

流出解析法を用いた透水性舗装への浸透連結管 付加による流出抑制効果向上の評価

和田安彦¹・三浦浩之²

¹正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564 吹田市山手町3丁目3-35)

²正会員 関西大学助手 工学部土木工学科 (〒564 吹田市山手町3丁目3-35)

透水性舗装の雨水流出抑制効果を定量的に評価するため、水を降雨状に散水できる散水装置を用いた数十回に及ぶ現場浸透実験と解析を実施した。これより透水性舗装における雨水浸透速度は舗装の間隙量と透水性により決まり、舗装面への灌水は浸透速度を増加させることが明らかになった。また、透水性舗装に浸透連結管を付加することにより、透水性舗装の最終浸透能を5mm/hr程度は向上できた。施設の浸透機構を考察し、これに基づいて透水性舗装の雨水流出抑制効果を定量評価できる浸透・流出シミュレーションモデルを構築した。このモデルを用いて浸透連結管を付加した透水性舗装を都市域に整備した場合の流出抑制効果を定量評価し、浸透連結管を付加すれば、透水性舗装を都市域の雨水排除計画に組み入れることが可能なることを示した。

Key Words : rainfall infiltration, storm runoff control, permeable pavement, infiltration pipe, urban runoff simulation model, tank-model

1. 緒言

現在、わが国では、都市化の進展等による都市域の雨水流出量の増大化、集中化に対処するため、透水性舗装や浸透管等の雨水浸透施設と防災調節池、雨水貯留池、雨水貯留管等の雨水貯留施設の設置による雨水流出抑制が図られている。

雨水浸透施設、貯留施設を下水道による雨水排除計画に組み入れていくためには、これら施設の流出抑制効果を定量的に把握することが必要である。雨水貯留施設の流出抑制効果の評価に関しては、修正RRL法等の流出解析モデルにおいて、流出経路での分水機能と貯留施設の貯留機能をモデル化して組み込み、施設設置前と設置後の流出ハイドログラフを比較することによって施設の流出抑制効果が推定されている^{1)~7)}。

一方、雨水浸透施設の流出抑制効果は、その浸透能が施設構造や設置地盤の浸透特性等によって異なるため、貯留施設の貯留容量のように流出抑制量を明確にすることが難しい。このため、ある地域全体への浸透施設設置による流出抑制効果は、個々の施設の浸透実験結果等より求めた流出抑制値の単純合計から評価するにとどまっている。

代表的な雨水浸透施設である透水性舗装は、広い浸透面を確保できることから都市の水循環の適正化

に役立ち、しかも、通過車両による騒音の低下、降雨時の夜間におけるヘッドライトの反射抑制等の効果も有するため、その設置が広まれば、市民の受ける恩恵も多いと考えられる。しかし、

- ・浸透柵や浸透トレンチでは雨水を灌水することにより浸透能を高く維持できるが、透水性舗装では表面に雨水をほとんど灌水できないため、浸透能が低い。
- ・通過交通によりもたらされる土粒子やゴミ等が多く、目詰まりによる浸透能低下の問題が顕著に表れる。

といった問題点があるため、その普及が関東（とりわけ東京都）以外では遅れているのが現状である。

そこで、本論文では、透水性舗装の浸透能力を向上させるために、浸透連結管を付加することを試み、その流出抑制能力と雨水浸透機構を実験施設における浸透実験より明らかにする。さらに、この施設を排水区域全体に設置した場合の流出抑制効果を、流出解析モデルにより評価する。

2. 浸透連結管付き透水性舗装とその透水特性

(1) 浸透連結管付き透水性舗装

浸透連結管付き透水性舗装は、側溝の下部に浸透連結管を併設して、透水性舗装の路床に浸透した雨水を排除することにより、透水性舗装の浸透能を降

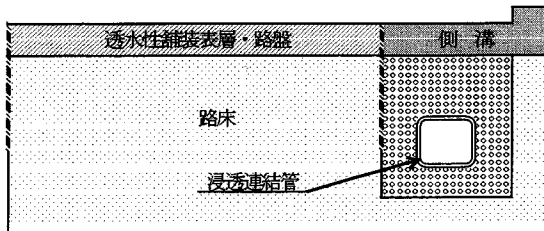


図-1 浸透連結管付き透水性舗装施設の構造図

雨後半においても高く維持することを目指した施設である(図-1)。透水性舗装と浸透連結管の間には地表面より0.59 mまで止水板(エラストイト厚さ10 mm)が埋設してあり、透水性舗装より地中へ浸透した雨水がすぐに浸透連結管内へ浸透することを防いでいる。

透水性舗装表面は緩やかに傾斜しており、浸透しきれずに表面に湛水した水は舗装面端に設置した流出孔へと流出するようになっている。ここで表面流出量を計測する。また、浸透連結管は柵に接続しており、ここで流出量を計測する。

これまでに、試験的に設置した透水性舗装に次の3タイプの浸透連結管を付加した複合型雨水浸透施設の雨水流出制御効果について浸透実験を通じて明らかにしてきた^{8) - 11)}。

- Type-1 ; ポーラスコンクリート管(円形)
- Type-2 ; ポーラスコンクリート管(方形)
- Type-3 ; 有孔塩化ビニール管(卵型)

実験時の地下水位や路床土壌の湿潤状態の方が施設構造よりも浸透速度等に対する影響が大きく、付加する浸透連結管のタイプによる浸透能の差は見られなかった。

さらに、実験結果の検討により明らかにした複合型雨水浸透施設の雨水浸透機構をもとに、施設の雨水制御効果を予測評価するシミュレーションモデルを構成した。複合化した雨水浸透施設の雨水浸透機構は、多段タンクモデルを応用したモデルにより表現できた¹¹⁾。なお、実験地には浸透連結管のみを設置したタイプもある。

(2) 実験方法

a) 浸透実験Ⅰ：浸透連結管付き透水性舗装

浸透連結管を付加した透水性舗装における浸透実験を次のように行った。

透水性舗装表面に降雨散水装置で様な降雨強度で散水し、表面流出開始までの時間と累積散水量、及び、表面流出開始後の流出量の測定を行った¹¹⁾。降雨散水装置は塩化ビニールパイプ製で、散水孔の間隔、孔径を工夫することで、舗装面全体の散水強度

が極力一様になるようにしたものである。実験ではこれを複数個用い、舗装面での降雨強度が一様になるように、適宜装置を移動した。

一般に透水性舗装での散水実験による表面流出量は散水初期は発生せず、ある時間経過後に流出を開始する。この表面流出開始までの単位面積当たりの累積散水量を初期浸透高とした。流出開始後、表面流出量は徐々に増加し、その後、ある値で一定となる。この時の浸透速度を最終浸透能とした。

さらに、透水性舗装表面からの流出量がほぼ一定となっても散水を継続した。これにより、透水性舗装に併設された浸透連結管からも流出が始まる。この流出量が流出開始後より増加し、その後、ある値で一定となるまで実験は継続した。

b) 浸透実験Ⅱ：浸透連結管付加効果の検討

実験施設には透水性舗装のみで浸透連結管を付加していないものはない。このため、直接、浸透実験により浸透連結管を透水性舗装に付加することの効果进行を明らかにすることはできない。そのため、あらかじめ浸透連結管を水で満たし、透水性舗装に浸透した水が浸透連結管へ流入しない状態を意図的に作って、散水実験を行い、浸透連結管が付加されていない透水性舗装の浸透特性を調査した。

c) 浸透実験Ⅲ：浸透連結管

浸透連結管単独でも浸透実験を行った。実験は浸透連結管の下流端は開放し、上流端を締め切って注水し、その反対側で流出量を測定する方法(流水法)で行った。通常、浸透連結管の浸透能力調査に用いられている定水位法などの湛水方式を用いなかったのは、対象実験施設での浸透連結管の機能が、連結管内に流入した雨水を浸透させつつ、域外へ排除することであるためである。

浸透連結管では透水性舗装における散水強度に該当するものとして注水強度を用いた。これは単位時間内の浸透連結管への注水量を浸透連結管の浸透面当たりに換算したものである。また、初期浸透高、最終浸透能の値もこの浸透面積を用いて算出した。

(3) 透水性舗装の浸透特性

a) 実験結果

実験結果を表-1に示す。ここで、浸透連結管無しの場合とは、浸透実験Ⅱによる調査結果である。

散水強度等の実験条件の違いはあるものの、浸透連結管を付加することによって最終浸透能が4-5 mm/hr高くなっている。

実験における透水性舗装表面流出ハイドロ、浸透連結管流出ハイドロの一例を図-2に示す。透水性舗装への散水により、浸透連結管からも流出が生じ

表-1 透水性舗装浸透能調査結果 (平均値)

	浸透連結管	実験回数(回)	平均散水強度(mm/hr)	初期浸透高(mm)	最終浸透能(mm/hr)
Type-1	有り無し	11 4	43 41	34 22	29 25
Type-2	有り無し	12 4	54 43	32 44	40 35
Type-3	有り無し	12 3	58 43	35 34	37 33
全タイプ	有り無し	35 11	48 42	34 33	35 30

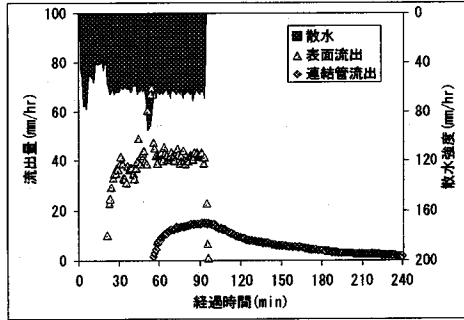


図-2 浸透実験における流出ハイドログラフ

ており、透水性舗装の路床へ浸透した水の一部が浸透連結管へ流入して、さらに管を通じて区域外へ流出している。この流出は散水停止後徐々に減少して、やがて終了する。

図-3は実験における平均的な水収支を計算した結果は表したものである。およそ散水した水の70%が透水性舗装より浸透し、この内の30%が浸透連結管より区域外へ流出している。

以上より、透水性舗装より路床へと浸透した水の一部は併設した浸透連結管へ流入し、区域外へと流出していると判断できる。この現象を本論文では側方浸透として取り扱う。

b) 初期浸透高

図-4に各実験時の平均散水強度と初期浸透高の関係を示す。

通常、浸透施設における初期浸透高は降雨強度に関係なく一定値になると考えられている。しかし、解析結果では、初期浸透高は散水強度が強いほど小さな値となる傾向を示している。

次に、初期浸透高を求める際に用いる表面流出開始までの時間と、平均散水強度の関係を求めた。これを図-5に示す。さらに、相関の高い関係が得られており(R=0.71)、透水性舗装からの表面流出の発生は降雨強度が強まると急速に早くなることがわかる。

以上の特性は、表面流出が開始するまでは、

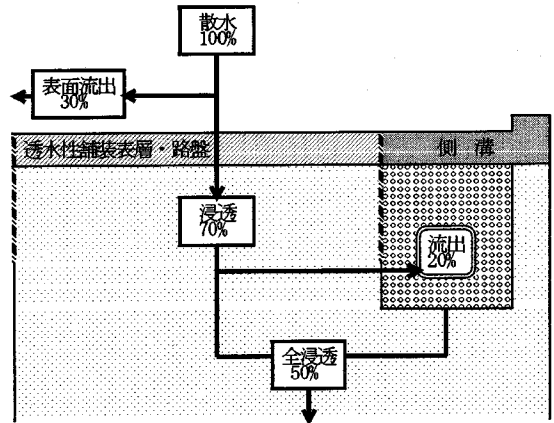


図-3 平均的な水収支

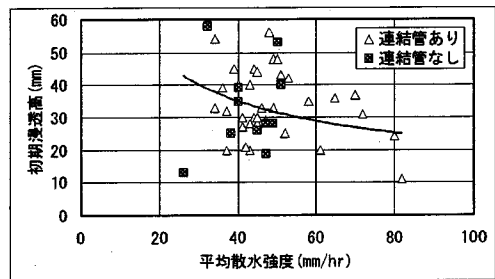


図-4 平均散水強度と初期浸透高の関係

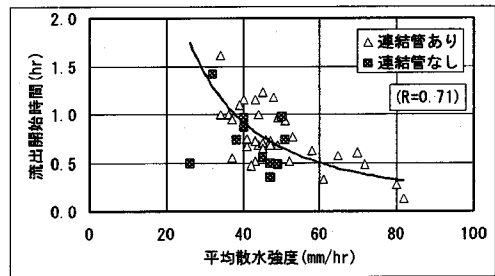


図-5 平均散水強度と流出開始時間の関係

- ①舗装の表層・路盤から路床への浸透
 - ②舗装の表層・路盤の間隙への貯留
- が同時に進行していると考えたと説明できる。
- すなわち、これら2つの事象が同時に進行しているとすると、平均散水強度、流出開始時間、舗装表層・路盤の間隙量、浸透速度の間には次の関係式が成り立つ。

$$t = H / (R - SH) \quad (1)$$

ここで、 t は流出開始時間(hr)、 R は平均散水強度(mm/hr)、 H は透水性舗装表層・路盤の単位面積当たりの間隙量(mm)、 SH は表面流出開始までの浸透速度(mm/hr)である。

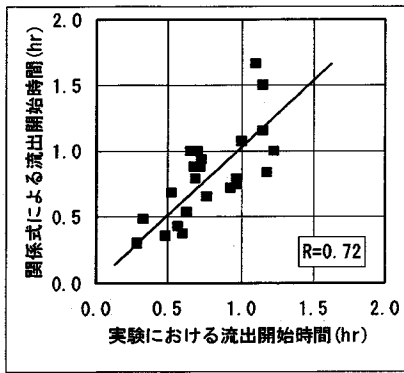


図-6 舗装表層・路盤間隙量 H と浸透速度 SH の推定 ($H=15\text{mm}, SH=30\text{mm/hr}$)

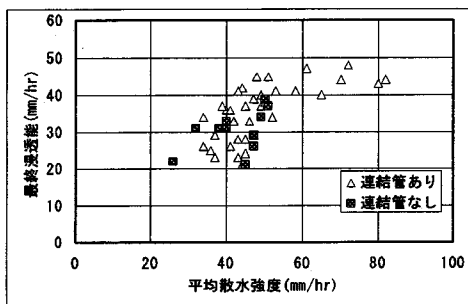


図-7 平均散水強度と最終浸透能の関係

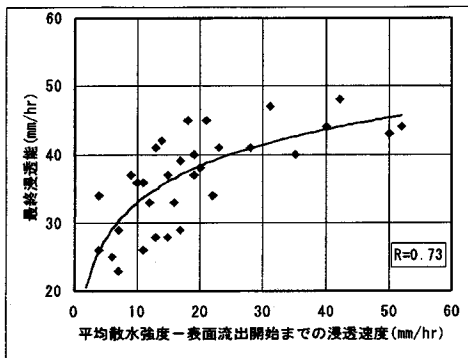


図-8 平均散水強度と最終浸透能の関係 (舗装の浸透速度考慮)

$H = 15\text{mm}$, $SH = 30\text{mm/hr}$ として算出した流出開始時間と実験時の流出開始時間の関係を図-6に示す。両者の相関係数は0.72であり、先の仮定が妥当であったと判断できる(ただし、平均散水強度 80mm/hr 程度以下の範囲)。

したがって、透水性舗装において見かけ上の初期浸透高は一定値ではなく、降雨強度により変化すると評価できる。

b) 最終浸透能

次に、平均散水強度と最終浸透能の関係を図-7

に示す。最終浸透能は浸透施設による流出抑制効果の評価に用いられ、その値は設置地盤の透水特性と施設形状により決まるものとされている。

これについても、対象施設ではデータのばらつきはあるものの、降雨強度が強くなると最終浸透能が高くなる傾向が見られた。これは、実験において、散水強度を時間降雨量で $40 \sim 70\text{mm/hr}$ 程度と強く設定しており、これによって浸透しきれない水が表面に数 $\text{mm} \sim 1\text{cm}$ 程度であるが湛水しており、この表面湛水により舗装表層の上面と下面に作用する圧力差が大きくなり、その分だけ動水勾配が大きくなって浸透速度が大きくなっていると考えられる。

この仮定を証明するため、実験結果より、平均散水強度と最終浸透能の関係を図化した。解析結果を図-8に示す。ここでは、先に求めた表面流出開始までの浸透速度 SH を基準値として解析した。

この図より、平均降雨(散水)強度が表面流出開始までの浸透速度 SH より強い場合には、最終浸透能は散水強度が強いほど高い値となることが読みとれる。

したがって、透水性舗装の浸透機構のモデル化に当たっては、表面への湛水による浸透能の増加を考慮する必要がある。

(4) 浸透連結管の浸透特性

筆者らは浸透式の雨水管きょにおける浸透特性を解析した研究¹²⁾より、流下型の浸透施設で得られる浸透能は施設への流入水量、すなわち流下水深に比例することを明らかにしている。

そこで、浸透連結管においても、同様な浸透特性がみられると予想し、流下水深の代わりに注水強度を用い、最終浸透能との関係を解析した。両者の関係を次の図-9に示す。データのばらつきはあるものの、注水強度が強いほど得られる最終浸透能の値が大きくなっている。そこで、注水強度と浸透率(=最終浸透能/注水強度)の関係についても図化した。これを図-10に示す。浸透連結管の浸透率はおよそ $0.05 \sim 0.3$ (平均 0.15) の範囲にある。

3. 浸透連結管付き透水性舗装の浸透機構とモデル化

(1) 浸透機構

従来の筆者らの研究において、対象施設の浸透機構の模式化は行っている¹¹⁾が、さらに解析を進めた結果、浸透機構の解明において浸透面の位置を考慮する必要があると判断して、従来の考えに若干の修正を加え、その浸透機構を図-11のように考えた。

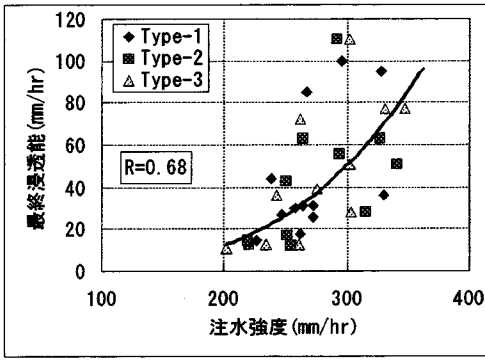


図-9 浸透連結管の最終浸透能

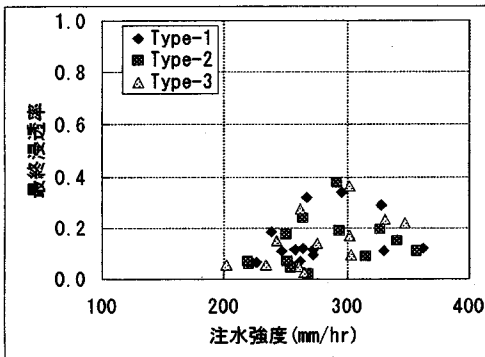


図-10 浸透連結管の最終浸透率

①降水→透水性舗装の表層・路盤

透水性舗装表面への降水は表層・路盤の間隙に貯留されながら浸透し、さらに路床へと浸透していく。この表層・路盤における浸透の速度は表層・路盤が不飽和状態の場合と飽和状態の場合では異なる。表層・路盤を浸透（間隙への貯留含む）しきれなかった降水は表面流出となる。

②透水性舗装の路床→浸透連結管

表層・路盤内を浸透した降水（浸透水）は路床を浸透する。浸透速度は設置地盤固有の値をとる。

路床を浸透水が浸透していく際、湿潤線が形成され、これが次第に路床の下方へと移っていく。この湿潤線が透水性舗装と浸透連結管を分離している止水板の下端にまで到達すると浸透水は浸透連結管設置地盤へも拡がっていく。

この側方浸透現象は鉛直方向で見て、止水板下端から浸透連結管の浸透面までの間にある路床にある浸透水により生じる。そこで、この側方浸透に関与する路床部を路床2とし、それより上方を路床1、下方を路床3と区分して考える（図-12）。

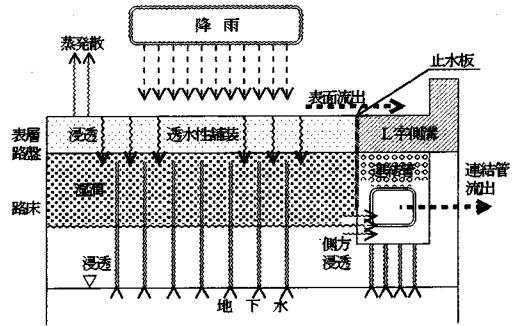


図-11 浸透機構のイメージ

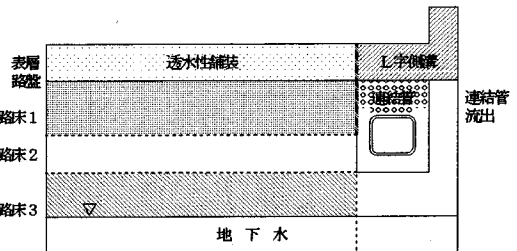


図-12 浸透施設のモデル化

路床3に達した浸透水はさらに下方の地下水面まで浸透していく。したがって、ここまで達した浸透水は流出することはない。

③浸透連結管

路床2部分の浸透水の一部が側方浸透現象により浸透連結管周囲の地盤及び砕石部へと移動する。

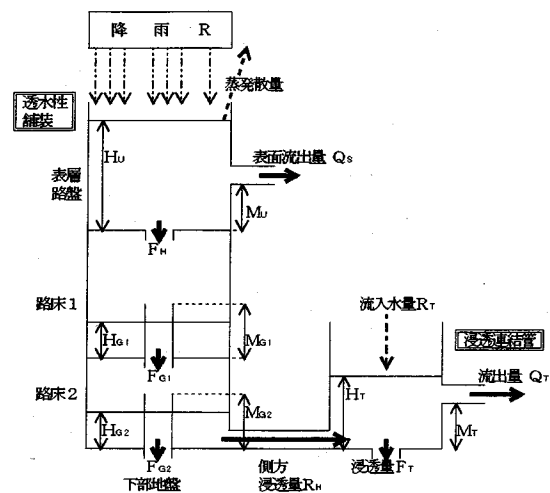
側方浸透水はこの地盤と砕石部の間隙を満たしていきながら、下方へと浸透する。側方からの浸透量よりも下方への浸透量が少なければ、浸透連結管周囲の地盤・砕石部の間隙での貯留水量が増え、すべてを満たしきると浸透連結管内へと浸透して外部へと排除されていく。

浸透連結管は透水性舗装の路床部の浸透水の一部を外へ排除している。これにより、路床部間隙が飽和状態になることを遅くし、施設の最終浸透能の向上に寄与している。

(2) 複合雨水浸透型施設の浸透機構のモデル化

以上の浸透機構を流出解析に用いられるタンクモデルの考え方を応用してモデル化した。モデルのイメージ図を図-13に示す。施設の各部分をひとつのタンクに置き換えてモデル化している。これは筆者らが構築した対象施設のシミュレーションモデルをベースに、新たに解明できた浸透機構を考慮して、再構築したものである。

a) 表層・路盤



- <表層・路盤> $H_U \leq M_U$; $F_H = S_H$, $Q_S = 0$
 $H_U > M_U$; $F_H = S_H + f(R - S_H)$,
 $f(R - S_H) = K_U \cdot \log(R - S_H)$
 $Q_S = R - E - F_H$
 $(S_H = 30 \text{ mm}, M_U = 15 \text{ mm})$
- <路床1> $M_{G1} = f(\text{透水性舗装の埋設深さ})$
 $F_{G1} = f(H_{G1} - M_{G1})$
- <路床2> $M_{G2} = f(\text{浸透連結管底部の埋設深さ} - \text{透水性舗装の埋設深さ})$
 $F_{G2} = f(H_{G2} - M_{G2})$
 $R_H = f(H_{E2})$
- <浸透連結管> $F_r = H_r \cdot S_r$ ($S_r = 0.05 \sim 0.1$)
 $Q_r = (H_r - M_r) \cdot K_r$

図-13 浸透施設の浸透機構のモデル化

透水性舗装の表層・路盤では間隙への貯留と浸透が同時に行われ、その浸透速度は降雨強度に比例する。そこで、表層・路盤は表層・路盤の単位面積当たりの間隙量を流出孔の高さとするタンクで表現する。上述の解析結果より透水性舗装の表層・路盤の間隙量は15mmであることから、タンクの流出孔高さは15mmとする。

浸透速度は、降雨強度が強い場合には表面湛水により透水性舗装の最終浸透能が30mm/hr以上となることから、次式により表した。

$$f_s = f_{s0} + f_{sa} \quad (2)$$

ここで、 f_s は表層・路盤の浸透速度、 f_{s0} は表層・路盤固有の浸透速度、 f_{sa} は表面湛水による付加的浸透速度である。

最終浸透能と平均降雨(散水)強度には比例関係が見られることから、両者の関係を表す次の回帰式を求めた。

$$f_m = 24.9 \cdot \log R_m - 21.27 \quad (3)$$

$$(R = 0.73)$$

$$f_m = f - f_{s0}$$

$$R_m = R - f_{s0}$$

ここで、 f_m は補正最終浸透能(mm/hr)、 R_m は補正降雨強度(mm/hr)、 f は最終浸透能(mm/hr)、 R は

平均降雨強度(mm/hr)である。

したがって、表層・路盤のタンクモデルにおける浸透速度 F_H および表面流出量 Q_S は次式で表現する。

$$H_U \leq M_U \begin{cases} F_H = S_H \\ Q_S = 0 \\ H_U = H_U' + r - S_H \end{cases}$$

$$H_U > M_U \begin{cases} F_H = S_H + 24.9 \cdot \log(r - S_H) - 21.27 \\ Q_S = r - E - F_H \\ H_U = H_U' + r - S_H - Q_S \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 r は降雨強度(mm/hr)、 M_U は表層・路盤の間隙量(mm)、 H_U は表層・路盤の間隙への貯留量(mm)、 F_H は路床1への浸透量(mm/hr)、 S_H は表層・路盤固有の浸透速度(mm/hr)(=30mm/hr)、 Q_S は表面流出量(mm/hr)、 E は蒸発散量(mm/hr)である。蒸発散量は実験施設と同一のアスファルト試験ピースに散水し、総重量の変化によって測定した。

b) 路床1

路床1の浸透機構を表すタンクの浸透孔高さは、路床1の単位面積当たりの間隙量 M_{G1} である。

路床2への浸透量 F_{G1} は次式で表現する。

$$\begin{cases} H_{G1} = H_{G1}' + F_H \\ F_{G1} = H_{G1} - M_{G1} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 M_{G1} は路床1の間隙量(mm)、 H_{G1} は路床1の間隙への貯留量(mm)、 F_{G1} は路床2への浸透量(mm/hr)である。

c) 路床2

側方浸透は浸透水が路床2に達すると直ぐに生じると考え、タンクの側方浸透孔(流出孔)高さは0mmとする。路床3への浸透孔高さは路床1同様に路床2の単位面積当たりの間隙量 M_{G2} である。

路床3への浸透量 F_{G2} 、側方浸透量 R_H はそれぞれ次式で表現する。

$$\begin{cases} H_{G2} = H_{G2}' + F_{G1} \\ F_{G2} = H_{G2} - M_{G2} \\ R_H = Fr H_{G2} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 M_{G2} は路床2の間隙量(mm)、 H_{G2} は路床2の間隙への貯留量(mm)、 F_{G2} は路床3への浸透量(mm/hr)、 R_H は側方浸透量(mm/hr)、 Fr は側方浸透係数である。

d) 浸透連結管

流出孔高さを浸透連結管下部の碎石層の単位面積当たりの間隙量と浸透連結管の浸透面より地下水面までにある地盤の単位面積当たりの間隙量との和とした。また、浸透量は碎石部間隙の貯留水量に比例するため、実験結果より求めた浸透率を浸透係数とする浸透孔で表す。なお、浸透連結管には透水性舗装の路床に浸透した浸透水の一部が浸透する他に、

表-2 対象浸透施設のモデルにおける特性値

特性値	Type-1	Type-2	Type-3
Mu (mm)	5-10	10-15	10-15
Mgu (%)	5	5	5
SH3 (mm/hr)	10-15	5	10-15
Fr (-)	0.3	0.3	0.3
Mtu (%)	15	15	5
Kt (-)	0.7	0.7	0.6
St (-)	0.05	0.05	0.05

直接管内へ流入する雨水もあるため、これも考慮できるようにした。

モデルの基礎式を次に示す。

$$\begin{cases} H_T = H_T' + R_H \cdot (A_T / A_H) + R_T \\ F_T = H_T \cdot S_T \\ Q_T = (H_T - M_T) \cdot K_T \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 M_T は浸透連結管砕石部・地盤の間隙量 (mm)、 H_T は砕石部・地盤の間隙への貯留量 (mm)、 R_T は浸透連結管への直接流入水量 (mm/hr)、 F_T は下方地盤への浸透量 (mm/hr)、 Q_T は流出量 (mm/hr)、 A_T は浸透連結管の設置面積 (m^2)、 A_H は透水性舗装の設置面積 (m^2)、 S_T は流出係数、 K_T は浸透係数 (=実験時の浸透率) である。

4. 浸透連結管付加の効果の評価

(1) モデルシミュレーション

構築したモデルを用い、実測した透水性舗装表面流出量と浸透連結管流出量にシミュレーション結果が一致するように次の特性値の決定を行った。

- ①透水性舗装表層・路盤の間隙量 M_u (mm)
- ②路床の間隙率 M_{gu} (%)
- ③路床の浸透速度 S_{H3} (mm/hr)
- ④浸透連結管への側方浸透率 Fr (-)
- ⑤浸透連結管の砕石部等の間隙率 M_{tu} (%)
- ⑥浸透連結管の流出率 KK (-)
- ⑦浸透連結管の浸透率 St (-)

ここで、これら特性値は対象施設の各タイプ毎の固有値であると考え、定数となるように配慮した。ただし、透水性舗装表層・路盤の間隙量は気象条件等の影響を受けるためある範囲内で適切な値を設定した。

また、路床と浸透連結管の砕石部等の間隙量ではなく間隙率を特性値としているのは、間隙量は地下水位のレベルにより対象となる路床厚および砕石部の地盤厚が変化するため、間隙率とこれらの厚さから間隙量を求めるようにしたためである。

すべての実験データに対して特性値同定シミュレーションを行った結果、各特性値はタイプ別に表-2に示すように求められた。

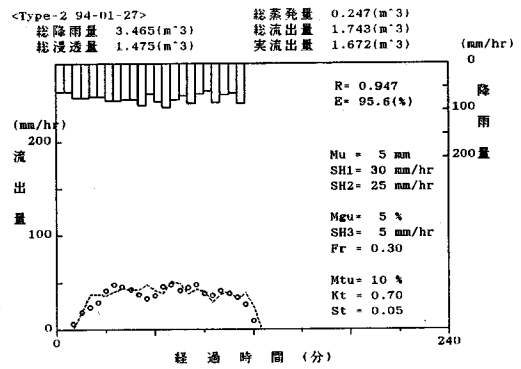


図-14(1) 透水性舗装部のシミュレーション結果

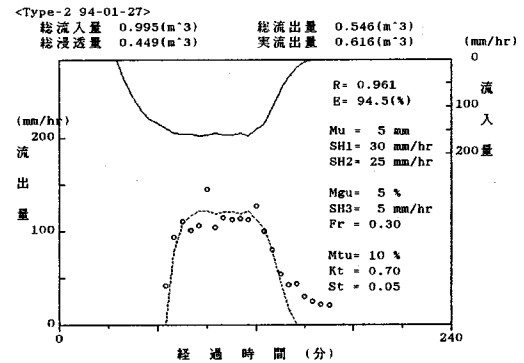


図-14(2) 浸透連結管部のシミュレーション結果

これら特性値から見ても、浸透連結管を透水性舗装の路床部浸透水の排除用に用いた場合には、流出抑制上の機能に関しては浸透連結管の種類はあまり影響しないと判断できる。

シミュレーション結果の一例を図-14に示す。同定シミュレーション結果は、この図で示しているように透水性舗装での表面流出量の変動状況および浸透連結管からの流出量の変動状況を的確に再現できている。

(2) 浸透連結管付加効果の評価

同定シミュレーション結果が的確であり、モデル中の未知の特性値も各施設タイプ毎に定数値として得られたため、これを用いて浸透連結管付加の効果を検討した。すなわち、先のモデルにおいて浸透連結管への側方浸透率を0として、同じ降雨条件を用いてシミュレーションを実施した。

シミュレーション結果の一例を図-15に示す。降雨後半において透水性舗装表面からの流出水量が増えていることがわかる。これは他の降雨条件においても同じであり、浸透連結管の付加は透水性舗装の透水能力の長時間に渡る確保に寄与すると評価できる。特に実験における降雨強度が平均40～60mm/

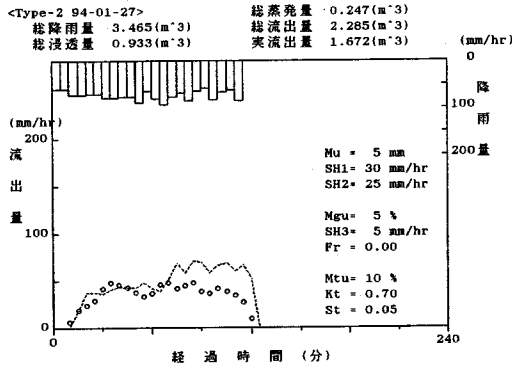


図-15(1) 透水性舗装部のシミュレーション結果

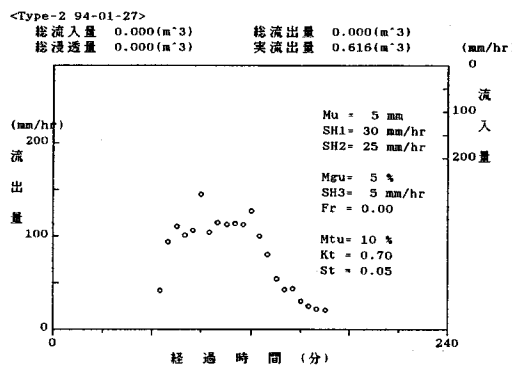


図-15(2) 浸透連結管部のシミュレーション結果

hrで、しかもその強度で2時間以上継続させたものであることを考えると、浸水発生が危惧される豪雨時における雨水浸透による流出抑制が十分可能であると考えられる。

現在、透水性舗装はその浸透能力が不安定であるため、雨水排除計画の立案時等において、流出抑制施設としてほとんど考慮されていない。しかし、われわれが検討した施設のように浸透連結管を付加すれば、その浸透能力を高めることが可能である。さらに、貯留施設の貯留量が一杯となる豪雨時の降雨後半においても流出抑制機能を保持できることは高く評価できる。

5. 流域規模での浸透施設設置効果の評価

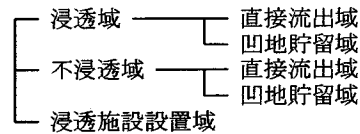
(1) 評価手法

筆者らはこれまで透水性舗装や各種の雨水貯留施設、および流出系での流出抑制施設である浸透性雨水管きよを流域内に適宜設置した場合の流出抑制効果の評価手法について研究してきた¹³⁾⁻¹⁵⁾。筆者らが提案してきた手法は、都市域の雨水流出ハイドログラフを求める際に一般的に用いられている修正

RRL法¹⁶⁾⁻¹⁹⁾における有効降雨モデルに、各流出抑制施設の流出抑制機構を個々に組み込むものである。

これまで、筆者らは、各流出抑制施設の流出抑制能力を凹地貯留と同様な貯留高と浸透域の浸透速度と同様な浸透能で表現してきた。しかし、本研究で対象とした施設の流出抑制能力は、このような定数値で表せるような単純なものではないため、有効降雨モデルに先の対象施設の流出・浸透シミュレーションモデルを組み込んだ。

対象域を次の5タイプに区分し、浸透施設設置域についてはシミュレーションモデルにより流出量を算出し、これを有効降雨量とした。



さらに、対象施設の設置場所や設置面積を的確に評価するため、有効降雨量を各等到達時間域毎に算出し、次式を用いて有効水量を算出して、インフローハイドログラフを求める。

$$P(t) = R_{n(1)} \cdot A_n + R_{n-1(2)} \cdot A_{n-1} + \dots + R_1(t) \cdot A_1 \quad (8)$$

ここで、 $P(t)$ は計算ステップ t における有効水量、 $R_n(t)$ は t ステップにおける等到達時間域 n の有効降雨量、 A_n は等到達時間域 n の面積である。

(2) モデル地域における評価

提案する手法を用いて、ある流域への対象浸透施設を設置した場合の流出抑制効果を流域単位で評価する。

a) 対象モデル地域

対象モデル地域は都市化された分流式下水道整備区域で、面積は10.39haである。不浸透面積率は53.4%である。

b) 対象降雨

対象降雨には計画降雨(確率年1/10、中央ピーク型)を用いた。

総降雨量 72.9 mm 時間最大 172 mm/hr

地下水位は対象降雨日に測定された現地での値を参考に設定した。

c) 施設設置条件

対象地域の幹線道路以外の全ての道路に、対象浸透施設を設置することを想定した。対象モデル地域内の幹線道路以外の道路の総面積は1.652haであり、道路総延長は約3,300mである。

また、実験施設では道路の片端に浸透連結管が設置してあるものであったが、ここでは道路の両側下に浸透連結管を設置することを想定した。したがっ

表-3 浸透施設の浸透特性設定値

特性値	設定値
Mu (mm)	15
Mgu (%)	5
S _{H3} (mm/hr)	10
Fr (-)	0.3
Mtu (%)	15
Kt (-)	0.7
St (-)	0.05

表-4 浸透施設設置による流出抑制効果

ケース	総流出水量 (m ³)	ピーク流量 (m ³ /min)	低減率(%)	
			総量	ピーク
未設置時	4,701	121.9	—	—
ケース I	3,806	96.3	19	21
ケース II	1,838	78.4	61	36

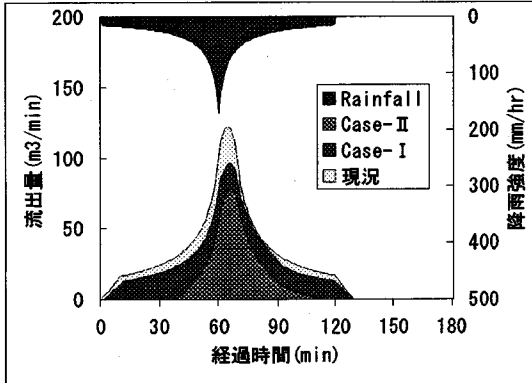


図-16 対象排水区からの流出ハイドログラフ

て、浸透連結管の総延長は約 6,600 mとなる。

検討ケースは

I : 透水性舗装のみ設置

II : 透水性舗装に浸透連結管を付加

の2ケースである。

d) 流出抑制効果の検討

浸透施設の浸透特性値は表-3に示す同定シミュレーションにおける平均的な値を用いた。

対象地域からの流出ハイドログラフを図-16に示す。雨水浸透施設の流出抑制効果を総流出量の低減率 $\Delta TQd/TQ_0$ とピーク流量の低減率 $\Delta PQd/PQ_0$ で表し、各検討ケースで求めた結果を表-4に示す。

$$\Delta TQd/TQ_0 = (TQ_0 - TQ_s) / TQ_0 \quad (9)$$

$$\Delta PQd/PQ_0 = (PQ_0 - PQ_s) / PQ_0 \quad (10)$$

ここで、 $\Delta TQd/TQ_0$ は総流出量低減率(%), TQ_0 は雨水浸透施設未設置時の総流出量, TQ_s は雨水浸透施設設置時の総流出量, $\Delta PQd/PQ_0$ はピーク流量の低減率(%), PQ_0 は雨水浸透施設未設置時のピーク流量, PQ_s は雨水浸透施設設置時のピーク流量である。

透水性舗装のみを設置した場合には総流量、ピーク流量共にあまり流出抑制効果は得られていない。しかし、浸透連結管を付加することによって、透水性舗装の浸透能の向上と浸透連結管よりの地下浸透が行われ、高い流出抑制効果を得られている。

6. 結言

透水性舗装は流出抑制効果を有するが、他の浸透施設や雨水貯留施設流出抑制効果が不確実なことから雨水排除計画立案時等においてあまり前向きに考慮されてこなかった。これに対して、筆者らは透水性舗装に浸透連結管を付加することにより、雨水浸透施設が得意としない降雨後半における流出抑制効果の保持を目指した。実規模の実験施設を設置し、その浸透能実験を数年間にわたり実施した。しかし、実験結果の解析からは、浸透連結管付加による明確な浸透性舗装の流出抑制保持効果は見いだせなかった。そこで、実験時の透水性舗装と浸透連結管からの流出の状況や各種実験データの解析結果を踏まえて、浸透連結管を付加した透水性舗装の浸透機構を解明し、これをもとにその浸透システムをシミュレーションできるモデルを構築した。

浸透連結管を付加した透水性舗装の浸透機構に関わる各種特性値を実験結果を用いて同定した上で、同一条件下で浸透連結管を付加した場合としない場合の浸透状況及び流出抑制状況を予測した。その結果、透水性舗装への浸透連結管の付加は、降雨後半における流出抑制効果の保持に効果があることを示すことができた。

次に、このような雨水浸透施設を都市域に設置した場合の排水区域単位での流出抑制効果を、修正RRL法の有効降雨の算定において、有効降雨モデルに対象浸透施設の浸透機構を表すシミュレーションモデルを組み込む方法により評価した。幹線道路を除く道路すべてに検討した浸透連結管付き透水性舗装の設置により、1/10の確率降雨において総流量を61%、流出ピークを36%低減可能であることを示した。

これより、透水性舗装では浸透連結管を付加して路床への浸透水を適宜排出系に排出すれば、雨水排除計画における流出抑制施設として勘案できるレベルの流出抑制効果を保てることを示せた。

最後に、本研究の遂行に当たり、実験施設を提供していただいた神戸市下水道局の関係各位に深く謝意を表すとともに、当調査研究に協力頂いた方々に

謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋徹男, 浪岡俊史, 白鳥悟士(札幌市): 創成川処理区雨天時流量・負荷量解析, 平成5年度第30回下水道研究発表会講演集, pp.783-785, 1993.
- 2) 唐牛義夫, 今井健治, 白鳥悟士(札幌市): 札幌市における雨水貯留管(創成川貯留管), 月刊下水道, Vol.16, No.4, pp.21-26, 1993.
- 3) 大迫健一(東京都): 池尻幹線・新駒沢幹線の管渠内貯留による雨天時初期汚濁対策および浸水対策としての暫定利用, 月刊下水道, Vol.14, No.5, pp.22-32, 1991.
- 4) 山本浩士, 永田俊範(名古屋市): 名古屋市における合流式下水道の改善目標と具体策について, 第31回下水道研究発表会講演集, pp.814-816, 1994.
- 5) 杉浦弘明, 倉敷三樹男, 守屋直哉: 浸水対策施設を利用した雨天時汚濁の削減効果, 平成6年度第31回下水道研究発表会講演集, pp.808-810, 1994.
- 6) 結城庸介(大阪市): 大阪市における大規模雨水貯留施設, 月刊下水道, pp.37-40, Vol.16, No.4, 1993.4.
- 7) 原正博: 大規模幹線による雨水対策設計例, 下水道協会誌, Vol.27, No.312, pp.47-50, 1990.5.
- 8) 和田安彦, 三浦浩之, 清水俊吾: 都市域における複数の雨水浸透型施設による流出抑制のシミュレーション予測とその評価, 土木学会衛生工学研究討論会講演集, 第26巻, pp.91-96, 1990.
- 9) 和田安彦, 三浦浩之: 雨水浸透型施設の組み合わせによる流出抑制と効果, 日本下水道協会, 第26回下水道研究発表会講演集, pp.809-811, 1989.5.
- 10) Yasuhiko Wada and Hiroyuki Miura: Effect and Evaluation of Storm Runoff Control by Permeable Combined Infiltration Facilities for Controlling Storm Runoff, 5th International Conference on Urban Storm Drainage, pp.789-794, 1990.
- 11) 和田安彦, 三浦浩之, 松本良博: 複数の雨水浸透型施設による雨水流出抑制効果のシミュレーション予測とその評価, 下水道協会誌, Vol.28, No.330, pp.25-35, 1991.8.
- 12) 和田安彦, 三浦浩之: 浸透性雨水管による雨水流出抑制と浸透能の評価, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, pp.164-165, 1988.10.
- 13) 和田安彦, 三浦浩之: 広域雨水流出制御システムによる雨水流出抑制の効果とその評価, 第25回下水道研究発表会講演集, pp.680-682, 1988.
- 14) 和田安彦, 三浦浩之: 広域雨水制御システムによる雨水流出抑制効果のシミュレーション解析, 平成元年度土木学会関西支部年次学術講演会講演集, 1989.
- 15) 和田安彦, 三浦浩之: 広域雨水制御システムによる雨天時流出負荷削減効果のシミュレーション解析, 土木学会第44回年次学術講演会概要集, pp.904-905, 1989.
- 16) Road Research Laboratory: A Guide for Engineers to the Design of Storm Sewer Systems, Road Note No.35, 1963.
- 17) Transport and Road research Laboratory: A Guide for Engineers to the Design of Storm Sewer Systems, Road Note No.35, 2nd Ed.
- 18) 山口高志, 松原重昭, 山守隆: 都市における降雨流出調査, 第2報, 土木技術資料, 14-11, 1972.
- 19) 山口高志, 松原重昭, 山守隆: 都市における降雨流出調査, 第3報, 土木技術資料, 15-17, 1973.

(1994.9.13 受付)

EVALUATION OF AN EFFECT OF A POROUS ASPHALT PAVEMENT TO ADD AN INFILTRATION PIPE ON RUNOFF CONTROL

Yasuhiko WADA and Hiroyuki MIURA

We examined the possibility of improvement in a porous asphalt pavement for runoff control by the installation of a infiltration pipe under the pavement. From the result of many infiltration experiments at our experimental rainfall infiltration facilities, it made clear that the infiltration rate through the porous asphalt pavement is influenced by the volume of pore and permeability of the pavement and if storm water puddled on the surface of the pavement then rainfall infiltration becomes fast. And the construction of the infiltration pipe under the porous asphalt pavement will improve the final infiltration rate of the infiltration pavement about 5mm/hr. Furthermore, we build up a model which can simulate rainfall infiltration and runoff at the infiltration pavement with the infiltration pipe based on infiltration process in the pavement and infiltration pipe. By this model, we prove that the construction of the infiltration pavements with infiltration pipes is one of effective storm runoff control facilities in urban area.