

トレンチ型雨水処理施設の浸透特性に関する研究

The Infiltration Characteristics of Infiltration Trench
for Urban Storm-runoff Control Facility

東京大学生産技術研究所 正 員 虫明功臣
東京大学大学院 学生員○桑原 衛

1. はじめに

都市域における雨水流出抑制策ならびに地下水涵養機能の保全策として、各種の地下浸透工法が提案・検討され、実用化も進められつつある。住宅・都市整備公団は、「降雨水の団地内処理システムに関する開発研究委員会」を組織し、その一貫として、昭島つつじヶ丘ハイッ内に各種浸透施設（浸透地下トレンチ、浸透すす、浸透U字溝および浸透性舗装）の試行建設区域を設定して、観測と現場実験に基づく追跡調査を続けている¹⁾。本研究は、その調査研究に関連して始められたもので、上記浸透施設のうち浸透地下トレンチを対象としている。

本稿では、周囲にテンシオメータを埋設した浸透地下トレンチに対する注入試験と自然降雨水による浸透の観測を通して、浸透特性を実験的に調べ、設計に対する基礎的知見を得ることを目的としている。現実的な問題意識は、(1) 浸透能の評価、(2) 浸透水が周囲の環境に及ぼす影響、の2点に大別される。前者については、設計浸透能の評価に際して行なわれる注入試験で問題となる注入時間、注入対象土層の土湿条件およびトレンチ内水位と浸透能の関係などを調べた。後者に関連して、飽和領域の範囲および浸透水供給停止後の土壌中の水分の排水状況の時間的変化について検討した。

2. 対象トレンチ、設置場所および実験・観測の概要

昭島つつじヶ丘ハイッは、住宅・都市整備公団が東京都昭島市に建設した高層住宅団地で、立川段丘上（標高105 m）に位置している。本研究で対象としたトレンチ周辺の表層90 cmまでは、造成工事により攪乱されたローム質土壌で構成され、深度約90～200 cmの間は立川ローム層、それ以下には粗粒砂礫よりなる立川礫層が分布している。トレンチが設置され注入の対象となっている立川ローム層は空隙に富み透水性が高い。なお、地下水面は地表面下10 m付近、立川礫層中にある。

図-1に対象トレンチの設置場所の略図を示す。このトレンチは、屋根面積63 m²の雨水排水を受けるように設計されており、路面などの排水は入らないため、目づまりの影響は比較的少ないと考えられる。図-2にトレンチの構造の概要を示す。

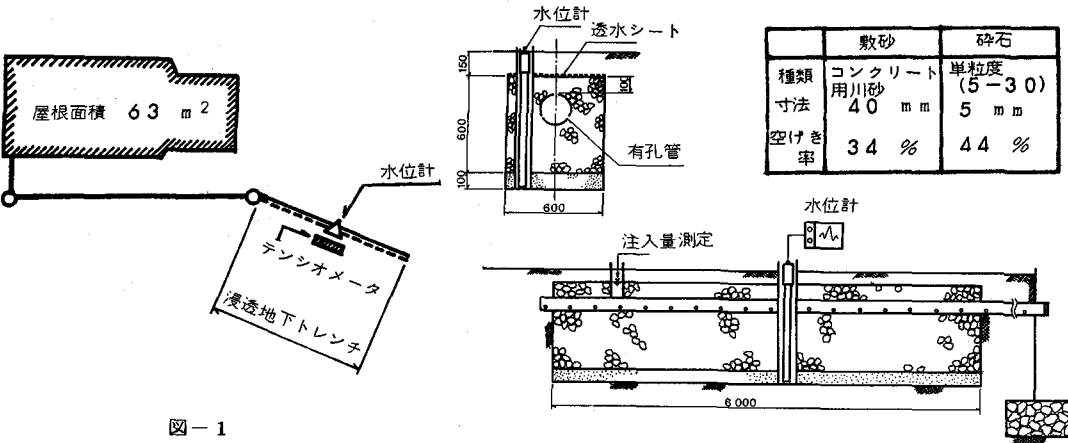


図-1 トレンチ設置場所付近の概要

図-2 対象トレンチの構造

トレンチ周辺には図-3に示すように自記テンシオメータを配置し、注入試験と自然降雨時の浸透の両者についてトレンチから浸透した水分の挙動が把握できるようになっている。地下水面上にある土中の水は土粒子の吸着力と気液界面に生ずる毛管力によって保持されている。テンシオメータはこの土中の水の受ける負圧（吸引圧）を水頭換算で測定するものである。吸引圧は土中水分量によって変化するので吸引圧とそれに対応する含水率の関係を現地の各深度で採取した円筒サンプル（100cc）を用いた室内試験により定め、これによって測定した吸引圧の値を含水率に換算することができる。図-4は吸引法、土柱法、加圧板法の試験によって求めたテンシオメータ設置深度での吸引圧-体積含水率曲線である。Wettingは吸水過程、Dryingは脱水過程を示す。なお、テンシオメータにはマノメータ式と圧力センサー式の2種があるが、土中水の移動が速やかであると想定し質量移動なしで反応する圧力センサー式を用いている。

注入試験はトレンチの周辺土中水分条件の異なる日を選び計4回行なった（うちテンシオメータ設置前1回）。注入条件及び前期降雨状況を表-1に示す。

自然降雨時の浸透能は、雨量とトレンチ内水位より連続式を用いて算出した。トレンチ内水位の自記観測に欠測が多いため降雨時の浸透能が得られたのは1982年4月14日～16日の降雨1例である。

土中水分の回復については1981年10月22日より翌年6月中旬までのテンシオメータ観測記録のうち降雨～降雨終了約10日間のデータを用いた。

3. 浸透能の時間変化（定水位注入試験）

定水位注入試験の結果をトレンチ単位長さ当たりの浸透能の時間変化として示したのが図-5である。各実験毎に浸透能は時間の経過につれて安定した値に近づいてゆく。通常指摘されているように土中が乾燥状態にある程初期浸透能は大きな値を示す。ここで注目すべきは、終期浸透能の値についても初期程ではないにしろ各実験で異なり、実験時の土中水分量と関係があると推察される点である。なお、ここでは、初期浸透能とは定水位になってから10分間の平均を、終期とは浸透能が安定したとみなせるようになった時点の意味する。定水位注入を8時間続けた実験Cでは定水位になって後3時間以後はほとんど浸透能に変化がなく、図-5に示されている他の実験についても定水位後3時間程度で浸透能が安定するとみなせる。

4. トレンチ内水位と浸透能の関係

（変水位試験）

定水位試験に続く変水位試験結果より終期浸透時のトレンチ内水位と浸透能の関係を示したのが図-6である。水位と浸透能の関係については、今までいくつかの式が提案されている。もっとも簡単な式は水位Hと浸透能

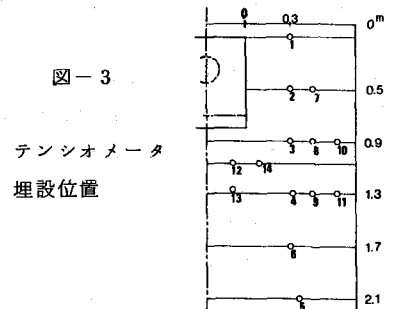


図-3

テンシオメータ
埋設位置

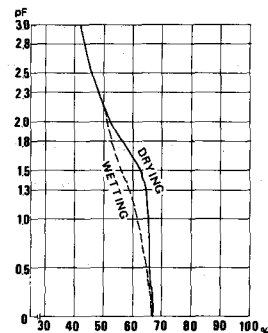


図-4

pF-体積含
水率曲線
深度 10cm

表-1 実験条件

実験日	CASE	降雨条件	注入時間	総注入量
1981.8.11	A	無降雨 2日	3 hr	9.41
1981.12.9	B	無降雨 11日	4	8.20
1982.4.9	C	17.5 mm 4.7-8	8	11.00
1982.7.8	D	24 mm 7.7	3	5.60

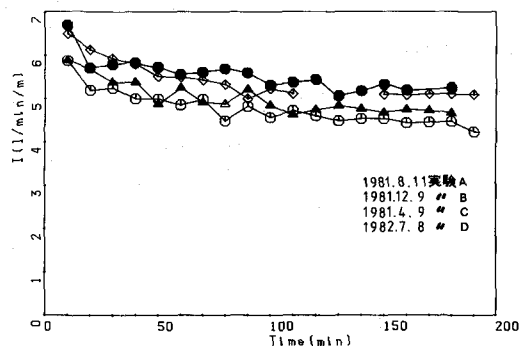


図-5 浸透能の時間変化

I の間に

$$I = \alpha H, \quad \alpha : \text{定数} \quad \dots\dots(1)$$

が成立するとするもので、この式の根拠は水位の対数と変水位経過時間 t の間に直線関係があると考えるところにある。しかし、水位がトレンチ底部近く 20 cm 程になると、この関係は成立しなくなり、全体として(1)式は $H \sim I$ の推定値として不適当である。今回の注入試験の結果、このようにして求めた推定浸透能は同一水位の定水位注入試験で求めた値よりかなり小さい値となる。実際にはトレンチ内水位がない場合でも若干の浸透能を有しているとして、

$$I = \alpha H + \beta \quad \alpha, \beta : \text{定数} \quad \dots\dots(2)$$

の関係が成立するとみなせば、

$$I \propto \frac{dH}{dt} \quad \dots\dots(3)$$

であるから、水位 H に何らかの定数項 $H_0 (>0)$ を加えたものと変水位経過時間 t の間に、

$$\text{Log}(H + H_0) = at + b \quad a, b : \text{定数} \quad \dots\dots(4)$$

の関係があることになる。これに基づき H, t を整理したところ、比較的良い直線関係を示した(図-7)。 (2)式の定数 α, β を定水位および変水位 20 cm 付近での水位と浸透能の関係から求めたものが図-6の実線である。自然降雨時の水位-浸透能関係は破線で示してある。自然降雨時の水位-浸透能の関係は変水位試験の場合よりバラツキがみられる。これは雨量データの読み取りが 30 分(場合に依っては 15 分)間隔でしかできず、水位の急激な変化に対応しなかったためである。図中破線はトレンチ内水位が低下過程にある場合の水位-浸透能関係から単回帰で求めたものである。この破線についてみれば、降雨時にも変水位試験時とはほぼ同様の水位-浸透能関係が成立すると判断できる。

5. 周辺土中水分条件と浸透能の関係

初期浸透能だけでなく終期に至っても周辺土中水分条件により浸透に差が生じることは既に述べた。通常、土中水分条件を深度別に求めることが困難であるため注入試験前の無降雨日数、前期降雨を周辺土中水分条件の指標としているが、ここでは「飽和含水率-試験前の含水率」、すなわち空隙率を水分条件の指標として用いることとした。なお、テンシオメータ設置前の実験 A については、気象、土質条件の類似した多摩ニュータウン内に設置したテンシオメータ測定値と相関を取り、多摩ニュータウンでの測定値より推定した値を用いた。図-8は各実験日における深度方向の空隙率を示す。図中の点線は $pF = 2$ に対する空隙率を示し、点線の右側の空隙部分は拘束性の強い水分保持状態の

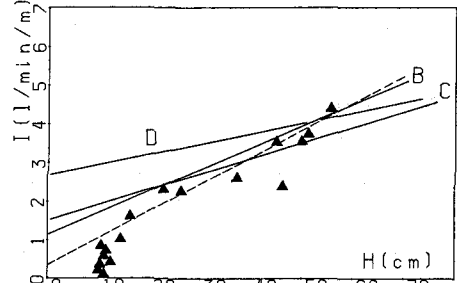


図-6 トレンチ内水位と浸透能の関係

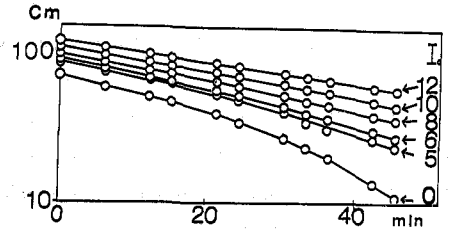


図-7 トレンチ内水位の時間変化(変水位試験)

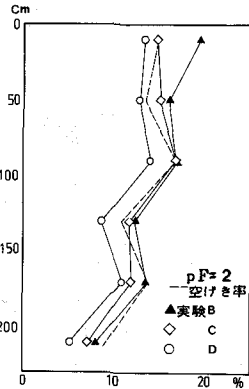


図-8

各実験日における
空隙率の深度方向
分布

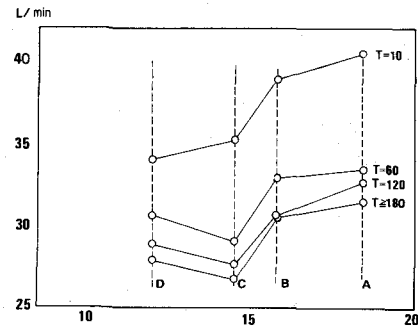


図-9 平均空隙率と浸透能の関係

領域である。したがって、この部分が広いことは重力では移動し難い水分をも保留しうることを示す。実験 B, C, D の順にこの保留容量が高い。

図-9 は表層から深度 150 cm までの平均空隙率と浸透能の関係が時間とともにどのように変化するかを示している。初期浸透能と平均空隙率の間にはほぼ直線関係が成立している ($T=10$ 分)。また終期浸透についても空隙の減少にともない低下の傾向がうかがえる。浸透能に関して土中水分条件に依らず一定値に近づくという、いわゆる最終浸透能の概念があるが、現実的な時間範囲で考えた場合、浸透能の境界条件として土中水分条件が影響をもつと考えられる。

6. ポテンシャル分布及び土中吸引圧分布の時間変化

実験 C におけるテンシオメータ測定より得られた吸引圧をもとにポテンシャル分布、土中吸引圧分布を求め、水分の全体的挙動を示したのが、図-10 (1)~(4) 及び図-11 (1)~(4) で、どちらも水頭 (cm) 単位で表わされている。ポテンシャルの数値は、地表面を基準にした位置ポテンシャルと吸引圧ポテンシャルを加えたもので、浸透水の運動を規定する外力と考えられる。トレンチ周囲のポテンシャルは、注入試験開始時に急激な変化を示すが、定水位後 2~3 時間程度で安定する。定水位注入量自体が 3 時間で安定するとみなせることと考え合せて、安定した浸透能を求めるための定水位試験は 3 時間程度で良いと判断される。

図-11 の土中吸引圧分布で 0 値は飽和状態を表わす。図-11 (2) は 8 時間注入後の状態を示している。飽和域の広がりを見ると、このような長時間の注入であってもトレンチ壁面から水平方向 50 cm 程度しか広がっておらず、また鉛直方向についてもトレンチ底面下 1 m で依然として不飽和状態を維持している。

図-11 (3), (4) は注入停止後の吸引圧の回復状況を示している。注入停止後 2 時間で飽和域が消滅し、3 時間後には吸引圧 50 cm の線がトレンチ壁面 20~30 cm の所まで近づく。

7. テンシオメータ実測値から算定した方向別浸透能

トレンチからの浸透が降雨によって受ける影響を知るためには、降雨による吸引圧の低下を早く受けるト

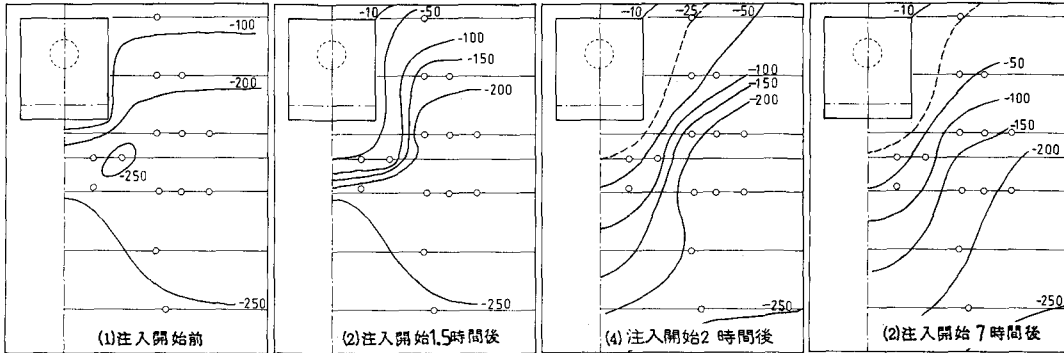


図-10 ポテンシャル分布の時間変化

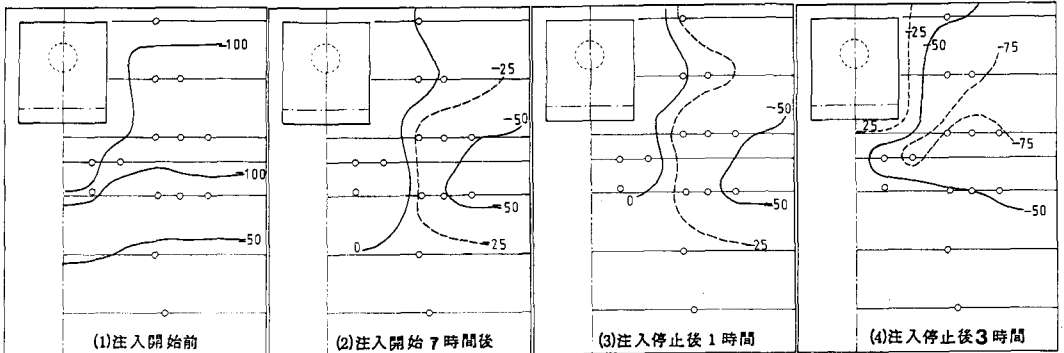


図-11 土中吸引圧の時間変化

レンチ側面からの浸透と、比較的降雨の影響を受け難いトレンチ底面からの浸透の両者を比較する必要がある。この節では、テンシオメータ測定値を用いていくつかの仮定のもとに浸透量の計算を行ない、実測との比較から計算の仮定を検証する。さらに、この計算に基づいて注入試験及び自然降雨時という異なる2つの条件下でトレンチ側面からの浸透能および底面からの浸透能の量的関係を評価する。運動がダルシー則に基づき、また不飽和透水係数が土中吸引圧の一価関数で表わせると仮定する。すなわち、

$$U=K \frac{\partial}{\partial S} (\Psi + Z) \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$K=K_o (\Psi / \Psi_o)^{-\beta} \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

ここに、U：土中水平流速、 Ψ ：土中吸引圧、Z：鉛直座標値、S：流線、 K_o , K：飽和、不飽和透水係数、 Ψ_o , β ：定数、である。

トレンチ周囲に図-12に示す想定断面を設定する。テンシオメータ設置点1, 2, 3, 10, 12が断面の各部を代表するように断面をトレンチに10分割し、その各部をF-1, F-2, F-3, F-10, F-12とする。想定断面がトレンチ壁面に近いことから水分の流線がF-1~12の各分割断面に直交していると考えれば、式(5), (6)を用いて各断面を通過する浸透能を計算することができる。なお、不飽和透水係数のパラメータ β は現地サンプルの室内試験より $\beta = -3$ に、 Ψ_o については未だ実験結果がでておらず代表値で -40 cm を採用した。 K_o については深度90~150 cmの現地サンプルより 1.5×10^{-3} 及び $1.7 \times 10^{-3} (\text{cm/sec})$ という値を得ているので、断面全体に渡り一定値 $1.7 \times 10^{-3} (\text{cm/sec})$ と仮定した。

C, D 2つの注入試験に対して上記の計算を行なったのが、それぞれ図-13(1)及び(2)である。全断面を通過する浸透量の総和の計算値と実測値の比は、実験Cで0.84、実験Dで0.79となっている。実測値にはトレンチ両端部での浸透量が含まれ、1~2割多く見積もられていることを考えれば、良く一致しており、上記(3), (4)式および緒定数値が妥当であると判断される。自然降雨時の総浸透量についての計算値と実測値の比は1.5となるが、これはトレンチ水位計の値が10 cm以下に低下しないためと考えられる。

図-13(1)~(3)は実験C, Dおよび降雨時の各断面部分での浸透能をあらわしている。初期の時間では想定断面とトレンチ壁面間の貯留効果があるので、周囲の水分状態の安定した3時間以後の値について考察する。

表-1の降雨状況からわかるようにC, D両注入試験はどちらも前期降雨の影響で表層近くが相当湿潤状態になっていたと考えられる。この2実験につき底面全体に対する側面全体の浸透量の比は、実験Cで0.67、実験Dで0.83となり、土中水分が高い場合でも側面が受け持つ浸透量の割合はかなり大きいと考えられる。しかし、表層部分F-1については条件により大きく変動するようである。同一の水頭のかかるF-10, 12とF-2, 3を比較すると単位面積当り浸透量で側面と底面の比が

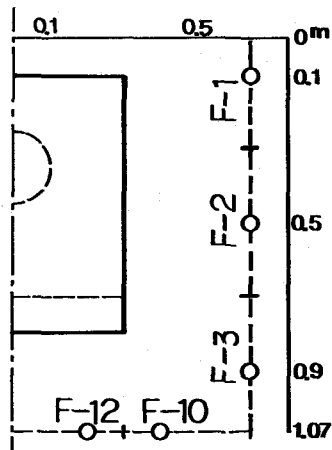


図-12 想定断面図

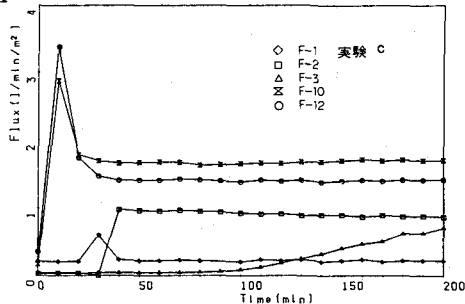


図-13(1) 方向別浸透能 (実験C)

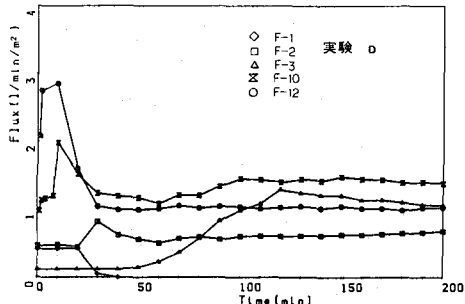


図-13(2) 方向別浸透能 (実験D)

実験Cで0.5、実験Dで0.7 1となり、少なく見積もっても側面は底面の半分の単位面積当り浸透能を有すると判断される。

自然降雨時図-13(3)の場合、トレンチ水位が上昇しF-1に水頭がかかっても、注入試験時と同様に浸透量が0に近い。この場合、底面全体に対する側面全体の浸透量の比は0.6 1、単位面積当りにすると0.56である。ここで対象とした自然降雨のように、12時間にわたって水位の上下を繰り返し浸透を続ける場合も、注入試験と同様に側面の効果を期待できると思われる。

8. 土中水分の回復

トレンチからの浸透水がいつまでも排水せずに長期間高い水分状態が継続すると、隣接する構造物、植生あるいは周辺環境に好ましくない影響を及ぼす可能性がある。6節で注入停止後の吸引圧の回復について少し触れたが、本節では、余剰な土中水分が排水される過程について検討する。

土中水分の回復を考える際、どの時点で余剰水が排水したとみなすか、その基準が問題となる。ここでは、種々の見解の中で農学関係でよく用いられる $pF = 2$ となる時点を採用する。ただし、深部においては pF 値が2以下で安定な状態を示すことがあり、そのような場合には、初期水分状態へ回復した段階を回復時点とした。以上の基準に基づき、経過時間と吸引圧の回復状況の関係を示した例が図-14である。実験B, C, Dいずれにおいても、浅部から深度210 cmまで2~3日で水分状態が回復したと判断される。同図中の破線は、自然降雨時の回復状況を示す。注入試験と自然降雨の両者に対して、土湿状態をパラメータとして時間の対数と吸引圧の間に直線関係が成り立ち、しかも傾きがほぼ一定とみなせることから、この傾きはこの土層の排水特性を表わす指標と考えられる。

9. おわりに

本稿では、特定の浸透地下トレンチを対象に、注入試験と自然降雨時の観測で得られた結果を現象論的に整理した。現状では、設計浸透能の評価に際して実物大の施設を用いた注入試験に基づくものとされているが、そうした注入試験の結果を解釈する際に、本論で得られた知見は有用であると考えられる。

いっぽう、数値解析的な方法で土壌特性と浸透特性を関連づける手法の確立が望まれるが、この研究で得られた成果を基にその方面での研究も進めるつもりである。

〔謝辞〕本研究は、住宅・都市整備公団が組織した「降雨水の団地内処理システムに関する開発研究委員会」(昭和56年度委員長石崎勝義氏、昭和57年度委員長吉野文雄氏)の一貫として始められた。貴重な研究の場と資料を提供していただいた同公団の関係各位、ならびに有益な議論をいただいた委員会メンバー各位に衷心より深謝の意を表します。また、注入試験、資料整理・解析に当っては、当研究室の小池雅洋、田村浩啓の諸氏、武蔵工大学生荻野幸美、三浦義和、両君の援助を受けた。記して謝意を表します。なお、本研究は一部文部省科研費(自然災害特別研究(1)、代表者早稲田大学吉川秀夫教授)の援助を受けている。

参考文献 1) 石原 旭:調整池から地下浸透工法の実施まで、月刊下水道Vol.5, No.4, 1982.4

2) 建設省土木研究所:地下浸透を考慮した流出抑制法の開発実験に関する報告書、土木研究所資料第1767号, 1982.3

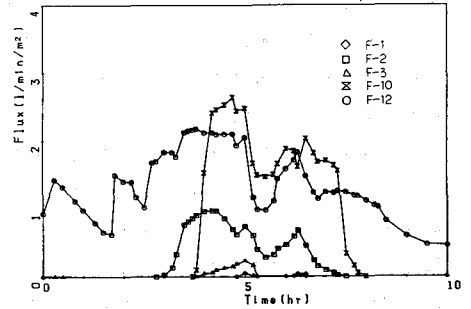


図-13(3) 方向別浸透能(降雨時)

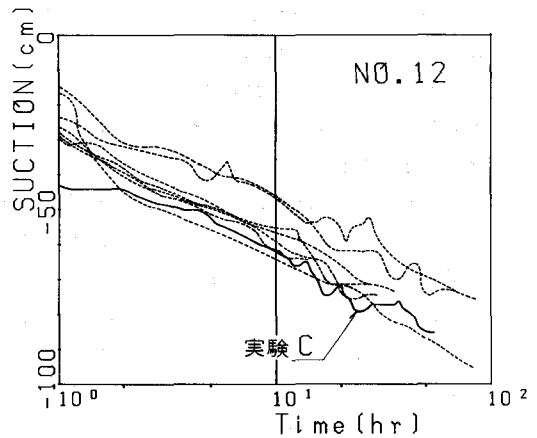


図-14 土中水分の回復と時間の関係