

名古屋工業大学 正会員 ○前田 健一
 名古屋工業大学大学院 学生会員 柴田 賢
 名古屋工業大学大学院 学生会員 今瀬 達也

1. はじめに

都市型集中豪雨が引き起こす河川堤防の損傷には、堤防表層部からの浸透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ブローする現象（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^{1),2)}。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。この決壊過程を目撃証言が新聞³⁾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、間隙空気のブ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され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ぶ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^{2),4),5)}。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の把握を試みた。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

降雨および河川の水位上昇が堤防に作用するときの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、土槽内に一定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箇所を開孔を設けて、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。

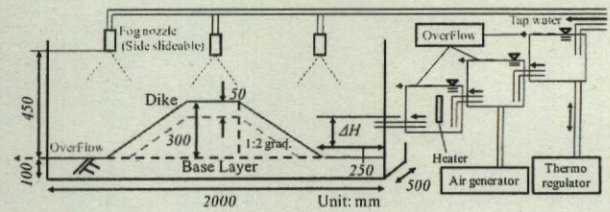


図-1 実験装置概要

堤体下部の基盤層（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。相対密度は $D_r=80\%$ とした。堤体部は、浸潤線の様子を目視でも簡単に観察できるように豊浦砂の乾燥飼料を用いて作製した。層厚50mmごとに空中落下させ突き棒で突固め（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124mm/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 (30mm/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 ことで、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。

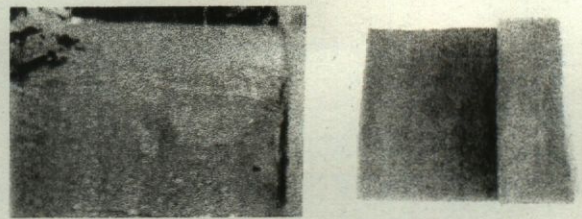
(2) 実験ケース

本論文で示す実験ケースは表-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 ことで、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 分間受けた後、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、スポーツウエ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 セティック用途として開発された'透気遮水シート'である^{6,8)}。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、直系 0.2-0.3mm 穴を 1-1.5 個/cm²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)不透気遮水シート (b)透気性遮水シート

図-2 使用したシートの種類

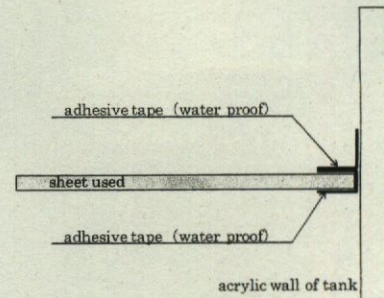


図-3 シートと土槽壁面との結合方法

3. 実験結果および考察

降雨なしの場合 (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。 初期状態において乾燥飼料を用いているため、浸潤線の動向を 明確に観察することができる。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こと がわかる。ただし、図-4 からわかるように、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領域ではなく、毛管 現象によって浸潤の進行方向に寄っていることがわかる。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 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。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 ($\theta - \theta_0$) (θ , θ_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。

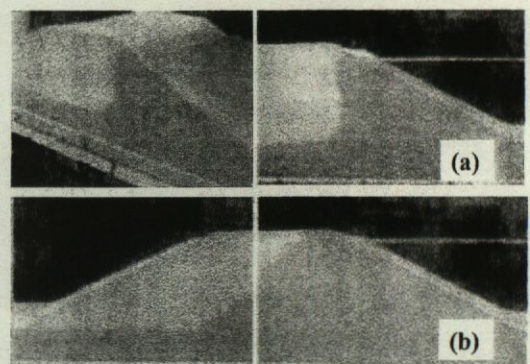


図-4 浸潤線の経時変化: Case(0) (降雨無し・シート無し) の河川水位 250mm の場合

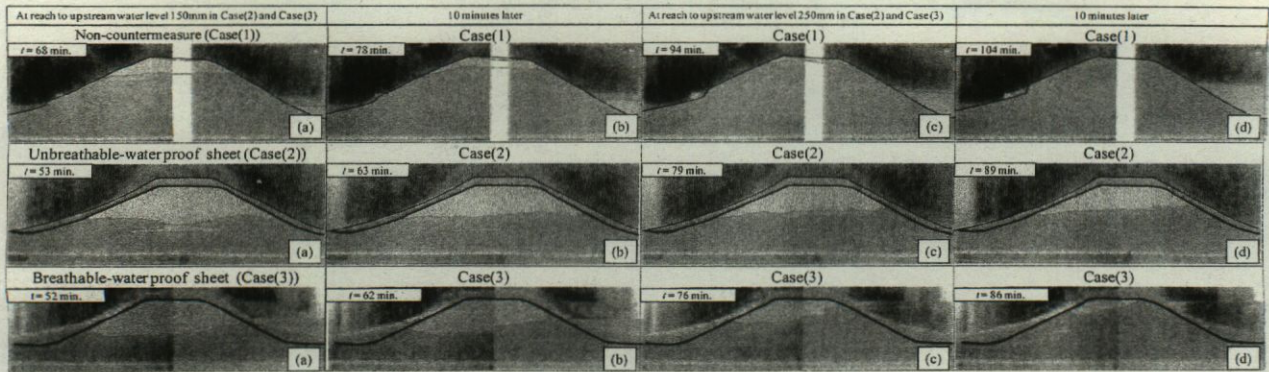


図-5 浸潤過程の比較：上から Case(1) (降雨有り，シート無し)，Case(2) (降雨有り，不透気・遮水シート)，Case(3) (降雨有り，透気・遮水シート)：(a)河川水位 150mm に達した時，(b) 河川水位 150mm を保持して 10 分経過した時，(c) 河川水位 250mm に達した時，(d)河川水位 250mm を保持して 10 分経過した時

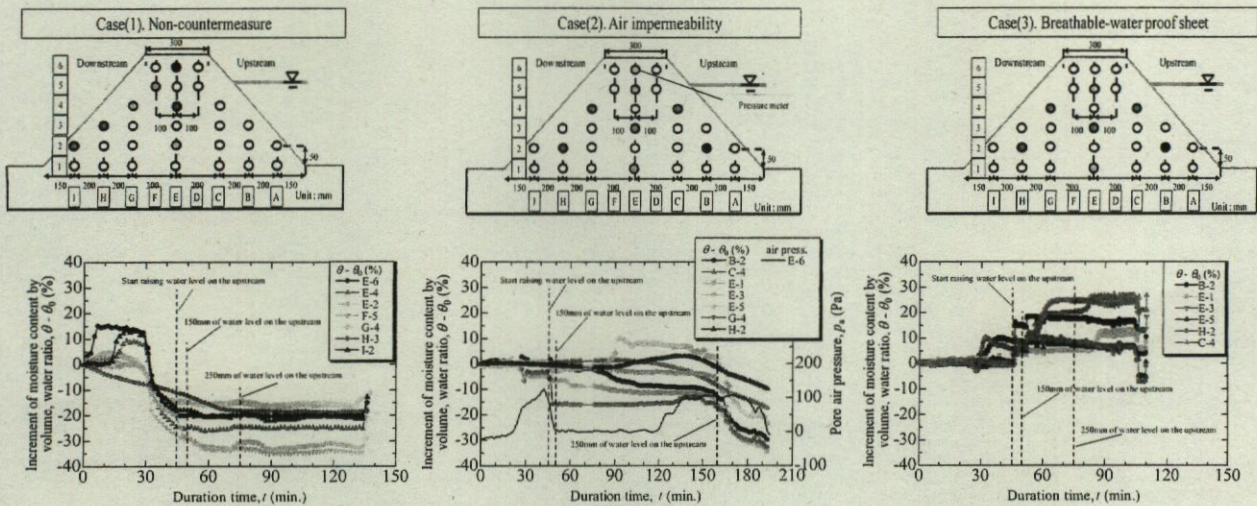


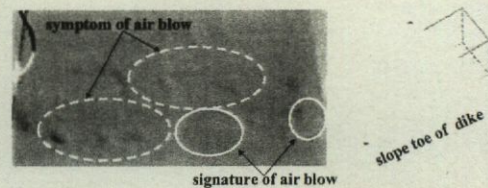
図-6 堤体内の水分量変化：Case(2) (降雨有り，不透気・遮水シート) ではシート下の間隙空気圧の変化を示す

(1) 浸潤挙動に及ぼす降雨の影響

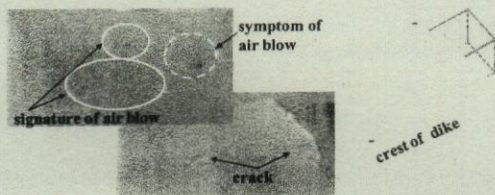
事前降雨と降雨を伴う Case(1)の場合，図-5(a) (河川水位 150mm に到達時) に示すように，堤体内部への浸潤速度が速く，堤内側裏面下部で崩壊を始めているため，早期の決壊を招く恐れがあり，危険である。一方，(b) (河川水位を 150mm に保持して 10 分経過時)，(c) (河川水位 250mm に到達時) となると，堤外側水位が上昇するとともに堤内側の法面が侵食される。(d) (河川水位 250mm を保持して 10 分経過した時) では，堤体内が飽和し，河川の水面と同等の高さまで侵食が伝播し，堤体の表層崩壊が進んでいることがわかる。ここで，図-6 に示されているを体積含水率の変化 $(\theta - \theta_0)$ ($\theta = w(\rho_d/\rho_w) = eS_r/(1+e)$; w , ρ_d , ρ_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関わらず体積含水率の値が低下し始め，湿润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関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。これは，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。

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，実験開始 75 分過ぎには，土槽側面から堤体内に空気塊が存在していること，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 分経過すると，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。以上より，降雨と河川水位の上昇が生じると，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わかる。この結果，空気塊は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。



(a) 実験開始 75 分後：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 分後：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) (降雨あり，不透気遮水シート設置の場合)

(2) 浸潤挙動に及ぼすシートの設置の影響

Case(2) (降雨有り，不透気・遮水シート) の場合，図-5(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防ぐ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が若干の変化はあるものの空気圧に変化無い。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共に，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，浸潤線の進入を助長されたことがわかる。

Case(1)から Case(3)に対して，越流後の状態を比べた状態を図-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-8 堤体の変状の様子：Case(1) (降雨あり，透気遮水シート設置の場合)

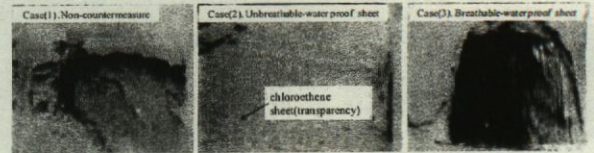


図-9 越流後の堤体の様子

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わかった。

謝辞：この研究に用いた装置の一部は日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究(B)20360120 および特別研究員奨励金 20-8411 によるものであり，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. *JSCSE, 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，浅岡頭：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：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)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。