

堤防模型実験の実務適用性と法尻排水工の対策効果の検討 Practical applicability of embankment model test and effect of the countermeasure by drainage installed in the slope toe

中村宏樹¹, 小高猛司², 李 圭太³, 山田紘太郎⁴, 福永葵衣⁴, 大橋健司⁴

- 1 名城大学大学院・理工学研究科・社会基礎デザイン工学専攻
- 2 名城大学・理工学部・社会基礎デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 日本工営・大阪支店
- 4 元名城大学学生

概要

我々の研究グループでは、高透水性基礎地盤を有する堤防の模型実験を行い、基盤漏水が堤体変状に対して与える影響およびメカニズムに関する検討を行ってきた。その結果、高透水性基礎地盤と被覆土層あるいは堤体との間に存在する透水性のギャップにより、堤体裏法尻付近への動水勾配の集中による噴砂・噴水をトリガーとして地層間に発達するパイピングや、裏法尻の小規模崩壊から進展する大規模すべり崩壊などを確認するとともに、そのメカニズムの解明を行ってきた。本論文では、我々が実施してきた模型実験の実務適用性を検討するために、福岡らの提案する堤防脆弱性指標を用いて実際の河川堤防との力学的相似性を考察する。さらに、浸透すべり破壊の抑制に効果がある堤体法尻部に設置する排水工について、その大きさと設置位置、さらに上層基礎地盤の透水性の影響について検討する。

キーワード：河川堤防，対策工，浸透破壊，堤防脆弱性指標，排水工

1. はじめに

名城大学の研究グループは、透水性が大きく異なる2層の基礎地盤を有する堤防の模型実験を行い、基礎地盤の漏水が堤体変状に対して与える影響およびメカニズムに関して検討を行ってきた¹⁾²⁾。その結果、非常に透水性の高い基礎地盤上に、それより透水性が低い基礎地盤が存在する複層構造の基礎地盤上の堤防では、法尻付近に高い動水勾配が集中することによって、破堤に結び付くすべり破壊やパイピングの発生が確認された。また、そのような高透水性基礎地盤上の堤防に発生する法尻付近のパイピングとそれをトリガーとする堤体の浸透すべり破壊を抑制するためには、法尻の堤体内に基礎地盤からの排水工を設けることが重要であることを示した³⁾。その際、堤体外の堤内地に排水工を設けても効果が低いことも併せて示した³⁾。

しかし、模型実験は実際の河川堤防と比較して極めて小さいため、たとえ実際の被災事例とおぼしき現象が模型実験で再現できたとしても、実現象との相似性を明確にする必要があった。そこで、田端ら⁴⁾は、河川堤防の形状、構造、透水性そして洪水継続時間などから総合的に被災危険度を評価できる堤防脆弱性指標を提案し、実河川の被災事例との高い適合性を示した。さらに、福岡ら⁵⁾は、名城大学で実施してきた模型実験結果についても堤防脆弱性指標を用いて評価を行った。その結果、裏法すべりや堤防決

壊など破壊の程度に応じた堤防脆弱性指標の値は、模型実験と現地堤防でほぼ一致することを示し、堤防脆弱性指標が力学的相似条件を示すことを明らかにした。

本論文では、まず、模型実験の堤防脆弱性指標の観点から実務への適用性について述べた後、浸透すべり破壊に抑制効果がある堤体法尻部に設置する排水工について、その大きさと設置位置、さらに、上層基礎地盤の透水性の影響について検討する。

2. 模型実験の実務適用性の検討

2.1 実験概要

図1、2および3に、それぞれ小型、中型、大型の3種類の寸法の模型実験の概要を示す。図2の中型模型が、既往の研究で採用してきた寸法である。小型模型、大型模型の寸法をそれぞれ中型模型の0.75倍、1.5倍とした。

本実験では、表1に示すように、3種類の寸法で堤体(領域III)と上層基礎地盤(領域II)の地盤材料の組み合わせによって、合計9パターンの実験を行った。地盤材料には、三河珪砂3号砂(間隙比 $e=0.95$, 透水係数 $k=2.67 \times 10^{-3} \text{m/s}$)、6号砂と同粒径の色砂を9:1の質量比で混合した6号カラー(間隙比 $e=1.06$, 透水係数 $k=4.88 \times 10^{-4} \text{m/s}$)、8号砂(間隙比 $e=1.06$, 透水係数 $k=3.98 \times 10^{-5} \text{m/s}$)、6、7および8号砂を5:2:5の質量比で混合した678号混合砂(間隙比 $e=1.06$,

表1 各 Case の地盤材料

Case	寸法	地盤材料		
		領域 I	領域 II	領域 III
Case 1	小型	3号砂	6号カラー	678号混合砂
Case 2			8号砂	678号混合砂
Case 3			6号カラー	8号砂
Case 4	中型	3号砂	6号カラー	678号混合砂
Case 5			8号砂	678号混合砂
Case 6			6号カラー	8号砂
Case 7	大型	3号砂	6号カラー	678号混合砂
Case 8			8号砂	678号混合砂
Case 9			6号カラー	8号砂

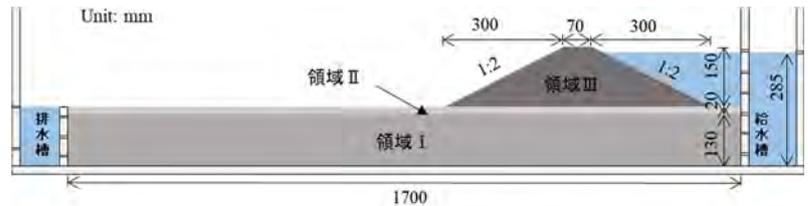


図1 小型模型

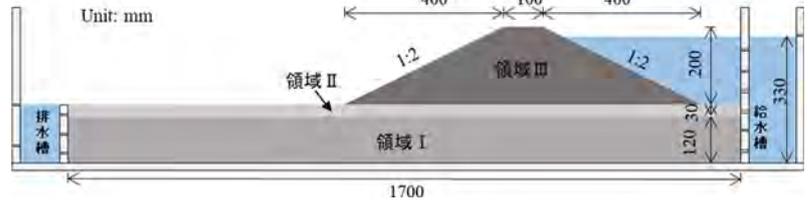


図2 中型模型

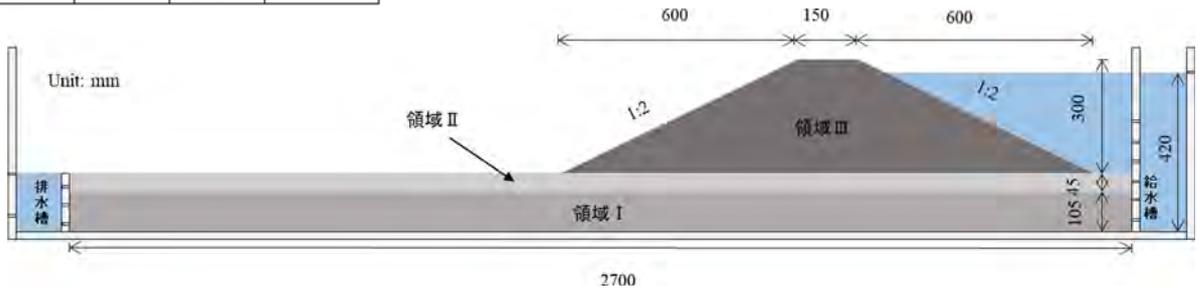


図3 大型模型

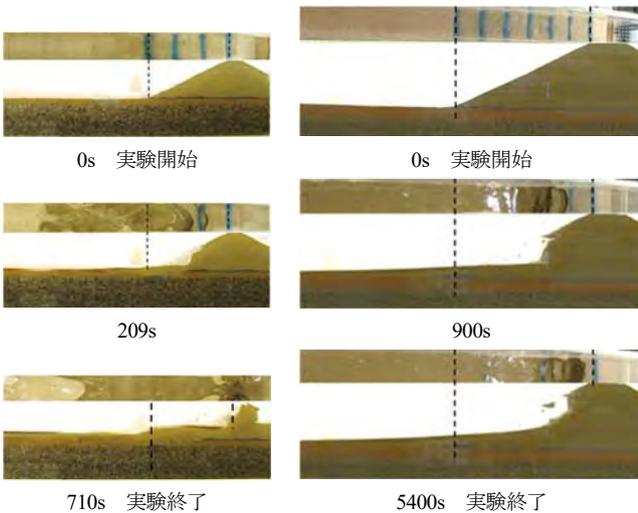


写真1 実験結果 (左 Case 2, 右 Case 9)

透水係数 $k=9.96 \times 10^{-5} \text{m/s}$) を用いた。いずれの地盤材料も含水比 4% に調整した後、所定の間隙比となるように丁寧に締め固めを行い、模型地盤を作製した。

模型地盤作製後、実堤防において地下水位が透水性基礎地盤中にある場合を再現するために、給水槽の水位を 100mm に保ち、地盤材料を飽和させた。その後、給水槽の水位を一気に上昇させ、堤体高さの 9 割でオーバーフローさせ水位を保ちながら、浸透に伴う堤体の挙動を観察した。その際、排水槽の水位を 150mm で保つように排水を行った。すべての実験過程において、模型実験の正面および側面からビデオ撮影を行い、堤体の変状がほぼみられなくなるまで実験を続けた。

2.2 実験結果

写真 1 に、小型模型の Case 2 と大型模型の Case 9 の実

験結果を示す。Case 2 では、実験開始から 209 秒後に、下層基礎地盤 (領域 I) から上層基礎地盤 (領域 II) を突き破る水みちが発生し、堤体法尻部が損傷したことをトリガーとして、裏法すべりが天端まで進行した。最終的に堤防決壊に至った。Case 9 では、堤防法尻部で発生した小規模な崩壊が、徐々に大規模な裏法すべりに進展した。最終的に天端の手前で崩壊が止まり、5400s で実験を終了した。

2.3 堤防脆弱性指標 t^* の比較

堤防脆弱性指標 t^* は、次式で表される⁴⁾。

$$t^* = \frac{8 H k t'}{3 \lambda b^2} \quad (1)$$

ここで、水位 $H(\text{m})$ 、堤体の透水係数 $k(\text{m/s})$ 、洪水継続時間 $t'(\text{s})$ 、堤体の空隙率 λ 、堤防幅 $b(\text{m})$ である。透水性基礎地盤を加味する t_m^* も提案されている⁵⁾ が、本論文では、 t^* による検討を行う⁶⁾。

表 2 および図 4 に、堤防脆弱性指標 t^* の算出結果を示す。Case 1~9 が本論文での実験結果であり、Case 10~22 は、既報⁵⁾ の模型実験結果であり、本論文での中型模型に相当する寸法で実施されている。既報の t^* よりも若干小さい傾向があるが、現地堤防と同様に t^* が 0.01~0.1 の範囲で裏法すべりが生じ、0.1~1 の範囲で決壊することが示された。さらに、本論文での 3 種類の寸法での実験での比較により、堤体の大きさに拘わらず裏法すべりが発生する t^* は、0.01~0.05 の狭い範囲に集まることが確かめられた。また、すべての寸法において、堤体 (領域 III) に 8 号砂を用いた Case 3, 6 および 9 で、最も小さい値が算出された。これは、堤体の透水係数が小さいことにより、洪水継続時間が長くなったことが要因である。

表2 堤防脆弱性指標 t^* の変数

Case	H(m)	k(m/s)	$t^*(s)$		λ	b(m)
			裏法 滑り	堤防 決壊		
Case 1	0.135	9.96E-05	40	310	0.51	0.4
Case 2	0.135	9.96E-05	60	410	0.51	0.4
Case 3	0.135	3.98E-05	80	575	0.51	0.4
Case 4	0.18	9.96E-05	80	-	0.51	0.54
Case 5	0.18	9.96E-05	160	-	0.51	0.54
Case 6	0.18	3.98E-05	150	-	0.51	0.54
Case 7	0.27	9.96E-05	87	-	0.51	0.81
Case 8	0.27	9.96E-05	100	-	0.51	0.81
Case 9	0.27	3.98E-05	140	-	0.51	0.81

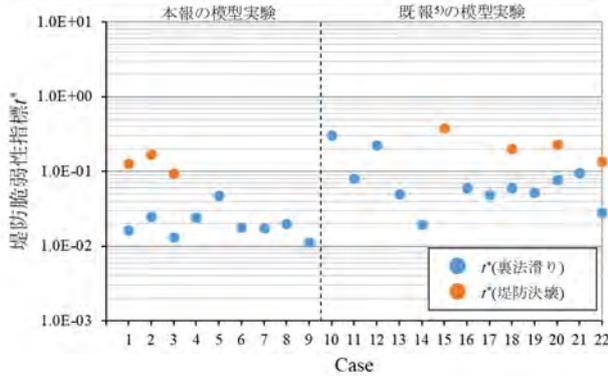


図4 堤防脆弱性指標 t^* の比較

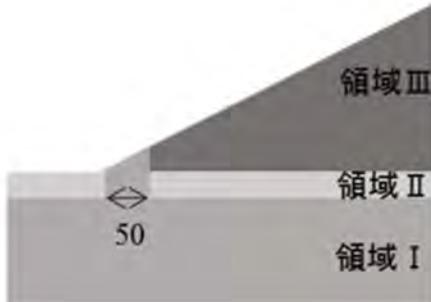


図5 Case A

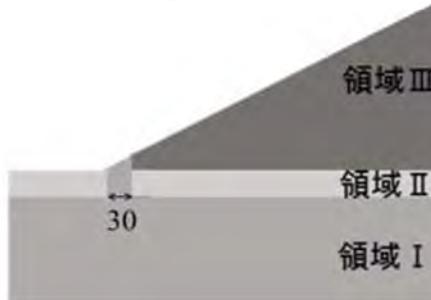


図6 Case B

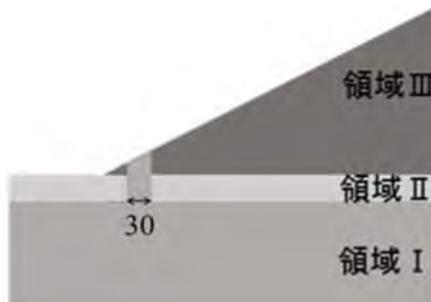


図7 Case C, D

表3 各 Case の地盤材料

Case	地盤材料			
	排水工	領域 I	領域 II	領域 III
Case A				
Case B	3号砂	3号砂	8号砂	678号混合砂
Case C			6号カラー	
Case D			6号カラー	

小規模であるが、再現性の高い精緻な模型実験において、 t^* が寸法の異なる堤体模型間での力学的相似条件を示すことを確認できた意義は大きい。ただし、本論文で比較した堤防脆弱性指標 t^* は、高透水性基礎地盤が河川の水位上昇によって被圧されることが、堤体の安定性にネガティブに作用する効果を十分に反映できていないことには留意しておく必要がある。

3. 排水工の大きさと設置位置の検討

3.1 実験概要

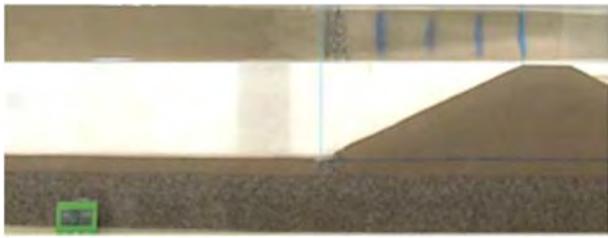
図5, 6および7に、各 Case における排水工の大きさと設置位置を変更した模型実験概要を示す。また、全 Case において、図2の中型模型で実験を行った。

本実験で用いた地盤材料を表3に示す。領域 I には三河珪砂3号砂、領域 II には8号砂、領域 III には678号混合砂を用いた。ただし、Case D では、排水工の大きさと設置位置を Case C と同様として、上層基礎地盤（領域 II）に6号カラーを用いて実施した。全 Case において、排水工には、領域 I と同様に3号砂を用いた。これらの地盤材料の間隙比と透水係数は、2.1 と同値である。いずれの地盤材料も含水比4%に調整した後、所定の間隙比となるように厚さ50mm ずつ締め固めを行い、模型地盤を作製した。

実験方法は、2.1 と同様の手順で行い、浸透に伴う堤体の挙動を観察した。

3.2 実験結果

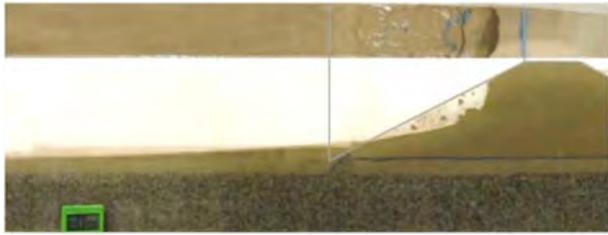
写真2に、各 Case の実験過程を示す。まず、排水工の大きさと設置位置を変更した際の浸透すべり破壊の抑制効果について検討する。写真2(a)の法尻堤体内に横幅50mmの排水工を設置した Case A では、実験開始23秒後から排水工から顕著な排水がみられたが、1時間浸透を継続しても堤体変状等は確認できなかった。写真2(b)の Case B では、排水工の横幅を30mmに縮小した。その結果、実験開始14秒後に排水工部分から噴き出すような顕著な排水がみられた後、無対策と同様に排水工付近の泥濁化が発生した。実験開始1分48秒後には、排水工上を泥濁化して流失してきた堤体材料が覆い被さるよう堆積してしまうことにより、無対策に近い状態となり堤体が徐々に変状した。その変状は、堤体法面の9割程度進行した後に停止した。越流には至らなかったが、天端付近まで裏法すべりが進行したことにより、排水工の設置による裏法すべりを抑制する効果はみられなかった。写真2(c)の Case C では、Case D と同じ横幅30mmの排水工を Case A の排水工の右端と同じ位置となるまで堤体内の奥側に設置した。結果として、実験開始21秒後に排水工からの排水が確認され、その際、堤体法先部が泥濁化により消失した。その後、それをトリガーとして堤体が徐々に崩壊し、36分後には川裏法面の8割が崩壊したが、最終的には越流には至らなかった。以上の Case A, B および C より、排水工の大きさが50mmから30mmに縮小することにより、堤体法尻部の



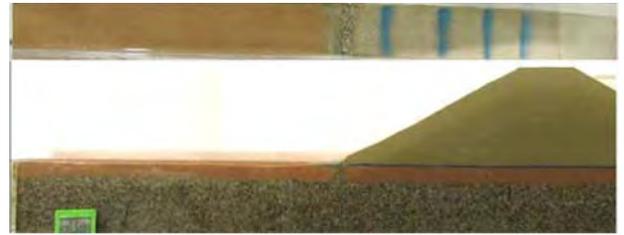
(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C



(d) Case D

写真2 実験結果（終了時）



$e=1.06$
 $k=4.88 \times 10^{-4} \text{m/s}$

$e=0.95$
 $k=2.67 \times 10^{-3} \text{m/s}$

写真3 行き止まり地盤での実験結果（終了時）

崩壊を抑制する効果が失われることが示された。したがって、排水工には、川表から供給される水を排水する能力が要求されることが考えられる。

次に、上層基礎地盤の透水性の影響をみるために、Case C と排水工は同様として、上層基礎地盤を Case C より透水性が 10 倍程度高い材料を用いた Case D を実施した。その結果、実験開始 17 秒後には排水工から顕著な排水がみられたが、写真 2(d) に示すように、Case A と同様に 1 時間浸透を継続しても堤体に変状等は確認できなかった。これは、上層基礎地盤の透水性が上がることで、排水工に集中する水量が軽減されることによって、横幅 30mm の排水工でも、浸透すべり破壊の抑制効果を発揮したと考えられる。

写真 3 に、Case A と同様の排水工が行き止まり地盤に設置された事例を示す。行き止まり地盤を含む上層基礎地盤（領域Ⅱ）の地盤材料は、Case D と同様の 6 号カラーを用いた。行き止まり地盤の場合には、堤体法尻部の動水勾配の集中は非常に大きくなり、極めて危険性が高まるが、排水工の設置によって、1 時間透水を継続しても堤体の変状はみられなかった。

4. まとめ

本論文では、堤防脆弱性指標 f^* の観点から模型実験の実務適用性の検討、また、堤体法尻部に設置する排水工の大きさと設置位置の検討を行った。

堤防脆弱性指標 f^* の比較により、模型実験から現地堤防のマルチスケールで破壊形態を分類できることが示され

た。これは、小規模で精緻な模型実験だからこそ解明できる被災現象やその対策方法が、現地堤防に適用可能であることを示唆している。なお、 f^* がマルチスケールで高い一致度を示した背景には、地盤材料が過圧密にならないように間隙比を大きくして、模型地盤を作製したことにある。これは、模型実験と現地堤防では、有効応力レベルが大きく異なるため、現地堤防におけるすべり破壊等の力学現象を小さな模型地盤でも再現するために必要な措置である。

堤体法尻部に設置する排水工は、基礎漏水によって発生する法尻での小規模すべりをトリガーとする進行性破壊の根源を元から絶つ点で、非常に効果が高いが、設置位置と規模には注意が必要であることも明らかになった。

本論文の堤防脆弱性指標を整理するのにあたり中央大学の福岡捷二先生、田端幸輔先生にご指導いただくとともに、有益なご議論をいただいた⁶⁾。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 森三史郎・林愛美・小高猛司・崔 瑛・李 圭太・原大知：全断面堤体模型を用いた高透水性基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊に関する検討，第 71 回土木学会年次学術講演会，2016。
- 2) 小高猛司・崔 瑛・林愛美・森三史郎・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，2017。
- 3) 小高猛司・森智彦・李 圭太・朝岡巧・飯田潤哉・澤村元希：透水性基礎地盤上の河川堤防の排水工の模型実験，第 54 回地盤工学研究発表会，2019。
- 4) 田端幸輔・福岡捷二・内堀寿美男・上村勇太：堤防脆弱性指標に基づいた堤防破壊危険性評価に関する研究－鬼怒川中下流部平成 27 年 9 月大洪水を例として－，河川技術論文集，Vol. 23，2017。
- 5) 福岡捷二・小高猛司・田端幸輔：現地堤防と模型堤防の浸透破壊を規定する力学的相似条件－堤防脆弱性指標，第 5 回河川堤防技術シンポジウム論文集，2017。
- 6) 中村宏樹・小高猛司・李 圭太・福岡捷二・田端幸輔・山田紘太郎・福永葵衣・大橋健司，寸法の異なる堤防模型実験による力学的相似条件の考察，第 75 回土木学会年次学術講演会，2020。