浸透流解析を用いた簡易的なパイピング 進行評価手法の堤防模型実験への適用性検討 A STUDY ON SIMPLE EVALUATION-APPROACH OF PIPE-PROGRESSION WITH SEEPAGE ANALYSIS

田中 秀岳¹・笹岡 信吾²・瀬崎 智之³・福島 雅紀⁴ Hidetake TANAKA, Shingo SASAOKA, Tomoyuki SEZAKI, Masaki FUKUSHIMA

¹正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)
²国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)
³国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)
⁴正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

In 2012, the Yabe River levees broke down due to the occurrence of piping penetration from the foundation ground. The purpose of this study is to establish a pipe-progression evaluation-method. A pipe-progression in a levee foundation was evaluated using a seepage analysis which modeled formation progress of a pipe. As a result, it was confirmed that the local hydraulic gradient at the end of the pipe changed by the length of the pipe and the tendency of this change depended on the hydraulic conductivity of the pipe. It is considered that pipe-progression becomes slow and eventually suspended in case of a reduction of a local hydraulic gradient. Some levee-model-experiments were conducted to confirm that the stop of the pipe progression was a possible phenomenon. It was observed that the pipe-progression stopped at certain water levels in these experiments. Therefore, the reproduction of the phenomena proved the applicability of the evaluation approach.

Key Words : River levee, piping, model experiment, seepage analysis

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の堤防が約50mにわたって決壊した.この要因 として基礎地盤の砂層に河川水が浸透することで水ミチ が川裏法尻から川表に向かって徐々に延伸し,堤体が沈 下・陥没し決壊に至ったことが挙げられている.しかし, このようにパイピングが原因となって破堤につながった と推定されるケースがある一方で,漏水や噴砂等は発生 するが,堤防の破壊までには至らず,パイピング現象が 終息するケースも数多く報告されており,パイピングの 進行性を評価する手法の開発が強く求められている.

既往研究において, 西村ら¹⁾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」)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においてパイピングが 発生しやすいことを明らかにした. 基礎地盤が単一層である場合(以下「単層」)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.しかしながら,基礎地盤の間 隙水圧が高まる条件が揃えば,単層でもパイピングが発 生するものと考えられる.上野ら²は,単層に対して法 尻部抽出模型を用いて大きな水圧作用条件下でパイピン グ現象を再現し,基礎地盤の間隙水圧が高まる条件では 単層でもパイピングの進行が見られることや水平方向の 浸透が卓越し水ミチの延伸が見られることを示した.

また、漏水は発生するもののパイピングがある程度進 行した後に進行が止まってしまう事例も確認されている. 笹岡ら³は堤防模型実験で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、パイピングの進行と 停止を確認した.その後、水ミチの透水性を仮定した浸 透流解析を行うことで、その現象を再現している.こう したパイピングの進行性を評価できればパイピングによ る堤防の破壊メカニズムの解明につながるとともに、進 行性の有無は対策優先度の検討に活用できると考える.



一方、上野ら⁴や高辻ら⁵は噴砂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、水ミチを閉塞さ せ、パイピングの進行に影響を与えることを確認してお り、堤体土の材料特性や強度により、堤体が変形しにく いほどパイピングの進行性が高いことを指摘している. このように堤体の変形とパイピングの進行と停止が複雑 に絡み合い、進行する現象は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⁹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.

本論文では、現場への適用を念頭に置き、堤体が変形 しにくく、パイピングの進行性が強い場合(危険側の評 価)を想定し、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たパイピング進 行性評価の可能性を示した.その後、堤防模型実験を実 施して、パイピング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.

2. パイピングの進行性に関する浸透流計算

(1) 計算条件

パイピング発生時の土層では、複雑な現象が生じてい ると推測されるが、上記の浸透流解析を用いてパイピン グの進行性を簡易に評価することを試みた.堤防のパイ ピングは水ミチの形状や透水性に規定されると考え、水 ミチを盛土や基礎地盤と同様にモデル化した.

解析モデルの概要を図-1に示す.基礎地盤のパイピン グ破壊を評価するため,堤体は透水性の低い粘性土とし 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.水ミチに設定した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.水ミチの長さはパイピングの進 行を模擬するために,長さを1~2m単位で変更し,川裏 法尻を基準としてL=0~9m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同じ高さとし,定常計算を行った.

(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)を基礎地盤の水ミチ先端部と接触 する土層部分について抽出し,図-2,図-3に示した.水 ミチの長さにより局所動水勾配の値が変化した.複層, 単層によって値は異なるが,水ミチに設定した透水係数 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,基礎地盤の地盤定数を変更しても(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) 計算結果の評価



局所動水勾配を評価する 水ミチがある場合, 圧力コンターが粗く 水ミチが進行すると, 圧力コンターが粗くなる 節点間距離は0.1mとした なる(局所動水勾配が小さくなる) ※水ミチの透水係数は上層の100倍 図-4 全水頭コンター図(複層) (全水頭が0.05m変化するごとにコンターを示している)

堤防および基礎地盤へ河川水が浸透する場合,法尻部 では堤内地が浸出面となり,圧力が解放されることによ り川表から基礎地盤に浸透した水の圧力は浸出面に向 かって急激に小さくなると考えられる.特に複層で下層 の透水係数が高い場合,下層に水が浸透しやすいため, 下層での圧力が高まりやすい.そのため,法尻部付近で は単層よりも圧力の変化が大きくなり,局所動水勾配が 大きくなりやすいと考えられる.

次に透水係数は笹岡ら³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、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.水ミチが延 伸すると水ミチと基礎地盤の境界面で圧力解放が生じる と考えられるが、水ミチに透水係数を与えると、圧力解 放が法尻に比べて小さくなる.さらに、評価位置が法尻 から離れることによって、法尻付近で受けていた圧力解 放の効果が小さくなり、水ミチが延伸することで局所動 水勾配が低下するケースがある.水ミチ内の透水係数が 大きく、水ミチ内で速やかに圧力が低下する場合は水ミ チの延伸とともに徐々に動水勾配が大きくなり、水ミチ は川表まで延伸すると推定される.

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=1.0×10⁵(m/s))で初期値からの拡大傾向を示すが, 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=1.0×10⁴(m/s))で初期値からの拡大傾向 を示す.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高い値を保つ.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.単層については,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と考えられ,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拡大する傾向となり,川表まで 水ミチが延伸する可能性があると考えられる.

3. 堤防模型実験の概要

(1) 堤防模型及び使用材料

2章の検討を踏まえ、パイピングの進行性評価への適 用性を検討するため、堤防模型実験等の実現象に対する 再現解析を通じ、水ミチ先端部での圧力変化を確認し、 パイピング進行の有無を表現可能か確認する。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. 堤体は高さ0.2mの矩形として良く締め固め、法尻が泥濘 化しないよう工夫した。使用材料は堤体を関東ローム、 基礎地盤は透水層として珪砂3号~6号を使用した.透水 層以外の基礎地盤は関東ロームで作製した.基礎地盤の 層厚、種類は複数組み合わせており、基礎地盤構成は表 -1に示すとおりである.

透水層は0.1m幅とした. 透水層の側面には観察のため 強化ガラスとした. また, 揚圧力による堤体の浮き上が りを防ぐため, ロームの上部には重量物を載せて実験を 行った. 高い間隙水圧が基礎地盤に作用する状況を作り 出すため, 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に直接供給されるようにした.

(2) 水理条件

外水位はポンプを介して給水槽に水を注入することで 調整を行った.基礎地盤の上面を基準のG.L.とし,実験 開始前はG.L.+0mの位置で水位を維持し,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破堤に至らせたケース

② 水位を一定値に維持し経過観察をしたケース

①では、水位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回程度上昇させた。



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)	実施 条件	条件②の 維持水位 G.L.+(m)	条件②の 結果
ケース1	上層	6号珪砂	0.182	2.71E-05	0.1	1, 2	0.26	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	0.42	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	0.25 ~0.54	破堤
	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	0.30 ~0.40	水ミチ 0.1mで 停止
	下層	3号珪砂	2.697	5.56E-04	0.1			

②では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 はさらに水位を上昇させ、パイピングが発生した場合は その水位を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 パイピングが進行す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は地盤条件が同じ であるが、維持水位を変化させて実験を行った.

(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.また、ガラス面より目視及びカメラを用いた外観観察を行い、水ミチの延伸状況を観察した.間隙水圧計は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. 堤防模型実験の結果

①経時的に水位を上昇させ破堤に至らせたケースにおける、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に設置した

マノメータの1分ごとの観測値から計算した局所動水勾 配である. 図-6~8に示すとおり,局所動水勾配ih,ivは 評価位置に関わらず,ある値をピークに低下する傾向を 示している. 例えばケース1のピーク値は,ih=0.31程度, iv=0.78程度である.

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,局所動水勾配と外水位の変化を図-9~12に示す.② では①におけるihとivの値の変動を参考にして維持水位

(表-1参照)を定めた.ケース1-②(図-9)では外水位 は実験開始の1分間に急激に上昇させているため、局所 動水勾配も最初の数分間で急激に変化する. 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分程度を境にih,ivとも急激に低下 し、その後は徐々に低下する、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, 局所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 伸することで基礎地盤内の圧力が解放されたことが推測 され,法尻の局所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局所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、水位維持後に破 堤したケース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

(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.2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³の検 討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.

(2) 解析結果

水ミチの長さを変更させた場合の局所動水勾配を図-13~15に示す.局所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.実験ではパイピング発生時に上 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.ivが水ミチの延伸に影響を与えると考えると, このivの低下によってパイピングの進行性が低下したも のと考えられる.破堤したケース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 と比べ高いため局所所動水勾配が水ミチの延伸とともに 一旦低下するが,低下後も局所動水勾配の値が比較的に 大きく,パイピングの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局所動水勾配はケース1、2-1、3でそれぞれiv=0.65、0.66、0.74と0.7程度の値 が得られている.6号珪砂(ケース1、2-1、2-1)、4号珪 砂(ケース3)の限界動水勾配i。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.i。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. まとめと今後の課題

本論文ではパイピングの進行性を、浸透流解析で簡易 に表現することが可能か検討した.

簡易モデルを用いた浸透流解析では水ミチの延伸に伴い局所動水勾配が低下するケースがあることを示した.

堤防模型実験では外水位一定であれば水ミチの延伸が 止まるケースを示すことができた.再現解析においても 局所動水勾配が低下する傾向が確認でき,パイピングの 進行性が低下する可能性を示すことができた.

本検討で示した進行性評価が可能となれば、堤防の安 全性評価や対策優先度の検討に活用できると考えられる.

今回の検討では現行の評価指標である局所動水勾配を 指標として用いたが、現地適用に際しては、局所動水勾 配の算出について、適用するメッシュサイズの影響や閾 値の設定など、今後さらなる検討が必要である.

以上のような課題を踏まえつつ現地適用に向けた検討 を進め、実務への反映を目指したい.

参考文献

- 西村柾哉,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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 高辻理人,前田健一,西村柾哉,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.
- 6)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.
- 7) 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), 2012.
- 8) GELホームページ, http://gw.civil.okayama-u.ac.jp/gel_home/ (2019. 4. 2受付)