

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属	役職	
	小高 猛司 (こだか たけし)	名城大学 理工学部	教授	
②研究テーマ	名称	パイピングに伴う堤防劣化を考慮した河川堤防評価技術の開発		
	政策領域	[分野] 河川技術分野	融合技術	(リモートセンシング、非破壊検査、認知行動学 等)
		[公募課題] 透水性基礎地盤に起因する河川堤防の変形に関する技術研究開発		
③研究経費 (単位: 万円)	平成27年度	平成28年度	平成29年度	総合計
※端数切り捨て.	1376	796	828	3000
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名	所属・役職 (※平成30年3月31日現在)			
李 圭太	(株)建設技術研究所・上席技師長			
野田 利弘	名古屋大学・教授			
大竹 雄	新潟大学・准教授			
本城 勇介	岐阜大学・名誉教授			
原 忠	高知大学・教授			
森口 周二	東北大学・准教授			
小山 倫史	関西大学・准教授			
溝口 敦子	名城大学・教授			
崔 瑛	横浜国立大学・准教授			
吉川 高広	名古屋大学・助教			
⑤研究の目的・目標	(申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>本研究の目的は、堤体の進行性破壊のメカニズムを検討し、パイピングも含めた河川堤防の危険度評価を合理的に実施できる手法を提案することである。さらに、パイピング破壊を想定した信頼性解析を構築し、線状構造物である河川堤防の対策優先度の評価法をあわせて提案する。なお、本研究では、パイピング現象を水みちに沿った局所的かつ進行的な土砂流失を伴う空洞形成現象とだけとは考えず、透水性基礎地盤中の間隙水圧の局所的な上昇による液状化やボイリングなどに伴う堤体崩壊を誘発する土砂移動も含むように広義にとらえている。</p> <p>以上の目的の下、具体的に以下の3つの研究テーマごとの達成目標を掲げる。</p>				
(1) 透水性基礎地盤に起因する堤防崩壊メカニズムの解明 (テーマ1).				
法尻付近でのパイピングをトリガーとする堤体の進行性破壊のメカニズムを模型実験で解明するとともに、浸透条件下の土粒子と間隙水の相互作用を DEM-CFD 連成解析でマイクロに解明する。				
(2) 透水性基礎地盤上の堤防の危険度評価法の開発 (テーマ2).				
堤体が進行的に破壊に至る詳細な予測解析法を GEOASIA で整備する。また、円弧すべり解析に代わり、実務で使用する堤体の危険度予測解析法を剛塑性 FEM で整備する。				
(3) 透水性基礎地盤堤防へ信頼性解析の適用 (テーマ3).				
パイピング破壊を想定した河川堤防の安全性評価における不確実性を定量的に評価し、簡便かつ有効なスクリーニング手法を開発し、対策優先度ならびに最適調査法の決定手法を提案する。				

⑥研究成果

(様式 A-11と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

本研究で推進している3つの研究テーマ毎に3カ年で得られた研究成果を示す。

テーマ1：透水性基礎地盤に起因する堤防崩壊メカニズムの解明

(a) 模型実験による堤防崩壊メカニズムの解明

矢部川、子吉川、梯川などの近年の堤防被災の共通点として、高い透水性の基礎地盤が存在し、かつその基礎地盤の上には透水性が大きく異なる堤体や基礎地盤（被覆土層を含む）が存在していた。本研究は、そのような高い透水性を有する基礎地盤を原因として、パイピングを含む法尻近傍での堤体変状が堤防全体の破壊に結びつく堤防崩壊のメカニズムの解明を目的としている。

3カ年の研究期間において、研究初年度は主に高透水性基礎地盤の行き止まりなど境界条件に着目し、透水性が大きく異なる2層構造の基礎地盤を有する半断面堤防の浸透模型実験を行った。2年目にはより一般性を考慮し、行き止まりのない透水性基礎上の全断面堤防模型による実験を実施し、各地盤材料の透水性や層厚等が堤体の変状に及ぼす影響について検討した。最終年度には、土質、境界条件、浸潤条件の違いによって堤防の進行性破壊がどのように進展し、破堤に至るほどの大変状をするのか解明するために、より詳細な模型実験を実施した。その結果、図-1に示すように、堤防の崩壊パターンは主に3つに類型化できることが明確になった。すなわち、1) 崩壊パターン1は、透水性が極端に異なる地盤構成が存在する場合には、法先に高い動水勾配が作用することによって噴砂が発生し、それが徐々に川表側に進行して行き、やがて堤体を連通するパイピングが発生し、破堤に至る。2) 崩壊パターン2は、崩壊パターン1ほどに極端な透水性の差がない場合に現れる。高透水性の基礎地盤の上に低い透水性の地盤が存在する場合、法尻付近に大きな上向き動水勾配が発生し、基礎地盤が液状化（有効応力が喪失した状態）し、その液状化領域は徐々に川表側に拡大していく。堤体の透水性が比較的高い場合には堤体の浸潤によりすべり破壊が発生し、堤体の透水性が比較的低い場合にはブロック状に破壊して、液状化した基礎地盤へ陥没する。3) 崩壊パターン3は、上部基礎地盤が厚い場合、あるいは大きな強度を有する場合には、下部の高透水性基礎地盤の影響が及ばず、上部の堤体の浸透のみによって堤体変状の度合いが決まるものである。本研究は、これら3パターンの中でも、H.W.L.以下でも堤体が大変状、最悪の場合には破堤に至る危険性が高いものとして、崩壊パターン2に着目してそのメカニズム解明ならびに破壊予測解析手法の開発を進めた。

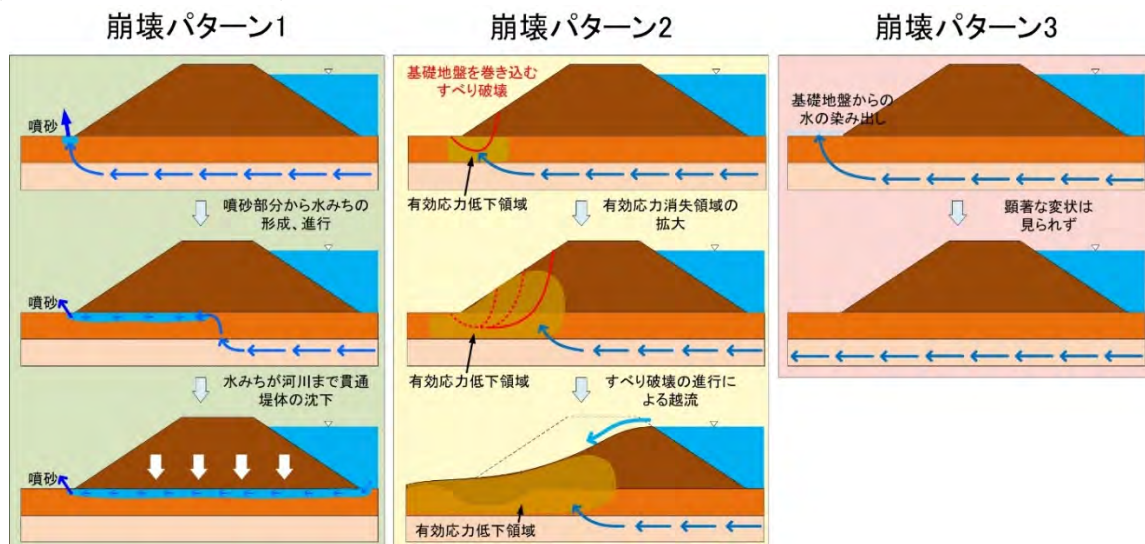


図-1 堤防の崩壊パターンの類型化

(b) DEM-CFD 解析による土粒子と間隙水の相互作用の解明

研究開始から2カ年の研究において、ダルシー流から非ダルシー流への遷移領域の表現が可能であることを確認しており、さらに、非ダルシー流領域におけるマクロな透水係数の低下のメカニズムを明らかにした。その過程では、粒子が等間隔で配置された条件に限定して詳細な分析を行ってきた。最終年度においては、周期境界を表現できる改良を加えた解析プログラムを用いて、ランダム配置についても分析した。その結果、粒子の配置がランダムでもレイノルズ数を基準と

⑥研究成果 (つづき)

して透水係数の低下をモデル化できることが確認された。また、ダルシー則を想定した場合の透水係数の低下について、レイノルズ数を基準として統一的に表現できる可能性が示された。この結果に基づき、透水係数の非線形性を考慮したモデルを構築することにより、これまでの有限要素法 (FEM) などの連続体解析をベースとする堤防の解析に対してフォードバックが可能となる。

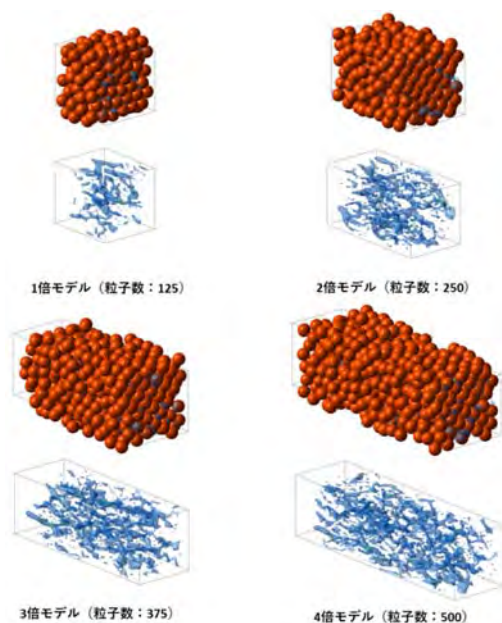


図-2 DEM-CFD解析による流速場の可視化

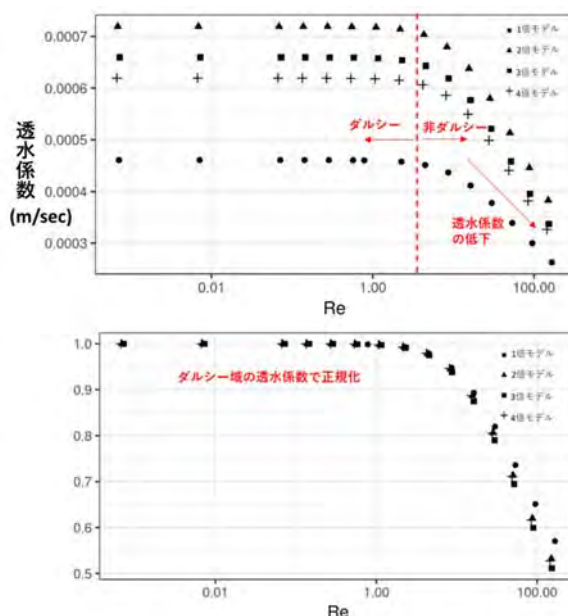


図-3 透水係数とレイノルズ数の関係

テーマ(2)：透水性基礎地盤上の堤防の危険度評価法の開発

(a) 空気～水～土骨格連成の有限変形弾塑性FEM解析コードGEOASIA

テーマ(1)の模型実験のシミュレーションを実施し、破壊する場合と破壊しない場合の違いを表現することに成功した。具体的にここでは、基礎地盤の高透水性層が三河珪砂3号、低透水性の被覆土層が三河珪砂8号、堤体が三河珪砂6,7,8号混合砂の場合の模型実験に対して、目立った変形が生じなかった被覆土層厚が5cmの場合と、最終的には滑りが堤体天端部分まで到達した被覆土層厚が3cmの場合をシミュレートした事例について述べる。なお、簡単のために、土質の違いは飽和透水係数と乾燥透気係数の違いとして表現した。図-4は、被覆土層厚5cmの場合のせん断ひずみ分布図を示す。浸透開始から100分経過後も、実験において目立った変形は見られず、計算においてもせん断ひずみがほとんど生じていない。図-5は、被覆土層厚3cmの場合のせん断ひずみ分布図を示す。計算では、実験のように滑りが天端まで到達する様子までを表現できていないが、高透水性層と被覆土層の層境から始まる大変形の様子を捉えている。図-6は、被覆土層厚5cmの場合と3cmの場合の平均骨格応力分布を比較した図である。被覆土層厚3cmの場合、大変形が生じた層境において平均骨格応力がゼロ近くまで低下している。大きなひずみが生じるこの領域内の土要素は、塑性体積膨張を伴う軟化挙動を示している。次に、土質や境界/外力条件を変更したケーススタディについて、紙幅の都合上、土質を変更したケースについてのみ一例を示す。目立った変形が生じなかった被覆土層5cmの場合において、堤体を三河珪砂6,7,8号混合砂から粘性土に変更 (飽和透水係数を $8.25 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ から $6.68 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ に変更) して被覆土層と堤体の透水性のコントラストを大きくしたケースでは、図-7のせん断ひずみ分布と平均骨格応力分布に示すように、被覆土層と堤体の境から大変形が始まり、平均骨格応力も大きく低下した。

また、サクシオン効果を考慮したSYS Cam-clay modelを搭載した解析コードを用いて、半断面の模型実験に対するシミュレーションも行った。図-8はサクシオン効果考慮の有無を比較したせん断ひずみ分布の計算結果である。サクシオン効果を考慮した構成式を用いた場合、浸透に伴い飽和度が上昇する過程で吸水コラプス (塑性体積圧縮) 挙動を示し、その塑性変形に伴って堤体が正規圧密化することで、法尻付近のボーリングをきっかけとした堤体の進行的な破壊挙動を表現できることがわかった。

⑥研究成果 (つづき)

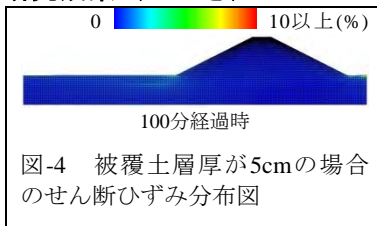


図-4 被覆土層厚が5cmの場合のせん断ひずみ分布図

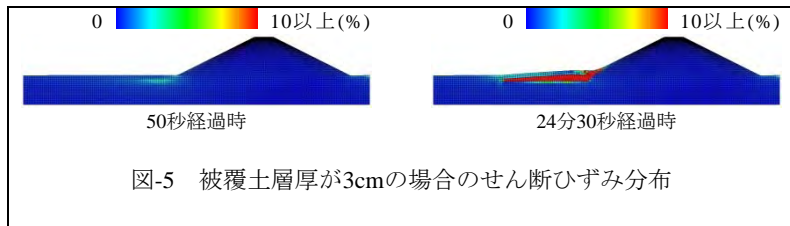


図-5 被覆土層厚が3cmの場合のせん断ひずみ分布

(※計算で用いた飽和透水係数の値…高透水性層: $4.06 \times 10^{-1} \text{cm/s}$, 被覆土層: $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, 堤体: $8.25 \times 10^{-3} \text{cm/s}$)

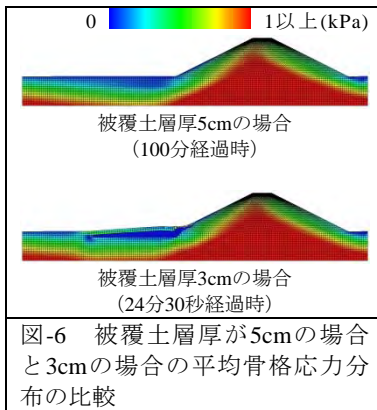


図-6 被覆土層厚が5cmの場合と3cmの場合の平均骨格応力分布の比較

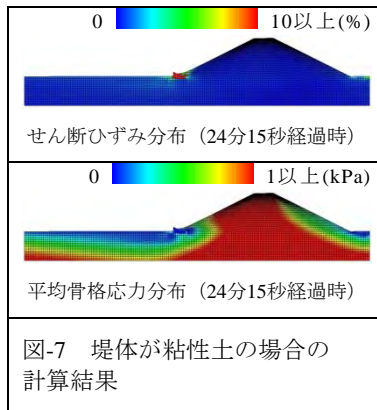


図-7 堤体が粘性土の場合の計算結果

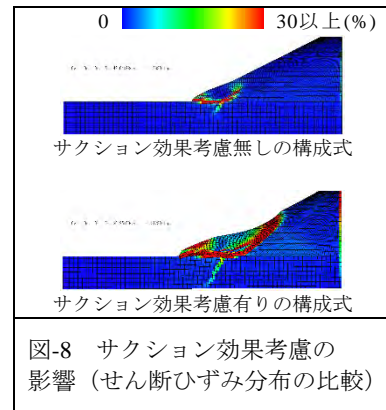
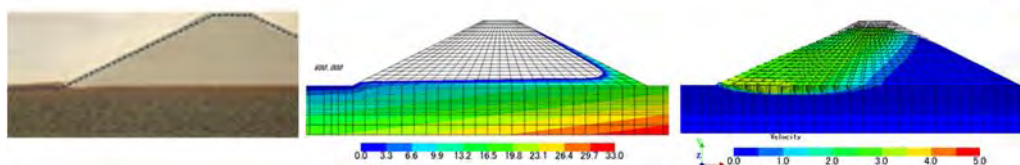


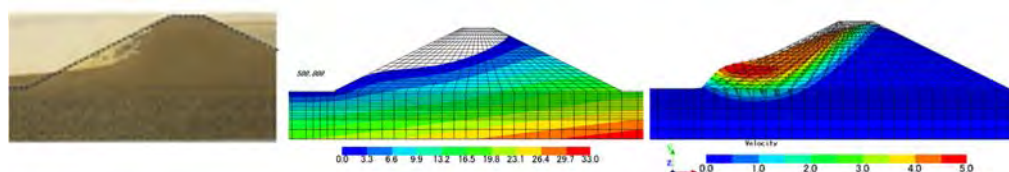
図-8 サクシヨン効果考慮の影響 (せん断ひずみ分布の比較)

(b) 不飽和浸透場連成剛塑性FEMの開発

現状の浸透時のすべり破壊に対する安定性の照査は、円弧すべり解析が用いられるが、それに代わる手法として、飽和-不飽和非定常浸透流解析と剛塑性有限要素法を連成した解析法を新たに開発した。非定常浸透流解析の結果を直接用いるために、本研究で扱うような複雑な地盤条件の堤防であっても適正な浸透流場を設定できることと、崩壊メカニズムを円弧に限定せずに流動破壊時の安全率を直接求めることができる。図-9は全断面模型実験の粘性土堤体を用いた実験ケースである。解析は10分経過時の結果である。難透水性の粘性土堤体を反映して、(b)に示すように堤体内にはほとんど水は浸潤していない。堤体底面全体に圧力水頭の勾配が集中している。(c)の速度場を見ると、法面全体の崩壊となっているが、この速度場を与える安全率は50以上の数値であり、現実的にはこの堤防が崩壊することはあり得ないことを示している。図-10は砂質土堤体を用いた実験ケースである。安全率が1を下回るおよそ10分経過時の状態を示す。(b)の圧力水頭の勾配からもわかるように、法尻付近に圧力の集中が見られる。また、安全率1を下回る時の破壊モードは、基礎地盤を巻き込むものとなっており、模型実験の変状をほぼ説明することができる。本研究で開発した解析は、飽和-不飽和浸透流解析と剛塑性FEMを連成させた解析であり、実務の詳細検討においては円弧すべり計算に替わるものである。従来法より優位な点として、複雑な間隙水圧場でも合理的な解を算出することが可能、非円弧の破壊モードでも問題なく解くことが可能、コードの高度化によって安全率1の崩壊メカニズム(速度場)を使って継続して解析することにより、進行性破壊の検討が可能、が挙げられる。



(a) 模型実験 (b) 圧力水頭分布 (c) 速度場
図-9 全断面浸透模型実験の剛塑性FEM結果 (粘性土堤体: 崩壊パターン1)



(a) 模型実験 (b) 圧力水頭分布 (c) 速度場
図-10 全断面浸透模型実験の剛塑性FEM結果 (砂質土堤体: 崩壊パターン2)

⑥研究成果（つづき）

テーマ3：透水性基礎地盤上の堤防への信頼性解析の検討

テーマ1で実施された33の模型実験における崩壊形態と国内外で用いられている照査指標との関係を統計解析により分析した。その結果、透水性基礎地盤の局所動水勾配照査、パイピング進展の判定照査（Sellmeijer式）、円弧すべり照査の並列システムとして信頼性解析を行うことで、透水性基礎地盤上の堤防の進行性破壊を合理的に評価できることを確認した。その上で、延長35kmの一級河川堤防左右岸に信頼性解析とリスク評価を実施し、提案手法の有効性を検証した。

図-11は、提案する信頼性解析の適用結果が示されている。提案手法は、堤防形状情報、地盤調査結果に基づいた信頼性解析を実施した上で、既往の中規模洪水による堤防周辺の変状による信頼性更新（ベイズ更新）を行う点に特徴がある。

図-12は図-11の結果を異なる図で表現したものであり、堤防破壊により生じる社会的損失（COST）と信頼性解析によって得られる破壊確率との散布図を示している。図中の線は等リスク線である。

図-11より、越水による破壊確率（量的）は、いずれの地点でも大きな変化はないのに対して、基礎地盤に起因しない浸透すべり破壊（すべりと呼称）や透水性基礎地盤に起因した破壊（パイピングと呼称）に伴う堤防の質的な破壊確率は、地点毎の変動が比較的大きい傾向がある。質的評価は、量的評価に比べて信頼度が一般的に高い傾向があるが、部分的に信頼性が逆転している箇所がある。また、図-12を見ると、形状に支配されている越水、すべりが支配要因となる地点のリスクは概ね一定値となっているのに対して、パイピングが支配している地点は、リスクが独立にばらついていることが分かる。加えて、微地形分類との関係を分析すると、パイピングが支配している地点は旧河道に位置していた。

最後に、計算されたリスクを指標として、対策優先度の設定例（対策によるリスクの低減効果）を複数試算し、提案する手法が河川堤防の管理者に対して、重要な情報を提供することを確認した。

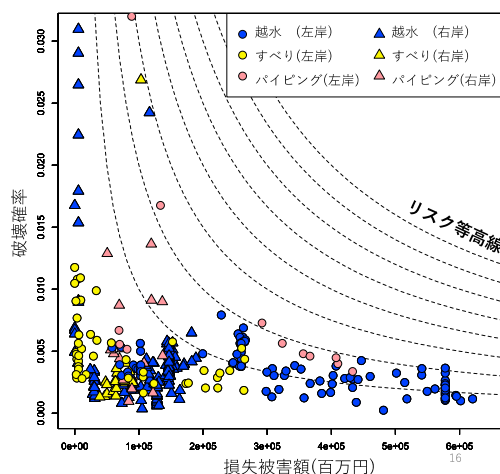


図-12 対象河川堤防のリスクカーブ
(破壊確率と社会的損失の関係)

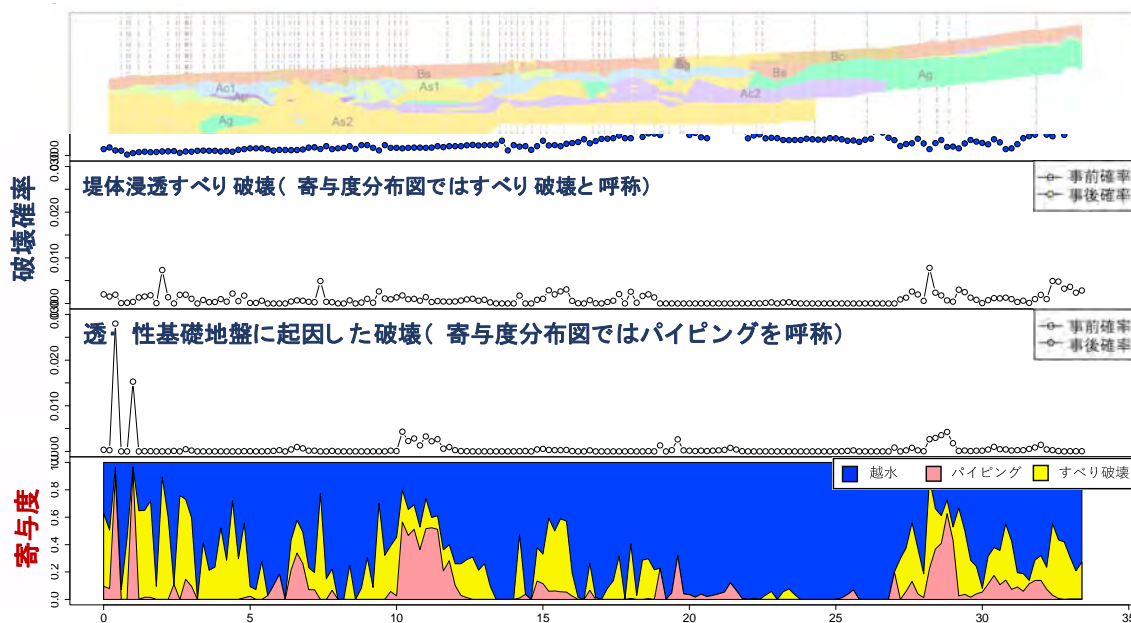


図-11 ある一級河川堤防35kmへの適用結果，越水，すべり，パイピングの信頼性解析（信頼性指標）とそれぞれに破壊モードの寄与度

⑦研究成果の発表状況

・これまでに発表した代表的な論文

1. Noda, T. and Yoshikawa, T.: Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 55(1), 45-62, 2015.
2. Yoshikawa, T., Noda, T. and Kodaka, T.: Effects of air coupling on triaxial shearing behavior of unsaturated silty specimens under constant confining pressure and various drained and exhausted conditions, *Soils and Foundations*, 55(6), 1372-1387, 2015.
3. 吉田郁政, 大竹雄, 本城勇介: 情報の価値 Value of Information に基づく最適な観測点位置および箇所数の評価方法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 土木学会論文集 A2 (応用力学), 71(1), 1-13, 2015.
4. 崔瑛, 小高猛司, 李圭太: 河川堤防樋門周辺地盤内のゆるみ領域や空洞の生成・発達に関する模型実験, 河川技術論文集, 21, 395-400, 2015.
5. 吉川高広, 野田利弘, 加藤健太, 小高猛司, 李圭太, 高稲敏浩: 空気～水～土骨格連成有限変形解析による大規模河川堤防の浸透・地震時挙動の評価, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 71(2), I_621-I_632, 2015.
6. 小高猛司, 李圭太: 河川堤防の安全性評価に向けた地盤工学の課題, 地盤工学会会誌, 総説, 63(9), 1-5, 2015.
7. Yoshikawa, T., Noda, T., Kodaka, T. and Takaine, T.: Analysis of the effect of groundwater level on the seismic behavior of an unsaturated embankment on clayey ground, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 217-230, 2016.
8. Tachibana I., Moriguchi S., Takase S., Terada K., Aoki T., Kamiya K., and Kodaka T.: Characterization of transition from Darcy to non-Darcy flow with 3D pore-level simulations, *Soils and Foundations*. 57(5), 707-719, 2017.
9. 小高猛司, 李圭太, 石原雅規, 久保裕一, 森 智彦, 中山雄人: 高透水性基礎地盤を有する河川堤防の崩壊メカニズムと評価手法に関する研究, 河川技術論文集, 第 24 集, pp.559-564, 2018.

・国際会議、学会等における発表状況

1. Yu Otake, Y. Honjo, Y. Hiramatsu, K. Lee and T. Kodaka.: Continuous River Levee Safety Assessment Based on a Reliability Analysis, Proc. of Geotechnical Safety and Risk V, T., Schweckendiek, A.F., van Tol, D. Pereboom, M.Th. van Staveren and P.M.C.B.M., Cools eds, pp.563-568, 2015.
2. Y. Honjo, H. Mori, M. Ishihara and Y. Otake. : On the Inspection of River Levee Safety in Japan by MLIT Proc. of Geotechnical Safety and Risk V, T., Schweckendiek, A.F., van Tol, D. Pereboom, M.Th. van Staveren and P.M.C.B.M., Cools eds, pp.855-860, 2015.
3. Kodaka, T. Cui, Y., Lee, K.-T., Kobayashi, Y. and Wu, Y.: Evaluation of strength coefficients of sandy levee soils under various triaxial test conditions, Proc. of 15ARC, JPN-088, 2015.
4. Noda, T., Yoshikawa, T. and Takaine, T.: Soil-water-air coupled seismic behavior accompanying internal water level variation of an unsaturated embankment with an enclosed saturation area on cohesive soil ground, Proc. of 15ARC, JPN- 077, 2015
5. Yoshikawa, T., Noda, T., Kato, K., Kodaka, T., Lee K.-T. and Takaine, T.: Evaluation of seismic behavior of a large river levee based on soil-water-air coupled finite deformation analysis, INTERNATIONAL MINI SYMPOSIUM CHUBU (IMS-CHUBU), No. 26, 2016.
6. Tachibana, I., Moriguchi, S., Takase, S. and Terada, K.: 3D Direct Numerical Simulation of Grain-Level Seepage Flow in Geomaterials, WCCM2016, MS918A-2, 2016.
7. Yoshikawa, T., Kodaka, T. and Cui, Y.: A consideration of the failure mechanism of river levees due to water seepage based on model tests and soil-water-air coupled finite deformation analysis, Proc. of 19th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017.
8. Kodaka, T., Lee, K.-T. and Ishihara, M.: Simplified sampling method for river embankment soils and strength property evaluations of the sampled soils, Proc. of 19th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017.
9. Tachibana I., Moriguchi S., Takase S., Terada K., Aoki T., Kamiya K., and Kodaka T.: Pore-Scale Direct Numerical Simulation on Seepage Flow through Granular Structure, COMPSAFE2017, China, 2017.
10. Tachibana I., Moriguchi S., Takase S., Terada K., Aoki T., Kamiya K., and Kodaka T.: Numerical investigation on the characteristics of flow in granular materials, PMES2017, Australia, 2017.
11. Honjo, Y. and Otake, Y. : Evaluation of statistical estimation error in an embankment stability problem, Proc. Geo-Risk2017.
12. 崔瑛, 小高猛司, 李圭太: 基礎地盤の透水性に起因する堤体の進行性破壊, 第 27 回中部地盤工学シンポジウム, pp. 104-107, 2015.
13. 吉川高広, 野田利弘, 加藤健太, 小高猛司, 李圭太, 高稲敏浩: 空気～水～土連成有限変形解析による大規模河川堤防の浸透・地震時挙動の評価, 第 18 回応用力学シンポジウム, ID:100124, 2015.
14. 小高猛司, 李圭太, 崔瑛, 尤源, 森三史郎, 林愛実: 透水性基礎地盤に起因する堤防の浸透破壊に関する考察, 第 3 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, 42-45, 2015.
15. 大竹雄, 本城勇介, 平松佑一, 李圭太, 小高猛司: 実河川堤防の浸透安定性に関する危険箇所抽出方法の提案, 第 3 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, 2015.
16. 加藤健太, 吉川高広, 野田利弘, 小高猛司, 高稲敏浩, 李圭太: 空気～水～土骨格連成有限変形解析に基づく河川堤防基礎地盤の透水性がパイピング破壊に及ぼす影響評価, 第 50 回地盤工学研究発表会, 1037-1038, 2015.
17. 吉川高広, 野田利弘, 小高猛司, 高稲敏浩: 地下水位が異なる粘性土地盤上の不飽和盛土の静的/動的空気～水～土骨格連成解析, 第 50 回地盤工学研究発表会, 1071-1072, 2015.
18. 吉川高広, 野田利弘, 小高猛司, 高稲敏浩: 粘性土地盤上の不飽和盛土で地震後に生じる水位上昇メカニズムに関する空気～水～土骨格連成有限変形解析, 第 20 回計算工学講演会, F-4-3, 2015.
19. 崔瑛, 小高猛司, 李圭太: 高透水性基礎地盤の基盤漏水に起因する堤体の進行性破壊に関する模型実験, 第 70 回土木学会年次学術講演会, 329-330, 2015.
20. 小高猛司, 李圭太, 石原雅規, 崔瑛, 田村 太郎, 高木 竜二, 尤 源: 砂質堤体土の簡便サンプリング法の提案と採取試料の強度特性の評価, 第 28 回中部地盤工学シンポジウム論文集, pp.71-74, 2016.
21. 崔瑛, 小高猛司, 李圭太, 森 三史郎, 林 愛実: 高透水性基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊メカニズムの検討, 第 28 回中部地盤工学シンポジウム論文集, pp.81-88, 2016.
22. 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 御手洗 翔太, 高木 竜二: 細粒分流出に伴う砂質堤体土の劣化に関する考察, 第 28 回中部地盤工学シンポジウム論文集, pp.101-106, 2016.
23. 野田利弘, 吉川高広, 小高猛司, 崔瑛: 空気～水～土骨格連成有限変形解析による透水模型実験の再現と浸透破壊メカニズム

- の考察, 第 51 回地盤工学研究発表会, 1013-1014, 2016.
24. 吉川高広, 野田利弘, 小高猛司, 崔瑛: 空気～水～土骨格連成有限変形解析を用いた浸透破壊メカニズムに関する考察, 第 21 回計算工学講演会, 2016.
 25. 吉川高広, 野田利弘, 小高猛司, 崔瑛: 空気～水～土骨格連成有限変形解析による透水模型実験の再現と浸透破壊メカニズムの考察, 第 28 回中部地盤工学シンポジウム, 89-96, 2016.
 26. 吉川高広, 野田利弘, 内藤誠也, 小高猛司, 崔瑛: 空気～水～土骨格連成有限変形シミュレーションによる模型堤防の浸透破壊メカニズムの考察, 第 4 回河川堤防技術シンポジウム, 2016.
 27. 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 石原雅規, 高木竜二, 田中貴之, 御手洗翔太: 「粘性土」堤体土の浸透時の力学特性の評価, 第 4 回河川堤防技術シンポジウム, 2016.
 28. 石原雅規, 東拓生, 秋場俊一, 地蔵智樹, 小高猛司, 崔瑛, 李圭太: 梯川旧堤で実施した現地堤防地盤調査, 第 4 回河川堤防技術シンポジウム, 2016.
 29. 橋一光, 森口周二, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 神谷浩二, 小高猛司: 埋め込み境界法を用いた地盤材料の透水シミュレーション, 第 19 回応用力学シンポジウム, 100092, 2016.
 30. 橋一光, 森口周二, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 神谷浩二, 小高猛司: 埋め込み境界法を用いた地盤材料の土粒子スケール透水シミュレーション, 第 21 回計算工学講演会, C-1-1, 2016.
 31. 橋一光, 森口周二, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 神谷浩二: 埋め込み境界法を用いた地盤材料の土粒子スケール透水シミュレーション, 第 71 回土木学会年次学術講演会, II-365, 2016.
 32. 大竹雄, 佐藤周作, 本城勇介: 不完全情報を用いた河川堤防の安全管理に向けた基礎研究その 1, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.1055-1056, 2016.
 33. 佐藤周作, 大竹雄, 本城勇介: 不完全情報を用いた河川堤防の安全管理に向けた基礎研究その 2, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.1057-1058, 2016.
 34. 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 久保裕一, 御手洗翔太, 高木竜二: 粒度変化と密度変化が砂質土の力学挙動に及ぼす影響, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.
 35. 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 林愛実, 森三史郎, 森智彦: 基礎地盤の複層構造が河川堤防の浸透破壊に及ぼす影響, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.
 36. 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 森三史郎, 林愛実, 森智彦: 複層構造基礎地盤を有する河川堤防の非定常浸透流解析, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.
 37. 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 森智彦, 森三史郎, 林愛実: 河川縦断方向に均質な模型堤体に浸透破壊を引き起こす基礎地盤の条件, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.
 38. 小高猛司, 李圭太: 河川堤防の浸透すべり破壊への剛塑性有限要素法の適用, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.
 39. 小高猛司, 李圭太: 不飽和浸透連成剛塑性有限要素法による河川堤防の安定解析, 計算工学講演会論文集, Vol.22, F-03-5, 2017.
 40. 吉川高広, 野田利弘, 内藤誠也, 小高猛司, 崔瑛: 模型堤防の浸透破壊メカニズム解明のための空気～水～土骨格連成有限変形シミュレーション, 第 71 回土木学会年次学術講演会, 201-202, 2017.
 41. 橋一光, 森口周二, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 小高猛司: 粒子流体連成解析による地盤材料の透水係数の非線形特性分析, 第 22 回計算工学講演会, 2016.
 42. 小高猛司, 李圭太, 石原雅規, 久保裕一, 田中貴之, 梅村逸遊: 吸水軟化試験による河川堤防土の低拘束圧下のせん断強度の評価, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.45-48, 2017.
 43. 小高猛司, 李圭太, 崔瑛, 森智彦, 森三史郎, 林愛実: 浸透に伴う基礎地盤の弱화에起因する堤防すべり崩壊に関する考察, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.55-58, 2017.
 44. 李圭太, 小高猛司, 石原雅規, 久保裕一, 御手洗翔太: 河川堤防盛土の原位置透水特性に関する考察, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.59-62, 2017.
 45. 福岡捷二, 小高猛司, 田端幸輔: 現地堤防と模型堤防の浸透破壊を規定する力学的相似条件—堤防脆弱性指標, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.79-82, 2017.)
 46. 小出央人, 大竹雄: Coupled Markov Chain モデルを用いた河川堤防パイピング危険個所の見落としリスク評価, 土木学会 第 20 回応用力学シンポジウム講演概要集, 2017.
 47. 小出央人, 大竹雄: Coupled Markov Chain モデルを用いた河川堤防パイピング危険個所の見落としリスク評価への試み, 第 35 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp.148-151, 2017.
 48. 小出央人, 大竹雄: Coupled Markov Chain モデルを用いた地層構成の確率的内挿-地盤調査の多寡を考慮した河川堤防リスクマネジメントモデルへ向けて-, 第 72 回土木学会年次学術講演会, 2017.

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)
該当なし

⑨表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

1. 大竹雄, 本城勇介, 他5名: 平成26年度地盤工学会賞・論文賞(和文部門)(論文名: 震災履歴を有する河川堤防20kmにおける地盤調査地点を考慮した液状化危険度解析とその有効性検証), 平成27年6月受賞
2. 崔瑛: 第50回地盤工学研究発表会 優秀論文発表者賞(発表論文名: 剛構造樋門周辺堤防の劣化に関する三次元模型実験), 平成27年12月受賞
3. 崔瑛: 土木学会平成27年度全国大会第69回年次学術講演会優秀講演者(発表論文名: 高透水性基礎地盤の基盤漏水に起因する堤体の進行性破壊に関する模型実験), 平成27年12月受賞
4. 吉川高広: 平成27年度地盤工学会研究奨励賞(受賞業績名: Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model), 平成28年6月受賞
5. 吉川高広: 第28回中部地盤工学シンポジウム優秀講演者賞(発表論文名: 空気～水～土骨格連成有限変形解析による透水模型実験の再現と浸透破壊メカニズムの考察), 平成28年8月受賞
6. 大竹雄, 本城勇介, 七澤利明, 河野哲也: 道路政策の質の向上に資する技術研究開発 優秀技術研究開発賞「道路橋示方書の改定を踏まえた性能設計概念に基づく設計照査手法についての研究開発」, 平成28年11月受賞

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

テーマ1においては、様々な土質、境界条件等で実施した模型実験ならびに飽和-不飽和浸透流解析によって、高透水性基礎地盤を有する河川堤防の崩壊メカニズムを解明した。さらに、基礎地盤ならびに堤体の透水性の比や堤体のせん断強度の違いによって、堤体がH.W.L.以下でも大変状を引き起こす条件を明確するとともに、その崩壊パターンを類型化した。本研究で明らかにした河川堤防における危険な地盤構成とは、地中の透水性砂層の行き止まりや三次元的な狭窄部の存在のように、事前に見つけることなどおよそ不可能な極めて特殊な境界条件を指しているのではなく、ごくありふれた地盤条件下における危険性を指摘していることが重要である。本研究の知見により、学術的な裏付けを持って、危険な地盤構成を明確にしたことにより、今後の河川堤防管理において重要かつ有用な情報を与えている。また、DEMとCFDの連成解析によって、土粒子と間隙水との相互作用をミクロに解析することによって、大粒径中を流れる間隙水の非ダルシー流れのメカニズムを明らかにした。この一連の研究によって、マクロな連続体の連成解析を行う際に有用となる透水係数の非線形性のモデル化に成功している。この成果を用いることによって、連続体解析を用いた堤防変状予測の今後の高精度化が期待できる。

テーマ2においては、サクシジョンの効果を考慮したSYS Cam-clay modelを搭載した空気~水~土骨格連成弾塑性FEM解析GEOASIAを用いて、小型透水模型実験と実物大透水模型実験のそれぞれに対して数値シミュレーションを実施し、透水性基礎地盤に起因して法先から崩壊が伝播していく進行的な堤防崩壊現象について精度良く解析できることを示した。また、対策工の適用性についても検討した。今後さらにその解析精度を高め、洪水外力や内部構造の不均質性も含めて重要堤防の危険度評価に用いる技術とすることが期待される。また併せて、円弧すべり解析に代わる通常の照査・設計実務への適用を目指して、不飽和浸透連成の剛塑性FEMを開発した。複雑な基礎地盤や堤体の浸透時のすべり破壊に対する危険度を高精度に評価するツールが提供できた。

テーマ3においては、透水性基礎地盤上の堤防の信頼性解析の基本的な考え方を示した上で、観測情報による信頼性更新(逆解析, データ同化)方法を定式化した。そして、実河川堤防への適用に基づいて、その有効性を検証してきた。提案手法は、河川管理者が有する情報(地盤調査, 変状履歴, 地質調査の経験等)に応じて、危険箇所を絞りこむために有効な方法であることを示すことができた。さらには、その危険箇所の優先順位、対策の方法(追加地盤調査, 対策工の実施)を設定する上で、有効な情報を与えることを確認した。今後は、適用事例を増やし、現状の河川堤防の信頼性レベルを明らかにするとともに、実務的な課題を見出し、より簡便で、実用性の高いモデルへ拡張できる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

テーマ1で類型化した透水性基礎地盤に起因する堤防崩壊のパターンは、実河川における広義のパイピングに脆弱な堤防の同定にそのまま役立てることができる。具体的には、破堤へつながる危険性が高い、基礎地盤の地層構造ならびに堤体材料、およびそれらの境界条件などを明確にすることにつながり、堤防危険箇所や対策優先箇所の同定に有用な情報となる。

テーマ2で整備するGEOASIAを用いた詳細解析手法においては、パイピングやボイリングなどの局所的な破壊に起因する法先から進展する堤体破壊を評価する新たな解析技術となる。一方、新たに開発した不飽和浸透連成の剛塑性FEMは、円弧すべり解析を基本とする現状を打破し、複雑な水理条件、地盤条件においても、簡便に安定解析ができるようになり、現状の照査法に代わりうる評価手法を提案することができる。

テーマ3では、高透水性基礎地盤に起因する堤防破壊を想定した河川堤防の信頼性解析を構築することによって、簡便かつ有効なスクリーニング手法の整備や対策優先度、最適調査法が提案でき、成果をそのまま河川行政に反映できる。