

平成30年7月豪雨による肱川阿蔵箇所でのパイピング被災状況とメカニズムの一考察

松山 海人¹・三國 宣仁¹

¹四国地方整備局 大洲河川国道事務所 工務第一課 (〒795-8512 愛媛県大洲市中村210)

平成30年7月豪雨では一級河川肱川において観測開始以降最大の出水を記録した。左岸18k200付近の堤内地では噴砂を伴う激しいボーリングが発生したことで民家の小屋が傾倒し、川裏法面では陥没・ズレ下がりといった被害が生じた。そこで、当該箇所について被災メカニズムを明らかにするとともに、パイピングの進展度を把握することを目的として中型動的コーン貫入試験（ミニラム）及び堤防開削調査を実施した。その結果、堤防法面の陥没・ズレ下がりとは基礎地盤のパイピングによる吸出しによって生じていたことが明らかになり、パイピングは最大で10m程度、堤防敷幅に対して1/4程度まで進展していたと評価した。

キーワード 河川堤防、パイピング、中型動的コーン貫入試験、堤防開削調査、質的整備

1. はじめに

河川堤防の安全性を確保することは、流域住民の人命・資産を守る上で極めて重要な課題である。しかし、近年の気候変動により集中豪雨の頻度が増し、水位が高い状態が長期的に継続するなど、堤防への負荷は増加している。これについて、今後はこれまでの量的な整備に加え、耐浸透機能・耐浸食機能・耐震機能の強化といった質的な整備を進めていく必要がある¹⁾。

平成30年6月28日～7月8日にかけて、西日本を中心に広い範囲で記録的な大雨となった。大洲河川国道事務所が管理する肱川においては観測開始以降最大の水位を観測し、左岸18k200地点では激しい噴砂と川裏法面の陥没・ズレ下がりに伴う堤防のパイピング被害が発生した。

パイピングとは一般に以下のように進展し、パイピングが堤防の半分くらいまで進展すると、その後一気に貫通し、破堤に至るといわれている²⁾ (図-1参照)。

- ① 裏法尻付近に噴砂を伴った漏水が発生し、川裏付近にパイプ（水ミチ）が形成される。
- ② 川表側に向かって堤防下にパイプが進展する。
- ③ 堤防下のパイプが河川と繋がる。
- ④ パイプは拡大し、法面が陥没する。
- ⑤ 破堤・決壊に至る。

また、近年の研究では、基礎地盤が単一の透水性地盤の場合はパイピングの危険度は相対的に低いが、上層が砂層で下層に透水性のよい砂礫が分布する複層構造の場合は注意を要することが分かっている³⁾。しかし、パイピングの発生条件や詳細なメカニズムについては明

らかになっていない部分が多い。

本稿では、平成30年7月豪雨でのパイピング被災箇所において詳細調査を実施し、被災メカニズムやパイピングの進展度について検討した結果について述べる。

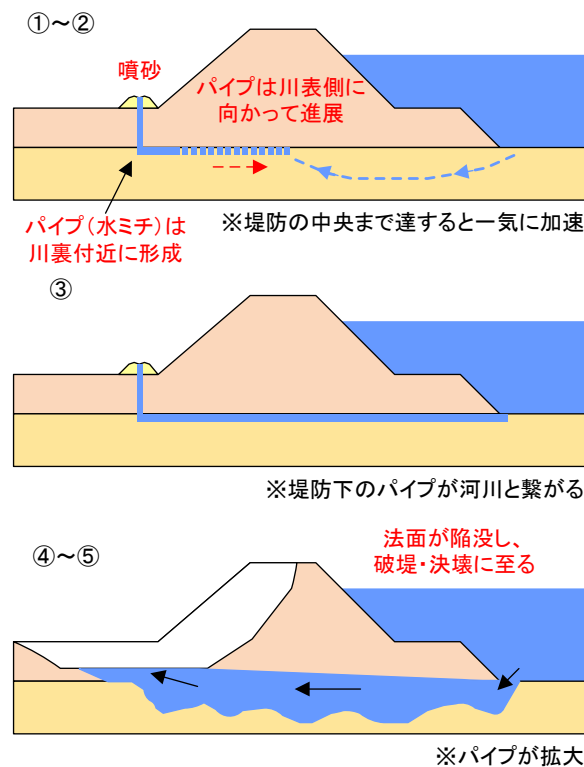


図-1 パイピングのメカニズム

2. 被災地の概要

(1) 水位・降雨状況

図-2に被災箇所近傍の水位観測所における7月5日～7月8日にかけての水位及び降雨量を示す。7月4日22時より断続的な降雨が続き、7日3時～7日7時の間には時間20mmを超える雨量を観測した。5日10時～7日9時にかけての2日間雨量では、計画降雨量340mm/2dに迫る333mm/2dを観測し、7日12時20分には計画高水位まで40cmに迫る8.11mまで水位が上昇した。これまでに最も水位が上昇した平成16年台風16号での出水と比べて1.26mも上回る観測開始以降最大の水位を記録した。

(2) 旧地形概要

図-3に被災箇所の治水地形分類図を示す。被災箇所は旧河道を利用したお堀を明治期に入ってから埋め戻した箇所位置している。また、川側には床止めがあり、出水時には水位が上昇しやすい箇所でもある。

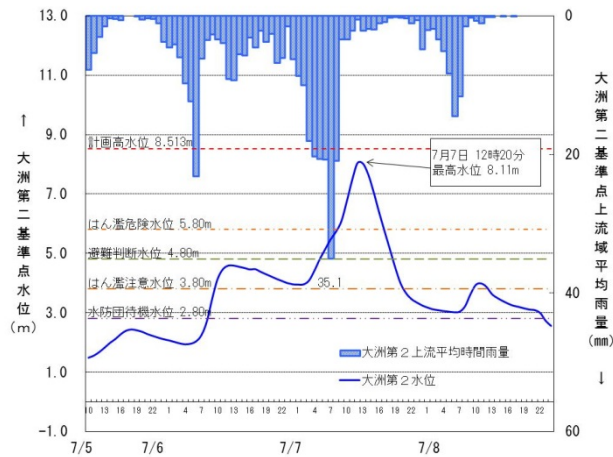


図-2 水位および降雨量（大洲第二地点）

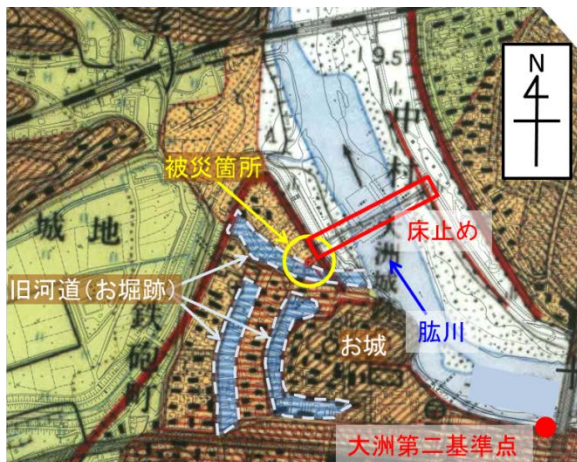


図-3 治水地形分類図

3. 河川堤防の被災概要

図-4～図-6に被災状況写真を示す。堤防法尻では噴砂を伴う激しいボイリングが発生し、隣接する小屋では約1mの沈下と35度の傾斜が生じ、もう一棟の母屋では数度の傾斜が生じた。また、法面では、およそ12m（縦断方向）×9m（横断方向）にわたって10～50cm程度の陥没が生じ、法尻付近の用地境界ではブロック塀が10～30cm程度沈下した。また、上流側でも小規模な噴砂や法尻での陥没が発生した。

図-7に被災から4ヶ月後に撮影したUAVによる全景写真を示す。大きく沈下・傾倒した小屋は撤去され、母屋を撤去するための工費用仮設道路が施工されている。同図には激しくボイリング（噴砂）した箇所以外に小規模な噴砂が発生した範囲やお堀を埋め立てた埋土の範囲も示している。激しくボイリングが発生したのは、お堀の埋土と法尻が交わる箇所である。また、小規模な噴砂が発生した範囲は、上流側法尻付近の埋土の範囲で発生している。



図-4 堤防裏のり面の陥没・ズレ下がり状況全景



図-5 左：小屋の傾倒・噴砂状況 右：母屋の被災状況



図-6 左：法面変状状況 右：上流側被災状況



図-7 被災地のオルソ画像

4. 現地調査

(1) ボーリング調査及びハンドオーガー

被災地の地層構成及び土の透水係数等の浸透特性を把握することを目的に、川表・川裏の2箇所でもボーリング調査を実施した。また、堤内地に広がるお堀の埋土の性状及び分布範囲を把握するため、ハンドオーガーによる試掘調査を行った。図-8に調査より明らかになった想定地質断面図を示す。

基礎地盤には主に透水性の良い砂礫層 (Ag) が分布し、その上には砂礫層 (Ag) に比べ透水係数が1/10程度小さな砂層 (As1) が分布するいわゆる複層構造を呈している。川裏側には粘土層 (Ac) が分布するが、法尻より川裏側ではシルトを含んだ角礫からなる緩いお堀の埋土が分布する。埋土は砂礫層 (Ag) に対し透水係数が1/100程度小さく、被覆土層として作用するものと想定した。噴砂 (ボーリング) は、粘土層 (Ac) と埋土の境界付近の埋土内で発生している。

堤体は透水性の良い砂礫 (Bg) からなるが、川表側には既設の遮水シートがあり、河川水が直接堤体には入りにくい構造となっている。

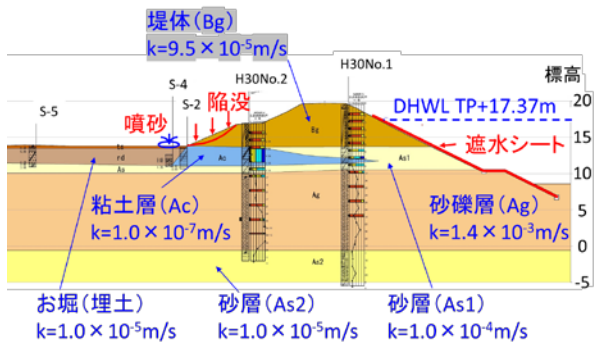


図-8 想定地質断面図及び透水係数

(2) 中型動的コーン貫入試験

基礎地盤が単一の透水性地盤の場合はパイピングの危険度は相対的に低い、同じ透水性地盤であっても透水性の高い層が下に分布する複層構造の場合はその境界が水ミチとなりパイピングが生じやすいことが最近の研究で分かっている。今回の被災箇所もこれに該当し、砂礫層 (Ag) と砂層 (As1) の境界が水ミチとなりパイピングが進行したことで、吸出しによる噴砂が発生した可能性が高いと考えられる。そこでパイピングによる砂層 (As1) 内の水ミチを把握するため中型動的コーン貫入試験 (以下、ミニラム) を実施した。図-9にミニラム調査位置図、図-10にミニラムの試験状況を示す。通常ミニラムでは20cm毎に貫入抵抗値 (Nd値) を評価するが、パイピングで生じる水ミチ (緩み) は数cm程度といわれているため一打撃毎の貫入抵抗値も評価した。ミニラムは変状箇所を包括するように、2m間隔で格子状に実施した。代表断面の位置について、図-9内に示す。

a) 横断方向

図-11に堤防横断方向の代表的な試験結果を示す。陥没した法面上では粘土層 (Ac) 内に自沈箇所が多い。滑落崖より外の小段の下に分布する砂層 (As1) では深度方向にNd値は大きくなるが、噴砂した法尻付近の砂層 (As1) では相対的にNd値が小さく (概ねNd値 ≤ 3)、かつ深度方向にNd値は大きくならないことから、パイピングによって緩みが生じた可能性がある。



図-9 ミニラム調査位置図

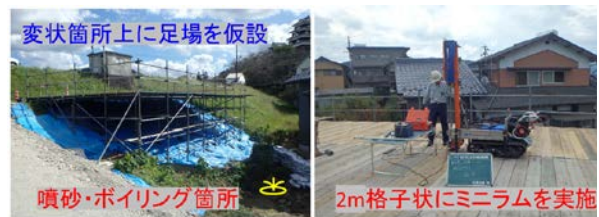


図-10 ミニラム試験状況

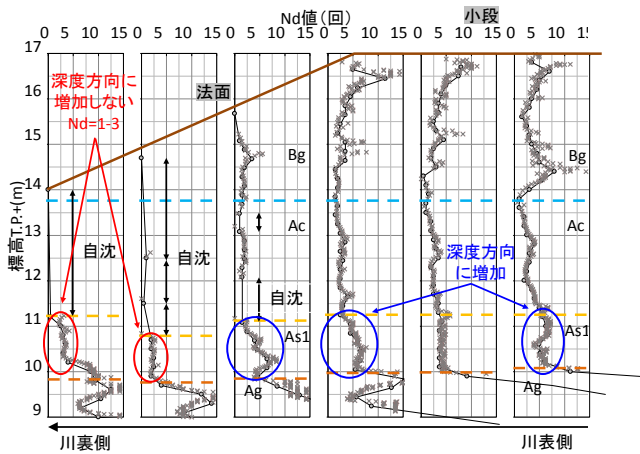


図-11 堤防横断方向 ミニラム調査結果

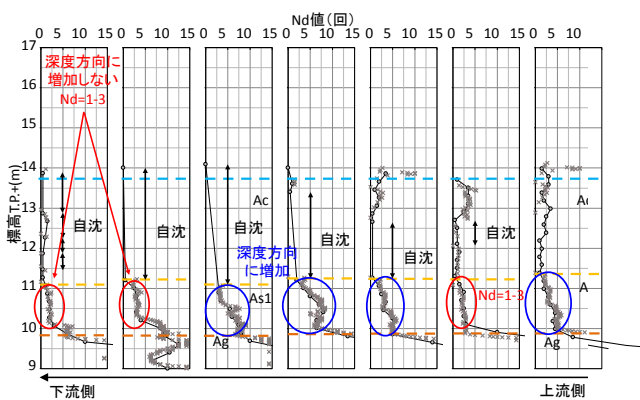


図-12 堤防縦断方向 ミニラム調査結果

b) 縦断方向

図-12に堤防縦断方向の代表的な試験結果を示す。粘土層 (Ac) 内の自沈の程度は、噴砂した下流方向に向かって大きくなる傾向にある。砂層 (As1) の緩みも同様に、下流側では緩みの影響と評価できる箇所が分布するが、上流側では緩みによる乱れの影響は比較的少ない。

(3) 堤防開削調査

変状メカニズムを検証するため被災箇所の堤防開削調査を行った。図-13に堤防開削範囲平面図を示す。平面図には噴砂によって傾倒した小屋とミニラムの調査位置との関係も示している。図-14に堤防開削状況上空写真を示す。

a) 下流側断面

図-15に下流側堤防横断方向の堤防開削調査結果を示す。砂礫層 (Ag) の上に分布する砂層 (As1) は川裏方向に向かい斜め下へ落ち込み、分布が途中で途切れている。途切れた箇所からは砂脈が発達し、その周りからは鉛直方向のクラックが発達している。図-17に砂脈及び噴砂した砂の粒径加積曲線を示す。砂脈及び噴砂の粒度分布は砂層 (As1) とよく一致することから、両者は砂層 (As1) に由来するものと考えられる。このことから、



図-13 堤防開削範囲平面図

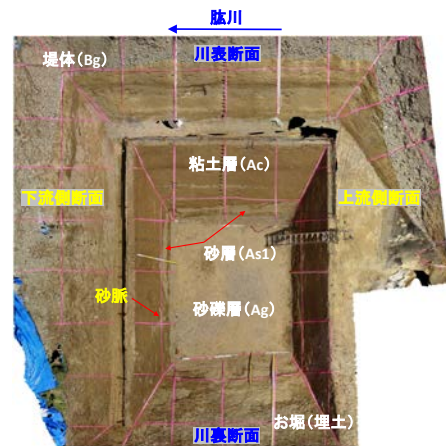


図-14 堤防開削状況上空写真

もともと水平方向に連続して分布していた砂層 (As1) がパイピングによって噴砂として地表面に吸出され、一部は砂脈となって粘土層 (Ac) に貫入することで陥没が生じたものと考えられる。鉛直方向のクラックは、粘土層 (Ac) が陥没した際に発達したものと考えられる。

開削調査から明らかになった粘土層 (Ac) の下面深度はミニラムの結果と概ね整合していたが、開削調査ではミニラムの結果に見られるような緩みの存在は判別できなかった。

b) 上流側断面

図-16に上流側堤防横断方向の堤防開削調査結果を示す。堤防法面には滑落崖が見られ、堤体 (Bg) 内にもせん断された跡が確認できる。また、これに連続するように粘土層 (Ac) 内でもクラックが発達している。川裏側にはくさび状にお堀の埋土が分布し、埋土はスコップで軽くなると簡単に崩れるくらい緩い状態にある。粘土が薄くなるくさび状の埋土の下端で砂礫層 (Ag) が埋土内に貫入している。下流側で見られたような砂層 (As1) の吸出しは確認できないことから、下流側とはやや違うメカニズムで変状した可能性が高く、上流側断面はすべりの影響の方が強いと考えられる。

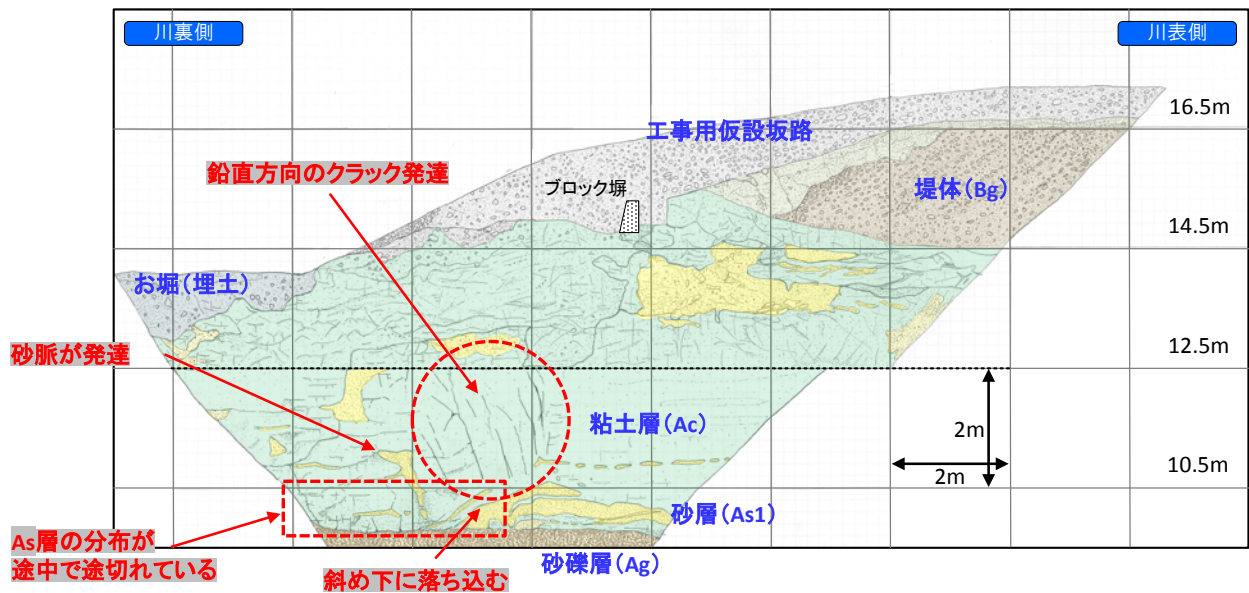


図-15 下流側堤防横断方向 堤防開削調査結果

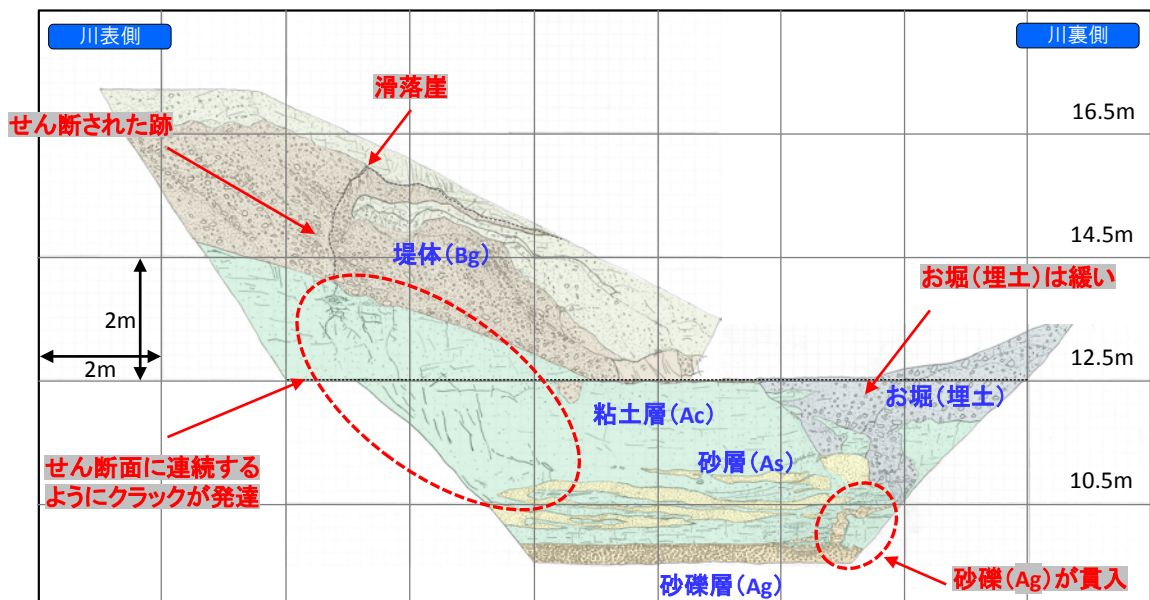
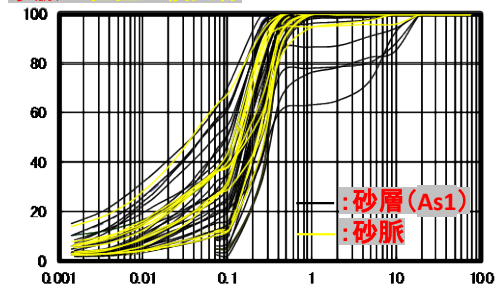
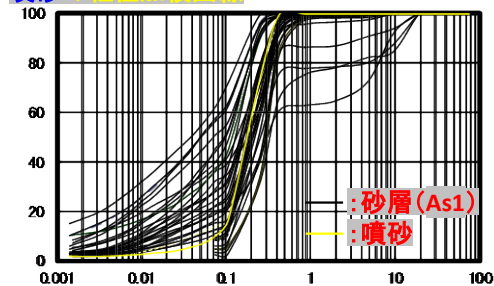


図-16 上流側堤防横断方向 堤防開削調査結果

砂脈の粒径加積曲線



噴砂の粒径加積曲線



砂脈及び噴砂は砂層 (As1) を由来とする

| | | | | | | | |
|----|-----|----|----|----|----|----|----|
| 粘土 | シルト | 細砂 | 中砂 | 粗砂 | 細礫 | 中礫 | 粗礫 |
|----|-----|----|----|----|----|----|----|

| | | | | | | | |
|----|-----|----|----|----|----|----|----|
| 粘土 | シルト | 細砂 | 中砂 | 粗砂 | 細礫 | 中礫 | 粗礫 |
|----|-----|----|----|----|----|----|----|

図-17 砂脈及び噴砂の粒径加積曲線

5. 考察

(1) 被災メカニズム

開削調査結果をもとに被災メカニズムを推定した。図-18に被災メカニズムを示す。

STEP1：水位の上昇に伴い、基礎地盤に動水勾配が発生。

STEP2：砂礫と砂層の境界でパイピングが発生、砂層の多くは埋土から地表面へ水と一緒に噴出。一部の砂層は鉛直方向の揚圧力により粘土層に貫入（砂脈の発達）。

STEP3：パイピングが進展し砂層に吸出しや緩みが発達。

STEP4：砂層が吸出されたことで粘土層や埋土が陥没し、それに伴って堤体も一緒に陥没。

(2) パイピングの進展

ミニラムの結果は開削調査の結果とよく整合し、粘土層の下面深度を概ね捉えていた。そこで、ミニラムの結果をもとに粘土層の下面標高を評価した。図-19に粘土層の下面標高コンター図を示す。粘土層の下面標高は法尻付近で低くなっており、特にボーリングが発生した下流側では堤防横断方向にも面的に低くなっている。また、同図には砂層が緩んでいるものと評価できるNd値が深度方向に増加せず、かつNd値 ≤ 3 の箇所を+印で示している。この結果、被災地では法尻から川表に向かって最大で10m程度、堤防敷幅の約1/4程度パイピングが進展したものと推測した。一方、対策工として基盤漏水対策のための矢板工法を不透水層まで施工したため、今後パイピングが更に進展する可能性は低いものと考えられる。

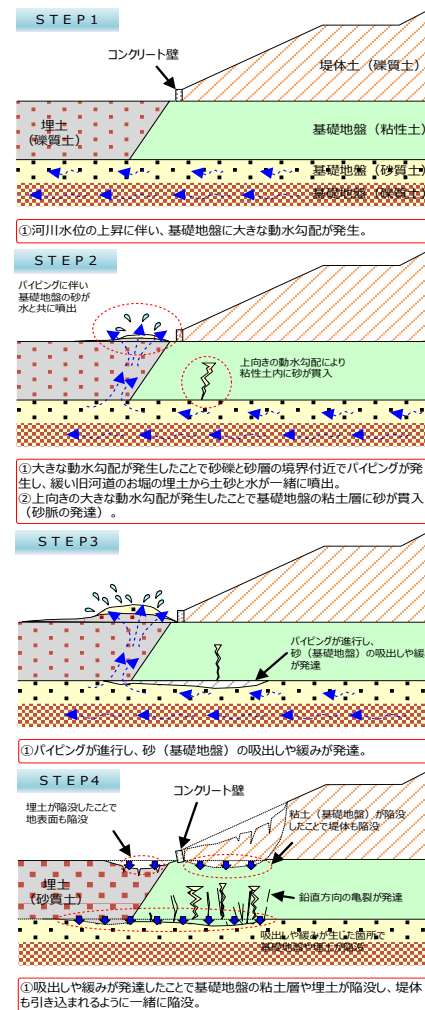


図-18 被災メカニズム

+ ミニラムで砂層に緩みが見られた地点 (Nd値が深度方向に増加せず、かつNd値 ≤ 3)

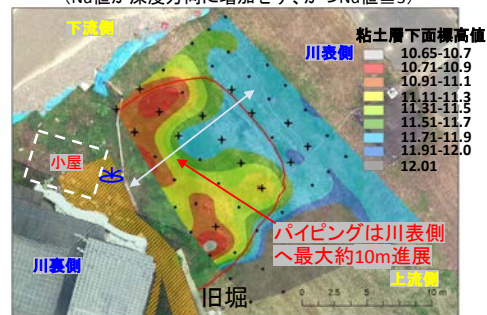


図-19 粘土層下面の標高コンター⁴⁾

6. おわりに

パイピングが進展すると、その後一気に地層内を貫通し、最悪の場合破堤に至る。また、一度パイピングが発生した箇所では、次回以降出水でパイピングが進展する恐れもあり、深刻な問題であるといえる。

今回調査の結果、パイピング被災箇所はお堀の埋土に位置し、砂礫の上の砂層が吸出されて発生したものであることが確認され、パイピングに対して注意が必要といわれている複層構造であることが判明した。また、ミニラムの結果からパイピングの進展度について評価することができた。しかし、ミニラムでは十数cm単位の緩みを把握することはできるが、数cm単位の水ミチを検出することは困難であるため、今後水ミチを精度よく捉えられる調査手法の確立が求められる。

謝辞：堤防開削調査にご協力頂き、また、本稿を執筆するに当たりご助言を頂いた愛媛大学大学院工学研究科生産環境工学専攻教授の岡村未対氏に深謝の意を表す。

参考文献

- 国土交通省 河川局 治水課：河川堤防設計指針，2002。
- 田中秀岳，笹岡信吾，下津隆介，福島雅紀：河川堤防基礎地盤におけるパイピング進行評価の検討，第6回河川堤防技術シンポジウム論文集，p.29-32，2018。
- 斎藤啓，前田健一，泉典洋，小林剛：豪雨による急速浸透と高水位継続のシナリオを考慮した透水性基盤を有する河川堤防の浸透・パイピングに対する安全性評価，地盤工学会誌，Vol.63No.9，p.30-33，2015。
- 陣内尚子，岡村未対：2018年西日本豪雨で被災した広川堤防の調査，第54回地盤工学研究発表会，2019。