

雨水浸透基盤における水収支に関する研究

Research On Water Balance On The Infiltration Pavement Basin Based On Long Term Observation

東京大学工学部 正員 市川 新
東京大学工学部 学生員 原田 茂樹

1. はじめに

都市の治水において、降雨時の雨水浸透が、その有効な手段として提案されているが、その効果に大きな影響を与えるのは、基盤内での雨水の貯留である。本研究では、大学構内に設置されている、雨水浸透実験施設のデータを利用して、基盤内の水分量の変化を考えた。具体的には、特徴的な4つの水分量、即ち、先行水分量、集水開始の水分量、貯留の最大量、集水終了時の水分量によりその変化のシュミレーション・モデルを提案した。また、そのモデルの検証としてライシメーターを作成し、その実測値と計算値の比較を行った。

2. 施設の説明

球場に設置されている実験施設では、2台のパーソナル・コンピューターによって、常時、降雨量、集水量、地下水位、土中温度などのデータが取得されており、そのデータはこの施設用に開発されたソフトによってファイル化され大型計算機に保存されている。浸透基盤の断面図は、図1のようになっており、遮水シートの条件や、れき層厚などを変えた基盤が図2の様に10、設置されている。それぞれの条件は表1に示す様である。基盤の大きさは、縦21m、横12mである。

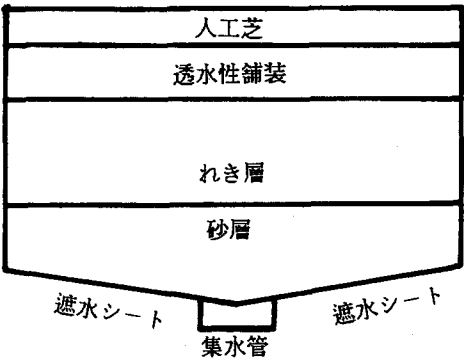


図1. 基盤の断面図

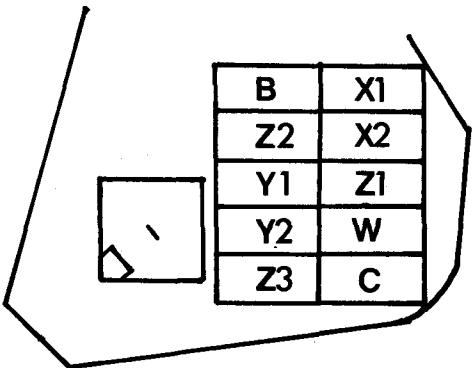


図2. 基盤の設置図

基盤名	Z 1	Z 2	Z 3	Y 1	Y 2	X 1	X 2	W	B	C
遮水シート の割合 (%)	0	100	0	20	40	100	100	0	100	100
れき層の 厚さ (cm)	30	30	30	30	30	30	30	20	10	25

表1 基盤の条件

3. 水分量変化のシュミレーション・モデルの提案

(1) モデルの条件

野球場のデータを解析した結果、基盤Z2内における水分量のマクロな変化について次のようなモデルを考える事ができた。そのモデルは次の(a)から(d)の条件で成立するものとする。

(a) 基盤Z2は、側面がトタン板によって完全に区切られており、下部には遮水シートが設置されている為、基盤からの流出は全て集水管に集水される。

(b) 基盤下部の砂層は、その厚さが毛管圧による水分上昇高より薄い為、常に飽和の状態である、とする。その為、水分量の変化は、れき層内の水分量変化のみを考えれば良く、れき層から砂層へ流出した水分は全て砂層から集水管へ流出する、と仮定する。

(c) 基盤内の特徴的な水分量の状態を、次の図3の様な水位のイメージで表現した。

1は降雨の先行水分量。

2は集水が始まる時の水分量。この量は、土壌の特性によって決るものであり、どの降雨についても常に一定であると仮定する。

3は貯留量の最大値。この値は降雨強度が砂層の浸透速度より大きい時、その差により記録される。

4は集水が終了した時の水分量。一般的には降雨終了後、更に数時間を経た時点での状況である。この水分量は降雨間の蒸発によって減じられ、次の降雨の先行水分量となる。

(d) 基盤内の水収支は、次の式に従う。

$$S_n = A_n + I_n - Q_n \quad A_{n+1} = S_n - E(n)$$

但し、 S_n = 降雨nにおいて貯留される量

A_n = 降雨nの先行水分量

I_n = 降雨nにおける降雨量

Q_n = 降雨nにおける集水量

$E(n)$ = 降雨nと降雨n+1の間の蒸発量

このモデルの特徴は、基盤内の水分量変化を4つの水分量で説明できる事である。また実測が困難な蒸発量、先行水分量においても、上記4つの水分量によって表現する事ができる。

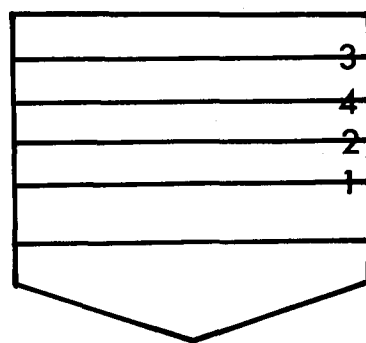


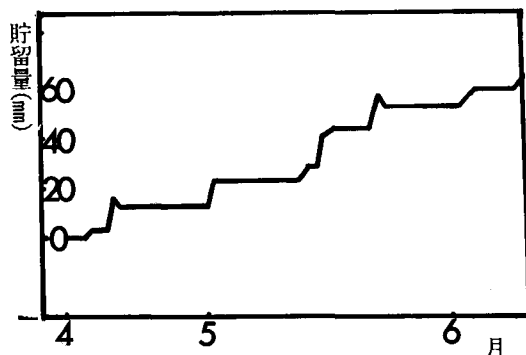
図3. 4つの水分量

(2) モデルの前提となった実測データの解析結果

この項では、蒸発量、及び先行水分量が実測データに表れている様子を示す。

1). 蒸発量の推定

まず、基盤内の水収支の因子を、降雨量、集水量、の2つのみと考えると、その差の貯留量を考える。即ち、前項の(d)における蒸発量を0として1日あたりの貯留量を計算し、スタートの日の先行水分量を0と仮定した後の貯留量の変化をフローとして捉えるのである。Z2において、昭和59年の4月から6月までをプロットした結果を、次のグラフ1に示す。このグラフ1において、貯留量は時間が経過するにつれ増加している。実際には、グラフ中の降雨も集水も行なわれていない水平の部分において、蒸発による減少がおきている事が考えられるので、この部分に蒸発量の値を試行錯誤的に与えてプロットしてみた。その中で



グラフ1. 蒸発を考えない時の貯留量

1. 4 mm/day の値をプロットしたものが、次のグラフ2である。このグラフは降雨中の貯留量の増加や、その後の減少をうまく説明しており、この時期における蒸発量の平均値がこの程度の値であった事がわかる。

2). 先行水分量の影響

まず、Z2における降雨量と集水量の関係を昭和59年、及び昭和60年の全降雨についてプロットしたものをグラフ3に示し、その結果から判る事を次の様に整理する。

a. グラフ3において、ほぼ直線的な相関をみることができる。

b. この直線は、 8.0 mm のあたりで横軸を切っており、これ以下の降雨量では、集水が起こらない事を示している。また、実際に、 8.0 mm 以下程度の降雨では集水がおこる事は少ない。

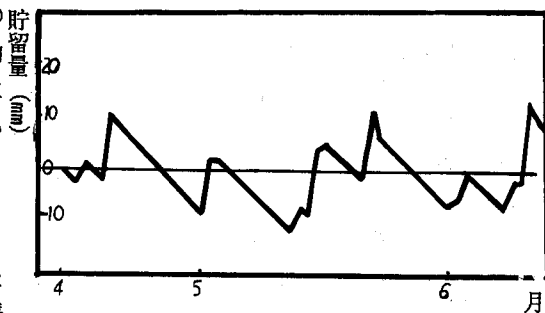
c. Z2における 8.0 mm 以上の降雨の平均では、 8.4 mm の降雨量が記録された後に集水が始まっている。即ち、水分量の不足分が補給された後に集水が開始されている事がわかる。

そこで、この補給分を全降雨量から除いて、直接、集水量に関係すると思われる「集水開始後の降雨量」に対する集水量をプロットしたものが、グラフ4である。

このグラフによれば、やはり直線的な相関が見出され、またその直線が原点を通っている。故に、この方法によって先行水分量の影響が削減でき、また、その影響が削減された後は、多くの降雨で同じ割合の集水量が記録されている事がわかる。この結果は、モデルの2の水分量が一定、という仮定の裏付けと考えられる。

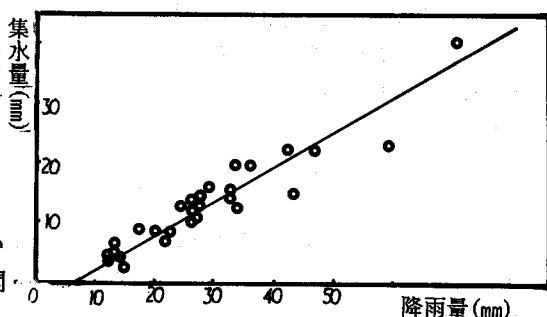
(3) モデルによる貯留量変化の計算値

前述のモデルによって、貯留量の変化をグラフ化したのがグラフ5である。方法は、縦軸に貯留量、横軸に日付けをとる。そして、最初に、集水の始った時刻とその時の貯留量をプロットする。この縦軸の値をここでは0として基準線を引いている。次に、集水開始まで必要だった降雨量分だけ貯留量が少い量に降雨開始時の貯留量（即ち、先行水分量=モデルの1）をプロットする。3及び4の貯留量は、降雨量と集水量の差を貯留量として連続的にプロットする事ができる。この作業を各降雨に行った後、連続した降雨の4と、

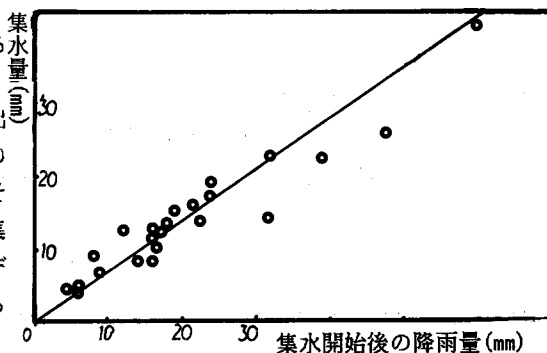


グラフ2. 蒸発量を 1.4 mm/day

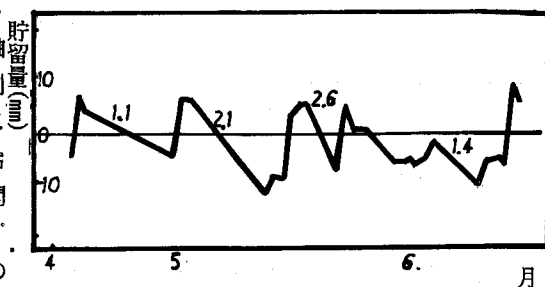
とした貯留量



グラフ3. 降雨量と集水量



グラフ4. 集水開始後の降雨量と集水量



グラフ5. モデルによる貯留量変化の計算値

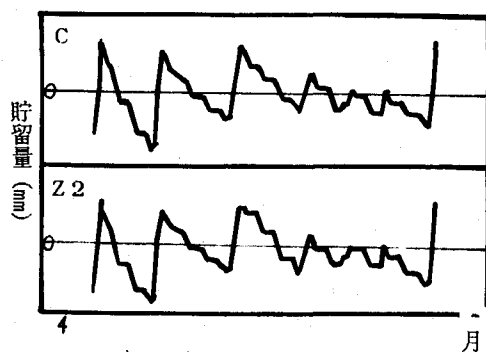
1を結んだ直線の傾きが、この間の平均的な蒸発による減少量を表す事になる。この方法で59年の4月から6月までの貯留量の変化をZ2においてプロットし、蒸発量の計算値はグラフ中に示した。また、降雨と降雨の間に集水のほとんど起らない様な数mm程度の降雨のあった場合は、その収支も含めて蒸発量を計算する。また、他の時期について、基盤Cと基盤Z2の比較をした物をグラフ6として示す。

4. ライシメーターによる検証

ここでは、前節のシュミレーション・モデルをライシメーターによって検証した結果を示す。ライシメーターは、野球場観測小屋の横に設置されており、集水量、全体の重量が自動計測されており、その水収支と水分量変化の絶対値を知る事ができる。ライシメーターの外形は次の図4に示す。

(1) 検証に使用したライシメーター

使用したライシメーターは2つであり、それぞれZ、Hと名付けた。HはZ2基盤と、HはC基盤と同じ構造に作成してある。それぞれの特徴は次の表3に示す。



グラフ6. CとZ2の比較

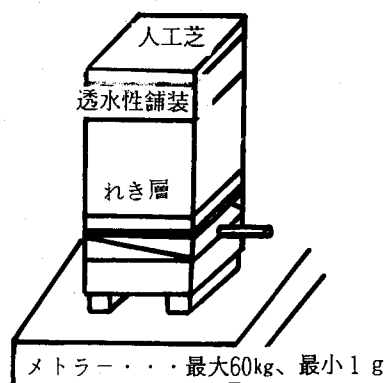


図4. ライシメーターの外形

	れき層の締め固め度	れき層厚	特徴
ライシメーターZ	96.3%	30cm	昭和59年作成。構造は実基盤と同じだが、水分保持力が弱い。
ライシメーターH	99.3%	25cm	昭和61年作成。構造のみでなく、れき層の締め固め度、粒度分布でも基盤の再現を図った。

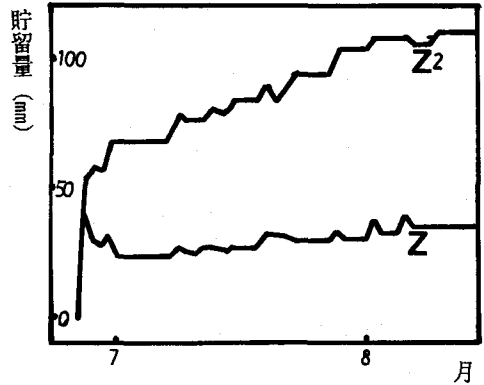
表3 ライシメーターZとHの比較

表3に示した様に、Hは締め固め度において基盤の再現が果せており、Zよりも再現性は高い。

ライシメーターと実基盤の比較としては、各降雨に対する集水量を比較した表4、表5、及び、グラフ1で行った、蒸発を考えない時の貯留量の変化を考えた、グラフ7、グラフ8を示す。

番号	降雨量 (mm)	Z 2の集水量 (mm)	Zの集水量 (mm)
8412	17.2	6.9	18.7
8413	25.0	8.1	22.7
8414	13.8	4.6	13.6
8416	12.6	4.4	11.0
8418	38.0	8.6	17.7
8419	22.2	8.2	19.8
8420	21.6	6.9	18.7
8421	49.1	7.7	14.9
8422	35.9	19.2	34.4
8423	25.0	21.7	21.0

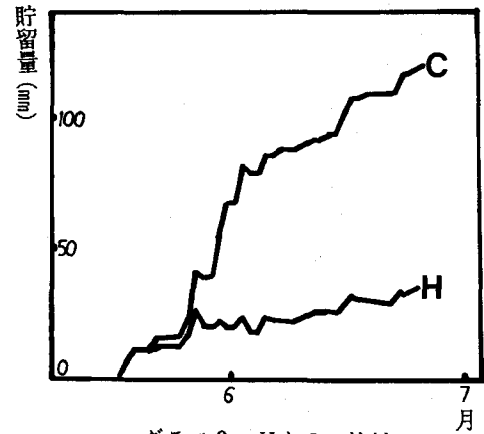
表4. 基盤Z2とライシメーターZの
集水量の比較



グラフ7. Z2とZの比較

番号	降雨量	Cの集水量	Hの集水量
8612	25.6	2.4	17.3
8613	68.8	41.1	69.4
8614	36.1	20.0	36.3
8615	14.6	4.7	9.2
8616	42.1	19.8	43.6
8617	210.7	71.4	221.2

表5. 基盤CとライシメーターH
の集水量の比較



グラフ8. HとCの比較

表4、表5の結果より、ライシメーターHにおいても、実基盤よりも集水量が大きくなっており、基盤の再現の為には、締め固めの他、集水の方法、ライシメーターの大きさなど課題が残されている事が判ったが、グラフ8に見られる様に、貯留量の変化の状態は相似であり、集水量の大きさを水収支の中で考慮すれば、十分、モデルの検証として使用し得る事がわかる。そこで、次の様に、検証をすすめた。

(2) ライシメーターによる検証

1) 集水開始時の水分量が一定という仮定について

86年度の降雨について、ライシメーターHにおける集水開始時の重量値は、次の表6の様になっている。これによれば、その値はほぼ一定となっており仮定の裏付と考えられる。8617の値が大きくなっているが、これは、集水開始前の降雨強度の高かった為に、集水に寄与しない降雨量が集水開始前の水分量として含まれている為と思われる。

8612	49409 g
8613	49427 g
8614	49463 g
8615	48467 g
8616	49548 g
8617	49762 g

表6. 集水開始時の水分量

2) モデルの計算値と実測値

ライシメーターにおける降雨量と集水量にモデルをあてはめ計算した値と、重量の変化を降雨量のmm単位に換算したものの比較を行った。86年の6月から8月までの比較の結果は次のグラフ9の様になっている。

このグラフによれば、計算値は、実測値を良く表現している事がわかる。両者の開きの大きい所は、降雨の接近している所であり、この状況下における蒸発量の評価が課題として残される。

5. 考察

1) 4つの水分量の分布状態

4つの水分量を、前述のモデルにおいては、水位のイメージで表現したが、実際には、その分布状態は、図4のようになっていると考えられる。この図では、縦軸に基盤の高さを取り、横軸には含水率を取っている。1の先行水分状態では、土壌内の鉛直水分分布に従った形で分布しており、その後は上からの水分の浸透によって、下部の含水率の高い部分の厚さが増していき、その厚さが、基盤の毛管圧による上昇高さを超えた瞬間に集水管への流出が始まる事になる。その為、この時の水分分布は、2として示した曲線のようになると思われる。また、降雨強度の高い時には、図5で示すように表面部にも含水率の高い部分が存在する。この状態で、表6の降雨8617のように集水開始時の水分量が多くなっている場合が説明できる。

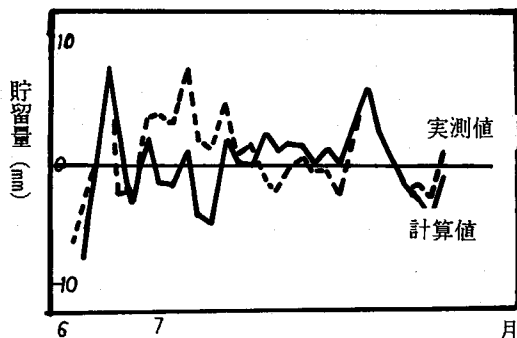
2) 集水が行なわれている時の水分状態

集水開始までの降雨量を集水開始の為の補給量と考えた時、その量を引いた「集水開始後の降雨量」と集水量の間には、 $Y = 0.75X$ という直線的な相関が存在する事はグラフ4において既に述べたが、その時の状況は次のように説明できる。

- 前項で述べたように、れき層の水分保持力を超えた瞬間にれき層から砂層に水分が流出する。
- この水分量を超えた後は、先行水分量の大小による影響は既に消え、どの降雨に対しても、図4のような同様の水分量変化がおこる。
- 図4の3の水分量において、貯留量の最大値を記録した後は、れき層の上部の空隙に水分が保留され、2の水分量の状態まで戻らず、4の水分量を記録するので、グラフ4の直線は、 $Y = 1.0X$ にならない。
- 4の水分量は、表面部での蒸発や下方への浸透によって、図4に示した形になる。

参考文献

- 市川他「浸透基盤における雨水の挙動に管する実験的研究」水講第30回
- 市川、原田「雨水透水施設の評価」土木第41回



グラフ9. モデルの計算値と実測値

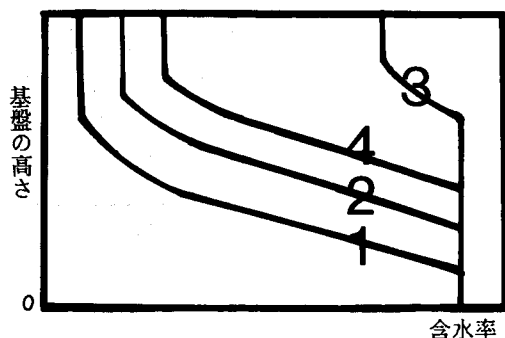


図4. 4つの水分量の分布状態

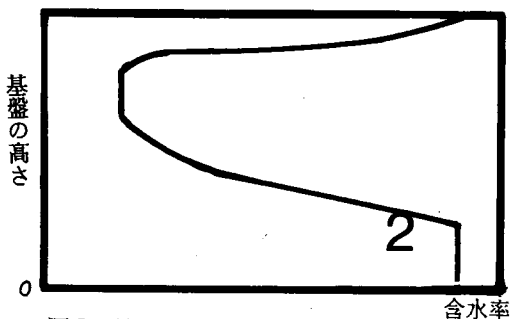


図5. 降雨強度の高い時の2の水分分布