

# 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

前田健一<sup>1</sup>・柴田賢<sup>2</sup>・馬場干児<sup>3</sup>・榎尾孝之<sup>4</sup>・今瀬達也<sup>2</sup>

局所的な集中豪雨による河川堤防の損傷には、堤防表層部から浸透水による堤体の飽和化と堤体内浸潤線の上昇に伴う間隙空気のプロローが関与していることが数値解析で想定されている。都市が発達する下流部の河川堤防は軟質な細粒分の多い砂質土から構成され、堤体内に封入された間隙空気による堤防の損傷を受けやすいと考えられている。本論文では、降雨発生装置を備えた模型堤防実験により、降雨浸透や河川水位の上昇に伴う間隙空気塊の挙動を把握した。無体策の堤体では降雨浸透や河川水位の上昇により空気圧の上昇やプロロー現象が確認できた。遮水シートによる浸透防止対策工ではシート下位の間隙空気圧が上昇した。また、透気性のある遮水シート施工時は降雨浸透防止効果と間隙空気圧の上昇軽減効果が確認できた。

キーワード：集中豪雨，河川堤防，間隙空気，エアブロー，透気遮水シート

## 1. はじめに

局所的な集中豪雨が引き起こす河川堤防の損傷には、堤防表層部から浸透水による堤体の飽和化と堤体内浸潤線の上昇に伴い、間隙空気が浸潤線に取り囲まれ圧縮し、その後の堤体から押し出されるといったプロローする現象（以下、エアブローと呼ぶ）が関与していることが数値解析で想定されている<sup>1)2)</sup>。2000年の東海豪雨水害の際には、名古屋市内を流れる新川の堤防が決壊し河川沿いに甚大な被害を及ぼした。この決壊過程の目撃証言が新聞<sup>3)</sup>に掲載されており、「堤防を斜めに横断する形で幅1メートルほどの亀裂が入り、白い泡状の水が噴き出した。その後、亀裂は3時間ほどかけてゆっくりと広がっていった。」と浸透破壊に間隙空気が関与を思わせることが報告されている。このような決壊時に堤防から空気が噴発する現象は、「ガマが吹く」と言われ、少なからず昔から目撃談があるようである。しかし、間隙空気のプロローが堤体強度に影響するのかどうか、影響するとすればどのようなメカニズムなのか、ということは未だ明らかになっていないのが現状である。堤体を効率的に補強するためには、集中豪雨時の堤体内の間隙空気の挙動や堤体強度に及ぼす間隙空気の影響について検討が必要と考えられる。

また、気泡が発生するメカニズムは異なるものの、地盤が気泡の発生・発達によって損傷を受けることが報告されている<sup>2)4)</sup>。通常、浸透破壊現象は限界水位差に達すれば一気に崩壊する現象として知られている。しかし、砂地盤において間隙水が過飽和状態（水中溶存酸素

量が高い水）の場合には、気泡間隙水中に理論飽和量を超えて溶解している空気が気泡として溶出し発達することで、限界水位差以下の水位差を保持し続けるだけで破壊することが示されている。この場合にも、発生した気泡が発達し下流側の地表面から噴出する毎に地盤内に緩み領域が発達することが観察されており、気泡が地盤の損傷を助長する。

一方、都市が発達する下流部の河川堤防は細粒分を含む砂質土や透水性のやや良い砂から構成された堤体が多いと考えられる。礫質材のような水や空気の流れが良い高透水材の場合や粘土のように極めて透水性が低く浸潤線の進行が極めて遅い場合には、エアブローが発生する可能性は極めて低いと判断される。つまり、河川の下流域の沖積平野の堤防において、エアブロー発生の可能性が最も高く、急激な降雨浸透によって都市部の堤体強度の低下を助長すると考えられる。

そこで、本研究では、降雨発生装置を備えた模型堤防実験により、降雨浸透や河川水位の上昇に伴う間隙空気塊の挙動を把握することを試みた。降雨浸透や河川水位の上昇によりエアブロー現象の観察や空気圧の測定を行った。また、遮水シートや透気性のある遮水シートを設置した際の堤防の補強効果について検討を行った。

## 2. 実験方法および実験条件

### (1) 実験装置および実験方法の概要

降雨および河川の水位上昇が堤防に作用するときの

<sup>1</sup>国際会員，名古屋工業大学大学院工学研究科 社会工学専攻，准教授（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）；<sup>2</sup>学生会員，名古屋工業大学大学院工学研究科 社会工学専攻，大学院生（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）；<sup>3</sup>正会員，応用地質（株）（〒102-0073 東京都千代田区九段北4-2-6 市ヶ谷ビル）；<sup>4</sup>正会員，太陽工業株式会社（〒154-0001 東京都世田谷区池尻2-33-16）

堤防への浸潤の様子から越流による堤体の破壊の様子を観察するために、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）を作製し用いた。水道水を用いて3本の噴霧ノズルから降雨を発生させ、土槽内に一樣な降雨量となるためにノズルを長手方向に一定速度で往復運動させた。また、堤体の外部からは様々な方向から写真・ビデオ撮影を行うことで浸潤線を観測するとともに、図-1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シオメータなどを埋設できるようにした。

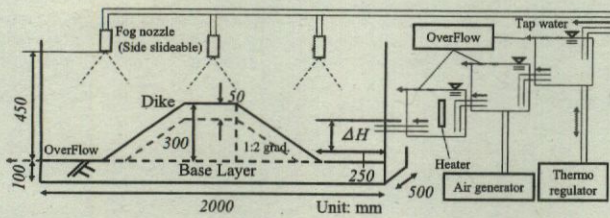


図-1 実験装置の概略

堤防下部の基盤層（層厚 100mm）は、極力飽和状態に近くするために、土槽底面に水を張った後、予め別容器で浸潤しておいた豊浦砂を水中落下させ作製した。相対密度  $D_r=80\%$  とした。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豊浦砂の乾燥試料を用いて作製した。層厚 50mm ごとに空中落下させ突棒で突固め（100mm 平方当たり 7 回）、相対密度  $D_r=70\%$  とした。本論文では、堤体高さを 300mm、1 対 2 の法面勾配とした。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。この場合、まず、図-1の赤破線部のような堤体を作製し、堤体の両法先 100mm の箇所から堤体表面を覆うように敷設した後に、50mm の土被り層を締固めて作製する。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。降雨有りの場合には、事前降雨として 45 分間与えた後に、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。ここで、降雨の有無、シートの設置の有無、シートの種類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 150mm 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 250mm に達したところで、10 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。最後に、給水量を増やし、一気に越流させ堤体の損傷状況を確認した。

## (2) 実験ケース

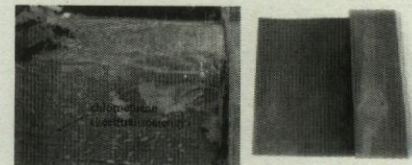
本論文で結果を示す実験ケースを表-1に示す。まず、シートを設置せずに、降雨の影響について検討を行

った (Case(0)と Case(1))。ここで、Case(0)では比較のために降雨無しで堤外側の水位上昇のみを行い、Case(1)では、降雨による堤体上部表面からの浸潤を 45 分間与えた後、堤外側の水位上昇を行った。これにより、Case(1)は、堤体上部表面と堤外側からの両方からの浸潤を同時に受けることになる。

つぎに、堤体への浸潤や表面からの浸食を防ぐために、アスファルトフェイシング等が用いられることがある。それを模擬するために‘不透気遮水シート’を設置した実験を行った (Case(2))。シートには厚さ 0.5mm の塩ビシートを用いた (図-2(a))。また、越流堤などには、設計マニュアルには明文化されていないものの、堤内からの圧縮空気を逃がすための空気孔が設けられていることがある。そこで、シートに透気性を持たせた透気遮水シートを使用することとした (Case(3))。ここで用いたシートは、スポーツウェアや雨具などの衣料品では一般的となっている透湿防水布と同質の性能を期待できるようにジオシンセティックス用途として開発された‘透気遮水シート’である<sup>6,8)</sup>。今回の実験に用いた堤体は実堤体の 1/30 程度であるため、堤体内に発生する間隙空気圧も低く透気し難いと考え、直径 0.2-0.3mm 穴を 1-1.5 個/cm<sup>2</sup> に設置することとした。シートと堤体法面との摩擦を確保するために、薄くフレキシブルで凹凸がある摩擦性マット（透水・透気性は非常に高い）を敷いた。図-3のように粘着テープなどを用いて極力固定した。これによる堤防側面の変形の自由度は若干失われるが、シートと模型土槽側面のアクリル壁の間から水や空気が浸入したり抜けることがないように、水や空気に関する境界条件を明確にした。

表-1 実験ケース

Case (No.)	duration time of pre-rainfall (min.)	counter-measure sheet
Case (0)	-	-
Case (1)	45	-
Case (2)	45	unbreathable - waterproof
Case (3)	45	breathable - waterproof



(a) 不透気性遮水シート (b) 透気性遮水シート  
図-2 用いたシート状のジオシンセティックス

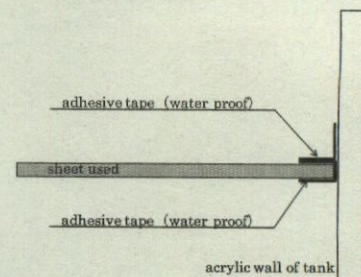


図-3 シートと水槽部の結合方法

### 3. 実験結果および考察

降雨無しの場合 (Case(0)) における, 河川水位を 250mm に一定に保持した後の浸潤線の経時変化 ((a) から (b)) を図-4 に示す. 初期状態が乾燥した堤体を用いているので, 浸潤線を明確に見ることができる. 時間とともに ((a) から (b)), 浸潤線が S 形状からなだらかな下に凸の形状に変化している. ただし, 図から分かるように, 浸潤によって色が異なる箇所は, 必ずしも飽和度の高い浸潤域ではなく, 毛管現象によって浸潤の進行方向に寄っていることが分かる. しかし, 観察の容易さから, このような水分量の違いによる色の違う箇所を浸潤線の前線とするとともに, 水分計による水分量の両方の結果を用いて考察するものとする.

つぎに, 降雨有りの Case(1) から Case(3) のケースの浸潤過程の比較を図-5 に示す. これらの実験ケースでは, 堤外側 (河川側) からの総給水量が等しい. また, 堤体内に設置した水分計から計測した体積含水率の変化 ( $\theta - \theta_0$ ) ( $\theta$ ,  $\theta_0$  はそれぞれ現在と初期の体積含水率) および水圧計の設置位置および値を図-6 に示す.

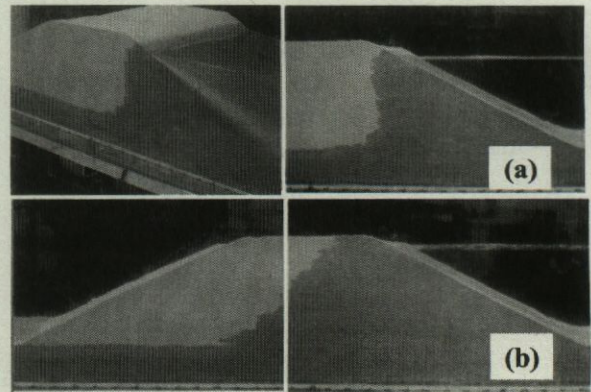


図-4 浸潤線の経時変化: Case(0) (降雨無し・シート無し) の河川水位 250mm の場合

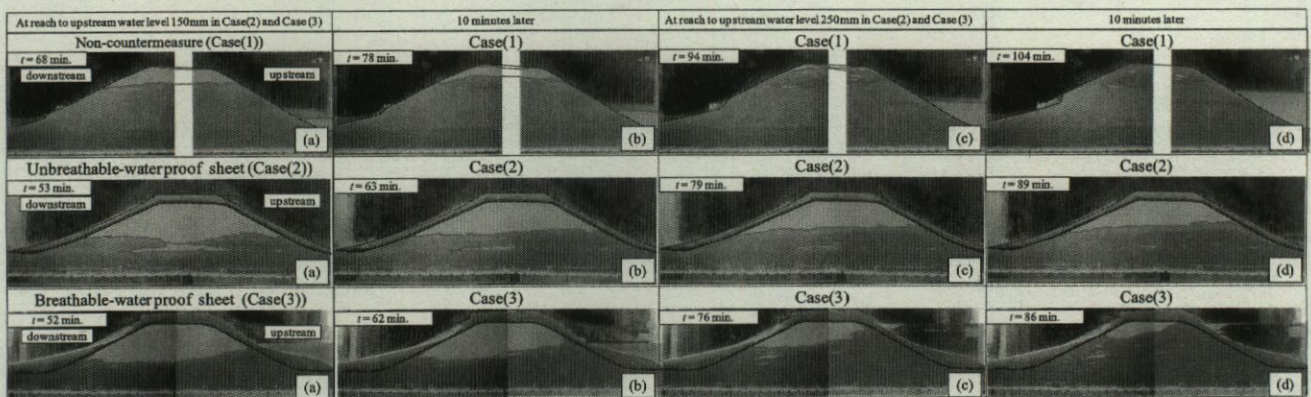


図-5 浸潤過程の比較: 上から Case(1) (降雨有り, シート無し), Case(2) (降雨有り, 不透気・遮水シート), Case(3) (降雨有り, 透気・遮水シート): (a) 河川水位 150mm に達した時, (b) 河川水位 150mm を保持して 10 分経過した時, (c) 河川水位 250mm に達した時, (d) 河川水位 250mm を保持して 10 分経過した時

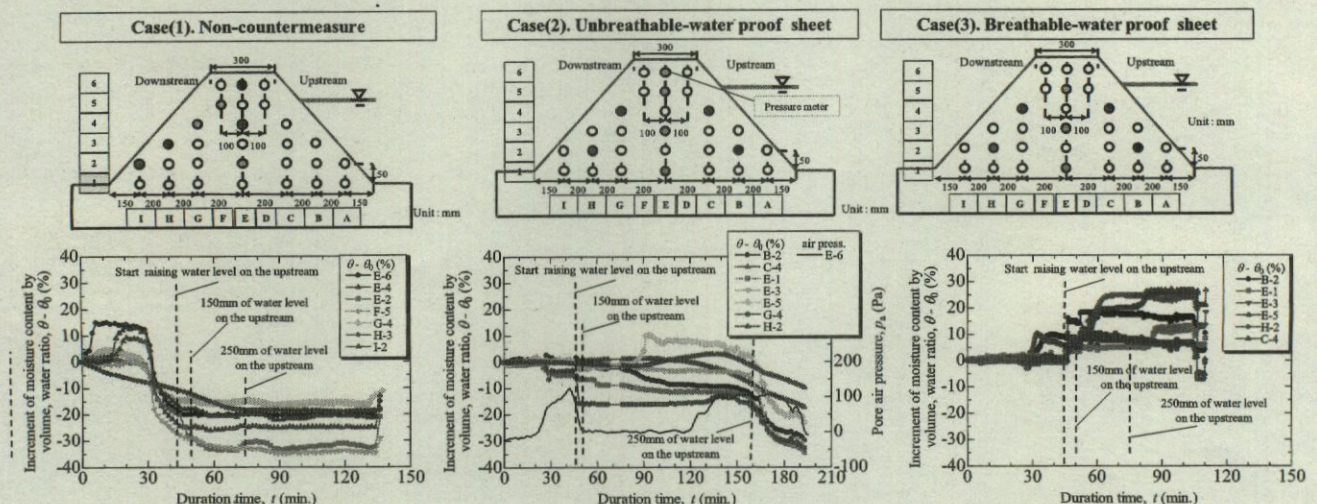
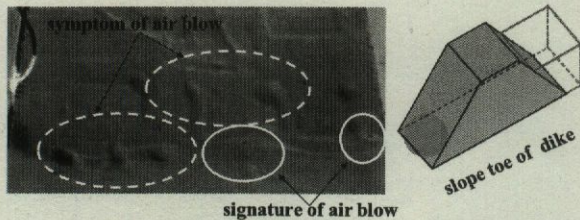


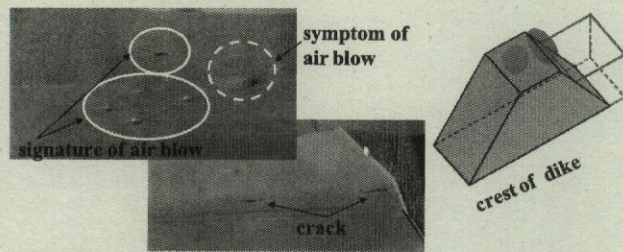
図-6 堤体内の水分量変化: Case(2) (降雨有り, 不透気・遮水シート) ではシート下の間隙空気圧の変化を示す.

(1) 浸潤挙動に及ぼす降雨の影響

事前降雨と降雨を伴う Case(1)の場合、図-5 (a) (河川水位 150mm に達した時) に示すように、堤体内部への浸潤速度が速く、堤内側法面下部で崩壊を始めているため、早期の決壊を招く恐れがあり危険である。一方、(b) (河川水位 150mm を保持して 10 分経過した時)、(c) (河川水位 250mm に達した時) となると、堤外側水位が上昇するとともに堤内側の法面が浸食される。(d) (河川水位 250mm を保持して 10 分経過した時) では、堤体内が飽和し、河川の水面と同等の高さまで浸食が伝播し表層崩壊が進んでいる。ここで、図-6 に示されている体積含水率の変化( $\theta - \theta_0$ ) ( $\theta = w (\rho_d/\rho_w) = e S_r / (1+e)$ ;  $w$ ,  $\rho_d$ ,  $\rho_w$ ,  $e$ ,  $S_r$  はそれぞれ含水比, 土の乾燥密度, 水の密度, 間隙比, 飽和度) を見てみる。実験開始後 30 分程度は、降雨によって堤体内の水分量が増加しているが、その後、降雨が継続しているにもかかわらず体積含水率の値が低下し始め、湿潤していた基盤層と降雨の浸潤線に挟まれた領域では初期状態と同値を示している。さらに、45 分経過以降も河川水位を上昇したにもかかわらず体積含水率は下がり、堤防の越流崩壊の約 135 分までの間、低い値が保持されている。雨による浸潤によって堤体内部に閉じ込められた空気塊に起因することが考えられる。



(a) 実験開始 75 分頃： 法先でのエアブローおよびその兆候としての表面の膨れ



(b) 実験開始 125 分頃： 天端でエアブローの発生およびクラックの発生

図-7 堤体の変状の様子： Case(1) (降雨有り, 不透気・遮水シート)

実験中、堤防の表面からも、特徴的な現象を観察することができた。まず、75 分過ぎには側面から堤体内に空気塊が存在することができ、図-7(a) に示すように法先にエアブローやその兆候としての表面の膨れを観察することができた。また、125 分頃には、図-7(b) に示すように、天端でエアブローの発生を確認するとともに、上流側に引張り亀裂のような変状が見られた。以上のことから、降雨と河川水

位上昇が生じると、浸潤線の進行によって空気塊が閉じ込められていくとともに、堤内側や天端の体積含水率が顕著に低い値をとることからも、閉じ込められた空気塊が圧縮されていることが分かる。この結果、地表面に押し出されることでエアブローが生じるとともに亀裂といった堤体に損傷を与えることが分かった。越流時には、閉じ込められた圧縮空気塊には揚力がかかることから、堤体の破壊を助長することが想像できる。

(2) 浸潤挙動に及ぼすシート設置の影響

Case(2) (降雨有り, 不透気・遮水シート) の場合、図-5 の(a)では、Case(1) (降雨有り, シート無し) と比較して堤体内への浸潤は遅く、堤体内の浸潤線の発達が非常に複雑に進行している。そのため、(b), (c), (d)の段階では、大きな不飽和領域が形成されている。また、堤体の天端方向への浸潤が他のケースと比較して非常に遅いことから、シート内部に圧縮空気が封入され浸潤線の進行を妨げることが原因と考えられる。この場合、大規模なエアブローを引き起こす可能性がある。堤体内においては、実験開始直後は降雨によっても体積含水率はほとんど増加することがないが、20 分を経過すると、天端のシート下で計測している空気圧  $p_a$  は上昇を始める。その後、体積含水率が低下する領域が表れ、空気圧は低下する。河川水位 150mm 以下では体積含水率に若干の変化はあるものの空気圧に変化は無い。河川水位が 250 mm に到達すると、体積含水率の低下と空気圧上昇が同時に進行していく。つまり、Case(2)では、大きな圧縮空気塊が出来ると伴に、外部の水位上昇によって空気圧が上昇することになる。越流時には、シートには大きな揚圧力が掛かることが考えられ、シートが剥がれる際には堤体に大きな損傷を与えることになることが想像される。つぎに、Case(3)の場合 (降雨有り, 透気・遮水シート)、Case(2)の不透気性遮水シートとは異なり、浸潤が水位上昇と共に進んでいる。また、堤体内では実験開始 30 分経過後に堤体下部において体積含水率の増加が始まり、その後の河川水位上昇時においても、Case(1)や Case(2)のように顕著な低下を示すことなく保持されている。また、図-8 に示すように、75 分過ぎには、Case(1)のときと同様に法先にエアブローの兆候と考えられるような表面の膨れが観察されることから、シートの透気性によって堤体内の空気が抜け、浸潤線の進入を助けたことが分かる。

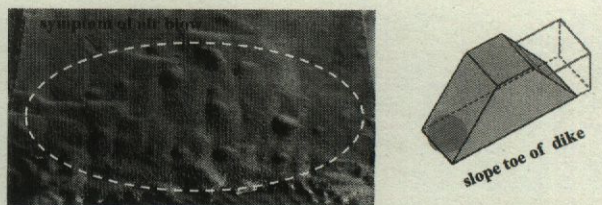


図-8 堤体の変状の様子： Case(3) (降雨有り, 透気遮水シート)

Case(1)から Case(3)に対して、越流後の状態を図-9 に示す。Case(1)のようにシートが無い場合には、崩壊や洗掘が進み、堤体が破壊しているが、Case(2)や Case(3)のように、堤体全面にシートが敷設され、今回の実験の様にシートが剥がれないように工夫されている場合には、シートよりも下部の堤体が保護されていることがわかる。ただし、Case(2)のように不透気シートの場合には、内部に高い圧力を持った圧縮空気が存在し、必ずしもシートが側面に固定されないような実際の状態では、大規模なエアブローで堤体が決壊する可能性があることが考えられる。

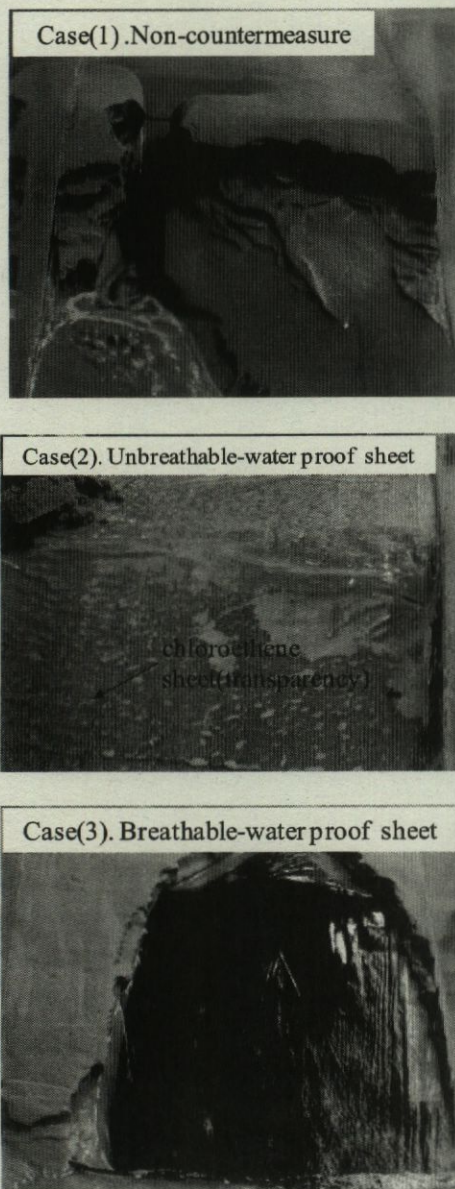


図-9 越流後の堤体の様子

#### 4. 結論

本研究では、降雨発生装置を備えた模型堤防実験により、降雨浸透や河川水位の上昇に伴う間隙空気塊の挙動を把握した。無対策の堤体では、降雨浸透や河川水位の上昇により空気圧の上昇やブロー現象が確認されるとともに、天端にクラックも生じ、堤体内の圧縮空気の封入によって堤体に損傷が生じることが模型実験でも確認することができた。不透気性の遮水シートによる浸透防止対策工ではシート下位の間隙空気圧が上昇した。越流時にはこの間隙空気が堤防への突発的な損傷を与えることが予想される。また、透気性のある遮水シート施工時は、浸潤線の経時変化から堤体内部から外部への早期の気泡放出が確認され、降雨浸透防止効果と間隙空気圧の軽減効果が生じることが分かった。

#### 参考文献

- 1) Maeda, K., Sakai, H. and Sakai, M.: Development of failure analysis method of ground with Smoothed Particle hydrodynamics. *JSCE, 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) 中日新聞社 (2000) : 中日新聞朝刊2000年9月15日朝刊.
  - 4) 小高猛司, 浅岡顕: 砂質地盤での浸透過程での気泡の発生・発達現象, *土木学会論文集*, 487/III-26, pp. 129-138, 1994.
  - 5) 中島保治: 干拓堤防のパイピングについて, *土と基礎, 地盤工学会*, Vol. 13, No. 2, pp. 83-88, 1985.
  - 6) 上田滋夫, 榎尾孝之: 河川堤防に用いる新しいジオシンセティックスの提案, *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 -*, 2006.
  - 7) 榎尾孝之, 三吉正英, 椋木俊文, 谷口徳晃: 通気・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.
- 榎尾孝之, 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*, pp.673-674, 2009.

## LAYING EFFECT OF BREATHABLE - WATER PROOF SHEET ON RIVER DIKE CONSIDERING HEAVY RAIN AND AIR BUBBLE

Kenichi MAEDA, Satoshi SHIBATA, Kanji BABA, Takayuki MASUO and Tatsuya IMASE

Based upon numerical analysis, the damage of a river dike caused by a localized torrential downpour is presumed to be related to the saturation of the dike, due to seepage water from the dike surface and blow off of pore air (air blow) following a rise in the seepage line in the dike. 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 body. In this study, by performing experiments using a dike model equipped with a rainfall generation apparatus, the behavior of a pore air mass captured by rainfall seepage and a rise in the river water level was investigated. When no counter-measures had been taken to the dike, a rise in the pore air pressure and an air blow phenomenon were confirmed following rainfall seepage and a rise in the river water level. When seepage prevention measures using an unbreathable - waterproof sheet had been taken, the pore air pressure below the sheet rose. When seepage prevention measures using a breathable - waterproof sheet had been taken, the effect of preventing rainfall seepage and that of reducing the pore air pressure were confirmed.