



## 2. 模型堤防における透気遮水シート設置効果

### (1) 模型堤防実験装置および実験方法の概要

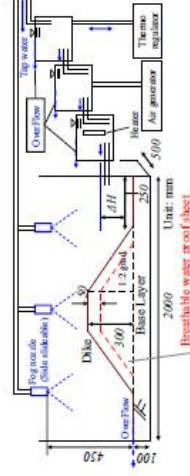


図-1 実験装置の概略

図-1 のような降雨発生装置を有し、底面以外は透明なアクリル面を有する土槽 (幅 2000mm, 深さ 550mm, 奥行き 500mm) を用い、模型堤防を作製した。模型堤防の作製方法について、堤体下部の基盤層 (層厚 100mm) に豊浦砂を水中落下させ、相対密度  $D_r=80\%$  となるように固めを行った。堤体部は、浸潤線の様子を目視でも観察し易くするために乾燥豊浦砂を使用し、相対密度  $D_r=70\%$  となるように突固めを行った。シートを設置する際には、図-1 の赤破線部に示すように堤体の最終形状の表面から深さ 50mm に設定した。

降雨と堤外側の水位に関する水理条件としては次のように設定した。降雨強度を一定値  $124\text{mm/hr}$  とし集中豪雨相当を確保した。事前降雨を 1 時間程度与えた後に、堤外側に一定水位速度 ( $30\text{mm/min}$ ) で給水し水位を上昇させる。これは、集中豪雨が発生し、その後、河川水位が上昇することを想定している。シートの設置の有無によっては堤体内への浸潤速度が異なるため、河川水位が  $150\text{mm}$  に到達した際に、一旦、水位を保持し浸潤線の進入が安定するまで 10 分間保持した。その後、再び河川水位を上昇させ  $250\text{mm}$  に達したところで、10

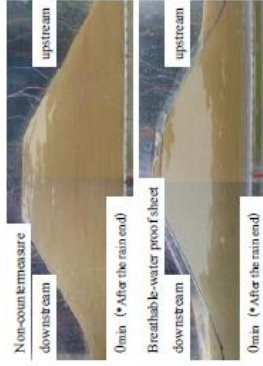


図-3 降雨及び水位上昇に伴う堤体の浸潤過程, 上: 無対策堤防, 下: 透気遮水シート設置堤防: 図中の時間は降雨載荷後の表法側 (図の右側) での水位上昇の経過時間を表す

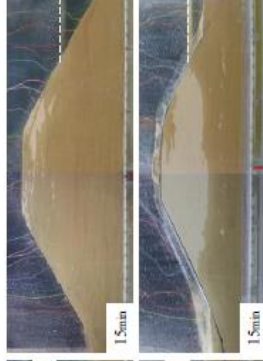
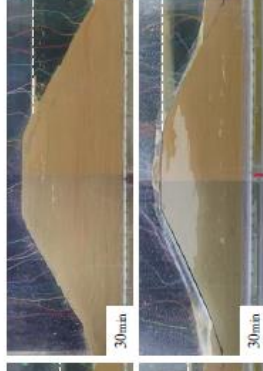


図-3 降雨及び水位上昇に伴う堤体の浸潤過程, 上: 無対策堤防, 下: 透気遮水シート設置堤防: 図中の時間は降雨載荷後の表法側 (図の右側) での水位上昇の経過時間を表す



### (3) 実験結果および考察

#### a) 堤防断面の浸潤過程の比較

図-3 に、無対策堤防 (上図) と透気遮水シート設置時の堤防 (下図) において堤防断面から観察される浸潤挙動について比較したものを示す。無対策堤防では、事前降雨を与えた時点で堤防全体がおお

分間水位を保持し、堤体内部の浸潤や堤体の変状を観察した。250mm は天端のシートの位置と一致している。堤体の外部からは様々な方向から写真撮影を行うことで浸潤線を観測し、堤体内部の浸潤挙動については装置の裏面からアクリル面に約 30 箇所の開孔を設けて、堤体の奥行き中央に水分計やテンスジオメータなどを埋設し、計測した。また、比抵抗モニタリングによる計測も同時に行った。堤防の非破壊検査として注目されている比抵抗モニタリングは、地盤内の比抵抗 (電気の流れにくさ・流れやすさ) を繰り返し計測するもので、一般に地盤内の空隙に占める間隙水の割合が大きいくほど比抵抗値が小さくなる。

### (2) 模型実験で用いたジオセンチックス概要

模型実験では、シートを設置しない無対策堤防と、堤体内からの圧縮空気を逃がすため、シートに透気性を持たせた透気遮水シートを使用した対策堤防の 2 つのケースについて実験を行った。実験で利用した透気遮水シートは、スポーツウェアなどの衣料品では一般的な透湿防水布と同質の性能を期待できようである。ジオセンチックス用途として開発されたものとして、シートを設置するために、水や空気に関する境界条件を明確にするため図-2 のように粘着テープなどを用いて土槽に極力固定した。

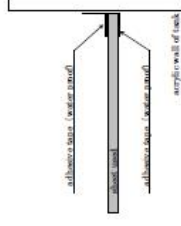


図-2 左: 透気遮水シート, 右: シートと土槽の結合方法

よそ浸潤化している。このような豪雨による急激な浸潤化は堤体内に空隙空気を封入する危険性が高くなる。一方、透気遮水シートを設置した堤防では無対策の堤防と比較して、豪雨による堤防の浸潤化を抑え、河川水位の上昇に伴い基盤層から天端へ向け浸潤が進む様子がわかる。

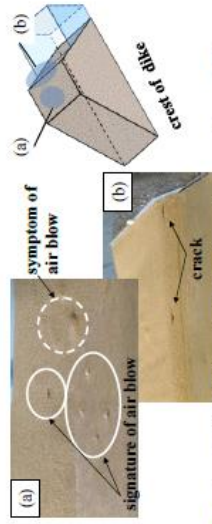


図-4 無対策堤防で確認された (a) エアブロー現象 (b) クラックの発生 (実験開始 125 分頃)

図-4 では、無対策堤防で見られたエアブロー現象と天端に生じたクラックの様子について示す。模倣型堤防は実堤防のおよそ 1/30 スケールのため、堤体内に発生する間隙空気圧も小さいと考えられる。そのため、実堤防においてはさらに大きな間隙空気圧の蓄積により突発的なエアブロー現象が危惧される。

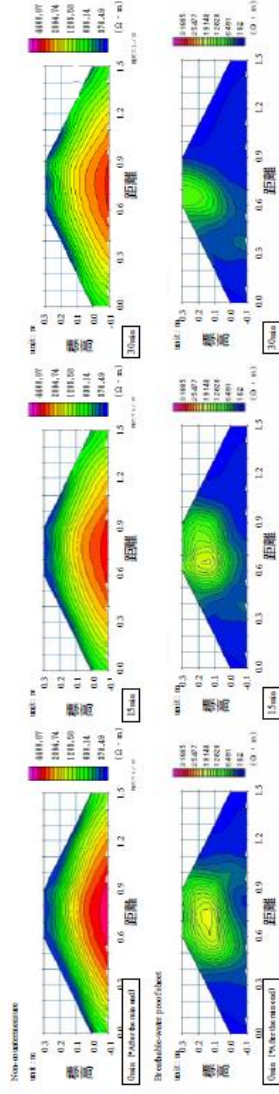


図-5 降雨及び水位上昇時における比抵抗モニタリングによる堤体内浸潤挙動の比較、上：無対策堤防、下：透気遮水シート設置：図中の時間は降雨載荷後の表法側 (図の右側) での水位上昇の経過時間を表す

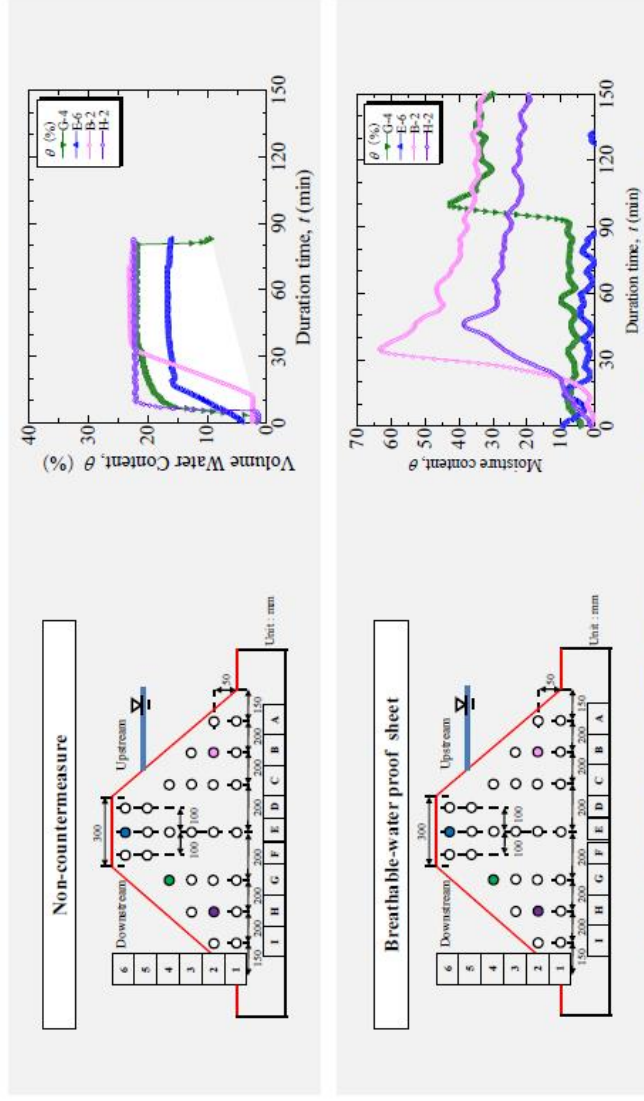


図-6 堤体内における水分量変化の比較、上：無対策堤防、下：透気遮水シート設置時

### b) 比抵抗モニタリングによる堤体内における浸潤挙動の比較

図-5 に、無対策堤防 (上図) と透気遮水シート設置時の堤防 (下図) において、事前に降雨を作用させた場合の比抵抗による堤防内の浸潤挙動を可視化したものを示す。ここで、図-5 において暖色が乾燥、寒色が濡潤を表す。無対策堤防を見ると事前に降雨を作用させたことにより、堤防表層において低比抵抗領域が発達していることがわかる。また、

堤防内部では高比抵抗領域が目立っていることから、降雨により堤防内部に間隙空気が封入されていることが考えられる。その後、水位の上昇に伴い高比抵抗領域の値が小さくなっていくことがわかる。一方、透気遮水シートを設置した場合、堤防の基盤部分から浸潤が進行し、高比抵抗領域が天端へ向けて遷移するが、これは堤防内の間隙空気が透気遮水シートから排出され、清らかに浸潤したためと考えられる。

### c) 土壌水分計測による堤体内部における浸潤挙動の比較

図-6 に、水分計により計測された堤体内部積含水率の経時変化について示す。無対策堤防では、降雨開始直後に天端付近及び法先における水分量が急激に増加する様子がわかる。このことから、比抵抗モニタリングによる可視化で見られた堤防表層における急激な浸潤化を水分計による計測からも確認した。一方、透気遮水シートを設置した堤防では、降雨開始から20分後に法先地点 H-2 における水分量が増加するが、これは基盤層から天端へ向かう浸潤線の挙動を捉えているためと考えられる。その後、基盤層に近い水分計から、浸潤に对应答を示していることがわかる。

これらの結果から、透気遮水シートを設置することで、堤防表層からの浸潤を抑制し、基盤層からの浸潤がある場合、堤体内の間隙空気が透気遮水シートから排出されるため比較的緩やかな浸潤挙動となる。

次章では、模型堤防実験で得られた結果を踏まえ、堤防において散水実験を行い、透気遮水シートの設置効果を検討した。

### 3. 実堤防における透気遮水シート設置効果

#### (1) 実堤防散水実験地

実堤防散水実験は、矢田川右岸 2.2K・庄内川左岸、20.2K 地点で行った。実験堤は都市河川の堤防でよく見られる透水性のやや良い砂質土で構成されている。天端付近は碎石を転圧して形成しているため密な状態であり浸透しづらい状態である。図-7 に実堤防における水分計の設置位置について示す。また、堤体内の浸潤挙動について水分計と合わせて比抵抗モニタリングによる計測を行った。これにより、計測原理の異なるセンサーを使用することで地盤内の浸潤挙動を正確に把握することができる。本稿では特に、法先 (W2)、法面 (W3)、法肩 (W4) における浸潤挙動について検討を行った。

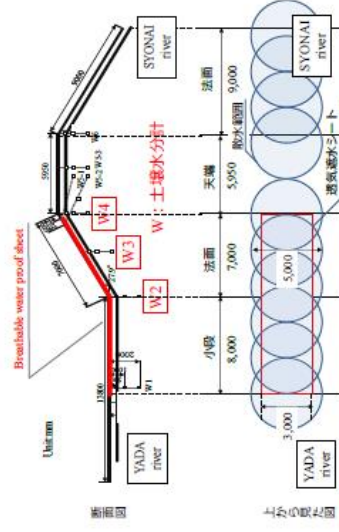


図-7 実堤防内水分計設置位置：(上) 堤防断面とセンサー設置位置；(下) スプリングクラ配置及び散水範囲

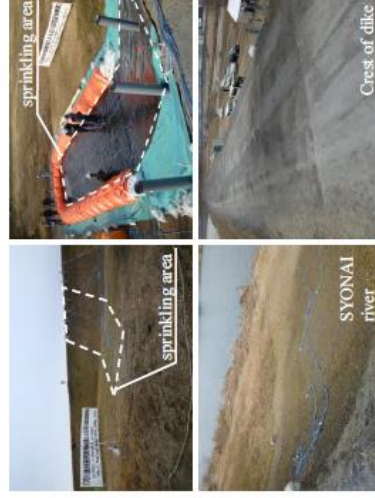


図-8 実堤防散水実験の様子：(左上) 無対策、(上右) 透気遮水シート敷設、(下左) 庄内川側の散水の様子、(下右) 堤防天端の様子

#### (2) 散水実験方法

透気遮水シートの設置効果を検討するために、無対策時と同じ外力条件、初期条件で散水試験を実施した。外力は 50mm/hr の降雨強度を 6 時間継続し、総降雨量 300mm を与えた。実験を実施した河川堤防は、天端を道路としての機能も持ったため、実験後堤防にすべりが発生して、これらの機能を失うことが無いよう集中豪雨相当 (降雨強度 120mm/hr 程度) より小さい降雨強度 50mm/hr に降雨外力を調整した。降雨は実際に雨を発生させるのではなく、図-7,8 に示すように、スプリングクラを両法面、天端に配置し散水した。降雨強度は流量で管理し、事前に時間雨量を計測した結果、散水量がばらつかないことを確認した。浸潤挙動は、堤防内に配置された土壌水分計と、堤体表面に並べた比抵抗電極によるモニタリングを同時に計測し検討する。

#### (3) 実験結果および考察

a) 比抵抗モニタリングによる無対策堤防と透気遮水シート設置堤防に関する浸潤・排水挙動比較  
 図-9 に、比抵抗モニタリングにより得られた堤防断面の比抵抗変化率の経時変化について示す。ここで、比抵抗変化率は、 $\text{変化率}(\%) = \frac{\text{測定データ} - \text{基準データ}}{\text{基準データ}} \times 100$  で算定し、基準データを散水前における堤防内比抵抗値とした。

無対策堤防に着目すると、散水開始後堤防の法先から法面にかけて浸潤域が発達する様子がわかる。さらに時間が経過すると、法先の深度 2m 付近で高比抵抗領域 (乾燥領域) が発達するが、散水前の浸潤状態と比較し乾燥状態に近づくことから、堤防法先下に間隙空気が凝集していることが考えられる。透気遮水シートを設置した堤防では、無対策堤防時に見られた堤防表層における急激な浸潤化が見られず、それに伴う間隙空気の封入 (図-9) における暖色の発達) も確認されなかった。比抵抗モニタリングによる結果から、模型実験でみられたように透気遮水シートを設置することで堤防表層からの浸潤化を防止し、堤防内に間隙空気の封入を抑制する効果

を確認した。次節では、比抵抗に加え水分計の値について検討し正確な浸潤挙動の把握を試みる。

b) 堤防法先における無対策堤防と透気遮水シート設置堤防の比較

図-10 では、左の縦軸に水分量、右の縦軸に比抵抗

抗の変化率をとり、それらの経時変化について示している。比抵抗変化率が大きくなるほど乾燥を表し、小さくなるほど湿潤を表す。まず、堤防内の浸潤挙動について堤防法先地点より比較を行う。

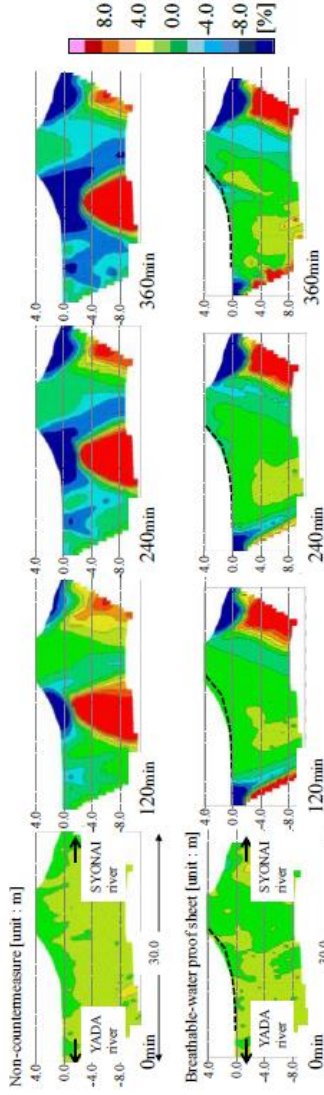


図-9 散水時における比抵抗モニタリングによる堤体内浸潤挙動の比較。上：無対策堤防、下：透気遮水シート設置 (左岸側の法面・小段部にのみ敷設；図-7, 8 参照)

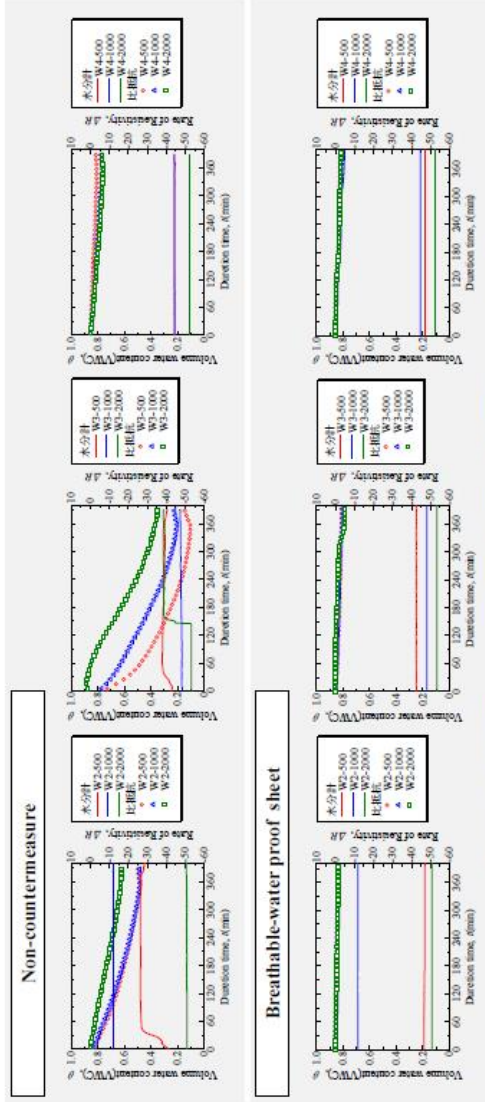


図-10 散水の様子。上：無対策堤防、下：透気遮水シート設置堤防

無対策堤防の法先地点では、実験開始からおおよそ 1 時間後に地表面から 0.5m 下において水分量の上昇が確認できる。また、この時の比抵抗変化に着目すると、堤防表層である W2-500 (法先表層から 0.5m 下), W2-1000 (法先表層から 1.0m 下) において実験開始から著しく減少するが深部にある W2-2000 (法先表層から 2.0m 下) について、時刻変化における比抵抗の減少量が少なかった。これは、無対策時における模型実験で見られたように、表層では散水直後から浸潤化が進むのに比べ、深部では間隙空気を封入するために浸潤の進行が抑止されたと考えられる。一方、透気遮水シートを設置すると、水分量や比抵抗値に変化がみられないことから堤防内への浸潤を抑制していることがわかる。

c) 堤防法面における無対策堤防と透気遮水シート設置堤防の比較

つぎに、堤防法面地点における比較を行う。無対

策堤防における水分計の挙動からみると、実験開始直後から堤防表層の W3-500 (法面表層から 0.5m 下) で水分量が増加している。実験開始から 150 分後に W3-2000 (法面表層から 2.0m 下) が反応する。比抵抗の挙動をみると、実験開始直後の W3-2000 においてわずかに比抵抗変化率が増加している。これは、急激な降雨浸透水の浸入により堤防内深部で空気が圧縮されるためと考えられる。透気遮水シート設置時の比抵抗変化率の挙動をみると、値に大きな変動は見られなかった。模型実験で確認されたように透気遮水シートがあることで堤防表層の急激な浸潤を防ぎ間隙空気の封入を抑止する効果があることがわかる。

d) 堤防法肩における無対策堤防と透気遮水シート設置堤防の比較

堤防法肩地点における比較を行う。無対策堤防、透気遮水シート設置堤防ともに浸潤挙動に大きな変

化は見られなかった。これは、比抵抗モニタリングによる可視化した図(図-9)で見られた浸潤挙動とも一致しているためと考えられる。また、法肩付近方向に流下するためと考えられる。また、法肩付近は砕石を転圧し形成されているため、浸潤化が生じにくかったと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、豪雨により河川堤防内に捕捉される間隙空気が、河川水位の上昇に伴い噴出することで生じる堤防内部からの損傷を防ぐ対策工として透気遮水シートの有用性について検討した。模型実験において、豪雨相当の降雨を発生させたとき、無対策堤防では比抵抗モニタリングと水分計の挙動から内側に間隙空気の蓄積が確認され、その空気が噴出した際に生じたエアブローやクラックが観察された。一方、透気遮水シートを設置した場合、堤防表面からの急激な浸潤を抑え、間隙空気が透気遮水シートを介して排出される様子を確認した。

実堤防において透気遮水シートの効果を検討すべく散水実験を実施したところ、比抵抗モニタリング、水分計の挙動から模型堤防実験で見られた浸潤挙動が確認され、透気遮水シートに降雨浸透防止と間隙空気の排出の実用的な効果を確認した。

今後は、実堤防における遮水シートとの比較を行うとともに自然降雨、河川水位上昇に対する透気遮水シートの堤防の補強効果について、降雨強度や降雨履歴、水位履歴による影響を調べるために、長期モニタリングなどによる評価が必要と考えられる。また、圧力を含めた様々な計測方法による、堤体内部の間隙水、間隙空気の挙動の三次元的な可視化方法についても検討を進める必要がある。

謝辞：この研究は、国土交通省河川技術研究開発制度(地域課題研究)採択課題の一環として行ったもの

のである。また、用いた装置の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基礎研究(B)20360120によるものである。末筆ながら深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Maeda, K., Sakai, H. and Sakai, M.: Development of failure analysis method of ground with Smoothed Particle hydrodynamics. *J.SCE, Journal of Struct. Eng. And Earthquake Eng.* Vol.23, No.2, pp.307-319, 2006.
- 2) Maeda, K. and Sakai, H.: Seepage failure and erosion of ground with air bubble dynamics, *ASCE, Geoenvironmental Engineering and Geotechnics*, GSP 204, pp. 261-266, 2010.
- 3) 石原雅規, 井上 悟士, 宇野 尚雄, 小俣 篤, 川井 正彦, 齋藤由紀子, 佐古 俊介, 佐々木哲也, 長田 仁, 森 啓年: 河川堤防の浸潤に対する照査・設計のポイント, (独)土木研究所地質・地盤研究グループ 土質振動チーム, pp.45, 2013.
- 4) 前田健一, 柴田賢, 馬場千兒, 梶尾孝之, 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を設置効果, 国際ジオセンチテックス学会日本支部, ジオセンチテックス論文集, 第25巻, pp.107-pp.112, 2010.
- 5) 小林剛, 前田健一, 柴田賢: 不飽和堤防の急速浸潤化に伴う間隙空気の挙動と比抵抗モニタリングによる可視化, 河川技術論文集, Vol.18, pp.293-298, 2012.
- 6) 上田滋夫, 梶尾孝之: 河川堤防に用いる新しいジオセンチテックスの提案, 地下水地盤環境に関するシンポジウム論文集 - 水辺と堤防と地下水 -, pp.143-144, 2006.
- 7) 梶尾孝之, 三吉正英, 標木俊文, 谷口徳晃: 透気・防水シートを用いた河川堤防の強化に関する基礎的実験, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, 第II部門, pp.229-230, 2007.
- 8) 梶尾孝之, 石田正利, 山本正人: ジオセンチテックス(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, pp.673-674, 2009.

### THE EFFECT OF BREATHABLE – WATER PROOF SHEET AS A COUNTER-MEASURE AGAINST HEAVY RAIN IN A RIVER DIKE

Kenichi MAEDA, Toshio SUGII, Takayuki MASUO, Tsuyoshi KOBAYASHI, Humiaki USUDA, Hidenobu KURODA, Satoshi SHIBATA, and Hiroshi SAITO

Since a river dike located at the downstream where urbanization has been in progress is composed of sandy soil consisting mainly of soft and fine particles, the river dike is considered to be easily damaged by pore air that has been enclosed within the dike. Therefore, the establishment of counter-measure method which prevents degradation of the dike by air blow is pressing need. So, this research examines the effect of the breathable-water proof sheet as counter-measure method which controls enclosure of pore air in a dike. According to the previous research to the breathable-water proof sheet, the seepage prevention effect and the mitigating effect of pore air pressure were confirmed from the model tests. We conducted in-site test on a real dike. As a result of artificial rain fall experiment in the dike, the usefulness of the breathable-water proof sheet became clear from the response of a soil water meter and specific resistance monitoring.

KEYWORDS: Heavy rain, Breathable-water proof sheet, River dike, Air blow