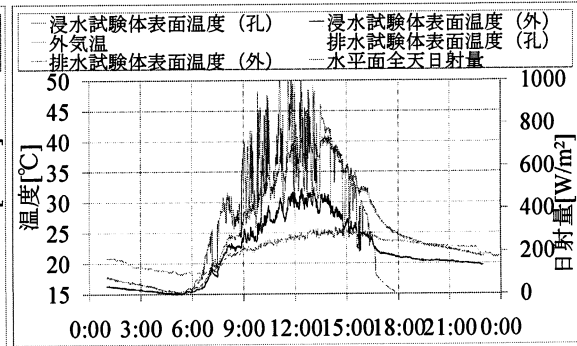


図 4.5.38 浸水深さ 70mm 浸水実験
8 号 25%試験体表面温度と気象条件

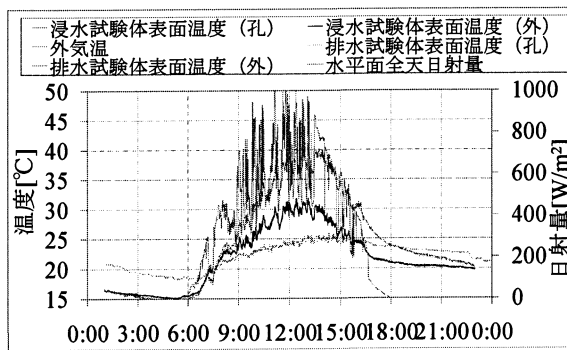


図 4.5.39 浸水深さ 70mm 浸水実験
8 号 35%試験体表面温度と気象条件

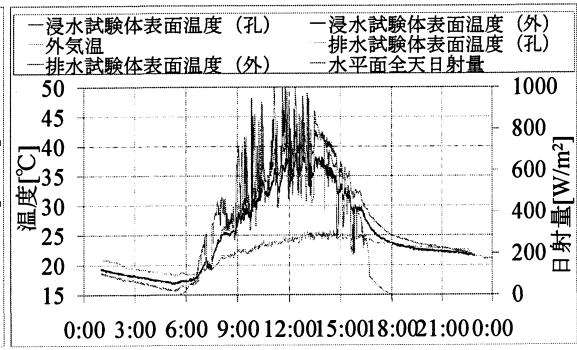


図 4.5.40 浸水深さ 70mm 浸水実験
7 号 25%試験体表面温度と気象条件

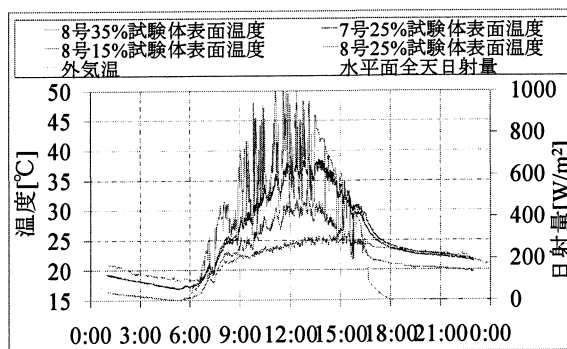


図 4.5.41 浸水深さ 70mm 浸水実験
浸水試験体表面平均温度と気象条件

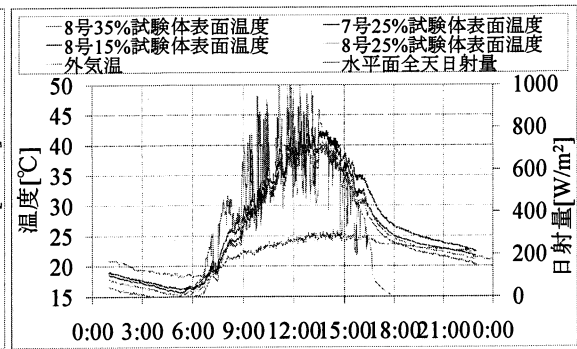


図 4.5.42 乾燥試験体表面平均温度と気象条件

図 4.5.43 から図 4.5.56 に、2009 年 9 月 8 日に浸水深さ 80mm の浸水実験を行ったポーラスコンクリート試験体の種々温度と気象条件の測定結果を示した。測定日は快晴であり、気温は 30℃を超え、乾燥試験体表面温度は 40℃以上に上昇した。

図 4.5.43 から図 4.5.50 に浸水試験体と乾燥試験体の測定箇所〔a〕から〔k〕の温度と気象条件を示した。浸水・乾燥試験体表面温度は日射量・外気温に比例して上昇した。全ての浸水試験体表面温度は乾燥試験体表面温度に比べ、大きな温度低下がみられ、特に 8 号 15%と 8 号 25%は気温よりも低くなった。

図 4.5.51 から図 4.5.54 にポーラスコンクリート種類別に浸水試験体と乾燥試験体の表面温度と気象条件を、図 4.5.55 と図 4.5.56 に浸水試験体表面平均温度と乾燥試験体表面平均温度と気象条件を示した。図 4.5.44 から図 4.5.51 より、全ての種類のポーラスコンクリート試験体表面温度について、日射量ピーク時の浸水試験体の大きな温度低下がみられた。浸水深さ 80mm 以外の実験で、8 号 15%や 7 号 25%の浸水試験体表面温度に大きな温度低下はみられなかったが、浸水深さ 80mm の実験では全ての浸水試験体表面温度が乾燥試験体表面温度に比べて約 10℃低下した。目視においても全ての試験体表面が濡れていたことから、試験体表面の蒸発量より試験体底部からの水分供給が上回り、浸水試験体の表面はある一定の濡れを維持していることが考えられる。ゆえに、浸水試験体表面温度は乾燥試験体と比べてピーク時で約 10℃以上の温度低下があり、試験体表面が常時水分を保持していることから貯水機能のある舗装システムであれば、十分な蒸発冷却効果が期待できることができないのではないだろうか。

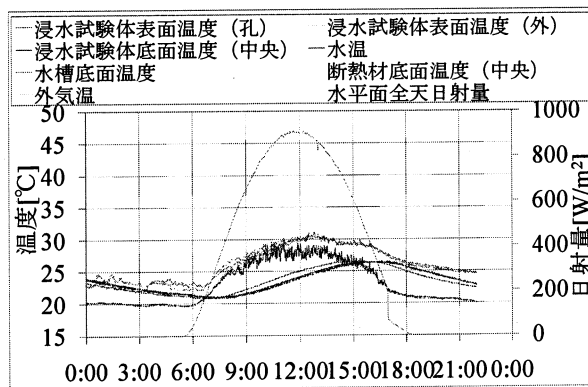


図 4.5.43 浸水深さ 80mm 浸水実験
8 号 15%浸水試験体温度と気象条件

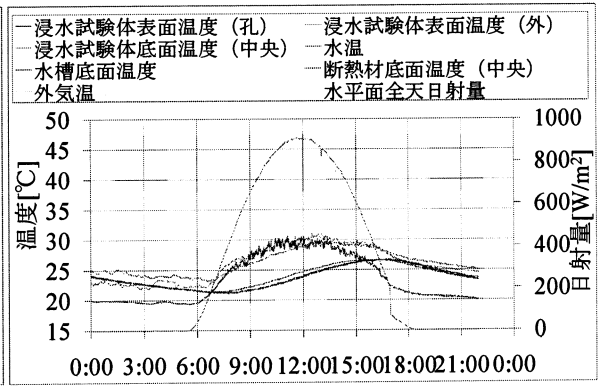


図 4.5.44 8 号 15%乾燥試験体温度と気象条件

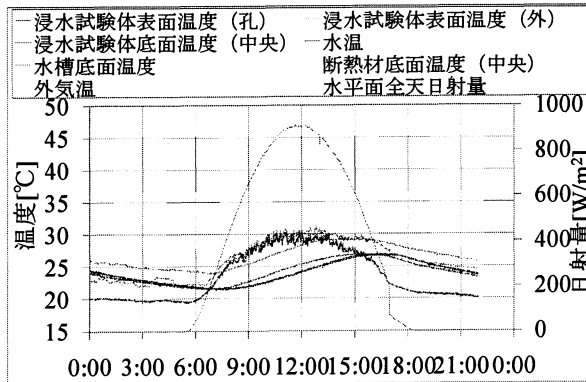


図 4.5.45 浸水深さ 80mm 浸水実験
8 号 25%浸水試験体温度と気象条件

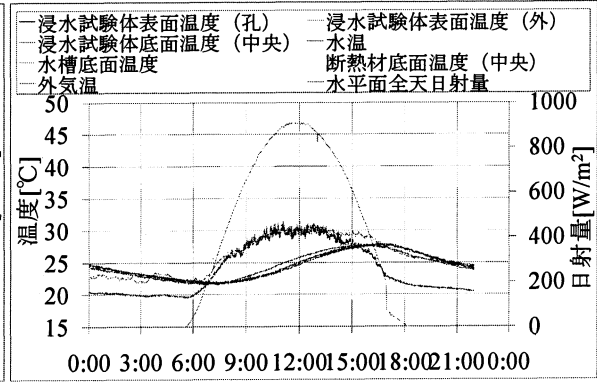


図 4.5.46 8 号 25%乾燥試験体温度と気象条件

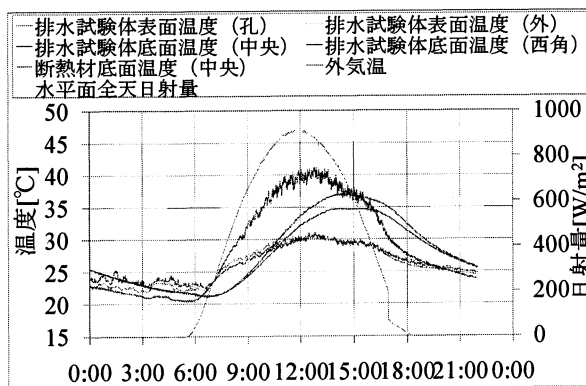


図 4.5.47 浸水深さ 80mm 浸水実験
8 号 35%浸水試験体温度と気象条件

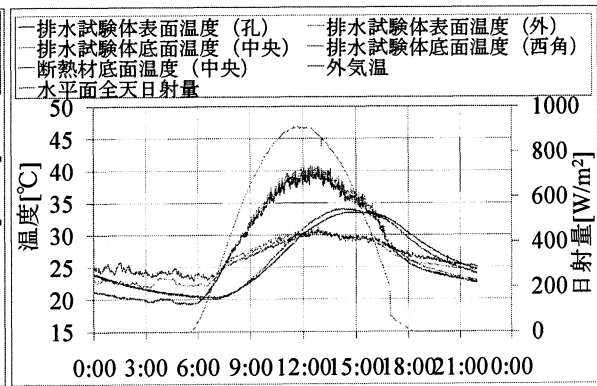


図 4.5.48 8 号 35%乾燥試験体温度と気象条件

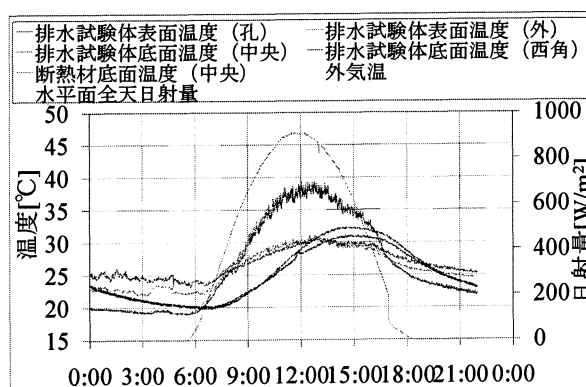


図 4.5.49 浸水深さ 80mm 浸水実験
7 号 25%浸水試験体温度と気象条件

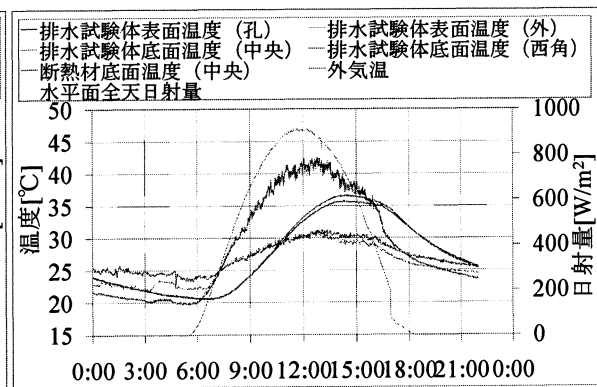


図 4.5.50 7 号 25%乾燥試験体温度と気象条件

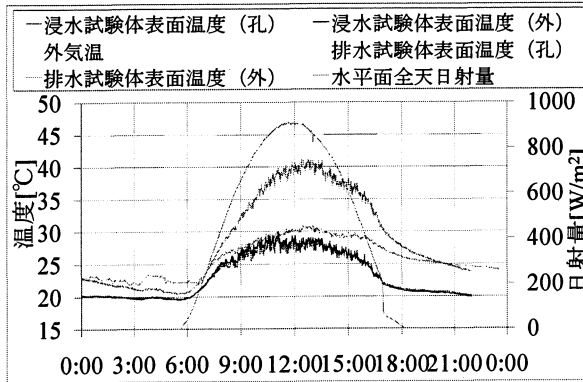


図 4.5.51 浸水深さ 80mm 浸水実験
8 号 15%試験体表面温度と気象条件

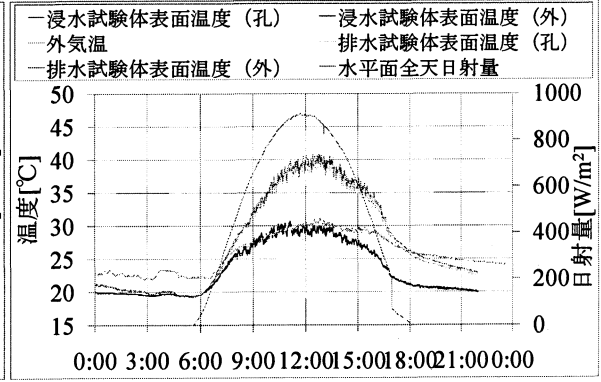


図 4.5.52 浸水深さ 80mm 浸水実験
8 号 25%試験体表面温度と気象条件

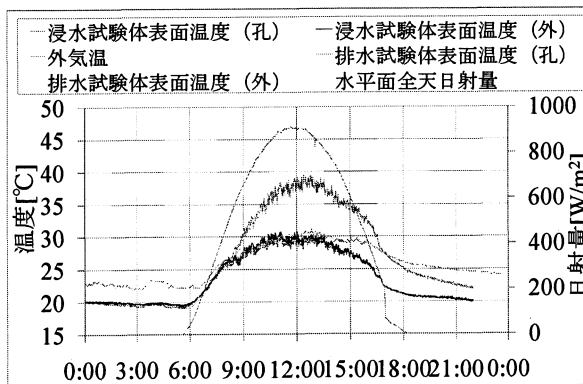


図 4.5.53 浸水深さ 80mm 浸水実験
8 号 35%試験体表面温度と気象条件

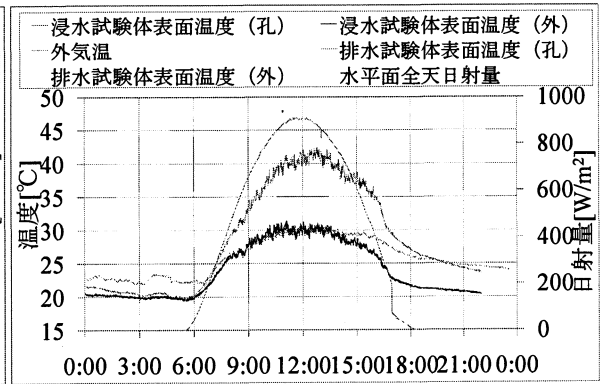


図 4.5.54 浸水深さ 80mm 浸水実験
7 号 25%試験体表面温度と気象条件

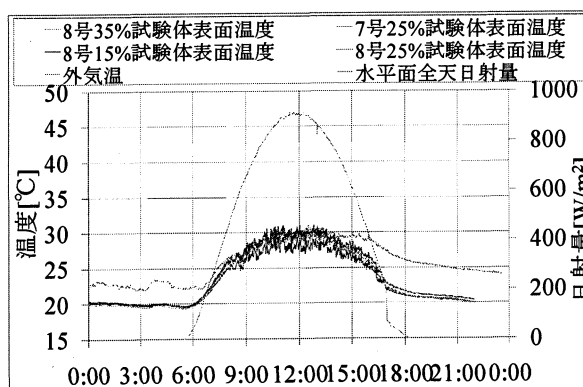


図 4.5.55 浸水深さ 80mm 浸水実験
浸水試験体表面平均温度と気象条件

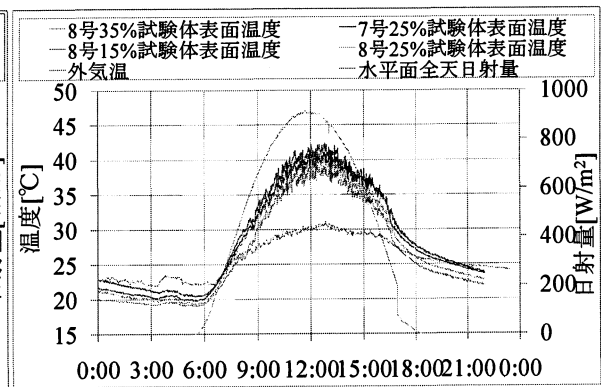


図 4.5.56 乾燥試験体表面平均温度と気象条件

図 4.5.57 から図 4.5.61 に、2009 年 9 月 16 日から 9 月 18 日に約 1 分間の水没後、重力によって排水されない水分を含んだ状態を初期条件とした排水実験のポーラスコンクリート試験体の種々温度と気象条件の測定結果を示した。測定日は快晴であり、気温は 30℃ 近くまで上昇した。浸水時刻は、9 月 16 日午前 9 時とした。結果は、気象条件と試験体表面・底面温度で示す。

実験開始 30 分後には、目視で全ての試験体表面が乾燥していることを確認した。全ての試験体において 3 日間とも表面温度の大きな温度低下がみられなかったことから、表面が乾燥状態にあったことが考えられる。

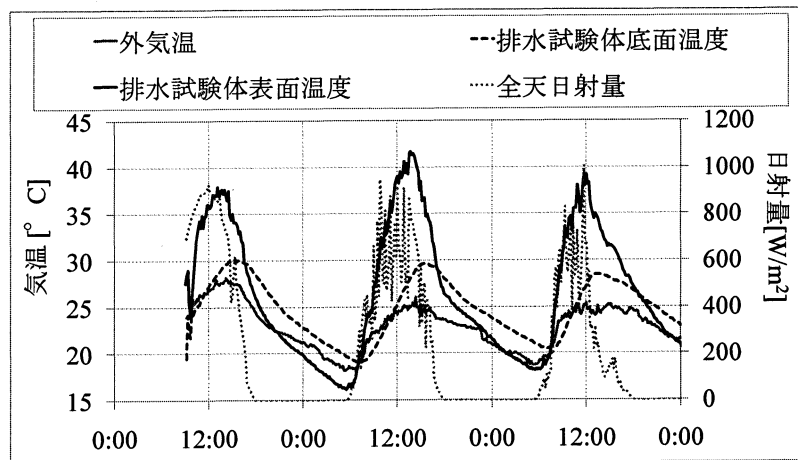


図 4.5.57 8 号 15%試験体の排水実験の結果と気象条件

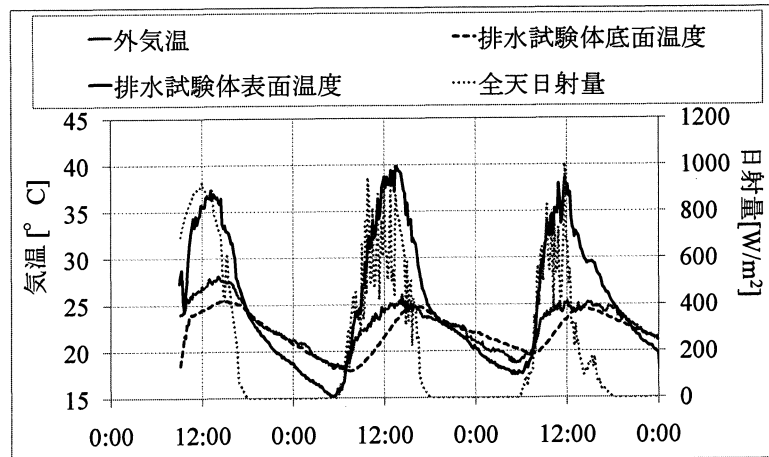


図 4.5.58 8 号 25%試験体の排水実験の結果と気象条件

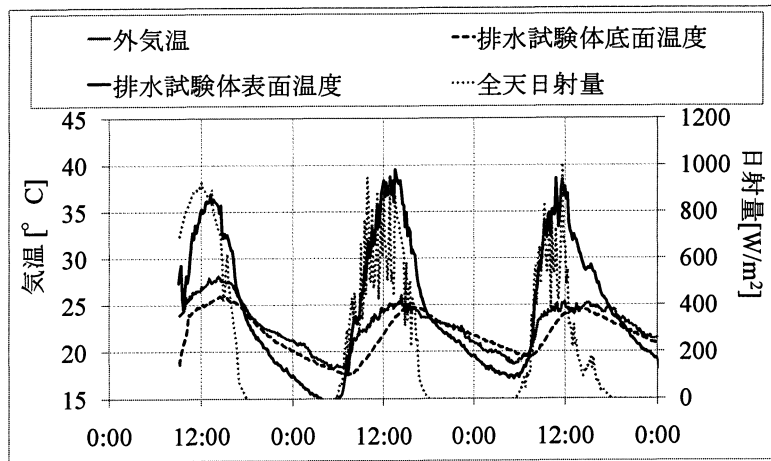


図 4.5.59 8号 35%試験体の排水実験の結果と気象条件

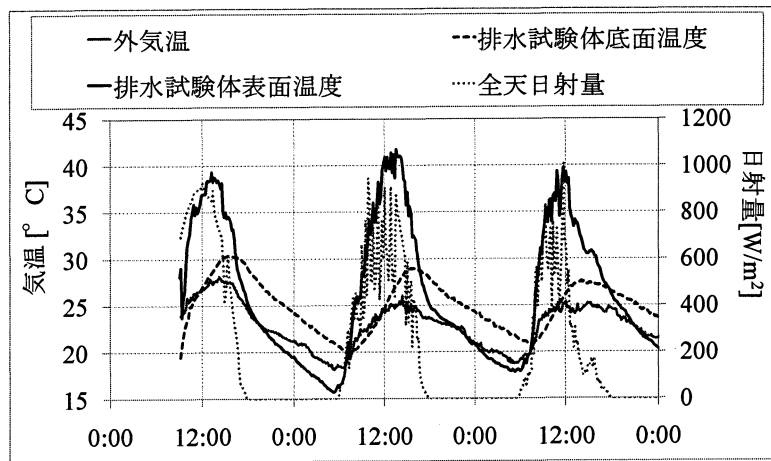


図 4.5.60 7号 25%試験体の排水実験の結果と気象条件

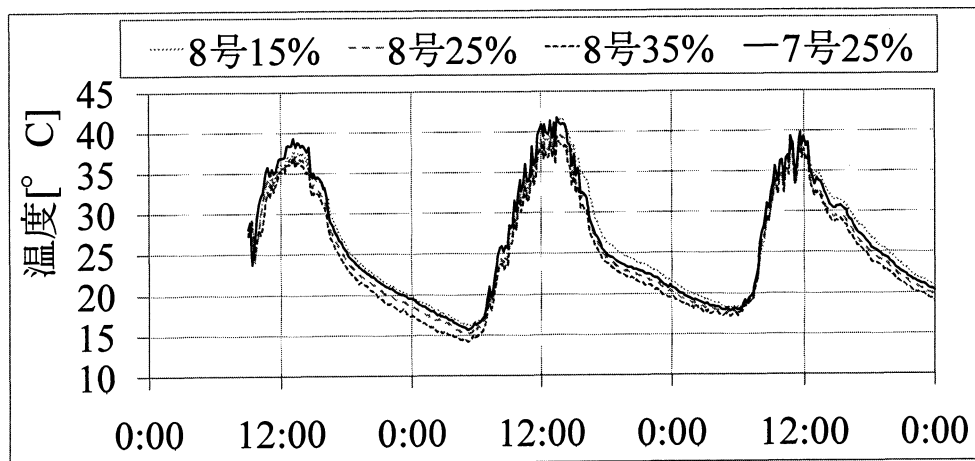


図 4.5.61 排水実験の表面温度の比較

4.6 数值解析

4.6.1 解析方法

材料内の熱水分性状は、式(4.6.1)および式(4.6.2)に示した鉛直方向 1 次元（上向き正）の熱水分同時移動方程式を用いて解析を行った。

熱収支式

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left((\lambda + r\lambda'_{T_g})\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(r\lambda'_{\mu_g}\frac{\partial \mu}{\partial z}\right) \quad (4.6.1)$$

水分収支式

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda'_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda'_\mu \left(\frac{\partial \mu}{\partial z} + g \right) \right) \quad (4.6.2)$$

ここで c : 比熱[J/kg K] g : 重力加速度[m/s²]
 r : 気化熱[J/kg] t : 時間[s]
 T : 温度[K] λ : 熱伝導率[W/m K]
 λ'_T : 温度勾配に対する水分伝導率[kg/ m s K]
 λ'_{Tg} : 温度勾配に対する気相水分伝導率[kg/m s K]
 λ'_μ : 水分化学ポテンシャル勾配に対する水分伝導率[kg/m s (J/kg)]
 $\lambda'_{\mu g}$: 水分化学ポテンシャル勾配に対する気相水分伝導率[kg/m s (J/kg)]
 μ : 水分化学ポテンシャル[J/kg]
 ρ : 密度[kg/m³] ρ_w : 液水の密度[kg/m³]
 Ψ : 含水率[m³/m³] Z : 水面からの高さ[mm]

4.6.2 初期条件

初期条件は、試験体の初期温度は測定値を直線補間して与えた。水分に関しては測定を行っていないことから、浸水試験体については、浸水水面の位置の水分化学ポテンシャルを空隙内がほぼ水で満たされる -0.01 とし、排水実験の水没後の排水試験体の解析の場合は、試験体底面の水分化学ポテンシャルを -0.2 とした。厚さ方向の分布は、水分化学ポテンシャルが $\mu = \mu_0 - gz$ を満たすとして、水分化学ポテンシャル分布を与えた。このとき μ_0 は試験体底面の水分化学ポテンシャルであり、浸水試験体、排水試験体はそれぞれ $\mu_0 = -0.01, -0.2$ である。

4.6.3 計算条件

境界条件は、空気と接する材料の表面における熱・水分収支を考える。
空気と接する固体表面での水分移動は式 4.6.3 で表される。

$$\alpha'_\mu(\mu_0 - \mu_i) + \alpha'_T(T_0 - T_i) + J_p = -\lambda'_\mu \left(\frac{\partial \mu}{\partial n} \right)_s - nF_w - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (4.6.3)$$

$$(\because J_w = -\lambda'_T \nabla T - \lambda'_\mu (\nabla \mu - F_w) \quad , \quad \alpha'_\mu = \alpha'_m \left(\frac{\partial p}{\partial \mu} \right)_T, \alpha'_T = \alpha'_m \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_\mu)$$

空気と接する固体表面の熱に関する収支は水分の相変化に伴う熱、水分移動に伴う顕熱移動を考慮して考えると、式 4.6.4 で表される。

$$(\alpha + r\alpha'_T)(T_0 - T_i) + r\alpha'_\mu(\mu_0 - \mu_i) + q_{sol} + q_{noc} = -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s - r\lambda'_{Tg} \left(\frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - nF_w \right) \quad (4.6.4)$$

このとき、試験体底面の境界条件は、熱に関しては測定温度を与え、排水試験体の水分の境界条件は、完全断湿とした。試験体表面では、熱については日射、長波長放射および対流による熱伝達を考慮した。

また、熱伝導率 λ は試験体の含水率 ψ の関係から式 4.6.5 を与えた。

$$\lambda = 0.52 + 0.84 \psi \quad (4.6.5)$$

対流熱伝達率はユルゲスの式から表面を普通面として考え、式 4.6.6 で与えた。

$$\begin{aligned} \alpha_c &= 5.8 + 3.95 v \quad (v \leq 5) \\ \alpha_c &= 7.13 v^{0.78} \quad (v > 5) \end{aligned} \quad (4.6.6)$$

湿気伝達率はルイスの関係式 (式 4.6.7) を用いた。

$$\frac{\alpha_c}{\alpha'_m c_m \rho_m R_v T} = Le \quad (4.6.7)$$

試験体の液相水分伝導率は物性値を、気相水分伝導率は式 4.6.8 の水蒸気拡散係数から換算した値を用いた。

$$D_v = \frac{\psi_0 - \psi}{\tau} 2.56 \times 10^{-5} (T/298.2)^{1.75} \quad (4.6.8)$$

日射吸収率 α は測定値を用いた。

熱伝導率は、測定した絶乾熱伝導率と絶乾空隙率の関係から実質部の熱伝導率を算出し、それと水の熱伝導率から、含水率に対する実質部の熱伝導率を算出した値を用いた。

ここで、

λ : 熱伝導率 [$\text{W/m}^2 \text{K}$] t : 時間 [s]

$\lambda'_{Tg}, \lambda'_{Tl}$: 温度勾配に関する気相、液相水分伝導率 [kg/msK]

$\lambda'_{\mu g}, \lambda'_{\mu l}$: 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相、液相水分伝導率 [kg/ms (J/kg)]

ρ_{gw}, ρ_{lw} : 気相、液相水分の密度 [kg/m^3] T : 温度 [K]

Φ_0 : 乾燥時材料内の空隙率 [-]

ψ : 材料の体積含水率 [-]

$\Phi_0 - \psi$: 含水率 ψ のときの空隙率 [-]

W : 水蒸気から液水に相変化水分量 [$\text{kg/m}^3 \text{s}$]

α_c : 対流熱伝達率 [$\text{W/m}^2 \text{K}$]

C_m : 湿り空気の定圧比熱 [J/kg K]

ρ_m : 湿り空気密度 [kg/m^3]

R_v : 水蒸気の気体定数

L_e : ルイス数 [-]

a : 湿り空気の温度伝導率 [m^2/s]

D : 湿り空気中の水蒸気の拡散係数 [m^2/s]

μ_0, μ_i : 空気、固体表面の水分化学ポテンシャル [J/kg] μ : 水分化学ポテンシャル [J/kg]

T_0, T_i : 空気、固体表面の絶対温度 [K]

α'_μ, α'_T : 水分化学ポテンシャル、温度勾配による水分伝達率 [$\text{kg}/(\text{ms J/kg})$]、 $[\text{kg/msK}]$

p : 水蒸気圧 [Pa]

J_p : 降雨量 [$\text{kg/m}^2 \text{s}$]

n : 固体表面の内法線ベクトル [-]

$J_{gw(a)}$: 空気層側の気相水分伝達による表面水分流 [$\text{kg/m}^2 \text{s}$]

J_p : 降雨による液相の表面水分流 [$\text{kg/m}^2 \text{s}$]

$J_{gw(s)}$: 材料側の気相水分の表面水分流 [$\text{kg/m}^2 \text{s}$]

$J_{lw(s)}$: 材料側の液相水分の表面水分流 [$\text{kg/m}^2 \text{s}$]

$q_{s(a)}$: 空気層側の対流伝達による表面熱流 [W/m^2]

q_r : 日射吸収、低温放射による表面発熱 [W/m^2]

$q_{s(s)}$: 材料側の熱伝導による表面熱流 [W/m^2]

α_r : 放射熱伝達率 [$\text{W/m}^2 \text{K}$]

q_{sol} : 日射吸収量 [W/m^2]

q_{noc} : 夜間放射量 [W/m^2]

R_v : 水蒸気のガス定数 [J/kmol K] = R/M_v = 461.643 R : 一般ガス定数 [J/kmol K] = 8316.96

4.6.4 解析結果

図 4.6.1 から図 4.6.12 に、2009 年 9 月 13 日に浸水深さ 50mm の実験測定を行った測定結果と計算結果を示した。浸水試験体表面温度推移の図から測定日の浸水試験体表面温度の計算結果は実験結果と良い一致を示したと言えるが、昼間の日射がピーク時において 8 号 15% 浸水試験体表面温度の計算結果は、実験結果より 5℃ 程度低い結果となった。この原因として、屋外実験の試験体打設時に作成した試験体の絶乾空隙率が 30.5% と水分物性測定実験の試験体に比べ 7.1% 程度高い値であり、空隙構造の違いが考えられた。目視観察から、表面が濡れた状態にあり、表面含水率の計算結果から試験体表面は終日濡れた状態にあったと言える。

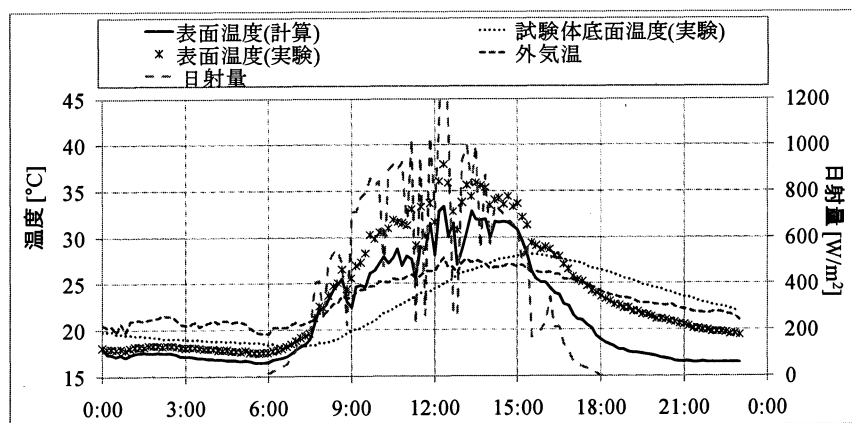


図 4.6.1 浸水深さ 50mm 浸水実験 8 号 15% 浸水試験体表面温度及び気象条件

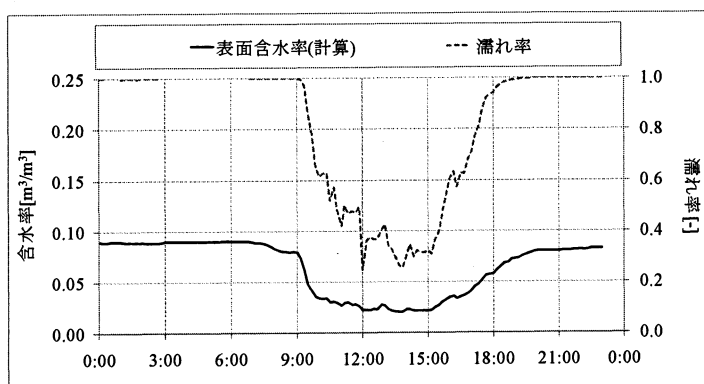


図 4.6.2 表面含水率・濡れ率計算結果

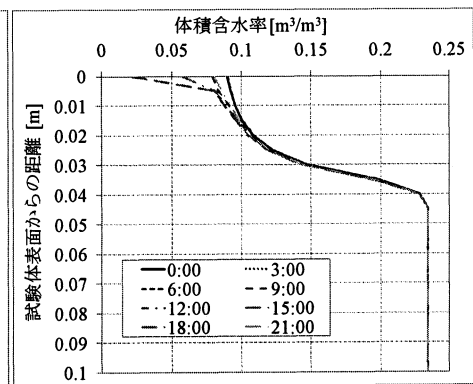


図 4.6.3 含水率分布計算結果

浸水深さ 50mm 浸水実験 8 号 15% 浸水試験体

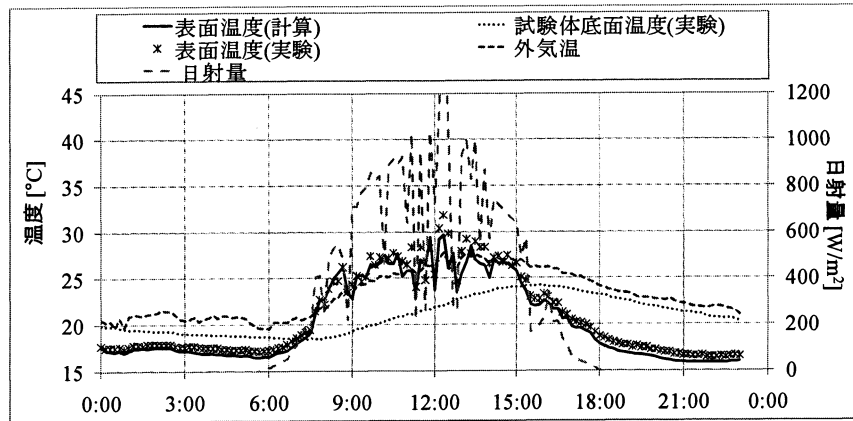


図 4.6.4 浸水深さ 50mm 浸水実験 8 号 25%浸水試験体表面温度及び気象条件

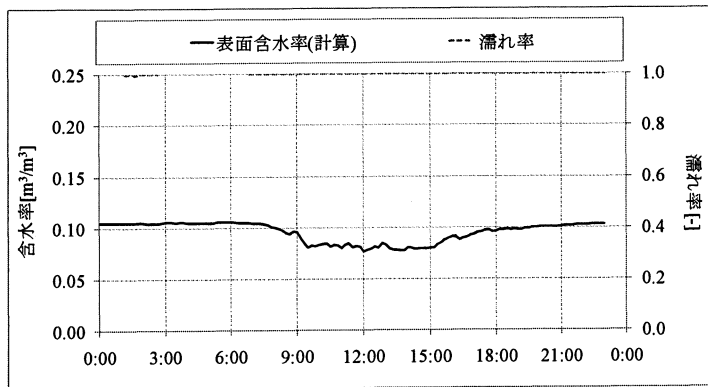


図 4.6.5 表面含水率・濡れ率計算結果

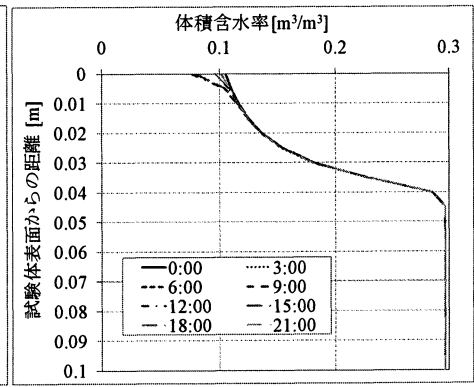


図 4.6.6 含水率分布計算結果

浸水深さ 50mm 浸水実験 8 号 25%浸水試験体

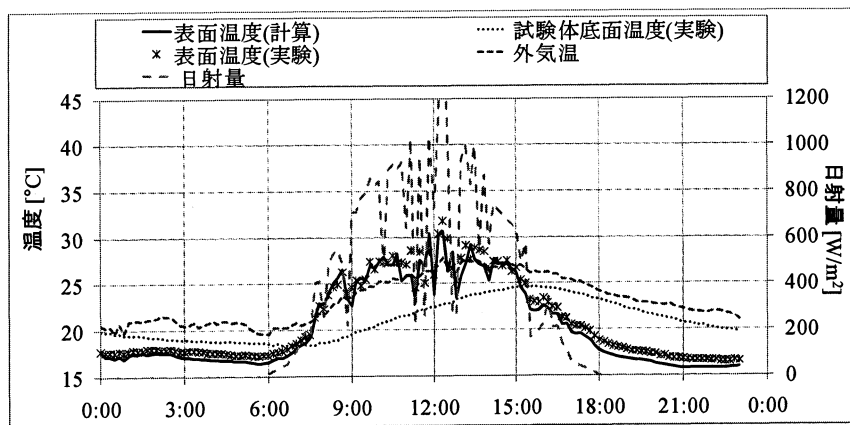


図 4.6.7 浸水深さ 50mm 浸水実験 8 号 35%浸水試験体表面温度及び気象条件

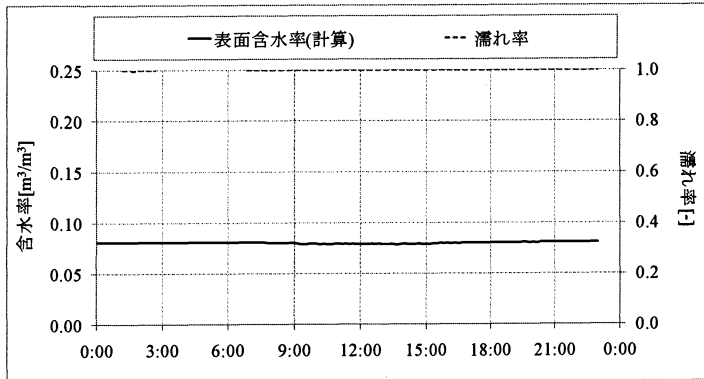


図 4.6.8 表面含水率・濡れ率計算結果

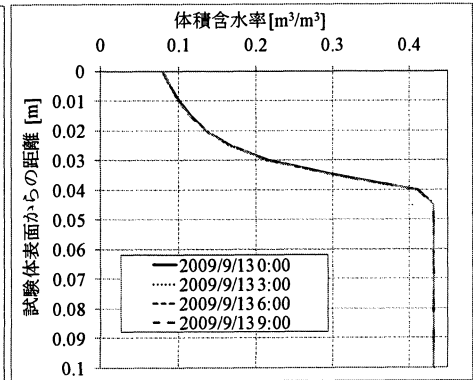


図 4.6.9 含水率分布計算結果

浸水深さ 50mm 浸水実験 8 号 35%浸水試験体

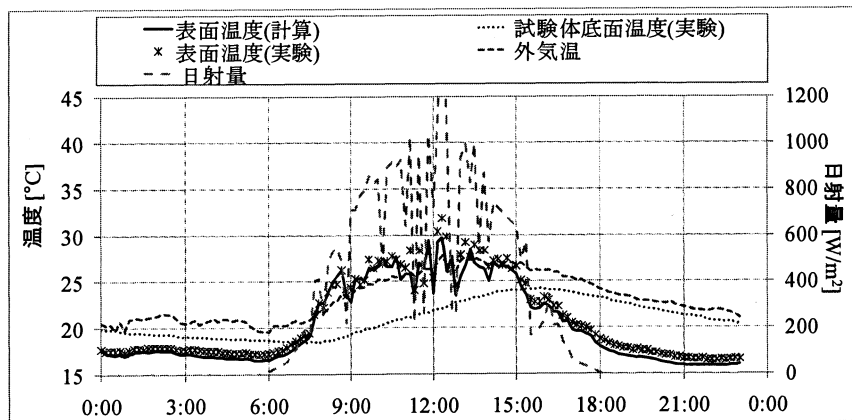


図 4.6.10 浸水深さ 50mm 浸水実験 7 号 25%浸水試験体表面温度及び気象条件

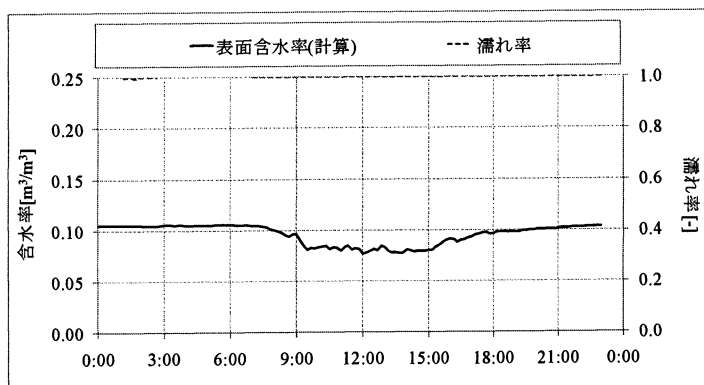


図 4.6.11 表面含水率・濡れ率計算結果

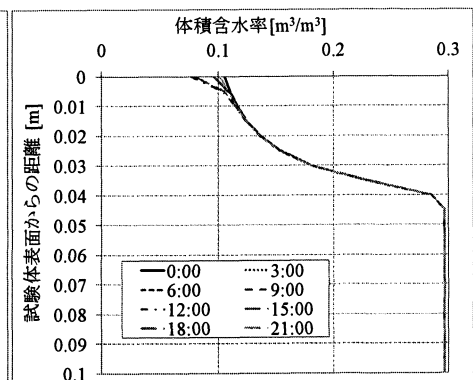


図 4.6.12 含水率分布計算結果

浸水深さ 50mm 浸水実験 7 号 25%浸水試験体

図 4.6.13 から図 4.6.24 に、2009 年 9 月 6 日に浸水深さ 60mm の実験測定を行った測定結果と計算結果を示した。浸水試験体表面温度推移の図から測定日の全ての浸水試験体表面温度の計算結果は実験結果と一致しなかった。浸水深さが 50mm より深いものにも関わらず、目視観察では試験体表面が乾燥しており、表面温度の計算結果は実験結果に比べ低い値となった。浸水試験体の表面温度は、浸水深さ 60mm の条件を除いて、計算結果と実験結果は比較的高い精度で一致しており、この浸水深さ 60mm の実験については、実験において浸水深さの設定に誤りがあったのではないかと考えられる。

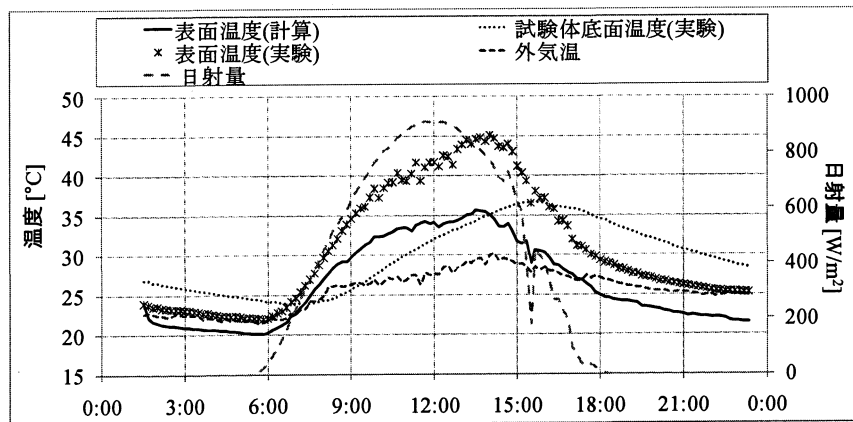


図 4.6.13 浸水深さ 60mm8 号 15%浸水試験体表面温度及び気象条件

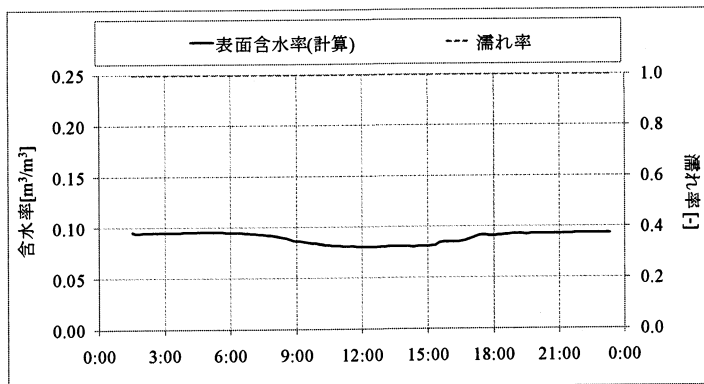


図 4.6.14 表面含水率・濡れ率計算結果

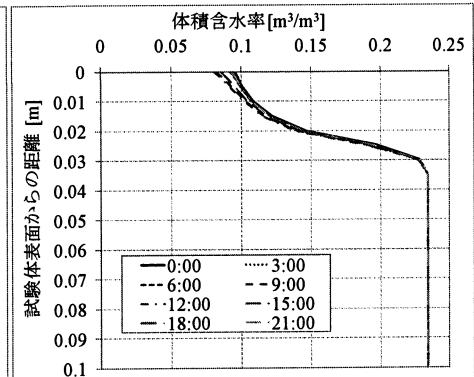


図 4.6.15 含水率分布計算結果

浸水深さ 60mm 浸水実験 8 号 15%浸水試験体

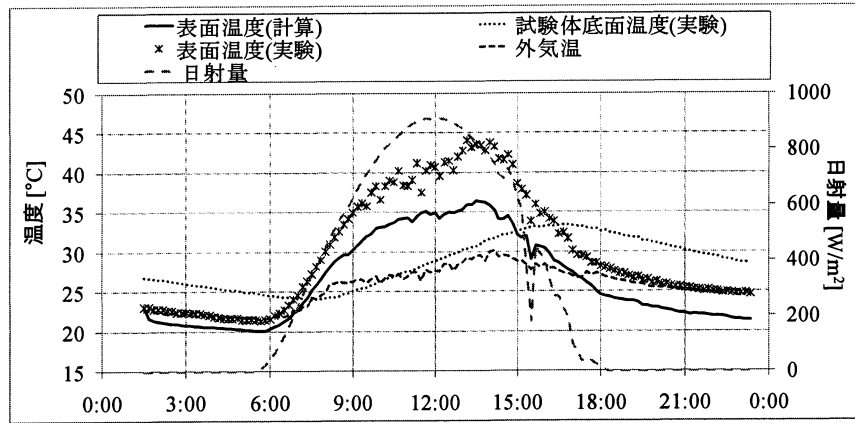


図 4.6.16 浸水深さ 60mm 8 号 25%浸水試験体表面温度及び気象条件

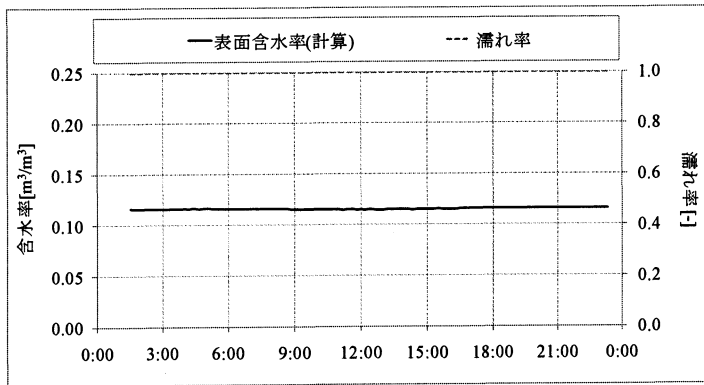


図 4.6.17 表面含水率・濡れ率計算結果

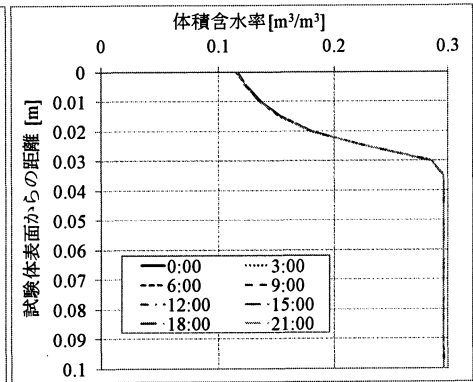


図 4.6.18 含水率分布計算結果

浸水深さ 60mm 浸水実験 8 号 15%浸水試験体

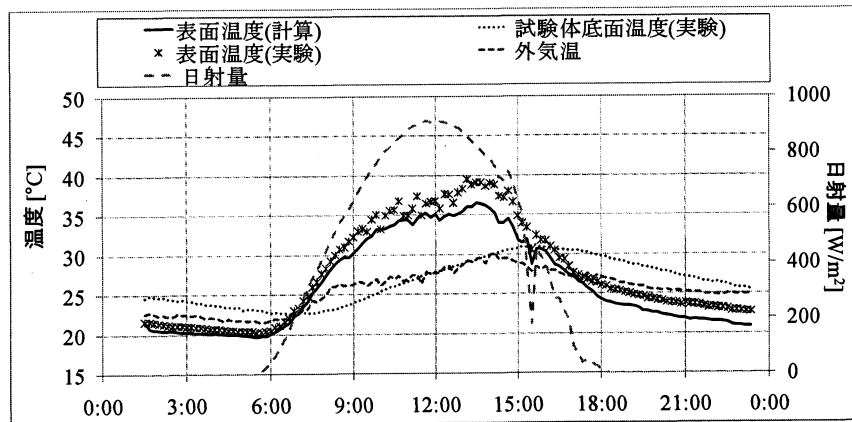


図 4.6.19 浸水深さ 60mm 8 号 35%浸水試験体表面温度及び気象条件

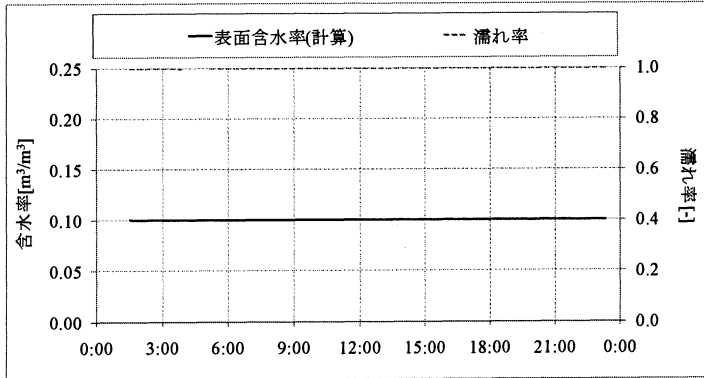


図 4.6.20 表面含水率・濡れ率計算結果

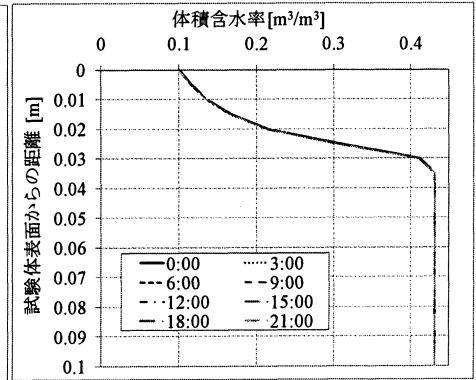


図 4.6.21 含水率分布計算結果

浸水深さ 60mm 浸水実験 8 号 35%浸水試験体

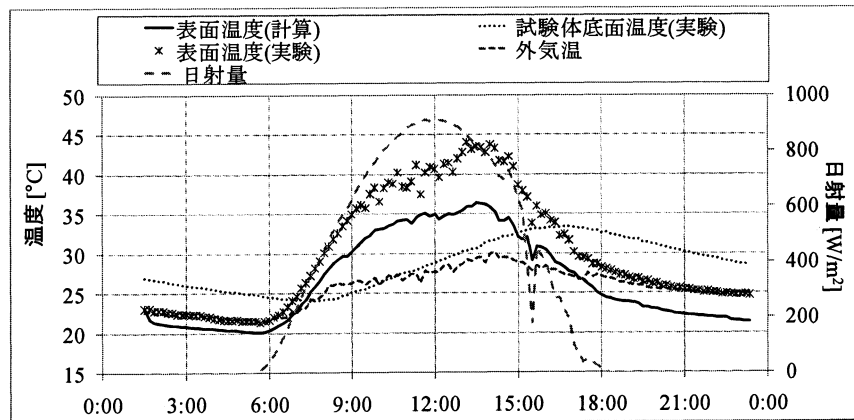


図 4.6.22 浸水深さ 60mm 7 号 25%浸水試験体表面温度及び気象条件

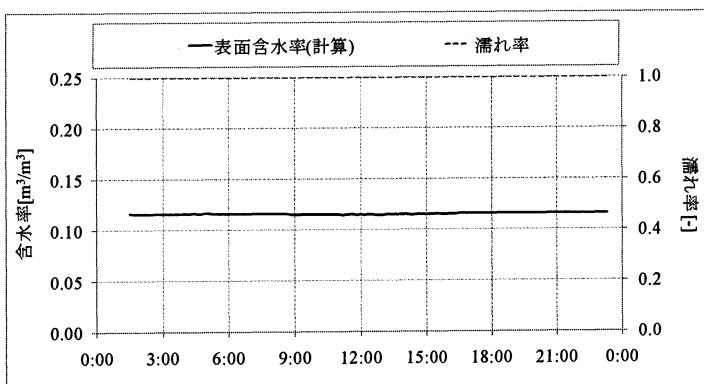


図 4.6.23 表面含水率・濡れ率計算結果

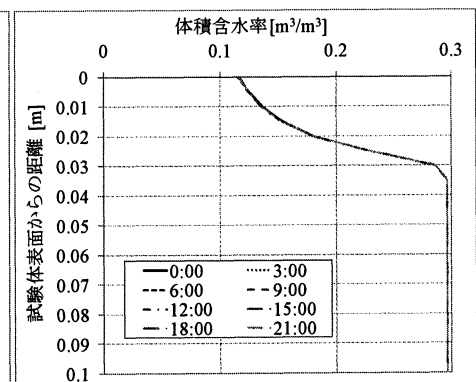


図 4.6.24 含水率分布計算結果

浸水深さ 60mm 浸水実験 7 号 25%浸水試験体

図 4.6.25 から図 4.6.36 に、2009 年 9 月 17 日に浸水深さ 70mm の実験測定を行った測定結果と計算結果を示した。浸水試験体表面温度推移の図から測定日の浸水試験体表面温度の計算結果は実験結果と良い一致を示したと言えるが、終日 8 号 15%浸水試験体表面温度の計算結果は、実験結果より低い結果となった。これは、浸水深さ 50mm の条件と同様に、屋外実験の試験体打設時に作成した試験体の絶乾空隙率が 30.5%と水分物性測定実験の試験体に比べ 7.1%程度高い値であり、空隙構造の違いが考えられた。目視観察から、表面が濡れた状態にあり、表面濡れ率や含水率の図から、浸水深さ 70mm の条件では、試験体表面は温度変化に依存することなく、終日濡れ率 1.0 の状態にあったことがわかる。

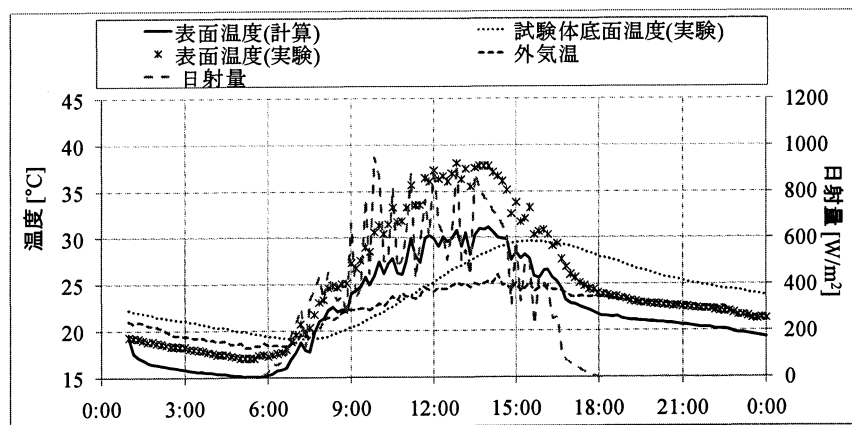


図 4.6.25 浸水深さ 70mm 8 号 15%浸水試験体表面温度及び気象条件

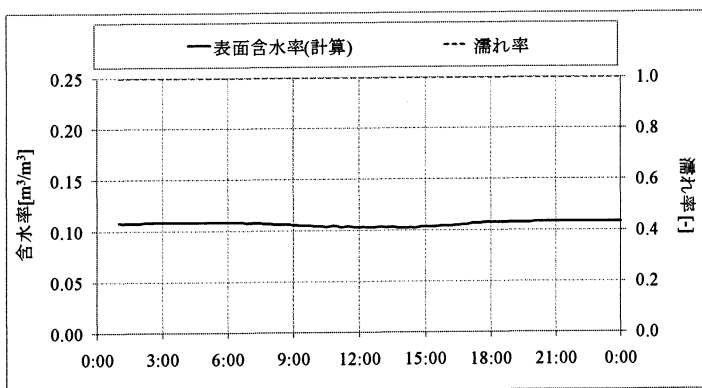


図 4.6.26 表面含水率・濡れ率計算結果

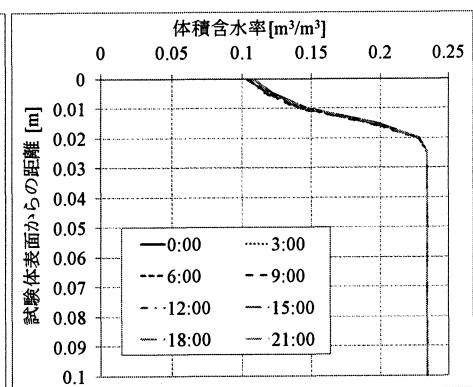


図 4.6.27 含水率分布計算結果

浸水深さ 70mm 浸水実験 8 号 15%浸水試験体

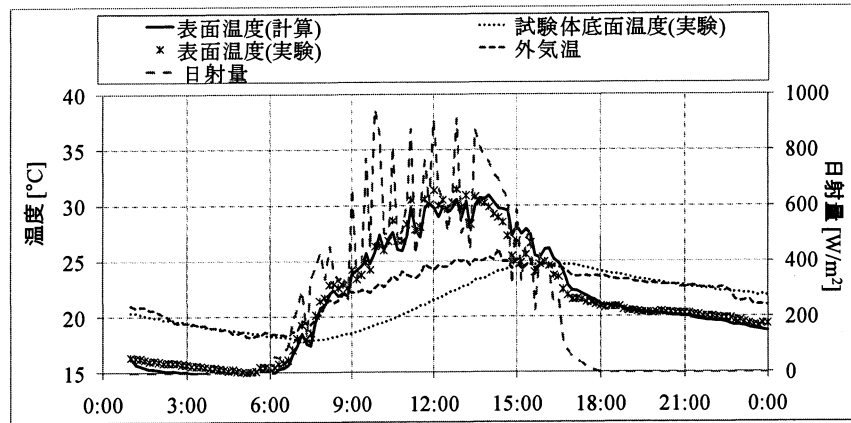


図 4.6.28 浸水深さ 70mm 8 号 25%浸水試験体表面温度及び気象条件

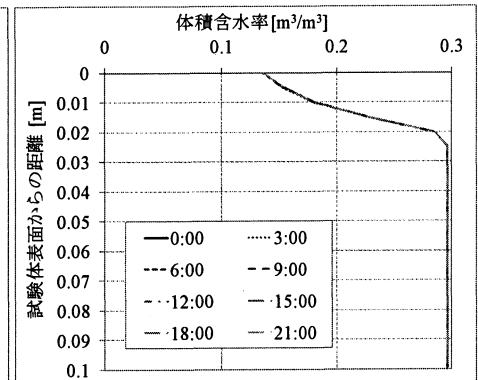
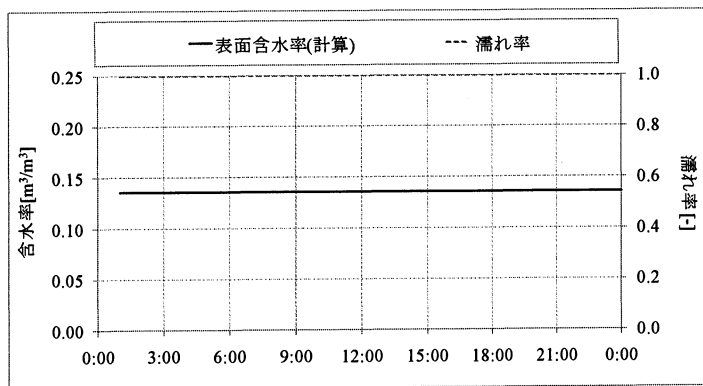


図 4.6.29 表面含水率・濡れ率計算結果

図 4.6.30 含水率分布計算結果

浸水深さ 70mm 浸水実験 8 号 25%浸水試験体

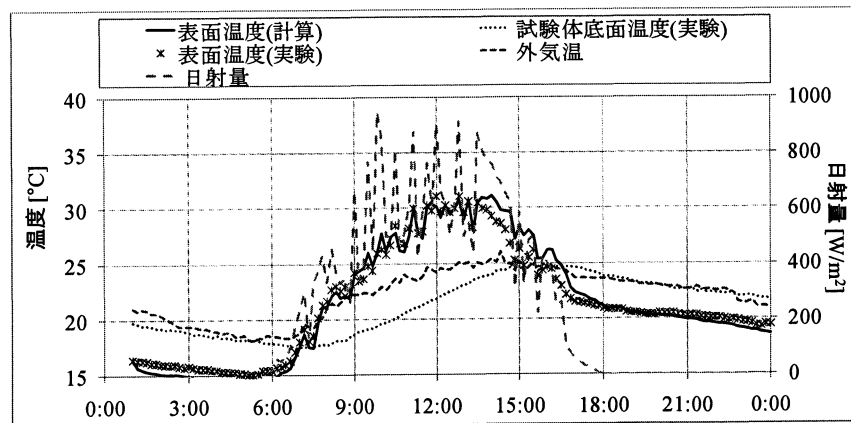


図 4.6.31 浸水深さ 70mm 8 号 35%浸水試験体表面温度及び気象条件

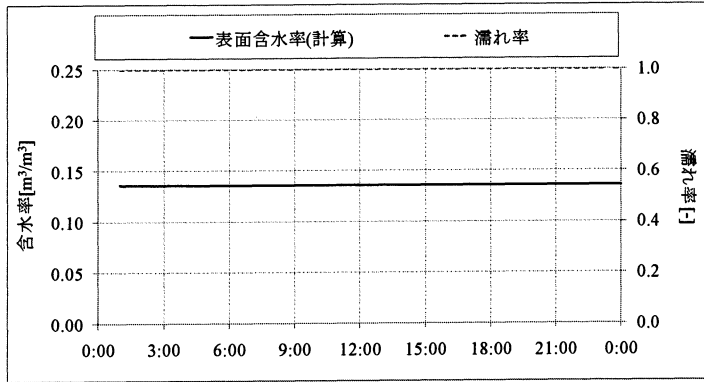


図 4.6.32 表面含水率・濡れ率計算結果

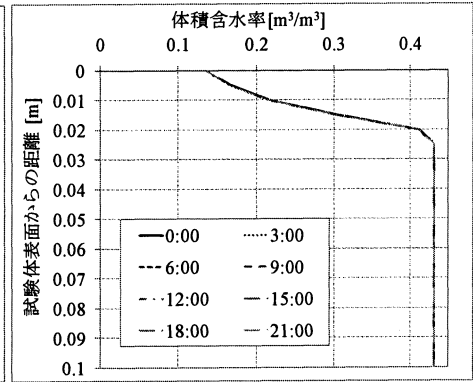


図 4.6.33 含水率分布計算結果

浸水深さ 70mm 浸水実験 8 号 35%浸水試験体

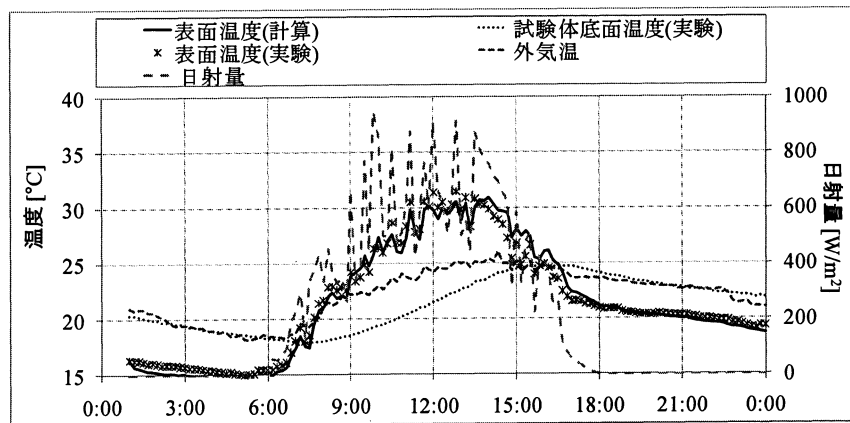


図 4.6.34 浸水深さ 70mm 7 号 25%浸水試験体表面温度及び気象条件

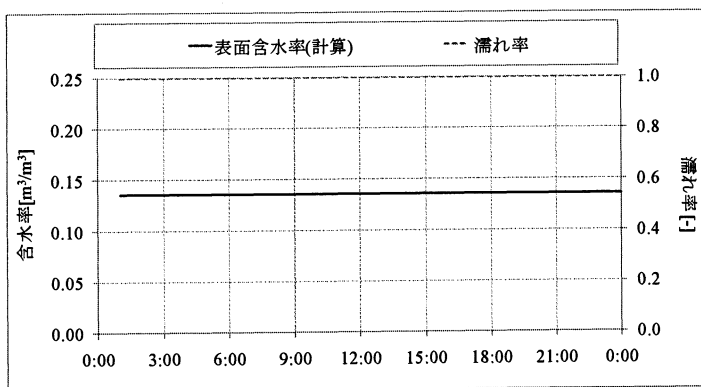


図 4.6.35 表面含水率・濡れ率計算結果

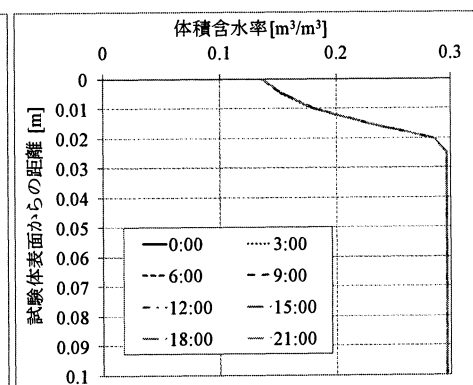


図 4.6.36 含水率分布計算結果

浸水深さ 70mm 浸水実験 7 号 25%浸水試験体

図 4.6.37 から図 4.6.48 に、2009 年 9 月 8 日に浸水深さ 80mm の実験測定を行った測定結果と計算結果を示した。浸水試験体表面温度推移の図から測定日の浸水試験体表面温度の計算結果は実験結果と良い一致を示したと言える。温度上昇に依存することなく、一定の含水率、濡れ率を保持していることがわかる。また、浸水試験体表面からの距離と体積含水率の関係の計算結果から、表面付近の含水率についても温度変化に依存することなく、一定の含水率を保っていることがわかる。

これらの結果から、試験体表面の蒸発量より試験体底部からの水分供給が上回り、浸水試験体の表面はある一定の濡れを維持していることがわかる。ゆえに、浸水試験体表面温度は湿り試験体表面温度と比べてピーク時で約 12°C の温度低下があり、試験体表面が常時水分を保持していることから貯水機能のある舗装システムであれば、空隙径の大きいポーラスコンクリート舗装であっても、十分な蒸発冷却効果が期待できることがわかる。

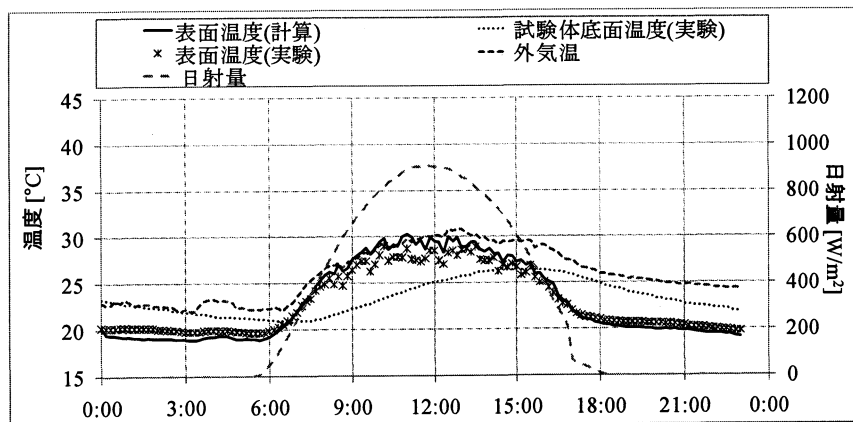


図 4.6.37 浸水深さ 80mm8 号 15%浸水試験体表面温度及び気象条件

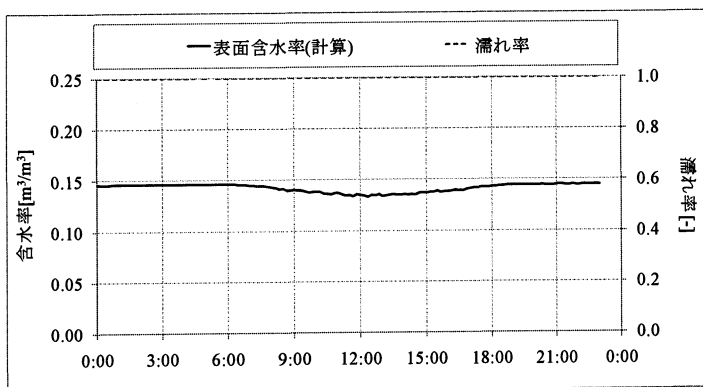


図 4.6.38 表面含水率・濡れ率計算結果

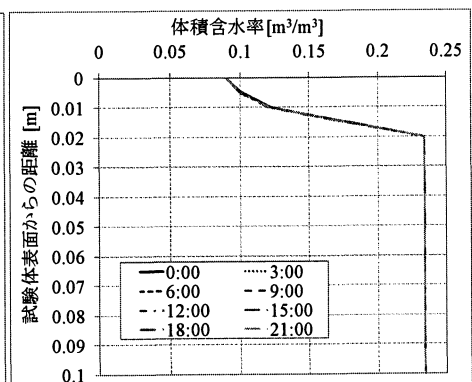


図 4.6.39 含水率分布計算結果

浸水深さ 80mm 浸水実験 8 号 15%浸水試験体

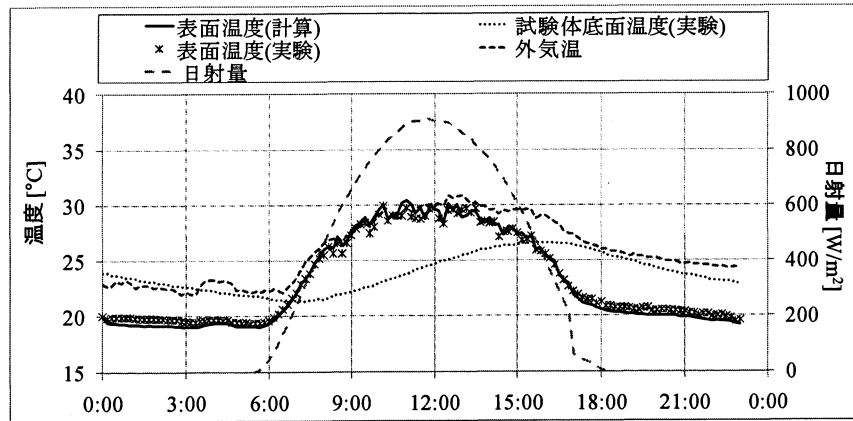


図 4.6.40 浸水深さ 80mm 8 号 25%浸水試験体表面温度及び気象条件

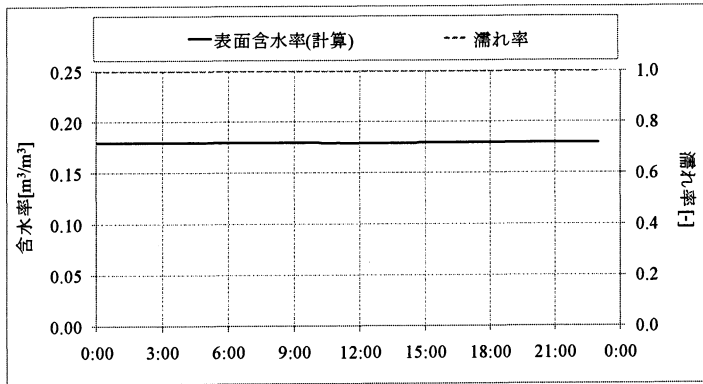


図 4.6.41 表面含水率・濡れ率計算結果

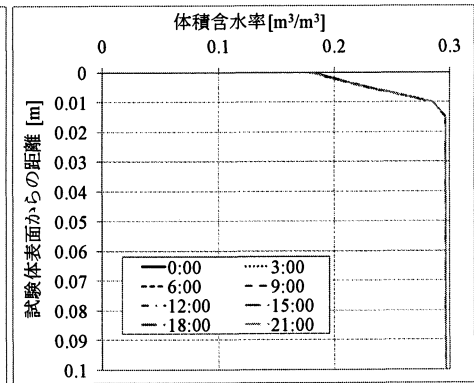


図 4.6.42 含水率分布計算結果

浸水深さ 80mm 浸水実験 8 号 25%浸水試験体

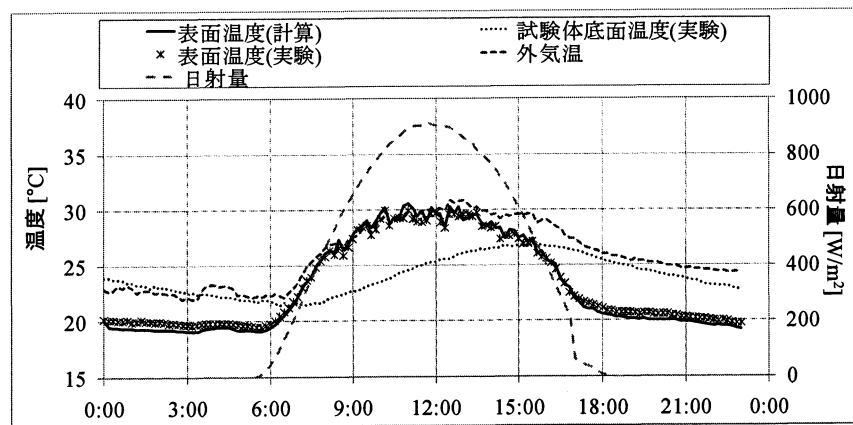


図 4.6.43 浸水深さ 80mm 8 号 35%浸水試験体表面温度及び気象条件

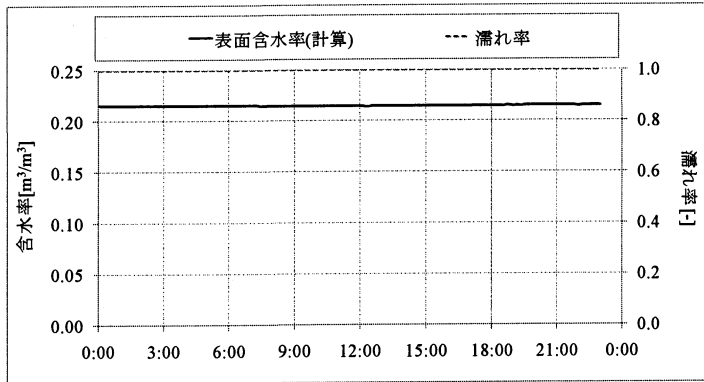


図 4.6.44 表面含水率・濡れ率計算結果

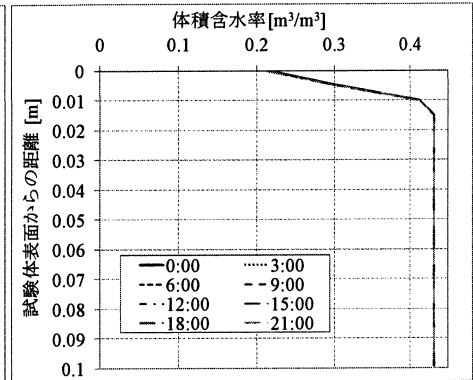


図 4.6.45 含水率分布計算結果

浸水深さ 80mm 浸水実験 8 号 35%浸水試験体

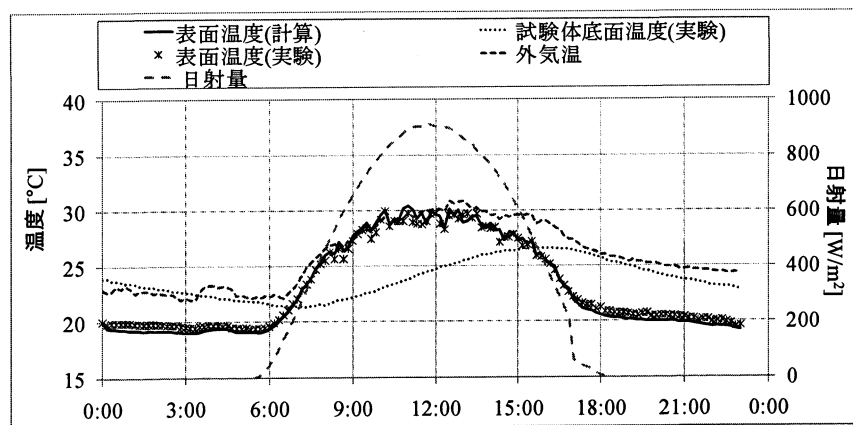


図 4.6.46 浸水深さ 80mm 7 号 25%浸水試験体表面温度及び気象条件

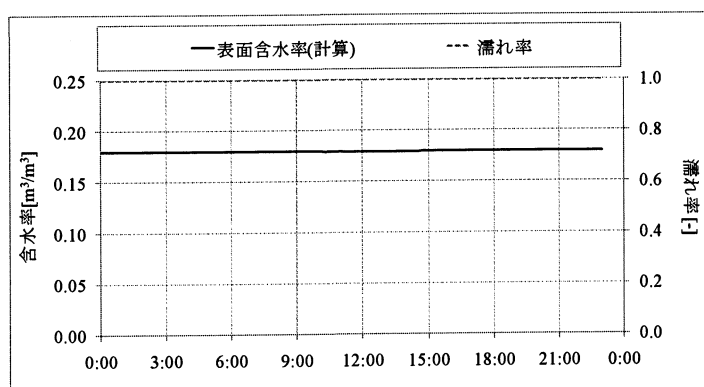


図 4.6.47 表面含水率・濡れ率計算結果

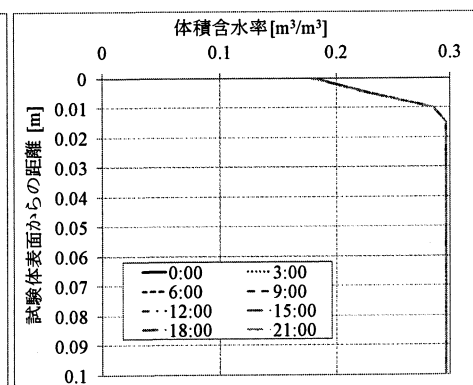


図 4.6.48 含水率分布計算結果

浸水深さ 80mm 浸水実験 7 号 25%浸水試験体

図 4.6.49 から図 4.6.60 に、2009 年 9 月 16 日から 9 月 18 日に排水実験のポーラスコンクリート試験体の種々温度と気象条件の測定結果と計算結果を示した。測定日は快晴であり、気温は 30℃近くまで上昇した。浸水時刻は、9 月 16 日午前 9 時とした。

実験開始 30 分後には、目視で全ての試験体表面が乾燥していることを確認した。表面濡れ率の計算結果からも、実験開始後 30 分後には、全ての試験体の表面濡れ率が約 0.1 となった。試験体の表面温度の計算結果は実験結果と良い一致を示したと言える。

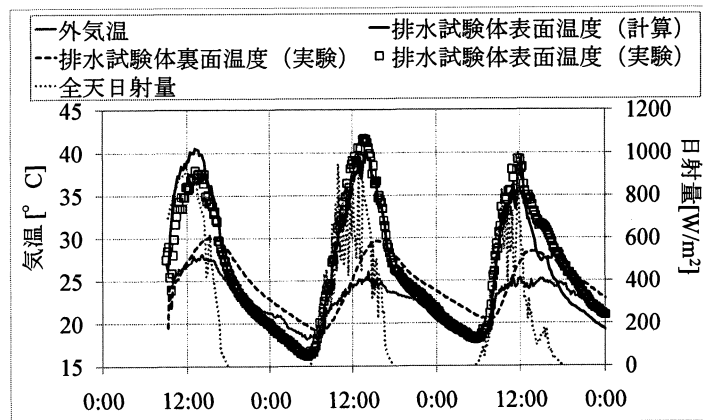


図 4.6.49 8 号 15%試験体表面温度及び気象条件

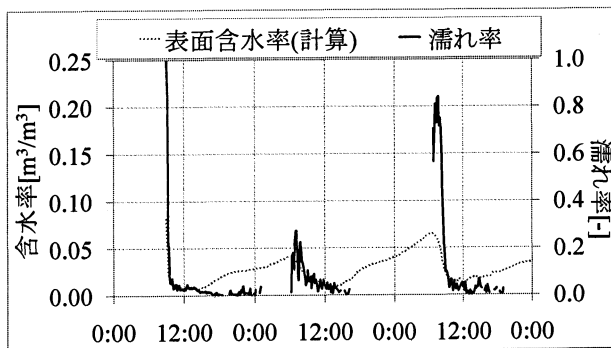


図 4.6.50 8 号 15%試験体
表面含水率・濡れ率計算結果

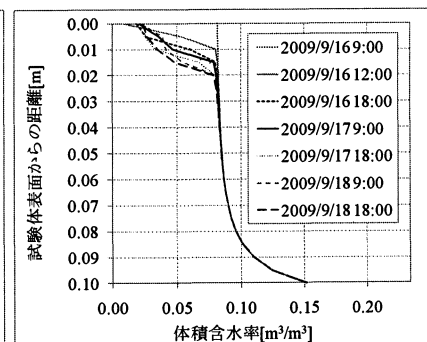


図 4.6.51 8 号 15%試験体
含水率分布計算結果

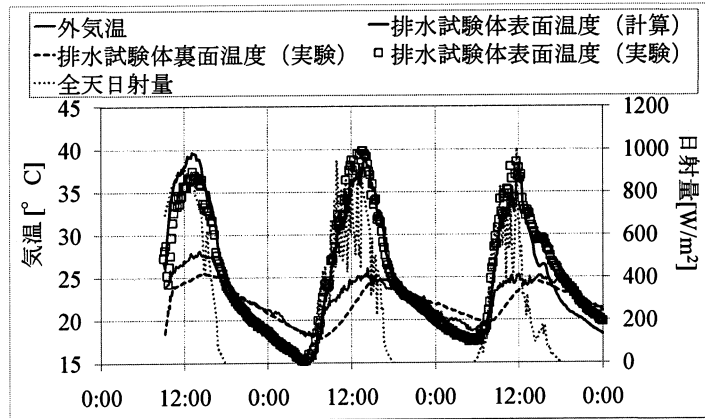


図 4.6.52 8号 25%試験体表面温度及び気象条件

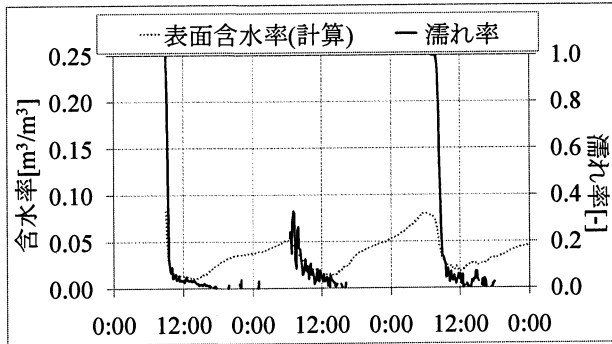


図 4.6.53 8号 25%試験体
表面含水率・濡れ率計算結果

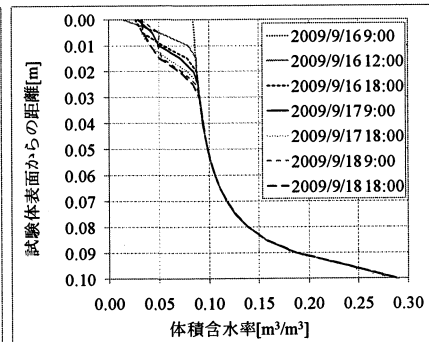


図 4.6.54 8号 25%試験体
含水率分布計算結果

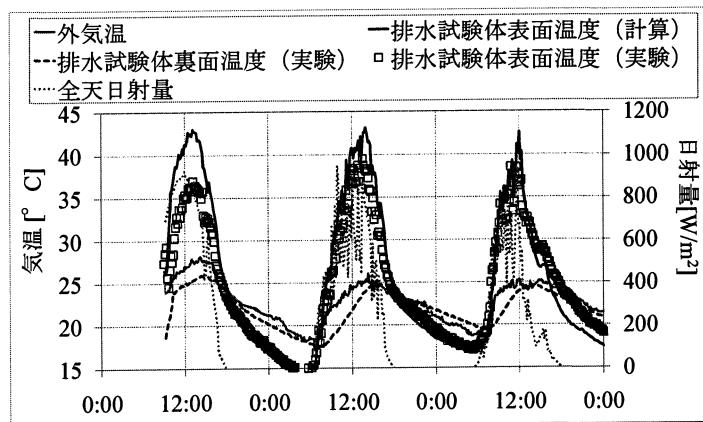


図 4.6.55 8号 35%試験体表面温度及び気象条件

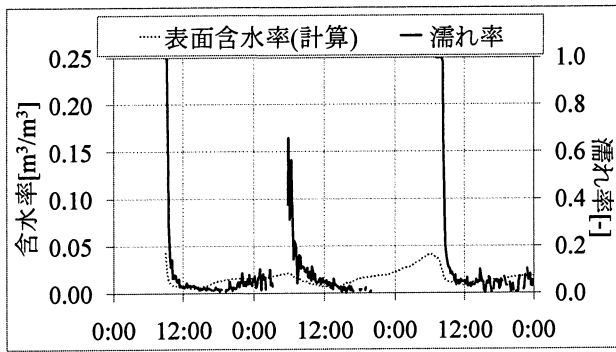


図 4.6.56 8号 35%試験体
表面含水率・濡れ率計算結果

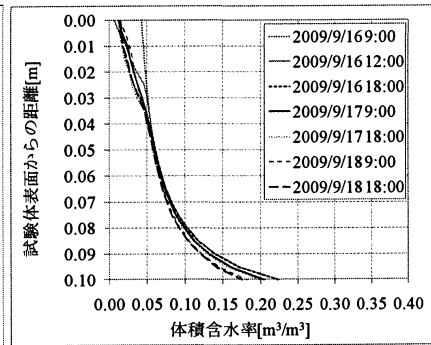


図 4.6.57 8号 35%試験体
含水率分布計算結果

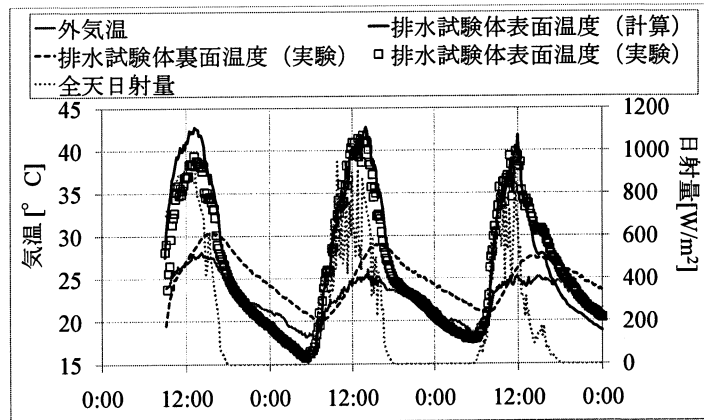


図 4.6.58 7号 25%試験体表面温度及び気象条件

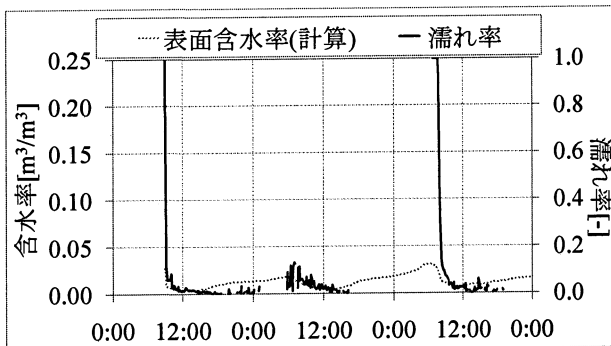


図 4.6.59 7号 25%試験体
表面含水率・濡れ率計算結果

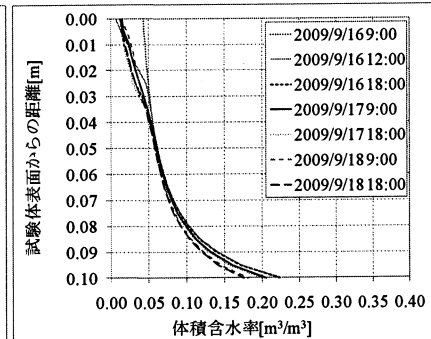


図 4.6.60 7号 25%試験体
含水率分布計算結果

4.7 第4章まとめ

本章では、第3章と同様の調合で作製したポーラスコンクリートを用いて、屋外蒸発冷却実験を行い、得られた数値計算の結果と実験結果を比較し、ポーラスコンクリートの水分物性値の妥当性を検討する。また、この実験からポーラスコンクリート舗装による水分蒸発冷却の効果を考察する。

浸水実験は浸水深さ 60mm の実験を除いて、試験体表面温度の実験結果と計算結果はよい一致を示した。濡れ率も外気温に依存することなく、ほぼ 1.0 を示しており、浸水深さ 50mm 以上の実験において、試験体表面は終日濡れた状態にあることがわかった。浸水深さ 60mm のとき、試験体表面温度の実験結果と計算結果が一致しなかったのは、浸水深さの設定に誤りがあったことが考えられる。また、浸水深さ 50、70mm のときの 8 号 15%試験体表面温度の計算結果が、精度のよい結果にならなかった。これは、屋外実験の試験体打設時に作成した試験体の絶乾空隙率と水分物性測定実験の試験体の空隙構造の違いが考えられた。

排水実験では、排水試験体の表面温度の計算結果と実験結果はよい一致を見せた。また、実験開始後 30 分後には、目視で全ての試験体表面が乾燥していることを確認した。表面濡れ率の計算結果からも、実験開始後 30 分後には、全ての試験体の表面濡れ率が約 0.1 となった。更に、計算結果から試験体表面温度の大きな低下が見られなかったことから、貯水機能の無い条件下では、試験体下部に保持された水分表層への移動速度が十分大きくないために、蒸発冷却効果はあまり期待できないと言える。

これらの結果から、試験体表面の蒸発量より試験体底部からの水分供給が上回り、浸水試験体の表面はある一定の濡れを維持していることがわかる。ゆえに、浸水試験体表面温度は排水試験体表面温度と比べてピーク時で約 12℃の温度低下があり、試験体表面が常時水分を保持していることから貯水機能のある舗装システムであれば、空隙径の大きいポーラスコンクリート舗装であっても、十分な蒸発冷却効果が期待できることがわかる。

第5章

結論

本研究では、透水性舗装材料として、ポーラスコンクリートを対象とし、調合が異なる数種類の材料の熱および水分特性の把握を目的とした。第3章でポーラスコンクリートの熱・水分物性の測定・同定を行い、第4章で行った屋外実験の実験結果と計算結果を比較することで、熱・水分物性値の妥当性を検討した。

空隙率・絶乾密度測定では、絶乾密度が高い程、空隙率が低くなる傾向にあり、絶乾密度は空隙率と比例関係にある結果となった。また、水中重量の測定においては、2ヶ月間浸水測定より真空ポンプ測定の方が、空隙内の空気を抜くことができ、設計空隙率に近い測定を行うことができた。

熱伝導率測定では、普通コンクリートと比較したとき、ポーラスコンクリートは空隙を所持する分、普通コンクリートより熱を通しにくい結果となった。また、種々のポーラスコンクリートで比較したとき、空隙率が高い程、熱伝導率が低くなる結果となった。

日射反射率測定では空隙率が低い程、日射反射率が高い結果となった。ポーラスコンクリートの日射反射率は普通コンクリートより低く、湿潤状態の時も同様であった。ゆえに、道路舗装を考えたとき湿潤状態にあるポーラスコンクリート舗装は普通コンクリート舗装より日射を吸収し、十分な蒸発冷却が望める。

平衡含水率測定では、低含水率域と高含水率域に分けて測定を行った。低含水率域の測定結果で、空隙率が低い試験体の体積含水率が高い傾向、高含水率域の測定結果で、底からの高さが高くなるにつれて、体積含水率が低くなる傾向が得られ、近似した平衡含水率の曲線は妥当であるといえる。

液相水分伝導率測定では、8号15%、8号20%、8号25%、8号30%試験体の測定結果は、時間変化に伴い、体積含水率が上昇する傾向がみられた。8号35%と7号25%試験体の測定結果はそのような傾向はみられなかった。液相水分伝導率の同定では、8号15%、8号20%、8号25%、8号30%試験体の計算結果は実験結果と概ね一致していることから、同定した液相水分伝導率の値は妥当であるといえる。

屋外実験は浸水実験と排水実験を行った。浸水実験は浸水深さ60mmの実験を除いて、試験体表面温度の実験結果と計算結果はよい一致を示した。濡れ率も外気温に依存することなく、ほぼ1.0を示しており、浸水深さ50mm以上の実験において、試験体表面は終日濡れた状態にあることがわかった。

排水実験では、排水試験体の表面温度の計算結果は実験結果より高くなった。この原因として、屋外実験の試験体打設時に作成した試験体と水分物性測定実験の試験体の空隙構造の違いが考えられる。また、実験開始後30分後には、目視で全ての試験体表面が乾燥していることを確認した。表面濡れ率の計算結果からも、実験開始後30分後には、全ての試験体の表面濡れ率が約0.1となった。更に、計算結果から試験体表面温度の大きな低下が見られなかったことから、貯水機能の無い条件下では、試験体下部に保持された水分表層への移動速度が十分大きくないために、蒸発冷却効果はあまり期待できない。

これらの結果から、第3章で測定したポーラスコンクリートの熱・水分物性の値は、第4章で行った屋外実験の計算結果が実験結果と概ね一致したことから、妥当な値の物性値であったと言える。しかし、物性値測定について、調合時や測定時の状況によって、物性値が大きく変化するので、より精密な測定を行う必要がある。

最後に蒸発冷却効果についての評価を述べる。浸水実験結果から、ほとんどの試験体で試験体表面の蒸発量に見合った水分供給があり、浸水試験体の表面はある一定の濡れを維持していることがわかる。ゆえに、浸水試験体表面温度は排水試験体表面温度と比べてピーク時で約12℃の温度低下があり、試験体表面が常時水分を保持していることから貯水機能のある舗装システムであれば、空隙径の大きいポーラスコンクリート舗装であっても、十分な蒸発冷却効果が期待できると言える。

付録

記号説明

λ : 熱伝導率[W/m² K]

$\lambda'_{Tg}, \lambda'_{Tl}$: 温度勾配に関する気相、液相水分伝導率 [kg/msK]

$\lambda'_{\mu g}, \lambda'_{\mu l}$: 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相、液相水分伝導率[kg/ms (J/kg)]

ρ_{gw}, ρ_{lw} : 気相、液相水分の密度[kg/m³]

Φ_0 : 乾燥時材料内の空隙率[-]

ψ : 材料の体積含水率[-]

$\Phi_0 - \psi$: 含水率 ψ のときの空隙率[-]

t : 時間[s]

W : 水蒸気から液水に相変化水分量[kg/m³s]

α_c : 対流熱伝達率[W/m²K]

C_m : 湿り空気の定圧比熱[J/kg K]

ρ_m : 湿り空気密度[kg/m³]

R_v : 水蒸気の気体定数

L_e : レイス数[-]

a : 湿り空気の温度伝導率[m²/s]

D : 湿り空気中の水蒸気の拡散係数[m²/s]

μ_0, μ_i : 空気、固体表面の水分化学ポテンシャル[J/kg]

T_0, T_i : 空気、固体表面の絶対温度[K]

α'_μ 、 α'_T ：水分化学ポテンシャル、温度勾配による水分伝達率[$\text{kg}/(\text{ms J/kg})$]、[kg/msK]

p ：水蒸気圧[Pa]

J_p ：降雨量[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

n ：固体表面の内向法線ベクトル[·]

$J_{gw(a)}$ ：空気層側の気相水分伝達による表面水分流[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

J_p ：降雨による液相の表面水分流[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

$J_{gw(s)}$ ：材料側の気相水分の表面水分流[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

$J_{lw(s)}$ ：材料側の液相水分の表面水分流[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

$q_{s(a)}$ ：空気層側の対流伝達による表面熱流[W/m^2]

q_r ：日射吸収、低温放射による表面発熱[W/m^2]

$q_{s(s)}$ ：材料側の熱伝導による表面熱流[W/m^2]

α_r ：放射熱伝達率[$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

q_{sol} ：日射吸収量[W/m^2]

q_{noc} ：夜間放射量[W/m^2]

V_s ：実質部の体積[m^3]

V_a ：試験体のみかけの体積（空隙を含む）[m^3]

M_d ：試験体の絶乾重量[kg]

p_w ：水の密度(=1000)[kg/m^3]

ρ ：絶乾密度 (kg/m^3)

M_v : 試験体の水中重量[kg]

q : ヒータ線 1m あたりの発熱量[kcal/m h]

V : 電圧[V]

I : 電流[A]

L : 電圧 V を測定しているヒータ線の長さ[m]

R : ヒータ線 1m あたりの抵抗[Ω]

r : 半径[m]

α : 試料の熱拡散率[m²/h]

t_1, t_2 : サンプルング時間[s]

T_1, T_2 : サンプルング時間 t_1, t_2 における温度[°C]

η : K 熱電対の熱電能 (-10~200°Cで $\eta=0.0405mV/^\circ C$ とした)

R : 反射率[-]

I_r : 反射日射量[W/m²]

I : 水平面上向き全天日射量[W/m²]

ϕ : 立体角投射率[-]

W : 試験体の幅[m]

H : 試験体表面と下向き日射計の距離[m]

R_v : 水蒸気のガス定数[J/kmol K]= $R/M_v=461.643$

R : 一般ガス定数[J/kmol K]=8316.96

M_v : 水の分子量[kg/kmol]

ϕ : 相対湿度 P_v/P_{vs} [nd]

P_v : 水蒸気圧[Pa]

P_{vs} : 飽和水蒸気圧[Pa]

T : 温度[K]

μ : 水分化学ポテンシャル[J/kg]

z : 水面からの高さ[mm]

g : 重力加速度[m/s²]

参考文献

- 1) 成田健一 他 4 名, "蒸発効率を用いた保水性舗装の性能評価", 日本建築学会技術報告集, No.20, pp.187-190, (2004)
- 2) 谷本潤 他 4 名, "都市環境評価のための地表面からの蒸発量の簡易計算手法に関する研究", 日本建築学会計画系論文集, No.534, pp.63-68, (2000)
- 3) 円井基史, 梅干野晃 他 2 名, "蒸発冷却効果を有する舗装体の表面濡れ状態に着目した熱・水分収支特性の把握 都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その 2", 日本建築学会環境系論文集, No.610, pp.75-82, (2006)
- 4) 松本衛, "建築壁体における熱・水分同時移動および水分蓄積に関する研究", 博士論文, (1978)
- 5) 例えば, 松本衛 他 2 名, "浸透性材料を用いた場合の屋根散水に於ける断熱効果の研究", 日本建築学会大会梗概集, pp.643-644, (1982)
- 6) 例えば, 小椋大輔, 松本衛, "自然状態かにおける地下構造物とその周辺地盤の熱・湿気性状の解析", 日本建築学会計画系論文集, No.474, pp.27-36, (1995)
- 7) Kooi, "Moisture Transport in Cellular Concrete Roofs", PhD thesis, TUEindhoven, The Netherlands
- 8) 水口裕之ほか, ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書 (2.6.3 力学性能・耐久性能), 日本コンクリート工学協会, pp.116-117, 2003.5
- 9) 黒木 他, 建築材料の湿気物性 JIS 規格測定法、日本建築学会環境工学委員会熱環境小委員会「湿気研究の新たな進展」、pp.25～32、2001
- 10) 松本衛, 新建築学体系 10 環境物理 第 3 章, 彰国社, 1984

謝辞

本論文作成に当たり、三重大学石川幸雄教授には本論文の研究テーマを与えて下さり、また研究に対する姿勢、暖かい配慮、何より完成に至る今日までの多大なるご指導を賜り深く感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、北野博亮助教には、終始一貫してご指導いただき、心より感謝しております。数々のご迷惑をおかけしたと思いますが、根気よくご指導して下さり、本論文を完成させることができました。ここに記して感謝の意を表します。

また、三重大学工学部建築学科・永井久也准教授、寺島貴根准教授、岩田剛技術専門職員には、日頃より大変貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

最後になりましたが、三畑十氏、馬林慶氏、佐野修平氏をはじめとする環境設備系研究室の皆様には、研究に関する実測への協力や、貴重なご意見やなどをいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

更にこの二年間、筆者が設備系研究室で充実した時間を過ごすことができたのは、大学生生活を共に過ごした親友、また支えてくださった親族一同のおかげであり、心から感謝いたします。