

# 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。2022年台風14号の接近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の結果、主に降雨により発達した堤体内水位は、法肩、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、表面被覆型の「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変形量を測定した。その結果、法尻ドレーンがないケースでは、法尻付近の圧力水頭の上昇により泥濘化が発生し、小規模なすべりがみられた。一方、法尻ドレーンがあるケースでは、法尻付近の圧力水頭は上昇せず、法尻部の変形もみられなかった。

現地観測及び模型実験ともに、法尻ドレーンの排水効果が大きく寄与していることが確認された。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計することが必須であ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箇所まで堤防が決壊に至ったが、図-1に示す様に、それら全体の86%が越水に起因した。

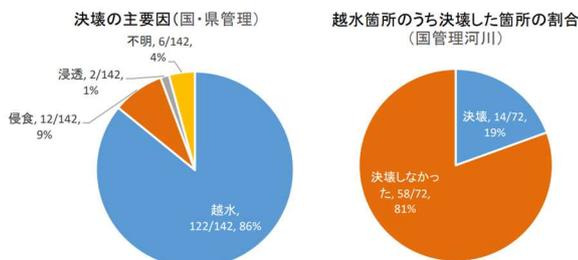


図-1 台風19号による被災要因

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おり、その構造形態の一つ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」が存在する。しかしながら、川裏法面も被覆する「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。今後の設計の高度化のため、表面被覆型の「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



図-2 佐波川の粘り強い河川堤防と観測井

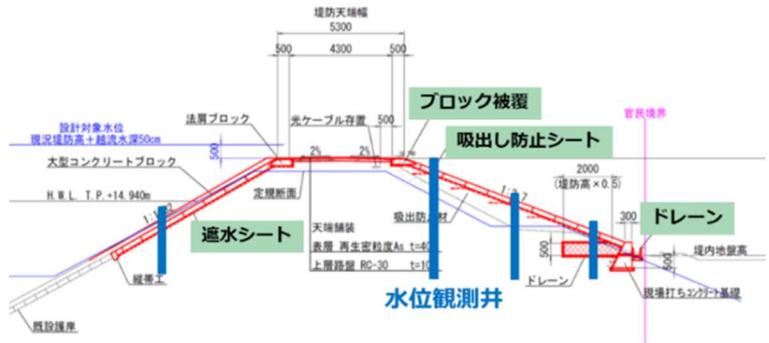
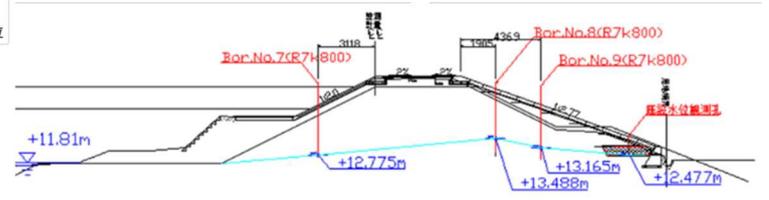
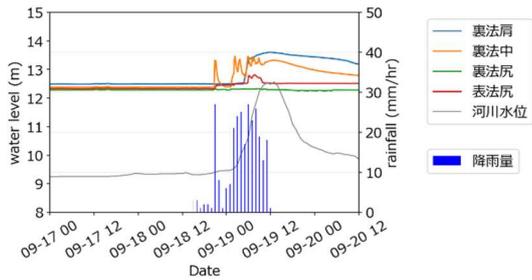
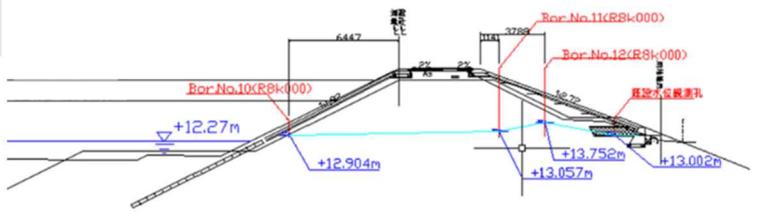
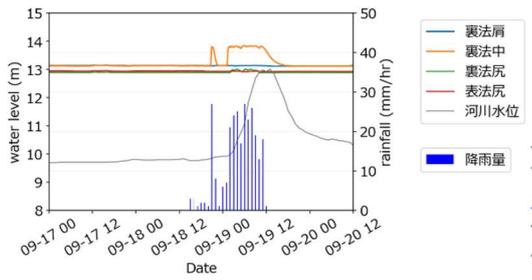


図-3 観測井と水位計の設置位置



a) 7k800 河川水位, 降雨, 堤体内水位観測結果及び横断面図 (2022年9月19日8:00)



b) 8k000 河川水位, 降雨, 堤体内水位観測結果及び横断面図 (2022年9月19日8:00)

図-4 2022年台風14号接近時の観測結果

に施工された表面被覆型の「粘り強い河川堤防」(図-2)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 か所)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-3 に示す。

## (2) 観測結果

台風 14 号接近時の 2022 年 9 月 17 日 0 時~9 月 20 日 12 時の観測結果を対象とし, 堤体内水位・降雨量・河川水位ともに上昇が見られる時 (2022 年 9 月 19 日 8:00) の堤体の浸潤線を図-4 に示す。

その結果, 川裏の堤体内水位と降雨量は同様の傾向を示し, 河川水位がそれほどの上昇がみられなかったこともあり, 堤体内水位は河川水位に比べ, 堤体表面のブロックの隙間から浸透したと考えられる降雨の影響が大きかった。また, 法尻ドレーンに向かって堤体内水位は低

下していた。河川堤防の安定性に大きく影響を及ぼす法尻の堤体内浸潤線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, 川表の堤体内水位は表法面に設置された遮水シートにより降雨の浸透が抑制され, 降雨の影響はほとんどなく, 河川水位との相関が主に見られた。

## 3. 再現解析 (現地観測)

### (1) 解析方法

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。浸透流解析を用いた解析モデルでは, 表面被覆の大型コンクリートブロックを難透水性としてモデル化をしたが, 観測結果と同様の堤体内水位の上昇が再現出来なかった。そのため, 一般的な河川堤防の設

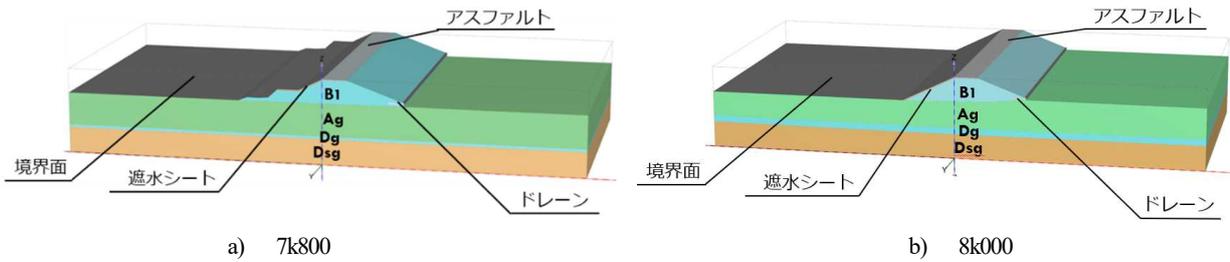


図-5 解析モデル

表-1 解析パラメータ

	土層	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	透水係数 (m/s)
堤体	B <sub>1</sub>	17	4.1 × 10 <sup>-4</sup>
	ドレーン	17	1.0 × 10 <sup>-2</sup>
	アスファルト	17	1.0 × 10 <sup>-7</sup>
	遮水シート	17	2.5 × 10 <sup>-3</sup>
基礎地盤	A <sub>g</sub>	21	6.2 × 10 <sup>-5</sup>
	D <sub>g</sub>	21	3.5 × 10 <sup>-5</sup>
	D <sub>sg</sub>	20	2.5 × 10 <sup>-7</sup>

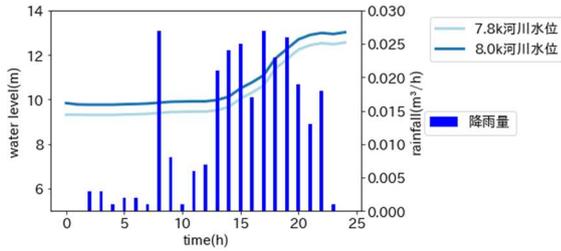


図-6 解析外力

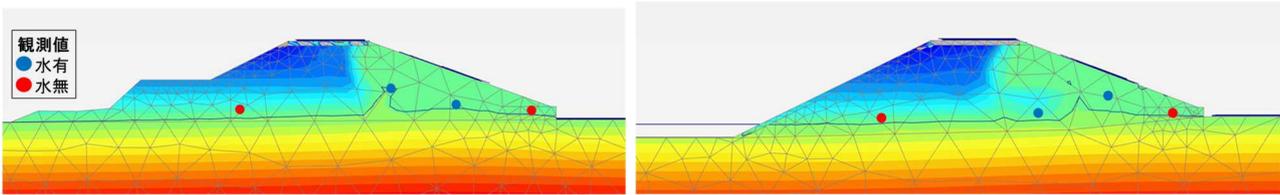


図-7 解析結果 (2022年9月19日8:00)

計の際の浸透流解析と同様に、大型コンクリートブロックはモデルに反映させないこととした。

解析モデルを図-5、解析パラメータを表-1に示す。解析モデル、解析パラメータとともに、近傍の堤防の詳細点検の結果を参考にして作成及び設定した。また、不飽和浸透特性などは一般的な河川堤防の設計の際に用いられるものと同様に設定した。なお、解析パラメータのうち堤体 B<sub>1</sub> 及び基礎地盤 A<sub>g</sub> 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、調整した。

川表に河川水、モデルの全体に降雨を境界条件として与え(図-6)、時間変化に伴う堤体内水位の変化を計算した。また、初期地下水位は堤内地盤高と設定している。なお、河川水位は、上流の真尾観測所の河川水位をスライドして用いており、降雨も真尾観測所のものを使用した。

## (2) 解析結果

解析開始から19時間後(降雨量、河川水位ともに上昇が見られる2022年9月18日8時)の解析結果と同時刻の観測値を図-7に示す。その結果、降雨により堤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。解析結果より観測値がやや高い水位となったが、観測結果

と同様に川裏法中で最も降雨の影響を受けやすく、川裏法中、川裏法肩の順で堤体内水位が高くなっていることが分かる。また、堤体への浸透水は法尻ドレーンまたは基礎地盤への浸透によって低下することがあわせて確認された。

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。

## 4. 模型実験

### (1) 実験方法

次に、洪水時の表面被覆型の「粘り強い河川堤防」の耐浸透性能と被災形態を確認するために模型実験を行った。

本実験で使用した実験模型図を図-8に示す。この実験模型を利用して、表-2に示す通り法尻ドレーンと表面被覆の設置条件を変化させた計4ケース実施した。基礎地盤は岩国まさ土の単層で構成されており、地盤高は

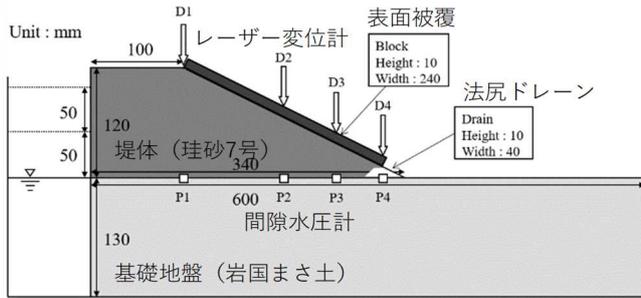


図-8 実験模型  
表-2 実験ケース

ケース	法尻ドレーン	表面被覆
1	-	-
2	○	-
3	-	○
4	○	○

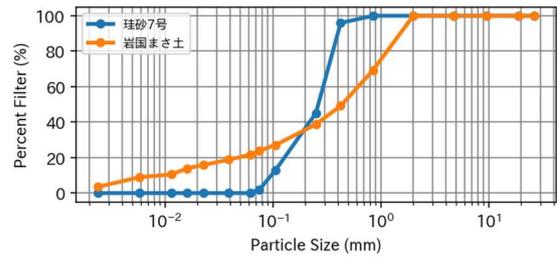
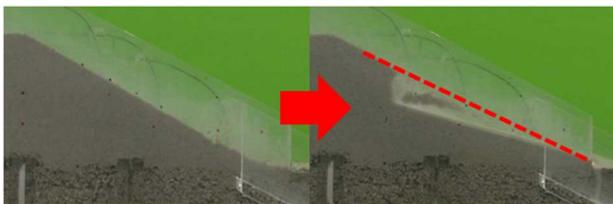


図-9 粒度分布  
表-3 土質性状

		珪砂7号	珪砂1号	岩国まさ土
含水比	%	10	0	10
透水係数	m/s	$2.4 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$3.6 \times 10^{-5}$
最大乾燥密度	g/cm <sup>3</sup>	1.44	1.50	1.71
施工時乾燥密度	g/cm <sup>3</sup>	1.29	1.47	1.54
締固め度	%	90	-	90



a) ケース 1



b) ケース 3

図-10 実験結果

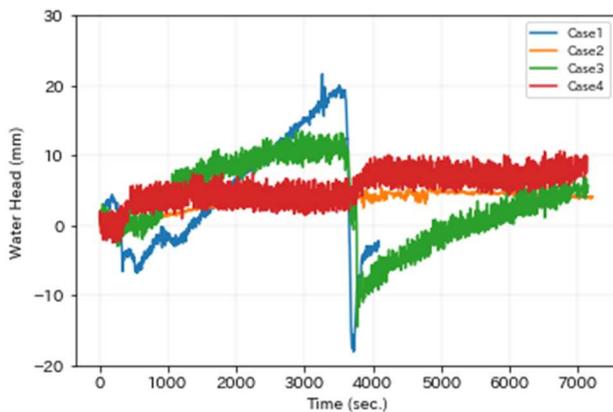


図-11 圧力水頭の増分 (川裏法尻部)

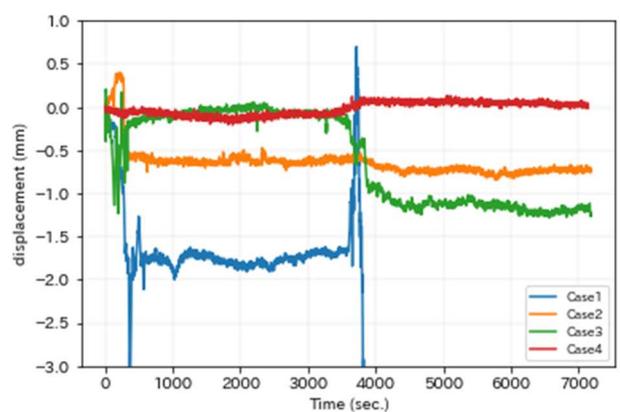


図-12 堤体変位量 (川裏法尻部)

130mmである。また、堤体は珪砂7号で構成されており、高さ120mm、天端幅100mm、奥行き150mm、法面勾配1:2の堤体を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。実験に用いた土質性状を表-3及び図-9に示す。なお、法尻ドレーンは、珪砂1号と透水性シートにより作成し、表面被覆は縦40mm、横40mm、厚さ10mmのアルミ切板をタイル状に透水性シートにシリコン樹脂製の接着剤を用いて貼付することで作成した。

実験時は、間隙水圧計及びレーザー変位計により圧力水頭の増分と堤体変位の挙動の把握を行った。計測機器は、模型左端の給水槽を基準として100mm、220mm、

280mm、320mmの位置に設置し、実験開始時にゼロリセットを行うことで初期値からの値の増減を計測している。実験前に基礎地盤は12時間以上かけて飽和し、水位条件に関しては、実験開始と同時に10mm/minで5分間上昇させた後に55分間水位固定を行い、その後、再び10mm/minで5分間上昇させた後に55分間水位を固定した。堤体が決壊した場合、もしくは120分経過を実験終了条件とした。

## (2) 実験結果

### a) 実験状況

堤体に変形が生じたケース1及び3の実験状況を図-10

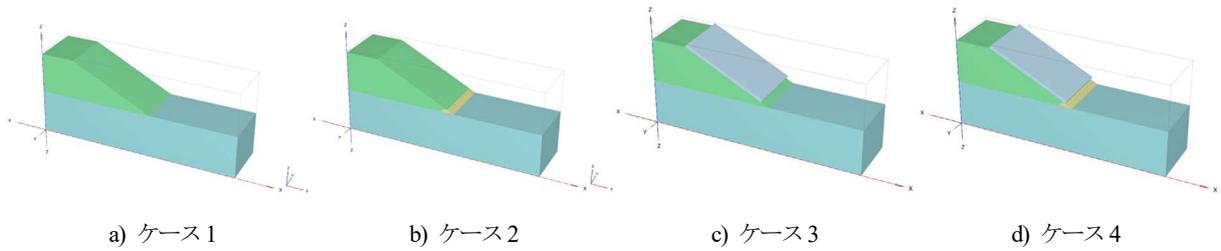


図-13 解析モデル

表-4 解析パラメータ

	土層	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	透水係数 (m/s)
堤体	珪砂7号	17	$2.4 \times 10^{-4}$
	ドレーン	17	$1.0 \times 10^{-2}$
	被覆工	17	$1.0 \times 10^{-9}$
基礎地盤	岩国まさ土	17	$3.6 \times 10^{-5}$

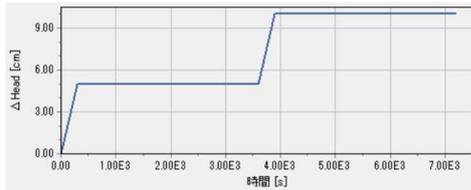


図-14 解析外力

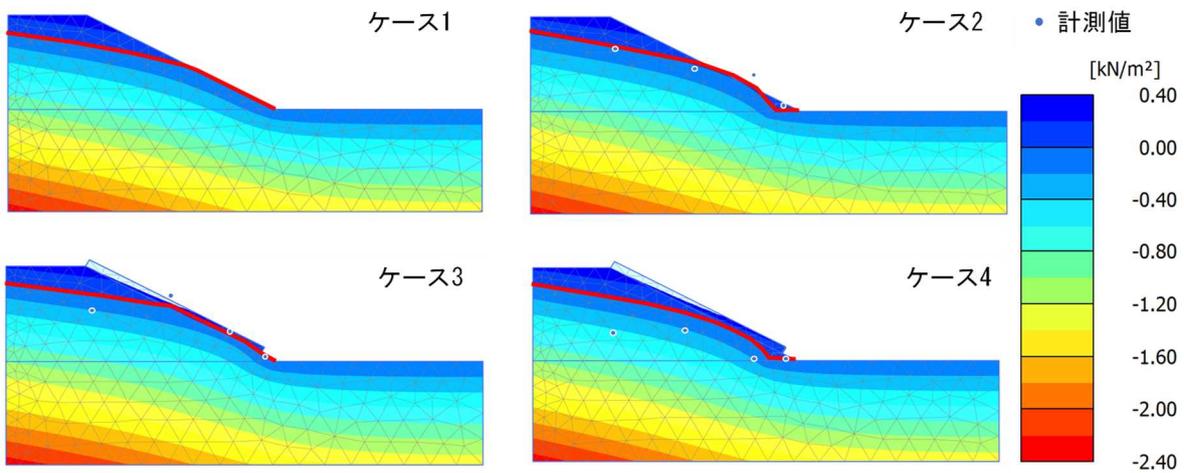


図-15 解析結果 (間隙水圧)

に示す。ケース1は大変形が発生し、ケース3は川裏法尻部の堤体土が泥濁化し流出する変状が生じた。なお、法尻ドレーン工を設置したケース2及び4は大きな変状がみられなかった。これらの結果から、模型実験においても、法尻ドレーンの排水及び土留めの効果が河川堤防の安定に大きく寄与していることが分かる。

一方、表面被覆を設置したケース3では、無対策のケース1と比較して川裏法尻部の変形が発生したものの堤体の変形は抑制される結果となった。これは、表面被覆の重量により堤体の表層に拘束圧が作用し、堤体を構成する土のせん断強さが発揮されたためと考えられる。

**b) 圧力水頭**

図-11は、堤体の安全性に大きな影響を与える川裏法尻部(給水槽から320mm)に設置した圧力水頭の増分の計測結果を比較したものである。ケース1に関しては、川裏法尻で最初のすべりが発生した時点(2回目の水位上昇を開始した60分時点)で、水みちの発生に伴い圧力水頭が低下している様子がうかがえる。ケース3に対してもケース1と同様、2回目の水位上昇を開始した時点

で、川裏法尻において泥濁化し流出する変形が発生している様子がこの計測結果から推測できる。また、ケース2及び4では法尻ドレーンの効果が顕著に表れており、圧力水頭の増分をほぼ0に近い値で抑えることができていた。

**c) 堤体変位**

図-12は、間隙水圧計と同様に、川裏法尻部(給水槽から320mm)に設置したレーザー変位計の計測結果を比較したものである。この計測結果に関して、プラスは沈降を意味し、マイナスは隆起を意味する。ケース1に関して、隆起(マイナスの値)を示す傾向にあり、すべりによって流出した堤体土が法尻に堆積していることが推測できる。ケース2に関しては、実験開始直後に多少の変動があるものの、その後変位はほとんど発生していない。最も変位を抑えることができたのはケース4であり、法尻で局所的なすべりが確認されたケース3に関しては、流出した堤体を構成する珪砂が法尻に1mm程度堆積する結果となった。

## 5. 再現解析 (模型実験)

### (1) 解析方法

表面被覆型の「粘り強い河川堤防」の河川水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、実験結果の再現を試みた。現地観測と異なり、外力に降雨が存在しないため、解析モデルでは表面被覆の大型コンクリートブロックを難透水性としてモデル化し、行き止まりによる影響を把握できるようにした。

モデルを図-13、解析パラメータを表4に示す。解析モデル、解析パラメータとともに、土質試験や「河川堤防の構造検討の手引き (改訂版)」<sup>2)</sup>をもとに設定した。また、現地観測の再現解析と同じく不飽和浸透特性などは同様に一般的な河川堤防の設計の際に用いるものを設定した。

川表に河川水を境界条件として与え (図-14)、時間変化に伴う堤体内水位の変化を計算した。また、初期地下水位は実験と同様に堤内地盤高と設定している。

### (2) 解析結果

実験開始から 7200 秒後の解析結果と同時刻の計測値を図-15 に示す。その結果、河川水浸透により堤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、一部のケースで計測値より解析結果がやや高い水位となったが、計測結果と同様に川裏法肩の堤体内水位が最も高く、川裏法中、川裏法尻の順に堤体内水位が低くなっていることが分かる。また、表面被覆型の大型コンクリートブロックの存在により法面の堤体内水位が上昇することが伺える。一方で、法尻ドレーンの存在により、川裏法尻の水位が低下するとともに、大型コンクリートブロックによる体内水位の上昇が抑制されることも確認された。

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浸潤線の行き止まりとなることを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、現地観測の再現解析の結果と同様に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。

## 6. 結論

本研究は表面被覆型の「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。その結果、以下の事項が明らかになった。

### 現地観測：

- ① 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。
- ② 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。

### 模型実験：

- ① 模型実験において、洪水時に法尻ドレーン及び表面被覆の対策工の影響を確認することができた。法尻ドレーンによる川裏法尻部の堤体内水位及び変位抑制効果が大きい一方で、表面被覆工の存在により堤体内水位が上昇する可能性があることが判明した。
- ② 表面被覆型の「粘り強い河川堤防」の設計の際に、表面被覆は浸潤線の行き止まりになることを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、表面被覆のみでは耐浸透性能は不十分であり、法尻ドレーンを併設することが必要であると結論づけられた。

今後は、現地観測を継続するとともに、一部自立型の「粘り強い河川堤防」の模型実験などを実施し、その耐浸透性能を把握する予定である。

**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](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