

粘土・砂・礫からなる模擬堤防の越流決壊プロセス

早稲田大学理工学術院	正会員	関根 正人
早稲田大学大学院	学生会員	○ 松浦 泰地
早稲田大学大学院	学生会員	菅 俊貴
早稲田大学大学院（当時）	学生会員	佐藤 耕介

1. 序論

近年，気象の極端化の影響による豪雨災害が相次いでいる．このひとつが河川堤防の決壊による大規模浸水である．このため，堤防決壊のメカニズムを解明することは喫緊の課題である．ところが，河川堤防の決壊メカニズムは内部構造の複雑さゆえに未解明な部分が多い．本論文では堤防の構成材料に着目し，粘土・砂・礫からなる一様な模擬河川堤防による実験を行い，相互の含有比率が及ぼす効果を明らかにすることを目的とする．

2. 実験の概要

本実験では，TA カオリン（粒径 $7.0 \times 10^{-3} \text{mm}$ ，比重 2.65），硅砂 7 号（粒径 0.15mm，比重 2.65），硅砂 1 号（粒径 4.3mm，比重 2.65）の 3 種類の材料を用い，それぞれを粘土・砂・礫として取り扱う．本実験ではこれらの含有比率を変化させ，粘土および礫の効果を調べた．本論文で説明する実験条件は表 -1 に示すとおりである．砂のみからなる実験が Case 1，砂・粘土からなる実験が Case 2~6，砂礫のみからなる実験が Case 8，粘土・砂・礫からなる実験が Case 7, 9, 10 の合計 10 ケースである．ここに，全重量に占める粘土の重量比率を粘土含有率と呼ぶ．実験手順は以下のとおりである．まず，水路全体にわたって厚さ 5cm となるように作成した堤体材料を敷き詰め締め締固めを行って，基礎地盤を作成する．次に，基礎地盤上に木枠を設置し，木枠内にて一層の厚さが 5cm となるように堤体材料の敷き詰め，締め締固めを行い，土塊を作成する．この手順を三層に分けて行い，土塊の高さが 15cm となるようにする．この際，基礎地盤や層の表面をけがくことで不連続とならないように留意した．次に，木枠を外し，天端を中心として法面勾配が 30° となるように土塊を切り出す．水路端で越流が生じることを防ぐため，天端の中心から左右 5cm にかけて 6mm 程度低くし，さらに左右 30cm にかけて 2% の勾配がとなるようにしている．河川区間には水位計を設置しており，河川区間における水位の測定を行っている．実験では河川区間へ水を注入し，越流させる．この時，水が堤防を越流し，裏法肩に到達した瞬間をもって越流開始とする．Case 1 ~ Case 8 では模擬河川堤防が完全に決壊した時点，Case 9 では越流開始から 3 時間，Case 10 では 6 時間が経過した時点で注水を止め，実験終了とした．実験中の様子は裏法面を斜め上方から捉えたカメラ，堤内地側に水平方向に設置し裏法面を捉えたカメラ，天端の鉛直上方に設置し俯瞰から捉えたカメラの 3 台のカメラを用いて撮影している．

3. 粘土および礫が与える影響について

表 -1 の右列に各ケースで決壊に要した時間を示してある．なお，越流水が裏法肩に到達してから模擬堤防を浸食し河川区間の水位が基礎地盤付近まで低下した時間を決壊に要した時間とする．まず，Case 1 ~ Case 6 について比較する．Case 1 と Case 2 の決壊に要する時間はわずか 2% の粘土含有率であってもその差が 36 秒となるのに対し，Case 2 と Case 4 の時間差は 10 秒と短くなっている．ところが，Case 4 とさらに 2% 粘土含有率を大きくした Case 5 の時間差は 54 秒と長くなり，Case 6 のように粘土を大幅に増加させると時間も急激に長くなる．以上のことから粘土含有率が大きくなることで耐浸食性も向上することがわかるが，その中で粘土の粘着効果を十分に発揮させるための最適な粘土含有率が存在すると考えられる．Case 1 ~ Case 6 の決壊プロセスに着目すると，Case 1 ~ Case 3 では浸食が下方向に進行する下方浸食となっており越流水が集中することで狭く深い一本の流路が形成される．Case 4 ~ Case 6 では粘着性土の特徴的な浸食である 3 段の階段状の流路となる浸食となっている．このことから粘土を含有する模擬堤防の決壊プロセスにおいて下方浸食から階段状の浸食となる粘土含有率の境界があり，それが 5% ~ 7% の範囲にあると考えられる．次に，Case 5 と同じ粘土含有率で砂の一部を礫に置き換えた

キーワード：堤防決壊，越流，粘着性材料，浸食，粘土

連絡先：〒 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1，TEL 03-5286-3401，FAX 03-5272-2915

表 -1 各ケースの決壊に要した時間

Case	含有比率(%)			決壊に要する時間 (sec)
	粘土	砂	礫	
1	0	100	0	110
2	2	98	0	146
3	5	95	0	155
4	7	93	0	156
5	9	91	0	210
6	30	70	0	3960
7	9	82	9	285
8	0	57	43	60
9	20	50	30	破堤なし
10	30	40	30	破堤なし

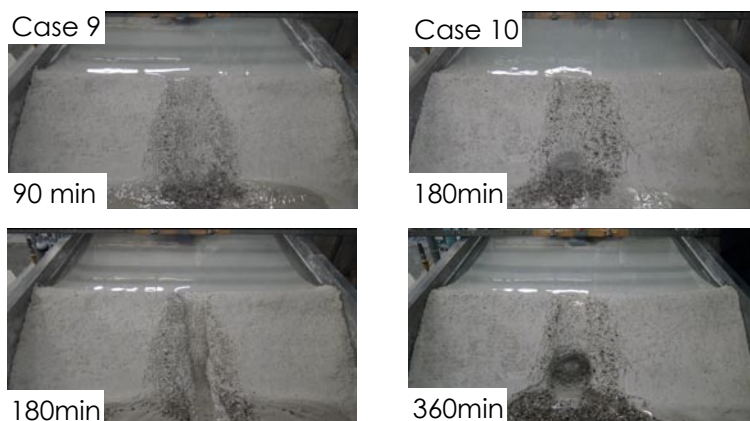


写真 -1 模擬堤防の決壊プロセス：堤内地の斜め上方から撮影した実験結果を示す。Case 9 は粘土：砂：礫=2：5：3、Case 10 は粘土：砂：礫=3：4：3である。

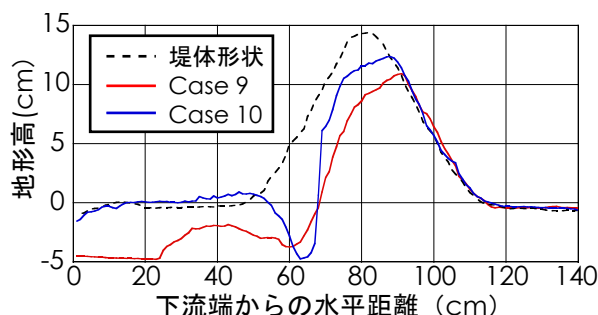


図 -1 実験後の堤体最終形状

Case 7 とを比較する。決壊に要する時間は Case 7 が Case 5 よりも 75 秒長い。このことから堤防に礫が含有することで礫の噛み合わせ効果や粘土の粘着効果により堤防の浸食が抑制されることがわかる。次に、Case 9 の礫の噛み合わせ効果を確認するため、砂礫の含有率を変えずに粘土分をなくした Case 8 の実験について示す。Case 8 ではわずか 1 分で決壊しており、粘土を除いたことによる耐浸食性の低下は顕著なものとなることがわかる。さらに、Case 1 と Case 8 を比較すると、Case 8 がより早く決壊しており、砂礫のみの模擬堤防よりも砂のみの模擬堤防の方が耐浸食性が高いことがわかる。このことから礫の噛み合わせ効果を発揮させるには粘土による粘着性が必要であり、粘土含有率が一定以下であると礫の存在が弱点となると考えられる。

写真 -1 は Case 9 および Case 10 の 2 ケースの決壊時の様子であり、堤内地側から堤体を斜めに見下すように撮影したものである。Case 9 と Case 10 の同時刻の決壊の様子を比較する。両ケースとも法面の浸食過程ではまず粘土と砂が越流水による浸食を受け、そこから礫が表面に露出することで転がり落ちる。そして、移動する礫によってさらに浸食が進行する。Case 9 がより浸食の影響を受けており、Case 10 では広い流路が形成されるのに対し、Case 9 では浸食が進行することで越流水が集中していき、狭い一本の流路を形成している。図 -1 は Case 9 および Case 10 の 2 ケースの実験終了後の縦断図である。Case 9 の注水時間が 3 時間、Case 10 の注水時間が 6 時間であるにもかかわらず、粘土含有率の大きい Case 10 の方が浸食は緩やかであり、耐浸食性に優れていることがわかる。礫が含有する場合においても、粘土含有率の大きいほど粘土の粘着効果と同時に礫の噛み合わせ効果もより高く発揮されるため、模擬堤防の耐浸食性が向上すると考えられる。

4. 結論

本研究では粘土・砂・礫の 3 種混合の模擬堤防における 3 種の含有比率の違いが決壊プロセスに与える影響について検討した。粘土含有率を大きくするほど耐浸食性の向上が見込まれるものの粘土の粘着効果および礫の噛み合わせ効果を十分発揮させるためには一定の粘土含有率が必要であることがわかった。

謝辞：本研究は文部省科学研究費基盤研究 (C) (研究代表者：関根正人、課題番号：No.16K06519) を受けて行われたものである。

参考文献：1) 関根正人、堀江翼、佐藤耕介：越流による模擬河川堤防の決壊プロセスに関する検討、土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.74, No.4, I_1057-I_1062, 2018. 2) Jose A. Feliciano Cestero, Jasim Imran, and M. Hanif Chaudhry. : Experimental Investigation of the Effects of Soil Properties on Levee Breach by Overtopping, J. Hydraul. Eng., 2015, 141(4): 04014085