

越流に対する表面被覆型対策工の効果と堤体崩壊メカニズムの検討 Effectiveness of surface covering countermeasures against overflow and Failure mechanism of the embankment

夏目将嗣¹, 岡本隆明², 小高猛司², 李圭太³

- 1 名城大学大学院・理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻
- 2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 日本工営株式会社・コンサルティング事業統括部 / 名城大学特任教授

概 要

近年激化する豪雨や洪水に伴い越流による河川堤防の決壊が頻発化しており、越流に対して決壊するまでの時間を長くするための粘り強い河川堤防の設計が急務となっている。本研究では、越流対策工として挙げられる表面被覆型の対策工を施した堤体において、法面被覆工や法尻保護工が越流侵食に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、法尻保護工の長さを系統的に変化させて越流実験を行った。法尻保護工を長くすることで堤体材料の吸い出しが抑制され、決壊までの時間を大幅に伸ばすことができることを示した。また、越流実験から得られた侵食形状を再現した固定床で同様な越流実験を行い、洗掘孔内の PIV 計測を行うことで、法尻保護工の長さによって堤体近傍における流体挙動が変化することで堤体材料の吸い出し現象に影響を及ぼすことを明らかにした。

キーワード：河川堤防、越流、法面被覆工、パイピング、PIV

1. はじめに

近年激化する豪雨、洪水に伴い越流による河川堤防の決壊が頻発化しており、越流が発生した場合においても決壊するまでの時間を少しでも長くするための構造を有した粘り強い河川堤防の設計が急務となっている。現在、粘り強い河川堤防の構造設計として、表面被覆型や自立型の対策工など様々な対策に関する研究および検討が行われている(例えば1)~4)。

本研究では、表面被覆型の対策工を施した越流侵食実験および2次元浸透流解析と越流水のPIV計測を行った。越流侵食実験では、天端・法面被覆工と法尻保護工を設置し、法尻保護工の長さを変化させ堤体の崩壊メカニズムの検証を行った。PIV計測では、被覆工によって堤体近傍で生じる流れ構造を明らかにした。さらに、粘り強さを高めるためのドレーン工の効果についても検討した。

2. 実験概要

本研究では、幅170cm、高さ60cm、奥行き12cmの亚克力製土槽を用いた(図1(a))。x, yおよびzはそれぞれ流下方向、鉛直方向および横断方向座標である。時間平均成分をU, VおよびWとした。堤体の高さはH=20cm、基礎地盤の厚さB=15cm、堤体は2割勾配である。堤体材料に

は三河珪砂8号砂(間隙比 $e=1.06$ 、透水係数 $k=3.98 \times 10^{-5}$ m/s)を用いた。また、被覆材には、やすりで表面加工した亚克力板を用い、越流水が側面から流入しないように亚克力板の両側に止水ゴムを貼り、実験装置の壁面同士で挟み込むように固定して実験を行った。

実験手順として、まず、三河珪砂8号砂を含水比4%になるように調整した後、所定の間隙比になるように丁寧に締め固め堤体を作製し、その後、亚克力板を天端・裏法面、法尻部に設置する。法尻保護工の長さは L_l とした。堤体作製後、給水槽の水位を水槽底面から250mm(堤体高さ5割)、排水層の水位を100mmで保ち、100分間浸透を行った。

浸透後、給水槽の水位を一気に上昇させ、越流水深 $h=1$ cmで一定の流量になるように実験を行った。堤体が決壊に至るまで実験を行ったが、決壊しない場合は90分間で実験を終了した。 $t=0$ sは越流水が堤体法尻の基礎地盤に到達したときの時刻とした。越流侵食実験では、堤体全体、法尻拡大部および法面の3か所をビデオカメラで撮影した。

表1に実験条件を示す。本研究では、図2のように、天端、法面の被覆工の有無、法尻保護工の長さ L_l を $L_l=0, 15$ cm($L_l/h=0, 15$)に変化させた2ケースに加え、天端・法面被覆工を施した堤体の法尻部にドレーン工を設置したケースの計4ケース越流侵食実験を行った。

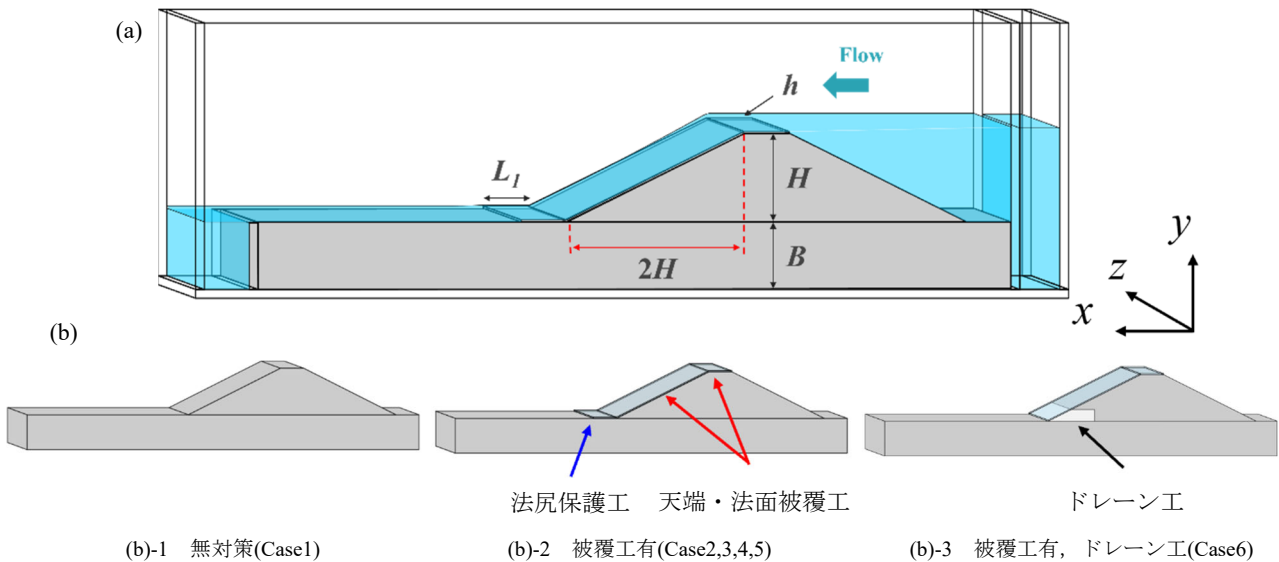


図 1(a) 越流侵食実験装置, (b) 堤防の対策工について

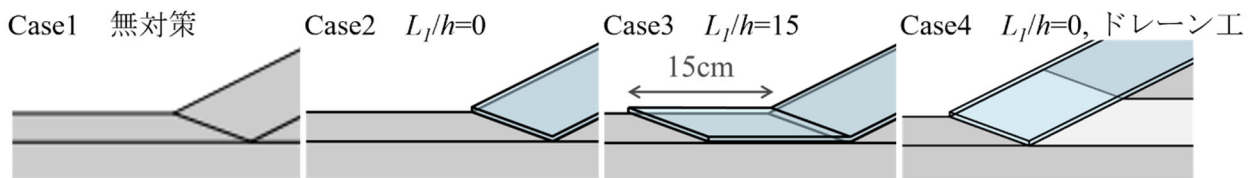


図 2 堤防の法尻保護工の長さ

表 1 実験条件

	H(cm)	h(cm)	実験条件	法尻保護工の長さ L_1 (cm)	実験項目
Case1	20	1	無対策	0	越流侵食
Case2	20	1	被覆工有り	0	越流侵食, PIV
Case3	20	1	被覆工有り	15	越流侵食
Case4	20	1	被覆工有り, ドレーン工	0	越流侵食

3. 実験結果と考察

(1) 天端・法面被覆工による越流侵食抑制効果について

天端・法面の被覆工の有無による越流侵食過程の変化について考察する。ケース 1 の無対策では、越流直後、越流水が法尻部を侵食し、時間経過とともに法尻から天端にかけて侵食が進行する。その後も越流させ続け、 $t=20s$ で天端が侵食され決壊へと至った(図 3(a))。

天端・裏法面に被覆工を設けたケース 2($L_1/h=0$)では、越流開始直後、越流水が法尻部に到達すると、堤体法尻部よりも川裏側の基礎地盤が侵食される。その後も川裏側の基礎地盤への侵食が進行していくが、 $t=10s$ 時点において堤体法尻への吸い出しによって堤体土砂が川裏側へと流出することをきっかけとして、裏法面に設置した被覆材に沿って川表側への内部侵食(backward erosion)が進行し始める。内部侵食が生じることをトリガーとして堤体と被覆材との境界に水みちが形成される。以降、透水性のギャップが大きい堤体と被覆材との境界に沿って内部侵食が進行していき、 $t=790s$ で被覆材に沿って生じた水みちが連通す

ることで一気に崩壊が進み決壊へと至った(図 3(b))。

ケース 1, ケース 2($L_1/h=0$)の実験結果より、天端・裏法面の被覆工によって越流による直接的な侵食が抑制されるため、無対策のケース 1 よりも決壊までの時間が大幅に伸びたと考えられる。また、天端・裏法面に被覆工を施した場合でも越流水によって堤体法尻部が侵食・吸い出しをトリガーとして破堤に至ることが分かった。

法尻保護工を長くしたケース 3($L_1/h=15$)では、越流開始から基礎地盤が侵食され、洗堀孔が川裏側へと拡大していく。保護工を設置することで洗堀孔が流下方向に長くなり、洗堀深さが浅くなっていることがわかる。これは越流水が基礎地盤へ吐出される際の流れが保護工によって減速されたためと考えられる。その後も 90 分間(5400s)越流させ続けたが、保護工下および堤体材料の吸い出しや川表側への内部侵食は見られず、堤体の変状も見られなかった(図 3(c))。これらの結果より、法尻保護工を設置しない場合においては、越流水による堤体材料の吸い出しをきっかけとして、裏法面の被覆工に沿って内部侵食(backward erosion)が進展し、それに伴う水みちが天端まで連通することによって堤体全体が崩壊するメカニズムが生じている(図 4)。

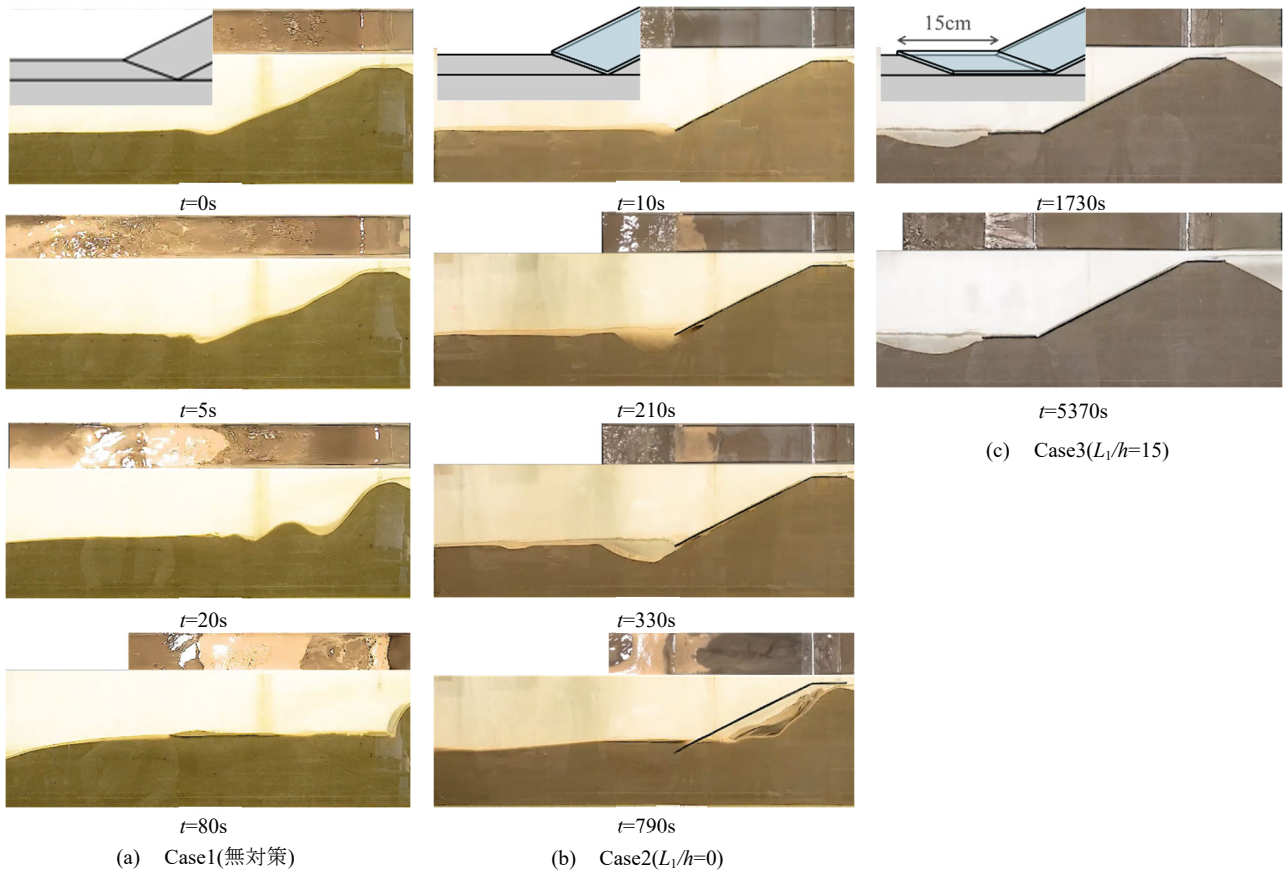


図3 越流侵食過程((a) Case1,(b) Case2,(c) Case3)

(2) 天端・法面被覆工による流れ構造について

本節では、法尻部での侵食に伴う越流水の流れ構造を明らかにするために、越流実験で得られた基礎地盤の侵食形状を対象に、法尻部の流れを PIV 計測した。水面変動があると上面からレーザー光を照射して正確に流速計測することが難しくなるため、底面からレーザー光を照射するようにし実験を行った。まず、ビデオカメラで撮影した基礎地盤の形状を 3D プリンターで再現し、固定床の模型を作製した。土槽底面からレーザー光が照射できるように中央に幅約 1cm の溝を設け、溝部の上部は地盤形状に合わせて変形する透明シートで被覆を行い、溝内部に水が浸水しないようにしている(図 5)。流速計測実験では堤防模型を発泡スチロールで作製している。トレーサー粒子を流して通水し洗堀孔内部の流速を PIV 法で計測した。5.0W の YAG レーザーを光源として土槽下方から厚さ 2mm のレーザーシートライト (LLS) を照射し、土槽の側方に設置した高速カメラ (1280×1024 pixel) でデジタル撮影した。カメラにパルス発生器を接続して 30Hz の外部トリガーを与え、500Hz のフレームレートで 2 枚の連続画像のペアを 60 秒間計測した。撮影領域のサイズは約 20×20cm とした。

堤体高さ H 、断面平均流速 U_m および越流水深 h は全ケースで一定とした。PIV 計測は、 $L_1/h=0$ の $t=10s$ の基礎地盤形状を再現して行った。

PIV 計測結果から、洗堀孔内における流れ構造について考察する。図 6 にケース 2($L_1/h=0$)の $t=10s$ 時点の地盤形状

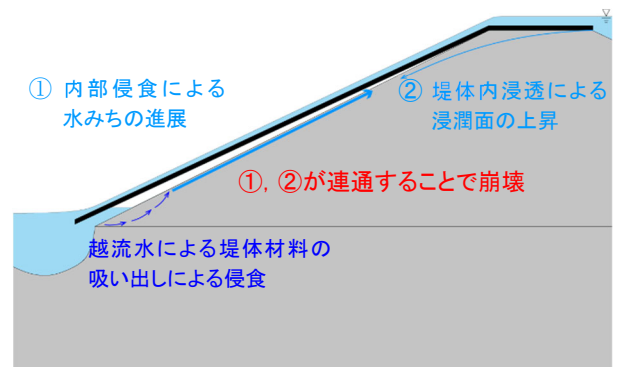


図4 崩壊メカニズム模式図

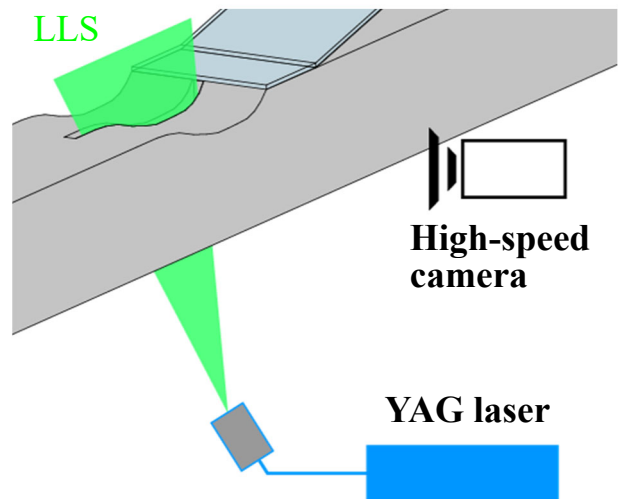


図5 洗堀孔内の PIV 計測

で計測した時間平均主流速 U のコンターと流速ベクトル (U, V) を示す。ケース 2 ($L_1/h=0$) の PIV の結果より、裏法面被覆工から吐出された越流水が洗堀孔内に流れ込み基礎地盤に衝突するのが観察される。基礎地盤に衝突した流れはそれぞれ反時計回りと時計回りの渦を形成している。これらの渦によって川表側と川裏側への侵食が発生していると考えられる。

(3) ドレーン工が越流侵食に与える影響について

越流侵食実験の結果より、法尻保護工を設置しないケース 2 ($L_1/h=0$) では、越流水による堤体法尻部の吸い出しをトリガーとし、堤体内浸透が進行することで堤体と被覆工の境界に水みちが形成され、決壊へと至ることが示された。

本節では、吸い出し現象の起点となる堤体法尻部の強化および堤体内の浸潤面を低下させるためのドレーン工を設置したケース 4 ($L_1/h=0$, ドレーン工) を実施し、被覆工・ドレーン工併設の越流侵食抑制効果を検証した。ドレーン部分は、三河珪砂 3 号砂 (間隙比 $e=0.95$, 透水係数 $k=2.67 \times 10^{-3} \text{m/s}$) を用いて縦 50mm, 横 200mm のスケールで作製し、実験を行った。加えて、模型実験結果を浸透流解析でシミュレーションし、ドレーン工を併設した場合における堤体内部の浸透挙動について考察を試みた。

図 7 に天端・裏法面に被覆工、堤体法尻部にドレーン工を併設したケース 4 ($L_1/h=0$, ドレーン工) の越流侵食過程を示す。越流開始直後、ケース 2 ($L_1/h=0$) と同様に川裏側が越流水によって侵食され、間もなくして堤体法尻への吸い出しによってドレーン材の一部が川裏側へと流出するが、その後、90 分間堤体の変状は見られなかった。越流実験中の堤体内浸透を視覚的に明らかにするために、赤色の蛍光トレーサー染料を川表法面の複数個所に注入し観察を行った。図 7 に示すように堤体内の浸透水がドレーン工に集水され、浸潤面が被覆工まで達していないことがわかる。また、ドレーン部に到達した浸透水は、ほぼ水平方向に向かって低内地側へと排水されている。ドレーン工を設置したことにより、堤体内浸潤面が裏法面被覆工に浸出することが抑制されることで、堤体と被覆工の境界部に水みちが形成されなかったことが決壊に至らなかった要因であると考えられる。

天端・裏法面を被覆したケース 2 ($L_1/h=0$) と天端・裏法面被覆工とドレーン工を併設したケース 4 ($L_1/h=0$, ドレーン工) の実験結果を飽和 - 不飽和浸透流解析コード UNSAF (Unsaturated-Saturated Analysis program by Finite element method) を用いてシミュレーションを行った。解析モデルの境界条件を図 8 に示す。被覆工を施した天端・裏法面は非排水条件とし、外力として与える水位は、模型実験に合わせて設定した。この時、川表側の水位は、30s で越流水深が 1cm に到達するように変動水頭を与えている。浸透流解析を行う際には、不飽和浸透特性を明らかにする必要があるが、本研究で用いた関数モデルやパラメータについては、小高ら(2022)⁹で行った浸透流解析のパラメータを参考に解析を行った。図 9 にケース 2 ($L_1/h=0$)、ケース

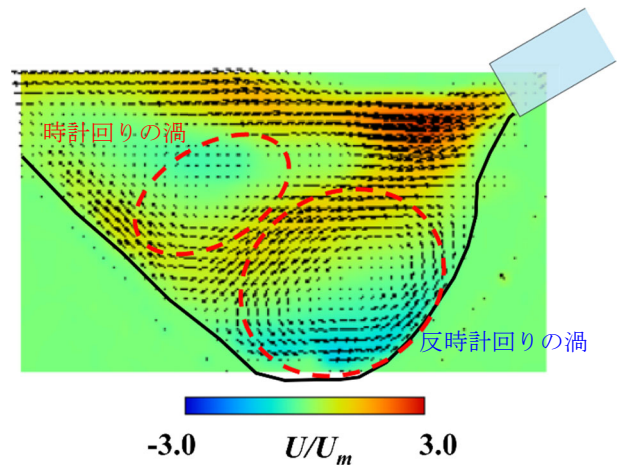


図 6 PIV 結果

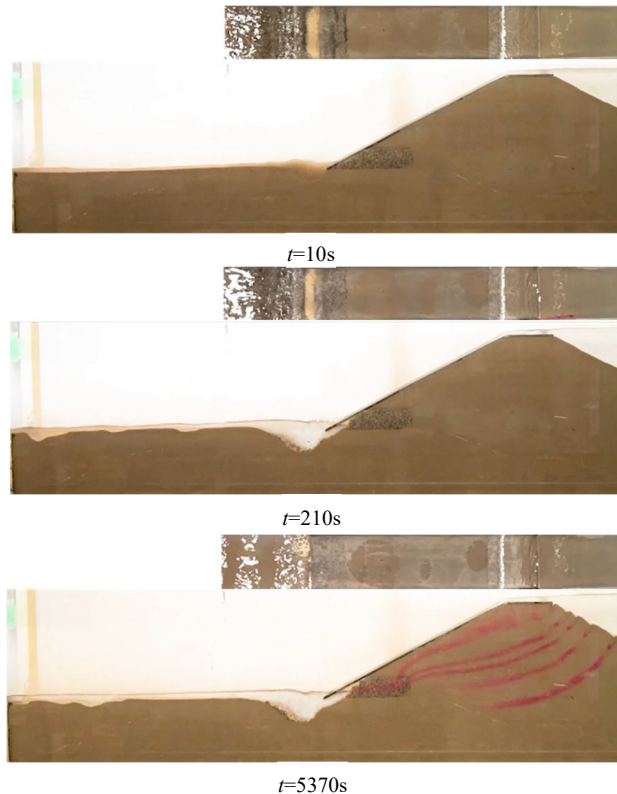


図 7 越流侵食過程(Case6($L_1/h=0$, ドレーン工))

4 ($L_1/h=0$, ドレーン工) の解析結果を示す。ケース 2 ($L_1/h=0$) の再現解析では、川表側の水位を上昇させると浸潤面が徐々に上昇し、越流水深が 1cm に到達する 30s 時点では、浸潤面が裏法面の約 8 割の高さまで上昇している。一方で、天端・裏法面被覆工とドレーン工を併設したケース 4 ($L_1/h=0$, ドレーン工) の再現解析では、越流水深 1cm に到達した 30s 時点においても浸潤面は裏法面に到達しておらず、ドレーン工設置によって浸潤面が大きく低下されることを示している。また、ドレーン工部分に到達した浸潤面は、ほぼ水平方向に向かって進行している。これは、天端・裏法面被覆工とドレーン工を併設したケース 4 ($L_1/h=0$, ドレーン工) の実験で見られた堤体内の流線とおおむね一致していることがわかる。

これらの結果より、越流に対して表面被覆型の対策工を

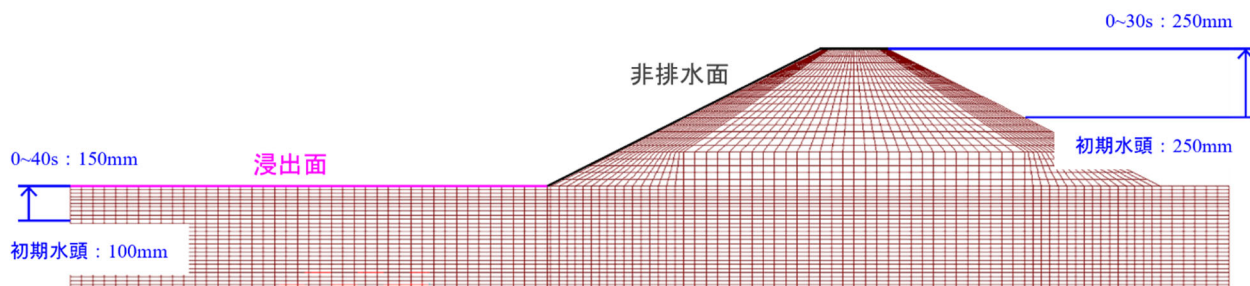


図8 浸透流解析境界条件

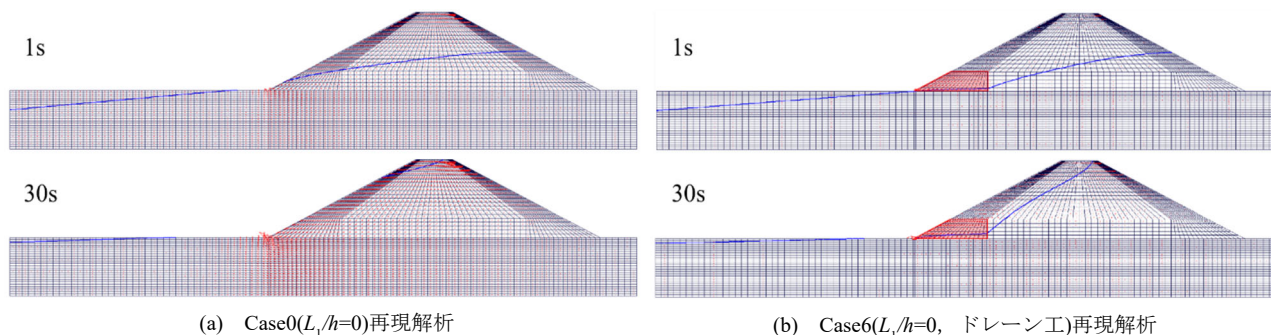


図9 浸透流解析結果

行う場合は、越流による直接的な侵食を抑制する天端・法面の被覆に加え、堤体内の浸潤面を下げ被覆工下に浸潤面を到達させないためのドレーン工を併設することが有効であると考えられる。

も決壊へと至らなかった。模型実験および浸透流解析の結果から、ドレーン工を設置した場合、堤体内の浸潤面を低下させ、堤体と被覆工との境界部における水みち形成を抑制することで、決壊までの時間を伸ばすことができると示した。

4. 結論

本研究では、表面被覆型の対策工を施した堤体に対して保護工の長さを変化させたケースおよびドレーン工を併設したケースで越流侵食実験を行った。また、越流侵食実験から取得した地盤形状を再現し越流水の PIV 計測を行った。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 天端・法面被覆工を設置すると、越流水による直接的な侵食が抑制されるため、決壊までの時間を引き伸ばすことができた。一方で、堤体法尻における侵食および吸い出しをトリガーとして、被覆材に沿って内部侵食(backward erosion)が進行し、堤体と被覆材との境界で形成された水みちが天端まで連通することで決壊へと至った。
- 2) 法尻保護工を設置することで、大幅に決壊までの時間を伸ばすことができた。保護工が長いケース($L_1/h=15$)では、通水時間 90 分で吸い出しによる内部侵食は見られず、堤防は決壊しなかった。
- 3) PIV 計測結果から、洗堀孔内に吐出された越流水が直接洗堀孔の底面に衝突し、反時計回り、時計回りの渦が形成されることが分かった。
- 4) 堤体法尻部にドレーン工を設置したケース($L_1/h=0$, ドレーン工)では、吸い出しにより堤体材料およびドレーン材の一部が川裏側へと流出したが、通水時間 90 分で

参考文献

- 1) 国土交通省: 粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料(案), 2023.
- 2) 持田祐輔, 妙中真治, 亀山彰久, 森安俊介, 山崎弘芳, 靱山嵩, 荒木優介, 乙志和孝: 越流に対する粘り強い河川堤防を実現する鋼矢板構造, 日本製鉄技報第420号, 2023.
- 3) 與田敏昭, 中川一, 水谷英朗, 川池健司, 張浩: 堤体飽和度に着目した越流侵食のメカニズムに関する研究, 自然災害科学, Vol.33-1, pp.29-41, 2014.
- 4) 倉上由貴, 二瓶泰雄, 矢田孝次朗, 山崎達也, 山口晋平, 川邊翔平, 菊池喜昭, 龍岡文夫: 耐越流侵食性向上のための河川堤防補強技術の提案, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1219-I_1224, 2013.
- 5) 小高猛司, 李圭太, 中村宏樹, 山下集史: 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礎排水工の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.3, pp.433-449, 2022.

Effectiveness of surface covering countermeasures against overflow and Failure mechanism of the embankment.

Shoshi NATSUME¹, Takaaki OKAMOTO², Takeshi KODAKA², Keita LEE³

1 Graduate School of Science and Technology, Department of Civil Engineering, Meijo University

2 Department of Civil Engineering, Meijo University

3 Department of Domestic Business, Nippon Koei / Meijo University

Abstract

The recent increase in heavy rains and floods has led to more frequent breakdowns of river embankments due to overflow, and there is an urgent need to design more durable river embankments that can withstand overflow for a longer time. The purpose of this study was to clarify the influence of the slope cover and slope protection on overflow erosion, we conducted overflow erosion experiments by systematically changing the length of the slope protection. It was shown that the time to failure could be significantly extended by increasing the length of the slope protection, which suppressed the sucking out of the embankment. The same overflow experiment was conducted using a fixed bed that reproduced the erosion shape obtained from the overflow experiment, and PIV measurements in the scour hole revealed that the length of the slope protection changed the fluid behavior near the embankment and affected the sucking out phenomenon of the embankment.

Key words: levee, overflow, surface countermeasure, piping, PIV