

越水に対する堤防強化のための 小型堤防による越流侵食実験

EXPERIMENTAL STUDY FOR RIVER EMBANKMENT OF
COUNTERMEASURES FOR EROSION DUE TO OVERTOPPING WATER BY
USING SMALL-SCALE MODEL

與田敏昭¹・中川 一²・関口秀雄³・岡二三生⁴・後藤仁志⁵・文字 聖⁶
Toshiaki YODEN, Hajime NAKAGAWA, Hideo SEKIGUCHI, Fusao OKA,
Hitoshi GOTOH and Satoru MONJI

¹正会員 工修 株式会社ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所流域災害研究センター(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

³フェロー会員 工博 京都大学名誉教授(〒611-0031 宇治市広野町尖山)

⁴フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁵正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁶国土交通省 近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 (元 淀川河川事務所) (〒668-0025 豊岡市幸町)

We have not enough scientific and technical data which are necessary to enhance the measures against the seepage in river embankment due to high water-level and against its erosion due to overtopping of river water. Experiments have been performed to clarify the mechanisms of river embankment deformation by seepage flow and erosion due to overtopping water by using small-scaled physical model (height of embankment is one meter). Experiments were carried out several reinforced industrial method of embankment.

From those experiments, it was found that the reinforcement for erosion was effective a method to low wet condition in the embankment. It was, therefore, shown that operation and management of embankment, especially soil property, is very important to keep embankment safe from seepage and erosion due to overtopping.

Key Words : river embankment, small-scale model, overtopping water, erosion, seepage

1. はじめに

堤防強化にあたって、浸透については『河川堤防設計指針』¹⁾(国土交通省河川局治水課,平成14年7月,最終改正平成19年3月)による安全性照査の技術的方法に基づき点検・照査が実施されている。一方、越水については過去の破堤原因の多くを占めているといわれているものの、現在のところ連続的な大堤防で越水に対して効果的な対策を施すための技術的な知見は不足しており、効果的な越水対策を具体的に検討することが難しい状況にある²⁾。

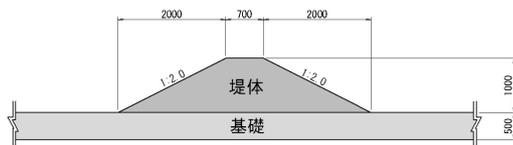
堤防の越流侵食実験に関する研究としては、独立行政法人土木研究所(旧建設省土木研究所)において、堤体高3m程度の大型模型を用いた実験的検討が行われてお

り、越流による堤防破壊は裏のり侵食から天端崩壊に進行すること、土質条件により堤体の侵食量が異なることおよび越流に対する保護工の効果等についての知見が得られている^{3),4),5)}。しかし、既往成果については、大型模型であるが故に、実験回数に制約があり、特に土質条件が同一である実験ケースは限られている。

このため、筆者らは、淀川にある大堤防に関して、浸透や越水あるいはそれらの複合した現象に対して、堤防を強化するための具体的な検討を行うために、実験的な検討および越流侵食・浸透現象の解析モデル構築を進めてきた。既報⁶⁾では、小型堤防模型による越流侵食・浸透実験を行い、堤体内の湿潤状態が越流時の侵食場所、侵食量および侵食進行過程に大きく影響することについて報告した。

本研究では、越流侵食と浸透による堤防の変形・侵食

【堤体詳細図】



【平面図】

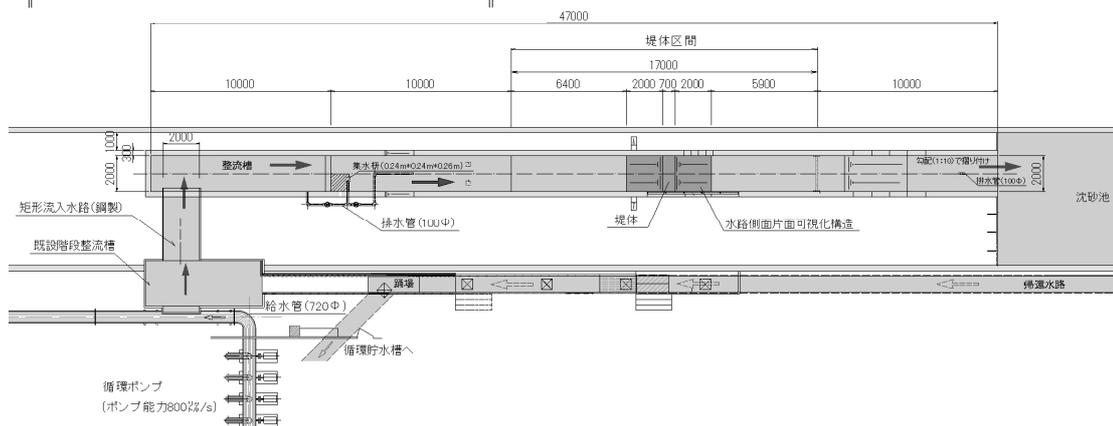


図-1 小型堤水理実験装置

メカニズムの把握と堤防強化を検討することを目的として、既報と同様に土質条件や施工条件を管理して製作した小型堤防模型を用いて、堤防強化工法を設置した場合の実験的研究の成果について報告する。

2. 小型堤防実験

(1) 実験方針

本実験では、土質条件等を設定し、管理して製作した堤防模型に、一般に堤防強化工法として採用されている以下の対策工を模擬して浸透・越流侵食実験を行った。

- ・表のり面遮水工
- ・裏のり尻ドレーン工

(2) 実験装置

小型堤水理実験装置を図-1に示す。実験装置は、気象・外気環境等の影響を避けるため京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー実験棟内に作成した。水路長は全長47.0m（沈砂池を除く）、幅2.0m、高さ2.5mであり、堤体側面の一部は観測のためにガラス張りとした。模型堤防は、基礎部（高さ0.5m、延長17.0m）の上に、高さ1.0m、天端幅0.7m、のり面勾配1：2の堤体を作成した。なお、実験流量は最大0.600m³/sであり、堤防模型を越水時に越流水深30cmに相当する。

堤体および基礎部の材料は、淀川河川事務所管理区間の堤防強化工事等で使用している混合改良土を用いた。実験に使用した土は、土の物理試験（土粒子の密度試験、含水比試験、粒度試験、液性限界・塑性限界試験、土の保水性試験）および力学試験（土の三軸圧縮試験、土の

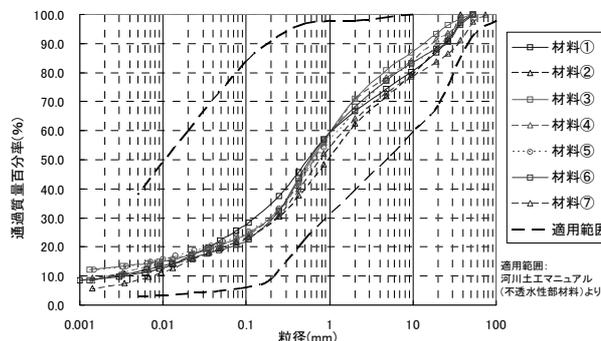


図-2 実験に使用した土の粒度分布

締めめ試験、土の透水試験、土の圧密試験）を実施した。実験材料の粒度分布を図-2に示す。また、土の透水係数は 2×10^{-4} cm/s $\sim 4 \times 10^{-4}$ cm/sであった（90%締めめ調整時）。なお、実験材料は、実験の進捗にあわせて数回に分けて搬入し、搬入毎に土質試験を実施して、材料に大きな違いがないことを確認した。

堤体、基礎部の作成は、土の含水比を散水等により最適含水比に調整しながら、層厚10cm程度ごとに締めめを行った。堤体の作成方法および手順は常に同一として、締めめの各段階でRI試験を行い、目標の締めめ度（堤体部90%程度、基礎部90%以上）となるように管理した。

(3) 対策工

a) 表のり面遮水工

表のり面遮水工の実験模型を図-3に示す。表のり面遮水工は、堤体および基礎部を作成後に、ポリエチレン製シートをのり面に敷設して製作した。シートの下端部は、浮き上がりを防止するために基礎部に根入れた。シートの側方部は、水路側壁に粘着テープで接着した。

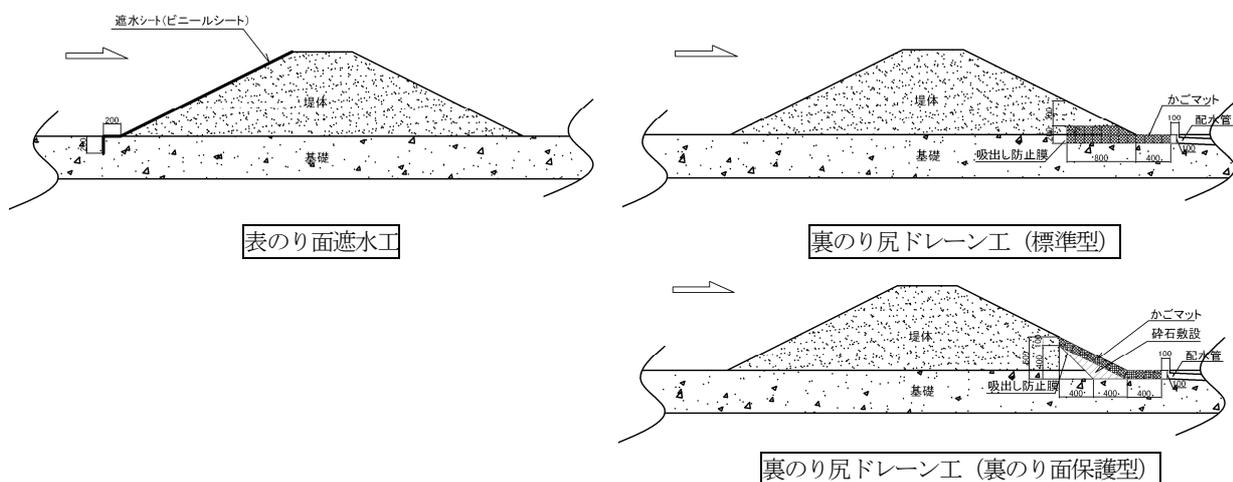


図-3 対策工の実験模型

表-1 越流侵食実験計測項目

計測項目	計測方法	計測時期
堤体内湿潤状況	間隙水圧計 (5箇所)	湛水時
流況	ビデオカメラ撮影 (3方向)	通水時
侵食変形	レーザー変位計	通水一時停止時

表-2 実験ケース

対策工	越流水深	堤体目標縮固め度	湛水有無
なし	30cm	90%	あり
表のり面遮水工	30cm	90%	あり
裏のり尻ドレーン工 (標準型)	30cm	90%	あり
裏のり尻ドレーン工 (裏のり面保護型)	30cm	90%	あり

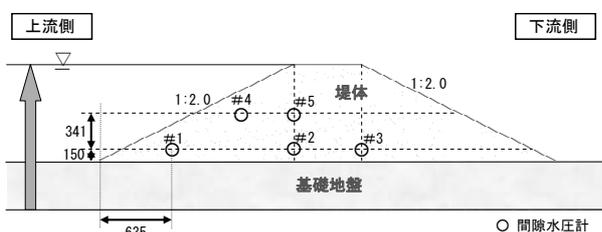


図-4 間隙水圧計設置位置

b) 裏のり尻ドレーン工

裏のり尻ドレーン工の実験模型を図-3に示す。裏のり尻ドレーン工は、「標準型」ドレーン形状と、カゴマットをのり面に沿って敷設する「裏のり面保護型」ドレーン形状の2タイプを製作した。裏のり面保護型ドレーン工のカゴマットの敷設範囲は、標準型ドレーン工と同じ奥行きとなるようにした。堤体および基礎部を作成後に、裏のり尻付近を掘削しカゴマットおよび砕石を埋設した。カゴマットは袋状の透水性ネットに6号砕石（粒径5mm～13mm）を詰めて、複数のカゴマットを保護鉄筋で一体化した。また、堤防材料の流出を防ぐため、ドレーン工との境界面には吸い出し防止膜を敷設した。

(4) 実験方法

越流侵食実験は、堤体上流側の水位を、基礎部底面から堤体天端高まで約9分で上昇させた後、天端水位状態で24時間以上の湛水を行い、堤体内湿潤面が定常状態となった後に、所定の越流水深となるようにポンプ流量を設定して越流させた。

計測項目は、越流時の流況撮影および堤体内に埋設した間隙水圧計（5箇所、図-4）による堤体内湿潤状態の

計測である。堤体内湿潤面が定常状態かどうかの判定は、裏のり面に近い間隙水圧計#3を常時観測して確認した。越流による堤体侵食量は、通水時の堤体形状を直接計測することが困難であったため、通水開始後2分、10分等の間隔で通水を一時停止し、堤体および基礎部の侵食変形をレーザー変位計により計測した。

実験は、堤体天端が破壊されて所定の越流水深が維持されなくなる時点（＝「破堤」と定義）まで、越水と通水停止（侵食変形計測）を繰り返し実施した。

小型堤防による実験ケースを表-2に示す。既報では越流水深、堤体縮固め度、堤体内湿潤状態などの条件を変更した実験を実施したが、本報告の実験では、対策工による影響を評価するため、越流水深30cm、堤体縮固め度90%に統一した。また、堤体土質は(2)に示すような管理を行うことにより同一条件とみなす。

3. 実験結果

(1) 表のり面遮水工の浸透・越流侵食実験

表のり面遮水工を設置したケースと対策工なしの実験結果を比較する。

間隙水圧計測結果を図-5に、これより描いた湿潤面コ

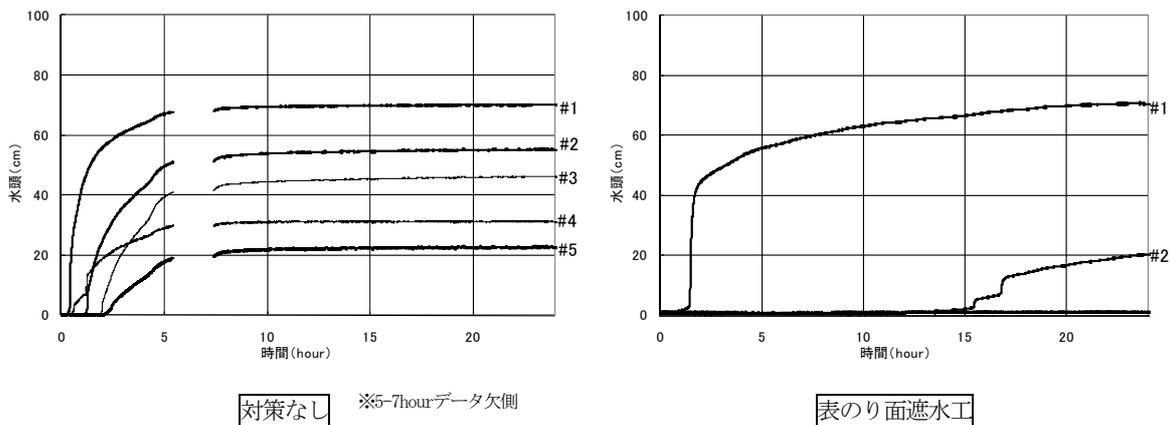


図-5 表のり面遮水工 間隙水圧計測結果

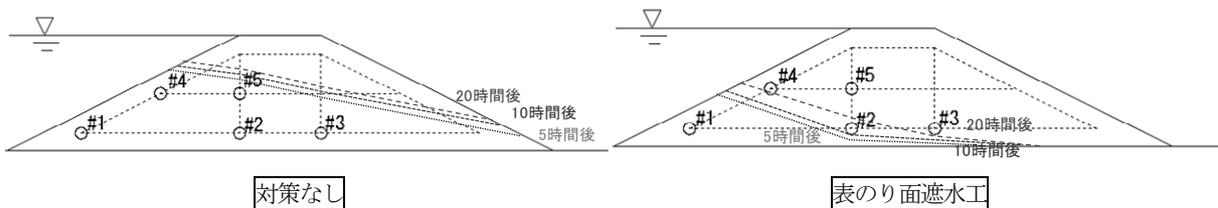


図-6 表のり面遮水工 堤体内湿潤面コンター図

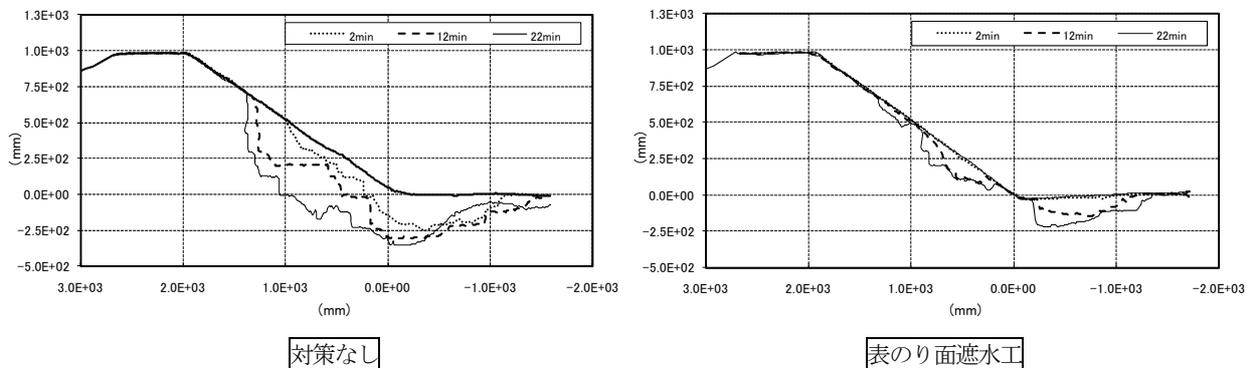


図-7 表のり面遮水工 越流時の侵食形状図

ンター図を図-6に示す。同じ湛水時間では、表のり面遮水工設置時の堤体内湿潤面が低くなっており、裏のり面に湿潤面が表れていない。また、対策工なしでは、下段の間隙水圧計#1、#2、#3が短時間で水頭の上昇を開始しているが、表のり面遮水工設置時には#1の上昇開始後かなり遅れて#2の上昇が開始している。

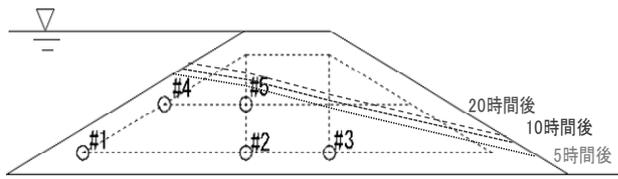
越流時の侵食形状の比較を図-7に示す。対策工を設置した実験は複数ケース実施したが、既報と同様に侵食量の結果にバラツキが見られたため、侵食開始場所と侵食進行過程に着目する。表のり面遮水工を設置したケースでは、のり面中央部から侵食開始して、のり面の侵食範囲が拡大していく。裏のり尻付近の侵食量は対策なしに比べて小さく、のり面の侵食が進行した後に裏のり尻付近の侵食が開始する。

(2) 裏のり尻ドレーン工の浸透・越流侵食実験

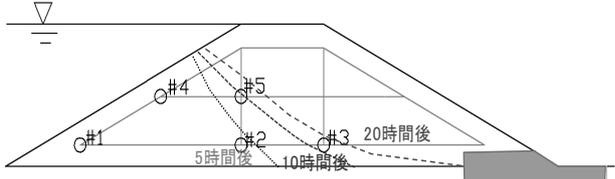
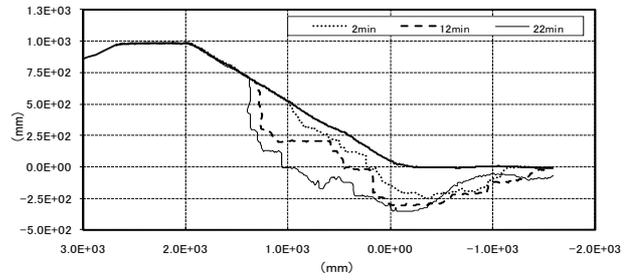
裏のり尻ドレーン工を設置したケースと対策工なしの実験結果を比較する。

間隙水圧計測結果より描いた湿潤面コンター図を図-8に示す。これより、ドレーン工近傍で湿潤面が低下し、裏のり面には湿潤面が到達していない。また、堤体内湿潤面を低下させる効果について、ドレーン形状による差はないと見られる。

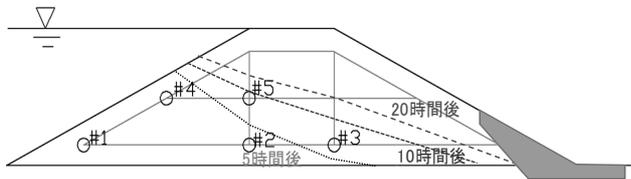
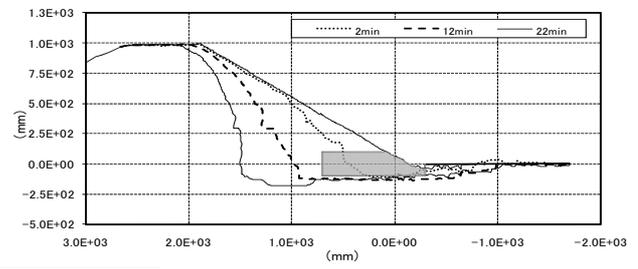
越流時の侵食形状の比較を図-9に示す。ドレーン工を設置した実験では、いずれのケースでも越流実験の途中で設置したドレーン工が流体力により変形し、変形後はドレーン工を撤去して越流実験を行った。このため、侵食開始場所の違いに着目する。ドレーン工の設置により、裏のり尻付近の深掘れ侵食は抑制される。しかし、ドレーン工と土の境界部付近から侵食が開始して、その後、ドレーン工の裏側へ侵食が進行する。



対策なし



裏のり戻ドレーン工 (標準型)



裏のり戻ドレーン工 (裏のり面保護型)

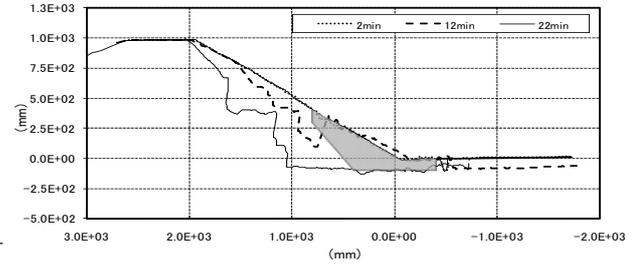


図-8 裏のり戻ドレーン工 堤体内湿潤面コンター図

図-9 裏のり戻ドレーン工 越流時の侵食開始場所

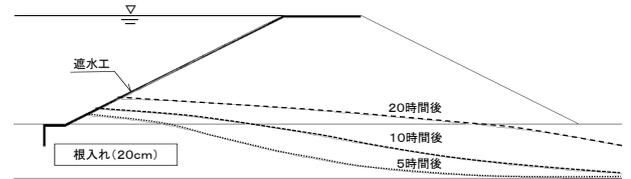
4. 対策工設置時の浸透・侵食メカニズム

(1) 表のり面遮水工設置時の浸透現象

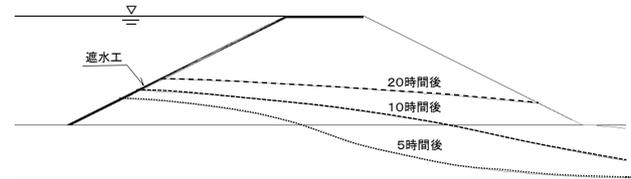
実験では、シートと側壁との隙間からの浸透は阻止しているため、基礎部からの浸透により堤体部の湿潤面が上昇していると想定される。実験では基礎部の間隙水圧計測を行っていないため、堤体および基礎部を浸透流解析モデル化して、実験結果の検証解析を行い、基礎部から堤体部への浸透現象の検証を行った。解析モデルの土の透水係数は、岡ら⁷⁾の実施した浸透実験（対策工なし）の再現計算条件を参考に、対策工実験での湿潤面と一致するように設定した。表のり面遮水工は不透水材料とした。

その結果、図-10に示すように、基礎部下流側の湿潤面の上昇が遅くなり、このために表のり戻側（湛水側）に比べて、堤体中央付の湿潤面がかなり遅れて上昇することが示された。

また、同じモデルを用いて、表のり面遮水工の根入れがない場合の湿潤面を算定した。その結果、基礎部下流側の湿潤面が高くなり、堤体内湿潤面はかなり上昇した。



【現況対策工設置時】



【根入れがない場合】

		kx	ky
透水係数 (cm/s)	堤体部	1.0E-2	5.0E-4
	基礎部	2.0E-3	5.0E-4

図-10 表のり遮水工設置時の浸透流解析結果

これらの検証解析結果より、表のり面遮水工は、堤体および基礎部の土質条件を考慮して設置された場合には遮水効果を十分に発揮して、堤体内の湿潤面を低くすることが示された。

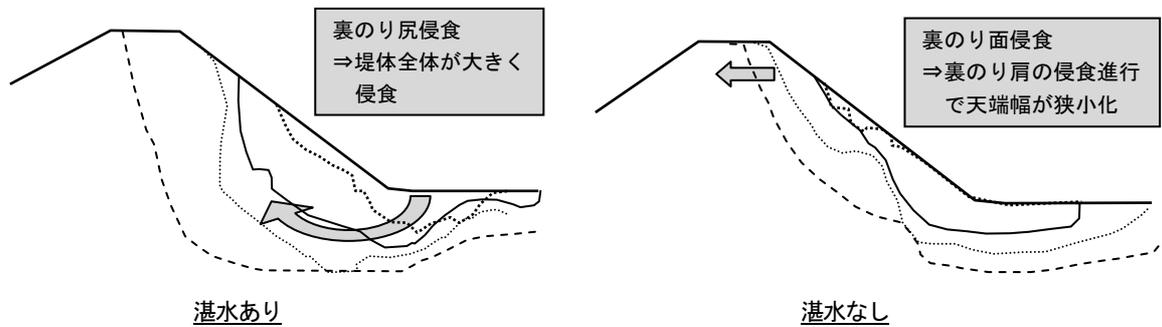


図-11 湛水有無の侵食進行過程（侵食パターン）のイメージ

(2) 表のり遮水工設置時の越流侵食

表のり面遮水工を設置した場合の、越流時の侵食開始場所と侵食進行過程が、既報の湛水あり・なしの実験で明らかになった堤体内湿潤の有無による侵食進行過程（侵食パターン）の違い（図-11）における、湛水なしの状況と類似する。これは、表のり面遮水工により堤体内の湿潤面が低下するためである。

既報では、堤体内が湿潤状態である方が、同じ通水時間では侵食量が多くなることが示されていることより、表のり面遮水工の設置により堤体内の不飽和域が増加することが、越流侵食に対して一定の効果を有するものと見られる。

(3) 裏のり尻ドレーン工設置時の越流侵食

裏のり尻ドレーン工を設置した場合の、越流時の侵食開始場所と侵食進行過程は、ドレーン工により裏のり尻付近の侵食は多少抑制されるが、ドレーン工と土の境界付近が弱部となり、侵食が進行することが示された。

一方、今回の実験では流水によりドレーン工が変形した。このように小型堤防による対策工実験で見られた現象の中には、スケール効果により実現象とは異なる点も多いと考えられる。

5. まとめ

小型堤防による越流侵食・浸透実験により得られた知見を整理すると以下のようなものである。

1) 既報および今回の小型堤防実験結果より、堤体内湿潤面を低くすることが越水時の侵食を少なくすることが示唆された。このため、堤体内に水を入れない、また堤体内の水を速やかに排水する浸透対策工も、越流侵食に対して一定の効果を有すると考えられる。

2) 裏のり尻ドレーン工を設置した場合の越流時の侵食進行過程は、ドレーン工により裏のり尻の侵食は多少抑制されるが、ドレーン工と土の境界付近が弱部となることが明らかとなった。

3) 一連の対策工実験により、小型堤防による実験では解明できない事項も明らかとなった。今後は小型堤防により得られた知見を基に、解析モデルによる検証方法の確立が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課：河川堤防設計指針，平成19年3月
- 2) 社団法人 土木学会：「耐越水堤防整備の技術的な実現性の見解」について、耐越水堤防整備の技術的な実現性検討委員会報告書，平成20年10月27日。
- 3) 建設省土木研究所河川研究室：越水堤防調査最終報告書－解説編－，土研資料2074号，1984。
- 4) 建設省土木研究所河川研究室：越水堤防調査中間報告書－資料編－，土研資料1761号，1982。
- 5) 建設省土木研究所河川研究室：越水堤防調査報告書－資料編（II）－，土研資料2050号，1984。
- 6) 與田敏昭，中川一，関口秀雄，岡二三生，後藤仁志，小俣篤：越流侵食・浸透のメカニズムを把握するための小型堤防による越流侵食実験，河川技術論文集，第16巻，pp.347-352，2010。
- 7) F. Oka, S. Kimoto, N. Takada & Y. Higo: A multiphase elasto-viscoplastic analysis of an unsaturated river embankment associated with seepage flow, Proc. Int. Symp. on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, Oka, Murakami & Kimoto (eds), Taylor & Francis group, London, pp.128-132,2009.

(2011. 5. 19受付)