

都市河川流域の表層浸透特性

Surface Infiltration Characteristics of Urban Catchment Area

芝浦工業大学土木工学科	守田 優 M. Morita
東京都立大学土木工学科	安藤義久 Y. Ando
東京都土木技術研究所	和泉 清 K. Izumi

1. はじめに

都市河川流域で対象となる浸透現象は、大きく二つに分けることができる。ひとつは、降雨が地面から直接侵入していく表層の浸透であり、いまひとつは、最近、設置が進められている雨水浸透施設のように、地中の浸透管等からの雨水の直接の浸透である。本研究では、上述の浸透現象のうち、前者の表層浸透について報告する。この表層浸透特性は、総合治水対策における貯留浸透施設の設計や都市河川の流出解析にとって不可欠の知識である。都市河川流域のこのような浸透特性を調べるためには、土地利用など流域の表層の条件を変えた浸透実験を行い、その浸透能を実測することが必要である。そこで、この数年、人工降雨による散水型浸透実験や湛水状態での冠水型浸透実験を、多摩ニュータウン地区をはじめ都内数カ所で実施してきた。本研究は、これらの実験結果を整理し、さらにデータの解釈や適用性について検討したものである。

2. 散水型浸透実験

降雨が地表からどれくらい浸透するかを見るのに最も適した方法は、対象とする地点において人工降雨を発生させ、そのときの浸透量を測定することである。そのためには、実際の降雨に近い状態を設定できる散水実験装置を新たに開発する必要がある。その場合、都市流域の浸透特性を考慮し、次のような条件を満たすものでなければならない。まず第一に、都市流域の浸透域のもつ浸透能が概して小さいことから、低降雨強度10~20mm/hr が安定的に操作できること、第二に、中央集中型などの計画降雨による応答が実験できるように、10~20分の時間間隔で降雨強度を時間遅れなしに変えられることである。そこで筆者らは、雨水供給量ではなく、パイプ内の水圧によって降雨強度を調節する新たな散水実験装置を開発した。この散水実験装置を用いた野外実験については、すでにその一部を報告している^{1) 2)}が、ここであらためてこの散水型浸透実験による浸透能測定結果を報告する。

(1) 散水型浸透実験装置の説明

散水実験装置の全体を図-1に示した。この散水実験装置は、雨水供給部、降雨発生部、降雨強度調節部、雨水浸透部、計測記録部からなる。これらの詳細についてはすでに報告している¹⁾。

(2) 実験内容

散水型浸透実験は、都内の善福寺川流域に位置する善福寺川公園内の4地点と大栗川・乞田川流域内の多摩ニュータウン地区の5地点で実施した。実験地点の土地利用は表-1に示した。また、散水の具体的な内容は以下のとおりである。

① 一定強度降雨 降雨強度を、10mm/hr, 30mm/hr, 50mm/hr, 75mm/hr, 100mm/hr の5段階とし、各降雨強度毎に流出量を測定し、それを後述する貯留量の変化で補正して浸透強度を算出した。一定降雨の継続時間は、原則として60分である。ただし、降雨強度が低い場合、定常状態に達するまでに時間を要するため、散水時間を120分とした。この一定強度の散水実験で定常状態の浸透強度を求め、それを表層終期浸透能とした。なお、この実験では、散水する地面にスケールを立てて湛水深の変化を測った。また、降雨終了後の残流分の時間変化も実測した。そして、すでに水準測量で調べた実験区画の地表の凹凸と、このデータと湛水深、および残流分の実測値から、貯留量の変化を計算した。

② 中央集中型降雨 実際の降雨に近い状態で散水することを目的に、中央集中型の降雨波形で散水強度

を変え、降雨強度が変動する状態での表層浸透強度を調べた。この実験は、多摩ニュータウン地区の5地点で実施し、降雨強度を30mm/hr ~ 100mm/hr の範囲で20分毎に変化させた。

(3) 実験結果 (その1)

以上の実験方法により求めた各対象地点の表層終期浸透能について実験結果を述べる。

① 一定強度降雨 一定降雨強度の条件における実験地点の終期浸透能の平均値は表-1のとおりである。また、各降雨強度と終期浸透能の関係を図-2に示した。この図-2の斜めの点線は、降雨強度と浸透強度が等しい状態に相当し、降雨強度がその地点の終期浸透能より小さいとき、この点線上にプロットされる。図中のこの斜線上の点は、終期浸透能ではなく、単なる浸透強度を表わす。一方、降雨強度が終期浸透能より大きい条件では、図-2から明らかなように、降雨強度が変化しても終期浸透能はほぼ一定である。ただし、これは、比較的低い浸透能をもつ土地利用についてであり、林地の実験結果に関しては後で述べる。なお、図-2の中で、善福寺川公園の草地A、草地Bの75mm/hr、100mm/hrの浸透能を()で示しているが、これらの値は、30mm/hr、50mm/hrの浸透能よりも小さくなっている。この原因として、前者の実験は、後者の実験の数日後に実施しており、その間、実験区画の表面が荒らされ、踏み固められたことが考えられる。これから、表層のわずかな変化が浸透能に及ぼす影響の大きさについて確認することができる。

ここで、林地の浸透能について述べる。図-2の降雨強度と終期浸透能の関係をみると、30mm/hr、50mm/hrの降雨強度のとき、浸透強度は、点線上にあり、降雨強度と等しい値を示している。しかし、75mm/hrと100mm/hrのときは、降雨強度の増加とともに、終期浸透能も大きくなっている。この実験結果を、すでに述べた裸地や造成地の結果と対応させながら検討すると次のように言える。すなわち、終期浸透能は、裸地や造成地などと同様降雨強度の増加と無関係に一定値をとると考えられるが、林地のように終期浸透能そのものが大きい場合、その一定の終期浸透能に達する前に、その遷移段階として、降雨強度の増加とともに浸透強度が大きくなる中間段階が存在する。このことから、75 mm/hr と 100mm/hr のときのそれは、最大の終期浸透能に達するまでの中間段階と考えることができる。一方、林地以外の土地利用において、このような傾向が見られないのは、終期浸透能そのものが低いため、林地の場合の最大浸透強度へ至る中間段階が顕著に現れないためと判断できる。

② 中央集中型降雨 中央集中型降雨による浸透強度の変化を、多摩ニュータウンの5地点で測定した。このうち、草地と林地の実験結果を図-3に示した。この図-3では2~3分単位の測定値を図示している。浸透強度は降雨強度とともに鋭く変化しているように見えるが、これは貯留量の増減によるみかけの浸透強度であり、各降雨強度の後半10分間の平均浸透強度で見ると、草地の場合、初期の損失から短時間のうちに定常状態に達し、以後、降雨強度が変化しても、浸透強度はほぼ一定値を示す。この傾向は、一定降雨強度の実験からも推察できることであり、他の裸地、造成地、盛土でも同様である。一方、林地の場合は、最初の1時間、降雨はほとんどそのまま浸透しており、降雨強度80mm/hr から、ゆるやかに浸透強度が低下し、後半の45mm/hr で再び、降雨強度と浸透強度が等しくなっている。

この林地の実験結果について注意すべき点は、後半の浸透強度が、50 mm/hr 弱と①の一定降雨強度での終期浸透能より小さくなっていることである。前半の浸透強度最大値は、65 mm/hr 前後であり、①の実験結果とはほぼ等しい値が得られている。この原因を検討するため、現場の土層を調べたところ、地表より約50cm下に細粒碎石の層があり、その下は難透水性の粘土層が見い出された。おそらく3時間に及ぶ散水により、この粘土層上に雨水が貯留され、このことが表層の浸透強度を低下させたものと推察される。

(4) 実験結果 (その2)

散水型浸透実験では、土地利用別、降雨強度別の終期浸透能を求めると同時に、浸透強度の時間変化についても検討した。

ここで、本実験のように雨水の到達時間を無視できる小区画においては、次の短期水収支式が成立する。

$$r = i + r_e, \quad r_e = \Delta S + q_s, \quad q_s = K \cdot S^M, \quad S = \sum \Delta S \quad \dots\dots\dots (1)$$

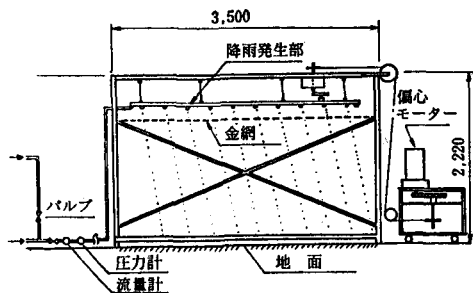


図-1 散水型浸透実験装置

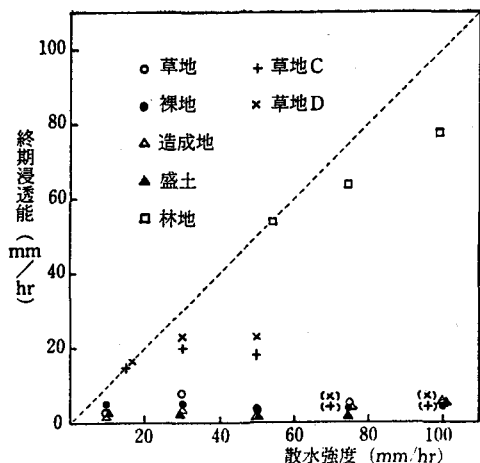


図-2 降雨強度と終期浸透能の関係

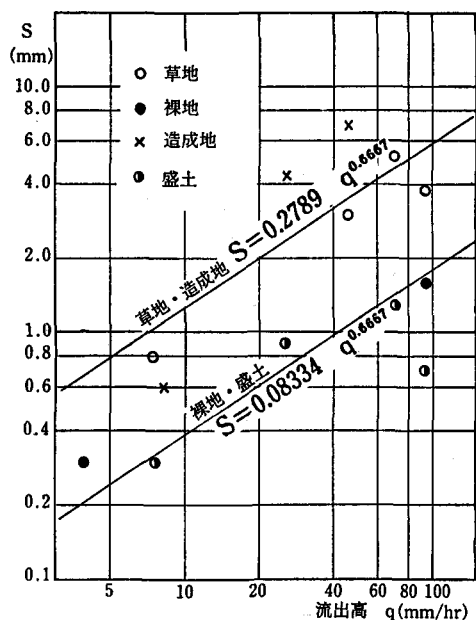


図-5 S~q 特性図

表-1 散水実験による土地利用別終期浸透能

実験場所	土地利用	終期浸透能(mm/hr)
善福寺公園	裸地A	3~8
	裸地B	2~6
	草地C	18~20
	草地D	22~23
多摩ニュータウン	裸地	4~6
	草地*)	3~7
	造成地	2~5
	盛土	1~3
	林地	63~65

*) 盛土上の草地

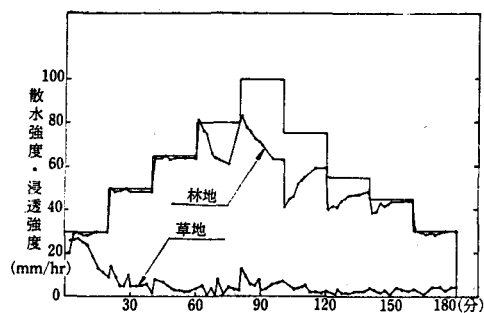


図-3 中央集中型降雨による浸透強度の変化

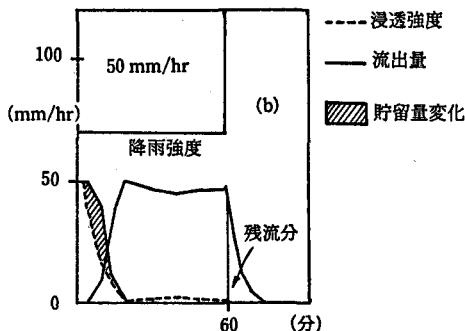
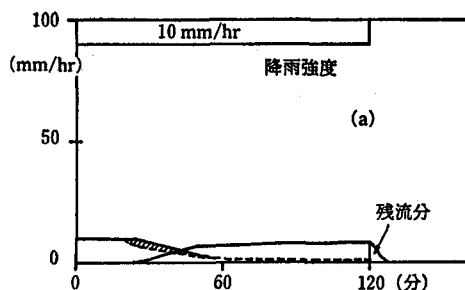


図-4 浸透・貯留・流出の関係

ここに、 r ：降雨強度、 i ：浸透強度、 r_e ：降雨余剰、 ΔS ：地表貯留量変化、 q_s ：地表流出、 S ：地表貯留量、 K 、 M ：定数である。

すでに(2)で述べたように、多摩ニュータウンにおける5地点の一定降雨強度の散水実験においては、湛水深の変化 ΔS と残流分 S を実測している。これから、式(1)の水収支式による解析が可能となる。

そこで、式(1)にもとづき、一定降雨強度の各ケースの降雨強度、浸透強度、流出量、そして貯留量の関係を求めた。このうち、代表例として造成地の10mm/hrと50mm/hrの解析結果を図-4(a),(b)に示した。図中の斜線の部分の面積は貯留量変化 ΔS の合計であり、貯留高の総量 S に相当する。図-4(a),(b)を見ると、時間の経過とともに、浸透強度は、初期値から漸次低減し、やがて一定の浸透強度、すなわち終期浸透能に達する。

ところで、式(1)の M の値は、図-5に示したように、 $M=3/2$ としている。このような表面の流出では、マニングの式が適用されることが多く、この場合、式(1)の M の値は $M=5/3$ となるが、実際に、実験結果をプロットしてみると、図-5のように、 $M=3/2$ とした方が適合性の良いことがわかった。

3. 冠水型浸透実験

2.で述べた散水型浸透実験は、人工降雨という実際の降雨を模擬した浸透実験であり、そこで得られた浸透能の実測値は、現実の表層浸透能にかなり近い値であると言える。ただ、この実験装置は、装置自体の規模が大きいこと、現場での組立てに手数を要すること、実験に使用する水量が多いことなどのため、簡便性に欠けるうらみがある。そこで、現場において比較的簡単に浸透能を測定する方法として、二重円筒浸透計を用いた冠水型浸透実験が広く採用されている^{2) 3)}。すでに筆者らはこの冠水型浸透実験を、多摩ニュータウン地区や善福寺川公園で実施してきた。この浸透実験の方法についてはすでに報告している³⁾が、ここで、その実験結果について整理し、その解釈や適用性について検討する。

(1) 実験内容

この冠水型浸透実験は、二つの部分からなる。ひとつは、土地利用別表層浸透能を求める実験、いまひとつは、小区画において、冠水型浸透実験の測定値を、そのバラツキや、冠水深と終期浸透能の関係について検討し、さらに散水型浸透実験との比較も試みたものである。

① 土地利用別表層浸透能の測定

この実験の対象地域は、代表的な都市流域のひとつである多摩川水系乞田川流域の多摩ニュータウン地区である。ここでは、2. (2)で述べたように、散水型浸透実験も行っている。この多摩ニュータウン内において、各土地利用ごとに7～9地点を選定し、冠水型浸透計による表層浸透能の実験を行った。土地利用の分類、および各地点数を表-2に示した。実験地点数は、合計55地点であり、偏りのないように選定した。

② 冠水型浸透実験の検討

この実験は、都立善福寺川公園内の4地点(裸地A・裸地B・草地C・草地D)で実施した。この4地点は、散水型浸透実験と比較するため、2. (2)の4地点と同一の場所を選んだ。当初、各地点(3.0 m×3.0 m区画)において、冠水深を5.0 cm、10.0cm、15.0cm、20.0cmの4通りとし、A、B、C、Dの4地点で、各々3箇所、合計48回の現地実験を行う予定であった。しかし、後述するとおり、冠水深5.0 cm、10.0 cm、15.0cmについて上記の条件で実験を行ったところ、3.0m×3.0 mの小区画内においても、箇所の違いによるバラツキが大きいと、冠水深と浸透能の関係を明瞭に求めることができなかった。そこで、同一地点、同一箇所において冠水深を段階的に各1時間変化させて実験を行う方法をとった。また、冠水深を15.0cmで止め、その代りに実際の降雨状態に近づけるという意味で、できるだけ小さな冠水深(3 cm)を下限值とした。図-6には、裸地A、裸地B、草地C、草地Dの小区画(9 m²)と、区画内の実験位置および実験条件(冠水深)を示した。

(2) 実験結果(その1)

まず、実験内容①で述べた土地利用別表層浸透能の測定結果について述べる。表-2に多摩ニュータウン地区で実施した冠水型浸透実験の結果を土地利用別に示した。測定時間は1時間であるが、実験開始後10~40分で一定値に漸近しており、本実験では、40分以降の5回の測定値の平均値を終期浸透能値とした。なお、冠水深はいずれも10cmである。

ところで、この表-2から明らかなように、浸透能測定値のバラツキは大きく、同じ土地利用であっても、終期浸透能にかなりの幅がある。本実験では、多摩ニュータウン地区において、広範囲に測定地点を選んでいるが、そのため、このような測定値のバラツキが生じているのか、あるいは、もっと小さな範囲に限定して測定すれば、このバラツキが減少するのかについては、次の(3)であらためて検討する。

多摩ニュータウン地区では、すでに述べたように、土地利用別に散水型浸透実験も実施している。表-2にはその結果も同時に記しているが、冠水型の測定値は、散水型のそれより大きめの値であり、それは終期浸透能の大きい林地において特に著しい。しかし、裸地、造成地、公園草地、林地と並べたとき、冠水型による終期浸透能は、散水型とはほぼ同じ傾向を示している。

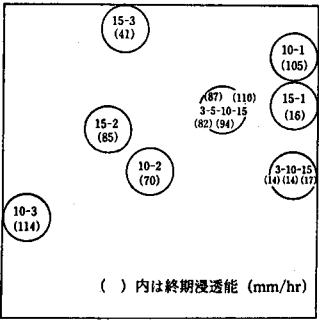
また、この冠水型浸透実験では、測定地点の表土についても調べ、土地利用別の終期浸透能を、測定値のバラツキも含め、表土との関連で検討してみたが、特に顕著な傾向は認められなかった。ただ、同じ土地利用であっても、締め固めの影響は大きく、表-2の芝生の場合、人の通り道に近い場所では、4 mm/hr という低い浸透能が測定された。

表-2 土地利用と終期浸透能 (多摩N. T.)

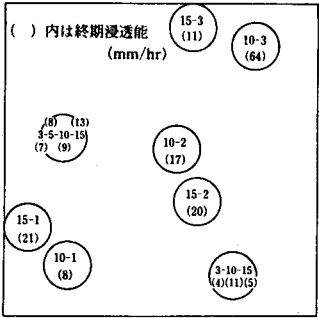
土地利用	地点数	fcの範囲	平均	散水実験結果
畑	9地点	130~1430	677	—
林	7地点	60~1400	736	63~65
道路法面	8地点	14~760	327	—
芝生	7地点	4~210	64	—
公園草地	7地点	5~70	24	3~7
造成地	8地点	2~50	15	2~5
運動場	9地点	3~40	18	4~6

表-3 土地利用と終期浸透能 (善福寺川公園)

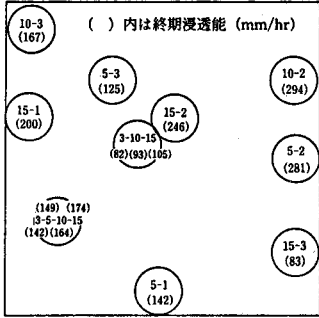
地点	終期浸透能 全平均	終期浸透能 冠水深10cm	散水型浸透 実験結果
裸地A	データ数13 65.2	データ数5 79.6	3~8
裸地B	データ数13 15.3	データ数5 21.8	2~6
草地C	データ数18 161.9	データ数6 166.5	18~20
草地D	データ数19 293.4	データ数7 355.1	22~23



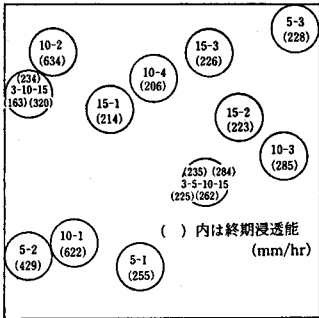
(a) 裸地A



(b) 裸地B



(c) 草地C



(d) 草地D

図-6 冠水型浸透実験結果

(3) 実験結果 (その2)

この実験は、土地利用を裸地と草地に限定し、4地点について、9 m²という狭い区画で冠水型浸透実験そのものを検討したものである。実験内容の②で述べた4地点の測定結果を、位置、冠水深、終期浸透能、そして測定値のバラツキがわかるように示したのが、図-6の(a), (b), (c), (d)である。この図と関連して、実験を行った4地点の終期浸透能の平均値(全平均と冠水深10cmのケースの平均)を表-3に示し、散水型浸透実験による同一地点の終期浸透能値も同時に併記した。

まず、図-6の(a), (b), (c), (d)を、各々詳細に見れば明らかなように、9 m²という狭い区画であっても、冠水型浸透実験による終期浸透能にかなりのバラツキがある。具体例をあげると、A地点の15-1と10-1、B地点の10-3と15-3、C地点の15-2と3-10-15、そしてD地点の5-1と5-2、10-1など、ほとんど接するような位置であるにもかかわらず、その測定結果にはオーダーが1桁違うものまで含めて、かなりの開きが見られる。この図に認められる測定値のバラツキと、表-2に示した多摩ニュータウンの測定結果のバラツキとを比較すると、冠水型浸透実験による測定値のバラツキというものが、実験箇所を狭い区画に限定しても小さくなることはなく、ほとんど変わらないことがわかる。このことは、同じ土地利用の小区画であっても、表層の浸透特性の不均一性が非常に大きいことを示している。

また、表-3を見ると、裸地Bで15.3mm/hrであるのに、同じ土地利用の裸地Aでは、65.2mm/hrという大きな値である。草地C、草地Dについても同様のことが言える。

以上のように、冠水型浸透実験の結果は、散水型浸透実験と異なり、同じ土地利用であっても、また、狭い区画においてもかなりのバラツキがある。このことは、流出という比較的広い単位で浸透を問題にすると、個々の冠水型浸透実験結果はあまり意味をもたないと思われる。

4. 浸透実験結果のまとめ

2および3で、散水型浸透実験と冠水型浸透実験の結果を述べてきたが、ここで、これらの実験結果を整理し、データの解釈や適用性について検討する。

(1) 散水実験における降雨強度と浸透強度の関係 散水実験では土地利用別に終期浸透能を求めた。降雨強度がこの終期浸透能よりも小さいとき、浸透強度は降雨強度に等しくなる。一方、降雨強度が終期浸透能より大きいときは、浸透強度は終期浸透能に等しく、降雨強度にかかわらず一定値を示す(図-2)。

(2) 散水実験における表面流出特性 散水実験データを短期水収支式で解析した結果、実験を行ったすべての土地利用において表面流出の特性を $q_s = K \cdot S^M$ ($M=3/2$)で近似することができた(図-5)。

(3) 冠水型浸透実験のデータの解釈 冠水型浸透実験による終期浸透能測定値は、土地利用ごとに一定の傾向を示すものの、同じ土地利用であっても、また小さな区画内においても、オーダーが異なるようなかなり大きなバラツキを示す。このことから、冠水型実験による浸透能測定値はその測定箇所の値を示すものと見なすべきであり、流出解析等に適用するときは何らかの変換を必要とする(図-6)。

(4) 冠水型浸透実験における冠水深と終期浸透能の関係 同じ箇所では冠水深を変えて終期浸透能を測定した結果、冠水深の増加により終期浸透能測定値も大きくなることが認められた。しかし、この冠水深の効果よりも上述の測定箇所の違いによる測定値のバラツキの方が重要であるように思える(図-6)。

(5) 散水型浸透実験と冠水型浸透実験の比較 同じ区画を対象に散水型と冠水型で終期浸透能を測定した結果、冠水型浸透実験による測定値が散水型によるそれを大きく上回り、しかもその測定値にかなりの幅があることがわかった(表-2、表-3)。

参考文献 1) 守田 優, 星 幸三, 屋井裕幸(1986): 都市流域を対象とした散水実験装置による表層浸透能の測定, 第41回土木学会年講概要集Ⅱ, 61~62. 2) 守田 優, 和泉 清(1986): 都市流域の表層浸透特性について, 同掲書, 63~64. 3) 安藤義久, 菅 明芳 他(1982): 関東ローム丘陵・台地における土地利用別の浸透能, 水利科学, 第26巻, 第5号, 1-23.