透水性舗装の洪水抑制機能に関する研究[†]

西山 哲* 大西 有三** 矢野 隆夫***
山本 剛**** 和田 実*****

Flood Control Properties of Permeable Pavement

by

Satoshi NISHIYAMA*, Yuzo OHNISHI**, Takao YANO***,
Tsuyoshi YAMAMOTO**** and Minoru WADA*****

The surface structures made of conventional asphalt pavements prevents rainfall from infiltrating into ground. In recent years, frequency of flood occurrence has been increasing by an increase of rainfall outflow into of rivers and sewers in urban areas. The rainfall storage and infiltration properties of permeable pavements, which are made of porous asphalt, have been attracted attention as a control measure of flood in urban areas. Previous study makes clear that rainfall infiltration properties of permeable pavements are strongly dependant on the behaviors of unsaturated zones in the pavement. In order to estimate the effects of permeable pavements on flood control that were shown by the experimental results, we have developed the simulation method that analyzes the air and seepage flow simultaneously. But, there have been few data about the flood control properties of permeable pavement for rainfall having inconstant intensities. This paper shows the rainfall storage and infiltration properties of permeable pavements for inconstant rainfall intensity by experiments. And we examine whether the simulation method we have developed in order to estimate the flood control properties of permeable pavements is valid for the inconstant rainfall. This study shows the design method of the permeable pavement structures which are appropriate for various precipitation probabilities and heavy downpours.

Key words : Permeable pavement, Flood control, Rainfall storage, Rainfall infiltration, Seepage analysis

1 緒 言

都市部ではアスファルトやコンクリートによって地表面が被覆され、さらに近年では局所的な豪雨が頻繁に発生することにより、降雨量が下水道などの雨水処理能力を超えることによる都市型洪水と称される水害が多発している。そこで一定以上の面積を開発する際には、10年確率中央集中型降雨波形を主とした降雨に対して、開発前後でピーク流量の増量がゼロとなるように雨水浸透施設を設置することを義務付ける法令も施行されるに至っている。このような背景の下、雨水を貯留および地盤中へ浸透させる透水性舗装が注目され、都市部においては歩道だけでなく車道への普及も検討されるようになった。透水性舗装の道路への普及を図るためには、道路としての耐久性だけでなく、集中豪雨などに対する透水性舗装の浸透および貯留機能を評価する必要がある。¹⁾これまでの透水舗装の水収支の考え方においては、アスファルト混合物などの舗装材料の飽和透水係数が路床の飽和透水係数に対して数倍高いことを前提にしており、舗装を構成する材料の透水特性ではなく、路床の透水係数を基準

にした水収支の手法が提案されている。²⁾その一方で、舗装体中の不飽和領域の挙動が関与することによって、ピーク流量やピーク流量の発生する時間が降雨強度によって変化するために、舗装材料の特性を考慮した洪水抑制機能の評価が必要であるとの実験結果も示されている。³⁾この結果より、舗装体中の気相の挙動を考慮することによって透水性舗装の洪水抑制機能を評価する解析手法も提案されているが、これまで10年確率降雨などの非定常な強度をもつ降雨に対する水収支の定量的な評価は実験的にも行われておらず、結果として透水性舗装の洪水抑制機能を見積もるための解析手法の議論も十分にされていないのが実情である。⁴⁾

本研究はこのような背景を鑑み、非定常の強度をもつ降雨に対する透水性舗装の水収支を評価する実験を実施し、それに基づいて不飽和特性を考慮した透水性舗装の洪水抑制機能の評価手法の妥当性を検討する。本研究成果により、流出抑制機能を含めた透水性舗装の効用を正確に見積もることが可能となり、透水性舗装の構造設計に有用な手法を提供することができると考える。

[†] 原稿受理 平成 21 年 11 月 4 日 Received Nov. 4, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 京都大学大学院工学研究科 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Kyoto Univ., Graduate School of Eng., Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540

** 正 会 員 京都大学 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Kyoto Univ., Sakyo-ku, Nishikyo-ku, Kyoto, 606-8501

*** 京都大学大学院工学研究科 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Kyoto Univ., Graduate School of Eng., Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540

**** 国土交通省近畿地方整備局 〒540-8586 大阪府中央区大手前, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Kinki Regional Development Bureau, Chuo-ku, Osaka, 540-8586

***** (社) 近畿建設協会 〒540-6591 大阪府中央区大手前, Public Association for Construction Service, Kinki Region, Chuo-ku, Osaka, 540-6591

2 模型実験による雨水浸透機能の評価

2・1 実験の概要

本章では実物大の模型を用いて透水性舗装の雨水浸透機能を評価した結果を記述する。⁵⁾ Fig. 1 は実験に供した模型構造の平面図であり、透水性舗装は路床浸透型として設計した。これは、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 TA = 25.2cm）と同一構造の構築を模型化したものであり、路床に関しても、セメント乳剤で改良することで施工場所と同じ透水係数である 3.61×10^{-6} m/sec とした。透水性舗装の底面および側面は、20mm 厚のモルタルと 10mm 厚の防水シートによって遮水構造にしている。なお透水性舗装の特性と比較するために、同じ遮蔽構造の密粒舗装も隣接して施工した。

Table 1 に舗装の構成材料およびその層厚と物性値を示す。表層混合物は通常用いられる排水性舗装と同じく最大粒径が 8.0mm、空隙率が約 22.5% の高粘度改質アスファルトである。基層混合物も同じ高粘度改質アスファルトで構成され、空隙率が約 20.0%、最大粒径が 20.0mm のものを用いた。上層路盤は開粒度安定処理路盤材（改質Ⅱ型アスファルト）を加えたものであり、下層路盤はクラッシャーラン RC-30 よりなる。

降雨強度が制御できるスプリンクラーにより舗装に散水を行い、溢流した水を塩化ビニールパイプによって転

Fig. 1 Model of permeable pavement.

Table 1 Materials of permeable pavement.

	Material	Thickness (mm)	Hydraulic Conductivity (m/s)	Void (%)
Surface Course	Open Graded Asphalt Maximum grain size : 8mm	30	5.0×10^{-4}	22.5
Binder Course	Open Graded Asphalt Maximum grain size : 20mm	120	6.4×10^{-4}	20.3
Base Course	Open Graded Asphalt Stabilization	100	6.9×10^{-4}	20.8
Subbase Course	RC-30	150	1.3×10^{-3}	26.5
Subgrade	Slag	350	3.4×10^{-6}	5.0

倒枡（透水性舗装：浸透枡 A2、密粒舗装：浸透枡 A1）に導水することにより溢流量を計測し、また鉋さい層を浸透した水をスパイラルドレーンを介して導水管に導水し、当導水管に設置した転倒枡（浸透枡 B）によって浸透量を計測した。また鉋さい層中のほぼ中央の位置に間隙水圧計を設置し、舗装体内の水面の位置を計測した。

2・2 雨水浸透特性の評価

降雨は 10 年確率降雨波形を表現するため、式 (1) による Cleveland 型の降雨波形とした。

$$r = \frac{a}{t_c^n + b} \quad (1)$$

ここで、 a 、 b 、 n は対象地域における過去の降雨履歴から決定される定数であり、本研究では参考文献 6) よりそれぞれ 1.765、8.22、3/4 とした。 t_c は降雨継続時間 (min)、 r は t_c 内の平均降雨強度 (mm/hr) である。これより、Fig. 2 に示すように前方集中型 (Type 1)、中央集中型 (Type 2) および後方集中型 (Type 3) の降雨波形を作成した。ただし最大降雨強度 r_1 が 80mm/hr となるように降雨継続時間を決定し、総降雨量は 83.3mm とした。

Fig. 3 に散水終了時における水収支を Fig. 4 には溢流量の経時変化を示す。Fig. 3 より、散水実験の結果ではどの降雨波形においても、総降雨量の約 50% を貯留し、約 20% を地盤に浸透させており、透水性舗装は流出抑制機能を有していることが分かる。しかしながら Fig. 4 より、総降雨量や最大降雨強度が同じであっても、溢流量やピーク流量は降雨波形によって異なることも示されている。

この溢流発生時間と散水終了時間における舗装体内の間隙水圧計の計測データを Fig. 5 に示す。図中の黒丸は

Fig. 2 Types of artificial rainfall.

Fig. 3 Water balance of permeable pavement.

Fig. 4 Time-dependant change of overflow rate.

Fig. 5 Change of Water level of the pavement.

溢流開始時の舗装体内の底面からの水位を、白丸は散水終了時の同じく舗装体内の底面からの水位を表す。どの降雨波形においても散水終了時には舗装体内の表面付近に水位があるが、溢流発生時の水位は降雨波形によって大きく異なっている。計測結果から、溢流発生時には後方集中型の降雨では表面近くまで水位があるが、前方集中型と中央集中型では舗装体内の水位が低い状態であり、これは前方集中型と中央集中型では、舗装体の底面から順に飽和して溢流が発生するのではないことが分かる。降雨強度が一定の定常降雨を散水した実験にお

いても、降雨強度が強い場合に下層路盤底面から順に飽和する過程を経ずに舗装表面から溢流が発生する結果も報告例されており、⁵⁾降雨条件によっては舗装体内に飽和していない領域、すなわち不飽和領域が発生すると考えられる。これまでの設計手法のように舗装を構成する材料の飽和透水係数を考慮する設計法では、降雨波形によって Fig. 5 に示すような 2 重水面が舗装体内に生じる状態を表せない。その結果として、Fig. 4 に示すようなピーク流量を正確に算出することも困難であると考えられる。

このように舗装体の模型を使った実験からは、不飽和領域が流出抑制機能に影響を与える結果が示された。この不飽和領域は、舗装体内に閉塞される空気によって形成されと考えられ、さらにその空気相の挙動が降雨波形によって影響を受ける結果となった。このように基準降雨を用いた洪水抑制機能の算定においては、舗装体内の空気相の挙動を考慮しないと、透水性舗装の機能を正確に評価できないと考えられる。そこで次章では空気相を考慮した雨水の浸透解析手法の適用性を検討する。

3 透水性舗装の洪水抑制機能の評価手法

3・1 洪水抑制機能評価用解析手法の概要

空気相を考慮した解析手法によって、非定常降雨現象を再現できるかどうかを検討する。用いる手法は、液相と気相の両方の挙動を同時に考慮する気液 2 相解析手法である。³⁾具体的には、ダルシー則と質量保存則により導かれる連立方程式により舗装体内の水圧 P_l と空気圧 P_a を算定するものである。ただし、解析を単純化するために、次のような状態を仮定する。

- 1) 温度変化による水、水蒸気、空気の運動は生じない。
- 2) 水蒸気の流れが水および空気の運動に与える影響は小さく無視できる。
- 3) 物質の密度勾配による拡散現象は浸透現象に比較して小さく無視できる。
- 4) 湧き出しは生じない。
- 5) 模型舗装は 2.0% の片勾配が設けられており、動水勾配に換算すると 0.02 となるが、鉛直方向の流れに対する動水勾配と比較すると小さいため、水平方向の流れは鉛直方向に対して無視できると考える。すなわち、解析モデルにおいては、水平方向の勾配をゼロとし鉛直一次元の流れについて考察する。

まず運動量保存則としてダルシー則を用い、式 (2) および式 (3) 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。⁷⁾

$$J_{li} = -\frac{k_{ij}K_l}{\mu_l} \frac{\partial(P_l + \rho_l g x_3)}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$J_{ai} = -\frac{k_{ij}K_a}{\mu_a} \frac{\partial(P_a + \rho_a g x_3)}{\partial x_j} \quad (3)$$

ここで、 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 [Pa], ρ_l : 水の密度 [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 [Pa], ρ_a : 空気の密度 [kg/m³] である。

次に質量保存則として、式 (4) および式 (5) を得る、

$$\frac{\partial(\rho_l \theta)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho_l J_{li})}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\phi - \theta) \rho_a}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho_a J_{ai})}{\partial x_i} \quad (5)$$

ここに θ は体積含水率、 ϕ は間隙率である、

式 (2) を式 (4) に代入して式 (6) を得る、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ - \frac{k_{ij} K_l}{\mu_l} \frac{\partial(P_l + \rho_l g x_3)}{\partial x_j} \right\} \quad (6)$$

また、毛管圧 P_c [Pa] は式 (7) のように空気圧 P_a と間隙水圧 P_l の差で表される、

$$P_c = P_a - P_l \quad (7)$$

式 (8) の関係より、式 (6) は式 (9) のように表される、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{dP_c} \frac{\partial P_c}{\partial t} \quad (8)$$

$$\frac{d\theta}{dP_c} \left(\frac{\partial P_a}{\partial t} - \frac{\partial P_l}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{k_{ij} K_l}{\mu_l} \frac{\partial(P_l + \rho_l g x_3)}{\partial x_j} \right\} \quad (9)$$

式 (3) を式 (5) に代入し、空気密度は理想気体の法則である式 (10) を用い、式 (11) を得る、

$$\rho_a = \frac{P_a}{RT} \quad (10)$$

R : 気体定数 [J/K · mol], T : 絶対温度 [K] である、

$$\frac{\partial(\phi - \theta) P_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(P_a \frac{k_{ij} K_a}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

式 (11) の左辺を式 (12) のように変形する、

$$\frac{\partial(\phi - \theta) P_a}{\partial t} = (\phi - \theta) \frac{\partial P_a}{\partial t} - P_a \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (12)$$

式 (7)、式 (8) と式 (12) を式 (11) に代入して式 (13) を得る、

$$(\phi - \theta) \frac{\partial P_a}{\partial t} + P_a \frac{d\theta}{dP_c} \left(\frac{\partial P_l}{\partial t} - \frac{\partial P_a}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(P_a \frac{k_{ij} K_a}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial x_j} \right) \quad (13)$$

以上の式 (9) および式 (13) の支配方程式が導かれ、これをガラーキン有限要素法を用いて定式化して解くことにより間隙水圧 P_l と空気圧 P_a を求める。解析においては舗装体の幅 1000mm の部分をモデル化し、表層、基層および上層路盤を 1000mm × 0.5mm サイズのメッシュに分割し、下層路盤および路床を 1000mm × 10mm のメッシュに分割した。流量境界である舗装表面の圧力水頭勾配が高くなることが予想されるため、舗装表面付近の要素サイズを底部付近よりも細かくしている。液相に関する初期条件としては、路床の飽和度が常に飽和に近い定常状態であることを反映させるために、下層路盤底面の間隙水圧 P_w は大気圧とし、全水頭が解析モデル内で一定であることを考えて、下層路盤底面からの高さに

応じた圧力水頭分布を節点に与える。気相の初期条件に関しては、舗装内に大気圧の空気が存在していることを表現するために、全節点において気圧 P_a を大気圧とする、

また液相の境界条件に関しては、表面の節点における圧力水頭 ϕ が $\phi < 0$ である不飽和状態の場合に降雨強度に相当する流量を与え、 $\phi \geq 0$ である飽和状態の場合には間隙水圧 P_w を 101.325kPa (= 1atm) とする。また下層路盤底面の間隙水圧も 101.325kPa 一定とする。なお、舗装体側方の流量は 0 とする。気相については、表面での空気圧 P_a は大気圧と等しいとし、さらに下層路盤と路床の空気圧 P_a も大気圧で一定として、表面以外の境界について流量を 0 とすることにより表面以外から空気が排出されないことを表現する、

不飽和浸透特性は、飽和透水係数と同様に実際の試料を用いた実験によって決めるのが理想であるが、粗粒材の不飽和特性を精度良く計測することは困難であるため、本研究では相似粒度試料を用いたこれまでの研究例を基に決定する。まず体積含水率 θ と比透水係数 K_l の関係については、粗粒の頁岩と花崗岩の粒度分布を変えて不飽和特性を測定した文献 8) の結果によれば、粘性土や砂などの試料に対して適用される Van-Genuchten モデルよりも式 (14) に示す Irmay 式に従うことが報告されている。⁹⁾

$$K_l = S_e^\eta \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (14)$$

ここで S_e は有効飽和度であり、 θ は体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は最小容水量である。また式 (14) の Irmay 式は、粒度や岩種にかかわらず適用できることが報告されている。この結果に基づいて、本研究における表層および基層・上層路盤のアスファルト混合物の $\theta - K_l$ に対しては、文献 8) において最大粒径が 9.52mm から 25.4mm の粗粒材に対して適用されている $\eta = 3.2$ を用いた式 (14) を用いることにする、

次に水分保持特性である体積含水率と土中水のポテンシャル ψ の関係についても同じく文献 8) の粗粒材の研究例を参考に考える。本文献においては、粗粒材の水分保持特性に対しては、式 (15) で表される Van-Genuchten モデルが合致することが報告されている、

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha |\psi|^\beta)} \right]^{1 - \frac{1}{\beta}} \quad (15)$$

ここで ψ は土中水のポテンシャルであり、 α および β は係数である。文献 8) の結果では、水分保持特性には粒度分布の影響があることも報告されているので、本件のアスファルト混合物と粒度分布が近い花崗岩についての実験結果を参考することにし、表層の最大粒径 8mm の骨材に対しては最大粒径が 9.52mm の花崗岩を用いて実験した結果に基づいて、式 (15) における α , β のパラメータをそれぞれ 2.40 [1/kPa] および 1.59 とし、また基層・上層路盤の最大粒径 20mm の骨材に対しては、同じく最大粒径が 25.4mm の花崗岩を用いて実験した結果に基づいて式 (15) における α , β のパラメータをそれぞれ 10.8

[1/kPa]および1.68とした。下層路盤および路床については、これらの特性が浸透特性に与える影響が小さいことを解析によって確認したので、 $\theta-K$ 特性および特 $\theta-\psi$ 性の関係を線形の関係で表現した。また表層、基層および上層路盤の比透気係数については正確な値を実験にて得ることが困難なため、いくつかの試行に基づいて実験結果を再現するように決定した。Fig. 6に解析で用いた不飽和浸透特性を示す。

アスファルト混合物よりなる試料の不飽和浸透特性を計測した文献¹⁰⁾の結果からも、Irmay式およびVan-Genuchtenモデルを適用すること、および前述の各パラメータの値を用いることの妥当性が裏付けられるが、Fig. 1に示す透水性舗装の模型に対して降雨強度を19.4mm/hrから123.0mm/hrまでの一定の値に設定した定常降雨を散水した際の舗装体の水収支を解析によって再現することを試み、その結果から本不飽和浸透特性を用いた解析の妥当性を検証することを試みた。なお散水実験における各降雨強度の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。Fig. 7は各強度の定常降雨散水実験における舗装体表面からの溢流開始時間の測定値と解析値を示したものである。³⁾実験

Fig. 6 Unsaturated characteristics of permeable pavement.

Fig. 7 Simulation results using unsaturated parameters.

における溢流開始時間を再現するためには、路床への浸透量および舗装体内の貯留量を含めた水収支が再現される必要があり、Fig. 7に示すように解析結果と実験による計測値が一致することは、ここで設定した不飽和浸透特性は舗装体内の雨水の挙動を表現するために適したものであることを実証していると考えられる。

3・2 非定常降雨に対する解析結果

Fig. 8に非定常の降雨波形に対する、舗装体表面からの溢流量の経時変化に関する実験値と解析した結果を示す。なお解析手法の妥当性を検証するために、液相のみの挙動を考慮した解析手法の結果も同時に示す。液相のみを考慮した解析結果は飽和-不飽和浸透流解析と同等の

Fig. 8 Simulation results of overflow rate.

解析結果を示すもので、解析モデルにおいて全ての節点の空気圧を常に大気圧とすることにより、気相の挙動が影響しない条件下で解析した場合である。本論文ではこの解析結果を単相解析と称し、気相の影響を考慮した解析結果を気液2相解析と称する。図では単相および気液2相の解析結果を、それぞれ点線 (Single phase) および実線 (2 Phase) で示し、実験値を黒丸で示す。単相解析の結果では、前方集中型あるいは中央集中型の降雨に対しては溢流が発生せず、また後方集中型の降雨では、実験値に比較して溢流が発生する時間が遅くなる。一方、気液2相の解析結果では、非定常降雨の波形によらず溢流時間および溢流量ともに実験結果が再現されている。これらの結果を考えると、舗装体内の空気の挙動を考慮する気液2相解析によって、透水性舗装の洪水抑制機能を正確に評価できることが分かる。

次に一般国道 163 号線のある大阪府寝屋川水系の流域を対象に透水性舗装の洪水抑制効果を考察する。この効果の算定には、Fig. 9 に示す最大降雨強度が 110.6mm/hr である 24 時間の中央集中型降雨波形である大阪府策定の基準降雨を用いる。開発対象地域の流出係数によっては、透水性舗装導入後でも開発前のピーク流量を上回る場合が想定され、そのような場合には、舗装厚の割り増し等を考慮することが従来の設計指針である。⁴⁾そこで舗装厚を各種変えたモデルを Fig. 10 のように作成し、それらに対して流出特性を評価する。Fig. 10 において、Case 1 は一般国道 163 号線に導入した構造であり、Case 2 および Case 3 はともに下層路盤の層厚を厚くしたものである。Fig. 11 に解析結果を示す。Case 1, Case 2 および Case 3 の流出特性は気液2相解析の結果であり、Single Phase と記している流出特性は単相解析の結果である。まず気液2相の解析と単相解析では、ピーク流量抑制効果やピーク遅延効果が大きく異なり、単相解析では安全側の設計ができないことが分かる。さらに気液2相解析の結果によれば、ピーク流量は下層路盤の層厚を約2倍に増加させても大きく改善することがない。これまでの飽和透水係数を用いる設計法では、舗装厚と溢流抑制効果は線形関係を有することになるため、層厚を厚くすることで洪水抑制機能を調節できるが、実際には舗装体内の不飽和領域形成の影響によって、舗装厚が増してもその効果は

Fig. 9 Rainfall criteria.

Fig. 10 Structures of permeable pavements for simulation.

Fig. 11 Simulation results for rainfall criteria.

顕著には現れない解析結果となった。透水性舗装の構造を設計する際、いくつかの構造の舗装を実際に作成して、基準降雨に対する流出特性を計測するなどの実験を行うことは困難であり、実務上は解析によって流出特性を求める手法に頼らざるを得ない。したがって、実際の挙動を正確に反映する解析手法が透水性舗装の設計には必要になるが、このように、気相の影響を考慮することによって舗装厚を増す効果の算定など、透水性舗装の洪水抑制機能を適切に評価することが可能になると考えられる。

4 結 言

本研究は、透水性舗装の実験モデルを構築し、非定常降雨に対する水収支を計測することにより、透水性舗装の洪水抑制機能を定量的に評価した。その結果、雨水貯留および浸透機能によって透水性舗装は洪水抑制機能を発揮するが、舗装体内の水位の計測値から、前方集中型、中央集中型および後方集中型などの降雨波形によって溢流発生時の舗装体内の水位が異なることが明らかになった。この現象は舗装材料の飽和透水係数を考慮した場合は再現できず、空気の挙動を考慮した評価手法を必要があることを示唆するものであると考えられる。そこで舗装の洪水抑制機能を正確に見積もるための気液2相解析手法の適用性を、この非定常降雨実験の結果に対して検証した。解析結果からは、本解析手法が実験結果を正確

に再現することが示され、透水性舗装の洪水抑制効果の算定に有用な手法になるとを明らかにした。今後は車道に透水性舗装を適用した場合の耐久性などの研究結果を統合して、構造的な視点を含めて透水性舗装の普及効果を考察していく予定である。

参 考 文 献

- 1) O. Kamada, T. Shimizu and M. Ito, "Study on durability of permeable pavement", Journal of Pavement Engineering, JSCE, Vol.10, pp.91-98 (2005).
- 2) Y. Miura, H. Nakazono, Y. Saigusa, N. Abe and A. Inoue, "Examination on the design method of the roadway type permeable pavement and the storage penetration facilities", Journal of Pavement Engineering, No.7, pp.8-1-8-10 (2002).
- 3) S. Nishiyama, Y. Ohnishi, T. Yano, M. Kitayama and M. Wada, "Study on rainfall infiltration facilities of permeable pavements", Journal of Pavement Engineering, JSCE, Vol.12, pp.99-106 (2007).
- 4) M. Ito, T. Ayabe and K. Kubo, "Performance of permeable pavements under heavy traffic", Journal of Pavement Engineering, JSCE, Vol.12, pp.91-98 (2007).
- 5) S. Nishiyama, Y. Ohnishi, T. Yano and M. Wada "Permeable pavements for control of flood and heat island phenomenon", Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.53, No.9, pp.24-26 (2005).
- 6) "The handbook on rainwater use", p.199 (1998) Association for Rainwater Storage and Infiltration Technology.
- 7) G. R. Hadley, "Theoretical treatment of evaporation", Int. Heat Mass Transfer., Vol.25, No.10, pp.1311-1322 (1982).
- 8) A. Kudo, M. Nishigaki, U. Nishikata, T. Torii and S. Asada, "Unsaturated hydraulic properties of rockfill materials and the effect of particle size distribution on such properties", Journals of the Japan Society of Civil Engineers, Vol.73/3, No.64, pp.77-87 (2003).
- 9) S. Irmay, "On the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Trans. Amer.Geophys.Union, Vol.35, No.3, pp.463-467 (1954).
- 10) K. Moriishi, Y. Ohnishi, S. Nishiyama, T. Yano, Y. Tanaka and T. Takemoto, "Experimental research on the unsaturated seepage characteristics of porous asphalt concrete", Proceedings of the 57th JSMS Annual Meetings, pp.21-22 (2008) The Society of Materials Science, Japan.