

河川堤防の降雨浸透現象に及ぼす 間隙空気挙動の影響

INFLUENCE OF PORE AIR BEHAVIOR ON RAINFALL INFILTRATION PHENOMENON IN RIVER DIKE

神谷浩二¹・大場敬士²・田中伸幸³・伊東侑毅⁴
Kohji KAMIYA, Keishi OBA, Nobuyuki TANAKA and Yuki ITO

¹正会員 博士(工) 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²愛知県 (元 岐阜大学大学院生) (〒460-8501 名古屋市中区三の丸3-1-2)

³岐阜県 (元 岐阜大学学部生) (〒500-8570 岐阜市藪田南2-1-1)

⁴学生会員 岐阜大学大学院生 大学院工学研究科博士前期課程 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

It is extremely important to understand the rainfall infiltration phenomenon in the unsaturated soil on the evaluation of the stability of river dike. The objective of this study is to clarify the influence of pore-air behavior on the characteristic of pore-water movement during the rainfall. In this paper, the laboratory rainfall infiltration experiment were carried out using the unsaturated soil columns. As a result, it was found that the pore-air in the soil of the hydraulic conductivity of 3×10^{-5} m/s was trapped and compressed under the rainfall intensity of over 40 mm/hr. The pore-air pressure restricted the downward movement of rainfall infiltration water.

Key Words : Pore-air pressure, Rainfall intensity, Hydraulic conductivity, Unsaturated soil

1. まえがき

河川堤防の浸透に対する安全性の照査・設計では、洪水外力としての降雨や河川水による堤体への浸透現象を的確に評価する必要がある¹⁾。特に、照査・設計のための浸透流解析における降雨浸透条件には、降雨量とその流入側である堤体の透水性との関係によって散水浸潤(流量境界)と湛水浸潤(水頭境界)のいずれかを設定する場合が多く、即ち、地表面から流入可能な流量に比べて降雨量が小さいとき降雨はすべて浸透し、降雨量が大きいとき地表面で貯留が生じると想定して解析される^{2) 3)}。その一方で、降雨浸透時に間隙水が間隙空気とスムーズな置換が生じないとき、間隙空気が地盤内に封入され圧力発生し、その間隙空気が降雨浸透を阻害する可能性が指摘されてきた^{4) 5)}。しかしながら、間隙空気の挙動に不明な点が多いため、降雨浸透条件設定に間隙空気の影響を考慮していないのが現状である。本論文は、土質の違いによる降雨の浸透特性を究明したものである。実堤防の三次元的な降雨浸透現象に対比して、基礎的に検討するため円柱体の不飽和な模型地盤について鉛直方向で人

工降雨を浸潤させる一次元的な実験を行った。そして、その実験によって間隙水と間隙空気の挙動について調べ、特に、間隙空気の封入・圧力発生する場合を示し、それによる降雨浸透への影響を考察した。

2. 模型地盤の降雨浸透実験

(1) 装置と方法

図-1は、模型地盤に人工降雨を鉛直一次元方向に浸潤させるための実験装置の概要を示したものである。装置は、試料層を作製するための試料管(直径φ15cmで長さ200cmの亚克力製の円筒管)、降雨を模擬するための散水装置(亚克力製の容器に注射針を取り付けたもの)と定流量ポンプ、試料層内の水位面を固定するための排水容器、試料層内の飽和度 S_r (%), 間隙水圧 u_w (kN/m²), 間隙空気圧 u_a (kN/m²)をそれぞれ測定するための水分計、間隙水圧計、間隙空気圧計によって構成されている。

炉乾燥させた試料を試料管に充填して所定の間隙比 e の試料層を作製する。なお、試料層は、約20cm長さに相当する質量の試料を投入した後に試料管の側面を木槌

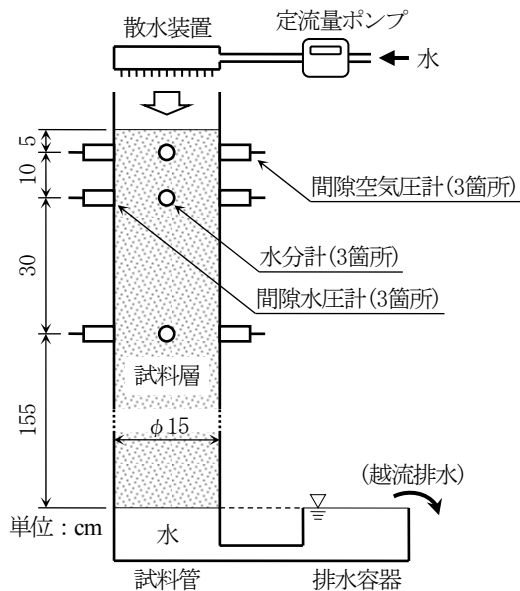


図-1 降雨浸透実験の装置概要図

で打撃することによって締め固め、これらの作業を繰り返すことによって作製した。次に、排水容器の水位面を試料層上面付近に上昇させることによって試料層下面からゆっくりと浸潤飽和させ、その浸潤面が試料層上面に達した後、排水容器の水位面を試料層下面に位置するように移動させて重力排水させる。そして、飽和度分布がほぼ平衡したときの試料層を初期状態とした。

上記手順で作製した試料層について、定流量ポンプによって一定流量を散水装置に送水することによって、試料層上面に降雨を所定量 R (mm/hr)で降らせ浸潤を開始する。降雨開始からの経過時間 t (min)における試料層内の飽和度、間隙水圧、間隙空気圧のそれぞれを測定した。なお、水分計、間隙水圧計、間隙空気圧計のそれぞれは、図-1に示したように、試料層の上面からの深さ $z = 5, 15, 45$ cmの3箇所を設置した。そして、降雨による浸潤が $z = 45$ cmに達したとき、あるいは、試料層上面に湛水深が数cm程度に達したときに降雨を停止した。

(2) 試料とケース

試料には、図-2に粒度を示す木曽川堤防砂、硅砂8号、硅砂9号の3種類を用いた。透水試験で得られた飽和透水係数 k_w (m/s)の値は、木曽川堤防砂で 1.8×10^{-4} m/s、硅砂8号で 3.0×10^{-5} m/s、硅砂9号で 7.4×10^{-6} m/sであった。そして、表-1に示すように降雨量を20~100 mm/hr程度の範囲で設定したときのケースA~Iの実験をそれぞれ行った。なお、各試料の間隙比は $e = 0.88$ とした。表-1には、各ケースでの相対密度 D_r (%), 降雨量の飽和透水係数に対する比 R/k_w の値を併記した。

(3) 降雨時の飽和度、間隙水圧と間隙空気圧の変化

図-3は、ケースC(木曽川堤防砂)、ケースF(硅砂8号)、

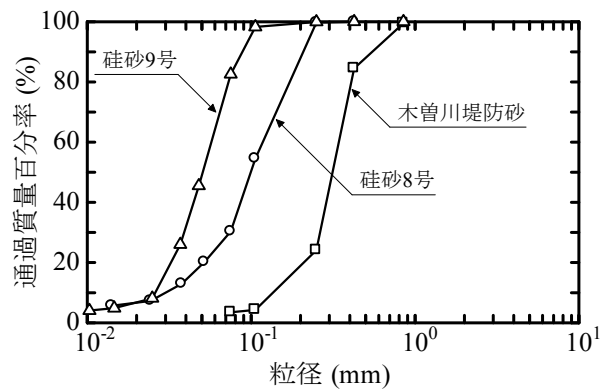


図-2 試料の粒度

表-1 実験ケース

ケース	試料	相対密度 D_r (%)	降雨量 R (mm/hr)	R/k_w
A	木曽川堤防砂	41.5	60.1	0.09
B			79.8	0.12
C			100.2	0.15
D	硅砂8号	81.1	40.1	0.37
E			59.9	0.55
F			79.5	0.74
G	硅砂9号	94.9	19.9	0.75
H			30.4	1.14
I			39.7	1.49

ケースI(硅砂9号)の場合を例に、飽和度、間隙水圧、間隙空気圧の経時変化をそれぞれ示したものである。

ケースA~C(木曽川堤防砂)では、図-3(a)に示したように、飽和度と間隙水圧は降雨の浸潤に伴って上昇した後にある一定の値が維持され、定常浸透流に至る。降雨が継続されても地表面での湛水の発生や内部での間隙空気圧の顕著な発生は認められなかった。また、ケースG(硅砂9号)でも、ケースA~Cの場合と類似した飽和度や間隙水圧の変化を示し、降雨に伴い湛水や間隙空気圧の発生は確認されなかった。

ケースD~F(硅砂8号)では、図-3(b)に示したように、地表面付近である $z = 5$ cmと 15 cmにおいて降雨の浸潤によって飽和度や間隙水圧は上昇した後一定値を維持していたが、深めの $z = 45$ cmで顕著な間隙空気圧が発生し始めるとそれに呼応して間隙水圧が再上昇し、更に、 $z = 45$ cmでの間隙空気圧が 3 kN/m²程度に達した頃に地表面での湛水が観察された。間隙空気圧は最大で 5 kN/m²程度であったが、降雨量が多いケースほど若干大きくなる傾向にあった。なお、ケースEとFでは、湛水が生じてから間もなく地表面付近において部分的な亀裂等による破壊現象が観察された。

ケースHとI(硅砂9号)では、図-3(c)に示したように、 $z = 5$ cmと 15 cmにおいて降雨の浸潤によって飽和度や間隙水圧は上昇した後、幾らかの時間を経て地表面で湛水が観察された。なお、湛水発生の後に僅かな間隙空気圧の発生が確認された。

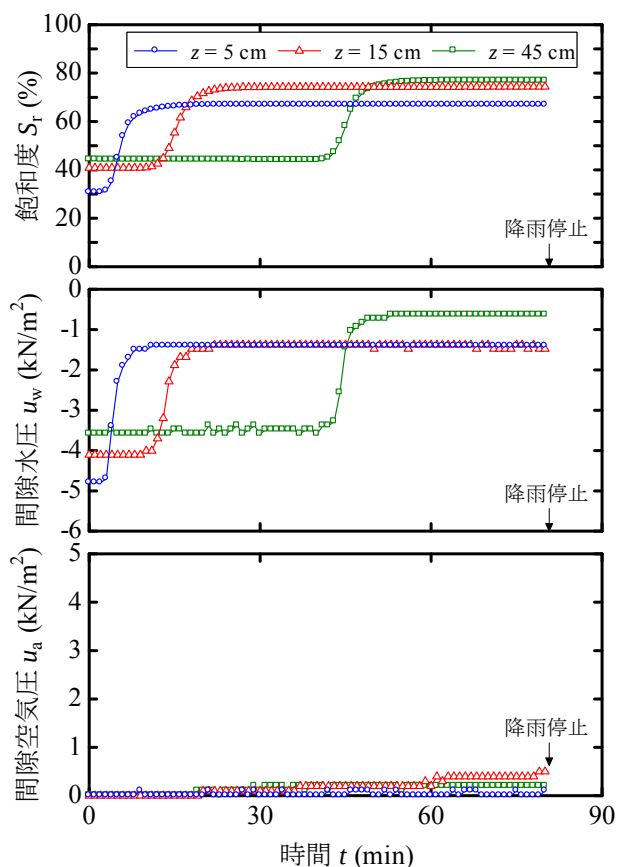


図-3(a) 飽和度，間隙水圧，間隙空気圧の変化(ケースC)

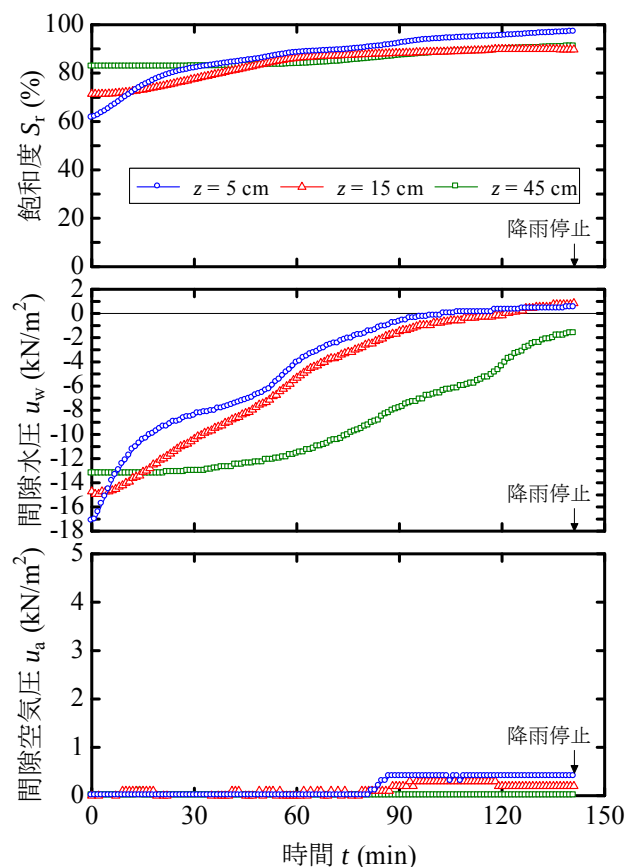


図-3(c) 飽和度，間隙水圧，間隙空気圧の変化(ケースI)

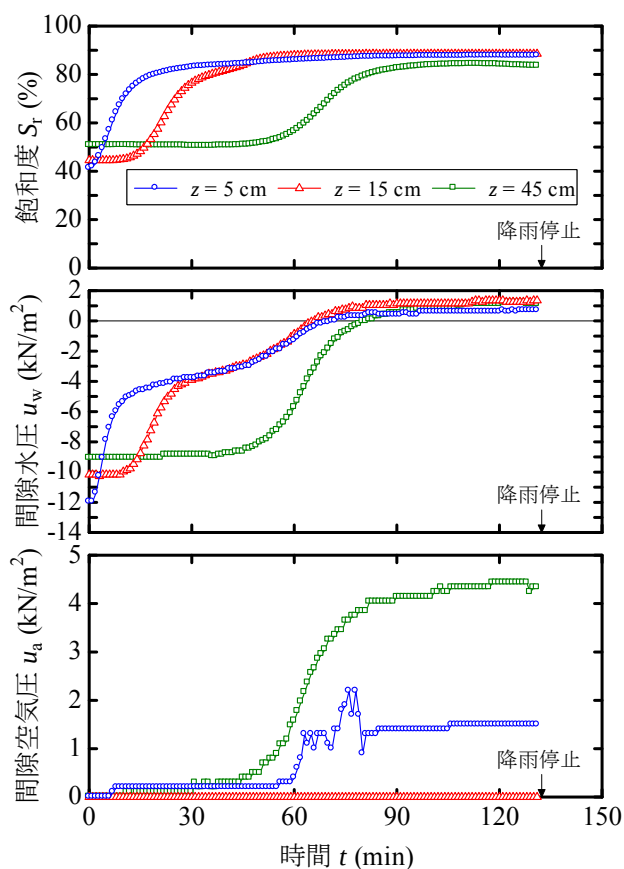


図-3(b) 飽和度，間隙水圧，間隙空気圧の変化(ケースF)

3. 土質と降雨量の関係による浸透特性

(1) 浸透特性の分類

上記2. (3)に基づき，降雨浸透特性は，ケースA～CとGの比較的スムーズに降雨が浸潤(散水浸潤)する場合，ケースD～Fの間隙空気圧の発生に伴ってスムーズな散水浸潤から湛水浸潤に移行する場合，ケースHとIの地表付近の飽和度が上昇した後に湛水浸潤に至る場合の3つに大別される．従来，飽和透水係数より大きな値に相当する降雨量のときには降雨を継続すると湛水浸潤に至ると考えられていて³⁾，ケースHとIでは表-1のとおり $R/k_w > 1$ の関係にあつて湛水浸潤のその条件に合致する．一方，ケースA～CとGでは $R/k_w < 1$ の関係にあつて散水浸潤が認められたが，ケースD～Fでは $R/k_w = 0.37 \sim 0.74$ の範囲であるにもかかわらず間隙空気圧の発生に伴って湛水浸潤に至った．この空気圧発生は，浸潤によって地表付近で低下した透気性に比べて，浸潤によって置換される間隙空気移動速度が卓越する関係にあることが原因の一つと考えられる⁶⁾．

(2) 空気圧発生による湛水機構

図-4は，ケースC(木曽川堤防砂)とケースF(硅砂8号)を例に，深さ $z = 5$ cmと 15 cmのそれぞれで測定した間隙水

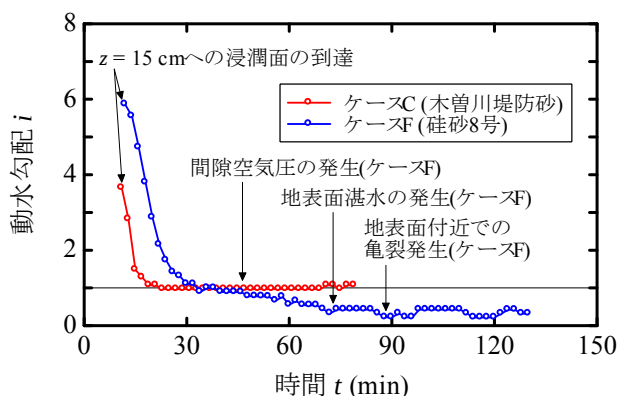


図-4 動水勾配の変化(ケースCとケースF)

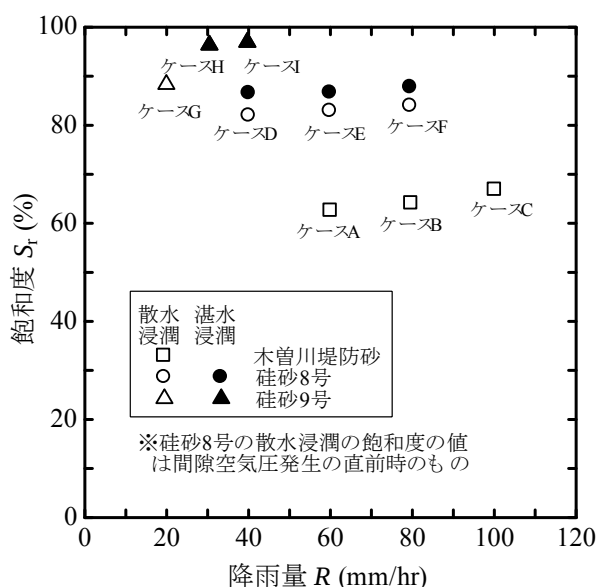


図-5 降雨量と地表面付近($z = 5\text{cm}$)の飽和度

圧の値を用いて算出した動水勾配 i の値の経時変化を示したものである。なお、図-4では、降雨による浸潤面が $z = 15\text{cm}$ に到達した以降の時間範囲について示した。

散水浸潤であるケースCでは、動水勾配は、降雨による飽和度上昇時(図-3(a)参照)には最大4程度の値と大きく現れるが、その後の定常浸透流では1程度の値に減少してその大きさが維持される。一方、ケースFでは、間隙空気圧の発生時までの範囲については、ケースCと同様に動水勾配は6程度から減少して1程度の値が継続し散水浸潤の状態であると考えられる。空気圧発生以降には0.5程度の値まで減少し、更に、湛水後には0.3~0.4の範囲の値で推移する。図-3(b)に示したように、空気圧発生時の前後付近では、 $z = 5\text{cm}$ と 15cm において飽和度に殆ど差が無いため不飽和透水係数の大きさが同程度の状態にあるとみられる。そして、ダルシー則に従うと、空気圧発生によって地表面付近の浸潤速度が半減したことが推定される。即ち、降雨開始後の散水浸潤が生じている状況で、空気圧発生によって浸潤が抑制され地表面からの流入可能流量が降雨量よりも小さい関係に至ったため湛水発生に移行したことが考えられる。

(3) 降雨量と飽和度

図-5は、ケースA~Iについて、深さ $z = 5\text{cm}$ における実験の降雨停止時の飽和度の値(図-3参照)を降雨量に対して示したものである。但し、ケースD~Fについては間隙空気圧発生直前(散水浸潤とみられる)での飽和度の値を併記した。

散水浸潤(図中の白抜き印)では降雨量の増加によって飽和度が高くなる傾向であるが、湛水浸潤(黒塗り印)では降雨量の違いによらず同程度である。また、散水浸潤に比べると、湛水浸潤では飽和度が高くなる傾向にある。ケースD~Fでの空気圧発生は、上記のように浸潤速度を抑制する一方で、湛水浸潤に移行することによって地表面付近の飽和度をより高める特徴がある。

4. あとがき

本論文では、飽和透水係数が $10^{-4} \sim 10^{-6}\text{ m/s}$ オーダーの範囲にある土試料の降雨浸透実験に基づき、浸透時の間隙空気挙動等を考察した。その結果、飽和透水係数が $3 \times 10^{-5}\text{ m/s}$ を有する砂質土では、降雨量が 40 mm/hr を超える条件のとき、地盤内で最大で 5 kN/m^2 程度の間隙空気圧が発生し、それによって降雨の浸水が抑制され地表面に湛水が生じる浸透現象に至った。飽和透水係数よりも小さな値に相当する降雨量のときには、降雨はスムーズに地盤浸透する散水浸潤に至ると考えられたが、上記の砂質土では降雨量が飽和透水係数の4~7割程度の大きさであった。飽和透水係数より大きな降雨量のときには湛水浸潤が認められた。即ち、間隙空気圧の発生によって降雨浸透が抑制され湛水が発生する現象が明らかになり、河川堤防の照査・設計での降雨浸透条件の設定に間隙空気挙動の影響を考慮する重要性が示唆された。

参考文献

- 1) 国土技術センター：河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)，pp.46-68，2012。
- 2) 日本地下水学会地下水流動解析基礎理論のとりまとめに関する研究グループ 編：地下水シミュレーションーこれだけは知っておきたい基礎理論ー，技報堂出版，pp.53-55，2010。
- 3) 中野政詩：土の物質移動学，東京大学出版会，pp.23-26，1991。
- 4) 佐藤邦明：間隙空气の圧縮を伴う鉛直浸透に関する一考察，土木学会論文報告集，No.216，pp.21-28，1973。
- 5) 西田義親，八木則男，二木幹夫：雨水浸透による地盤内発生間隙圧と斜面安定，No.262，pp.91-100，1977。
- 6) 神谷浩二，大場敬士，山田周作：河川堤防の浸水に伴う間隙空気圧発生とそれによる破壊現象に関する実験的考察，河川技術論文集，Vol.20，pp.473-478，2014。

(2016. 4. 4受付)