

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	
	にしがき まこと 西垣 誠	岡山大学	特任教授	
② 研究テーマ	名称	弱点箇所抽出技術の開発		
	政策領域	[分野] 河川技術分野 [公募課題] (27-T) 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	融合技術 (リモートセンシング, 非破壊検査, 認知行動学 等)	
③ 研究経費 (単位: 万円) <small>※端数切り捨て.</small>	平成27年度	平成28年度	平成29年度	総合計
	772	1263	706	2741
③ 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 年3月31日現在)			
西垣 誠	岡山大学 特任教授			
西村 伸一	岡山大学 教授			
小松 満	岡山大学 准教授			
柴田 俊文	岡山大学 准教授			
珠玖 隆行	岡山大学 准教授			
渡邊 武志	パシフィックコンサルタンツ株式会社			
新村 卓也	パシフィックコンサルタンツ株式会社			
高橋 千明	パシフィックコンサルタンツ株式会社			
増山 博之	パシフィックコンサルタンツ株式会社			
舘川 逸朗	パシフィックコンサルタンツ株式会社			
藤吉 秀彰	パシフィックコンサルタンツ株式会社			
若狭 愛	パシフィックコンサルタンツ株式会社			
石田 勇介	パシフィックコンサルタンツ株式会社			
坂野 アイカ	パシフィックコンサルタンツ株式会社			
④ 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>本研究は長大で複雑な歴史的構造物としての河川堤防において「弱点箇所を確実に抽出すること」を目的に, ①堤防内部の土構造を現場で把握するための調査技術の開発, ②進行性破壊の発生しやすい地盤条件把握のための模型実験, を行うものとする. 調査技術に関する研究は, 以下に示す研究項目のうち, (1)(3)(4)が該当する.</p> <p>(1) 堤体の浸透特性・力学特性を把握する調査法 (2) 進行性破壊の発生の素因・誘因となる地盤・堤体条件把握のための模型実験 (3) 物理探査とサウンディング試験の合成による調査法 (4) 空気圧による連通試験</p>				

⑤ 研究成果

(1) 堤体の浸透特性・力学特性を把握する調査法

■ 研究目的

堤体の浸透特性を把握するための調査法の確立が急務である。また、河川堤体の強度を適切かつ定量的に評価することは、安定性評価の上で重要であり、堤体の相対度・飽和度と強度の関係の把握等、堤体の力学特性を把握する調査法の確立が急務であるため、実施した。

■ 浸透特性を把握する調査法の検討

試験結果を表-1に示す。室内透水試験を合わせて実施し、結果の比較を行った。仮に孔壁の洗浄が十分にあり、掘削損傷の影響がなければ、図-1に示すとおり、試験時の飽和度は90~95%程度の範囲であったと考えられる。水平方向と鉛直方向の透水係数の割合については、原位置透水試験、室内透水試験の両方において、鉛直方向の透水係数は、水平方向より若干小さい(0.18~0.66)結果となった。また、保水性試験・室内不飽和透水試験も合わせて実施したところ、図-2に示すとおり、保水性試験の結果から、 $\theta \sim \psi$ 、 $\theta \sim k/ks$ についても、高い精度で推定可能であった。

これらの結果を踏まえると、堤体の透水性の評価にあたっては、現場透水試験と室内透水試験の両方を実施し、総合的な評価が望ましいと考えられる。また、鉛直方向と水平方向の透水性の割合については、室内試験で把握することも有効と考えられる。不飽和浸透特性を把握するにあたっては、保水性試験は極めて重要である。

表-1 原位置透水試験と室内透水試験の比較

	① 透水係数(鉛直方向)	② 透水係数(水平方向)	③ 透水係数(鉛直方向) 透水係数(水平方向) (①/②)	【参考】 F_c : 掘削分含有率	【参考】 α_{00} による換算透水係数
現場不飽和透水試験	式①/雨水浸透試験の式	9.95×10^{-10} (cm/s)	1.50×10^{-10} (cm/s)	0.66	1.47×10^{-10} (cm/s) ($\alpha_{00}=0.030$)
	式②/理論式	3.70×10^{-10} (cm/s)	2.08×10^{-10} (cm/s)	0.18	
室内不飽和透水試験	1.12×10^{-10} (cm/s)	2.22×10^{-10} (cm/s)	0.50	15.4~26.4%	1.01×10^{-10} (cm/s) ($\alpha_{00}=0.08$)

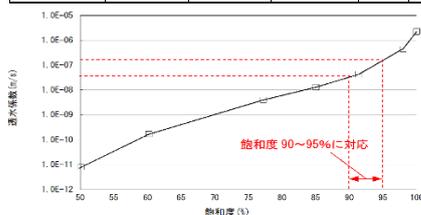


図-1 原位置透水試験における飽和度確認

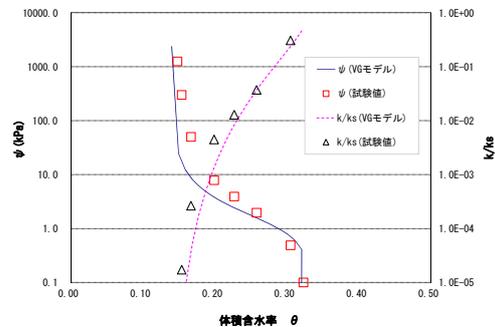


図-2 VGモデルによる保水性試験結果・室内不飽和透水試験結果の再現

■ 力学特性を把握する調査法の検討

BとAs層の土質試験の結果の一覧は表-2に示すとおりである。堤体を対象とした不飽和三軸試験は、 $S_r=100\%$ 、75%、50%を目安として実施した。体積含水率と粘着力の関係を表-2、図-3に示す。粘着力については、飽和状態では、 $c=1.8$ (kN/m²)と小さく、殆ど粘着力が見込めないものの、飽和度が75%程度では、 $c=15.2$ (kN/m²)と大きくなり、飽和度が50%になると、 $c=17.7$ (kN/m²)とさらに大きくなる。これに対して、内部摩擦角については、含水状態に大きく依存しない結果である。この結果を踏まえると、飽和度に応じた粘着力を設定して安定計算を行うことで、より高精度な堤体の安定性照査が可能になると考えられる。

なお、河川堤体は礫分を多く含む場合が多く、サンプリングが困難である。当研究で使用した試料は、GPサンプリング(写真-1)によって採取したものである(室内透水試験も同様)。

表-2 試験結果一覧

試料①(B-不飽和)			
飽和度の目安 S_r (%)	体積含水率 θ	cd (kN/m ²)	Φd (°)
100	0.31	1.8	35.3
75	0.2325	15.2	35.8
50	0.155	17.7	38.4

試料②(As-飽和)			
飽和度の目安 S_r (%)	体積含水率 θ	cd (kN/m ²)	Φd (°)
飽和試料		6.6	36

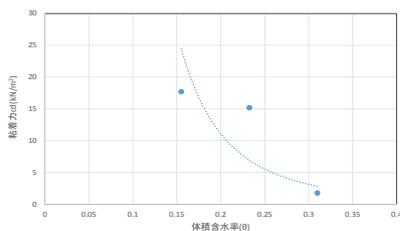


図-3 体積含水率と粘着力の関係



写真-1 GPサンプリングの状況

⑥研究成果 (つづき)

(2)進行性破壊の発生の素因・誘因となる地盤・堤体条件把握のための模型実験

1) 検討の流れ

本検討は河川堤防においてパイピングに起因する進行性破壊の発生の素因・誘因となる地盤・堤体条件を把握することを目的とする。平成23年9月台風12号に伴う洪水により漏水が発生した一級河川小田川右岸5k600付近の被災と無被災箇所的基础地盤材料を採取し、模型実験により洪水時に堤防川裏側でパイピングが生じる場をモデル化し、基礎地盤特性の違いによるパイピング進行性破壊の挙動変化を把握する。検討の流れは、①現地試料採取、②模型実験 (H28: 被災箇所・無被災箇所の地盤条件, 被覆土層の有無) である。

2) 模型実験

実験は岡山大学内の浸透実験装置、幅2m、高さ1m、奥行き0.5mの土槽内に堤防模型を作製して行った。模型の透水層部分は小田川の現地材料を用いた。実験は漏水箇所材料による2ケース (被覆土層あり・なし)、無被災箇所による3ケースの計5ケースとした。ケース毎に堤防高0.6m、基礎地盤の厚さ0.2m (被覆土層は0.25m) の堤防・基礎地盤模型を構築し、河川水位を上昇させて、変形や水圧変化を確認した。河川水位上昇速度は、実際に小田川で漏水が生じた洪水時の近傍水位観測所における水位上昇速度 (1cm/min) と同等として、5min毎に階段状に与えた。

透水層の条件は、A.被災箇所 (氾濫平野: Oda-1③5k600+13)、B.無被災箇所 (旧河道: Oda-2②5k600-20)、C.無被災箇所 (氾濫平野: Oda-3①5k600-20) の3種類とした。実験により、基礎地盤特性の違いによる河川堤防の川裏側で生じるパイピング進行性破壊の挙動変化の差異が定量的に把握された。A.とC.は透水係数・相対密度が異なる地盤特性であるが、進行性パイピング破壊が生じる特性は類似した。この要因は、A.はC.より透水係数は高いものの (図-2)、A.はC.より細粒分が多い (図-1) ことに起因していると考えられる。

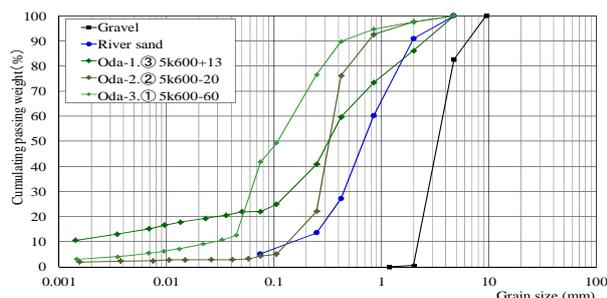


図-1 粒径加積曲線

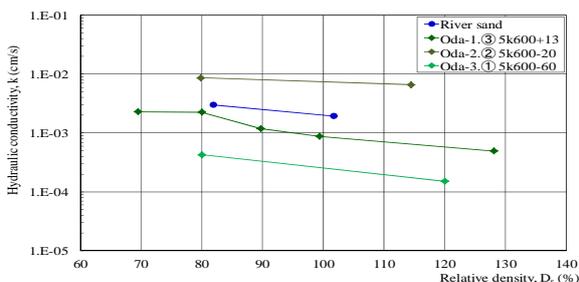


図-2 相対密度と透水係数の関係

実験により得られた間隙水圧を基に、平均的な動水勾配と法尻直下の砂層との行き止まり層の境界上部の局所動水勾配を等ポテンシャル線から推定した (図-5)。A.のケースでは、漏水時の局所動水勾配が現況照査基準を下回る0.5未満と評価された (B.とC.のケースでは $i \geq 0.5$ であった)。この要因は、A.のケースは比較的細粒分を多く含んでおり、河川水位上昇による水圧変化に対して細粒分の多い基礎地盤に粒子移動が生じた影響と考えられる。これらの実験結果から、細粒分を多く含む基礎地盤でのパイピングに対して留意が必要な点が示唆された。

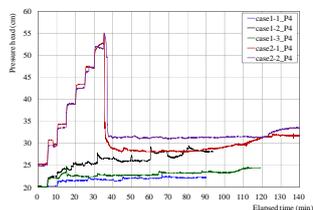


図-3 法尻直下の水圧分布



図-4 B.の進行性破壊の状況

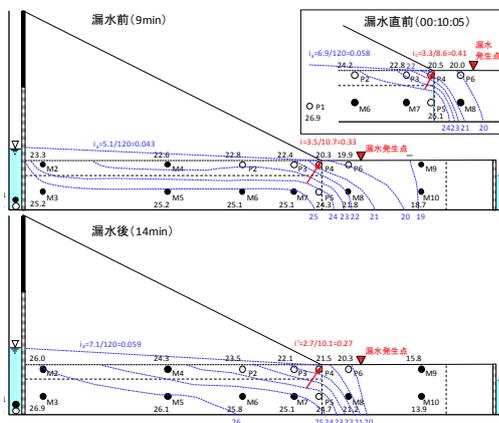


図-5 A.の噴砂前後の水頭分布

⑥研究成果 (つづき)

(3)物理探査とサウンディング試験の合成による調査法

堤防内でパイピングを起こすような箇所を同定するために、強度と土質の情報が非常に重要である。ここでは、一般的には、パイピングを起こしやすい土質は砂質系であり、緩く堆積した自然地盤、もしくは緩く締め固めた(施工不良を含む)盛土においてポテンシャルが高いと思われる。その条件を調査するには、かなり高密度な調査が必要であるが、考えられる方法として、物理探査とサウンディング調査が考えられる。土質調査ではボーリング調査が基本であり、それと同時に実施される標準貫入試験は、我が国の設計においては必須要件であるが、調査本数に限界がある。一方、物理探査と、ボーリングを伴わないサウンディングは高密度調査が可能である。本研究では、サウンディング手法として、土質判定も可能で、かつ、長大な路線長を有する河川堤防で効率的な調査が可能で、電気式3成分コーン貫入試験(CPT)を行う。また、物理探査手法としては、地盤強度と相関が良い弾性波探査手法の一つである表面波探査(SWM)を実施した。

サウンディングの結果は、適切な統計モデルに当てはめることによって、空間的な補間が可能である。ここでは、この目的に対して地質統計学手法の一つであるインディケータシミュレーション法を用いた。インディケータシミュレーションでは、主データと補助データを用いることができ、ここでは、破壊試験であるサウンディング結果を主データ、弾性波探査結果を補助データとして取り扱った。最終的に、N値が5を下回る確率の空間分布から低強度領域が明らかになり、これと土質分類の結果から弱部を同定した。

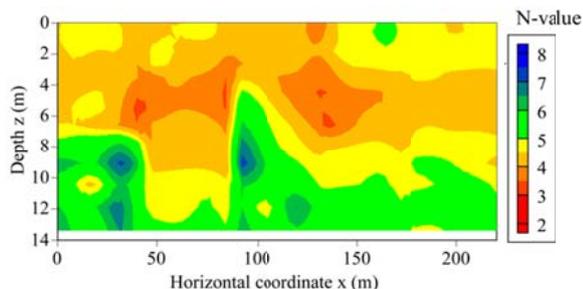


図-1 小田川左岸表面波探査結果(N 値換算結果)

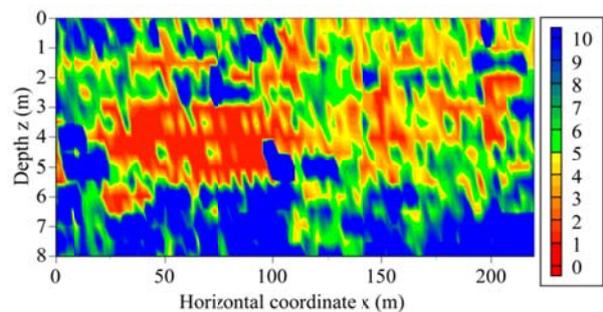


図-3 小田川左岸シミュレーション結果 (N値平均)

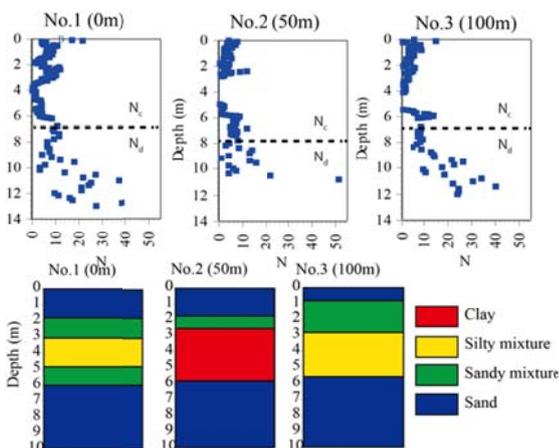


図-2 小田川左岸サウンディング試験結果 (換算 N 値と推定土層)

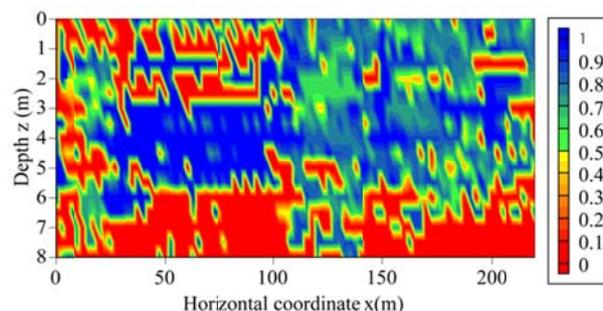


図-4 小田川左岸シミュレーション結果 (N<5となる確率)

小田川左岸における調査および解析結果の一部を図-1から図-4に示している。図-1は、表面波探査(SWM)結果で、全体的な弱層の把握を行った。この結果に対して、水平座標の $x=30\text{m}-100\text{m}$ 付近が最も弱いと推定され、重点調査区間とし、高密度(5m間隔)の調査区間とした。図-2は、CPTの結果であり、換算N値と推定土層を示している。結果、低強度部分は、粘土、もしくはシルト層と推定される。CPTから推定されたN値は、概ね表面波探査の結果によく対応している。図-3および図-4は、インディケータシミュレーションの結果である。図-3は、換算N値の期待値の分布であり、 $x=30\text{m}-100\text{m}$ 付近の弱層の存在が明確である。図-4の確率分布では、高密度区間では、確率が0.1と明確である。一方、 $x=100\text{m}-200\text{m}$ の区間では、CPTが低密度(概ね50m間隔)であるため、確率値も、0.5付近の値が多く見られ、曖昧な結果となった。

⑥研究成果 (つづき)

(4)空気圧による連通試験

1) 水平一次元カラムによる要素実験

水平一次元カラムによる要素実験で空気圧の伝搬状況と段階的な加圧・除圧時の応答挙動を整理し、飽和度及び相対密度の違いによる結果の差異について考察した。その結果、飽和度や相対密度の違いにより伝搬挙動や応答時間が変化する状況を確認したことから、本手法の適用性について指標となり得る一定の有用性を示すことができた。その一方で、水平一次元透気試験での供試体内の密度や飽和度の変化に対する問題点も判明した。

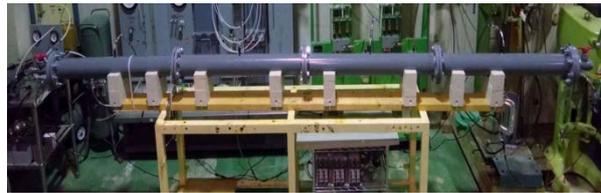


写真-1 水平一次元カラム実験状況

2) 空気圧による連通試験

堤体直下の不飽和透水層を対象に、水ミチ等の弱点箇所を現場で把握する新たな調査法として「空気圧による連通試験」を考案すると共に、試験機プロトタイプ製作・改良を継続し、第3回高梁川での実証実験において30m程度の間隔で配置した調査孔を用いて、空気圧の伝播特性を把握することができた。また、第4回小田川での実証実験では、弱点箇所を抽出する組合せ調査法を一連で行い、「SWM+CPT」による河川縦断方向における緩い砂層体積区間の抽出、「空気圧による連通試験」を用いた、砂層の河川横断方向における連続性を把握することができた。

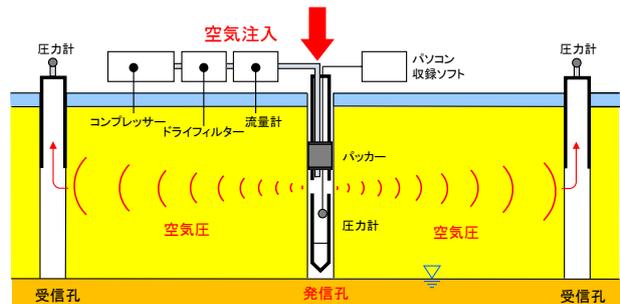


図-1 空気圧による連通試験イメージ

3) 三次元解析

三次元解析手法を用いて、a)弱点箇所の有無、b)発信孔と弱点箇所との位置関係より、受信孔の応答特性に違いが生じることを把握すると共に、現位置試験における調査孔の配置方法として、発信孔に対し対

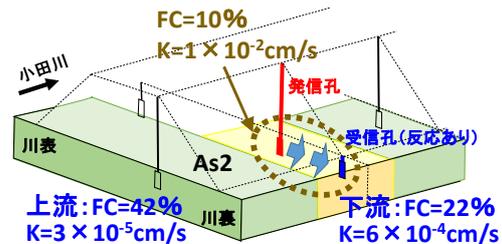


図-2 第4回 実証実験における空気伝播イメージ

称な2箇所以上の受信孔を配置し、応答の相対比較により、弱点箇所を抽出する手法が有効であることが分かった。

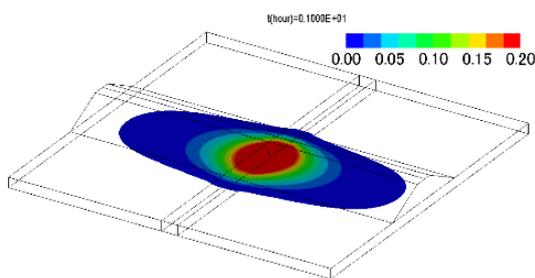


図-12 空気圧の平面分布
(z=1.25m, pa>0.001m)

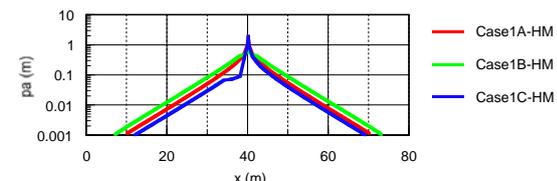


図-13 堤防縦断方向の空気圧分布 (天端)

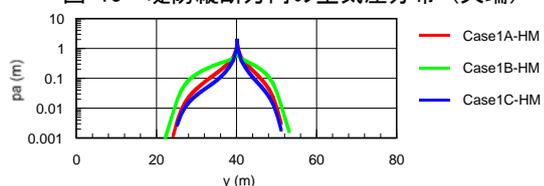


図-14 堤防横断方向の空気圧分布 (弱点箇所)

4) 空気圧による連通試験マニュアル (案)

現地実証実験及び三次元解析結果を踏まえ、「空気圧による連通試験マニュアル (案)」として、①現地での計測手法、②計測結果の評価方法、③現地での適用性の限界と課題整理、についてとりまとめをおこなった。

⑦研究成果の発表状況

- ① 西村伸一・柴田俊文・珠玖隆行・西垣 誠：CPTによる河川堤防の弱点箇所 の同定，第51回地盤工学研究発表会，2016
- ② 舘川 逸朗・藤吉 秀彰・新村 卓也・荻野 一彦・久賀 真一・西垣 誠：河川堤体を対象とした乱れの少ない試料採取と室内不飽和透水試験についての一考察，第51回地盤工学研究発表会，2016
- ③ 藤吉 秀彰・舘川 逸朗・新村 卓也・栗田 永敏・西垣 誠：河川堤体を対象とした不飽和土の透水試験法についての一考察，第51回地盤工学研究発表会，2016
- ④ 小松 満・西原直也・西垣 誠・新村 卓也・舘川 逸朗：空気圧を用いた連通試験に関する水平一次元カラム実験，土木学会第72回年次学術講演会講演概要集，III-108，pp.215-216，2017.
- ⑤ 小松 満・西垣 誠・増山 博之・新村 卓也・舘川 逸朗：河川堤防の基礎地盤材料を用いたパイピング進行性破壊に関する模型実験(その1)，第52回地盤工学研究発表会，D-04，0465，pp.927-928，2017.
- ⑥ 小松 満，西原 直也，新村 卓也，舘川 逸朗，西垣 誠：地盤内の弱点箇所を調査する空気圧連通試験に関する水平一次元カラムを用いた基礎的実験，地盤と建設，Vol.35，No.1，pp.101-108，2017.
- ⑦ Nishimura, S., Shibata, T. and Shuku, T.: Geostatistical Analysis for Identifying Weak Soil Layers in Dikes, Geo-Risk 2017, Geotechnical Risk from Theory to Practice, June 4-6, 2017.
- ⑧ 増山博之・新村卓也・舘川逸朗・小松満・西垣誠：河川堤防の基礎地盤材料を用いたパイピング進行性破壊に関する模型実験(その2)，第52回地盤工学研究発表会，2017
- ⑨ 増山博之・新村卓也・舘川逸朗・小松満・西垣誠：河川堤防の被覆土層のある基礎地盤でのパイピング進行性破壊に関する模型実験，第71回土木学会年次学術講演会，2017
- ⑩ 新村卓也・舘川逸朗・小松満・西垣誠：空気圧を用いた連通試験の河川堤防への適用，第52回地盤工学研究発表会，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。)

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。)

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。)

「河川堤防内の土層構成の調査法に関する研究」について

平成24年に発生した九州北部豪雨における矢部川堤防など，河川堤防の浸透に起因した堤防決壊を事前に防ぐための対策をとることは急務である。一方，わが国の河川堤防の延長は都道府県管理も含めると6万kmを超えており，極めて効率的に弱点箇所を抽出することは喫緊の課題である。

本研究では既往ボーリング間に潜在する弱点箇所を抽出する手法として，①電気式3成分コーン貫入試験(CPT)と表面波探査(SWM)による一次抽出，②空気圧による連通試験による二次抽出，を組合せた手法について，河川堤防への適用性を検討した。電気式3成分コーン貫入試験(CPT)と表面波探査(SWM)の組合せについては，ゆるい砂層の堆積する範囲を絞り込む手法として有効であることが示唆された。また「空気圧による連通試験」については，直轄河川堤防の規模でも計測可能であり，新たな調査法として河川堤防へ適用可能であることが示唆された。今後，「空気圧による連通試験」の実用化に向けては，様々な現場条件(土質・地下水位等)，試験条件(水ミチ等と調査孔との配置，注入空気量等)における試験行い，空気圧の伝播特性情報を蓄積し解析手法との分析を継続することで，評価法等，精度の向上を図る必要がある。

さらに，本研究で提案する調査手法は，調査効率の向上を図る目的から，CPTを活用している。長大な河川堤防において同手法による調査を進めていくためには，調査機の普及も合わせて行う必要がある。

「進行性破壊の発生の素因・誘因となる地盤・堤体条件把握のための模型実験」について

本研究では小田川の漏水箇所の現地発生土を用いて，模型実験を行った。実験の結果，進行性破壊を引き起こす起因として，透水係数・相対密度とともに，粒度特性が重要であることが示唆された。また，基礎地盤特性(粒度，透水係数，密度)・被覆土層の有無により噴砂の生じる位置，パイピング破壊の形態・進行速度，堤体内の局所を含む動水勾配等の異なる特性が把握できた。

基礎地盤材料と堤体材料の条件を変化させて，パイピング進行性破壊が生じる特性を把握する必要がある。

①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。)

河川堤防内の土層構成の調査法に関する研究成果は、既往のボーリング間に潜在する河川堤防の弱点箇所を抽出し、対策工（遮水矢板等）を優先的に進めるべき範囲を具体的に効率的に抽出するための調査手法としての活用が考えられる。