

パイピングと越水による複合要因型堤防決壊プロセスの

遠心載荷実験による解明

川尻 峻三¹, 廣岡 明彦¹

九州工業大学大学院 工学研究院 建設社会工学研究系

概要：本研究では、河川水位上昇時の堤防決壊プロセスを解明するため、河川水位上昇中に発生する堤内地盤でのパイピングと、その後の越水を再現した模型実験を行った。その結果、河川水位上昇中にパイピングが発生した場合には堤内地盤での間隙水圧が上昇していることが確認でき、その後の越水において堤体断面が早期に消失することがわかった。

1. はじめに

河川堤防は洪水時には増水した河川と居住エリアの境界部に立地し、洪水氾濫に対する「最後の砦」である。しかし、近年の豪雨災害では、この「最後の砦」からいとも簡単に越水して土で構成される河川堤防が侵食されて最終的には決壊している。近年の河川堤防の決壊は津波に匹敵する被害をもたらし、越水に対する河川堤防の性能強化は「待ったなし」の社会情勢である。過去に発生した堤防決壊に対する被災メカニズム調査から、被災した堤防の7割程度は越水による堤防侵食が決壊の主要因とされている。しかし、先述したように近年では毎年のように堤防決壊が発生し、住民が濁流の中を命がけでヘリコプターやボートで奇跡的に救助され、最悪の場合には人命が失われる状況にある。すなわち、近年の気候変動に伴う洪水外力による堤防決壊では、過去に決壊した堤防の調査から得た決壊メカニズムやプロセスが異なっている可能性があり、これによって住民の逃げ遅れが発

生しているおそれがある。

ここで図-1は、筆者らが2022年12月に宮崎県北川での現地調査の状況を示している^{1), 2)}。当該箇所では2022年9月に九州を縦断した台風14号によって、河川堤防の設計水位である計画高水位(H.W.L.)に迫る出水となった。これによって、堤内地盤において噴砂および陥没が発生した。このような堤内地盤での噴砂やそれに伴うパイピングは、堤防基礎地盤である砂層や礫層からの上向き浸透流の増加によって発生することがわかっている³⁾。

このような背景を受けて本研究では、越水による決壊を助長・促進する堤防の事前損傷として堤内側の堤防基礎地盤で発生するパイピングに着目した。堤内側の堤防基礎地盤でパイピングが越水前に発生した場合には、堤内側の堤防法尻付近では法尻のすべり崩壊などの変状が進行し、このような状態の堤防法尻へ越水による越流水が作用した場合には通常より堤防侵食が顕著に進行する複合要因型の早期堤防決壊プロ



図-1 実験土槽および模型堤防の概要

セスが発生していると仮説を立てた。本研究では、模型実験によって上記の仮説を検証し、昨今の気候変動に伴う堤防決壊メカニズムの一つを解明することが目的である。

なお、本研究の最終的な目標は、実応力条件を再現可能な遠心場において上述の挙動を計測して考察することであったが、昨今の社会情勢の影響を受けて実験土槽を遠心載荷装置に搭載するための治具等の作製・取り付けが大幅に遅れた。そのため、本文では遠心載荷実験用土層で行った 1G 場（重力場）での実験結果について詳述している。令和 5 年 5 月現在では実験土槽を遠心載荷装置に搭載する目処が立っており、本文が公表される時期には実験結果が蓄積されていることが期待でき、その実験結果については別の機会に公表する予定である。

2. 浸透・越水模型実験の概要

図-2 は本研究で新たに作製した遠心載荷実験用の実験土槽および実験に使用した模型堤防を示している。実験土槽は内寸で高さ 270mm、幅 150mm、長さ 680mm であり、これは九州工業大学が所有する中型遠心載荷装置に搭載可能な最大寸法とした。本実験では、筆者らが過去に実施した実大試験堤防の湛水実験で使用した高さ 2m の試験堤防を参考に縮尺比 1/20 の模型盛土を構築した。すなわち、模型堤防は天端幅 50mm、高さ 100mm、法面勾配 1:2 とした。この模型堤防の基礎地盤は、上層が厚さ 35mm の

砂層、下層が厚さ 65mm の礫層とした。実験中の計測項目は堤内地盤周辺を中心とした領域での間隙水圧、高速度カメラによる堤内地盤でのパイピング発生時の地盤・水理挙動の変化、4K の解像度を持つ web カメラによる模型全体の側面映像である。なお、間隙水圧計は小型動的データロガーおよび計測・制御用ラップトップパソコンに接続されている。このラップトップパソコンに対してリモートデスクトップを利用して遠隔で操作することで、遠心載荷実験においても任意のタイミングで高速度カメラによる撮影を可能としている。

表-1 は 1G 場で実施した実験の諸条件のまとめを示している。1G 場の実験では、堤体の締固め D_c 、基礎地盤の砂層の粒径を変化させた 3 ケースを実施した。Case 1 は、堤体の D_c を $D_c = 85\%$ として砂層を東北珪砂 4 号とした。なお、堤体材料は各ケースで共通して東北珪砂 4 号と笠岡粘土を重量比で 8:2 として混合した材料である。Case 2 では堤体の D_c を $D_c = 95\%$ として砂層を東北珪砂 4 号とした。Case 2 では、Case 2-1 として湛水実験後に一度水位を低下させて 24 時間放置し、その後、水位を急激に上昇させて越水実験を行った。Case 3 では、砂層を三河珪砂 7 号とすることで Case 1 および 2 よりも低透水性の砂層を設定した。堤体の D_c は $D_c = 95\%$ とした。なお、砂層の目標とした間隙比 e は、東北珪砂 4 号を用いた場合には $e = 0.7$ 、三河珪砂 7 号の場合には $e = 0.9$ とし、礫層の目

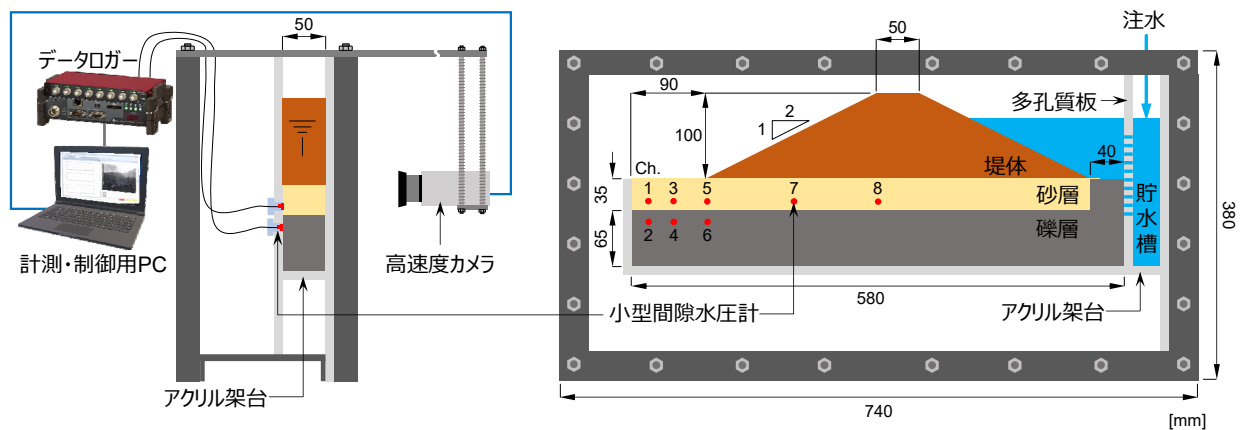


図-2 実験土槽および模型堤防の概要

表-1 実験ケースのまとめ

実験ケース	砂層の土質	堤体の D_c	湛水および越水の条件
Case 1	東北珪砂 4 号	85	20 分間で天端高さまで水位上昇させて湛水
Case 2-1	東北珪砂 4 号	95	20 分間で天端高さまで水位上昇させて湛水
Case 2-2			30 秒で天端高さまで水位上昇させて 10 分間湛水後に越水
Case 3	三河珪砂 7 号	95	5 分間で天端高さまで水位上昇させて 10 分間湛水後に越水

標とした e は $e = 1.0$ とした。

河川水位の上昇速度などの実験条件は表-1に示すとおりである。各実験ケースで河川水位が天端到達後に一定時間湛水を行った。また、河川水位上昇前に基礎地盤を飽和することを目的として、堤内および堤外地盤の地表面まで注水し、間隙水圧計の計測値の安定性を確認後に河川水位を上昇させた。

4. 実験結果および考察

図-3はCase 1, 2-1, 3の湛水実験における河川水位 8cmでの堤体断面の比較を示している。堤体の D_c が $D_c = 85\%$ と実験ケース内では最も低いCase 1では他のケースと比較して裏法尻

の崩壊領域が大きいことがわかる。Case 1では天端までの河川水位上昇によって最終的には裏法面の半分程度が崩壊した。一方で、堤体が高いCase 2-1および3では法尻の崩壊は限定的であった。これは高い D_c のケースでは、土のせん断強度が増加していることと、透水係数 k_{sat} が低いことで堤体内水位の上昇が抑制されたために裏法尻の崩壊が限定的であったと考えられる。ここでCase 3の堤内地盤に着目すると、図中の実線で示した実験前の堤内地盤の地表面よりも河川水位 8cmでの堤内地盤の地表面が上方に位置しており、隆起していることがわかる。

図-4は高速度カメラから取得した画像に対してPIV解析を行って得られたCase 3において



a) Case 1



b) Case 2-1



c) Case 3

図-3 河川水位 8cmでの堤体断面の比較

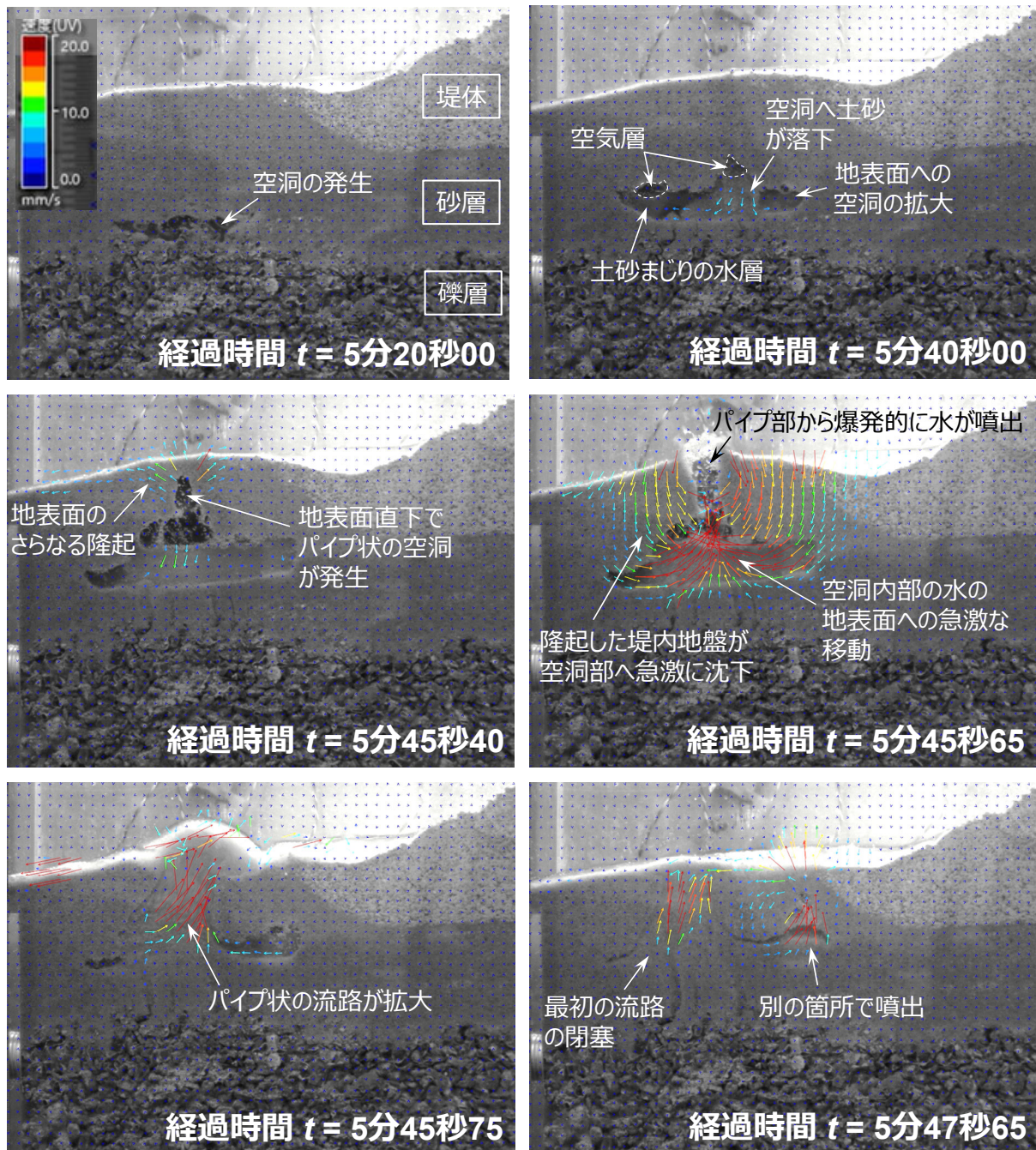


図-4 堤内地盤の隆起から噴出発生までの地盤内の変位速度分布の経時変化

隆起発生後の堤内地盤の変位速度分布の経時変化を示している。図中の経過時間 t は河川水位の注水時間を初期値としている。堤内地盤に隆起が確認できた直後に砂層と礫層の境界部付近において空洞の形成されていた ($t = 5$ 分20秒00)。その後、この空洞では空洞上部の土砂を空洞底部へ落下する挙動を呈し、地表面へと拡大した ($t = 5$ 分40秒00)。この空洞内部の上層は空気層であり、下層には土砂を混入した水層となっていた。地表面付近では空洞上部が空気層のパイプ形状となり、地表面では局所的な隆起が進行した ($t = 5$ 分45秒40)。この地表面の局所的な隆起が確認されて1秒も経過しない

うちに局所的な隆起部から空洞内部の水が一気に噴出した ($t = 5$ 分45秒65)。この際、隆起した堤内地盤は空洞内部へ急激に沈下する挙動を示した。大規模な空洞が消失した後はパイプ状の流路が拡大し、この流路から大きな流速で地表面へ土砂を含む水が流出した ($t = 5$ 分45秒75)。このパイプ状の流路は2秒程度で閉塞し、これと同時に残存した空洞へ水圧が伝播するように他の箇所でも地表面へ土砂を含む水が噴出した ($t = 5$ 分47秒65)。次に図-5はCase 3における実験中の間隙水圧の経時変化を示している。堤内地盤の飽和過程において間隙水圧計の値が安定した段階を間隙水圧の初期値として

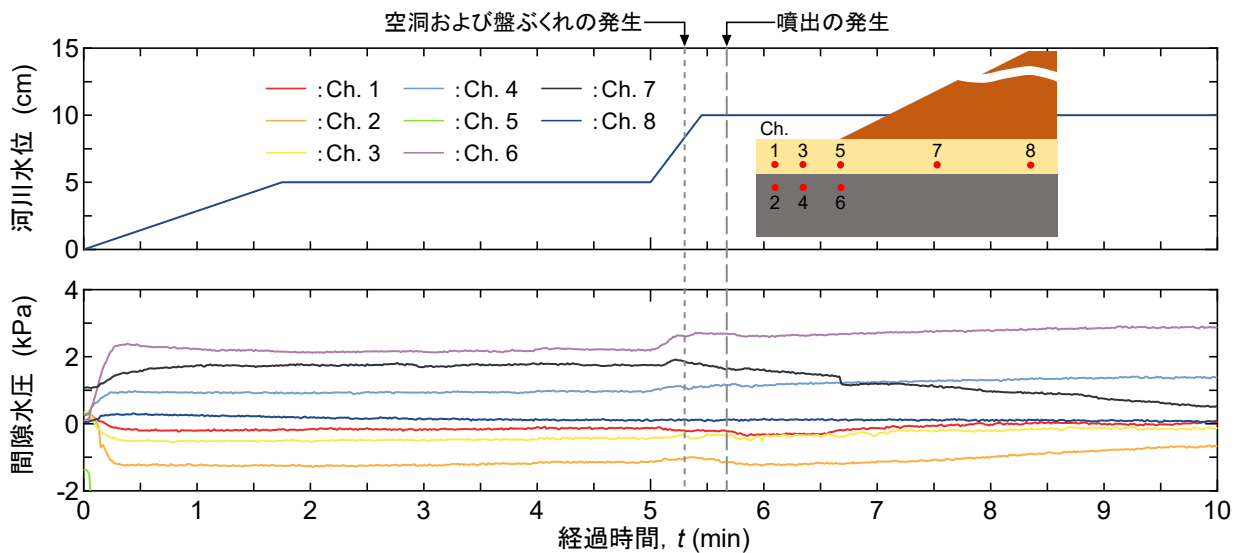
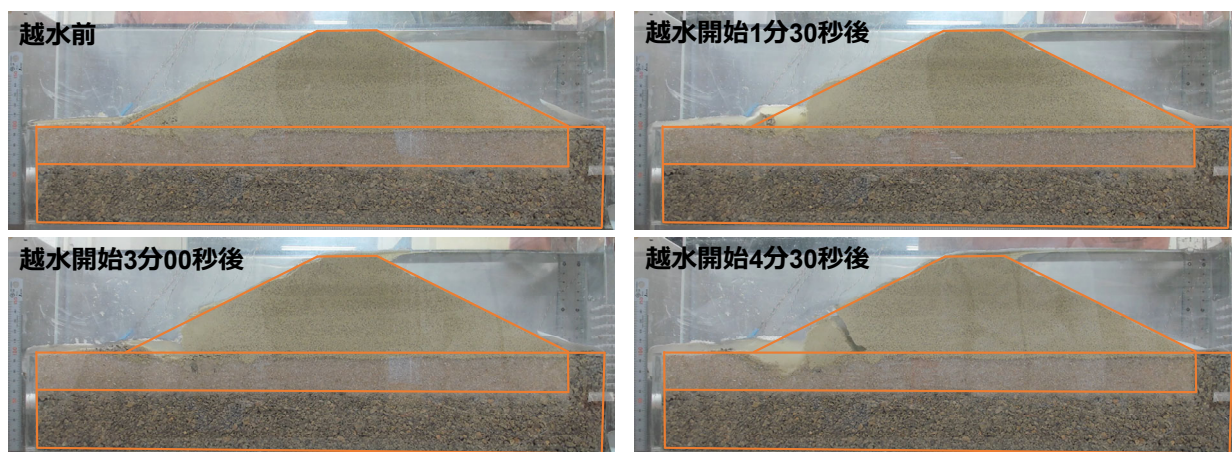


図-5 堤内地盤で噴出が発生した Case 3 における湛水実験中の間隙水圧の経時変化

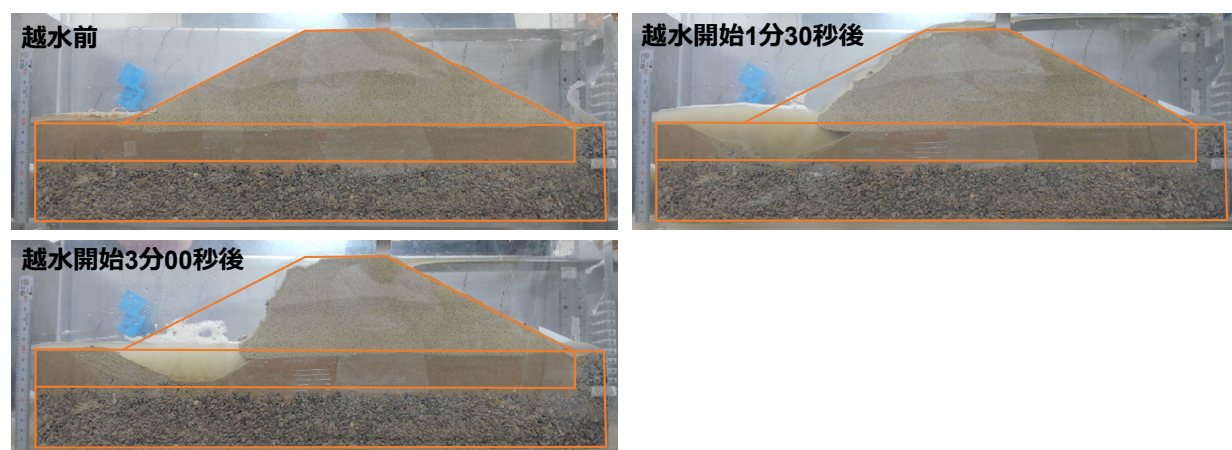
いる。堤内地盤左端の亚克力土槽に近い領域の間隙水圧は、河川水位の上昇に伴い間隙水圧が低下した。これは亚克力土槽に近い領域では局所的な水みちが形成されて静水圧が保持できないような間隙水圧分布になっていたためと予想される。なお、法尻直下の Ch. 5 では飽和による通水時から間隙水圧が低下している。この原因は現在では不明であるが、間隙水圧計からの取り付けのシーリングに問題があり、圧力が漏れていた可能性が考えられる。上記に示した箇所での計測値は、今回の実験では計測不良と判断し、以下では間隙水圧挙動の考察を進める。地表面の隆起である盤ぶくれと砂層と礫層の境界に空洞が発生した $t = 5$ 分 20 秒よりも早い時間帯で堤内地盤の砂層と礫層の境界部に近い Ch. 4 および Ch. 6 の間隙水圧が上昇し始めており、 $t = 5$ 分 20 秒では間隙水圧がわずかに低下している。これは空洞内部が水で満たされているわけではなく、空気層も存在しているために一時的に空洞周辺の間隙水圧が低下したと予想される。地表面に空洞内部の水が噴出した $t = 5$ 分 45 秒頃までの挙動は、一度低下した間隙水圧が再度わずかに上昇し、噴出した後は緩やかに間隙水圧が低下している。しかし、この低下傾向はその後の湛水で増加に転じて概ね一定値となっている。堤体直下に設置した Ch. 7 および Ch. 8 の間隙水圧を見ると、Ch. 7 では空洞および盤ぶくれが確認された時間帯よりもわずかに早い時間帯で間隙水圧がピークとなり、その後低下する傾向にある。この理由は現状では定かではないが、静水圧を保持できないような局所的な水みちの形成が予想される。Ch. 7 よりも堤体中央に近い Ch. 8 は堤内地盤や Ch. 7

の間隙水圧挙動とは異なり、概ね一定値となっている。すなわち、堤内地盤での噴出などの影響は少なくとも Ch. 8 の設置位置よりも堤体中央部には及んでいないといえる。以上に示したように堤内地盤の砂層の透水性が低い場合には、礫層からの上向き浸透流の影響によって砂層において盤ぶくれと空洞が発生し、最終的には地表面に土砂を含む水が噴出した。この噴出によって堤内地盤にはパイプ状の流路が形成されていた。このような状態に至るまでには間隙水圧が上昇していることを確認した。つまり、噴砂・パイピングが発生した場合には堤内地盤の間隙水圧が上昇した状態にあり、堤内地盤は液状化に近い状態となっていると予想される。これは越水時において越流水の下流端となる堤内地盤の侵食を促し、堤体断面の流失を促進させる可能性がある。

図-6 は湛水実験後に越水を行った Case 2-2 および Case 3 における越水実験中の堤体断面を示している。Case 2-2 については、越水実験前の湛水実験において裏法尻部付近の法面の一部が流出して欠損したため、越水実験前に欠損した領域に再度盛土を行い、堤体の断面形状を復旧した。また、越水深については両ケースともに実スケールにおいて 0.3m を想定して 1.5cm となるように注水量をコントロールした。Case 2-1 と比較すると Case 3 において、堤体断面の消失する速度が早い。特に基礎地盤の砂層では、Case 3 では消失の範囲が礫層上面にまで達するような、いわゆる「落堀」が形成されており、実河川堤防の決壊箇所を確認される現象が模型実験で再現されている。また、越水開始 1 分 30 秒後には堤体部がオーバーハング状



a) Case 2-2



b) Case 3

図-6 越水実験中における堤体断面の比較

態となり、堤体部が不安定化する堤体断面消失モードとなっている。すなわち、越水前に堤内地盤に噴砂およびパイピングが発生するほどに間隙水圧が上昇した **Case 3** において越水による堤体断面の消失が早くなる結果となった。一方で、この結果の支配要因として砂層の地盤物性の違いも影響していると考えられる。つまり、東北珪砂 4 号と三河珪砂 7 号では流水に対する侵食抵抗が異なっていると予想される。今後は、各地盤材料の侵食抵抗を基礎データとして考察を進める予定である。

5. まとめ

本研究では越水時の河川堤防の早期決壊プロセスとして、河川水位上昇中に堤防基礎地盤でパイピングが発生し、その後に越水を受ける堤防では越水時の堤体断面消失が促進されると仮説を立て、その検証に模型実験を行った。その結果、越水前に堤内地盤に噴砂およびパイピングが発生して間隙水圧が上昇した実験ケースでは、噴砂およびパイピングが発生していない実験ケースよりも越水による堤体断面の消失が早く

なる結果を得た。今後は遠心载荷実験で同様の実験を行い、実応力条件下での挙動について詳細な検討を進め、最終的には効果的な対策工の提案を目指す。

6. 謝辞

本研究は、一般社団法人九州建設技術管理協会の令和 4 年建設技術開発助成を受けて実施した。末筆ながら記して深甚なる謝意を表す。

7. 参考文献

- 1) 石原ら：令和 4 年台風第 14 号による宮崎県北川の漏水・噴砂状況，第 58 回地盤工学研究発表会講演集，投稿中
- 2) 川尻ら：2022 年台風 14 号で噴砂および陥没が発生した河川堤防での開削調査，投稿中
- 3) 仲村ら：河川堤防における小規模噴砂発生時の堤体内水理挙動に関する一考察，地盤工学会北海道支部技術報告集，Vol. 63，pp. 177-182，2023.