

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
		岡村 未対（おかむらみつ）	愛媛大学大学		教授
②技術研究 開発テーマ	名称	詳細な地表面形状情報を基にした堤体状態診断法の開発			
③研究経費（単位：万円） ※端数切り捨て。		平成29年度	平成30年度	平成31年度	総 合 計
		215万円	181万円	104万円	500万円
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		所属機関・役職（※平成 年3月31日現在）			
二宮 崇		愛媛大学大学院理工学研究科・教授			
全 邦釘		東京大学大学院工学研究科・准教授			
新清 晃		応用地質東京支社・技術部長代理			
⑤研究の目的・目標（様式地河-1、地河-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。） 河川堤防は内部が極めて複雑な構造体であり、また降雨や高水の繰り返し作用による劣化など、経時的に状態が変化する。これに対し、河川堤防の土質データは、およそ1km毎のボーリング調査である。高い不均一性と経時変化、さらに堤体の局所的な欠陥が破堤に繋がる被災の特徴からして、この調査頻度で危険箇所を精度良く抽出するのは困難である。一方、近年ではUAV等を用いた3D測量技術の急速な発展により、高密度・高精度のリアルタイム地表面形状情報を堤防全体について取得することが現実的となってきた。これは被災地点の予測や内部状況の把握に繋がり得る有力な情報であり、これを用いた堤防評価技術は是非とも取り組むべき課題である。 そこで本研究では堤体材料や内部構造、内部状態といった力学的情報を基にしたこれまでの力学の正攻法ではなく、地表面形状情報を基にした新たなアプローチによる堤体健全度評価法を構築する。そこでは、パイピングによって生成される堤体及び基礎地盤内部の空洞（パイピング部）の性状を明らかにすること、またパイピング部の形成により引き起こされる堤体表面沈下性状を明らかにする必要がある、そのため多くの現地調査と精緻な模型実験を行う。また、内部変状を検知するために必要な精度の表面形状のデータ（DEM）を取得するための方法を検討する。UAVや車両に搭載したLP、写真からSfMを用いる方法によるDEM取得法と精度について検討する。これらを基に、表面形状からパイピング進展度を評価する方法を提案する。 また、自動処理によるリアルタイム・パイピング進行度評価法の検討を行う。パイピングの進展に伴いその直上の法面に現れる特徴的な沈下は数cm程度の小さいものである。長い距離の堤防からこのような変状箇所を発見するには、精度の良いDEMを作製し、自動判読技術により抽出することが効率的であり、また高水中にリアルタイムで堤防診断する場合には必須となる。そのため、機械学習によって局所的な鉛直方向変位量から噴砂の位置を予測可能であるかどうかについて、AIの枠組みにより検討を行い高水中のリアルタイムでの損傷進行度評価法構築にむけた課題の抽出を行う。					

⑥研究成果

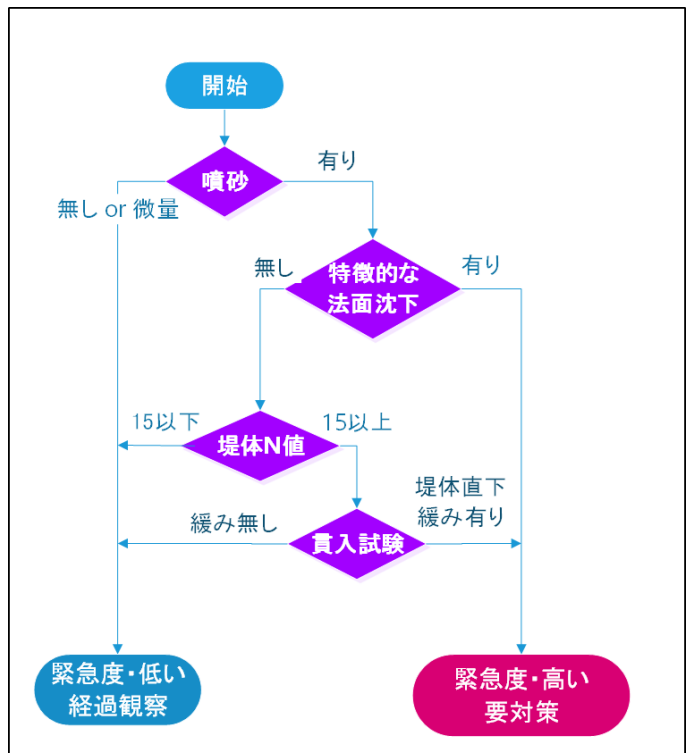
(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

本研究は堤体材料や内部構造、内部状態といった力学的情報を基にしたこれまでの力学の正攻法ではなく、地表面形状情報を基にした新たなアプローチによる堤体健全度評価法の構築を目的とした。また、高水中のリアルタイムでの損傷進行度評価を行うにあたり有用なツールとなり得る AI による変位の自動認識技術についても試行を行い、課題の抽出を行った。

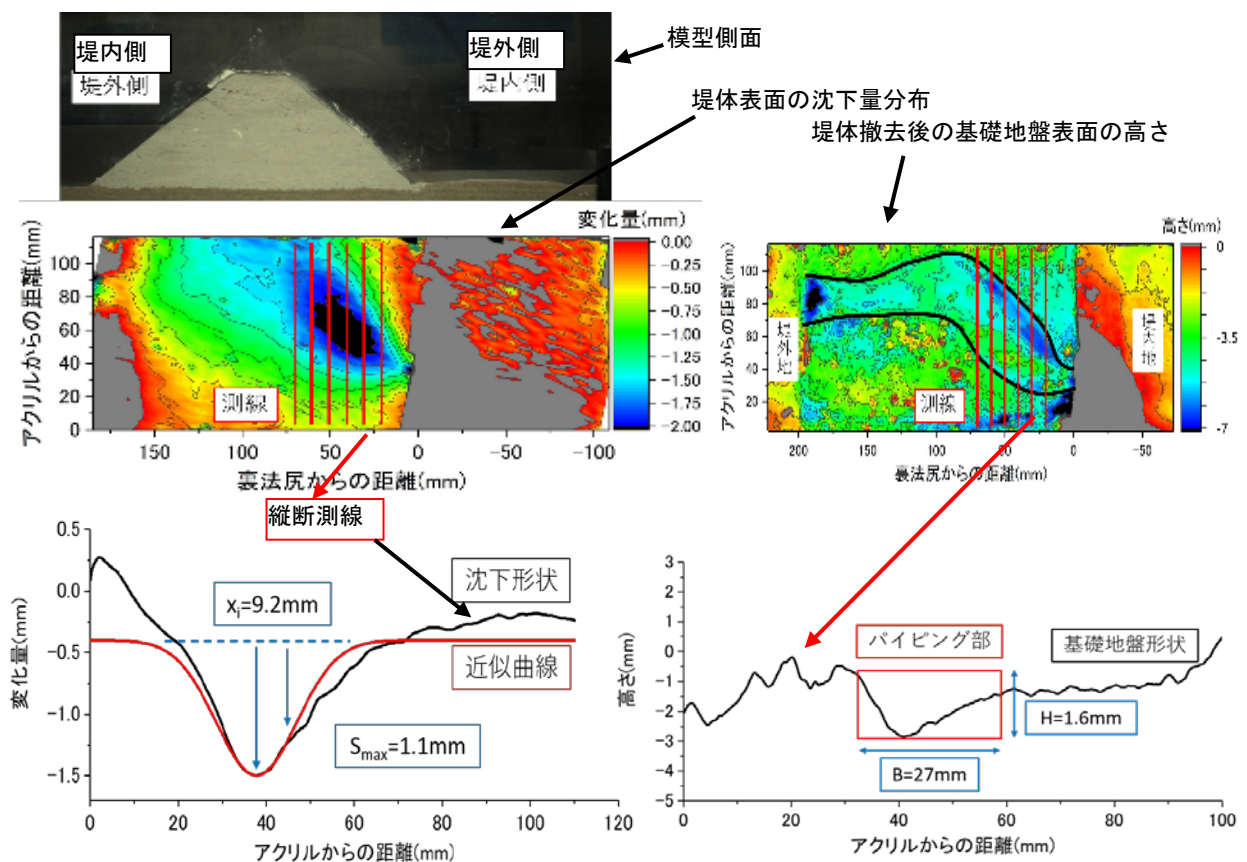
研究の3年目である令和元年度は、堤体表面に現れる沈下性状と内部変状(パイピング)の関係をより明確にすることを目的とし、まず、パイピングによる空洞の規模と形状について検討し、続いてパイピングが発生することにより堤体表面に現れる沈下部の規模と形状を検討した。これにより、堤体表面の DEM に含まれる植生などによる凸凹と、抽出すべきパイピングによる凸凹を分離することが容易になった。さらに、堤体法面 DEM を用い、機械学習によって局所的な鉛直方向変位量から噴砂の位置を予測可能であるかどうかについて、AI の枠組みにより検討を行った。主な成果を以下に述べる。

◆ 堤体表面沈下性状－内部変状関係の確立

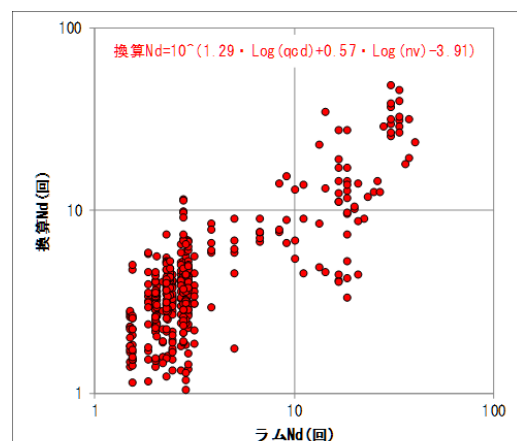
- 2018 年 7 月西日本豪雨での出水により、肱川左岸 18.2k 付近の堤内地で激しい噴砂が発生し、堤防裏法面が幅 12m にわたって沈下した。堤体直下地盤にパイピングが生じたものと考えられたため、被災のメカニズムとパイピングの進展度を把握するとことを目的とし、陥没領域を中心に高密度の中型動的コーン貫入試験、UAV による地表面の詳細な形状測量、および開削調査を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。
 - ミニラム試験を 2m 間隔で面的に実施し、さらに一打撃毎の貫入抵抗を整理した。これより、パイピングにより緩んだ砂層の貫入抵抗が小さく評価できた。また砂層厚が減少した領域を特定できた。
 - 開削調査により、砂層厚さの分布を直接観察し、ミニラムの結果と整合することを確認した。また噴砂口から砂層に続く砂脈、また砂層厚の減少している箇所から上方に伸びるせん断クラックを特定し、噴砂によって砂層から砂が排出されたことにより上部の土層および法面が陥没したことを明らかにした。
 - ネットワーク型 RTK-GNSS 測量と UAV 写真撮影から作製した DEM より、地表面の沈下量分布はミニラムから得られた粘土層下面標高の分布と良く対応し、堤体陥没の主な原因が基礎地盤中の砂層から砂が排出され層厚が減少したためであることを明らかにした。また、パイピングは堤防法尻から川表側に向かっておよそ 10m の位置まで進展していることがわかった。
 - 現在までにパイピングの進展度を現場で調査する有効な方法が無い中、本報告では一つの有力な方法を提示した。パイピングによる堤防被災についての詳細な調査報告事例はこれまで少なく、現象の解明や照査法の高度化のために積極的に調査を行い、事例を蓄積することが必要であることがわかった。



- 表面形状を基にパイピング部を推定する方法の課題について調べることを目的として、河川堤防の高水位を模擬した遠心模型実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった
 - 実験では特にパイピングと堤体表面沈下分布形状を詳細に測定し、それらの関係を検討した。パイピング発生前後の堤体表面高さ及び実験後のパイプ部の形状と大きさを詳細に計測した結果、パイプ部直上の法面には縦断方向にガウス曲線状で深さ 4~6cm 程度（原形スケール）の沈下が見られる。
 - 同じ規模のパイピング部が形成された場合、堤体の土質が砂質土よりも粘性土の方が、また堤体土強度が大きいほど法面に現れる沈下範囲が広い。
 - パイピング部が法尻から川表側に向かって敷幅のおよそ 1/2~1/3 程度まで進展すると、その後パイピング部は外水位が増加しなくても急速に進展して川表側まで貫通する。
 - パイピングが貫通すると大流量の河川水がパイプ部の内部を侵食し急激に拡大させ、直上の堤体が沈下し決壊する。



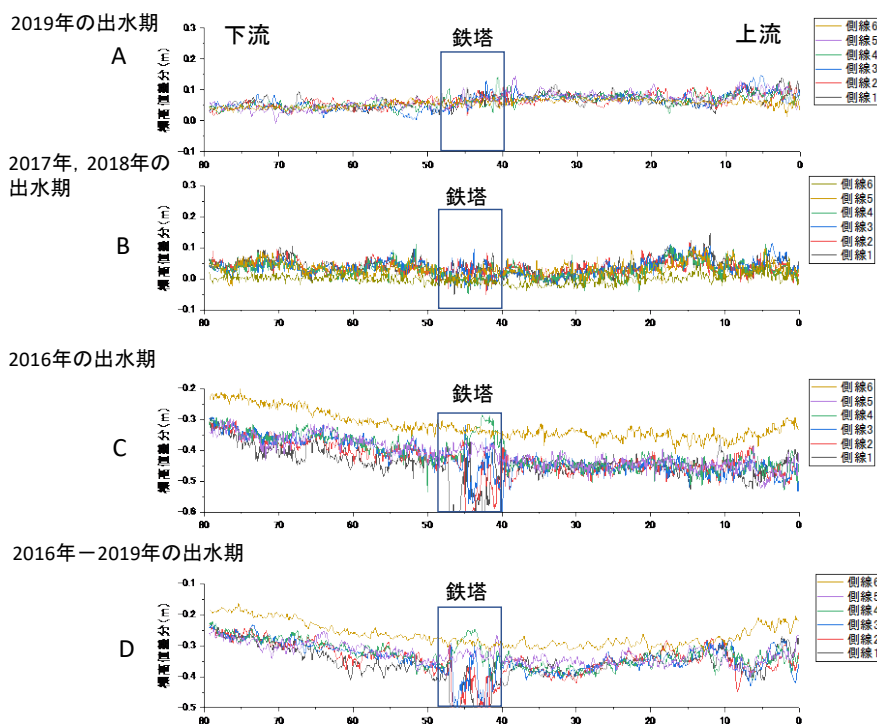
- 貫入試験の効率化を目指し、昨年度に開発したバイブロコーンを改良し、パイピング部調査法としての適用性を確認した。まず、バイブロコーンは深度 1m あたり 30 秒程度で実施できる迅速性を実現し、地盤の局所的な現象であるパイピング部を特定するために多地点で行うのに適した方法とすることができた。また、先端に高感度ロードセルを内蔵させることにより、ロッドの周面摩擦に影響を受けない先端抵抗を計測できるようにした。ミニラムでの Nd 値と今回開発したバイブロコーンの換算 Nd 値は良い相関を示し、パイピング部を効率的かつ精度よく特定す



るための方法としてパイプロコーンが有効であることを確認した。

- 複数時期の DEM によるパイピング進展度の判定を、噴砂が近年生じた那賀川堤防・楠根下流地区の堤防に対して行ったこの地点では、2016 年の出水期前から毎年堤体の DEM を取得しており、その間にも漏水や噴砂が発生している。二時期の DEM の差分をとり期間内の堤体表面高さの変化分布を調べ、変化のあった箇所とそこでの沈下形状を調べた。パイピングによる特徴的な沈下が生じていた箇所が特定でき（下図の 0m～10m 区間）、その沈下の発生期間には噴砂・漏水が発生する水位に近い外水位の出水が発生していたことから、表面沈下によるパイピングの進行評価の妥当性が確認できた。
- また、2019 年 8 月の台風 10 号では法尻から 10m 程度離れた堤内地で激しい噴砂が発生した。しかしながらこの期間の差分沈下量分布には特徴的な沈下領域は見られないことから、この噴砂では堤体直下にはパイピング部が進展せず、堤体の安全性が生じなかったことが確認できた。
- 今年度までに 9 河川 30 地区での DEM データを取得でき、法面形状の自動判定のための機械学習に用いる基礎データを整備した。

期間	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
出水	8月 台風11号	7月 台風11号	1月 9月	3月 8月 10月	7月 西日本豪雨 11月	8月 台風10号 11月
加茂谷観測所 最高水位	23.2m	22.1m	国総研 データ 19.8m	応用 UAV_LP 20.2m	21.4m	研究室 不明 研究室 UAV
楠根下流地区 噴砂・漏水	有	有	不明	不明	不明	有
DEMの沈下	データ無	データ無	有	有	有	変位無



◆ 自動処理によるリアルタイムシステムの検討

UAV や MMS によって取得した堤体の地表面形状データ（DEM）から自動的にパイピングによる変状箇所を抽出することを検討した。

2 章で述べたように、パイピングの進展に伴いその直上の法面に現れる特徴的な沈下は数 cm 程度の小さいものである。目視による堤防点検でも、点検者の熟練度や知識によってこのような僅かな変状を

必ずしも発見できるものではない。また長い距離の堤防からこのような変状箇所を発見するには、精度の良い DEM を作製し、自動判読技術により抽出することが効率的であり、また高水中にリアルタイムで堤防診断する場合には必須となる。そこで、これまでに蓄積してきた変状箇所の堤体法面 DEM を用い、機械学習によって局所的な鉛直方向変位量から噴砂の位置を予測可能であるかどうかについて、AI の枠組みにより検討を行った。那賀川・楠根下流における正解と解析結果の比較を下図に示す。黄色部が噴砂が発生しているポイントであることを意味する（上図が解析結果、下図が正解）。現時点では噴砂の発生地点を必要以上にかなり多めに見積もっており、満足できる精度は得られているとは言い難い。これは、データ数が圧倒的に不足しており、Random Forest の精度が上がっていないことが原因として考えられる。今後は、データ数を大幅に増やすことを目指す。そのためには現地計測だけでなく、実験や数値解析も学習データとして用いる枠組みを構築することが必要である。

特に事例データの少なさは、多くのデータから深層学習させることによって精度が向上する機械学習にとって大きなハンディキャップである。このような現状ではあるものの、現有のデータを元に AI によりどの程度の判定ができるのかを試行した。その結果、現時点では噴砂の発生地点を必要以上にかなり多めに見積もっており、満足できる精度は得られているとは言い難い。これは、データ数が圧倒的に不足しており、Random Forest の精度が上がっていないことが原因として考えられる。今後は、データ数を大幅に増やすことを目指す。そのためには現地計測だけでなく、実験や数値解析も学習データとして用いる枠組みを構築することが必要となると考えられる。



⑦研究成果の発表状況・予定

・国際会議、学会等における発表状況

論文題目：堤体表面沈下分布と貫入試験によるパイピング緩み領域の把握

著者：岡村未対，今村衛，陣内尚子，小野耕平，山本卓男，鎌田卓

会議名：河川技術論文集 第24巻，2018年

論文題目：重信川での噴砂・漏水箇所における高水前後の堤防表面形状の比較

著者：岡村未対，陣内尚子，新清晃

会議名：第5回 河川堤防技術シンポジウム，土木学会，2018年

論文題目：噴砂が生じた河川堤防表面沈下分布と貫入試験

著者：今村衛，岡村未対

会議名：第56回地盤工学研究発表会，地盤工学会，2018年

論文題目：Internal erosion in foundation soil under sand levee and its manifestation on levee surface

著者：M.Okamura, M.Imamura, N.Jin-nouchi

会議名：The 9th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2018)，2018年

論文題目：陥没孔周辺の堤体表面の動態観測

著者：山中大智，岡村未対

会議名：第6回 河川堤防技術シンポジウム，土木学会，2019年

論文題目：数値標高モデルと高密度貫入試験による河川堤防のパイピング部の特定

著者：今村衛，岡村未対，小野耕平

会議名：第73回 土木学会年次学術講演会，土木学会，2019年

論文題目：LPで取得した堤体表面DEMデータ精度に与える植生の影響について

著者：陣内尚子，岡村未対

会議名：第73回 土木学会年次学術講演会，土木学会，2019年

論文題目：パイピング発生時に堤体強度が堤体表面沈下性状に及ぼす影響

著者：今村衛，岡村未対

会議名：第58回地盤工学研究発表会，地盤工学会，2020年（投稿中）

論文題目：高水時のパイピング形態に及ぼす地盤粒度と堤体土強度の影響

著者：今村衛，岡村未対，露口祐輔

会議名：河川技術論文集 第26巻，2020年（投稿中）

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。）

NHK総合	「おはよう日本 朝7時台のニュース」（全国）	2019年2月5日
NHK総合	「ニュース ヒメポン！」（愛媛）	2018年9月6日
NHK総合	「ニュース ヒメポン！」（愛媛）	2019年12月19日
NHK総合	「明日へつなげよう」（全国）	2020年2月16日

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。)

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・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。)

パイピング現象はその詳細なメカニズムがいまだ解明されていない中、毎年高水中に多くの噴砂や漏水が発生している。その中でも、堤体の損傷度合いによって優先的に対策すべき箇所を判別することは重要なことである。この3年間の研究で、表面形状データからパイピング進展度を評価する方法をほぼ実用に供せ得るレベルまで完成させることが出来た。一方、表面形状からパイピングの進展度を自動で検出・評価する方法については、機械学習に用いる事例データが圧倒的に不足しているために精度が不十分であることが明らかとなった。この技術の更なる高度化のためには、高水前後の表面形状を用いた検討が不可欠であり、そのため事前(変状発生前)のDEMデータ取得が課題である。また、噴砂地点の調査を今後も継続し、データの蓄積につとめる必要がある。

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。)

この技術は通常の堤防点検時に堤体の健全度を評価できることに加え、非常時(高水中)に変状の進展度を評価することにより優先的な水防活動箇所の選定や避難指示発令のための情報として使用することを想定している。