

集中豪雨による砂質堤防の損傷における間隙空気の影響と透気遮水シートの敷設効果
Participation of pore air in damage of sandy dike depend on a localized torrential downpour and laying
effect of breathable waterproof sheet on river dike

柴田 賢¹, 前田 健一², 馬場 干児³, 梶尾 孝之⁴

- 1 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻
- 2 名古屋工業大学 都市社会工学科 E-mail: maeda.kenichi@nitech.ac.jp
- 3 応用地質 エンジニアリング本部
- 4 太陽工業 国土環境エンジニアリングカンパニー

概 要

局所的な集中豪雨による河川堤防の損傷には、堤防表層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ブ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。無対策の堤体では、降雨強度の変化が堤体内浸透挙動に影響を及ぼし、特に集中豪雨に相当する降雨強度の場合には間隙空気の挙動が顕著に現われることが分かった。また、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できた。不透気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：都市型集中豪雨、間隙空気、透気遮水シート

1. はじめに

都市型集中豪雨のように局所的な集中豪雨が引き起こす堤防の決壊には、降雨による堤防表層からの浸透と河川の水位が上昇することに伴う下層からの浸透により、内部の間隙空気が圧縮され、堤防内から押し出されるようにブローする現象（以下、エアブローと呼ぶ）が発生することが数値解析で指摘されている¹⁾²⁾。2000年の東海豪雨時には、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。このときの決壊過程が新聞³⁾に掲載されており、その目撃者によると、『堤防を斜めに横断する形で亀裂が入り、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、ゆっくりと広がり続け、漏れ出る水の勢いは激しさを増していった。』という。これは、浸透破壊に間隙空気の関与を想像させる内容である。しかし、間隙空気が噴発することが堤防にどのような影響を及ぼすのか、影響を及ぼすとすればどのようなメカニズムなのか、については未だ明らかにされていない。また、堤防の効率的な対策方法を考えるために、集中豪雨時における堤防内部の間隙空気の挙動や堤防の強度に及ぼす影響について検討することが重要である。

また、気泡が発生するメカニズムは異なるものの、地盤内部に気泡が発生・発達すること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、浸透破壊現象は水位差が限界水位差に達

すると一気に崩壊する現象として知られている。しかし、砂質地盤において、間隙水が過飽和状態（水中溶存酸素量が多い水）の場合、限界水位差以下の水位差を保持し続けるだけで、空気が間隙水中に理論飽和量を越えて溶解しているときに、不安定な空気が気泡として溶出し、発達成長することで地盤が破壊することが示されている。この場合においても、発生した気泡が発達し下流側の地表面から噴出する度に地盤内に緩み領域が発達し、気泡の挙動が地盤の損傷を助長する。

一方、都市が発達する下流域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防が多いと考えられる。礫質のように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遅い場合には、エアブロー発生の可能性が最も低いと考えられる。つまり、河川の下流域の沖積平野における堤防では、最もエアブロー発生の可能性が高く、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。また、一般的には降雨浸透時における間隙空気の影響は考慮されず、浸透特性の検討や安全性の評価がされており、河川堤防の設計についても降雨の影響は十分に考慮されていないのが現状である。

そこで、本研究では、任意の降雨強度を再現可能な降雨発生装置を備えた模型堤防実験を行い、降雨浸透や河川水位の上昇に伴う間隙空気の挙動を把握することを試みた。また、降雨浸透および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。この結果を踏まえ、不透気遮水シート（水も空気も透さないシート）を用い、一般的な越流対策としてアスファルトフェインングを模擬した場合、また、透気遮水シート（空気は透すシート）の設置効果を検討した。

2. 実験方法および実験条件

2.1 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堤防への浸潤から越流し堤防が破壊するまでの様子を観察するために図-1のような任意の降雨強度を設定することができる降雨発生装置を備え、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。降雨は水道水を用い、設定する降雨強度に合わせて噴霧ノズルを使用し、土槽内に均様な降雨量となるように長手方向に一定速度で往復運動させ、発生させた。また、時々刻々と進行する浸潤線の動向を観測するために、模型堤防の外から写真およびビデオ撮影を行うとともに、図-1の背面から約30箇所の開孔を設けて、堤防の奥行き方向の中央に水分計や間隙水圧計を埋設できるようにした。水分計および間隙水圧計の設置位置を図-2に示す。

堤防下部の基盤層（層厚100mm）は、土槽底面に水を張り、極力飽和状態となるように予め別容器に浸潤させておいた豊浦砂を水中落下させ、相対密度80%に管理して作製した。堤防本体は浸潤線の進行を目視でも観察し易くするために、乾燥状態の豊浦砂を用いて作製した。層厚50mmごとに空中落下させ突き棒で突固め（100mm²当たり7回、相対密度を70%に管理した。本論文では、堤防高さを300mm、法面勾配を1対2と設定した。また、シートを設置する場合には、図-1の赤破線で示した位置（堤防完成図から50mm内部）まで堤防を作製した後、その堤防表面を覆うようにシートを敷設し、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外力条件は図-3に示すようにcase(1)からcase(4)は上図、case(5)からcase(7)は下図のとおり設定した。気象庁で集中豪雨と定義されている降雨強度の範囲で100mm/hr、120mm/hrを一定値で確保し、非常に激しい雨と定義されている範囲で60mm/hrを一定値で設定する。これによって、降雨の強さによって間隙空気の影響にどの程度の差異が現われ、間隙空気の影響が顕著に現われるメカニズムを検討することができる。また、堤外側の水位上昇は、堤外側に一定流量（1800ml/min）で給水し、30分掛けて天端に達するような上昇速度で与える。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。上昇速度に関しては、東海豪雨時の新川堤防の決壊地点付近におけるハイドログラフをもとに設定している。

2.2 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、シートを敷設せずに、降雨の影響について検討を行った（case(1)から(4)）。case(1)では降雨を与えず堤外側の水位上昇のみを行い、case(2)

から(4)では、降雨強度を変え、雨の強さが浸潤挙動に及ぼす影響について検討する。図-3に各実験ケースでの外力条件を示す。case(5)では、降雨による堤防表層からの浸透を45分間受けた後、降雨を継続させながら、堤外側の水位を上昇させた。つまり、堤体表面と堤外側の水位上昇の両方からの浸潤を同時に受けることになる。

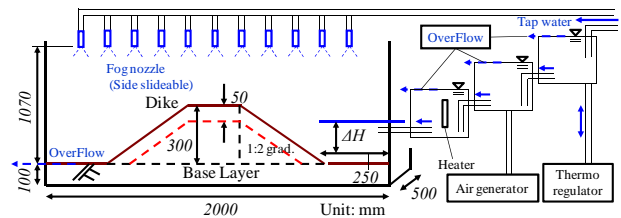


図-1 実験装置概要

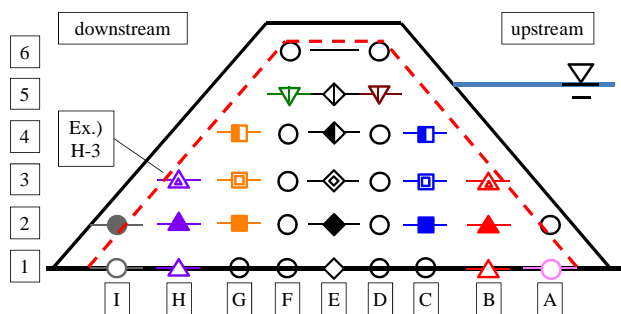


図-2 計測器設置位置とグラフのプロット

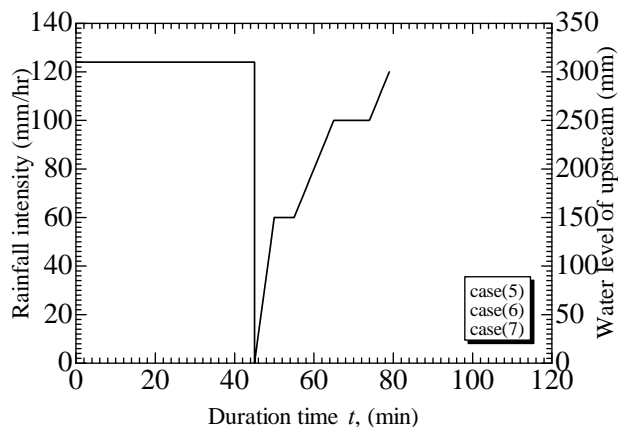
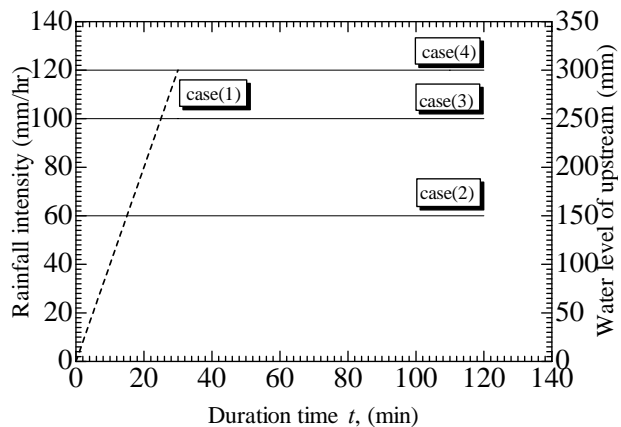


図-3 各実験の外力条件

表-1 実験ケース

case(No.)	Intensity of rainfall (mm/hr)	Water level raising upstream	Counter-measure sheet
case(1)	-	Yes	-
case(2)	60	-	-
case(3)	100	-	-
case(4)	120	-	-
case(5)	124	Yes	-
case(6)	124	Yes	Unbreathable-waterproof
case(7)	124	Yes	Breathable-waterproof

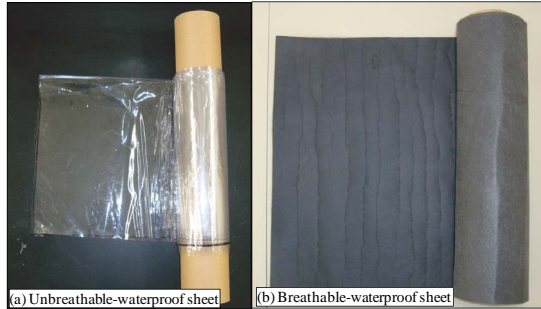


図-4 対策時に用いたシート:(a)はcase(6)で用いた不透気遮水シート, (b)はcase(7)で用いた透気遮水シートを示している。

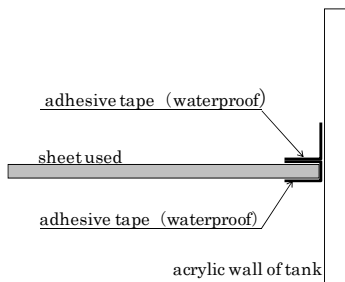


図-5 土槽壁面とシートの境界条件

つぎに、堤体への浸潤や表面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。これを模擬するために、不透気遮水シートを堤体内に設置して実験を行った(case(6))。シートには厚さ0.5mmの塩化ビニル製のシートを用いた(図-4(a))。また、設計マニュアルには明文化されていないものの、越流堤などには、堤内に生じた圧縮空気を逃がすために排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(図-4(b))を用いることとした

(Case(7))。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用途として開発された透気遮水シートである⁶⁾⁹⁾。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。シート端部は図-5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。

3. 実験結果および考察

3.1 河川水の浸透と降雨浸透の比較

河川水の上昇による浸透と降雨浸透のそれぞれを外力として堤体に与えた場合の浸透挙動を比較する。外力を降雨なし、堤外側の水位を上昇させる場合(case(1))、河川水位を0mmから300mmに到達する間の浸潤線の経時変化および外力を降雨のみ、降雨強度120mm/hrを与える場合(case(4))の浸透過程を図-5に示す。初期状態が乾燥した堤体を用いているので、浸潤線を明確に観察することができる。河川水位の上昇とともに、河裏の法尻へ浸潤前線が進行している。ただし、図から分かるように、浸潤によって色が異なる場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の前線とするとともに、水分計による水分量変化の両方の結果を用いて考察するものとする。

また、河川水位の上昇による堤体内の浸潤挙動とは異なり、case(4)を見ると、降雨浸透は堤体表層に浸透し、表層に浸潤域を形成した後、そのまま表層から下層に向かって浸透が進んでいない様子がよくわかる。つぎは、法先および法尻から堤体内方向へ浸透が進み、堤体中央付近の浸透が最も遅くなっている。したがって、水位上昇による浸潤と降雨浸透は全く異なる挙動を示すことが分かる。

3.2 浸潤挙動に及ぼす雨の強さの影響

つぎに、降雨浸透が間隙空気に及ぼす影響を検討するために、降雨強度を変えて間隙空気の影響を考慮した降雨浸透特性を検

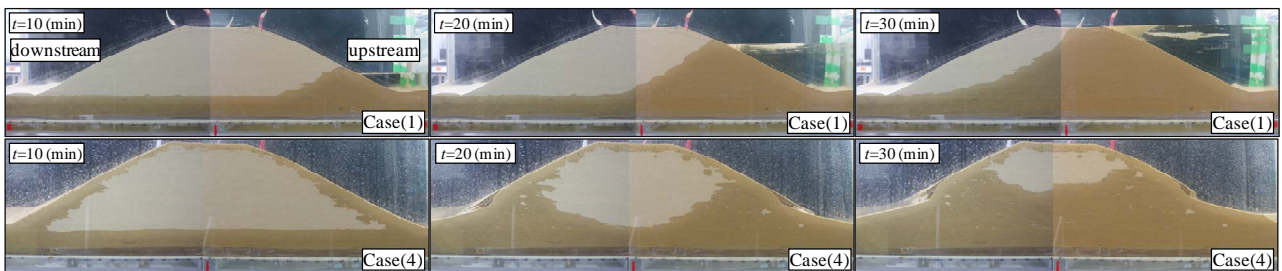


図-6 集中豪雨および河川水位の上昇の外力をそれぞれ与えた時の浸透挙動の変化: 上段にcase(1)(降雨なし, 河川水位の上昇のみ), 下段にcase(4)(降雨あり, 河川水位の上昇なし)を示す。

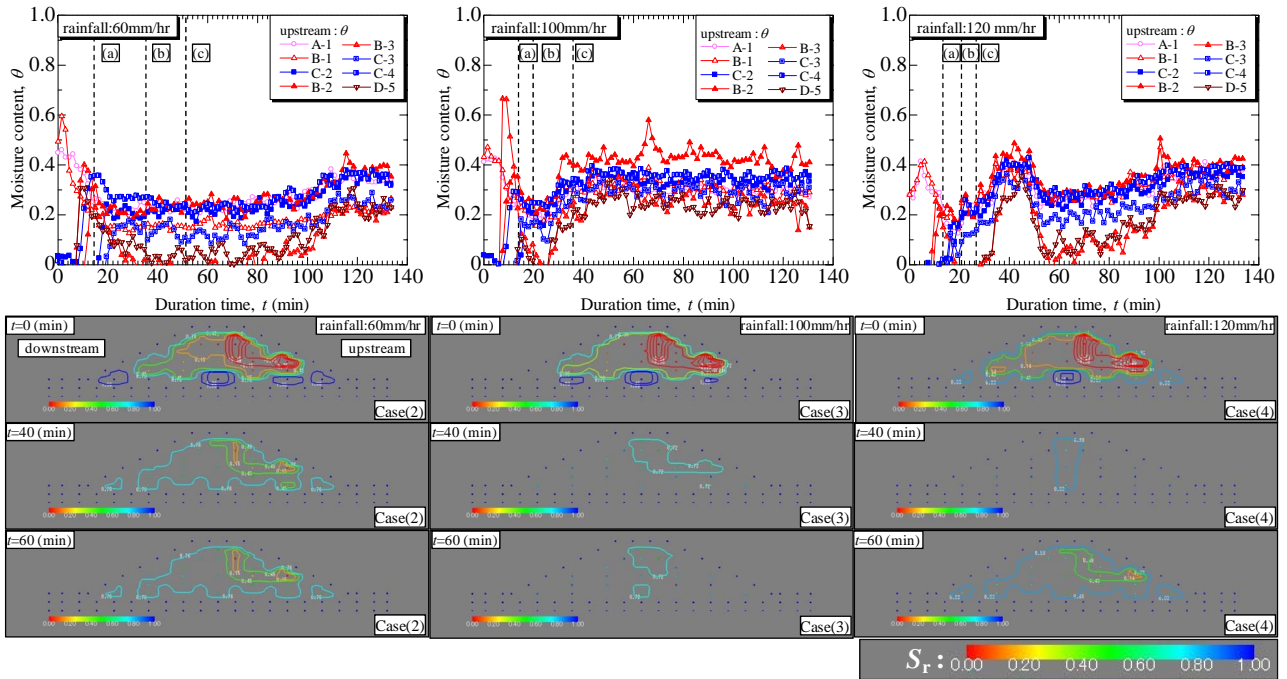


図-7 堤体内水分量の変化：上段には、堤体内の堤外側に埋設した水分計による体積含水率の経時変化を示し、下段には堤体断面全体の水分量の変化を飽和度による等高線を用いて示している。上段の体積含水率の変化内に時刻歴を示す。(a)土槽側面で地盤表面に膨れが観察された時、(b)降雨浸透により堤体の法面が浸食された時、(c)土槽正面から見ると、堤体内に乾燥状態の領域が無くなった時を示している。なお、飽和度コンター図は暖色系であるほど乾燥状態、寒色系であるほど湿潤状態を意味している。

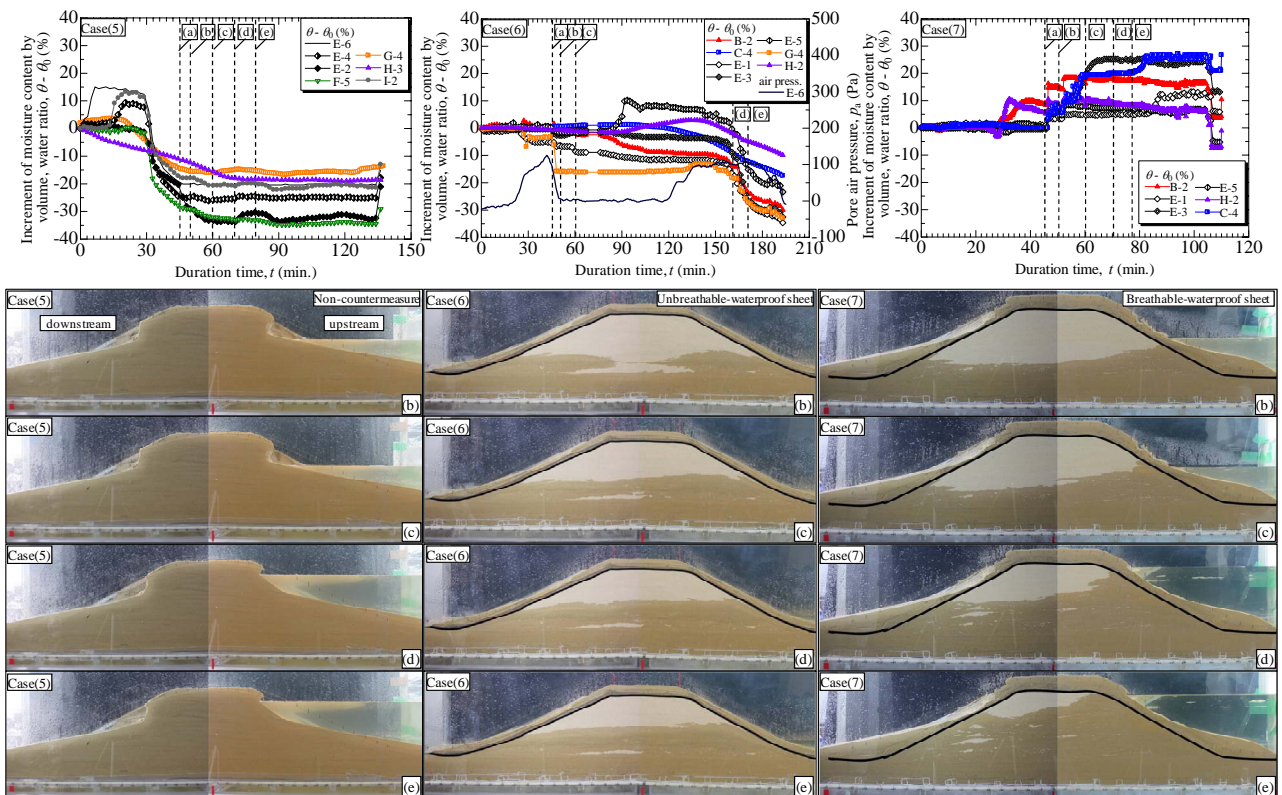


図-8 浸潤過程の比較：左から順に、case(5) (シート無し), case(6) (不透気遮水シート施工時), case(7) (透気遮水シート施工時)を示している。なお、グラフ上に記されている時刻歴と堤防断面の時刻は一致している。(a)堤外側の水位を上昇させ始めた時、(b)河川水位が150mmに到達した時、(c)河川水位150mmを保持して10分経過した時、(d)河川水位が250mmに達した時、(e)河川水位250mmを保持して10分経過した時である。

討する。降雨強度を変化させると、浸透の速度に変化が現われるものの、土槽壁面で観察された浸潤挙動に顕著な違いは現われないので、例として降雨強度 120mm/hr の浸潤過程を図-6 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を捉えた。堤体内における降雨浸透の様子を観察するために、計測された体積含水率を飽和度に変換し、飽和度コンター図を作成し、降雨が及ぼす間隙空気の影響を検討した。堤体内の体積含水率の変化および飽和度コンターを図-7 に示す。ここで、堤体内の体積含水率の変化は堤外側と堤内側で顕著な違いはないので、本論文ではすべて堤外側の変化を示す。

つぎは堤体内の水分量の変化を実験ケースごとに見てみる。

case(2)の場合、水分量の変化を見ると、降雨開始後 20 分程度ですべての設置個所で水分量が増加している。その後、堤体内の水分量は 120 分掛けて緩やかな増加傾向にある。このとき、降雨は常時継続しているにもかかわらず、堤体内が早期には飽和状態になっていないことが予想される。そこで、コンター図を見ると、堤体断面全体で不飽和な状態にあり、特に堤体中央付近に不飽和状態が顕著に現われている。よって、降雨強度 60mm/hr の場合、降雨浸透により堤体内を急激に飽和させるほどの浸透作用はないことが考えられる。

case(3)の場合では、降雨開始後 45 分程度で堤体内の水分量の増加傾向が収束し、その後、一定値を示している。コンター図を見ると、不飽和な領域が特に堤体中央付近に現われているものの、その周囲では降雨浸透が進行していることがわかる。

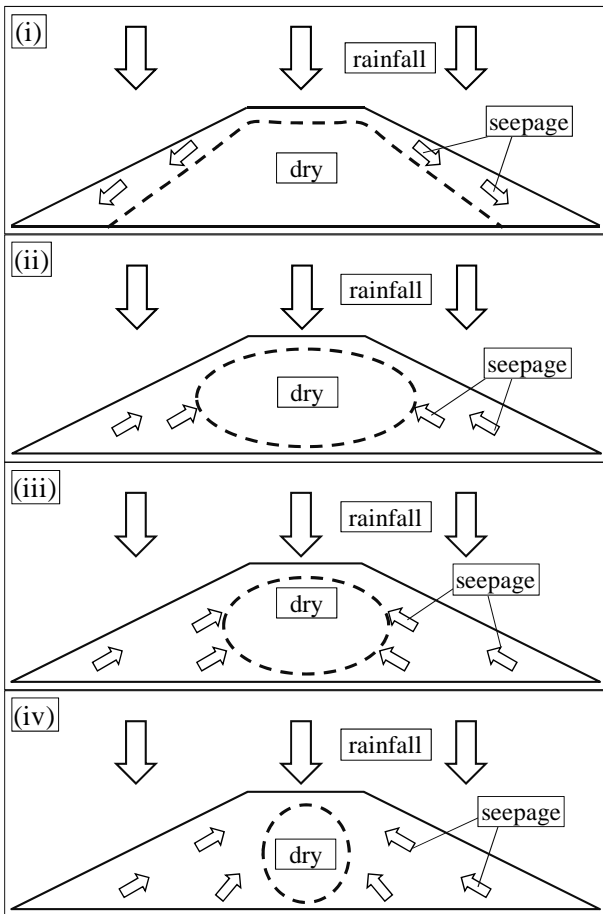
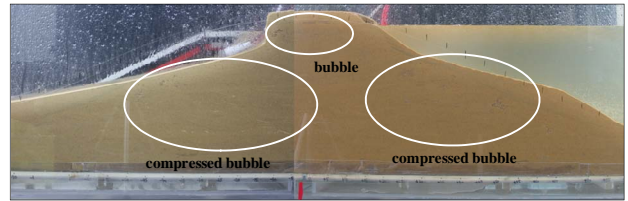


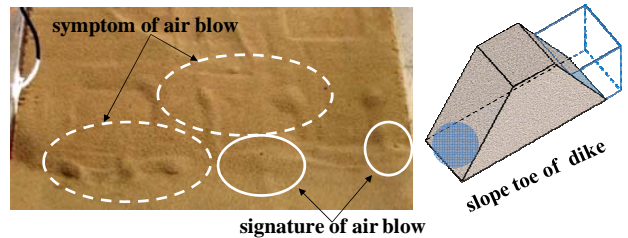
図-9 堤体内における降雨浸透の様子

つまり、降雨強度が 100mm/hr の場合、case(2)と比べて、降雨浸透が進行し、飽和領域が広く分布している。しかし、堤体中央まで降雨浸透の影響がとどまらなく、不飽和な領域を残存させていることが考えられる。

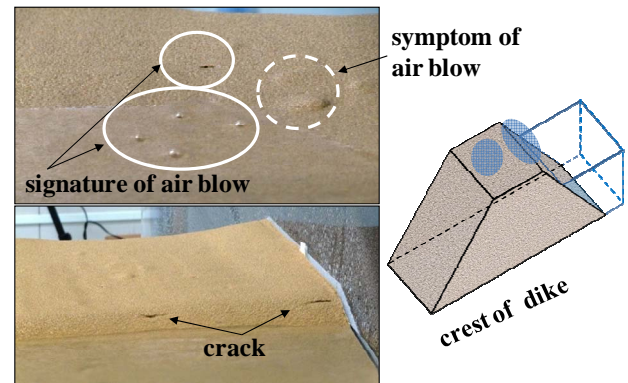
つぎに、case(4)の場合、降雨開始後 40 分程度で降雨浸透により堤体内の水分量が増加しているが、その後、降雨を継続しているにもかかわらず体積含水率の値が低下し始め、基盤層と堤



(a) 実験開始 130 分頃：越流直前に土槽正面で圧縮空気塊の発生を確認した。



(b) 実験開始 15 分頃：堤内側の法先でエアブローおよびその兆候としての表面の膨れ



(c) 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-10 堤体の変状の様子：case(5) (シート無しの時)

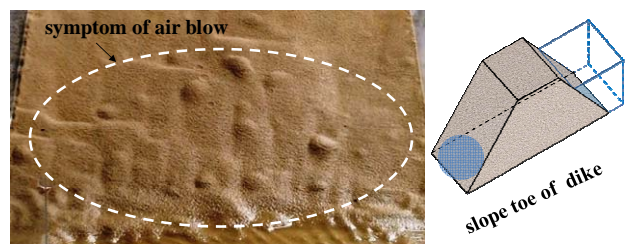


図-11 堤体の変状の様子：case(7) (透気遮水シート施工時)

防表層との間ではその増減現象が顕著に現われている。これは、降雨の浸透によって堤体内部に閉じ込められた間隙空気起因することが考えられる。その後、体積含水率は緩やかな増加傾向を示している。ここで、コンター図を見ると、降雨開始後40分で堤体中央以外、飽和状態となったにもかかわらず、再び堤体断面の全体で不飽和領域が拡大している様子が分かる。これは、降雨開始初期では乾燥試料のように湿潤していない箇所に間隙空气が存在していること示し、降雨開始後42分に計測された体積含水率の値が頂点むかえた後は、飽和地盤の中に気泡として間隙に空气が存在していることが考えられる。このように間隙空气がそれ自身圧力を持った気泡として存在するときに、河川の水位が上昇すると、閉じ込められた圧縮空气に揚力が作用し、堤体の破壊を助長することが想像できる。

以上の結果より、降雨浸透が堤体内に及ぼす影響は図-7のように考えられる。まず、(i) (降雨浸透の初期段階) では、堤体表層に浸潤域を形成する。つぎは(ii)に示すように、法先、法尻部から堤体内方向へ浸潤が進み、堤体全体としては飽和状態へ近づいていくが、堤体中央付近には大きな不飽和領域が残っている。この最も浸透現象が遅い範囲に間隙空气が閉じ込められていることが考えられる。また、(iii)、(iv)のように浸透が進行するとともに、堤体中央付近の不飽和領域に存在している間隙空气が圧縮されていき、このとき河川水位が上昇し、圧縮空气に揚力が掛かると突発的な崩壊を引き起こすと考えられる。

以上の結果を踏まえ、降雨と河川水位の上昇の外力を同時に考慮し、都市型集中豪雨のような自然環境に近い外力条件を設定し、試験を行った (case(5)から case(7))。この条件下で実施した浸潤過程を図-8に示す。これらの試験では堤外側からの総給水量が等しい。

また、本実験では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) および空气圧の計測を試みた。

3.3 浸潤挙動に及ぼすシート設置の影響

事前降雨と降雨を伴う case(5)の場合、図-8(b) (河川水位が150mmに到達した時) に示すように、堤体内部への浸潤速度が速く、堤体内が飽和している。このとき降雨浸食に加え、堤内側法面で水位上昇による崩壊を始めているため、早期の崩壊を招く恐れがあり危険である。一方、(c) (河川水位150mmを保持して10分経過した時)、(d) (河川水位が250mmに達した時)、(e) (河川水位250mmを保持して10分経過した時) となると、水位上昇とともに浸透流による堤内側の表層崩壊が進行している。ここで、図-8に示されている体積含水率の変化を見ても、実験開始後30分程度は降雨浸透により、堤体内の水分量が増加しているが、その後、降雨を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、(a) (堤外側の水位を上昇させ始めた時) となっても、体積含水率の値は低下し続け、越流崩壊するまでの約135分間、低値を保持している。降雨による浸潤によって堤体内に閉じ込められた空气塊に起因することが考えられる。

また、実験中に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、15分過ぎには側面から堤体内に空气塊が存在することができ、図-8(b)に示すように法先にエアブローの兆候として表面の膨れが観察することができた。また、125分頃には、図-8(c)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、堤外側の法肩で引張り亀裂のような変状が見られた。さらに、越流直前には、堤体内においても間隙空气塊の発生を目視できた。以上のことから、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气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ことから、閉じ込められた空气塊が圧縮されていることがわかる。この結果、空气塊が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が生じる等の損傷を堤体に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气塊に揚力が作用することからも堤体の破壊を助長することが想像される。

case(6)の場合、図-8(b)では、case(5)と比較して堤体内の浸潤は遅く、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、(c)、(d)、(e)の段階では、シート内に大きな不飽和領域が形成されている。また、基盤層から天端表層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、シート内に圧縮空气が閉じ込めら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考えられる。堤体内においては、実験開始直後は降雨によって体積含水率はほとんど増加することがないが、20分経過すると、天端のシート直下で計測している空气圧 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現われ、空气圧は低下する。河川水位が150mm以下のときは体積含水率には若干の変化が現われるもの、空气圧には変化が現われない。河川水位が250mmに達すると、体積含水率の低下と空气圧の上昇が同時に進行している。つまり、case(2)では、大きな圧縮空气塊が発生するとともに、河川水位が上昇することにより、空气圧が上昇することになる。さらに河川水位が上昇し、越流時になると、シートに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予想される。

つぎに、case(7)の場合、case(6)の不透气遮水シートとは異なり、河川水位が上昇するとともに浸潤が進行していることがわかる。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、河川水位が上昇してもcase(5)、case(6)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-9に示すように、case(5)と同様に法面において、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气が抜け、浸潤線の浸入を助けたことがわかる。

case(5)から case(7)に対して、越流後の様子を図-10に示す。Case(5)のようにシートを設置しない場合には、崩壊や洗堀が進み、堤体が破壊しているが、case(6)や case(7)のように、堤体全面にシートが敷設され、今回の実験のよう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分かる。ただし、case(6)のように不透气遮水シートのように、内部に高い圧力を持った圧縮空气が存在し、

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。

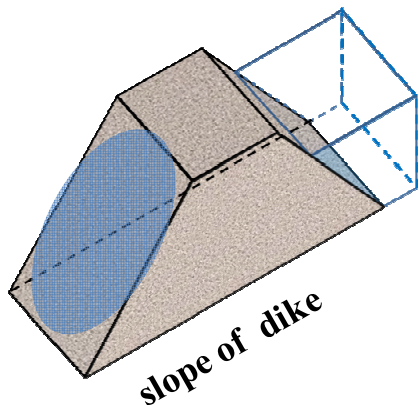
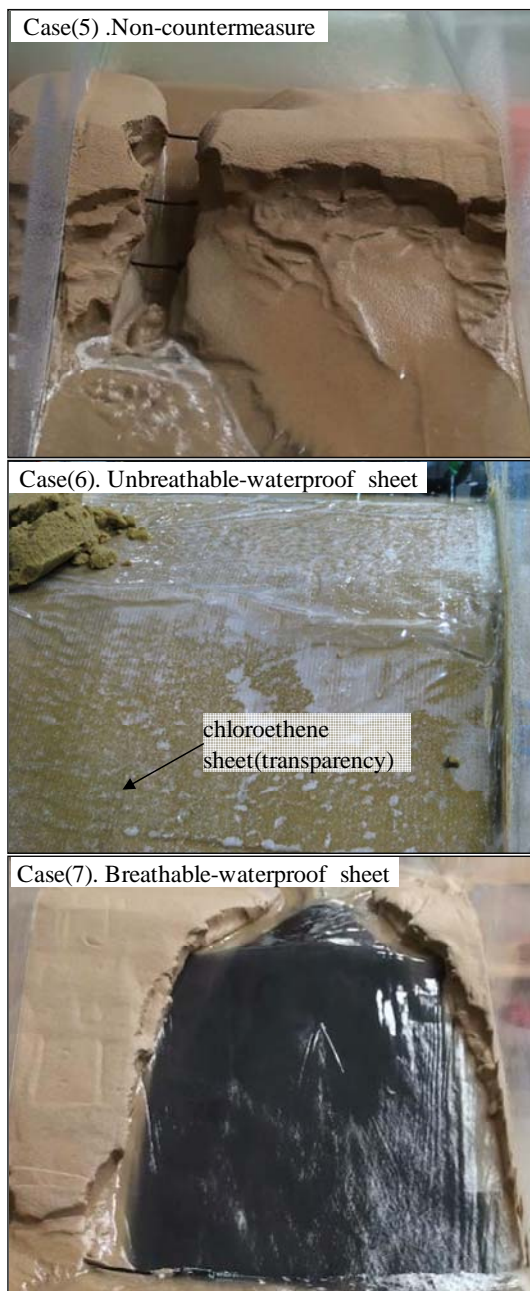


図-12 越流時の堤体の変状

以上の結果をまとめると透気遮水シートには、次のような効果を期待することができる。まず、通常考えられる降雨に対しては、一般的な堤防内部への浸透対策として、アスファルトフェイシング等と同等の効果があり、堤体内への水の浸入を防ぐことができる。豪雨時においては、シートを敷設していることで、堤体内への急激な浸透を防ぎ、堤体表層に降雨によるラップ状の湿潤層の形成をさせない。よって、豪雨による間隙空気のトラップ現象を防止することができる。豪雨に伴い河川水位の上昇が作用する場合には、透気遮水シートでは浸透を完全に防止することはできないが、浸透速度をコントロールすることができる。透気遮水シートの透気性能として、シート内の閉じた領域では空気がある圧力以上の高压となる必要がある。言い換えると、シート内の間隙空気圧がその圧力に達するまでは透気せず、シート内に空気が存在し続けることになる。したがって、河川が高水位となるとシート内部の間隙空気圧が高くなり、間隙空気の透気と浸透現象が関連して進行する。特に越流時にこの効果が発揮されることが考えられる。これにより、堤体内の間隙空気が噴発することによる突発的な破壊や越流による崩壊を防ぐことができる。

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。無対策の堤防では、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、天端にクラックが生じ、堤体内に圧縮空気が封入されることによって、堤体に損傷を与えることが模型実験でも確認することができた。

不透気遮水シートによる浸透防止対策工ではシート直下の空気圧が上昇した。越流時にはこの間隙空気が堤防へ突発的な損傷を与えることが予想される。また、透気遮水シート施工時には、浸潤線の経時変化から堤体内から外部へ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。

5. 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および日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)21360222によるものであり、深謝の意を表します。

6. 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, 榊尾孝之 : 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) 榊尾孝之, 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.
- 8) 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, pp.673-674, 2009.
- 9) 前田健一, 柴田賢, 馬場干児, 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, 国際ジオシンセティックス学会日本支部, ジオシンセティックス論文集, 第25巻, pp107-112, 2010.12