矢板設置による河川堤防のパイピング破壊の進展抑制効果

Suppression effect of piping progress in river levee by sheet-pile installation

伊神友裕¹,前田健一²,牧洋平³,岡田類⁴

- 1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・E-mail address t.ikami.494@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 清水建設
- 4 中部電力

概 要

パイピングの危険性の高い水理一地盤条件の特定が進められ、今後は弱点箇所に対する早急かつ適切な強 化工法を実施する必要がある。河川堤防の強化工法の1つに矢板の設置が挙げられるが、現状その効果に ついては不明な点も少なくない。そこで、本研究では矢板設置時のパイピング破壊のメカニズム把握のた め、簡易小型模型実験と浸透流解析を実施した。その結果、模型実験では基礎地盤下部の礫層の深い部分 まで矢板が打設されていない場合には堤内地の噴砂の発生自体を抑えることは難しいものの、漏水流量を 半減させるなど基礎地盤の変状が抑えられ、噴砂の裏法尻到達やパイピング孔貫通を遅延させる効果があ ることが分かった。また、堤体下のパイピング孔の進展を模擬した浸透流解析から、堤外側からのパイピ ング孔先端への浸透流の急激な増加作用がパイピング孔貫通による破堤のトリガーの1つであることが明 らかになり、矢板の設置はこの作用を防ぐことといえる。

キーワード:河川堤防,パイピング,矢板

1. はじめに

近年,河川水が透水性基礎地盤に浸透することで,堤内 において漏水や噴砂が発生する被災事例が増加している。 また,今後も豪雨の強度増加や長期化によって,高水位の 外力が河川堤防に長時間作用することで堤内側の漏水や 噴砂の発生・継続を助長し,パイピング破壊に至る危険性 は高まっていくと考えられる。

そのような中,パイピングの危険性の高い水理一地盤条件の特定が進められてきた¹⁾。今後は,抽出された弱点箇所に対する早急な強化工法を実施する必要がある。

堤防の浸透破壊を防ぐ強化工法としては、堤体を対象に した工法と基礎地盤を対象にした工法に分けられるが、基 礎地盤を対象とした強化工法の1つに矢板などを用いる 川表遮水工法が挙げられる。矢板を堤外側に設置すること で河川水の基礎地盤内における浸透路長を延長するとと もに、河川水が浸透できる面積も小さくなることから、パ イピングの被害を防ぐことができると考えられ、これまで 噴砂や陥没等のパイピングの被害が発生した実河川にお いても矢板の設置が進められてきた。

しかし,宮崎県の北川³をはじめとして矢板を設置した後にも噴砂等が発生する事例もあることから,矢板の効果については現状でも不明な点は少なくなく,今後その効果

について解明していくことが求められている。また,矢板 の効果を明らかにすることで,河川堤防の効果的な維持管 理に貢献できると考える。

そこで、本研究では、矢板がパイピング破壊に及ぼす影響を把握することを目的に、簡易パイピング模型実験及び 三次元浸透流 FEM 解析を実施した。

まず,模型実験では,パイピング孔が堤外側に貫通する までの噴砂動態,パイピング進展速度,間隙水圧の伝播特 性,漏水流量などに着目し検討を行った。

次に,実験では検討が難しい,堤外側基礎地盤に矢板を 設置した場合の堤体下でのパイピング孔進展時のメカニ ズムについて考察を行った。

2. 矢板の効果に関する模型実験及び再現解析

2.1 実験及び解析の概要

図1に実験模型概略図,表1に実験ケース一覧を示す。 基礎地盤は水中落下法で堆積させ、上層珪砂7号、下層珪 砂2号とし、相対密度は70%にした。また、堤外側の左端 から50mmを下層(透水層)の露出部、裏法尻から200mm 堤内側のところで行き止まり境界とした。複層構造基礎地 盤や下層の露出部、行き止まり境界を設置することで、パ イピングが発生しやすい条件とした。また、実堤防におい



図1 実験模型概要図

恚	1	宙齢	F-	マ	丶丶	-
衣	1	夫淑	ッー	\sim		i.

	矢板の有無	水圧計の有無	基礎地盤条件			
case名			屋 / 本 ` 生	層厚(mm)		下層の露出
			眉伸迫	上層	下層	の有無
case1	×	×				
case2	0	×	指展	45	45	0
case3	×	0	1疫/管	43	43	0
case4	0	0				



図2 実験に用いた試料の粒度分布

ても、パイピングで被災した地点においては、これらの存 在が確認されている³⁾。実験中のパイピング進展に伴う基 礎地盤の平面上の変状を可視化するために、既往研究³⁾を 参考に堤体上部におもりを載荷したアクリル板を用いた。 また、アクリル板と基礎地盤の間の境界に不陸が形成され るのを防ぐために、水溶アガーで作成した極薄い透明なゼ リー層を設置した。堤体敷幅は 300mm とし、おもりは法 面勾配 1:2 の粘性土堤と同程度となるように調整した。各 材料の透水係数は珪砂 7 号 $k_{\rm a}=1.40\times10^4$ (m/s)、珪砂 2 号 $k=1.80\times10^2$ (m/s)であり、実験に用いた各材料の粒度分布は 図 2 に示す通りである。

矢板にはアクリル板を使用した。矢板を設置する場合に 大きな止水効果を期待するには、貫入深度が透水層厚の 90%以上必要との試算⁴があるため、透水層の深度 90%ま で矢板を設置することとし、90mmの基礎地盤に対して 85.5mm挿入した。実験では図 3 のように水位を段階的に 上昇させ(*i*は外水位を堤体敷幅で除した平均動水勾配を 表す)、パイピング進展状況と堤内側の圧力水頭、漏水流 量を計測した。本実験ではパイピング孔が堤外側まで繋が り、水位が維持できなくなった時点をパイピング孔の貫通 とし、実験終了とした。



本研究では矢板なし矢板ありのそれぞれに対して,間隙 水圧計ありとなしの条件で合計4ケースの実験と,実験と 同じ寸法・材料・水位条件で三次元飽和・不飽和浸透FEM 解析も実施した(図4参照)。なお数値解析には,三次元 飽和・不飽和浸透流解析コード(UNSAF3D)⁵が組み込ま れた 3D-Flow(地層科学研究所)を用いた。

2.2 実験と解析の結果及び考察

既往の研究¹から,基礎地盤が複層・露出あり・行き止 まり有の条件では,法尻から離れた堤内地で噴砂が発生し, その後噴砂が裏法尻まで移動し堤体下のパイピング孔が 堤外に向けて進展することで,最終的にパイピングに至る ことが分かっている。また,その過程において変状部分周 辺でゆるみ領域が拡大することも確認されている。このプ ロセスに着目し,①噴砂の発生,②堤内地での噴砂箇所の 裏法尻方向(堤体方向)への移動,③堤体下の堤内から堤 外へのパイピング孔の進展と貫通,の3段階に分けて考察 する。

2.2.1 噴砂の発生

表2に case1 から case4 の実験結果の概要,図5に case3 (矢板なし), case4 (矢板あり)の噴砂発生時間と実験開 始後30分から70分における裏法尻及び行き止まりにお ける間隙水圧の経時変化を示す。なお、堤内側で噴砂が発 生すると間隙水圧が瞬時に消散し比較が困難になるため、 間隙水圧の値は噴砂発生前で比較を行う。表2と図5よ り、本実験において噴砂の発生時間は、矢板の有無による 違いは確認されなかった。この理由について、case3 (矢板 なし), case4 (矢板あり)における裏法尻と行き止まりの 間隙水圧の経時変化(図5参照)をみると、計測された水

case名	噴砂発生時間(min)	裏法尻に噴砂が 到達した時間 (min)	パイピング孔 貫通時間(min)		
casel	66.2	77.2	123.3		
case2	66.5	123.5	137.6		
case3	65.5	89.5	109.8		
case4	65.5	111.5	129.6		



図5 間隙水圧の経時変化の比較

圧の値に大きな差は確認されなかった。そのため, 噴砂が ほぼ同じ時刻で発生したと考えられる。

また, 矢板を設置しても堤内側への圧力伝播を抑制でき なかった理由について, 既往の研究より噴砂に影響を及ぼ す基礎地盤の深度方向における影響範囲は堤体敷幅の約 0.4 倍以浅との試算があり の, その試算に従うと本実験で は地表面から 120mm まで矢板を貫入させる必要があった が,本実験ではその深さまで矢板を設置していないため, 噴砂発生を抑制できなかった可能性も考えられる。今後は 矢板の根入れ長を変更し模型実験や数値解析を実施する ことで, 矢板の根入れ長の影響について定量的に検討する 必要があると考える。

2.2.2 堤内地での噴砂の裏法尻(堤体方向)への移動

図6に case1 (矢板なし), case2 (矢板あり) における噴 砂が裏法尻に到達した時間と漏水流量の経時変化を示す。 図より,噴砂が裏法尻に到達する時間は,矢板を設置する ことで約45分間遅延できていることがわかる。

この理由について図 6 の漏水流量の値をみると, case2 (矢板あり)では, case1 (矢板なし)と比較して 1/2 程度 に抑制していることがわかる。漏水流量が多い場合には基 礎地盤における浸透流速も大きくなることで,基礎地盤の 流動化が進みやすく,また基礎地盤から流出する土粒子の 流出速度が速くなり危険側となるが,矢板によりその作用 を抑制していたと考える。

なお, case1 (矢板なし) では, 実験開始後 100 分から 110 分までは外水位が 80mm で一定であるが漏水量が増えて おり堤体下での損傷が進行していることもうかがえる。既 往の研究^のにおいても, 高水位が長時間継続すると, 矢板



図7 矢板の有無に伴う漏水流量の比較(浸透流解析)

を施工した場合には基礎地盤への浸透が長期化しパイピ ングが水位上昇から遅れて発生する危険性が示されてい るため、今後は高水位が長時間継続する場合の矢板の効果 についても検討していく必要がある。

また,図7に本実験の結果を確認するために,本実験と 同じ寸法,材料,水位条件で実施した浸透流解析の漏水流 量の結果を示す。図7より,浸透流解析においても,矢板 ありと矢板なしでは漏水流量に大きな差があることが確 認できることから,実験結果は解析の結果と傾向が合って いるといえる。なお,既往の研究⁸から噴砂孔を模擬する ことで数値解析の結果を模型実験の結果に近づくことが 確認されているが,今回は簡易的に噴砂孔を模擬せずに解 析を実施したため,模型実験の漏水流量の値は大きく異な っている。

以上のことから, 矢板を施工することで堤内への漏水を 大きく減少させる効果を確認できた。

2.2.3 堤体下におけるパイピング孔の進展と貫通

図 8 に堤体下でパイピング孔が進展する時の堤体下基礎地盤を真上から観察した様子を示す。なお、図8は堤体下の基礎地盤上層の変状範囲を可視化したものである。

まず, case1 (矢板なし) では水位 60mm の時に裏法尻中 央に噴砂が到達後, 堤体下でのパイピング孔の進展が始ま り, 堤外側からの浸透流により土粒子が堤内側に運搬され, 基礎地盤において変状範囲を広げながら, 堤外側へパイピ



図 8 堤体下のパイピング進展変状の比較 (上図: case1 (矢板なし),下図: case2 (矢板あり))

ングが進行する様子が確認できた。一方, case2 (矢板あり) ではパイピング進展開始時の水位が 100mm で, case1 (矢 板なし)と比較して 40mm 高くなっており, また水位 100mm における変状も case1 (矢板なし)と比べて小さい ことから, 矢板によるパイピング進展の抑制効果が確認で きる。

以上より,本実験のように基礎地盤下部の礫層の深い部 分まで矢板が打設されていない場合には,噴砂の発生自体 を抑制することはできないが,漏水流量が減少することで, 堤内側での噴砂の裏法尻への到達やパイピング孔の貫通 を遅延させる効果があることがわかった。また,パイピン グ進展時に形成される基礎地盤の緩みは水位低下後も残 り続ける⁹ため,基礎地盤の変状量を抑える矢板は出水の 度に高まるパイピングのリスクを低下させることができ ると考える。

浸透流解析による矢板設置時の堤体下におけるパイピング孔進展メカニズム

前章において、矢板を設置することで、噴砂が裏法尻に 到達する時間を遅らせるとともに、堤体下でパイピング孔 が進展する際にも変状範囲を小さくし、堤体下の土粒子の 流出を防ぐ効果があることが分かった。また、矢板の有無 に関係なく裏法尻に噴砂が到達した後は漏水流量が急増 するため、パイピング孔貫通が堤外側まで貫通する危険性 が高まる。そこで本章においては、単純化した条件で堤体 下のパイピング孔の進展をモデル化した三次元浸透流 FEM 解析を行い、堤体下でのパイピング孔の進展メカニ ズムについてより詳細に検討を行った。

3.1 解析概要

図 9 に露出部を有する複層構造基礎地盤に矢板を設置



図9 パイピング孔を設置する解析モデルの概要図

バイピング進展度= 裏法尻からパイピング孔先端部までの距離:*l_e(mm)* 堤体幅:*B(mm)*

裏法尻からパイピング孔 先端部までの距離: <i>l_c</i>	
堤体幅:B=300	

図 10 パイピング進展度の定義

表3 解析ケース一覧

パイピング進展度		基礎地盤構造 矢板の有無		ケース数	
0	0.1	0.2	単一層	矢板なし	
0.3	0.4	0.5	複層(露出なし)	矢板あり	
0.6	0.7	0.8	複層(露出あり)		
0.9	1				
	11通り		3通り	2通り	11×3×2=66



図 11 パイピング孔設置の奥行方向のイメージ



図 12 パイピング孔の境界条件

した場合の解析モデル概要図を示す。解析ソフト及び使用 材料は、前章と同様である。なお、基礎地盤が珪砂7号の みの単一層や下層の露出がないモデル及び矢板を設置し ないモデルも作成した。いずれのモデルも側面は非排水境 界とした。解析ケースを表3に示す。本解析では、既往の 研究 8から確認される、堤体直下に生じるパイピング孔の 段階的な進展を想定し、堤体下のパイピング進展度を 11 通り変化させた。ここで、パイピング進展度とは裏法尻か らパイピング孔先端部までの距離 lc を堤体敷幅 B=300mm で除することで、堤体下でどの程度パイピングが進展した かを定量的に示す指標であり、その定義を図 10 に示す. なお、パイピング進展度1.0でパイピング孔の貫通を表す。 また、本解析における空洞進展度が0とは噴砂に伴う土粒 子の流出によって裏法尻にゆるみが発生したことを想定 している。解析モデルの奥行中心にパイピング孔を設置し (図11参照),パイピング孔内はすべて浸出面境界とし て設定し (図 12 参照),堤外側に向けて進展させた。パイ ピング孔の大きさは、模型実験等の様子から、幅と深さを 10mm とした。外力条件は平均動水勾配 i=0.20 として、定 常解析を実施した。なお、本章では流速から算出した見か けの局所動水勾配を用いて検討を行う。

3.2 浸透流速による検討

図 13 に各ケースのパイピング進展度と図 9 の流速計測 地点の浸透流速 v を珪砂 7 号の透水係数 ku で除して求め た見かけの局所動水勾配 v/kuの関係を示す。なお,今回は パイピング孔先端の土塊に浸透流が局所化し,限界の流速 を越え不安定化しパイピングの進展に寄与すると考え,パ イピング孔先端部での流速を比較に用いた。

図 13 よりパイピング孔の進展過程に着目すると,単一 層では矢板を設置していない時はパイピングの進展とと もに流速が上昇していた。これに対し,複層では露出の有 無に関わらず,パイピング進展度 0.6 までは流速が横ばい もしくは若干下がるが,0.8 を超えると急激に増加してい た。これに対し,矢板を設置した場合には基礎地盤構造に 関係なく,進展度 0.7 までは流速がほぼ横ばいであるが, 0.7 を超えると流速が低下していた。

3.3 パイピング進展メカニズムの検討

図 13 より,矢板を設置することでパイピング孔先端に 作用する流速に差が見られた。この理由について,基礎地 盤が単一層と複層(露出なし)の場合の堤防縦断中央の断 面図の局所動水勾配ベクトルとコンター(図 14 参照)に より考察を行う。

まず単一層では、矢板を設置していない場合には進展度 に関わらずパイピング孔先端に向けて浸透流が最短経路 で流入している様子が確認できる。パイピング孔が堤外側 に近づくほどパイピング孔先端にかかる流速が大きくな り、最終的にパイピング孔貫通に至ると考える。しかし、 矢板を設置することで、堤外側からパイピング孔先端に向 けて浸透流が直接流入するのを防ぐため、パイピング孔の 貫通を防ぐことができると考える。

続いて, 複層 (露出なし)では, 矢板を設置していない 場合には河川水が透水層を浸透したのちに, パイピング孔 の先端のみならずパイピング孔全体に一様に作用してい る様子が確認できる。また,進展度 0.9 を見ると, 単一層



図13 パイピング進展度と見かけの局所動水勾配の関係

と同様に堤外側からパイピング孔先端に向けて流速が作 用している様子も確認できる。しかし、矢板を設置するこ とで、河川水が浸透できる面積が小さくなり、十分に浸透 できなかったこと、そして単一層と同様に堤外側パイピン グ孔先端に向けて直接流速が作用できなくなったことか ら、単一層と同様に進展度が 0.7 を超えるとパイピング孔 先端にかかる流速が低下したと考える。

4. まとめ

本研究では、矢板を設置した河川堤防におけるパイピン グ進展メカニズムを把握するために、模型実験と浸透流解 析を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- 今回実施した模型実験や浸透解析のように基礎地盤 下部の礫層の深い部分まで矢板が打設されていない 場合,矢板を設置することで噴砂の発生は止めるこ とはできないものの,漏水流量が低減されることで 土粒子の流出が減り,噴砂が裏法尻に到達する時間 や堤外側までパイピング孔が貫通する時間を遅延さ せる効果があることが分かった。
- 2) 堤体下でのパイピング孔の進展を模擬した浸透流解 析により、基礎地盤構造に関係なく堤外側からパイ ピング孔先端に向けて直接的に作用する浸透流がパ イピング孔貫通のトリガーであることが分かった。 また、矢板を設置することで、パイピング孔先端に浸 透流が直接作用するのを防ぎ、パイピング孔貫通を 防ぐ効果があることも分かった。

今後は,堤防規模,矢板の根入れ長や水位条件がパイピング進展と破堤に及ぼす影響を限界流速などの新たな 指標を用いながら総合的に検討し,矢板の破堤抑制効果 を定量的に評価する必要がある。

謝辞

本研究の成果は、国土交通省・河川砂防技術研究開発制 度平成 29 年度国総研からの委託研究,科学技術研究費(研 究課題 19H00786)の援助を受けたものである。末筆なが ら深謝の意を示します。



図14 堤防断面図(縦断方向中央)の局所動水勾配ベクトルとコンター:上図;単一層,下図;複層(露出なし)

参考文献

- 西村柾哉,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,河川技術論文集 25 巻, pp.499-504, 2019.
- 石原雅規,上田修一,安部知之,品川俊介,笹岡信吾,富澤 彰仁,佐々木亨,杉山詠一,佐々木哲也:北川における漏水 の変遷と地形及び堤防構造等の関係,河川技術論文集25巻, pp.517-522, 2019.
- 3) 露口祐輔,岡村未対:堤防直下のパイピング進展メカニズム に関する実験と考察,第55回地盤工学研究発表会,pp.21-7-4-07,2020.
- 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.71, 2012.
- 5) 西垣誠,進士喜英,今井紀和:有限要素法による飽和不飽和 浸透流解析-AC-UNSAF3D-プログラム解説およびユーザー

マニュアル, pp.145, 2005.

- 西村柾哉,前田健一,櫛山総平,高辻理人,泉典洋:河川堤 防のパイピング危険度の力学的簡易点検フローと漏水対策 型水防工法の効果発揮条件,河川技術論文集 24 巻, pp.613-618, 2018.
- 7) 牧洋平,前田健一,伊神友裕,岡田類:裏法尻の間隙水圧伝 播と漏水挙動からみた河川堤防における川表遮水工法の効 果,土木学会河川技術論文集27巻,pp.217-222,2021.
- 牧洋平,前田健一,伊神友裕:河川堤防における噴砂とパイ ピング孔進展に伴う間隙水の圧力伝播と流れの局所化,土 木学会論文集 B1 (水工学), Vol.76, No.2, pp.l_319-l_324, 2020.11.
- 9) 牧洋平,前田健一,高辻理人,伊神友裕:出水履歴の有無を 考慮した河川堤防のパイピング進展メカニズム,第55回地 盤工学研究発表会, pp.21-7-2-07, 2020.