

令和元年6月28日現在

機関番号：16301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18907

研究課題名(和文) 表面の沈下パターンから河川堤防の健全度と破堤危険度をリアルタイムで評価する方法

研究課題名(英文) Internal Erosion in a Foundation Soil under a Sand Levee and its Manifestation on the Levee Surface

研究代表者

岡村 未対 (Mitsu, Okamura)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：50251624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：降雨や高水の浸透により生じる堤体形状の微小だが特徴的な変形パターンを精緻な実験により明らかにした。そこでは、降雨と洪水の外力パターンを変化させ、堤体表面形状の高精度3次元測定を行い、浸水や侵食、堤体劣化の進行に伴って生じる微小で特徴的な表面形状変化パターンを特定した。続いて、近年の高水で変状が発生した堤防の現場において、堤体表面形状をUAVからのステレオ写真およびレーザー測量により詳細に測定し、上述のモデルで堤体の内部状況を推定し、現場で行われた詳細な調査結果と比較することによりモデルの推定精度を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、激甚な豪雨による高水が頻繁に発生して河川堤防が破堤しており、その防止が重要な課題となっている。今後は降雨や高水の繰り返し作用により、堤体土が徐々に吸い出され劣化が進行し、パイピングによる破堤の増加が危惧されている。しかし既往の調査法やセンサーの設置でパイピング破壊の進行を検知することはほぼ不可能である。

本研究は、近年の技術開発によって取得することが可能となった高密度・高精度のリアルタイム堤体表面形状情報を利用し、新たなアプローチによる堤体の健全度評価及び高水中のリアルタイムでの損傷進行度評価法の構築の基礎を築いたものである。

研究成果の概要(英文)：River levees occasionally fail during flooding because of the mechanics of internal erosion or piping within or below the levees. Current inspection methods cannot detect the pipes until it manifests itself at the exterior surface. There is a strong need for non-destructive techniques that can identify internal damage. In this study it was found that specific deformation pattern appears on the surface of levees just above pipes. A method was established for estimating the size and location of the pipes based on the characteristic shape of the de-formed slope. The method was applied to levees, where significant sand boils occurred at the levee toe during recent flooding events. In addition, a number of mini-ram soundings were conducted at small intervals to identify the pipe locations in a more direct manner. It was confirmed that the penetration tests were effective in detecting the pipe locations. The detected locations compared well with those estimated from the surface topography.

研究分野：土木工学

キーワード：河川堤防 洪水 浸透 パイピング DEM

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

わが国では激甚な豪雨とそれによる高水で河川堤防が頻繁に被災しており、被災およびそれによる破堤・決壊の防止が重要な課題となっている。わが国の破堤事例を見ると、堤体の高さや幅が計画に達していない暫定的な堤防を外水が越流し、それをきっかけとする破堤が大半を占めているが、越水せずに、あるいは計画高水位以下の外水で堤体が被災し、決壊に至ることもある。それらの主なメカニズムが裏法の滑り、堤体や基礎地盤のパイピング、ならびに表法の流水による浸食・洗掘である。

土構造物である河川堤防は、越流した流水により法尻付近に作用する大きなせん断力に対して極めて弱い構造物であり、越水させないよう堤高を確保することが堤防整備の原則である。また、流水による表法面の被災についてはその被災メカニズムは明確であり、表法面の護岸整備や零筋の修正などの対策が進められている。それに対し、パイピングやパイピングが引き金となりうる裏法面の不安定化による堤防被害については、未だにメカニズムの解明に向けた調査研究が進められている段階であり、被災の発生やその進行から破堤までの予測は極めて困難である。この、未だメカニズムの解明に至っていない破壊現象が本研究で対象とする事象である堤体や基盤に比較的透水性の良い水みちが存在すると、堤体土が徐々に吸い出され、堤防機能が低下しパイピングによる破堤の危険性が高まる。パイピング破壊はモグラ等の動物の穴が破堤のきっかけになることさえあるなど初期には極めて局所的な現象である。また、河川堤防は浸透水による内部侵食が引き起こす経年劣化を考慮しなければならない構造物である。四国の河川堤防も砂やレキなどの透水性基礎地盤上に建設され、また堤体にも砂やレキが用いられているものが多く存在するため、パイピングは堤防管理上の重大な懸案事項の一つである。

わが国の河川堤防の調査では、これまでに膨大な予算を投入しおよそ延長 1km 毎のボーリング調査と堤体の力学的な安定性評価が行われたが、不均一性が極めて高く、ごく局所的な欠陥が破堤に繋がる被災の特徴に比してこの調査頻度は、特にパイピングに対する弱部を精度良く抽出するにはあまりにも低い。また、これまで地盤工学分野では均一な盛土の降雨や高水による浸透・侵食・法面崩壊の予測について、現象の解明と評価・予測法の研究が行われ、学術的に大きな進展を見た。しかしながら、内部構造と材料力学特性の存在を前提とした現在の力学フレームの中だけでは、堤防の破堤危険箇所の抽出や内部の損傷状況の把握はできない。すなわち、材料特性や内部構造が不明な堤防については、現場において堤体およびその周辺の目視点検で変状を発見する以外方法はなく、変状発生前に危険箇所を精度良く検知する方法を持っていない。さらに、浸透により漏水や噴砂などの変状が発生した堤防について、構造物としての損傷度合いを精度よく評価する技術も存在しない。その例として、平成 27 年高水で被災した鬼怒川堤防で行われた調査が挙げられる。複数の大規模な噴砂や漏水が発生した左岸 13.2k 付近の堤防において、噴砂に通じる堤体直下のパイピング部やゆるみ部を地中レーダーや比抵抗、速度検層によって検知しようと試みたが、最新の物理探査技術でも存在するはずのゆるみ箇所を特定することはできなかった(2015 年関東・東北豪雨災害土木学会・地盤工学会合同調査団関東グループ, 2016)。この事例に限らず、地盤や堤体内のパイピング部の探査に成功した事例報告は国内外を問わずこれまでに存在しない。パイピングなどの破壊現象は、時間とともに徐々に進行するいわゆる進行性破壊であるが、変状が現れる前に察知することは難しく、また変状が発見された場合にもその堤防が既に破堤寸前で一刻も早く本格的な対策が必要なのか、あるいはまだ変状が進行していない初期段階で、当面は応急対策で十分機能を発揮するのかが判定することが現状ではできない。

高水時に堤防に作用する外力は降雨や高水の浸透であり、堤体の湿潤化が不安定化の原因である。それにより発生する堤体の変状、すなわちパイピングによる堤体内空洞形成、法面滑りなどは、結果として表面に現れる変形パターンが異なる。岡村ら(2017)は、堤防の内部構造や力学特性が不明であっても、cm オーダーの詳細な堤体の応答、および内部損傷の結果として生じる表面の残留変形を知ることにより、内部状態の推定と危険度の判定に結びつけられる可能性が高いと考え、パイピングによる堤体の空洞化について、法面に特徴的な形状の陥没が現れることを実験で確認し、沈下分布からパイピング部の位置と大きさを特定する方法を考案した。また平成 27 年 9 月に被災した鬼怒川堤防で噴砂が生じた地点の堤防法面で特徴的な形状の沈下分布を確認し、その地点における簡易貫入試験で特定した緩み域と考案した方法による緩み域がほぼ一致することを示した。これらによって単なるパイピング現象のみならず、法面滑り破壊や法尻付近の基盤の不安定化など、堤防を不安定化事象毎、及びそれらの複合時に現れる表面形状パターンを特定し、表面形状から堤防の損傷状態を定量的に評価できる可能性があることが示された。長大な河川堤防の法面の形状を詳細に捉えるための技術については、近年急速に発展しているレーザープロファイラー(LP)や写真画像を用いた 3D 測量技術の利用が考えられる。これらの技術の応用により、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。

2. 研究の目的

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法構築にむけた課題の抽出も行う。

3. 研究の方法

近年の高水で変状が発生した堤防において、堤体表面形状を UAV 等を用いた画像測量技術により詳細に測定した。予め検討している堤体の表面変形パターンと内部状態の関係をを用い、計測した堤体の内部状況を推定し、現場で行われた詳細な調査結果と比較することによりモデルの有効性を確認した。さらに取得した堤体表面形状に関する膨大な点群データから内部状態を推測する実務的な方法を構築した。この技術は将来的に通常の堤防点検時に堤体の健全度、漏水や噴砂が発生した地点での変状の進行度合いを評価することに加え、非常時（高水中）にリアルタイムで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されることを想定している。

4. 研究成果

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法構築にむけた課題の抽出も行った。そこでは近年の高水で変状が発生した堤防において、堤体表面形状を UAV 等を用いた画像測量技術により詳細に測定した。予め検討している堤体の表面変形パターンと内部状態の関係をを用い、計測した堤体の内部状況を推定し、現場で行われた詳細な調査結果と比較することによりモデルの有効性を確認した。さらに取得した堤体表面形状に関する膨大な点群データから内部状態を推測する実務的な方法を構築した。この技術は将来的に通常の堤防点検時に堤体の健全度、漏水や噴砂が発生した地点での変状の進行度合いを評価することに加え、非常時（高水中）にリアルタイムで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されることを想定している。得られた主な成果を以下に述べる。

A. 堤体表面形状と内部変状の関係の検討

高知県を流れる後川および徳島県を流れる那賀川の堤防において、近年の出水により噴砂が発生した箇所を対象として表面形状の詳細な DEM を取得し、それを基に筆者らの構築したモデルによって堤体内部のパイピング部を推定した。これらの区間ではいずれも堤体底面から約 2m までは粘土質砂礫や砂質粘土の層が分布し、その下に基礎地盤の砂礫層が堆積しており、パイピングが生じやすい層構成の地盤である。また、パイピング部の推定結果の妥当性を検証するために、現地で高密度の貫入試験を実施した。そこで貫入試験は法尻から天端に向かって 4 測線を設定し、各区間で 29～40 箇所で行った。

堤体表面にパイピング特有の特徴的な沈下が見られた 5 か所は、何れも噴砂が生じた位置と一致し、また噴砂が生じていない区間には特徴的な凹部が無いことから、パイピングによって生じた堤体表面沈下であると考えられる。抽出した箇所の表面沈下形状を正規分布曲線で近似し、沈下量の最大値と変曲点の距離から岡村らの方法によってパイピング部を推定した。推定されたパイピング部は高密度貫入試験で特定された緩み位置とほぼ一致した。今回は高水後に計測した表面形状を基にパイピング部の抽出を行っているが、この表面形状には高水による沈下だけでなく、高水前にすでに何らかの原因で存在した沈下も含まれている。高水前の DEM データを取得しておき、高水前後の標高差から高水による沈下のみを抽出すれば、パイピング部の推定精度が向上するものと考えられる。

本評価法の適用性を確認するために、別途現地調査を行った。これは 2015 年以降に噴砂や漏水が発生した堤防およびその周辺を調査した結果を取りまとめたものである。これにより、堤体 N 値が 12 までの堤防で表面に特徴的な凹みが見られており、少なくともこの程度の N 値までは堤体表面に変形が現れることが確認できた。そこで、常時の点検におけるパイピング進行度の実用的点検法を提案する。高水による漏水や噴砂などの変状履歴がある堤防を対象とし、パイピングの進行度に応じた対策の緊急性を判断する材料とするものである。以下に提案方法の流れを示す。

検討の対象とする箇所の絞り込み

まず、パイピングは地盤中の土砂が移動し地表に脱出することによって形成されるので、噴砂が生じた箇所が検討対象となり、それが無ければパイピング部は発生していないと考えてよい。ただし、過去の記録や高水中の痕跡が残っていない場合など、噴砂の有無が不明の場合もある。その場合にはあらかじめ検討対象を絞ることはできず、全域を検討対象とする。

堤体表面形状情報（DEM）の作成と分析

LP や SfM などによって DEM を作成する。このとき、除草が行われた状態、あるいは堤体表面が目視できる状態であることが必要である。また、測定点密度は概ね 400 点/m² 程度以上が望ましい。それによって約 5cm 間隔の格子メッシュデータが得られることになる。

DEM データから法面を抜き出し、平面近似する。近似平面からの偏差量を堤体の凹凸とし、凹凸の平面分布データとする。

凹凸の平面分布データからパイピングにより発生する特徴的な形状と大きさの凹部を抽出する。

抽出した凹部の形状から岡村ら (2017) のもでのよりパイピング部の位置と規模を推定

する。

堤体のN値が10ないし15以上の場合、およびパイピングが生じる可能性のある土層から堤体表面までの高さが5m以上の場合、パイピング部が存在しても堤体表面に沈下が現れない可能性がある。その場合には、高密度貫入試験にてタイピング部の有無を特定する。

高密度貫入試験として、ミニラム試験を行う。縦断方向の測線上を50cm間隔で貫入試験を実施する。調査深度はパイピング部が起きると考えられる土層まででよい。

高密度貫入試験結果（周面摩擦の補正をしたもの）のNd値がゼロの深度をパイピング部あるいはパイピングによる緩み域とする。

表面変位から推定したパイピング部、あるいは高密度貫入試験で特定した緩み域が存在しなければ対策は当面は不要である。また、存在する場合でも、存在する位置が堤内側法尻付近のみであり、川表側に向かって進んでいなければ対策は当面は不要である。

上記の で、堤体のN値>15の場合および直上の土被り厚さが5m以上の場合を適用範囲の閾値としている。これについて、これらの値はこれまでに堤体表面に凹部が現れた実績を基に暫定的に決めた値である。そのため、今後は事例を蓄積しながらこれら以上の範囲における適用性を確かめていくことが必要である。

B. UAV, SfM による高精度堤体表面形状データ取得法の検討

今日ではDEMをLP(レーザープロファイラー)で取得することができるが、河川堤防の場合には植生の影響が懸念される。特にLPを搭載したMMSでは、路肩走行の自動車から斜め下方に向けてレーザーを照射するため、堤体表面への入射角は小さくなり、植生の影響を強く受けることが想定される。そこで

本研究では、MMSに搭載したLPで測定した堤体形状データを用い、堤体表面形状データの精度に及ぼす法面への入射角の影響を漏水が発生した被災箇所と無被災箇所と比較検討した。その結果、除草から1カ月以内の比較的条件的良い(植生他繁茂していない)時期であっても入射角が小さいと測定誤差が大きくなり、数cm程度以下の誤差で表面の沈下分布を計測するためには除草後でもレーザーの入射角をおよそ40°以上とすることが必要であることがわかった。また、三次元座標DEMデータは、データのメッシュ間隔が小さいほどデータ点数が多く、堤防のように横断方向にも幅が広く縦断方向に長い構造物の場合にはデータサイズが膨大になり得る。データサイズは処理時間に直接影響するため、高水中のリアルタイムでの内部変状推定を目指すときには適切なメッシュ間隔のデータを取得することが重要である。そこで、二時期のDEMから表面形状の変化を求め、そこから特徴的な表面形状変化を特定することを想定し、適切なメッシュ間隔の検討を行った。その結果、DEMのメッシュ間隔は捉えるべき窪みの幅の約1/6以下であることがわかった。パイピングによる堤体表面の凹み幅は、これまで収集した事例からすると少なくとも約50cm以上であることから、DEMはおよそ8cm間隔とするのがよい。

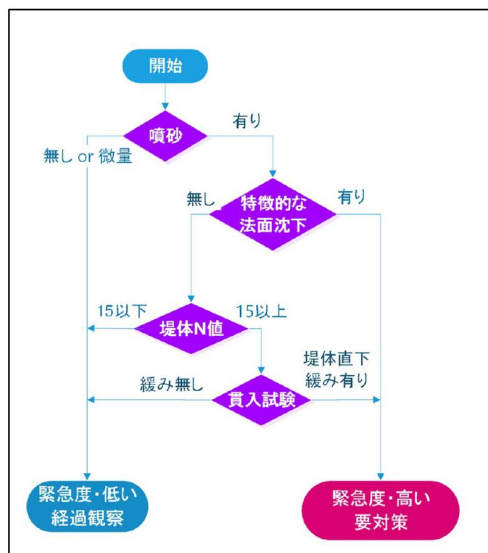
5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

岡村未対, 前田健一, 西村柁哉, 高辻理人, 石原雅規, 品川俊介, 今村衛, 北川で繰返し発生した陥没を伴う噴砂の詳細メカニズム調査, 河川技術論文主集, 第25巻, pp.7-12, 2019 査読有

岡村未対, 今村衛, 陣内尚子, 小野耕平, 山本卓男, 鎌田卓, 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, 河川技術論文主集, 第24巻, pp.529-534, 2018, 査読有

岡村未対, 平尾優太郎, 前田健, パイピングにより堤体表面に現れる沈下分布の特徴, 河川技術論文主集, 第23巻, pp.393-398, 2017, 査読有



〔学会発表〕(計 7 件)

田村元希, 岡村未対, 金子奨一郎, 河川堤防の高水時パイピングの進展に及ぼす粒径の影響, 第 54 回地盤工学研究発表会, CD-ROM, 2019

今村衛, 岡村未対, 小野耕平, 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, 土木学会第 73 回年次学術講演会, CD-ROM, 2018

陣内尚子, 岡村未対, 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, 土木学会第 73 回年次学術講演会, CD-ROM, 2018

陣内尚子, 岡村未対, UAV・MMS で取得した植生のある堤防堤体表面 DEM データ精度への入射角の比較, 平成 30 年度技術研究発表会(土木学会四国支部), CD-ROM, 2018

今村衛, 岡村未対, 小野耕平, 数値標高モデルと貫入試験結果による堤防基礎地盤の緩み領域の推測, 第 53 回地盤工学研究発表会(地盤工学会), CD-ROM, 2018

M. Okamura, M. Imamura & N. Jin-nouchi, Internal Erosion in a Foundation Soil under a Sand Levee and its Manifestation on the Levee Surface, The 9th Int. Conf. on Scour and Erosion, ICSE2018, CD-ROM, 2018

岡村未対, 陣内尚子, 新清晃, 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, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム, 2017

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 二宮 崇

ローマ字氏名: Ninomiya Takashi

所属研究機関名: 愛媛大学

部局名: 理工学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 20444094

(2)研究協力者
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。