

模擬堤防土槽実験によるエアブローの確認と 数値解析

AIR BLOW PHENOMENON IN UNSATURATED RIVER DIKE MODEL AND NUMERICAL SIMULATION

前田健一¹・柴田賢²・馬場干児³・小林剛⁴・榊尾孝之⁵・尾畑功²
Kenichi MAEDA, Satoshi SHIBATA, Kanji BABA, Tsuyoshi KOBAYASHI, Takayuki MASUO
and Isao OBATA

¹正会員 博士(工学) 名古屋工業大学教授 都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²正会員 工修 国土交通省中部地方整備局 (〒460-8514 名古屋市中区三の丸2丁目5番1号)

³正会員 応用地質株式会社 (〒102-0073 東京都千代田区九段北4-2-6 市ヶ谷ビル)

⁴正会員 応用地質株式会社 計測システム事業部 (〒305-0841 つくば市御幸が丘43)

⁵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)

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. By performing experiments using a dike model equipped with a rainfall generation apparatus, the behavior of pore air captured by rainfall seepage and a rapid rise in the river water level was investigated. When no counter-measures had been taken to the dike, a rise in the pressure of the pore air captured and an air blow phenomenon were confirmed. When seepage prevention measures using an unbreathable - waterproof sheet had been taken, the pore air pressure rose. When a breathable - waterproof sheet had been used, the effect of preventing rainfall seepage and that of reducing the pore air pressure were confirmed.

Key Words : moisture content, heavy rainfall, seepage, Smoothed Particle Hydrodynamics

1. はじめに

梅雨末期や台風時期の集中豪雨およびそれに伴う河川の急激な増水により、河川堤防への急速な降雨水の浸潤や高い河川水位が作用する事例が増えてきた。また、堤防の規模によっては越流浸食もみられる。特に晴天が続いた後の不飽和な堤防への集中豪雨の浸透現象は、時間雨量10-30mm程度の日常降雨と比較し、急激に浸潤化することで堤防が不安定になることが考えられる。急激な堤体の浸潤化は通常降雨のような不飽和から飽和に向かう土・水・空気三相の物理・力学的変化のみならず間隙空気や間隙水中に溶存している空気が気泡¹⁻³⁾として分離し、堤防の弱線に沿って地表に噴発するエアブロー現象³⁾の発生が考えられ、実際に同現象が確認されている。実例として、平成11年東海豪雨、平成23年新潟・福島豪雨、台風第15号襲来時に目撃された(図-1)。

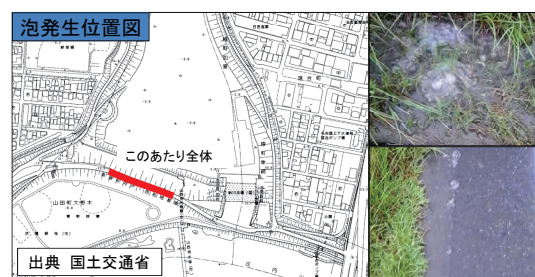


図-1 豪雨・高水位時の天端でのエアブローの発生事例

これは、豪雨の浸透過程に間隙空気の関与を想像させる現象である。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、そのメカニズムについては十分に明らかにされていない。

そこで本論文では、このような間隙空気による堤防不安定化のメカニズムについて把握するため、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試験を

行い、降雨浸透や河川水位の上昇に伴う間隙空気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、一般的な浸食・越流対策としてアスファルトフェイシ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）^{4), 5)}の設置効果を検討した。さらに、エアブロー現象も考慮した三相の降雨浸透から破壊、流動までの解析を可能にするために、計算手法の開発を試みた。

2. 模型堤防試験方法および試験条件

(1) 試験装置および試験方法

図-2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、土槽内に一樣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、アクリル面に約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-3に示す。以降、計器の場所は図中の記号を用いて示す。

試験試料には豊浦砂（最大・最少間隙比:0.978, 0.605, 透水係数: 3.22×10^{-4} m/s, 空気侵入値: 約3kPa）あるいはまさ土（最大・最少間隙比:1.231, 0.662, 透水係数: 2.29×10^{-3} m/s, 空気侵入値: 約10kPa）を用いた。堤防下部の基盤層（層厚100mm）は、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試料を相対密度80%に管理して作製した。堤体本体は浸潤線の進行を目視でも観察し易くするために、乾燥状態の試料を用いて作製した（湿潤堤防についての結果は紙面の都合上省略する）。層厚50mmごとに空中落下させ突き棒で突固め、相対密度を80%に管理した。本論文では、堤体高さを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-3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。

(2) 試験ケース

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挙動を把握することを試みるとともに、エアブローの観察を行った。水理的外力の設定として降雨と河川水位の上昇、もしくはその組み合わせとした（表-1）。降雨強度は気象庁の雨の強さに関する定義も参考として

定めた。河川水は一定流量（1800ml/min.）で供給することで、30分かけて天端に達するような上昇速度となるように設定をした。この条件の下、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。この対策を施していない模型堤体実験の結果を踏まえ、不透気遮水シート（水も空気も透さないビニールシート）を用い、一般的な越流対策としてアスファルトフェイシングを模擬した場合、また、透気遮水シート（堤体への降雨浸透を遮断し、堤体内部からは空気は透すシート）^{4), 5)}の設置効果を検討した。

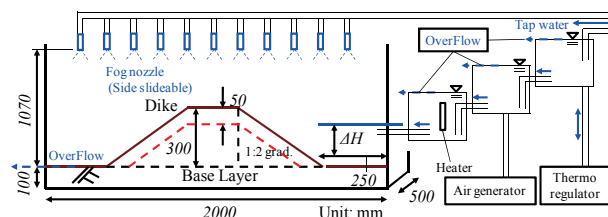


図-2 豪雨・高水位時の天端でのエアブローの発生事例

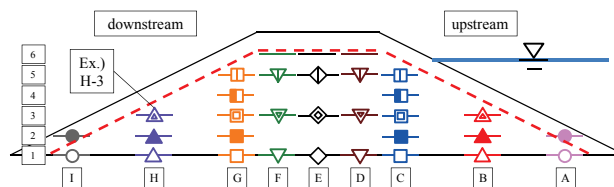


図-3 計測器設置位置とグラフマーカの関係

表-1 試験ケース

case(No.)	Intensity of rainfall (mm/hr)	Water level raising upstream	Counter-measure sheet
case(1)	-	Yes	-
case(2)	30	-	-
case(3)	90	-	-
case(4)	120	Yes	-
case(5)	120	Yes	Unbreathable-waterproof
case(6)	120	Yes	Breathable-waterproof

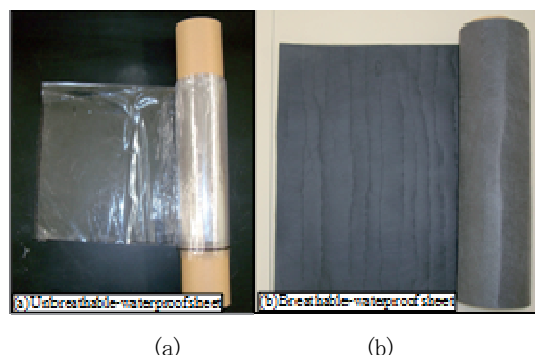


図-4 対策工に用いたシート：(a)はcase(5)で用いた不透気遮水シート，(b)はcase(6)で用いた透気遮水シート。

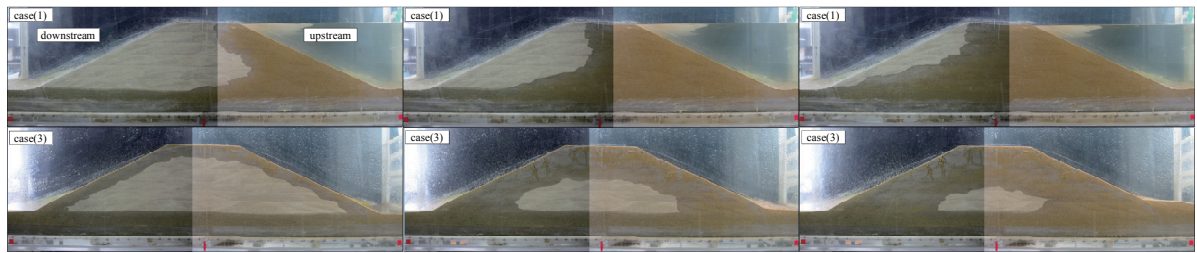


図-5 浸潤線の変化：上段:case(1) (降雨なし, 河川水位の上昇のみ), 下段:case(3) (降雨あり, 河川水位の上昇なし)

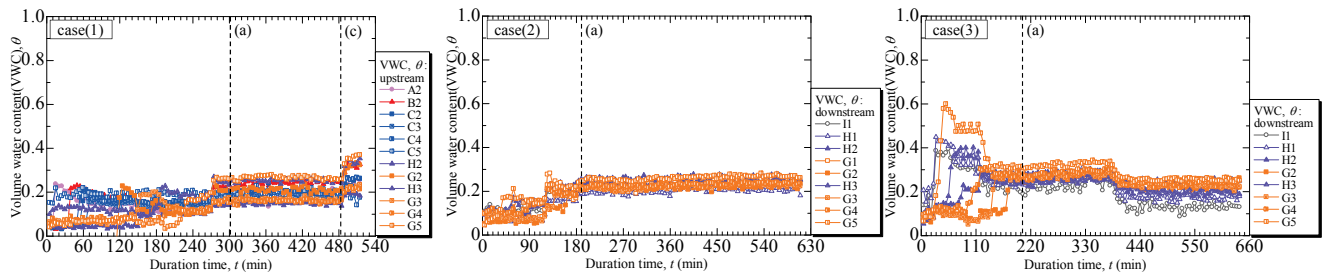


図-6 堤体内の浸透挙動：左端:case(1), 中央:case(2), 右端:case(3); なお(a)は堤体が浸潤化した時刻

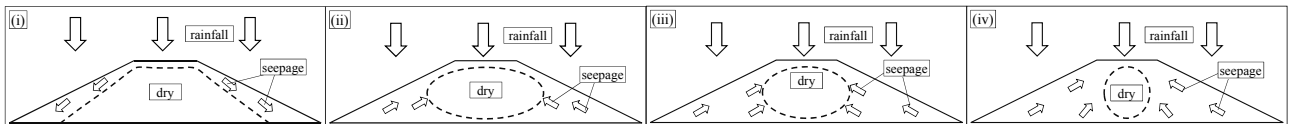


図-7 間隙空気の挙動を考慮した豪雨時の浸潤過程：(i) 表層に浸潤域を形成；(ii) 排気速度よりも浸潤作用が早い場合，法先，法尻からの浸潤で空気が捕捉；(iii) 浸潤で圧縮空気塊の形成；(iv) 空気塊のさらなる縮小・変形と上方への押し上げ

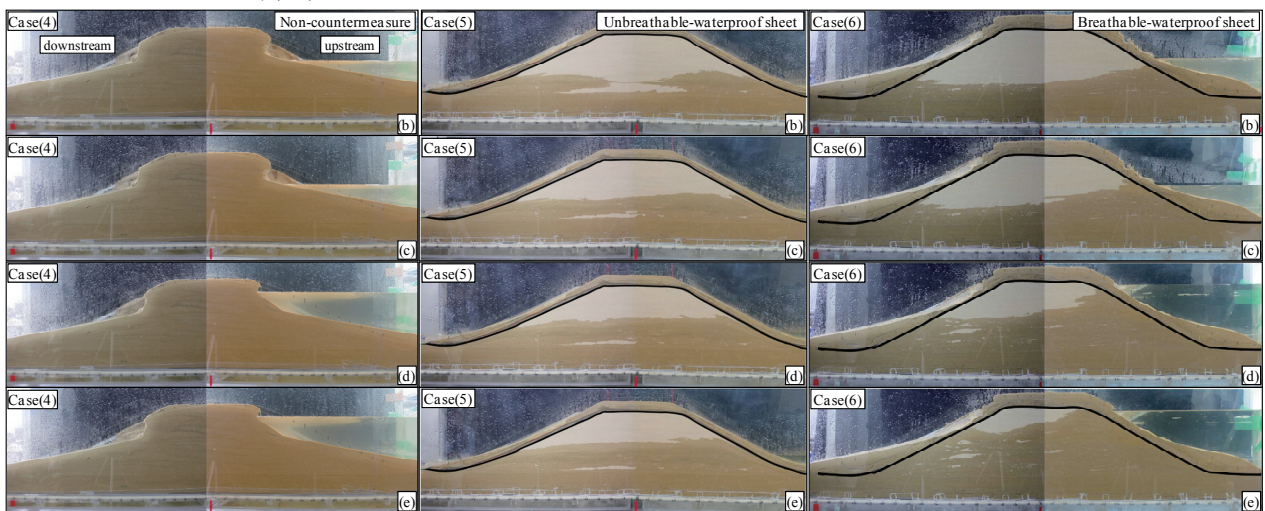
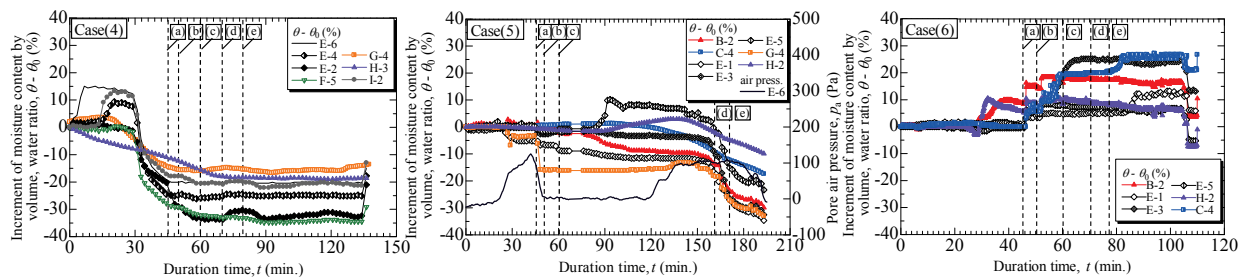


図-8 浸潤過程の比較：左から順に, case(4) (シート無し), case(5) (不透気遮水シート施工時), case(6) (透気遮水シート施工時). (a)堤外側の水位を上昇させ始めた時, (b) 河川水位が150mmに到達した時, (c) 河川水位150mmを保持して10分経過した時, (d) 河川水位が250mmに達した時, (e)河川水位250mmを保持して10分経過した時

3. 模型堤防試験方法および試験条件

(1) 河川水の浸透と降雨浸透の比較

河川増水時と降雨のそれぞれの堤体内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)) は、河川水位を0mmから300mmに到達させ堤体内の浸潤化過程を観察する。また、外力を降雨のみの場合 (case(2)およびcase(3)) は、降雨強度30mm/hr (比較的発生頻度の高い強い雨) と90mm/hr (豪雨) で降雨を600分継続した結果について示す。

河川が増水し水位の上昇とともに (case(1))、川裏の法尻へ浸潤前線が進行している (図-5上段)。一方で、降雨浸透の場合 (図-5下段)、日常的降雨30mm/hrと集中豪雨90mm/hr (case(2)およびcase(3)) とでは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る浸潤挙動に顕著な違いが観られなかった。つぎに、図-6に示す水分計から得られた体積含水率 θ の変化の様子から考察する。図-6 (中央) に示すように30mm/hr (case(2)) の場合には降雨の継続に伴い、表面から徐々に浸潤し、値は単調に増加後、180分経過後には0.3程度に収斂した状態に達している。一方、図-6 (右) に示すように90mm/hr (case(3)) の場合、豪雨浸透は、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分かる。その後、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。さらに、45分経過した頃から体積含水率 θ の低下がみられる箇所もあり、最終的には、全ての箇所の体積含水率 θ は0.3程度に収斂した状態に達している。この最も浸透現象が遅い中央付近の範囲に間隙空気が閉じ込められていることが考えられる。豪雨の場合、通常の雨に比べて降雨浸透の速度が速いため、堤体内の間隙空気が堤体表面や他の境界から排気され難いと考えられる。降雨の浸潤過程と間隙空気塊の関係をイラストにしてまとめると図-7になる。このとき河川が増水し、圧縮空気が押されたり、浸水したりすると圧縮空気塊に揚圧力が掛かることで、堤体に突発的な損傷を与えることが考えられる。

(2) 対策工試験の比較および対策効果

a) 無対策の堤体の浸潤挙動

無対策の堤体に対して、降雨 (120mm/hr) に伴い河川が増水する場合 (case(4))、図-8 (左) (b) の時点 (河川水位が150mmに到達した時) に示すように、堤体断面の浸潤化が速く、堤体内が飽和している (因みに、(a) の経過時間45分は堤外側の水位を挙げた時点である)。このとき降雨浸食に加え、堤内側法面で河川水の上昇による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。降雨浸食については、降雨強度が強く、早くから浸潤した堤体表面 (透水係数が高くなった箇所) に降雨水が集中して流れたことが要因と考えられる。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。堤体内の体積含水率の変化に着目すると、試験開始30分経過後、降雨浸透によ

り堤体内の水分量が増加している。しかし、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分の間、低値を保持している。降雨浸透によって堤体内に閉じ込められた間隙空気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、試験開始15分過ぎには堤体断面に空気塊が存在することができ、図-9(a)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物を観察することができた。また、降雨開始125分頃には、図-9(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、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、高水位状態や越流直前には、堤体内においても間隙空気塊の発生を目視できた。

以上のことから、降雨に伴い河川が増水すると、浸潤線の進行によって間隙空気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、閉じ込められた間隙空気が圧縮されていることが分かる。この結果、間隙空気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。高水位時もしくは越流時には、閉じ込められた圧縮空気塊に揚力が作用することから堤体の破壊を助長することが想像される。

b) 不透気遮水シート敷設で対策された堤体の浸潤挙動

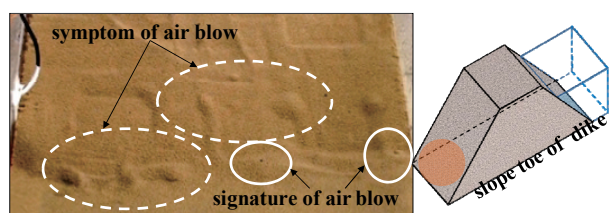
case(5) の場合、図-8 (中央) (b) の時点では、case(4)と比較して堤体内の浸潤は遅く、堤体内の浸潤線の発達が非常に複雑に進行している。そのため、(c)、(d)、(e)の段階では、シート内に大きな不飽和領域が形成されている。また、基盤層から天端表層方向への浸潤が他のケースと比較して非常に遅いことから、シート内に圧縮空気が閉じ込められ、堤体外に通気できないことから、浸潤線の進行を妨げることが原因と考えられる。

堤体内においては、試験開始直後は降雨による体積含水率の増加はしないが、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現われ、空気圧は低下する。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の、空気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気圧の上昇が同時に進行している。つまり、case(5)では、大きな圧縮された間隙空気が発生するとともに、河川水位が上昇することにより、空気圧が上昇することになる。さらに河川水位が上昇し、高水位時や越流時になると、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。また、空気塊が弱部とおもわれる箇所から押し出ようとする

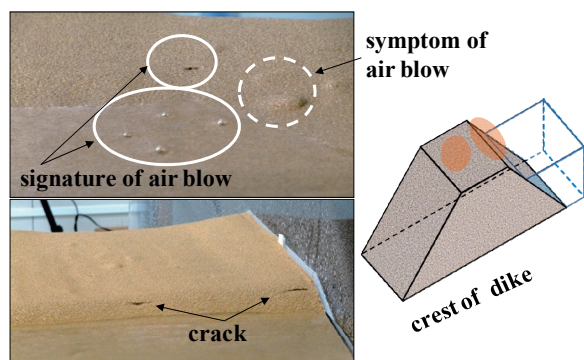
様子が目視で確認できた。

c) 透気遮水シート敷設で対策された堤体の浸潤挙動

case(6)の場合(図-8(右)), case(5)とは異なり, 河川水位が上昇するとともに浸潤していることが分かる。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(4), case(5)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-10に示すように, case(4)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物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, 浸潤線の浸入を助けたことがわかる。



(a) 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物



(b) 実験開始125分頃: 天端でエアブロー及びクラックの発生

図-9 堤体の変状の様子: case(4) (無対策)

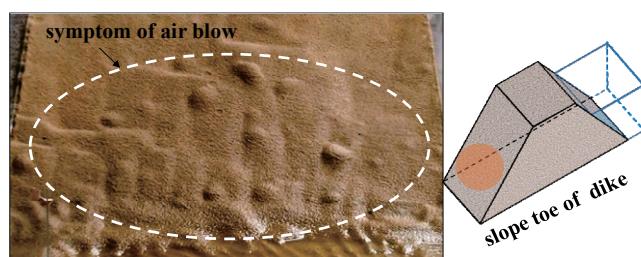


図-10 堤体の変状: case(6) (透気遮水シート敷設)



図-11 越流時の堤体の変状

d) 高水位～越流時の堤体の変状

case(4)～(6)の越流後の様子を図-11に示す。

case(4)の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(5)やcase(6)の場合には, 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, 図中央のcase(5)の不透气遮水シート敷設の場合, 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。

4. 解析手法の開発の試み

第3章で着目したような現象を解析するには, 土-水-空気の連成, 破壊解析, ある相が他の相中を移動する解析ができる必要がある。そこで, 宇宙物理の分野から発達した粒子法であるSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を拡張する^{6,8)}。FEMの連続したメッシュの代わりに, 図-12に示すような, 運動する計算粒子素片 (半径 h) を用いたLagrange的手法である (中心座標は $\mathbf{x}$)。土であれば, 土粒子ではなく土塊という連続体を計算粒子素片とする。素片の重なり合いで場を記述し, 物理量 $f(\mathbf{x})$ は素片中心と共に移動する。ここで素片 i の中心における物理量は, 周辺の素片 j の物理量と平滑化関数 $W(\mathbf{r}_{ij}, h)$ ($\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$)の重ね合わせのみで表現できる (式(1))。ここで, m, ρ は計算素片の質量, 密度である。連続体解析であるので, 計算素片には状態方程式 (流体相) や構成式 (固相) が必要となる。体積力を $\mathbf{f}$, 応力テンソルを $\boldsymbol{\sigma}$ とする (用いた簡易な構成モデルやパラメータの説明は既報⁶⁾に譲る)。

$$f_i \cong \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W_{ij}(\mathbf{r}_{ij}, h), \quad 1 = \int W_{ij}(\mathbf{r}_{ij}, h) d\mathbf{r}_{ij} \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\boldsymbol{\sigma}_j}{\rho_j^2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_i}{\rho_i^2} + \Pi_{ij} \mathbf{I} \right) \cdot \nabla W_{ij} + \mathbf{f}_i \quad (2)$$

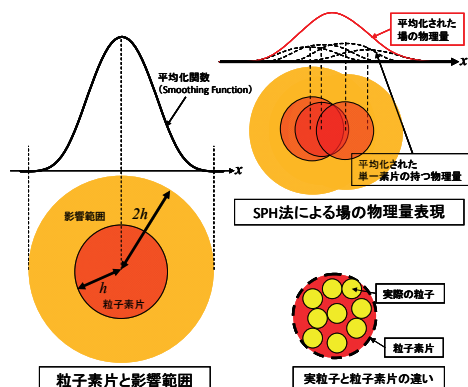


図-12 SPH法の計算粒子素片と物理量の表現方法

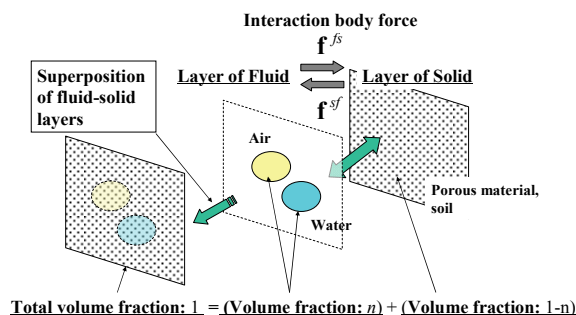


図-13 連成解析のための固相と流体相の重ね合わせ

また、三相の連成を表現するために、図-13のように、固体相と流体相（液・気相）に分け、それぞれをSPH法で計算し、式（3）に示すようなダルシー則を仮定した相互作用力を考慮して重ね合わせる方法とした。

$$\mathbf{f}^{sf} = n \frac{\rho_f g}{k} (\mathbf{v}^s - \mathbf{v}^f) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{f}^{sf}$ 、 n 、 ρ_f 、 k 、 $\mathbf{v}^s$ 、 $\mathbf{v}^f$ はそれぞれ固体相から流体相への作用力、間隙率、流体相の密度、透水係数、固体相と流体相の速度を表す。著者の一人は既に予め飽和した地盤中に封入した空気塊が水流と浮力によって噴出する現象の表現に成功している^{7),8)}。図-14は土砂の堤体に図の左側の水位が上昇し堤体が進行性破壊、流動を起こす様子を計算したものである。初期条件を図(a)に、素片の移動速度分布を図(b-d)を示す（暖色ほど速度が大きい）。また、図-15は堤体（底部は非排水・非排気条件）に豪雨を降らせ、初期状態(a)から、浸潤によって圧縮空気塊が掲載される過程が再現されていることを示している。また、図-16は堤体内の水平方向の圧縮応力の増減を示しており、圧縮空気塊の上方に弧状に水平方向の圧縮応力の低下域（図(b)中の黄色部分）が発生している。圧縮空気塊が堤体に亀裂を生じさせる可能性を表現できていると言える。

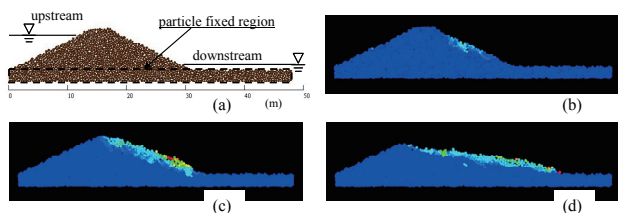


図-14 SPH法による進行性破壊挙動の再現

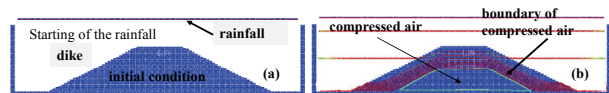


図-15 SPH法による豪雨浸透解析

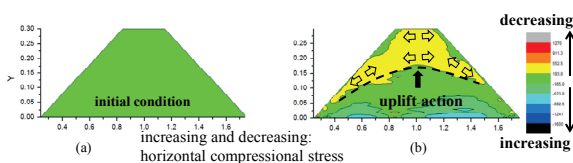


図-16 SPH法による豪雨浸透による水平圧縮応力の変化

5. おわりに

模型堤防試験により、急激な降雨浸透や河川水の上昇に伴う堤体内間隙空気の挙動を把握した。無対策の堤防では、降雨浸透により堤体内の間隙空気圧の上昇やエアブロー現象が確認されるとともに、堤体に損傷を与えることが確認することができた。堤体の安定性に及ぼす降雨履歴と河川水位履歴の影響が大きいといえる。不透気遮水シート工ではシート直下の空気圧が上昇し、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、透気遮水シート敷設時には、堤体内の浸透挙動により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。

三相の降雨浸透から破壊、流動までの解析を可能にする計算手法をSPH法を用いて開発を試みた。今後開発を継続することでエアブローに関わる一連の挙動を連続して表現できる可能性を示すことができた。

謝辞：この研究に用いた装置の一部は補助金基盤研究(B) 研究課題番号：23360203、(B) 研究課題番号：21360222によるものであり、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 中日新聞社：中日新聞朝刊2000年9月15日朝刊，2000.
- 3) 坂井宏隆，前田健一：浸透破壊現象における気泡のダイナミクスの影響，地盤工学会誌，Vol.57，No.9，2009.9.
- 4) 梶尾孝之，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.
- 5) 梶尾孝之，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.
- 6) 前田健一，坂井守：Smoothed Particle Hydrodynamics法による粒状地盤の浸透破壊解析手法の開発，土木学会応用力学論文集，Vol.7，pp.775-786，2004.
- 7) 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.
- 8) 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.

(2012. 4. 5受付)