

堤内外の基礎地盤特性が河川堤防のパイピング破壊 に及ぼす影響と堤防調査方法の提案

INFLUENCE OF FOUNDATION GROUND INSIDE AND OUTSIDE RIVER LEVEE ON PIPING FAILURE AND PROPOSAL OF LEVEE INVESTIGATION METHOD

高辻理人¹・前田健一²・牧洋平¹・伊神友裕¹・泉典洋³

Masato TAKATSUJI, Kenichi MAEDA, Yohei MAKI, Tomohiro IKAMI and Norihiro IZUMI.

¹学生会員 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²正会員 工博 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³正会員 工博 北海道大学教授 環境フィールド工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北十三条西8丁目)

The aim of this paper is to clarify the conditions under which infiltration flow is likely to be localized by focusing on the characteristics of the foundation ground outside the levee—the location of the inflow boundary of river water—in order to accurately evaluate the piping risk. Therefore, we focused on the exposed section of the permeable lower layer of the foundation outside the levee and quantitatively showed the effect of the exposed part's position in high permeable layer on piping failure through three-dimensional seepage analysis. In addition, based on the survey results of the damaged levee, we proposed a survey regarding piping destruction of a river levee, considering the conditions outside and inside the levee.

Key Words : river levee, piping, foundation ground outside and inside, flow localization, cone penetration test

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、豪雨の強度増加や長期化によって、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し、重点監視箇所を抽出するための重要指標を見出すことが重要である。また、それらに基づく、実堤防での調査方法とその結果の活用方法を整理して調査方針を示すことで、堤防情報を効率的・効果的に残すこと、変状の危険性の高い箇所を事前に抽出することは今後の河川管理において不可欠な課題である。

西村ら¹⁾は地盤工学的な観点から、堤体強度が比較的高い条件下、パイピング破壊に対する評価指標を検討している。主な指標の例として、透水層に低透水層が被覆している場合、抑え効果としての「基礎地盤の被覆土層厚」と外力との関係、「透水係数比」が約100倍であると堤内地への水圧伝播による噴砂が生じやすいといっ

た重要指標と調査の目安を示している。また、透水性基盤層の「行き止まり構造」が裏法尻から堤体幅の1.5倍以内に存在するか、堤内地に浸透が集中するため「堤内地の不陸」の有無、支川との合流部の有無といった「流域情報」も重要である。堤防の構造体としての耐力評価には、被災後の堤防損傷度把握を目的とした「堤体や堤体下の基盤層の緩みや変状」、「噴砂情報」やトレンチ掘削などによる「パイピング進展度の可視化」等も有益な情報である。一方、地盤工学的には、堤体や堤体下の基礎地盤の変形・強度特性の把握に注力されてきたが、堤外側の河川水の流入境界特性は見逃されてきた。しかし、パイピングの危険度評価の精度向上には、流入領域としての河床状態や堤外側の基礎地盤特性にも着目し、パイピングにおける効果を定量的に整理する必要がある。

そこで本論文では、まず、従来見逃されがちであった基盤漏水に及ぼす流入領域の基礎地盤特性「流入領域の大きさ」、河床特性「透水性下層の露出部」及び「露出部の位置」の影響を定量的に数値解析で検討した。著者らの評価指標²⁾の検討でも詳細な検討がされていなかった。

つぎに、上記の結果と既報³⁾の結果を合わせた上で、提案する評価指標をどのように調査するのか、過去の調

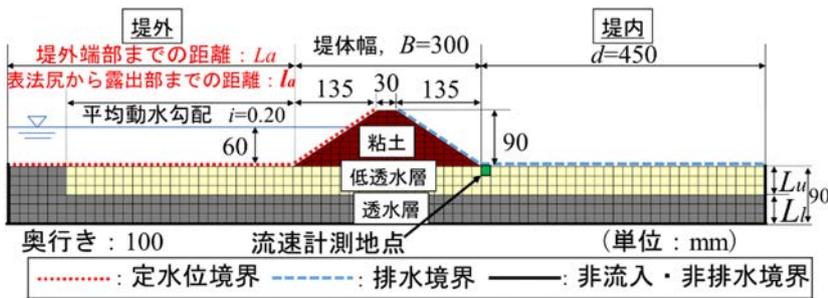


図-1 解析モデル概要図

表-1 検討ケース一覧

表法尻から堤外側端部までの距離 L_a (mm)	上層厚 L_u (mm)	下層の河床への露出	ケース数
90	540	30	あり
180	630	45	
270	720	60	
360	810		
450	900		
10通り	3通り	2通り	10×3×2=60

査事例をもとに留意点などについて整理した結果を示すこととする。

2. 基盤漏水に及ぼす河床流入域の構造の影響

河川堤防のパイピング破壊に影響を及ぼす条件として、堤外側における透水層の露出部が挙げられる。これは堤外側の河床に透水層が露出していると透水層から河川水が直接流入し、堤体下や堤内側まで高い圧力が伝播し、堤内側で噴砂・漏水の発生を助長するからである。

本章では堤外側の河床への透水層の露出部の有無と流入領域の大きさに着目し、これらの要素がパイピング発生に及ぼす影響について三次元浸透FEM解析を用いて検討した。また、解析を実施する上で必要な堤外側の解析領域についても明らかにした。計算には、不飽和浸透流計算が可能な地層科学研究所GEOSCIENCEの3D-Flow三次元飽和・不飽和浸透流解析ソフトを用いた。異なる土の水分保持曲線に適合し、広く用いられている水分移動特性モデル (van Genuchtenモデル³⁾) を搭載している。

(1) 解析概要

図-1に基本となる解析モデルの概略図を示す。解析モデルの堤体幅・材料は既往の模型実験¹⁾を参考にしており、堤体は粘土、基礎地盤は低透水性上層・透水性下層の複層で作成し、奥行き方向 (堤防縦断方向) への厚さは100mmに固定した。基礎地盤の全層厚は、既往の研究¹⁾から求められた基礎地盤の影響範囲内で検討を行うために90mmと固定し、その上で上層厚 L_u を3通り変化させている (なお、紙面の都合上詳細は省くが、層厚90mm以上では凡そ解析結果が変化しない事を確認した。本稿の結論には影響はない)。堤内側の基礎地盤の図中の右端は浸透流が浸出しないように設定し、いわゆる行き止まり境界となっており、行き止まり境界までの距離は $d=450$ mmとしている。また、透水性下層が河床へ露出している場合の影響を調べるため、表法尻から堤外側端部までをすべて露出部としたモデルも作成した。本章では、表法尻から堤外側端部までの距離 L_a (図-1参照) を10通り変化させ、堤内への浸透流速と流入量の変化を比較した。検討ケースを表-1に示す。

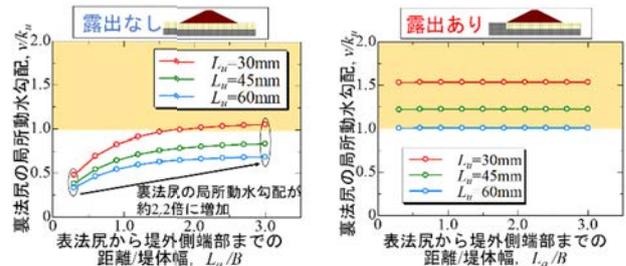


図-2 表法尻から堤外側端部までの距離と v/k_u の関係:

左図; 透水性下層の露出なし (平均動水勾配 $i=0.20$)

右図; 透水性下層の露出あり (平均動水勾配 $i=0.20$)

外力条件は堤外に地表面から60mmの水位を一様に作用させ平均動水勾配 $i=0.20$ で定常解析を実施した。また、材料の透水係数は既往の模型実験¹⁾に基づき粘土 $k_t=3.00 \times 10^{-8}$ (m/s), 低透水層 $k_l=1.40 \times 10^{-5}$ (m/s), 透水層 $k_p=1.80 \times 10^{-3}$ (m/s)に設定した (なお、透水層に低透水層が被覆した複層構造の場合、各透水係数の比が100倍以上でパイピング発生の危険度がほぼ最大値となり、本稿の結論には影響しないことを確認している)。

(2) 浸透流速による検討

図-2に各ケースの裏法尻 (図-1; 流速計測地点) における浸透流速 v を低透水性上層の透水係数 k_u で除して求めた見かけの局所動水勾配 v/k_u と、表法尻から堤外側端部までの距離 L_a を堤体幅 B で除した値との関係を示す。図-2より透水性下層が露出なしの場合は、表法尻から堤外側端部までの距離 L_a が大きくなるほど上層の見かけの局所動水勾配 v/k_u は大きくなり、 L_a/B が3.0程度あると局所動水勾配は収束していることがわかる。局所動水勾配が大きくなると上層の有効応力は低下し液状化状態に近づくため地盤の耐力は低下する。また、 $L_a=90, 900$ mm ($L_a/B=0.3, 3.0$) のケースを比較すると、 v/k_u の値が約2.2倍に上昇している。堤外側の解析領域を適切に設定しないと安全率を大きく見誤ることになる。

一方、透水性下層が露出ありの場合は、表法尻から堤外側端部までの距離 L_a に対して裏法尻の局所動水勾配 v/k_u の値は凡そ変化しない。したがって、堤外側の解析領域の設定に関しては、堤外側の基礎地盤表層が低透水性上層の場合または透水性下層の場合といったように、基礎地盤条件によって整理する必要があると考えられる。

図-2の検討より、堤外側に透水性下層が露出ありの場

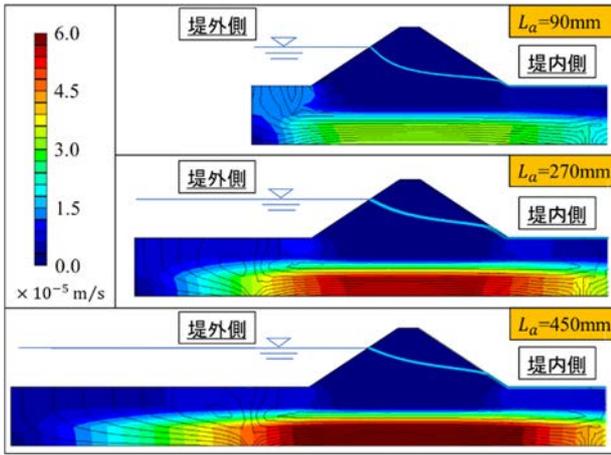


図-3 モデル断面の流線と流速コンター
(透水性下層の露出なし, 平均動水勾配 $i=0.20$)

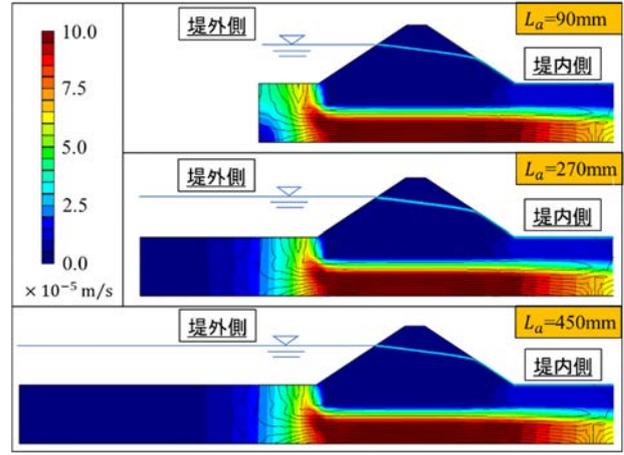


図-4 モデル断面の流線と流速コンター
(透水性下層の露出あり, 平均動水勾配 $i=0.20$)

合と露出なしの場合で、堤外側の解析領域をそれぞれ変化させた結果、局所動水勾配に差が見られた。この理由について断面の流線と流速コンター（図-3,4参照）により考察する。露出なしの場合では流入領域を大きくしていくと、堤体下や堤内側の基礎地盤の浸透流速が大きくなるため、基盤漏水・噴砂の危険性が増すことになる。一方で、露出ありの場合では流入領域を大きくしても流速の値に大きな変化は見られない。これは流入箇所が表法尻周辺（図中左側に露出した透水層と低透水層の境界部分）に集中しており、堤外から堤内に至るまで最短経路で浸透していることが原因であるといえる。すなわち堤外側に透水性下層が露出している場合は、露出部の面積に関わらず、露出部が存在していること自体が河川堤防の浸透破壊の危険性を上昇させるといえる。

(3) 流入量による検討

次に、表法尻から堤外側端部までの距離 L_a の大きさの違いによる流入量の変化について検討する。図-5に $L_a=45\text{mm}$ における、表法尻から堤外側端部までの距離 L_a と累積流入量の割合及び流入量の増加倍率の関係を示す。なお、累積流入量の割合とは、解析モデルの堤外側の地表面における流入量を表法尻に近い箇所から順に足して求めた値であり、グラフの立ち上がり早いほど法尻から近い箇所における流入量の割合が大きいということである。また、流入量の増加倍率とは、 $L_a=90\text{mm}$ ($L_a/B=0.3$) の場合に対して流入量が何倍に増加したかを示す。図-5より、露出なしの場合では表法尻から堤外側端部までの距離 L_a が大きくなるほど流入量は増加するが増分は次第に低下し、 $L_a/B=3.0$ 程度でほぼ収束する。これは、全流入量自体は堤体下の基礎地盤モデルの深さ、および透水係数によって支配されるため限界値が存在するからである。図-3からもわかるように、表法尻から堤外側端部までの距離 L_a が大きくなるほど表法尻から離れた堤外側基礎地盤中の浸透流速も大きくなっており、分散して流入していることが推察される。さらに累積流量

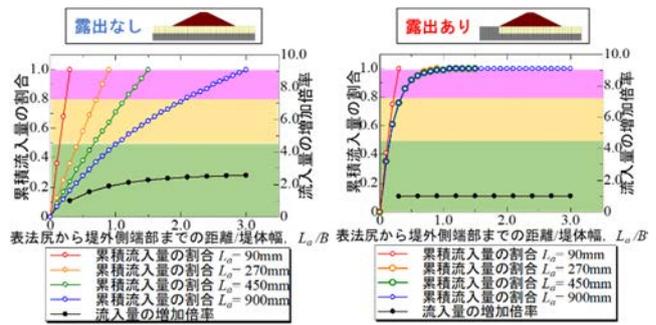


図-5 表法尻から堤外側端部までの距離と流入量の関係：
 $B=300\text{mm}$, 左図；透水性下層の露出なし ($L_a=45\text{mm}$, $i=0.20$) ,
右図；透水性下層の露出あり ($L_a=45\text{mm}$, $i=0.20$)

の割合が10割程度に達する影響範囲は表法尻から堤外側端部までの距離 L_a の大きさによって変わってくる。

一方で、露出ありの場合は累積流入量の割合が10割程度となる影響範囲は L_a/B が1.0つまり、堤体幅の1.0倍程度の範囲で流入していることがわかる（図-5参照）。また、 $L_a=270\text{mm}$, 450mm , 900mm ($L_a/B=0.9, 1.5, 3.0$) のケースを比較すると堤外側同一箇所の流入量がほとんど同じ値となっており、浸透流速による検討と同様に露出部の面積の大きさの違いによって流入量の上昇効果はないといえる ($L_a=30\text{mm}$, 60mm の場合でも同様の結果となったことを確認している)。したがって、堤外側地表面全面に透水性下層が露出しているような場合、堤外側の解析領域は堤体幅に対し1.0倍程度設定すれば適切に安全率を算定できると考えられる。

3. 基盤漏水に及ぼす高透水層の河床における露出位置の影響

前章で河川水の流入領域の特性として透水層の露出部が重要な要素であることがわかった。ただし、透水層の

表-2 検討ケース一覧

表法尻から露出部までの距離 l_a (mm)	上層厚 L_u (mm)	ケース数
90	540	30
180	630	45
270	720	60
360	810	
450	900	
10通り	3通り	10×3=30

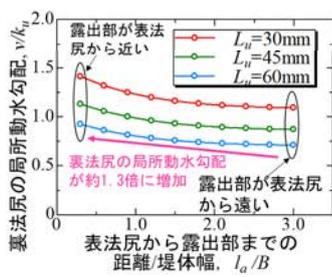


図-6 露出部の位置と v/k_u の関係 (平均動水勾配 $i=0.20$)

露出部が堤体から離れていれば危険度が変化する事が予想される。そこで、本章では河床における透水層の露出部の位置が異なる場合に生じる、パイピング発生に及ぼす影響の違いを三次元浸透FEM解析により定量的に検討した。また、その結果と実河川の川幅との関係について、被災事例をもとに簡単に検討した。なお、本章の川幅とは、堤防敷の表法尻から対岸の表法尻までの区間を示す。

(1) 解析概要

解析モデルは図-1を基本としている。本章では表法尻から堤外側端部までの距離 $L_a=900$ mm ($L_a/B=3.0$)と固定し、表法尻から露出部までの距離 l_a を10通り変化させた。ただし、 $l_a=900$ mm ($l_a/B=3.0$)のケースについては解析モデルの都合上、露出部が基礎地盤表面に存在していないため、本章で実施した解析においては、堤外側の基礎地盤の左端(図-1参照)にも平均動水勾配 $i=0.20$ 相当の水頭を設定し、定水位境界条件とすることで露出部を再現させ、定常解析を実施した($l_a/B=3.0$ のケースは露出部を基礎地盤表面に設けたケースも別途実施しており、本論文に記載しているデータとの差は微小であったことを確認している)。これにより、堤外側基礎地盤における透水性下層の露出部の位置が浸透破壊に及ぼす影響を検討した。検討ケースの一覧は表-2に示す。

(2) 浸透流速による検討

図-6に各ケースの裏法尻(図-1;流速計測地点)における浸透流速 v を上層低透水層の透水係数 k_u で除して求めた見かけの局所動水勾配 v/k_u と、表法尻から露出部までの距離 l_a を堤体幅 B で除した値との関係を示す。図-6より表法尻から露出部までの距離 l_a が大きくなるほど上層の局所動水勾配 v/k_u は小さくなり、 l_a/B が3.0程度で局所動水勾配は収束していることがわかる。また $l_a=900$, 90mm ($l_a/B=3.0, 0.3$)のケースを比較すると、局所動水勾配の値が約1.3倍に増加するため、露出部の位置は堤内側の浸透流速の大きさに影響を及ぼすといえる。

さらに、上層厚が小さいほど危険となっているため、危険な条件が重複することでパイピング危険度が大幅に増加することもわかる。さらに、図-2の左図及び図-6の最も右の値について、両者の関係は $L_a=900$ mm ($L_a/B=3.0$)という条件の下、 $l_a=900$ mm ($l_a/B=3.0$)の位置における

表-3 被災した実堤防の堤防幅と川幅の関係

実堤防の被災事例	堤防幅 (被災岸) B(m)	河川幅 L_a (m)	L_a/B
①子吉川右岸 10.8k付近。(噴砂・すべり), 2013	25	120	4.8
②常呂川左岸 26.8k付近。(噴砂), 2016	30	300	10.0
③矢部川左岸 6.2k付近。(無被災), 2012	35	125	3.6
④矢部川右岸 7.3k付近。(決壊箇所), 2012	30	210	7.0
⑤矢部川右岸 11.8k付近。(噴砂), 2012	35	125	3.6
⑥矢部川左岸 16.0k付近。(噴砂), 2012	40	210	5.3
⑦鬼怒川左岸 13.1k付近。(噴砂), 2015	30	220	7.3
⑧北川左岸 13.1k付近。(噴砂・陥没), 2018	40	210	5.3
⑨長良川右岸 49.0k付近。(噴砂・陥没), 2018	90	220	2.4

露出部の存在有無を比較しており、両者の局所動水勾配がほとんど同じ値である。すなわち、透水性下層の露出部が表法尻から堤体幅の約3.0倍離れていれば、露出部の存在による浸透流速の上昇効果はほとんどないといえる。したがって、堤外側基礎地盤を難透水層で被覆するブランケット工法等の浸透抑制対策を行う際には、表法尻から堤体幅の約3.0倍の範囲で十分である。

つぎに、表-3に既往研究⁴⁾で検討した被災した実堤防の堤防幅と川幅の関係を示す。表に示すように、多くの河川は川幅が堤体幅の3.0倍以上であるため、透水層の露出部の位置を現地でも定量的に評価することで危険箇所を絞込みにつながると考えられる。

4. 漏水・噴砂情報の堤防調査に関する考察

前章までの内容および既往の研究^{1),2)}の考察結果を踏まえたうえで、実堤防の効率的な維持管理や危険箇所の抽出に資する調査方法・方針について示す。また著者らは、これまでに漏水・噴砂等により被災した実堤防の調査を実施しているが^{2),5)}、各調査の効果的な実施方法等は検討していなかった。そこで本章では、調査を実施する上で留意すべき調査時のポイント等を過去の調査結果を基に考察した。そのうえで、堤内外の条件を考慮した具体的な調査方法及び方針について整理した。

(1) 簡易貫入試験および電気探査による地盤調査

図-7, 8に北海道常呂川で実施した簡易貫入試験結果と電気探査結果例(詳細は文献2を参照)を示す。簡易貫入試験を実施することで堤内・堤体下の基礎地盤の緩み領域の把握や被覆土層の厚さ等の大まかな基礎地盤構造が把握できた²⁾。また、堤体の N 値が大きい場合、貫入力が高いパイプロコン貫入試験によって堤体下の緩みの調査が可能である⁶⁾。パイピング進展時は、基礎地盤の上層部分が緩むことから、必ずしも深部までの調査が必須というわけではなく、上層の構造および緩みを把握することが重要である。図-7のように砂礫の透水層に到達する程度(3~4m程度)で広範囲な多点実施が効果率的である。さらに、電気探査を実施することで基礎地盤構造を面的に確認でき、行き止まり境界の有無等も把握で

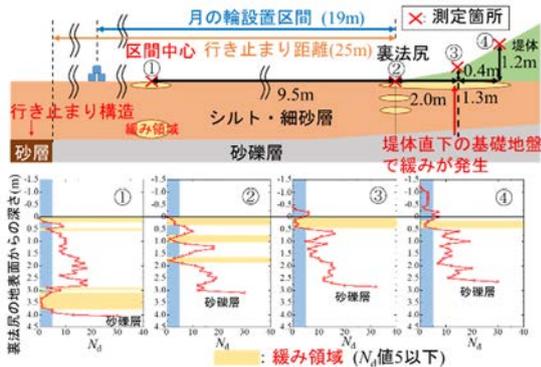


図-7 貫入試験結果と断面の概要図 (堤防横断方向)

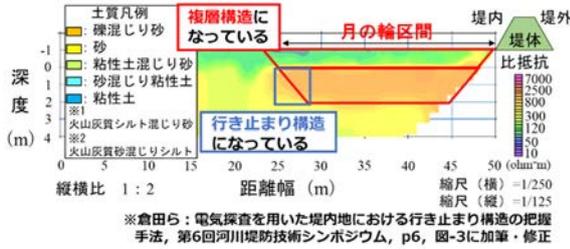


図-8 電気探査の結果 (堤防横断方向)

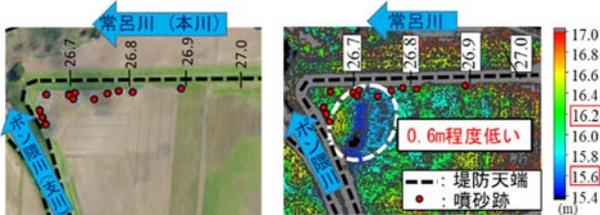


図-9 常呂川左岸KP26.8付近の標高コンター (国土交通省・北海道開発局提供)

きる⁷⁾ (図-8参照) . 事前に旧河道等の行き止まり境界になりやすい箇所を治水地形分類図等によって把握しておくことで弱部を効率よく抽出できると考えられる.

(2) UAV撮影による地形情報や被災データの蓄積

図-9にUAVにより撮影した北海道常呂川の被災箇所の標高データを示す. 図より支川の合流部が近く, 標高が周囲より低い箇所で多数の噴砂が発生している. このような箇所は浸透流が集中しやすいため²⁾, 堤内地の不陸といった地形情報の蓄積は重要である. その際, 堤内地を広く測量できるUAVは危険箇所を絞り込むうえで効率的であると考えられる. また, UAV等を用いて被災後の噴砂情報 (発生位置, 大きさ, 密集度) や堤体の変状といった被災データを蓄積することも可能である⁸⁾.

(3) トレンチ掘削によるパイピング進展メカニズム調査

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の比較が可能である. 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, 調査結果の解釈の向上にも繋がる. 図-10に示すように宮崎県北川で実施した

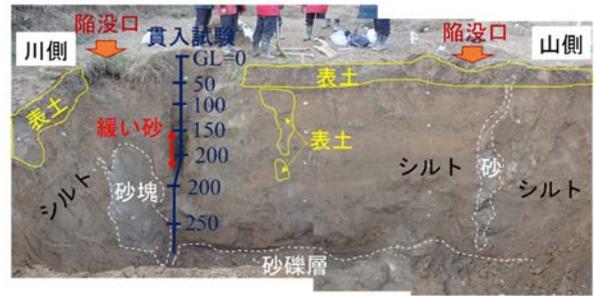


図-10 陥没孔直下の断面 (宮崎県北川)

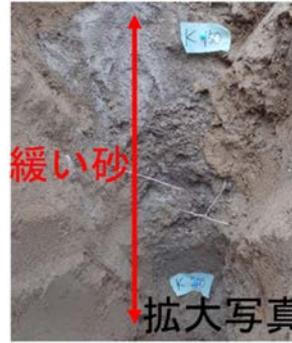


図-11 緩い砂の拡大写真

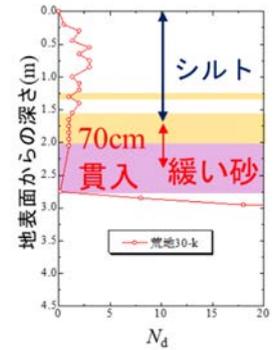


図-12 貫入試験結果 (北川)

トレンチ掘削調査 (詳細は文献5を参照) では, 噴砂や陥没孔の直下付近には透水性下層の砂礫層から砂が上昇し地上に堆積していたことが確認され, 現地でも模型実験で観察されるパイピングの進展と同様の現象が発生していることがわかった. また, 図-10中の貫入試験実施箇所に関して, 図-11, 12に示すように貫入試験を実施して貫入抵抗が極めて低い層は空洞になっているわけではなく, 砂が極端に緩く堆積していることもわかった.

(4) 効率的維持管理に向けた調査方針フローの提案

図-13に河川堤防のパイピングに関する調査方法・方針フローを示す. このフローは, これまでに実施した調査実験に基づき, 出水後に被災地点において実施すべき調査方法および調査方針, 調査目的についてまとめており, 効果的な堤防情報の蓄積や活用方法について整理したものである. 調査内容をランク付けして調査体制に応じて実施すべき調査方法の選択も必要である. 堤防の損傷度の把握は, 次の出水時に決壊リスクが高い箇所や優先的に対策すべき箇所の絞り込みにつながると考えられる. 図-13中ではCランクまでは必須としたい.

5. まとめ

本研究の検討結果から以下のような知見が得られた.

- 1) 堤外側において, 低透水性上層が地表面全体を被覆している場合には, 堤外側の解析領域を表法尻から堤体幅の約3.0倍にする必要がある. 高透水性下層が河床全体に露出している場合には, 表法尻周辺 (透

調査手法	調査対象 堤防情報	調査の実施項目, 実施目的, 実施時のポイント	被災情報の記録		堤内外の基礎地盤特性の調査	
			Cランク 危険箇所を大 まかに把握	Bランク 危険度を推定 (堤防損傷度)	Aランク 対策優先度決定 (調査時間少)	Sランク 対策優先度決定 (調査時間多)
目視, UAV 撮影, LP	噴砂情報	1.噴砂の発生位置, 大きさ, 密集度等を記録 2.浸透破壊危険箇所の特定 3.噴砂情報から基礎地盤上層厚を比較する	○	○	○	○
	堤体の変状	1.堤体変状を計測 2.堤防損傷度を把握 3.噴砂情報や堤内地の不陸と一緒に撮影が望ましい	—	○	○	○
	堤内地の不陸	1.堤内地の凹凸情報を計測 2.集水性の高い凹部を特定 3.噴砂情報や堤体変状情報と一緒に撮影が望ましい	—	○	○	○
簡易動的 コーン 貫入試験	堤体下の緩み	1.堤体下の緩み(損傷度)の進展度を記録 2.堤防損傷度を把握 3.調査深度は地表面から3~4m程度とし箇所を増やす 堤体のM値が大きい場合はパイプロコーンなどを推奨 被災していない箇所のデータも比較用に収集	—	○	○	○
	パイプロ コーン 貫入試験	基礎地盤の被 覆土層厚・透 水係数比	—	—	○	○
堤防 断面図 治水地形 分類図	基礎地盤の河 床への露出	1.透水層の露出部の有無を確認 2.流入量が多い箇所を特定 3.表法尻から堤体幅の3倍以内の範囲を調査	—	—	○	○
	流域情報	1.危険な流域情報を把握 2.浸透破壊危険箇所を推測 3.支川との合流部・湾曲部・旧河道が重要	—	—	○	○
電気 探査	行き止まり構造	1.堤内側の基礎地盤構造を面的に調査 2.行き止まり境界の有無を特定 3.表法尻から堤体幅の1.5倍以内の範囲を調査 被災していない箇所のデータも比較用に収集	—	—	○	○
トレンチ 掘削調査	パイピングの進 展度(可視化)	1.変状箇所を開削しパイピングの進展と損傷度を確認 2.模型実験・数値解析結果と比較 3.貫入試験や電気探査結果と比較し, 整合性を評価	—	—	○	○

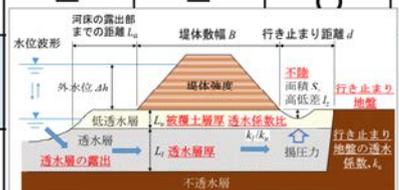


図-13 効率の維持管理に向けたパイピングに関する情報収集のための河川堤防の調査方針フロー：調査方法をS, A, B, Cの4段階へクラス分けし、管理リソースと要求されるクラスに応じて効率的に効果的な調査を選択することを目的とした整理

水層と低透水層の境界)からの流入割合が大きいため、露出部の広さによる浸透流速の上昇効果はほとんどない。堤外側の解析領域の大きさはほとんど関係なく、表法尻から堤体幅の1.0倍程度で十分である。

- 堤外側の表法尻から高透水性下層の河床への露出部までの距離が近いほど裏法尻の浸透流速の値は増加し、パイピングの危険度が最大で1.3倍程度まで上昇する。また、高透水性下層の河床への露出部までの距離が表法尻から堤体幅の3.0倍程度離れていれば、露出部の存在による堤内地への浸透流速の上昇効果はほとんどなくなる。
- 被災した実堤防において実施した調査の結果に基づき、堤内外の条件を考慮した河川堤防の効率的な維持管理に向けた調査方法について検討・整理した。

謝辞：本研究の成果は、国土交通省・河川砂防技術研究開発制度平成29年度国総研からの委託研究、科学技術研究費（研究課題17H03305および19H00786）の援助を受けたものである。末筆ながら深謝の意を示します。

参考文献

- 西村 征哉, 前田 健一, 榎山 総平, 高辻 理人, 泉 典洋：河川堤防のパイピング危険度の力学的簡易点検フローと漏水対策型水防工法の効果発揮条件, 河川技術論文集 24 卷,

pp.613-618, 2018.

- 西村 征哉, 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 卷, pp.499-504, 2019.
- van Genuchten, M.T. : A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Science Society of America Journal, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 国土交通省-国土地理院地図
- 岡村 未対, 前田 健一, 西村 征哉, 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, 河川技術論文集 25 卷, pp.487-492, 2019.
- 上野 俊幸, 新清 晃, 大藪 剛士, 田中 悠暉, 小野 哲治：地盤の緩み領域を簡便に把握可能なパイプロコーンの開発, 第7回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.17-20, 2019.
- 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.
- 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 卷, pp.529-534, 2018.

(2020.4.2受付)