

河川堤防のパイピング破壊に対する漏水対策型水防工法の効果発揮条件 Efficient condition of leakage countermeasure-type flood control method for piping failure of river levees

佐々木一真¹, 前田健一², 大桑有美³, 近藤知輝¹

- 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.sasaki.340@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

高水位継続時間の長期化により河川堤防のパイピング破壊の危険性が高まる中で、河川堤防の効率的な維持管理が求められている。パイピングに対する伝統的な漏水対策型水防工法として、釜段・月の輪工法が用いられており、これらは経済性或柔軟性に優れているため将来的にも継承・強化すべき手段である。しかし、その効果性能についての検討事例は少ない。そこで本論文では、釜段・月の輪工法による対策工対策効果を検討するため、対策工を設置するタイミングや高さ等の着目し、模型実験を実施した。その結果、対策工により一時的に基礎地盤内の土の流出を抑制する効果がみられた。また、対策工の規模を大きくすることによる噴砂発生箇所を含む広範囲の対策は効果的である一方、時間経過とともに基礎地盤が液状化状態となり、対策工が沈下する現象もみられ、十分な効果が発揮されない可能性が考えられた。

キーワード：河川堤防、パイピング、漏水対策型水防工法

1. はじめに

近年、河川水が透水性基礎地盤に浸透し、堤内地で漏水や噴砂が発生する被害が増加しており、特に長時間にわたる高水位の影響で、堤防が決壊する危険性が高まっている。既往の研究¹⁾から、堤体と基礎地盤の地盤特性によりパイピングのメカニズムが大きく異なることが判明しており、パイピングの危険性の高い水理—地盤条件の特定が進められてきた。そのような中、長大な河川堤防を効率的に維持管理し、粘り強い堤防を目指すための検討が求められている。

そこで本論文では、パイピングに対する伝統的な漏水対策型水防工法として活用されている釜段・月の輪工法に着目する(図1参照)。これらは経済性或柔軟性に優れているため、将来的にも継承・強化すべき手段である。しかし、これまで釜段・月の輪工法の効果を定量的に検証した例²⁾³⁾は少なく、その効果性能については不明な点も多い。それらを解明するために、模型実験を実施し、効果が十分に発揮されるような対策工を設置するタイミングや高さ等を検討した。

2. 模型実験概要

図2に久楽らの実験⁴⁾を参考にした実験模型概略図、



図1 漏水対策型水防工法の様子(月の輪工)

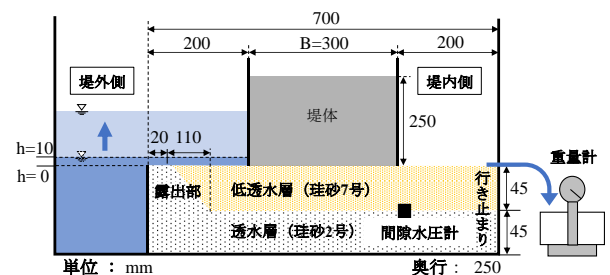


図2 実験模型概略図

表 1 に実験ケース一覧を示す。また、図 3 に釜段工と月の輪工を模擬した装置を示す。なお、case2, 4 では堤内側の法尻で噴砂が発生したタイミングで釜段工、月の輪工を、case5 では噴砂が堤内地の中央部分に発生したタイミングで釜段工を、法尻で噴砂が発生したタイミングで月の輪工を設置した。基盤層は水中落下法で堆積させ、上層は珪砂 7 号（細砂）、下層は珪砂 2 号（砂礫）を使用し、相対密度が 70% 程度になるように作成した。各試料の粒度分布と物性値を図 4 に示す。堤体については、含水比 20% の藤森粘土を締め固めた。ただし、堤体をアクリル板で拘束して堤体の変状によるパイピング進展への影響を無視している。パイピングが発生しやすい条件⁵⁾とするため、裏法尻から堤内側に 200mm 離れた位置を行き止まり境界とし、case3, 4, 5 では堤外の左端から 20mm を下層（透水層）の露出部とした。図 5 に水位条件である平均動水勾配 i （堤外側の水位差 h を堤体敷幅 B で除した量）の経時変化を示す。初めに基礎地盤を飽和させるため、平均動水勾配 $i=0.20$ を 30 分間維持した。その後、平均動水勾配を 10 分毎、単調増加させた。観測項目は、パイピング進展度と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 を越えて溢れ出した流量として重量計で計測した。

異なる基盤層条件下で実験を実施し、対策工の有無や高さの違いによる基礎地盤への影響に着目し、漏水対策型水防工法の効果を検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 パイピング進展度に着目した対策工の効果

3.1.1 露出無し地盤におけるパイピング進展度

パイピング進展度とは、行き止まりから緩み領域先端までの距離を堤体敷幅 $B=300\text{mm}$ で除すことで定義される（図 6 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、緩み領域とは、外水位による水圧上昇により液状化のような状態の地盤の範囲を意味している。また、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 は噴砂に伴う土粒子の流出によって裏法尻に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を意味している。

パイピング進展度の経時変化を図 7 に示す。露出無しの case1, 2 を比較すると、case1 は平均動水勾配 $i=0.87$ 時にパイピングにより破堤した。一方、対策工を設置した case2 では平均動水勾配 $i=1.37$ まで水位を上昇させたが、パイピング進展度 0.4 以降進展せず、破堤に至らなかった。

以上より、パイピング進展度を 0.4 までで抑制する、すなわち、裏法尻に噴砂を発生させないことが破堤を防ぐ上で重要である。また、パイピング進展度が 0.4 にな

表 1 実験ケース一覧

ケース名	基盤層		露出の有無	対策工の有無	対策工			破堤時の平均動水勾配	
	上層(mm)	下層(mm)			月の輪工	設置時間	釜段工		設置時間
case1	珪砂7号 45	珪砂2号 45	×	×	-	-	-	$i=0.87$	
case2	珪砂7号 45	珪砂2号 45	×	○	①	101分5秒	②	101分40秒	破堤せず ($i=1.37$)
case3	珪砂7号 45	珪砂2号 45	○	×	-	-	-	$i=0.29$	
case4	珪砂7号 45	珪砂2号 45	○	○	①	3分30秒	②	10分5秒	$i=0.20$
case5	珪砂7号 45	珪砂2号 45	○	○	①	33分50秒	③,④	4分10秒	$i=0.37$

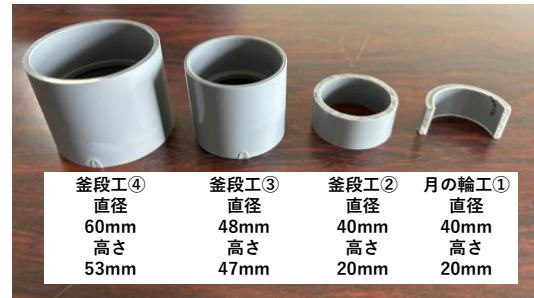


図 3 対策工を模擬した装置

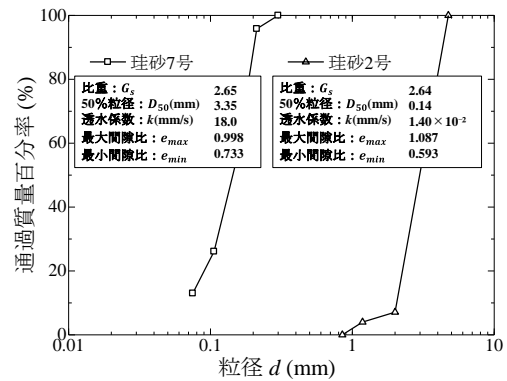


図 4 試料の粒度分布と物性

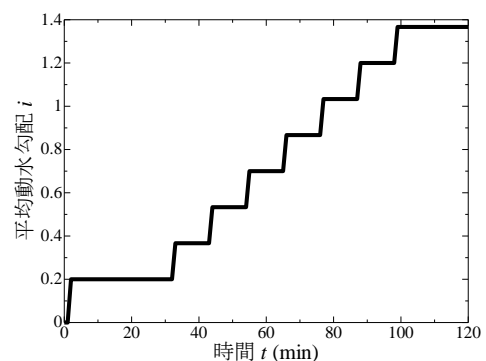


図 5 平均動水勾配の経時変化

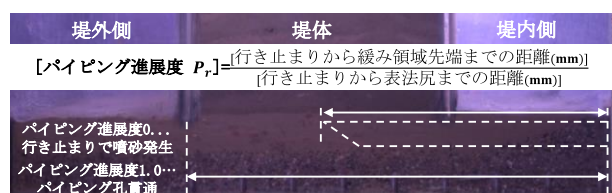


図 6 パイピング進展度の定義

り裏法尻に噴砂が発生したとしても、対策工には堤体下への進展を抑制することで破堤を防ぐ効果がある可能性が示された。

3.1.2 露出有り地盤におけるパイピング進展度

露出有りの case3, 4, 5 を比較すると、case3 は平均動水勾配 $i=0.20$ で 30 分間水位を維持した後、パイピング孔が貫通し、破堤した。また、釜段工③、④を設置した case5 も同様のタイミングでパイピング孔が貫通し、破堤した。一方、case4 は釜段工②を設置したが、平均動水勾配 $i=0.20$ で 22 分間水位を維持した後、パイピング孔が貫通し、最も早く破堤した。よって、露出有り基礎地盤では平均動水勾配が $i=0.20\sim 0.37$ 程度で破堤に至った。

一方、破堤に至るまでのパイピング進展過程はばらつきが大きい。case3, 4, 5 の堤内地における噴砂動態・対策工の様子をそれぞれ、図 8, 9, 10 に示す。

case3 では、裏法尻の噴砂によって運搬された堤体下の珪砂 7 号や藤森粘土が裏法尻付近に堆積することで、一時的に噴砂は収まる。しかし、土が堆積した範囲では水圧上昇が抑制されると、土が堆積していない範囲に水圧が集中するため、行き止まり境界付近の噴砂が活性化し、その後、5 分 15 秒に活性化した噴砂が裏法尻まで進展し始めたことで裏法尻の緩み領域が拡大した。流出した土が堆積し続けることで活性化が抑制されたが、15 分 20 秒に再度、噴砂の活性化と裏法尻への進展が起こり、32 分 30 秒にパイピング孔が貫通し、破堤した。

case4 は 1 分 45 秒に行き止まり境界で噴砂が発生し、その 20 秒後には裏法尻での噴砂が発生した。裏法尻の噴砂に対しては 3 分 30 秒に月の輪工、行き止まり境界の噴砂に対しては堤内地の中央を越えた 10 分 5 秒で釜段工を設置した。初期の裏法尻の小さい噴砂に対しては月の輪工を設置することで抑制でき、パイピング進展は一定となったが、設置から 6 分後には再度、進展が始まった。最終的には、噴砂の増大による緩み領域と裏法尻からの漏水によって、月の輪工が沈下・移動し、対策工を設置しない case3 よりも早い破堤となった。

case5 は行き止まり境界で噴砂が発生し、噴砂が堤内地の中央を越えた 4 分 10 秒で釜段工を設置した。釜段工を設置したことにより堤内地における緩み領域が拡大しなかった。その後、パイピング進展度は変わらなかったが、平均動水勾配 $i=0.37$ に水位上昇させると、裏法尻に噴砂が発生し、月の輪工を設置したが直後に破堤に至った。

case4, 5 において、両ケースで最初の対策工を設置すると、噴砂の活性化が抑制され、パイピング進展度は一定となる（図 7 参照）。対策工を設置したことで、対策工内の噴砂が抑制し、パイピングの進展を停滞させる効果があることがわかった。一方、対策工周りでは噴砂の活性化がみられた。これには、釜段工を設置するタイミングが関係していると考えられる。case4 では、裏法尻での噴砂発生後に釜段工を設置したため、すでに緩み領

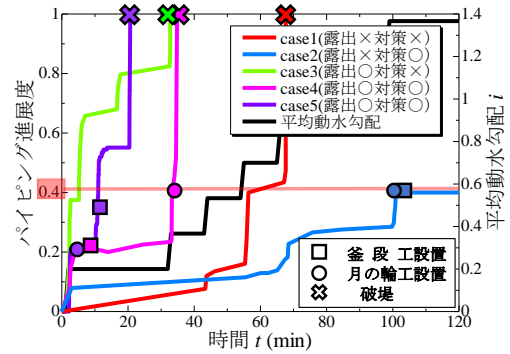


図 7 パイピング進展度の経時変化

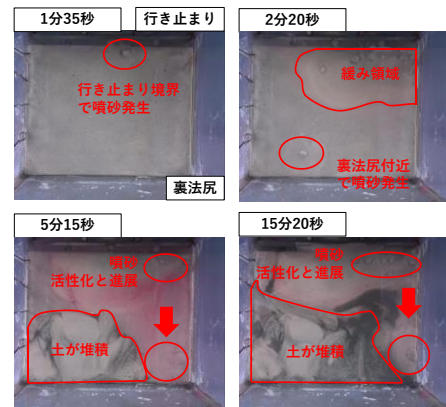


図 8 case3 の噴砂動態の様子

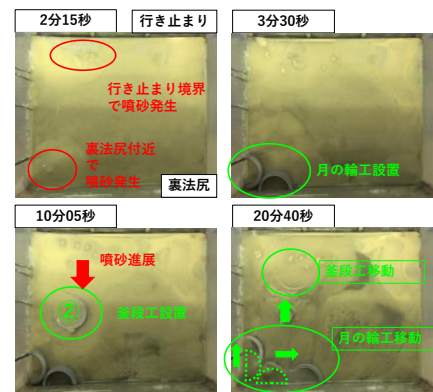


図 9 case4 の噴砂動態・対策工の様子

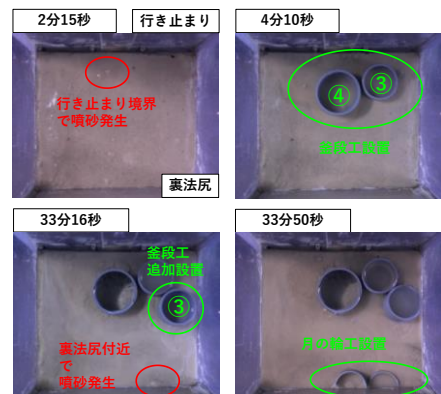


図 10 case5 の噴砂動態・対策工の様子

域が裏法尻付近まで広がっていた影響で釜段工の効果が発揮されなかった。以上より、対策工の噴砂抑制効果よりも対策工周りの噴砂を活性化させる効果の方が大きかったため、無対策の case3 よりも破堤に早く至ったと考えられる。

3.2 釜段工の高さによる噴砂動態への影響

裏法尻の噴砂に使用した月の輪工は同じであるが、堤内地の噴砂に対して使用した釜段工が異なる。本節では、釜段工の高さの違いに着目し、case4, 5 の噴砂動態の変化を考察する。ここで、釜段工③は釜段工②より高さが約2倍、釜段工④は釜段工②より高さが約2.5倍、直径が約1.5倍大きい装置である（図3参照）。

case4 は釜段工②を使用した。釜段工②を裏法尻で噴砂が発生した10分5秒に設置すると、緩み領域の影響で設置直後に沈下、傾斜し、破堤直前には50mm押し流された。

case5 は釜段工③、④を使用した。釜段工③、④は、噴砂が行き止まり境界から進展し、堤内地の中央を越えた4分10秒に設置したが、設置直後には沈下、傾斜がみられなかった。その後、徐々に沈下したが、大きく傾斜せず、噴砂による裏法尻側へ緩み領域の進展を抑制した。しかし、釜段工周り、特に行き止まり境界側の噴砂の活性化がみられた。この時、釜段工内部は珪砂7号が流出しており、水のみになっていた。これは、釜段工が高く、釜段工内外の水位差により内部から外部に向けて水の流れが発生し、珪砂7号が下層の珪砂2号を通して流出したためである。したがって、釜段工③、④は過剰な高さとなっていた。

以上より、釜段工には沈下、傾斜せずに水位差による逆流が発生しない最適な高さが存在すると考えられる。

3.3 漏水流量の挙動

図11に実験開始時からパイピング破壊に至るまで、または実験終了時までの累積漏水流量の経時変化を示す。この時、同地盤条件の実験ケースそれぞれで累積漏水流量に着目する。

露出無し地盤の case1, 2 では case1 が破堤した累積漏水流量と case2 で月の輪工を設置した101分5秒の累積漏水流量が近い値となった。そして case2 では、月の輪工設置後も累積漏水流量は増加したが、破堤には至らなかった。露出有り地盤では、対策工が効果的に作用した case5 を用いて考察する。case5 では、釜段工を設置した4分10秒から累積漏水流量の傾きが急になるが、case3 よりも破堤時の累積漏水流量は大きくなっている。

既往の研究⁶⁾から、漏水流量は基盤層に損傷を蓄積させ、破堤に至る限界を示すパラメータであるとされている。これより、対策工の設置により噴砂が抑制され、緩み領域の拡大を防いだため、無対策地盤に比べて地盤が損傷を蓄積できる範囲が増加し、破堤に至る限界値が引

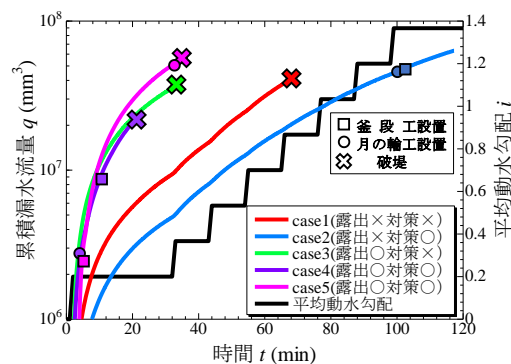


図11 累積漏水流量の経時変化

き上げられたと考えられる。

4. まとめ

本研究では、以下の知見が得られた。

- (1)漏水対策型水防工法である、月の輪工・釜段工によって、パイピング進展を抑制する効果がみられた。また、裏法尻から堤体下へのパイピング進展を抑制するためには対策工を設置するタイミングが重要であることがわかった。
- (2)対策工の高さの違いによって、噴砂動態が変化し、パイピングに対して最適な対策工の高さが存在することが示唆された。
- (3)対策工により緩み領域の拡大を防ぎ、地盤の損傷範囲が、無対策地盤に比べて縮小されたことで破堤に至るまでの累積漏水流量が増加したと考えられる。

今後は実験ケースを増やし、整合性を高めるとともに、水位条件や間隙水圧にも着目して検討を行っていく。

参考文献

- 1) 櫛山総平ら：透水性基盤の層構造による噴砂口動態およびパイピング進行性への影響,第51回地盤工学発表会, pp.1093-1094, 2016.
- 2) 西村征哉ら：異なる基礎地盤特性の堤防の噴砂動態・パイピング挙動と漏水対策型水防工法の効果, 河川技術論文集23巻, pp.381-386, 2017.
- 3) 高木不折ら：パイピングによる破堤過程と「月輪工」の効果の評価, 河川技術に関する論文集, 第5巻, pp.123-128, 1999.
- 4) 久楽勝行ら：水平方向浸透流下における砂地盤のパイピングについて, 第20回土質工学研究発表会, pp.1483-1484, 1985.
- 5) 西村征哉ら：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.
- 6) 澤村直毅ら：漏水流量に着目した河川堤防の噴砂・漏水, パイピング孔進展現象の考察, 第11回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.9-12, 2024.

Efficient condition of leakage countermeasure-type flood control method for piping failure of river levees

Kazuma SASAKI¹, Kenichi MAEDA², Ami OKUWA³, Kazuki KONDO¹

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

With the prolongation of high water level durations, the risk of piping failure in river levees is increasing, necessitating efficient maintenance and management. Traditional leakage countermeasure-type flood control methods for piping, such as the Kama-dan and Tsuki-no-wa methods, are used and should be inherited and strengthened in the future due to their economic efficiency and flexibility. However, there are few studies examining the performance of these methods. Therefore, in this paper, model experiments were conducted to investigate the effectiveness of the Kama-dan and Tsuki-no-wa methods, focusing on the timing and size of the countermeasures. As a result, it was observed that the countermeasures temporarily suppressed the outflow of soil particles within the foundation ground. Additionally, while increasing the scale of the countermeasures was effective in addressing a wide area, including the sand boil occurrence points, it was also observed that the foundation ground became liquefied over time, causing the countermeasures to subside, which suggests the possibility that sufficient effectiveness may not be achieved.

Key words: River levees, Piping, leakage countermeasure-type flood control method