

II-31 大空隙を有する土層内の不飽和浸透流の特性に関する研究

北海道大学工学部 正会員 藤田 睦博
北海道大学工学部 学生員 萩原 敬也
北海道 開発局 正会員 許士 達広
北海道大学大学院 学生員 高橋 一浩
北海道大学工学部 学生員 Siamak Budaghpour

1. 本研究の目的

これまでに降雨流出過程については数多くの実験・研究がなされてきた。しかし、根跡やひび割れのように土層内に大きな空隙の存在を考慮し、それらが流出量・土壌水分移動に与える影響について調べられたものは少ない。空隙は空気・水の通りが非常に良いため、これが流出量・土壌水分移動に及ぼす影響は無視できないのではないと思われる。例えば、空隙の存在により、

1) 土層内部においても常に十分な空気が供給・放出されることにより、水の浸透速度が増し、降雨開始後から流出までに要する時間が短縮される。

2) 水が空隙内に染み出し、やはり降雨開始後から流出までに要する時間が短縮される。

などが、予想される。本研究は、それらを確かめるとともに、土層内における空隙の有無が、流出状況及び土壌水分移動状況に与える影響を明らかにするために行った。

2. 実験の概要

2-1. 実験装置

本実験で用いた主な装置は、図-2-1に示すように、縦・横30cm、高さ45cmの亚克力製の筒を縦に3段重ねたものと降雨発生装置により構成されている。空隙には、直径3.3cm、長さ113cmのプラスチック製円筒状のアミを用いた。なお、砂の流出を防ぐため、アミのまわりに包帯を巻いた。降雨発生装置は注射針42×42(=1764)本により雨滴を発生し、24cm下方に位置する供試体表面にほぼ均等に降雨を与える。降雨強度はオーバフローさせる高さ(図-2-1中のh)を調節することにより何段階かに調節できるようになっている。また、気泡の発生などにより雨量強度はどうしても変化してしまうので、降雨開始時と停止時の平均値を雨量強度とした。供試体の底部には、砂は流出させず、空気・水は簡単に流出させる素材のものを全面に敷いた。各継目には空気・水の流出を防ぐため、グリス・粘土を詰め込んだ。供試体には、粗砂として珪砂4号・細砂として珪砂7号を用い、なるべく一様なものを作成するため、水締めを行った(それでも細砂では層状のシマがみられ、締め固め方法により実験結果に違いがでるかもしれないが、今回はこの方法以外行っていない)。

土壌内負圧はテンシオメーターにより測定したが、圧力センサーの初期値にはバラツキがあるため、大気中(999mb)での値を零とすることによって補正をおこなった(以下のグラフは全て補正済みのものである)。テンシオメーターの位置は、図-2-1に示されているように、供試体上端から5, 20, 40, 55, 70, 90, 105cmのところに合計7つセットし、上から順に1~7と名付ける。

2-2. 実験方法

実験の手順を以下に示す。

I 砂種・空隙の有無・降雨量の設定。

II 降雨量の測定(今回用いた降雨装置では降雨量が定常に達したと判断されるまでに約2時間かかった)。

Experimental Study on the Unsaturated Flow in Soil Column with Vertical Void

by Mutuhiro FUJITA, HAGIWARA Keiya, TATUHIRO KYOSI, KAZUHIRO TAKAHASHI and SIAMAK BUDAGHPOUR

Ⅲ 降雨開始・土壌内負圧測定開始・流出量測定開始、以上の3つを同時に行う。

Ⅳ 降雨停止。

Ⅴ 降雨量の測定。

降雨量は降雨発生装置と供試体の間に樋を入れ、樋上を流れてくる水をメスシリンダーにとり測定した。

土壌内負圧は供試体にさされたテンシオメーター（各位置は図-2-1参照）により測定した。

流出量は、流出水をビニールパイプ（内径1cm）によりハカリ上に設置した桶に導き、その値をビデオにとることにより測定した。なお、流出量の変化の激しい部分ほど細かく記録することにした（1,5,10,20,30分ごと）。

また、降雨は流出量が定常に達するか、供試体表面の半分以上に水たまりが生じた時点で停止した（水たまりができたのは後述3-Bのケースだけであった）。

2-3. 実験ケース

実験のケースを表-2-1に示している。

- ・乾燥期間が珪砂4号の初期値に与える影響は、1日以上なら変化なかった。
- ・土層厚（125cm）・締め固め方法（水締め）・空隙（大きさ・素材）は統一した。

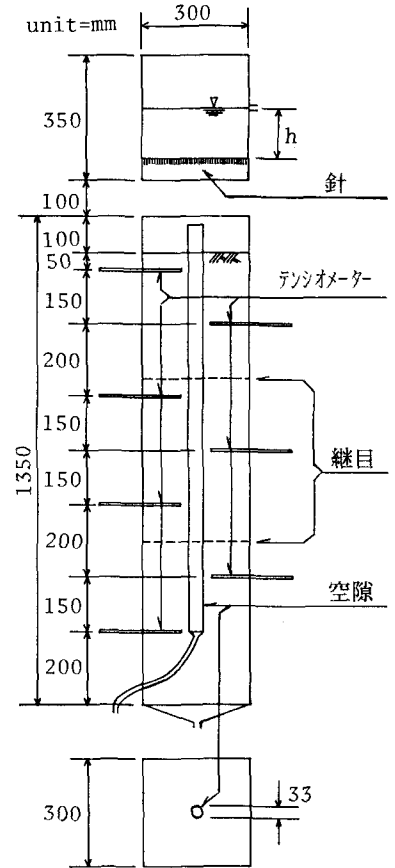


表-2-1: 実験ケース

図-2-1: 実験装置

実験ケース名	空隙の有無	供試体	降雨強度(mm/hr)	降雨継続時間(分)	乾燥時間(日)
1-A	有	珪砂4号	4.5	180	3
1-B	無	4号	4.2	210	4
2-A	有	4号	11.5	390	1
2-B	無	4号	11.5	420	1
3-A	有	7号	5.0	180	1
3-B	無	7号	4.4	180	1
4-A	有	7号	2.4	360	1
4-B	無	7号	23.5	360	1

3. 実験結果

3-1. 流出ハイドログラフ

図-3-1～図-3-4は流出ハイドログラフの測定結果を示している。いずれの図も実線は空隙有り・点線は空隙無しを示している。また、ここでは降雨強度40～50mm/hrを強雨・10～13mm/hrを弱雨・22～25mm/hrを中雨と呼んでいる。

これらの図より得られた結果を以下にまとめる。

- ① 空隙を有する方が、流出量の最大値は大きい。
- ② 空隙を有する方が、立ち上がるまでに要する時間は長い、等しい（等しいのは図-3-1の粗砂強雨のみ）。
- ③ 空隙を有する方が、立ち上がり方が急、等しい（等しいのは図-3-1の粗砂強雨のみ）。

- ④ 細砂強雨を除き、空隙を有する方が、ピークに達するのがはやい(細砂強雨でも3-Bで2度目のピークの方をとるなら同様のことがいえる)。
- ⑤ 1-A<粗砂強雨空有>と3-A<細砂強雨空有>のグラフはほぼ一致する。
- ⑥ 3-B<細砂強雨空無>のグラフはピークが2つある(1つ目は降雨中にもかかわらずピークに達するとすぐに下降する)。
- ⑦ 3-B<細砂強雨空無>では、立ち上がりまでに要する時間が異常に短い。
- ⑧ 4つの比較のうち最も空隙の影響の少ないのは図-3-1の粗砂強雨であり、最も影響の大きい(重ねたグラフのズレが大きい)のは図-3-3の細砂強雨である。

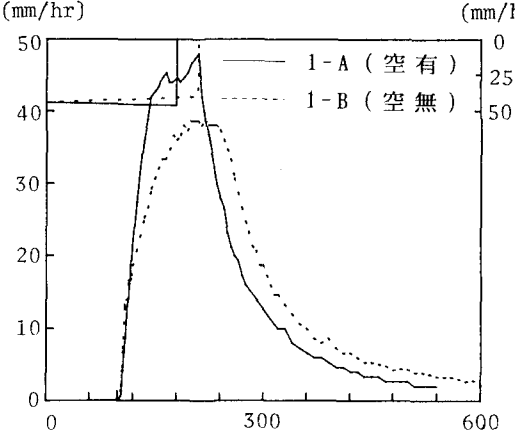


図-3-1:ハイト・ロク・ラフ<粗砂強雨>(min)

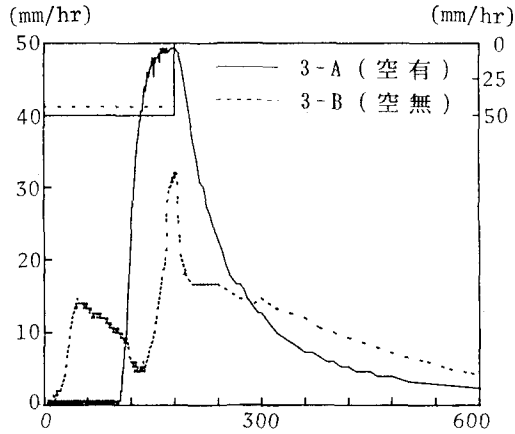


図-3-3:ハイト・ロク・ラフ<細砂強雨>(min)

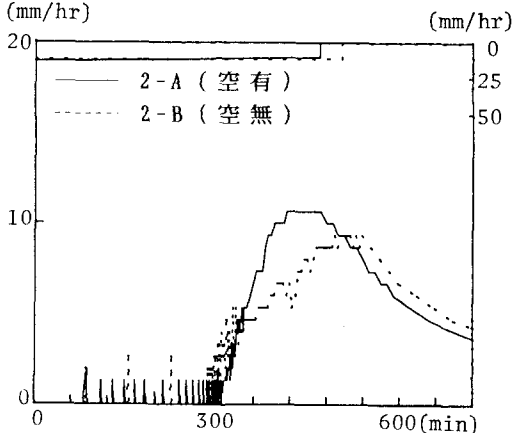


図-3-2:ハイト・ロク・ラフ<粗砂弱雨>

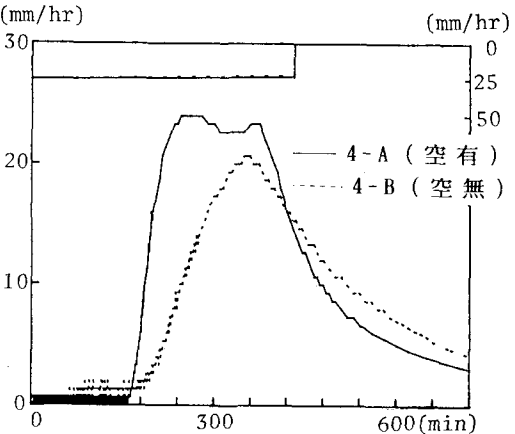


図-3-4:ハイト・ロク・ラフ<細砂中雨>

表-3-1:
実験結果

実験ケース名	立ち上がりまでに 要する時間(分)	最高流出量(mm/hr)	空隙からの総流出量(cc)
1-A	105	48	28
1-B	105	39	-
2-A	310	11	21
2-B	305	9	-
3-A	105	49	20
3-B	10(130)	15(32)	-
4-A	160	23	27
4-B	55	21	-

次にハイドログラフの立ち上がり時刻(0.7mm/hr以上の流出量が連続して観測され始めた時刻とした)とピーク流出量に関して各ケースの実験結果を整理して表-3-1を得た。

・表-3-1で、3-Bの()内の値は2度目の山についての値である。

⑨ 表-3-1より、空隙からの流出量は、空隙内に落下する降雨量と考えられる。つまり空隙の側面からの流出は観測されなかった。

3-2. 土壌内負圧について

土壌内負圧測定グラフ (図-3-6,8,9,10)

⑩ 空隙の存在しない方が、土壌内圧力は上昇する。例えば図-3-9ではそれが著しくあらわれている。

⑪ 1-A<粗砂強雨空有>の1(上端から5cm)では、ハイドログラフの立ち上がりと同時期に負圧が急増するのが見られた(図-3-10参照)。

⑫ 3-B<細砂強雨空無>は2段階で変化する(図-3-6参照)。

⑬ 圧力の最大値は上方のものが下方のものを上まわるケースがみられる(図-3-6参照)。

土壌内負圧変化進行グラフ

図-3-11・図-3-12はテンシオメーターの位置と負圧の急激な変化時刻(例えば図-3-9に示す矢印の位置を急激な変化とみなす)の関係を示している。図の結果を以下にまとめる。

⑭ 3-B<細砂強雨空無>はどれも異常にはやく上から下までほぼ同時に変化する(図-3-11の▲参照)。

⑮ 3-B<細砂強雨空無>を除き、他は供試体上方からほぼ等速度に変化が進む。

⑯ 空隙を有する方が、すこし変化がはやく進む。

⑰ 降雨強度の強い方が、変化がはやく進む。

その他

⑱ 3-B<細砂強雨空無>に限り、表面に水たまりが発生し、それとほぼ同時に表面から1~4cmの深さのところに、幅1~6cm・高さ0.05~1cm程の空洞(中は空気)ができた(図-3-13参照)。

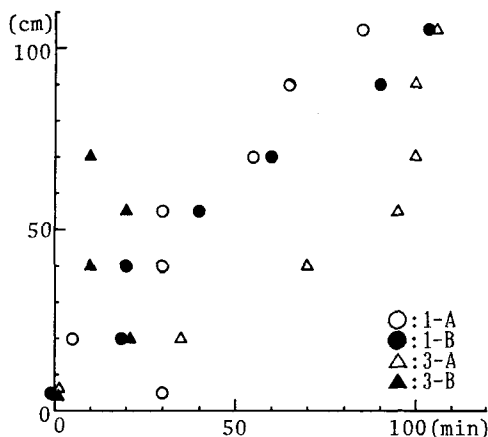


図-3-11: 土壌内負圧進行分布<強雨>

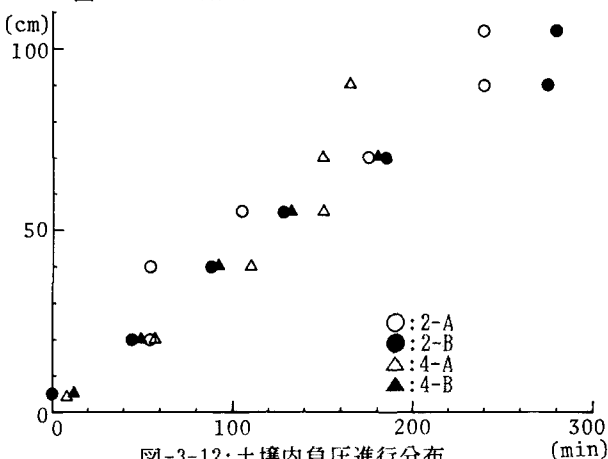


図-3-12: 土壌内負圧進行分布

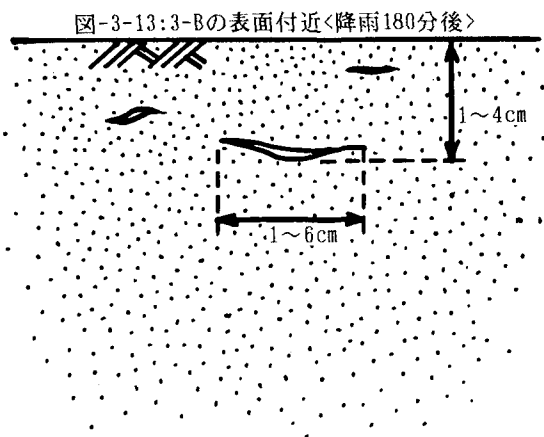


図-3-13: 3-Bの表面付近<降雨180分後>

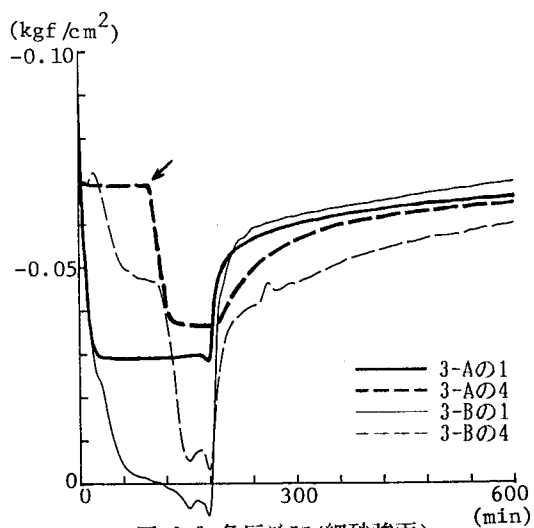
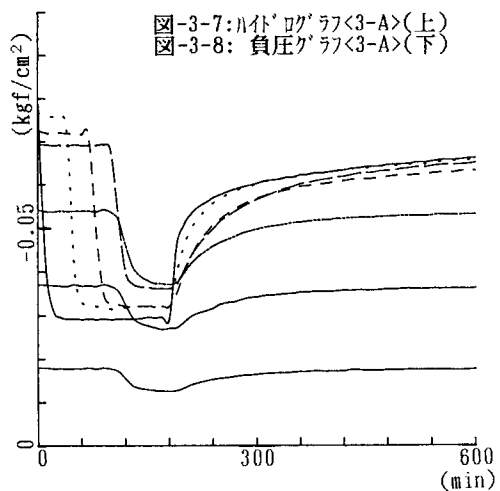
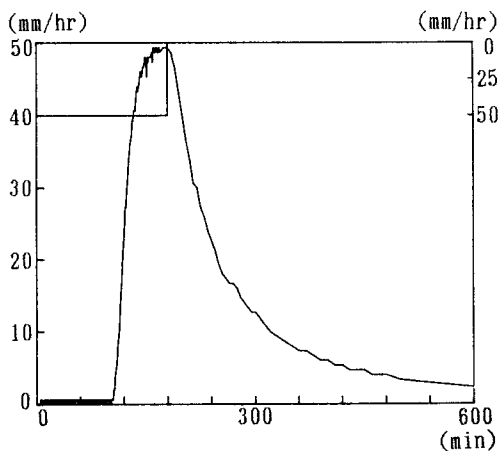
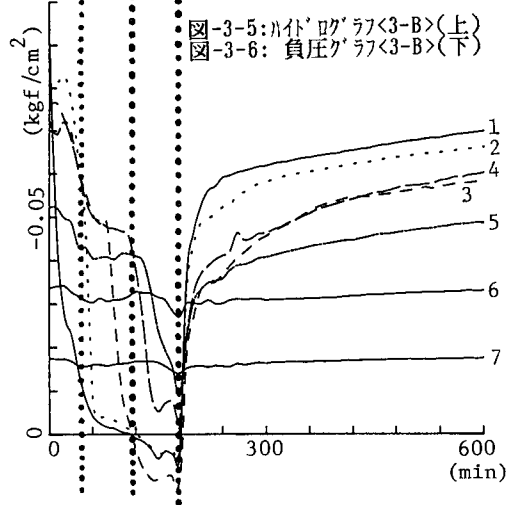
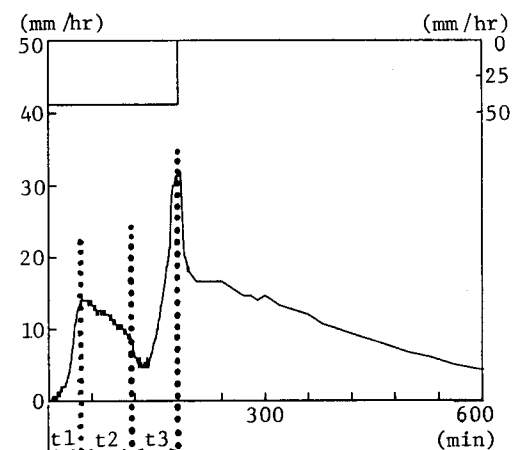


図-3-9: 負圧グラフ<細砂強雨>

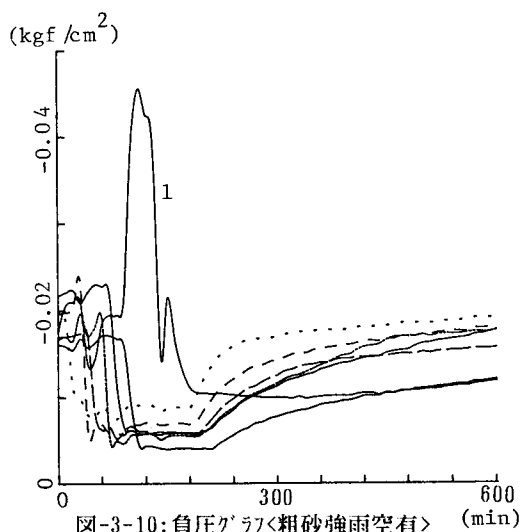


図-3-10: 負圧グラフ<粗砂強雨空有>

4. 考察

⑧より、空隙の影響を考えるとときに最も注目すべきなのは細砂強雨のケースであり、しかも⑥・⑦から(また、グラフを見るだけでも)3-Bは他と比べて特殊な曲線を描くことが分かる。さらにこの特殊さは空隙の存在しないものの特徴(②の逆)を強調したものととれる。

以上から、特に3-Bに注目することにより空隙の影響を明かにしていくことにする。

4-1. 実験3-B<細砂強雨空無>について (以下、図-3-5・図-3-6参照)

特に他の実験ケースと異なる時期を図の様にt1, t2, t3の3区間に分けて述べる。

<t1間>

空隙が存在せず、かつ強雨であると、空気が逃げずらいうえに上部からの水の供給にともない、間隙空気と水の交換がスムーズに進まず、表面付近で間隙がほぼ飽和され、それより下方の空気を閉じ込める”水のフタ”の様なもの(擬似飽和領域)が形成される。それが最下方のほぼ飽和された部分の水を(中間の比較的乾いた部分を挟んで)押し出したものがハイドログラフに表れた1つ目の山であると考えられる。なお、その間、全体的に圧力は上昇する。

<t2間>

ハイドログラフの1つ目のピークは、まだこれから上昇するところ(か、ピークに達するあたり)で、くずれてしまったようにも見える。これは底に近い飽和度の高い部分ほど先に押し出されるため(時間がたつほど飽和度の低い部分の水が流出するため)であると考えられる。なお、この間、圧力は一定している。

<t3間>

その後、降雨により与えられた水が浸透してくる。この間、一定していた圧力がさらに上がる。

なお、⑬に関しては、下方の閉塞空気が移動困難なのに対し、上方の閉塞空気は表面に近いので比較的容易に移動し飽和に近づくことができるため起きる現象であると考えられる。さらに水が浸透しやすいところと浸透しにくいところが存在するため、フィンガリング現象が生じていると思われる。

上記した疑似飽和領域が存在するならば、少なくとも珪砂7号・降雨44mm/hr・面積30cm×30cm(=900cm²)では、図-3-11より降雨後10～20分間で作成されることになる。

以上で3-Bに特有の現象⑥・⑦・⑩・⑫・⑬は説明がつく。

①・③・④・⑥は空隙の存在が空気を放出させる役割を果たし、水の浸透に伴う抵抗を下げたためだと考えられる。

②は空隙の存在しない方が実験前から多量の水分を供試体内に保持していたため(つまり空隙は空気を供給する役割をする)と考えられる。

⑤から空隙が存在することにより、(少なくとも強雨時の)流出ハイドログラフに及ぼす砂の粒径の効果は少なくなることが分かった。

⑧は粒径が小さい程、実験装置の中央部に設置した空隙の影響が大きいと考えられる(②・③で粗砂強雨が例外なもののためと思われる)。

【参考文献】

土壌物理研究会編:「土の物理学」, 森北出版株式会社, 1979

日野・太田・砂田・渡辺:「洪水の数値予報」, 森北出版株式会社, 1989