

河川堤防の浸透対策工のための 透気防水シートの機能評価

CHARACTERISTICS OF AIR-PERMEABLE WATER-PROOF GEOSYNTHETICS FOR COUNTERMEASURE AGAINST SEEPAGE FAILURE OF RIVER DIKE

神谷浩二¹・伊東侑毅²・佐藤拓也³・川岸 靖⁴・小島悠揮⁵

Kohji KAMIYA, Yuki ITO, Takuya SATO, Yasushi KAWAGISHI and Yuki KOJIMA

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

²(株)熊谷組 名古屋支店 (〒460-8402 愛知県名古屋市中区栄4-3-26 昭和ビル8階)

³名古屋市 (〒460-8508 愛知県名古屋市中区三の丸3-1-1)

⁴正会員 太陽工業(株) 国土環境エンジニアリングカンパニー (〒54-0001 東京都世田谷区池尻2-33-16)

⁵正会員 Ph.D. 岐阜大学助教 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

This paper studies a countermeasure method against seepage failure of the river dike by covering with the geosynthetics having air permeable and water proof properties. The influence of the placement of the geosynthetics on the behavior of pore-air and pore-water in the river dike was examined based on the laboratory experiment assuming the infiltration of the rainfall and river water into the unsaturated soil. An improved geosynthetics with enhanced the air permeability and the water proof as compared with the one in our previous study was used. As a result, it was recognized that the placement of the improved geosynthetics prevented the pore-air pressure generation and of the rainfall infiltration.

Key Words : *Geosynthetics, pore-air pressure, air permeability, water proof*

1. まえがき

不飽和な河川堤防が豪雨時に急激な浸水を受けたとき、堤体内部で封入・圧力増大した間隙空気が地表面から噴発する現象が指摘され、河川堤防の安定性低下の一因になることが懸念されている。筆者らは、砂質土試料による模型地盤について降雨と河川水を想定して鉛直一次元方向で浸水させる室内実験に基づき、降雨によって地表付近の透気性が著しく低下した状態で急激な浸水を受けたとき、間隙空気の圧力発生・噴発現象に至ることを明らかにした¹⁾。即ち、噴発現象を防御するには、浸水時に地表付近の透気性を十分に確保することが必要であった。そのため、表のり面被覆工法で用いられる従来の遮水シートに対比して、降雨や河川水の浸水を抑制しつつ間隙空気を地表から速やかに排出させるための透気防水シートの適用が検討されてきた^{2) 3)}。そして、上記の模型地盤に対する浸水実験に基づき、地表付近へのシートの敷設によって降雨による透気性低下が抑制され、間隙空気の噴発現象を防御できる可能性を見出した⁴⁾。

本論文は、透気防水シートの浸透対策工としての有効性を高めるため、浸水履歴を伴ったときのシートの透気性と防水性の機能の持続について基礎的に検討したものである。併せて、既往成果^{1) 4)}で用いた透気防水シートに比べて、透気性と防水性をより高めた新たな透気防水シートの適用性を究明した。本文では、先ず、新たに用いたシートの透気・透水性の基本的性質を明らかにした。次に、地表付近にシートを敷設した模型地盤に対する降雨と河川水の浸水実験を実施して、従来のシートと新たなシートの場合を比較しつつ、浸水を繰り返すなどして長期的な浸水挙動や間隙空気圧の発生状況を調べた。

2. 透気防水シートの透気性・透水性

(1) 透気防水シート

シートは、図-1に示すように、透気性・低透水性のフィルムとその両面を保護するための長繊維不織布によって構成される。既往研究^{2) 4)}で用いた透気性・低透水性フィルムは、微多孔性ポリエチレンフィルムに直径

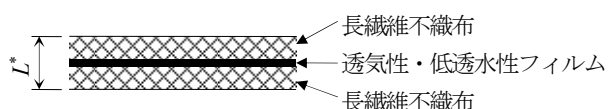


図-1 透気・防水性シートの断面構造の概要図

0.32mmの孔を複数設けたものであり、開孔率(そのポリエチレンフィルムの1cm²の面積に含まれる0.32mm孔の面積の割合)が0.1%のものであった。以下では、既往研究でのフィルムを用いたときのシートを従来型シートと呼ぶ。これに対して、本論文では、太さが1dtex未満の極細繊維が積層した不織布構造を有する透気性・低透水性フィルムを新たに用いた。このフィルムを用いたときのシートを改良型シートと呼ぶ。改良型シートは、従来型シートに比べると、透気性と防水性の性能向上が期待され、以下では両者の透気係数と透水係数を比較した。

(2) 透気係数

a) 透気試験の装置と方法

河川堤防へのシート敷設時の覆土を想定して、シート上面に載荷圧を与えたときの透気試験を実施した⁴⁾。試験装置は、図-2に示すように、試料容器、空気圧力調節器、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る⁴⁾。試料容器内に設置したシートに、ある一定の載荷圧 p (kN/m²)(荷重計で測定)を与え、その圧縮に伴うシートの鉛直変位 δ (mm)(変位計で測定)が一定に落ち着いた状態を用意する。次に、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節器によって所定の圧力に調節して試料容器の下部に送気し、その空気をシートに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)を空気圧力計によって測定し、また、透過した空気流量 Q_a (cm³/s)を空気流量計によって測定する。

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^{2),4)}。

$$k_a = \frac{Q_a/A}{(h_a - h_{a0})/L^*} \cdot \frac{1}{100} \quad (1)$$

ここで、 A (cm²)はシートの断面積(シートは直径φ10cmの円形であるため $A = 78.54\text{cm}^2$)、 h_{a0} (cm)はシート上面での空気圧力水頭、 L^* (cm)はシートの厚さである。

本論文では、改良型シートについて、自然乾燥状態のものと同様に十分に湿潤させた状態のものをそれぞれ用いた。一方、載荷圧は、0～100cm程度の範囲内での覆土厚さを想定して、 $p = 0, 3.4\text{kN/m}^2, 8.7\text{kN/m}^2, 17.3\text{kN/m}^2$ とした。載荷圧を大きくすると、改良型シートは、載荷していないときの厚さ0.5cmに比べると最大で8割ほどの厚さにまで圧縮された。従って、式(1)の L^* の値は、 $p = 0$ のとき $L^* = 0.5\text{cm}$ 、 $p > 0$ のとき $L^* < 0.5\text{cm}$ (鉛直変位 δ より求まる値)である。

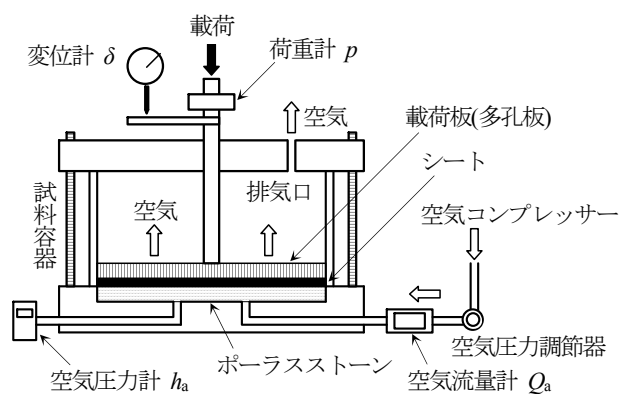


図-2 透気試験装置(透水試験併用型)の概要図

b) 乾燥・湿潤状態の透気係数

図-3(a)は、乾燥状態の改良型シートについて、載荷圧 $p = 17.3\text{kN/m}^2$ の場合を例に、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。図中の実線は式(1)による関係を重ね合わせて示したものである。なお、図-2の装置図において、排気口を大気に開放しているため、シートの上面側の空気圧力水頭 $h_{a0} = 0$ とみなされる。図-3(a)によれば、空気圧力水頭が大きくなると式(1)による直線関係からずれが生じる傾向にある。このずれの原因は、空気が層流から乱流に移ることによって考えられる²⁾。従って、 h_a と Q_a に直線関係が認められる範囲に対して、図中の実線のように式(1)をフィッティングさせることによって、乾燥状態の透気係数 k_a を求めた。

一方、図-3(b)は、湿潤状態の改良型シートについて、載荷圧 $p = 17.3\text{kN/m}^2$ の場合を例に、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。空気がシートを透過し始めから、空気圧力水頭を徐々に増加させると曲線的な関係によって空気流量が増加した後、図中の実線のようにほぼ直線関係になることが得られた。湿潤シートの上面では、空気透過時に僅かな湛水が生じ水膜による気泡が生じ、それによる空気透過への抵抗に相当した空気圧力水頭 h_{a0} が発生すると考えられた²⁾。即ち、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²⁾、図-3(b)の実線のように、 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、湿潤状態の透気係数 k_a を求めた。

図-4は、載荷圧 p との関係によって乾燥と湿潤状態での改良型シートの透気係数 k_a の値をそれぞれ示したものであり、従来型シートの k_a の値⁴⁾を併記した。改良型と従来型のいずれのシートにおいても載荷圧の増加によって透気係数は減少する傾向にある。 $p = 0$ の場合に比べると、改良型シートでは、乾燥状態の透気係数は最大で2割程度が減少し、湿潤状態のものは最大で3割程度が減少する。従来型シートでは、乾燥状態の透気係数は最大で2割程度、湿潤状態のものは最大で7割程度が減少する。また、改良型シートの透気係数は、従来型シートに比べると、同程度の載荷圧のとき乾燥状態で十数倍の大きさ

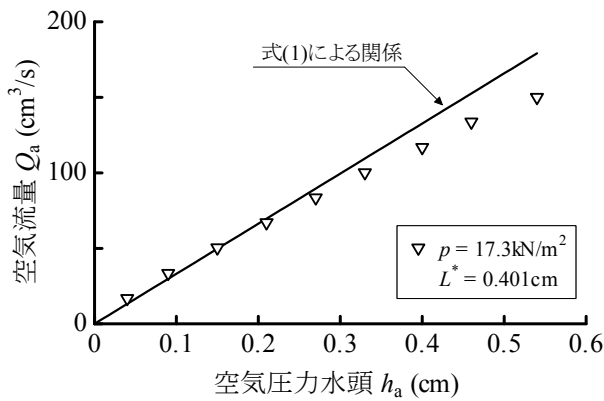


図-3(a) 空気圧力水頭と空気流量(乾燥状態の改良型シート)

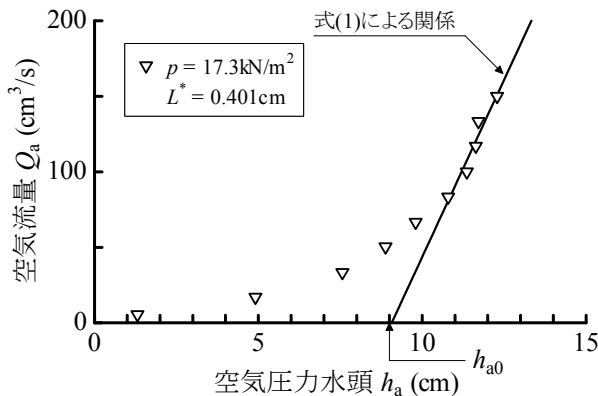


図-3(b) 空気圧力水頭と空気流量(湿潤状態の改良型シート)

にあり、湿潤状態では3～6倍の大きさにある。即ち、改良型シートは、従来型シートに比べると、载荷を受けた場合でも高めの透気性を維持できる特徴がある。

(3) 透水係数

a) 透水試験の装置と方法

透水試験には、図-2の透気試験装置において、下方の空気流量計(出口側)の接続口と上方の排気口のそれぞれの箇所にビューレットを接続させ置き換えたときの装置を用いた⁴⁾。なお、ビューレットは、内径φ1.5cmで長さ50cmの亚克力管である。試料容器に湿潤状態の改良型シートを設置してその容器内を脱気水で満たした後、シートにある一定の载荷圧 p を与えその鉛直変位 δ が一定に落ち着いた状態を用意する。そして、図-2の空気流量計の接続口側を排水側とし排気口側を給水側として、ビューレットに水位差を与えることによってシートに鉛直下向きに透水させる。このとき、給水側と排水側のそれぞれのビューレットの水位の経時変化を測定する。飽和透水係数 k_w (m/s)は、ダルシー則に従って、次式(2)によって算出される⁴⁾。

$$k_w = 2.303 \frac{aL^*}{2A(t_2 - t_1)} \log \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{1}{100} \quad (2)$$

ここで、 a (cm²)は給水側・排水側ビューレットの断面積、

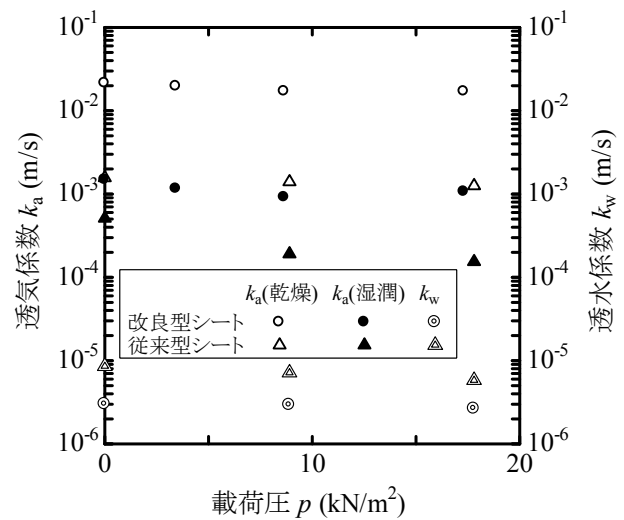


図-4 载荷圧と透気係数・透水係数(従来型と改良型シート)

($t_2 - t_1$) (s)は測定時間の間隔、 h_1 (cm)は時刻 t_1 (s)における給水側と排水側のビューレットの水位差、 h_2 (cm)は時刻 t_2 (s)における給水側と排水側のビューレットの水位差である。なお、シートの载荷圧は、上記の透気試験の場合と同程度として、 $p = 0, 8.9 \text{ kN/m}^2, 17.8 \text{ kN/m}^2$ とした。

b) 飽和状態の透水係数

上記の図-4には、载荷圧 p との関係によって改良型シートの飽和透水係数 k_w の値を重ね合わせて示し、従来型シートの k_w の値⁴⁾を併記した。透気係数の場合と同様、改良型と従来型のいずれのシートにおいても载荷圧の増加によって透水係数は減少する傾向にある。 $p = 0$ の場合に比べると、改良型シートでは透水係数は最大で1割程度が減少し、従来型シートでは最大で3割程度が減少する。また、改良型シートは、従来型シートに比べると、同程度の载荷圧のとき透水係数の値が3.5割～4.5割の大きさにあり、透水性が低い。

3. シート敷設した模型地盤の浸水実験

(1) 浸水実験の装置と方法

図-5は、降雨と河川水を想定して模型地盤に鉛直一次元方向に浸水させる実験装置の概要図を示したものである⁴⁾。装置は、模型地盤を作製する試料管(内径φ15cmで長さ200cmの亚克力製の円筒管であり、1つあたりの長さ50cmのものを4つで構成)、地表に降雨を供給する散水装置、河川水を想定して模型地盤の底面から浸水させる貯水管(内径φ10cmで長さ200cmの亚克力製の円筒管)、模型地盤内の飽和度 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水分計、間隙水圧計、間隙空気圧計によって構成される。

図-5において、堤体地盤を模擬して、炉乾燥試料を所定の間隙比 e になるように充填して長さ150cmの試料層Aを作製する。そして、貯水管水位を徐々に試料層Aの上

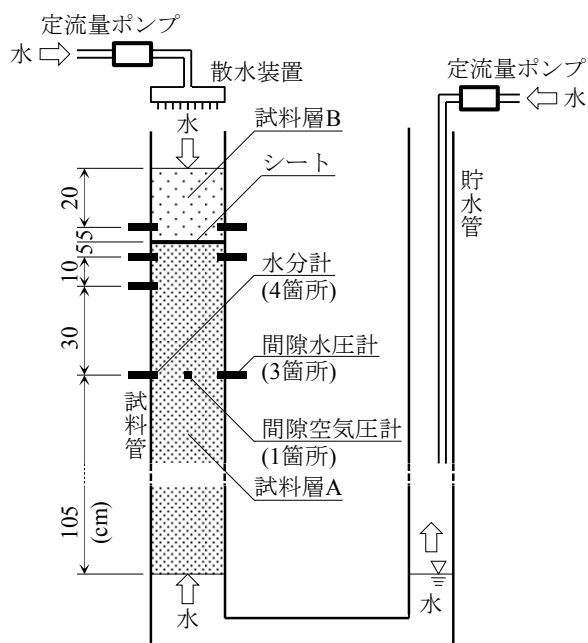


図-5 模型地盤の浸水実験装置の概要図

面の位置まで上昇させることによってその底面から浸水させ全体の飽和度を十分に高める。その後、貯水管水位を試料層Aの底面付近の位置に固定しながら試料層から重力排水させ、飽和度分布が平衡になったものを用意する(このときのものを初期状態とする)。次に、試料層Aの上面に、透気防水シートを試料管に密着させて敷設し、更に、そのシート上面に覆土地盤を模擬して、炉乾燥試料を充填し長さ25cmの試料層Bを作製する。なお、水分計は模型地盤の上面からの深さが $z = 20\text{cm}$ (試料層B)、 30cm (試料層A)、 40cm (試料層A)、 70cm (試料層A)の4箇所に、間隙水圧計は $z = 20\text{cm}$ 、 30cm 、 70cm の3箇所に、間隙空気圧計は $z = 70\text{cm}$ の1箇所にそれぞれ設置した。

散水装置によって覆土を模擬した試料層Bの上面に R (mm/hr)の一定の降雨量を散水し、降雨による浸水がシート上面付近に達したとき、貯水管水位を速度 v_H (cm/hr)で上昇させることによって堤体を模擬した試料層Aの底面から浸水させる。このとき、降雨開始からの時間 t (min)での試料層の飽和度、間隙水圧、間隙空気圧をそれぞれ測定する。なお、降雨は、試料層Bへの浸水後、シート上面付近の試料管側面に設けた小孔より排出され、湛水しないようにした。そして、貯水管水位が試料層Aの上面付近の位置に達した後にその位置を維持させ、試料層Aの $z = 70\text{cm}$ 付近に下方からの浸水が達したとみられるとき降雨を停止した。更に、 $z = 30\text{cm}$ 付近に達したとき貯水管水位を v_H の速度で低下させ始め、その水位が試料層Aの底面付近に達したとき実験を終了した。

(2) 試料とケース

堤体模擬の試料層Aには硅砂8号を用い、覆土模擬の試料層Bには硅砂7号を用いた。なお、両者の間隙比は

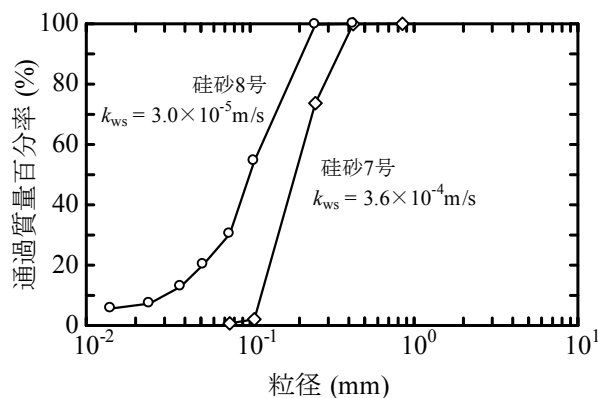


図-6 試料の粒度

いずれも $e = 0.850$ とした。図-6はこれら試料の粒度を示したものであり、飽和透水係数 k_{ws} (m/s)の値を併記した。

透気防水シートには上記の改良型シートと従来型シートを用い、また、比較のため、不透気・不透水性とされる遮水シートを用いた場合も併せて検討した。

降雨量と貯水管水位上昇速度は、図-5においてシートと試料層Bのない状態で試料層A(硅砂8号)のみに対する浸水実験^{1), 4)}で、間隙空气の噴发现象が確認されたときの条件である $R = 80\text{mm/hr}$ と $v_H = 100\text{cm/hr}$ に設定した。また、実験終了後には飽和度分布が平衡した状態にさせた後、再度、降雨と河川を想定した浸水をさせて、計3回の浸水実験を繰り返した。但し、遮水シートを用いた場合は1回のみの浸水実験とした。

(3) 浸水時の間隙水・間隙空气の挙動

図-7の(a)～(c)は、改良型シート、従来型シート、遮水シートのそれぞれを用いたときの飽和度、間隙空气圧の経時変化を示したものであり、降雨量と貯水管水位の経時変化を併記した。

改良型シートの場合の図-7(a)によれば、覆土模擬の試料層Bの $z = 20\text{cm}$ の位置では、飽和度は、降雨の開始後に初期の乾燥状態から75%程度に増加した後にほぼ横ばいに変化し、降雨を停止して再開しても同程度の状態が維持される。シート下面側の堤体模擬の試料層Aでは、底面からの浸水を開始した後に、下方から $z = 70\text{cm}$ 、 40cm 、 30cm の順に飽和度が増加して、最大で65～70%程度の範囲に達する傾向にある。即ち、シート上面側は降雨によって高めの飽和度が継続されているが、降雨と河川の浸水や排水を繰り返しても降雨による浸透水が試料層Aへ浸入した形跡はみられず、改良型シートによる降雨への防水機能が持続されていることが認められる。一方、間隙空气圧は、底面からの浸水が $z = 70\text{cm}$ の位置に到達したあたりから増加し始めて最大で1.5kPa程度に達し、そして、貯水管水位を低下させて試料層A内からの排水が始まる頃から減少して-1kPa程度になった後、ゼロの値に至る傾向にある。この傾向は、その後の浸水・排水の繰り返しによっても同様である。浸水時には

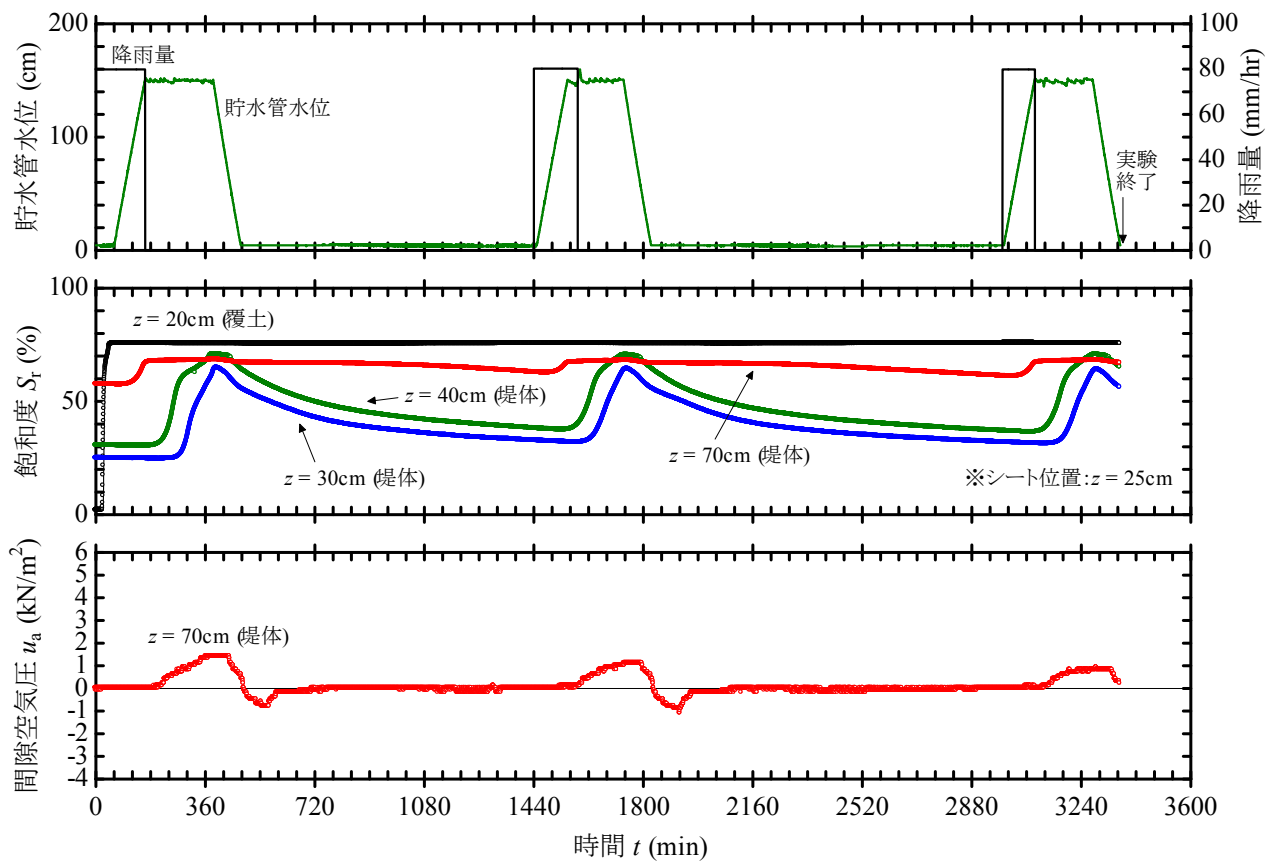


図-7(a) 飽和度と間隙空気圧の経時変化(改良型シート)

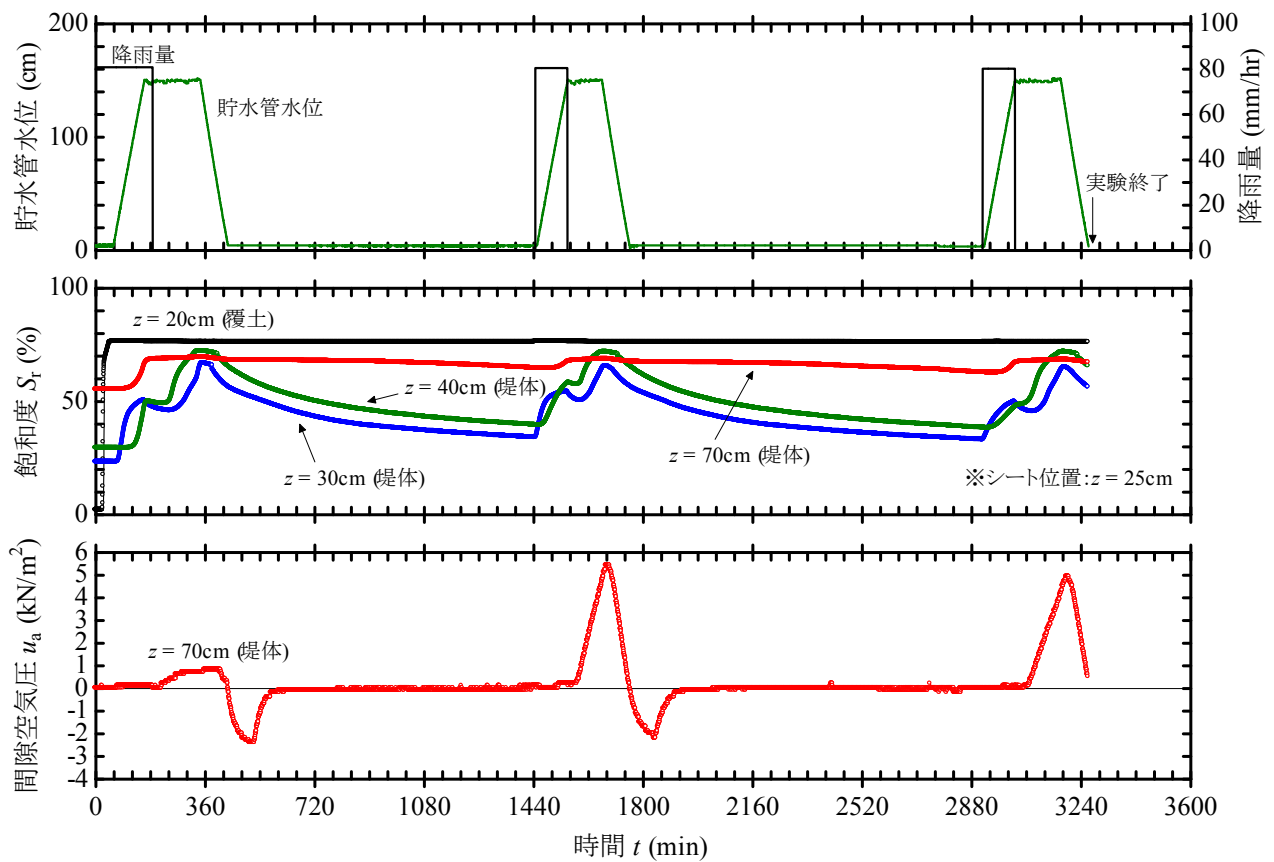


図-7(b) 飽和度と間隙空気圧の経時変化(従来型シート)

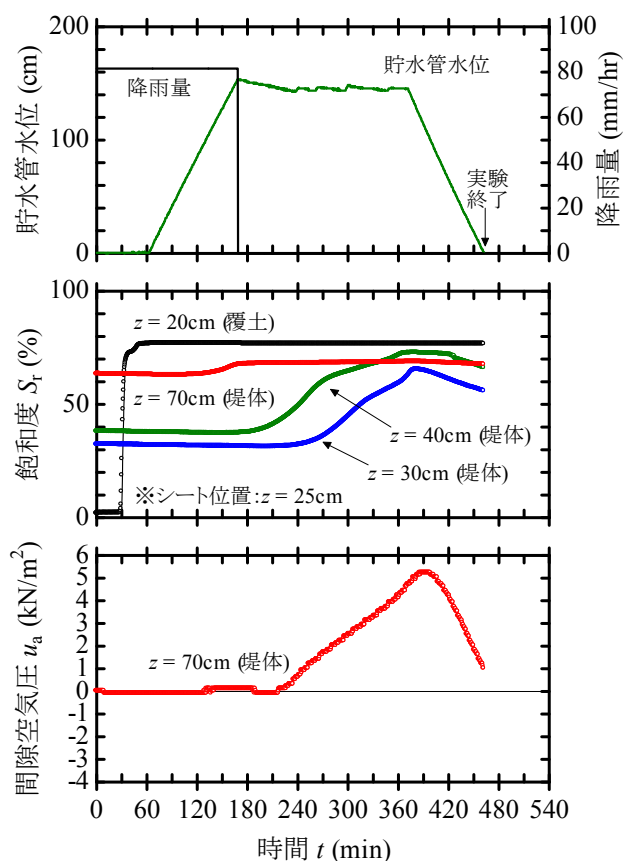


図-7(c) 飽和度と間隙空気圧の経時変化(遮水シート)

間隙空気が圧縮を受けて正值を示し、排水時には一時的に負値を示して間隙空気が膨張に転じているとみられる。

従来型シートの図-7(b)によれば、上記の図-7(a)の場合と同様、試料層Bの飽和度は降雨の開始後に75%程度に増加した後にほぼ横ばいのものが維持される。試料層Aでは、 $z = 70\text{cm}$ の位置に比べ、 $z = 30\text{cm}$ 、 40cm の位置において先行して飽和度が50~60%程度に増加させられ、降雨による浸透水がシートを通過して試料層Aに浸入していることが認められる。即ち、試料層Bで高めの飽和度が維持されるとき、改良型シートに比べると、従来型シートではその透水性が高いためか防水機能の効果が高まらないことが考えられる。一方、間隙空気圧は、図-7(a)と同様、まず、底面からの浸水が $z = 70\text{cm}$ の位置に到達したあたりから増加し始めて最大で1kPa程度に達する。そして、貯水管水位を低下させて試料層A内からの排水が始まる頃から減少して-2kPa程度になった後、ゼロの値に至る。その後、浸水を繰り返すと、間隙空気圧は5kPa程度まで増加した。降雨の浸透水によってシートが湿潤して透気性が低下したり、また、シート下面側への浸透水の到達によって試料層Aの上部の透気性が低下して、繰り返しの浸水によってそれらの透気性低下が著しくなり、試料層Aの間隙空気速やかな排出を阻害したことが空気圧増加を助長した原因であると想像される。なお、5kPa程度の空気圧発生によってシートの変形や試料層Aの亀裂等の発生⁴⁾が懸念されたが、試料層Bによる

土被り圧が作用しているとみられ、試料層等に変状は認められなかった。

ところで、遮水シートを適用した場合の図-7(c)によれば、改良型シートの場合と同様に降雨による浸透水の試料層Aへの浸入を防御したが、そのシートによる試料層Aからの排気への阻害が原因して5kPa程度の間隙空気圧が発生する結果にあった。

4. あとがき

本論文は、河川堤防の浸水時の間隙空気圧発生を抑制する透気防水シート対策工について、模型地盤の浸水実験に基づき、浸水履歴によるシートの透気・防水機能の持続性を検証するとともに、間隙空気挙動への影響を考察した。その結果、主に、次述する事項が得られた。

- (1) 透気性と防水性を高めた改良型シートの適用によって、浸水の繰り返しや浸水時間の長期化を伴った場合でも、降雨の浸水を十分に抑制でき、また、排気性確保によって小さめの間隙空気圧の発生に抑制できると考えられ、対策工としての効果が高まることが示唆された。
- (2) 従来型シートの場合では、繰り返し浸水等によって最大で5kPa程度の間隙空気圧の発生に至った。この空気圧は、降雨の浸透水によるシートやその背面側付近の堤体を模擬した試料層の含水量増加と透気性低下に原因することが考えられた。即ち、従来型シートは、浸水履歴によって透気・防水機能が低下する傾向にあった。
- (3) 改良型シートの透気係数は、従来型シートに比べると、シートが乾燥状態で十数倍の大きさにあり、湿潤状態ではおよそ5倍の大きさにあった。飽和透水係数は4割程度の大きさにあった。

謝辞：本研究は、(公財)河川財団の平成28年度河川基金助成を受けた。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 前田健一, 杉井俊夫, 榎尾孝之, 小林 剛, 臼田文昭, 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.
- 4) 神谷浩二, 大場敬士, 山田周作, 石田正利: 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, 河川技術論文集, Vol.21, pp.383-388, 2015.

(2017. 4. 3受付)