

基礎地盤の透水性に起因する堤体の進行性破壊

Progressive failure of river embankment due to the high permeability of foundation ground

崔 瑛¹, 小高猛司², 李 圭太³

- 1 名城大学 理工学部 社会基盤デザイン工学科・cuiying@meijo-u.ac.jp
- 2 名城大学 理工学部 社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 株式会社建設技術研究所 大阪本社 水工部

概 要

平成 24 年の九州北部豪雨における矢部川堤防の決壊に始まり, 平成 25 年にも子吉川と梯川の堤防が立て続けに法すべりを起こすなど, この数年間に高い透水性を有する基礎地盤に起因すると考えられる堤防被災が目立つ。本論文では, 高い透水性を有する基礎地盤の存在に着目し, 透水性が大きく異なる 2 層の基礎地盤を有する堤防の浸透模型実験を行い, 基盤漏水が堤体決壊に結びつくメカニズムについて検討を行った。その結果, 高い透水性基礎地盤の上に, 低い透水性の地盤が存在する場合, 法尻付近に大きな上向き動水勾配が発生し, 基礎地盤が液状化(有効応力を喪失した状態)することによって, 基礎地盤を巻き込むすべり破壊や基礎地盤への堤体陥没を生じさせ, 決壊に至るような堤体変状が発生する可能性があることが分かった。

キーワード: 堤防, 進行性破壊, 透水性地盤, パイピング, 越水なき破堤

1. はじめに

平成 24 年 7 月の九州北部豪雨によって, 矢部川堤防(右岸 7.3km)においてパイピングをきっかけとした破堤が発生し, 「越水なき破堤」として絶大なインパクトを与えた。この被災事例では, 図 1 (a)に示すように, 基礎地盤に粘性土の堤体の下に堤外地と直接連通している高透水性の砂層が, しかもその先が行き止まりの状態が存在したという特殊事情が明らかになりつつある¹⁾。また, 平成 25 年 7 月に立て続けに発生した子吉川堤防の法すべりの被災²⁾, 梯川堤防の法崩れの被災³⁾も, 透水性基礎地盤(図 1)の基盤漏水の影響が少なからずあると考えられる。

本論文では, 高い透水性を有する基礎地盤の存在に着目し, 透水性が大きく異なる 2 層の基礎地盤を有する堤防の浸透模型実験を行い, 透水性基礎地盤の基盤漏水が堤体決

壊に結びつくメカニズムについて検討した。なお, 本実験の境界条件は, 既往の先進的な研究⁴⁾⁵⁾を参考にしている。

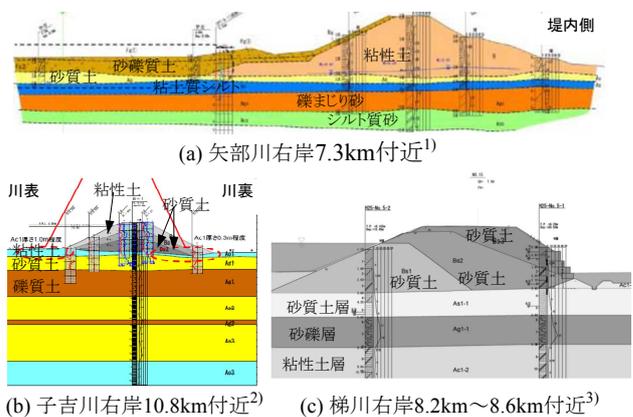


図 1 被災箇所の地層構造

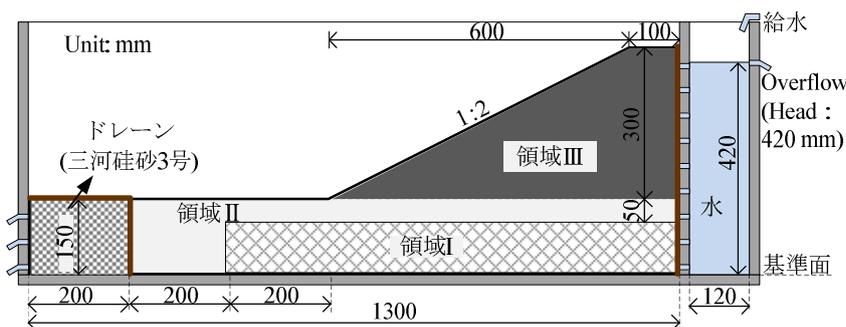
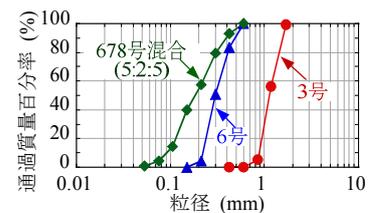


図 2 浸透模型実験装置の概要



	領域 I	領域 II	領域 III
Case_1	6号	6号	6号
Case_2	3号	6号	6号
Case_3	3号	6号	678号混合

*三河珪砂

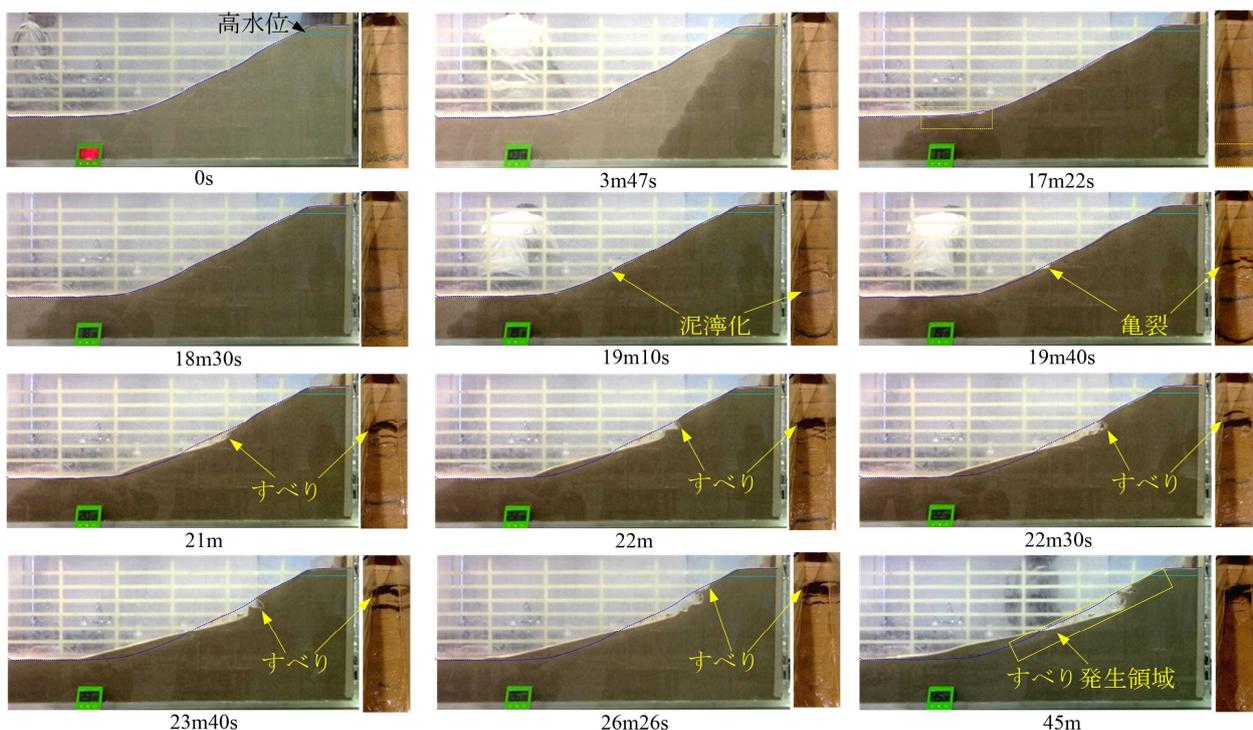


写真 1 Case_1 における浸透破壊過程

2. 模型実験の概要

図 2 に浸透模型実験装置の概要を示す。実験装置の外寸は、幅 1500mm、高さ 500mm、奥行 160mm であり、通水孔を有する仕切板によって土槽（内寸：1300mm×480mm×120mm）と水槽（内寸：120mm×480mm×120mm）に分けられている。本実験では、高い透水性基礎地盤に起因して、法尻付近の基礎地盤に発生すると予想される比較的大きな動水勾配の影響を検討するため、図 2 に示すように、模型地盤を領域 I, II, III に分け、それぞれの領域における地盤材料を変化させた計 3 ケースについて検討した。Case_1 は基礎地盤および堤体地盤に、三河珪砂 6 号のみを用いたケース、Case_2 は、Case_1 から基礎地盤の領域 I を透水性の高い地盤に置き換えたケース、Case_3 は Case_2 からさらに堤体地盤を透水性の低い材料に変えたケースである。透水性の高い地盤材料には三河珪砂 3 号、透水性の低い地盤材料には三河珪砂 6, 7, 8 号を 5:2:5 の重量比で混合したものを使用した。それぞれの地盤材料の粒度分布を図 2 に示す。

地盤試料はいずれも 4% に含水比調整した後、間隙比 1.0（三河珪砂 3 号のみ 0.9）になるように、一層 20mm ずつ締め固めて模型地盤を作製した。この際、より均一な模型地盤を作製するため、各層をさらに横方向に 200mm ずつ区切り、それぞれのブロックに所定の土試料を投入した。堤防模型作製後、水槽部の水位を 420mm で一定に保持して、実験装置の正面および上部からビデオ撮影を行いながら堤防の浸透破壊の様子を観察した。なお、本実験では堤体地盤に変化が見られなくなったとき、もしくは越流が発生し、破堤したと判断した時点を実験終了とする。

3. 浸透破壊過程

3.1 Case_1 における浸透破壊過程

写真 1~3 に各ケースにおける、浸透開始から破壊までの一連の様子を示す。堤防を囲む点線は堤防の原型を示し、天端付近の実線は給水水槽の高水位の位置を示す。写真 1 に併記した矢印は、すべり破壊の発生位置を示している。

Case_1 では、堤体および基礎地盤が均一な材料であることを反映し、ほぼ直線状の浸潤線が徐々に法尻に向かって進行して行く。実験開始後 17 分程度で法尻付近において水の浸出が見られ、そのおよそ 2 分後に法尻で泥濁化とも呼べる極めて浅いすべりが発生する。また、実験開始後 19 分 40 秒後には、泥濁化した地盤近くの法面上部でき裂が見られ、21 分後にはそのき裂を境界に小さいすべり破壊が発生した。これは、法尻周辺地盤が泥濁化に伴って強度が低下することにより、その上部法面地盤のすべりに対する抵抗力が減少したためであると考えられる。その後、このような小さいすべり破壊は、天端に向かって次々と発生し、それに伴って法面が継続的に緩勾配化する様子が見られた。しかし、継続的なすべり破壊は堤防高の 2/3 程度の位置で停止し、破堤には至らなかった。

以上から、Case_1 では法尻地盤の泥濁化を発端として、「すべり破壊→泥濁化→緩勾配化」の過程を繰り返す、進行性破壊の様子が見られた。一方、Case_1 で発生したすべりは非常に浅く、法面の崩壊は表層部分のみに留まっている（写真 1：45 分後）。その理由として、堤体地盤が比較的高い透水性の砂質土であったため、浸潤線が法面まで到達し、法面が飽和することにより、次々と泥濁化とそれに伴うすべり破壊が生じたと考えられる。

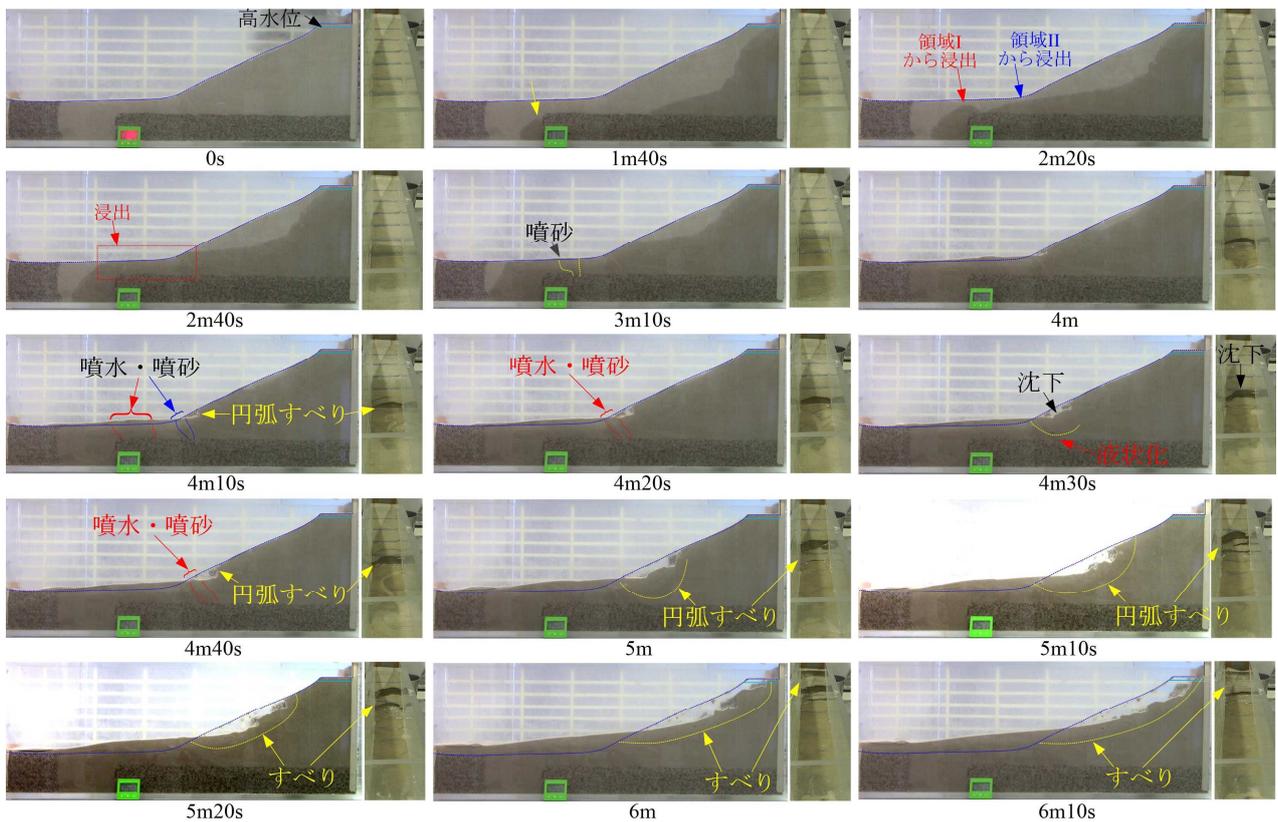


写真 2 Case_2 における浸透破壊過程

3.2 Case_2 における浸透破壊過程

Case_2 では、基礎地盤領域 I の透水性が他領域より高いことを反映し、領域 I および領域 II 周辺地盤においては、水が非常に速い速度で排水口に向かって浸透して行き、2分20秒後には、領域 I および領域 II からの浸透水がそれぞれ地表面に到達している。

実験開始約 3 分後には法尻から少し離れた位置で砂が噴き出すポイリング現象が確認され、(3分10秒：図中点線で囲んだ部分) その領域は徐々に排水口方向に広まって行く。4分10秒後には、法尻付近の領域 II の広い領域でもポイリング(液状化)が発生し、法尻部分では基礎地盤を巻き込む明瞭な円弧すべりが発生する。これは、法尻付近での液状化の発生により、法尻下部地盤の支持力が急激に減少したためであると考えられる。その後、円弧すべりにより明確なすべり境界(すべり線)が見られるが、それに囲まれたすべり土塊は徐々に斜め下にすべり落ち、領域 II まで滑り込む現象が見られる(4分30秒)。これも、すべり線以下の地盤における液状化の発生による支持力の低下に起因するものと考えられる。さらにその約 30 秒後にも、基礎地盤の液状化に起因すると考えられる比較的深い円弧すべりが発生している(5分：矢印で示した部分)。なお、この過程では、堤体のすべり崩壊に伴い、基礎地盤の広い領域で堤体内部に向かってポイリング(液状化)が進行して行くことが観察できた。これは、円弧すべりの発生による緩勾配化により、領域 I から地盤表層までの距離が短くなることによって、法面下の領域 II の基礎地盤の動水勾配が増大するためであると考えられる。基礎地盤を巻

き込む大きなすべり崩壊も、その基礎地盤の液状化に起因している。

その後(5分10秒以後)も、比較的大きな円弧すべりが断続的に天端に向かって伝播する進行性破壊が確認できるが、これらは基礎地盤の液状化を伴っていない。さらに、5分20秒後からは、基礎地盤まで滑り込むようなすべりは発生せず、法面の表層のみですべり崩壊が次々と発生して行き、天端ぎりぎりまで変形が続く。

これらの現象をまとめると、Case_2 における堤防の破壊形態は二種類に分けることができる。一つは、実験開始後 3分10秒から 5分までの基礎地盤の液状化を伴う円弧すべりで、二つ目は、5分20秒以後の泥濁化による表層すべりである。本ケースでは、基礎地盤領域 I に高透水性地盤を設けることによって、同領域に高い水頭が作用し、局所的に動水勾配が大きくなるため基礎地盤領域 II にポイリングが発生し、一部表層まで貫通する水みちも確認できた。法先の支持力が低下したため、法面は基礎地盤に滑り込むような、大きい円弧すべりを引き起こす。また、円弧すべりの発生に伴う緩勾配化により、堤体地盤が次々と限界動水勾配に達するためポイリングの領域が広まって行き、それに伴う円弧すべりも引き続き発生する。しかし、法面上部では堤体への浸透のみによる、法面の泥濁化を伴う表層すべりが発生している。

以上から、非常に透水性が高い基礎地盤が存在する場合は、局所的に動水勾配が上昇し、基礎地盤のポイリングの発生に伴い法面全体のすべり崩壊に発展する恐れがあると言える。

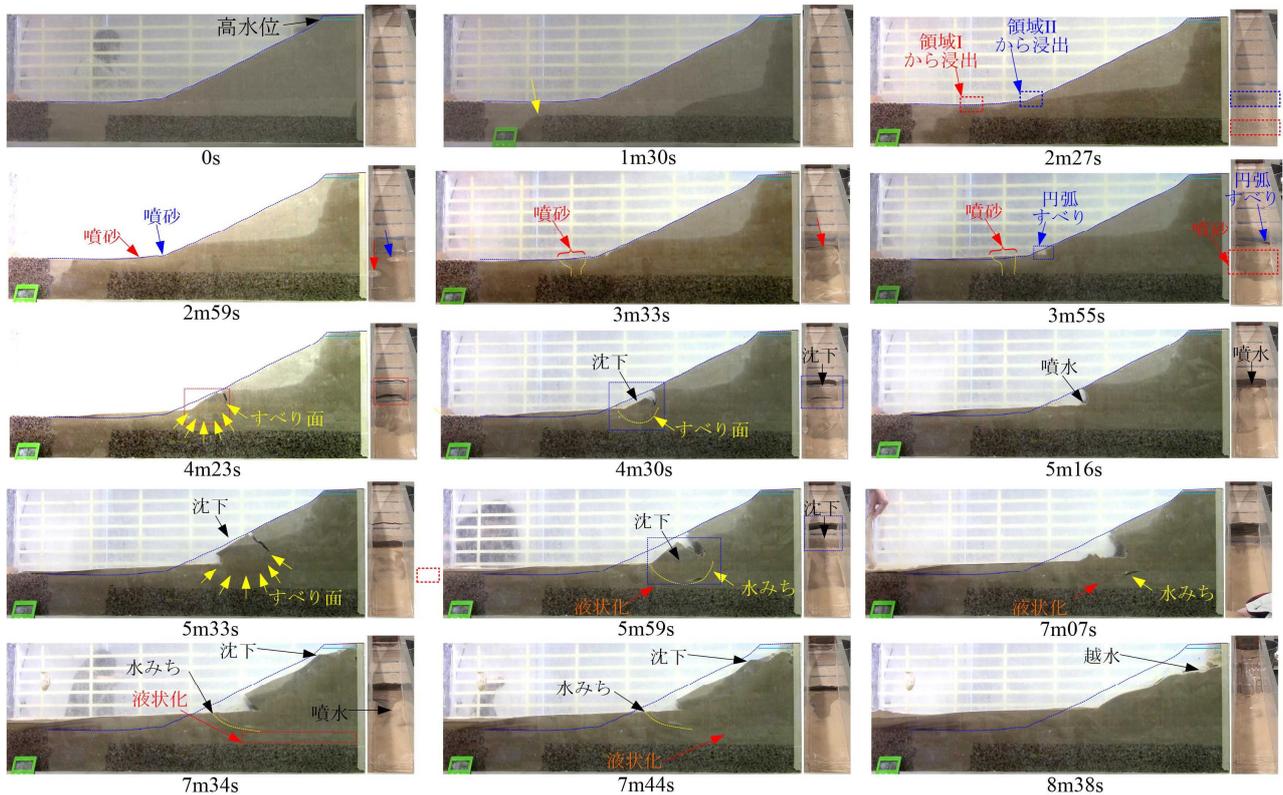


写真 3 Case_3 における浸透破壊過程

3.3 Case_3 における浸透破壊過程

Case_3 では、領域 I, II では Case_2 とほぼ同じ浸透過程が見られるが、堤体（領域 II）材料の浸透性が低いため、基礎地盤から水が浸出した際、堤体の大部分はまだ浸透が進んでいない。実験開始約 3 分後に Case_2 とほぼ同じ位置で噴砂が発生し、法尻付近の領域 I が液状化し、Case_2 と同様に法尻で小さな円弧すべりが確認できた（3 分 55 秒：点線で囲んだ部分）。4 分 30 秒で堤体に亀裂が生じ、ブロック状に土塊が破壊しつつ、基礎地盤に沈み込んだ。5 分 33 秒にはさらに法面上部で大きな亀裂が発生し、堤体から離脱した大きなブロックが液状化した基礎地盤領域 II に沈み、それに伴いブロック下側に沿って流れる水みちが確認された。7 分過ぎには天端を含む大きなすべりが発生し、7 分 44 秒にはブロックの下部に領域 II から法尻を結ぶような長い水みちが確認され、その水みちにより囲まれた崩壊土塊は一気に基礎地盤領域 II に沈みこむ。これにより天端が大きく沈下し、堤防は越流により崩壊した。すなわち、Case_3 では液状化して支持力を喪失した基礎地盤に、すべり土塊が沈み込むことによって順次泥滓化し、それがさらに堤体内部まで基礎地盤の液状化を伝播させ、決壊に至るような堤体変状に進展する。

Case_3 では Case_2 と共通して、大きな動水勾配の集中によって基礎地盤がボイリング（液状化）することにより、堤体に基礎地盤を巻き込むすべり破壊が発生しているが、Case_3 で発生したすべり土塊の規模は非常に大きく、最終的には天端まで巻き込むような大きいすべり崩壊が発生している。これは、Case_3 における堤体材料は透水性が低

く、不飽和状態ではサクシオンによる粘性が高いため、浸潤によってすぐに泥滓化は起こらず、基礎地盤のボイリングに伴う不安定化によって亀裂を伴うブロック状の崩壊が発生するためであると考えられる。

4. まとめ

非常に高い透水性の基礎地盤の上に、比較的透水性の低い地盤が存在することにより、法尻付近に大きな上向き動水勾配が発生し、基礎地盤が液状化（有効応力を喪失した状態）する。それによって、法尻付近の崩壊が始まり、その小崩壊をトリガーとして、基礎地盤を巻き込むすべり破壊や基礎地盤の堤体陥没が生じ、やがて堤防決壊に至らしめすような堤体変状が発生する可能性が本模型実験によって示された。今回の実験では、高い透水性基礎地盤を行き止まり状態で配置したが、今後はそればかりではなく、基礎地盤上部の被覆土層の条件も検討し、上記の堤防変状に結びつく実地盤での境界条件の一般性を明らかにする。

参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会報告書, 2013.
- 2) 第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム災害報告特別セッション配付資料, 2014.
- 3) 大角ら: 梯川古府地先漏水対策について, 平成26年度北陸地方整備局事業研究発表会, 2014.
- 4) 齊藤ら: 透水性基盤のパイピングとすべりに着目した河川堤防の安定性, 第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, 2014.
- 5) 倉田ら: 透水性基礎地盤に起因する河川堤防の進行性破壊に関する模型実験, 河川技術論文集, 第21巻, pp.361-366. 2015.