

## 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>
	(すぎい としお) 杉井俊夫		中部大学・工学部・都市建設工学科		教授 大学教育研究センター長
<b>②研究テーマ</b>	名称	堤防の三次元構造と降雨・水位の浸潤履歴が及ぼす堤体の不安定化に関する研究			
	政策領域	[分野] 地域課題分野 [公募課題] 河川	融合技術	比抵抗探査・サウンディング技術・土質物性評価	
<b>③研究経費</b> (単位:万円) ※端数切り捨て。	平成27年度	平成28年度	平成29年度	総合計	
	1,367千円	2,382千円	1,166千円	4,915千円	
<b>④研究者氏名</b> (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)				
小高猛司	名城大学理工学部・教授				
前田健一	名古屋工業大学・教授				
神谷浩二	岐阜大学工学部・教授				
崔 瑛	横浜国立大学都市イノベーション研究院・准教授				
余川 弘至	中部大学工学部・講師				
斎藤 秀樹	応用地質(株)技術本部・技師長 斎藤 秀樹				
小林 剛	応用地質株式会社計測システム事業部・副部長 小林 剛				
<b>⑤研究の目的・目標</b> (申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)					
<b>(目的)</b> 本研究は、堤防の延長方向の影響を考慮するため、三次元構造を把握すると同時に物性値をも評価し、堤防の安定性を評価すること、さらには、降雨履歴、水位履歴の浸潤履歴が及ぼす浸透過程への影響を明らかにし、現状のピッチより詳細に堤体の不安定性について検討することを目的としている。					
<b>(調査・研究内容及び成果)</b> 本研究では、さらにコストを安く時間短縮し、細かいピッチで断面把握にSH型貫入試験を援用すること、同試験機により物性値をも推定する調査技術の開発を予定している。また、これまでのモニタリング技術を使って浸潤履歴が異なる場合の堤体の湿潤過程を明らかにすることなどを計画している。					
<b>(研究成果の河川整備・管理への反映)</b> 三次元構造、物性値、浸潤過程を明らかにすることで堤防の強化地点などの特定に反映できる。また、詳細なシミュレーションが可能になり、事前に対策等の施策に貢献することが期待できる。					

## ⑥研究成果

### 1. 研究の背景・目的

現在、河川堤防は2次元断面として設計照査が行われているが、縦断方向にはずっと同一断面ではなく、これまでの修復や築堤履歴が異なる箇所、治水地形分類図が示すように堤体基礎地盤が異なる箇所も多い。また、堤体における構造物の存在なども浸透過程の違いと堤防変状に影響する。一方、近年、年間総雨量は変わらなくても乾燥した堤防にゲリラ豪雨などが直撃し、浸透過程が大きく変わってきており、水位だけでなく降雨の浸透についても重要視されるようになってきた。砂層の行き止り地盤では、浸透力が集中して不安定要因であることが知られているが、断面構造が大きく変化する箇所においても行き止り地盤に近い構造といえるがこれまで十分に考慮されてこなかった。本研究は、堤防の延長方向の影響を考慮するため、三次元構造を把握すると同時に物性値をも評価し、堤防の安定性を評価すること、さらには、降雨履歴、水位履歴の浸潤履歴が及ぼす浸透過程への影響を明らかにし、現状のピッチより詳細に堤体の不安定性について検討できる方法について検討することを目的としている。

### 2. 3カ年の研究内容

本研究を進めるにあたり、大きく分けて4つに分けて進めていくことにした。

#### (1) 堤体縦横断面構成の把握と物性値の推定

斜面表層すべりの調査に使用されるSH型貫入試験装置を用い、そこから得られる貫入抵抗波形を用いてサンプリングせずに層の境界を判別できないか、土質の判断に使えるか、波形解析を用いた分析を試みている。また、本調査法は、容易に実施できることや、0.1mm単位の貫入を計測できる特徴もあることから解析結果の分解能も高く、現行のボーリング間の補完にも有効であり、堤防盛土の3次元構造を可視化した。

#### (2) 土粒子移動と目詰まりの可能性

Kenneyらの粒状フィルターの内部安定性指標（土粒子流出の判定）をもとに、堤体粒度分布の情報から検討を行っている。本研究の遂行過程においてKenneyらの安定指標は非常に密度が高く、粒径幅が狭い土試料において適用可能であることが判明、実務においてそのままでは使用できないことがわかり、間隙径分布からのアプローチを加えて検討を行う必要が明らかとなった。本研究では、間隙径分布の測定を行い、間隙比の影響が高く、Kenneyらの安定指標の考え方の修正を行っている。また、これまで2次元個別要素法（2D-DEM）では、表現できなかった粒子流出の現象を再現することを試み、有効応力に替わる粒子有効力の提案をおこなっている。

#### (3) 浸透水による土質材料の変化

模型堤体に使用した礫質土を用いて、大型三軸試験による単調荷せん断試験および吸水軟化試験を実施し、礫質堤体土の浸透耐性を含めた力学特性の評価を行った。

#### (4) 堤体内の水分量の3次元モニタリング

5分の1のスケールで堤体のストレステストを意識した降雨および湛水実験を実施し、高速比抵抗モニタリングを3次元で実施した。堤体内を浸透する水の動きを素早く3次元で把握することができ、間隙空気の移動をも確認できるモニタリング実験をおこなった。

### 3. 研究成果

#### (1) 堤体縦横断面構成の把握と物性値の推定

既存土質データがある近傍でのSH型貫入試験の抵抗波形からそう判別および類似土質の推定を確認していた（図-1および図-2）。昨年度室内試験で確認した高周波域は、ノイズや水分量による影響が高いことを考慮すると図-2から、累積スペクトルが低周波域において一致しており、3-S3と3-P4の土質の抵抗波形の類似性が高いことがわかる。

SH型貫入試験は細かいmm単位の深さでの硬軟を計測することができることや、試験が容易であることから細かく実施することで地盤の可視化を試みた。図-3に示すように、

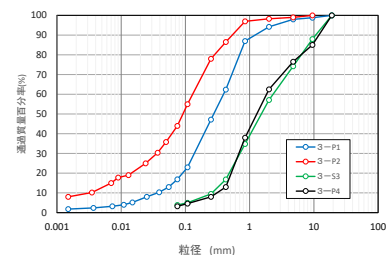


図-1 4つの深度での粒度分布

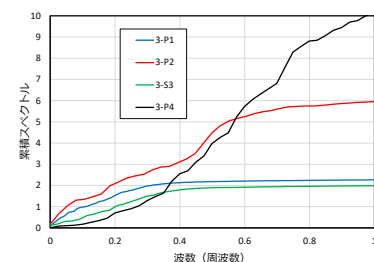


図-2 累積スペクトル図

## ⑥研究成果（つづき）

基準点25kmから上流側に+5m、15m、

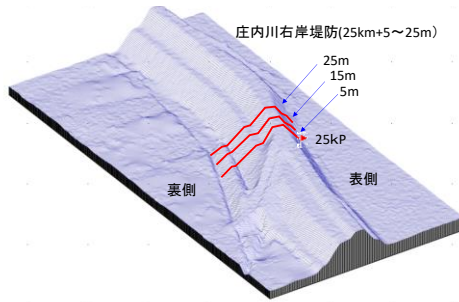


図-3 3つの測線

25mに測線をとって、貫入試験を実施する地点を設定した。

図-4には結果の25km+0.005m断面でのSH型貫入試験結果を示す。また、図-5には、3側線のデータを示し、さらにNd/drop値が25以上の硬い地層を推定している。これより堤体中心部が硬く、のり面が軟らかい傾向がわかる。また、この地点は破堤履歴がある地点であり縦断方向にも硬さが違うことが、別途表面波探査、重力探査で明らかになっており、整合性を得ている。

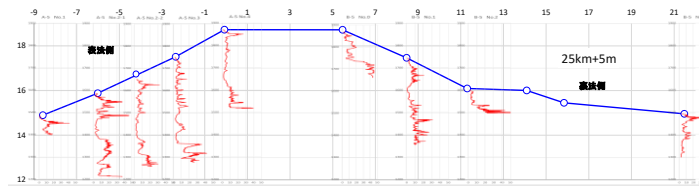


図-4 25km+0.005断面でのSH型貫入試験結果

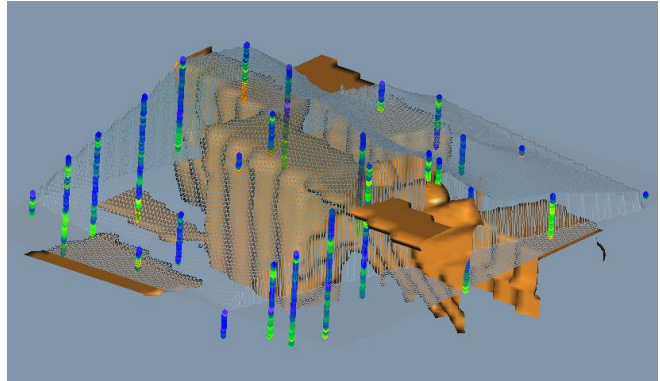


図-5 Nd/drop値25以上の可視化

### (2) 土粒子有効力のシミュレーション

杉井は、これまでに鉛直1次元流れの浸透破壊現象に土粒子の水中重量と流速による損失（透水力）がつりあう実流速を多粒子限界流速式として提案してきた。各々の粒子径に対する多粒子限界流速に達するとそれぞれ水中単位体積重量がゼロとなるように、重力加速度を減少させていくアルゴリズムに基づく。ここで、次の3つの条件を仮定している。一つには、個々の粒子の重力加速度が一定の割合で減少していく。二つには、多粒子限界流速に達した後は、鉛直上向きに重力加速度が同様に増加していく。三つ目には、粒子が移動しても間隙率は変わらないという仮定である。解析結果である4種類の粒径の粒子移動と粒子有効力による粒子間に働く応力の分布を図-6に示す。流速が上昇するにつれ、細かい粒子から流出する現象、粒子間応力は流速の増加とともに中層部の粒子間力が減少しているが、1.0cm/sになると粒子間力は小さくなるどころと大きくなる部分が現れる。これは上昇粒子が上部の粒子を押し上げようとするために増加するものと推察された。

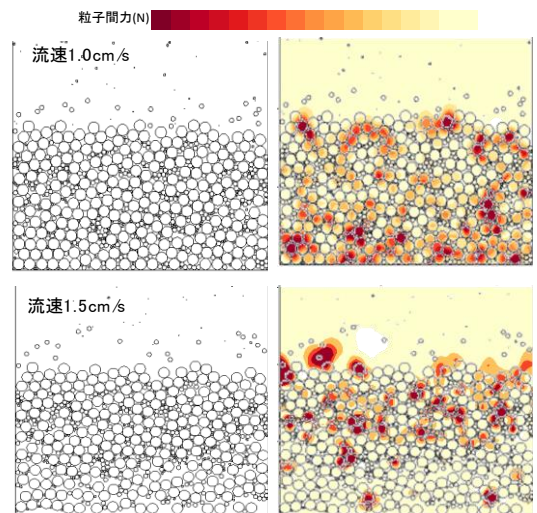


図-6 (左)粒子の浮上の様子と(右)粒子間力の分布

### (3) 透水による土質材料の変化

模型堤体を使用した礫質土を用いて、大型三軸試験による単調荷せん断試験および吸水軟化試験を実施し、礫質堤体土の浸透耐性を含めた力学特性の評価を行った。図-7に堤体試料の粒度分布を示す。図-8(a)と(b)に三軸試験結果を示す。吸水軟化試験の有効応力経路は水平線で表され、有効応力の低下に伴い右から左に推移するが、試験の破壊線の左側まで到達している。土の軟化の閾値を破壊応力比で評価する場合、本試験においては、吸水軟化試験による低有効応力条件下での破壊応力比は、通常の試験で得られるものより大きく、低有効応力では軟化しづらいことがわかる。図-7に示すモールの応力円より、試験の内部摩擦角は39度と比較的大きい。一方、吸水軟化試験においては、軸ひずみが急増して急激に吸水軟化し、供試体の骨格構造が大きく変化する時点の有

⑥研究成果（つづき）

有効応力状態を用いてモールの応力円を作成している。その結果、試験結果と比較すると内部摩擦角は小さくなったものの粘着力は6kPaと比較的大きな値を示し、低拘束圧下では吸水軟化試験の破壊規準線の方が、CUB試験による破壊規準線を上回ることが示された。せん断強さを規定する破壊規準線のパラメータを仮に直線とした場合には、吸水軟化試験によってせん断応力に大きな切片、すなわち粘着力が評価される。これは礫材料が極低有効拘束圧条件下でも粒子のかみ合わせによってある程度のせん断強さを有するためと考えると良い。模型実験の際、越流後も安定していた堤防法面の状態等から判断すると、今回の吸水軟化試験で評価された比較的大きな粘着力、すなわち最小せん断強さは、実際の模型堤防においても発揮されていたと考えられる。

(3) 浸透水による土質材料の変化

模型堤体に使用した礫質土を用いて、大型三軸試験による単調載荷せん断試験および吸水軟化試験を実施し、礫質堤体土の浸透耐性を含めた力学特性の評価を行った。図-7に堤体試料の粒度分布を示す。図-8(a)と(b)に三軸試験結果を示す。吸水軟化試験の有効応力経路は水平線で表され、有効応力の低下に伴い右から左に推移するが、試験の破壊線の左側まで到達している。土の軟化の閾値を破壊応力比で評価する場合、本試験においては、吸水軟化試験による低有効応力条件下での破壊応力比は、通常の試験で得られるものより大きく、低有効応力では軟化しづらいことがわかる。図-7に示すモールの応力円より、試験の内部摩擦角は39度と比較的大きい。一方、吸水軟化試験においては、軸ひずみが急増して急激に吸水軟化し、供試体の骨格構造が大きく変化する時点の有効応力状態を用いてモールの応力円を作成している。その結果、試験結果と比較すると内部摩擦角は小さくなったものの粘着力は6kPaと比較的大きな値を示し、低拘束圧下では吸水軟化試験の破壊規準線の方が、CUB試験による破壊規準線を上回ることが示された。せん断強さを規定する破壊規準線のパラメータを仮に直線とした場合には、吸水軟化試験によってせん断応力に大きな切片、すなわち粘着力が評価される。これは礫材料が極低有効拘束圧条件下でも粒子のかみ合わせによってある程度のせん断強さを有するためと考えると良い。模型実験の際、

越流後も安定していた堤防法面の状態等から判断すると、今回の吸水軟化試験で評価された比較的大きな粘着力、すなわち最小せん断強さは、実際の模型堤防においても発揮されていたと考えら

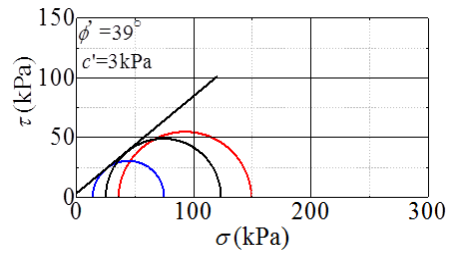


図-7(a) CU試験

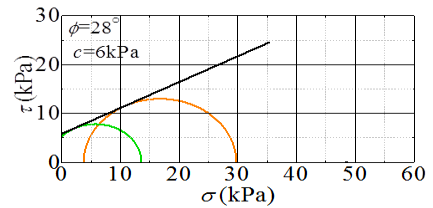


図-7(b) 吸水軟化試験

図-7 堤体試料 粒度分布

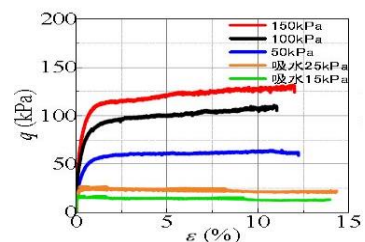


図-8(a) 軸差応力～軸ひずみ

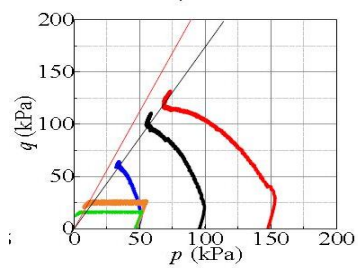


図-8(b) 平均有効応力経路

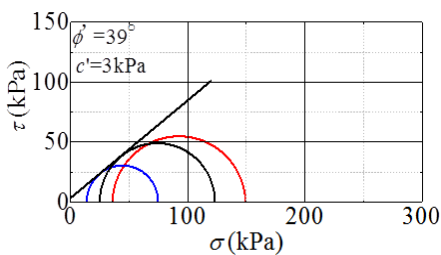


図-7(a) CU試験

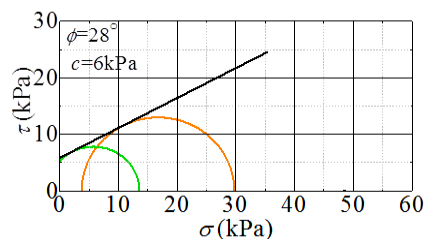


図-7(b) 吸水軟化試験

れる。

## ⑥研究成果 (つづき)

### (4) 堤体内の水分量の3次元モニタリング

小型模型実験を使って堤防越流現象を再現した。外水位の上昇をはかるための約5分の1のスケールの小規模堤防と貯水池を庄内川河口3.4kmに構築した。模型堤防に水をほぼ均一に散布することができる堤防の上に、人工降雨用設備を設置した。貯水池の水位上昇と人工的な降雨浸透時の計測値の一つとして、堤体内の浸透現象を視覚化するため、継時的に堤体内の比抵抗率を計測する比抵抗探査を行った。

越水実験では堤防表側に貯水池を設けて庄内川より河川水を汲み上げて水位を制御し、小型堤防へ外水位の負荷と散水装置による人工降雨を与えた。比抵抗の測定では、小型堤防全体をカバーできるような8測線で合計3072データの測定を一定の時間間隔で繰り返した。測定では、時間間隔をできるだけ短縮するために電流送信器を8台・電位測定器8台の多点同時通電システムを用いて約20分間隔で一連の測定を繰り返した。3次元比抵抗モニタリングの結果、人工降雨や外水位上昇に伴う堤体内の比抵抗変化を明瞭に捉えることが出来た。

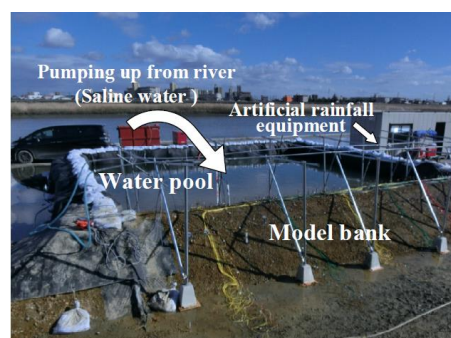


写真-1 小型堤防と貯水池

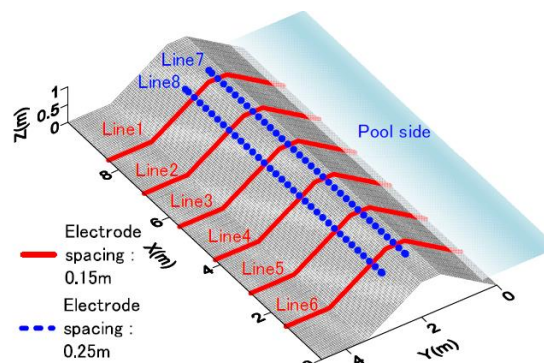


図-8 2次元 ERT 測量線の配置

### 4. 河川等政策への質の向上への寄与

- (1) SH型貫入試験によるボーリング間の硬軟の補完だけでなく、サンプリングせずに土質種、物性の判断にも有効と考えられる。なお、礫が多い場合には、貫入不可となる箇所もあるため、適用場所を選定して使用する必要がある。
- (2) 堤体の浸透による破壊を考えるうえで低拘束圧下では吸水軟化試験の破壊強度の評価はすぐにも反映でき、これまで過度に小さな安全率の問題も解消していくものと考えられる。
- (3) 同一材料の堤防での計測であったが、高速比抵抗モニタリングは3次元で浸透水および間隙空気の挙動を把握することができ、密度の違いがみられたことから堤防特性を把握するうえでも有効と考えられる。

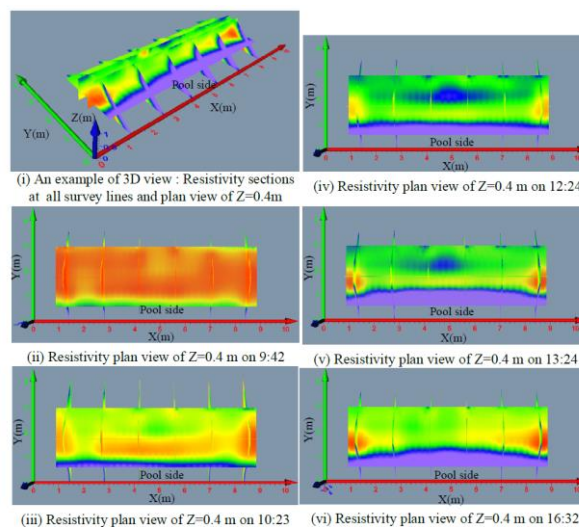


図-9 全2D測線を用いた比抵抗分布 (Z = 0.4mの平面図)の時間変化)

### 参考文献

- 1) 表土層調査技術研究会: SH型貫入試験技術・調査基準同解説, 2016.
- 2) 杉井俊夫・余川弘至・浅野憲雄・杉本雄奎・酒井駿: 貫入抵抗値の波形解析による地盤調査の試み, 第51回地盤工学研究発表会, No.93, pp.185-186, 2016.
- 3) Kenney, T.C. and Lau, D.: Internal Stability of Granular Filters. Canadian Geotechnical Journal, 22, 1985, pp.215-225.
- 4) 杉井俊夫・佐藤健・宇野尚雄・山田謹吾: 浸透破壊の発生プロセスと土の非均質性, 土と基礎, Vol.37, No.6, pp.17-22, 1989.
- 5) 松島亘志: 実際に個別要素法プログラムを動かしてみよう, 個別要素法セミナーテキスト, 2010.
- 6) 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, 第4回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, pp.45-46, 2016.
- 7) Imamura, S. and Tago, K. Namiki, H.: A Rapid Resistivity Profiling Technique Using Code Division Multiple Current Injection, 73rd EAGE Conference & Exhibition, I004, 2011

## ⑦研究成果の発表状況

- 1) 杉井俊夫, 朱発瑜, 末松知奈: 有効応力から「粒子有効力」へ、間隙率から「間隙径分布」へ、地盤工学会誌, 7月号, 2018 (印刷中)
- 2) 杉井俊夫, 寺西剣悟, 長瀬弘己: 多粒子限界流速を用いた堤防の耐侵食性能の評価, 2018年度・河川技術に関するシンポジウム, 2018 (印刷中)
- 3) 杉井俊夫・朱 発瑜・寺西剣悟・小高猛司・前田健一・崔 瑛・斉藤秀樹・小林 剛・山口明代: 小型堤防による越水から決壊現象における堤体粒度の影響, 第 72 回土木学会年次学術講演会, III-307, pp.613-614 (九州大学)
- 4) Y. Yamashita, T. Kobayashi, H. Saito, T. Sugii, T. Kodaka, K. Maeda, Y. Cui: 3D ERT Monitoring of Levee Flooding Experiment Using Multi-current Transmission Technique, 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Near Surface Geoscience 2017)
- 5) 前田健一: 数式のない土木の数値解析 地盤工学における粒子ベースの数値解析の可能性 -地盤を科学し好学するために-土木学会誌 102(4)44-45 2017年04月
- 6) 西村柁哉,前田健一,榎山総平, 泉典洋, 齊藤啓: 異なる基礎地盤特性の堤防の噴砂動態・パイピング挙動と漏水対策型水防工法の効果, 河川技術論文集, Vol.23, pp.381-386, 2017(6).
- 7) 齊藤啓,前田健一: 二次元浸透流解析によるパイピング照査の高度化に向けた基礎研究, 河川技術論文集, Vol.23, pp.375-380, 2017(6).
- 8) 岡村未対, 平尾優太郎, 前田健一: パイピングにより堤体表面に現れる沈下分布の特徴, 河川技術論文集, Vol.23, pp.399-404, 2017(6).
- 9) 宮本順司, 鶴ヶ崎和博, 岩本哲也, 中瀬仁, 松田達也, 前田健一: 遠心模型実験による腹付工を設置した防波堤基礎マウンドの粘り強さの確認, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.73, No.2, I\_7-I\_12, 2017(11).
- 10) 山口敦志, 前田健一,松田達也, 高木健太郎: 表層流れに起因する地盤の流動および間隙水圧変化に関する DEM-CFD 解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, I\_517-I\_522, 2017(11).
- 11) 松田達也, 前田健一, 山口敦志, 高木健太郎, 鶴ヶ崎和博, 宮本順司, 角田紘子: PIV による水平流れに起因した土粒子・土粒子群の微視的な流動挙動解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, I\_529-I\_534, 2017(11).
- 12) Sugii, T., Yamada, K., Yokawa, H. and Asano(2015) : Destabilization of the ground due to the efflux of soil particles, Proc.of The 15th Regional Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- 13) 杉井俊夫: 論説: 堤体基礎のパイピングに対する一考察(2015), 地盤工学会誌, Vol.63, No.9, pp.63-70.

杉井研究室ホームページ

[https://www3.chubu.ac.jp/faculty/sugii\\_toshio/](https://www3.chubu.ac.jp/faculty/sugii_toshio/)

## ⑧研究成果の社会への情報発信

### ●メディア発信

- 1) 平成 29 年 1 月 18 日 (水) 東海テレビ みんなのニュース One 「庄内川の河川敷で堤防の強度実験を実施」放送

### ●イベント

- 1) 平成29年1月17日—18日 庄内川右岸 3.0k (明德橋下流) 河川敷 小型堤防降雨・湛水浸透・越水実験 (愛知県名古屋市中川区下之一色町三角) 延べ30名程度 (国土交通省中部地整河川局、木曾川下流河川事務所、建設技術研究所(株)、(株)アイデア、中日本建設コンサルタント(株)、大日コンサルタント(株)、(株)テイコク、庄内川河川事務所、名城大学、名古屋工業大学、岐阜大学、中部大学、応用地質(株)他)

### ⑨表彰、受領歴

(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。)

なし

### 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。)

- (1) SH型貫入試験での提案は、現在の200mピッチのボーリング間の補完や物理探査の検証データとして有効な技術を提案でき、精密な堤体状況を知るうえで有効であると考ええる。
- (2) SH型貫入試験によるボーリング間の硬軟の補完だけでなく、サンプリングせずに土質種、物性の判断にも有効と考えられる。なお、礫が多い場合には、貫入不可となる箇所もあるため、適用場所を選定して使用する必要がある。
- (3) 堤体の浸透による破壊を考えるうえで低拘束圧下では吸水軟化試験の破壊強度の評価はすぐにも反映でき、これまで過度に小さな安全率の問題も解消していくものと考えられる。
- (4) 同一材料の堤防での計測であったが、高速比抵抗モニタリングは3次元で浸透水および間隙空気挙動を把握することができ、密度の違いがみられたことから堤防特性を把握するうえでも有効と考えられる。
- (5) 今回、提案した堤防の調査技術は実務においても利用できることがわかったが、そこから調査により得られるデータについて今後の課題発見となることも予想され、河川政策の調査技術への将来性が期待できる。

### 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。)

⑩にも記述したが、調査技術はいままで見えなかった堤体内を可視化していく上で有意義な手法であると考えられる。一方で、そこで明らかとなる三次元構造の堤体の弱部になり得るかどうかの判断までいっていない。これまで横断面構成について危険堤防構成については知られているが三次元的な構造・縦断断面構成については知られていないため、本方法によるデータの蓄積が求められるところで、縦断方向についても堤体および堤体基礎の構造を知る技術に貢献していると判断する。

三次元の多点同時通電三次元比抵抗モニタリング（高速モニタリング）の技術では浸透だけでなく、差分をとることで堤体の構造をも探査できる可能性を有し、実務においても有効な技術であると判断する。

浸透水を受けた場合の堤体土質の変化については、物性では研究の色が強いが、堤防がこれまでに受けてきた既往最高水位およびその継続時間が重要であり、そうした既往経験水位等のデータの整理がきちんとされる河川管理がへの反映が望まれる。