

定常降雨による湛水発生時間及び浸透能 に関する研究

A STUDY ON PONDING TIME AND INFILTRATION CAPACITY DURING STEADY RAINFALL

藤村和正¹・安藤義久²・山田富美夫³・山中理⁴

Kazumasa FUJIMURA, Yoshihisa ANDO, Fumio YAMADA and Osamu YAMANAKA

¹正会員 工博 明星大学講師 理工学部土木工学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)

²フェロー 工博 東京都立大学大学院教授 工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³株式会社東芝 電力・産業システム技術開発センター (〒183-8511 東京都府中市東芝町1)

⁴工博 株式会社東芝 電力・産業システム技術開発センター (〒183-8511 東京都府中市東芝町1)

Natural rainfall has the variation in rainfall intensity during its event. However, the various infiltration models are subjected to rainfall intensities that are higher than the infiltration capacity of the soil at a given location. Diskin and Nazimov (J. Hydrol., 172: 313-330, 1995) proposed recently the infiltration model which is a simple conceptual model and can express the relationship between rainfall intensity and ponding time. 'Ponding time' is the period from the beginning of rainfall until the occurrence of ponding. This model also can compute the variation in the infiltration capacity for constant or variable rainfall rates. A simple conceptual model is valuable for carrying out the stormwater runoff analysis.

The purpose of this paper is to investigate the ponding time and the infiltration capacity for field infiltration data measured using a rainfall simulator under steady rainfall and to evaluate the above infiltration model proposed by Diskin and Nazimov. Comparison of the model calculations with experimental data shows reasonably good for the relationship between rainfall intensity and ponding time and excellent agreement for the infiltration decay curves.

Key Words : *Ponding time, rainfall intensity, infiltration capacity, rainfall simulator,
stormwater runoff analysis*

1. はじめに

浸透現象は、土壌特性、土湿状態、先行降雨、さらには地面の踏み固め状態、水みちや草木の根の有無にも影響される複雑な系と言える。現地の浸透実験の研究¹⁾、²⁾などでは、同じ実験区画内における測定結果にバラツキが見られ、浸透能は表層土壌のわずかな変化にも影響されることが考えられている。このように浸透現象は複雑であるが水文学的に重要であり、今日まで活発な研究が行われ、Horton式やRichardsの浸透理論など多くの浸透モデル、浸透理論が提案されている。

多くの浸透モデルや浸透理論では、均一土壌で垂直一次元での浸透現象であることを条件としているが、このような条件の一つに、降雨強度が対象地点あるいは対象領域の浸透能を常に上回っている条件がある。つまり高い降雨強度での浸透現象を想定している。しかし、自然

界では降雨の開始から終了まで降雨強度が常に浸透能より大きいことはありえず、降雨強度は時々刻々変化している。そこで、1970年代、Smith³⁾やMein and Larson⁴⁾は実際の現象に近づけた考え方として、浸透現象を湛水発生前と発生後に区分し、Richardsの方程式を基礎に降雨強度を考慮した浸透能式を導いている。近年では、Diskin and Nazimov⁵⁾が降雨強度を考慮して浸透能および地下水涵養量を表した概念的な雨水浸透モデルを構築している。これらの浸透モデルは従来のモデルに比べ実際現象に対応できると言えるが、実際現象に対して十分な検討はされていない。従って、まずは現地浸透実験によりこれらの浸透モデル、浸透理論の信頼性を確認することが必要である。

本研究では、実際の降雨現象及び浸透現象をよく表現できる雨水浸透モデルを流出解析に適用することを念頭に置いている。そこで、降雨強度を考慮でき少ないパラメーターで雨水浸透過程を表し、比較的容易に流出解析

に適用できると考えられるDiskin and Nazimov⁵⁾の提案した雨水浸透モデル（以下Diskin-Nazimovモデルとする）を筆者等の行った散水浸透実験に対し、その適合性について検討することを本研究の目的とする。具体的には以下の2点である。

- (1)定常降雨による散水浸透実験の結果から、降雨強度と湛水発生時間との関係についてDiskin-Nazimovモデルの適合性を検討する。
- (2)定常降雨による散水浸透実験の結果から、湛水発生後の浸透能曲線についてDiskin-Nazimovモデルの適合性を検討する。

2. 雨水浸透モデルの概要

本研究では、少ないパラメーターで定常降雨時及び非定常降雨時の浸透現象を表現できるDiskin and Nazimovの提案した雨水浸透モデルを現地浸透実験に対して検討する。モデルの詳細な説明については原著論文^{5), 6)}に記されているので、ここでは、モデルの基本構造及び浸透能、湛水発生時間の関係式等についての概要を述べる。

(1) Diskin-Nazimovモデルの基本構造

本モデルの構造は、図-1に示される貯留タンク、フィードバック経路及び流入調節部から構成される。貯留タンクは表層土壌の水分保留状態を表す。タンクからの流出量は、表層から下層地下に浸透する雨水量、つまり地下水涵養量である。流入調節部では、実浸透度及び直接流出量を、次式の降雨強度と浸透能の関係から算定する。実浸透度とは土壌への実際の浸透量のことである。

$$\begin{aligned} &\text{if } R(t) \leq f(t) \text{ then} \\ &\quad q(t) = R(t) \text{ and } y(t) = 0 \quad (1) \\ &\text{if } R(t) > f(t) \text{ then} \\ &\quad q(t) = f(t) \text{ and } y(t) = R(t) - f(t) \quad (2) \end{aligned}$$

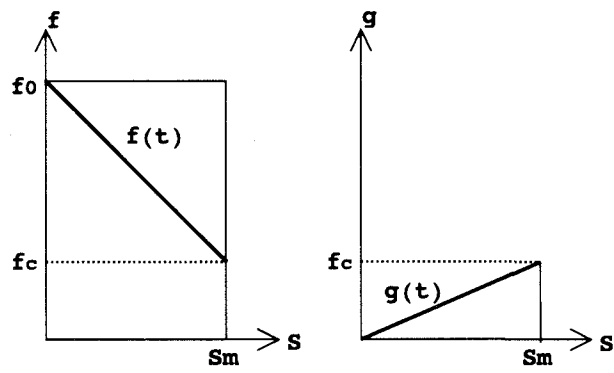


図-2 浸透能 f 及び地下水涵養量 g と表層水分保留量 s との関係図

ここに、 $f(t)$: 浸透能 (mm/h)、 $q(t)$: 実浸透度 (mm/h)、 $y(t)$: 直接流出量 (mm/h)、 $R(t)$: 降雨強度 (mm/h)、 t : 時間。

本モデルでは、表層水分保留量を表すタンク内の貯留量を変数とし、初期浸透能、終期浸透能及び表層水分保留量の最大値をパラメーターとして浸透能と地下水涵養量を算定する。つまり、表層土壌の水分保留量が増加するに従い浸透能は減少し、一方で、地下水涵養量が増加する関係を線形的に図-2のように表し、結局、図-2を表した次式で算定される。

$$q(t) = \frac{f_c}{S_m} S(t) \quad (3)$$

$$f(t) = f_0 - \frac{(f_0 - f_c)}{S_m} S(t) \quad (4)$$

ここに、 $g(t)$: 地下水涵養量、 $f(t)$: 浸透能、 f_0 : 初期浸透能、 f_c : 終期浸透能、 $S(t)$: 表層水分保留量、 S_m : 表層水分保留量の最大値。

また、タンク内の貯留状態 s は実浸透度 q と地下水涵養量 g を用いて次の微分方程式で表される。

$$\frac{dS(t)}{dt} = q(t) - g(t) \quad (0 \leq S(t) < S_m) \quad (5)$$

以上が雨水浸透モデルの基本構造である。

(2) 降雨強度による浸透現象の場合分け

降雨強度が一定であるときの浸透現象は、降雨強度の大きさにより図-3に示す3つの場合に分けられる。まず、第1として、降雨強度が初期浸透能よりも大きい $R_c = R_{c1}$ の場合である。このときは理論的には降雨開始と同時に湛水が発生する。多くの浸透能モデルではこの場合を降雨強度の条件として設定している。しかし、実際の降雨ではほとんど見られない浸透現象と言える。次に、第2として、降雨強度が初期浸透能と終期浸透能の間にある $R_c = R_{c2}$ の場合である。この場合は、降雨開始と同時に浸透能は減少し、浸透能の値が降雨強度と等し

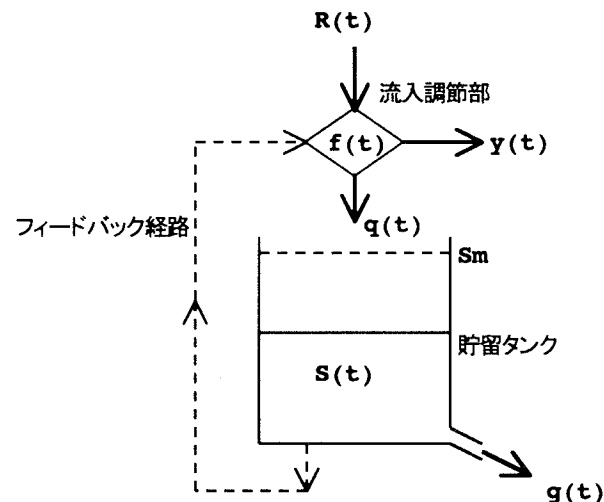


図-1 Diskin-Nazimovモデルの概要図

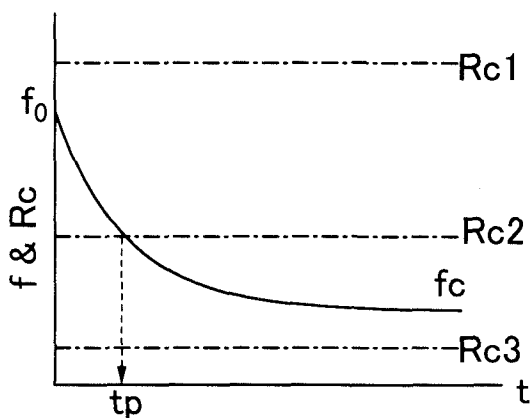


図-3 浸透能曲線、降雨強度と湛水発生の関係

くなった時に湛水が発生する。降雨開始から湛水発生までの降雨はすべて地中に浸透する。最後に第3として、降雨強度が終期浸透能より小さい $Rc=Rc3$ の場合である。この場合は、永久に湛水が発生することはない。

自然の降雨による浸透現象を簡略化して考えるならば、第1の場合よりもむしろ第2の場合に近い。従って、本研究でも降雨強度が初期浸透能と終期浸透能の間にあるこの場合について散水浸透実験に対するDiskin-Nazimovモデルの適合性を検討する。

(3) 湛水発生時間と湛水発生前の浸透能式

湛水発生前では、実浸透度 q は降雨強度 Rc に等しくなる。従って、(5)式は次式で表される。

$$\frac{dS(t)}{dt} = Rc - \frac{fc \cdot S(t)}{Sm} \quad (0 \leq S(t) < Sm) \quad (6)$$

両辺をそれぞれ dS 及び dt で表し、 $t=0$ で $S=0$ を初期条件として積分すると、時間 t あるいは表層水分保留量 S についての関数式が求められる。

$$t = -\frac{Sm}{fc} \cdot \ln \left(1 - \frac{fc \cdot S(t)}{Rc \cdot Sm} \right) \quad (7)$$

$$S(t) = \frac{Rc \cdot Sm}{fc} \left(1 - e^{-\frac{fc \cdot t}{Sm}} \right) \quad (8)$$

従って、湛水発生時間 tp において浸透能 f が降雨強度 Rc に等しいことを条件として(4)を変形し、(7)式に代入すると、次式の湛水発生時間の関数式が得られる。

$$tp = -\frac{Sm}{fc} \ln \left(\frac{1 - \frac{fc}{f_0}}{1 - \frac{fc}{Rc}} \right) \quad (9)$$

また、(8)式を(4)式に代入すると次式の湛水発生前の浸透能式が得られる。

$$f(t) = f_0 - Rc \cdot \left(\frac{f_0}{fc} - 1 \right) \left(1 - e^{-\frac{fc \cdot t}{Sm}} \right) \quad (10)$$

(4) 湛水発生後の浸透能式

湛水発生以後では、浸透能 f は降雨強度 Rc より大きく、実浸透度 q は浸透能 f となる。従って、(5)式は次式で表される。

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{f_0}{Sm} (Sm - S(t)) \quad (11)$$

両辺をそれぞれ dS 及び dt に関する項でまとめ、 $t=0$ のとき $S=0$ を条件として積分し、整理すると次式となる。

$$\frac{S(t)}{Sm} = 1 - e^{-\frac{f_0}{Sm} t} \quad (12)$$

(12)式を(3)式、(4)式に代入すると、次に示す湛水発生後の地下水涵養量及び浸透能の関数式が得られる。

$$q(t) = fc \cdot \left(1 - e^{-\frac{f_0}{Sm} t} \right) \quad (13)$$

$$f(t) = fc + (f_0 - fc) \cdot e^{-\frac{f_0}{Sm} t} \quad (14)$$

ここで(14)式に着目する。 $\alpha = f_0/Sm$ で表せば

$$f(t) = fc + (f_0 - fc) \cdot e^{-\alpha t} \quad (15)$$

となり、結果的にHorton式と同じ式になる。つまり、Horton式のパラメーター α を初期浸透能と表層水分保留量の最大値で表した浸透能式である。

3. 散水浸透実験

本研究では、東京都立大学構内の1実験区画3地点で行われた散水浸透実験及び洪水流出解析に適用する終期浸透能の値を得るために行われた4流域12実験区画37地点の散水浸透実験を対象とする。散水浸透実験はすべて定常降雨で行っている。ここでは、散水浸透実験の測定方法と実験対象地の概要について述べる。

(1) 散水浸透実験方法

散水浸透実験に用いる散水型浸透計の全体像を図-4に示す。この浸透計の上部には70cm×80cmに配置された140個のノズルがあり(図-5左)、最上部に取り付けられたモーターでノズル全体を水平に振動させながら散水し、降雨が均一に地面に落ちるように工夫されており、散水面積は1m²である。また、ポンプと給水槽(図-5右)によりノズルに水を供給でき、約30~180mm/hの範囲で安定的に降雨強度を操作できる。浸透部は、降雨発生部の真下の地表面であり、一側面に穴の空いた50cm×50cmの角枠を打ち込み、角枠からの流出量を細口瓶に受

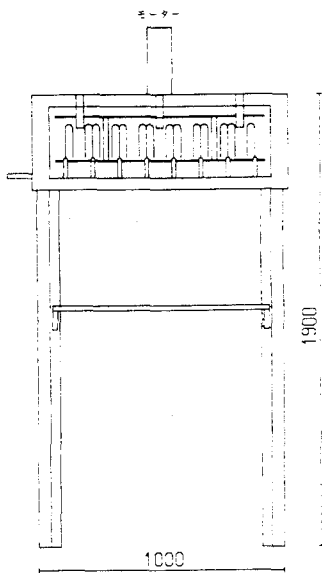


図-4 散水型浸透計の全体図

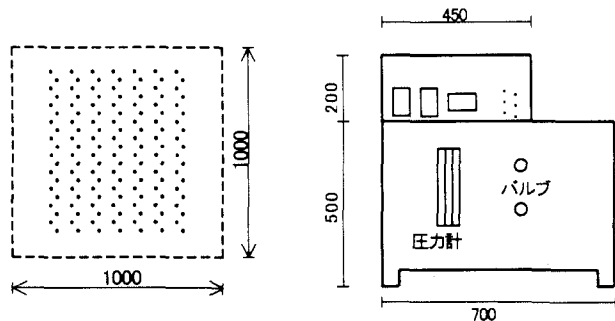


図-5 ノズル配置図およびポンプと給水槽

けて5分毎に測定する。そして、散水量から流出量を差し引いて浸透能を算定する。

(2) 散水浸透実験対象地

散水浸透実験の対象地の概要を表-1に示す。谷端川流域は武蔵野台地の東部の豊島台上に位置する関東ロームに覆われた流域であり、1988年に散水浸透実験を行っている。新小松川流域は東京低地の沖積地の流域であり、1989年に散水浸透実験を行っている。乞田川流域は多摩丘陵に位置するの関東ロームに覆われた流域であり、1990年に浸透能測定を行っている。東川流域は狭山丘陵に位置する関東ロームに覆われた流域であり、1996年に散水浸透実験を行っている。さらに、1998年、東京都立大学構内の雑草伐採裸地において散水浸透実験を行った。本研究では、これらすべての散水浸透実験により得られる降雨強度、湛水発生時間及び浸透能曲線を対象とする。

4. 雨水浸透解析

(1) 湛水発生時間と降雨強度の関係

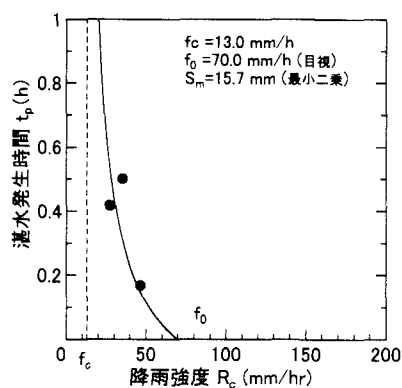
湛水発生時間と降雨強度の関係式である(9)式には、終期浸透能 f_c 、初期浸透能 f_0 そして表層水分保留量の

表-1 散水浸透実験対象地の概要

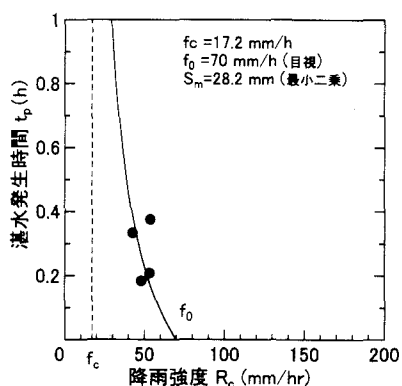
実験対象地	土地利用	地 質	測定地点数
谷端川流域	運動場	砂	3
	寺社の裸地	ローム	3
	民家の間地	ローム	3
新小松川流域	運動場	砂	3
	寺社の裸地	沖積土	3
	民家の間地	沖積土	3
乞田川流域	住棟間芝地	ローム	3
	運動場	砂	3
	造成地	土丹	3
東川流域	公園	砂	3
	民家の間地	ローム	4
	茶畑	ローム	3
都立大学構内	雑草伐採裸地	ローム	3

最大値 S_m の3つのパラメーターが含まれている。終期浸透能 f_c と表層水分保留量の最大値 S_m は土壌の特性を表すパラメーターである。なお、表層水分保留量 s の初期値は、実際には浸透能、土壌水分等の長期的変化を考慮して設定すべきであるが、本研究では対象期間を散水時間とした仮定の値として $s=0$ とした。この表層水分保留量の初期値の設定に関しては、今後の課題として、土壌水分等の測定を行い、また、モデルの改良により検討して行く予定である。(9)式による湛水発生時間の解析にはこれらの3つのパラメーターを決定する必要がある。まず、終期浸透能 f_c の設定については、浸透能実測値の中央値が平均値よりも異常値に影響されにくい⁷⁾とされているので、同一実験区画内の測定値のうち中央値を採用する。次に、初期浸透能 f_0 の決定については、今のところ有効な手法がない。(9)式を最小二乗近似して表層水分保留量の最大値 S_m とともに設定することも可能であるが、この場合、 f_0 値は極めて大きな適切でない値となる可能性がある。従って、本研究では、散水浸透実験の測定結果の湛水発生時間-降雨強度の関係図から目視によって推定することとする。表層水分保留量の最大値 S_m の決定は、上記の2つのパラメーターが決定されたことから、(9)式を最小二乗近似して求める。

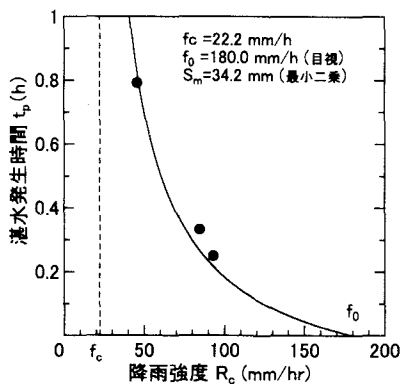
13実験区画における散水浸透実験の結果から、各実験区画の湛水発生時間と降雨強度の関係図が得られた。しかし、同一実験区画内の測定で散水強度が近接している場合が多いため、13実験区画の湛水発生時間-降雨強度の関係図の中から、降雨強度の値が分散し、湛水発生時間と降雨強度の関係が比較的分かりやすい図-6の(a)から(d)に示す4図について検討する。図中プロットされた●点が同じ測定日に同じ実験区画内で測定位置を変えて行われた測定の実測値である。実線が湛水発生時間と降雨強度の関係式(9)式による解析値である。図-6の(a)、(b)の東川流域における公園と民家の間地については、降雨強度の値がほとんど同じでも湛水発生時間に差異が見られる。しかし、(9)式の解析曲線は実測値の湛水発生時間と降雨強度の関係を概ね示していると言える。図-6(c)の乞田川流域の住棟間芝地の場合では、



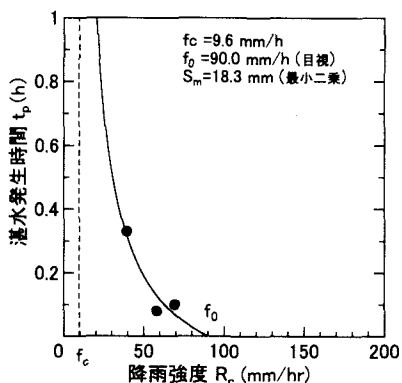
(a) 東川流域 (公園)



(b) 東川流域 (民家の間地)



(c) 乞田川流域 (住棟間芝地)

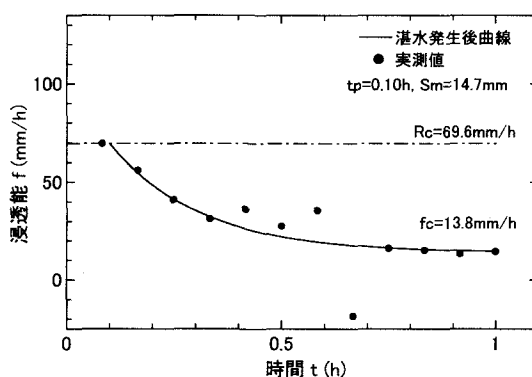


(d) 都立大学構内 (雑草伐採裸地)

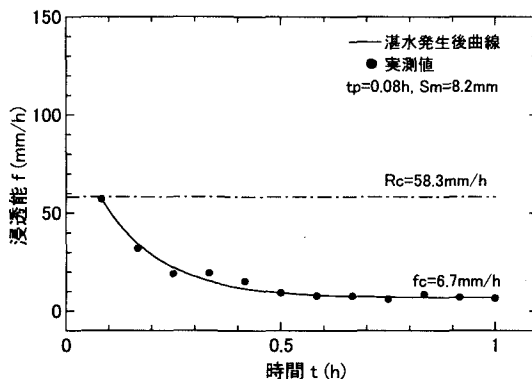
降雨強度が増大するにつれて湛水発生時間の減少が顕著であり、解析曲線は実測値によく適合している。図-6 (d)の都立大学構内の場合では、実測値にバラツキがあるものの(9)式の解析曲線は実測値にほぼ適合している。以上より、湛水発生時間と降雨強度の関係式(9)式は実測値に概ね適合していると言える。

(2) 湛水発生後の浸透能曲線

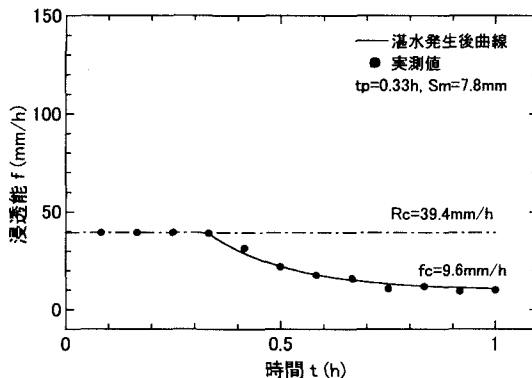
散水浸透実験を行った13実験区画40地点の測定地点で得られた浸透能曲線の実測値に対して(14)式で表される湛水発生後の浸透能曲線の適合性について検討する。湛水発生後の浸透能式は初期浸透能 f_0 を降雨強度 R_c として表されるので(14)式は次式に変形できる。



(a) 散水浸透実験 A-1



(b) 散水浸透実験 A-2



(c) 散水浸透実験 A-3

図-6 湛水発生時間と降雨強度の関係(東川流域)

図-7 都立大学構内、雑草伐採裸地の浸透能曲線

$$f(t) = f_c + (R_c - f_c) \cdot e^{-\frac{R_c}{S_m}(t-t_p)} \quad (t \geq t_p) \quad (16)$$

(16)式において未知のパラメーターは表層水分保留量の最大値 S_m のみであり、この値は(16)式の浸透能曲線を実測値に対して最小二乗近似して得られる。

散水実験対象地40地点の浸透能曲線は、実測値に対する(16)式の浸透能式の適合性が非常に良好であった。例として、都立大学構内の雑草伐採裸地について図-7(a)から(c)に示す。図-7(a)は、実測値が途中バラツキを見せているが、これは角枠からの流出水の日詰まりによる測定誤差であると考えられる。浸透能曲線の他の部分は実測値に浸透能式が非常に良く適合している。図-7(b)及び(c)についても、両図とも浸透能式の実測値に対する適合性は非常に良い。Horton式は実測値への適合性が良いとされる浸透能式であり、(14)式に示されるDiskin-Nazimovモデルによる湛水発生後の浸透能式は結果的にHorton式と同形のものであり、実測値への適合性が良いことはある程度推測できる。しかし、Horton式におけるパラメーター α を(14)式は降雨強度 R_c と表層水分保留量の最大値 S_m という水文学量で具体的に表現していることの意義は大きく、かつ、実測値への適合性も良好であることからDiskin-Nazimovモデルの浸透能式の妥当性は示されていると言える。

表層水分保留量の最大値 S_m は実測の値ではなく最小二乗近似により得られた値であり、物理的に示された値ではない。しかし、各測定地点においてはそれぞれが最適な値と言える。この値の一つの評価方法として、将来、流出解析に適用することを考えて、全測定地点の S_m の値を土地利用毎に分類してみる。土地利用毎の S_m の値を図-8に示すが、各土地利用毎に S_m 値を分類してもその値は比較的広く分布している。しかし、運動場、公園、寺社の裸地や民家の間地など踏み固められやすい土地利用では約10mm以下であり、芝地、雑草伐採裸地や茶畑な

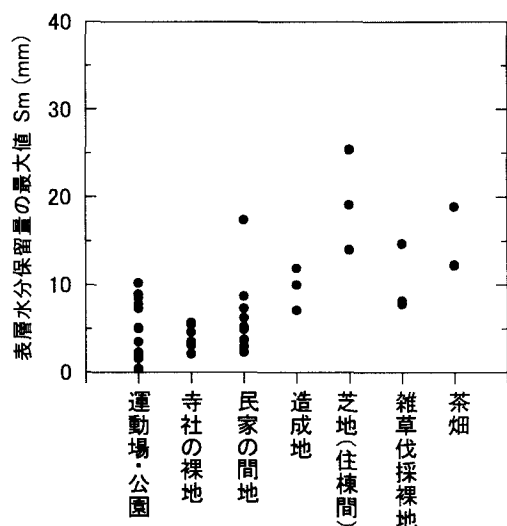


図-8 土地利用別の表層水分保留量の最大値 S_m の範囲

ど踏み固めが少ないと考えられる土地利用では約7mm～25mmであり前者に比べ大きな値を示す傾向が見られる。従って、表層水分保留量の最大値 S_m の値は土地利用毎に評価することが可能であると考えられる。

5. 結論

本研究では、降雨強度を考慮できる雨水浸透モデルであるDiskin-Nazimovモデルについて定常降雨による散水浸透実験の測定結果に対してモデルの適合性を検討した。その結果、得られた主な成果は次の通りである。

- (1) Diskin-Nazimovモデルの湛水発生時間と降雨強度の関係式は、散水浸透実験の実測値に概ね適合することが示された。
- (2) Diskin-Nazimovモデルの浸透能式は、散水浸透実験の各測定地点の浸透能曲線の実測値を良好に再現することが示された。

今後の課題として、非定常降雨の散水浸透実験や自然降雨により本モデルの適合性をさらに検討してゆくことが必要であると考えている。また、本モデル中のパラメーターについての評価検討も必要であると考えている。特に、初期浸透能の設定は目視により行っており、この値は上記(1)における本モデルの適合性が示されていることから同一測定日、同一実験区画の値として妥当な値と思われるが、今後、長期間の浸透能の変化を追跡して検討すべき問題であると認識している。

参考文献

- 1) 守田 優、安藤義久、和泉 清：都市河川流域の表層浸透特性、第32回水理講演会論文集、pp.59-64、1988。
- 2) 安藤義久：都市域の浸透能と地形・地質・土地利用との対応関係、水工学論文集、第35巻、pp.123-128、1991。
- 3) Smith, R. E.: The infiltration envelope: Results from a theoretical infiltrometer, *J. Hydrology*, Vol.17, pp.1-21, 1972。
- 4) Mein, R. G. and Larson, C. L.: Modelling infiltration during a steady rain, *Water Resources Res.*, Vol.9, No.2, pp.384-394, 1973。
- 5) Diskin, M. H. and N. Nazimov: Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process, *J. Hydrology*, Vol.172, pp.313-330, 1995。
- 6) Diskin, M. H. and N. Nazimov: Ponding time and infiltration capacity variation during steady rainfall, *J. Hydrology*, Vol.178, pp.369-380, 1996。
- 7) Ando, Y., Izumi, K., Morita, M. and Morita, H.: Urban runoff modeling with measured infiltration capacity, In: *Catchment runoff and rational formula*, ed. B. C. Yen, Water resources publications, Littleton, Colorado, USA, pp.145-154, 1991。

(1999.9.30受付)