

## 河川砂防技術研究開発【成果概要】

<b>①研究代表者</b>	<b>氏名</b> (ふりがな)	<b>所属</b>	<b>役職</b>
	高橋 章浩 (たかはし あきひろ)	東京工業大学	教授
<b>②研究テーマ</b>	名称	一部自立型構造を有する河川堤防の増水～越水～引水時性能評価に関する技術研究開発	
<b>③研究経費</b> (単位: 万円) ※端数切り捨て.	令和3年度	令和4年度	合計
	723 万円	989 万円	1,713 万円
<b>④研究者氏名</b>			
氏名	所属機関・役職 (※令和5年3月31日現在)		
藤澤 和謙	京都大学・教授		
妙中 真治	日本製鉄株式会社・室長		
持田 祐輔	日本製鉄株式会社・主任研究員		
Vikas Sharma	京都大学・研究員		
<b>⑤技術研究開発の目的・目標</b>			
<p>近年の降雨の激甚化・集中化により治水施設の能力を大きく超える洪水も多発している。このような洪水に対しても浸水による被害を可能な限り減らすため、堤防強化が求められている。越水に対して「粘り強い河川堤防」を実現するための強化対策の一つである「一部自立型」、特に鋼矢板二重壁によって構造体を構築する形式を取り上げる。この形式は、堤体内部にコアとなる構造体を構築することで、越水により法面等が流出したとしても、堤高を保つことで堤防を決壊させない、もしくは決壊までの時間を遅延させることを意図するものである。</p> <p>鋼矢板二重壁によって構造体を構築するものについては、類似構造物である海岸堤防・ため池堤等において適用実績がある。また、鋼矢板二重壁は堤防構築・改築時の仮締切として多くの実績がある。しかしながら、その適用にあたっては、増水～越水～引水時の構造体を含めた堤防としての破壊メカニズムや限界状態、想定すべき設計状態を明らかにし、性能照査や設計に利用可能な解析手法の整備が必要である。これらを本研究の目的とする。</p> <p>上記の背景・目的を踏まえた下記のような目標を設定し、研究を実施する。</p>			
<b>0. 考慮が必要な視点の整理</b>			
既往の知見のレビューにより、越水に対する河川堤防の強化にあたって考慮が必要な視点を整理する。			
<b>1. 破壊メカニズムや限界状態の明確化</b>			
模型実験を通じて、増水～越水～引水といった一連の状況変化の中で一部自立型構造を有する河川堤防において想定される破壊メカニズムや限界状態を明らかにする。特に越水時に発生する構造体の不安定化に与える洗掘深さに対する構造体の根入れ深さ、構造体・周辺土間の隙間等に注目する。			
<b>2. 想定すべき設計状態の明確化</b>			
主に数値解析を通じて、増水～越水～引水といった一連の状況変化の中で一部自立型構造を有する河川堤防の破壊を引き起こす想定すべき水理条件等の設計状態を明らかにする。流体領域／土中の飽和・不飽和領域の水流を同時かつ連続的に解析可能な手法を用いることで、模型実験では得ることが困難な詳細な土中水の流れを把握することができ、これと模型実験で得られた破壊メカニズムを組み合わせることで、堤防の安定性評価の着眼点としての想定すべき設計状態を明らかにする。			
<b>3. 洗掘深さ推定への挑戦</b>			
越水による洗掘深さ推定のための数値解析法の構築に挑戦し、定量的評価に向けた改善を試みる。			
<b>4. 性能照査の枠組みの提案</b>			
上記(0)～(3)を踏まえて、増水～越水～引水といった一連の状況変化を踏まえた、越水に対する強化を目的とした一部自立型構造を有する河川堤防の性能照査の枠組みを提案する。			

## ⑥研究成果

### 0. 考慮が必要な視点の整理

本研究は、増水～越水～引水といった一連の状況変化の中における鋼材による一部自立型構造（ここでは鋼矢板二重壁）を有する河川堤防（図1）を対象とする。鋼材による一部自立型構造を有する河川堤防は、構造的には仮締切構造と類似している。本研究を開始するにあたり、仮締切の既往知見を活用しつつ、増水～越水～引水の各段階における限界状態、設計条件の明確化および設計の前提となる力学モデル構築を前提として、考慮が必要な視点を整理した。

### 1. 破壊メカニズムや限界状態の明確化

一部自立型構造を有する河川堤防において、越水時の破壊メカニズムや堤防の性能照査時に必要となる限界状態の設定に資する知見を得るため模型実験を実施した。縮尺の異なる模型実験(1)(2)に共通した事象として、越流水により川裏側のり面が侵食され、最終的に滝つぼのような落下流になり基盤部に洗掘が生じる挙動が確認された。

#### (1) 遠心模型実験／小型模型実験

堤高 6 m, 天端幅  $B = 4 \sim 6$  m, 法勾配 1 : 2 の砂質土堤防を想定し、その両法肩に鋼矢板を基礎地盤根入れ長  $L = 4 \sim 8$  m の条件で設置した時の、増水～越水～引水時の堤防の変形・破壊挙動を遠心模型実験／小型模型実験により調べた。模型の縮尺は 1/75 であり、遠心模型実験では 25G の遠心加速度場で、小型模型実験では 1G の重力場で実験を行った。実験では、一部自立型構造に天端・川表側法面の止水を組み合わせて強化した堤防も対象とした。

図 2 に 1G の重力場で行った実験終了後の模型堤防の変形を示す。実験では越流水深 0.4 m 相当の越水流を与えた。図中の洗掘深は構造体が大きな変位を生じはじめるときの川裏側洗掘深で、残存根入は矢板長に対する洗掘後の川裏側残存根入れ長の比率である。根入れ・天端幅（構造体幅）ともに不十分な場合（Case 3）、洗掘による川裏側地盤の横抵抗低下や構造体下の支持力破壊によって構造体の転倒が生じるが、根入れを大きくし（Case 4）、天端幅（構造体幅）を大きくする（Case 5）ことによって、構造体の越水に対する安定度は向上し、越水が生じても堤高を保持できることが確認できた。

天端・川表側法面の止水した場合、浸透経路長の増加による川裏側での動水勾配・浸透力の低下とこれによる川裏側地盤の洗掘を発生しにくくする効果と、構造体に作用する水圧を低減する効果が期待される。本実験の範囲では前者の効果は限定的であったが、後者の止水によって堤防内の水位は低く抑える効果は確認できた。その結果、図 3 や図 4 に示すように、一旦遮水シートが破断してしまうと構造体の変形は急増するものの、破断前は構造体の変位を小さく抑えることができた。なお、矢板の根入れが十分確保されている場合は、構造体の変形が大きくなったとしても堤防高の低下は限定的であった。

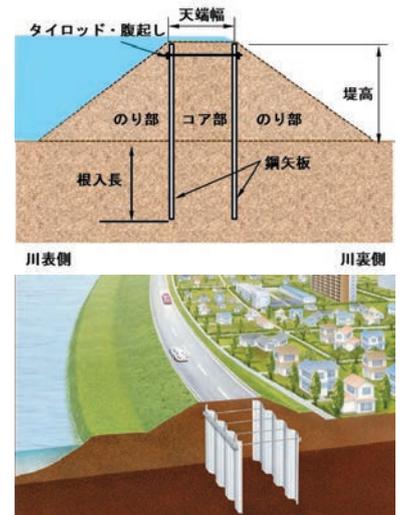
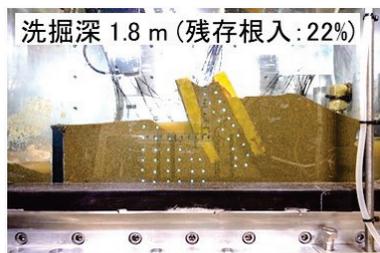
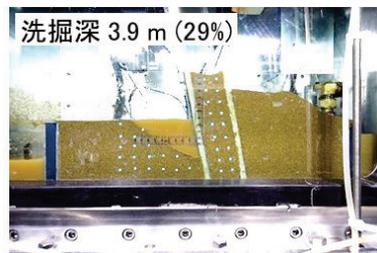


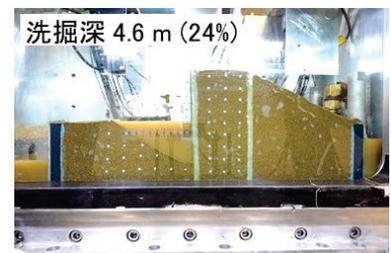
図 1 鋼材による一部自立型構造を有する堤防



(a) Case 3 ( $B = 4$  m,  $L = 4$  m)



(b) Case 4 ( $B = 4$  m,  $L = 8$  m)



(c) Case 5 ( $B = 6$  m,  $L = 8$  m)

図 2 実験終了後の模型堤防の様子

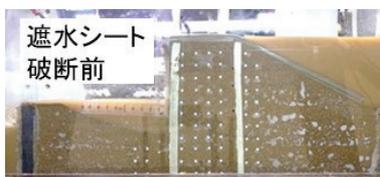


図 3 遮水シート破断前後の模型堤防の様子 (Case D, 柔矢板)

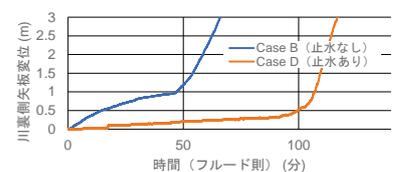
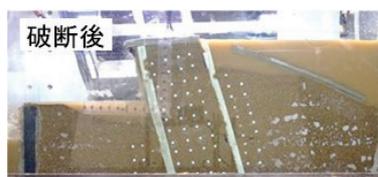


図 4 矢板変位の時刻歴

## (2) 中型重力場模型実験

堤高 6m 堤防の 1/15 の模型(図 5)を用いて、鋼矢板二重壁で補強された堤防の増水～越水～引水時の挙動を調査した。本実験では越水に対する評価の目安となる越流水深  $hc=30\text{cm}$  を 3 時間継続させる条件に相当する越水 (模型換算で  $hc\approx 20\text{mm}$ , 2700 秒) を作用させた。

主な実験ケースを表 1 に示す。矢板に作用する外力や抵抗力, 断面力の変化に注目するため, 矢板の根入れ長・剛性(板厚)を変化させた。Case コードの”EL”に続く数字が根入れ長, ”t”に続く数字が板厚を示す(単位は mm で模型換算寸法, 以降も模型換算の単位で示す)。

洗掘を考慮しない既存計算手法(鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル)

で求めた根入れ水準(300mm)に相当する EL300t6 よりも長く根入れしたケースでは越水に対して安定的な挙動を示した。実験結果からは, ①十分な根入れを確保した条件では越水に対して粘り強く抵抗できること, ②洗掘深さは経時的に増加するものの, 流量一定下では定常状態に至ること(図 6), ③洗掘の進展に伴い鋼矢板に発生する曲げモーメントが増大し, ピーク位置が深度方向へ移動すること(図 7) の 3 点が確認された。

評価の目安において破壊が生じた状況を図 8 に示す。無対策では, 越水開始後 200 秒程度で堤体地盤が流出し地表面水準まで侵食された。根入れが短い場合(EL100t6)は鋼矢板の下端が開くハの字型の破壊が確認され堤高が大きく低下した。また板厚を薄くした条件(EL1000t1.2)では川裏鋼矢板が降伏に至ることで堤高の低下が確認された。一方, 川表側鋼矢板は降伏せずに構造全体の安定性に寄与し続けており, 川裏側矢板の降伏後もリダンダンシーのある抵抗機構を有することが確認できた。さらに, 評価の目安の通り越水を与えた後に越流水深を増加させて実験を継続した結果を表 1 の右列に示す。根入れ長および矢板剛性が十分であれば, 厳しい越水条件においても安定的に堤高が維持できることが確認できた。

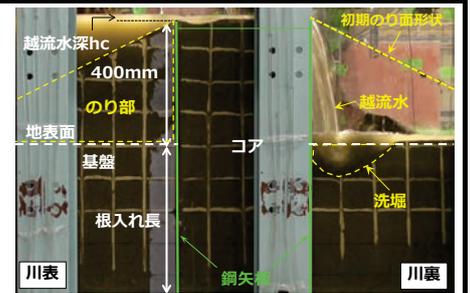


図 5 目安時間経過時の状態 (EL1000t6)

表 1 実験条件と結果一覧

Case コード	評価の目安 $hc=20\text{mm}$ , 2700 秒 (初期の堤高に対する比率)	目安条件以上の越水規模 (“-”は実施せず)
N-Y (無対策)	破堤(0%)	-
EL1000t6	安定(100%)	$hc=38\text{mm}$ まで安定, 破壊なし
EL500t6	安定(100%)	$hc=38\text{mm}$ まで安定, 破壊なし
EL300t6	若干傾斜(100%)	$hc=31\text{mm}$ でコアがせん断破壊
EL100t6	ハの字型の破壊(84%) <sup>**</sup>	-
EL1000t2.3	変形発生も安定(98%)	$hc=38\text{mm}$ まで安定, 破壊なし
EL1000t1.6	変形発生も安定(97%)	$hc=22\text{mm}$ で水位維持限界 <sup>**</sup>
EL1000t1.2	鋼矢板降伏(88%) <sup>**</sup>	-

※: 給水能力の限界により堤高低下に伴い河川水位を維持できていない状態に至る

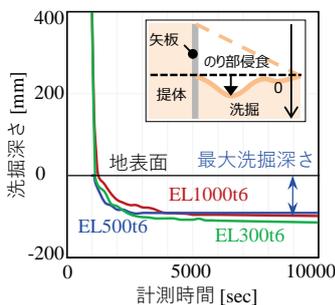


図 6 洗掘深さの変化

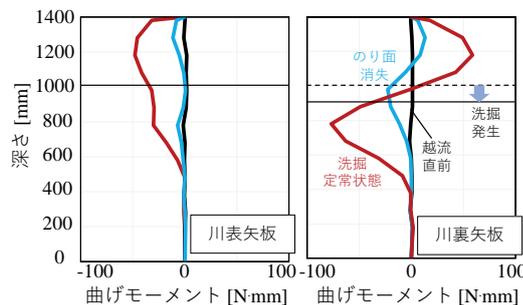


図 7 曲げモーメント分布の変化

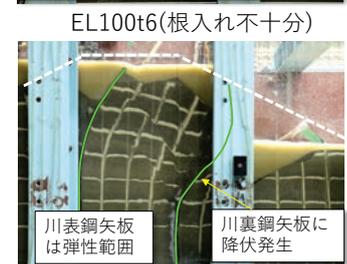
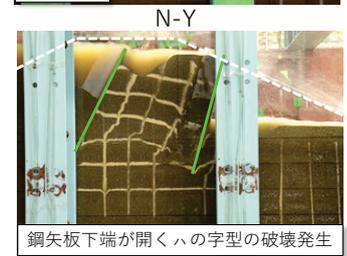
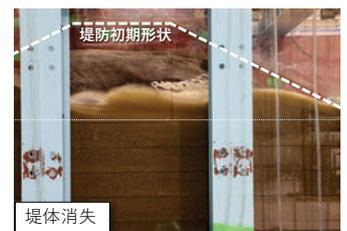


図 8 破壊が生じたケース (EL1000t1.2(板厚不十分))

## 2. 想定すべき設計状態の明確化/3. 洗掘深さ推定への挑戦

堤防が越水を受ける際, 堤体表面の越流水の流れだけでなく, 堤体内に浸透する水の流れ(浸透流)が堤防全体に与える影響を考える必要があり, 特に堤体内の間隙水圧分布と侵食・洗掘による堤体形状の変化は, その安定性に重要な影響を与える。そのため, これら二つの流れの同時計算を可能にする Darcy-Brinkman 式を支配方程式に採用し, 越流時に堤防を取り巻く流れの状況を把握し, 堤体内の間隙水圧分布等を把握するだけでなく, 堤防が受ける侵食・洗掘計算に取り組んだ。Darcy-Brinkman 式は, 以下のように与えられる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{u_i u_j}{n} \right) = -\frac{n}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + v \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{ng}{k} u_i \quad (1)$$

ここに、 $n$ 、 $u_i$ 、 $p$ 、 $\rho$ 、 $v$ 、 $k$ 、 $g$  は間隙率、流速（または多孔質領域ではダルシー流速）、ピエゾ圧、水の密度、動粘性係数、透水係数、重力加速度であり、 $x_i$  及び  $t$  は直交座標と時間を表す。式(1)の数値解法には Space-Time 有限要素法を利用し、また安定化を施した乱流計算も可能とするため変分マルチスケール法 (Variational multiscale method, VMS) を適用した。Space-Time 有限要素法を用いる理由は、自由水面の変動や侵食を受ける堤体形状の変化による計算領域の形状変化を追従するためである。

図 9 に越流時に堤体上を流れる表面流と堤体内の浸透流を計算するために利用した初期有限要素メッシュ並びに計算されたピエゾ圧分布を示す。図 9 (右) からは、初期に与えたメッシュ形状から自由水面が変化している点、堤体上の表面流と堤体内の浸透流の圧力分布が連続的に計算できている様子が見てとれる。このように、水面形の変化を移動メッシュにより追従しながら表面流と浸透流の同時計算が可能であり、越流時における堤体内の水圧分布の計算（および、それを考慮した堤防の安定計算）を可能とした。

上述の解析結果から越流水の影響により二重矢板間の水圧が局所的に高まることも確認された。一方、実験では、越水時には鋼矢板が安定維持をする中で、越流水により川裏側のり面が侵食され、最終的に滝つぼのような落下流となり基盤部に洗掘が生じることが確認された。その上で、堤防の安定性に影響を与える因子として「天端幅」「矢板根入れ長」「矢板剛性」の3つ大きく影響することが分かった。これらの知見より、越水時における堤防の安定性評価の上では、洗掘影響と矢板間の高水位という条件を考慮しつつ、天端幅に見合った矢板根入れ長・矢板剛性を選定していくことが重要と考えられる。

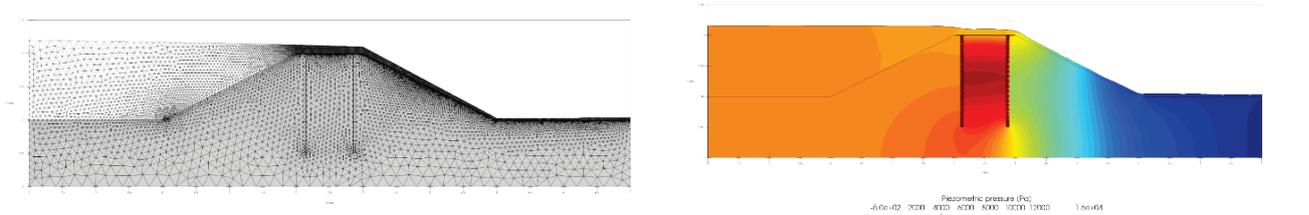


図 9 初期メッシュ (左), 越流時の表面流と堤体内のピエゾ圧分布 (右)

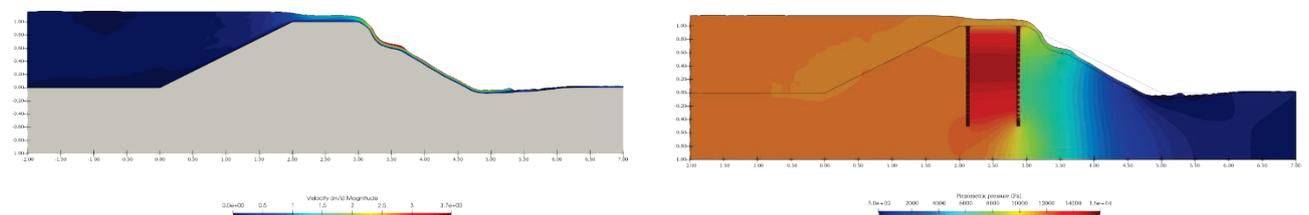


図 10 越水による侵食・洗掘を受ける堤防 (左: 表面流の流速分布, 右: ピエゾ圧分布)

図 10 には、図 9 に示した流れを初期条件として与え、堤体の侵食・洗掘計算を実施した一例を示す。ここでは、堤体材料の侵食速度を堤体表面の近傍流速の関数として与え、その速度に応じて、堤体材料が流失する（地表面と鉛直方向に削れる）計算を行った。この計算では、堤体表面の形状変化に伴い、越流水の水面形も変化し、それに合わせて有限要素メッシュを変形させる操作（移動メッシュ）が必要であり、メッシュの変形が大きくなる場合には、リメッシュ（メッシュの再作成）を行った。図 10 に示す通り、流速が大きくなる裏法面の法肩と法尻部において侵食が卓越して進行する様子が計算された。このような計算を継続することで法尻部の洗掘深さを推定できる。なお、侵食が進むにつれて堤体形状と流れの変化が急激になるため、安定的な計算が難しくなる点には注意が必要である。また、ここでの越流侵食計算は堤体の変形計算とは連成していないため、堤体の侵食と変形（水土連成解析）のカップリングを行うことが今後の重要課題と考える。

洗掘深さの推定については簡易的に最大洗掘深さを評価できる手法(⑦の文献 16 参照)の提案にも目途が立っている。既往研究に基づき越流水量・越流水の落下高さ・地盤粒径から予測した結果は中型試験により妥当性を確認した。今後、大型実験結果により検証していきたい。

#### 4. 性能照査の枠組みの提案

増水～越水～引水といった一連の状況変化を踏まえた性能照査の枠組みの案を表 2 に示す。性能照査には「堤体」「基礎地盤」などの堤防自体に対する評価とともに、補強構造となる「コアとなる構造体」の安定性

評価および「鋼矢板」材料の評価が必要となる。増水時においては、鋼矢板二重式仮締切設計マニュアルに準じた性能照査が可能である。引水時も通常の堤防においても考慮されている事象を考慮して性能照査をすることが可能である。越水時は、令和4年公開の「粘り強い河川堤防の技術開発に当たっての参考資料【自立型】」（以下、既存検討手法）を参照することでコア部等の安全性、浸透安全性、部材の安全性の照査方針を得ることができる。

本研究では、洗掘に伴う①構造体の安定性低下、②矢板に発生する変形・応力の増大の二点の検証が必要である。これらは、一部自立型構造を有する堤防において二重鋼矢板の仕様を決定づける項目である。①については既存検討手法に基づいた上で、川裏側の設計地盤面を低下させた条件で計算した結果、破壊モードが確認された実験結果を対象に妥当性が確認できた。②においても、既存検討手法に基づき洗掘深さの実験値を与条件として計算することで、矢板の応力の実験値を安全側に評価可能であることを確認した。

その上で、より合理的な計算を可能とする手法として、図11に示す(a)~(c)の3手法を提案した。(a)は川表・川裏矢板およびタイロッドを梁要素、地盤をバネ要素で表したフレームモデルである。(b)は鋼矢板二重壁を梁要素、地盤をソリッド要素で表したモデルであり、汎用FEMソフトウェアを用いて、浸透計算をした上で変形計算を実施した。(c)は前章で示したFEMにより洗掘を時系列的に評価することで、現時点では完成に至っていないが、設計の前提となる洗掘の深さや範囲をより精緻に計算できることが期待される。

3章までの知見に基づき(a),(b)の手法で中型模型実験を対象に計算を試行した。洗掘深さは前章に示す推定手法にて求め、安全側の検討とするために当該深度まで川裏側地盤面全体を低下させた。コア部の水圧分布は、2章で得られた結果を参考に川表からコア部にかけて天端の越水表面までの水位を保持させた。その結果、(a),(b)の手法によって既存検討手法よりも実験に近い結果を導出できることが確認できた。今回提案した手法は一般的な実務において実施可能なものであり、洗掘深さを推定した上で鋼矢板の根入れ長・剛性を適切に設定することで、越水に対して粘り強い構造を設計できることを示した。

表2 性能照査の枠組素案

	増水時	越水時	引水時
※青字は通常の堤防においても現状で考慮されている事象名等			
堤体 法すべり・侵食	法すべりを生じない（安全率が所定の値以上）	（構造体により堤高が維持されるのであれば、法すべり・侵食は許容）	表法すべりを生じない（安全率が所定の値以上）
基礎地盤 漏水・噴砂 ポイリング	漏水・噴砂を生じない（法尻での局所動水勾配が所定の値以下、構造体と周辺土の間に隙間があるとして局所動水勾配が所定の値以下）	ポイリングを生じない（洗掘底部での局所動水勾配が所定の値以下）	（特に懸念事象なし）
構造体 転倒など安定評価	転倒を生じない（支持力に対する安全率が所定の値以上） 崩壊を生じない（構造体内土のせん断に対する安全率が所定の値以上）	所定の堤高を保持できる（転倒角が所定の値以下、構造体内土のせん断変形による脆性的な破壊が生じない）	表法と構造体の間に隙間を生じない（生じた場合は復旧ができる）
鋼矢板 変形・応力	塑性変形を生じない（応力度が許容値以下）	過大な塑性変形を生じない（鋼材が終局に至らない）	（特に懸念事象なし）
性能照査の考え方	・のり部の有無は異なるものの鋼矢板二重式仮締切設計マニュアルを準用することで性能照査が可能	・洗掘発達による影響を考慮要（受働土圧減少による安定性低下・遮水距離の減少） ・限界状態の規定が必要（変形で規定できない場合は、増水時と同様に「転倒・崩壊」を生じさせないこととすることが必要）	・表のり部の円弧すべりなどの安全性照査が必要

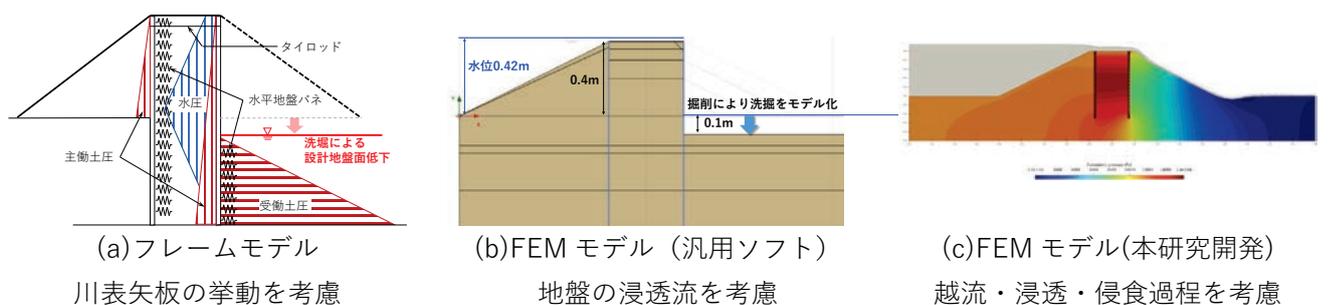


図11 越水・洗掘に伴う設計照査モデル（案）

## ⑦研究成果の発表状況・予定

- 1) Tadao Enomoto, Kazuki Horikoshi, Keisuke Ishikawa, Hirotohi Mori, Akihiro Takahashi, Toshiyasu Unno & Kenji Watanabe: Levee Damage and Bridge Scour by 2019 Typhoon Hagibis in Kanto Region, Japan, *Soils and Foundations*, Vol. 61, Issue 2, 566-585, 2021.
- 2) 村上陽哉, 持田祐輔, 高橋章浩: 鋼矢板による越水に対する河川堤防強化に関する遠心模型実験, 第56回地盤工学研究発表会講演集, 12-6-3-04, 2021.
- 3) 藤澤和謙, 嶋田侑治, 村上章: 拡張 Darcy-Brinkman 式による飽和/不飽和浸透流と Navier-Stokes 流の同時解析, 第76回土木学会年次学術講演会講演概要集, CS17-05, 2021.
- 4) 藤澤和謙: 第5.3節 流体と地盤の遷移領域の取扱い, 水理模型実験の理論と応用 一波動と地盤の相互作用一, 土木学会, 海岸工学委員会, 2021. (分担執筆)
- 5) Vikas Sharma, Kazunori Fujisawa & Akira Murakami: Space-time finite element method for transient and unconfined seepage flow analysis, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.197, 103632, 2021.
- 6) 持田祐輔, 山崎弘芳, 妙中真治, 藤澤和謙, 高橋章浩: 越水による河川堤防の決壊に対する鋼矢板補強構造の抵抗機構に関する実験的研究, 第9回河川堤防技術シンポジウム論文集, 89-92, 2021.
- 7) Wenyue Zhang, 高橋章浩: 河川堤防と基礎地盤の透水係数による堤防漏水のメカニズムの区別, 第9回河川堤防技術シンポジウム論文集, 61-64, 2021.
- 8) 妙中真治, 持田祐輔: 河川堤防における鋼矢板を用いた地震・洪水対策技術の開発, 地盤工学会, 地盤工学会誌3月号, 14-17, 2022.
- 9) 持田祐輔, Xin Shi, 高橋章浩: 小型模型実験による鋼矢板を用いた一部自立型堤防の越水時挙動に関する研究, 第57回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 57, 21-5-1-01, 2022.
- 10) Jenisha Singh, Kazuki Horikoshi, Yusuke Mochida & Akihiro Takahashi: Comparative Performance of Steel Drainage Pipes against Flood-induced Deformation in River Levee, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 40, No. 9, 4847-4857, 2022.
- 11) 鈴木海里, 高橋章浩: 噴砂丘形成による洪水時の堤防基礎地盤でのパイピング進展抑制に関する解析的研究, 土木学会第77回年次学術講演会講演概要集, Vol. 77, II-121, 2022.
- 12) Wenyue Zhang, Akihiro Takahashi: Statistical and parametric studies on natural levees as weak points against leakages in river levees, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 40, No. 11, 5643-5666, 2022.
- 13) Kazunori Fujisawa, Michael Koch, Misato Osugi, Akira Murakami: Hydraulic conductivity field marginalization in HMC based estimation of piping zone boundary, *Proc. of the 8th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, 863-867, 2022.
- 14) Michael Koch, Kazunori Fujisawa, Akira Murakami: Assessment of HMC parameter for piping zone boundary detection, *Proc. of the 8th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, 478-483, 2022.
- 15) 持田祐輔, 山崎弘芳, 妙中真治, 藤澤和謙, 高橋章浩: 越水による河川堤防の決壊に対する鋼矢板補強構造の抵抗機構に関する実験的研究(その2), 第10回河川堤防技術シンポジウム論文集, 33-36, 2022.
- 16) 持田祐輔, 山崎弘芳, 藤澤和謙, 高橋章浩: 直立堤背面における越流による洗掘深さの一分析, 第58回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 58, 2023.
- 17) 橋村元気, 河野真一郎, 持田祐輔, 高橋章浩: 二重鋼矢板壁および止水シートを有する河川堤防の越水に対する安定性に関する研究, 第58回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 58, 2023.
- 18) Yusuke Mochida, Kazunori Fujisawa & Akihiro Takahashi: Reinforcement Mechanism and Failure Mode of Embankment Reinforced with Steel Sheet Piles against Overtopping and Scour, *Proc. of the 11th International Conference on Scour and Erosion, Copenhagen, Denmark*, 2023.
- 19) Wenyue Zhang & Akihiro Takahashi: Statistical and experimental studies on the hydraulic conductivity of levees in relation to micro-topographies, *Proc. of the 11th International Conference on Scour and Erosion, Copenhagen, Denmark*, 2023.

## ⑧研究成果の社会への情報発信

- ・ 高橋章浩：堤防強化の実現に向けて，土木学会誌，Vol. 107, No. 6, 30-31, 2022.
- ・ 季刊ニッポンスチール，Vol.13, 2022年8月，国土強靱化  
<https://www.nipponsteel.com/company/publications/quarterly-nipponsteel/>
- ・ 日本製鉄技報 420号（2023年3月27日公開）  
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/>

## ⑨表彰，受賞歴

第57回地盤工学研究発表会優秀論文発表者賞

タイトル：小型模型実験による鋼矢板を用いた一部自立型堤防の越水時挙動に関する研究

発表者：持田祐輔, Xin Shi, 高橋章浩

## ⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

### 1) 大規模実験による実大相当データ取得の必要性

粘り強い堤防構造の検討にあたっては、大規模実験により堤防模型の壊れ方を確認することが重要である。一部自立型構造を有する堤防の越水に対する安定性について、国土技術政策総合研究所の大規模堤防模型実験水路を用いた実験が実施されているが、有効性の検証にあたっては、異なる条件下での実験の実施が望まれる。

### 2) 堤防強化への適用に伴う課題

堤防強化の目的では二重鋼矢板の設置位置が既存堤防形状に制約を受けることも想定され、天端幅（構造物幅）ともに不十分な場合もある。遠心・小型実験では天端幅が不十分な場合の構造不安定性が示唆されており、性能照査の上でも考慮が必要となる。さらに天端幅が確保できない場合の合理的な構造の提案が求められる。

### 3) 越流による堤防に関する評価技術開発

越流による堤防の侵食を精度よく予測することが困難な原因として「数値解析はそれほど容易ではない」、「侵食モデル（どのくらいの速さで侵食が進むのか）が確立していない」の2点が挙げられる。数値解析については、越水に伴う流れ（表面流と浸透流）、侵食・洗掘、および堤体の変形・破壊の連成解析は今後の技術的課題となる。また、後者については、数値解析法が発展したとしても、予測精度に直結する問題となる。今後は、現地での耐侵食性試験などの確立が、越流に対する粘り強さ（侵食にどのくらいの時間を要するのか）を判断する重要なステップと言える。

## ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

本研究の成果によって、越水に対する強化を目的とした一部自立型構造を有する河川堤防の増水～越水～引水といった一連の状況変化の中で想定される破壊メカニズムや限界状態、安定性評価の着眼点（想定すべき設計状態）が明らかとなり、性能評価に用いることができる一定レベルの数値解析技術が整備されることが期待される。

また、破壊メカニズムが明確になれば、限界状態の設定においては、構造物の安定が担保されれば法部の喪失は許容する、といった柔軟な対応も可能となることが想定される。このような力学的な裏付けに基づく性能照査法の整備により、越水に対して強い河川堤防整備の推進が期待される。

更に、本研究により想定すべき設計状態や堤防の限界状態を示すことができれば、数値解析による性能照査のほか、これが困難である場合に実験で性能評価をすることも可能となることから、民間による技術開発の促進、その結果としての整備の加速化も期待される。