

河川堤防における浸透破壊のパターンに関する模型実験

Model Experiments on Seepage Failure Patterns in River Levees

小松満 Mitsuru KOMATSU (岡山大学大学院環境生命科学研究科)
中原佑 Tasuku NAKAHARA (国土交通省近畿地方整備局)
高橋啓介 Keisuke TAKAHASHI (岡山大学大学院環境生命科学研究科)

河川堤防の浸透による被災事例の要因として、平成24年7月の矢部川での破堤に見られるような高透水性の基礎地盤の存在が指摘されており、これらの現象把握のための研究が進められている。一方、平成30年7月豪雨では、小田川や砂川で噴砂痕が確認されており、氾濫箇所でもパイピングが生じていた可能性が指摘されている。本報では河川堤防の浸透破壊に着眼し、模型実験を用いて複数の土層構成をモデル化し、基礎地盤特性の違いによる浸透破壊の挙動変化を検証するとともに、浸透対策工法の有効性を確認した結果について報告する。

キーワード：河川堤防，模型実験，浸透破壊

(IGC : D-04)

1. はじめに

河川堤防の浸透による被災事例の要因として、平成24年7月の矢部川での破堤に見られるような高透水性の基礎地盤の存在が指摘されている¹⁾。一方、平成30年7月豪雨では、小田川や砂川周辺の氾濫しなかった箇所でも噴砂痕が確認されており²⁾、氾濫した箇所でもパイピングが生じていた可能性が指摘されている。パイピングの発生は堤体の進行性破壊やすべり破壊につながる危険性があるものの、その発生要因は、場所によって地盤材料が異なることで堤防の止水能力が不均一になっていることや、基礎地盤の構造が複雑で内部の構造が明らかになっていないことから不明な部分が多い。そのため、堤防の破堤に至りやすい地盤条件や、基礎地盤特性の違いにおける破壊メカニズムについては未だ解明されていない点が多く、現在各機関において現象把握のための研究が進められている^{3)~7)}。しかし、実際の河川堤防の基礎地盤を構成する現地採取試料を用いたパイピング進行性破壊に対する検討はあまり実施されていない。

これまでに筆者らは実際に洪水により噴砂が発生した堤防の基礎地盤から採取した砂試料を用い、実験時の状況観察と水頭分布から砂試料の物理特性の違いによる噴砂口の発達過程および横断的な堤防の破壊速度等の挙動を把握し、進行性破壊に至るメカニズムについて考察した⁸⁾。その結果、基礎地盤の上部を構成する砂層の透水性の違いにより、噴砂を伴う破壊発生時における基礎地盤から堤体内に及ぶ動水勾配の挙動変化やメカニズムの差異を確認することができたが、複数の土層構成のパターンに対する検討は不十分であった。そこで本報では、住居や農地等のある堤防の川裏側（堤内地）における浸透破壊およびパイピング現象の発生を複数の土層構成に

おいてモデル化することで、基礎地盤特性の違いによる堤防の破壊状況の定性的な評価を行うとともに、堤防における浸透対策工法の有効性の検討を目的とした。

具体的には、長さ120cm×奥行15cm×高さ40cmの小型土槽内に基礎地盤の構成を変化させながら堤体モデルを製作し、主に実験時の観察状況から試料の物理特性の違いによる堤体の破壊に至る過程および破壊速度や規模等の挙動を把握し、浸透破壊の発生メカニズムについて考察する。また、浸透対策工法をモデル化することでそれらの有効性を検討する。なお、現状での浸透対策工法⁹⁾は、(1)堤体を対象とした強化工法として、①堤防断面を拡大することで浸透路長を延長し、平均動水勾配を減らす断面拡大工法、②堤体の川裏法尻を透水性の高い材料に置き換え、堤体に浸透した水を排水するドレーン工法、③表法面を難透水性材料で被覆し、高水位時の河川水の表法面からの浸透を抑制する表法面被覆工法等、(2)基礎地盤を対象とした強化工法として、①川表法尻に止水矢板等の遮水壁を設置することにより、基礎地盤への浸透水量を低減する川表遮水工法、②高水敷を難透水性材料で被覆することにより浸透路長を延伸させ、裏法尻近傍の浸透圧を低減するブランクット工法等が実際に採用されている。また、これら以外の工法について考えてみると、高透水性の基礎地盤がパイピング発生の要因となっていることから、そもそも基礎地盤の透水性を下げることができればパイピング防止につながると考えることができる。そこで、高透水性の基礎地盤に細粒分を注入することで透水性を低下させる新たな工法として、カオリクレア懸濁液¹⁰⁾（以下、粘土懸濁液）を用いて注入した際の効果について検討する。

2. 実験方法

2.1 模型実験土槽および土層構成

本研究で用いた模型実験土槽の概略図を図-1 に示す。土槽寸法は長さ 120cm×奥行 15cm×高さ 40cm（上流側長さ 10cm は水位調整槽）であり、複数の土層構成のパターンに対する検討を目的として、3 台の土槽を用いて同時に実験ができるようにした。一方、土層構成は、基礎地盤のパイピングに対する安全性照査¹¹⁾において、透水性地盤で堤内地に難透水性の被覆土層がない場合とある場合で評価が異なることを踏まえ、図-2 に示すように、2 種類とした。給水側から長さ 80cm を基盤層とし、下流側は長さ 20cm の行止層、最下流は長さ 10cm の排水層をそれぞれ高さ 10cm で設置した。堤体は給水側から長さ 80cm の位置を法尻として勾配 1:2、高さ 25cm で製作した。一方、基盤層上部に難透水性層がある場合においては 2.5cm の被覆土層を設置した。実験方法は、実験開始前の基礎地盤表面（高さ 10cm、被覆土層を設置したケースではその表面となる高さ 12.5cm）に調整槽の水位を固定し、排水礫槽の水位が同じになるまで基礎地盤および行止層（被覆土層設置のケースは被覆土層も含む）内を浸透させて初期飽和を行った後、定水位タンクは 2.5cm/6 分で段階的に上昇させた。

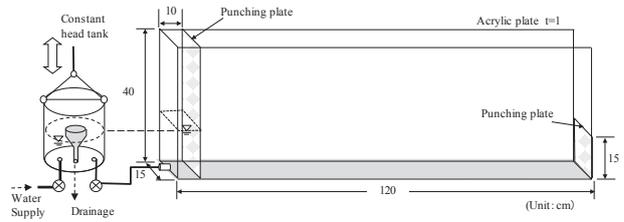


図-1 模型実験土槽概略図

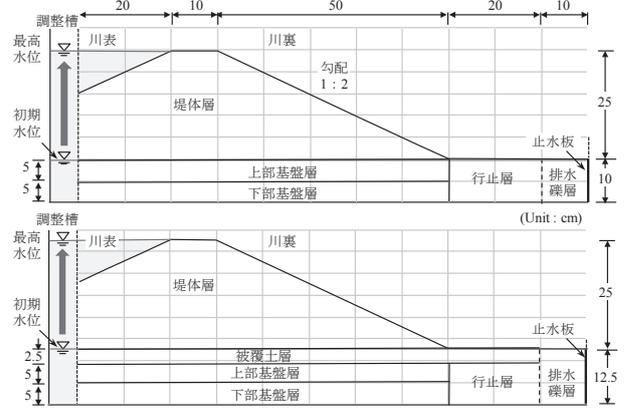


図-2 土層構成（上：被覆土層なし、下：被覆土層あり）

2.2 実験試料

図-2 に示した土層構成に用いた試料を下記に示す⁸⁾。

①砂(Sa)1~3：岡山県内の一級河川において過去に噴砂が確認された箇所を含む計 3 箇所から採取された砂試料を用い、砂 1：高透水性、噴砂箇所、氾濫平野、透水係数 $k=3.77 \times 10^{-4}$ m/s (相対密度 $D_r=90\%$)、 $k=6.50 \times 10^{-6}$ m/s ($D_r=125\%$)、 $k=3.58 \times 10^{-7}$ m/s ($D_r=150\%$)、砂 2：中透水性、旧河道、 $k=9.43 \times 10^{-5}$ m/s ($D_r=90\%$)、砂 3：低透水性、氾濫平野、 $k=2.63 \times 10^{-6}$ m/s ($D_r=90\%$) として分類した。

②碎石(G)：7 号碎石 ($k=5.47 \times 10^{-3}$ m/s)。下部基盤層のほか、排水礫層に同じ試料を用いた。

③まさ土(S)：岡山県産 ($k=9.67 \times 10^{-6}$ m/s)。

④混合材料(S:C)：まさ土：粘土（岡山県産）=7：3（乾燥重量比）で混合した試料で、 $k=1.75 \times 10^{-7}$ m/s である。

⑤低透水性材料(S:C:B)：まさ土：粘土：ベントナイト（山形県産）=7：0.5：2.5（乾燥重量比）で混合した試料で、 $k=1.17 \times 10^{-9}$ m/s である。

2.3 実験ケース

実験ケースを表-1 および図-3 に示す。Case1 は堤体および基盤層の透水係数の違い、Case2 は透水性基盤層がある場合の違い、Case3 は堤体および基盤層を構成する層の透水係数の違い、Case4 は上部基盤層を構成する砂層の透水係数の違い、Case5 は被覆土層がある場合の違い、Case6 は浸透対策工法（遮水壁設置、粘土懸濁液注入：全体に注入する目的で中央から注入）を設置した場合の各ケースにおいて破壊の形態を検証した。

表-1 実験ケース一覧

Case	下部基盤層	上部基盤層	堤体	被覆土層	行止層	対策工
1	1	まさ土(S)		—	—	—
	2	混合材料(S:C)			—	
2	1	碎石(G)	まさ土(S)		まさ土(S)	
			混合材料(S:C)		混合材料(S:C)	
3	1	砂 1 (Sa1)($D_r=125\%$)	まさ土(S)		まさ土(S)	
			砂 1 (Sa1) ($D_r=150\%$)		—	
				砂 1 (Sa1) ($D_r=90\%$)	—	
4	1	砂 2 (Sa2) ($D_r=90\%$)	—	—		
			砂 3 (Sa3) ($D_r=90\%$)	—		
				砂 3 (Sa3) ($D_r=90\%$)	—	
5	1	砂 1 (Sa1) ($D_r=90\%$)	混合材料(S:C)	低透水性材料 (S:C:B)	混合材料(S:C)	
						砂 2 (Sa2) ($D_r=90\%$)
						砂 3 (Sa3) ($D_r=90\%$)
6	1	砂 2 (Sa2) ($D_r=90\%$)	—	—	遮水壁設置	
					粘土懸濁液注入	

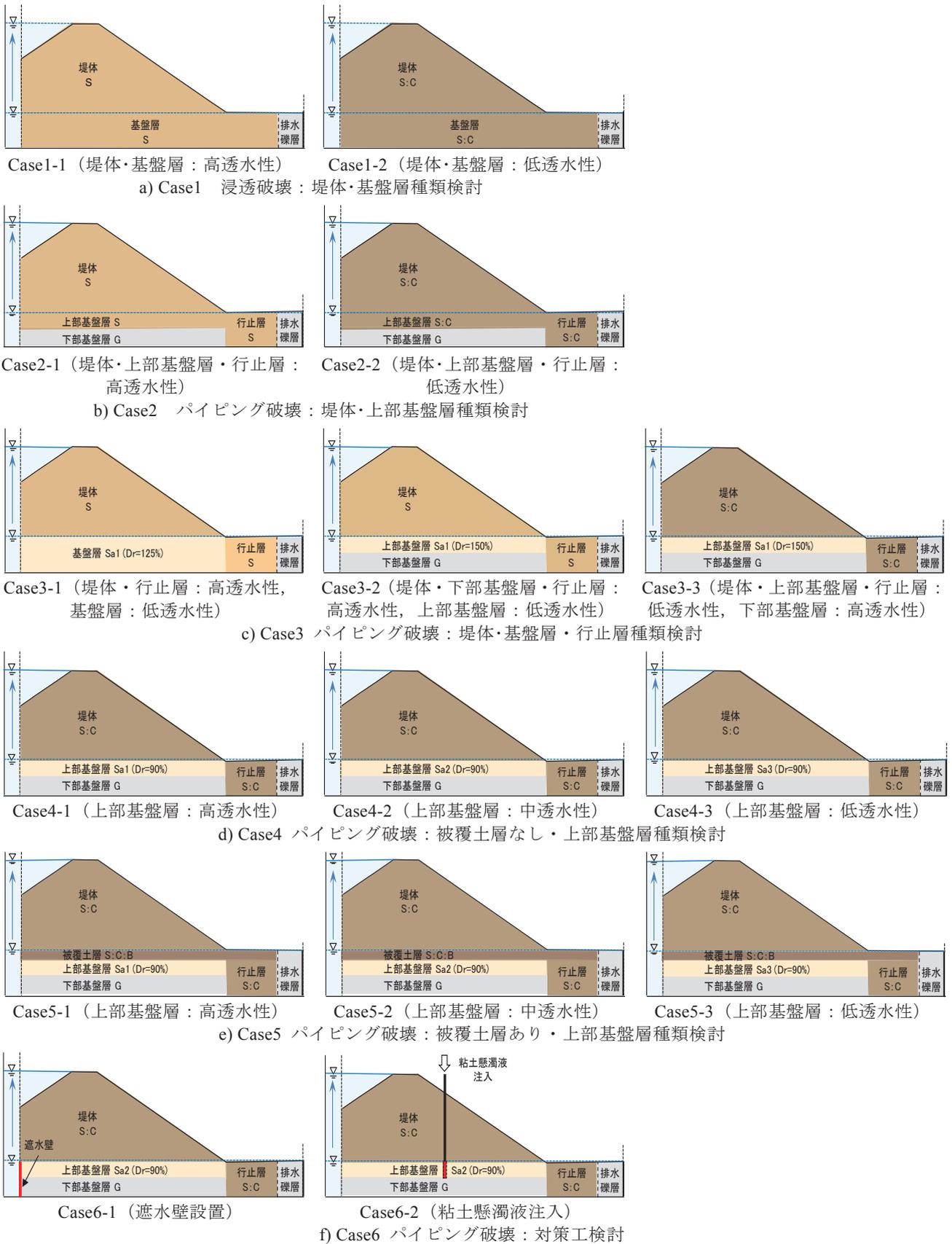


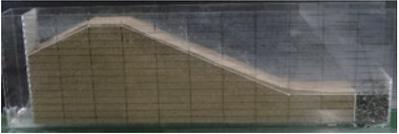
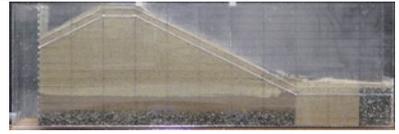
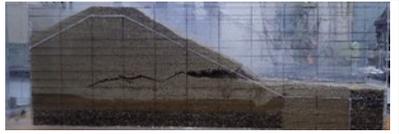
図-3 実験ケース

3. 実験結果

表-2 に実験結果として、実験終了時の様子を側面から撮影した状況と破壊の有無および規模を一覧表にまとめ

る。また、以下に各実験ケースでの観察状況および調整槽内水位の測定結果について述べる。なお、実験は定水位タンクの位置が天端まで達した後(試験開始 60 分後)、その状態で堤体に変状が確認されるまで継続した。

表-2 実験結果一覧

Case	1	2	3
1	浸透破壊：堤体・基盤層種類検討		
			
	<堤体・基盤層：高透水性> 破壊規模：大（天端破壊）	<堤体・基盤層：低透水性> 破壊規模：破壊なし（漏水のみ）	
2	パイピング破壊：堤体・上部基盤層種類検討		
			
	<堤体・上部基盤層・行止層：高透水性> 破壊規模：大（法尻円弧すべり）	<堤体・上部基盤層・行止層：低透水性> 破壊規模：小（法尻亀裂）	
3	パイピング破壊：堤体・基盤層・行止層種類検討		
			
	<堤体・行止層：高透水性， 基盤層：低透水性> 破壊規模：大（天端破壊）	<堤体・下部基盤層・行止層：高透水性， 上部基盤層：低透水性> 破壊規模：小（噴砂・法尻破壊）	<堤体・上部基盤層・行止層：低透水性， 下部基盤層：高透水性> 破壊規模：小（噴砂・法尻破壊）
4	パイピング破壊：被覆土層なし・上部基盤層種類検討		
			
	<上部基盤層：高透水性> 破壊規模：大（砂層噴出・法尻破壊）	<上部基盤層：中透水性> 破壊規模：中（砂層噴出・法尻破壊）	<上部基盤層：低透水性> 破壊規模：小（砂層噴出・法尻破壊）
5	パイピング破壊：被覆土層あり・上部基盤層種類検討		
			
	<上部基盤層：高透水性> 破壊規模：大（砂層噴出・堤体沈下）	<上部基盤層：中透水性> 破壊規模：大（砂層噴出・堤体沈下）	<上部基盤層：低透水性> 破壊規模：大（砂層噴出・堤体沈下）
6	パイピング破壊：対策工検討		
			
	<遮水壁設置> 破壊規模：小（表層すべり）	<粘土懸濁液注入> 破壊規模：小（噴砂・法尻破壊）	

3.1 Case1（浸透破壊：堤体・基盤層種類検討）

Case1 は単一土層構成に対する浸透破壊の違いを検討したケースであり，Case1-1はまさ土，Case1-2は混合材料となっており，透水性の違いはまさ土：混合材料=55：1となっている．まず，Case1-1では，開始33分後に法尻付近において漏水が発生し，78分後に排水礫層からの流出を確認した．104分後には堤体が破壊し始め，その後円弧状に破壊が進行し，214分後に天端が完全破壊し

た．一方，Case1-2では，開始55分後に法尻付近において漏水が発生し，64分後に排水礫層からの流出を確認したが，その後は堤体の破壊には至らず，実験は361分で終了した．これらから，基礎地盤および堤体が同一試料の場合，試料の透水性が高いと大規模な浸透破壊に至る可能性が高いことが確認できた．なお，このケースでは調整槽内水位の測定は実施しなかった．

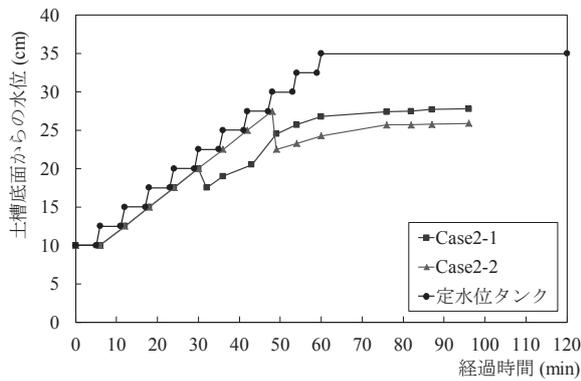


図-4 調整槽内水位測定結果 (Case2)

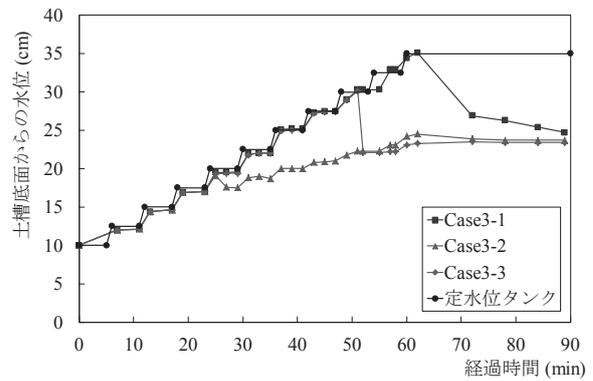


図-5 調整槽内水位測定結果 (Case3)

3.2 Case2 (パイピング破壊: 堤体・上部基盤層種類検討)

Case2 は Case1 の下部基盤層を砕石に置き換えたケースである。図-4 に土槽底面を基準とした定水位タンクの高さと調整槽内水位の測定結果を示す。まず、Case2-1 のまさ土では、開始 6 分後に法尻付近において漏水が発生し、18 分後に排水礫層からの流出を確認した。25 分後には法尻の少し上から堤体の破壊が始まり、26 分後には破壊箇所から大量の漏水が発生し、31 分後には調整槽内水位の減少が確認された。この時点で、漏水流量が流入流量を上回ったことが分かる。その後は円弧状に破壊が徐々に進行したが、103 分後からは変化が見られなかった。一方、Case2-2 では、開始 10 分後に法尻付近において漏水が発生し、35 分後に排水礫層からの流出を確認した。48 分後には法尻付近から勢いよく水が溢れ出し、調整槽内水位が減少し、法尻での亀裂が確認された。その後は変化が見られず、実験は 120 分で終了した。

実験終了後の観察状況から、Case2-1 では堤体のすべり破壊が見られた一方、Case2-2 では法尻付近において小規模な亀裂が発生したが、破壊には至らなかった。これらから、基盤層下部に透水性の高い砕石が存在する場合において、堤体および基礎地盤上部の試料の透水性が高いと破壊の規模が大きいことが判明した。

3.3 Case3 (パイピング破壊: 堤体・基盤層・行止層種類検討)

Case3 は下部基盤層は Case3-1 が砂 1、Case3-2 および Case3-3 は砕石である。また、上部基盤層はいずれも砂 1 で構成されているものの、Case3-1 は相対密度が他よりも低い。さらに、堤体は Case3-1 および Case3-2 がまさ土であるのに対し、Case3-3 は混合材料である。図-5 に調整槽内水位の測定結果を示す。まず、Case3-1 では、開始 12 分後に法尻付近において漏水が発生し、48 分後に排水礫層からの流出を確認した。60 分後には法尻の少し上から堤体が破壊し始め、徐々に円弧状に破壊が進行し、70 分後には天端が完全に破壊した。Case3-2 では、開始 6 分後に法尻付近において漏水が発生し、25 分後には法尻付近で破壊が始まるとともに排水礫層からの流出および噴砂が確認された。この時点で調整槽内水位が減少している。その後、破壊は進行したものの小規模で

あり、57 分後以降は変化が見られなかった。Case3-3 では、開始 12 分後に法尻付近において漏水が発生し、37 分後に排水礫層からの流出を確認した。51 分後には法尻付近で破壊が始まるとともに噴砂が確認された。その後は法尻付近のみでの破壊にとどまり、85 分後以降は変化が見られず、実験は 90 分で終了した。

実験終了時の状況から、Case3-1 では天端まで破壊に至り、Case3-2 では噴砂を伴う法尻の小規模な破壊が生じた。一方 Case3-3 では法尻付近のみでしか堤体の破壊が起らなかった。これらから、上部基盤層と堤体の透水性がいずれも高く、その値がほぼ等しい場合(まさ土: $k=9.67 \times 10^{-6} \text{m/s}$, 砂 1: $k=6.50 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ($D_r=125\%$))には大規模な破壊が起こり、堤体の透水性が上部基盤層と異なる場合、堤体の透水性が高いと破壊の規模が大きくなることが判明した。ただし、まさ土: $k=9.67 \times 10^{-6} \text{m/s}$, 混合材料: $k=1.75 \times 10^{-7} \text{m/s}$, 砂 1: $k=3.58 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ($D_r=150\%$) を踏まえて Case2 と比較すると、Case2-1 と Case3-2 から上部基盤層の透水性が低くなると噴砂が発生するものの、破壊の規模は小さくなる事が分かる。また、Case2-2 と Case3-3 では、上部基盤層の透水係数はほぼ同程度であるため、破壊の規模が同一であったものと判断できる。

3.4 Case4 (パイピング破壊: 被覆土層なし・上部基盤層種類検討)

Case4 は上部基盤層の砂層に対して異なる材料を用いたケースである。図-6 に調整槽内水位の測定結果を示す。まず、Case4-1 では、開始 6 分後に法尻付近において漏水が発生し、19 分後に排水礫層からの流出を確認した。31 分後に堤体斜面がすべり始め、39 分後には法面中央部よりやや下から破壊が始まり、同時に破壊箇所から噴砂が確認された。その後は砂の噴出および堤体の沈下とともに破壊が進行した。138 分後からは変化が見られなかった。Case4-2 では、Case4-1 とほぼ同時刻の開始 6 分後に法尻付近において漏水が発生し、16 分後に排水礫層からの流出を確認した。31 分後に堤体斜面がすべり始め、42 分後には法面中央部よりやや下から破壊が始まり、同時に破壊箇所から噴砂が確認された。その後、砂の噴出が激しくなり、堤体の沈下とともに破壊が進行した。113

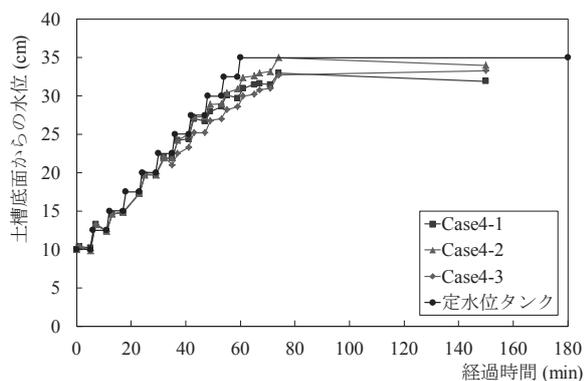


図-6 調整槽内水位測定結果 (Case4)

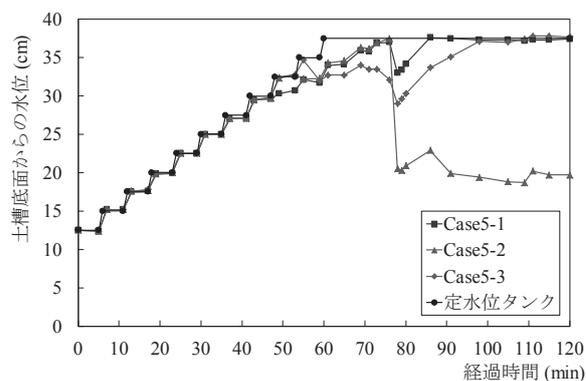


図-7 調整槽内水位測定結果 (Case5)

分後以降は変化が見られなかった。また、Case4-3 では他と同様に開始 6 分後に法尻付近において漏水が発生し、20 分後に排水礫層からの流出を確認した。32 分後に堤体斜面がすべり始め、33 分後に法尻より少し上の位置から破壊が開始し、同時に噴砂が確認された。その後、砂の噴出および堤体の沈下とともに破壊が進行したが、破壊は小規模であり、96 分後以降は変化が見られなかった。なお、実験は 180 分で終了した。

実験終了時の状況から、Case4-1 と Case4-2 はほぼ同様の堤体破壊を生じており、規模は Case4-1 が大きかった。Case4-3 では破壊が法尻付近のみであり小規模であった。これらから、基礎地盤上部の透水性が高いと破壊の規模が大きくなるのが分かる。実験後に実験前の上部基盤層の表面に相当する高さまで土を取り除いた状況(以下、開削状況)からも Case4-1、Case4-2 においては砂層の流出を確認した。一方、Case4-1 と Case3-3 を比較すると、砂 1 の透水係数は $k=3.77 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ($D_r=90\%$)、 $k=3.58 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ($D_r=150\%$) であり、1000 倍程度の違いがある。実験後の状況を比べても明らかのように、砂層が同一材料であっても相対密度の違いで破壊の規模が異なるのが分かる。

3.5 Case5 (パイピング破壊：被覆土層あり・上部基盤層種類検討)

Case5 は Case4 の上部に低透水性の被覆土層を有するケースである。図-7 に調整槽内水位の測定結果を示す。図-6 と比較すると明らかのように、約 50 分後までは、概ね定水位タンクと一致しており、被覆土層により基盤層の水圧が上昇している状況を示している。Case5-1 では、開始 38 分後に排水礫層からの流出を確認し、40 分後に被覆土層の法尻近傍で盤ぶくれが確認された。48 分後に法尻より少し上の位置から堤体の破壊が開始し、同時に噴砂も確認した。その後は法尻と平行な亀裂を生じるように破壊が進行し、73 分後以降は変化が見られなかった。Case5-2 では開始 44 分後に被覆土層の法尻近傍からやや離れた箇所まで盤ぶくれが発生し、52 分後に排水礫層からの流出が確認された。53 分後に法尻付近から堤体の破壊が始まるとともに噴砂が発生し、その後は砂の噴出とともに法尻中央部に円形の穴を形成する形で破壊

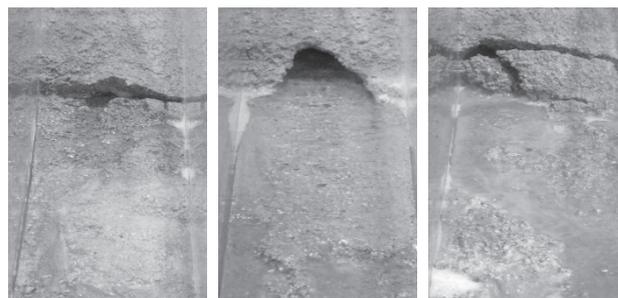


写真-1 実験終了時の状況 (Case5)

写真-1 実験終了時の状況 (Case5)

が進行した。85 分後にはこの穴は堤体を上下流方向に貫通しており、以降は生じた穴に水が流れるだけで堤体に破壊の広がり等の変化は見られなかった。Case5-3 では開始 27 分後に排水礫層からの流出を確認し、46 分後に被覆土層の法尻近傍で盤ぶくれが発生した。58 分後に法尻付近で堤体の破壊が始まるとともに噴砂が発生し、以降は上流側から見て堤体右側に亀裂を生じるように破壊が進行し、112 分後以降は変化が見られなかった。実験は 120 分で終了した。

実験終了時の状況を写真-1 に示す。Case5-1 と Case5-3 では堤体に亀裂が発生していた。一方、Case5-2 では法尻中央部に大きな穴が形成され、この穴は堤体を貫通する大規模な破壊となった。これらから、被覆土層がある場合、砂層の流出が大規模になり、堤体の沈下が全体的に生じることを示唆している。なお、実験終了後の開削状況によりいずれのケースにおいても大規模な砂層の流出を確認した。

約 78 分後にいずれのケースにおいても水みちの発生により漏水量が増加して急激に水位が低下した。その後、通水量が追いつかず定水位タンクの水位が低下したため、定水位タンクへの水道からの供給量を増加させたために、水位が回復した。

3.6 Case6 (パイピング破壊：対策工検討)

Case6 は Case4-2 において対策工を設置したケースである。Case6-1 は川表側に矢板に見立てた遮水板を設置し、Case6-2 は上部基盤層の砂層内に粘土懸濁液¹⁰⁾を注入したケースである。図-8 に調整槽内水位の測定結果を

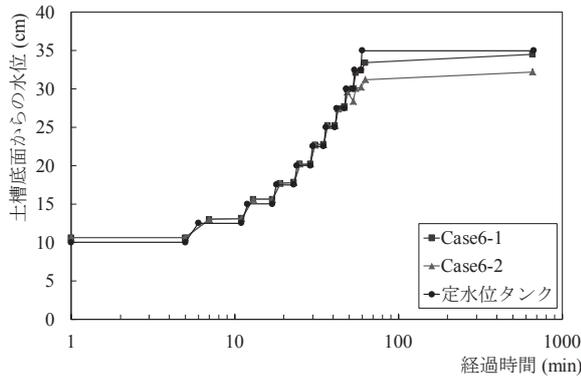


図-8 調整槽内水位測定結果 (Case6)

示す。Case6-1では、開始19分後に法尻付近で漏水が発生し、33分後に同じ法尻付近で漏水に伴うごくわずかな表層すべりを確認した。35分後に排水礫層からの流出を確認したが、その後は変化が見られなかった。Case6-2では、開始17分後に漏水と排水礫層からの流出を確認した。31分後には法尻付近において表層すべりを確認した後、50分後に法尻が小規模に破壊した。その際、注入したクレーの流出と噴砂を確認した。その後はわずかに法尻の破壊が進行したが、堤体の沈下は確認されなかった。なお、実験は670分で終了した。

実験終了時の状況から、Case6-1では法尻付近において小規模な表層すべりが発生したが、法尻の破壊には至らなかった。Case6-2では同一の土層構成であるCase4-2よりも破壊の規模が小さかった。これらから、対策工が進行性破壊を抑制する役割を果たしていることが分かった。また、実験後の開削状況からいずれのケースにおいても砂層の流出はほとんど見られないことを確認した。

4. 考察

4.1 単一土層の場合

単一土層であるCase1では、基盤層と堤体の透水性が同じであるため特定の水みちが形成されず、複数の箇所から水の浸透が生じる形態となった。Case1-1では、動水勾配が大きくなる法尻付近から漏水が起これ、堤体破壊につながった。Case1-2では、法尻付近からの漏水が確認されたが、基盤層および堤体の透水性が低いため破壊には至らなかった。これらから、単一土層の場合は構成材料の透水性が高いほど川表側から堤体内に水が浸透し、川裏側の法面が破壊しやすいことが示唆された。また、Case3-2を除いて堤体がまさ土で構成された3つのケースで円弧滑りが発生しており、堤体の土質により破壊の形状が異なる結果が示された。混合材料の場合は、この現象が認めれないことから、細粒分による粘着力の増加が堤体の安定に寄与しているものと考えられる。

4.2 透水性基礎地盤を有する場合 (被覆土層なし)

基礎地盤下部に碎石が存在するCase2では、透水性の

高い基盤層に水みちが形成され、法尻付近から漏水が発生し、破壊につながる現象が見られた。Case2-1では、漏水から時間が経過すると破壊により水みちの穴を塞いでしまい、法尻付近で新たな水みちを形成しようとするため破壊が広がった。水みちの穴から漏水し破壊につながる場合において水位は低下するが、穴が塞がれてから新たな水みちを形成している間、水位は上昇した。主に碎石に浸透するため、堤体の様々な箇所から浸透するCase1-1に比べ破壊は小規模であった。Case2-2では、一度形成された水みちの穴が塞がれないため、形成された水みちから漏水し続ける形となり、その箇所以外での浸透は生じていない。そのため、碎石とつながって局所的な透水性が高くなる部分が生じることで、漏水が発生すると水位は一気に低下し、その後はCase2-1よりも低い水位となった。基盤層上部および堤体の透水性が低いため、最終的に法尻に小規模なすべりが発生したもの、堤体破壊には至らなかった。

Case3-1では、砂とまさ土の透水係数が概ね同じであるため明確な水みちは形成されず、Case1-1と同様に浸透破壊が生じた。破壊メカニズムもCase1-1同様に法尻付近から破壊が開始し、その後、法尻がすべり破壊し、最終的に天端への破壊に至った。Case3-2では、基礎地盤内に形成された水みちにより法尻付近から漏水するとともに破壊が発生し、その後砂層が流出する噴砂が確認された。しかし、砂の相対密度が高く透水性が低いため、大規模な砂層の流出にはつながらず、破壊は小規模にとどまった。また、Case2-1と同様に形成された水みちを塞いで新たな水みちが形成されるため、堤体の透水性が低いCase3-3よりも破壊の規模が大きかった。Case3-3では、破壊開始後に砂層が流出する噴砂が確認されたが、砂層の相対密度が高く透水性が低いため、破壊は小さい。さらに破壊開始直後の水位の低下量が著しいが、水みちが塞がれていないことにより、漏水量が多かったものと考えられる。

次に、Case4-1、Case4-2、Case4-3においては、いずれのケースにおいても基礎地盤内に明確な水みちが形成され、法尻付近の地盤が盛り上がり破壊に至る現象が見られた。さらに砂層の相対密度が低いため透水性が高く、パイピングの進行により砂層が流亡した箇所に堤体が沈下する現象が見られた。破壊の規模については、透水性の高いCase4-1とCase4-2では開始60分後においてほぼ同程度であり、透水性の低いCase4-3では他の砂よりも破壊が小規模であった。このことから基礎地盤上部砂層の透水係数が高いほど破壊の規模が大きいたことが確認された。またCase3-3において基礎地盤上部に相対密度150%の状態で行ったが、同じ砂でも相対密度90%のCase4-1の方が破壊の規模が大きかったため、砂層の締め固まり具合によって破壊の規模が異なることも確認できた。なお、Case4では堤体の破壊後に調整槽内水位が急激に減少する現象は確認されなかった。これは、水位上昇に伴って漏水は増加するものの、堤体が徐々に破

壊することで流路を塞いだためである。

4.3 被覆土層を有する場合

被覆土層を有する Case5 では、いずれのケースにおいても Case4 で初期に見られたような法尻付近の漏水は生じず、被覆土層の法尻に近い箇所では盤ぶくれが発生した。これは被覆土層の透水性が低いことが影響しており、調整槽内水位からも分かるように高い水圧が被覆土層底面に作用していることを示している。盤ぶくれが生じた後、しばらくして勢いよく砂層が噴出することによって堤体が沈下する現象を確認した。特に Case5-2 では、パイピングの進行によって発生した水みちの穴が法尻中央部分を上下流方向に貫通しており、さらに堤体の下層部分の沈下によって堤体内に大きな空洞ができていることから、被覆土層がある場合、大規模な破壊となることが分かった。なお、透水性の最も低い砂を用いた Case5-3 においても、上流側から見て堤体の右側に沈下に伴う大きな亀裂を生じていたことから、砂の透水性が低い場合でも大きな亀裂を伴う破壊を生じる可能性があることが示唆された。

4.4 浸透対策工法の検討

基盤層に止水板を設置した Case6-1 では、法尻付近において小規模な表層すべりが発生したものの、長時間経過しても堤体の破壊に至らず砂層の流出も認められなかったことから、基盤層にパイピングによる水みちは形成されていないことが分かった。このことから、止水板が基盤層への水の浸透を防いだために水みちは形成されず、パイピングによる進行性破壊を抑制したものと考えられる。また、上部基盤層に粘土懸濁液を注入した Case6-2 では、同一の土層構成である Case4-2 と比較すると堤体の破壊に至った時間が遅かった。また、排水礫層からの流出を確認した際にもその流量は少なく、さらに実験終了時の砂の流出規模や堤体の破壊規模も小さかった。このことから、注入した粘土懸濁液が基盤層の透水性を低減させ、流量を抑制することで、パイピングの規模を軽減させる役割を果たしたと考えられる。なお、粘土懸濁液の注入管の先端には底面を閉塞した直径 1cm×長さ 3cm、開口率 45%、周囲に 75 μ m のステンレスメッシュを巻きつけた円筒状のフィルターを取り付けており、これが砂層の中央高さになるように設置した。そのため、注入は最初に砂層に対して水平方向に広がるものの、その後は下部基盤層にも広く充填される形となった。

今回は矢板による止水と砂層の透水性を低下させる粘土懸濁液の注入工法のみを検討となったが、両者を比較すると、例えば川表側の連続遮水壁の設置により地下水位が変化し、川裏側での地下水環境に影響が生じる可能性がある。例えば、川裏側でのドレーン設置が困難な場合等、砂層の透水係数を注入によって低下させることで堤体の破壊を抑制できる可能性がある。

表-3 漏水および破壊の発生開始時刻一覧
(表内の数字は分、-は発生なしを示す)

Case	1		2		3	
	漏水	破壊	漏水	破壊	漏水	破壊
1	33	104	55	-		
2	6	25	10	48		
3	12	60	6	25	12	51
4	6	31	6	31	6	32
5	48		52		58	
6	19	33	17	50		

4.5 漏水および破壊の発生時刻の比較

表-3 に漏水および破壊の発生開始時刻一覧を示す。単一土層である Case1 では、堤体と基盤層が低透水性の方が漏水発生が遅く、破壊は発生しなかった。Case2 や Case3 でも堤体と上部基盤層が低透水性の方が漏水および破壊の発生が遅かった。これらから、堤体および基盤層の透水性が漏水および破壊の発生時刻に影響を与える要因の一つとなっていることが分かる。また、Case4 では、漏水や破壊の発生時刻は変わらないものの、先述したように、上部基盤層の透水性の違いによって砂層の流出形態が異なることが特徴として挙げられる。Case5 では、上部基盤層の透水性の違いによって漏水と破壊が同時に生じる盤ぶくれの発生時刻が異なることが分かる。最後に、Case6 では未対策の Case4-2 と比較するといずれも漏水と破壊の発生時刻が遅くなっており、浸透対策工の有用性が示されたものと判断できる。

5. まとめ

本研究では河川堤防の浸透破壊に着眼し、模型実験を用いて複数の土層構成をモデル化し、基礎地盤特性の違いによる浸透破壊挙動の変化を検証した。その結果、基礎地盤の透水性の違いにより、噴砂を伴う破壊形態が異なる状況が把握できた。さらに、浸透対策工法をモデル化することで、それらの有効性を確認した。

以下に得られた知見を列挙する。

- (1) 基礎地盤と堤体が同一の材料の場合、川裏側の法面がすべり破壊に至る現象が見られた。また、透水性の違いにより破壊の有無や破壊時の規模が異なった。
- (2) 透水性の基礎地盤が存在し、その透水性が堤体と異なる場合、基礎地盤内に水みちが形成されて浸透が進み、川裏側の法尻付近から土砂が噴出することで破壊に至るメカニズムを確認した。また、基礎地盤上部の透水性の違いにより堤体の破壊に至るまでの時間や破壊規模が異なり、パイピングの進行規模が異なることが示唆された。さらに、堤体の透水性が低い場合、破壊土が流出する過程で流路を塞ぎやすく、新たな水みちを形成するため破壊の規模が大きくなることが判明した。
- (3) 被覆土層が存在する場合、盤ぶくれから漏水が発生

する現象が示された。また、透水性の違いにより堤体の破壊に至るまでの時間は異なるものの、砂層が透水性の低い材料であっても大規模な破壊に至る可能性があることが示唆された。

- (4) 浸透対策工法として用いられている遮水壁に加え、粘土懸濁液注入による効果が確認でき、高透水性の基礎地盤に細粒分を注入することでパイピングを抑制できることが示された。

最後に、本研究では試料の透水性のみに着目したが、破壊の規模は透水性だけでなく、細粒分が存在することによる粘着力が及ぼす強度増加にも大きく左右されるものであることから、今後は試料の強度についても検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 中島秀雄:図説 河川堤防, 技法堂出版, pp.102-104, 2003.
- 2) 土木学会中国支部: 2018年7月西日本豪雨災害調査報告書, p.96, 2018.
- 3) 小高猛司, 崔瑛, 林愛実, 森三四郎, 李圭太: 基礎地盤の複層構造が河川堤防の浸透破壊に及ぼす影響, 第52回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.961-962, 2017.
- 4) 西村柁哉, 前田健一, 櫛山総平: 異なる基礎地盤特性の堤防の噴砂動態・パイピング挙動, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, pp.199-200, 2017.
- 5) 西村柁哉, 前田健一, 櫛山総平, 高辻理人, 泉典洋, 古溝幸永: 簡易動的コーン貫入試験から見る河川堤防のパイピング進展メカニズム, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1067-1068, 2018.
- 6) 森三史郎, 林愛実, 森智彦, 小高猛司, 李圭太, 崔瑛: 複層基礎地盤の上部砂層の透水性と層厚が堤体法尻部に及ぼす影響に関する浸透流解析, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, pp.187-188, 2017.
- 7) 東拓生, 石原雅規, 佐々木哲也: 河川堤防の浸透による進行性破壊に対するドレーン工法の対策効果に関する模型実験, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1021-1022, 2018.
- 8) 小松満, 増山博之, 新村卓也, 館川逸朗: 透水性基礎地盤に起因する河川堤防のパイピング進行性破壊に関する模型実験, 地盤と建設, Vol.36, No.1, pp.111-118, 2018.
- 9) 国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き(改定版), p.72, 2012.
- 10) 高橋啓介, 小松満, 瀧本弘治: カオリンクレー注入による砂層の透水性低下工法に関する水平一次元浸透実験, 第54回地盤工学研究発表会発表講演集, No.0432, pp.863-864, 2019.
- 11) 国土交通省河川局治水課: 河川堤防設計指針, p.6, 2002.

(2019年6月17日 受付)

