

# 噴砂発生とパイピング進展に着目した河川堤防における二重鋼矢板式構造の効果

## Effectiveness of double steel sheet pile structures in river levees focusing on sand boiling occurrence and piping progression

近藤知輝<sup>1</sup>，前田健一<sup>2</sup>，大桑有美<sup>3</sup>，佐々木一真<sup>1</sup>

- 1 名古屋工業大学大学院・工学専攻環境都市プログラム・E-mail address k.kondo.280@stn.nitech.ac.jp
- 2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター
- 3 名古屋工業大学大学院・社会工学系プログラム

### 概 要

近年、頻発する水災害や地震を受け、河川堤防の堤体へ二重鋼矢板式構造を用いた補強技術が提案されている。しかし、二重鋼矢板式構造の噴砂動態や堤体下のパイピング進展など浸透特性について十分な検討が行われていない。そこで、本研究では基礎地盤が二重鋼矢板で補強された河川堤防を想定し、噴砂発生とパイピング進展に対する効果解明を目指し、簡易模型実験および3次元FEM浸透流解析を実施した。模型実験から、二重鋼矢板式構造は噴砂の発生を抑制する効果はないが、堤内側の鋼矢板がパイピング孔の進展を抑制することが確認された。また、浸透流解析から、鋼矢板周りに浸透流速が集中すること、二重鋼矢板式構造では堤内側で、上向きに進む浸透流速が増大し、噴砂が発生している可能性が示唆された。

キーワード：二重鋼矢板式構造，噴砂発生，パイピング進展，簡易模型実験，浸透流解析

### 1. はじめに

近年、水災害の頻発化・激甚化に加え、地震が頻発していることを背景に粘り強い河川堤防の技術検討が行われている。既報の強化工法として、河川堤防の堤体へ二重鋼矢板式構造を用いた補強技術が提案されている<sup>1)</sup>。この技術では、浸透・液状化・越流などの作用に対して、総合的な対策ができる可能性が示唆されている。

そのような中、河川水が透水性基礎地盤に浸透することにより、堤内地で漏水や噴砂が発生する被災事例が増加している。また、今後も気候変動に伴う豪雨の強度増加や長期化により、高水位の外力が河川堤防に長時間作用することで堤内地での漏水や噴砂の発生・継続を助長し、パイピング破壊に至る危険性は高まると考えられる。

現在、パイピングにより河川堤防が損傷あるいは破堤する危険性の高い弱点箇所の強化方法に鋼矢板の設置が挙げられる。鋼矢板は1度設置すると維持管理が不要なことから、全国の堤防で鋼矢板の設置が進んでいる。しかし、宮崎県北川では<sup>2)</sup>、堤外側へ一枚の鋼矢板を設置後に噴砂が発生したことが報告されている。既報<sup>3)</sup>により、堤外側へ一枚の鋼矢板を設置した河川堤防では、鋼矢板により噴砂発生を抑制する効果はないが、パイピング破壊に至る時間を遅延する効果があることが分かっている。

これに対して、二重鋼矢板式構造はL2地震動相当の加振履歴を受けても浸透特性が変化しないことが分かっ

ている<sup>1)</sup>。しかし、二重鋼矢板式構造の浸透特性に関する研究データの蓄積が進んでいないのが現状である。そのため、二重鋼矢板式構造の河川堤防における噴砂動態や堤体下のパイピング進展を明らかにすることは、今後の効率的な河川堤防強化のためにも急務である。

本論文では、河川堤防における二重鋼矢板式構造の効果解明を目的とし、簡易模型実験および3次元FEM浸透流解析を実施した。模型実験では、与えた外水位条件と噴砂動態、パイピング進展度、堤内地側への漏水流量に着目し検討した。浸透流解析では、実験では検討が難しい鋼矢板周りや地盤内の流速および堤体内の水位上昇について検討した。

### 2. 簡易模型実験

#### 2.1 実験概要

図1に実験模型概要の概略図、図2に各試料の粒度分布と物性値を示す。基礎地盤は水中落下法で堆積させ、上層に珪砂7号、下層に珪砂2号とし、それぞれ相対密度は70%程度となるように軽く締め固めて作成した。堤体は含水比20%の青粘土とした。また、堤体をアクリル板で拘束し、堤体の変状によるパイピング進展の影響を無視している。そして、堤外の左端から20mmを透水層(下層)の露出部、堤内側の法尻部から200mm離れた位置を行き止まり境界とした。これらを設置することで、パイピングが発生しや

すい条件としている<sup>4)</sup>。

鋼矢板の模型にはアクリル板を使用した。貫入深度は止水効果の発揮条件である透水層厚の90%という試算<sup>5)</sup>に準拠し、法尻直下へ90mmの基礎地盤に対して85.5mm貫入した。観測項目として、パイピング進展度および堤内側からの漏水流量である。パイピング進展度は動画より観測し、漏水流量は堤内側から基礎地盤層厚90mmを超えて溢れ出た流量として重量計で計測した。ただし、堤内側での漏水は全て排水される。実験は、パイピング破壊が生じた場合、あるいは実験開始から十分時間が経過し破堤しないと判断した場合に終了とした。

表1に実験ケース一覧を示す。本実験は、鋼矢板の有無と打設位置の検討および、水位条件を変化させた計6ケースで実施した。鋼矢板の打設位置は、堤外側、堤内側の法尻部とした。また、図3に水位条件である平均動水勾配*i*（堤内外の水位差*h*を堤体敷幅*B*で除した量）の経時変化を示す。本実験では外水位を単調増加させた場合（水位条件A）と外水位を繰り返し増減させた場合（水位条件B）の2パターンで検討した。

## 2.2 実験結果および考察

### 2.2.1 パイピング進展度の挙動（水位条件A）

パイピング進展度とは、行き止まり境界から緩み領域先端までの距離を堤体敷幅*B=300mm*で除すことで定義される（図4参照）、堤体下でどの程度パイピング孔が進展しているかを定量的に示す指標である。なお、パイピング進展度0は行き止まり境界で初期噴砂が発生したことを、パイピング進展度0.4は噴砂による土粒子の流出によって堤内側の法尻部で緩みが発生したことを、パイピング進展度1.0はパイピング孔が貫通したことで破堤に至ることを意味している。

まず、外水位を単調増加させた場合（水位条件A）のケース（Case1~Case3）のパイピング進展度について比較する。図5にCase1~Case3のパイピング進展度の経時変化を示す。Case1（鋼矢板なし）は、平均動水勾配0.2付近で行き止まり境界に初期噴砂が発生し、急激にパイピング進展度0.55程度まで増加した。その後、平均動水勾配0.37付近まで外水位が上昇するとパイピング進展度1.0となり破堤に至った。Case2（堤外のみ）はCase1（鋼矢板なし）同様に、平均動水勾配0.2付近で行き止まり境界に初期噴砂が発生した。しかし、Case1（鋼矢板なし）と比較するとパイピング進展度0.2付近で進展が止まることが分かる。そのため、鋼矢板を堤外側へ打設したことにより、鋼矢板がない場合よりも急激なパイピング進展が起きないと言える。その後、Case2（堤外のみ）は平均動水勾配0.37付近で噴砂が堤内側の法尻部に達し、平均動水勾配0.87付近まで外水位が上昇すると破堤に至った。Case3（堤内外）もCase1（鋼矢板なし）、Case2（堤外のみ）と同様に平均動水勾配0.2付近で行き止まり境界に初期噴砂が発生した。しかし、Case3（堤内外）はCase2（堤外のみ）とほぼ同時

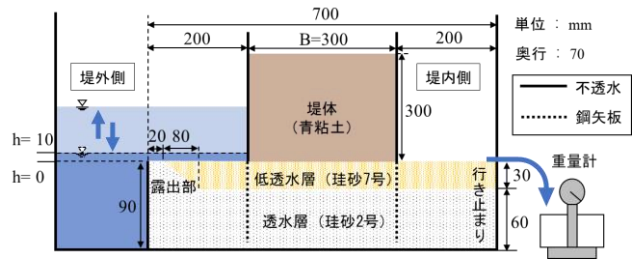


図1 実験模型概要

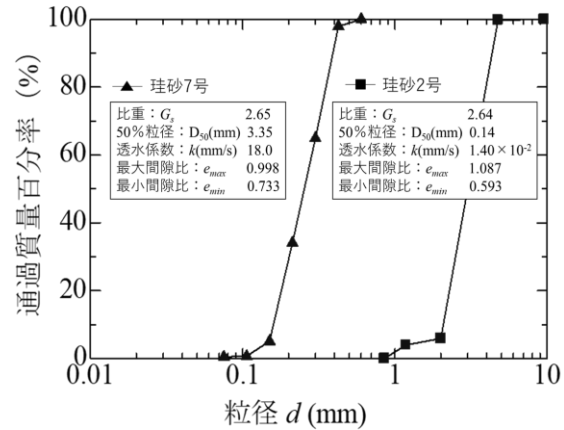


図2 試料の粒度分布と物性

表1 実験ケース一覧

実験ケース	鋼矢板打設位置		水位条件
	堤外側	堤内側	
Case1	-	-	A
Case2	○	-	
Case3	○	○	
Case4	-	-	B
Case5	○	-	
Case6	○	○	

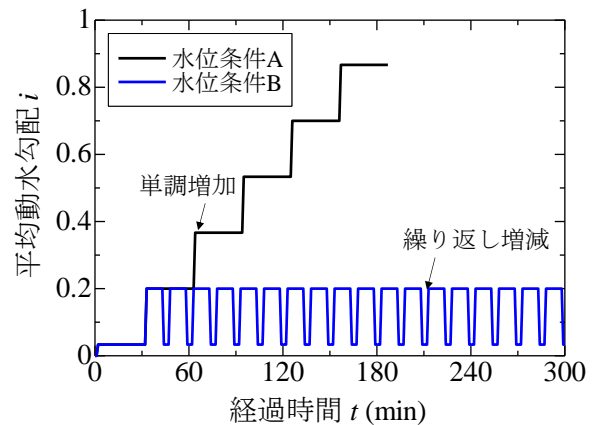


図3 外水位条件の経時変化

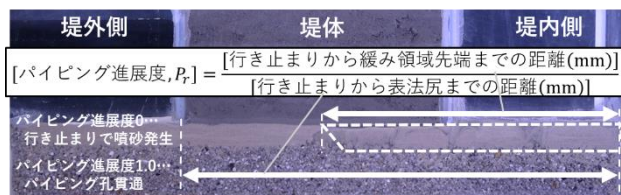


図4 パイピング進展の定義

刻に噴砂が堤内側の法尻部に達しているが、Case2（堤外のみ）が破堤に至る平均動水勾配までパイピング進展度 0.4 で維持していることが分かる。そのため、堤外側だけに鋼矢板を打設した場合よりも、堤外側と堤内側へ鋼矢板を打設する二重鋼矢板式構造では、堤内側の鋼矢板がパイピング孔の進展を抑制するため、パイピング破壊による破堤は起きないと考えられる。

### 2.2.2 漏水流量の挙動（水位条件 A）

外水位を単調増加させた場合（水位条件 A）のケース（Case1～Case3）の漏水流量について比較する。図 6 に Case1～Case3 の漏水流量の経時変化を示す。ここで、漏水流量は 1 秒間当たりの堤内側から流出する水の体積を意味する。全体の傾向として、平均動水勾配が大きくなるにつれ、漏水流量が増加しており、その挙動は対応している。これは、鋼矢板の有無にかかわらず、外水位に対する基礎地盤の透水能力の状態を表していると言える。また、行き止まり境界で初期噴砂が発生するまでの漏水流量は同程度である。しかし、それ以降の漏水流量は、Case2（堤外のみ）は Case1（鋼矢板なし）に対して 1/2 程度抑制されていることが分かる。これは鋼矢板を打設することで基礎地盤への流入量が抑制され、堤内側からの漏水流量を減少させていると考えられる。すなわち、流入量を抑制するとそれに伴う砂の流出量が低減され、堤内側での基礎地盤の緩みが進行しないため、パイピング進展を抑制すると言える。また、Case3（堤内外）では Case2（堤外のみ）よりもさらに漏水流量が抑制されていることから、二重鋼矢板式構造の方が、基礎地盤内の水を抑制できていると言える。

ここで、図 7 に基礎地盤内の浸透を可視化した様子を示す。なお、可視化に用いた試薬はウラン溶液であり、堤外側の露出部に注入した。ウラン溶液による浸透経路の観測から、Case1（鋼矢板なし）は基礎地盤の下層を平行に通抜けのに対して、Case2（堤外のみ）、Case3（堤内外）では鋼矢板を周り込みながら浸透していることが確認された。そのため、鋼矢板による河川水の流入面の減少や浸透経路が長くなることから、単位時間当たりの漏水流量が低減されたと推察される。しかし、Case1（鋼矢板なし）、Case2（堤外のみ）、Case3（堤内外）は漏水流量が  $0.2 \times 10^5 \text{ mm}^3/\text{s}$  付近で堤内側の法尻部に噴砂が到達している。このことから、一定の漏水流量に達すると、噴砂が発生する時間は異なるが、鋼矢板の有無にかかわらず噴砂は発生することが考えられる。

### 2.2.3 パイピング進展度の挙動（水位条件 B）

次に、外水位を繰り返し増減させた場合（水位条件 B）のケース（Case4～Case6）パイピング進展度について比較する。図 8 に Case4～Case6 のパイピング進展度の経時変化を示す。全てのケースで水位上昇 1 回目となる実験開始 33 分後に行き止まり境界で初期噴砂が発生し、直後に堤内側の法尻部まで噴砂が到達した。Case4（鋼矢板なし）では、2 回目の水位上昇でさらにパイピング孔が進展し、5 回

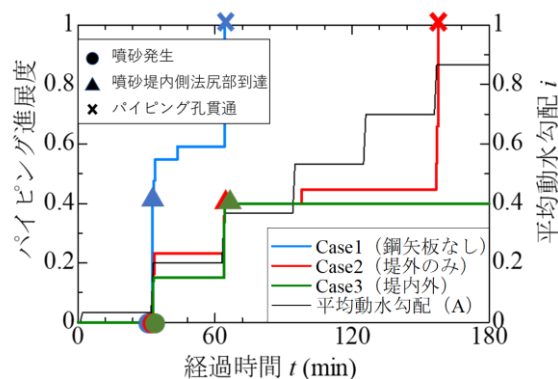


図 5 パイピング進展度の経時変化（水位条件 A）

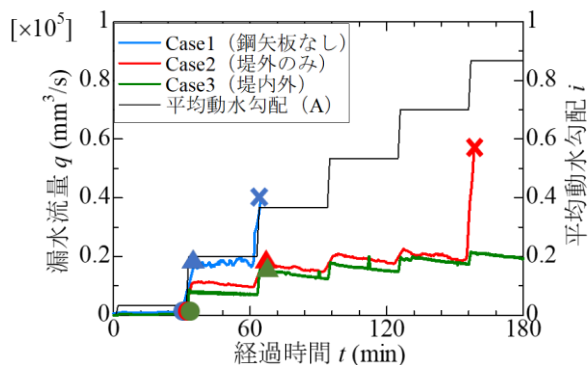


図 6 漏水流量の経時変化（水位条件 A）

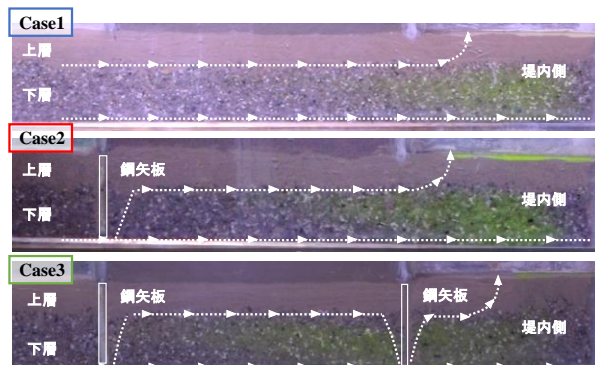


図 7 基礎地盤内の浸透を可視化（Case1～Case3）

目の水位上昇（100分）で破堤に至った。また、Case5（堤外のみ）は繰り返し水位上昇をすることでパイピング孔が進展し、17 回目の水位上昇（280分）で破堤に至った。しかし、Case6（堤内外）では Case5（堤外のみ）のような、パイピング孔の進展が見られず、パイピング進展度 0.4 で維持され、破堤に至らなかった。これは、上記で述べたように堤内側の鋼矢板がパイピング孔の進展を抑制したためと考えられる。

また、前項を踏まえて、外水位を単調増加あるいは繰り返し増減させた結果、水位高に関係なくパイピング進展度は平均動水勾配が増加すると、一定時間進展するが、その後はパイピング孔が停滞することが分かった。

### 2.2.4 漏水流量の挙動（水位条件 B）

外水位を繰り返し増減させた場合（水位条件 B）のケース（Case4～Case6）の漏水流量について比較する。図 9 に Case4～Case6 の漏水流量の経時変化を示す。全体の傾向と



して、平均動水勾配の挙動と漏水流量の挙動は類似している。Case5（堤外のみ）ではCase4（鋼矢板なし）に比べ、漏水流量が2/3程度に抑制されていることが分かる。また、Case5（堤外のみ）とCase6（堤内外）を比較すると、時間経過につれて、漏水流量はCase5（堤外のみ）では徐々に増加するが、Case6（堤内外）では減少していることが分かる。まず、Case5（堤外のみ）で漏水流量が徐々に増加した理由として、基礎地盤の土粒子が流失し、緩みが生じることで透水性が増加したことが考えられる。次に、Case6（堤内外）で漏水流量が減少した理由として、堤体下に残留する水圧が関係すると考える。前項を踏まえ、堤外側へ鋼矢板を打設するよりも、二重鋼矢板式構造では2枚の鋼矢板によりさらに漏水流量の抑制効果があることが分かった。しかし、ウラン溶液による浸透経路の観察時に、平均動水勾配が低い水位ではウラン溶液が堤内側へ到達する時間が遅くなった。そのため、水位条件Bのような平均動水勾配が低い水位が繰り返し増減をすると、堤体の両側に鋼矢板で遮水されることで、堤体下に流入してきた河川水が滞留することで、堤体内の水位が上昇し、水圧が高まってしまう可能性がある。したがって、次に水位が上昇した際に、堤体下の水圧が高まっていることから、河川水の流入量が減り、漏水流量も低減したと推察する。

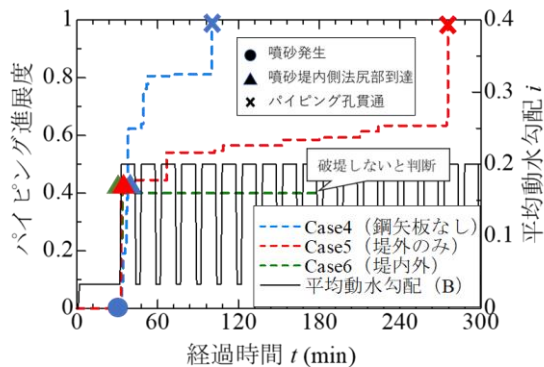


図 8 パイピング進展度の経時変化 (水位条件 B)

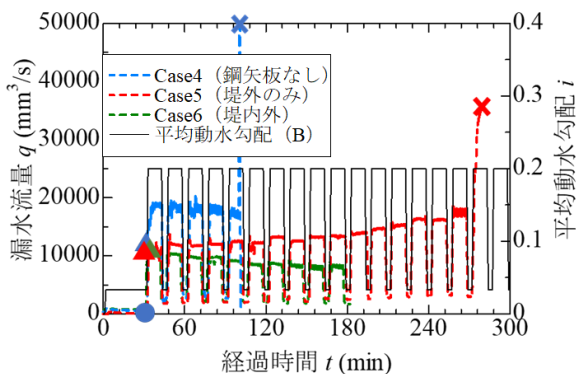


図 9 漏水流量の経時変化 (水位条件 B)

### 3. 3次元浸透流 FEM 解析

#### 3.1 解析概要

実験では検討が難しい鋼矢板周りや地盤内の流速、堤体内の水位上昇について検討するために浸透流解析を実施

した。数値計算には VG モデルを搭載し不飽和浸透流計算が可能である、地層科学研究所 GEOSCIENCE の 3D-Flow 三次元飽和・不飽和浸透流解析ソフトを用いた。図 10 に解析モデルを示す。初期の境界条件として、堤外表面は流入境界とし、外水位 10mm を一様に作用させ、堤内表面は排水境界とした。はじめに、この条件で定常解析を行い、基礎地盤下層を飽和状態にした。その後、得られた定常解析結果を初期値とし、実験と同様の外水位変化による非定常解析を実施した。

ここで、本解析で用いる解析ソフトの 3D-Flow では、地盤内の損傷を考慮することができない。そのため、繰り返し外水位を増減する水位条件 B での、浸透解析は再現できないと考える。したがって、外水位を単調増加させる水位条件 A で検討を行った。

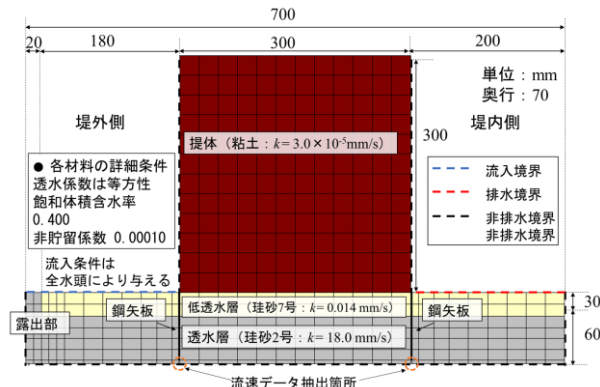


図 10 解析モデルの概要

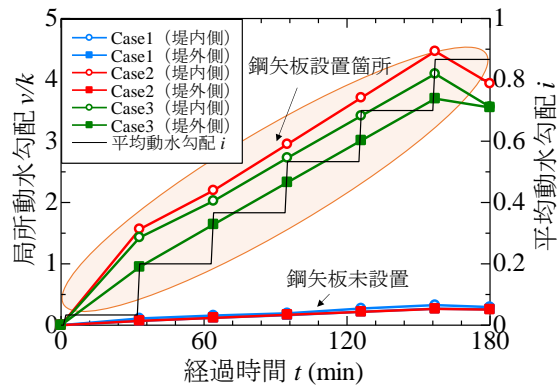


図 11 局所動水勾配の経時変化 (Case1~Case3)

#### 3.2 解析結果および考察

外水位を単調増加させた場合 (水位条件 A) のケース (Case1~Case3) を比較する。図 11 に Case1~Case3 の局所動水勾配の経時変化を示す。ここで、データの抽出箇所は鋼矢板周りの浸透流速を評価するため、鋼矢板の下部の要素で評価を行っている。また、局所動水勾配  $v/k$  は浸透流速  $v$  を珪砂 2 号の透水係数  $k$  で除して求めた見かけの関係を表している。局所動水勾配は浸透流速と比例関係にあり、無次元量かつ平均動水勾配との比較が容易なために置き換えて検討している。

鋼矢板を設置していない場合、平均動水勾配が上昇しても局所動水勾配はほぼ横ばいとなっており、流速は変化していないことが分かる。しかし、鋼矢板が設置されている

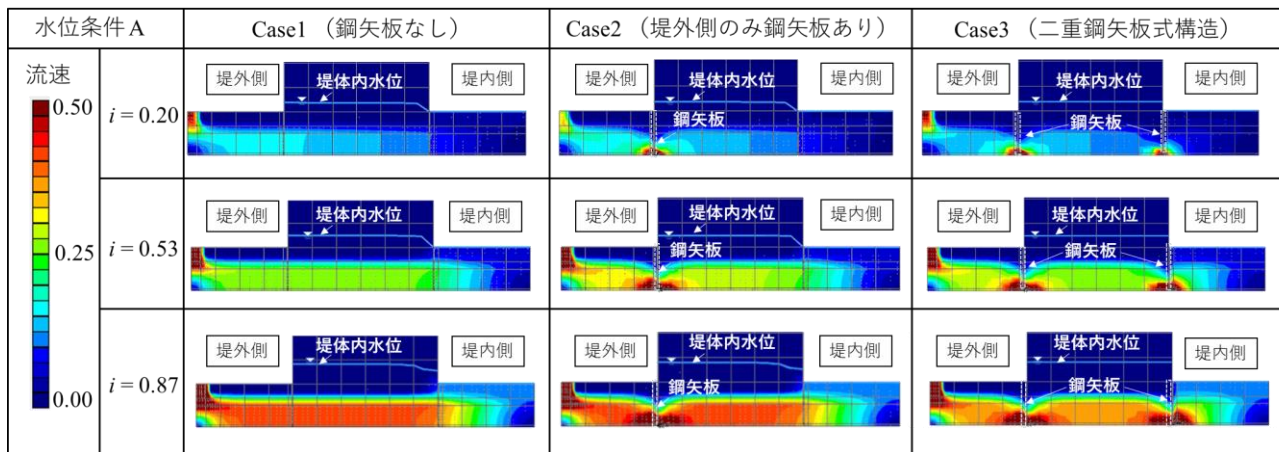


図 12 各平均動水勾配における流速コンター (Case1~Case3)

場合、平均動水勾配が高くなるにつれて、局所動水勾配が高くなっていることから流速が大きくなっていることが分かる。このことから、鋼矢板を設置することで、流入面積が小さくなり浸透流が集中することが考えられる。

図 12 に各平均動水勾配における Case1~Case3 の流速コンターを示す。ウラン溶液による実験模型で浸透経路と解析で得られた浸透経路は一致していると言える(図 7 参照)。Case1 (鋼矢板なし) では透水係数の高い珪砂 2号の層に対して、流速が一様に分布していることが分かる。また Case3 (堤内外) では、堤内側に鋼矢板があることで、浸透経路が鋼矢板を回り込むように進んでいる。これにより、堤内側の法尻部付近で上向きの浸透流速が大きくなるため、堤体側で噴砂がより発生しやすくなる可能性がある。

次に、図 12 中の堤体内の水位 (水色線) に着目すると、平均動水勾配が高くなるにつれて、堤体内水位が全てのケースで上昇していることが分かる。また、Case1 (鋼矢板なし)、Case2 (堤外のみ) では堤体内水位が堤外側から堤内側へ向けて低下していることから、堤体内の水が排水されていることが分かる。しかし、Case3 (堤内外) では、堤体内水位が直線状になっており、他のケースに比べて堤体内の水位が高いまま維持されている。そのため、2.2.4 で述べた水位条件 B での模型実験で、漏水流量が減少したのは、堤体内の水位が高い状態で維持され、外水位と堤体内の水位の水頭差が小さくなることで、河川水の流入量が減少したためと考えられる。

また、不飽和な河川堤防において、降雨や基礎地盤からの堤体内部への浸透が進むことで、エアブロー現象といった河川堤防の安定性の低下が懸念されている<sup>9)</sup>。そのため、二重鋼矢板式構造は堤体内水位の上昇によって、上記の現象を助長する可能性があると言える。したがって今後、堤体内水位の上昇に対して対策を検討する必要がある。

#### 4. まとめ

本研究では、以下の知見が得られた。

(1) 模型実験から、二重鋼矢板式構造は堤内側の鋼矢板がパイピング孔の進展を抑制することで、河川堤防のパ

イピング破壊に対する効果が高いことが確認された。また、二重鋼矢板式構造は水位条件に依らず、鋼矢板による河川水の流入面の減少と浸透経路が長くなることから漏水流量が抑制された。これにより、噴砂の発生は抑制できないが、一定の漏水流量に達するまで噴砂の発生を遅らせることがわかった。一方、繰り返し水位を増減すると漏水流量が低下する傾向が見られた。これは、堤体両側の鋼矢板で遮水され、堤体下に流入してきた河川水が滞留することで、堤体内の水位が上昇し、水圧が高まっている可能性が示唆された。

(2) 浸透流解析から、鋼矢板周りに浸透流速が集中し、二重鋼矢板式構造は堤内側に鋼矢板があるため、上向きに進む浸透流速が増大し、噴砂が発生している可能性が示唆された。また実験同様、二重鋼矢板式構造は堤体内の水が堤内側へ排水されず、堤体内水位の上昇による河川堤防の安定性の低下が懸念される。

今後は、基礎地盤に対する根入れ深さとの比率による浸透対策効果および堤体内水位が上昇した際の影響を検討していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 乙志和孝, 小関潤一, 金子勝, 田中宏征, 永尾直也: 鋼矢板を用いた堤防の補強に関する実験的研究, 地盤工学ジャーナル, Vol. 6, No. 1, pp.1-14, 2010.
- 2) 前田健一, 岡村未対, 石原雅規, 新清晃, 上野俊幸, 西村証哉, 高辻理人, 品川俊介, 笹岡信吾: 北川で繰り返し発生した噴砂による堤内・裏法尻箇所のゆるみ調査, 河川技術論文集, Vol. 25, pp.535-540, 2019.
- 3) 澤村直毅, 前田健一: 漏水流量と地盤損傷の関係性に着目した河川堤防のパイピング破壊に対する矢板の効果, 河川技術論文集, Vol.29, pp.169-174, 2023.
- 4) 西村証哉, 前田健一, 高辻理人, 牧洋平, 泉典洋: 実堤防の調査結果に基づいた河川堤防のパイピング危険度の力学的点検フローの提案, 河川技術論文, Vol. 25, pp. 499-504, 2019.
- 5) 財団法人国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き (改訂版), pp. 47-71, 2012.
- 6) 前田健一, 柴田賢, 馬場干児, 小林剛, 舛尾孝之, 尾畑政: 模擬堤防土層実験によるエアブローの確認と数値解析, 河川技術論文集, Vol. 18, pp. 305-310, 2012.

---

---

## Effectiveness of double steel sheet pile structures in river levees focusing on sand boiling occurrence and piping progression

Kazuki KONDO<sup>1</sup>, Kenichi MAEDA<sup>2</sup>, Ami OKUWA<sup>3</sup>, Kazuma SASAKI<sup>1</sup>

- 1 Nagoya Institute of Technology Graduate School, Engineering major Environmental City Program
- 2 Nagoya Institute of Technology Professor, Advanced Disaster Prevention Engineering Center
- 3 Nagoya Institute of Technology Graduate School, Social Engineering Program

### Abstract

Due to frequent water disasters and earthquakes, reinforcement techniques using double steel sheet pile structures have recently been proposed for river levees. However, insufficient studies have been conducted on the seepage characteristics of double steel sheet-pile type structures, such as sand boil dynamics and piping progress under the levee body. In this study, simple model experiments and 3D FEM seepage flow analysis were conducted to determine the effect of river levees reinforced with double steel sheet piles on the progression of sand boils and piping. The model test results confirmed that the double steel sheet-pile type structure was ineffective in suppressing the generation of sand boils. Otherwise, the steel sheet piles on the levee's inner side suppressed the propagation of the piping holes. The seepage flow analysis suggested that the seepage velocity was concentrated around the steel sheet pile. The inner side of the levee in the double steel sheet pile-type structure had an increased upward seepage velocity, which may have resulted in the generation of sand boils.

Key words: Double steel sheet pile type structure, Sand blowing occurs, Piping progress, Simple model experiment, Seepage flow analysis