

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

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE GENERATION OF PORE-AIR PRESSURE
AND ITS RESULTING THE FAILURE PHENOMENA DURING WATER
SEEPAGE IN THE RIVER DIKE

神谷浩二¹・大場敬士²・山田周作²

Kohji KAMIYA, Keishi OBA and Shusaku YAMADA

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 important to consider the influence of the pore-air behavior on the seepage behavior of river water and rainfall into the river dike, the reason is that the pore-air is likely to be trapped and compressed in the unsaturated soil. In this paper, the pore-air behavior during the wetting process in unsaturated soil was considered based on the laboratory water infiltration experiment in one-dimension. In this experiment, the pore-air pressure, the pore-water pressure and the degree of saturation in the unsaturated soil column were measured during the wetting process with constant intensity of rainfall at the soil top surface and the rise of river water level at the bottom of the soil. It was shown that the pore-air pressure in the soil with the hydraulic conductivity of 10^{-3} cm/s was generated by the seepage of river water when the air permeability at near the surface was reduced by the rainfall, and that the local crack in the soil occurred due to the larger pore-air pressure.

Key Words : pore-air pressure, air permeability, water characteristic curve, hydraulic conductivity

1. まえがき

河川堤防などの不飽和地盤が豪雨時に急激な浸水を受けたとき、地盤内の間隙空気が封入されその圧力が増大して、更に、封入された空気塊が地表面から噴出する現象が指摘されている^{1),2),3)}。この現象は、地盤に亀裂等の損傷を与えるため、土構造物としての不安定化に繋がることが懸念される⁴⁾。従来の不飽和地盤の浸透流に関する理論的扱いでは、Richards式に従って間隙水挙動のみが評価される。これは、一般に土の透気性は透水性に比べるとかなり高いため、間隙水の浸透現象は、間隙空気とのスムーズな置換によって生じると考えられたためとみられる。しかし、上述のように間隙空気の挙動を無視できない現象が存在し、間隙水と間隙空気を連成させたときの浸透挙動の評価・表現法が検討されている^{1),5)}。しかしながら、浸水時の間隙空気の挙動は十分に明らかにされておらず、また、間隙空気の封入・噴出現象の発生機構は解明されないままである。

本論文は、河川堤防の安定性向上に資するため、不飽

和地盤が浸水を受けたときの間隙空気の挙動を基礎的に究明したものである。不飽和な模型地盤について降雨や河川水を想定した鉛直一次元での浸水実験に基づき、浸水時の間隙水や間隙空気の挙動を調べた。そして、間隙空気圧の発生原因や噴出現象の特徴について考察した。

2. 不飽和な模型地盤の浸水実験

(1) 装置と方法

図-1は、降雨と河川水による地盤への浸透を想定した浸水実験の装置の概要を示したものである。装置は、試料を充填する試料管(内径φ15cm, 長さ $L = 200$ cmの亚克力製の円筒管)、降雨浸水させるための散水装置、河川水を想定して試料層下部から浸水させるための貯水管(内径φ10cm, 長さ200cmの亚克力製の円筒管)、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)のそれぞれを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。

散水装置は、密閉された円筒容器の底面に注射針を取

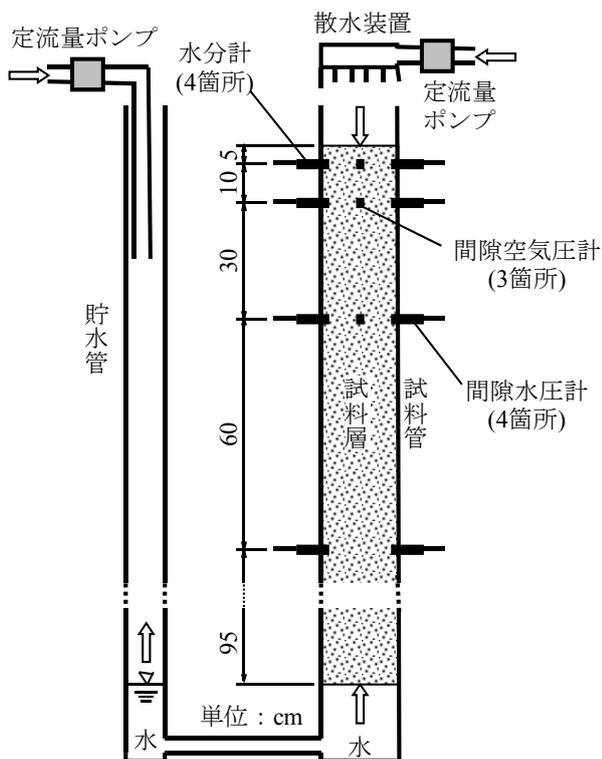


図-1 模型地盤浸水実験装置の概要図

り付けたものであり、水道水を定流量ポンプによって円筒容器に送水して注射針から所定量 R (mm/hr) で試料層表面に散水するものである。また、貯水管に水道水を定流量ポンプによって送水することによって、その水位を速度 v_H (cm/hr) で上昇させた。一方、水分計には、試料の誘電率を測定することによって含水量を求めるもの(市販のADR)を用いた。間隙水圧計には、サクシオンを測定するための市販のマイクロテンシオメータを用いた。間隙空気圧計は、上記マイクロテンシオメータの先端部のセラミックフィルタに防水スプレーを塗布することによって撥水性をもたせ、間隙空気のみがマイクロテンシオメータ内部で受圧できるようにしたものである。なお、水分計、間隙水圧計のそれぞれは、試料層表面からの深さ $z = 5, 15, 45, 105$ cm の4箇所、間隙空気圧計は $z = 5, 15, 45$ cm の3箇所にそれぞれ設置した。

炉乾燥試料を図-1の試料筒に所定の間隙比 e になるように充填して、試料層を作製する。なお、試料層は、試料を投入した後に試料筒の側面を打撃することによって締め固めて作製した。次に、貯水管の水位を上昇させることによって試料層の下部より浸水させ、試料層上面に浸潤面が達した後、貯水管の水位を試料層下端の位置に低下させ維持させながら重力排水させ、24時間程度放置して試料層の飽和度の分布がほぼ平衡状態になったときのものを初期状態とした。

上記手順で作製した試料層について、その地表面において降雨を先行して所定量 R で降らせ、深さ $z = 15$ cm に

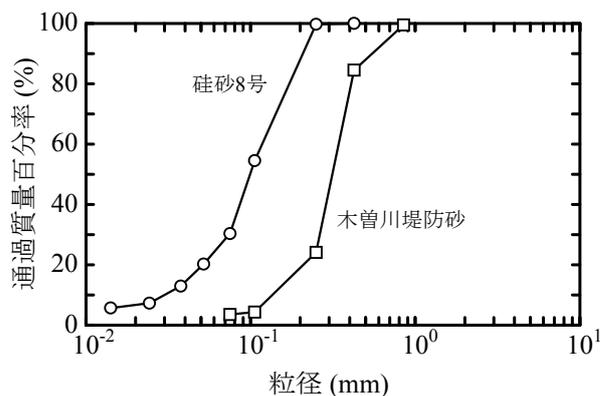


図-2 試料の粒度

表-1 浸水実験のケース

ケース	試料	降雨量 R (mm/hr)	貯水管水位上昇速度 v_H (cm/hr)
A		40	98.7
B	珪砂8号	58	99.4
C		79	100.8
D	木曽川	59	98.4
E	堤防砂	80	101.0
F		100	99.0

降雨による浸水が達したときに(水分計の応答で判断)、貯水管の水位(初期は試料層下端に位置)を速度 v_H で上昇させることによって、試料層下部から浸水を開始する。このとき、浸水開始からの時間 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。そして、貯水管水位が試料層表面と同じ位置に達したときに実験を終了した。

(2) 試料と実験ケース

試料には、珪砂8号と木曽川堤防砂の2種類を用いた。図-2は、試料の粒度を示したものである。試料層の間隙比は、珪砂8号で $e = 0.904$ 、木曽川堤防砂で $e = 0.880$ にそれぞれ設定した。また、室内透水試験によれば、飽和透水係数 k_{ws} (cm/s) は、珪砂8号で $k_{ws} = 3.0 \times 10^{-3}$ cm/s、木曽川堤防砂で $k_{ws} = 1.8 \times 10^{-2}$ cm/s であった。そして、表-1に示すように、試料の種類と降雨量 R 、貯水管水位上昇速度 v_H による6ケースの実験を行った。ただし、降雨量は、飽和透水係数が小さめの珪砂8号では40~80mm/hrの範囲、大きめの木曽川堤防砂では60~100mm/hrの範囲とした。また、いずれのケースにおいても $v_H = 100$ cm/hr程度とした。

(3) 浸水実験の結果

図-3は、表-1の実験ケースA~Fのそれぞれについて、浸水に伴う飽和度 S 、間隙空気圧 u_w 、間隙空気圧 u_a の経時変化をそれぞれ示したものである。

ケースA、BやケースD、E、Fでは、図-3の(a)、(b)、(d)、(e)、(f)のように浸水に伴って顕著な間隙空気圧

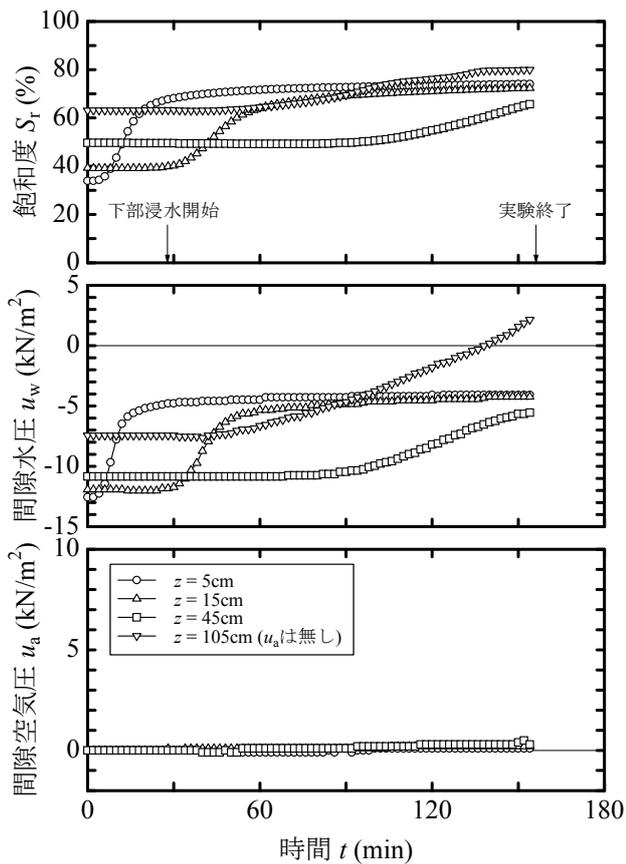


図-3(a) 飽和度, 間隙水圧・空気圧(ケースA)

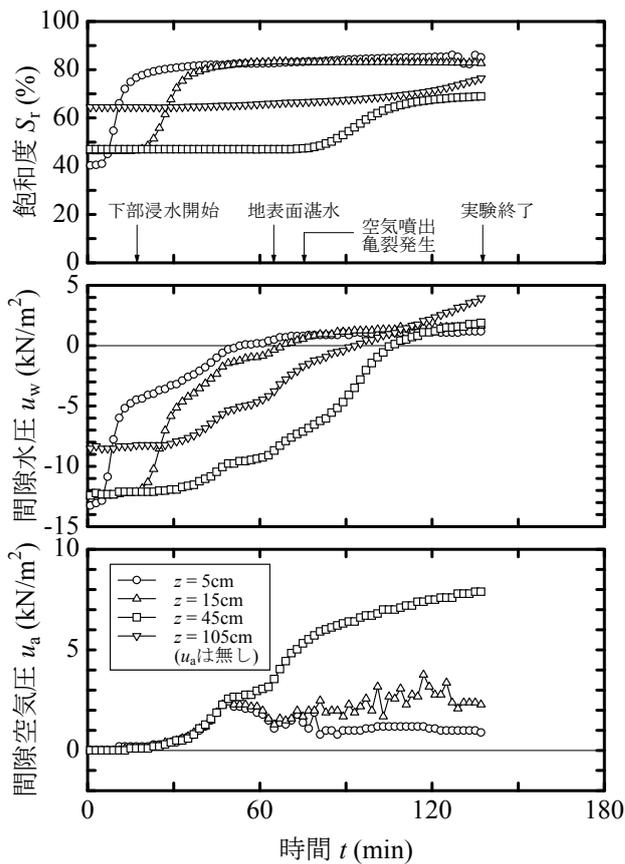


図-3(c) 飽和度, 間隙水圧・空気圧(ケースC)

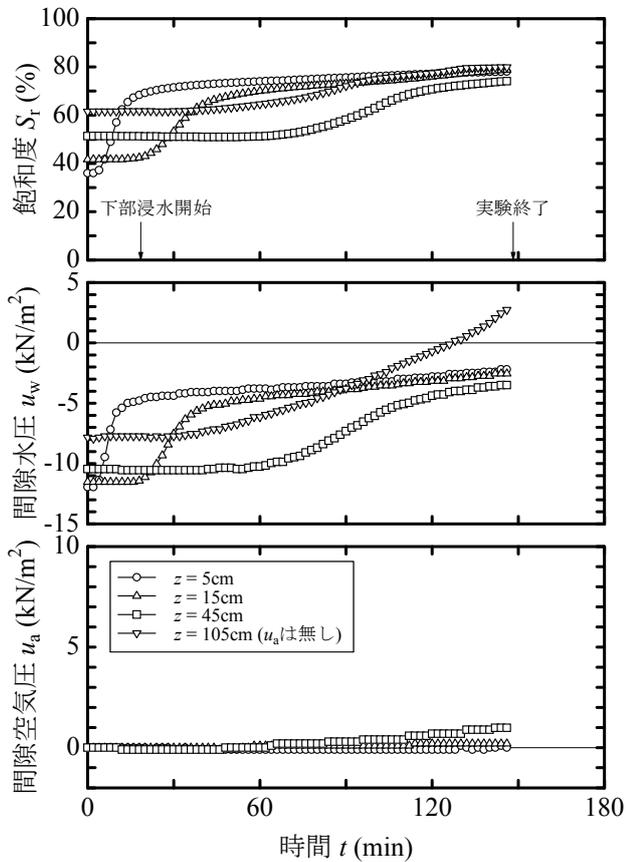


図-3(b) 飽和度, 間隙水圧・空気圧(ケースB)

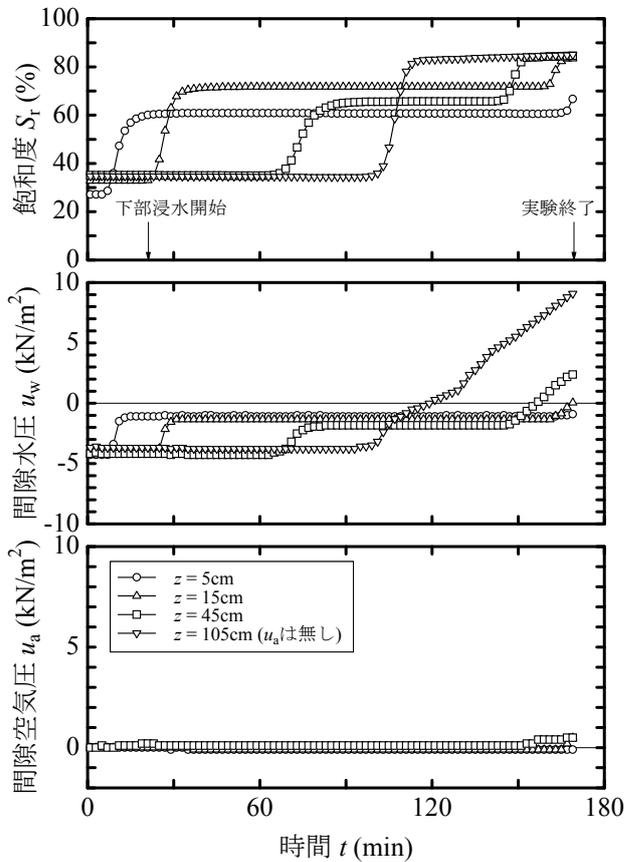


図-3(d) 飽和度, 間隙水圧・空気圧(ケースD)

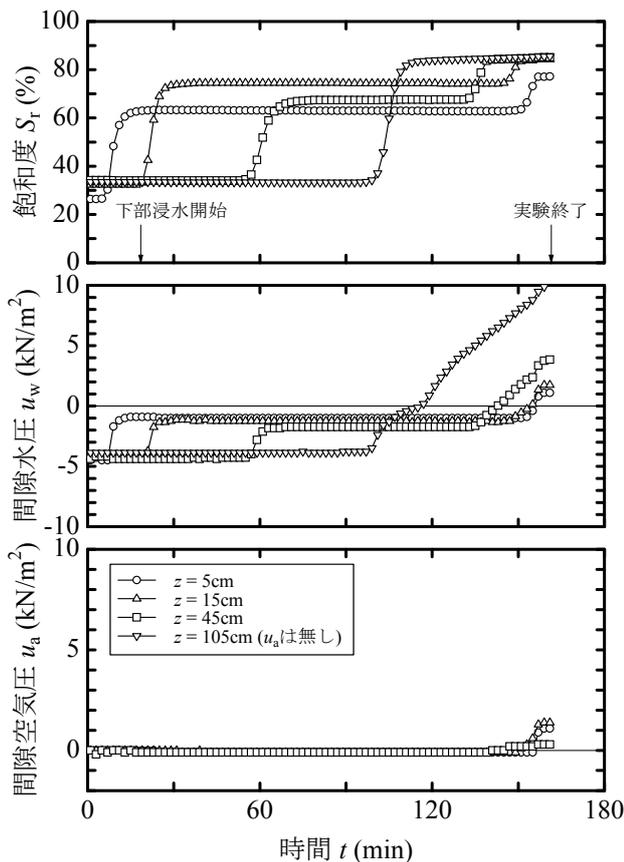


図-3(e) 飽和度, 間隙水圧・空気圧(ケースE)

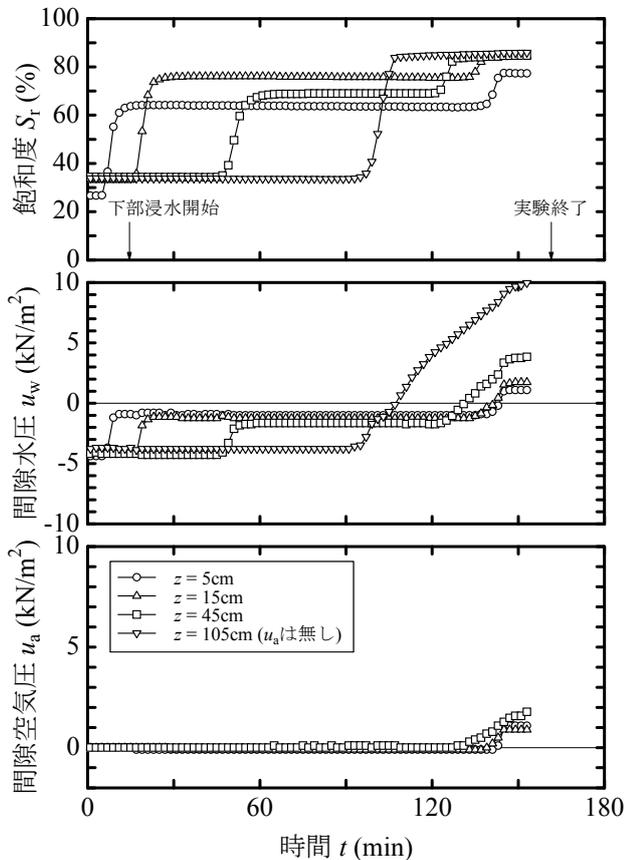


図-3(f) 飽和度, 間隙水圧・空気圧(ケースF)

の発生は認められず, 降雨や河川水(貯水管からの水)による間隙水は間隙空気とスムーズに置換しながら浸透したと考えられる. また, 降雨は地表で湛水せずすべてが浸水した. なお, 実験終了時間あたりにおいて間隙空気圧が増加する可能性があるが, これは, 下部からの浸水によって飽和度が高まって局所的に間隙空気が封入されたことによると想像される. それに対して, ケースCでは, 図-3(c)のように, 試料層下部からの河川による浸水を開始した後に, $z=5, 15, 45\text{cm}$ のいずれにおいても間隙空気圧がおよそ 2kN/m^2 まで増加し, そして, 地表で降雨の湛水が生じ始めてから $z=45\text{cm}$ での間隙空気圧が更に増大して 5kN/m^2 程度に達したとき, 地表面付近での亀裂による破壊現象(後述の写真-1参照)が観察された.

一方, 試料が同じであるケースA~Cについて, 図-3の(a)~(c)の飽和度の経時変化を比較すると, 間隙空気圧が発生していないケースAとBでは, 下部からの浸水によって $z=105\text{cm}$ に浸潤面に至るまでに約50分間を要しているが, 間隙空気圧が発生したケースCでは, 70分程度を要して時間的遅れがみられる. 即ち, この遅れは, 発生した間隙空気圧が間隙水の移動を抑制していることによると考えられる.

3. 間隙空気圧の発生条件

(1) 地表付近の透気性

図-4は, 図-3の地表付近である $z=5\text{cm}$ での飽和度の経時変化において, 降雨の浸水によって, 飽和度が増加した後に横ばいになり定常浸透流が生じたときの値を降雨量に対して示したものである. 降雨量の増加に伴い, 地表付近の飽和度も増加する傾向にある. また, 珪砂8号では, 木曾川堤防砂に比べると, 同じ降雨量のときの飽和度が高くなる. ところで, 定常浸透流のときの飽和度は, 降雨の浸水速度に不飽和透水係数が等しくなるように決まると考えられている⁶⁾. 図-5は, 図-3の $z=5\text{cm}$ での飽和度, 間隙水圧, 間隙空気圧の経時変化の値を用いて, 降雨や河川水が浸水する過程での飽和度 S_r とサクション $s (= u_a - u_w)(\text{kPa})$ の関係を示したものであり, 図中の破線は, 次のvan-Genuchten⁷⁾による式(1)をフィッティングさせたときの関係を示したものである.

$$S_e = \frac{S_r - S_{r0}}{S_{rs} - S_{r0}} = \frac{1}{\left[1 + (\alpha s)^{n^*}\right]^{1-1/n^*}} \quad (1)$$

ここで, S_e は有効飽和度, $S_{rs}(\%)$ は最大飽和度, $S_{r0}(\%)$ は残留飽和度, α と n^* は未知パラメーターである. 図-5には推定された S_{rs} , S_{r0} , α , n^* のそれぞれの値を併記した. そして, 図-5で得られた n^* 値を用い, 次のMualem⁸⁾モデルによる式(2)によって不飽和透水係数 $k_w(\text{cm/s})$ を求め, その k_w を降雨量 R に置き換えた(単位換算した)ときの値と飽和度の関係を図-4に破線で重ね合わせて示した.

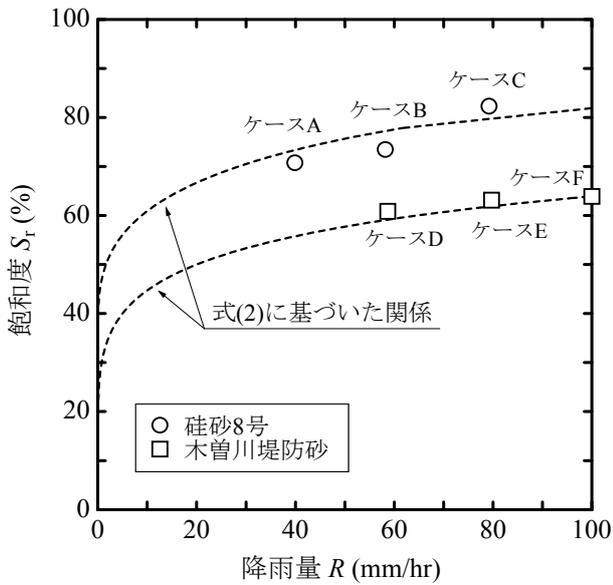


図-4 降雨量と地表付近の飽和度

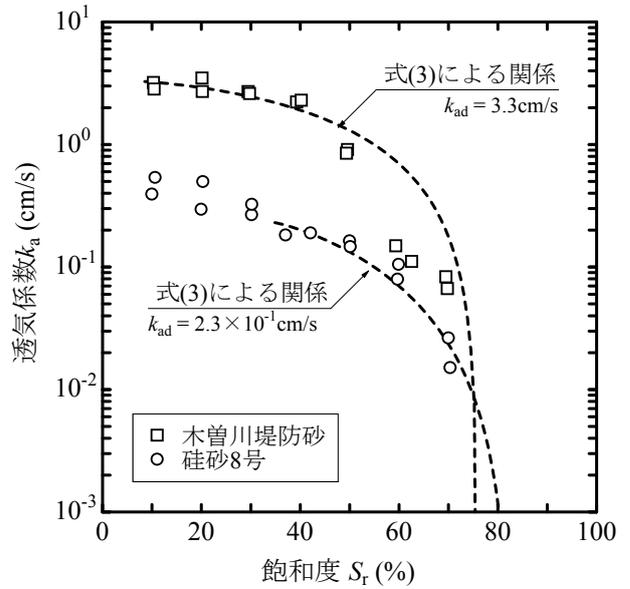


図-6 飽和度と透気係数

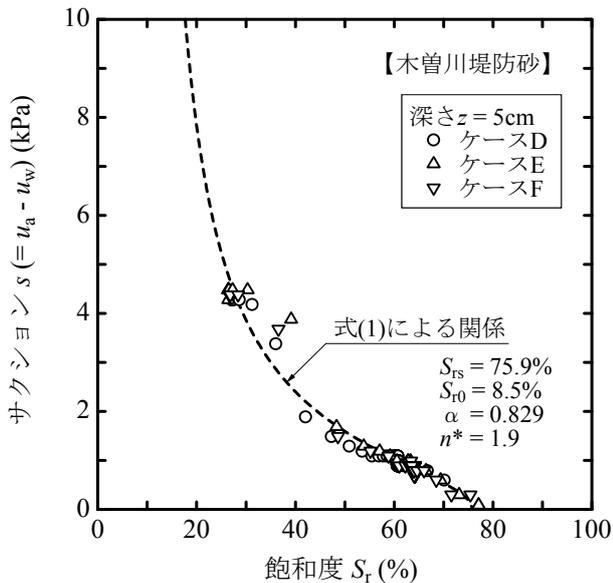
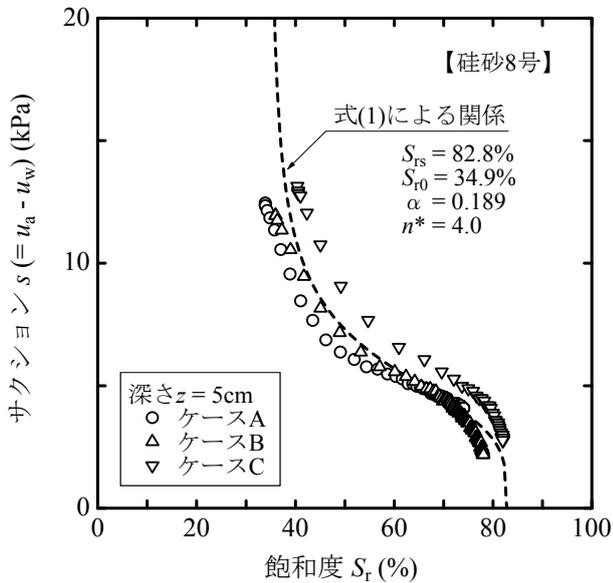


図-5 飽和度とサクシオン

表-2 地表付近の透気係数と降雨・河川水の浸水速度

ケース	透気係数 k_a (cm/s)	浸水速度 v_w (cm/s)
A	2.1×10^{-2}	1.6×10^{-3}
B (珪砂8号)	1.3×10^{-2}	2.3×10^{-3}
C	3.5×10^{-5}	2.2×10^{-3}
D (木曽川)	6.5×10^{-1}	4.6×10^{-3}
E (堤防砂)	5.2×10^{-1}	5.4×10^{-3}
F	4.8×10^{-1}	5.7×10^{-3}

$$k_w = k_{ws} S_e^{0.5} \left\{ 1 - \left[1 - S_e^{1/(1-1/n^*)} \right]^{1-1/n^*} \right\}^2 \quad (2)$$

図-4において、式(2)に基づいた破線による関係は浸水実験で得られた R と S_r の関係にほぼ合致し、地表付近の飽和度は、式(2)に基づけば、降雨量と飽和透気係数、水分特性曲線によって決定される。即ち、透水性が低く保水性が高いほど、同じ降雨量のときの飽和度は高くなる。

図-6は、透気試験⁹⁾によって得られた飽和度 S_r と透気係数 k_a (cm/s)の関係を示したものであり、図中の破線は、図-5の n^* 値を用い、次のMualemモデル^{8), 9)}による式(3)の関係をフィッティングさせて示したものである。

$$k_a = k_{ad} (1 - S_e)^{0.5} \left[1 - S_e^{1/(1-1/n^*)} \right]^{2(1-1/n^*)} \quad (3)$$

ここで、 k_{ad} (cm/s)は炉乾燥土の透気係数であるが、本論文では未知パラメーターとしてフィッティングにより求めた⁹⁾。図-4の地表付近の飽和度に対応する透気係数の値を図-6と式(3)に基づき調べると、表-2の中欄のとおりである。空気が発生したケースCでの透気係数の値は、他のケースでのものに比べるとかなり小さい。即ち、ケースCでの間隙空気圧の発生は、その試料が降雨によって地表付近の飽和度がより高まる条件にあり、また、それによって透気性が大きく低下したことが原因の一つであると考えられる。

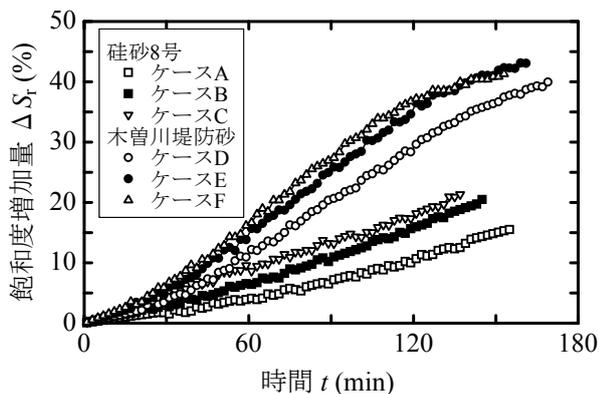


図-7 浸水に伴う試料層の飽和度上昇量

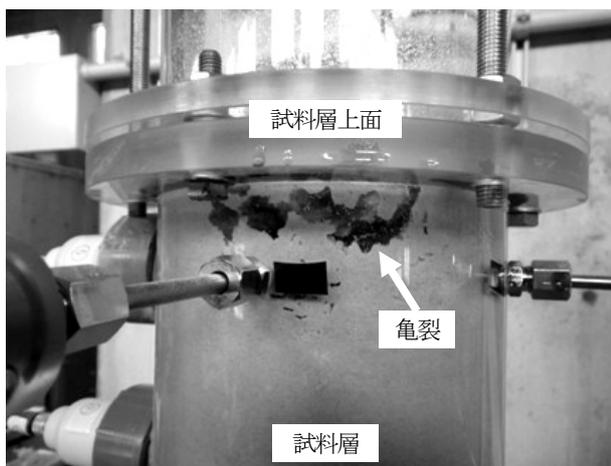


写真-1 間隙空気圧発生による地盤変状(ケースC)

(2) 浸水時の間隙水移動

図-7は、降雨量と貯水管水位上昇に伴う試料層への浸水量の値を求め、それに基づいて算出した試料層全体の飽和度の増加量 ΔS_r (%)の経時変化を示したものである。木曽川堤防砂に比べると、珪砂8号では飽和度の増加する速度が小さくなる。そして、その経時変化の最大勾配 β を求め、浸水速度 $v_w = \beta nL$ (n は間隙率)を算出したところ、表-2の右欄のとおりである。上述の地表付近の透気係数の値(表-2の中欄)と比較すると、ケースA、BとD~Fでは $k_a > v_w$ 、間隙空気圧が発生したケースCでは $k_a < v_w$ の関係にある。間隙水の v_w は間隙空気の地表からの排出速度に相当するため、ダルシー則に従って動気勾配 $i_a (= v_w / k_a)$ を試算すると、ケースA、BとD~Fでは0.01~0.1程度の微小な大きさであるが、ケースCでは60程度の値になり透気の圧力勾配がかなり大きい。即ち、間隙空気圧の発生は、浸水に伴って間隙水移動によって間隙空気が排出されようとするが、その排出速度に対して地表境界の透気に対する抵抗が大きいため、間隙空気がスムーズに排出されず圧縮を受けたことによると考えられる。

(3) 間隙空気圧発生による破壊現象

写真-1は、ケースCについて、間隙空気圧の増加に伴

う試料層の変化の様子を示したものである。図-3(c)を参照して、間隙空気圧が増加し始め、 $z = 45\text{cm}$ において 5kN/m^2 程度の空気圧に達したとき、試料層表面から間隙空気が泡状に噴出し始め、更に、地表面付近で局所的な亀裂や土粒子の流動化が生じた。その後、破裂音とともに写真-1のような大きめの亀裂に発達した。この破壊の様子は、間隙水による浸透破壊と異なる特徴がある。

4. あとがき

本論文では、河川堤防が浸水を受けたときの間隙空気圧の発生原因を究明するため、不飽和な模型地盤の浸水実験に基づいて、浸水に伴う間隙空気の挙動を考察した。その結果、主に次述する事項が得られた。

- (1) 飽和透水係数が 10^{-3}cm/s のオーダーをもつ珪砂8号では、降雨量が 80mm/hr 程度を超える条件のとき顕著な間隙空気圧が発生した。透水係数が 10^{-2}cm/s のオーダーの木曽川堤防砂では、降雨量が 100mm/hr に達しても空気圧発生は認められなかった。
- (2) 降雨によって地表面付近の飽和度は高くなり透気性が低下して、それが降雨や河川の浸水に伴う間隙空気の排出を阻害するため、間隙空気が圧縮を受け圧力が高まる原因であることが考えられた。
- (3) 間隙空気圧の増大に伴って、地表面から間隙空気が泡状に噴出するとともに、内部で亀裂が発達する特徴的な破壊形態が観察された。

参考文献

- 1) 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, 土木学会論文報告集, No.262, pp.91-100, 1977.
- 2) 田中 正: 雨水浸透と地下水涵養(4.地下水の自然涵養 4.1 自然涵養のプロセス), 地下水学会誌, Vol.38, No.3, pp.195-204, 1996.
- 3) 小俣新二郎: 豪雨による斜面崩壊, 物理探査, Vol.58, No.6, pp.599-609, 2005.
- 4) 前田健一, 柴田 賢, 馬場干児, 小林 剛, 栢尾孝之, 尾畑 功: 模擬堤防土槽実験によるエアブローの確認と数値解析, 河川技術論文集, Vol.18, pp.305-310, 2012.
- 5) Meiri, D.: Two-phase flow simulation of air storage in an aquifer, *Water Resources Research*, Vol.17, No.5, pp.1360-1366, 1981.
- 6) 中野政詩: 土の物質移動学, 東京大学出版会, pp.23-26, 1991.
- 7) van-Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 8) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 9) 神谷浩二, 井上光弘: 水分特性曲線を用いて不飽和土の透気係数と飽和度の関係を推定する関数モデルの考察, 土木学会論文集C, Vol.64, No.3, pp.650-661, 2008.

(2014. 4. 3受付)