

雨水浸透ますからの浸透特性に関する実験的研究

Experimental Study on The Characteristics of Infiltration
by Infiltrate Drainage

東京都土木技術研究所 正 員 〇 土 屋 十 窓
東京都土木技術研究所 正 員 山 本 弥 四 郎
東京都土木技術研究所 正 員 和 泉 清

1. はじめに

都市域における雨水流出抑制施設は浸透型・貯留型等各種のタイプがあり、各方面で提案・検討され、その一部が実用化されている。東京都においても1982年から街路、公園等に浸透型施設である「雨水浸透ます」を設置し、神田川、野川流域等5流域で観測と現場実験に基づく追跡調査を続けている。

本研究は、神田川流域に設置された雨水浸透ますの浸透特性を把握する目的で、現場実験を行い、その結果を検討したものである。

雨水浸透ますの機能はその性質上、地質、地下水位など設置場所の条件に大きく左右されやすいことが分かっている。従って、的確に機能を把握することは困難である。また、貯留型施設に比べ浸透機能という性格から、目詰まり防止、即ち、維持管理上の負荷が大きいこと。更に、路面などに散在する汚濁物の混入に伴う地下水汚染への影響、浸透に伴う路盤構造等への影響など検討すべき課題が多い。

本稿では図-1、2に示すような「たて型」浸透ますと「よこ型」浸透ます（トレンチ型）（以下、たて型、よこ型と呼ぶ）を対象として、①よこ型においては間欠的に注入された浸透水の周辺地盤中で挙動を把握すること、②たて型浸透ますとよこ型浸透ますの浸透能特性の違いについて実験的に検討した。

2. 実験の概要

実験場所は神田川流域の4地点であり、「たて型」が環状6号線と環状7号線に、「よこ型」が環状8号線と新宿区立西戸山公園に設置されている。浸透ます周辺の地質は表層3.5m～4.0mまでが関東ローム層、以深は砂質及び砂礫層となっている。ただし、 $\#16$ ～ $\#8$ のよこ型は街路工事により攪乱されたローム質で構成されている。地下水面は表面より、 $\#10$ （環7）、 $\#16$ （環8）が2.0m～3.2mにあり、 $\#23$ （西戸山公園）、 $\#26$ （環6）では4.5m付近にある。表-1参照。

浸透能実験に使用した注入水は給水車（2t～6t）のタンクローリー車より直接、各浸透ますに注入する方法をとり、注入開始とともに浸透管内の水位変化をNP水位計を用いて測定した。注水は計画水位まで注入し、注水終了後、経過時間毎の水位（地表面から水面までの深さ）を観測した。注水試験は、各地点とも、注入速度（注入量）を変化させ、3～4回間欠的に注水を行った。各地点毎の注入条件は表-2に示すとおりである。

3. テンシオメータとPF-水分量曲線

図-3に示すように、注入開始と同時に、浸透した水分の挙動が把握できるように、テンシオメータが配置されている。テンシオメータは、西戸山公園で12ヶ所、環8で9ヶ所設置した。テンシオメータは不飽

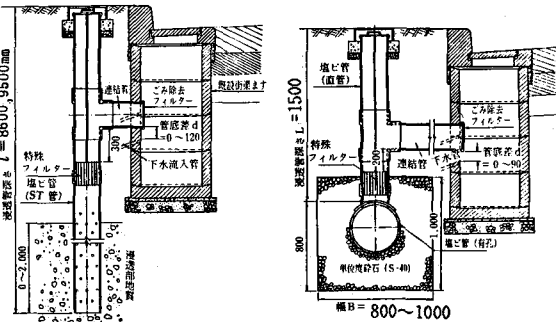


図-1 たて型浸透ます 図-2 よこ型浸透ます

表-1 設置箇所と自然条件

st. No.	実験場所	ますのタイプ	設置場所	型 状	地 質	地下水位
10	杉並区和田2丁目	「たて型」	街路環状7号線	$\phi 200\text{mm}$ $l=9500\text{mm}$	関東ローム4m以下砂礫	地表面より3.2m
16	杉並区清水2丁目	「よこ型」	街路環状8号線	$\phi 400\text{mm}$ $l=2000\text{mm}$	関東ローム4m	2.0～2.3m
23	新宿区百人町4丁目	「よこ型」	公園新宿区立西戸山公園	$\phi 400\text{mm}$ $l=4000\text{mm}$	関東ローム3.7m	4.6m
26	新宿区上落合3丁目	「たて型」	街路環状6号線	$\phi 200\text{mm}$ $l=8600\text{mm}$	関東ローム4m以下砂礫	4.4m

和帯における土中水の受ける土壌水吸引圧(負圧)を水頭換算で測定するものである。この吸引圧は、土粒子の吸着力や毛管力によって生じるもので水分保持力とも言っている。

表-2 注入水量

st. No.	浸透メータタイプ	集水面積 (㎡)	RUN-1				RUN-2				RUN-3				RUN-4			
			注入量 (l/min)	注入時間 (分)	総注入量 (l)	降雨換算 (mm/hr)	注入量 (l/min)	注入時間 (分)	総注入量 (l)	降雨換算 (mm/hr)	注入量 (l/min)	注入時間 (分)	総注入量 (l)	降雨換算 (mm/hr)	注入量 (l/min)	注入時間 (分)	総注入量 (l)	降雨換算 (mm/hr)
10 環 7	たて型	200	17.65	90	1588.5	5.3	25.04	1930	488.3	7.5	18.33	120	2199.6	5.5	—	—	—	—
16 環 8	よこ型	300	56.70	60	3400	11.3	85.0	40	3400	17.0	66.0	50	3400	13.6	—	—	—	—
23 西戸山	よこ型	650	67.50	40	2700	6.2	150.0	18	2700	13.8	72.0	37	2700	6.6	90.0	30	2700	8.3
26 環 6	たて型	650	60.29	12	723.5	5.6	35.29	120	4234.8	3.3	40.29	120	4834.8	3.7	—	—	—	—

従って、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水分量を求める換算が必要となる。本測定では、 $P^F-1.4$ 以下では、土柱法を、 $P^F 1.4$ 以上 $P^F 2.7$ 以下では加圧板法を用いて、テンシオメータ設置深さ毎の P^F -水分量曲線を作成した。この曲線は湿潤化過程と乾燥化過程ではヒステリシスを起すことが分かっている。本測定では乾燥化過程で P^F -水分量曲線を求めているため、総じて高い値を示している。図-4 は西戸山公園 (No. 23) での P^F -水分量曲線である。西戸山公園でのキャリブレーション結果は地表から深くなるに従って、 P^F 値に対する水分量の変動巾は大きくなっていることが分かる。

土質試験は間隙率が環 8 (No. 16) で平均値 8.1.1.5%, 西戸山公園 (No. 23) で 7.2.7.3% である。土の真比重は 2.4~2.6。透水係数 (室内) は No. 16 で 3.93×10^{-3} 、No. 23 で 1.86×10^{-2} (cm/S) となっている。

4. 間欠時注入水による吸引圧変化と浸透流の動き

ここでは、西戸山公園 (No. 23) における各深さの地点毎の鉛直方向の吸引圧変動をみると、前者については、トレンチ中心より 0.5 m 離れた地点では、図-5 に示すように、浸透流の動きは、No. 3 (H=2.7 m)→No. 4 (H=3.7 m)→No. 2 (H=1.7 m)→No. 1 (H=1.3 m) の順位で到達していることが分かる。初期浸透では鉛直方向の流れが卓越していることが分かる。第 2 回目以降の注入に対しても、ほぼ同様な現象がみられるが、第 1 回目の注入時より浸透流の応答時間が早くなっている。

次に、水平方向の浸透流に着目すると、トレンチ中心部に近い地点から流れが到達していることは当然である。

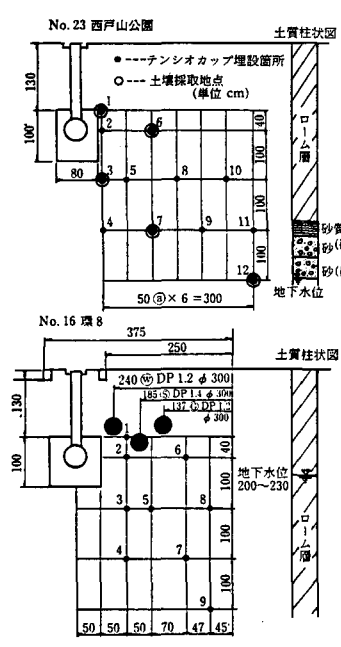


図-5 テンシオメータ埋設図

ある。深さ 3.7 m の地点での各点の吸引圧変化を図-6 に示す。注入→浸透→吸引圧の上昇という一連の現象は、各点ともほぼ平行した状態で浸透流の挙動をつかむことができる。ただし、吸引圧の変動の中で図中の一点鎖線より上図は地下水位としての正圧を受けていることを示している。上記の記録結果から注入時刻とテンシオメータの感知時刻の差をもって到達時間とすれば、各測定地点での到達順位と到達時間は表-3 に示すようになっている。以上の結果に

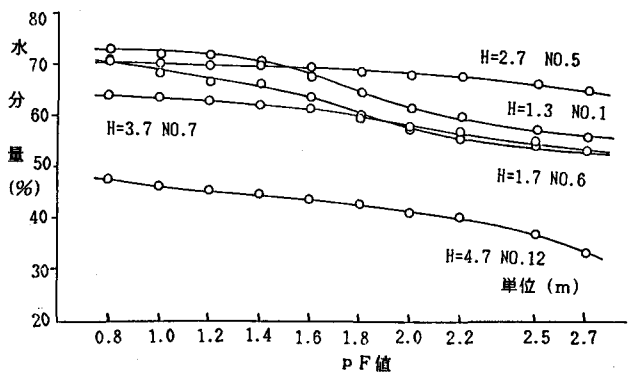


図-4 深さ別による P^F -水分量曲線

ついて経過時間毎の浸透流（湿潤面）を推定すると図-7のようになる。

以上のことから、注水された浸透水の流れは、注水の初期は重力浸透となって垂直方向に進み、やがて、浸透トレンチ内の空隙部分が注入水で満たされてくると、水位上昇にもなって、横方向への流れが加わる。その範囲は次第に拡大され260分後には浸透管の中心から3.5 m、深さ4.7 mの地点に到達している。また、№1地点においては到達時間が90分であるが、上層部への流れは毛管浸透によるものと思われる。

次に環8（№16）における浸透流の動きについては、地下水位が2.0 m～2.3 mのところであり、ほぼトレンチの底部のところにあたる。そのため、テンシオメータによる吸引圧変動は、№1、№2、№6の3点のみの測定にとどまった。深い地点では、すべて、正圧を測定する結果となっている。従って、注入水に対する、浸透流は、注入初期から横方向への浸透が支配的となり、間欠的注入に対して、正圧として水位変動の応答を測定した。

5. 土中水分量分布の時間変化

雨水浸透ます（よこ型）の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浸透によって吸引圧が低下する現象を、全体的な挙動として把握することが必要である。

表-3 測定地点と到達順位

到達順位	測定点	深さ	到達時間
1	№3	2.7 m	10 分
2	№4	3.7	22
3	№2	1.7	27
	№5	2.7	27
4	№7	3.7	32
5	№8	2.7	50
	№9	3.7	50
6	№1	1.3	90
	№11	3.7	90
7	№12	4.7	260
-	№6	1.7	到達認められず
-	№10	2.7	"

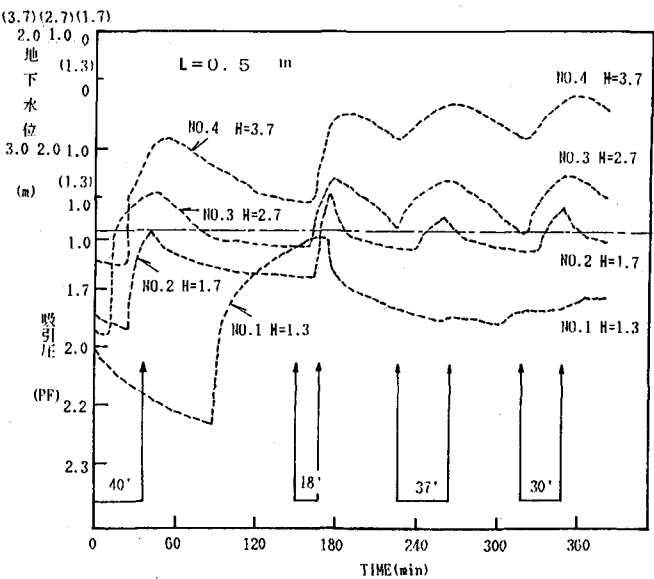


図-5 鉛直方向の各測点における吸引圧（L = 0.5 m）

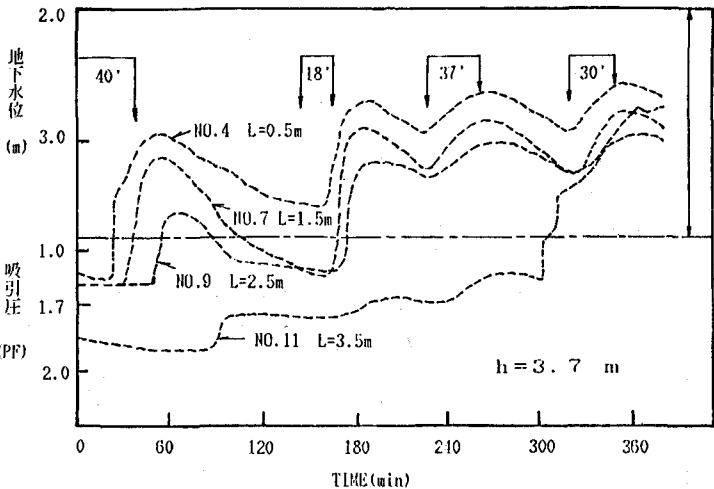


図-6 横方向の各測点における吸引圧（深さ3.7 m）

図-8は浸透に伴い、土中水分量の時間変化を示したものである。土中水分量は、図-4によって、すでに求められている、PF 値とのキャリブレーション曲線から各測定点毎に水分量を求めた。浸透ますの土壌周辺の水分量分布をみると、注水開始から30分後の状況は地下水、土中水分の分布はほぼ平行に走り、湿潤面から動水勾配を推定すると、 $i = 0.5$ の流れとなっている。土中での水の動きは、浸透ますを中心に、真下及び斜下方向に進んでゆくものと思われる。経過時間90分、120分、150分は、第1回目（67.5 l/min ）の注水停止後の状況である。時間とともに、湿潤面は下降し、水分量分布はそれに伴って褶曲した分布を示している。第2

回目注入(150 l/min)終了後の180分では動水勾配が同じであるが、湿潤線はやや上昇している。更に、240分後の第3回目は注水中72(l/min)で動水勾配は $i=0.8$ となり、湿潤面は浸透ますから離れるに従って直線的に変化している。経過時間330分後は、第4回目の注水中(90 l/min)の状況である。水分量分布、地下水面とも前の注入水の移動に伴って、褶曲した分布となっている。

この現象は注水、浸透が間欠的に行われることによって、いわゆる、水道(ミズミチ)がつけられるものと考えられる。

次に環8(No10)地点の場合の浸透変化についてみると、ここでは、バックランドの地下水面が浅く、街路の埋設構造物が存在する条件での土中水分量分布を示す。図-9に水分量変化の状況を示した。地下水面が高いため注入

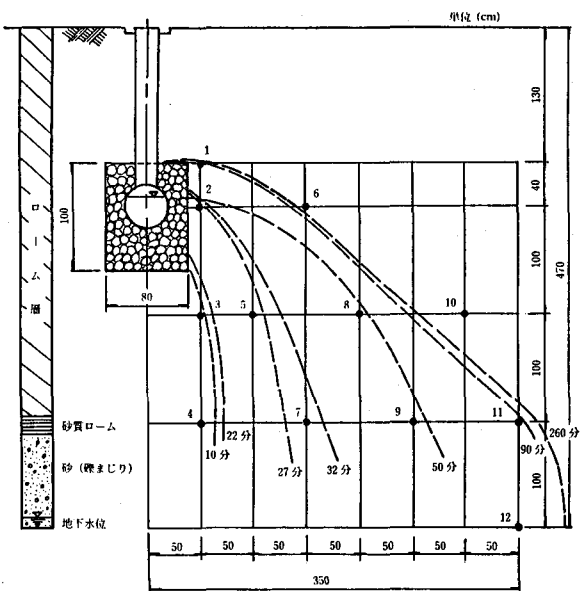


図-7 浸透流の挙動と到達時間

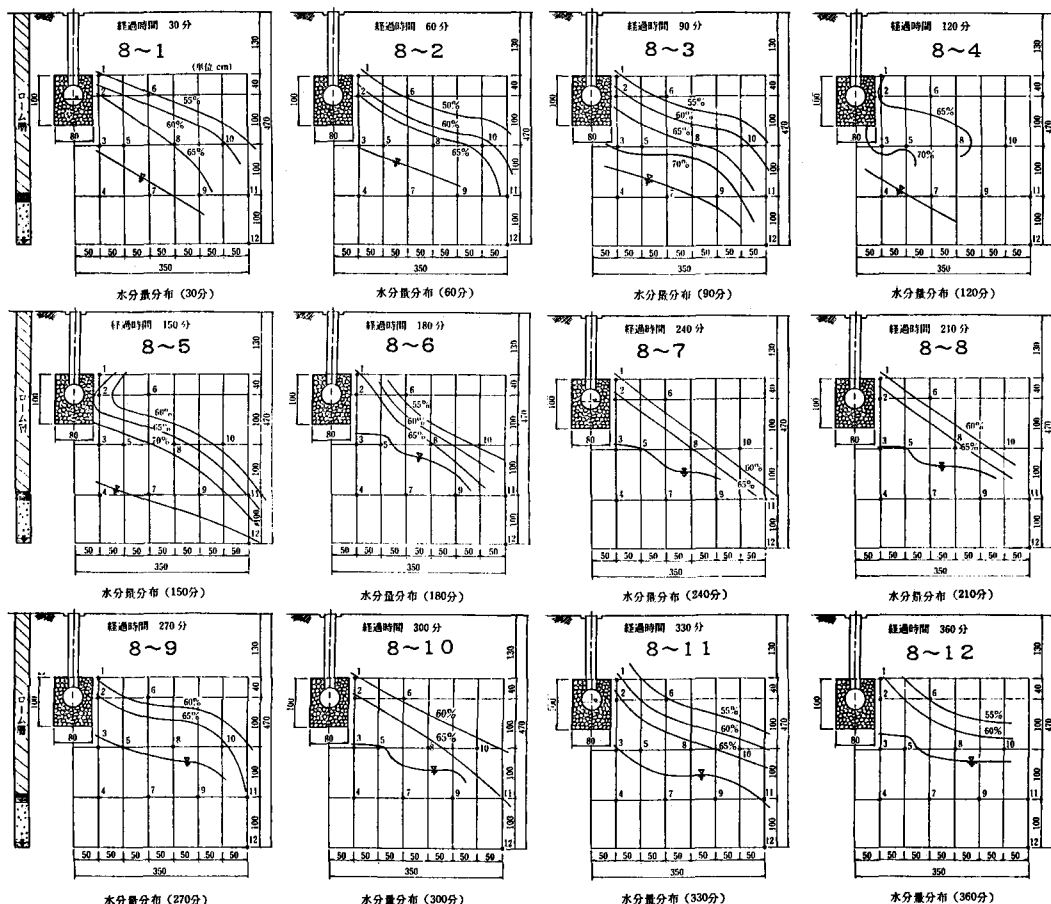


図-8 経過時間による水分量分布(西戸山公園)

時から経過時間毎の変化はあまりみられない。30分位から120分まではまったく変化はなく、動水勾配は $i = 0.1$ 程度の緩やかな状況となっている。

6. 路盤への影響とレイノルズ数

多量の雨水がくり返し、浸透することによって、生じる水道の存在は、路盤の陥没などの原因にもつながることを考慮しなければならない。

埋設物が存在する街路等の場合は、自重や車などの荷重で土が次第に締まって安定してゆく場合にも、埋設物の近傍は締まりにくい。このため、透水係数が大きく、流速も大きくなる場合に、その周辺の土が乱される可能性がある。そこで地盤中の水の移動について、Darcy 法則を考えると、

$$Q = k \cdot i \cdot A \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 A ：流れが浸透する断面積、 k ：透水係数、 i ：動水勾配、 Q ：流量である。

ここでは、土の断面全体では流れないため、間隙率を n とすれば、

$$A_v = n \cdot A \dots\dots\dots(2)$$

よって、浸透流の速さ V_s は、

$$Q = A_v \cdot V_s = k \cdot i \cdot A \dots\dots\dots(3)$$

即ち、 $V_s = k \cdot i / n \dots\dots\dots(4)$

この流速 V_s が大きくなると、流れは層流から乱流になるため、Darcy 則は適用されなくなる。従って、浸透流の現象が層流か乱流かになることを検討することが必要となる。従って、流れの Reynolds 数を試算すると、

- ① 垂直方向の重力浸透が支配的な場合
- ② 上記の現象に横方向の流れが加わる場合、Reynolds 数は次式で表わされる。

$$Re = V_s \cdot d / \nu \quad \text{但し、} \quad \nu = \mu / \rho \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 V_s ：浸透流の流速 (cm/s)、 d ：粒子関係の平均径 (cm)、 ν ：動粘性係数 (cm^2/s)、 μ ：粘性係数 ($Kg \cdot s/cm^2$)、 ρ ：水の密度 (g/cm^3)、($= 1.0$)、 Re ：Reynolds 数とすると、本実験の結果から、動水勾配の一番大きい場合は図-9より $i = 5$ 、間隙率は平均値で $n = 7.273\%$ 、不飽和透水係数 $k = 0.1515 cm/s$ とすると、(4)、(5)式より

$$V_s = k \cdot i / n = 0.0104 (cm/s)$$

$$Re = V_s \cdot d / \nu = 0.04 < 1$$

ただし、 $\rho = 1.0$ 、水温は $10^\circ C$ 、 $\nu = 0.013 (cm^2/s)$ 、 $d = 0.05 cm$ と仮定した。従って、浸透流は乱流となる限界値以下であることから、層流状態にとどまっているものに思われる。

次に、横方向の流れが加わる場合は、動水勾配 $i = 0.8$ で、前者と同一の条件で検討すると、 $Re \ll 1$ である。このことから、動的な力が加わる場合を除いては、土中の細粒子が乱され、流出の可能性は、ないものと推定される。

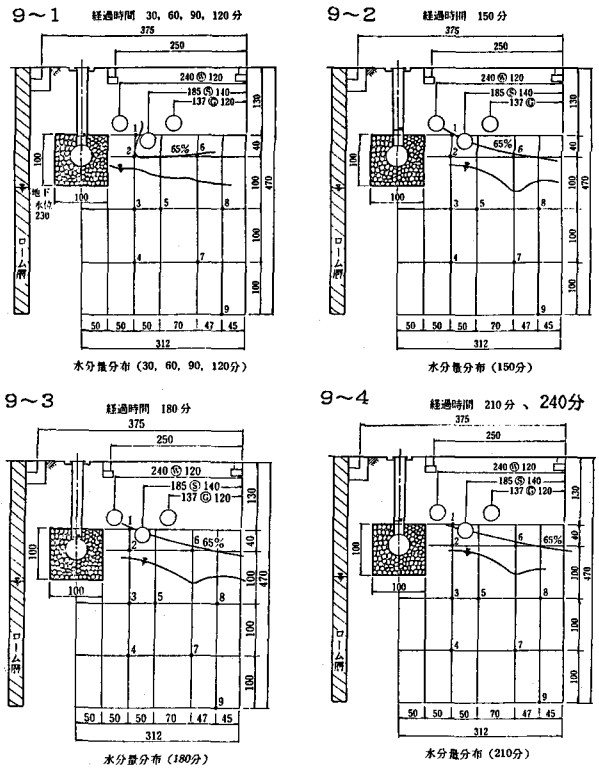


図-9 経過時間による分量分布 (環8)

7. 浸透能と浸透ますの評価

表-2に示すように、たて型とよこ型浸透ますの単位時間当りの注水量の差異はそのまま浸透能力のちがいを示すことになるが、よこ型浸透ますの場合、管周辺部のローム層を礫に置換している構造であることから、空隙部分が多いことに他ならない。そこで、たて型とよこ型浸透ますの能力を比較する上で同一条件のもとで評価する必要がある。

従って、いま、浸透量が底面積に比例することを仮定すれば、たて型の浸透面積は、 $A = 0.0314 \text{ m}^2$ 、よこ型の浸透面積は 4.0 m^2 と ($\#23$)、 3.0 m^2 ($\#16$) である。よこ型は、たて型の浸透面積の127.4倍、95.5倍に相当する。任意の水位Hだけ各々浸透したとすれば、よこ型は空隙率を48%とすると、たて型の浸透容量で61.1倍 ($\#23$)、45.8倍 ($\#16$) に匹敵することになる。

以上の考え方から、各注水実験ケース毎に注水終了後、即ち、最高水位に達してからの浸透量を累加浸透高 (D) mm として時間 (t) との関係性を求め比較検討を行った。累加浸透高と時間との関係を両対数グラフにしたものが、図-10である。単位時間当りの注水量はよこ型 ($\#16$)、たて型 ($\#26$) とほぼ、同じ場合である。図から明確なようによこ型の場合は注水終了時より時間経過とともに、ほぼ直線的に累加高が上昇しているのに対して、たて型の場合は、注水終了時より6~7分経過後に変化点 (Yield Point) が存在し、その後は浸透勾配は小さくなる事が分かる。他の全てのケースも同様な現象を示した。そこで、実験結果から(1)式のような関係式を求めることができる。

$$D = \alpha \cdot t^\beta \dots\dots\dots(1)$$

α : 注水後から $t = 1$ 分のときの累加浸透高 (mm) であり、初期浸透高に相当する。 β : 浸透勾配 (傾き)、D : 累加浸透高 (mm) を表す。そこで α 、 β を、たて型とよこ型の浸透ますの浸透能を評価する指標とすると、本実験での各ケース毎の α 、 β は表-4のよう結果となった。表中、 β_1 、 β_2 はたて型の場合の浸透勾配で、 β_1 が、Yield point までの値を示し、 β_2 はそれ以降の傾きを示す。

この現象は注水の場合、たて型浸透ますのストレーナー付近で乱流域が広がることから、損失が大きくなるためと考えられる。

8. おわりに

本稿では、雨水浸透ますへの間欠的に注水した場合の浸透ますトレンチ周辺部での浸透水の挙動を土中水分量で現象論的にまとめた。また、注入井型のたて型浸透ますと、トレンチ型のよこ型浸透ます

の浸透能について、累加浸透高と時間の関係から初期浸透高 α 、浸透勾配 β を求めた。とくに、 β はたて型、よこ型とも初期勾配 (6~7分まで) はほぼ同じ値である。しかし、たて型は全てのケースで浸透時間6~7分経過して、浸透勾配が変化点 (yield point) をもつことが明らかになった。今後は地下水の影響としての水質問題、又実際の降雨時の浸透現象を数量的に測定し、検討を加えてゆく予定である。

参考文献

- 1) 虫明功臣、桑原衛：トレンチ型雨水処理施設の浸透特性に関する研究、第27回水理講演会論文集、1983年2月
- 2) 土壌物理性測定法委員会編、土壌物理性測定法、養賢堂、1978

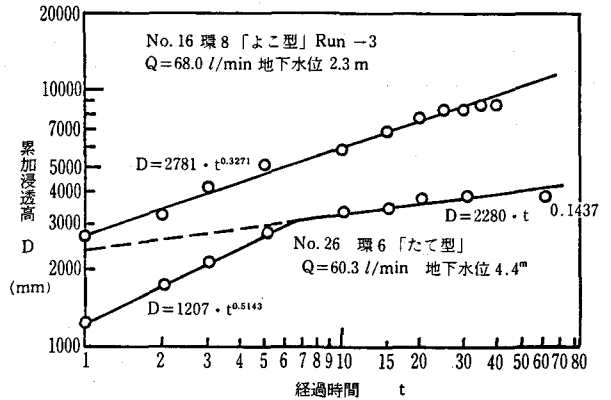


図-10 たて型とよこ型の比較

表-4 初期浸透高と浸透勾配

st. No.	浸透ますのタイプ	注水量 (l/min)	α 初期浸透高 (mm)	傾き β		R 相関係数
				β_1	β_2	
10 (環7)	「たて型」	Run 1 17.6	624	0.690	0.069	0.9636 0.9941
		2 25.0	726	0.613	0.104	0.9925 0.9557
		3 18.3	441	0.804	0.107	0.9934 0.9803
16 (環8)	「よこ型」	1 56.7	2,289	0.293	—	0.9968
		2 85.0	5,184	0.235	—	0.9968
		3 68.0	2,781	0.327	—	0.9934
23 (西戸山公園)	「よこ型」	1 67.5	3,127	0.548	—	0.9937
		2 150.0	7,892	0.484	—	0.9999
		3 72.0	1,306	0.945	—	0.9967
		4 90.0	2,395	0.725	—	0.9966
26 (環6)	「たて型」	1 60.3	1,207	0.514	0.144	0.9999 0.8245
		2 35.3	788	0.645	0.078	0.9991 0.8584
		3 40.3	1,006	0.532	0.015	0.9985 0.8783