

不飽和土中の水分排除による都市流出のピーク低減効果に関する基礎研究
Peak reduction of surface and groundwater runoff in urban area by the use of
a new drainage system to lower the moisture content in surface soil layer

埼玉大学 工学部 正会員 渡 辺 邦 夫
" " 大 矢 直 和

はじめに

都市における強い降雨時の流出ピークを低減するため、最近、浸透性舗装や浸透性パイプの設置などが計画されるようになってきた。この考え方は、基本的には、降雨を表土上層部の不飽和帯中に一時貯留し、無降雨時にゆっくりと流出させることである。一般に地下水流出は、表面流出に比べてはるかに遅いから、この方法により流出ピークを低減させることができる。しかしながら、表土上層部の貯留効果はこの上層部の降雨前飽和度に大きく影響されることに注意すべきである。仮りに、飽和度が 100 % に近ければ、降雨を表土中に一時貯留することは不可能である。したがって、降雨の浸透・貯留を促進させると同時に、次の降雨に備えて、貯留した水なるべく速やかに排水する策が必要となるはずである。いわば、先行降雨の影響を小さくすることである。本研究は、降雨時に表土上層部の不飽和帯中に貯留された水を降雨後なるべく速やかに排水する方法を考え、その流出ピーク低減に与える効果を、室内実験と、表面流出量を考慮する 3 次元飽和 - 不飽和浸透流解析によって基礎的に調べたものである。

1. 対象とする地形・地質条件と地下水排水促進の考え方

今回の研究の主たる対象とする地域は関東平野である。周知のように、関東平野は、洪積台地と沖積低地が複雑に混在していることによって特徴づけられる。洪積台地上部は関東ローム層によっておおわれている。図-1 は、浦和市北東部にみられる台地の典型的な露頭写真を示す。洪積シルト層の上をほぼ水平に、厚さ 2 m 程度のローム層がおおっていることがわかる。下部シルト層は固結度が高く難透水層となっている。一方ローム層はシルト層に比べはるかに透水性が良い。そのため、地下に浸透した降雨は主にローム層中を流下すると考えられる。この写真にみられる基本的な地質条件は単に浦和市ばかりでなく、東京北部まで含んだ広い地域に認められるものである。したがって一般性の高い一つの台地の地質モデルとして、図-1 に示される状態を考えることは妥当であろう。

図-2 は、台地・低地部を総合的にみた模式的断面図である。沖積低地内に河川がある。台地部に降った雨は、台地表面もしくはローム層中を流下し、沖積低地内の河川に入る。一般に言われているように、表面を流下する水による流出のピークは、地下水流出ピークに比べはるかに大きくまた速くあらわれるから、台地上の表面流出分の多くを地下に浸透させることによって、全体的なピークを低下させることができる。この時、地下浸透量は台地表面部の飽和度に影響されるから、あらかじめ表層部の水を排水しておくことが必要である。換言すれば、先行降雨の影響をなるべく小さくしておくことが重要となるはずである。このことを考慮して、今回、表層の水分を排水する方法を考え、その効果を調べた。



図-1 浦和市北東部にみられる典型的な台地上層部の地質

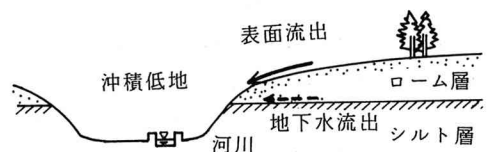


図-2 対象とする地形・地質の概略

図-3,にとりあげる排水システムの概略図を示す。このシステムは、ローム層に対応する上層の地下水を集めるための「浸透トレンチ」と、トレンチ内の水を台地崖面や、他のトレンチに運ぶ「浸透パイプ」より成る。トレンチ、パイプ共、種々の多孔体により充填されている。この方法によれば、もともと台地崖面上にあった浸出面に加え、高度の低い場所の「浸透パイプ」端面より水を排水しうることになり、排水効果が増大すると考えられる。「浸透トレンチ」「浸透パイプ」に充填する多孔体材料は、毛管力、透水係数を考慮してより排水効率の高いものを選ぶことができる。以下、この排水システムの流出ピーク低減に与える効果を室内実験と数値解析によって調べる。

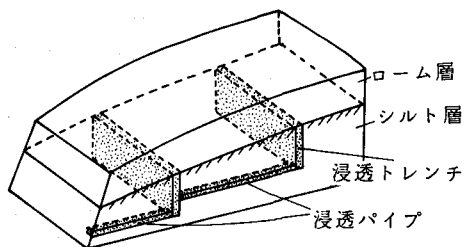


図-3 排水システムの概略図

2. 実験

用いた実験装置の模式図を図-4に示す。まず不透水板により斜面がつくられ、その上にローム層に対応する厚さ20cmの表土層がのせられる。表土層下端面は、崩壊しないよう金網でおさえられている。このモデルは実際の台地地質を考えると、下部のシルト層を不透水と考えていることになる。全体のモデルは、中央の隔壁により図に示すようにA、B二つの部分に分けられる。このうちB部には表土層下部に「浸透トレンチ」「浸透パイプ」のシステムがつくられる。一方、A部にはこのような排水システムがつくられていない。降雨は注射針方式により上方から両方の部分に与えられる。したがって、排水システムの降雨流出に与える影響を調べることができる。モデルの寸法や斜面勾配などの諸量を図-4にあわせて示す。実験モデルは確かに小さい。しかし、排水システムの効果をメカニズム的にみるには十分と考えた。実験は、表土として標準砂、ろか砂、ローム（攪乱試料）などを用いた。ここでは、性質が良くあらわれた、標準砂を用いた結果について述べる。

図-5は実験中の降雨の与え方を示したものである。約1ヶ月間内にR-1、R-2、R-3の3回の降雨を与えた。各々の平均降雨強度(R_I)、降雨継続時間(R_D)を図中にあわせて示す。また、R-1降雨の約1週間前に約25mm/hの降雨を定常的な流出がおこるまで与えた。R-2とR-3の間では、図-6に示す6点の最上部から土壌試料を採取し、含水比(砂の乾燥重量に対する水分重量の比)変化を調べた。図中にみられるように①、②、③点が排水システムを設けたB部にあり、④、⑤、⑥点がシステムのないA部にある。またR-3の降雨終了から20時間後に、図-6の各位置から深さ方向に3点ずつ試料を採取し、A、B部の含水比分布の相違を調べた。

図-7(a),(b)は、それぞれR-2、R-3降雨に伴う地下水流出特性を片対数紙上に示したものであ

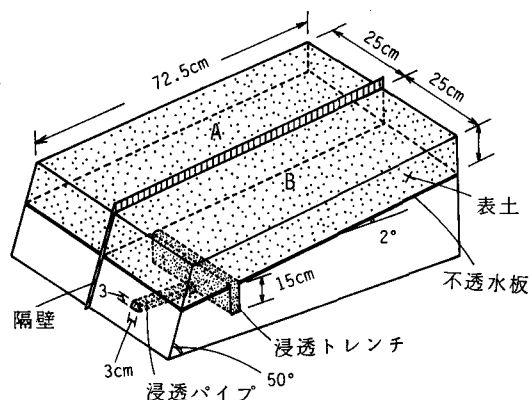


図-4 実験装置模式図および寸法

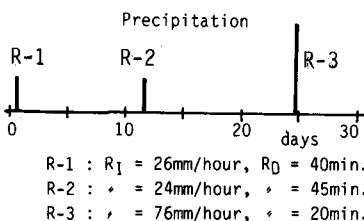


図-5 実験で与えた降雨パターン

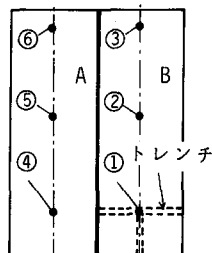


図-6 試料採取場所

る。各図共、実線が排水システムを設けたB部からの流出量変化であり、破線がA部からの流出量変化である。流出はすべて地下水流出であり、表面流出は生じなかった。注射針方式による降雨の分布にややばらつきがあり、A、B両部の降雨流入量は必ずしも同じでない。そのため、ほぼ流出量が定常となった。図-7(a); 25分、(b); 15分以後の流量は一致していない。このような問題はあ

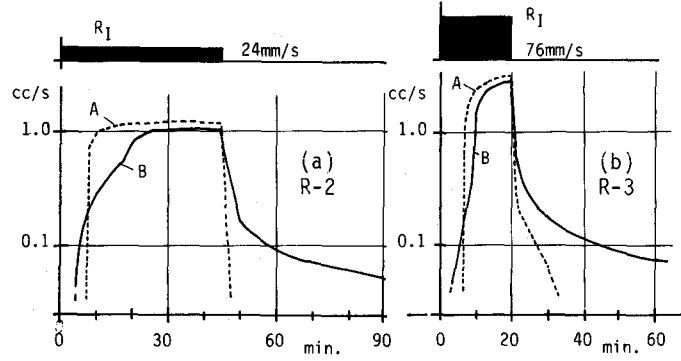


図-7 R-2、R-3降雨に伴うA部(破線)、B部(実線)

からの流出特性。(a)はR-2、(b)はR-3である

ものの、図からいずれの降雨に対しても、流出はまず、排水システムを設けたB部から開始することがわかる。A部からの流出は開始は遅いが増加率が大きく、定常流出になるまでの流出流量はB部に比べて大きい。また降雨停止後を見ると、A部からの流出が急速に終了するのにに対しB部からの流出が長く続くことが明瞭に認められる。このことから、排水システムは、降雨後にゆっくりと表土中の水分を排水する性質を持つことがわかる。表土中の水分が多く排水されるため、次の降雨時に飽和度が低くなっており、流出開始は早いものの、降雨が貯留されるため、流出量の立ち上がりが遅く、定常流出に達する前の流出量は小さくなるわけである。したがって、もし降雨が、流出が定常になる前に終了したならば、ピーク流量は排水システムがない場合に比べてより小さくなることが期待される。

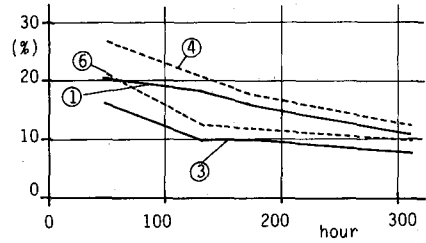


図-8 R-2降雨後の図-6中各位置の含水比変化

図-8は、R-2以降R-3までの、図-6に示す①、③、④、⑥位置表層部の含水比変化をみたものである。実線はB部、破線はA部である。前述したように、各部の降雨流入量に少し差がありその点問題も残るが、排水システムによって表層部の含水比が小さくなっていることがわかる。図-9は、R-3の20時間後の表土内含水比分布を深度方向に示したものである。図中の数字は図-6の試料採取位置番号に対応している。この図からも、実線で示したB部の含水比分布が、破線で示したA部のそれより全体的に小さくなっていることがわかる。降雨後の含水比が小さいことは、次の雨に対する貯留効果が大いことであり、前述したような流出特性を生ずるわけである。それゆえ、今回の小スケール実験でみる限り、排水システムの効果は大いといえる。

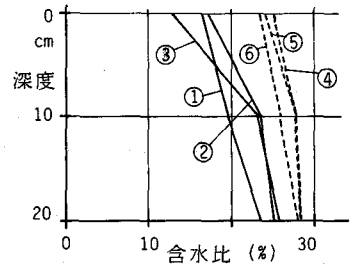


図-9 R-3降雨後20時間の含水比分布。(数字は図-6に同じ)

しかしながら、この実験は、モデルのスケールがやや小さすぎることや、表面流出がうまく再現できないなどの問題がある。そのため次に、よりスケールの大きい場を対象にし、表面流出量を考慮する3次元飽和-不飽和浸透流解析によって流出現象を再現し、排水システムの効果を調べた。

3. 3次元解析による排水システムの効果の検討

今回用いた解析法は、以下に示す3次元飽和-不飽和浸透流の基礎方程式を、有限要素法で解くことを基礎にしている。^{1), 2), 3), 4)}

$$C(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z}) + q \dots \dots (1)$$

ここに、 t は時間、 x 、 y は水平方向座標軸、 z は鉛直方向座標軸、 ϕ は毛管力を考慮したポテンシャル、 θ は飽和度、 $k(\theta)$ は不飽和透水係数、 $C(\theta)$ は比水分容量、 q は降雨流入率である。解析は、対象領域を2次元パラメトリックな6面体要素に分割し、ガラキン法によった。

今回解析の対象とした領域とその要素分割の概略図を図-10に示す。図中あわせて寸法を示した。斜面の大きさは、平面的にはほぼ $8\text{ m} \times 32\text{ m}$ である。表土厚さは 1.4 m 、浸透トレンチの深さは表面より 3.8 m 、浸透パイプ断面は $1.0\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ である。解析対象場

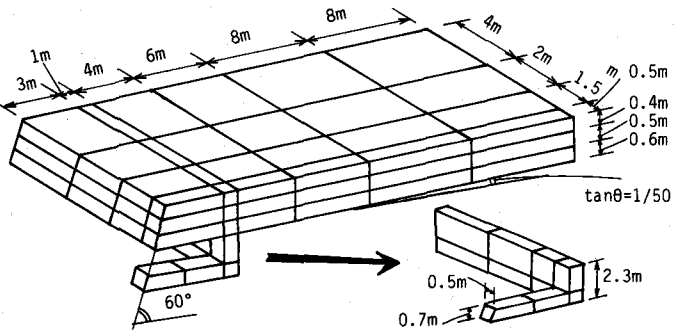


図-10 計算対象領域と要素分割概略図 (82要素 567 節点)

には数多くの浸透パイプが設けられていることを想定し、計算領域は、一つの浸透パイプ中心軸面から隣り合う浸透パイプとの中間までとしている。そのため、図-10に示される浸透パイプ断面は $0.5\text{ m} \times 0.7\text{ m}$ である。要素数は82、総節点数は567である。図-11は、解析領域およびその要素分割状態の平面図(a)、断面図(b)、である。

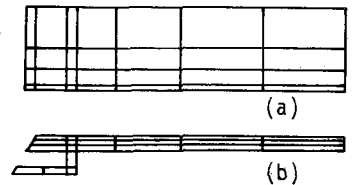


図-11 領域の平面図(a)と断面図(b)

解析は3ケース行った。ケース1は、図-12(a)に示す浸透トレンチ部と浸透パイプ部の飽和透水係数を地山部より大きくした場合である。ケース2は図-12(b)に示すように浸透トレンチ、浸透パイプに加えて斜面中に飽和透水係数の大きい集水トレンチを設け、排水をさらに促進するものである。ケース3は比較のため計算した、表土のみで排水システムを設けない場合である。飽和透水係数はローム層を想定し地山(表土)部が 10^{-3} cm/s 、浸透トレンチ、浸透パイプ、集水パイプ部を 10^{-2} cm/s とした。

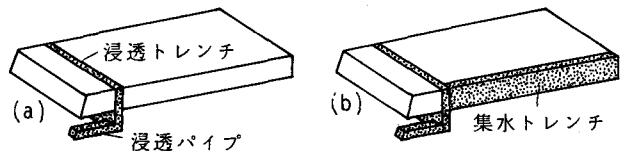


図-12 解析ケース((a); ケース1、(b); ケース2)

飽和 - 不飽和浸透流解析では、飽和度(θ)、不飽和透水係数 $k(\theta)$ 、毛管力水頭(h_c)の関係を与えることが必要となる。今回それを図-13に示すように設定した。この設定は仮定であるが、実際のローム層の関係としてさほど一般性を失わないものとする。

つぎに問題となるのは、表面流出量の計算である。表面流出は、降雨量が、地表から地下への浸透量を越えたところで発生する。そのためまず単位時間あたりの地表面からの浸透量を計算し、その量と単位時間の降雨量との差が表面流出量であるとした。実際の現象では、地表面にあふれた降雨が、台地表面を流れて台地崖面に達するまでに時間がかかり、また流下する途中で地下に浸透することも

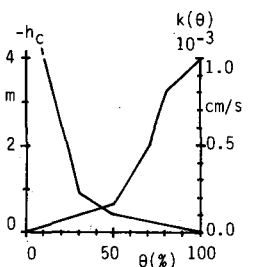


図-13 飽和度、毛管力水頭、不飽和透水係数の関係

ある。しかし、今回の解析では、地表面にあふれた水はすぐに台地から流出すると仮定した。このことは、地表面上の水が側溝や下水管に流入し急速に流下することを想定したものである。

計算境界条件は、表土の台地崖面、および浸透パイプ下端面を自由浸出面条件とし、地表面上に降雨を与えた。また、他の側面は流入出境界とした。いずれのケースも、初期条件として浸透パイプ下端面の最低標高に等しいポテンシャルを全節点に与えた。つまり地下水流れない条件である。

解析結果を図-14に示す。図は、最初に 5 mm/h の降雨を1日半与え、約3日後再び 15 mm/h の降雨を12時間与え、さらに約8日後 10 mm/h の降雨を12時間与えた場合の計算総流出量の変化を片対数紙上に示したものである。図中、実線はケース1、点線はケース2、破線はケース3の結果である。いずれのケースも、2回目、3回目の降雨時に表面流出が発生し、急激に流出量が増加していることがわかる。なお、2、3回目の定常流出量はそれぞれ 1 l/s 、 0.67 l/s であり、ケース3のみが降雨終了直前に定常流出となっている。図から、降雨終了後の流出(地下水流出)量は、いずれの降雨に対しても、排水システムのないケース3が最も小さいことがわかる。ケース1とケース2では、あまり大きな差はみられない。一方、2回目、3回目の降雨に対するピーク総流出量は、いずれもケース3が最も大きくなっている。ケース1、ケース2の総流出量は、ケース3に比べ2~3割小さくなっている。ケース2のピーク流量は、ケース1より小さくなっている。

図-15は、図-14に示した2回目の降雨前後の流出を表面流出と地下水流出に分けてあらわしたものである。図はケース1(実線)とケース3(破線)の結果のみを示している。図から、降雨開始後約5時間でいずれのケースも表面流出が始まり、急速に増加していることがわかる。ピーク表面流出量は、ケース3がケース1より大きい。降雨終了後、表面流出は急激に低下し、0となる。これは表面を流下するのに要する時間を考慮していないためである。

つぎに、地下水流出量をみてみる。前述したように降雨前において、ケース3の地下水流出量はケース

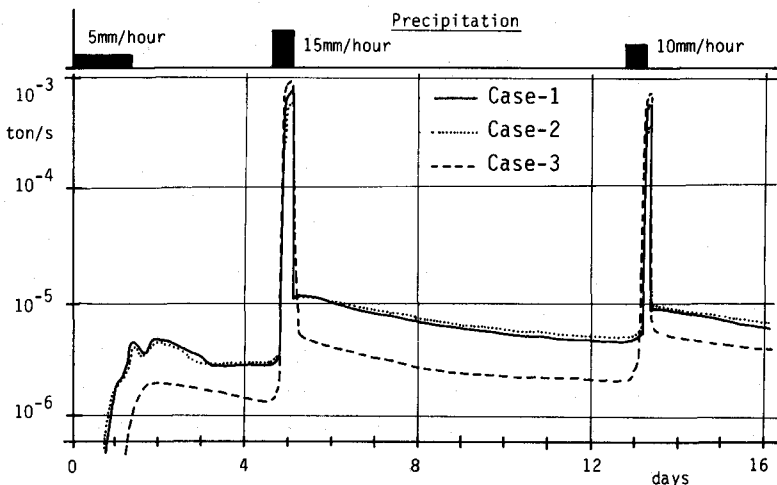


図-14 流出量変化の解析結果

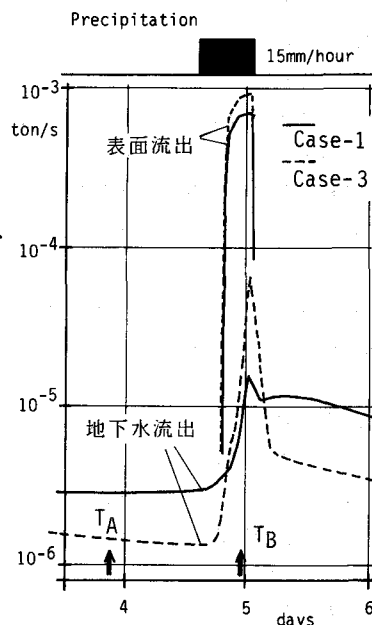


図-15 2回目の降雨に伴う地下水流出量と表面流出量の変化

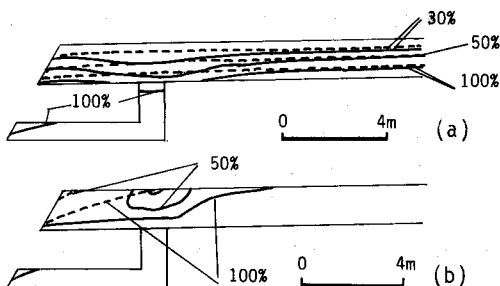


図-16 図-15中 T_A 、 T_B 時点での飽和度分布

ー1に比べてはるかに小さくなっている。しかし降雨が続くにつれ、ケースー3の流量増加がケースー1に比べて大きくなり、降雨終了時には、ケースー1よりかなり大きな地下水流出量となっている。降雨終了後ケースー3の地下水流出量は、ケースー1に比べて急速に低下する。図-14、図-15の結果を総合的にみると、排水システムを設けたケースー1、ケースー2では降雨終了後の地下水流出がケースー3に比べて大きく、土中の水分を低下させる効果を持つことがわかる。この効果により、降雨時のピーク流量が低下したと考えられる。ただ、地下水流出量をみる限り、ケースー1とケースー2との差はあまりなく、ピーク流量はやや違うものの、今回の解析では集水トレンチの効果はあまり顕著ではない。

さらに図-16は、図-15中の矢印 T_A 、 T_B 時点における、浸透トレンチ、浸透パイプ設置場所付近の飽和度分布をケースー1(実線)、ケースー3(破線)についてみたものである。いずれもケースー3の飽和度がケースー1より大きくなっている。とくに、降雨の与えられている T_B 時点においては、ケースー3が崖面付近を除いてほぼ飽和しているのに対し、ケースー1では、浸透トレンチ付近で不飽和域が形成されていることがわかる。このことから、表土内飽和度の低下が、流出量低下に寄与することが示される。

4. 結論と今後の問題

今回の研究により、表土内の地下水を無降雨時に排水し、表土内の飽和度を低下させることによって、次の降雨に伴う流出ピークを、地下水流出成分、表面流出成分共に低下しうることが明らかとなった。また、表土内飽和度の低下が、浸透トレンチ、浸透パイプを組み合わせたことによって促進されることが示された。さらに、表面流出量を考慮しうる3次元飽和-不飽和浸透流解析を用いて、今回設定した領域程度の大きさの地域流出解析がなしうることが明らかとなった。この手法にさらに蒸発散量などを導入すれば、より妥当な解析が可能となる。しかしながら、今回研究に用いた実験装置は、現象のメカニズムを把握するには秀れているものの、実際現象との対応を考えるにはやや小さすぎるきらいがあること、数値解析において、地面上あるいは、排水溝、下水管内の流れ⁵⁾を考慮していないことなどの問題が残っている。これらの問題については、やはり、現場実験を通したより綿密な検討が必要である。この現場での検証が今後の最も大きな問題点であるとする。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、いろいろと御教示いただいた東京大学玉井信行教授、同茂枝隆助教授に感謝いたします。また本研究は、科学研究費(代表 東京大学高橋裕教授)の補助を受けたものであることを記し、関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 渡辺邦夫、今井久; 斜面モデル内の水みち形成に関する基礎研究、第28回水理講演会論文集、pp. 527 ~ 533, 1984.
- 2) 渡辺邦夫、今井久; 水みちを持つ斜面内の非定常地下水流れの性質、応用地質、vol. 25, p. 1 ~ 9, 1984.
- 3) 今井久、渡辺邦夫: 3次元浸透流解析によるモデル斜面内水みちの降雨流出特性に与える影響評価、土木学会年講、1984.
- 4) 渡辺邦夫、中村俊六; 3次元飽和-不飽和浸透流解析による山地小河川流出特性把握の試み、土木学会年講、1984.
- 5) Stephenson, D.; Stormwater Hydrology and Drainage, Developments in Water Science, 14, Elsevier, pp. 1 ~ 276, 1981.