

## パイピング進展メカニズムと現地調査に基づく河川堤防の 簡易な弱部抽出フローの提案

### A proposal of simple weak part extraction flow of river embankment based on piping progress mechanism and field survey

牧洋平<sup>1</sup>，前田健一<sup>2</sup>，高辻理人<sup>3</sup>，伊神友裕<sup>4</sup>

1 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・E-mail address 31415084@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター

3 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻

4 名古屋工業大学・社会工学科

## 概 要

近年、気象条件の変化により河川の高水位継続時間が長期化され河川堤防のパイピング破壊が増加している。既往の模型実験から河川堤防のパイピングメカニズムは堤体—基礎地盤の地盤特性により大きく異なり特に堤体の強度が高く、透水層の上に難透水層が被覆している複層構造基礎地盤を有する場合、パイピング破壊の危険度が高いことが明らかになった。今後はこれらの情報をもとに、現地の堤防においてもパイピングの危険性が高い箇所を抽出していく必要がある。そこで、本稿では実際に台風や豪雨により被災した地点で簡易貫入試験や電気探査、トレンチ掘削調査等を実施した結果を踏まえて、パイピング危険箇所の抽出およびパイピング進展メカニズムについて検討した。さらに、数値解析と模型実験による結果からパイピングの危険度を判定する簡易点検フローを作成し、実堤防の被災事例を基にフローの妥当性を検討した。

キーワード：河川堤防，パイピング，現地調査

## 1. はじめに

近年、河川水が透水性基礎地盤に浸透することで、堤内において漏水や噴砂が発生する被災事例が増加している。また、平成24年に矢部川堤防が決壊した事例のように、高水位の外力が長時間作用することで堤内側の漏水や噴砂の発生・継続を助長し、パイピング破壊に至る危険性がある。そこで、パイピングの進展によって河川堤防が損傷・決壊する危険性の高い水理—地盤の総合的な条件を力学的に把握する必要があり、それに基づく重点監視箇所を抽出するための重要指標を見出すことは今後の河川管理には不可欠な課題である。

既往の模型実験から河川堤防のパイピングメカニズムは堤体—基礎地盤の地盤特性により大きく異なり、特に堤体の強度が高く、透水層の上に低透水層が被覆している複層構造基礎地盤を有する場合、パイピング破壊の危険度が高いことが明らかになった<sup>1)</sup>。今後はこれらの情報をもとにパイピングに対する危険な基礎地盤構造をさらに細かく検討し、実際の現場に適用可能な評価指標を作成する必要がある。

西村らは模型実験、浸透流解析等の結果をふまえて図1のような、堤体—基礎地盤構造や堤内外の地形に着目した河川堤防のパイピング危険度の力学的点検フローを提案している<sup>2)</sup>。このフローは堤体の強度が比較的高い条件下、まず最重要項目である堤体を支持する基礎地盤構造（層構造、被覆土層厚、透水係数比）について評価し、その後、堤内・堤外の地形（行き止まり距離、透水層の露出、堤内地の不陸）について評価することで、河川堤防のパイピング破壊に対する危険度を定量的に分類できるものである。また、現時点で既知の範囲で子吉川、常呂川、矢部川、鬼怒川、北川、長良川の6河川の被災箇所のデータから、点検フローに従い各箇所のパイピング危険度を分類した結果、点検フローで示された危険度が上昇するにしたがって実際の被災レベルも大きくなっており、点検フローによって実際の被害の大きさを定量的に評価可能であることも報告されている<sup>3)</sup>。よって、今後は被災した地点の基礎地盤構造および堤内・堤外の地形情報や噴砂等の現地の被災情報を蓄積していくことで、事前にパイピング危険箇所を把握することができる。

そこで、本稿では透水性基礎地盤に起因する特徴的な浸

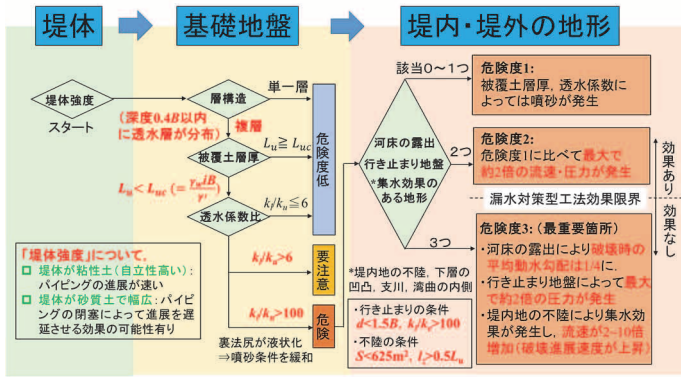


図 1 堤体—基礎地盤構造に着目した河川堤防のパイピング危険度の力学的点検フロー

透被害が発生した北海道常呂川、宮崎県北川、秋田県子吉川の3カ所で実施した簡易貫入試験、電気探査、トレンチ掘削調査の結果から、パイピング進展メカニズムを検討し、それぞれの調査内容の必要性・有用性についてまとめた。

また、河川堤防の現地調査法について整理し、点検フローに示す各項目を現地で調査するために必要な調査方法および調査方針を提案した。

## 2. 噴砂動態からみる基礎地盤の上層厚の推測

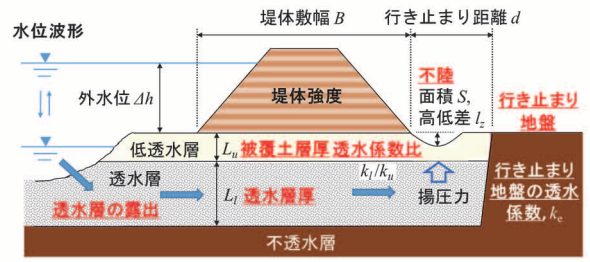
### 2.1 噴砂動態と基礎地盤の上層厚の関係

図 1 に示すように複層構造基礎地盤の上層厚（被覆土層厚）が薄いとパイピングの危険度が高いことが定量的に示されている。また、既往の模型実験から、上層厚が薄いほど、発生する噴砂の個数が多くなり、直径は小さくなるのがわかっている<sup>2)</sup>。したがって、複層構造基礎地盤において、堤内で発生した噴砂の個数や大きさの情報から基礎地盤の上層厚を推測することでパイピングの危険度を評価できる可能性が示唆された。そこで、被災後の福岡県矢部川、北海道常呂川で撮影された噴砂情報と同地点の断面データをもとに、現地で発生した噴砂の個数や大きさ基礎地盤の上層厚の関係について検討した。

### 2.2 現地の噴砂動態について

図 2、3 に現地で発生した噴砂の状況と断面データから求めた基礎地盤の上層厚の関係を示す。図 2、3 に示すように、現地で発生した噴砂についても上層厚が薄いほど噴砂の個数が多く直径が小さい傾向が確認できた。一方で上層厚が厚いほど噴砂の個数が少なく直径が大きくなる傾向となっていた。したがって、現地においても模型実験で観察された噴砂動態と上層厚の関係は一致しており、被災後の現地調査では噴砂の個数や大きさに関する情報を収集することで、パイピングの危険性が高い箇所を抽出することに繋がると考えられる。

## 3. 簡易動的コーン貫入試験からみるパイピング進展メカニズム



地点	16.0k	11.8k
噴砂の状況		
詳細	小さくて多い箇所 直径40cm以下の噴砂が30個程度	大きくて少ない箇所 直径1mの噴砂が3個程度
上層厚 (低透水層)		
	1.6m	2.5m
	実験と一致	

図 2 噴砂動態と上層厚の関係（福岡県矢部川）

地点	26.8k	24.6k
噴砂の状況		
詳細	小さくて多い箇所 直径60cm以下の噴砂が21個	大きくて少ない箇所 直径2mの噴砂が1個
上層厚 (低透水層)		
	0.5~1.0m	1.5~2.0m
	実験と一致	

図 3 噴砂動態と上層厚の関係（北海道常呂川）

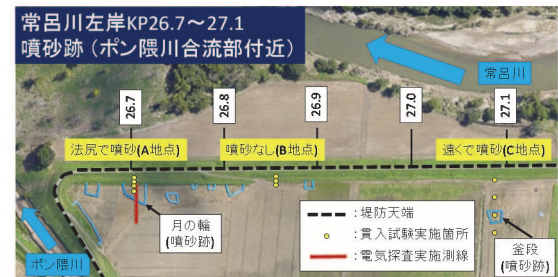


図 4 調査地点と貫入試験実施箇所の全景図

### 3.1 調査実施地点と試験方法

2016年8月に発生した台風11号により被災した北海道常呂川において現地調査を実施した。調査では簡易動的コーン貫入試験機を用いて堤体及び基礎地盤の緩みを測定し、噴砂が発生した地点の水道の特定と水道形成メカニズ

ムの解明を試みた。調査の実施は2017年7月及び10月であり被災から約1年経過しているが、噴砂等により形成された地盤の緩みは水位低下後も残り続けることが実験で確認されている<sup>3)</sup>。よって出水によって形成された地盤の緩みは出水後であっても観測可能と判断し、本試験を実施した。

図4に貫入試験の実施箇所を示す。調査箇所は常呂川左岸 KP26.7~27.1 のポン隈川合流部付近で、堤体の  $N_d$  値は平均5程度、法勾配は約2.5である。同地点には噴砂が多数発生しており、複数の釜段・月の輸工が施されていた。試験は法尻で多数の噴砂が発生した箇所 (A 地点)、噴砂が発生しなかった箇所 (B 地点)、法尻から離れた堤内側で噴砂が発生した箇所 (C 地点) の被災形態の異なる3箇所、法尻と堤内側を中心に実施した。また、簡易動的コーン貫入試験機は質量5kgのハンマーを50cmの高さから自由落下させ原位置における土の貫入抵抗を換算  $N$  値  $N_d$  として求める装置であり、可搬性が高く傾斜面でも適用性が高い。 $N_d$  は  $N_d = 10 \times (\text{打撃回数}) / (\text{貫入量})$  で算定する。先端コーンの直径は25mmである。試験の様子を図5に示す。また、同地点では貫入試験と同じ測線で応用地質の倉田らが電気探査を行っている<sup>4)</sup>。

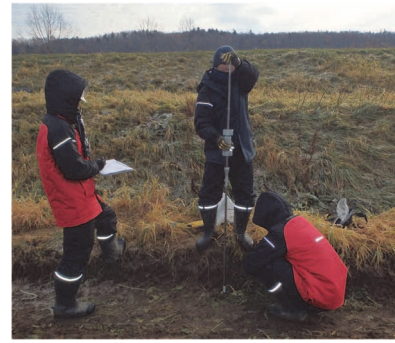


図5 簡易動的貫入試験の様子

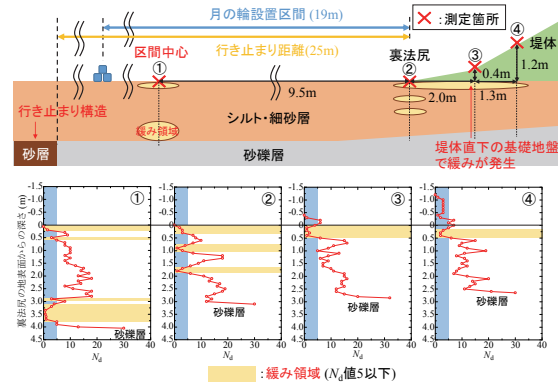


図6 (A地点)の貫入試験結果と断面の概要図

### 3.2 試験結果および考察

#### 1) 法尻で多数の噴砂が発生した箇所 (A 地点)

A 地点では月の輸工設置区間の中心 (①) と裏法尻3箇所 (②~④) の計4箇所貫入試験を実施した。図6にA地点における貫入試験結果及び断面の概要図を示す。なおグラフの縦軸は裏法尻先端 (②) の基礎地盤地表面を原点とした深度である。また、相対的に  $N_d$  値が小さい領域 ( $N_d \leq 5$ ) を緩み領域と定義し整理を行った。図より①で深度3.0~4.0m, ②で深度1.0mと1.75mに緩み領域が確認された。地表面から深い位置に局所的な緩みが生じており、噴砂に伴う土粒子の流出によって形成された緩み領域だと考えられる。また、いずれの地点でも基礎地盤の表層は柔らかく、さらに緩みは堤体直下の基礎地盤でも確認された。模型実験においても、裏法尻の基礎地盤から堤外側へ緩みが進展することでパイピングに至ることが明らかになっており、現地においても同様の現象が発生していた可能性がある。

また、A地点の電気探査の比抵抗分布を図7に示す。なお各比抵抗値における土質凡例は、オーガーボーリングにより現地で採取した試料から推定したものである。図より、透水性の高い礫混じり砂層は堤体から堤内方向へ25m程離れた地点で途切れており、いわゆる行き止まり構造になっていることが分かる。この行き止まり構造により基礎地盤内の圧力が上昇したため、A地点では特に多数の噴砂が発生した可能性がある。

#### 2) 噴砂が発生しなかった箇所 (B 地点)

B地点では堤内側の3箇所 (①~③) で貫入試験を実施した。図8にB地点における貫入試験結果及び断面の概要

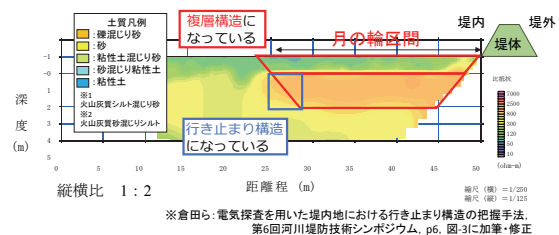


図7 (A地点)の電気探査の結果

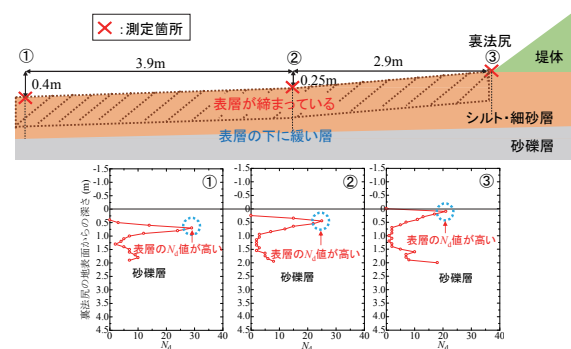


図8 (B地点)の貫入試験結果と断面の概要図

図を示す。深度の原点は裏法尻先端 (③) の基礎地盤地表面である。図よりいずれの測定箇所でも地表面から0.7m程度の表層の  $N_d$  値が高く、締め固まっていることが確認できる。表層に締め固まった地盤があることで、噴砂の発生を防いでいたと考えられる。しかし、表層の下は非常に緩い層が続いており、周辺で発生した噴砂等によって地盤内部が流動していた可能性がある。

### 3) 法尻から離れた堤内側で噴砂が発生した箇所 (C 地点)

C 地点では堤内側の 4 箇所 (①～④) で貫入試験を実施した。図 9 に C 地点における貫入試験結果及び断面の概要図を示す。図より裏法尻の④は表層が締め固まっております、噴砂が発生しにくい地盤条件である。一方、堤内側の①～③では表層が軟らかく、深い深度まで緩み領域が連続して分布していた。また①～③の貫入試験は砂礫層と考えられる層によって貫入が継続不可能となり試験を終了した。釜段設置箇所の直上である②で最も浅い位置に砂礫層が分布しており、いわゆる被覆土層が薄くなっていたため②で選択的に噴砂が発生したと予想される。また④では深度 3m まで砂礫層は確認できず、C 地点断面において A 地点、B 地点と比較して砂礫層が堤外まで連通していない可能性がある。よって C 地点に関しては、浸透流は縦断方向に続く砂礫層によって釜段設置箇所に供給されていた可能性がある。

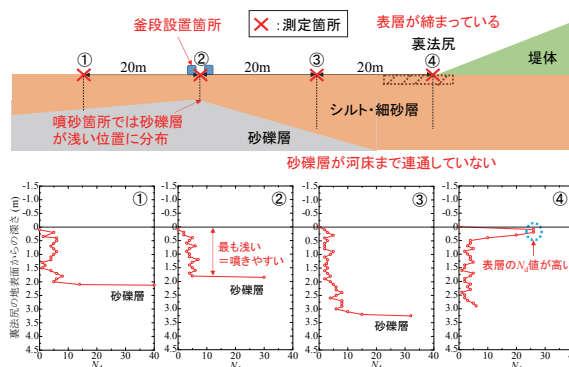


図 9 (C 地点) の貫入試験結果と断面の概要図

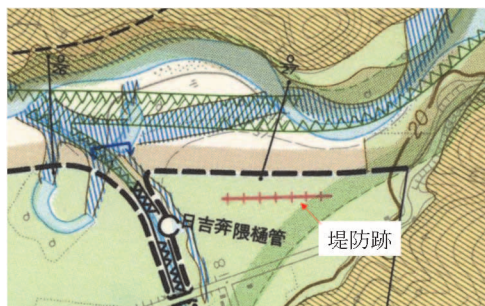


図 10 地質地形分類図 (北海道開発局提供資料に加筆)

### 3.3 地形情報からみる危険箇所の推定

図 10 に調査地点の地質地形分類図を示す。図より貫入試験を実施した C 地点には堤防跡が存在しており旧河道であったことが分かる。旧河道の影響により特異な砂礫層の分布が見られたと考えられる。また、同地点は河川の両岸が山で囲まれ狭窄部となっていることから、出水時には山の斜面から浸透した雨水が堤内まで流れてきて、地下水と共に堤内地を被圧したことで激しい噴砂・漏水の発生を助長したとも考えられる。さらに、同地点は常呂川の支川であるポン隈川が合流する地点でもあり、河川の増水時には本川からの浸透に加えて支川からの浸透の影響も加わり、パイピングの進展をさらに助長した可能性がある。

本調査地点では、地表面から深度 3～4m まで簡易動的コーン貫入試験を実施し、大まかな砂礫層の分布やパイピングの進展に伴う基礎地盤内の緩み領域が確認できた。したがって、パイピングの進展による基礎地盤内の緩みは深度 3～4m 程度 (砂礫層に到達するまでのシルト・砂質層) の浅部の地盤構造を調査するだけでも十分であるといえる。また、電気探査では基礎地盤内を面的に調査することができ、行き止まり構造を発見することができた。さらに、治水地形分類図から読み取れる旧河道や狭窄部、支川といった情報はパイピングの危険箇所を絞り込む上で重要な要素であると考えられる。

## 4. 噴砂動態と周辺地盤特性

### 4.1 調査地概要

宮崎県北部を流れる北川の左岸 12k800 から 13k700 の堤内地では過去 3 年間の出水により堤内地で著しい噴砂と陥没が繰返し発生した<sup>5)</sup>。特に川坂大橋 (13k250) から下流の約 500m 区間 (12k800～13k250) では、堤防から道路を挟んで 30～50m 離れた畑などの堤内地で激しい噴砂が多数発生した。基礎地盤は透水性の高い礫層の上に被覆土層がある層構造であり、上層が砂層の箇所では水防の釜

段工の土のうが大きく沈み込んだ箇所もみられた。

本地点では、川坂大橋から下流の区域 (以後、下流側区域と称す) における噴砂及び陥没の発生メカニズムを調べることを目的として堤内地及び裏法尻下部でパイプコーン貫入試験を行った。堤体は全面被覆構造による補強がされているが、裏法尻下を直接調べるために、一部のカゴ工を一時的に剥がす処理を行って調査を実施した。

### 4.2 下流側区間の噴砂および調査地点

#### 1) 噴砂地点の分布、標高および地形

UAV から地表面の写真を多数撮影し、SfM (Structure from Motion) を用いて作製した DEM (数値標高モデル) を基に、下流側区域のオルソ画像と地表面標高のコンター図を図 11 に示す。調査地点は北川左岸 12k900～13k200 の川坂大橋下流地点である。図 12 に、当該区域を拡大し、過去 3 年間 H28-H30 の出水で噴砂や陥没が発生した箇所に加えて矢板工の設置時期・範囲、旧河道域を示す。噴砂が多く観察された 13k100 付近は旧河道であり、その両側が自然堤防である。堤内地は水田部分が 1～2m 程度低く、いわゆる不陸が形成されている。

多くの噴砂地点は比較的地表の標高の低い箇所、旧河道箇所に分布しているようである。このように、治水地形分類図を調べることにより、旧河道や自然堤防等のパイピングの危険度が高い箇所を絞り込める可能性がある。また、UAV を使用して作成した DEM データから地形の標高差が得ることができた。この技術を活用して河川堤防の堤体の変状を調べることも可能である<sup>6)</sup>。ただし、標高が低くなく、旧河道でない箇所でも噴砂が発生している。また、図に示すように矢板の施工前後で、噴砂の個数や発生位置

に変化が見られる箇所と見られない箇所があった。

## 2) ボーリングデータによる地層構造

Bor. No.2, 3 (図 12) の堤防法肩付近でボーリング柱状図が得られている。盛土(シルト質砂礫)の下には, Bor. No.2 ではシルト質砂・砂礫が 6m 程度, シルト混じり砂礫が約 6m, 砂礫が 30m 以上の厚さで堆積し, Bor. No.3 ではシルト質砂/砂が約 3-4m, T.P.-30m 以深まで続くシルト混じり砂礫の構成である。つまり, 透水性の低い層の下に極めて高透水性の層をもつ複層構造の透水性基礎地盤である。また, 点検フローにあるような砂礫層が川表側で河床に露出している様子があり, 出水中には河川水の水圧が堤内まで伝播しやすい。さらに, 堤内地側は旧河道, 自然堤防があるため, 透水性が横断方向に変化し, 行き止まり地盤になっている可能性も否定できない。噴砂が極めて発生しやすい地盤条件となっている。今後, さらに詳細な調査が必要である。調査方法としては 2 章で述べたような電気探査等が考えられる。

以上から, 堤内地での砂礫層の出水中の水圧が高くなる条件がそろっている。地表面標高が低いところに加え, 礫層上面の標高が高い箇所において上向き動水勾配が特に高くなりボーリングが発生したことが想定される。

## 4.3 法尻付近の貫入抵抗とゆるみ

### 1) 実施した貫入試験概要

本地点での貫入試験では, 新たにパイプロコーン貫入試験装置を使用した。パイプロコーンは, 地盤内の空洞や緩み領域の把握を目的としたサウンディング試験であり, 荷重計を内蔵したコーンをパイプロハンマの振動打撃により地中に貫入することで, 深さ方向の先端抵抗値を測定するものである。パイプロハンマの重量は約 24kg と可搬性があり, 堤防法面など傾斜面でも適用性が高い。簡易貫入では貫入し難い礫混じりの層でも試験は可能である上, 試験に要する時間を大幅に短縮できる特長がある。試験装置を図 13 に示す。

コーン(荷重計内蔵), ロッド, トリガーセンサー, パイプロハンマ, 油圧発生ユニット, ワイヤ式深度検出器及びデータロガーで構成され, コーンの内径は 36.6mm, 断面積は 1,052mm<sup>2</sup> である。パイプロハンマの振動打撃は 12Hz 程度で, 0.03s 間隔でコーン先端の荷重(kN)と深度(m)を収録する。パイプロコーンで得られるデータは打撃貫入時の動的コーン先端抵抗  $q_{cd}(kN/m^2)$  とデータ数  $n_v$  (深度 1cm 当たりのサンプリング数) である。これらは, 予備試験から,  $N_d=10^{(1.76\text{Log}(q_{cd})+0.68\text{Log}(n_v)-5.68)}$  を用いてミニラムの  $N_d$  値に換算が可能である。

### 2) 試験結果と噴砂によるゆるみの考察

パイプロコーン貫入試験は No.1~No.8 (図 12 参照) のピット毎に 3 箇所ずつ行った(例えばピット No.6 内では縦断方向にピット中央 6-1, 中央との離隔 0.6m で上・下流側をそれぞれ, 6-2, 6-3)。このうち, 噴砂が近傍で確認さ

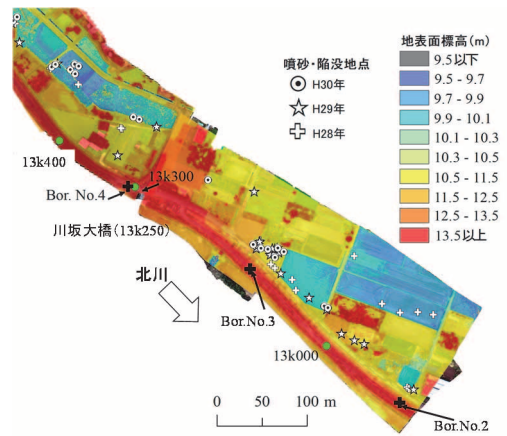


図 11 下流側区域のオルソ画像と地表面標高分布, 噴砂地点

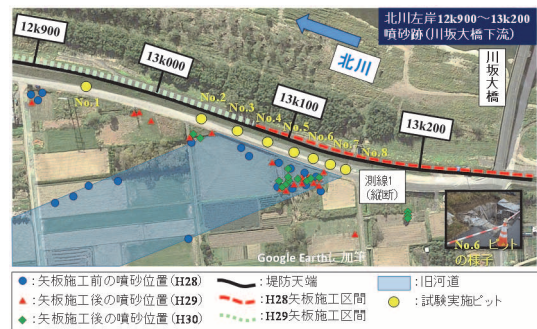


図 12 噴砂地点, 調査・試験実施箇所



図 13 パイプロコーン試験装置の様子

れなかったピット No.4 の試験結果を図 14(a)に, 堤内地側で噴砂が確認された箇所の代表としてピット No.6 の貫入試験結果を図 14(b)に示す。同図には既存の簡易動的貫入試験も併記した。簡易動的貫入試験の  $N_d$  は  $N$  値の 1~3 倍を示すため, ここでは 3 で除した値を併記した。

ピット No.4 では, 簡易動的貫入試験, パイプロコーン共に深度 1.6m 程度で貫入不能となり, 緩みや空洞は確認されなかった。

一方, 噴砂多発地点近傍のピット No.6 では, 簡易動的貫入試験, パイプロコーンともに深度 3.5m 付近まで貫入

し、ピット No.4 より貫入深度が深くなった。さらに換算  $N_d$  値が 1 程度を示す部分が連続することから、全体的に地盤が緩んでいることを確認した。また、深度 2m 付近、深度 3m 付近では、コーンが急速に自沈する状況が確認され、極めて緩い部分が存在することを確認した。

また、両試験方法の結果の比較から、今回、実施を試みたパイプロコーン貫入試験が、従来の簡易動的コーン試験との整合がとれており、有用であることが分かった。よって、パイプロコーンも簡易動的コーン貫入試験と同様に現地で活用することが可能であり、従来の簡易貫入試験よりも試験時間が短縮できるため、現地での作業性が向上すると考えられる。

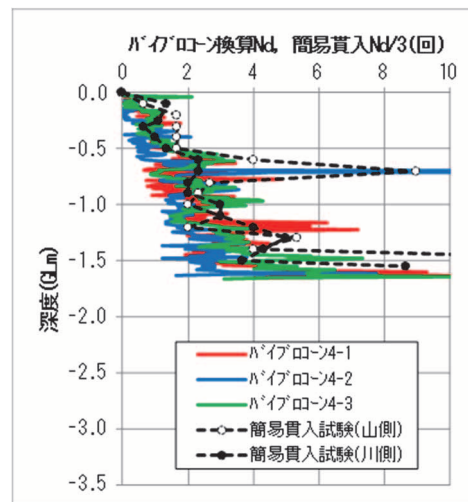
## 5. トレンチ調査からみるパイピング進展メカニズム

### 5.1 調査地概要

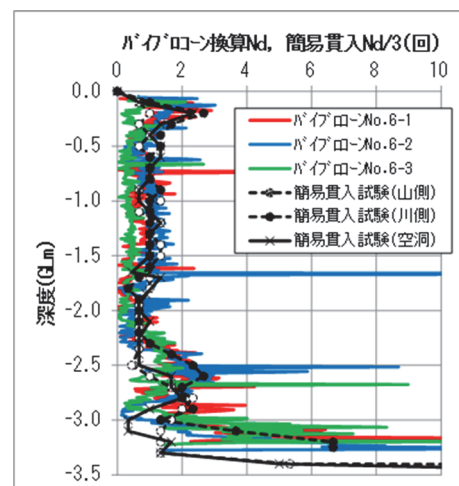
2013 年 7 月の前線性降雨による出水により秋田県の子吉川水系の堤内地で著しい噴砂と法すべりが発生した。その被災要因には基礎地盤で発生したパイピング現象が影響していると考えられている。また、本地点では、堤防被災箇所周辺でトレンチ掘削調査が行われており、トレンチ断面にはパイピングの跡と考えられる砂脈が確認された。トレンチ掘削調査は、現地で発生したパイピングの進展プロセスを断面で観察することができ、実験や解析で確認されたパイピングの進展プロセスと比較ができる。また、貫入試験や電気探査によって推測された地盤構造を実際に目視で確認できるため調査結果の整合性が向上する事にも繋がる。第 5 章では、トレンチ調査を実施する事のさらなるメリットを増やすことを目的に、トレンチ断面の剥ぎ取りを行い、断面の粒子配向を画像解析によって面的に調査し、被災当時の浸透流の方向や土粒子の移動・堆積状態を推定することで、パイピング進展メカニズムの解明を試みた。

### 5.2 解析概要

本解析では USB カメラで撮影した断面画像を二値化することにより土粒子を抽出し、解析を行った。断面のスケッチと撮影箇所を図 15 に示す。撮影は(A)箇所：砂脈(図 15 中の①～⑦)、(B)箇所：砂脈の下部の砂層(図 15 中の⑧～⑫)、(C)箇所：砂礫層の砂(図 15 中の⑬～⑮)の 3 種類の箇所の砂を撮影した。なお、粘土質シルト箇所は粒子がダメになっており撮影が困難だったこと、砂礫層の礫は撮影画面に粒子が収まらなかったことによりこの 2 種類の箇所は掲載していない。また、解析では土粒子の粒子配向を調べるため二値化した画像から土粒子の長軸の方位を計測した。粒子が水流中にある場合、粒子の長軸もしくは中間軸が傾斜する現象があり、これをインブリケーションと呼ぶ(図 16 参照)。これは、粒子が流れに対して傾斜している状態が安定であるためである。また、インブリケーションは一方向流が卓越する箇所によく確認される。



(a)ピット No.4：近傍で噴砂が確認されなかった箇所



(b)ピット No.6：近傍で噴砂が確認された箇所  
図 14 パイプロコーンの換算  $N_d$  値の深度分布

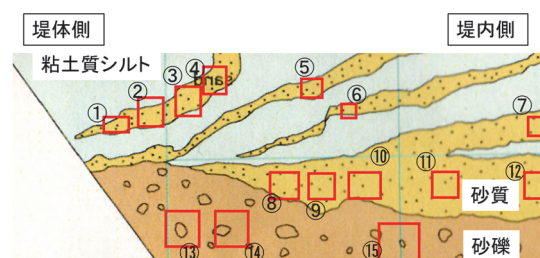


図 15 スケッチと撮影箇所

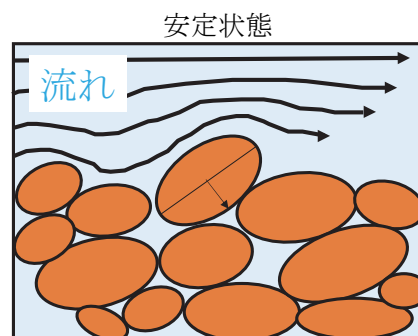


図 16 インブリケーション

この現象をもとに被災当時の浸透流の方向や土粒子の移動・堆積状態を推定した。

### 5.3 解析結果および考察

#### 1) (A) 箇所：砂脈 (①～⑦)

図 17 に本解析で計測した土粒子の長軸の角度の定義を示し、表 1 に各撮影箇所から得られた土粒子の長軸の角度を示す。角度が大きいほどより長軸が堤体側へ傾斜していることを表す。また、表 1 の土粒子の長軸の角度を用いて、インプリケーションの原理から予想される浸透流の向きを図 18 に示す。まず砂脈中の土粒子であるが、①～⑦のすべての箇所土粒子の長軸の角度が正になっており、堤体側に長軸が傾斜していることが確認できた。これより、現地の砂脈中では土粒子のインプリケーションが揃うような一方向流が卓越していたことがわかった。また、本断面の砂脈は法尻で発生しているが、このように法尻で発生するパイピング孔が堤体側へ傾斜する様子は模型実験から確認されている (図 19 参照)。よって、現地においても模型実験と同様に、パイピング孔 (砂脈) は鉛直方向から傾斜した角度で流速が卓越する状態であったことが確認できた。

#### 2) (B) 箇所：砂脈の下部の砂脈

表 1 の⑧～⑫の土粒子の長軸の角度をみると、⑧～⑩の土粒子の長軸は堤体側へ傾斜しており、⑪、⑫の土粒子の長軸は堤内側へ傾斜していることが確認できた。インプリケーションの原理から推測すると⑧～⑩の浸透流は堤体側から堤内側へ、⑪、⑫の浸透流は堤内側から堤体側へと発生したと考えられる。この原因として、⑧～⑫の浸透流が⑦の砂脈へと流れようとしたため、図 18 の⑧～⑫に示すような浸透流の向きになったと考えられる。このように、一度砂脈のようなパイピング孔が形成されると、そこへ浸透流が集中すると考える。

#### 3) (C) 箇所：砂礫層の砂

5.2 でも述べたように礫は撮影できなかったためここでは砂礫層内の砂分について解析を行った。表 1 の⑬～⑮の角度をみると、(B) 箇所のように、土粒子の長軸が堤体側へ傾斜している箇所 (⑬、⑮) と堤内側に傾斜している箇所 (⑭) がわかる。砂礫層内の砂粒子は礫分の隙間を通過して移動すると考えられるが、その場合、流れが一方向に卓越せず複雑な流れの向きとなっていたため、インプリケーションが一方向に発達しなかったと考えられる。

第 5 章では、トレンチ調査のさらなるメリットを示すためにトレンチ断面の粒子配向を画像解析により計測した。その結果、粒子の配向から被災当時の浸透流が大まかに予測できた。トレンチ断面を目視で確認するだけでなく、本解析のようにミクロな視点で調査することもパイピング進展メカニズムの整合性を高める手段として利用可能であるとえられる。

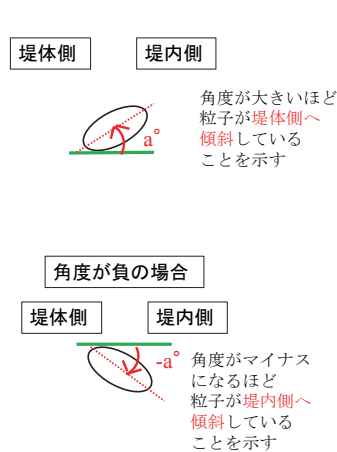


図 17 角度の定義

表 1 解析結果

種類	場所	角度
(A) 砂脈	①	1.0°
	②	6.1°
	③	9.9°
	④	10.6°
	⑤	9.0°
	⑥	2.1°
	⑦	10.5°
(B) 砂脈の下部の砂脈	⑧	7.6°
	⑨	3.1°
	⑩	3.1°
	⑪	-2.6°
	⑫	-4.6°
(C) 砂礫層の砂	⑬	5.0°
	⑭	-4.7°
	⑮	-4.6°

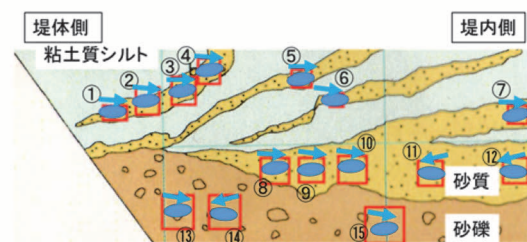


図 18 土粒子の傾きと予想される浸透流の向き

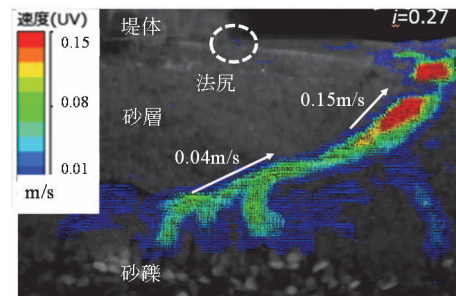


図 19 PIV による地盤中のパイピング孔の速度

## 6. 河川堤防の調査フローの提案

図 20 に河川堤防のパイピング破壊に対する調査方針フローを示す。このフローは出水後に被災を受けた地点において実施すべき調査方法および調査方針についてまとめられており、これまでに実施した調査手法が含まれている。このフローに従って調査を実施していくことで、これまで現地で見逃してきた基礎地盤内に潜在するパイピング危険箇所を見つけ出ししていくことに繋がると考えられる。また、フローに示す全ての調査ができない場合には、各調査に対し優先度をつけて実施していくことが重要であり、最低限現地で実施すべきポイントは被災後の様子 (噴砂の大きさ・個数等の情報) をデータとして記録し、堤外側の流入箇所及び堤体の損傷度、基礎地盤内の緩みの把握である。このフローに基づき整理された現地の情報を考慮し、浸透流解析を実施することで、より正確な河川堤防の安全照査が可能になると考えられる。

## 7. まとめ

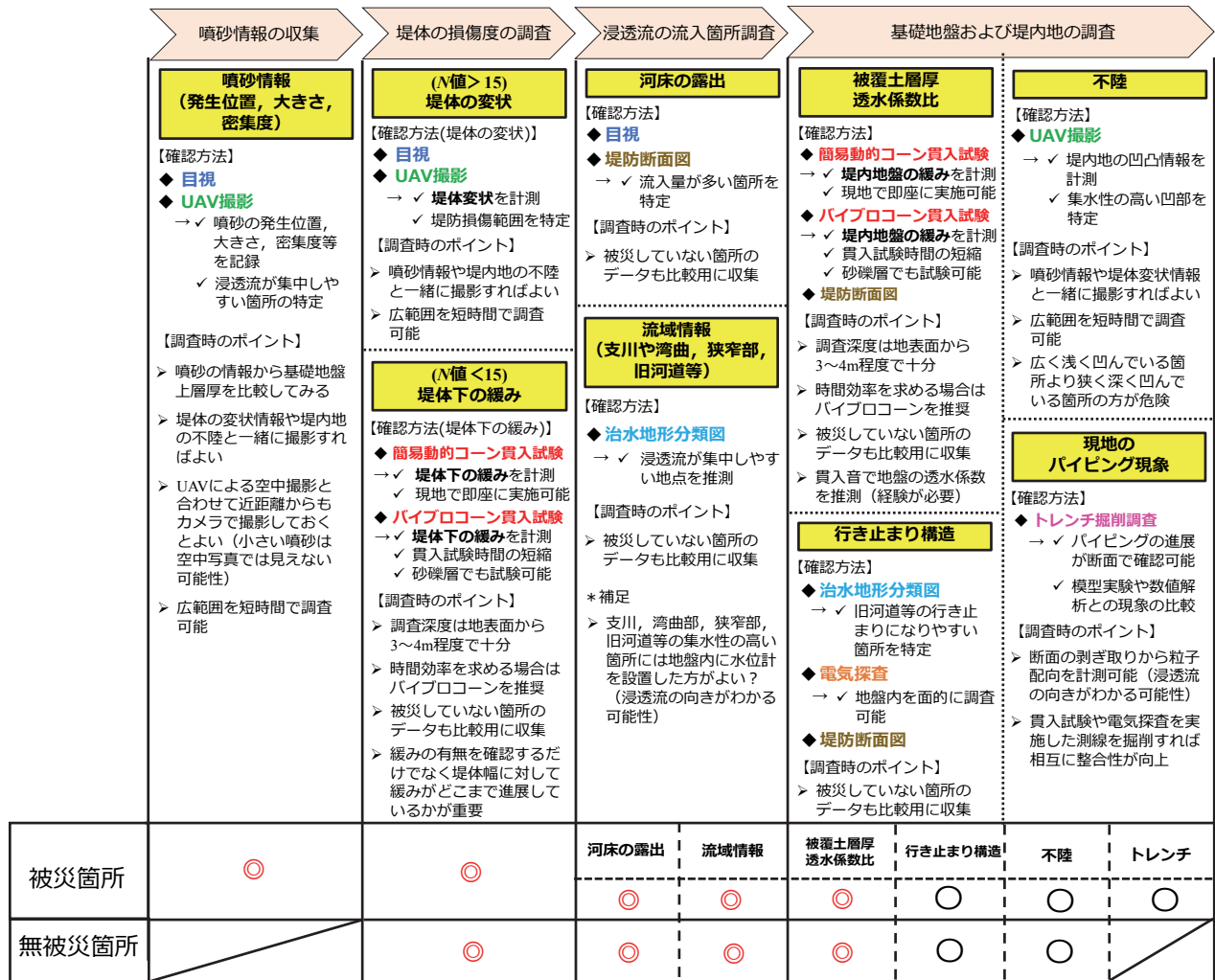
本稿では、実際に被災した河川堤防で簡易貫入試験や電気探査等を実施した結果、パイピングが進展しやすい箇所を示すことができ、調査手法の必要性・有用性について示すことができました。また、治水地形分類図から読み取った狭窄部や旧河道などの地形情報と噴砂動態を比較することでパイピングが発生しやすい条件を推定した。また、これまで実施してきた調査手法を含めた調査方針フローを作成した。これにより、今後は被災した河川堤防で着目すべきポイント・データを効率よく整理していくことで、パイピング危険箇所を事前に抽出していくことに繋がると考えられる。

### 参考文献

- 1) 西村柁哉, 前田健一, 高辻理人, 牧洋平, 泉典洋: 実堤防の調査結果に基づいた河川堤防のパイピング危険度の力学的点検フローの提案, 河川技術論文集 25 巻, pp.499-504, 2019.
- 2) 牧洋平, 前田健一, 西村柁哉, 牧洋平, 高辻理人: 河川堤防の基礎地盤構造特性と噴砂動態の関係, 平成 30 年度中部支部研究

発表会, 2019

- 3) 新清晃, 倉田大輔, 川原孝洋, 京野修, 小西千里: X 線を用いたパイピング破壊に伴う緩み領域の進行と水位履歴の影響, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.5-8, 2017.
- 4) 倉田大輔, 新清晃, 小西千里, 山下善弘: 電気探査を用いた堤内地における行き止まり構造の把握手法, 第 6 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.5-8, 2018.
- 5) 前田健一, 岡村未対, 石原雅規, 新清晃, 上野俊幸, 西村柁哉, 高辻理人, 品川俊介, 笹岡信吾: 北川で繰返し発生した噴砂による堤内・裏法尻箇所のゆるみ調査, 河川技術論文集 25 巻, pp.535-540, 2019.
- 6) 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, 河川技術論文集 24 巻, pp.529-534, 2018.
- 7) 牧洋平, 前田健一, 高辻理人, 西村柁哉: 透水性基礎地盤中の粒子配列に着目した河川堤防のパイピング進展挙動, 第 54 回地盤工学研究発表会, 2019.



◎ : 必ず実施

○ : 必要に応じ実施, 他調査と併せて実施

図 20 簡易点検フローに対する調査項目