

特集

# 基盤排水工によるパイピング破壊 対策と表面被覆型越流対策工への 展開

小高猛司<sup>1</sup>・岡本隆明<sup>1</sup>・夏目将嗣<sup>2</sup>・李圭太<sup>2</sup>

## Countermeasures for Seepage Failure of River Embankment using Foundation Drainage Work and Its Development into Surface Covering Work against Overtopping

Takeshi KODAKA<sup>1</sup>, Taka-aki OKAMOTO<sup>1</sup>, Shoshi NATSUME<sup>2</sup> and Keita LEE<sup>2</sup>

### Abstract

This study investigated appropriate reinforcement methods to enhance the resilience of river levees against seepage and overtopping using small-scale model tests. In terms of seepage, we elucidated the mechanism of piping, which occurs particularly in river embankments constructed on highly permeable foundations, leading to small slip failures at the slope toe that progress and ultimately result in levee breaches. Based on these insights, we demonstrated the efficacy of foundation-drainage work as a reinforcement method for levees. Concerning overtopping, we concentrated on the most practical measure, namely, the surface covering method, and elucidated the mechanism by which levee breaches occur. Specifically, we identified that levee failures are induced by the erosion of embankment materials at the slope toe due to overtopping water and piping that develops beneath the surface covering work owing to internal erosion. However, integrating drainage work or foundation drainage work with surface covering can effectively prevent levee breach.

キーワード：河川堤防，浸透，越流，パイピング，対策工

Key words: river embankment, seepage, over topping, piping, countermeasure

### 1. はじめに

2019年台風19号（東日本豪雨）では，全国142カ所の河川堤防が決壊し，そのほとんどの主因が越水であった。その水害を契機として，越水しても決壊までの時間を引き延ばす「粘り強い」河川堤

防の整備が国を挙げて進められはじめている。それまでも，河川堤防は様々な被災を経験してきた<sup>1)</sup>が，2012年の矢部川堤防における越水なき決壊と2013年に梯川堤防，子吉川堤防で立て続けに発生した大規模法崩れをきっかけとして，高透水

<sup>1</sup> 名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科  
Department of Civil Engineering, Meijo University

<sup>2</sup> 日本工営株式会社  
Nippon Koei Co., Ltd.

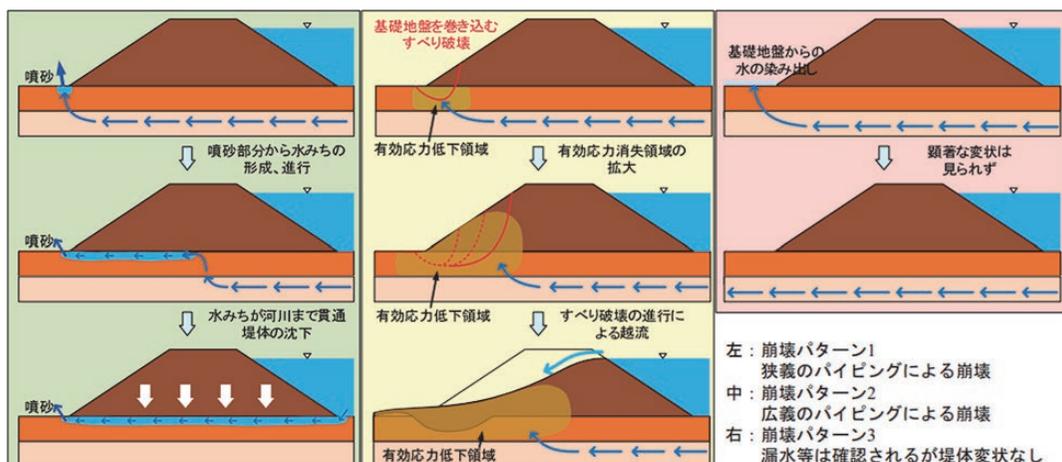


図1 高透水性基礎地盤を有する堤防の崩壊パターンの類型化<sup>1)</sup>

性基礎地盤上の河川堤防で発生するパイピングによる堤防決壊について多くの研究開発がなされてきた。一方、2019年までの間にも、毎年のように越水決壊が発生していたが、まずは超過洪水以前の外力から確実に堤防を守るための検討が優先されてきたことから、越水に対する検討の機運は十分に醸成されてこなかったのが現状である。

本稿では、著者らの小型模型実験に基づき、洪水時の河川堤防の浸透と越水による被災メカニズムについて整理し、浸透と越水いずれにも粘り強さを発揮するための河川堤防の強化について検討する。浸透と越水は全く別の現象であり、決壊メカニズムや対策方法も別と考えられるかもしれない。しかし、本稿で対象とする表面被覆型越流対策工における決壊メカニズムには、後述するように堤体内浸透が強く影響していることから、河川堤防の強化にあたり、特に越水対策にあたっては、浸透についても十分に検討すべきであることについても本稿で示す。

## 2. 透水性基礎地盤のパイピングに起因する河川堤防の崩壊パターンについて

筆者らの研究<sup>2,3)</sup>では、堤体ならびに基礎地盤の土質、境界条件を変えた浸透破壊模型実験を系統的に実施し、高透水性基礎地盤上の河川堤防の崩壊メカニズムのパターンを図1のように3つに

分類した。崩壊パターン1は、透水性のギャップが大きい地層間の境界部に水みちが形成され、それが川裏側から川表側まで連通し内部侵食を引き起こすことによって堤体が崩壊する。崩壊パターン2は、川裏側堤体法先付近において基礎地盤からの浸透圧による有効応力の低下により、法尻部から天端にかけて堤体の崩壊が進展するものである。崩壊パターン3は、川裏側の法先に漏水が見られる程度で、基礎地盤の浸透が堤体の崩壊に関与しないものである。

崩壊パターン1と2に共通して、図2のようにパイピングの初期現象として領域Ⅱの地盤が持ち上げられ(盤ぶくれ)、噴砂が発生する<sup>3-5)</sup>。図2の小型模型実験では領域Ⅰの三河珪砂3号と領域Ⅱの三河珪砂8号との間には67倍の透水係数の差がある。実験開始から堤体天端の9割まで川表側の水位を急上昇させ、その後水位を一定に維持するが、実験開始からすぐに川裏側の領域ⅠとⅡの間に水みちが発生して領域Ⅱの地盤の広い範囲が持ち上げられた。その直後に図の左側の堤体から遠い位置と堤体法尻部近傍ではほぼ同時に噴砂が発生した。水位上昇後に堤内地表面が所どころ盛り上がった後、堤体から遠い位置で発生した噴砂が、その後群発的に裏法面に向かって進行した。

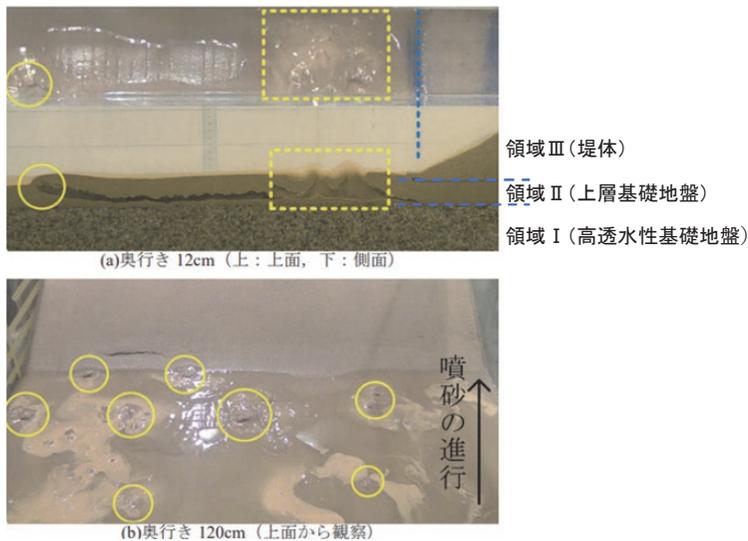


図2 被覆土層に発生する盤ぶくれと噴砂<sup>3,4)</sup>

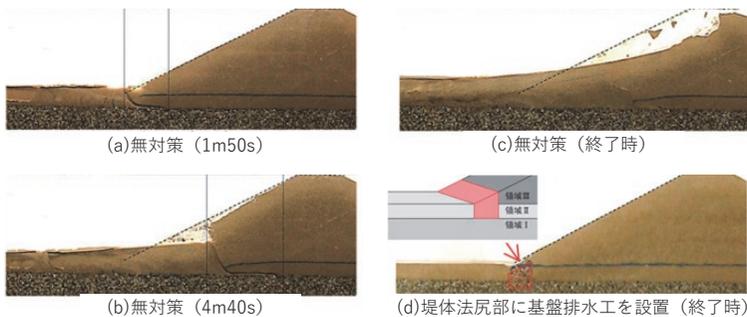


図3 (a) - (c) 無対策の場合のパイピングによる破壊過程, (d) 法尻への基盤排水工の設置による抑制効果<sup>3)</sup>

### 3. パイピング破壊に対して粘り強い堤防の検討

透水性基礎地盤上の粘り強い河川堤防について調べるために、筆者らは無対策のケースと川裏側の堤体法尻部に基盤排水工を設置したケースについて小型模型実験を行った<sup>3,5)</sup>。図3(a) - (c)の無対策のケースでは前章で述べたように、パイピング現象の初期に、法尻部での盤ぶくれの破裂に端を発する激しい漏水に伴う噴砂とパイピングが発生した。その後、領域IとIIの間に形成された水みちが法先から地表に吹き出し、堤体法尻部に小規模な法すべりが発生し始めた(図3(a))。さら

にその法すべりをトリガーとして、堤体法尻部の崩壊の進展に伴って水みちが川表側へ徐々に進行した(図3(b))。川表側への水みち形成は、Backward Erosionと呼ばれる透水性のギャップが大きい地層境界に発生する高速水流による内部侵食現象によるものである。断続的な堤体の小崩壊が繰り返し発生することによって大規模なすべり破壊に進展し、実験開始約23分後に天端川表側まですべり破壊が到達した(図3(c))。

一方、図3(d)の堤体法尻部に基盤排水工を設置したケースでは、実験開始約30秒後に基盤排水工からの排水が確認された。その後、堤体に変状は

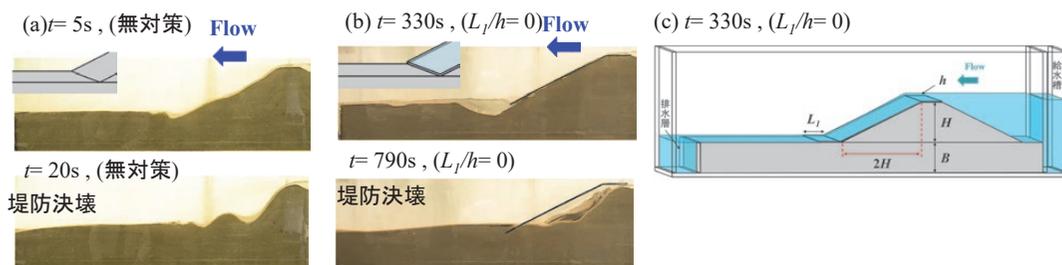


図4 (a)無対策の場合の越流侵食による破壊過程, (b)天端・法面被覆工設置による抑制効果, (c)越流侵食実験<sup>6)</sup>

見られず、実験開始60分で実験終了とした。堤体に変状が見られなかった理由として、大規模なすべり破壊のトリガーとなる法先の小規模なすべりを抑制したことが挙げられる。これは、最も動水勾配が大きくなる堤体法尻部に効果的に基盤排水工を配置したことによって、領域Ⅰから作用する間隙水圧の増加に伴う領域Ⅱ、Ⅲの有効応力低下も抑制されたためである。また堤体法尻部を基盤排水工の粗粒材料へと置換したことによる力学的な効果も大きいと考えられる。

#### 4. 越流侵食・パイピング破壊の双方に対して粘り強い堤防の検討

筆者らの研究<sup>6,7)</sup>では表面被覆工と併用することで基盤排水工の越流侵食対策での有効性についても調べている。筆者らの小型模型実験<sup>6)</sup>で堤防の越水実験を行った。堤体材料と基礎地盤に同じ材料を用いた単層の場合においては、三河珪砂8号砂を使用した。堤体作製後、水を浸透させた後に、越流水深を一定として、実験を行った。単層では天端、法面の被覆工の有無、法尻保護工の長さ $L_1$ を $L_1=0, 5, 15$  cm ( $L_1/h=0, 5, 15$ ) に系統変化させて、計4ケース越流侵食実験を行った。

被覆工無し(図4(a))のケースでは堤防を越流水が超えると、上面から侵食され、時間経過とともに法尻から天端にかけて侵食が進む。天端が消失すると堤防は決壊した。このケースではすぐに堤防が決壊し、決壊時間は短い( $t=20$  s)。これに対して、天端・法面に被覆工を設置すると( $L_1/h=0$ , 図4(b)), 越流水によって上面からは

侵食されてない。しかし、法尻部に到達する流れは高速の射流で、基礎地盤が侵食された。基礎地盤の洗掘孔は法面被覆工の下にも広がり、時間経過とともに堤体材料が吸い出された。これは洗掘孔内の流速は非常に高速でこれがトリガーとなって、堤体材料の吸い出しが起きたためである。堤体内浸透が進行することにより法面被覆工と堤体の透水性のギャップによって被覆工背面で内部侵食によって川裏側から水みちができていく。これが堤体天端までつながることで一気に崩壊が進み、堤防は決壊した。堤防決壊までの時間は実験室スケールで $t=790$  s(縮尺倍率30倍で実スケール換算して1.2時間)であり、被覆工無しのケースと比較すると大幅に延ばすことができた。

法尻にも保護工を設置した $L_1/h=5$ のケース(図5(a))でも越流水が法尻部に到達すると基礎地盤が侵食されている。 $L_1/h=5$ のケースでも洗掘孔内の流れによって堤体材料が吸い出され、堤防が決壊した。堤防決壊までの時間は $t=1730$  s(実スケール換算して2.6時間)で法尻保護工を設けることで洗掘孔から堤防の法尻まで土が吸い出されるのに時間がかかり堤防決壊までの時間を延ばすことができた。さらに長い保護工を設置した( $L_1/h=10$ のケース(図5(b))では保護工上で水平に流れを変えた越流水が基礎地盤に向かうため、基礎地盤の洗掘孔の深さが浅く、流下方向に長くなっている。堤防決壊までの時間は $t=2480$  s(実スケール換算して3.7時間)となった。保護工を一番長くしたケース( $L_1/h=15$ , 図5(c))では90分(5400 s)通水したが、保護工下の土の吸い出しは

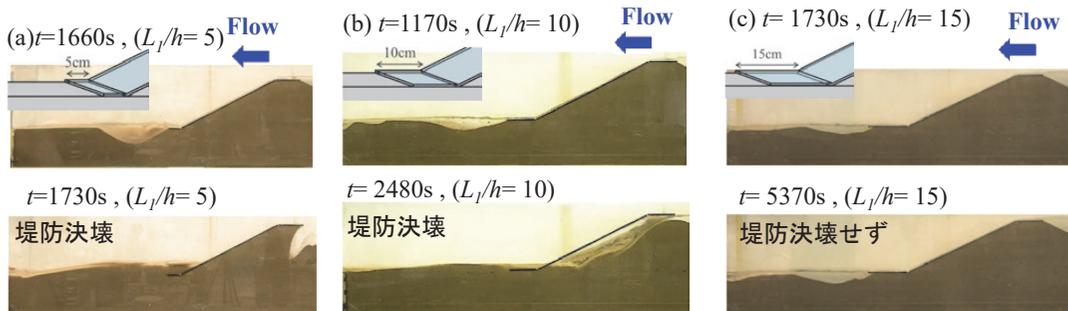


図5 (a) - (c)天端・法面被覆工，法尻保護工設置による越流侵食の抑制効果（保護工の長さを変化）<sup>6)</sup>

みられたものの法尻まで崩壊箇所は到達せず，堤体材料が吸い出されなかったため決壊しなかった。図には示していないが，染料実験結果から浸潤線は90分通水後に法面被覆工の真ん中まで到達していたが，法尻での洗掘孔までは到達していなかった。

保護工の効果について調べるために洗掘孔内部の流れのPIV計測を行った<sup>6)</sup>。ビデオカメラで撮影した基礎地盤の侵食形状を3Dプリンターで再現し，固定床の模型を作製した。PIV計測を用いて侵食時の固定床の地盤模型上の流速を計測した。図6 (a)の天端・法面に被覆工を設置した ( $L_p/h = 0$ ) ケースの  $t = 10$  s の地盤形状時では法面被覆工から下ってきた越流水が洗掘孔の中に流れ込んで基礎地盤にぶつかっているのが観察される。基礎地盤にぶつかった流れは分かれて，それぞれ反時計回りと時計回りの渦を形成している。これらの渦が地盤を川表側と川裏側に侵食していると考えられる。川表側と川裏側の底面付近の流速の正負の値は大きく地盤侵食を急激に進行させている (図7 (a))。この反時計回りの渦の高速流による法尻での侵食をトリガーとして堤体材料の吸い出しが起き，法面被覆工背面の内部侵食に伴う水みちが堤体天端までつながると堤防が決壊する (図7 (b))。

さらに保護工の長さを大きくした ( $L_p/h = 15$ ) のケース (図6 (b)) では，法面を下ってきた流れが保護工の上を水平に流れて，基礎地盤にぶつかる。流れが水平方向に向かっているため，洗掘孔

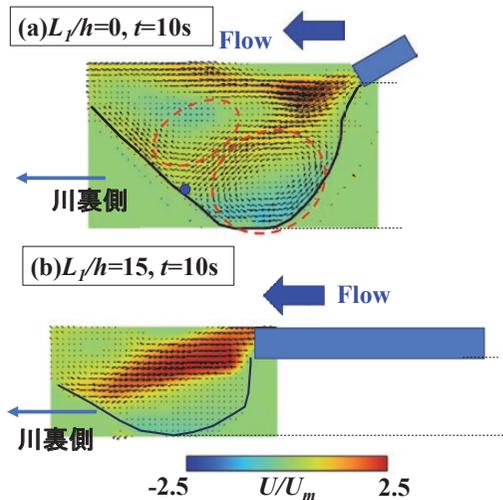


図6 堤防法尻での洗掘孔内の流れの変化<sup>6)</sup>，  
(a)  $L_p/h = 0$ ，(b)  $L_p/h = 15$

の深さは浅くなり，川表側の渦領域の流速は小さくなっている。このため洗掘はあまり進展せず，土の吸い出しも起きにくいと考えられる。高速流による堤体材料の吸い出しが起きなかったため， $L_p/h = 15$  では本研究の条件で堤防が決壊しなかった。

以上のように，越流対策として表面被覆工を設置していても，被覆工背面の堤体の内部侵食に伴う水みち連通によって堤防が決壊する危険性が示された。内部侵食は堤体内浸透による浸透水によって発生する現象であるため，堤体内浸透をより一層促進する可能性のある透水性基礎地盤の存

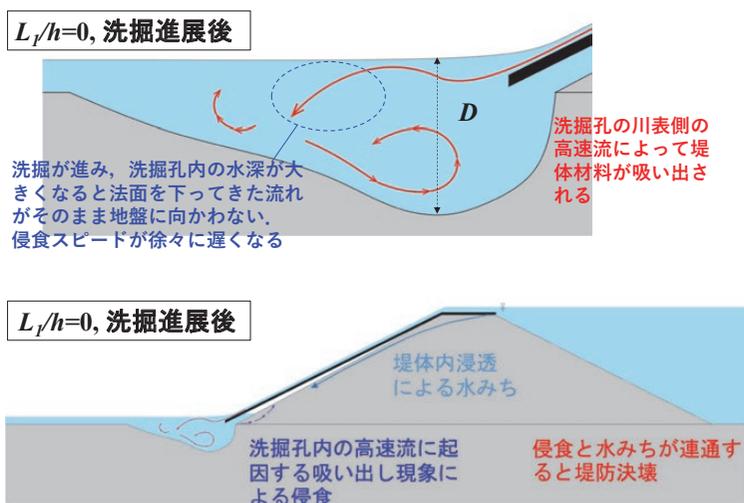


図7 被覆工のある堤防の越流による侵食プロセス<sup>6)</sup>

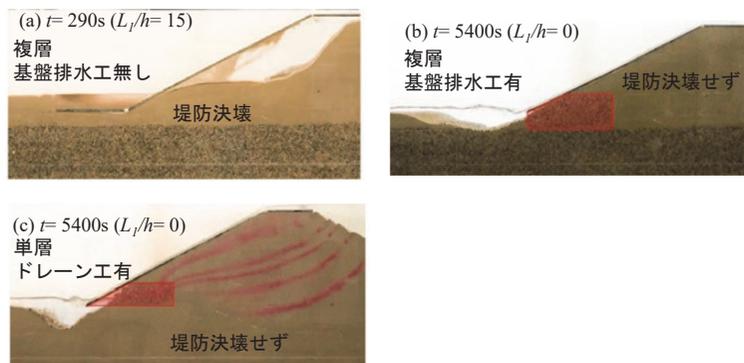


図8 (a) 複層地盤での越流侵食による破壊 (法尻保護工有, 基礎排水工無し), (b) 複層地盤での越流侵食の抑制 (天端・法面被覆工有, 基礎排水工有), (c) 単層地盤での越流侵食の抑制 (天端・法面被覆工有, 基礎排水工有)<sup>7)</sup>

在の有無の影響についても調べるために、単層だけでなく複層構造を有した堤防の実験を行った<sup>7)</sup>。透水性基礎地盤に三河珪砂3号砂、被覆土層に三河珪砂8号砂を使用する。表面被覆工に加え、パイピング破壊の対策工として効果が高いとされる被覆土層を透水層まで貫く構造を有した基盤排水工を堤体法尻部に設置し越流侵食実験を行った。基盤排水工には、複層地盤の透水地盤と同様に三河珪砂3号砂を用いて設置した。複層では天端・法面・法尻に被覆工を設置し、法尻の被覆工下部

に基盤排水工有と無しの2ケース実験を行った。

単層のケースでは越流によって決壊しなかった天端・法面・法尻に被覆工を設置して実験を行った。図8(a)の複層、 $L_1/h=15$ のケースでは、基礎地盤からの供給による浸透水によって、法尻保護工下の被覆土層の土が流出することにより、基礎地盤からの供給水の水みちが徐々に川表側に移動することによってパイピングが進行し、 $t=268$ sで決壊した。これにより法尻保護工を長くして洗掘孔と法尻の距離を延ばしても、表面被覆

工だけでは高透水性基礎地盤を有する場合のパイピング破壊は防げないことが示された。

表面被覆工に加え法尻部に基盤排水工を設置した複層のケース(図8(b))では越流水が法尻に到達することで川裏側の基礎地盤が侵食されるが、その後、90分間堤体の変状は見られなかった。基盤排水工を設置したことにより、高透水性基礎地盤から供給される浸透水が堤内地へ排水されることで、地層境界部で発生する高速流による内部侵食が抑制され、決壊に至らなかった。確認のために行った単層のケースでは法尻にドレーン工を設置すると、法尻に保護工を設置しなくても、天端と法面に被覆工を設置するだけで堤防の決壊を防ぐことができた(図8(c))。

複層地盤のケースで法尻部に基盤排水工を設置すると、越流侵食と浸透破壊を同時に対策することができた。表面被覆工を設置せずに基盤排水工だけ設置しても越流水で法面が上面から侵食されると考えられる。このため表面被覆工と基盤排水工(単層地盤であればドレーン工)を組み合わせることで堤体の越流侵食と浸透破壊の両方に対して粘り強い堤防となることがわかった。

## 5. おわりに

著者らの小型模型実験に基づき、浸透と越水に対して河川堤防が粘り強さを発揮するための強化法について検討した。浸透については、特に高透水性基礎地盤上の河川堤防で発生するパイピングとそれをトリガーとする決壊に至るまで進展する法すべりについて、そのメカニズムを明らかにした上で基盤排水工の有効性を示した。越水については、最も現実的な対策として、表面被覆型対策工を対象として、越流水による裏法尻での堤体材料の吸い出しと堤体内浸透に起因して被覆工背面で発生するパイピングによる決壊メカニズムを明らかにした上で、ドレーン工や基盤排水工を併用することの重要性を示した。

現在、「粘り強い河川堤防」の国を挙げての整備にあたって、国土技術政策総合研究所と土木研究所が「粘り強い河川堤防」の構造検討における考え方を整理して示している<sup>8,9)</sup>。そこで示され

ている標準断面においては、耐浸透性能の向上を理由にドレーン工の設置が推奨されているが、ドレーン工の存在が越流時の堤体に及ぼす影響については明確ではなかった。しかし、本稿によって、表面被覆型越流対策にあたっては、ドレーン工や基盤排水工の設置は必須であることの理論的裏付けができたものと考えている。

## 謝辞

本論文における模型実験の実施にあたり、名城大学の小高研究室の多くの卒業生にお世話になった。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会：河川堤防の調査・検討から維持管理まで、2020。
- 2) 小高猛司・李圭太・石原雅規・久保裕一・森智彦・中山雄人：高透水性基礎地盤を有する河川堤防の崩壊メカニズムと評価手法に関する研究、河川技術論文集, Vol. 24, pp. 559-564, 2018。
- 3) 小高猛司・李圭太・中村宏樹・山下隼史：高透水性基礎地盤上の河川堤防の浸透破壊に対する効果的な基盤排水工の検討、地盤工学ジャーナル, Vol. 17, No. 3, pp. 433-449, 2022。
- 4) 林愛実・森三史郎・森智彦・小高猛司・崔瑛・李圭太：複層構造基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊実験における三次元効果の検討、第72回土木学会年次学術講演会, pp. 189-190, 2017。
- 5) 中村宏樹・小高猛司・李圭太：堤防法尻に離散配置する基盤排水工の変状抑制効果の検証、地下水学会誌, Vol. 67, No. 3, pp. 307-325, 2025。
- 6) 岡本隆明・夏目将嗣・小高猛司・李圭太・松本知将・山上路生：堤防法尻侵食に伴う越流水の流れ構造の変化と法尻保護工の効果に関する実験的研究、土木学会論文集 特集号(水工学), Vol. 81, No. 16, ID: 24-16115, 2025。
- 7) 夏目将嗣・小高猛司・岡本隆明・李圭太：堤体と基礎地盤の浸透を考慮した堤防越水時の表面被覆工とドレーン工の効果の検証、地盤工学ジャーナル, Vol. 20, No. 3, pp. 367-380, 2025。
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究所河川研究室・国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ(土質・振動)：粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料(案)令和5年3月 ver.1.1, <https://www.nilim.go.jp/lab/>

fbg/download/gijutsusiryo.pdf, 閲覧日2025年6月21日.

- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部  
河川研究室・国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ(土質・振動): 粘り強い河川堤防の技術開発に当たっての参考資料【表

面被覆型】令和4年12月 ver1.0, [https://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/sanko\\_hyoumen\\_hifuku.pdf](https://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/sanko_hyoumen_hifuku.pdf), 閲覧日2025年6月21日.

(投稿受理: 2025年6月21日)

## 要 旨

浸透と越水に対して河川堤防が粘り強さを発揮するための強化法について小型模型実験によって検討した。浸透に関しては、特に高透水性基礎地盤上の河川堤防で発生するパイピングとそれをトリガーとする決壊に至るまで進展する裏法すべり崩壊について、そのメカニズムを明らかにした上で、強化法としての基盤排水工の有効性を示した。越水に関しては、最も現実的な対策である表面被覆型対策工を対象として、堤防が決壊に至るメカニズムを明らかにした。すなわち、越流水による裏法尻で発生する堤体材料の吸い出し、ならびに堤体内浸透に起因して被覆工背面において発生するパイピングによって堤防が決壊に至ることを示した。しかし、ドレーン工や基盤排水工を表面被覆工と併用することによって、決壊を回避できることを示した。