

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

PRIMARY STUDY FOR BREATHABLE AND WATERPROOF GEOTEXTILE FOR PROTECT BY AIR BLOWOUT INSIDE OF THE DYKE

神谷浩二¹・石田正利²・高木英知³

Kohji KAMIYA, Masatoshi ISHIDA and Hidetomo TAKAGI

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 (〒154-0001 東京都世田谷区池尻2-33-16)

³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)

Unsaturated soil of dykes becomes get wet rapidly due to heavy rain that happens frequently in recent years. As a result of this saturation, air blowouts are recognized along weak lines in a dyke which reduce stability of the dyke. The reason of this air blowout is considered as the air mass goes up due to the buoyancy inside of wet dyke due to the buoyancy after the pore air bubbles inside of the dyke growing up to a mass. As a countermeasure to the problem, a construction method which uses breathable and waterproof geotextile, which let the air through with waterproofed or with low permeability, has been developed. The purpose of the geotextile is to prevent water get inside of a dyke while keeping the air out from the dyke. This study reports basic properties of the geotextile regarding on their air permeability and water permeability through laboratory tests.

Key Words : *Geotextile, Air permeability, Breathability, Hydraulic conductivity, Air entry value*

1. まえがき

近年、時間雨量が100mmを超えるような豪雨に伴う河川水位の上昇によって、河川水が堤防を越流し侵食する現象が発生している。また、不飽和な堤防の急激な高飽和度化によって、内部の間隙空気が塊として封入されて圧力が増大し、その空気塊が堤防の弱線に沿って地表面に噴発するエアブロー現象が確認されていて、堤防の不安定化が懸念される。堤防の越流時の侵食や浸透を抑制するために従来から堤防表面の舗装や遮水シート敷設が検討されるが、これらは堤防内部の間隙空気の排出を阻害し、エアブロー現象を助長する可能性がある。

このような現状に対して、堤防内部の間隙空気のスムーズな排出を確保するとともに浸透を抑制するため、透気遮水シート(低透水性含む。以下、シートと略称)を堤防表面に敷設する工法が開発されている^{1), 2)}。本論文では、この工法で用いられるシートの基本的性質を究明するため、室内の透気・透水試験を実施し、シートの透気・透水係数の特徴を調べた。これにより、上記工法の適用に際して、堤防材料の粒度等に応じた適切なシート

の選定方法を示すことに繋げることができる。

2. シートの透気・透水試験

(1) シートの構造

シートは、図-1に示すように、透気性を有した不透水性のフィルムとその両端を保護するための不織布の三層から成る。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が、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、3. (1)で後述するように乾燥状態でのシートの透気係数は $k_a = 3.0 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 、飽和状態での透水係数は $k_w = 0$ で不透水性である。しかしながら、そのシートを河川堤防に敷設した場合には、河川水等に対する堤防の遮水が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の排出を抑制して空気圧を発生させる可能性が予想される。そのため、本論文では、その透気性・不透水性のシートのフィルムに対して、直径が $d = 0.32\text{mm}$ の細孔を開孔率 n^* (%) (シートの面積 1cm^2 あたりの細孔の面積の割合)で新たに設けたときのシートについて、開孔に伴う

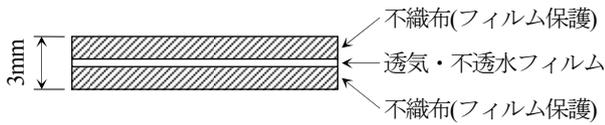


図-1 シート断面の模式図

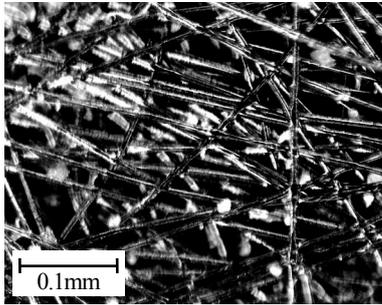


写真-1 シート表面(不織布)の顕微鏡写真

透気性の向上と遮水性の低下の度合いについて検討した。開孔率が $n^* = 0.10\%$, 0.16% , 0.48% , 0.64% , 0.97% , 1.45% のシートを用意して、以下の透気試験と透水試験によって、シートの透気・透水特性をそれぞれ調べた。

(2) 透気試験

図-2は、シートの透気試験装置の概要を示したものである。この装置は、シートを設置する試料容器(内径100mm)、空気圧力調節器、空気流量計、空気圧力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節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気し、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)を空気圧力計により、透過した空気の流量 Q_a (cm^3/s)を空気流量計によりそれぞれ測定する装置である。試験では、自然乾燥状態のシートと蒸留水に浸水させ真空脱気した湿潤状態のシートを用いた。

シートの透気係数 k_a (cm/s)は、ダルシー則にしたがって、次式(1)によって算出される³⁾。

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

ここで、 $A (= 78.54\text{cm}^2)$ はシートの断面積、 h_{a0} (cm)はシート上面での空気圧力水頭である。なお、乾燥状態でのシートでは、その上面は大気に解放されていて $h_{a0} = 0$ である。しかしながら、3.(2)で後述するように、湿潤状態でのシートでは、 h_{a0} は、シートの保水の影響によってゼロより大きな値を示す。

(3) 透水試験

図-3は、シートの飽和透水試験装置の概要を示したものである。蒸留水に浸水させ真空脱気したシートを試料容器(図-2の試料容器と同じもの)に設置する。そして、図-3に示すようにマリOTTタンク内の水位と試料容器

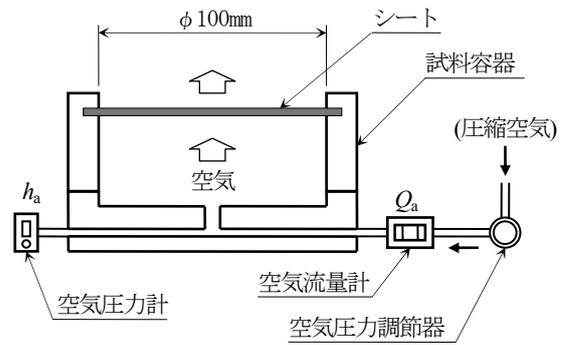


図-2 シートの透気試験装置の概要図

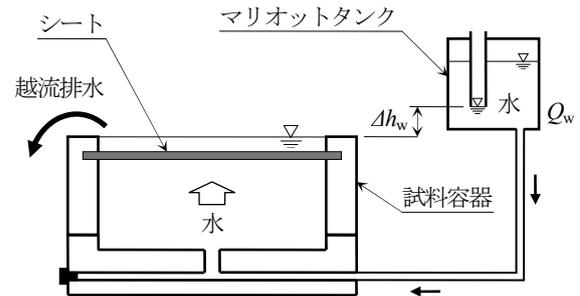


図-3 シートの透水試験装置の概要図

の上面での水位との差 Δh_w (cm)を一定に保ちながら、マリOTTタンクから給水される蒸留水をシートに鉛直上向きに透過させる。そのとき、マリOTTタンク内の水量の時間的変化から透水流量 Q_w (cm^3/s)を求める。

水位差 Δh_w と Q_w の値を用いて、透水係数 k_w (cm/s)は、ダルシー則にしたがって、次式(2)によって算出される。

$$k_w = \frac{Q_w/A}{\Delta h_w/L} \quad (2)$$

3. シートの透気特性

(1) 乾燥状態での透気係数

図-4は、開孔率が $n^* = 0.64\%$, 0.97% 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。 h_a と Q_a の関係は、空気流量の大きい範囲で直線関係の破線からずれが生じる。このずれの原因は、空気流が層流から乱流へ遷移することによると考えられる⁴⁾。レイノルズ数 Re を次式(3)によって定義して試算すると、 Re 値がおおよそ0.2より小さい範囲のとき h_a と Q_a は直線関係になる。

$$Re = \frac{v_a (d/10)}{\mu_a} \quad (3)$$

ここで、 v_a (cm/s)は空気流速 ($= Q_a/A$)、 μ_a (cm^2/s)は空気の動粘性係数である。したがって、本論文では、 $Re < 0.2$ の範囲の h_a と Q_a の係に上記の式(1)の係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

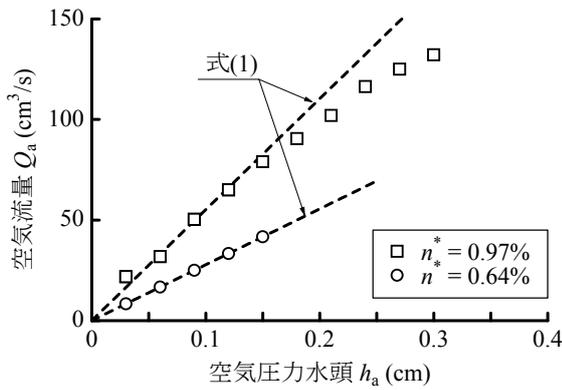


図-4 空気圧力水頭と空気流量(乾燥シート)

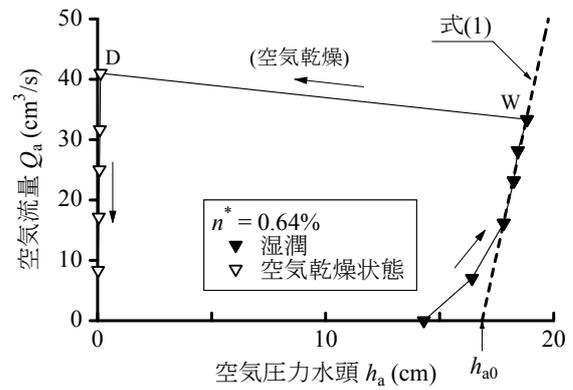


図-6 空気圧力水頭と空気流量(湿潤シート)

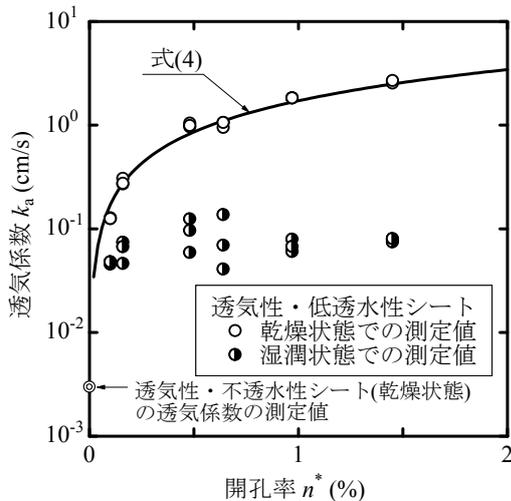


図-5 開孔率と透気係数(乾燥・湿潤シート)

求めた。

図-5は、透気係数 k_a の値を開孔率 n^* との関係で示したものであり、透気性・不透水性のシートの透気係数の値を $n^* = 0\%$ に対応させて示し、また、後述の湿潤シートの透気係数の値を併記した。細孔を設けたときのシートの透気係数は、 $n^* = 0\%$ のときのものに比べると、 $n^* = 0.10\%$ のとき100倍程度の大きさであり、 $n^* = 1.45\%$ のとき1000倍程度の大きさになり、開孔率が大きくなるほど透気係数の値は大きくなる。図-5の実線は、次のHagen-Poiseuille則に従った次式(4)による関係⁵⁾を重ね合わせて示したものである。

$$k_a = \frac{\gamma_w}{32\eta_a} n^* d^2 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

ここで、 γ_w (kN/m^3)は水の単位体積重量、 η_a ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)は空気の粘性係数である。 $n^* = 0.10 \sim 1.45\%$ の範囲では、透気試験による n^* と k_a の関係は、式(4)による関係とほぼ合致する。即ち、細孔のある乾燥シートの透気係数には、透気・不透水フィルム(図-1参照)の微小な透気係数や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。

(2) 湿潤状態での透気性

図-6の▼印は、開孔率 $n^* = 0.64\%$ の場合について、湿潤状態のシートでの空気圧力水頭 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15cm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。その直線関係は、横軸との交点である空気圧力水頭 $h_{a0} (> 0)$ を通り、 $Q_a / (h_a - h_{a0})$ の傾きをもつ。また、湿潤シートでのその傾きは、乾燥での傾き(Q_a / h_a)の1/10程度の大きさである。以下では、湿潤シートの h_a と Q_a の関係に基づいてその透気性を考察する。

a) 空気透過開始の空気圧

湿潤シートで空気透過が開始するときの空気圧は空気侵入値に相当し、その値が大きい場合には堤防内部の間隙空気の排出を阻害する原因の一つになると考えられる。

湿潤シートの透気試験で得られた空気侵入値 h_c は、11～19cmの範囲の大きさであり、開孔率が大きくなると若干小さくなる傾向にあった。シートの間隙部分(細孔と不織布の間隙空間)が毛管モデルで近似できると仮定すると、 h_c に対応する間隙径 d_c (mm)は次式によって算出することができる⁹⁾。

$$d_c = \frac{4T_s \cos \beta}{\gamma_w h_c} \cdot 10^{-2} \quad (5)$$

ここで、 T_s (N/m)は水の表面張力、 β ($^\circ$)は水の接触角である。上記の h_c 値から試算すると、式(5)の $\beta = 0$ と仮定したとき d_c は0.16～0.26 mmの範囲にあり細孔径 $d = 0.32$ mmの5～8割の大きさであり、 $\beta = 60^\circ$ のとき $d_c = 0.08 \sim 0.13$ mmで細孔径の2～4割の大きさである。即ち、シートの空気侵入値の大きさは、フィルムに対して厚みが大きく細孔の大きさよりも小さな空間をもつ不織布の間隙構造の影響を受けていると考えられる。しかしながら、その空気侵入値は微小な空気圧の大きさに相当する。

b) 空気圧力水頭 h_{a0}

湿潤シートでは、空気透過開始時から、シート表面に内部から排出された水によって僅かな湛水が生じ水膜による気泡が観察された。その水膜のある状態から、図-6

の湿潤の▼印のW点にて透気を12時間程度の長時間維持してシートを空気乾燥させると▽印のD点に移動し、その後、空気圧を徐々に減少させると原点に至る関係が得られた。この▽印による h_a と Q_a の関係は、図-4の乾燥シートの場合の関係とほぼ一致する。即ち、湿潤シートでの破線による h_a と Q_a の直線関係と乾燥での直線関係(▽印)との差は、不織布の含水量が徐々に減少して表面の水膜が消失することによって生じると考えられる。したがって、湿潤シートで認められる空気侵入値よりも若干大きな空気圧力水頭 h_{a0} は、比較的厚みがある含水した不織布を透過する時の気泡の空気圧に相当すると理解される⁶⁾。換言すると、湿潤シートでは、透気開始後もシートの不織布部分の空気透過に対して水膜による抵抗が発生する。

c) 透気係数

上記b)の結果より、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($h_a - h_{a0}$)とみなされるので、図-6の破線のように、 h_a と Q_a の直線的な関係に式(1)の関係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 を求めた。なお、湿潤シートの h_a と Q_a の関係について上記の式(3)によってレイノルズ数 Re を試算すると、 $Re < 0.2$ の範囲であった。

上記の図-5には、湿潤シートの透気係数 k_a の値を開孔率 n^* との関係で示した。湿潤シートの透気係数は、乾燥シートの1/10~1/100の大きさに減少し、一方で、開孔率の違いによって大きな変化が認められない。湿潤シートでは、空気圧の負荷によって空気が不織布内部の水を押し出しながら透気が生じる。また、不織布は比較的厚みも大きいことから、乾燥シートに比べると空気みちが形成され難く透気に対する抵抗が増え、それが湿潤シートの透気係数を減少させる原因であると考えられる。即ち、湿潤シートの透気性には、不織布の厚さと含水状態が大きく影響し、そのため、細孔の開孔率による影響が現れ難いのではないかと想像される。

4. シートの遮水性

図-7は、透水試験で得られた飽和透水係数 k_w の値を開孔率 n^* との関係で示したものである。透水係数は、 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ のオーダーの範囲で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。図中の破線は、透気係数の場合の式(4)の k_a を透水係数 k_w 、 η_a を水の粘性係数 η_w (Pa·s)にそれぞれ置き換え水の場合の関係の式を示したものである。しかしながら、測定した透水係数の値は、その破線の値を縦軸方向に約1/40の大きさに平行移動したときの図中の実線による関係とほぼ合致した。このことは、シートの透水係数が、細孔の径や開孔率のみならず、不織布の微細な間隙構造の影響も受けていることによると考えられる。

シートに細孔を設けた場合でも不織布の効果によって

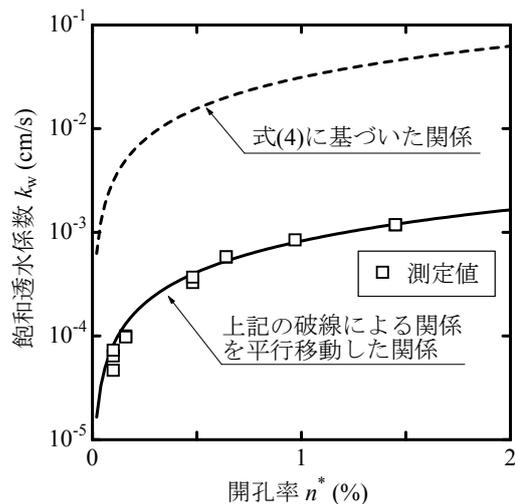


図-7 開孔率と飽和透水係数(シート)

低透水性を維持できるが、遮水性を高めるためのフィルムの細孔径の大きさや開孔率、不織布の間隙構造の設定については今後の課題である。

5. あとがき

本論文では、河川堤防表面に敷設する透気・遮水性シートについて、堤防内部の間隙空气の封入によるエアブロー防止対策の観点から、その透気係数や保水に伴う空気侵入値の特徴などを明らかにした。今後、実堤防の適用に資するため、堤体材料の透気性等に応じたシートの透気・遮水の必要性能を検討する。

参考文献

- 1) 榊尾孝之, 石田正利, 山本正人: ジオシンセティックス(透気・遮水シート)の透気性能に関する基礎的実験, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集(第V部門), pp.673-674, 2009.
- 2) 前田健一, 柴田 賢, 馬場干兒, 榊尾孝之, 今瀬 達也: 豪雨と気泡の影響を考慮した河川堤防における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. 25, pp.107-112, 2010.
- 3) 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.
- 4) 地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と評価, 丸善, pp.33-34, 2004.
- 5) Bear, J.: *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Publ. Co., pp.162-163, 1972.
- 6) 神谷浩二, 宇野尚雄, 松島健之: 「空気圧入法」による砂質土の間隙径分布の計測, 土木学会論文集, No.541/III-35, pp.189-198, 1996.

(2012. 4. 5受付)