

# 河川堤防の透気・防水性シート敷設による 間隙空気噴発の抑制効果

## EFFECT OF BREATHABLE-WATERPROOF GEOTEXTILE ON PREVENTION OF THE PORE-AIR BLOW IN RIVER DIKE

神谷浩二<sup>1</sup>・大場敬士<sup>2</sup>・山田周作<sup>3</sup>・石田正利<sup>4</sup>

Kohji KAMIYA, Keishi OHBA, Shusaku YAMADA and Masatoshi ISHIDA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>正会員 大成建設(元 岐阜大学大学院生) (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

<sup>4</sup>正会員 太陽工業 国土環境エンジニアリングカンパニー (〒154-0001 東京都世田谷区池尻2-33-16)

It has been pointed out that the pore-air blows off from the surface of river dike during heavy rainfall. It is therefore important to consider the influence of the pore-air blow on the stability of the dike. Based on the laboratory water infiltration experiment in the unsaturated soil column, we found that the pore-air pressure in the soil was generated by the seepage of the water when the air permeability at near the surface was reduced by the rainfall. The pore-air blow occurred due to the larger pore-air pressure. In this paper, the effectiveness of the breathable-waterproof geotextile on prevention of the pore-air blow is experimentally examined. As a result, it is shown that the pore-air blow is prevented in while keeping the air permeability at near the surface by laying the geotextile at the ground surface.

**Key Words :** Breathable-waterproof geotextile, Pore-air pressure, Air permeability

### 1. まえがき

不飽和な河川堤防が豪雨時に浸水を受けたとき、堤防内部の間隙空気が地表面から噴発する現象が確認されている。この現象は、地盤に亀裂などの損傷を与え、浸透水の水みちを形成するなどするため、河川堤防の不安定化への一因になることが考えられ、その対策が必要である。従来の遮水シートによる表のり面被覆工法に対比して、間隙空気の噴発現象にも対処するため、降雨や河川水の浸水を抑制し間隙空気の地表からの排出を確保するための透気・防水性シートの適用が検討されている<sup>1)2)</sup>。しかしながら、空気噴発対策を要する堤防の土質等の諸条件や透気・防水性シートの要求性能は明確にされていないと考えられる。筆者らは、不飽和な模型地盤について、鉛直一次元方向で、上面から人工降雨を浸水させ下面から河川水を想定した浸水をさせる再現実験を実施した<sup>3)</sup>。降雨の浸水による地表付近の透気性低下が著しい地盤に河川水が急激に浸水したとき、間隙空気は地盤内に封入され圧力が高まること、空気圧力増大に伴って地表付近では噴発や亀裂の破壊現象に至ることを認めた。また、シートの透気・透水性の評価を行うとともに<sup>4)</sup>、

シート敷設による空気噴発の抑制の有効性を究明した<sup>5)</sup>。そして、空気噴発を抑制するには、シートの透気係数を $10^{-4}\text{m/s}$ オーダー以上に確保する必要性などが明らかになった。しかしながら、実際のシート対策工は、シートの劣化や浮き上り防止のために、その上面に覆土を行うことが多く、筆者らの既往研究<sup>4)</sup>ではシートに覆土を施した状態での透気・防水性シートの性能を評価できていないことが課題として挙げられた。即ち、シートが載荷されたときのその透気係数の要求性能の確保について確認する必要があった。

本論文では、透気・防水性シート工法の実用化に向けて、透気・防水性シートが覆土を想定した載荷圧を受けたときにその透気・透水性に及ぼす影響を基礎実験により検討した。また、不飽和な模型地盤の地表付近にシートを敷設したときの間隙空気圧発生・噴発現象の抑制効果について検証した。

### 2. 透気・防水性シートの透気・透水性の評価

#### (1) 透気・防水性シート

シートは、図-1に示すように、透気性を有した不透水

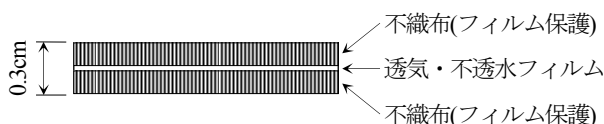


図-1 シート断面の模式図

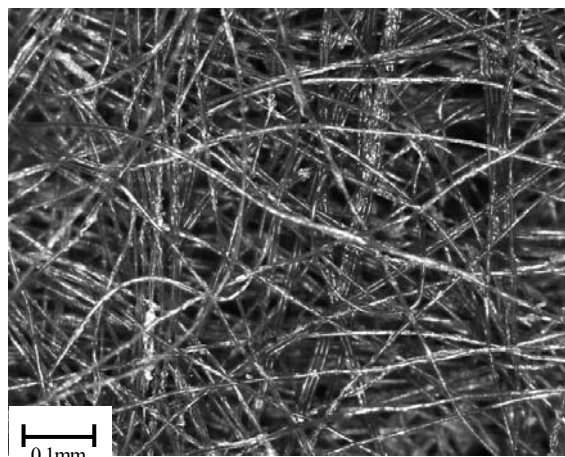


写真-1 シート表面(不織布)の顕微鏡写真

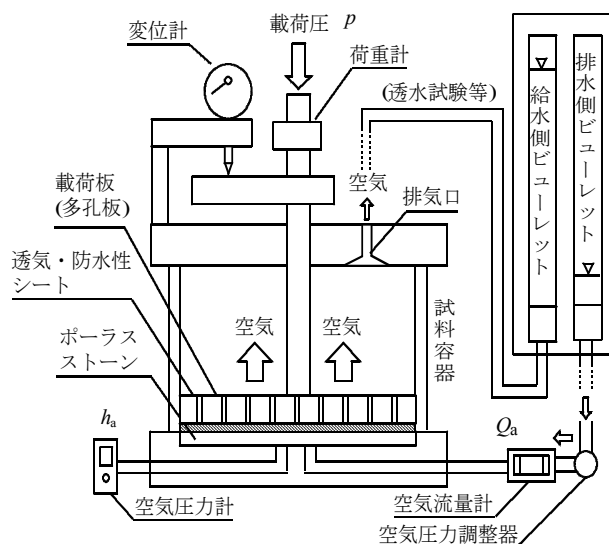


図-2 透気試験装置の概要図



写真-2 シートの含浸処理の様子

性のフィルムとその両側を保護するための不織布の三層からなる。写真-1は、シート表面の不織布の顕微鏡写真を示したものである。不織布では微細な間隙空間が複雑に形成されている。シートの厚さは  $L^* = 0.3\text{cm}$  であり、2. (4) で後述するように乾燥状態のシートの透気係数は  $k_a = 4.7 \times 10^{-5}\text{m/s}$ 、飽和状態の透気係数は  $k_w = 0$  で不透水性である。したがって、このシートを堤防に敷設した場合は、堤防への河川水等の浸水抑制を十分に期待できるが、透気性が低いために堤防内部の間隙空気は排出を抑制して間隙空気圧を増加させる可能性がある。そのため、本研究では、シートに直径が  $d = 0.32\text{mm}$  の細孔を開孔率  $n^*$  (%) (シートの面積  $1\text{cm}^2$  あたりの細孔の面積の割合) で新たに設け、透気性を向上させた。以下では、シートは、透気・不透水性ではなく、透気・防水性として表現した。開孔率は  $n^* = 0.10\%$ ,  $0.16\%$ ,  $0.48\%$ ,  $0.64\%$ ,  $0.97\%$ ,  $1.45\%$  とした。そして、次のように、透気・防水性シートの透気・透水試験によって透気係数  $k_a$  (m/s) と飽和透水係数  $k_w$  (m/s) を調べた。

## (2) 透気試験

覆土を想定してシート上面に載荷圧  $p$  ( $\text{kN/m}^2$ ) を与えながら、透気試験を行った。試験装置は、図-2 にその概要を示すように、シートを設置する試料容器 (内径  $100\text{cm}$ )、空気圧力調整器、空気流量計、空気圧力計、載荷機器、荷重計、変位計によって構成されている。

空気コンプレッサーから供給される圧縮空気を空気圧力調整器によって所定の大きさの空気圧力に調節して試料容器に送り、空気をシートに対して鉛直上向きに透過させる。そのとき、シート下面側に与えた空気圧力水頭  $h_a$  (cm) を空気圧力計により、透過した空気の流量  $Q_a$  ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) を空気流量計によりそれぞれ測定する。また、荷重計によって載荷圧  $p$  ( $\text{kN/m}^2$ ) を計測し、変位計によって載荷したときのシートの変位量  $\delta$  (mm) を計測した。なお、シートは、写真-2 に示すように、その外周に低粘度エポキシ樹脂を含浸させ、ステンスリングを接着させ、それを装置に設置してシート周囲からの漏気等を防ぎ、空気がシート鉛直方向のみ透過するようにした。以下のシートに関する試験においては、すべて同様の処理を施したシートを用いた。試験では、乾燥状態と浸水脱気した湿潤状態のシートを用いた。載荷圧は、覆土のないときの  $p = 0$  と、覆土を  $50\text{cm}$  厚さ、 $100\text{cm}$  厚さのそれぞれで想定した  $p = 8.9$ ,  $17.8\text{kN/m}^2$  とした。

シートの透気係数  $k_a$  (m/s) は、ダルシー則に従って、次式(1)によって算出される<sup>6)</sup>。

$$k_a = \frac{Q_a / A}{(h_a - h_{a0}) / L^*} \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

ここで、 $A$  ( $= 78.54\text{cm}^2$ ) はシートの断面積 (写真-2 のリング内のシート面積)、 $L^*$  (cm) はシートの厚さ、 $h_{a0}$  (cm) はシート上面での空気圧力水頭である。載荷圧  $p$  を与えた

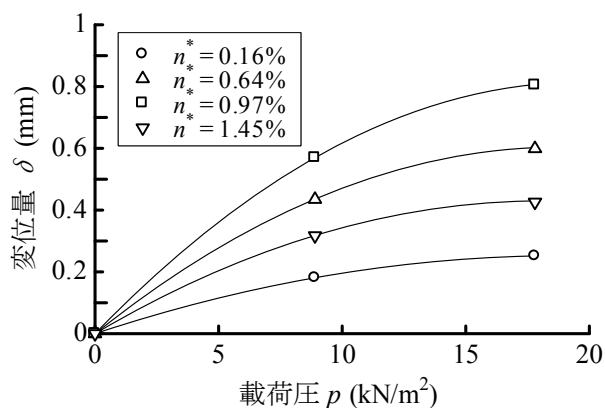


図-3 载荷圧と変位量

条件下での透気試験では、図-3に示すように、载荷圧を大きくするとシートの初期の厚さ( $L^* = 0.3\text{cm}$ )から最大で75%の厚さまでシートが圧縮された。従って、式(1)を用いて透気係数を算出するとき、 $p=0$ では $L^*=L=0.3$ 、 $p=8.9, 17.8\text{ kN/m}^2$ では $L^* < 0.3$  (シートの初期の厚さ $0.3\text{cm}$ に対して、図-3の変位量より载荷時のシートの厚さを求めたときの値)とした。なお、図-2の排気口を大気圧解放することにより、式(1)における $h_{a0}$ をゼロとした。

### (3) 透水試験

透水試験は、図-2の透気試験装置の点線部分で示す装置の排気口と空気流量計接続箇所をビューレットに置き換えたときのものを用いた。試料容器に湿潤状態のシートを設置した後、容器内を全て水で満たし、給水側と排水側のビューレットに水位差を与えてシートに鉛直下向きに透水させる。载荷圧は、透気試験の場合と同様の  $p = 0, 8.9, 17.8\text{ kN/m}^2$ とした。そして、ビューレット内の水位の経時変化の測定に基づいて、飽和透水係数 $k_w$  (m/s)をダルシー則に従って次式(2)によって算出する。

$$k_w = 2.303 \frac{aL^*}{2A(t_2 - t_1)} \log \frac{h_1}{h_2} \cdot 10^{-2} \quad (2)$$

ここで、 $a$  (cm<sup>2</sup>)はビューレットの断面積、 $(t_2 - t_1)$  (s)は測定時間、 $h_1$  (cm)は時刻 $t_1$ におけるビューレットの水位差、 $h_2$  (cm)は時刻 $t_2$ における水位差である。

### (4) 透気係数

#### a) 乾燥状態での透気係数

図-4は、開孔率 $n^* = 0.64\%, 0.97\%, 1.45\%$ の場合について乾燥シートにおける空気圧力水頭 $h_a$ と空気流量 $Q_a$ の関係を示したものである。図中の破線のように、この関係に上記の式(1)をフィッティングさせることによって乾燥シートの透気係数 $k_a$ を求めた。

図-5は、開孔率 $n^*$ と透気係数 $k_a$ の関係を示したものであり、後述の湿潤シートの場合を併記した。開孔率が大きくなるほど透気係数は大きくなる傾向にある。载荷圧を加えたとき、 $p = 0$ の場合の透気係数と比較すると、 $p$

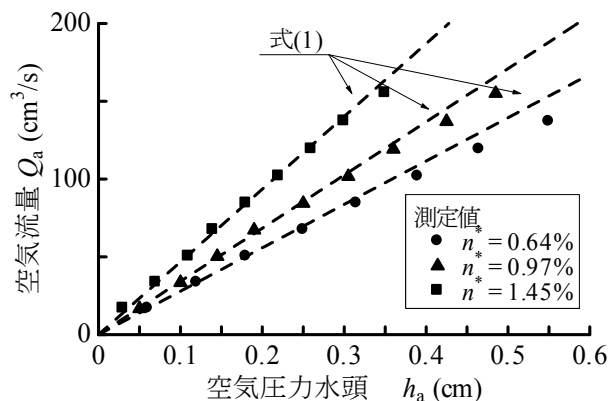


図-4  $h_a$ - $Q_a$  関係 (乾燥シート)

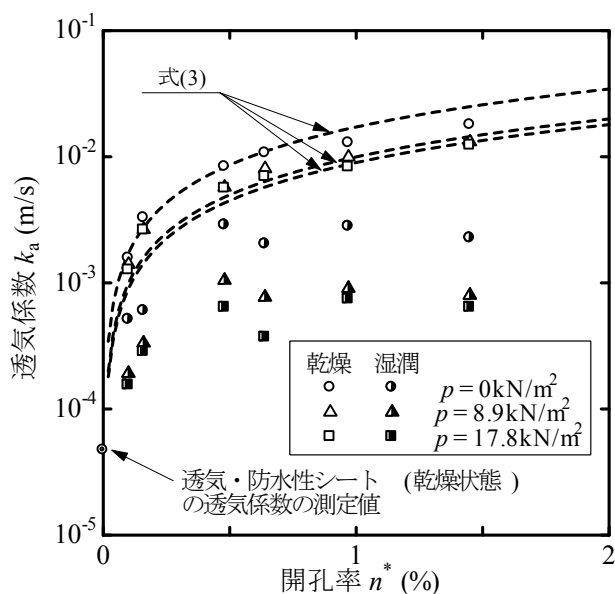


図-5 開孔率と透気係数

$= 8.9\text{ kN/m}^2$ のとき $k_a$ 値は6割から9割低下し、 $p = 17.8\text{ kN/m}^2$ のとき5割から8割低下して、载荷圧の増加によってシートの透気係数は低く評価される。図-5の破線は、次のHagen-Poiseuille則に従った次式(3)による関係 $\eta$ を重ね合わせて示したものである。

$$k_a = \frac{\gamma_w}{32\eta_a} n^* d^2 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

ここで、 $\gamma_w$  (kN/m<sup>3</sup>)は水の単位体積重量、 $\eta_a$  (Pa·s)は空気の粘性係数である。 $p = 0$ においては、式(3)中の $d$ に $0.32\text{mm}$ を代入したときの関係を図-5に重ね合わせて示した。一方で、 $p = 8.9, 17.8\text{ kN/m}^2$ においては、 $d$ をフィッティングパラメータとして最小二乗法によって求めたところ、 $p = 8.9\text{ kN/m}^2$ のとき $d = 0.24\text{mm}$ 、 $p = 17.8\text{ kN/m}^2$ のとき $d = 0.23\text{mm}$ であった。载荷圧が大きくなるほどシートの細孔が小さく評価されていて、载荷したときに $d$ が減少するために $k_a$ 値が小さくなる原因と考えられる。 $n^* = 0.1 \sim 1.45\%$ の範囲では、透気試験による $n^*$ と $k_a$ の関係は、式(3)による関係とほぼ合致する。即ち、

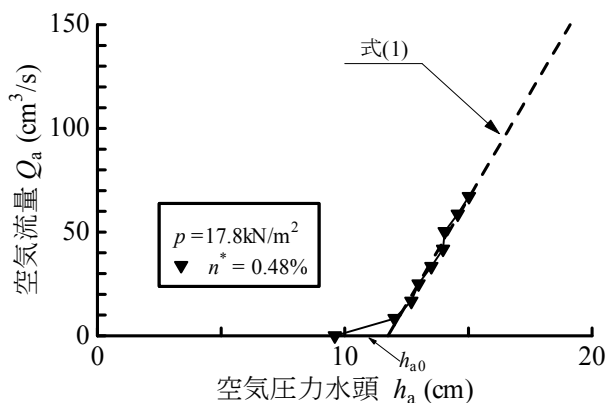


図-6  $h_a$ - $Q_a$  関係 (湿潤シート)

乾燥状態のシートの透気係数には、シート表面の不織布の複雑な間隙構造(写真-1参照)の影響が現れ難く、その値は開孔率と孔径によって近似的に表すことができる。

#### b) 湿潤状態での透気係数

図-6の▼印は、開孔率 $n^* = 0.48\%$ において、 $p = 17.8 \text{ kN/m}^2$ のときの湿潤状態のシートの空気圧力水頭 $h_a$ と空気流量 $Q_a$ の関係を示したものである。空気圧が10cm程度のときに空気がシートを透過し始め、空気圧を徐々に増加させると、図中の破線のように $h_a$ と $Q_a$ はほぼ直線関係になることが得られた。湿潤シートの上下面での空気透過時の空気圧力水頭差は $(h_a - h_{a0})$ とみなすことができ、図-6の破線のように、 $h_a$ と $Q_a$ の直線的な関係に式(1)をフィッティングさせることによって、湿潤シートの透気係数 $k_a$ を求めることができる。上記の図-5には、湿潤シートの開孔率と透気係数の関係を示した。

湿潤シートの透気係数は、乾燥シートの1/10程度に低下した。これは、シートを保護する不織布の間隙が保水し、細孔の一部を塞いだことが原因だと考えられる。一方で、載荷圧を加えたとき、 $p = 0$ の場合の湿潤シートの透気係数と比較すると、 $p = 8.9 \text{ kN/m}^2$ のとき $k_a$ 値は3割から5割低下し、 $p = 17.8 \text{ kN/m}^2$ のとき2割から5割低下した。載荷圧が加わると不織布の繊維による間隙が狭くなって保水性が高まるため、空気流に対する抵抗が高くなることによると考えられる。図-5の湿潤状態の透気係数と開孔率の関係は、乾燥状態の関係と比べて、細孔の開孔率による影響が現れ難く、不織布の保水性が支配的に影響するのではないかと考えられる。

#### (5) 透水係数

図-7は、透水試験で得られた開孔率 $n^*$ と飽和透水係数 $k_w$  (m/s)の関係を示したものである。載荷圧を与えると飽和透水係数は若干低下するが、おおむね $k_w = 10^{-5} \text{ m/s}$ 程度であり低透水性の値を示し、開孔率が大きくなるほど高めになる傾向にある。

シートの防水性については次の鉛直一次元模型実験によって確認する。

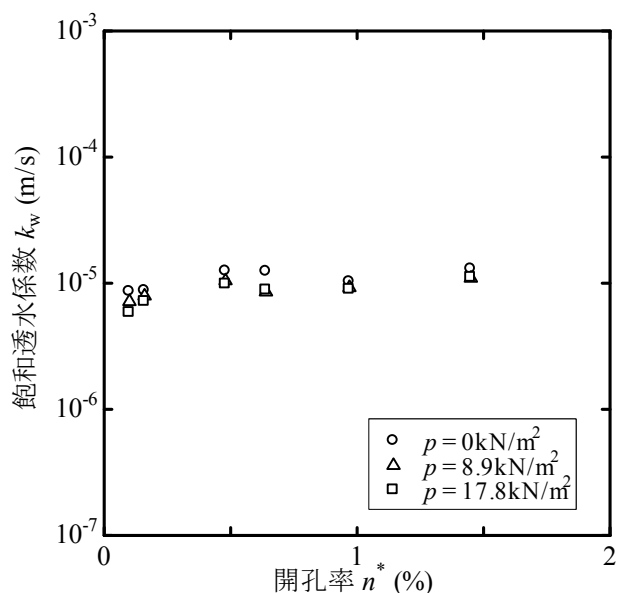


図-7 開孔率と透水係数

### 3. 透気・防水性シート敷設による噴発現象抑制

既往の研究<sup>3)</sup>では、上述したように、 $10^{-5} \text{ m/s}$ オーダーの飽和透水係数をもつ土質材料が降雨と河川水の急激な浸水を受けたときに間隙空气の噴発現象が生じることが得られ、この現象を抑制するには、浸水時のスムーズな間隙空气の排出のための $10^{-4} \text{ m/s}$ オーダー以上の透気係数の維持が要求されると考えられた。以下では、不飽和な模型地盤について、その表面に透気・防水性シートを敷設することによって間隙空气噴発の抑制を確認した。

#### (1) シート敷設したときの浸水実験

##### a) 装置と方法

図-8は、模型地盤の鉛直一次元浸水実験装置の概要を示したものであり、その写真を写真-3に示した。装置は、試料を充填する試料管(内径 $\phi 15 \text{ cm}$ 、長さ $L = 200 \text{ cm}$ の亚克力製の円筒管)、地表から降雨を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 $\phi 10 \text{ cm}$ 、長さ $200 \text{ cm}$ の亚克力製の円筒管)、試料層内の飽和度 $S_r$  (%), 間隙水圧 $u_w$  ( $\text{kN/m}^2$ ), 間隙空気圧 $u_a$  ( $\text{kN/m}^2$ )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。

試料には、硅砂6号(50%粒径 $D_{50} = 0.337 \text{ mm}$ )と硅砂8号( $D_{50} = 0.099 \text{ mm}$ 、飽和透水係数 $k_w = 3.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ )を用いた。

まず、硅砂8号を長さ $L = 150 \text{ cm}$ で充填したもの(間隙率 $n = 0.468$ )を浸水飽和させ、重力排水を行ったものを初期状態とした。その後、硅砂8号による試料層の地表面に開孔率 $n^* = 0.1\%$ の透気・防水性シートをシリコンで試料管に接着して敷設し、その上面に覆土を想定した硅砂6号( $n = 0.462$ )を充填した。なお、水分計、間隙水圧計の

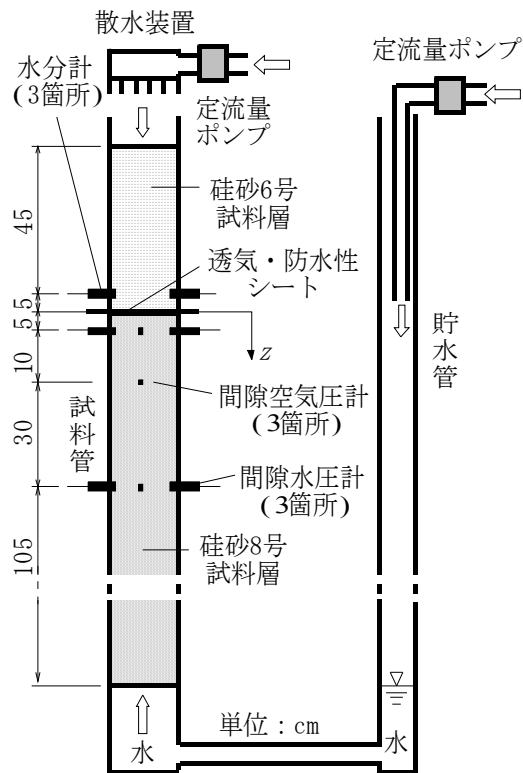


図-8 模型地盤浸水実験装置の概要図

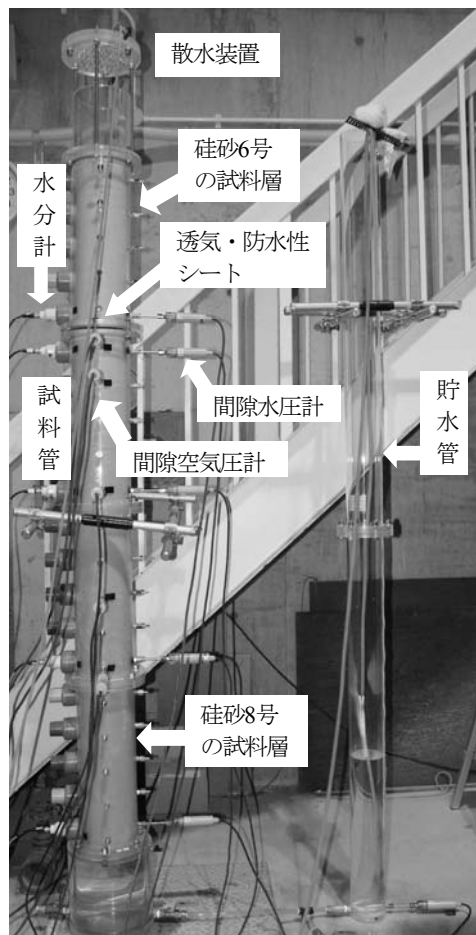


写真-3 模型地盤浸水実験装置

それぞれは、硅砂6号の試料層の底面から5cmの高さと、硅砂8号の試料層の表面からの深さ $z=5, 45\text{cm}$ の3箇所、間隙空気圧計は硅砂8号の $z=5, 15, 45\text{cm}$ の3箇所それぞれ設置した。そして、降雨量 $R=80\text{mm/hr}$ で散水し、硅砂6号の試料層内に設置した水分計に降雨浸水の浸潤面が到達したとき、貯水管の水位を水位上昇速度 $v_H=100\text{cm/hr}$ で上昇させることで地盤下部から浸水を開始した。なお、浸水実験では、シート上面に降雨浸透水が達したとき、湛水を発生させないため試料管の一部に排水箇所を設置した。また、貯水管内の水位が硅砂8号の試料層の地表面と同じ高さ(試料層底面から150cm高さ)に達したときに実験を終了した。

#### b) シートの透気・防水性

図-9は、浸水に伴う試料層の飽和度 $S_r$ 、間隙水圧 $u_w$ 、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。降雨によって地表付近( $z=5\text{cm}$ )の飽和度は初期状態から変化しないため、シートが降雨の浸水を抑制したと考えられる。一方、下部からの浸水を開始して試料層内の間隙空气の排出過程に至っても、間隙空気圧計において圧力の増大は確認されなかったため、シートの敷設によって地表の透気性が確保され、間隙空气がスムーズに排出したと考えられる。

### (2) シート敷設しない場合の浸水実験

#### a) 装置と方法

図-8の装置において、上述のシート敷設時の浸水実験終了後に、シートと硅砂6号を除去して硅砂8号のみにした状態で、再度重力排水させ飽和度分布を平衡状態にした。そして、それを初期状態としたときの上述と同じ降雨等の条件下での浸水実験を行った。

#### b) 間隙空気圧の発生

図-10のシートを敷設しない場合では、 $z=5\text{cm}$ において、降雨浸水によって飽和度が80%程度まで上昇する。間隙空気圧は、下部浸水開始より20分程度経過し、地表付近の飽和度が十分に高くなったときに $z=45\text{cm}$ で徐々に上昇し始め、更に35分経過後に間隙空気圧 $u_a=5\text{kN/m}^2$ 程度に達し、地表で間隙空气の噴発現象と地表付近で亀裂の発生(写真-4)が観察された。間隙空気圧発生に伴う地盤の変状は、初期段階では地表面付近の範囲で土粒子の流動化が生じていたが、時間の経過に伴って $z=5\text{cm}$ 付近で大きな亀裂に発達した。このように、シート敷設しない場合には、間隙空气の噴発現象が発生することが確認されたが、上述3. (1)のようにシート敷設によって噴発現象が抑制されることが検証された。

### 4. あとがき

本論文では、河川堤防の浸水時の間隙空气の噴発現象を抑制する透気・防水性シートの透気・透水性を調べるとともに、不飽和な模型地盤の浸水実験に基づき、その

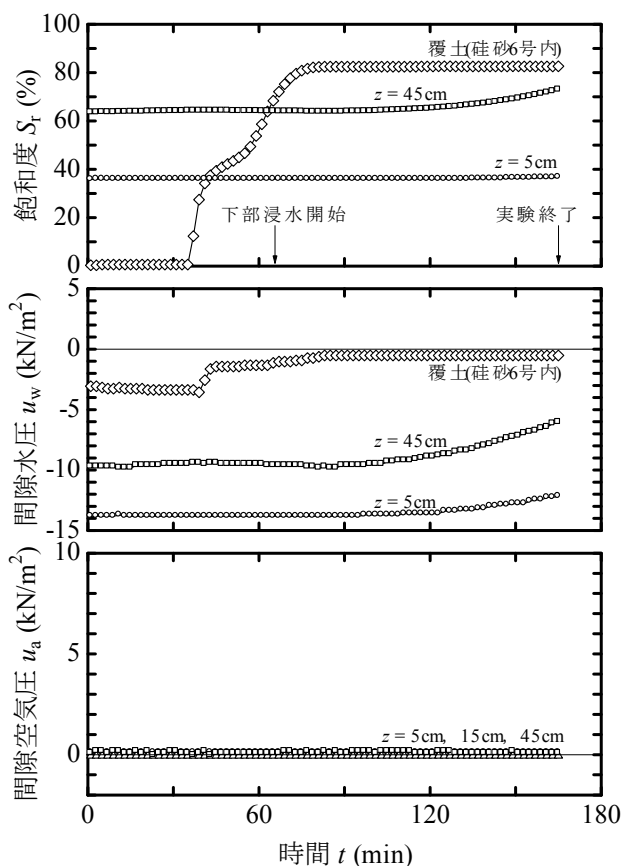


図-9 飽和度、間隙水圧・空気圧(シート敷設あり)

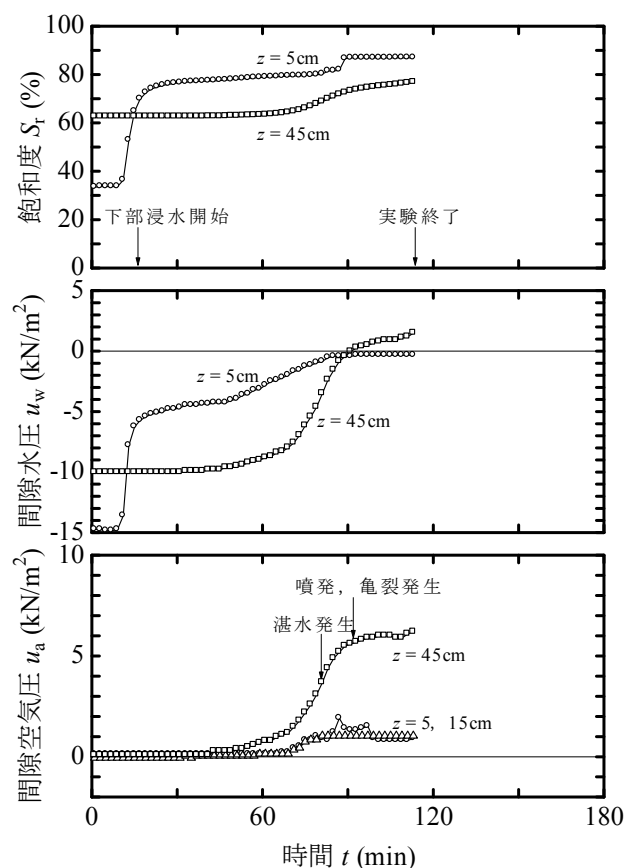


図-10 飽和度、間隙水圧・空気圧(シート敷設なし)

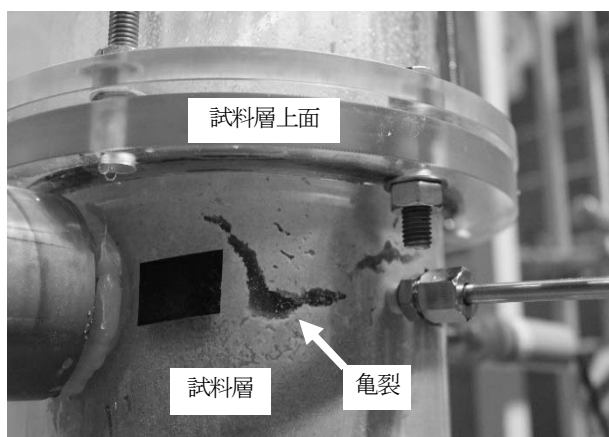


写真-4 間隙空気圧発生による地盤変状

シートの効果を考察した。透気・防水性シートは、覆土によって載荷された場合でも、乾燥時で $10^{-3}$ m/sオーダー以上の透気係数、湿潤時で $10^{-4}$ m/s以上の透気係数を確保できた。一方で、そのシートの飽和透水係数は $10^{-5}$ m/s程度であった。そして、噴発現象が生じる事例について、同じ模型地盤の地表付近に透気・防水性シートを敷設して降雨と河川水による浸水実験を実施した結果、浸水時に間隙空気が地表からスムーズに排出するために間隙空気圧発生や破壊現象を解消できることが検証された。

謝辞：本研究は、JSPS科研費25420500の助成を受けた。

また、(公財)河川財団の平成26年度河川整備基金の助成を受けた。関係各位に謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 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。
- 2) 前田健一，杉井俊夫，栢尾孝之，小林 剛，白田文昭，黒田英伸，柴田 賢，齊藤 啓：実河川堤防における豪雨対策としての透気遮水シートの設置効果，ジオシンセティックス論文集，Vol.28，pp.31-36，2013。
- 3) 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。
- 4) 神谷浩二，石田正利，高木英知：間隙空気塊による堤防のエアブロー防止対策工の基礎実験，河川技術論文集，Vol.18，pp.311-314，2012。
- 5) 神谷浩二，山田周作，石田正利：河川堤防の浸水時の間隙空気圧発生を抑制するシート対策工に関する実験的考察，ジオシンセティックス論文集，Vol.28，pp.17-22，2013。
- 6) 宇野尚雄，杉井俊夫，神谷浩二：比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察，土木学会論文集，No.469/III-23，pp.25-34，1993。
- 7) Bear, J.: *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Publ. Co., pp.162-163, 1972。

(2015. 4. 3受付)