

越水した場合であっても「粘り強い河川堤防」の耐浸透性能に関する研究

山口大学 大学院 創成科学研究科 准教授 森 啓年

概要：

本研究は「粘り強い河川堤防」の耐浸透性能を評価し、設計の高度化に活用することを目的として、現地観測及び模型実験により耐浸透性能を検討したものである。

現地観測では、佐波川の表面被覆型の「粘り強い河川堤防」整備済区間の2断面において、観測井に小型絶対圧式水位計を設置し、堤体内浸潤線を観測した。2023年6月から7月にかけて山口県に線状降水帯が発生し、それに伴う中規模の出水があり、その際の堤体内浸潤線の観測を行った。その結果、主に降雨により発達した堤体内水位は、法肩及び法中でやや高くなっているが、河川堤防の安定性に大きく影響を及ぼす法尻の堤体内水位は法尻ドレーンの排水効果により低く抑えられていることが確認された。

また、模型実験では、一部自立型の「粘り強い河川堤防」の構造を再現した堤防模型を作成し、河川水を模した外水位を与え、実験状況を観察するとともに、浸透により発生する圧力水頭や漏水量を測定した。その結果、矢板や逆T型擁壁の貫入深さが大きい場合は、川裏法尻の圧力水頭が低減され、漏水量が少なくなる傾向があった。

現地観測及び模型実験から、表面被覆型の「粘り強い河川堤防」の耐浸透性能を確保するため、法尻ドレーンをあわせて設置することが必須であり、一部自立型の「粘り強い河川堤防」は構造物の貫入深さが耐浸透性能に大きく影響を与えることが示唆された。

キーワード: 河川堤防, 現地観測, 模型実験, 浸透

1. 序論

近年、我が国における豪雨の発生件数が増加傾向にある。それに伴い、河川堤防が決壊に至る事例も多く発生している。令和元年に台風19号が猛威を振るった際には71河川142箇所堤防が決壊に至ったが、それら全体の86%が越水に起因した¹⁾。

越水が発生した際には、越水した河川水による裏法尻をはじめとした裏法及び天端の侵食が進展した後に、決壊に至ることが知られている。この越水に対して、決壊に至るまでの時間を長くし、被害を最小限に抑えることを目的とした「粘り強い河川堤防」の研究開発が進められている。その構造形態として大型コンクリートブロックなどによる表面保護工を設置した「表面被覆型」と矢板や構造物を堤体内に設置した「一部自立型」が存在する。しかしながら、これらの「粘り強い河川堤防」は、従来の河川堤防の構造とは大きく異なり、その浸透特性は未だ不明な点が多いのが実情である。この様な中、「粘り強い河川堤防」の耐浸透性能を把握することが重要である。

本研究は「粘り強い河川堤防」の耐浸透性能を評価し、設計の高度化に活用することを目的として、現地観測とその再現解析及び模型実験により耐浸透性能を検討したものである。

2. 現地観測

(1) 観測方法

現地観測は山口県防府市の佐波川右岸 7k650～8k200 に施工された表面被覆型の「粘り強い河川堤防」の右岸 7k800, 8k000 地点の2断面で観測を行った。

堤体に設けられた各断面4箇所の観測井(川表1箇所、川裏3箇所)に小型絶対圧式水位計を大気圧補正用のバロメーターとあわせて設置し、堤体内水位の観測を行った。観測井と水位計の設置位置を図-1に示す。

(2) 観測結果

山口県に線状降水帯が発達したの2023年6月30日0時～7月2日0時の観測結果を対象とし、堤体内水位の

観測結果と堤体内水位・降雨量・河川水位ともに上昇が見られる時（2023 年 7 月 1 日 4 : 00）の浸潤線を図-2 に示す。

① 7.8k 断面

川裏法肩及び法中の堤体内水位は降雨量と同じ傾向を示した。これは、堤体の表面に敷設されたコンクリートブロックには微小な隙間が存在し、浸透した降雨の影響を主に受けたと考えられる。また、堤体内の浸潤線は川裏法尻に向かって低下していることから、ドレーンによる排水効果が確認できた。加えて、川表は表法面に敷設された遮水シートにより降雨の浸透が抑制され、遮水シート敷設位置より下から浸透した河川水位との相関が主に見られた。

② 8.0k 断面

7.8k 断面と同様に川裏法中の堤体内水位は降雨量と同じ傾向を示した。また、川裏法尻の堤体内水位が低下していることから、ドレーンによる排水効果がこの断面からも確認できた。一方、川表は遮水シートにより降雨の浸透が抑制され、さらに河川水位の浸透にも時間の遅れがみられ、ほとんど水位の上昇が見られなかった。なお、川表と同様に、川裏法肩の堤体内水位の上昇はほぼ見られなかった。

(3) 再現解析方法

次に、表面被覆型の「粘り強い河川堤防」の降雨浸透に対する影響を把握するために、浸透流解析を実施し、観測結果の再現を試みた。解析モデルを図-3、解析パラメータを表-1 に示す。解析モデル、解析パラメータともに、近傍の堤防詳細点検の結果を参考に設定し、不飽和浸透特性などは河川堤防の設計²⁾と同様に設定した。なお、対象断面そのものの地盤調査結果ではないため、局所的に土層が変化し、透水性が変化する可能性があることから、解析パラメータのうち堤体及び基礎地盤 Ag の透水係数については、パラメトリックスタディを行い、観測結果と可能な限り合致する様、共に 1/100 に調整したものを用いている。

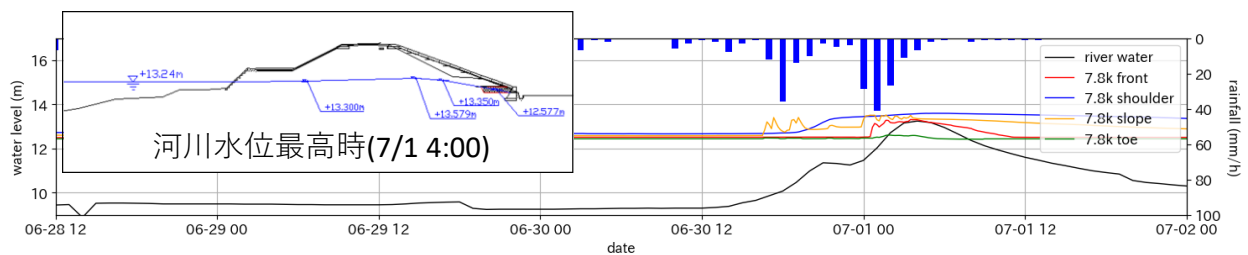
2023 年 7 月 1 日～2 日を再現期間とし、河川水位と降雨量は上流の真尾観測所をスライドして用いている。解析では、川表に河川水、モデル全体に降雨を境界条件として外力（図-4）を与えた。また、初期地下水位は地盤高から 0.5m 下に設定した。なお、現地観測の結果をもとに降雨境界は被覆ブロックの下に設定した。

(4) 解析結果

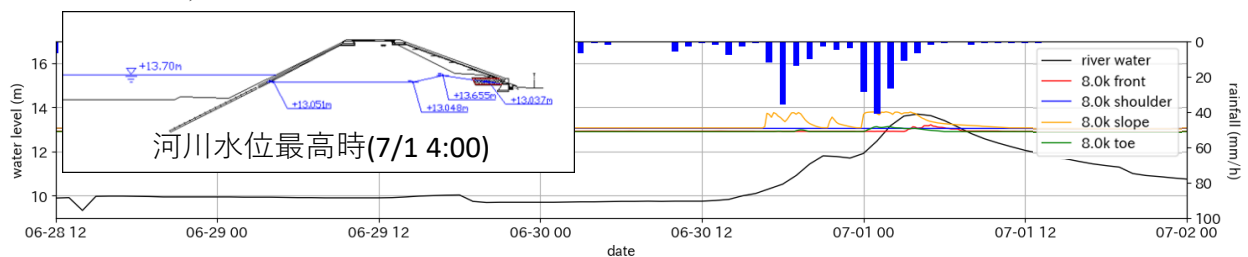
河川水位最高時の解析結果を図-5 に示す。また、同時刻の現地観測で得られた堤体内の浸潤線を示す。その結果、観測結果と同様に川裏法面から降雨の浸透により堤



図-1 観測井と水位計の設置位置



a) 7k800 河川水位、降雨、堤体内水位観測結果及び堤体内浸潤線（2023 年 7 月 1 日 4 : 00）



b) 8k000 河川水位、降雨、堤体内水位観測結果及び堤体内浸潤線（2023 年 7 月 1 日 4 : 00）

図-2 2023 年線状降水帯発生時の観測結果

体内に浸潤線が発達することが数値解析からも確認された。解析値と観測値を比較すると、解析値より観測値がやや高い水位となったが、裏法面での水位上昇の傾向はよく再現できた。

これらの結果から、表面被覆型の「粘り強い河川堤防」の設計の際に、裏法面のブロックは降雨が浸透する前提で耐浸透性能を評価することが必要なことが示唆された。また、裏法尻付近の堤体内水位を低下させ、河川堤防の安定性を確保するために、法尻ドレーンは有効であることが確認された。

3. 模型実験（矢板）

(1) 実験方法

天端から基礎地盤にかけて矢板を施工する「一部自立型」による粘り強い河川堤防を再現した模型実験を行い、矢板の貫入深さ・枚数が耐浸透性能に与える影響を、圧

力水頭及び漏水量の観点から検討した。

実験は表-2 に示す通り、無対策と矢板の貫入深さ及び枚数を変化させた計 5 ケースを実施した。図-6 に実験模型の横断面図を示す。基礎地盤の土層構成は、難透水層となる部分に高さ 10mm の金剛カオリン、透水層となる部分に高さ 100mm の珪砂 4 号、被覆土層となる部分に高さ 20mm の珪砂 9 号とした。堤体部は、岩国まさ土を用いて天端幅 100mm、高さ 120mm、法面勾配 1:2 の台形になるように、4 層に分けて密度管理を行いながら締固め度が 90% になるように作成した。実験模型用土槽の大きさの制限から、堤体は半堤体の模型とした。なお、実験模型の奥行きは 150mm である。表-3 に実験で用いた試料の土質定数、図-7 に粒径加積曲線を示す。

全てのケースにおいて、間隙水圧計により圧力水頭を、漏水や噴砂、水みちの発生状況及び堤体変状をビデオカメラで撮影することで把握した。また、漏水流量をデジタルスケールで計測した。設置した間隙水圧計は、図-6 に示す給水槽と土槽の境界部から 100mm、160mm、

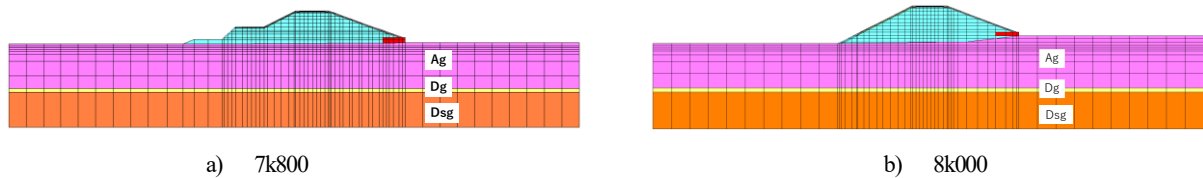


図-3 解析モデル

表-1 解析パラメータ

要素	透水係数(m/s)	要素	透水係数(m/s)
天端舗装	1.00E-07	堤体	2.43E-05
被覆ブロック	1.00E-09	Ag	3.74E-04
遮水シート	1.00E-03	Dg	2.12E-05
ドレーン	4.05E-05	Dsg	1.49E-07

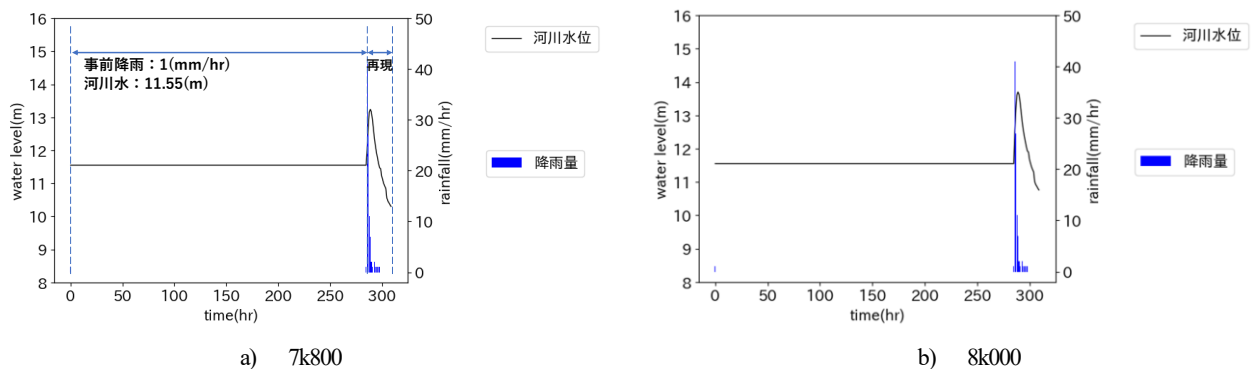


図-4 解析外力

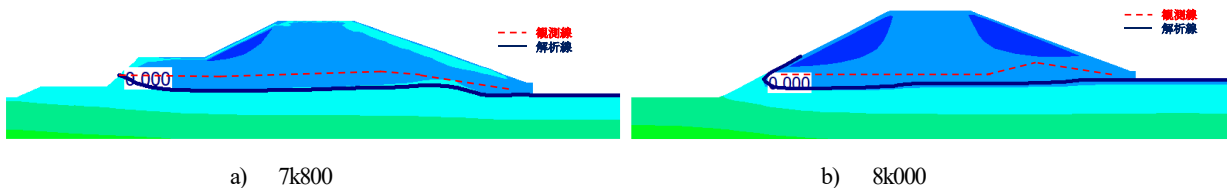


図-5 解析結果 (2023 年 7 月 1 日 4 : 00)

220mm, 280mm に設置しており, P1~P4 とした. 一般に自立型に使用される矢板の代用として, 厚さ 2mm のアクリル板を用いた.

実験開始前に, 水位を 130mm で 1 時間以上固定し, 基礎地盤飽和を行った. その後, 実験開始時に, 外力として給水槽側の水位を 50mm まで 10mm/min で上昇させ, 55 分間水位固定を行った後, 再び 100mm まで 10mm/min で上昇させ, 水位固定を 55 分間行った. 堤体の決壊もし

くは実験開始後 7200 秒後を実験終了条件と設定した.

(2) 実験結果

a) 実験状況

全ケースの二回目の水位上昇直前 (3600s) 及び直後 (3900s) の実験状況を図-8 に示す. いずれのケースにおいても, 水位上昇による水みちの発生・発達を確認され, 法尻部付近での噴砂と水みちの発達によるパイピング破

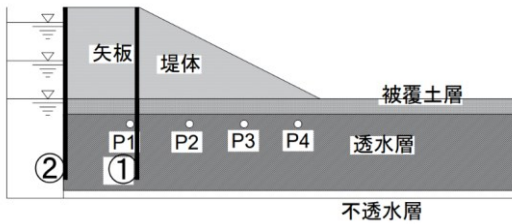


図-6 実験模型

表-2 実験ケース

	矢板位置	貫入深さ
Case0	-	-
Case1	①	170mm
Case2	②	170mm
Case3	①+②	230mm
Case4	①+②	230mm

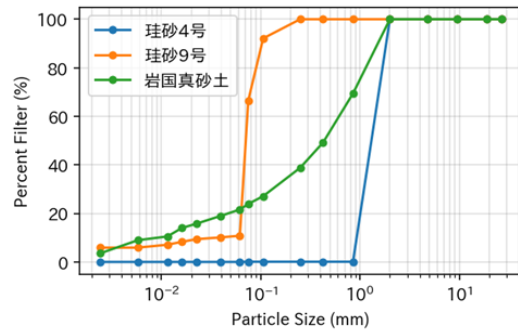


図-7 粒度分布

表-3 土質性状

		珪砂4号	珪砂9号	岩国 まさ土
施工時含水比	%	10	10	15
透水係数	m/s	2.4×10^{-4}	1.0×10^{-3}	3.6×10^{-5}
締固め度	%	90	90	90

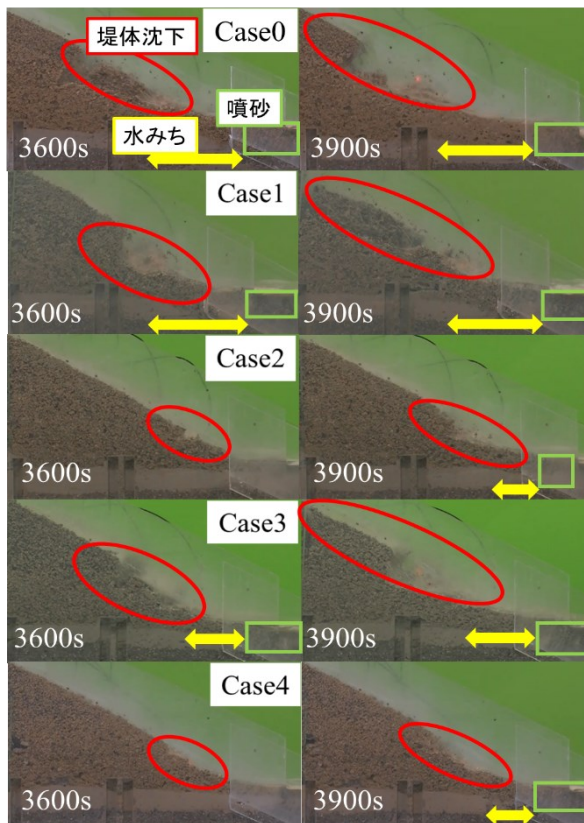


図-8 実験状況

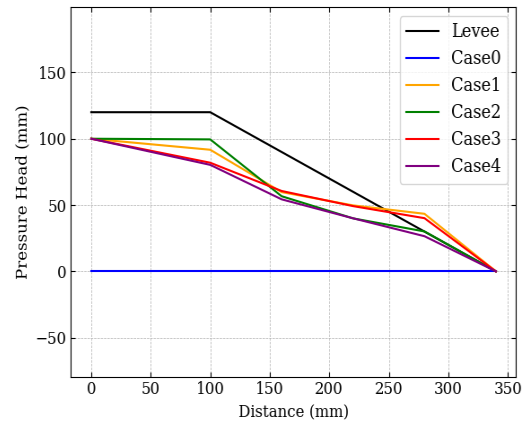


図-9 堤体内浸潤線

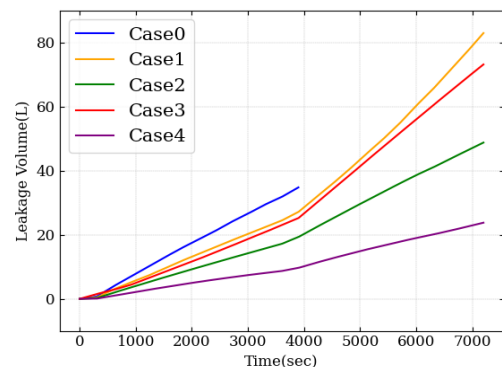


図-10 漏水量

壊が観察された。

無対策の Case0 は、二回目の水位上昇後にパイピング破壊が発生し、堤防高が維持できなくなったことから実験終了とした。矢板を貫入した Case1~4 では、パイピング破壊が発生するものの実験終了時まで堤防高を維持することができた。

矢板の貫入深さが 170mm である Case1 及び 3 においては、矢板の枚数に関わらず一回目の水位上昇により、堤内地盤で複数の噴砂が観測された後、法尻付近で大きな変状が見られた。また、水みちの発生も観測されたが、法尻部の堤体が沈下することで水みちが塞がれたため、これ以上水みちが進展することはなかった。その後、二回目の水位上昇により、新たな噴砂が見られ堤体変形が法肩部まで及んだ。

矢板の貫入深さが 230mm である Case2 及び 4 も同様に、矢板の枚数に関わらず一回目の水位上昇により、噴砂の発生は観測されたが、その後の変形は非常に微小な変形であった。二回目の水位上昇では、新たな噴砂が見られ、法中付近まで変形が拡大したものの、Case1 及び 3 と比較すると噴砂の発生数は少なく、法肩部の沈下は見られなかった。堤体変形後に水みちの形成が観測されたが、Case1 及び 3 と同様に、堤体沈下により水みちが堤外側へ進展しない結果となった。

以上のことから、矢板の有無・貫入深さが浸透破壊の規模に影響を及ぼすことが判明した。一方、矢板の枚数の影響はほとんど見られなかった。

b) 圧力水頭

間隙水圧計から得られた圧力水頭を、堤体内浸潤線に変換したものを図-9 に示す。これより、法尻部にかかる圧力が堤体変状に影響しており、矢板の貫入深さが大きいケースほど圧力水頭が低減されることが示唆された。これは、矢板の貫入深さが大きくなるほど浸透経路長が長くなり、損失水頭が増加したためと考察できる。一方、圧力水頭に対しても矢板の枚数の影響はほとんど見られなかった。

c) 漏水量

各実験ケースの堤内地盤から発生した漏水量を図-10 に示す。堤体内浸潤線を示した図-9 と同様の傾向を示し、矢板を施工した Case2~5 において漏水流量の低減が確認され、矢板の貫入深さが大きい Case3, 5 ほどその効果は顕著に表れた。一方、矢板の貫入深さが大きくなると矢板の枚数による漏水流量の低減が確認された。これは、大幅な透水層の断面積遮断が 2 回存在することにより、漏水流量が低減することが示唆される。

以上より、本研究で対象とした矢板を貫入した一部自立型の越水に対して「粘り強い河川堤防」は、一定の耐浸透性能を有し、矢板の貫入深さ・枚数によりその性能が変化することが示唆された。

4. 模型実験（逆 T 型擁壁）

(1) 実験方法

次に、天端から基礎地盤にかけて逆 T 型擁壁を施工する「一部自立型」による粘り強い河川堤防を再現した模型実験を行い、逆 T 型擁壁の貫入深さが耐浸透性能に与える影響を、圧力水頭及び漏水量の観点から検討した。

実験は、無対策と逆 T 型擁壁の貫入深さを変化させた計 4 ケースを実施した。図-11 に実験模型の横断図を示す。模型の土層構成や外力の与え方は、矢板の実験と同様であり、逆 T 型擁壁は 20mm 厚の亚克力を用いて再現した。

(2) 実験結果

a) 実験状況

各ケースの実験状況（3600s, 7200s）を図-12 に示す。逆 T 型擁壁を設置していない Case0 に関して、水位 50mm で噴砂・水みちが確認され、法尻付近の崩壊に至った。その後、50mm 水位維持時に堤体内の浸透が進行し、2 度目の水位上昇時に決壊に至った。一方で、逆 T 型擁壁を対策工として設置したケースでは、大きな堤体崩壊を伴う決壊は確認されなかった。また、堤内地に噴砂孔が複数確認されたが、それによる法面の大きな崩壊は確認されず、特に基礎地盤まで逆 T 型擁壁が施工される Case2, Case3 に関しては法尻の微小な破壊のみにとどまった。

b) 圧力水頭

図-13 に間隙水圧計で計測した圧力水頭を、堤体内浸潤線として表示したものを示す。Case1 がやや大きい値を示している理由としては、逆 T 擁壁が基礎地盤に貫入せず、堤内地に設置しているためである。これにより、水位による圧力が被覆土層を伝播する場合、他 2 ケースと比較し伝わりやすい条件となっている。また、法尻付近の浸潤線は顕著な差が確認されなかったものの、堤体法面中央部では Case1, Case2, Case3 の順に高く位置しており、逆 T 型擁壁の貫入深さによる耐浸透性能の差が確認された。

c) 漏水量

図-14 に本実験で得た漏水量の計測結果を示す。逆 T 型擁壁による対策工を設置した 3 ケースに有意な差は確認されず、漏水発生時間・漏水量ともに似た値を示した。なお、本実験では、堤内地盤からの漏水に加え、堤体からの漏水も確認された。

以上より、本研究で対象とした逆 T 型擁壁を設置した一部自立型の越水に対して「粘り強い河川堤防」は、一定の耐浸透性能を有し、逆 T 型擁壁の設置高さによりその性能が変化することが示唆された。

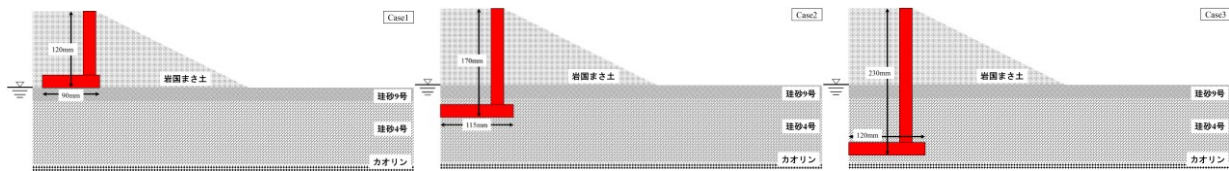


図-11 実験模型図 (左: Case1, 中央: Case2, 右: Case3)

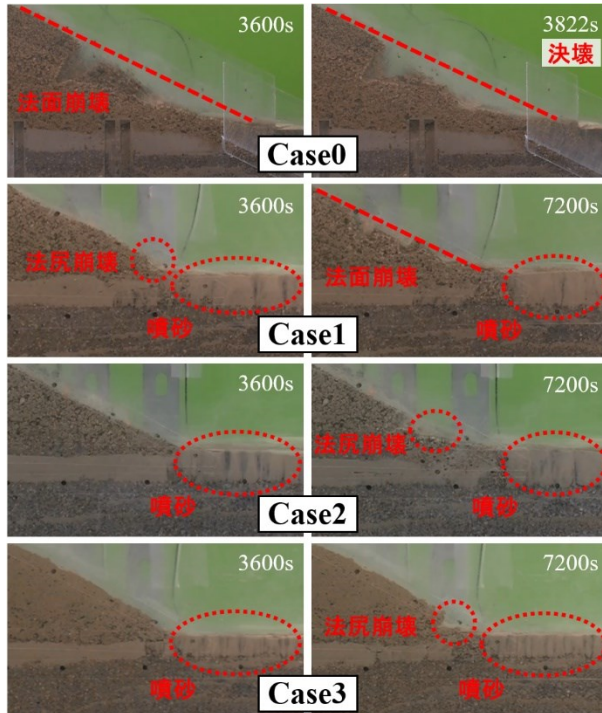


図-12 実験状況

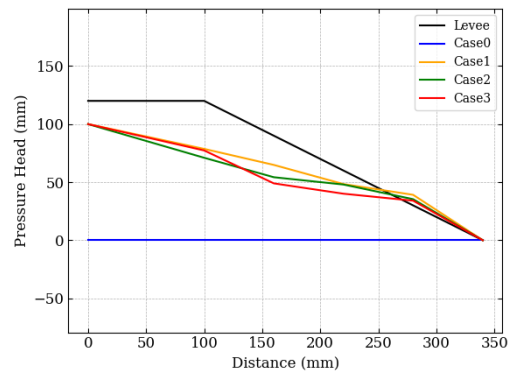


図-13 堤体内浸潤線

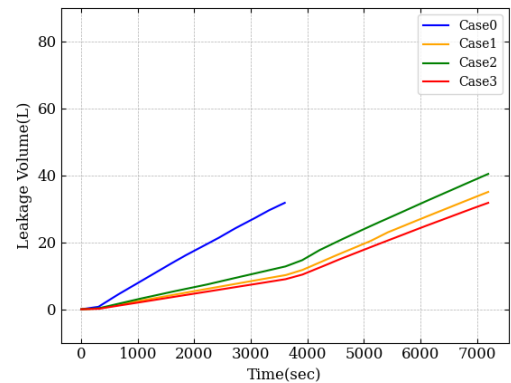


図-14 漏水量

5. 結論

本研究は「粘り強い河川堤防」の耐浸透性能を評価し、設計の高度化に活用することを目的として、現地観測とその再現解析及び模型実験により耐浸透性能を検討した。その結果、以下の事項が明らかになった。

現地観測：

降雨浸透により川裏法面の堤体内水位が上昇し、法尻ドレーンの効果により、法尻に向かって水位は低下することが確認された。数値解析の結果でも、同様の傾向が見られ、観測結果を裏付けることができた。また、裏法尻付近の堤体内水位を低下させるために、法尻ドレーンは有効であることが確認された。

表面被覆型の「粘り強い河川堤防」の設計の際に、裏法面のブロックは降雨が浸透する前提で耐浸透性能を評価することが必要なことが示された。

模型実験：

模型実験において、矢板もしくは逆T型擁壁を用いた一部自立型の越水に対して「粘り強い河川堤防」は、一定の耐浸透性能を有し、構造物の貫入深さによりその性能が変化することが示唆された。

一部自立型の「粘り強い河川堤防」の設計の際に、現地の地盤状況に留意し、構造物の貫入深さを踏まえ、耐浸透性能を評価することが重要であることが示唆された。

謝辞：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に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川堤防の被災状況の調査・分析について、
https://www.vip.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/gijutsu_kentoukai/dai03kai/pdf/doc2.pdf (2022.12 閲覧)
- 2) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）、JICE 資料第 111002 号、2012.2