

河川堤防の堤体浸透・変状に及ぼす降雨強度と粒度分布の影響 Effect of rainfall intensity and particle size distribution on seepage behavior and deformation of river levee body

一瀬守¹，前田健一²，澤村直毅³，大桑有美⁴

1 名古屋工業大学大学院・社会工学系プログラム・E-mail address m.ichinose.943@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

4 名古屋工業大学・社会工学科

概 要

近年、都市部を襲う集中豪雨は増加傾向にあり、河川堤防の決壊被害も相次いで報告されている。また、2000年に発生した東海豪雨でも、堤防決壊前にエアブローの発生が確認されている。しかし、現行の河川堤防における設計要領では、エアブローの程度により堤体内部に与える影響、降雨条件が堤体変状に及ぼす影響については、十分に考慮されていない。また、堤防ごとに材料は異なり、それに伴い粒度分布も変化する。そこで本稿では、降雨強度と堤体材料の粒度分布及び透水係数が河川堤防堤体での浸透挙動と変状に与える影響について検討するため堤防模型実験を実施した。その結果、堤体材料の粒度分布の範囲が狭く、透水係数が大きく、さらに降雨強度が強くなるほど堤体への水の浸透が早くなり、より多くの間隙空気が基礎地盤に近い位置で閉じ込められることで、法尻に近い位置でエアブローが発生しやすくなること、それに伴い法面が大きく変状することで決壊の危険性が高まることを明らかにした。

キーワード：堤防，エアブロー，粒度分布，降雨，浸透

1. はじめに

近年、河川水位が高水位に至らない降雨のみによる河川堤防の変状が報告されている。また、豪雨時において、堤防の変状前に空気の噴出(エアブロー)が目撃されている。土-水-空気の三相に着目した検討¹⁾はされているが、現行の河川堤防における設計指針²⁾では、堤体の安全性に及ぼす降雨波形の影響や間隙空気の影響、また堤体材料による影響についてはメカニズム解明や定量的評価には至っていないため明記されていない。また、総雨量は同じでも瞬間的な降雨強度が高いほど堤体に水が浸透しにくくなる³⁾ことが判明している。温暖化に伴う気候変動の影響により大雨のリスクが増加している中、上記は重要な研究課題であり、効率的な対策の検討は急務と考える。

そこで本報告では、既報⁴⁾にない豊浦砂とまさ土の2種類の堤体材料を用い、堤体に豪雨を作用させる模型実験を実施し、降雨強度が河川堤防堤体における浸透挙動と変状に与える影響、間隙空気のダイナミクス解明とエアブローの危険性に対する評価を行った。

2. 実験概要

図1に実験模型概略図、表1に実験ケース一覧を示す。基礎地盤及び堤体には case1, case2 では豊浦砂, case3, case4 ではまさ土を使用した。堤体に作用させる豪雨の降雨強度は case1, case3 では気象庁が激しい雨と定める 30 mm/h, case2, case4 ではその3倍で猛烈な雨と定める 90 mm/h とした。また基礎地盤については、豊浦砂を用いた case1, case2 では水中落下法, まさ土を用いた case3, case4 では含水比 20%で練り混ぜた後、空中落下法により作成した。また、図2に粒度分布を示す。豊浦砂とまさ土の透水係数はそれぞれ $k=1.23 \times 10^{-4}$ m/s と $k=2.29 \times 10^{-5}$ m/s であり、粒度分布を図2に示す。全ケースで堤体の含水比は 0.01, 法勾配は 2割勾配とした。実験模型の底面は不透気非排水である。また、堤内側は開放してあり、堤外側のみ降雨による水が蓄積し、水位が上昇するよう設定した。

実験開始後はビデオカメラにより堤防断面の浸透過程を記録した。また、土壌水分計を設置することで堤体内における浸潤挙動の計測を行った。さらに、奥行き方向中央にレーザー変位計を設置し、実験開始から5分ごとに裏法尻から表法肩までの法面及び天端の変状の計測を行った。

実験は降雨強度 30mm/h に設定した case1, case3 については、堤体内部への水の浸透が完了した後に堤外側の水位を越流するまで上昇させ、破堤した場合に終了とした。ま

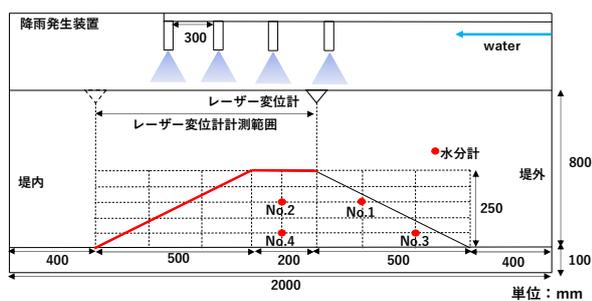


図1 模型実験概略図及び水分計の設置位置

表1 実験ケース一覧

case名	降雨強度	土の種類
case1	30(mm/hr)	豊浦砂
case2	90(mm/hr)	豊浦砂
case3	30(mm/hr)	まさ土
case4	90(mm/hr)	まさ土

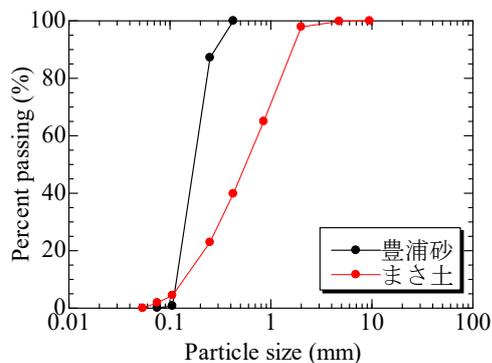


図2 実験に用いた試料の粒度分布

た、降雨強度 90mm/h に設定した case2, case4 については、実験中に発生した法面の浸食や水位上昇による影響で破堤した場合に終了とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 堤体への浸透過程及びエアブローの発生の確認

実験模型断面で確認された堤体浸透の経時変化を図3に示す。図3より、降雨を作用させると堤体表層から水が浸透し浸潤域が発達することが分かった。case1 では実験開始 30 分後、case2 では実験開始 10 分後、case3 では実験開始 60 分後、case4 では実験開始 30 分後に間隙空気を圧縮していることが分かった。このような浸潤線に囲まれた領域は間隙空気を蓄積し、基礎地盤や水位上昇による揚力を受けることで間隙空気が噴出しエアブローを誘発することで、堤防を弱体化させる危険性がある。case1, case2 を比較すると、case2 の方が基礎地盤に近い位置で間隙空気が圧縮されていることが分かる。これは降雨強度が強くなると基礎地盤からの浸透量はあまり変化がないものの、法面及び天端からの浸透量が多くなるのが原因だと考

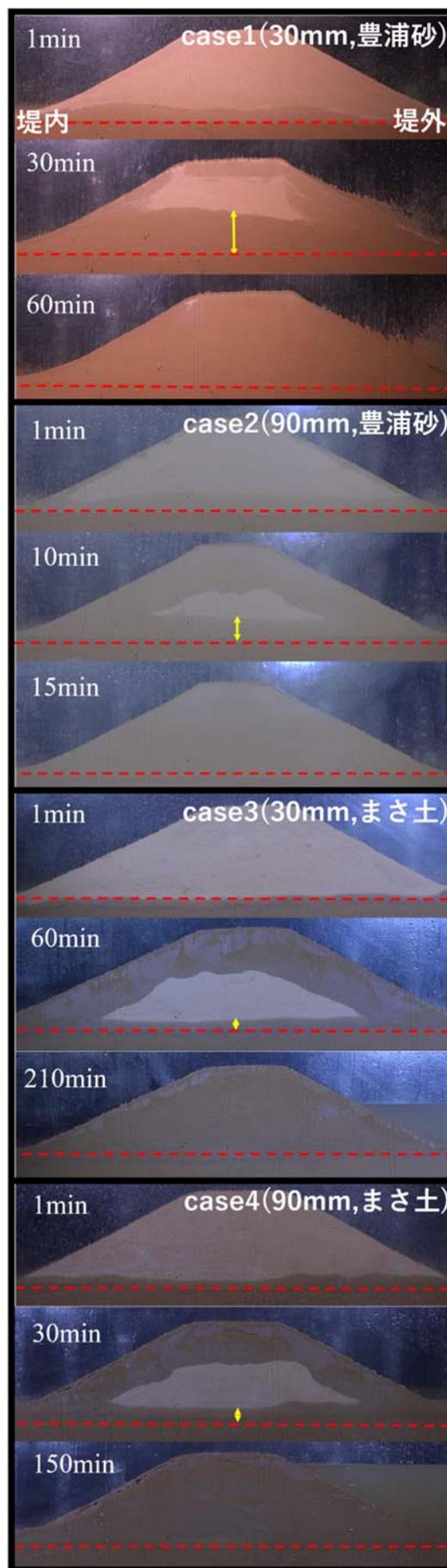


図3 間隙空気圧縮の様子：上から case1 (降雨強度 30mm/h, 豊浦砂), case2 (降雨強度 90mm/h, 豊浦砂), case3 (降雨強度 30mm/h, まさ土), case4 (降雨強度 90mm/h, まさ土)

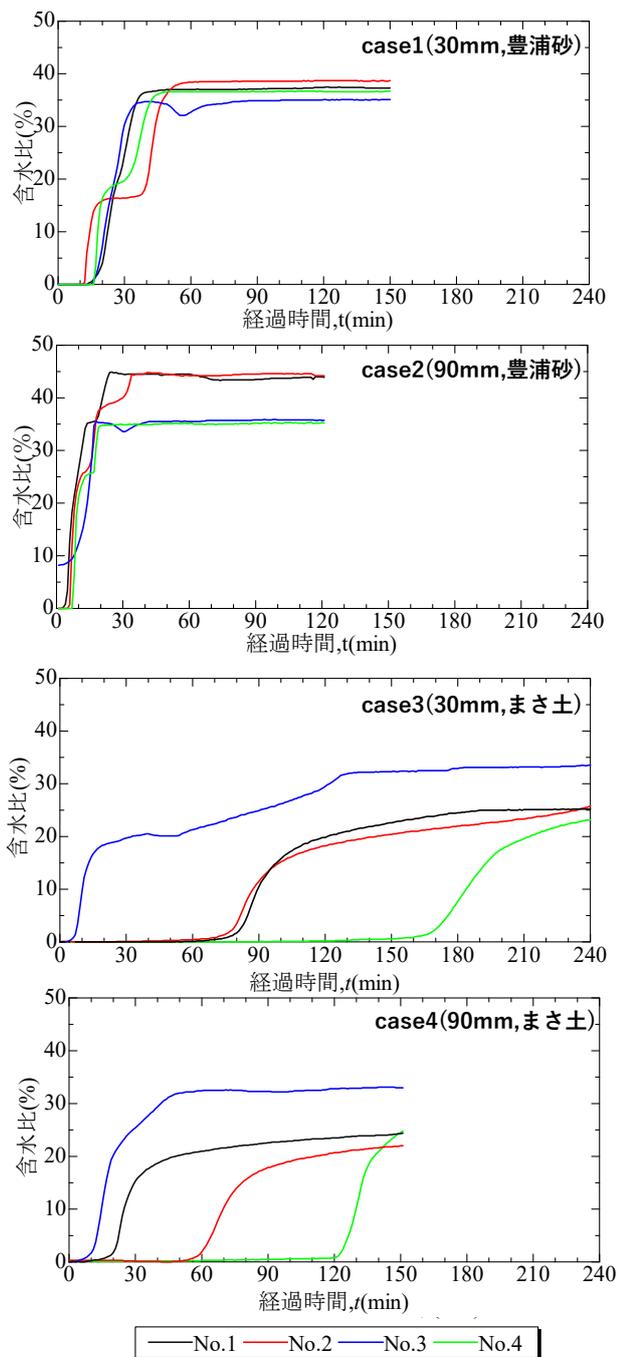


図4 水分量の経時変化：上から case1 (降雨強度 30mm/h, 豊浦砂), case2 (降雨強度 90mm/h, 豊浦砂), case3 (降雨強度 30mm/h, まさ土), case4 (降雨強度 90mm/h, まさ土)

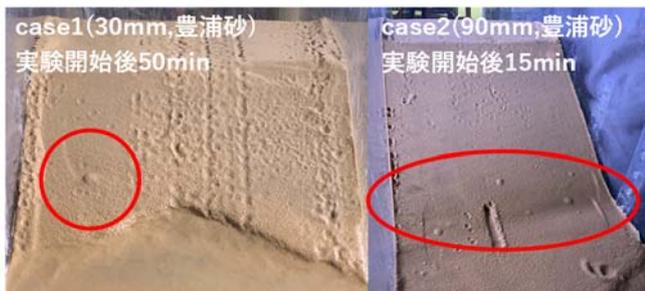


図5 実験で確認されたエアブロー現象：左図；case1 (降雨強度 30mm/h, 豊浦砂), 右図；case2 (降雨強度 90mm/h, 豊浦砂)

えられる。しかし, case3, case4 では降雨強度が異なるが, 間隙空気が圧縮される位置に大きな違いは見られない。これは豊浦砂の透水係数がまさ土に比べて 20 倍ほど大きいため, まさ土を使用した case3, case4 では基礎地盤から堤体に向かっての水の浸透が少なかったと考えられる。また, 断面全体に浸透が進んだ時間を確認すると, 降雨強度 30mm/h の case1 では 60 分, case3 では 210 分, 降雨強度 90mm/h の case2 では 15 分, case4 では 150 分のように, まさ土を使用した場合により多くの時間を要することが分かった。これも先ほど同様に, それぞれに使用した堤体材料の透水係数の違いが原因であると考えられる。

また, 各ケースにおける堤体内の水分量の経時変化を図 4 に示す。図 4 から豊浦砂を使用した case1, case2 では, 実験開始から 15 分以内にはすべての点で水分量が増加したが, まさ土を使用した case3, case4 では水分量が増加するまでに時間がかかることが分かった。このことから, 図 3 で確認した通りまさ土は豊浦砂に比べて透水係数が小さいため, 水の堤体内部への浸透が遅いことが分かる。また, 豊浦砂を使用した case1, case2 では天端中央下方に設置する水分計 No.2, No.4 (図 1 参照) に着目すると, case1 では実験開始後 20 分, case2 では実験開始後 10 分で一時的に水分量の増加が停止している。これは降雨による法面及び天端からと基礎地盤からによる, 上下からの水の浸透により圧縮された間隙空気が一時的に水の浸透を妨げたためだと考えられる。しかし, まさ土を使用した case3, case4 では水分量の増加速度が緩やかになる箇所が存在しないことから, 水が急激に浸透する豊浦砂の方が間隙空気を圧縮しやすいといえる。また, 豊浦砂を使用した case1, case2 に比べて, まさ土を使用した case3, case4 では水分量の増加が緩やかになっている。これは豊浦砂に比べてまさ土の透水係数が小さいことと, まさ土を用いた堤体では表層から浸透する水が堤体内部の間隙空気と少しずつ入れ替わるように浸透するためだと考えられる。

さらに, 本実験で発生が確認されたエアブローの様子を図 5 に示す。case1 では実験開始 50 分後に裏法面中央付近で 1 つ, case2 では実験開始 15 分後に両側の法尻上部付近で複数個発生した。しかし, まさ土を使用した case3, case4 ではエアブローは発生しなかった。この結果から降雨強度が強くと水が浸透しやすい方がより多くの間隙空気を基礎地盤に近い位置で圧縮し, エアブローが発生しやすくなることが分かった。

3.2 異なる豪雨強度時の法面変状の比較

図 6 に各ケースにおけるレーザー変位計で計測した奥行方向中央の堤体形状の経時変化を示す。図の横軸は 0 が裏法尻, 700 が表法肩を表す。豊浦砂を使用した case1, case2 は法面の浸食が発生しており, 時間の経過に伴い法面の浸食箇所が徐々に法肩に近づくことが分かった。さらに, case1 では法面中央まで浸食の起点が進展するまでに実験開始から 120 分間を要しているが, case2 では裏法肩まで崩壊の起点が進展するのに実験開始から 60 分間を要

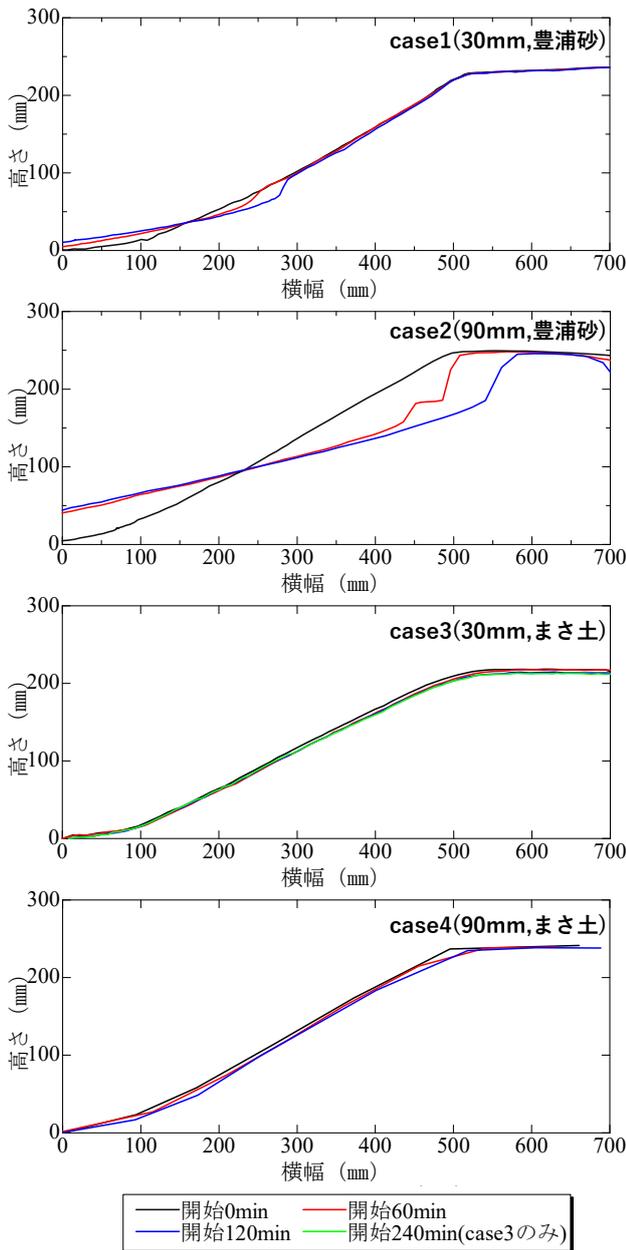


図6 レーザー変位計による堤体形状の経時変化：上から case1 (降雨強度 30mm/h, 豊浦砂), case2 (降雨強度 90mm/h, 豊浦砂), case3 (降雨強度 30mm/h, まさ土), case4 (降雨強度 90mm/h, まさ土)

していることから、降雨強度の違いによりすべりの進展速度に大きな差が生まれることが分かる。また、case2 ではエアブローの発生時に堤体が大きく変状しているが、case1 ではエアブローの発生時に大きな変化は見られない。このことから豊浦砂においては法尻付近のエアブローの発生は法面浸食を助長するが、法面中央のエアブローではあまり影響を受けない。つまり、実堤防においてもエアブローが発生したとしても必ずしも堤体変状の危険が迫っているわけではなく、エアブローの発生する場所により堤体変状の危険性が変化することを明らかにした。また、まさ土を使用した case3, case4 では堤体形状の変化がほとんど見られない。そのため本実験においては、粒度分布が広

く透水係数の小さい堤体材料の場合、豪雨が堤体に作用した際の形状変化への耐久性が強くなることが分かった。

4. まとめ

本研究では河川堤防堤体に豪雨が作用した際の浸透挙動・変状のメカニズムを把握するために、降雨強度と堤体材料を変化させた模型実験を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 堤体材料の粒度分布が狭く、透水係数が大きく、さらに降雨強度が強くなるほど堤体への水の浸透が早くなり、より多くの間隙空気が基礎地盤に近い位置で閉じ込められる。その結果、法尻に近い位置でエアブローが発生しやすくなることを明らかにした。
- 2) 豊浦砂においては、エアブローが法尻に近い位置で発生するほど法面の崩壊を助長することを確認した。そのため、エアブローにも個体差があり、法尻付近で大量の空気が噴き出すエアブローは堤防決壊の危険性を高めるが、法面中央のエアブローに関しては空気が安全に抜けることで結果的に大きな被害につながることを抑制していることを明らかにした。

今回の実験では一様な砂で堤体を作成しているため浸食が法尻から徐々に崩壊することが確認された。しかし、実堤防では法面の植生や表土の粘着力が生じることで、法肩からまとまった気泡が一気に噴き出すようなエアブローが発生することで、法肩を起点とした円弧すべりなどの変状を引き起こす可能性が考えられる。そのため、今後はさらに使用する堤体材料の種類を増やして実験を行う。さらに、植生などの法面の状況をより実堤防に近づけ、変状・破壊モードに及ぼす影響について詳細に検討するとともに、エアブローの発生箇所や個数、規模等によって堤体の不安定化を抑制・助長させる条件について検討していく。

謝辞：本研究の成果は、国土交通省・河川砂防技術研究開発制度平成 29 年度国総研からの委託研究、科学技術研究費（研究課題 19H00786）の援助を受けたものである。末筆ながら深謝の意を示します。

参考文献

- 1) 小高猛司, 浅岡頭: 砂質地盤での浸透過程での気泡の発生・発達現象, 土木学会論文集, 487/III-26, pp.129-138, 1994.
- 2) 齋藤啓, 前田健一, 李兆卿: 多種センサー・モニタリングによる降雨強度の違いにおける実堤防内浸潤挙動, 土木学会第 70 回年次学術講演会, III-169, pp.337-338, 2015.
- 3) 国土交通省河川局治水課, 河川堤防設計指針, 2007.
- 4) 前田健一, 柴田賢, 馬場千児, 榊尾孝之, 今瀬達也: 豪雨と気泡の影響を考慮した河川堤防における透気遮水シートを設置効果, 国際ジオンセティックス学会日本支部, ジオンセティックス論文集, 第 25 巻, pp107-pp112, 2010.
- 5) 前田健一, 柴田賢, 馬場千児, 小林剛, 榊尾孝之, 尾畑功: 模擬堤防土槽実験によるエアブローの確認と数値解析, 河川技術論文集, Vol.18, pp.305-310, 2012.