

現地浸透実験に基づく土壌の飽和・不飽和特性の解析
Analysis of Saturated-Unsaturated Properties of the Soil
based on the Field Infiltration Experiment

九州大学工学部	神野 健二	Kenji	JINNO
九州大学工学部	初井 和朗	Kazuro	MOMII
九州大学大学院	児玉 晃	Akira	KODAMA
九州大学大学院	新保 弘	Hiroshi	SHINBO
福岡市下水道局	木下 雅常	Masatsune	KINOSHITA
福岡市下水道局	砥綿 淳一	Junichi	TOWATA
福岡市下水道局	篠田 輝義	Teruyoshi	SHINODA

Two methods for the estimation of saturated-unsaturated properties of soil are examined using the field infiltration experiment. The first method by Reynolds and Elrick(1985) is based on the analytical solution where the exponential function for the relative unsaturated hydraulic conductivity is assumed. The second method combines the numerical calculation of unsaturated flow and the optimization algorithm for the estimations of unknown parameters in the van Genuchten's hydraulic relations. It is shown that the unsaturated properties of the soil affect the infiltration rate of water from the drainage facilities. It is also shown that the method by Reynolds and Elrick is useful in the field experiment for the estimation of the saturated-unsaturated hydraulic conductivity. The relation between the suction pressure h and the relative hydraulic conductivity k_r is suitably expressed by $k_r = \exp(-\alpha |h|^2)$.

keywords: Infiltration facilities, saturated-unsaturated hydraulic properties, field experiment

1. はじめに

近年、都市域では舗装道路やコンクリートビル等による不浸透面積の増大のため、雨水の地下への浸透が著しく遮られ、降雨の直接流出が卓越し都市河川の氾濫頻度が顕著になること、一方では無降雨時における低水流量が減少し水質の悪化が生じることが指摘されている¹⁾。このような問題に対して、ピーク流量の下水道への負荷の軽減および降雨期における地下水涵養のために、浸透トレンチや浸透柵等の雨水浸透施設の設置が検討されている。雨水浸透施設の合理的な設計を行うためには、施設の設置に伴う雨水の土壌中への浸透過程を解明すること、ならびに、対象土壌の浸透能力の精度よい推定を行って浸透施設の効果を評価することが必要となつてこよう。

本研究では、福岡市下水道局²⁾が住宅地等への設置を検討している雨水浸透柵に対して、まず、土壌の飽和・不飽和特性が浸透流量に及ぼす効果について数値実験による検討を加え、次いで現地浸透実験で得た浸透流量の実測値に基づいて現地土壌の飽和及び不飽和の水理学的特性について考察を加えるものである。

2. 雨水浸透柵および実験地の土質特性

図-1には、本研究で用いた2種類の雨水浸透柵(Type a, b)を示している。本施設Type aは内径50cmのボラスコンクリート管を土中に埋設したものである。簡易施設Type bでは、側壁にスリットを設けた内径25cmの塩ビパイプを用いており、Type aに比べて簡易な構造となっている。なお、現地浸透実験における浸透柵の湛水深 H は、図に示すように、45cmと25cmに設定している。

図-2には、福岡市内2ヵ所の実験地(百道小学校と三宅小学校の校庭で、以下百道、三宅と記す)における

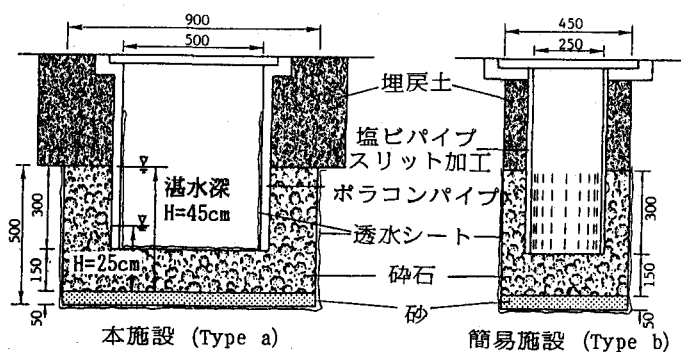


図-1 雨水浸透樹の概略(図中の寸法mm)

土質柱状図、浸透樹の埋設深度及び浸透実験直前の地下水位を示している。図中の*記号は浸透樹の低面が地下水面に達していることを示しており、以下でもこの記号を用いることにする。

土質特性に関して、三宅は百道に比べて粒径5mm以上の中礫を含む砂礫層であるが、粒径加積曲線から求めた有効径 d_{10} からいえば、三宅の d_{10} は0.02mm、百道の d_{10} は0.4mmであり、百道に比べ三宅の透水性は低く、従って、浸透樹からの浸透流量も小さくなるものと考えられる。

3. 不飽和特性が浸透流量に及ぼす効果について実験

ここでは、現地浸透実験の解析に先だて、土壌の不飽和特性が浸透流量に及ぼす効果を見るために、図-1に示した現地雨水浸透樹(Type b)を対象に、数値実験を行う。図-3に数値計算領域と差分格子配置を示している。座標系は F を原点として水平方向を r 軸、鉛直上向きを z 軸とする円筒座標系である。図の計算領域において ABCDE は浸透樹であり、EF は中心軸、FGI は地下水面、AHI は地表面である。境界条件は境界 BC, CD, DE を静水圧、AB, HG を不透水壁としている。この条件のもとで、不飽和浸透流の基礎式を、

差分陰解法により数値計算³⁾し、浸透樹からの浸透流量の算定を行っている。なお計算領域は Type b の半径 $a=12.5\text{cm}$ で、また時間 t 、浸透流量 q は飽和透水係数 k_0 と a で無次元化し、 $t^*=k_0 t/a$ 、 $q^*=q/(a^2 k_0)$ としている。数値計算は無次元時間 $t^*=0.001\sim 0.18$ の範囲で行った。なお本計算での湛水深は $H^*=H/a=2.0$ である。

次に数値計算で用いる土壌の不飽和特性は、van Genuchten⁴⁾ が提案した次式を用いることにする。

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / \{1 + (\alpha h)^n\}^m \quad (1)$$

$$k_r(h) = \{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\}^2 / [1 + (\alpha h)^n]^{m-2} \quad (2)$$

ここに、 θ : 体積含水率、 h : サクシオン、 k_r : 不飽和透水係数比、 θ_r : 残留体積含水率、 θ_s : 飽和体積含水率、 $m=1-1/n$ である。本数値実験での上式における各パラメータの値は、 $k_0=4.4 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ 、 $\theta_s=0.298$ 、 $\theta_r=0.0505$ 、 $\alpha^{-1}=61\text{cm}$ 、 $n=4.36$ に設定している。このパラメータ値で与えられる土壌は Mualem の土質カタログ⁵⁾ における No. 4108 の砂に相当している。

まず、不飽和パラメータ α の値が浸透流量の時間的変化に及ぼす効果について検討するために、 k_0 と n の値を固定し、 $\alpha^{-1}=125\text{cm}$ 、 61cm 、 42cm についての計算を行った。図-4に、3種類の α^{-1} に対する浸透流量の時間的変化を示す。図より、 α^{-1} が大きいほど浸透初期の浸透流量及び最終浸透流量は大きくなり、 $\alpha^{-1}=125\text{cm}$

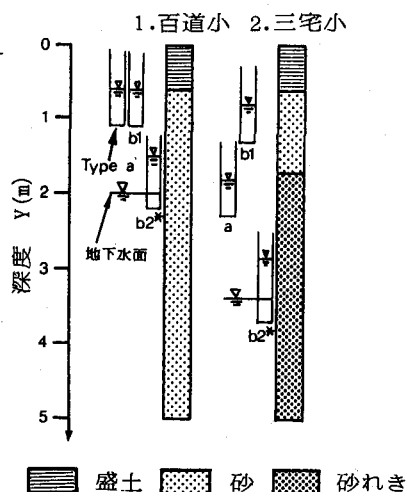


図-2 現地土質柱状図

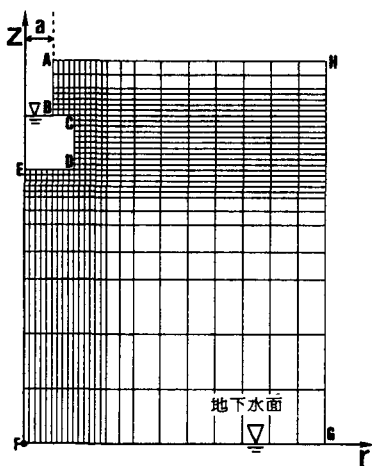


図-3 数値計算領域の概略図

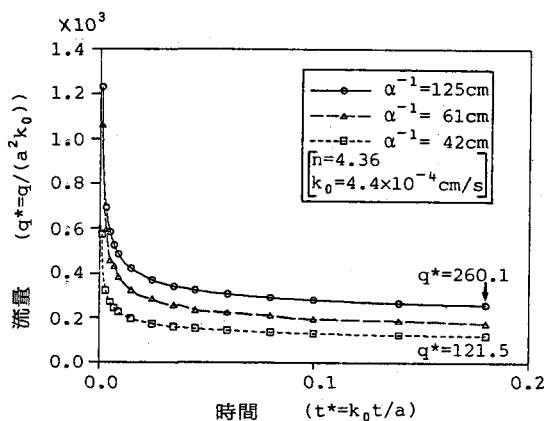


図-4 α^{-1} の変化による浸透流量の相違

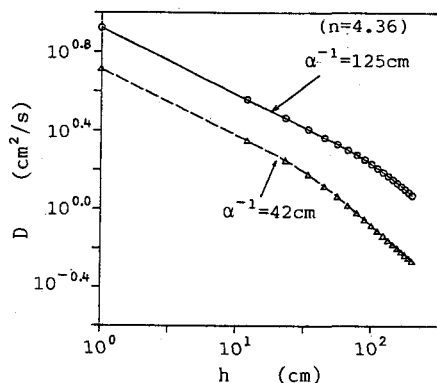


図-5 α^{-1} の変化による水分拡散係数の相違

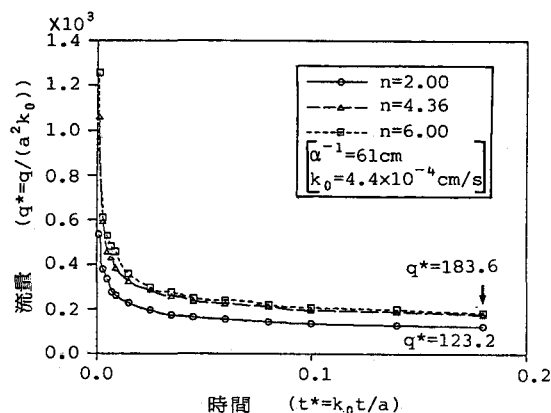


図-6 n の変化による浸透流量の相違

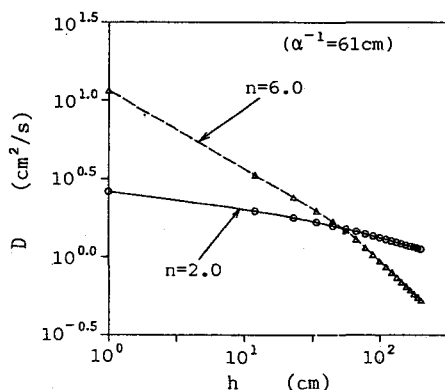


図-7 n の変化による水分拡散係数の相違

の最終浸透流量は $\alpha^{-1}=42\text{cm}$ に比べて約2倍となっている。これについて水分拡散係数 $D(h)$ により検討してみよう。図-5には $\alpha^{-1}=125\text{cm}$, 42cm の場合の $D(h)$ の分布を示している。水分拡散係数は、比水分容量を $C_w(h)=d\theta/dh$ 及び不飽和透水係数を $k_u(h)$ とすると、 $D(h)=k_u(h)/C_w(h)$ で与えられる。これより、 $D(h)$ が大きいほど土壌水分の貯留能力は小さく、水分の輸送が卓越することになる。このことから図に示すように $\alpha^{-1}=125\text{cm}$ の水分拡散係数の値のほうが $\alpha^{-1}=42\text{cm}$ より大きくなり、水分輸送の卓越する前者の方が浸透流量は大きくなると考えられる。

次に、 k_0 と α^{-1} を固定して、不飽和パラメータ n の効果について検討してみよう。図-6に3種類の n に対する浸透流量の相違を示す。図より、 $n=2.0$ に比べて、 $n=6.0$ の最終浸透流量は大きくなっている。これは、本数値計算の上部境界 AB で与えたサクションの値が $h=97.5\text{cm}$ であり、従って本数値計算で対象となるサクションの範囲は $h<97.5\text{cm}$ となることから、この範囲のサクションでは、図-7の水分拡散係数の分布に示すように、 $n=6.0$ の水分拡散係数の値が $n=2.0$ に比べて大きいためである。

以上のことから、土壌の不飽和特性は浸透槽からの浸透流量の非定常変化過程に大きな影響を及ぼすものといえる。また、本数値実験の範囲では、式(1)、(2)の不飽和パラメータ α^{-1} , n の値が大きくなるほど、最終浸透流量は大きくなるといえる。

4. 土壌の飽和・不飽和特性の解析

4.1 Reynoldsらの近似解による方法(方法A)

Reynoldsら(1985)⁶⁾は、不飽和帯の流れを考慮し、最終浸透流量 Q と飽和透水係数 k_0 との関係式として次式を提案している。

$$Q = k_0 (2\pi H^2 / C + \pi a^2) + Q_u \quad (3)$$

$$Q_u = 2\pi H \phi / C \quad (4)$$

ここに、 C は H/a に依存する無次元定数、および ϕ は次式で与えられている。

$$\phi = \int_0^{h_0} k_u(h) dh \quad (5)$$

ここに、 h_0 :浸透槽周辺の初期サクシオンである。式(5)において浸透槽周辺が飽和している場合、積分の下限値 $h_0=0$ となり、 $\phi=0$ 、すなわち式(4)の $Q_u=0$ となる。ここで、 $Q_u=0$ の場合の式(3)は、Gloverによって飽和流れを対象に導かれた Q_u と k_0 の関係式^{7),8)}と一致することから、式(4)の Q_u は、最終浸透流量に及ぼす不飽和流れの寄与の項といえる。

いま、簡便さのため、不飽和透水係数を次に示すいずれかの関数で近似する。

$$k_u(h) = k_0 \exp(-\alpha_0 h) \quad (6)$$

$$k_u(h) = k_0 \exp(-\alpha_1 h^2) \quad (7)$$

ここに、 α_0 (cm^{-1})、 α_1 (cm^{-2})はサクシオンに対する不飽和透水係数の変化を規定する土壤に固有の不飽和特性パラメータであり、 $\alpha_1 = \pi \alpha_0^2 / 4$ の関係がある。また式(6)は Reynolds and Elrick⁹⁾が用いたものであり、式(7)はここで新たに検討するものである。式(6)、(7)を式(5)に代入し、 h_0 が十分大きいと仮定し $h_0 \rightarrow +\infty$ として積分すると、それぞれの式(6)、(7)に対応した ϕ の値 ϕ_0 、 ϕ_1 は次のようになる。

$$\phi_0 = k_0 / \alpha_0 \quad (8)$$

$$\phi_1 = (\sqrt{\pi}/2) (k_0 / \sqrt{\alpha_1}) \quad (9)$$

以上のことから、Reynoldsらの近似解式(6)、(7)の未知パラメータは k_0 と α_0 (あるいは α_1)の2つであり、同一浸透槽において、異なる湛水深で浸透実験を2回以上行うことにより、未定定数を求めることができる。

4.2 最適化手法と不飽和浸透流の数値計算による方法(方法B)

ここでの方法Bは、雨水浸透槽からの浸透流量の時間変化の実測値と、前述の不飽和浸透流の数値解析から求めた数値解との誤差の自乗和が最小になるように、土壤の不飽和特性を表す式(1)、(2)の未定パラメータと飽和透水係数を、非線形最小自乗法により推定するものである。

ここでは、まず浸透流量の時間変化の観測値から、式(1)、(2)の未定パラメータが推定できるかどうか以下のような感度解析を行う。すなわち、まず θ_0 、 θ_1 は既知とし、次に示すパラメータの値：

k_0 (cm/s)	2.7×10^{-4}	3.6×10^{-4}	4.5×10^{-4}	5.4×10^{-4}	6.3×10^{-4}	
α^{-1} (cm)	100	83.3	71.4	62.5	55.6	50
n	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5

のそれぞれの組合せのもとで数値計算を行い、得られた浸透流量の値を $q_{0,i}$ としよう。次に、第3章で用いた $k_0 = 4.4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、 $\alpha^{-1} = 61 \text{ cm}$ 、 $n = 4.36$ の値を真値とし、この真のパラメータ値のもとで得られる浸透流量を

q_i とし、評価関数 $J = \left\{ \sum_{i=1}^N (q_i - q_{0,i})^2 \right\}^{0.5} / N$ の値により、パラメータの変化に対する浸透流量の感度解析を行

う。ここで i は時間ステップ、 N はデータ数である。

図-8には、浸透初期の浸透流量の時間変化を含む無次元時間 $t^* = 0.001 \sim 0.18$ の $N=27$ 個の q_i と、 k_0 を真値に固定し、上表のパラメータの組(α^{-1} , n)で求めた $q_{0,i}$ との差より求めた評価関数 J の分布を示している。評価関数 J の最小値 $J_{\min}$ は、ほぼ真値($\alpha^{-1} = 61 \text{ cm}$ i.e. $\alpha = 0.016 \text{ cm}^{-1}$, $n = 4.36$)の付近にあり、浸透流量の時間変化の観測

表-1 方法Bによる推定値の妥当性

	k_0 (cm/s)	α^{-1} (cm)	n
真値	4.4×10^{-4}	61	4.36
推定値	4.3×10^{-4}	64.9	4.25

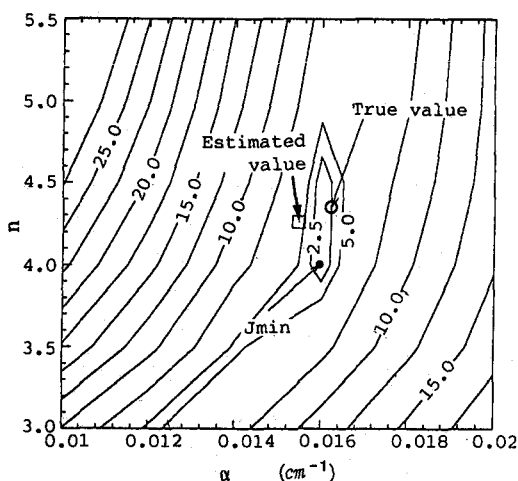


図-8 α, n に対する評価関数(データ数 $N=27$)

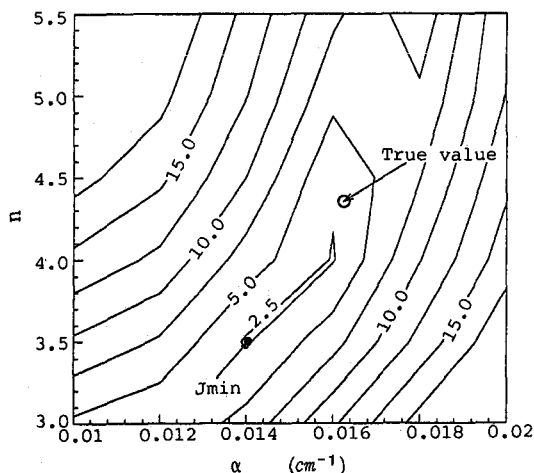


図-9 α, n に対する評価関数(データ数 $N=17$)

値を与えることにより未定パラメータの推定が可能といえる。一方、図-9には初期の浸透流量の変化を含まない無次元時間 $t^*=0.015 \sim 0.18$ の17個の q_i との比較により求めた J の分布を示している。図-8と比較すると、 J_{min} の現れる位置が真値からはなれており、不飽和パラメータの推定の精度は低下するといえる。なお、同様の考察が k_a と n の感度解析の場合にもいえた。以上のことから不飽和パラメータ α^{-1}, n の精度よい推定を行うには、初期の浸透流量の低下過程を含む q_i の実測値が必要であると考えられる。

従ってここでは初期の浸透流量の低下過程を含む $N=27$ 個の q_i を与え、修正Marquardt⁹⁾法を用いて未定パラメータの推定を行った。得られた k_a, α^{-1} , および n の推定値を表-1および図-8の□印で示している。図表に示すように、方法Bによる精度は十分といえる。

5. 現地浸透実験結果の解析

ここでは百道、三宅における現地浸透実験で得た浸透流量の実測値により方法A, Bの未定パラメータの推定を行い、現地土壌の不飽和特性に関する検討を加える。方法Bにおいては図-3の境界ABにおいて現地に適した境界条件を与える必要がある。ここでは現地浸透機付近の土壌のサクションを圧力センサーにより測定しその値を境界ABにおけるサクションとして用いた。なお θ_s は実測により百道で $\theta_s=0.389$, 三宅で $\theta_s=0.346$ とし、また残留体積含水率 θ_r は未定であるため、ここでは k_a, α^{-1}, n と同様に θ_r の推定も行っている。

表-2に推定結果を示す。比較のため、飽和理論⁹⁾による k_a も併記している。まず、飽和理論による飽和透水係数は方法A, Bに比べて過大な値を与えることがわかる。これは飽和理論では不飽和帯の流れが考慮されていないため、土壌中の全ての水分移動を飽和透水係数だけで受け持つためであると考えられる。

図-10には百道 Type bにおいて方法A, Bにより推定した不飽和パラメータを用いた時の不飽和透水係数比を示す。図-11には百道Type bによる実験結果に対し方法Bによる浸透流量の予測値と実測値とを示す。

まず、図-10においてvan Genuchtenの式(2)と式(7)の $\exp(-\alpha_i h^2)$ で表される $k_r(h)$ の形状は比較的よく一致している。一方、式(6)の $\exp(-\alpha sh)$ で与えられる $k_r(h)$ の形状は式(2), (7)の形状からかなり異なっている。このことは百道Type aについても同様であった。次に図-11に示すように浸透流量の低下過程は百道については比較的よく再現されていることから、方法Bの推定方法は妥当な方法であると考えられる。また式(7)を用いた方法Aの k_a の推定値は、方法Bによる解析結果と比較的よく一致していることから、Reynolds and Elrickの近似解の不飽和透水係数比の関数形として $\exp(-\alpha_i h^2)$ を用いた方法Aは現地に比較的簡便に応用でき、雨水浸透機設置位置における土壌の現地浸透試験を評価をする上で有用である。さらに、方法Aにおいて式(4)に示す不飽和帯の流れの寄与項である Q_u が最終浸透流量 Q に占める割合である Q_u/Q を算定する

表-2 現地浸透実験解析結果

実験地	浸透槽タイプ	最終浸透流量 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$	飽和理論 $k_0(\text{cm}/\text{s})$	方法(A)		方法(B)			
				$k_0(\text{cm}/\text{s})$	$\alpha_0^{-1}(\text{cm})$	$k_0(\text{cm}/\text{s})$	$\alpha^{-1}(\text{cm})$	n	θ_r
百道小	a	1234	3.67×10^{-2}	1.66×10^{-2}	75.4	1.17×10^{-2}	108.8	3.82	0.047
	b1	1039	6.11×10^{-2}	3.68×10^{-2}	42.7	1.89×10^{-2}	65.7	3.85	0.051
	b2*	949	8.01×10^{-2}						
三宅小	a	863	2.57×10^{-2}	(3.66×10^{-2})	(-14.5)	5.77×10^{-3}	56.8	4.09	0.018
	b1	783	4.60×10^{-2}	3.69×10^{-2}	18.6	4.43×10^{-3}	52.6	4.36	0.030
	b2*	37	2.61×10^{-3}						

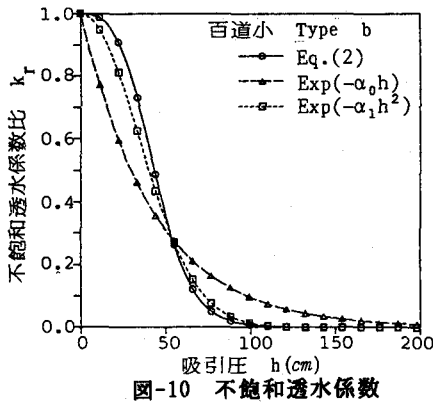


図-10 不飽和透水係数

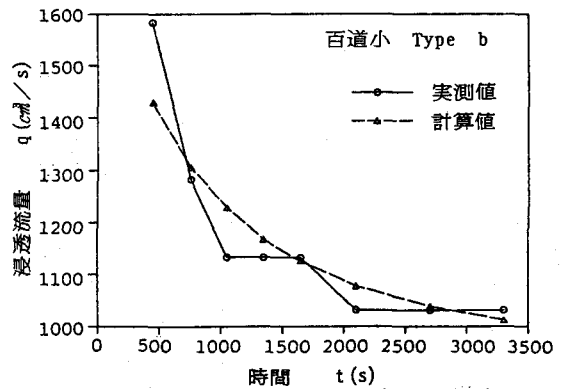


図-11 浸透流量の実測値と計算値

と、百道のType bにおいて約45%であり、土壤の不飽和特性が雨水浸透槽からの浸透流量に及ぼす影響は大きいと考えられる。なお三宅の解析結果については方法Aと方法Bの透水係数の値が異なっており、これは主に浸透流量の低下過程を正確に把握できなかったことが原因として考えられ、今後検討を行う予定である。

6. おわりに

本研究で得られた結論を要約すると次のようである。

- (1) 本浸透試験結果に対しては土壤の不飽和特性が雨水浸透槽からの浸透流量に及ぼす影響は大きい。
- (2) 浸透流量の低下過程を用いることにより飽和透水係数、不飽和パラメータの精度よい推定が可能である。
- (3) 飽和理論による飽和透水係数は過大な値となることを示した。
- (4) Reynolds and Eirickの近似解の不飽和透水係数比の関数形として $\exp(-\alpha_1 h^2)$ を用いることにより概ね妥当な飽和・不飽和透水係数を現地で比較的簡便に推定できることを示した。

参考文献

- 1)建設省土木研究所：都市化による流出変化と浸透によるその抑制法に関する研究，土木研究所報告，第175号，昭和62年3月。
- 2)福岡市下水道局計画課：下水道（雨水）の改善計画調査報告書，昭和63年3月
- 3)Momii, K., Jinno, K., Ueda T. and Kodama, A.: Study on the Infiltration Rate from Drainage Facilities, IAHR Sympo. on Interaction between Groundwater and Surface Water, Sweden, pp. 15-21, 1988.
- 4)van Genuchten, R.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp. 892-898, 1980.
- 5)Mualem, Y.: A Catalogue of the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, Hydrodynamics and Hydraulic Laboratory, Israel, 1976.
- 6)Reynolds, W. D., Elrick, D. E. and Clothier, B. E.: The Constant Head Well Permeameter (Effect of Unsaturated Flow), Soil Sci., Vol. 139, No. 2, pp. 172-180, 1985.
- 7)Reynolds, W. D., Elrick, D. E. and Topp, G. C.: A Reexamination of the Constant Head Well Permeameter Method for Measuring Saturated Hydraulic Conductivity above the Water Table, Soil Sci., Vol. 136, pp. 250-268, No. 4, 1983.
- 8)地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック，建設産業調査会，p. 289, 1979.
- 9)Oyanagi, Y. and Nakagawa, T.: Program system for statistical analysis with least-squares fitting, SALS (Version 2.5), Computer center, Tokyo, 1981.