

河川堤防のパイピング進行性評価手法の検討

田中秀岳・笹岡信吾・福島雅紀

1. はじめに

平成24年7月九州北部豪雨に伴う出水により、矢部川右岸7.3kpの堤防が決壊した。矢部川が決壊では、基礎地盤の砂層に河川水が浸透し堤防川裏法尻からパイピングが発生した。その後、基礎地盤の砂が流出し水ミチ（本報文では、漏水・噴砂により空洞が生じる現象をパイピング、生じた空洞を水ミチと呼称する）が川裏法尻から川表に向かって徐々に延伸したことで、堤体が沈下・陥没し、決壊に至ったと考えられている¹⁾。しかし、このように水ミチが延伸し決壊につながったと推定されるケースがある一方で、パイピングは発生するが、堤防の決壊までには至らず、終息するケースも数多く報告されている。パイピングの進行性（水ミチの延伸の有無）を評価することは堤防の浸透の安全性を向上するうえで有用である。

本報文では、堤体が変形しにくく、パイピングの進行性が高い場合（危険側の評価）を想定したパイピング進行性評価手法の提案と実験模型への適用を検討した事例²⁾について報告する。具体的には、堤防模型実験を実施してパイピングによる水ミチの延伸が停止した実験ケースの再現解析を行うことで、進行性評価の適用性について検討を行った。なお、本手法は現場への適用を念頭に置き、河川堤防の浸透に対する安全性照査で一般的に用いられている浸透流解析を用いている。

2. 既往研究

西村ら³⁾は基礎地盤が透水性の異なる二層を有する構造（以下「複層」という。）において、上層の層厚が薄いことや下層が上層に比べて透水性が高く、その差が大きいこと、堤内側が行止り構造であること等の条件で、堤体と基礎地盤の境界でパイピングが発生しやすいことを述べている。

基礎地盤が単一層である場合（以下「単層」という。）や、複層であっても上層に対して下層の透水性が低い場合は、川裏側基礎地盤の間隙水圧が高まりにくいため比較的パイピングは発生しづ

らい。しかし、上野ら⁴⁾が行った法尻部の抽出模型実験では、大きな水圧が作用し基礎地盤の間隙水圧が高まる条件で単層でもパイピングが発生し水ミチの延伸が確認されている。

笹岡ら⁵⁾は基礎地盤の透水層の厚さを変えずに、その幅を川表から川裏に向けて狭めた模型による実験を実施し、パイピング発生後に水ミチの延伸が途中で止まる現象を確認した。なお、笹岡ら⁵⁾は水ミチの透水性を仮定した浸透流解析を行い、その現象を再現可能であることも示している。パイピングの進行性を評価できれば堤防の破壊メカニズムの解明につながるとともに、対策優先区間の設定にも活用できると考える。

一方、上野ら⁶⁾や高辻ら⁷⁾はパイピングの発生に伴い形成された水ミチにより堤体が変形することによって、水ミチが閉塞し、水ミチの延伸に影響を与えることを確認しており、堤体の変形しにくいほど水ミチの進行性が高いことを指摘している。堤体の変形と水ミチの延伸と停止が複雑に絡み合い進行する現象は、パイピング発生の有無を評価する現行の照査手法では表現できない。これに対して例えば小高ら⁸⁾は、非定常浸透流解析と剛塑性有限要素法を連成した高透水性基礎地盤上の河川堤防の安定性評価手法を提案している。

3. 進行性を表現するための浸透流計算の試行

3.1 計算条件

パイピング発生時の土層では、前述のように複雑な現象が生じていると推測され、厳密にシミュレーションするためには浸透流解析、土砂水理、堤体変形解析、水理・河川工学などを幅広く連成させることが必要となり、実装に至るまでにはさらなる詳細な検討が必要である。しかし、パイピングの進行により決壊に至るのか確認することは危機管理上、喫緊の課題であり、現場への適用を考えると簡易に表現できる手法の開発が求められている。簡易手法としては、河川堤防の浸透現象を検討する際に広く用いられている浸透流解析を使用することが考えられるが、浸透現象に大きく影響すると考えられる堤体の変形や水ミチの土砂

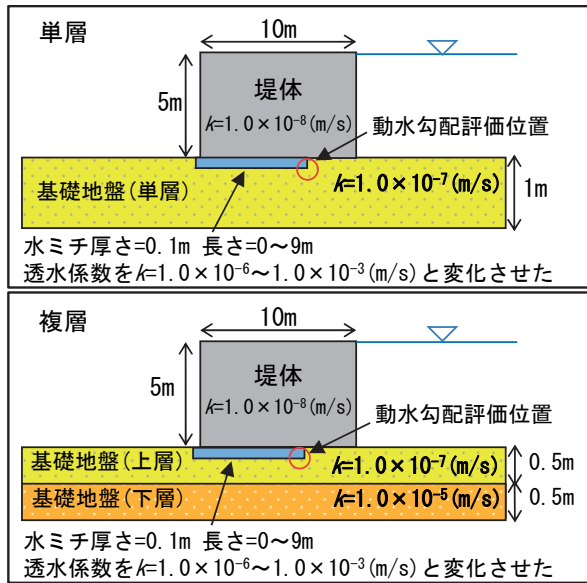


図-1 解析モデル図

の流動を浸透流解析では厳密に評価することはできない。だが、堤体に変形しないことで安全側の評価につながる⁶⁾こと、土砂の流動によって生じた水ミチを盛土や基礎地盤と同様にモデル化し、水ミチに透水係数を与えることで既往実験の再現性も高かった⁶⁾ことから、浸透流解析による簡易的な表現が可能であると考えた。

解析モデルの概要を図-1に示す。堤体は透水性の低い粘性土を想定した。基礎地盤は比較的透水性の高い砂層とし、単層と複層を想定した地盤モデルを作成して計算を行った。複層の場合は上層に対して下層の透水性が高い組合せとした。地盤に透水係数を大きくした箇所を設定することで水ミチを模擬し、その長さを変化させ浸透流解析を行った。実際には水ミチの中では間隙率の変化なども生じていると考えられるが、簡易評価のために透水係数のみを変更して計算した。水ミチの透水係数による影響を検討するため、原地盤の値を基準に原地盤の10~10,000倍程度の値を設定した。水ミチの長さは水ミチの延伸を模擬するために、長さを1~2m単位で変更し、川裏法尻を基準として $L=0\sim9\text{m}$ とした。水ミチの厚さは一律で0.1mとした。なおメッシュサイズは0.01mとした。外水位は堤防天端高とし、定常計算を行った。

3.2 計算結果

現行の照査で指標とされている局所動水勾配（水平方向ih、鉛直方向iv、評価節点距離は0.1mとした）を基礎地盤の水ミチ先端部（図-1参照）

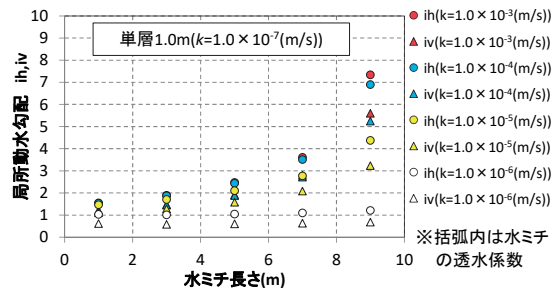


図-2 水ミチの長さ（m）と局所動水勾配（単層）

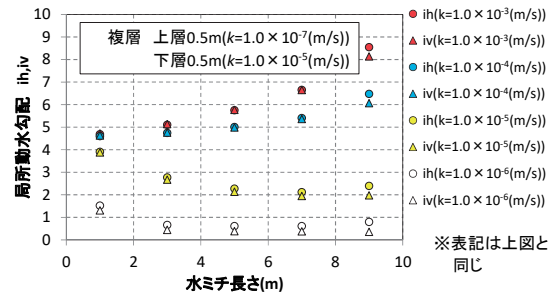
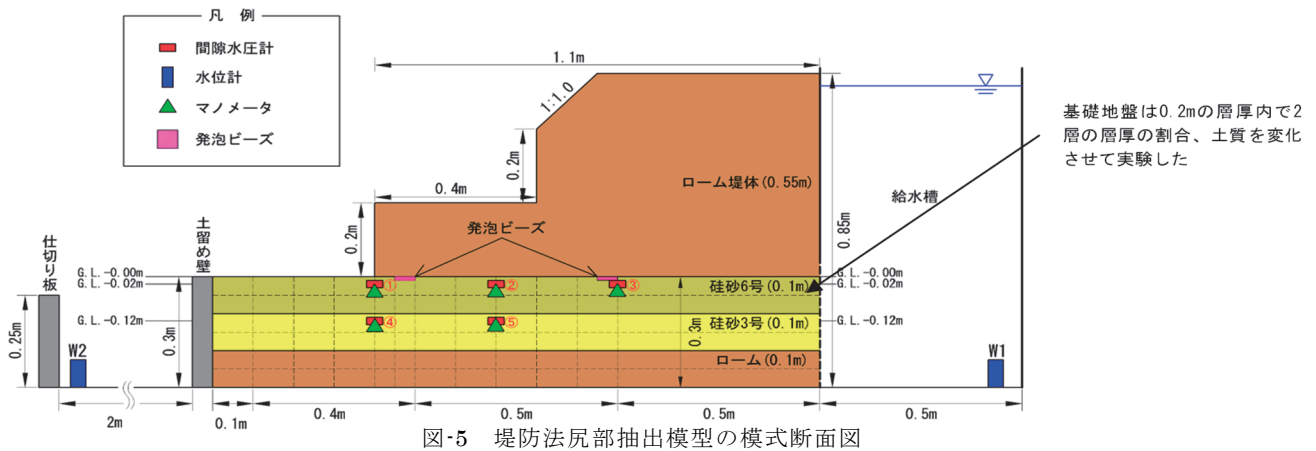
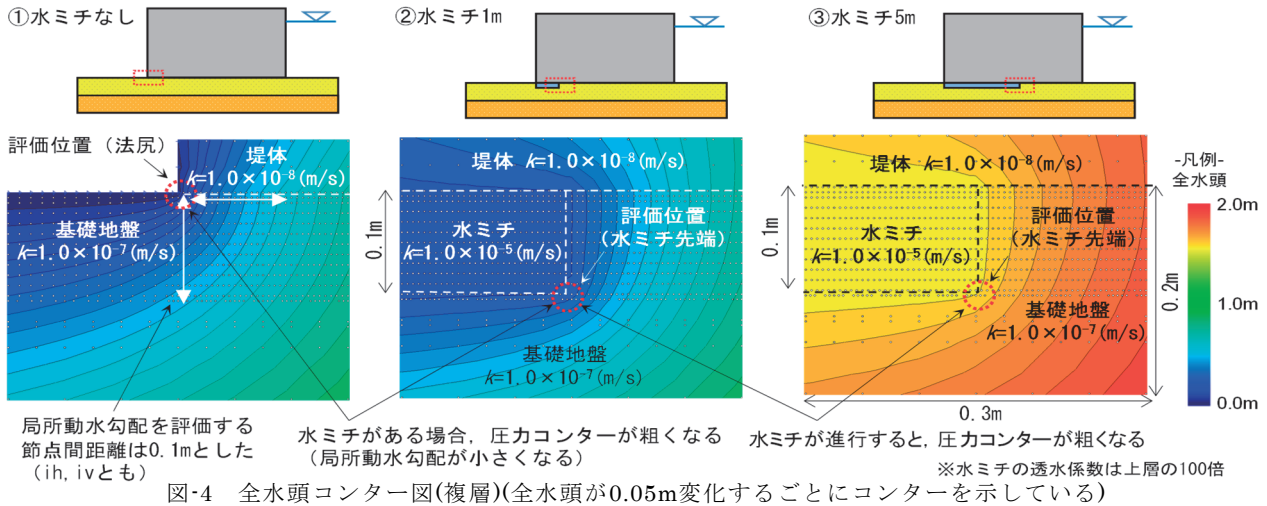


図-3 水ミチの長さ（m）と局所動水勾配（複層）

において計算し、図-2、図-3に示した。これは水ミチ先端部の土砂の流動が、水ミチ先端部の局所動水勾配の値によって支配されると考えるためである。計算結果から、水ミチの長さにより局所動水勾配の値が変化することがわかる。複層、単層によって値は異なるが、水ミチの透水係数が相対的に高いと水ミチの延伸とともに局所動水勾配は大きくなり、水ミチの透水係数が低い場合、水ミチが延伸すると局所動水勾配がやや下がるか、ほぼ横ばいとなる。なお、基礎地盤の透水係数を変更しても（複層では上下層の透水係数比が一定であれば）水ミチの延伸に伴う勾配の変化傾向の大きな変化はないことを確認している。基礎地盤層厚を変更すると傾向がやや変化するが、こちらも大きな傾向の変化はないことを確認している。

3.3 計算結果の評価

複層で水ミチの透水係数を上層地盤の100倍とした解析の結果として得られた全水頭コンター図を図-4に示す。法尻部では大気圧と接しているため、基礎地盤内の等圧力線は非常に密となるため局所動水勾配が高まる。しかし、水ミチが延伸すると水ミチの透水性が上層の透水係数より大きいために、水ミチの延伸によって法尻に集中していた等圧力線が水ミチ境界部に集中するが、水ミチ内には透水係数を与えているため、大気圧と比較して等圧力線は密ではないため局所動水勾配は若干低くなる。一方、水ミチの透水係数が大きいと



境界部の等圧力線が比較的に密になり、水ミチの延伸とともに平均動水勾配が大きくなることで徐々に局所動水勾配が大きくなる。

以上の計算で得られた局所動水勾配の特徴は、単層では水ミチの透水係数が元の地盤の透水係数の100倍程度 ($k=1.0 \times 10^{-5} (\text{m/s})$) で水ミチの延伸に伴い、局所動水勾配が拡大傾向を示すが、複層では水ミチの透水係数が基礎地盤上層の透水係数の1,000倍程度 ($k=1.0 \times 10^{-4} (\text{m/s})$) で初期値からの拡大傾向を示す。しかし、図-3に示したとおり、複層構造では初期値の局所動水勾配が単層と比較して相対的に大きく、水ミチの延伸とともに局所動水勾配が低下しても局所動水勾配が比較的大きい値となる。そのため水ミチの延伸が継続しやすく、進行性が高いと推測される。単層は水ミチ延伸前の局所動水勾配が小さく、水ミチ延伸後に局所動水勾配が複層同様に低下する。低下した局所動水勾配は複層と比較して小さく、水ミチの延伸が継続しにくいため、進行性が低いことが推測される。しかし水ミチがある程度まで延伸すると局所動水勾配が上昇する傾向となり、川表ま

で水ミチが延伸する可能性があると考えられる。以上の解析により水ミチ延伸後の水ミチ先端部の局所動水勾配を評価することによりパイピングの進行性を表現できる可能性を示すことができた。

4. 堤防模型実験

4.1 堤防模型及び使用材料

3章の検討を踏まえ、パイピングの進行性評価が実地盤に適用可能であることを検討するため、パイピング発生後に基礎地盤に形成される水ミチ先端部での局所動水勾配の変化傾向を確認し、粒径ごとの限界動水勾配と比較することにより、進行性の有無を確認した。実験に使用した模型は図-5に示す堤防法尻部の抽出模型とした。基礎地盤構成は表-1に示すとおりである。

透水層は横幅0.1mとした。透水層の側面は観察のため強化ガラスとした。高い間隙水圧を基礎地盤に作用させるため、基礎地盤がスリットを介して給水槽とつながる構造とし浸透水が川表側の基礎地盤に直接供給されるようにした。

4.2 水理条件

外水位は基礎地盤の上面をG.L.とし、実験開始

表-1 堤防模型実験の条件と結果

ケース名	実験条件						実験結果
	上下層	土質	平均粒径 D ₅₀ (mm)	透水係数 (m/s)	層厚 (m)	条件②の 維持水位 G.L.+(m)	
ケース1	上層	6号珪砂	0.182	2.71E-05	0.1	①、②	水ミチ 0.3mで 停止
	下層	3号珪砂	2.697	5.56E-04	0.1		
ケース2-1	上層	6号珪砂	0.182	2.71E-05	0.15	①、②	水ミチ 0.4mで 停止
	下層	3号珪砂	2.697	5.56E-04	0.05		
ケース2-2	上層	6号珪砂	0.182	2.71E-05	0.15	②	水ミチが給水 槽まで貫通 ⇒決壊
	下層	3号珪砂	2.697	5.56E-04	0.05		
ケース3	上層	4号珪砂	0.741	7.67E-05	0.1	①、②	水ミチ 0.1mで 停止
	下層	3号珪砂	2.697	5.56E-04	0.1		

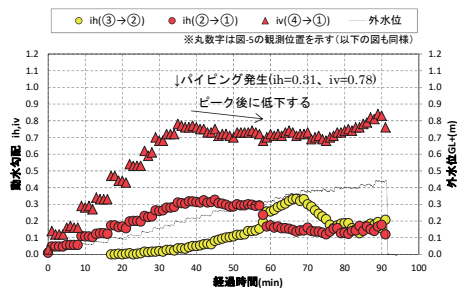


図-6 観測値から計算した局所動水勾配の経時変化 (ケース1-①) (括弧内のih、ivはピーク値を示す)

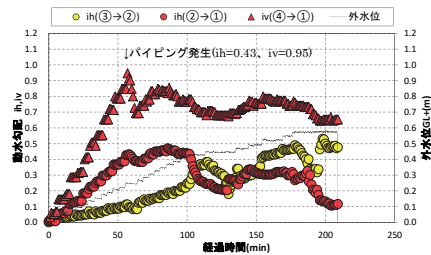


図-7 観測値から計算した局所動水勾配の経時変化 (ケース2-1-①) (括弧内のih、ivはピーク値を示す)

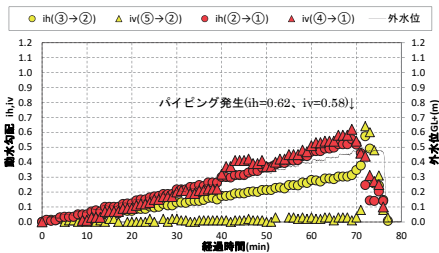


図-8 観測値から計算した局所動水勾配の経時変化 (ケース3-①) (括弧内のih、ivはピーク値を示す)

前はG.L.0mで水位を維持し、基礎地盤を飽和させた。その後は以下の2通りの水位調整を行った。

- ①経時的に水位を上昇させ決壊に至らせたケース
- ②水位を一定値に維持し経過観察をしたケース

①では、マノメータの値を確認し概ね変動がないか確認した後、3分に1回程度水位上昇させた。②では①において法尻でパイピングが発生した水位を目標水位とし、実験開始直後に目標水位まで外水位を上昇させ、経過観察した。その後パイピングが発生しなかった場合は水位を上昇させ、パイピングが発生した場合は水位を5時間程度維持

した。①は外力に応じたパイピングの進行性を確認すること、②はある一定外力時にパイピングの進行性があるかを確認することを目標として実施した。なお、ケース2-1とケース2-2は地盤条件は同一で、維持水位を変化させて実験を行った。

4.3 計測方法

実験中は、外観観察及び間隙水圧の計測を行った。埋設型の間隙水圧計を基礎地盤の上層と下層に配置するとともに、マノメータによる観測も行い、実験中も基礎地盤の水圧を確認した。実験終了後は外水位を下げて堤防模型の開削調査を行い、水ミチの延伸長さを確認した。

4.4 実験結果

①経時的に水位を上昇させ決壊に至らせたケースでの局所動水勾配と外水位の経時変化を図-6～8に示す。ここでの局所動水勾配は上層および下層のマノメータの1分ごとの観測値の差をマノメータ設置間隔で除した値である。模型の都合により鉛直方向は離隔0.1m、水平方向は離隔0.3mである。ピーク後、局所動水勾配が低下する傾向が確認できる。これは水ミチの延伸による圧力低下で、局所動水勾配が低下したためと考えられる。

②水位を一定値に維持し経過観察をしたケースにおける動水勾配と外水位の変化を図-9～12に示す。ケース1-② (図-9) の法尻位置における観測では、数分間の値変動の後、実験開始60分程度まで、ivは値を維持し、ihでは緩やかな上昇傾向を見せる。経過時間が60分程度でih、ivとも急激に低下し、その後は徐々に低下した。これは水ミチが当初の数分間で急激に延伸したため基礎地盤内の圧力が変化し、動水勾配の急激な変化が発生したものと推測される。また、60分経過後にマノメータ②の位置まで水ミチが延伸することで圧力が低下し、法尻の動水勾配が低下した。その後は水ミチの延伸が止まったことで動水勾配の大きな変化が生じなかったものと推測される。一方で、水位維持後に決壊したケース2-2-② (図-12) では水位維持(実験開始150分)後から220分程度まで法尻のih、ivが低下傾向、堤体内部でのih、ivは上昇傾向を示している。これは基礎地盤の中をゆっくりと水ミチが延伸し、基礎地盤内の圧力分布が変化したことを示唆すると考えられる。

5. 堤防模型実験の再現解析

5.1 解析条件

実験において確認された事象を再現するための浸透流解析を実施した。浸透流解析は3次元の堤防モデルを作成して実施した。使用したプログラ

ムはDtransu-3D・ELである。メッシュサイズは0.01mとした。透水係数は実験値(表-1参照)を用いた。3章で示したように水ミチを模擬したメッシュを作成し、透水係数は笹岡ら⁵⁾が原地盤の透水係数の100倍程度の値を水ミチに透水係数として与えることで解析の再現性が得られたとしていることを参考に、基礎地盤上層の100倍とした。事後開削調査の結果から水ミチの厚さは0.01m、横幅は透水層と同じ幅(0.1m)とした。水位は表-1の維持水位の最大値を用いて、定常計算を行った。

5.2 解析結果

水ミチの長さを変更させた場合の動水勾配を図-13～15に示す。動水勾配はマノメータの設置間隔と同じih : 0.3m、iv : 0.1～0.15m(上層厚さと同じ)間隔で評価している。ケース1、2-1ではihは横ばいからわずかに上昇する傾向を示すが、ivについては水ミチの延伸とともに値が低下している。実験では上層での上向きの噴砂の発生を確認している。ivが低下すると上向きの噴砂は生じにくくなると考えられ、ivの変化がパイピングの進行性に寄与している可能性は高い。

ケース3においてihは増加し、ivは一旦低下後上昇に転じている。このivの低下によってパイピングの進行性が低下したことが考えられる。決壊したケース2-2はih、ivともに変化傾向はケース2-1とほぼ同様である。外水位がケース2-1と比べて高いため動水勾配が水ミチの延伸とともに一旦低下するが、閾値を下回らなかったためにパイピングの進行性が保たれたものと推測される。

なお、水ミチが停止した長さでの動水勾配はケース1、2-1、3でそれぞれiv=0.65、0.66、0.74と0.7程度値が得られている。6号珪砂、4号珪砂の限界動水勾配icをそれぞれ実験前に実施した現場密度試験より求めた間隙比より算出した。icはそれぞれ0.86、0.88であり、今回の計算値と比べて若干大きい。実験においてはパイピングにより土が緩み、間隙比が大きくなっていたことが推測され、間隙比の拡大によって限界動水勾配が低下した可能性が考えられる。

6. まとめ

本報文では、パイピングの進行性を簡易に評価するモデル(以下「簡易モデル」という。)を提案した。この簡易モデルは、水ミチの延伸に伴う局所動水勾配の変化を計算するものであり、パイ

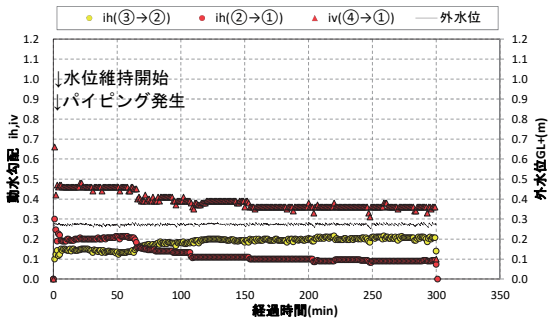


図-9 観測値から計算した局所動水勾配の経時変化
(ケース1-②: 水ミチ0.3mで停止)

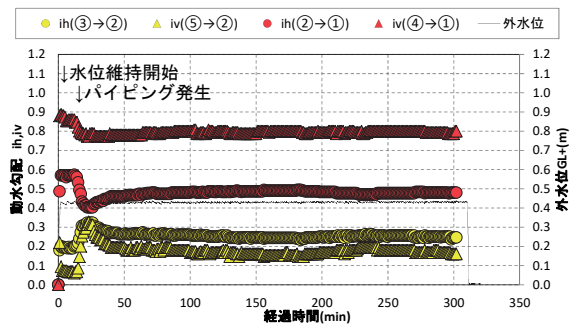


図-10 観測値から計算した局所動水勾配の経時変化
(ケース2-1-②: 水ミチ0.4mで停止)

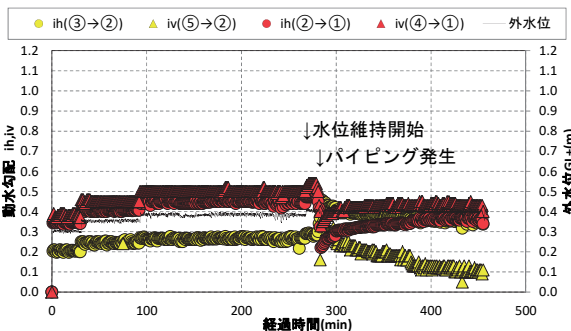


図-11 観測値から計算した局所動水勾配の経時変化
(ケース3-②: 水ミチ0.1mで停止)

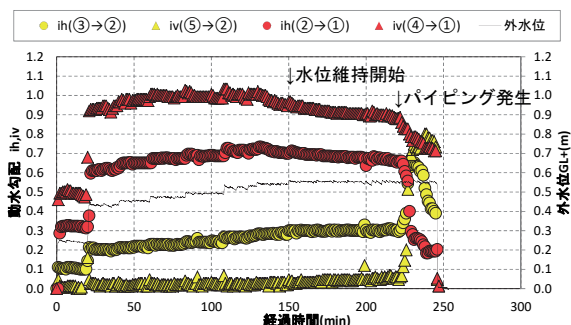


図-12 観測値から計算した局所動水勾配の経時変化
(ケース2-2-②: 決壊)

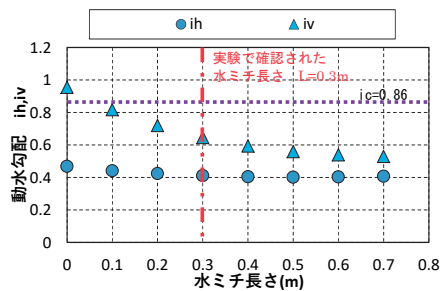


図-13 局所動水勾配の計算値(ケース1)

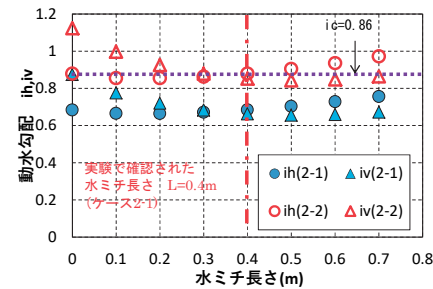


図-14 局所動水勾配の計算値(ケース2-1、ケース2-2)

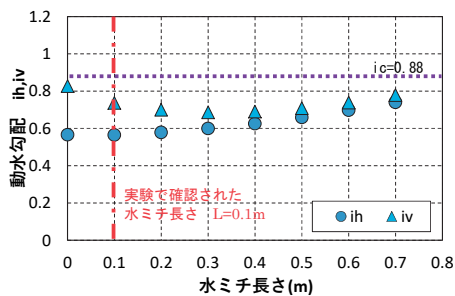


図-15 局所動水勾配の計算値(ケース3)

ピングの進行性を表現できる可能性がある。この簡易モデルを堤防模型実験に適用したところ、基礎地盤条件に応じて、水ミチの延伸に伴う局所動水勾配の変化を表現することができた。なお、今回は3次元浸透流解析を行ったが、2次元浸透流計算でも同様の解析結果が得られている。

ここで提案した手法はパイピング発生後に生じる基礎地盤内の水ミチを仮定し、水ミチ先端部の局所動水勾配の変化傾向により進行性の有無を確認しようとするものである。この手法が確立できれば、簡易に堤防の安全性評価や対策優先区間の

選定に活用できると考えられる。また、こうした簡易な予測が可能となると、現在整備が進んでいる危機管理型水位計や水害リスクラインと連携し、堤防の浸透に対する安全性の変化をリアルタイムに評価することが可能となるなど、危機管理対応への貢献が可能になることが期待される。

今回の検討では、現行の技術基準で浸透の安全性評価に利用されている局所動水勾配を指標として用いたが、局所動水勾配は浸透流計算の際に適用するメッシュサイズの影響を受けるため、現地に適用する際のメッシュサイズについての検討を進めるなど、実務への反映を目指したい。

参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書、pp.4-1～4-60、2013
- 2) 田中秀岳、笹岡信吾、瀬崎智之、福島雅紀：浸透流解析を用いた簡易的なパイピング進行性評価手法の堤防模型実験への適用性検討、河川技術論文集、第25巻、pp.565～570、2019
- 3) 西村柁哉、前田健一、櫛山総平、高辻理人、泉典洋：透水性基礎地盤を有する河川堤防のパイピング条件に基づく点検フローの提案、第5回河川堤防技術シンポジウム論文集、pp.13～16、2017
- 4) 上野俊幸、笹岡信吾、中村賢人、福島雅紀、諏訪義雄：模型実験に基づくパイピング発生パターンと局所動水勾配の関係、第5回河川堤防技術シンポジウム論文集、pp.63～66、2017
- 5) 笹岡信吾、上野俊幸、福島雅紀、諏訪義雄、栗原朋之、坂本淳一、神原隆則：実流速による河川堤防基礎地盤の水みち進行判定の試算、河川技術論文集、第24巻、pp.607～612、2018
- 6) 上野俊幸、笹岡信吾、森啓年、中村賢人、福島雅紀、諏訪義雄：模型実験に基づいた河川堤防のパイピング発達に係わる土質条件の分析、河川技術論文集、第23巻、pp.405～410、2017
- 7) 高辻理人、前田健一、西村柁哉、牧洋平、泉典洋：異なる堤体材料を用いた透水性基盤を有する河川堤防の浸透破壊進展メカニズム解明、第6回河川堤防技術シンポジウム論文集、pp.25～28、2018
- 8) 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、第24巻、pp.559～564、2018

田中秀岳



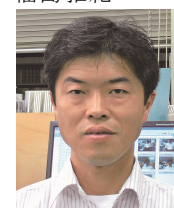
国土交通省国土技術政策総合
研究所河川研究部河川研究室
交流研究員
TANAKA Hidetake

笹岡信吾



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
研究官
SASAKA Shingo

福島雅紀



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
長、博士(工学)
Dr. FUKUSHIMA Masaki