



## 2) 模型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間隙空気を封入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滑らかに進む様子がわかる。

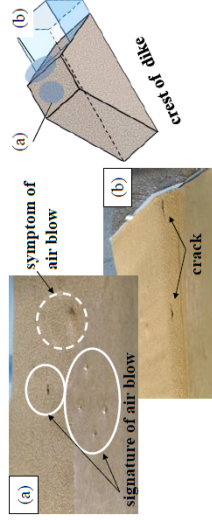


図-4 無対策堤防で確認された (a) エアブロー現象

(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が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の蓄積による突発的なエアブロー現象が危惧される。

### b) 比抵抗計測による堤体内部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、寒色が湿潤を表す。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、堤防表面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、堤防の基盤層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、滑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体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近く、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面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における水分量が增加するが、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、浸潤に対し応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、間隙空気の噴出による堤防の弱体化を防ぐ効果があることが期待できる。

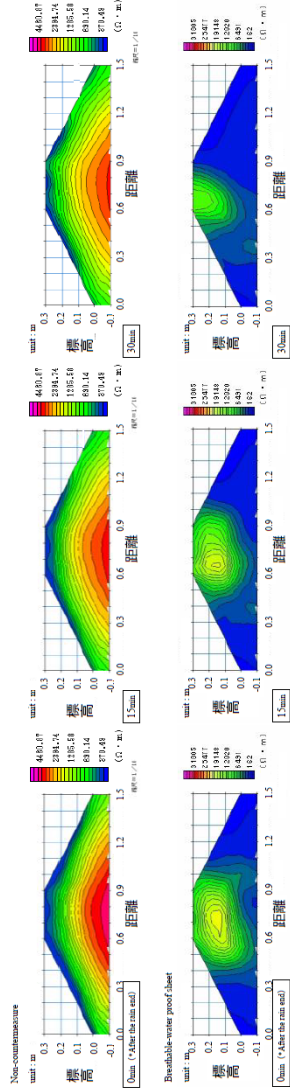


図-5 降雨及び水位上昇時における比抵抗モニタリングによる堤体内浸潤挙動の比較、上：無対策堤防、下：透気遮水シート設置

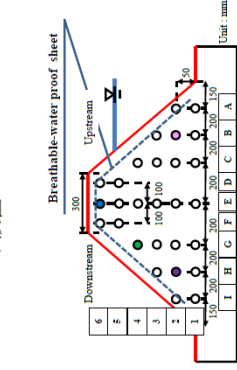


図-6 堤体内における水分量変化の比較、上：無対策堤防、下：透気遮水シート設置時



### 3. 継続する高水位による堤防不安定化検討実験

#### 1) 概要

2012年7月14日の未明から昼ごろにかけて九州北部において各地で記録的な雨量発生し、この豪雨の影響により、12年7月14日13:20矢部川右岸7k300地点で堤防が決壊した。破壊した堤防の直下には透水性が比較的大きい砂層が分布しており、また高水位が長時間作用していたことからパイピングを伴った進行性の浸透破壊が生じたことが報告されている。

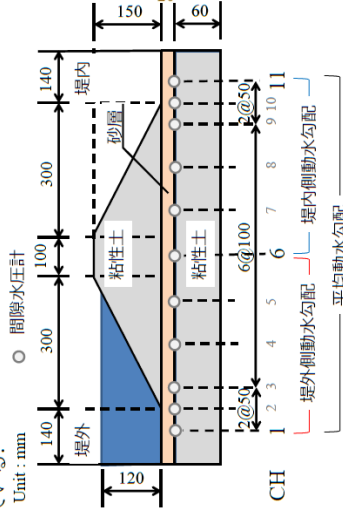


図7 矢部川模型堤防概略図、実堤防の1/50スケール相当かつ動水勾配が実堤防と同じ約0.2になるように形状を決定。

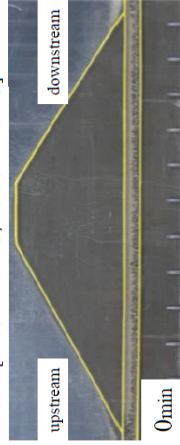
そこで、図-7のような、透明なアクリル面を有する土槽(幅1000mm、深さ500mm、奥行き250mm)を用い矢部川堤防を再現した模型実験を実施した。模型堤防の作製方法について、堤体下部の基礎層(層厚60mm)と堤体(高さ150mm)は藤ノ森粘土を含水比20%に調整して相対密度 $D_r=80\%$ になるように突固めを行った。堤体部と基礎層で挟まれた砂層について、比較的粒径がそろっている豊浦砂を堆積させる場合と、珪砂7号(大粒)と2号(小粒)を層状に堆積させる場合の2ケースについて比較を行った(砂層も相対密度 $D_r=80\%$ となるように突固めた)。堤外側の水位に関する水理条件としては次のように設定した。堤外側に一定水位速度(3.0mm/min)で給水し水位を上昇させる。水位が砂層上部から120mmに達したところで水位を保持した。堤防の断面および堤内側法先において動画撮影を実施し、また砂層部に間隙水圧計を計8箇所設置し、計測した。

砂層部〔豊浦砂〕



0min

砂層部〔上層：珪砂7号，下層：珪砂2号〕



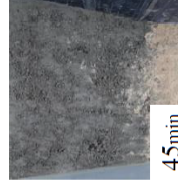
0min



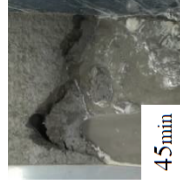
45min



45min



45min



45min

#### 2) 模型実験結果および考察

図-8に、実験時における堤防断面と堤内側法尻部における様子を示す。砂層部を豊浦砂で作成した堤防では、実験開始から45分後においても変状は見られず、その後2時間ほど観測を続けたが堤内側からきれいな漏水が出るだけの破壊には至らなかった。一方、砂層部を上層、下層異なる粒径の試料を用いた堤防では、実験開始から20分後には堤内側で濁った水が漏水し始め、45分を過ぎたあたりで堤防が破壊した。これは、上層の珪砂7号が行き止まり地盤のような役割を果たし、法尻部で水圧を増加させたためと考えられる。

図-9では、砂層部における動水勾配の経時変化を示している。砂層が豊浦砂の場合、先に堤外側の動水勾配が増加し、55分あたりから堤内側における動水勾配が増加する。一方、砂層が二層で構成された堤防の場合、実験開始直後から堤内側で動水勾配が増加する。また、実験開始20分頃から堤内側より濁水が絶えず漏出しており、砂層内で粒子の移動が生じていたことが推察される。砂層内の粒子の移動は目詰まりを発生させ、透水係数の減少をもたらす。堤内側における動水勾配の増加を引き起こしたものと考えられる。また、このように粒子が抜けることで透水係数が減少する挙動は一次元の実験において確認されている。

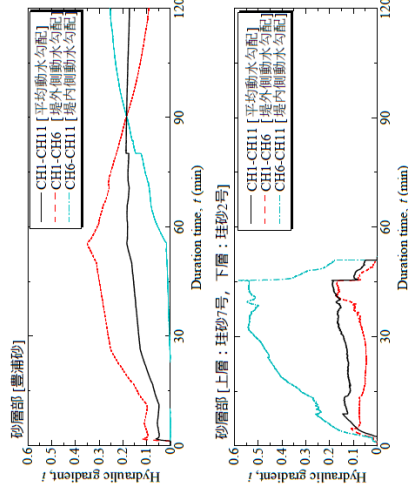


図9 砂層部における動水勾配の経時変化。  
〔動水勾配〕 = [2点間の水頭差] / [2点間の距離]

図8 堤防底部に砂層層を有する場合の浸透破壊実験：(a)上図、砂層部：豊浦砂；(b)下図、砂層部：上層珪砂7号・下層珪砂2号。右の写真は堤内側法尻部における実験から45分後の様子。

#### 4. 粒子法を用いた内部侵食を考慮した解析

矢部川破堤箇所で見られたような、底部や基盤面に透水性の高い砂質や砂礫を含む層を有するような河川堤防において、高水位が継続した場合、バイピングを伴った進行性の浸透破壊が生じることが報告されている。透水力による細かい粒子が流出する内部侵食が原因との指摘もある。洪水時に、堤防からの漏水が濁っていない箇所では局所的な変形は生じるものの破堤には至らない事例も多く報告されている。一方で、濁った漏水となった箇所では破堤に至る場合が多いようである。

内部侵食では、一般に、細粒子の流失による間隙の増加が流れの集中をもたらすことは従来から指摘されているが、粒度分布の変化に伴い、土の土粒子骨格も損傷を受け、土要素自体も力学的に不安定化することが考えられる。しかし、この不安定化がどのような効果をもたらすのかについては、明らかになっておらず、解析方法についても整備されていないのが現状である。

そこで、本研究では内部侵食による土の不安定化と、それに起因する堤防の不安定化について検討するとともに、解析手法の提案を試みた。この一連のメカニズム解明と現象予測や対策の検討においては、連続したメッシュを有する有限要素法や計算要素が小さな個別要素法のそれぞれのみを用いた方法では要求を分けなければならない。本研究ではミクロからマクロでの考察を行おうとするとともに、上記の要求に応えるために新しい計算フレームを開発し、ここでは、メッシュフリー法で粒子法の一つである、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を土-水-空気連成に應用した方法を用いることとした<sup>8)</sup>。粒子法では、FEMのような連続体としての計算要素を持ちながら(材料の構成則を用いることで広い範囲の挙動を近似しながら)、要素の運動をLagrange的に扱う方法である。

さらに、内部侵食時の細粒分の流出による粒度変化もまたらす粒状体の変形・破壊挙動にも着目した。これをDEMで単純にモデル化し数値実験するとともに、その結果に基づいて、内部侵食時の土の応力ひずみ関係を記述する構成則を開発している<sup>8)</sup>。これをSPH法解析に導入することで、内部侵食を伴う大変形・破壊シミュレーション方法を提案し、新たなメカニズムの発掘を試みる。この方法を図式化したものを図-10に示す。

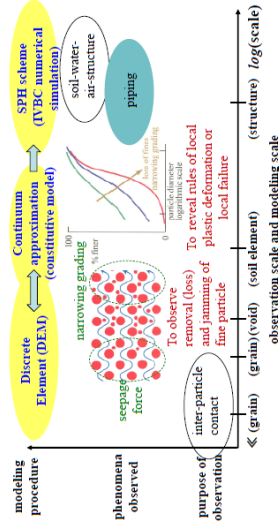


図-10 マルチスケールに着目した細粒分のダイナミクスを伴う地盤の進行性破壊の数値計算フレームの提案

図-11(a,b)は、それぞれ、図-8(a,b)の実寸相当のスケールの場合について解析を行った結果である(図の色は暖色ほど変形速度が大きい)。内部侵食無しの場合と有りの場合とについて比較している。内部侵食無しの場合では、裏法に法先が膨れるものの崩壊に至っていない。内部侵食有りの場合には、法先の局所的な変形が進み、ゆるみ領域も見られ、最終的には透水性の基盤が削られることで、決壊に至っており、進行性破壊が再現されている。

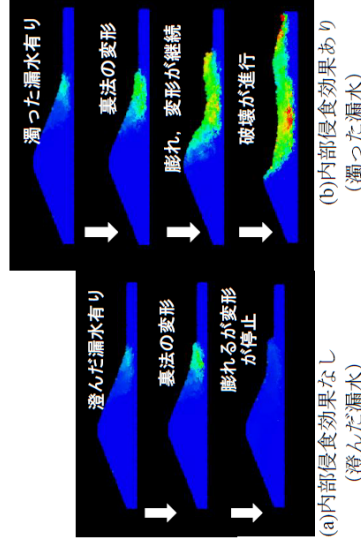


図-11 内部侵食を考慮した粒子法による浸透破壊の様子。

#### 5. 結論

本稿では、河川堤防に作用する降雨と水位の二つの外力についてそれぞれ検討を行った。集中豪雨に伴うエアブロー現象と、その対策としての透気遮水シート の敷設効果の検討を行った。また、高水位が継続して堤防に作用した場合の影響について、矢部川堤防の模型実験を行った。その結果、堤内側から濁水が流出する場合、堤内側の動水勾配を増加させ、更に破壊が進行する挙動を確認した。さらに、このような濁水が流出する現象について、粒子法を用いた解析で再現できた。

謝辞： この研究は、日本学術振興会科学研究費補助基金 盤研究(B) 23360203 の助成を受けており、ここに深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 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.
- 小林剛, 前田健一, 齊藤啓, 伊藤嘉, 阿部知之: 河川堤防材料の浸潤挙動に及ぼす降雨強度及び浸潤速度の影響とモニタリング手法の比較, 河川技術論文集, Vol.19, pp.69-74, 2013.
- 榊尾孝之, 三吉正英, 榑木俊文, 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.
- 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.
- 山田高弘, 前田健一, 近藤明彦: 粒状体の内部侵食の安定性に及ぼす粒度形状の影響と代表粒径を用いた評価の試み, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1967-1968, 2013.
- Maeda, K. et al.: Journal of Structural and earthquake engineering, JSCE, Division A, 23(2), pp.307-319, 2006.
- Maeda, K. and Sakai, H.: Geoenvironmental Engineering and Geotechnics (GSP 204), ASCE, pp.261-266, 2010.
- Wood, D. M., Maeda, K. and Nukudani, E.: Geotechnique, 60(6), pp.447-457, 2010.
- 前田健一, 今瀬達也, 伊藤嘉, 齊藤啓: 内部侵食による土の不安定化を考慮した河川堤防の浸透破壊解析法の提案, 河川技術論文集, Vol.19, pp.39-44, 2013.