

北川で繰返し発生した噴砂による 堤内・裏法尻箇所へのゆるみ調査

GEOTECHNICAL INVESTIGATION OF LOOSENING OF SOIL OUTSIDE LEVEE DUE TO SAND BOILS IN RECENT FLOODING EVENTS IN KITA RIVER

前田健一¹・岡村未対²・石原雅規³・新清晃⁴・上野俊幸⁵・

西村柁哉⁶・高辻理人⁷・品川俊介⁸・笹岡信吾⁹

Kenichi MAEDA, Mitsu OKAMURA, Masanori ISHIHARA, Akira SHINSEI, Toshiyuki UENO,
Masaya NISHIMURA, Masato TAKATSUJI, Shunsuke SHINAGAWA and Shingo SASAOKA

¹正会員 工博 名古屋工業大学教授 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 愛媛大学教授 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

³正会員 工修 国研・土木研究所 土質・振動チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴正会員 応用地質株式会社 東京支社技術部 (〒331-8686 さいたま市北区土呂町2-61-5)

⁵正会員 応用地質株式会社 流域・水資源事業部 (〒331-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5)

⁶正会員 工修 国土交通省北海道開発局 札幌開発建設部 岩見沢河川事務所 (〒068-0000 岩見沢市7
条東9丁目3-1, 元名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 大学院生)

⁷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)

⁸正会員 理修 国研・土木研究所 地質チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁹正会員 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

A large number of significant sand boils have been repeatedly appearing during flooding events in recent years in the left hinterland of Kita River at around 13 km from the river mouth. Versatile in-situ investigations, including topography survey, penetration tests, and trench excavations, were conducted to understand the influences of sand boils on the loosening of soils in the hinterland and around the back slope toe and on the damage to the river with seepage analysis using FEM. Results confirmed that the loosening of soil was from the hinterland and around the back slope toe. The thickness, fine-grained fraction content, and permeability of the sandy soil layer overlaid on the gravel layer with high permeability determined the occurrence of soil boiling. Moreover, the sheet pile constructed as countermeasure against piping failure would need to be effective to restrain the rapid propagation of piping.

Key Words : sand volcano, in-site tests, piping, pore water pressure, liquefaction

1. はじめに

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¹⁾²⁾。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。

一方、近年の模型実験、数値解析、噴砂被災箇所の調査から、噴砂が生じた堤内だけでなく裏法尻や堤体下で

貫入抵抗が極めて低い箇所があり堤体下部にもゆるみ領域が生じることが明らかになってきている³⁾⁴⁾。

本報告では、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で、繰返し生じた噴砂によって堤体下部が損傷を受けていないかを調べることを目的として堤内地及び裏法尻下部の土質調査、原位置透水試験、貫入試験などを多角的に行った。堤体は全面被覆構造による補強がされているが、裏法尻下のゆるみ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。平成28～30年度の噴砂の有無、噴砂位置に変化の有無など記録をもとに測線を決定している。また、本地区は2016年の漏水の発生を踏まえ川表遮水対策(鋼矢板)

が進められてきた。矢板の設置効果についても、調査結果に加え非常浸透解析結果も合わせて考察している。

2. 下流側区域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を図-1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-2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（詳細は文献1）を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⁹⁾。堤内地は水田部分が1～2m程度低くなっている。

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。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。

次に矢板の効果について確認する。平成28年度及び29年度には被災後に順次矢板が施工されている。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。具体的には、12k900～13k000付近では平成29年度に矢板を施工したことによって、平成28年度から繰り返し発生していた噴砂が平成30年度においては抑制されている。特に、堤防から比較的距离がある箇所では顕著である。一方で、13k100付近では平成28～30年度を通して矢板施工前後で噴砂の発生箇所や被災規模に大きな変化は見られない。このように矢板の施工によって噴砂が抑制された箇所と抑制されていない箇所があった。

さらに、H29年（2017年）には、H.W.L.を大幅に上回る出水により、多数の漏水が生じ、釜段による水防活動が実施されたが、釜段の内側が噴砂で一杯になったり、土のうが沈下したりしたことも報告されている¹⁾。

(2) ボーリングデータによる地層構造

Bor. No.2, 3（図-1）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、砂礫層は川表側で河床に露出しており、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。

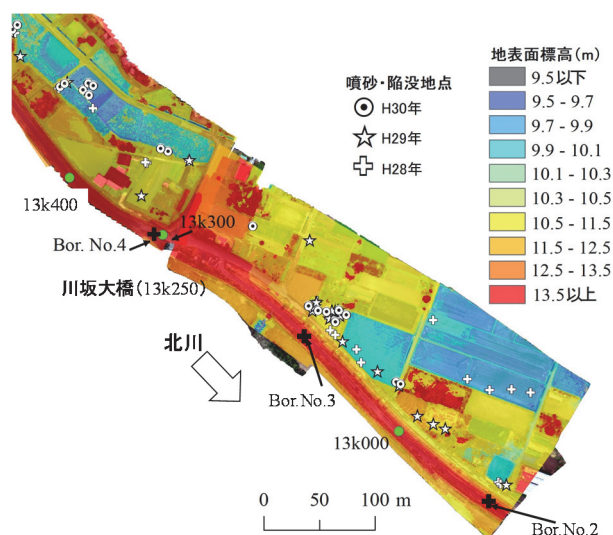


図-1 下流側区域のオルソ画像と地表面標高分布、噴砂地点

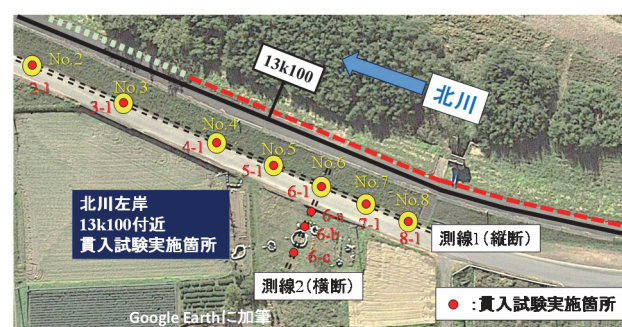
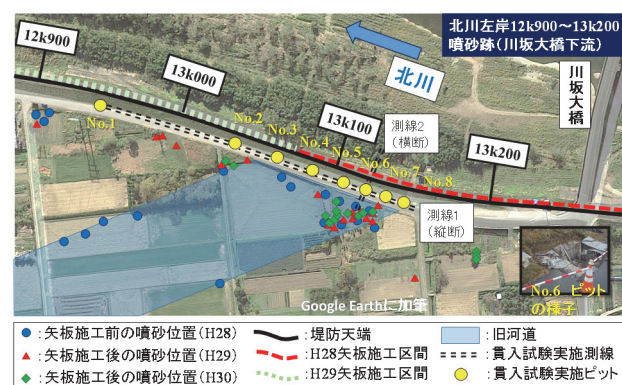


図-2 噴砂および矢板工設置地点、調査・試験実施箇所



図-3 裏法尻の調査ピット (No. 6) の様子

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。

(3) 貫入試験および土質試験の実施地点

図-2には北川左岸下流側区域12k900～13k200の貫入試験および土質試験の実施箇所を示している。法尻下のゆるみの有無を調べるために、法尻下部のカゴ工および道路のアスファルト舗装を一時的に剥がした8つの調査ピット（下流からNo.1～No.8、深さ1.0-1.5m程度、図-3）にて2種類の貫入試験、原位置透水試験、試料採取による粒度試験等を行った。

ピットは噴砂の有無や噴砂量が異なる箇所を選んでいく。貫入試験は各ピット内でそれぞれ2ヶ所（ピット中心から川側と山側の位置）で実施（No.6のみ3か所）した。ここでは、図中の破線に示すように、縦断測線（測線1）と堤内地で噴砂が集中的に発生したNo.6ピットを通る横断測線（測線2）の結果について報告する。

また、貫入試験は従来の簡易動的コーンと人力では貫入しにくい礫分の多い土でも対応可能なように開発したパイプロコーンの2種類の試験を行った。本調査では、事前に礫混じり土が確認されていたため、後者の貫入試験を導入している。

3. 法尻箇所の土の物理特性と現地浸透試験結果

ピット底面の土を採取し、粒度分布試験を実施した。また、ピット底面において現場透水試験を実施した。変水位による簡便な方法で行っており、飽和透水係数が正確に求められているとは言い難いものの、少なくとも透水係数の相対的な変化は十分に捉えることができると考えられる。この粒度分布試験の結果と現場透水係数、またクレーガーの粒径を用いた透水係数の推定値を図-4に示す。なお、No.7においては、試験機の筒とその周囲の地盤との間から水が漏れてしまうルーフィングが発生し、地盤自体の透水係数を得ることができなかった。

全体的には、現場透水試験結果及びクレーガー式による推定結果の両者とも、細粒分が多く含まれている箇所ほど透水係数が低くなる傾向を示している。しかし、No.5、No.6の細粒分含有率がNo.3、No.4と比較して特に多くないにも関わらず、No.5、No.6の現場透水試験による透水係数は低い値を示している。この結果は、調査期間中に発生した降雨によって、No.5、No.6、No.7のピット内には20cm程度の水深で水が溜まっていたことと良く整合している。さらに、No.5、No.6の付近が、川坂大橋下流側で最も大規模な漏水が確認された場所となっている。

したがって、被覆土層の透水係数が低く、透水層の圧力を逃がさない地盤構造が、大規模な漏水に結び付いたとも考えられる。

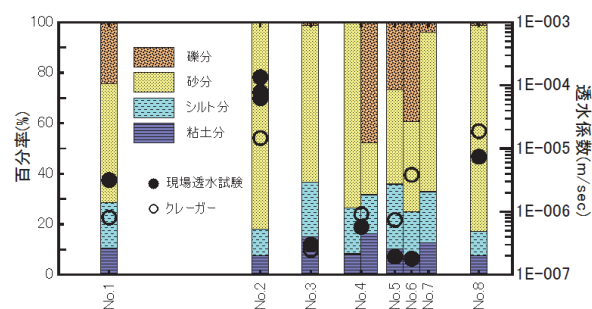


図-4 裏法尻の調査ピット底面の土の粒度組成と透水係数

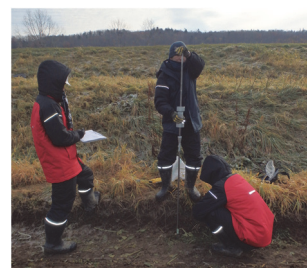


図-5 簡易動的貫入試験の様子



図-6 パイプロコーン試験装置の様子

4. 堤内・法尻付近の貫入抵抗とゆるみ

(1) 実施した貫入試験概要

a) 簡易動的コーン貫入試験

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る。 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。

b) パイプロコーン貫入試験

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あっても、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-6に示す。

コーン（荷重計内蔵）、ロッド、トリガーセンサー、バイプロハンマ、油圧発生ユニット、ワイヤー式深度検出器及びデータロガーで構成され、コーンの直径は36.6mm、断面積は1,052mm²である。バ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。バ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/m²)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

a)No.6の横断方向の簡易動的コーン貫入試験結果

13k100付近では法尻から30m程度離れた堤内地内でも多数の噴砂が発生しており、この基礎地盤内の緩みを把握するために堤内地の3箇所と裏法尻の1箇所、計4箇所（測線2）で貫入試験を実施した結果を図-7に示す。深度の原点はカゴ工撤去後の裏法尻6-1における基礎地盤地表面である。ここでは、相対的に N_d 値が小さい2以下の領域を緩み領域と定義し整理している。

いずれの箇所でも基礎地盤内に緩み領域が確認された。特に、噴砂発生箇所に最も近い箇所6-3では深度2.0～3.0mに局所的な緩みが生じており、基礎地盤上層の液状化、噴砂に伴う土粒子の流動によるものと考えられる。また、同地点では噴砂が発生した周辺の堤内地のみならず裏法尻下部にも緩みが生じていることが確認された。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^{2),3)}、現地においても同様の現象が発生していたといえる。

b)裏法尻の縦断方向の簡易動的コーン貫入試験結果

堤内地において噴砂が集中して発生した箇所と発生しなかった箇所における堤防裏法尻で貫入試験を実施し、緩み領域の有無を比較した。図-8に同地点における貫入試験結果および断面概要図を示す。なお、深度の原点は

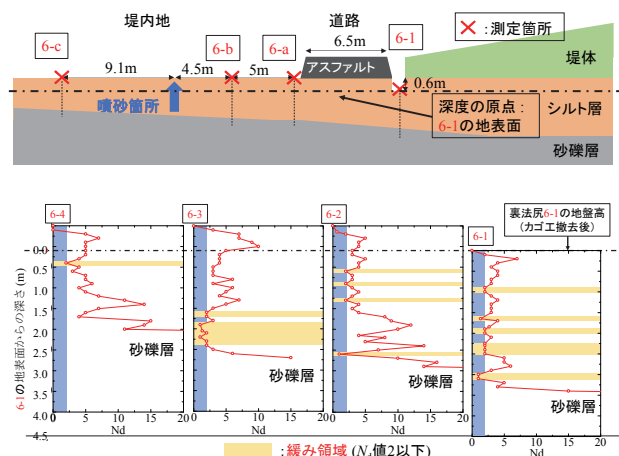


図-7 貫入試験結果（堤防横断方向：測線2）

裏法尻6-1（ピットNo.6内）における基礎地盤地表面である。図より堤内地において噴砂が多数発生した地点に近い5-1（No.5）、6-1（No.6）では3-1（No.3）、4-1（No.4）と比較して多くの緩み領域が確認された。特に、6-1においては深度3.0mにおいて貫入抵抗がほとんど無い N_d 値1以下の極めて緩んだ領域が存在していた。

また、下流ほど、砂礫層（ N_d 値20以上）が浅く分布していると言える。一般的に透水層を覆う難透水層の層厚が薄いほど噴砂は発生しやすく、パイピングは進展しやすいが^{2),3)}、この箇所は、下流箇所と比較して被覆土層が厚かった。3章で考察したように複層基盤の基盤下層と被覆土層の透水係数比が大きいことの影響も考えられる。また、同地点の噴砂は旧河道と隣接することで、境界部分が行き止まり構造と同様の働きを示した可能性も考えられる。今後、詳細な検討が必要である。

c)裏法尻の縦断方向のバイプロコーン貫入試験結果

バイプロコーン貫入試験はNo.1～No.8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れな

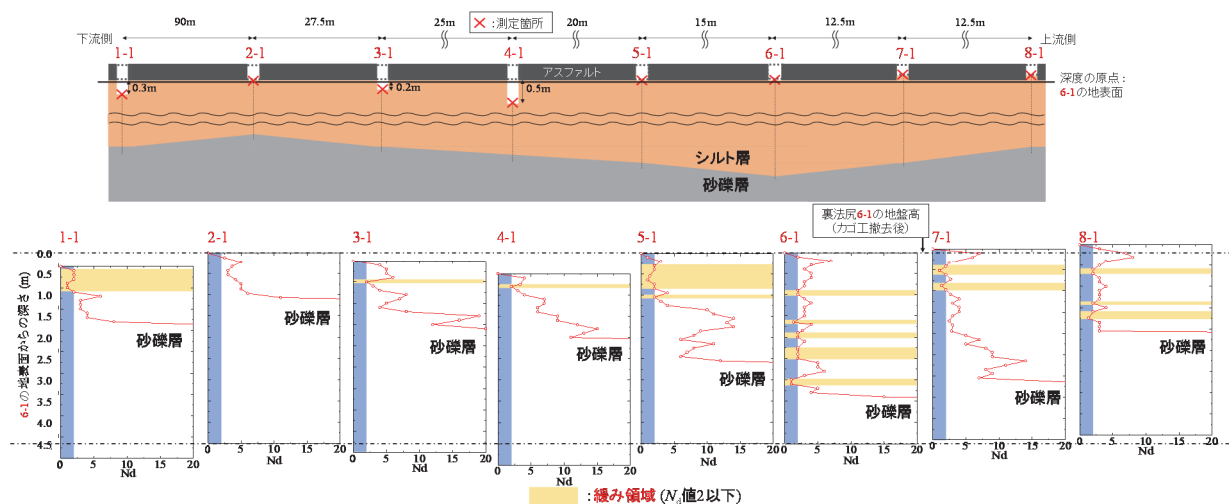
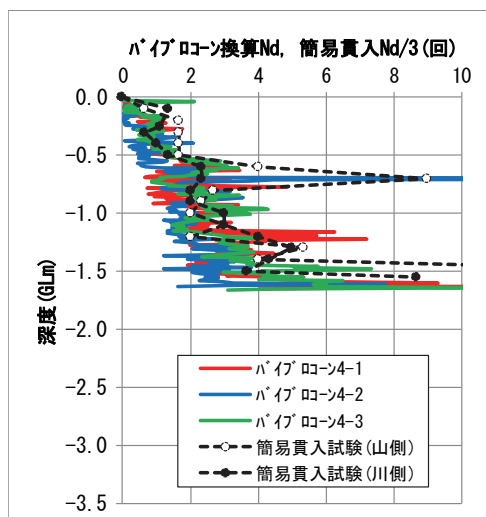


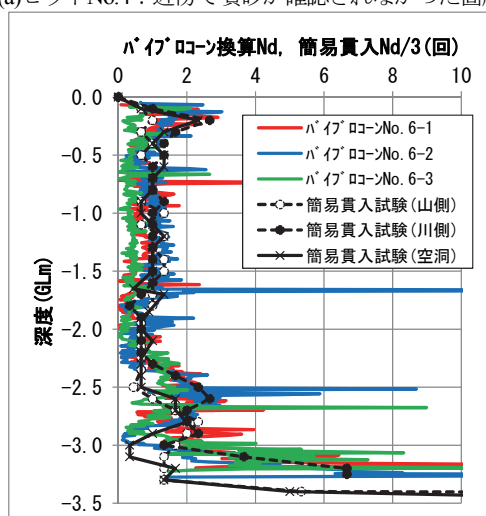
図-8 裏法尻部の貫入試験結果（堤防縦断方向：測線1）

かったピットNo.4の試験結果を図-9(a)に、堤内地側で噴砂が確認された箇所としてピットNo.6の貫入試験結果を図-9(b)に示す。同図には前述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⁶⁾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、バ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。



(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-9 バイプロコーンの換算 N_d 値の深度分布

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、バ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、実施を試みたバ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。

5. 浸透解析による噴砂挙動及び矢板効果の考察

(1) 解析概要

前章までの噴砂の記録や調査結果を踏まえて、矢板による基礎地盤内の圧力分布や流速場の変化を二次元浸透FEM解析により検討し、この地点の矢板施工がパイピングの進展抑制にどのような効果を発揮したかを考察する。

図-10に解析モデルの概要図を示す。使用する解析モデルは宮崎県北川左岸の13k100地点を参考に作成した。設定した各材料の透水係数も図に示す。いずれの材料も飽和体積含水率は簡単のため0.4に設定した。堤外側の基礎地盤の遮水矢板の有無の影響についても比較した。

境界条件は、堤内側の地表面は浸出面に設定し、初期外水位7.58m (T.P.) を堤外側に作用させ、基礎地盤下層を飽和状態にした。その後、堤外側の水位を上昇させることで非定常解析を行った。

(2) 解析結果および考察

図-11に堤外側に入力した外水位波形と堤防裏法尻直下の過剰間隙水圧の経時変化を示す。外水位は、平成30年9月30日から10月1日にかけて発生した出水時において、同地に最も近い長井観測所で記録された水位を参考に設定した。また、図の縦軸は堤防裏法尻直下（位置は図-10参照）の過剰間隙水圧（初期値からの増分）の圧力水頭を被覆土層厚1.63mで除し、無次元化した値である。まず圧力の最大値を比較する。矢板無しのケースでは最大値が2.55であるのに対し、矢板を設置したケースでは

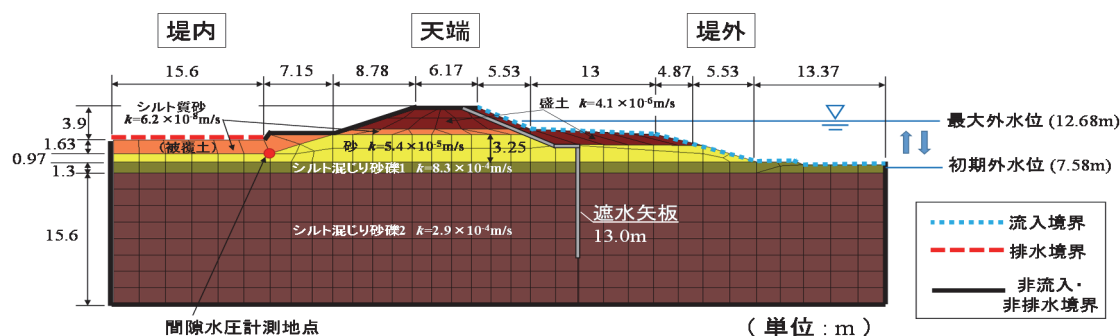


図-10 浸透解析モデルの概要図（宮崎県北川左岸13k100地点）

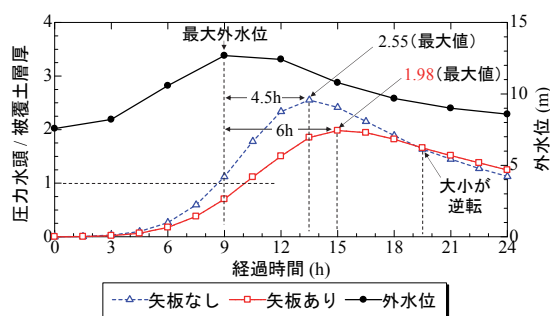


図-11 外水位波形と裏法尻直下の過剰間隙水圧の経時変化
(平成30年の実際の洪水時の水位波形)

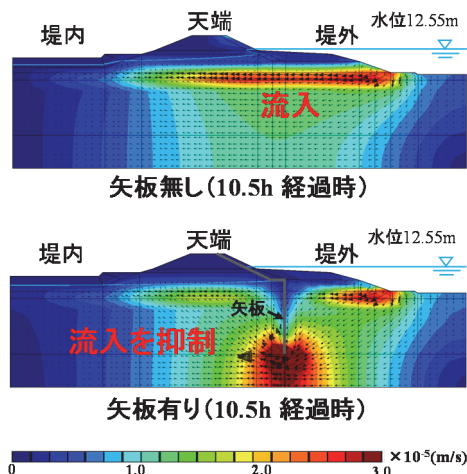


図-12 外水位ピーク後(10.5h経過時)における矢板の有無における流速ベクトルと流速コンター

1.98に減少(約2割の低減)している。よって、法尻付近の漏水の総流量も低減していることになり、流出する土粒子量を減らしたと考えられる。さらに、圧力が最大となるタイミングは、外水位がピークを超えてから矢板無しで4.5時間後、矢板有りで6時間後となっており、矢板は堤内の圧力上昇を遅延する効果が見られる。図-12には、比較のため外水位が低下し始めてから1.5時間後の10.5h経過時(矢板の有無にかかわらず図-11の縦軸の無次元化した圧力水頭の値が1を超えた時点)における流速ベクトルと流速長コンターを示す。矢板の有無に関わらず堤外から堤内に浸透流が発生しているが、矢板を設置した場合、天端下の流速が低下し、堤内への流入を抑制している様子が確認できる。

以上のことから、矢板設置後にも噴砂が発生した場合でも、堤防の突発的なパイピング破壊を抑制していると考えられる。ただし、今後は三次元的浸透流れによる矢板設置の範囲や深度を考慮した抑制効果についての検討も必要である。

6. おわりに

本稿では、北川川坂地区の左岸下流側区域12k800～

13k250において近年の出水時に繰返し多数発生した噴砂とゆるみの発生メカニズムを調べるために行った調査・解析結果を報告した。裏法尻部分の開削をすることで判明した事実も多い。主な結果を以下にまとめる。

- 1) 当該地区の基礎地盤は複層構造になっており、砂礫層上層の被覆土層の土質や細粒分の含有率、透水性が噴砂の発生の有無に大きな影響を与えている。最も顕著に噴砂が発生した箇所は、旧河道で被覆土層の透水係数が低く、透水層の圧力を逃がしにくい地盤構造であった。
- 2) 本調査用に開発、実施を試みたパイプロコーンは、従来の簡易動的コーンでは貫入し難い礫分混じりの層であっても迅速に試験することができ、従来の簡易動的コーンの結果とも良い整合が見られた。
- 3) 堤内の噴砂箇所ではゆるみ領域が発生していることがわかった。また、噴砂が多数発生した測線では、法尻下部にも貫入抵抗がほとんどない極めてゆるんだ箇所もあることが明らかになった。
- 4) 観測された外水位波形を用いた非定常浸透解析の結果、打設された矢板によって堤防裏法尻の圧力上昇量と漏水流量が低減され、堤内側の圧力上昇を遅延する効果が見られた。浸透による基礎地盤の液状化、噴砂によるゆるみ、堤体下の突発的なパイピングの進展を抑制したと考えられる。今後も填砂動態の記録や継続的な調査が、堤防の効率的な維持管理において重要とおもわれる。

謝辞：本研究の成果は宮崎県延岡土木事務所の支援・協力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

- 1) 石原雅規ら：北川における漏水の変遷と地形及び堤防構造等の関係，河川技術論文集，第25巻，2019。(投稿中)
- 2) 岡村未対ら：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，第25巻，2019。(投稿中)
- 3) 西村柁哉，前田健一，櫛山総平，泉典洋，齊藤啓：異なる基礎地盤特性の堤防の噴砂動態・パイピング挙動と漏水対策型水防工法の効果，河川技術論文集23巻，pp.381-386，2017。
- 4) 西村柁哉，前田健一，櫛山総平，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 巻，pp.381-386，2018。
- 5) 品川俊介，矢島良紀，西塚大，阿南修司：河川堤防基礎地盤漏水現場におけるトレンチ調査，日本第四紀学会講演要旨集，48，p.7，2018。
- 6) 大久保駿，上坂利幸：簡易貫入試験機による地盤調査，土木技術資料，Vol.13，No.2，1971。

(2019. 4. 2受付)