

# 河川砂防技術研究開発 【成果概要】

<b>①研究代表者</b>	<b>氏名</b> (ふりがな)	<b>所属</b>	<b>役職</b>	
	(まえだ けんいち) 前田健一	名古屋工業大学 大学院 社会工学専攻・高度防災工 学センター	教授	
<b>②研究 テーマ</b>	名称	雨量履歴・水位履歴を考慮した河川堤防の安定性のリアルタイム予測方法の 開発と安全性向上に関する研究		
	政策 領域	地域課題分野 (河川)	融合 技術	
<b>③研究経費</b> (単位:万円)	平成24年度	平成25年度	平成26年度	総合計
	190	184	122	496
<b>④研究者氏名</b>				
氏名	所属・役職			
杉井俊夫	中部大学・教授			
小高猛司	名城大学・教授			
神谷浩二	岐阜大学・准教授			
斎藤秀樹	応用地質株式会社・エンジニアリング本部・副技師長			
小林剛	応用地質株式会社・計測システム事業部・グループリーダー			
<b>⑤研究の目的・目標</b>				
<p>本研究では、①構造体としての堤体内部の土の特性（飽和・不飽和透水係数，強度，剛性）とその分布や築堤履歴による内部構造，②作用外力としての降雨履歴（雨量強度，時刻変化）と水位履歴，③堤体内部の水分量および封入される間隙空気と上昇圧力，について物理探査や継続的なモニタリングを実施し，模型実験や数値解析も援用しながら，今まで未解明であった①～③の相互関係を明らかにする。大学研究者，堤防管理者，技術者が連携し，以下の計画による本研究成果，実務的技術，現場管理経験がリンクすることは，河川の効率的な維持管理，流域の水害被害軽減，効果的な避難計画に貢献できると考える。</p> <p><b>【平成24年度】</b> 継続モニタリング，模型実験，数値解析によって，堤体内水分量と降雨履歴の関係のモデル化，浅層～深層に適用可能な現場飽和・不飽和透水試験方法の提案，土の変形・破壊特性の把握と間隙空気を考慮した堤防の安定性評価法の検討</p> <p><b>【平成25年度】</b> 降雨履歴，河川水位履歴の両方の影響を考慮した堤体内水分量の予測方法の提案，モニタリング箇所を増設と物理探査実施，安定性評価法の提案</p> <p><b>【平成26年度】</b> 雨量履歴・水位履歴による水分量予測，現場透水試験法の確立，高度な堤防の浸透・破壊解析法の提案，現行法を利用した河川堤防の安定性のリアルタイム予測方法の提案と検証。</p>				

## ⑥研究成果

### (1) 研究成果の概要

「集中豪雨とそれに伴う急激な河川水位上昇時（堤体への急速な浸潤作用時）」と「継続時間が長い高水作用時」のシナリオ（図-1）に対する堤防の応答を考慮したリアルタイム堤防安定性評価の考え方を提案した。これによって、降雨と水位の両方から堤防の安定性を予測するとともに、各地区の危険性の高い箇所を絞り込むことに貢献できると考えられる。さらに、外力特性と地盤特性を一体に考える力学的考察に基づき、比較的入手しやすいデータである粒度分布から算定可能な指標を用いて、危険箇所を絞り込む方法を提案している。これらの成果は、管理を厳重にする箇所、重点的に強化する箇所の抽出を支援し、効率的な維持管理、流域の安全性向上の施策、効果的な避難計画のために貢献できるものとする。

本研究は、以下の通り、5項目に分けられる。

- ① 実堤体内水分量のモニタリングと予測モデル構築
- ② 現場飽和・不飽和透水試験方法の提案
- ③ 堤体内の浸潤・間隙空気挙動<sup>2),3)</sup>を考慮した堤防の安定性評価法の開発
- ④ ドレーン工を有する堤防におけるモニタリングとドレーンの効果確認
- ⑤ 想定された降雨履歴、想定水位履歴に対する堤防の重点強化箇所の抽出

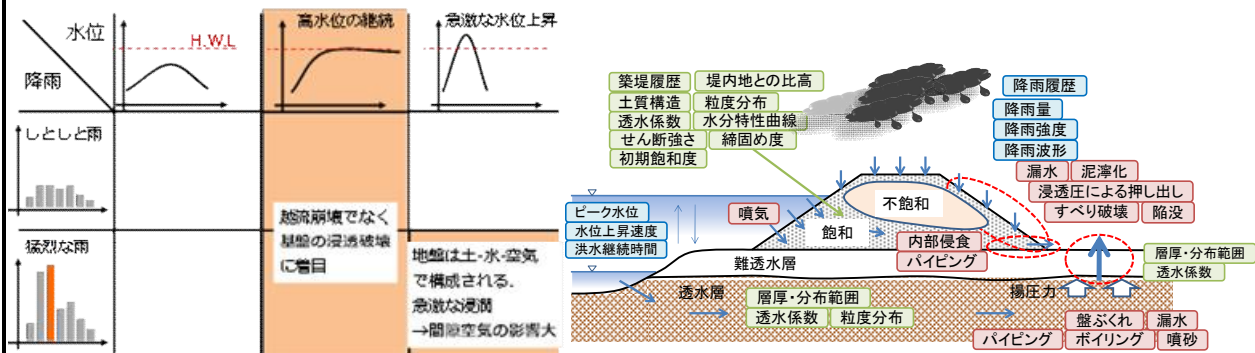


図-1 着目する降雨・外水位の外力シナリオ: (左)シナリオ表, (右)外力-地盤特性-堤防の応答の列挙

### (2) 実堤体内水分量のモニタリングと予測モデル構築

たとえ、総雨量が同じであっても時間雨量、雨滴径が異なると浸透モードが大きく異なることが分かった（図-2）。ゆっくり浸潤する場合には、底部より飽和化が進み浸潤線は上方に進む、一方で、猛烈な雨や急激な水位上昇などの急速な浸潤過程においては、浸潤線が間隙空気を閉じ込め、それが噴出することで堤体を内部から損傷させ、弱体化させることが分かった（図-3）。

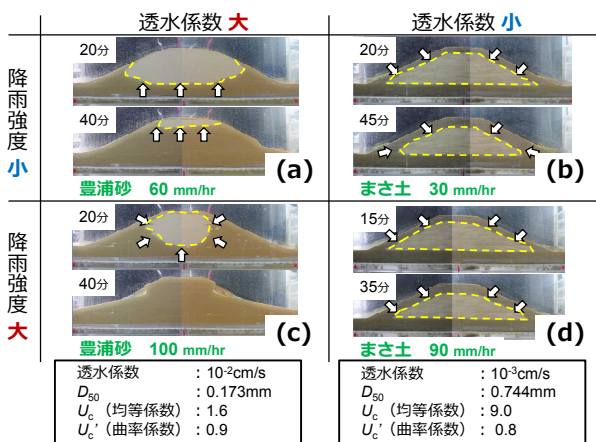


図-2 降雨強度と土質による浸透モードの違い

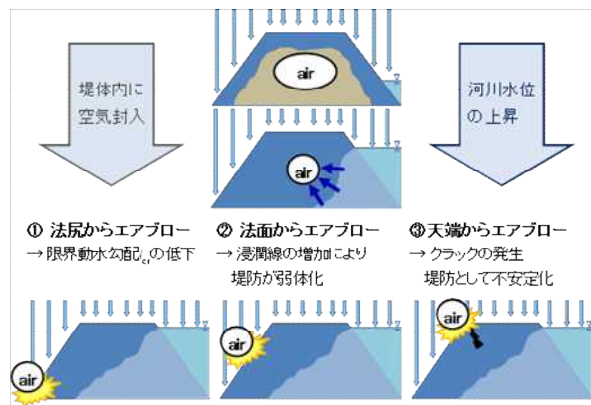


図-3 豪雨など急速な浸潤に伴う噴気（エアブロー）による堤体の損傷シナリオ

## ⑥ 研究成果 (つづき)

また、このような浸潤モードの発生は、粒度と降雨強度で予測できることも明らかにした。さらに、実堤防で自然降雨、河川水位変動および散水試験(図-4)でのモニタリング結果(2モニタリング箇所)でも模型実験と同様な傾向があり、降雨による表面土強度が1/2~1/3まで低下することを示した(図-5)。浸潤初期から飽和直前までの水分状態の測定において有効性が高い比抵抗モニタリングの結果を示している。堤体や法面の安全性の管理において、総雨量だけでなく降雨強度の影響を考慮することで、浸透モードや破壊モードの違いを把握でき、より効果的な維持管理に貢献できると考えられる。

降雨履歴と降雨強度といったリモートで取得可能なデータのみから実効雨量を算定し、ロジスティックモデルを用いた統計数理によって堤体内の水分予測モデルを構築した(図-6)。想定降雨に対する堤体の安全性の事前予測だけでなく、出水時にほぼリアルタイム予測ができようになった。



図-4 実堤防散水試験の様子

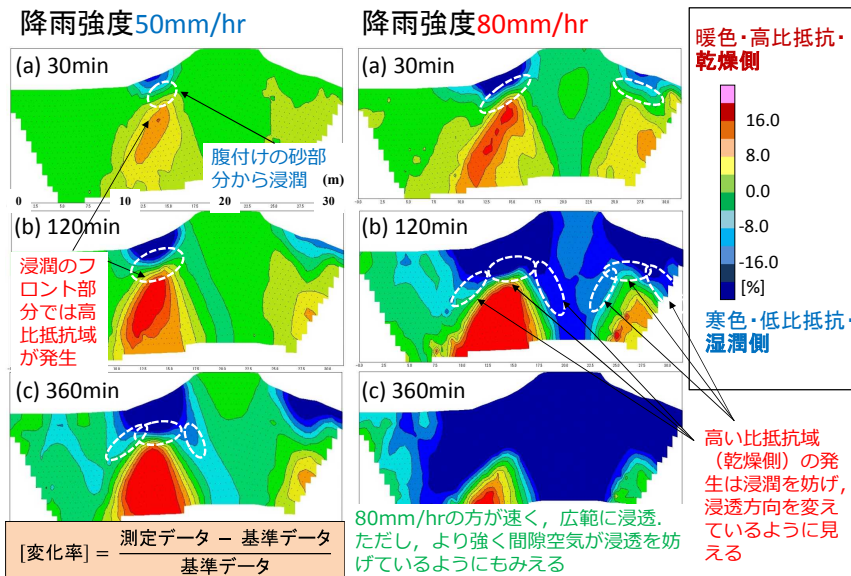


図-5 実堤防散水試験時の比抵抗モニタリング結果 (横断2測線、縦断2測線の内の横断面)

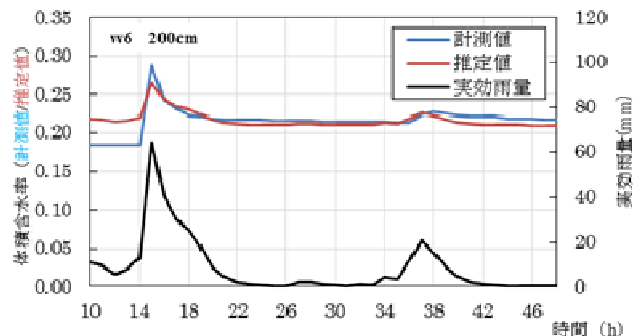


図-6 実効雨量を用いた実堤防内の有効飽和度の推定: (モニタリングの1箇所について)



## ⑥ 研究成果 (つづき)

### (3) 現場飽和・不飽和透水試験方法の提案

堤体の浅い箇所や深い箇所に関わらず、簡単に現地で実施可能な方法を提案した。比較的簡単な現場試験方法であるので、今後、現場での適用事例を増やすことで、広範な堤体の浸透特性を把握して安全照査や重点地点の抽出を進めることに貢献できる。

### (4) 堤体内の浸潤挙動・間隙空気挙動を考慮した堤防の安定性評価法の開発

「集中豪雨と急激な河川水位上昇による堤体への急速な浸潤作用時」(前述(2))と「継続時間が長い高水作用時」の二つのシナリオに対して堤防の応答を検討した。後者は、パイピング<sup>4),5)</sup>が、透水性基盤が単層の場合には発生しにくい、上層が砂、下層が砂礫層の場合には発生しやすいことが明らかになった(図-7)。

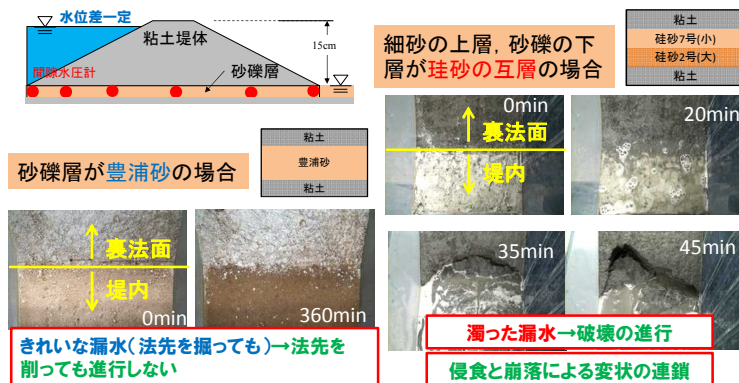


図-7 基盤の層構成の違いによる被災程度の違い：(a) 単層基盤 (非被災)，(b) 互層基盤 (パイピング)

この結果に基づいて、現行の堤防の安定性評価方法を修正・高度化し、リアルタイムに堤防の安定性を評価する考え方を提案し(図-8)、検証を行った(図-9)。図-9は、堤防が決壊した実事例の解析結果である。決壊前には、亀裂の発生後、白い泡状の噴出が目撃され、その後、亀裂が進展したとの証言されている。エアブローによる堤体の内部損傷のシナリオ③(図-3；法肩にクラック)として評価している。図中の○の時点でエアブローが発生したとし、損傷③を与えている。計算された安全率が1となる時間は、実際に決壊した時刻(×)よりも早い時刻を示しているものの、実堤防で、実外力(雨量・水位波形)に対しても、提案手法はある程度妥当な結果を示すことが分かった。

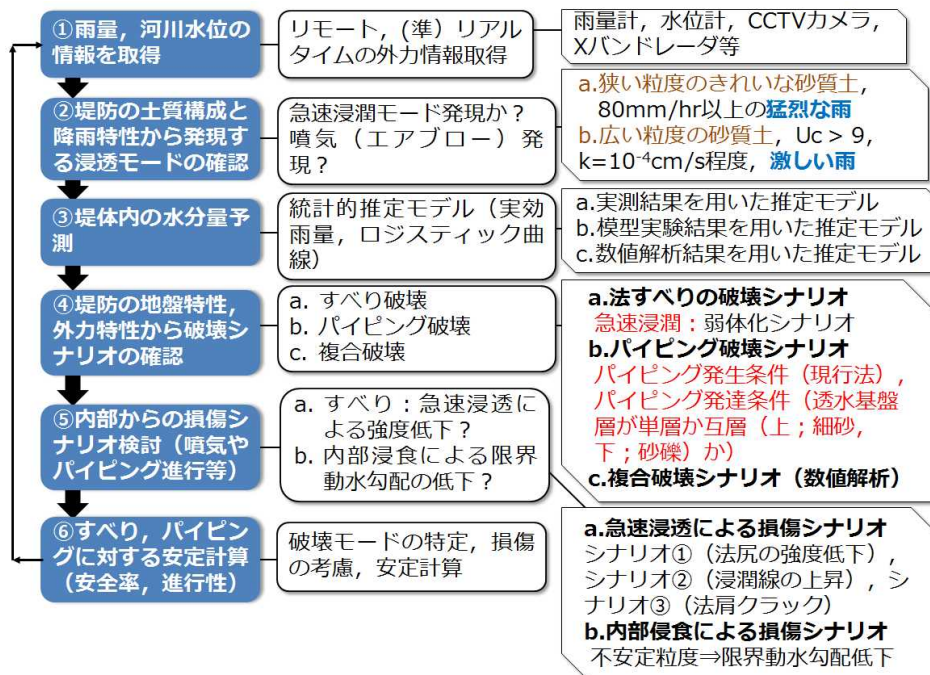


図-8 河川堤防の安定性のリアルタイム予測方法のフレーム

⑥ 研究成果 (つづき)

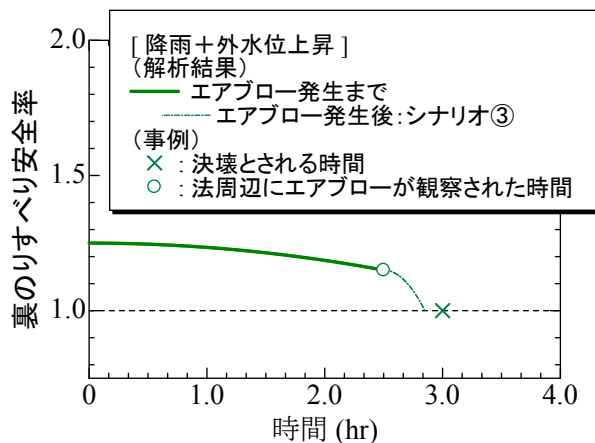


図-9 実被災事例のリアルタイムすべり安定性評価結果:実堤防に対して実外力の記録を作用させ計算した安全率の時刻歴。実際に目撃された亀裂発生 (○の時刻), 泡状噴気, 亀裂の進展 (想定損傷シナリオ③) を考慮

二つのシナリオによる, 堤体内部からの噴気 (エアブロー) やパイピングの発展による堤防の弱体化についての条件は, 観測可能な外力とデータが入手しやすい粒度や層構成を主体とした指標で整理した. これによって従来は考えていなかった, 豪雨や急な増水, 継続時間の長い高水にも対応したりリアルタイムな堤防安定性照査による維持管理の高度化と効率化の糸口がつかめたと考えている.

(5) 対策堤防のモニタリングとドレーン工効果確認

ドレーン工は, 外水位だけでなく, 降雨外力に対しても堤体内部の水位を低下させ降雨水を速やかに排水する効果があることが分かった. ドレーン工設置箇所では天端付近に空気塊による浸潤しにくい地帯が見られたことから, ドレーン工が降雨水の浸透経路に影響を及ぼすことがわかった.

(6) 想定された降雨履歴, 想定水位履歴に対する堤防の重点強化箇所の抽出

土の弱体化の原因となる透水による内部侵食 (細かい粒子の流出) に着目し, その安定性を情報入手し易い粒度指標で表した. 国土技術政策総合研究所で公開された堤防土質実験のデータから粒度分布を整理して, 流域の粒度を分析した結果, 内部侵食されやすい不安定粒度の存在箇所と治水地形分類とは関連があり, 自然堤防や河原では不安定粒度が分布する割合が高いことが分かった (図-10). 従来から, 被災し易いされて来た地形には, 力学的原因があることが示された. 不安定粒度が存在する箇所では, すぐに浸透破壊の危険性があるとは言えないが, 出水の際の透水によって粒度分布の再配分が生じ, 外水位が高い場合には濁り水などを伴い, 計画よりも小さな動水勾配で被災する危険性があることに留意が必要と考えられる. 堤防管理上の点検において重要なポイントと思われる.

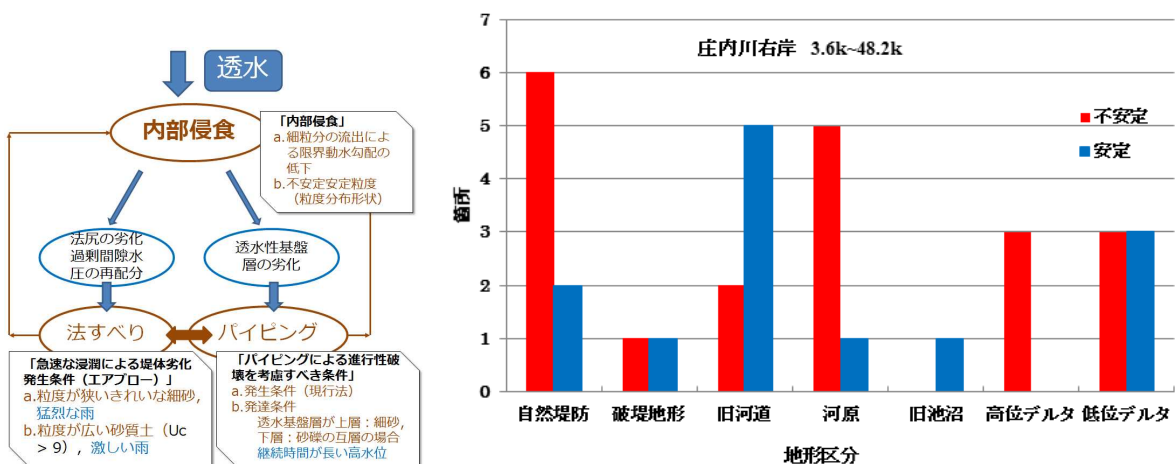


図-10 治水地形分類の各地形における安定粒度 (青)・不安定粒度 (赤) の箇所数の比較: 庄内川右岸

## ⑦研究成果の発表状況

### 【論文】

- 1) 前田健一・柴田賢・馬場干児・小林剛・梶尾孝之・尾畑功: 模擬堤防土槽実験によるエアブローの確認と数値解析, 河川技術論文集, Vol.18, pp.305-310, 2012.6.
- 2) 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, 2012.6.
- 3) 杉井俊夫, 前田健一, 斎藤秀樹, 小林 剛, 尾畑功: EPS 盛土を使った堤体横断面の表面波探査, 河川技術論文集, Vol.18, pp.315-320, 2012.6.
- 4) 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, 2013.6.
- 5) 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, 2013.6.
- 6) 前田健一, 杉井俊夫, 梶尾孝之, 小林剛, 臼田文昭, 黒田英伸, 柴田賢, 齊藤啓: 実河川堤防における豪雨対策としての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 28 巻, pp.31-pp.36, 2013.
- 7) 松田 達也, 前田 健一, 三宅 達夫, 宮本 順司, 角田 紘子, 鶴ヶ崎 和博: 土粒子-土要素レベルに着目したジェット流に伴う地盤洗掘の実験的考察, 土木学会, 論文集B2(海岸工学), Vol. 70 (2014) No. 2 p. I\_1041-I\_1045.
- 8) Zhang W. and Maeda, K.: Numerical simulations of slope and levee failure under heavy rainfall using the three-phase SPH model, 土木学会論文集A2, (応用力学), Vol.70, No.2, I\_483-I\_494, 2014.
- 9) 前田健一, 近藤明彦: 粒度分布形状に起因する内部侵食メカニズムに着目した細粒分のダイナミクスに及ぼす間隙構造の影響, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol.70, No.2, I\_507-I\_517, 2014.
- 10) Zhang, W. and Maeda, K.: The model test and SPH simulations for slope and levee failure under heavy rainfall considering the coupling of soil, water and air, Soil Behavior and Geomechanics, ASCE, GSP No. 236, pp. 538-547, 2014.
- 11) Maeda, K. and Kondo, A.: Micro and macro modeling of ground depression due to internal erosion, ASCE, Soil Behavior and Geomechanics, GSP236, pp.445-455.
- 12) 齊藤啓, 前田健一, 梶尾孝之, 松田達也: 豪雨と急激な水位上昇が作用する堤防の透気遮水シートおよびドレーンによる補強効果, ジオシンセティックス論文集第 29 巻, pp.115-120, 2014.

### 【著書】

なし

### 【国際会議, 学会等における発表状況】

- 1) Maeda, K. and Matsuda, T.: Geoenvironmental Computing for Ductility against Multiple-Consecutive External Actions, Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, , 99.386-389, 2014.4.13-16.
- 2) Maeda, K., Kondo, A. and Muir Wood, D. : Micro and macro modeling of internal erosion, International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro, IS-Cambridge 2014, 2014.9.1-4.
- 3) Zhang, W. and Maeda, K. : SPH simulations for slope and levee failure under heavy rainfall considering the effect of air phase, 14th IACMAG (International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics), pp.1465-1470, 2014.

- 4) Imase, T., Maeda, K. and Ito, Y. : Scour of the sandy soil with dynamic interactions among soil-water-gas due to tsunami, 14th IACMAG (International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics), pp.1517-1522, 2014.
- 5) Maeda, K. and Kondo, A. : Instability modelling caused by internal erosion with changing grading, 14th IACMAG (International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics), pp.1505-1510, 2014.
- 6) Sugii, T., Yamada, K. , Yokawa, H. and Asano : Destabilization of the ground due to the efflux of the soil particles, Proc. of Asian Regional Conference on Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, 印刷中, 2015
- 7) Sugii,T., Yamada, K., Asano, N. and Yamada, Y. : Measurement Method for Hydraulic Properties of Unsaturated Ground using the Dynamic Soil Moisture Distribution Model, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,pp.1195-1198, 2013.
- 8) Kodaka, T., Cui, Y., Lee, K.-T., Mori, S. and Kanematsu, Y.: Soil structure in gravel-mixed sand specimen and its influence on mechanical behavior, Proc. of the 18ICSMGE, pp.1691-1694, 2013.
- 9) 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, to appear, 2015.

#### 【国内学会発表】

- 1) 大谷彩圭・杉井俊夫・余川弘至・山田公夫・日向萌：原位置試験を考慮した不飽和透水特性の評価法の開発，第50回地盤工学研究発表会、印刷中、2015.
- 2) 杉井俊夫・余川弘至・山田公夫・浅野憲雄・高田拓哉・小嶋拓也：堤体基礎の浸透破壊現象への限界流速の適用，第50回地盤工学研究発表会、印刷中、2015.
- 3) 杉井俊夫・山田公夫・浅野憲雄・堀伸彰・稲吉隆太：土中の内部浸食による浸透破壊の発生，第49回地盤工学研究発表会，pp.905-906，2014.
- 4) 杉井俊夫・稲垣隆：実効雨量による堤防水分量の予測，第49回地盤工学研究発表会，pp.983-984，2014.（地盤工学会研究発表者賞受賞（大学院生1年 稲垣隆））
- 5) 杉井俊夫・山田公夫・浅野憲雄・余川弘至：土木学会第69回年次学術講演会概要集、pp.323-324，2014.
- 6) 杉井俊夫・佐古俊介：講座：河川堤防，4. 浸透破壊に対する評価・対策，地盤工学会誌、Vol.61、No.11/12、pp.63-70，2013.
- 7) 杉井俊夫：河川堤防の浸透破壊と液状化，第49回水工学に関する夏期研究会講義集、13-A-6，2013
- 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，中部地盤工学シンポジウム論文集，2013.
- 9) 小林芳樹・間宮健太・森 涼香・兼松祐志・小高猛司・崔 瑛・李 圭太・坪田邦治・加藤雅也：非排水および排水せん断時のゆる詰め砂礫地盤の力学挙動に関する考察，平成24年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.203-204，2013.3.
- 10) 兼松祐志・森 涼香・小林芳樹・間宮健太・小高猛司・崔 瑛・李 圭太：河川堤防土の力学特性の評価する上での排水条件の検討，平成24年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.225-226，2013.3.
- 11) 小高猛司・崔 瑛・兼松祐志・森 涼香・小林芳樹・李 圭太：各種三軸試験条件で得られる河川堤防土の強度定数の評価，第48回地盤工学研究発表会講演集，CD-ROM，2013.7.
- 12) 小高猛司・崔 瑛・兼松祐志・小林芳樹・李 圭太：河川堤防土の強度定数決定のための試験条件についての一考察，第25回中部地盤工学シンポジウム論文集，pp.55-60，2013.8.

- 13) 小高猛司・崔 瑛・小林芳樹・兼松祐志・森 涼香・李 圭太・坪田邦治・加藤雅也：液状化が懸念される堤防基礎礫質土の大型三軸試験，第48回地盤工学研究発表会講演集，CD-ROM，2013.7.
- 14) 小高猛司・李 圭太・崔 瑛・兼松祐志・小林芳樹：砂質堤体土の強度定数評価のための三軸試験条件の考察，第1回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム講演概要集，pp.67-70，2013.11.
- 15) 小高猛司，崔 瑛，小林芳樹，兼松祐志，李 圭太：河川堤防の安定性照査に用いるべき強度定数を求めるための三軸試験条件，第 49 回地盤工学研究発表会講演集，CD-ROM，2014.7
- 16) 崔 瑛，小高猛司，小林芳樹，武 楊，李 圭太：河川堤防砂質土の適正な強度定数評価手法，第26回中部地盤工学シンポジウム論文集，pp.1-6，2014.8.
- 17) 小林芳樹，武 楊，小高猛司，崔 瑛，李 圭太：堤防開削時に現地採取した乱れの少ない河川堤防砂の三軸試験，土木学会第69回年次学術講演会，CD-ROM，2014.9.
- 18) 小高猛司，崔 瑛，李 圭太，小林芳樹，武 楊：すべり安定性照査に用いる堤体土の強度定数設定法，第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，2014.12.
- 19) 田村太郎・小林芳樹・武 楊・小高猛司・崔 瑛・李 圭太：含水比が礫質土堤防の力学特性に及ぼす影響，平成26年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，2015.3.
- 20) 武 楊・小林芳樹・田村太郎・小高猛司・崔 瑛・李 圭太：河川堤防砂の不攪乱ならびに再構成供試体の三軸試験手法の比較，平成26年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，2015.3.
- 21) 小高猛司・崔 瑛・田村太郎・武 楊・小林芳樹・李 圭太：礫質堤防土の力学特性の評価に及ぼす供試体再構成条件の影響，第 50 回地盤工学研究発表会講演集，CD-ROM，2015.9
- 22) 小高猛司・崔 瑛・武 楊・田村太郎・小林芳樹・李 圭太：砂質堤防土の強度定数評価に及ぼす供試体再構成と凍結過程の影響，第 50 回地盤工学研究発表会講演集，CD-ROM，2015.9

### **以上を含め60件以上**

#### **【企業とのタイアップ】**

株式会社太陽工業，応用地質株式会社 「透気・遮水シートに関する設計・施工マニュアル作成」  
東洋建設株式会社 地盤－水の連成に関する共同研究

#### **【公開イベント・講演】**

- 1) 2013 年度・河川技術に関するシンポジウム オーガナイズドポスターセッション 話題提供“堤防の浸透破壊～目に見えない堤体・基盤内からの破壊～より深い現象の理解と堤防管理の高度化を目指して” 名古屋工業大学高度防災工学センター 教授 前田健一（侵食・浸透破壊・洗掘 WG リーダー） 地盤工学での浸透破壊の研究動向
- 2) 講演：「南海トラフ巨大地震と液状化 2次災害に備える」，清須市地域防災リーダー養成講座，2014.5.11.
- 3) 講演：「甚大化する地盤災害の常識を理解して備える地盤災害を理解し備える～地震による液状化から豪雨による土砂災害まで～」 中部ライフガードTEC2014～防災・減危機管理展～ 2014.5.22-23
- 4) 講演：「甚大化する地盤災害の常識を理解して備える ～地震による液状化から豪雨による土砂災害まで～」，第28回応用地質株式会社中部支社研究発表会，2014.9.13.
- 5) 平成26年12月2日 土木学会応用力学講演会2014 「激甚化する豪雨災害 ～求められる分野横断・学際的な研究～」 講演②：前田 健一先生(名古屋工業大学)  
「地盤工学、水工学、農学の狭間にある豪雨浸透とパイピング破壊の謎解きに向け
- 6) 講演：中部地質調査業協会 平成27年新春技術者懇談会「甚大化する地盤災害の常識を再整理して備える ～津波、豪雨、超過洪水、陥没で水と土のかかわりを見直す～」，中部地質調査業協



会, 2015.1.30

- 7) その他： 国・自治体およびNPOやボランティア関連（10件），地盤改良協会（2件），地域の技術士会総会（2件），自治体およびNPO関連（3件），鉄道会社（1件）での講演でも引用し，活動内容と成果についてより広く普及することを行った。

**【主要雑誌・新聞等への成果発表】**

散水による実堤防浸透試験について，  
日刊建設通信新聞，日刊建設工業新聞，建通新聞など，2014.1

テレビ放映については，⑧で記述

**【特許など、知的財産権の取得状況】**

特になし

**⑧研究成果の社会への情報発信**

**【テレビ放映】**

1)散水による実堤防浸透試験

- ・ 中京テレビ・NNNストレイトニュース 「名古屋・北区庄内川 集中豪雨を想定した堤防浸水実験」，2014.1.22
- ・ テレビ愛知・NEWSアンサー 「集中豪雨に強い堤防づくりを」，2014.1.22
- ・ CBC・イッポウ 「今日のなぜ？ 堤防決壊メカニズム “水の力” や “空気” が？」，2014.1.22
- ・ NHK・ほっとイブニング 「大雨想定し堤防の強度を調査」，2014.1.22
- ・ 中京テレビ，キャッチ！ 「豪雨を想定した“実験” 背景に降り方の変化」

2)都市インフラ

- ・ 平成25年3月4日 NHK 陥没に関する放送（内部侵食）
- ・ 平成25年4月15日 CBC 陥没に関する放送（内部侵食）

**【新聞等】**

1)散水による実堤防浸透試験

- ・ ・日刊建設通信新聞，2014.1.23
- ・ ・日刊建設工業新聞，2014.1.23
- ・ ・建通新聞，2014.1.24

## ⑨表彰、受領歴

- ・ 平成24年度 JC-IGS論文賞（国際ジオシンセティクス学会日本支部）
- ・ 土木学会海岸工学論文賞，2014
- ・ 砂防学会 論文賞，2014
- ・ 地盤工学会中部支部 支部賞（論文賞） 「豪雨と高水位の継続作用に着目した河川堤防の安定性」，2013，2014

## ⑩研究の今後の課題・展望等

- 1) 安定性評価において、堤防の三次元の構造、浸透・すべりの特徴を把握し、堤体の安定性、変状規模を三次元的に検討できるようにすることが課題である。これにより、より詳細で効率的な重要強化地点の特定や対策技術の選定への貢献が期待される。
- 2) 堤防内の水分量変化の可視化方法として、比抵抗モニタリングが有効であることが分かった。より効果的な表示の仕方の検討が必要である。これによって、探査技術向上、堤防の外力に応じた弱部抽出が可能になり、対策技術の選定に繋がると期待される。
- 3) エアブローの発生要因や亀裂の損傷条件について、理論的条件値の整理が必要である。また、今回は、均質な堤体を対象としたが、築堤履歴に起因する不均質性の考慮が必要である。これによって、堤防のリアルタイム安定性予測技術の向上が期待される。
- 4) パイピングの発達条件の理論的条件の導出が必要である。また、実験室内の小型実験をより活用するため、相似則を構築する必要がある。今後、増加が予測される継続時間の長い高水によって、堤防のリアルタイム安定性予測技術の向上が期待される。さらに、パイピング、法面のすべりや崩落といった複合的破壊についての検討も今後の課題である。
- 5) 内部侵食は粒度分布形状によって支配されることが分かっているが、被災予測の精度を向上するためには、侵食量予測の粒度指標と間隙流速によって搬送される粒子径との関係の導出などが課題である。内部侵食、パイピング、浸透によるすべりのインタラクションによる大規模破壊の機構解明は、決壊危険度予測や重点箇所抽出の精度向上に貢献できる。
- 6) 実堤防での出水時の強度低下とそれに及ぼす土質や締固め状態の影響についてデータの蓄積を行う必要がある。一方で、土質による強度発現の違い、締固めによる強度増加を適切に評価しないと、法勾配のみが重要なパラメータであると誤った判断をすることにもなり、不経済な設計・管理をすることになる。すべりだけでなく、浸透破壊の制御においても強度は重要である（現行の照査ではパイピングには強度は関係しないが）。また、適切な対策が実施なれないなどのおそれもある。詳細な検討においては、安易にバラツキをさけ、標準的な強度定数にこだわり過ぎないようにし、適切な強度定数の把握が課題となる。

（上記詳細は報告書にも記載）

## ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

- ・「集中豪雨とそれに伴う急激な河川水位上昇時」と「継続時間が長い高水作用時」のシナリオに対する堤防の力学的応答を考慮したリアルタイム堤防安定性評価の考え方を提案している。この際の計算では、すべりに対する安定計算は従来方法を用い、上記シナリオによる堤防の弱体化条件を粒度などの簡単な指標は判断できるようにした。これに基づき、降雨と水位の両方の履歴から堤防の安定性を予測する考え方を提案している。また、危険箇所を絞り込むために、内部侵食の観点から不安定粒度の存在箇所と治水地形分類との関連性を示した。これらの成果は、重点的監視・強化すべき箇所の抽出を支援し、効率的な維持管理、流域の安全性向上の施策、効果的な避難計画のために貢献できると考える。また、堤体や基盤層の粒度など、簡単かつ入手しやすい情報を用いた方法は実務的に導入しやすいと考える。
- ・センサーの原理によって浸潤初期から飽和時にかけて得意とする応答時期が異なることを示した。この成果は、センサーの適材適所な選択・配置の選択の際に、有効である。長大なインフラである堤防の適切なモニタリング技術の評価や選定に貢献できると考えられる。
- ・総雨量が同じでも雨量強度や雨滴径、先行降雨量が異なると浸透モードや堤体内の水分量の消散速度が大きく異なることが分かった。また、降雨履歴によって、地盤表層で貫入抵抗が1/2～1/3程度まで低下し、法肩の土の強度回復が速いことが分かった。一方で、現行の安全照査において降雨による強度低下は見込んでいない。そこで、堤体や法面の安全性の管理において、総雨量だけでなく降雨強度についても考慮することで、浸透モードや破壊モードの違いを把握でき、より効果的な維持管理、危険性の高い堤防の特定などに貢献できると考えられる。降雨強度・履歴は従来から計測されており、リモートで得られる情報であるのでから、上記の確認ポイントは実務に導入しやすいとおもわれる。
- ・提案する原位置透水試験は、地盤工学会の基準部で地下水調査法として基準名「地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法」（2015）として進んでおり、2015年夏に公示となることで、全国の河川行政でより効率的な堤防の管理に貢献できる。