

9. 車道透水性舗装の透水特性

A Study on Through Water Function of the Roadway Permeable Pavement

技術部 高崎忠勝、小林一雄、峰岸順一、高橋清

1. はじめに

東京都はヒートアイランド現象の緩和や局所的集中豪雨等における洪水流出抑制、地下水涵養を目的として車道への透水性舗装の導入を目指している。

本報は試験供試体を用いた実験及び浸透流解析結果をもとに車道透水性舗装が有する流出抑制機能及び地下水涵養機能について報告するものである。

2. 実験概要

(1) 散水実験

車道透水性舗装の浸透特性に関する基礎データを得るため散水実験装置を作成した。

実験装置は図-1 に示した構造の舗装供試体（勾配方向 1.5m×奥行き 1.0m×高さ 0.27m）の上面以外を防水処理し、舗装供試体上面に 1.0m×1.0m の範囲を散水する装置を取り付けたものである。写真-1 に散水実験装置を、写真-2 に舗装供試体の作製状況を示した。

散水した水は下面 6 箇所と側面 4 箇所の排水口から排水する仕組みであり、排水口は止水装置により排水条件を変更できる。

表層(透水性特殊開粒度As混合物)	t=5cm
上層路盤(透水性開粒度As混合物2号)	t=7cm
下層路盤(RC-40)	t=10cm
フィルター層(砂)	t=5cm
ジオテキスタイル	

図-1 舗装供試体の構成

舗装供試体の型枠はステンレス製であり下面及び側面に排水口を設けてある。

フィルター層の作製方法を示す。事前に密度確認用の供試体に砂を入れ水締めによる締固めを行い、湿潤密度 1.970g/cm³、含水比 22.0%を確認した。

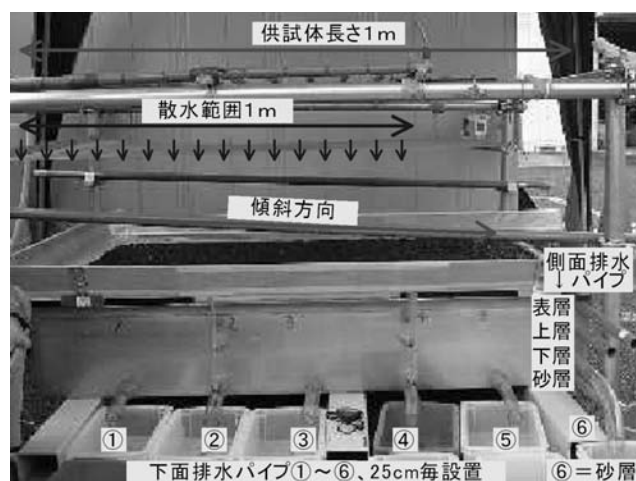


写真-1 散水実験装置



写真-2 舗装供試体作製状況

型枠底面にジオテキスタイルを敷設後、計量した砂を型枠内に入れ、水締めで締め固めた。厚さ 5cm になったことを確認後、上部にジオテキスタイルを敷設し周囲のシーリングを行った。使用したジオテキスタイルのカタログ上の透水係数は $8.4 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ である。

下層路盤の作製方法を示す。路盤材が締め固め度 95% となる重量を計量し、型枠に入れ締め固め、厚さ 10cm になったことを確認後、周囲をシーリングした。

上層路盤の作製方法を示す。アスファルト混合物はアスファルトプラントから出荷されたものを使用した。アスファルト混合物が室内配合の基準密度の 97% の締め固め度となる重量を計量し、型枠に入れ締め固め、所定の厚さであることを確認し、周囲をシーリングした。

表層の作製方法を示す。アスファルト混合物はアスファルトプラントから出荷されたものを使用した。アスファルト混合物が室内配合の基準密度の 97% の締め固め度となる重量を計量し、型枠に入れ締め固め、所定の厚さであることを確認し、周囲をシーリングした。

表-1 のように排水、勾配、散水の条件を設定した。勾配 1.5% は道路の横断勾配を想定しており、勾配 5.0% は道路の縦断勾配を想定したものである。

散水は設定した散水強度で 1 時間行い、排水量の測定は散水開始時から 30 分間隔、散水開始 30 分経過時から散水終了時が 5 分間隔、散水終了時から 90 分間隔とした。実験のインターバルは舗装供試体の初期水分量が一定となるように 1 週間程度とした。

散水実験における排水量の経時変化についてケース 16~18 を図-2 に示した。散水開始 3~6 分後から排水がはじまり時間経過とともに排水量が増加した。散水開始から 10 分間で排水量は安定した。散水終了とともに排水量の減少がはじまり 20 分後には排水がほぼ終了した。

排水が下面及び側面のケース（1, 4, 7, 10, 13, 16）は側面からの排水がみられず、下面のみのケース（2, 5, 8, 11, 14, 17）と同様の結果となった。排水が

表-1 散水実験の設定

ケース	勾配	散水強度	排水条件	ケース	勾配	散水強度	排水条件
1	1.5%	50mm/hr	下面・側面	10	5.0%	50mm/hr	下面・側面
2	1.5%	50mm/hr	下面	11	5.0%	50mm/hr	下面
3	1.5%	50mm/hr	側面	12	5.0%	50mm/hr	側面
4	1.5%	100mm/hr	下面・側面	13	5.0%	100mm/hr	下面・側面
5	1.5%	100mm/hr	下面	14	5.0%	100mm/hr	下面
6	1.5%	100mm/hr	側面	15	5.0%	100mm/hr	側面
7	1.5%	150mm/hr	下面・側面	16	5.0%	150mm/hr	下面・側面
8	1.5%	150mm/hr	下面	17	5.0%	150mm/hr	下面
9	1.5%	150mm/hr	側面	18	5.0%	150mm/hr	側面

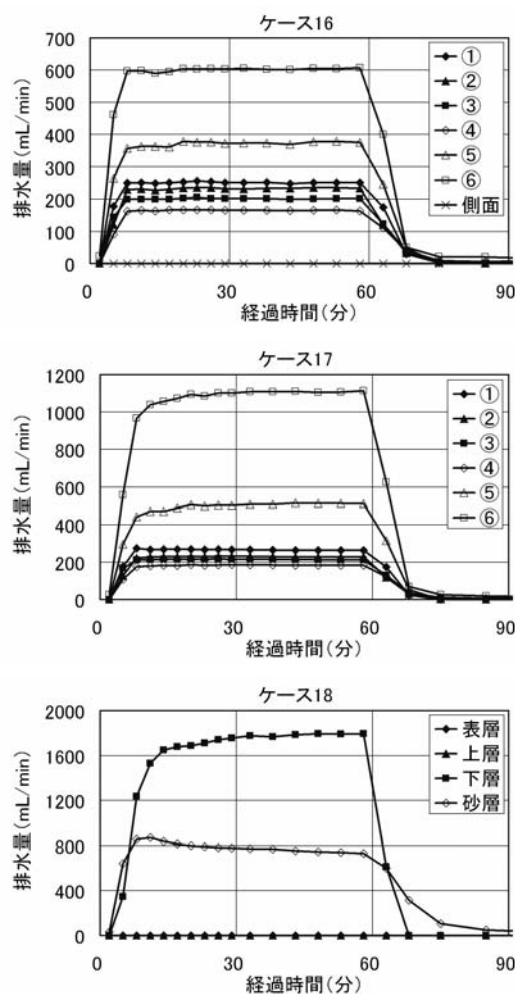


図-2 散水実験結果（ケース 16~18）

下面及び側面と下面のみのケースにおいて、散水 100mm/hr と散水 150mm/hr は勾配下流側の排水量が大きくなり、散水 50mm/hr では散水範囲に近い勾配上流側の排水が卓越した。特に勾配 1.5% のケースでは大部分が散水範囲の下方に位置する排水口①~④から排水された。

排水が側面のみのケースでは、砂層と下層路盤のみから排水が生じており、散水 50mm/hr では砂層からの排水が多く、散水 100mm/hr と散水 150mm/hr

では下層路盤からの排水量が多かった。

以上の傾向は全 18 ケースにおいて現れており本実験結果から得られる一般的傾向と考える。

(2) 透水試験

舗装材料の透水係数を定水位透水試験と低動水勾配透水試験の 2 種類の試験により求めた。定水位透水試験は舗装試験法便覧の透水性アスファルト混合物の透水試験方法に従った試験である。低動水勾配透水試験は定水位透水試験の設定水位を通常よりも小さくして低動水勾配としたものであり、舗装縦断

方向・横断方向の流れが極めて緩やかな動水勾配により流動するとの観点から行ったものである。

供試体は表層と上層路盤が $\phi 10\text{cm}$ 厚さ 5cm、下層路盤とフィルター層が $\phi 10\text{cm}$ 厚さ 10cm、表層+上層路盤と上層路盤+下層路盤と下層路盤+フィルター層が $\phi 10\text{cm}$ 厚さ 10cm (5cm+5cm) である。下層路盤+フィルター層にはジオテキスタイルをいれている。供試体の作製は舗装試験法便覧マーシャル安定度試験の供試体作製方法に準じ、散水実験で用いた舗装供試体と密度が同じになるようにした。各 3 供試体を用い、また、定水位透水試験と低動水勾配透水試験で同一の供試体を使用した。

図-3 に試験結果を示した。下層路盤とフィルター層と上層路盤+下層路盤と下層路盤+フィルター層は動水勾配が大きくなると透水係数が小さくなることを確認した。低動水勾配透水試験による結果はフィルター層以外については定水位透水試験による結果より大きな透水係数値を得た。

(3) 保水実験

表層及び上層路盤の保水能力について供試体を用いた実験を行い確認した。実験は供試体を飽和させた後に供試体下面から水が落下しない状態まで自然放置する。その後、供試体上面以外を防水処理し室内（温度 20℃、湿度 60%）の条件で自然放置し、経過時間による保水量の変化を測定した。

供試体は表層、上層路盤、表層+上層路盤の 3 種類であり、表層と上層路盤が $\phi 10\text{cm}$ 厚さ 5cm、表層+上層路盤は $\phi 10\text{cm}$ 厚さ 10cm (5cm+5cm) である。供試体の作製は舗装試験法便覧マーシャル安定度試験の供試体作製方法に準じ、散水実験で用いた舗装供試体と密度が同じになるようにし、各 3 供試体を用いた。

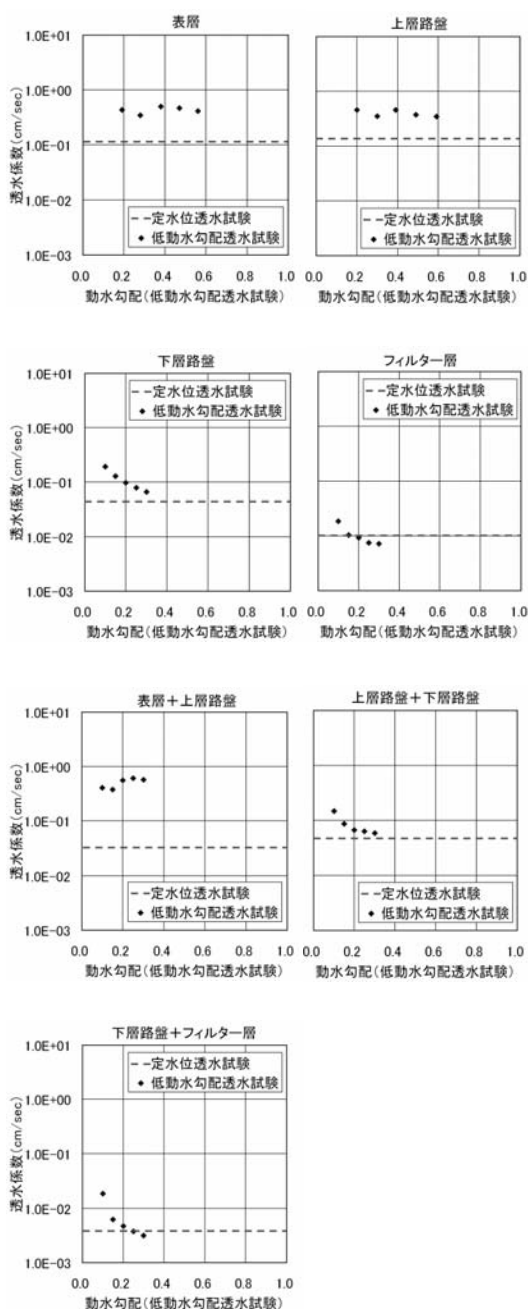


図-3 透水試験結果

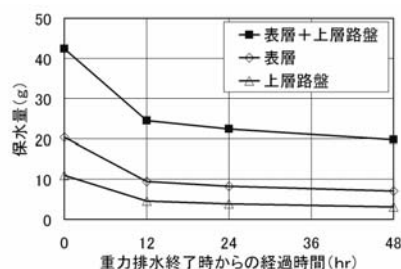


図-4 保水量変化

試験結果を図-4 に示した。重力排水終了時刻の保水量を1としたとき、12時間経過後の保水量は上層路盤 0.43、表層 0.46、表層+上層路盤 0.57 であり、24 時間経過後の保水量は上層路盤 0.36、表層 0.42、表層+上層路盤 0.52 であり、48 時間経過後の保水量は上層路盤 0.29、表層 0.35、表層+上層路盤 0.46 である。12 時間で概ね蒸発散が終了すること、48 時間で保水量の約 50% が蒸発散することを確認した。

3. 車道透水性舗装の浸透特性

散水実験で得られた結果を浸透流解析上で再現

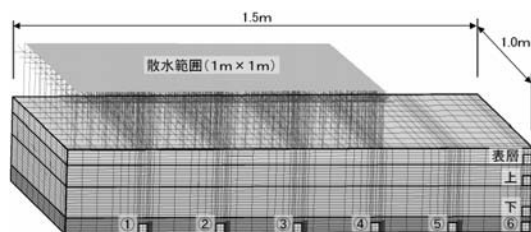


図-5 散水実験モデル

することにより車道透水性舗装の浸透特性を検討した。構築した散水実験モデルを図-5 に示した。

(1) 初期計算

透水性舗装の透水係数は一般的な手法である定

表-2 透水係数 (初期設定)

材料	透水係数 (cm/s)
透水性特殊開粒度As混合物	1.1×10^{-1}
透水性特殊開粒度As混合物2号	1.4×10^{-1}
透水性RC-40	4.5×10^{-2}
砂	1.0×10^{-2}

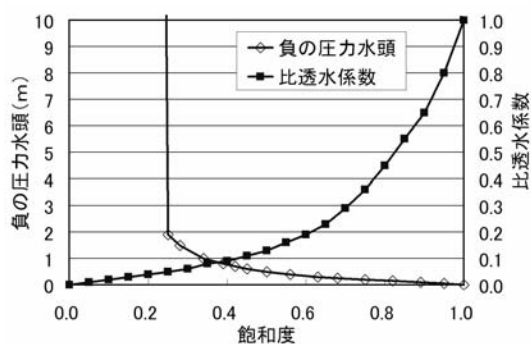


図-6 不飽和設定初期値

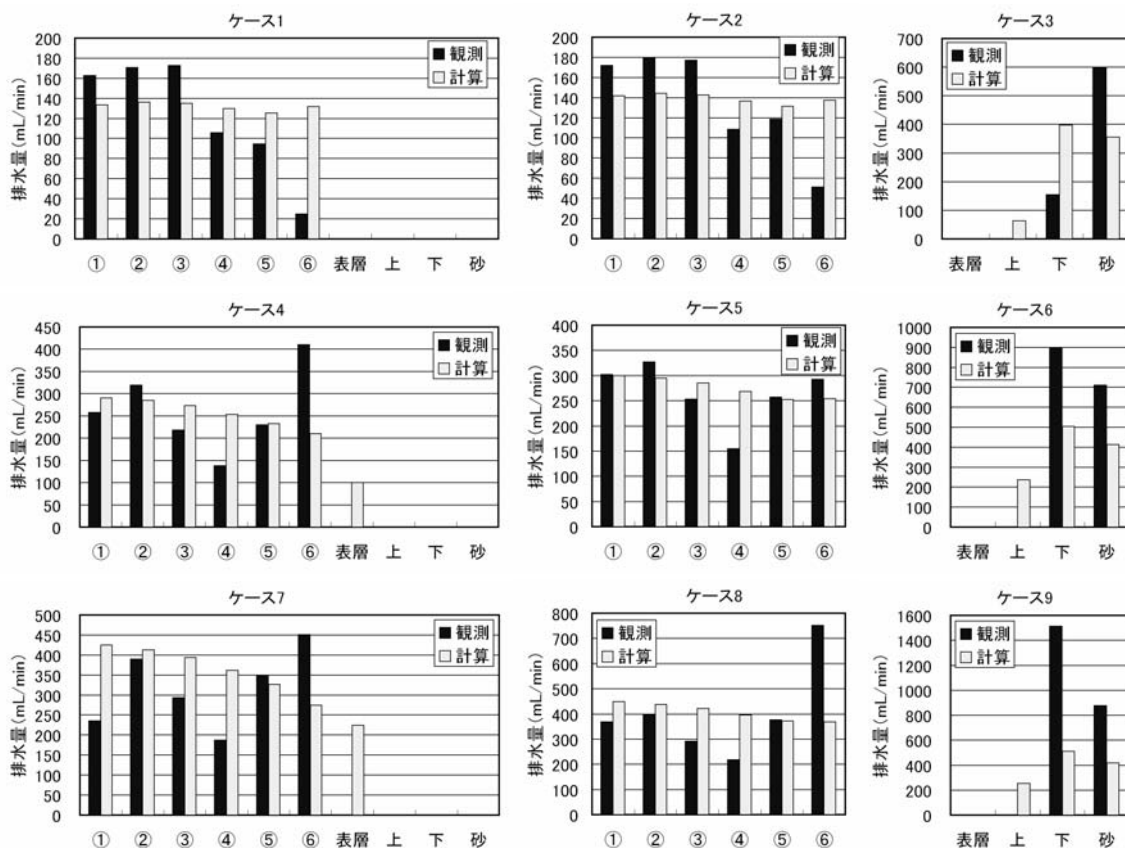
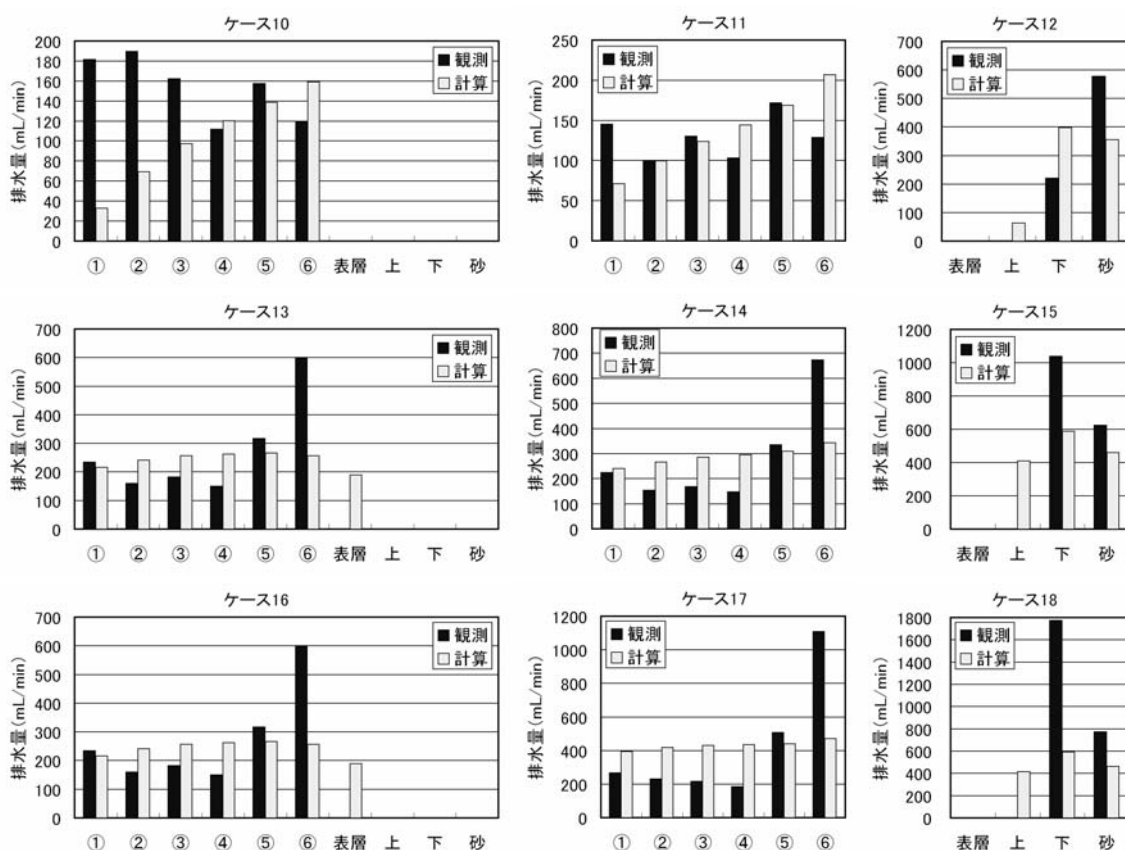


図-7 初期計算結果 (ケース 1~9)



図－8 初期計算結果（ケース 10～18）

水位透水試験から得られた値とした。表－2 に設定した数値を示した。透水性舗装の不飽和特性は砂礫地盤の特性を基に図－6 に示したように初期値を設定した。ジオテキスタイルは初期計算のモデル化においては省略した。

初期設定値による散水実験の再現計算結果について排水量が安定する散水開始後 30 分経過時点の排水量を図－7～8 に示した。勾配 1.5% のケース（1～9）では散水量が大きい場合においても勾配下流側で顕著な増加を示さず、勾配 5.0% のケース（10～18）では勾配下流側の排水量が著しく大きい。鉛直と水平の流動ベクトルの方向が舗装の勾配によってのみ支配されている状況となっている。排水条件が側面のみのケースにおいて上層路盤からも排水が生じている。

計算において再現を要する事項は、散水 50mm/hr のケースでは鉛直下方の流動が卓越し、散水 100mm/hr と散水 150mm/hr のケースでは水平方向に流動が変化する傾向がみられること及び排水が側面のみのケースにおいて砂層と下層路盤のみから排水

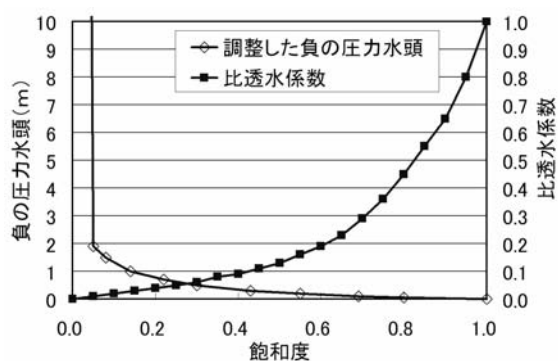
が生じる状況である。

（2）舗装の物性値の検討

舗装の物性値である透水係数と不飽和特性について想定される設定を組み合わせる計算を行った。

表－3 低動水勾配透水試験による透水係数

材料	透水係数 (cm/s)
透水性特殊開粒度As混合物	4.3×10^{-1}
透水性特殊開粒度As混合物2号	4.6×10^{-1}
透水性RC-40	1.9×10^{-1}
砂	1.9×10^{-1}



図－9 不飽和設定（負の圧力水頭を調整）

透水係数は、①定水位透水試験値、②低動水勾配透水試験値、③水平方向を低動水勾配試験値・鉛直方向を定水位試験値、の 3 パターンを想定した。①は定水位透水試験結果から設定した値であり初期計算で用いたものである。②は低動水勾配透水試験結果から設定した表-3 に示した値である。③は動水勾配が小さい水平方向にのみ低動水勾配透水試験値を用い、鉛直方向は定水位透水試験値を用いるものである。

不飽和特性は、①砂礫同等、②負の圧力水頭を調

整の 2 パターンを想定した。①は初期計算で用いたものである。②は図-9 に示したように砂礫の不飽和特性について負の圧力水頭曲線を左側へスライドさせたものである。乾燥状態に近い負の圧力水頭の効果を発揮するために、より小さな含水率となる必要がある。

図-10 に散水開始後 30 分経過時点の排水量を示した。図中にある絶対誤差平均は各排水口における観測値と計算値の差の絶対値を平均したものであり、値が小さいほど再現性が高い。透水係数を①定水位

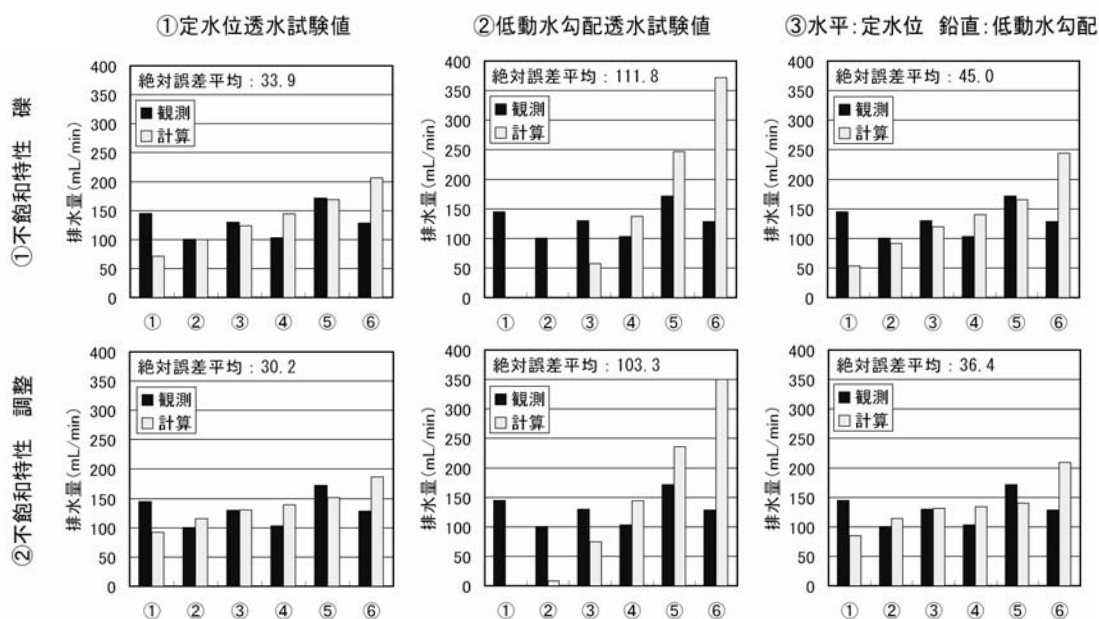


図-10 舗装の物性値の検討 (ケース 11)

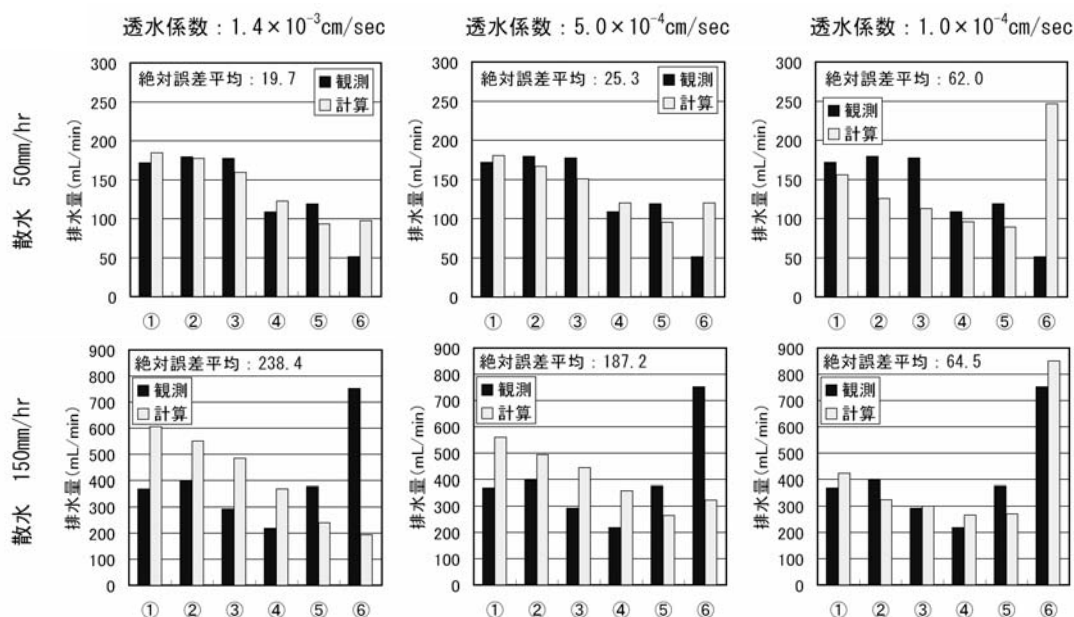


図-11 ジオテキスタイルの検討 (ケース 2, 8)

透水係数： $5.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 透水係数： $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$

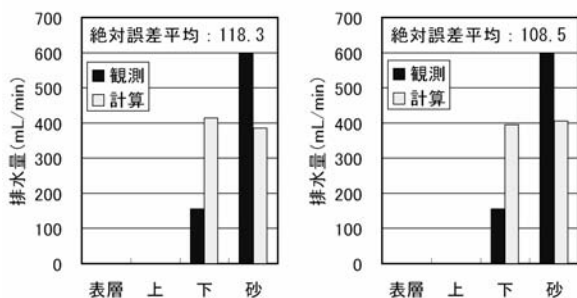


図-12 ジオテキスタイルの検討（ケース 3）

透水試験値とし不飽和特性を②負の圧力水頭を調整とする組み合わせが他と比べて誤差が小さかった。

(3) ジオテキスタイルの設定

散水実験においては散水量によって流動が変化したのは、浸透量が大きくなるとジオテキスタイルが半遮水層として鉛直下方の流れを阻害し水平方向への流れを誘導していると考えられることからジオテキスタイルを半遮水層としてモデルに組み込んだ。カタログ上ではジオテキスタイルの透水係数は $8.4 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ であるが、計算においては $1.4 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 、 $5.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 、 $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ の 3 種類の透水係数を与えた。

図-11 に散水開始後 30 分経過時点の排水量を示した。散水 50mm/hr のケースではジオテキスタイルの透水係数を大きく設定すると再現性が良く、散水量が大きいケースでは透水係数が小さい方が再現性が良い。

図-12 に示した排水条件が側面のみのケースでは、初期計算で生じていた上層路盤からの排水がなくなっている。透水係数を $5.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ より小さくなると排水口⑤と排水口⑥の排水量の相対的な大きさが計算と実験で逆となる。ジオテキスタイルの透水係数は散水条件による大きな誤差を生じにくい $5.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ を採用した。ジオテキスタイルの透水係数が小さくなったのは、舗装路盤により圧縮されたことによると考えられる。

4. 試験施工箇所の浸透能

散水実験モデルの再現計算により得た車道透水性舗装の浸透特性を用いて写真-3 に示した練馬区石

神井台六丁目の試験施工箇所（以下、練馬地区）の浸透能を検討する。

(1) モデル化

モデル化の範囲は試験施工範囲から四方 30m 程度までとし、深さ方向は関東ローム層の下位に位置する粘性土層および礫層までを対象とした。

図-13 に構築した練馬地区モデル、図-14 に断面設定、表-4 に各層の透水係数を示した。



写真-3 練馬地区

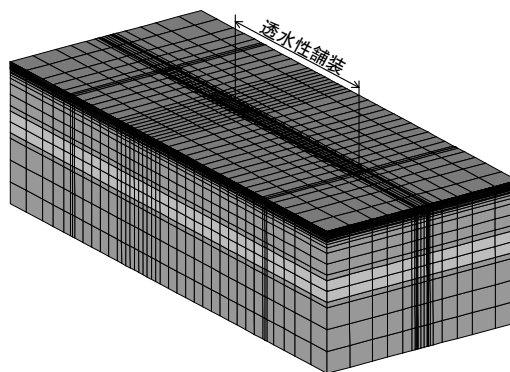


図-13 練馬地区モデル

練馬地区モデル断面		層厚
ローム層（上）	透水性特殊開粒度As混合物	5cm
	透水性開粒度As混合物2号	7cm
	透水性RC-40	40cm
	ジオテキスタイル	0.5cm
	フィルター層（砂）	15cm
	ジオテキスタイル	0.5cm
ローム層（上）		22cm
ローム層（下）		360cm
粘性土層		200cm
礫層		

図-14 断面設定

表－4 各層の透水係数

材料	透水係数(cm/s)
透水性特殊開粒度As混合物	1.1×10^{-1}
透水性開粒度As混合物2号	1.4×10^{-1}
透水性RC-40	4.5×10^{-2}
ジオテキスタイル	5.0×10^{-4}
フィルター層(砂)	1.0×10^{-2}
ローム層(上)	5.2×10^{-4}
ローム層(下)	3.0×10^{-4}
粘性土層	1.0×10^{-5}
礫層	1.0×10^{-1}

東京都地盤情報システムにより練馬地区付近の柱状図を参照し断面設定を行った。ローム層の透水係数は練馬地区で採取した試料による土の透水試験(変水位)の結果を用い、シルト層と礫層の透水係数は、土質工学会基準「土の透水試験方法」に示された透水性と試験方法の適用性を参考に設定した。

(2) 舗装内湿潤状況の経時変化

練馬地区モデルに規模の異なる 9 ケースの降雨を入力し、降雨終了後 24 時間経過時点までの舗装内湿潤状況の経時変化を計算した。

ケース 1～4 は平成 16 年の降雨を想定したものである。ケース 1 は 8 月 29 日降雨であり総雨量 34mm である。ケース 2 は平成 16 年において最も雨量が大きかった 10 月 9 日の台風 22 号時の降雨であり総雨量 232mm である。ケース 3 は 10 月 21 日降雨であり総雨量 4mm である。ケース 4 は 11 月 12 日降雨であり総雨量 25mm である。

ケース 5～7 は台風時の降雨を想定したものである。ケース 5 は時間最大雨量 50mm・日雨量 150mm、ケース 6 は時間最大雨量 100mm・日雨量 300mm、ケース 7 は時間最大雨量 150mm・日雨量 450mm に設定した。

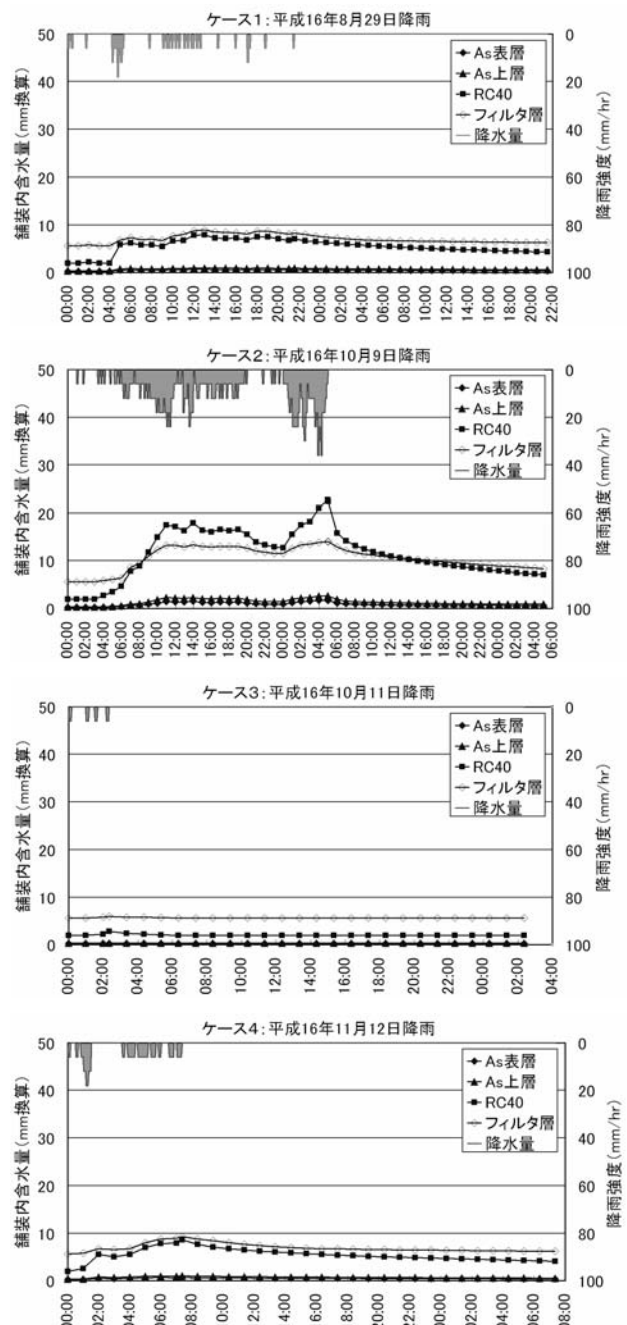
ケース 8～9 は局地的集中豪雨を想定したものである。ケース 8 は 200mm/hr の降雨を 30 分間継続、ケース 9 は 300mm/hr の降雨を 30 分間継続するものである。

図－15～16 に計算結果を示した。ケース 9 をみると表層が飽和していることがわかる。このときの表層の含水量は mm 換算で 5mm である。ケース 1～5 は

表層の含水量が mm 換算で 5mm に達していないことから、1 時間に 50mm の降雨であれば表面流出しない。また、ケース 8 をみると表層の含水量が mm 換算で 5mm に達するのは数分間であり、1 時間に 100mm の降雨においても降雨のほとんどを浸透させる。これらのことから大雨時の流出抑制に大きな効果を期待できる。

(3) 舗装による降雨の捕捉

降雨終了後、各層の含水率は低下するが時間経過により低下量は小さくなる。降雨終了後 12 時間経過



図－15 含水量変化 (ケース 1～4)

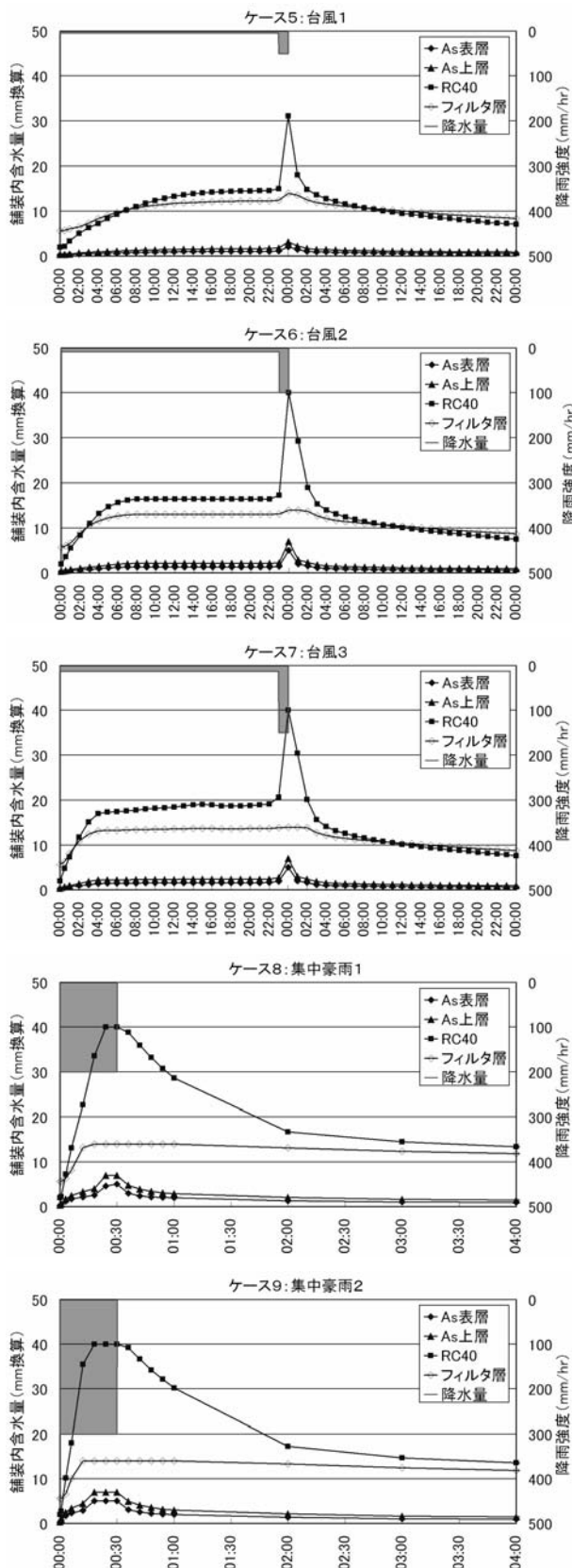


図-16 含水量変化 (ケース 5~9)

時点を重力排水終了時と考え、この時の表層と上層における降雨による保水量増加を捕捉水量とした。

総雨量と捕捉水量の関係を図-17 に示した。

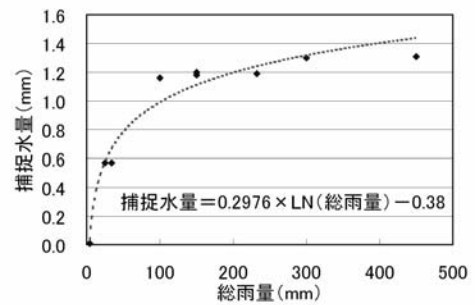


図-17 捕捉水量

総雨量の増加に伴って捕捉水量は増加するが、総雨量が 100mm 以上になると捕捉水量の増加は少なくなる。対数近似により図中の式を得た。

舗装内からの蒸発量は供試体を用いた保水実験により地表に近い表層と上層から 48 時間に捕捉水量の約 50%が蒸発する傾向を確認している。

また、可能蒸発量は式(1)の Penman の式により計算される。

$$E_p (\text{mm/day}) = 0.35 (\rho^* - \rho_a) (0.5 + v/161) \quad \text{式 (1)}$$

E_p : 可能蒸発散量 (mm/day)

ρ_a : 平均蒸気圧 (mmHg)

ρ^* : 飽和水蒸気圧 (mmHg)

ρ_a / ρ^* : 相対湿度

v : 平均風速

捕捉水量の 50%と 12 時間における可能蒸発量を比較して大きい値を蒸発量と考えた。

(4) 地下水涵養量

平成 16 年における練馬試験施工箇所の地下水涵養量を計算した。雨量は気象庁の練馬、府中、所沢の 3 観測所の平均雨量とし、降雨期間中の可能蒸発量を雨量から引いたものを有効雨量とした。

無降雨状態が 48 時間以上継続後の降雨を別降雨と考え、一連降雨毎に有効雨量及び蒸発量を計算し、有効雨量から蒸発量を引いたものを地下水涵養量とした。

計算の結果、年間雨量 1694mm に対して蒸発量 75mm、地下水涵養量 1619mm を得た。年間雨量に対する割合は蒸発量 4%、地下水涵養量 96%である。施工範囲内への降雨のほとんどを地下に浸透させることから、施工延長を大きくすることで地下水涵養を期待できる。平成 16 年 4 月 1 日現在、練馬区内において東京

都が管理する道路は練馬区面積の 2.6%にあたる。東京都管理道路の 10%を車道透水性舗装で施工したと仮定すると練馬区内に降った雨の 0.2%を地下に浸透させることになる。

(5) 側方への浸透

図-15~16 の計算における降雨ピーク時の中央部浸透状況を図-18 に示した。図に示した浸潤線は飽和不飽和の境界をあらわし、矢印は水の動きあらわす。車道透水性舗装に降った雨は、下方以外に側方の不浸透域下部に浸透していることがわかる。

5. 考察・まとめ

練馬施工箇所を対象にした浸透流解析では 1 時間に 50mm の降雨に対しては表面流出がなく、1 時間に 100mm の降雨に対してもほとんどを浸透させる結果を得た。このことから高い流出抑制効果を期待できる。また、地下水の涵養に関しては、練馬区内の東京都管理道路の 10%を車道透水性舗装で施工したと仮定すると練馬区内に降った雨の 0.2%を地下に浸透させることが期待できる。

浸透流解析結果より不浸透域下部に向かった側方への浸透を確認した。本解析結果から得られた車道透水性舗装の浸透能は過去にモデル舗装を用いた実験から得られた浸透能より大きい。モデル舗装による実験では土槽内に舗装を構築していることから、側方への浸透が拘束された状態にある。高い浸透能力は側方への浸透による寄与が大きいと考える。

ジオテキスタイルが浸透を相当程度阻害している状況を実験・再現計算から確認した。ジオテキスタイルはフィルター層の流出防止のために敷設してお

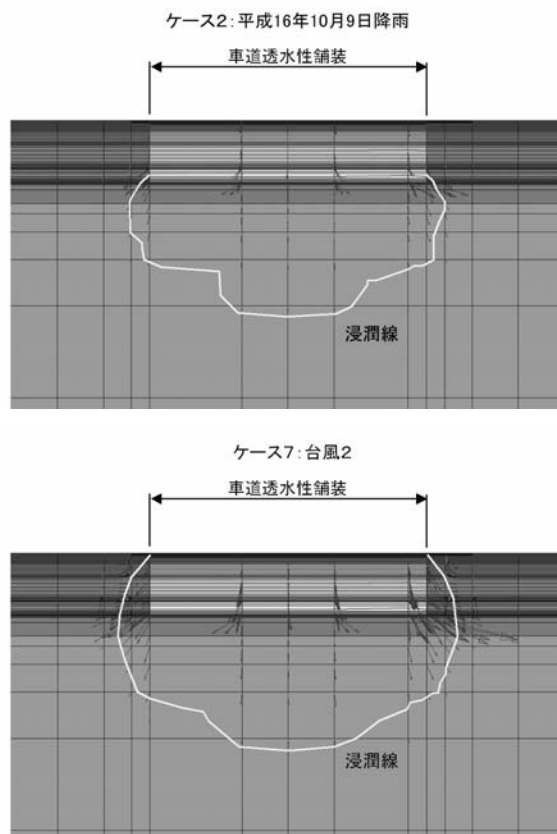


図-18 中央部浸透状況

り、これまでも浸透の阻害は想定していたが、本実験及び解析により阻害の程度を把握した。浸透流解析においてジオテキスタイルは浸透流動をほとんど阻害しないとする設定が行われることが多いが、定量的な検討を行う際にはジオテキスタイルによる浸透阻害を考慮する必要がある。

雨水浸透による支持力低下や埋め戻し材料の流出等の検討においても水の動きを把握する必要があるため、浸透流解析を活用できると考える。

参 考 文 献

- 1) 小林一雄、峰岸順一、近江淳一、阿部忠行(2002) : 車道透水性舗装の構造及び機能の検討、平 14. 都土木技研年報、41-52
- 2) 峰岸順一、小林一雄、竹田敏憲(2004) : 車道透水性舗装の耐久性と透水機能、平 16. 都土木技研年報、63-74