

パイピングによる 河川堤防の変形に関する研究

森 啓年¹

¹山口大学大学院 創成科学研究科 准教授.

前線や台風に起因する豪雨が年々増加し、それに伴い河川堤防の被災事例も全国各地で発生している。しかし、河川堤防の被災原因の一つであるパイピングにより河川堤防の変形が発生し、堤防決壊に至るまでの過程にはまだ不明な点が多くあるのが現状である。

本研究では、パイピングによる河川堤防の変形に着目し、被災事例の現地調査やパイピング対策に関する模型実験や現地観測を実施した結果を報告する。

キーワード：河川堤防，パイピング，現地調査，模型実験，現地観測

1. 序論

我が国において、前線や台風に起因する豪雨が年々増加している。このような豪雨の増加により河川堤防の被災事例が、矢部川（2012年）、子吉川（2013年）、小田川（2018年）、千曲川・那賀川・久慈川（2019年）、江の川（2018年、2020年、2021年）など全国各地で発生している。

特に矢部川、梯川、子吉川、江の川の被災では浸透破壊の中でもパイピングが河川堤防の被災原因とされている。しかし、パイピングにより河川堤防の変形が発生し、堤防決壊に至るまでの過程にはまだ不明な点が多くあるのが現状である。

本研究では、パイピングによる河川堤防の変形に着目し、被災事例の現地調査やパイピング対策に関する模型実験や現地観測を実施した結果を報告する。

2. 現地調査

(1) 被災状況

現地調査は、2018年7月豪雨、2020年7月豪雨の際に繰り返しパイピングに伴う噴砂が発生した江の川右岸15.0k付近を対象として実施した（図-1、2）。なお、3年間で2回繰り返し高い水位を経験し、噴砂が繰り返し発生したにも関わらず、河川堤防の変形はみられなかった。

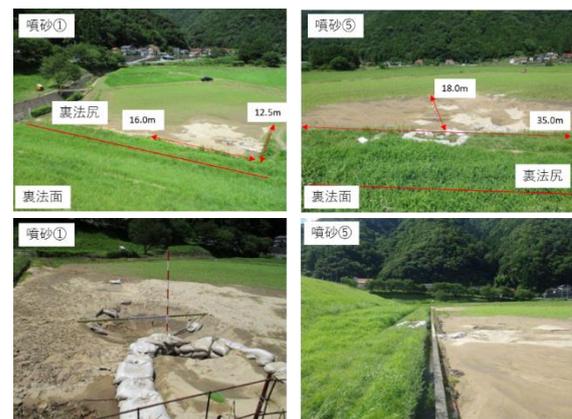


図-1 2018年7月豪雨時被災状況（中国地整提供）

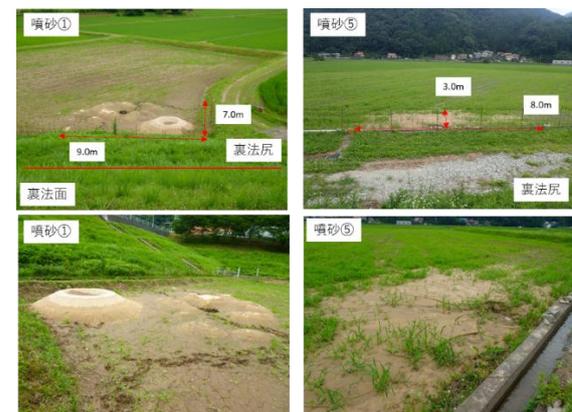


図-2 2020年7月豪雨時被災状況

(2) 調査結果

河川堤防の基礎地盤の変状を把握するために、噴砂発生箇所を中心に開削調査を2020年7月豪雨後に実施した。その結果、図-3の開削断面に示す様に、噴砂発生箇所の

直下には、基礎地盤の被覆土となるUc層を貫く幅1mを超える砂柱が存在していることが観察された。図4に示す様に、被覆土下の砂質土層及び礫質土層を構成する砂粒子がこの砂柱を通じ、噴砂となって噴出していることが確認された。一方、噴砂量が最も大きな地点の開削断面であっても、パイピングに起因する基礎地盤の被覆土Uc層の沈下や変形は確認されず、前述の様に周辺の河川堤防の変形もみられなかった。



図-3 開削断面（噴砂量最大地点）



図-4 開削断面（噴砂・砂柱接続地点）

(3) 数値解析

次に、2次元非定常飽和不飽和浸透流解析を用い、2018年7月豪雨と2020年7月豪雨の2回の洪水時の河川水位と降雨を外力として与え数値解析を行った。その結果、基礎地盤の砂質土層・礫質土層を通じて河川水による水圧が作用し、漏水・噴砂が発生しており、堤体からの浸透による影響はほぼないことが確認された。また、パイピング対策（川表遮水工法）の実施、出水規模の違いにより、2020年7月豪雨の際の川裏法尻部の間隙水圧は1～2割、ダルシー流速は2～3割程度、2018年7月豪雨の際より改善していることが示された。

3. 模型実験

(1) 被災状況

パイピング対策として一般的に用いられる「川表遮水工法」は、遮水効果がある鋼矢板などを、川表法尻直下に透水層を遮断するように設置するものである。しかし、

透水層の厚さが非常に深い位置までである場合など、鋼矢板で透水層を完全に遮断できない事例（以下、浮き型遮水矢板）が存在する。

本研究では、浮き型遮水矢板のパイピング対策効果を把握するため、透水層への根入れ深さや設置位置が、川裏法尻直下の圧力水頭や堤内地への漏水量にどのように影響するか模型実験を行った。

模型実験は浮き型遮水矢板の透水層への根入れ深さや設置位置を変化させた表-1に示す6ケースを行った。図-5に模型実験の横断面図を示す。遮水矢板は2mm厚の亚克力板を使用し再現し、実験土槽との接縁部はテープにより遮水した。

実験開始前に、1時間以上給水槽と排水槽の水位を堤内地表層と同じにして、基礎地盤を飽和させた。その後、実験開始とともに、外力として給水槽側の水位を10mm/分で上昇させ、120mmを最高水位として固定した。全てのケースにおいて、実験終了は水位を上昇開始してから20分とした。実験中は、間隙水圧計による圧力水頭、デジタルスケールによる漏水量を計測するとともに、漏水や噴砂、水みちの発生状況をビデオカメラで撮影した。なお、遮水壁を設置しない無対策の場合は、水位の上昇とともに水みちが給水槽まで発達し、大量の漏水を発生させることを事前に確認している。

表-1 模型実験ケース表

ケース	根入れ深さ (透水層厚 100mm)	位置 (給水槽から)
1	30mm	100mm
2	60mm	100mm
3	90mm	100mm
4	30mm	200mm
5	60mm	200mm
6	90mm	200mm

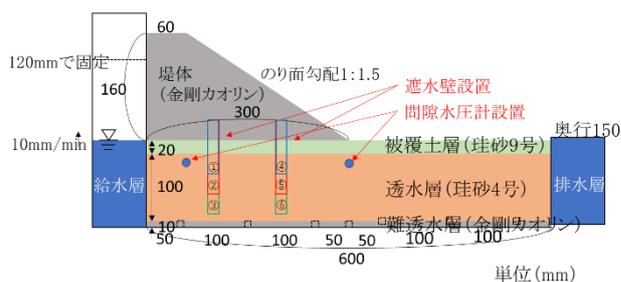


図-5 実験模型

(2) 実験結果

代表的な実験ケース3の実験状況を図-6に示す。いずれのケースにおいても、水位上昇に伴い噴砂と水みちが発生し、その後水みちは浮き型遮水矢板の位置まで発達した。そして、水みちが安定し、漏水量がほぼ一定の段階となった。なお、河川堤防の変形は、水みち上部の堤体は沈下するものの、他の部分の堤体は変形がみられなかった。

次に、川裏法尻直下の圧力水頭の実験開始時からの増分を図-7及び8に示す。まず、圧力水頭の上昇速度は、同じ設置位置であれば、いずれの根入れ深さでもほぼ同等であった。一方、設置位置が川裏法尻より遠いケースは、近いケースより上昇速度がいずれの根入れ深さでも早い傾向がみられた。また、最終的な圧力水頭の値について、設置位置が法尻から遠いケースでは、根入れ深さが大きいケースほど大きくなる傾向がみられた。一方、設置位置が川裏法尻に近いケースでは根入れ深さによる傾向はみられず、ほぼ同等であった。なお、水みちが矢板に到達した時間で圧力水頭の上昇が止まり、水みちが安定した後もほぼ安定していた。

さらに、堤内地への漏水量を図-9及び10に示す。まず、漏水量の増加速度は、同じ設置位置であれば、初期はいずれの根入れ深さでもほぼ同等で、その後根入れ深さが小さいケースが大きくなる傾向がみられた。ただ、その差は川裏法尻から近いケースでは比較的小さいものであった。また、設置位置が川裏法尻より遠いケースは、近いケースより増加速度がいずれの根入れ深さでも早い傾向がみられた。

模型実験の結果、浮き型遮水矢板により、水みちの進行を止め、堤防の変形を抑制することが確認された。また、法尻に比較的近い方に設置すると、根入れ深さに左右されず川裏法尻の間隙水圧の上昇や漏水量を抑制することが示唆された。

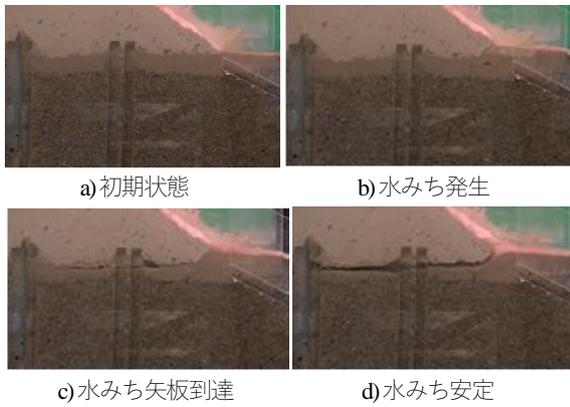


図-6 実験状況 (ケース3)

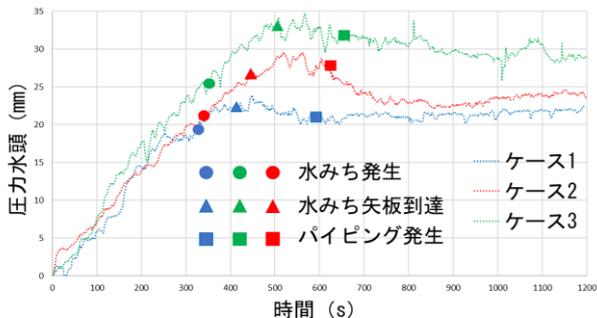


図-7 法尻直下圧力水頭増分 (ケース1-3)

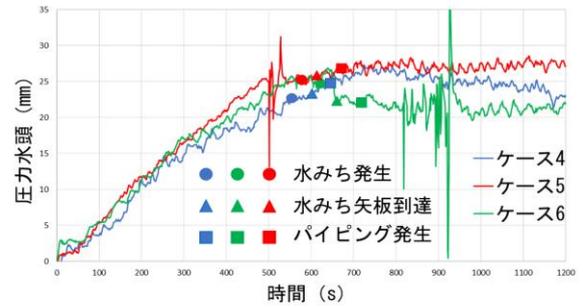


図-8 法尻直下圧力水頭増分 (ケース4-6)

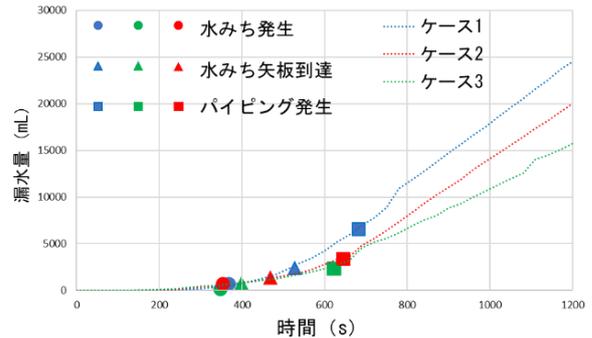


図-9 堤内地漏水量 (ケース1-3)

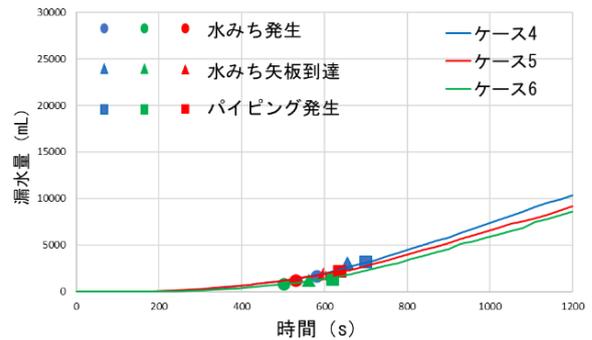


図-10 堤内地漏水量 (ケース4-6)

4. 現地観測

(1) 観測方法

堤内基盤排水工法が実施された佐波川左岸 25.5k 付近を対象ワイヤレス傾斜計の傾きの変化と直下流の堀観測所の水位及び降雨と前述の堤体内水位といった外力データを分析し、出水期における河川堤防川裏法面の変形を分析した。

図-11 に示す様に、ワイヤレス傾斜計は対象堤防の川裏法面に千鳥状に設置した。具体的に無体策区間の法肩(肩センサー)に1箇所、法尻(尻センサー)に2箇所、対策済区間の法肩(肩センサー)に7箇所、堤内基盤排水工法の擁壁(壁センサー)に8箇所設置し、傾きの変化を観測した。それらを集約し、サーバーに送信する集約ユニットは区間 A 及び B の境界に存在する排水樋門に設置している。



図-11 対象堤防とワイヤレス傾斜計設置状況

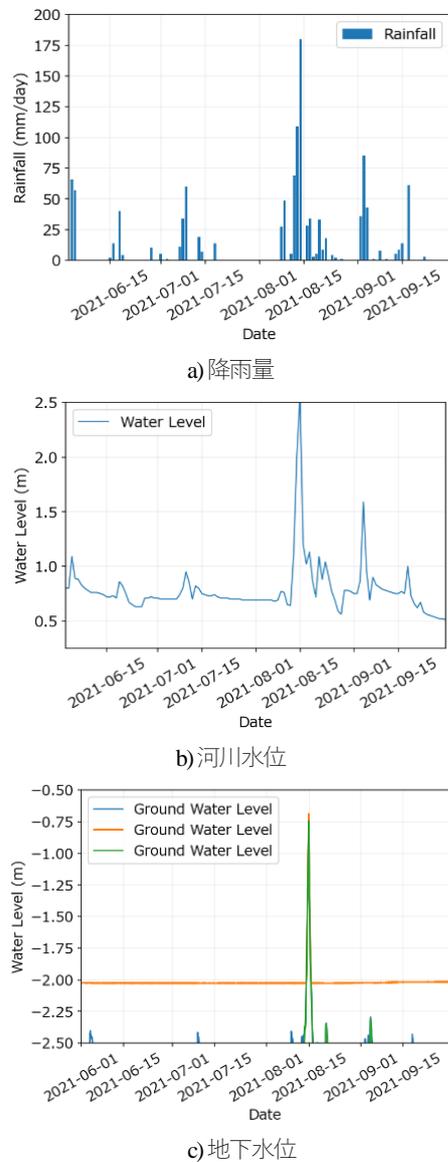


図-12 降雨量と河川水位および地下水水位の関係(2021年6月～9月)

(2) 観測結果

特に規模の大きな出水がみられた2021年の佐波川の出水期(6月1日～9月30日)の堀観測所の降雨量、河川水位と、堤体内水位を図-12に示す。あわせて、2021年の出水期に計測された裏法面の肩、尻、壁センサーの堤防横断方向の傾きの変化(正が川表側への傾き、負が川裏側のへの傾き)を、温度補正と平均値でゼロ補正した上で図-13に示す。

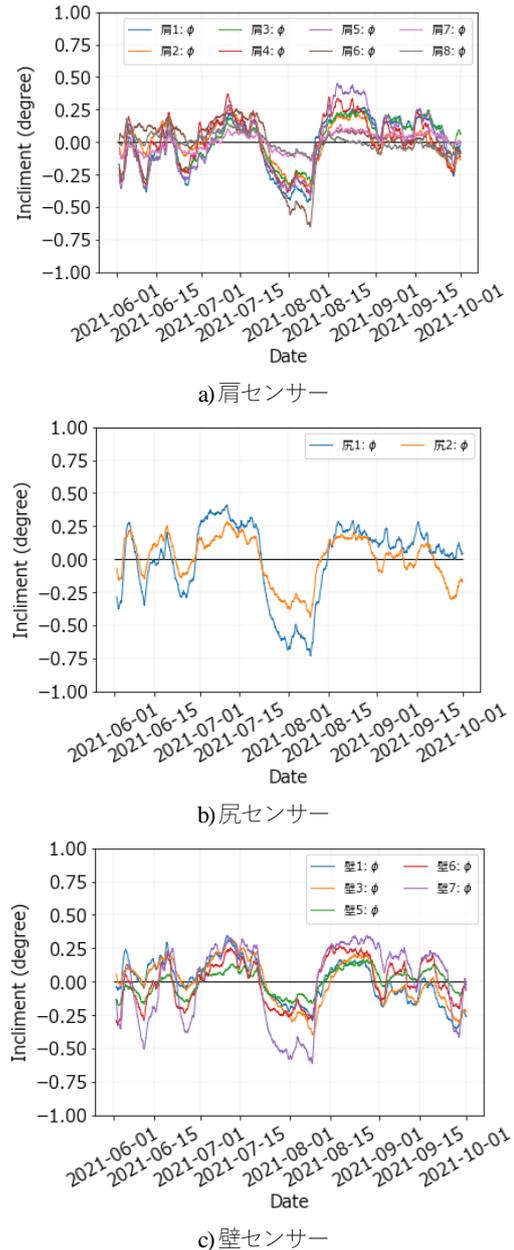


図-13 堤防横断方向の堤防の法肩、法尻、擁壁センサーの傾きの変化(2021年6月～9月)

これらの結果から、いずれの設置箇所も類似した傾向の傾きの変化がみられることが確認された、なお、傾きの変化量は ± 0.5 度程度と微小であり、目視による観察の結果でもすべりや盤膨れなどの顕著な変形は発生していないことを確認している。これらの結果から、河川堤防

の川裏法面は静止している訳ではなく、日々の外力の変化によりわずかに変形し続けていることが明らかになった。

次に傾きの変化と降雨・河川水位・堤体内水位の外力を比較すると、大きな降雨量、高い河川水位と堤体内水位が観測された時期に川裏法面の堤防横断方向の傾きは正の方向に向かう（川表側に傾く）傾向が見られた。特に、2021年8月豪雨の際にはその傾向が顕著にみられた。この川表側への傾きの変化は、堤防の裏法面がすべりを起こすときの変形と同様の挙動であり、顕著な変形までは至らなかったものの、大きな外力の作用に起因する変形である可能性が高いと考えられる。

5. 結論

本研究では、パイピングによる河川堤防の変形に関する現地調査や模型実験を実施し、その発生状況を把握するとともに、河川堤防の変形を抑制する対策について検討した。その結果以下のような結果が得られた。

1) 現地調査

基礎地盤の砂質土層・礫質土層を通じて河川水による水圧が作用し、漏水・噴砂が発生していること、それによる河川堤防の変形は発生していないことを確認した。また、数値解析の実施により、2018年7月豪雨時と2020年7月豪雨時を比較し、パイピング対策（川表遮水工法）の実施、出水規模の違いにより川裏法尻部の間隙水

圧は低下していることを確認した。

2) 模型実験

模型実験の結果、浮き型遮水矢板により、水みちの進行を止め、堤防の変形を抑制することが確認された。また、法尻に比較的近い方に設置すると、根入れ深さに左右されず川裏法尻の間隙水圧の上昇や漏水量を抑制することが示唆された。なお、堤体の土質によっては水みちが矢板上部をまわり込むように発生する可能性があるため、今後浮き型遮水矢板の現場での適用にあたっては、砂質土の堤体での挙動の検証も必要である。

3) 現地観測

現地観測の結果、河川堤防は日々の外力の変化によりわずかに変形すること、大きな外力を受けると河川堤防の川裏法面は川表側に傾く傾向があること、が確認された。今後、別の河川堤防でも変形に関する観測を実施し、変形と外力の定量的な関係の把握が必要である。

謝辞：江の川の現地調査にご協力頂きました国土交通省中国地方整備局河川部河川計画課、河川工事課、浜田河川国道事務所河川管理課、江の川下流出張所に御礼を申し上げます。また、佐波川の現地観測にご協力頂きました国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所河川管理課にも厚く御礼を申し上げます。