タンクモデルによる透水性舗装体の地下水涵養機能評価[†]

中 村 聡 司* 日 置 和 昭**
青 木 一 男*** 矢 野 隆 夫****

Evaluation of Groundwater Recharge Functions of Porous Pavements Using a Tank Model

by

Satoshi NAKAMURA*, Kazuaki HIIOKI**, Kazuo AOKI*** and Takao YANO****

In this study, an attempt was made to develop tank and modified tank models of surface runoff and groundwater recharge of porous pavements based on the results of model tests conducted to evaluate the stormwater infiltration and storage functions of porous pavements. As a result, it was revealed that the tank and modified tank models were fully applicable to the evaluation of groundwater recharge functions of small-scale artificial structures like porous pavements and that the amounts of surface runoff and groundwater recharge by porous pavements could be accurately reproduced by the tank or modified tank model by using different parameters in areas at rainfall intensities above and below 70.0 mm/hr where stormwater penetration behavior in porous pavements varied. In order to evaluate the stormwater storage capacity of porous pavements, numerical tests were conducted using the modified tank model. As a result, it was verified that porous pavements had little stormwater storage capacity.

Key words : Porous pavements, Surface runoff, Groundwater recharge, Tank model, Modified tank model

1 緒 言

近年、都市型洪水対策ならびにヒートアイランド対策の観点から透水性舗装体（透水性舗装、路盤、路床）が持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、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大きい構造となっているため、降雨を舗装内から路盤・路床へと浸透し、やがては不圧地下水を涵養する。今後、都市型洪水対策やヒートアイランド対策の観点から透水性舗装の普及を論ずる場合、このような地下水涵養機構の解明とそのモデル化が重要となってくる。

地下水涵養は、不飽和帯の土中水が移動することにより発生するものであり、不飽和浸透理論に基づいてモデル化されることが多い。しかし、不飽和浸透理論に基づくモデルでは、降雨浸透過程で発生することがある空気封入現象^{2), 3)}を理論上再現することはできない。空気封入現象を理論的に再現するには気液2相流解析^{3), 4)}が必要となるが、気液2相流解析ではパラメータの設定など未だ難しい面がある。

一方、不飽和浸透モデルを単純化するため、タンクモデル⁵⁾が提案されている。タンクモデルとは、雨水が不飽和帯に貯留されることによって降雨の地下水への影響が累積され、またある程度は遅れるという考え方のもと

に、不飽和帯の雨水貯留をモデル的に示したものである。しかし、タンクモデルでは、貯留高変動に伴う不飽和透水係数の変化が考慮できない等、改善すべき課題もある。そのため、青木ら⁶⁾は、タンクモデルの貯留高を体積含水率、浸透率を不飽和透水係数とみなし、浸透率が貯留高の変動に伴って変化する修正タンクモデルを提案している。また、本論文の第1・第2筆者ら⁷⁾は、修正タンクモデルは地下水涵養の発生に時間的遅れが大きい（すなわち、不飽和帯が厚い）場合ほど、タンクモデルと比較し優位になることを確認している。

本論文では、透水性舗装体の地下水涵養モデルとしてタンクモデルと修正タンクモデルを用い、透水性舗装体の地下水涵養機能評価を行った。具体的には、透水性舗装体が持つ雨水浸透貯留機能を評価するために実施された模型実験結果³⁾に基づいて、タンクモデルと修正タンクモデルの各パラメータを同定するとともに、透水性舗装体の表面流出と地下水涵養に関するモデル化を試み、その再現性を評価した。次に、修正タンクモデルを用いて数値実験を行い、豪雨時における透水性舗装体の雨水貯留機能について若干の考察を加えた。

なお、タンクモデルは河川流出の解析を目的に開発され、これまで地下水環境保全や土砂災害危険度予測等の分野で活用されている。しかしながら、本論文で対象と

[†] 原稿受理 平成 21 年 11 月 17 日 Received Nov. 17, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 昭和エンジニアリング(株) 〒540-0037 大阪市中央区内平野町, Syouwa Eng. Co., Ltd., Chuo-ku, Osaka, 540-0037

** 正 会 員 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科 〒535-8585 大阪市旭区大宮, Dept. of Civil Eng. and Urban Design, Osaka Inst. of Tech., Asahi-ku, Osaka, 535-8585

*** 大阪工業大学工学部環境工学科 〒535-8585 大阪市旭区大宮, Dept. of Environmental Eng., Osaka Inst. of Tech., Asahi-ku, Osaka, 535-8585

**** 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, Dept. of Urban and Environmental Eng., Kyoto Univ., Nishikyoku-ku, Kyoto, 615-8540

した透水性舗装体のような小規模人工構造物に適用された事例はほとんどなく、透水性舗装体の地下水涵養機能評価に適応するかどうか疑問であった。そのため、本論文では、透水性舗装体の地下水涵養機能評価へのタンクモデルの適応性について検証することも重要課題の一つとして捉えている。

2 タンクモデルと修正タンクモデルの構造

2.1 タンクモデルの構造

タンクモデルの構造の概念図を Fig. 1⁵⁾に示す。タンクモデルとは、複数のタンクが縦に直列に並んだものであり、各々のタンクの側面には1～数個、底面には1個の孔が設けられている。最上段のタンクから浸透した降雨は、一部は側面の孔から流出し、一部は底面の孔から下段のタンクへ移行する。側面の孔からの流出は河川等への流出を示し、底面の孔から下段タンクへの移行は下層への浸透を示している。また、タンク内の水位は帯水層の貯留量を示しており、貯留高と呼ばれる。各タンクの貯留高と各タンクからの浸透量および流出量は、次のように表すことができる。

$$\beta_n^t = \beta_n^{t-1} - q_n^{t-1} - \sum q_{nm}^{t-1} + q_{n-1}^{t-1} \quad (1)$$

$$q_n^t = \alpha_n \times \beta_n^t \quad (2)$$

$$q_{nm}^t = 0 \quad (0 \leq \beta_n^t \leq L_{nm}) \quad (3)$$

$$q_{nm}^t = \gamma_{nm} \times (\beta_n^t - L_{nm}) \quad (L_{nm} \leq \beta_n^t) \quad (4)$$

ここに、 β_n^t ：各時間ステップにおける貯留高、 q_n^t ：各時間ステップにおける浸透量（ただし q_0^t ：降雨量）、 q_{nm}^t ：各時間ステップにおける流出量、 α_n ：浸透率、 γ_{nm} ：流

出率、 L_{nm} ：側面の孔の高さ、 t ：時間ステップ、 n ：タンクの番号、 m ：側面の孔の番号である。

タンクモデルでは、貯留高が側面の孔の高さに達するまで流出は起こらず100%が下段のタンクへ浸透するが、貯留高が側面の孔の高さに達すると流出が始まり、下段のタンクへと浸透する割合は減少する。なお、タンクモデルでは、貯留高変動に伴う不飽和透水係数の変化を考慮することはできない。

2.2 修正タンクモデルの構造

修正タンクモデルの構造の概念図を Fig. 2⁶⁾に示す。修正タンクモデルとは、タンクモデルの貯留高を体積含水率、浸透率を不飽和透水係数とみなし、浸透率が貯留高の変動に伴って変化する（側面に孔を設けていない）タンクモデルのことで、各タンクの浸透率 α_n^t が前時間ステップにおける貯留高 β_n^{t-1} の関数で表される。関数形としては、簡単のため1次式を仮定すると、各タンクの浸透率は、次のように表すことができる。

$$\alpha_n^t = a_{n2} \quad (0 \leq \beta_n^{t-1} \leq a_{n1}) \quad (5)$$

$$\alpha_n^t = a_{n3} \times (\beta_n^{t-1} - a_{n1}) + a_{n2} \quad (a_{n1} \leq \beta_n^{t-1}) \quad (6)$$

ただし、式(6)において $\alpha_n^t \geq 1$ となる場合は、 $\alpha_n = 1$ とする。ここに、 α_n^t ：浸透率、 β_n^{t-1} ：前時間ステップにおける貯留高、 a_{n1} 、 a_{n2} 、 a_{n3} ：定数、 t ：時間ステップ、 n ：タンクの番号である。

また、各タンクの貯留高および各タンクからの浸透量は、次式によって表すことができる。

$$\beta_n^t = \beta_n^{t-1} - q_n^{t-1} + q_{n-1}^{t-1} \quad (7)$$

$$q_n^t = \alpha_n \times \beta_n^t \quad (8)$$

Fig. 1 Conceptual scheme of tank model structure.⁵⁾

Fig. 2 Conceptual scheme of modified tank model structure.⁶⁾

ここに、 q_n^t :各時間ステップにおける浸透量（ただし q_0^t :降雨量）、 β_n^t :各時間ステップにおける貯留高である。

修正タンクモデルは、貯留高変動に伴う不飽和透水係数の変化を考慮できる（貯留高が高くなるに従い浸透率は増大し、貯留高が低くなるに従い浸透率は減少する）ため、無降雨時等における貯留高の変動を精度よく再現することができる。なお、修正タンクモデルは、タンクモデルを拡張したもので、 a_{n3} の値がゼロになると浸透率が一定となり、（側面に孔を設けていない）タンクモデルと等価になる。

3 透水性舗装体の地下水涵養機能評価

3・1 模型実験の概要

模型実験の概要図を Fig. 3～4³⁾に、模型舗装体の物性値を Table 1³⁾に示す。模型舗装体は、実際の道路と同様なものとされており、防水シートを模型舗装体の路床底部および周囲に設置すること、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設置することで、正確な雨水浸透貯留機能を評価するように試みられている。なお、降雨については、降雨強度を 19.4mm/h から 123.0mm/h までの一定の値に設定され、総降雨量は模型舗装体への雨水浸透が定常状態となる 83.3mm とされている。

定常状態における浸透能（ここでは、透水性舗装体内へ

の浸透量を降雨強度で除した値を浸透能と称する）と降雨強度との関係を Fig. 5 に示す。降雨強度が 30.1mm/h、53.4mm/h の場合、浸透能は降雨強度の 75% 程度であるが、降雨強度が 80.0mm/h、123.0mm/h になると、浸透能は降雨強度の 50% 程度まで低減しており、降雨強度 70.0mm/h 程度を境に、浸透能に大きな差異が認められる。この要因として、降雨強度 70.0mm/h 程度を境に、透水性舗装体内で雨水浸透現象が異なる挙動を示す（すなわち、降雨強度が 70.0mm/h 程度までは舗装体内の下部より順次雨水が貯留されていくが、降雨強度が 70.0mm/h を超えると舗装体内の下層と上層路盤内に 2 重水面が発生する）ことが西山ら³⁾によって指摘されている。

3・2 表面流出量の再現性評価

Fig. 1～2 に示したように、タンクモデルと修正タンクモデルの「第 1 タンク」は共通である。表面流出のモデル化は、「第 1 タンク」を用いて試みた。

「第 1 タンク」の各パラメータは、模型実験結果³⁾に基づいて同定した。同定手法としては、間接法を採用し、解析値と観測値との残差二乗和が最小となるパラメータを、タンクモデルの同定に用いられた実績^{8), 9)}のある Powell の共役方向法により推定した。ただし、入力データ（観測値）および出力データ（解析値）の時間ステッ

Fig. 3 Plan and profile of pavement model.³⁾

Fig. 4 Arrangement of measurement equipment in pavement model.³⁾

Table 1 Layer thickness and physical property value in pavement model.³⁾

	Name	Material	Pressure H_f (mm)	Permeability coefficient k_f (m/s)	Percentage of air voids θ_f (%)
A	Surface course	Open-graded asphalt (maximum grain size:20mm)	30	5.0×10^{-4}	22.5
B	Base	Open-graded asphalt (maximum grain size:20mm)	120	6.4×10^{-4}	20.3
C	Upper subbase	Open-graded asphalt stabilized (improved asphalt type II)	100	6.9×10^{-4}	20.8
D	Lower subbase	Recycled crusher run RC30	150	1.3×10^{-5}	26.5
E	Subgrade	Slag	350	3.4×10^{-6}	5.0

Fig. 5 Infiltration capacity and rainfall intensity.

プとモデル計算の時間ステップは、すべて1分単位とした。各パラメータの同定結果一覧をTable 2に、また各パラメータの平均値をTable 3に示す。この平均値を用いて順解析を行い求めた表面流出量（解析値）と観測値をFig. 6に、解析値と観測値との残差二乗和ならびに相関係数をTable 4に示す。これによると、いずれの場合も解析値と観測値には若干の差異が認められ、その再現性に疑問が残る。

ここで、Fig. 5に示したように、降雨強度70.0mm/h程度を境に、透水性舗装体内の雨水浸透現象が異なる挙動を示すことに着目して、降雨強度が30.1mm/hと53.4mm/hの場合のパラメータと、80.0mm/hと

Table 2 List of identified parameters. (first tank)

	Initial value	30.1mm/h	53.4mm/h	80.0mm/h	123.0mm/h
α_1	0.01000	0.00632	0.01529	0.01074	0.01207
L_{11} (mm)	30.000	39.027	28.623	32.294	26.081
γ_{11}	0.05000	0.06419	0.04707	0.09833	0.08575
L_{12} (mm)	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000
γ_{12}	0.10000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
β_1^0 (mm)	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 3 List of parameters used for direct analysis. (first tank)

	All mean value
α_1	0.01111
L_{11} (mm)	31.506
γ_{11}	0.07384
L_{12} (mm)	0.000
γ_{12}	0.00000
β_1^0 (mm)	0.000

Table 4 Residual sum of squares and correlation coefficient. (cumulative surface runoff)

	Residual sum of squares	Correlation coefficient
30.1mm/h	172.6	0.688
53.4mm/h	91.4	0.721
80.0mm/h	89.2	0.751
123.0mm/h	29.4	0.773

Fig. 6 Observed surface runoff and analysis value. (using mean parameters)

123.0mm/hの場合のパラメータを各々平均化したものがTable 5である。この平均化したパラメータを用いて順解析を行い求めた表面流出量（解析値）と観測値をFig. 7に、解析値と観測値との残差二乗和ならびに相関係数をTable 6に示す。これによると、いずれの降雨強度の場合も解析値と観測値は非常に良く一致しており、良好な再現性を確認することができる。

3・3 地下水涵養量の再現性評価

透水性舗装体における地下水涵養のモデル化は、タンクモデル、修正タンクモデルともに、「第2タンク」のみ、もしくは「第2タンク+第3タンク」を用いて試みた。表面流出量の再現性評価と同様に、タンクモデルと修正タンクモデルの各パラメータは、西山ら³⁾が行った模型実験結果に基づいて同定した。同定手法としては、間接法を採用し、解析値と観測値との残差二乗和が最小となるパラメータをPowellの共役方向法により推定した。ただし、入力データ（観測値）および出力データ（解析値）の時間ステップとモデル計算の時間ステップは、すべて1分単位とした。各パラメータの同定結果一覧をTable 7～10に、また各パラメータの平均値を

Table 5 List of parameters used for direct analysis. (first tank)

	Rainfall intensity < 70mm/h	Rainfall intensity $\geq$ 70mm/h
α_1	0.01081	0.01141
L_{11} (mm)	33.825	29.187
γ_{11}	0.05563	0.09204
L_{12} (mm)	0.000	0.000
γ_{12}	0.00000	0.00000
β_1^0 (mm)	0.000	0.000

Table 6 Residual sum of squares and correlation coefficient. (cumulative surface runoff)

	Residual sum of squares	Correlation coefficient
30.1mm/h	18.2	0.947
53.4mm/h	29.2	0.945
80.0mm/h	11.2	0.979
123.0mm/h	7.0	0.981

Fig. 7 Observed surface runoff and analysis value.
(using properly parameters)

Table 7 List of identified parameters. (tank model, two-tier model)

	Initial value	30.1mm/h	53.4mm/h	80.0mm/h	123.0mm/h
α_2	0.03000	0.00843	0.00698	0.00313	0.00310
L_2 (mm)	10.000	42.106	48.692	52.566	61.981
γ_2	0.30000	0.04911	0.04190	0.23954	0.29398
β_2^0 (mm)	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 8 List of identified parameters. (modified tank model, two-tier model)

	Initial value	30.1mm/h	53.4mm/h	80.0mm/h	123.0mm/h
a_{21} (mm)	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000
a_{22}	0.01000	0.00446	0.00441	0.00254	0.00253
a_{23} (mm ⁻¹)	0.00100	0.00007	0.00007	0.00001	0.00001
β_2^0 (mm)	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 9 List of identified parameters. (tank model, three-tier model)

	Initial value	30.1mm/h	53.4mm/h	80.0mm/h	123.0mm/h
α_2	0.03000	0.03874	0.03089	0.05747	0.05647
L_2 (mm)	10.000	11.727	6.616	18.991	19.929
γ_2	0.30000	0.04059	0.04042	0.23155	0.29992
β_2^0 (mm)	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000
α_3	0.01000	0.01209	0.01118	0.00350	0.00434
L_3 (mm)	10.000	31.481	32.708	48.145	44.214
γ_3	0.30000	0.05911	0.04042	0.08453	0.08529
β_3^0 (mm)	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 11 ~ 14 に示す。この平均値を用いて順解析を行い求めた表面流出量（解析値）と観測値を Fig. 8 ~ 9 に、解析値と観測値との残差二乗和ならびに相関係数を Table 15 に示す。これによると、いずれの場合も解析値と観測値には若干の誤差があり、良好な再現性を確認することができない。ここで、降雨強度 70.0mm/h 程度を境に、透水性舗装体内の雨水浸透現象が異なる挙動を示すことに着目して、降雨強度が 30.1mm/h と 53.4mm/h の場合のパラメータと、80.0mm/h と 123.0mm/h の場合

Table 10 List of identified parameters. (modified tank model, three-tier model)

	Initial value	30.1mm/h	53.4mm/h	80.0mm/h	123.0mm/h
a_{21} (mm)	10.000	20.373	25.448	1.003	2.112
a_{22}	0.01000	0.00016	0.00010	0.00010	0.00017
a_{23} (mm ⁻¹)	0.00100	0.00005	0.00005	0.00002	0.00001
β_2^0 (mm)	5.000	49.252	45.925	46.474	49.356
a_{31} (mm)	10.000	28.140	29.145	33.337	35.161
a_{32}	0.01000	0.00007	0.00011	0.00010	0.00005
a_{33} (mm ⁻¹)	0.00100	0.00233	0.00229	0.00425	0.00430
β_3^0 (mm)	5.000	26.107	29.047	32.056	33.486

Table 11 List of parameters used for direct analysis. (tank model, two-tier model)

	All mean value
α_2	0.00541
L_2 (mm)	51.336
γ_2	0.15613
β_2^0 (mm)	0.000

Table 12 List of parameters used for direct analysis. (modified tank model, two-tier model)

	All mean value
a_{21} (mm)	0.00000
a_{22}	0.003
a_{23} (mm ⁻¹)	0.00004
β_2^0 (mm)	0.000

Table 13 List of parameters used for direct analysis. (tank model, three-tier model)

	All mean value
α_2	0.04589
L_2 (mm)	14.316
γ_2	0.15312
β_2^0 (mm)	0.000
α_3	0.00778
L_3 (mm)	39.137
γ_3	0.06734
β_3^0 (mm)	0.000

Table 14 List of parameters used for direct analysis. (modified tank model, three-tier model tank)

	All mean value
a_{21} (mm)	12.234
a_{22}	0.00013
a_{23} (mm ⁻¹)	0.00003
β_2^0 (mm)	47.752
a_{31} (mm)	31.446
a_{32}	0.00008
a_{33} (mm ⁻¹)	0.00329
β_3^0 (mm)	30.174

Fig. 8 Observed cumulative groundwater recharge and analysis value by tank models. (mean parameters)

Fig. 9 Observed cumulative groundwater recharge and analysis value by modified tank models. (mean parameters)

Table 15 Residual sum of squares and correlation coefficient. (cumulative groundwater recharge)

	Tank model				Modified tank model			
	Vertically connected two-tier tank (second tank)		Vertically connected three-tier tank (second and third tanks)		Vertically connected two-tier tank (second tank)		Vertically connected three-tier tank (second and third tanks)	
	Residual sum of squares	Correlation coefficient	Residual sum of squares	Correlation coefficient	Residual sum of squares	Correlation coefficient	Residual sum of squares	Correlation coefficient
30.1mm/h	24081	0.855	14724	0.897	23118	0.859	13364	0.904
53.4mm/h	12951	0.853	10951	0.863	12801	0.857	10699	0.869
80.0mm/h	28084	0.803	22084	0.821	27494	0.807	20506	0.826
123.0mm/h	30564	0.772	25564	0.862	30445	0.776	25349	0.869

のパラメータを各々平均化したものが Table 16 ~ 19 である。この平均化したパラメータを用いて順解析を行い求めた地下水涵養量（解析値）と観測値を Fig. 10 ~ 11 に、解析値と観測値との残差二乗和ならびに相関係数を Table 20 に示す。これによると、いずれの場合も解析値と観測値は非常に良く一致しており、良好な再現性を確認することができる。なお、タンクモデルと修正タンクモデルとの間に、また「第2タンク」と「第2タンク + 第3タンク」との間に有意な差がほとんど生じなかった要因としては、透水性舗装体（不飽和帯）の厚さが1.5m程度と比較的薄かったことが挙げられる。

Table 16 List of parameters used for direct analysis. (tank model, two-tier model)

	Rainfall intensity <70mm/h	Rainfall intensity ≥ 70 mm/h
α_2	0.00770	0.00311
L_2 (mm)	45.399	57.274
γ_2	0.04550	0.26676
β_2^0 (mm)	0.000	0.000

Table 17 List of parameters used for direct analysis. (modified tank model, two-tier model)

	Rainfall intensity <70mm/h	Rainfall intensity ≥ 70 mm/h
a_{21} (mm)	0.000	0.000
a_{22}	0.00444	0.00253
a_{23} (mm ⁻¹)	0.00007	0.00001
β_2^0 (mm)	0.000	0.000

Table 18 List of parameters used for direct analysis. (tank model, three-tier model)

	Rainfall intensity <70mm/h	Rainfall intensity ≥ 70 mm/h
α_2	0.03481	0.05697
L_2 (mm)	9.172	19.460
γ_2	0.04051	0.26573
β_2^0 (mm)	0.000	0.000
α_3	0.01163	0.00392
L_3 (mm)	32.094	46.180
γ_3	0.04976	0.08491
β_3^0 (mm)	0.000	0.000

Table 19 List of parameters used for direct analysis. (modified tank model, three-tier model)

	Rainfall intensity <70mm/h	Rainfall intensity ≥ 70 mm/h
a_{21} (mm)	22.911	1.558
a_{22}	0.00013	0.00013
a_{23} (mm ⁻¹)	0.00005	0.00001
β_2^0 (mm)	47.588	47.915
a_{31} (mm)	28.643	34.249
a_{32}	0.00009	0.00008
a_{33} (mm ⁻¹)	0.00231	0.00428
β_3^0 (mm)	27.577	32.771

Fig. 10 Observed cumulative groundwater recharge and analysis value by tank models. (properly parameters)

Fig. 11 Observed cumulative groundwater recharge and analysis value by modified tank models. (properly parameters)

Table 20 Residual sum of squares and correlation coefficient. (cumulative groundwater recharge)

	Tank model				Modified tank model			
	Vertically connected two-tier tank (second tank)		Vertically connected three-tier tank (second and third tanks)		Vertically connected two-tier tank (second tank)		Vertically connected three-tier tank (second and third tanks)	
	Residual sum of squares	Correlation coefficient	Residual sum of squares	Correlation coefficient	Residual sum of squares	Correlation coefficient	Residual sum of squares	Correlation coefficient
30.1mm/h	1071	0.997	1049	0.997	773	0.998	707	0.998
53.4mm/h	395	0.997	307	0.998	113	0.999	69	0.999
80.0mm/h	298	0.998	297	0.998	269	0.999	239	0.999
123.0mm/h	190	0.998	138	0.999	136	0.999	125	0.999

以上より、透水性舗装体の表面流出と地下水涵養についてのモデル化は、タンクモデル、修正タンクモデルともに直列2段（「第1タンク+第2タンク」）で十分であると考えられる。

3・4 雨水貯留機能に関する数値実験

透水性舗装体が持つ雨水貯留機能を評価するため、直列2段の修正タンクモデルにより数値実験を実施した。数値実験に用いたパラメータは、Table 21に示したとおりである。また、降雨としては、2003年7月（19日午前0時から24日午前0時まで）に熊本災害をもたらせた（熊本県水俣市南福寺で観測された）雨量データ¹⁰⁾を用いた。数値実験により得られた貯留高（第2タンク）の経時変化をFig. 12に示す。これによると、降雨によって増加した貯留高は、降雨が止んだ後、12時間程度でほぼ降雨前の貯留高まで減少しており、透水性舗装体は雨水を舗装体内に浸透させる機能（雨水浸透機能）は十分に有するものの、雨水を舗装体内に留めておく機能（雨水貯留機能）はほとんど有しないものと推察される。

4 結 言

本論文では、透水性舗装体の地下水涵養モデルとしてタンクモデルと修正タンクモデルを用い、透水性舗装体の地下水涵養機能評価を行った。得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

(1) タンクモデルや修正タンクモデルは、透水性舗装体のような小規模人工構造物の地下水涵養機能評価にも十分適応し、雨水浸透現象が異なる挙動を示す降雨強度70.0mm/h程度を境に、パラメータを使い分けることで、

Table 21 List of parameters used for numerical analysis. (modified vertically connected two-tier tank model)

	Rainfall intensity <70mm/h	Rainfall intensity ≥ 70 mm/h
α_1	0.01081	0.01141
L_{11} (mm)	33.825	29.187
γ_{11}	0.05563	0.09204
L_{12} (mm)	0.000	0.000
γ_{12}	0.00000	0.00000
β_1^0 (mm)	0.000	0.000
a_{21} (mm)	0.000	0.000
a_{22}	0.00444	0.00253
a_{23} (mm ⁻¹)	0.00007	0.00001
β_2^0 (mm)	0.000	0.000

Fig. 12 Change in storage depth with time. (second tank)

透水性舗装体の表面流出量と地下水涵養量を精度良く再現し得ることを明らかにした。

(2) 透水性舗装体は、雨水を舗装体内に浸透させる機能（雨水浸透機能）は十分に有するものの、雨水を舗装体内に留めておく機能（雨水貯留機能）はほとんど有しないものと推察した。

今後は、タンクモデルや修正タンクモデルに用いる各パラメータの合理的な決定方法（例えば、透水性舗装体の各物性値と関連付けるなど）について検討する必要がある。

最後に、本研究の遂行に当たっては、新都市社会技術融合創造研究会における実験データを使用させて頂きました。関係の方々に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) S. Nishiyama, Y. Onishi, 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).
- 2) A. Marui, "Laboratory Experiments in the Vertical Water Movement Using a Stratified Two Layered Soil Column", The Journal of the Japanese Association of Groundwater Hydrology, Vol.28, No.2, pp.53-62 (1986).
- 3) S. Nishiyama, Y. Ohnishi, T. Yano, M. Kitayama and M. Wada, "Study on Rainfall Infiltration Facilities of Permeable Pavements", Journal of Pavement Engineering, Vol.12, pp.99-106 (2007).
- 4) S. Saito and T. Kawatani, "Numerical Study on Rainfall Infiltration and Seepage Processes Considering Pore-Air Flow", Journal of Applied Mechanics, Vol.6, pp.865-872 (2003).
- 5) M. Sugawara, "Ryusyutukaisekihoh", (1972) Kyoritsu Shuppan.
- 6) K. Aoki, M. Fukuda, H. Imanishi, T. Iida and K. Nishiyori, "Estimation of Groundwater Infiltration and Water Supply", Proceedings of the 4th Symposium on Water Resources, pp.287-290 (1992).
- 7) S. Nakamura, S. Iwanaga and K. Hioki, "Case Study of Slope Failures by Modified Tank Model", Proceedings of Symposium on Instability Mechanism and Stability Estimation of Slope in Time of Rainstorm and Earthquake, pp.275-280 (2009).
- 8) S. Kobayashi and T. Maruyama, "Search for the Coefficients of Reservoir Model with the Powell's Conjugate Direction Method", Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Vol.65, pp.42-47 (1976).
- 9) A. Nagai and M. Kadoya, "Optimization Techniques for Parameter Identification of Runoff Models", Disaster Prevention Research Institute annuals, Vol.22, B2, pp.209-224 (1979).
- 10) Japan Meteorological Agency, "Weather, Climate & Earthquake Information", <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> (2008).