

透水性舗装の雨水浸透機能に関する研究

西山 哲¹・大西有三²・矢野隆夫³・北山迪也⁴・和田実⁵

¹正会員 博士（工学）京都大学大学院工学研究科 准教授（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

²正会員 工博,Ph.D 京都大学大学院工学研究科 教授（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

³正会員 博士（工学）京都大学大学院工学研究科 技術専門員（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

⁴非会員 修士（工学）東日本高速道路株式会社 関東支社（〒261-0014 千葉県美浜区若葉2丁目9番3号）

⁵正会員 社団法人近畿建設協会（〒540-6591 大阪府中央区大手前1-7-31）

透水性舗装の雨水浸透貯留機能は都市環境を改善するものとして注目されつつあるが、本研究では実際に施工された透水性舗装の模型実験により、雨水の浸透が降雨強度に大きく依存することを明らかにした。結果によれば、降雨強度が大きくなるにつれ舗装体内の不飽和領域が雨水浸透を妨げるように作用する。このメカニズムを把握するために気液2相を考慮する解析手法を開発し、気相の挙動が前述の雨水浸透能を左右することを証明した。これらの成果により、透水性舗装の雨水流出抑制効果を正確に評価することができる指針となる気液2相の考え方を示すことができた。

Key Words : permeable pavement, rainfall storage and infiltration, flood prevention, air flow

1. はじめに

これまで道路は安全で快適な交通を確保することを目的に建設され、我が国の経済発展あるいは日常生活を支える重要な社会資本として重要な機能を果たしてきた。ところが近年、道路としての機能を維持するためのアスファルト舗装が、ヒートアイランド現象や都市型洪水の誘因になると指摘されるに至り、環境に対する社会の認識が高まるにつれて、舗装に対しても環境負荷の軽減が求められ、新たな機能を有する舗装構造が研究されるようになってきた。特に特定都市河川浸水被害対策法が制定され、同法で指定された区域においては、一定規模の道路の新設に関しても雨水流出対策を行うことが求められ、総合治水対策の側面からも透水性舗装がもつ雨水浸透貯留機能が注目を集めている¹⁾。

透水性舗装は、これまで普及させてきた密粒度のアスファルト舗装とは異なり、粗骨材を主体とした配合で空隙率が高い構造にしている点に特徴があり、雨水を舗装内に貯留させると同時に、路床にも浸透させるものである。このため特に車道に普及させた場合の耐久性について、まだ十分な評価がなされているとは言い難い面があるものの、これまでの研究報告において、透水管の設置による舗装外への排水や舗装の増し厚によって耐久性を向上させる工夫などが提案されており、都市型洪水対策としての水収支に着目した透水性舗装の普及が検討され始めている²⁾。今後も環境対策としての透水性舗装の普及

に関する議論は活発になると考えられるが、浸透貯留機能の設計に対する指針の構築とその検証が充分なされていないとは言い難い。本研究はこのような背景を鑑み、実験によって透水性舗装の水収支を明らかにし、さらにその実験で得られた現象を解明し、得られた雨水浸透のメカニズムを考慮することで、雨水透水性貯留施設としての透水性舗装の設計を考察することが可能な解析手法の構築を試みるものである。

2. 模型実験による浸透貯留機能の評価

(1) 模型舗装の概要

本研究では一般国道163号門真地区に施工した透水性舗装（舗装計画交通量=3900台/日・方向、設計CBR=20%、等値換算厚 $T_A=25.2$ cm）と同一構造の模型を構築し、散水実験による雨水貯留浸透機能の評価した。舗装模型の施工にあたっては、施工法も実際の道路と同様なものとし、アスファルトフィニッシャーによりアスファルト混合物の敷きならしを行った後にマカダムローラおよびタイヤローラを用いて転圧を行った。さらに路床に関しても、セメント乳剤で改良した構造とすることで163号の場合と同じ透水係数をもつようにした。図-1は模型構造の概観であり、各層厚および物性値を表-1に示す。防水シートを模型舗装の路床底部および周囲に設置し、またスプリンクラーにより散水した水が模型外へと飛散しないようにカーテンを透水性舗装上および周囲に設置する

(a) 平面図

(b) 断面図

図-1 模型舗装の平面図および断面図

番号	名称	材料	層厚 H_i [mm]	透水係数 k_i [cm/s]	空隙率 θ_i [%]
A	表層	開粒度アスファルト (最大粒径8mm)	30	5.0×10^{-2}	22.5
B	基層	開粒度アスファルト (最大粒径20mm)	120	6.4×10^{-2}	20.3
C	上層路盤	開粒度アスファルト 安定処理 (改質Ⅱ 型)	100	6.9×10^{-2}	20.8
D	下層路盤	再生クラッシャーラン RC30	150	1.3×10^{-3}	26.5
E	路床	鉋さい	350	3.4×10^{-4}	5.0

ことで、正確な雨水浸透貯留機能を評価するように試みた。また降雨は、舗装上部に設置したスプリンクラーから人工的に雨を降らせるシステムによって発生させ、降雨強度を制御できるよう配管に流量調整バルブを取り付けるとともに、降雨量を求めるため流量計を設置した³⁾。

さらに模型舗装には、舗装内の水位を測定するため図-2に示すように路床内に3個、路床と下層路盤の間に1個

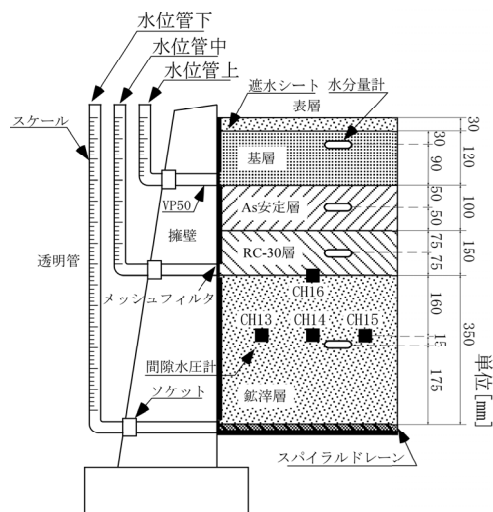


図-2 模型舗装における計測機器配置図

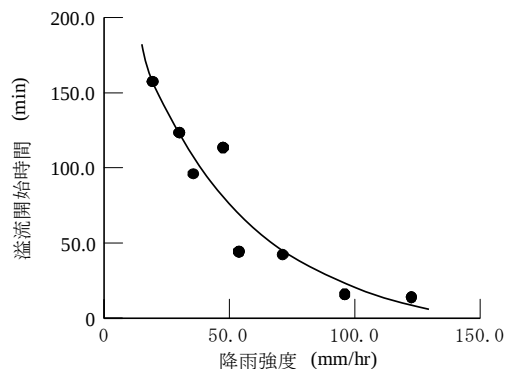


図-3 降雨強度と溢流開始時間の関係

の間隙水圧計を埋設し、また舗装内の水面の発生状況を調べるための水位管も設置した。溢流量と路床底部から排出される浸透量は転倒枡計を用いて計測する。溢流量は図-1(a)に示すように縦断方向0.5%、横断方向2%の片勾配により溢流した雨水を浸透枡A2により集水し、浸透枡内に設置した転倒枡により計測を行う。また浸透量に関しては、図-1(b)に示すように防水シート上に配置したスパイラルドレーンにより集水し、その水を図-1(a)に示す浸透枡Bまで導き、そこに設置した転倒枡により計測する。

散水については、降雨強度を19.4mm/hから123mm/hまでの一定の値に設定し、総降雨量に関しては、舗装への雨水浸透が定常状態になる83.3mmとした。なお、本実験では浸透した雨水が原地盤へ浸透していくことを模擬するため、図-1(a)に示すバルブを開放した状態で散水実験を行った。

(2) 実験結果および考察

図-3 に降雨強度に対する溢流開始時間を示す。溢流開始時間とは、溢流量計測用の転倒枀に散水開始後初めて

計測値が現れた時間である。このグラフから降雨強度が強くなると溢流開始時間が早くなることがわかる。

次に図-4(a)および(b)に水位管内に水面が発生した時間を深度方向にとった値を降雨強度と共に示す。図の縦軸は水位管内に水面が現れたことが目視にて確認した時間であり、水面が現れた時点で水位管を挿入した位置が飽和状態になったと考えられる。図-4より、降雨強度が約72mm/h以下では、舗装内の下部より順次雨水が貯留されていくことが分かるが、約90mm/h以上では舗装内の基層の方が下層路盤より先に飽和状態になる現象が現れる。このことから、降雨強度が弱い場合には舗装底部から順次水位が上昇するが、降雨強度が強くなると表面および基層が飽和し、舗装体内に雨水が浸透し難くなる現象が生じると考えられ、これが図-3に示すような降雨強度が強くなるにつれ溢流開始時間が早くなる現象にむすびついたと考える。

この降雨強度への雨水浸透の依存性は、図-5に示す溢流開始時における水位の結果からも把握できる。図の縦軸は、鉦滓層中に埋設した計器の中で安定した計測値を出力したCH13,14,および16の間隙水圧値より溢流時の間隙水圧計からの水位の位置を求めたものであり、降雨強

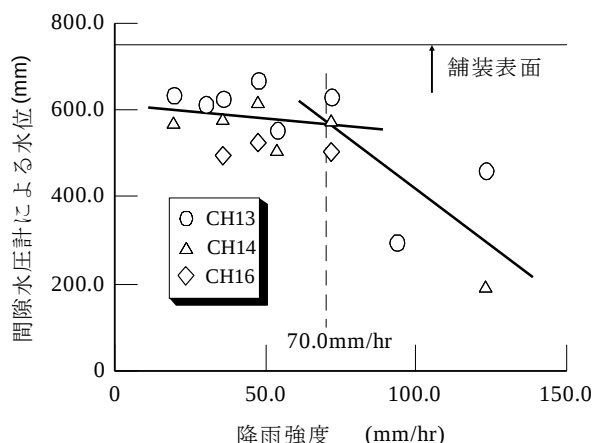


図-5 降雨強度と溢流開始時の水位の関係

度が70mm/hrを超えると舗装体内の下層および上層路盤内に水面が発生することが分かる。はこれらの結果より、舗装体内への雨水浸透現象は図-3に示す非線形的な挙動となり、降雨強度によって舗装体内に2重水面が発生することが明らかになった。

3. 雨水浸透メカニズムの検討

前節において透水性舗装における雨水浸透現象の特徴を模型舗装を用いた実験から検討した。これまでの地盤における雨水の浸透現象を対象とした既往の研究では、間隙空気の影響が雨水の浸透メカニズムに影響を及ぼすことが明らかになっている。本研究では、透水性舗装における雨水浸透現象が、地盤と同様に空気の流動を考慮して解明できるかどうか試みる⁴⁾。そこで透水性舗装用に、気液二相の挙動を加味する有限要素法を開発することにより実験で得られた浸透貯留機能のシミュレーションを試み、気相の影響を考察すると同時に雨水流出抑制効果の算定手法の構築を図る。

解析に当たっては、未知数を舗装体内の水圧 P_l と空気圧 P_a とし、ダルシー則と質量保存則により導かれる非線形の連立微分方程式により算定する手法を用いる。まずダルシー則については、式(1)および式(2)から液相の流速 j_{li} [cm/s]と空気相の流速 j_{ai} [kg/m²/sec]を求める。

$$j_{li} = -\frac{k_{ij}K_l}{\mu_l} \frac{\partial(P_l + \rho_l g x_3)}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$j_{ai} = -\frac{k_{ij}K_a}{\mu_a} \frac{\partial(P_a + \rho_a g x_3)}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここに、 k_{ij} : 固有浸透率[m²]、 K_l : 比透水係数、 μ_l : 水の粘性係数[Pa・sec]、 P_l : 間隙水圧[atm]、 ρ_l : 水の

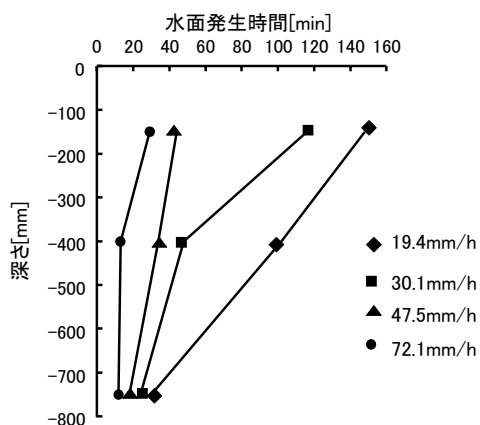


図-4(a) 降雨強度と水位管の水面発生時間の関係
(降雨強度 19.4mm/h から 72.1mm/h まで)

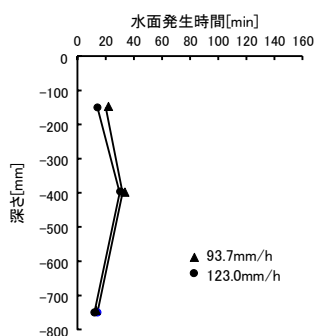


図-4(b) 降雨強度と水位管の水面発生時間の関係
(降雨強度 93.7mm/h と 123.0mm/h まで)

密度[kg/m³], g : 重力加速度[m/sec²], x_3 : 鉛直座標[m],
 K_a : 比透気係数, μ_a : 空気の粘性係数[Pa・sec], P_a :
 空気圧[atm], ρ_a : 空気の密度[kg/m³]である。

また質量保存則については, 式(3)および式(4)となる。

$$\frac{\partial(\rho_l \theta)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho_l J_{li})}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\phi - \theta)\rho_a}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho_a J_{ai})}{\partial x_i} \quad (4)$$

ここに θ は体積含水率, ϕ は間隙率である。

ρ_l が定数であることから, (1)式を(3)式に代入して式(5)を得る。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ - \frac{k_{ij} K_l}{\mu_l} \frac{\partial(P_l + \rho_l g x_3)}{\partial x_j} \right\} \quad (5)$$

また, 毛管圧 P_C [atm]は空気圧 P_a と間隙水圧 P_l の差より式(6)となり, それより式(7)を得る。

$$P_C = P_a - P_l \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{dP_C} \frac{\partial P_C}{\partial t} \quad (7)$$

これから式(5)は式(8)式のように変形される。

$$\frac{d\theta}{dP_C} \left(\frac{\partial P_a}{\partial t} - \frac{\partial P_l}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{k_{ij} K_l}{\mu_l} \frac{\partial(P_l + \rho_l g x_3)}{\partial x_j} \right\} \quad (8)$$

さらに, 空気密度 ρ_a と空気圧 P_a は式(9)の関係にあり,
 式(2)および式(9)式を式(4)に代入して式(10)を得る。

$$\rho_a = \frac{P_a}{RT} \quad (9)$$

なお, R : 気体定数[J/K・mol], T : 絶対温度[K]である。

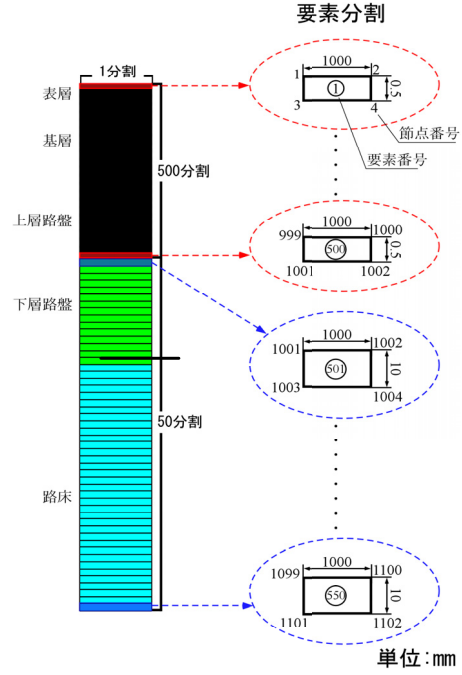
$$\frac{\partial(\phi - \theta)P_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(P_a \frac{k_{ij} K_a}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

式(10)の左辺は式(11)のように変形できる。

$$\frac{\partial(\phi - \theta)P_a}{\partial t} = (\phi - \theta) \frac{\partial P_a}{\partial t} - P_a \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (11)$$

式(6), 式(7), 式(10)および式(11)より式(12)を得る。

$$(\phi - \theta) \frac{\partial P_a}{\partial t} + P_a \frac{d\theta}{dP_C} \left(\frac{\partial P_l}{\partial t} - \frac{\partial P_a}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(P_a \frac{k_{ij} K_a}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$



上層路盤に対しては、最大粒径 20mm の骨材を用いているため G-d モデルを用いる⁵⁾。透気係数については、パラメータスタディを行い決定した。これらから決定した不飽和浸透特性を図-9 に示す。上述の条件の下で降雨強度に対する溢流開始時間を解析した結果を図-10 に示す。気相の挙動を加味した水の動きを解析すると、図に示すように実験で得られた溢流時間の降雨強度依存性を再現することが可能であることが分かる。図-11 には溢流開始時の貯留量に関して、実験で得られた値と解析による値を示す。この結果も同様に降雨強度が強くなると貯留量が減

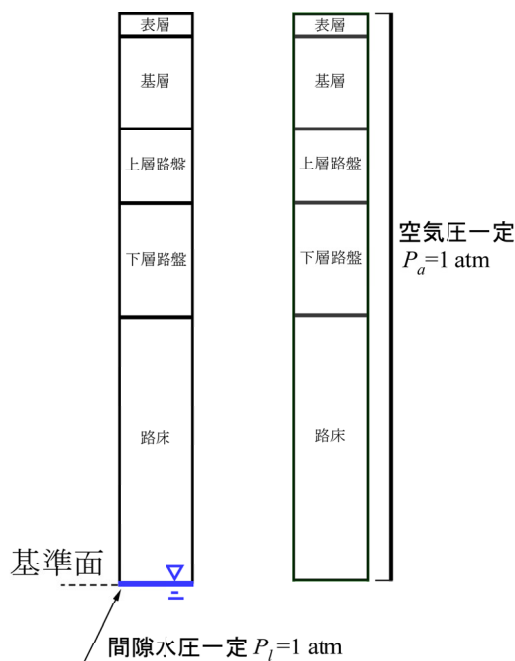


図-7 液相 (左) と気相 (右) の初期条件

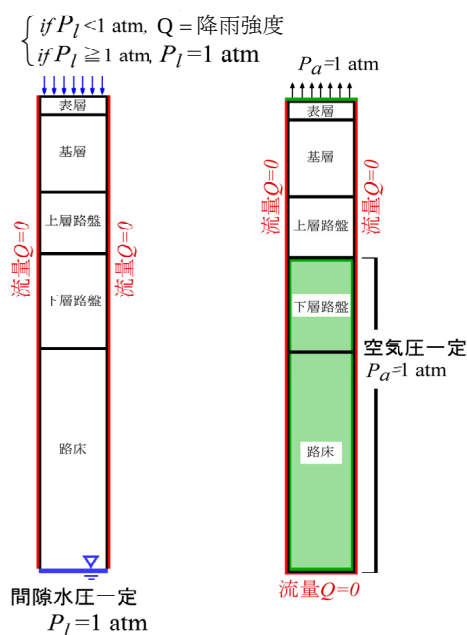


図-8 液相 (左) と気相 (右) の境界条件

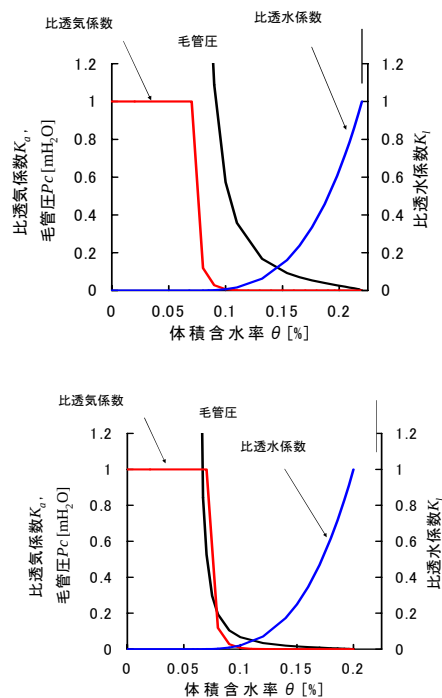


図-9 表層 (左) および基層と上層路盤 (右) の不飽和特性

少するという挙動も気相の影響が反映したものであることが分かり、舗装体内では気液 2 相の挙動が雨水浸透現象を支配していることが分かる。

さらに気相がどのように浸透貯留機能の降雨強度依存性を左右するのかを明確にするために、解析モデルにおいて、全ての節点で常に空気圧を大気圧とすることで気相の挙動が影響しない単相の条件で解析した場合と、これまでの気相の影響を考慮した気液 2 相の場合とを比較した。図-12 および図-13 は、それぞれ降雨強度が 70mm/h と 120mm/h の場合の舗装体内の水面の位置の経時変化を解析した結果である。単相ではいずれの場合も水面が底部から順次上昇していき、舗装体内の各層が飽和状態になると表面が飽和する、すなわち溢流する現象になっている。

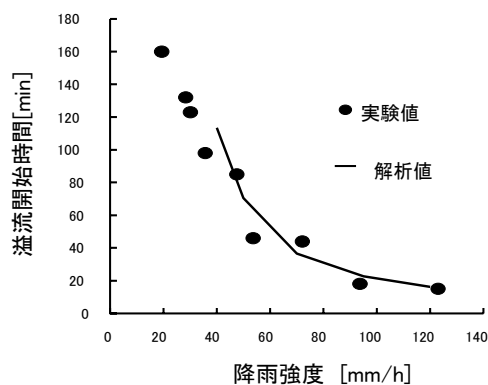


図-10 溢流開始時間の降雨強度依存性の解析結果

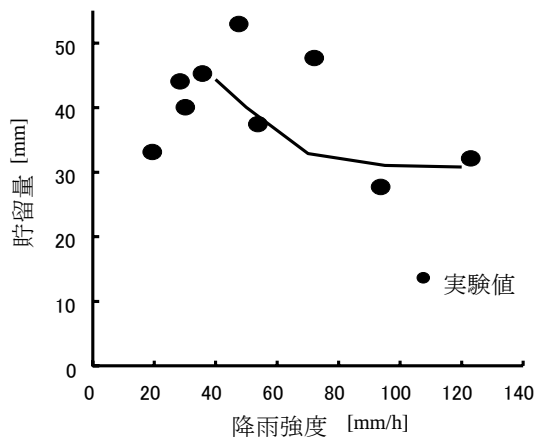


図-11 貯留量の降雨強度依存性の解析結果

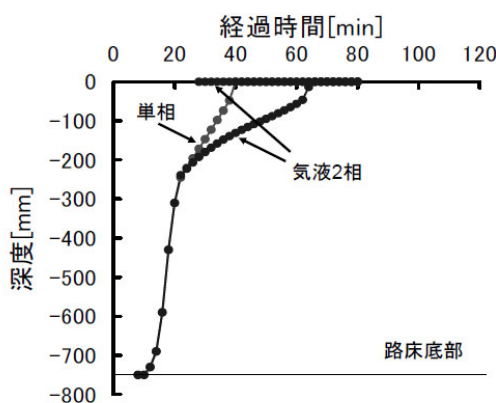


図-12 降雨強度 70mm/hr のときの水面位置の経時変化

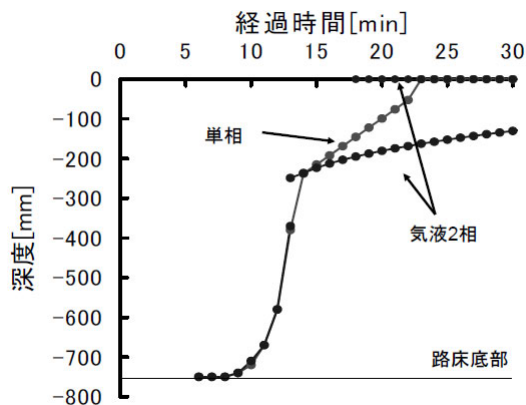


図-13 降雨強度 120mm/hr のときの水面位置の経時変化

一方、気液二相の場合は 70mm/hr の降雨強度では舗装体内の下層路盤層辺りに水面が現れると同時に表面が飽和する。この傾向は 120mm/hr の降雨強度では顕著になり、基層が飽和しないまま表面が飽和する、すなわち舗装体内に 2 重水面が発生したまま溢流する状態が続いている。

これは図-4 で示した水位管での水面の位置の観測結果とも傾向が一致しており、舗装体内の不飽和領域の発生が雨水浸透現象を支配していることを明確に示すものであ

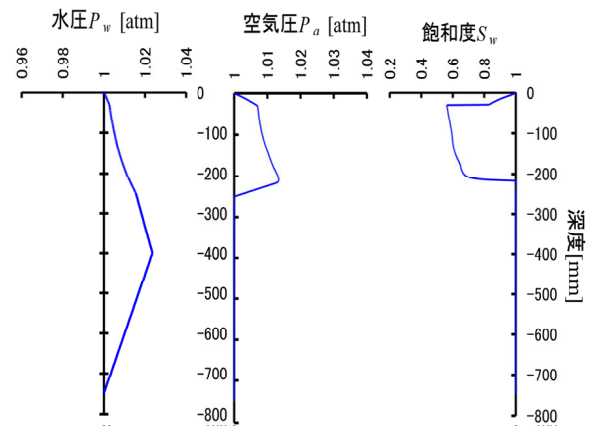


図-14 舗装体内の水圧、空気圧および飽和度の分布

る。また図-14 は 120mm/hr の降雨強度で溢流が発生した際の舗装体内の水圧、空気圧および飽和度の分布を解析した結果を示したものである。これより、舗装体の上部において水圧および空気圧の高い領域が発生しており、それによって雨水浸透が妨げられることで不飽和領域が形成される結果、舗装体内のすべてが飽和状態になる以前に表面からの溢流が現れることが分かる。

これら解析によって明らかになったメカニズムを用いて、具体的に透水性舗装の洪水抑制機能を評価することを試みる。前述の特定都市河川浸水被害対策法では、1000m²以上の開発がなされるとき、10 年確率降雨の基準降雨に対する流出量を低減させるように雨水浸透貯留施設を検討する必要がある。そのため透水性舗装は、新たな雨水浸透貯留施設の設置に替わる機能を備えた道路としての期待が大きい。ここでは前述の国道 163 号線のある大阪府寝屋川水系の流域を対象に、大阪府策定の基準降雨を用いて流出雨水量の算定を行った結果を示す。図-15 は基準降雨を示すもので、24 時間の中央集中型降雨波形であり、最大降雨強度は 110.6mm/h である。解析はこれまでと同じ一般国道 163 号門真地区に施工した透水性舗装をモデル化したものであり、本節で記述した境界条件および初期条件を用いた。

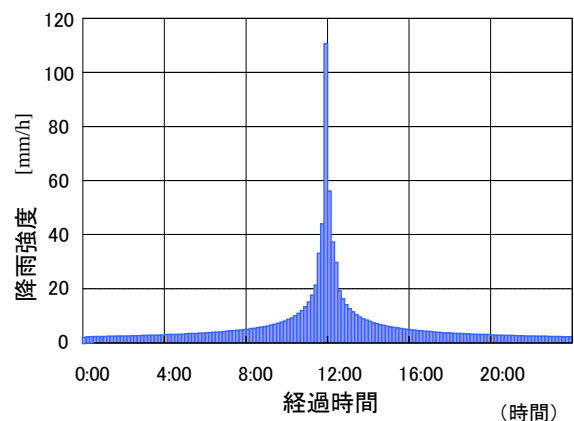


図-15 解析に用いた大阪府の基準降雨

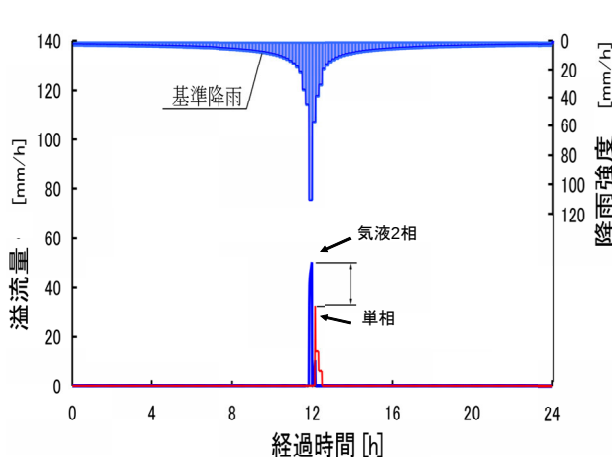


図-16 基準降雨に対する溢流量の解析結果

解析結果を図-16 および図-17 に示す。ただし、前述のように気相の影響を考慮しない単相での結果と気相の影響を考慮する気液 2 相での結果を示す。気相を考慮しないにもかかわらず基準降雨が最大降雨強度に達する付近において溢流が発生しているが、気相を考慮しないと約 20mm/h 少なく溢流量を見積ることになる。またピーク遅延時間においては、気相の影響が無い場合には最大降雨強度が終了した後に溢流が発生するが、気相の影響を考慮すると最大降雨強度になる時刻に溢流が発生し、同じくピーク遅延時間が約 10 分程度早くなる。このように透水性舗装は、降雨強度によって、その洪水抑制機能の見積りに非線形的な現象を考慮する必要があるが、気相を考慮する解析手法によって、実際の水収支をはじめピーク遅延時間などを正確に評価することが可能となる。本研究は、実際の国道に施工された透水性舗装を対象にして解析モデルを構築したが、舗装体の構造が変わっても解析モデルを変更すれば、その水収支を正確に評価することが可能で、気相が雨水浸透能を左右するというメカニズムを考慮した汎用的な解析手法の確立は、透水性舗装の普及を図る上で、構造設計を支援するツールとして活用していくことも期待できると考える⁷⁾。

4. まとめ

本研究では、実際の国道に施工された透水性舗装と同じ構造の舗装モデルによる浸透貯留機能を計測し、流出抑制機能の定量的な性能を評価した。その結果、溢流量および時間に降雨強度の依存性が現れることが分かり、そのメカニズムを考察するための解析によって、舗装体内の気相の挙動が雨水浸透能を支配していることを明らかにした。ここで解析の対象とした透水性舗装は、舗装計画交通量が 3900 台/日・方向のところに施工されて約 3 年が経過したものである。これらの耐久性に関するデータが蓄積されれば、これからますます環境対策用として透水性舗装を普及させる議論が活発になると考えられる⁸⁾。その際、舗装体内の気液の挙動を明確に把握できる解

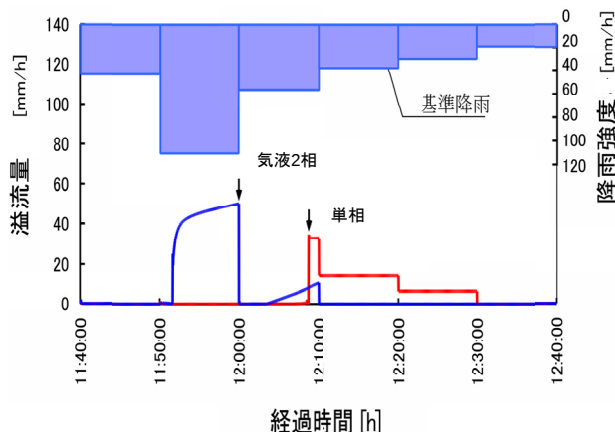


図-17 基準降雨に対するピーク遅延時間の解析結果

析手法を構築しておくことは、舗装がもつ機能を正確に評価するために必要であると考えられる。さらに、どのような構造の場合にどのように舗装体の水収支の挙動が変わってくるのかを、本研究で開発した手法を用いて検討していく予定である。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、社団法人日本道路建設業協会関西支部の方々には多大なる御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西山哲, 大西有三, 矢野隆夫, 和田実: 洪水抑止およびヒートアイランド現象緩和のための透水性舗装, 土と基礎, Vol.53, No.9, pp.24-26, 2005.
- 2) 鎌田修, 清水忠昭, 伊藤正秀: 車道透水性舗装の耐久性に関する研究, 土木学会舗装工学論文集 Vol.10, pp.91-98, 2005.
- 3) 木下孝樹, 和田実, 西山哲: 車道透水性モデルの機能性評価～産・学・官の取り組み～, 第 26 回日本道路会議, 12060, 2005.
- 4) 佐藤邦明: 間隙空気の圧縮を伴う鉛直浸透に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第 216 号, pp.21-28, 1973.
- 5) 工藤アキヒコ, 西垣誠, 西方卯佐男, 鳥居剛, 浅田昌蔵: 粗粒材の不飽和浸透特性の測定と粒度による影響, 土木学会論文集, No.743, III-64, p.77-87, 2003.
- 6) Van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Am. J., Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980.
- 7) 独立行政法人 土木研究所: 道路路面雨水処理マニュアル (案), 2006.
- 8) 建部英博, 大根義男, 大谷大三: 車道を対象とした透水性舗装の可能性, 舗装 31-9, pp.27-31, 1996.

STUDY ON RAINFALL INFILTRATION FACILITIES OF PERMEABLE PAVEMENTS

Satoshi NISHIYAMA, Yuzo OHNISHI, Takao YANO, Michiya KITAYAMA
and Minoru WADA

The rainfall storage and infiltration facilities of permeable pavements have been attracted attention as an improvement measure of urban environment. In this paper, experimental study makes clear that rainfall infiltration facilities of permeable pavements are strongly dependant on rainfall intensity and unsaturated zones prevent rainfall from infiltrate into the pavement. We develop the simulation method that analyze the air and seepage flow simultaneously and we demonstrate that the dependence of rainfall infiltration facilities on rainfall intensity is mainly caused by the behavior of air flow in the pavement. It is shown that the effects of permeable pavements on flood control can be evaluated accurately by using this simulation method.