

# 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

EXPERIMENTAL STUDY TO UNDERSTAND MECHANISMS OF RIVER  
EMBANKMENT BY SEEPAGE FLOW AND EROSION DUE TO OVERTOPPING  
WATER BY USING SMALL-SCALE MODEL

與田敏昭<sup>1</sup>・中川 一<sup>2</sup>・関口秀雄<sup>3</sup>・岡二三生<sup>4</sup>・後藤仁志<sup>5</sup>・小俣 篤<sup>6</sup>  
Toshiaki YODEN, Hajime NAKAGAWA, Hideo SEKIGUCHI, Fusao OKA,  
Hitoshi GOTOH and Atsushi OMATA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 京都大学名誉教授(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

<sup>4</sup>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)

<sup>5</sup>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)

<sup>6</sup>正会員 国土交通省 近畿地方整備局 淀川河川事務所 (〒573-1191 枚方市新町)

There is not enough of the necessary scientific and technical data and method to enhance the measures against seepage of river embankment due to high water-level and against its erosion due to overtopping of river water. This experimental study was done to understand 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 under the several hydraulic and soil conditions such as overflow depth, degree of soil compaction, moisture content in the embankment, etc.

From those experiments, it was found that wet condition in the embankment significantly effects on the eroded locations, resulting shapes and sediment volume yielded that is strongly depend on the degree of soil compaction. 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』<sup>1)</sup>(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。しかし、浸透による土質力学的な安定性の評価については、より物理プロセスを適確に反映させる手法の開発が求められている<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。

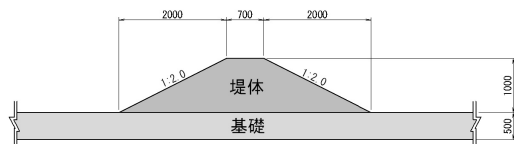
このため、筆者らは、淀川にある大堤防に関して、浸

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。ここでは、堤体高1mの小型堤防を用いた実験的研究の成果について報告する。

堤防の越流侵食実験については、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<sup>4),5),6)</sup>。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。

本研究では、越流侵食現象と浸透現象の関係にも着目

## 【堤体詳細図】



## 【平面図】

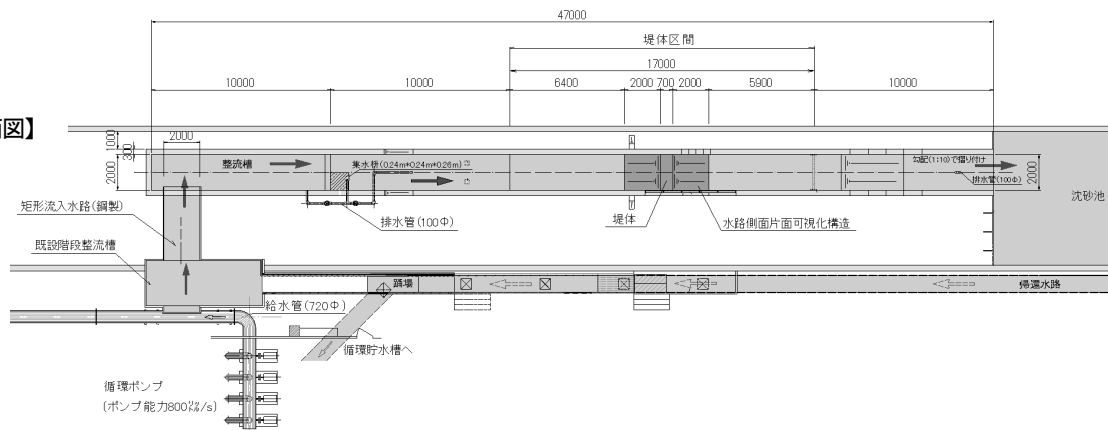


図-1 小型堤水理実験装置

し、これらのメカニズムを検討するために、土質条件や施工条件を管理して製作した模型を用いて、堤体の土質条件や外力条件と越流侵食・浸透との関係を調べることとした。そのため、模型製作が比較的容易で実験回数を多く実施可能であり、土質等の実験計測を密に行える小型堤防（堤体高1.0m）を用いた実験を行うこととした。

## 2. 小型堤防実験

### (1) 実験方針

本実験では、以下の視点で土質条件等を設定し、管理して製作した堤防模型を用いて実験を実施した。

- ① 外力条件、堤体締固め度、堤体内湿潤状態など条件が異なる場合の越流侵食の違いの検討
- ② 同一条件での実験による結果のバラツキの検討

②については、土質条件や施工条件を管理した小型堤防を用いた実験であっても、結果にバラツキを生じるとすれば、実スケールの堤防における安定性の評価を行う上で重要な検討項目になると考えた。

### (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0.600m<sup>3</sup>/sであり、堤防模

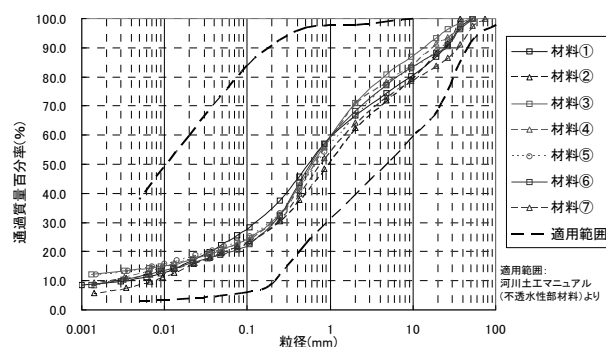


図-2 実験に使用した土の粒度分布

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、土の締固め試験、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 $2 \times 10^{-4}$ cm/s $\sim 4 \times 10^{-4}$ cm/sであった（90%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程度ごとに締固めを行った。堤体の作成方法および手順は常に同一として、堤体の締固め度（本実験では90%と85%を作成）の調整は転圧回数で調整した。また、基礎部は堤体より締固め度を大きくして90%以上とした。なお、堤体・基礎部の締

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
裏のり面変形量	裏のり面に設置した直接変位計	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

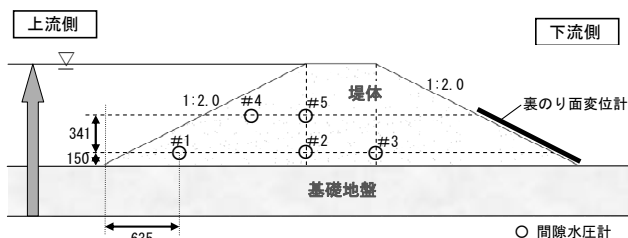


図-3 間隙水圧計設置位置

固めにおいて、各段階でRI試験を行い、目標の締固め度となるように管理した。

### (3) 実験方法

#### 1) 固定床水理実験

土材料による実験では越流時の水面計（水深）、圧力分布、流速分布の計測が困難であるため、表面粗度をつけた合板で作成した固定床堤体を用いた越流実験を実施して、越流水深を10cm、20cm、30cmと変えた条件での各水理量を計測した。

#### 2) 越流侵食実験

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、レーザー変位計による侵食変形計測、堤体内に埋設した間隙水圧計（5箇所、図-3）による堤体内湿潤状態の計測および変位計による浸透に伴う裏のり面の変形量計測である。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。

#### (4) 実験ケース

小型堤防による実験ケースを表-2に示す。各ケースは、特異な実験結果を判別するため、同一条件で3回以上実

表-2 実験ケース

実験の種類	No.	越流水深	堤体目標締固め度	湛水有無	実施回数
固定床	I	10, 20, 30cm	—	—	各1
越流侵食	II-1	30cm	90%	あり	13
	II-2	20cm	90%	あり	3
	II-3	10cm	90%	あり	3
	II-4	30cm	85%	あり	8
	II-5	30cm	90%	なし	3

※網掛けは基本ケース（II-1）に対して変更した条件

施するものとした。ケースII-1「越流水深30cm、堤体締固め度90%、越流前湛水あり」条件は、比較評価の基本ケースとするとともに、実験結果のバラツキ評価を行うため、同一条件で13ケース実施した。なお、「湛水なし」の実験では、基礎部底面から堤体天端高まで水位上昇させた後、湛水を実施せず、一気に水位上昇・越流させた。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. 実験結果および考察

固定床水理実験および越流侵食実験結果について、条件別に整理して越流侵食・浸透のメカニズムを検討した。

#### (1) 外力条件（越流水深）の違いによる影響

越流水深を10cm、20cm、30cmと変化させた場合の実験結果を比較する。なお、越流水深以外の条件は、堤体締固め度90%、越流前湛水あり、で統一する。

越流時に侵食が開始する場所の評価は、通水時の把握が困難であったため、短時間（2分間）で通水を一時停止した時点で侵食されている場所を侵食開始場所とした。通水2分後の侵食形状を図-4に示す。いずれの越流水深でも越流侵食の開始場所は裏のり尻付近であり、違いは見られない。また、図-5の固定床実験結果と比較すると、裏のり尻付近の圧力水頭が大きく変化している箇所と侵食開始場所が一致している。

堤体変形計測より算出した堤体全体の侵食量と通水時間の関係を図-6に示す。これより、同じ通水時間では越流水深が大きいほど侵食量が多くなっており、越流水深が大きいほど侵食進行が速いといえる。

#### (2) 堤体土質の締固め度の違いによる影響

堤体土質の締固め度を90%および85%と変えた場合の実験結果を比較する。なお、堤体締固め度以外の条件は、越流水深30cm、越流前湛水あり、で統一する。

通水時間と侵食量の関係を図-7に示す。締固め度85%では早く破堤に至るため通水12分後までしか比較できないが、同じ通水時間では締固め度90%より85%の方が侵食

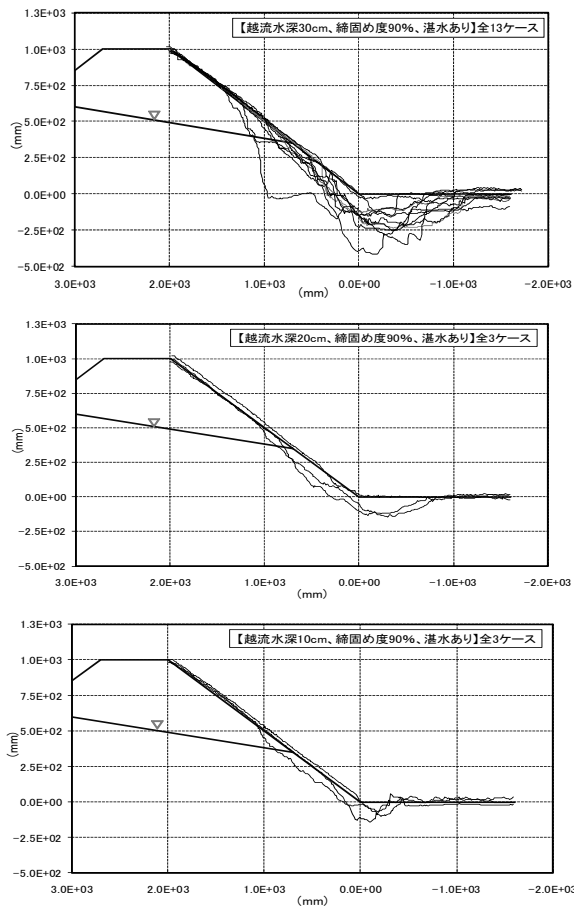


図-4 通水2分後の侵食形状（越流水深別）

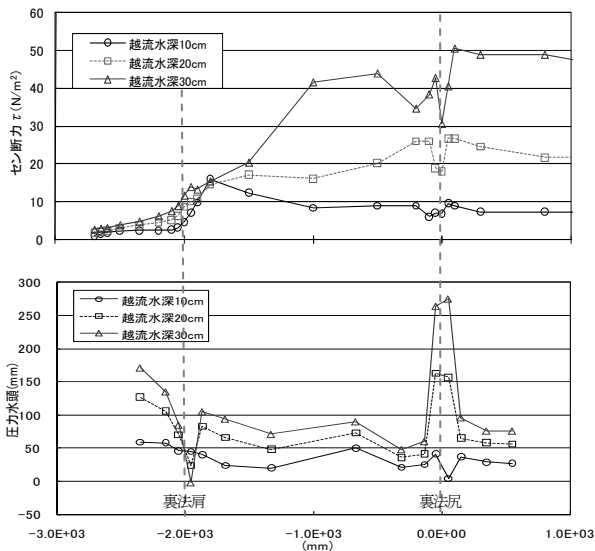


図-5 固定床実験結果

量が多くなっており、同じ土質であっても締固め度が緩いほど侵食進行が速いといえる。

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、今回の実験では締固め度90%、85%とも、浸透時の湿潤面が基礎面から平行に上昇している。堤体内湿潤面がほぼ定常になる時間は、締固め度90%で

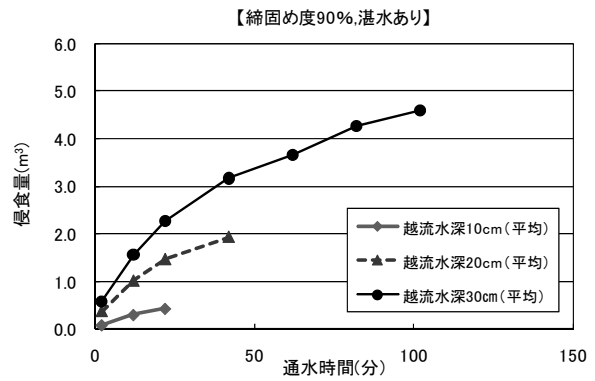


図-6 通水時間と侵食量の関係（越流水深別の比較）

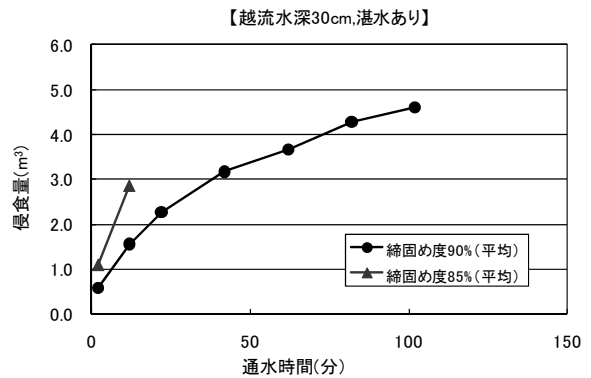


図-7 通水時間と侵食量の関係（締固め度別の比較）

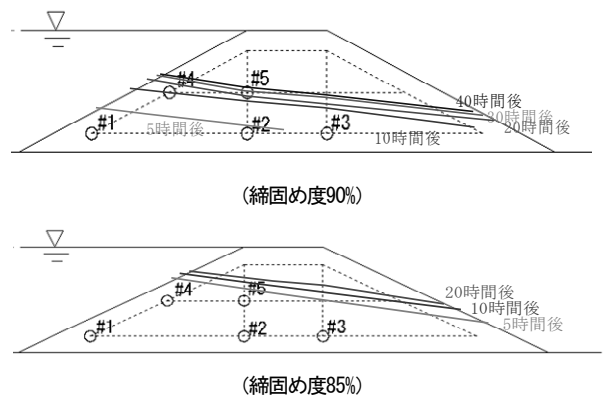


図-8 堤体内湿潤面コンター図

20～30時間程度、85%で10時間程度であった。また、湿潤面高さは締固め度90%に比べて85%の方が高くなっている。

### (3) 堤体内湿潤面の違いによる影響

越流前に湛水を行ったケース（湛水あり）と湛水を行わなかったケース（湛水なし）での実験結果を比較する。なお、湛水有無以外の条件は、越流水深30cm、堤体締固め度90%で統一する。

湛水による湿潤面の有無別の通水2分後の侵食形状を

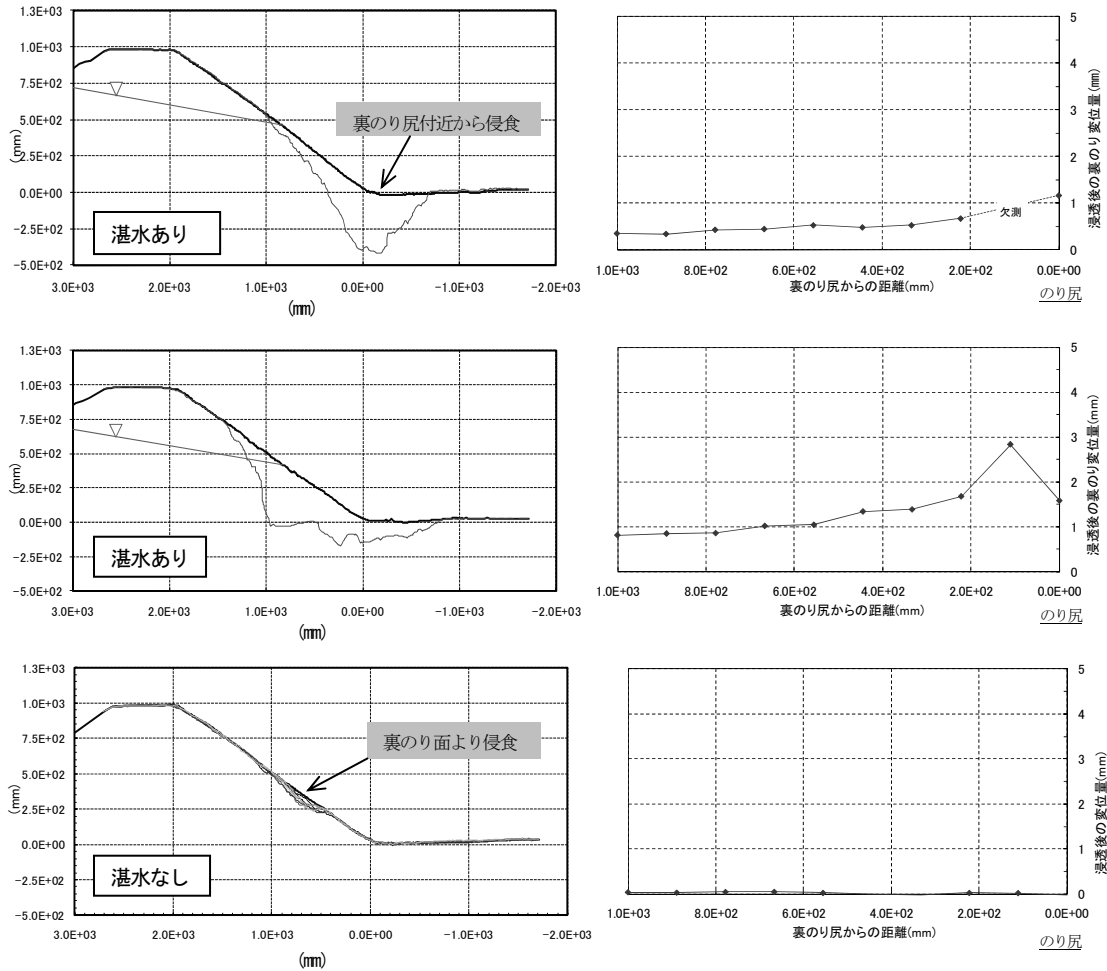


図-9 通水2分後の侵食形状と浸透による裏のり変位量

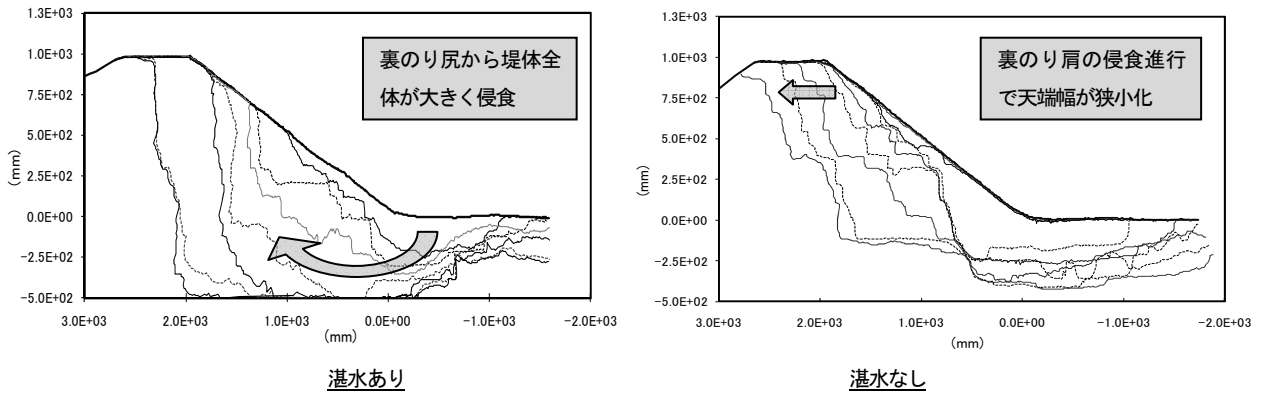


図-10 湛水有無の侵食進行過程 (侵食パターン)

図-9に示す。これより、湛水ありの場合の侵食開始場所は裏のり尻付近、湛水なしの場合は裏のり面となっており、堤体内湿潤状態による違いが見られた。固定床実験結果と比較すると、湛水ありの場合の侵食開始場所は圧力水頭が急激に大きくなっている箇所であり、湛水なしの場合の侵食開始場所はせん断力が最大値となっている箇所と一致する。

湛水による湿潤面の有無による、代表的な侵食進行過

程 (侵食パターン) の違いを図-10に示す。湛水ありの場合には、「堤体が裏のり面から崖状に侵食され、堤体全体が大きく侵食していく」形状で侵食が進行する。一方、湛水なしの場合は「裏のり面がのり肩まで侵食され、のり肩の侵食進行で天端幅が狭小化する」形状で侵食が進行する。また、湛水条件が異なる場合の、通水時間と侵食量の関係を図-11に示す。これより、湛水により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

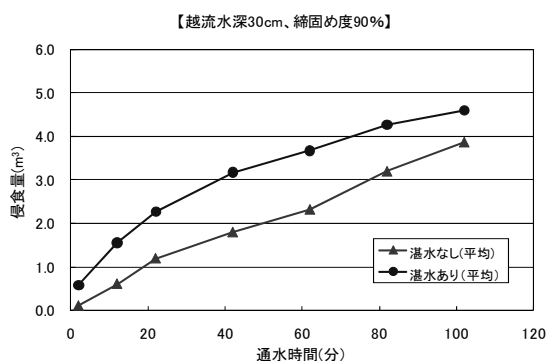


図-11 透水時間と侵食量の関係（湛水有無の比較）

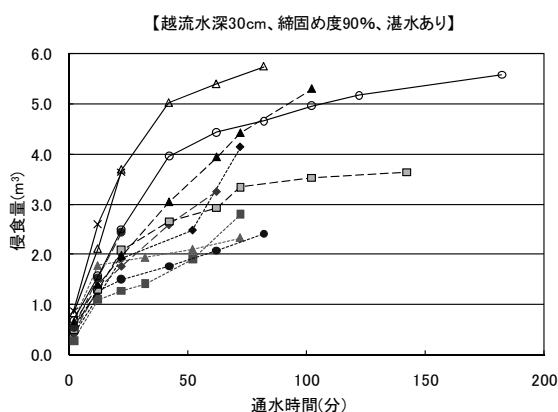


図-12 透水時間と侵食量の関係（同一条件）

【越流水深30cm, 締固め度90%, 湛水あり, 全11ケース】

いことが示された。これらより、堤体内湿潤状態は越流時の侵食場所や侵食の早さに影響を与えるものといえる。

また、図-9には浸透に伴う裏のり変形計測結果を併せて示す。湛水ありの場合は、浸透により裏のりが0.5～2.0mm程度変形（はらみ出し）していることが明らかとなった。また変形は、裏のり尻付近が最大となっている。なお、この変形箇所は、越流時の侵食開始場所と一致する。湛水なしの場合は、浸透に伴う変形は見られない

#### (4) 同一条件での結果の比較

同一条件で実施した実験結果を比較して、実験結果のバラツキについて分析を行った。比較検討を行った実験条件は、越流水深30cm, 堤体締固め度90%, 越流前湛水あり, である。

越流時の侵食開始場所については、いずれの実験でも裏のり尻付近となり、結果にバラツキは見られなかった。侵食量のバラツキについて、同一条件の侵食量と透水時間の関係を特異な結果を除いた11ケースについて図-12に示す。これより、同じ透水時間での侵食量にはバラツキが見られ、また途中から侵食量が増加するケースや、逆に減少するケースがあるなど、侵食進行の進み方も一定でない。

一方、各実験の堤体について、間隙水圧、締固め度、含水比を整理したが、これらの侵食進行の違いとの関連性が見られなかった。これより、実験結果で見られたバラツキは、局所的な土質や施工上の違いが影響していると想定されるが、バラツキを統計的に評価するためには実験回数が不足していることより、定量的にどれだけ影響しているかの判定は難しい。

#### 4. 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ものである。

- 1) 堤防越流時の裏のり面、のり尻の侵食場所、侵食量および侵食進行過程（侵食パターン）については、堤体内の湿潤状態が大きく影響すると推察される。小型堤防実験では、堤体内が湿潤状態で越流した場合は裏のり尻から侵食が開始し、裏のり面やのり尻が不飽和状態で越流した場合はのり面から侵食が開始した。また、越流侵食過程（侵食パターン）も堤体内の湿潤状態により異なるものとなった。
- 2) 同じ土質であっても、堤体の締固め度が異なると、越流時の侵食進行の速さや、堤体内への浸透量に影響する。
- 3) 土質条件や施工条件を厳密に管理しても、同一実験条件において侵食時間などにバラツキが見られた。これは、施工管理や土質管理は浸透や越水に対する安全性確保に関連することを示唆する。

#### 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) 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.
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。

(2010. 4. 8受付)