

豪雨と高水位の継続作用に着目した河川堤防の安定性

Influence of sequential action of heavy rain and high-water level on the stability of a dike

齊藤啓¹, 前田健一², 杉井俊夫³, 小林剛⁴, 伊藤嘉⁵, 松田達也⁶, 若狭愛⁷

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・社会工学専攻・cju18531@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学・高度防災工学センター・都市社会工学科

3 中部大学・工学部・都市建設工学科

4 応用地質株式会社・計測システム事業部

5 国土交通省・中部地方整備局

6 豊橋技術科学大学・建築 都市システム学系・都市 地域マネジメント学分野

7 パシフィックコンサルタンツ株式会社

概 要

近年、集中豪雨の増加や長期化、地球温暖化に伴う台風の大型化により超過洪水が多発している。東海豪雨による新川破堤では、決壊前に堤防から気泡が噴出したという証言から、浸透現象には従来の土-水だけでなく土中の間隙に含まれる空気の封入・噴出を考慮する必要性が指摘されている。そこで、間隙空気のダイナミクスを明らかにするために、模型実験や実堤防実験から、降雨特性や土質の影響を明らかにした。また、高水位の長期化に伴い河川堤防の浸透破壊が懸念されている。実際に、2012年に発生した九州豪雨では、矢部川堤防が、長時間高水位が維持され決壊した。しかし、現行の設計では高水位の継続に伴う進行性破壊については考慮されていない。そこで、矢部川堤防の模型実験を実施し、堤体下の砂層を通る浸透水により内部侵食の発生とすべりの進行によって堤防の弱体化プロセスを明らかにした。

キーワード：河川堤防，間隙空気，豪雨，パイピング

1. はじめに

近年、都市部において局所的な集中豪雨と、それに伴う急激な河川水位の上昇による河川堤防の損傷に関する実被害や研究成果が報告されている^{1),2)}。不飽和な堤防では、時間雨量 10~30mm 程度の頻度の高い降雨と比較して、集中豪雨時において急激な浸潤化作用によって間隙空気が浸潤線に捉えられ、空気塊として圧縮され、浮力による天端への引張り作用や堤防の弱線に沿って地表に押し出される作用を受ける。この間隙空気が噴発するエアブロー現象が、2011年の福島・新潟豪雨、台風 15 号時にも確認されている(図 1)。特に、降雨量が多い豪雨時や、間隙空気を多く含む不飽和堤防において考慮しなければいけない問題と考える。しかし、一般的に不飽和堤防は洪水時に河川水の浸入を抑制することから浸透による破壊に対し強固であるが、急激な浸潤時においては間隙空気の影響



図 1 台風 15 号来襲時の庄内川右岸堤防 (2011.9)

は無視できないものと思われる。そこで、本稿ではエアブロー現象が堤防の安全性に与える影響について検討する。

一方、諸外国に比べ急峻な河川の多い日本においても近年の気候変動に伴い洪水の長期化が増加している。1976年に発生した長良川破堤の際には5日間で約1000mmの雨が降り長い時間高水位が維持されたことで浸透破壊が発生した。また、2012年に発生した九州豪雨による矢部川破堤でも同様に洪水の長期化が原因で基盤層に広がる砂層を通じパイピング現象が発生した³⁾。現在堤防強化対策として各WGが立ち上がっており、その中の浸透WGでは矢部川破堤を受けて浸透破壊の機構解明に取り組んでいる。特に、被災箇所とそうでない箇所を隔てる条件の整理は堤防の安全度を向上させる上で重要であり、本研究では模型実験を実施することでそれらに関する検討を行う。



図 2 九州豪雨による矢部川破堤 (2012.7)

2. 土質の違いによる堤体内浸潤挙動

2.1 模型堤防実験の概要

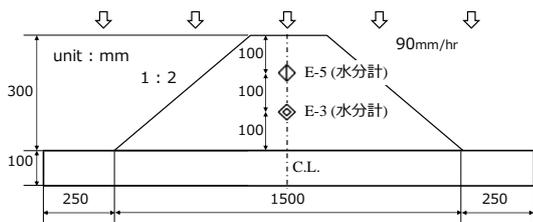


図 3 模型堤防実験概略図

表 1 堤防試料の物性値

試料	透水係数 m/s	50% 粒径 mm	均等係数	曲率係数
豊浦砂	3.22×10^{-4}	0.17	1.60	0.90
まさ土	2.29×10^{-5}	0.74	9.00	0.80

エアブロー現象解明のため次のような模型実験を行った。図 3 に模型堤防実験の概略図を示す。また、実験条件について表 1 に示す。本実験では堤防を構成する土質に着目し間隙空気の封入過程に関する検討を試みた。地表面近くに地下水位があると仮定し基盤層は飽和、堤体は乾燥で作成した。外力は集中豪雨を想定した降雨強度 90mm/hr (猛烈な雨) を作用させた。ビデオカメラにより堤防断面の浸潤挙動を記録し、堤体内に土壤水分計を設置することで内部における浸潤挙動の計測を試みた。

2.2 豊浦砂堤防における実験結果

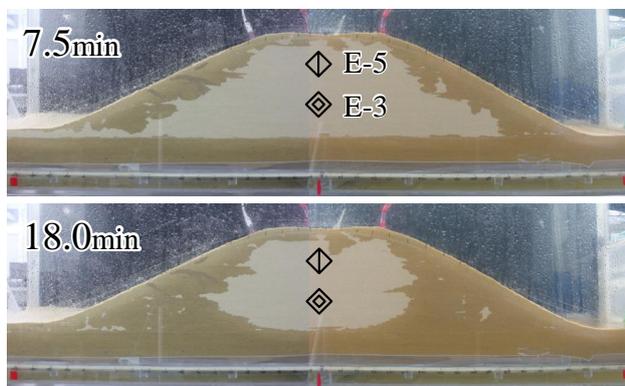


図 4 豊浦砂堤防断面の経時変化

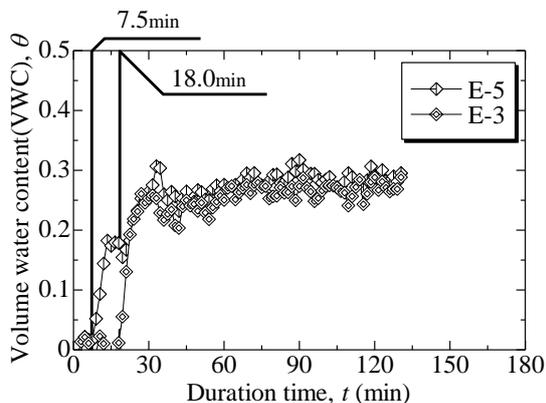


図 5 豊浦砂堤防内部における水分量経時変化

図 4 に豊浦砂堤防断面の経時変化について示す。豊浦砂堤防に集中豪雨相当の降雨強度 90mm/hr の外力を作用させると、堤体表層から浸潤域が発達する様子がわかる (図 4 上)。その後、表層に加え基盤層から浸潤線が発達し天端近い箇所 (E-5 の上) で乾燥域が消失した。このような浸潤線に囲まれた領域は間隙空気が囲い込まれていることが考えられる。

図 5 に豊浦砂堤防内の水分計より計測した水分量の経時変化を示す。各計測位置における水分計が反応を示す時間に着目し、堤防断面から観察される浸潤挙動と比較を行った。実験開始から 7.5 分後の様子を比較すると、水分計設置位置 E-5 において堤防断面では乾燥領域が残っているが水分計がすでに反応していることがわかる。さらに、18.0 分後の様子を比較しても、堤防断面と内部で異なる浸潤挙動を示した。これは地盤内部でフィンガリング現象のような選択的な浸潤が発生したことが考えられる。豊浦砂のような比較的透水性の大きい材料では浸潤の前線において圧力勾配が大きくなることが取手ら (2009) の検討により明らかとなっている⁴⁾。また泉ら (2013) の検討から大きな圧力勾配が浸透水による液層と気層の界面に不安定化⁵⁾をもたらすことが指摘されている。

2.3 まさ土堤防における実験結果

図 6 にまさ土堤防断面の経時変化について示す。断面の様子から浸潤域が表層から進行し、基盤層に近い箇所 (E-3 の下) で乾燥域が消失した。豊浦砂堤防と比較し浸潤は緩やかに進行し、表層からの浸潤のみ観察された。

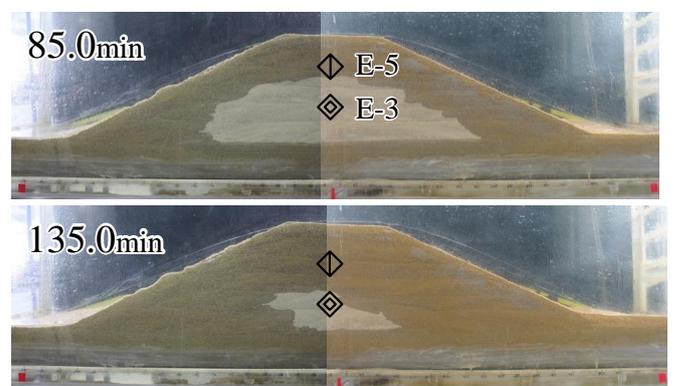


図 6 まさ土堤防断面の浸潤挙動

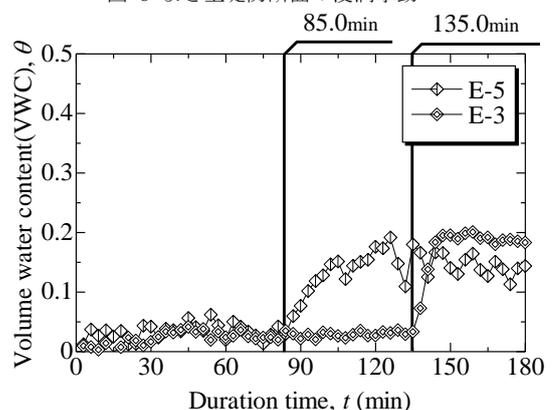


図 7 まさ土堤防内部における水分量の経時変化

図 7 にまさ土堤体内部の水分計より計測した水分量の経時変化を示す。各計測位置における水分計が反応を示す時間に着目し、堤防断面から観察される浸潤挙動と比較を行った。実験開始から 85.0 分後の様子を比較すると断面で見られる浸潤の前線が E-5 に到達した時点で計測器が反応を示している。さらに、135.0 分後においても断面で見られる浸潤前線と計測器 (E-3) の反応がおおよそ対応していることがわかる。豊浦砂と比較し透水性の小さい土質では浸潤前線における圧力勾配が小さいため、堤防内の空気塊が界面を保ったまま浸潤が進行することが考えられる。

間隙空気の封入過程について検討したが噴出過程について考えると噴出する箇所により次のことが危惧される。

- 1) 法尻からの噴出：限界動水勾配の低下，水道の形成。
- 2) 法面からの噴出：内部水位増加の促進，水道の形成。
- 3) 天端からの噴出：クラックの発生，雨水の侵入。

3. 実堤防散水実験

3.1 実堤防散水実験の概要

昨年度、中部地方整備局庄内川河川事務所のご協力のもと実堤防における散水実験を実施した。実験地は名古屋市にある矢田川右岸 2.2K (庄内川左岸 20.2K) 地点を採用した。

矢田川側および庄内川側法面のそれぞれ 240m² (縦 20m × 横 12m) にスプリンクラーを設置し、ポンプ車によって汲み上げた矢田川の河川水を用いて散水を行った。降雨強度は 80mm/hr に設定し、7 時間継続することで豪雨時における堤防内部の浸透挙動について検討した。また、以前同じ実験地で降雨強度 50mm/hr で行った実験結果との比較を行った。



図 8 散水の様子 左：矢田川側，右：庄内川側

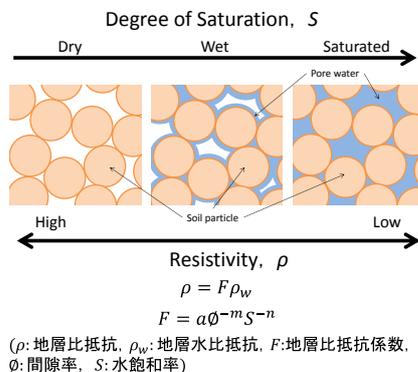


図 9 比抵抗モニタリングの原理：一般に間隙中に占める水の割合が増えるほど、比抵抗値は小さくなる。図中に示したアーチーの式(Archie, 1942)は、比抵抗値と飽和率の関係を示している。

堤防内部の浸潤状況については比抵抗モニタリングにより面的な計測を試みた。比抵抗モニタリングは、地盤内の比抵抗 (電気の流れにくさ・流れやすさ) を繰り返し計測するもので、一般に地盤内の間隙に占める間隙水の割合が大きくなるほど比抵抗値が小さくなる (図 9)。

3.2 実堤防散水実験の結果

図 10 に比抵抗モニタリングにより得られた堤防断面の比抵抗変化率の経時変化について示す。ここで、比抵抗変化率は、変化率(%)=[(測定データ) - (基準データ)] / 基準データ × 100 で算定し、基準データを散水前における堤防内比抵抗値とした。どちらの実験においても、矢田川側の法先において降雨浸透に伴い内部に間隙空気による乾燥領域が発達することがわかる。また、浸潤挙動に着目すると降雨強度 80mm/hr の方が浸潤が早く進み実験開始から 120 分で堤防全体が浸潤化している。降雨強度 80mm/hr の時のような急激な浸潤は空気の逃げ道を早々に塞ぎ空気塊として不安定なまま保持する危険性がある。また本稿で紹介する実験では水位について考慮していないが、このような豪雨による間隙空気の封入に加え水位上昇のタイミング及びその速さがエアブロー現象の地盤への影響を左右するものとする。

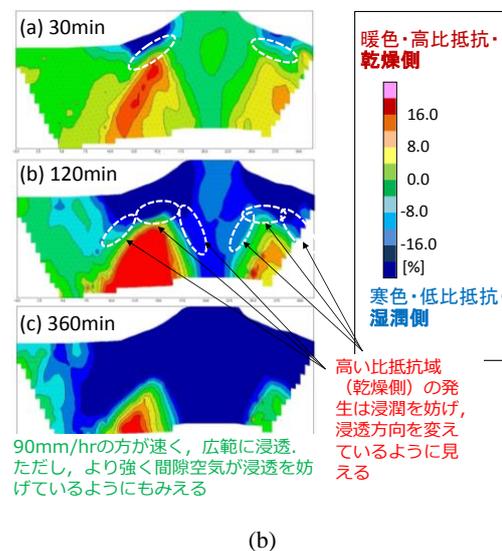
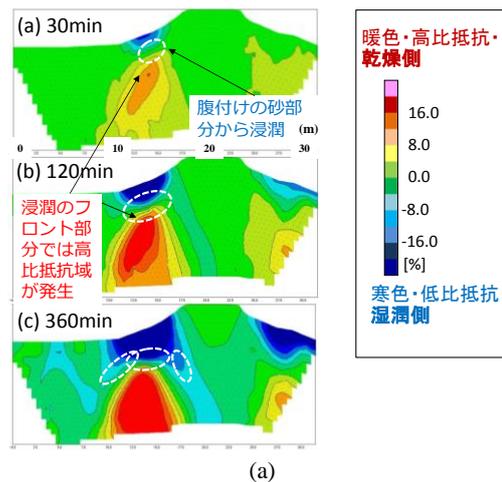


図 10 比抵抗モニタリングによる計測結果。(a)降雨強度 50mm/hr, (b)降雨強度 80mm/hr

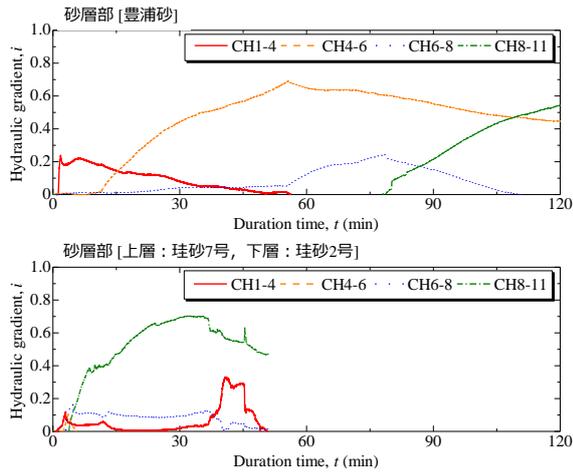


図 14 砂層部における動水勾配の経時変化。
[動水勾配] = [2 点間の水頭差] / [2 点間の距離]

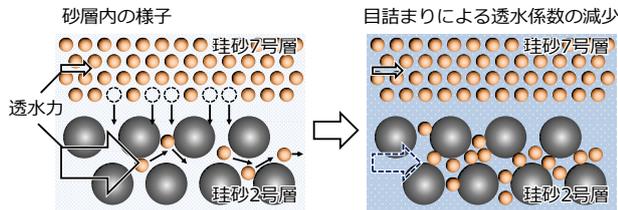


図 15 内部侵食と目詰まりによる透水係数の減少。

間隙水圧計が反応することで動水勾配が減少するためである。この結果から、堤外側から供給される水が豊浦砂層で詰まることなく浸透していることがわかる。一方砂層が粒度の異なる二層の場合、実験開始から堤内側に近い CH8-11 間における動水勾配が先行して増加する。堤外側から供給される水が、比較的透水係数の大きな珪砂 2 号の層を浸透する際、珪砂 7 号を浸食し堤内側で目詰まり引き起こし、その結果、砂層内の目詰まりから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 (図 15)。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⁹⁾。

5. 内部侵食を考慮した浸透破壊解析結果及び考察

本論文では、粒子レベルのミクروسケールからの内部侵食と土要素の損傷^{10),11)}、境界値問題としての土構造物の変状と破壊が連鎖することで、パイピングなどの進行性破壊をもたらす、という観点でこれらの一連のプロセスを数値計算で表現する試みを行った。上記のような現象を計算するには、連続したメッシュを有する有限要素法 (FEM) や計算要素が小さな DEM を用いた方法では、要求に応えることは難しい。そこで、マイクロとマクロのスケールでの現象に関する考察とモデル化、スケール間の連結¹²⁾などを考慮しながら、上記の要求に応えるための新しい計算フレームを提案した。概略図を図 16 に示す (紙面上の都合から詳細は既報¹³⁾⁻¹⁵⁾にゆずる)。

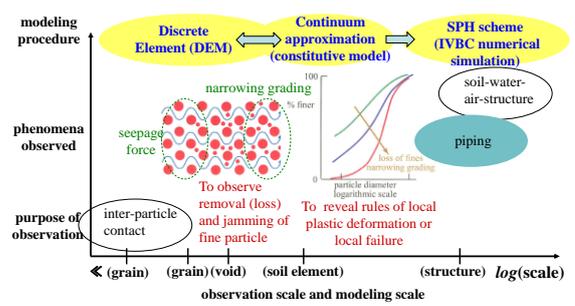


図 16 内部侵食を伴う堤体の進行性破壊を表現するために提案する数値計算フレーム

内部侵食時の細粒分の流出による粒度変化をもたらす粒状体の変形・破壊挙動は、DEM で単純にモデル化し数値実験した結果に基づいて、内部侵食時の土の応力ひずみ関係を記述する構成則^{10),11)}を開発している。これを粒子法の一つである SPH 法解析に導入¹³⁾⁻¹⁵⁾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を行った。

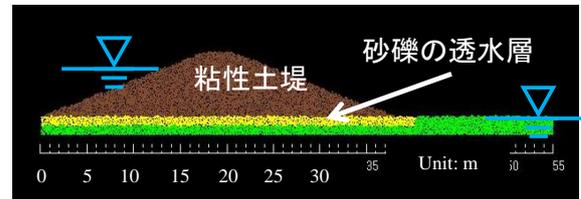


図 17 水位一定下における堤体の下層の浸透解析断面

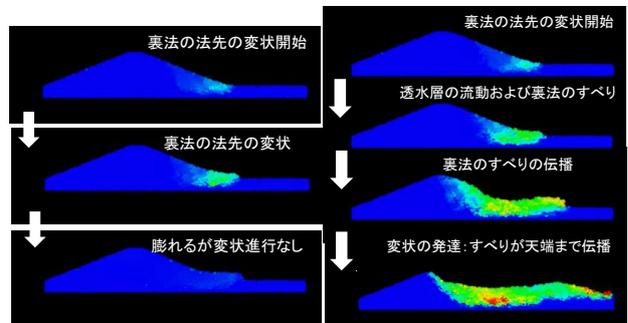


図 18 水位一定下における堤体の下層の浸透による堤体の変状・決壊解析例: (左) 内部侵食無し: 漏水がきれいなるままの場合: 決壊なし; (右) 内部侵食有り (漏水が濁る場合): 決壊後、越流・洗掘破壊に至る。

図 17, 18 は、図 11 の実験を模擬した解析を行った結果である。図 18 は、底部に透水層を有する粘性土の堤体が、高水位に保たれた条件下でどのように変状するかを解析した結果を示しており、それぞれ、内部侵食有りとなしの場合について比較している。上流水の流れは下部の透水性層に集中する。内部侵食無しの場合 (左図) では、堤内側の法先が膨れゆるむが崩壊には至っていない。内部侵食有りの場合 (右図) には、法先の局所的な変形が進み、ゆるみ領域も見られる。さらに、すべりが法先から天端に伝播し、最終的には透水性の基盤が削られ堤体全体が決壊に至っている。進行性破壊が再現されている。本結果における進行性破壊の解釈を図 19 にまとめる。

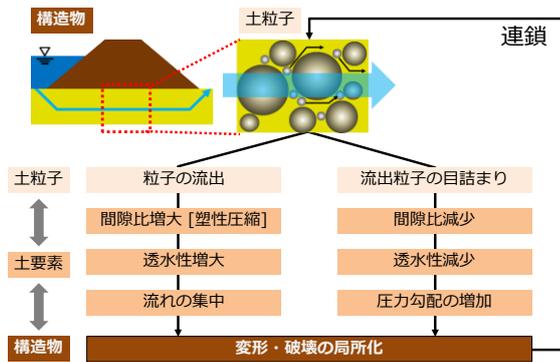


図 19 内部侵食を伴う土構造の要素の局所変形・破壊の伝播と各スケールレベルの相互作用による堤体の進行性破壊のイメージ

6. まとめ

本稿では、河川堤防において豪雨により捕捉される間隙空気塊の挙動把握と、高水位の維持に伴う内部侵食による浸透破壊について検討を行った。

- 1) 土質を変えて模型堤防を作製し集中豪雨に相当する雨を降らせたところ浸潤挙動に明確な違いがみられた。これは浸潤前線の気層境界における安定性が関わっており、透水性に依存することが考えられる。
- 2) 実堤防において集中豪雨相当の雨を降らせると堤防内部に間隙空気の封入が比抵抗モニタリングにより観察された。特に都市河川堤防は間隙空気を封入しやすい土質構成であることに加え、急激な水位上昇が懸念されるためエアブロー現象への対策が求められる。
- 3) 一昨年前に発生した矢部川破堤に関して、模型実験を実施することで破堤メカニズムの検討を行った。その結果、透水性の異なる二層構造の砂層において細粒子が流出し堤内川法面が少しずつすべりを生じる進行性の破壊現象が見られた。全国には今回破堤した矢部川と類似した断面の堤防が数多くあり、その中でも浸透破壊が発生するかもしれないかの判断ができるようになれば効率的な維持管理につながる。
- 4) 浸透による進行性破壊については、マクロな浸透作用（水位差）が一定条件であっても、ミクロレベルでの細粒分の移動・目詰まり、土要素レベルでの粒度変化に伴う土の変化、塑性変形の進行による土塊の不安定化、ゆるみ領域や内部侵食領域の透水性の変化、マクロな土構造物の変状とすべりといった、異なるスケール間での変化と不安定化が連鎖していると考えられる。

謝辞：本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) 23360203 の助成を受けたものである。また、本実験は、国土交通省河川技術開発制度地域課題研究によって、国土交通省庄内川河川事務所との共同で実施されたものである。末筆ながら深謝の意を示します。

- 1) 前田健一，柴田賢，馬場千児，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-pp112，2010.
- 2) 神谷浩二，山田周作，石田正利：河川堤防の浸水時の間隙空気圧発生を抑制するシート対策工に関する実験的考察，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 28 巻，pp17-pp22，2013.
- 3) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書，2013.
- 4) 取出伸夫，渡辺晋生，坂井勝：土中への水の浸潤 1.フラックス境界と圧力境界条件，土壤の物理性 113 号，pp.31-41，2009.
- 5) 泉典洋，前田健一：浸透層内における Rayleigh-Taylor 不安定，応用力学論文集，16，545-551，2013.
- 6) 長瀬迪夫：浸透破壊に関する考え方と破壊発生条件（その 2）—諸基準の統一的視野—：応用地質年報 No.15，pp.4，pp.11，1993.
- 7) 中島秀雄：図説 河川堤防，技報堂出版 pp.103.
- 8) 杉井俊夫，梅基哲矢，山田公夫，名倉晋：浸透破壊を対象とした進行性メカニズムの評価に関する研究，第 25 回中部地盤工学シンポジウム論文集，pp.69，2013.
- 9) 山田高弘，前田健一，近藤明彦：粒状体の内部浸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.
- 10) Wood, D. M. and Maeda, K.: *Acta Geotechnica*, 3 (1), pp.3-14, 2008.
- 11) Wood, D. M., Maeda, K. and Nukudani, E.: *Geotechnique*, 60(6), pp.447-457, 2010.
- 12) Maeda, K. et al. : *Granular Matter*, Vol.12, No.5, pp.499-505.
- 13) K. Maeda, H. Sakai and M.Sakai: Development of seepage failure analysis method of ground with Smoothed Particle Hydrodynamics, *Journal of Structural and Earthquake Engineering, JSCE, Division A*, Vol.23, No.2, pp.307-319, 2006.
- 14) Maeda, K. and Sakai, H.: *ASCE, Geoenvironmental Engineering and Geotechnics (GSP 204)*, pp.261-266, 2010.
- 15) 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.