

降雨による盛土構造物破壊過程に関する基礎実験

Impact of rainfall characteristics on bank failure

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 外館貴雅 (Takamasa Todate)
北海道大学大学院工学研究院 学生員 Supapap Patsinghasanee
北海道大学大学院工学研究院 正会員 木村一郎 (Ichiro Kimura)
北海道大学大学院工学研究院 フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. 背景

近年台風や集中豪雨が原因の水害が多く確認されており、特に堤防決壊による被害は甚大である。2015 年 9 月、台風 18 号の通過に伴い北関東を中心に記録的な大雨が降った。その結果、茨城県の 1 級河川である鬼怒川の堤防が決壊し、近くの市町村に深刻な被害を与えた。降雨による堤防決壊の原因は大きく二つに分けることができる。一つは降雨により河川の流量が増加し堤体ののり尻部を侵食することで崩壊を起こす場合、もう一つは降雨が直接堤体に降り注ぎ堤体の表面や内部を侵食する場合である。前者の原因はにおいて多くの実験や解析が行われており、堤防崩壊のメカニズムはある程度解明されている。しかし、降雨により堤体の表面を流れる表層流がどのような挙動を示すのかについては明らかになっていない。そのため、本研究では堤体の表面を流れる表層流の挙動を観察すると共に、降雨が堤防決壊に与える影響についての見検討を目的とし、堤体の小型模型を用いた実験を行った。

2. 実験条件

今回の実験では図-1 に示すように、底面積 80cm×80cm、高さ 65cm の水槽の中に、幅 80cm、長さ 60cm、高さ 15cm、斜面勾配 1/3 の堤防の小型模型を設置して実験を行った。水槽には観察のためアクリル製の窓を横 2 面に設置した。堤体の試料は珪砂 6 号とシルトを表-1 の割合で混ぜたものを使用した。人工降雨装置は図-2 のようなものを用いた。上部の貯水槽の大きさは底面積 80cm×80cm、高さ 30cm であり、貯水槽内の水の量を測るために簡易的な水位計が設置されている。貯水槽の底には直径 1mm の穴が 10cm 間隔で空いており、その穴から水が雨となって降り注ぐような仕組みになっている。また貯水槽には水を供給するパイプと排出するパイプが設置されているため、降雨量を一定に保つことができる。堤体の作成後 100kg の荷重を 3 日間載荷重し実験を行った。降雨装置は始動直後の降雨強度が安定しないため、装置の作動開始から 5 分間ブルーシートを用いて降雨を水槽外に排出した。実験中は堤体に与える影響を降雨のみとするために水槽に溜まった余分な水をポンプで排水した。観測は堤体の側部と上部から定点カメラで撮影し、実験前と堤体に降雨が降り注いでから 2 分後に 3D スキャナーを用いて 3 次元画像の投影を行った。また、堤体

内部に加速度センサーを設置し堤体の崩壊形態を調べた。
Case1 は降雨装置、堤体に特に手を加えないで実験を行った。Case2 は堤防表面への降雨の影響を小さくするために貯水槽の下部に網を設置し雨を分散させ、貯水槽からポンプで水を汲み上げ降雨量を小さくした。なお、実験中の貯水槽の水位は Case1 では 10cm、Case2 では 6cm であった。

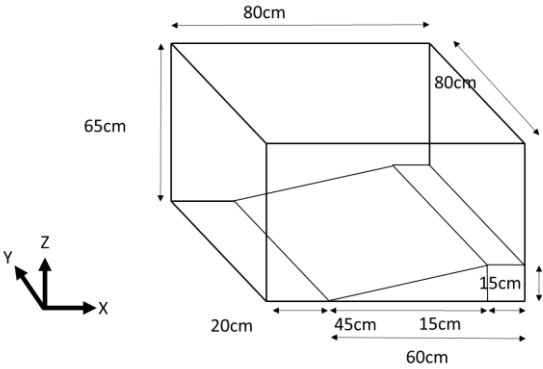


図-1 実験水槽と堤体の寸法

表-1 試料の割合

珪砂6号(%)	シルト(%)	水(%)
70	30	39.63

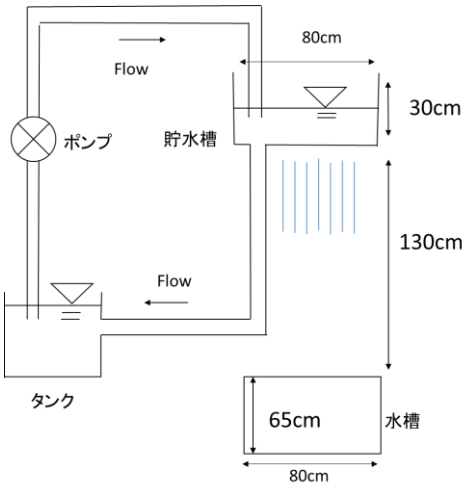


図-2 人工降雨装置の概要

3. 人工降雨の計測と考察

実験に先立ち人工降雨の特性を計測した。降雨の計測は多機能雨量計 Parsivel で行った。計測項目は降雨の粒径、速度である。水槽に堤体を設置する前に1時間の計測を2回行い、15秒ごとに特定の粒径と速度の粒子の個数を取り出した。各ケースで測定した降雨の平均粒径、平均速度を表-2に示す。図-3はCase1の一回目の測定の粒子の分布である。図-3より粒子の速度が速いほど粒径が大きいことが確認できる。また、粒子の個数のピークは一定の範囲に集中しており、平均粒径と平均速度はピークの周辺の値であることが分かる。

さらに、円筒柵を用いて各ケースでの降雨強度を測定した。柵は直径10cm、高さ13cmの物を用いて、各ケースで場所を変え、4回の測定を行い、柵が水で満たされるまでの時間から降雨強度を算出した。降雨強度の測定結果を表-3に示す。表-3よりCase1の降雨強度がCase2よりも大きいことが分かる。すなわちCase1が降雨から受ける影響はCase2よりも大きいので、盛土の崩壊はCase1の方が早いと予測できる。なお現実の降雨強度より値が大きいのは装置の特性上、降雨の位置が固定されているためであると考えられる。

表-2 人工降雨装置の降雨特性

	平均粒径(mm)	平均速度(m/s)
Case1(1回目)	0.793	3.342
Case1(2回目)	0.785	3.340
Case2(1回目)	1.340	3.448
Case2(2回目)	1.396	3.389

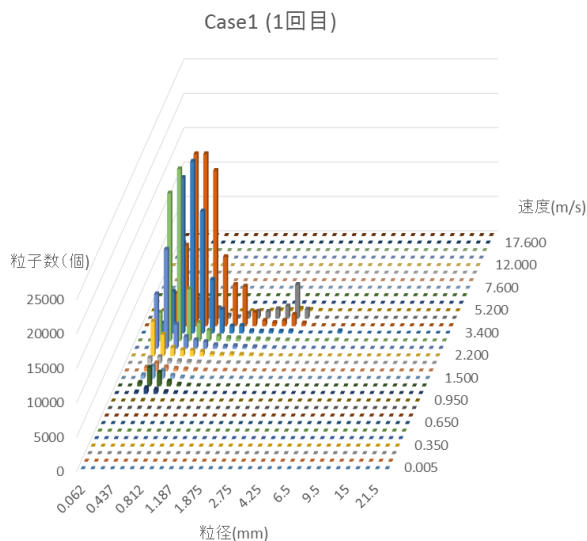


図-3 Case1, 1回目の測定の降雨の粒子数の分布

表-3 降雨強度の測定結果 (mm/hr)

	1回目	2回目	3回目	4回目	平均
Case1	629.9	752.4	744.0	768.0	723.6
Case2	596.9	688.2	631.6	585.0	625.4

4. 実験結果と考察

4-1. 堤体の観察

図-4に実験開始2分後のCase1とCase2の堤体の様子を示す。図-4より表層流が堤体の表面を削る様子を確認できる。表層流は堤体の表面を一様に流れるのではなく、何本かに枝分かれして流れている。そのため、表層流が集中して流れている地点が特に多く削られている。また斜面崩壊が発生しており、斜面の下部から上部に向かって徐々に崩壊していく様子が見て取れる。逆に堤体の天端は降雨により直接削られており、表層流の影響をほとんど受けていない。Case1とCase2を比較すると、Case1はCase2より降雨量を小さくしているのに、崩壊がより短時間で起こっていることが分かる。さらにCase1は表層流の流量も大きいので、堤体表面に作られる溝もより深く、溝に水が集中し他の部分よりも削られ方が激しい。

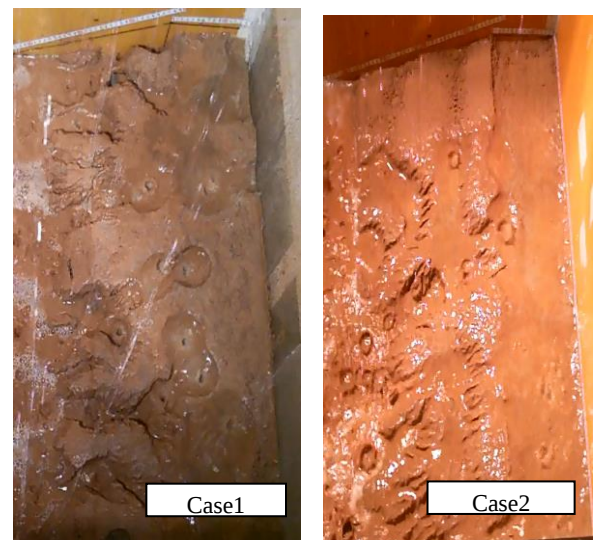


図-4 実験開始後2分後の堤体の様子

4-2. 3D スキャナーによる測定結果

図-5は3Dスキャナーを用いて作成した実験前の堤体と実験開始2分後のCase1とCase2の3次元画像である。なお、図-5の実験開始全体図に示されている位置を座標原点とする。堤体の高さの変化や表層流に削られた斜面が再現されている。実験開始2分後の斜面の下部を見ると、水面がスキャンされてしまっている。3Dスキャナーでは水面下の斜面まではスキャンできないため、水面より上にある堤体の斜面上部、天端の変化について考察していく。Case1は斜面上部には表層流によって大きな溝が作られ、天端部分への侵食が始まっていることが確認できる。一方Case2では表層流によって小さな溝がいくつも形成され、斜面を階段状に侵食していることが分かる。Case2はCase1より降雨量が小さいため侵食が遅く、数分後にはCase1と同規模の斜面破壊が進行すると予測できる。斜面上の表層流は最初に無数に枝分かれし小さな溝を作りながら侵食を始め、溝を流れる表層流同士が合流することにより大きな侵食を始めると考えられる。

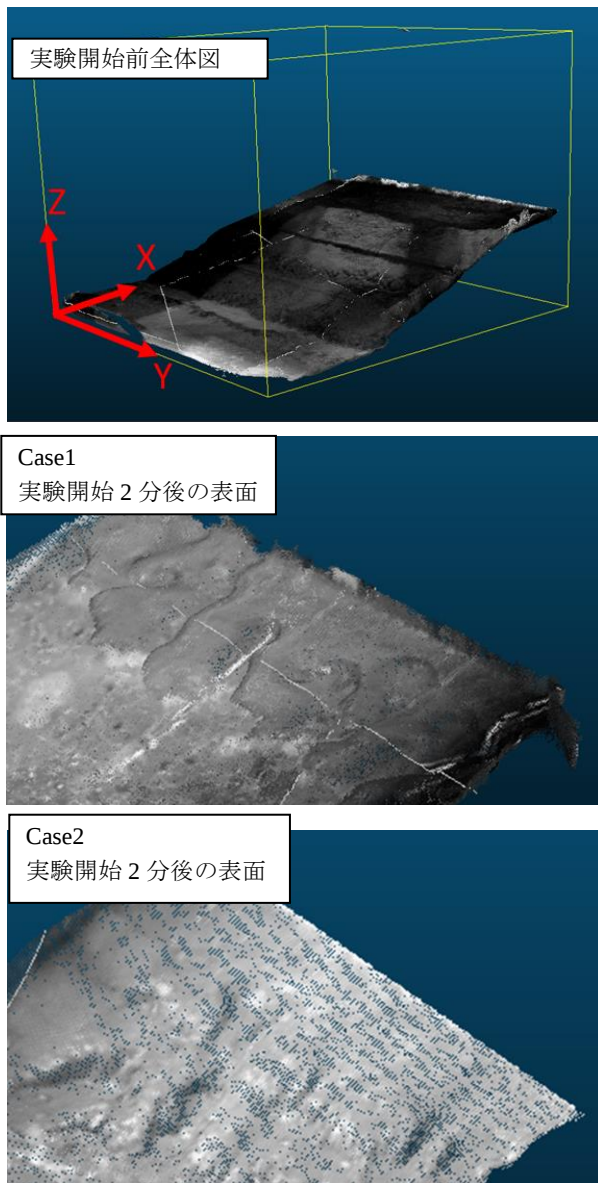


図-5 堤体模型の 3 次元画像

図-6, 図-7 は 3 次元画像の断面図から作成した堤体の表面の変化である。なお実験開始前より 2 分後の方が Z 座標の値が大きい部分は水面である。また、各グラフにおいて X 座標の範囲が違うのは、各グラフの元となった断面図においてスキャンできた範囲が異なるからである。

Case1 は全体的に Case2 より侵食が大きく特に天端部分から斜面上部の高さの変化が大きい。これは Case1 が Case2 より降雨量が大きいため降雨が堤体の表面を直接削るためであると考えられる。a) のグラフにおいて $X=200\sim500\text{mm}$ の範囲で 高さが最大で約 60mm 減少している部分があることが読み取れる。また Case 1 の 3 つのグラフから、斜面下部は地面に対してほぼ平行な状態になるまで削られていることが分かる。

一方 Case2 において、斜面下部は表層流によって大きく削られているが、斜面上部、天端部分はほとんど変化していないことが分かる。Case2 は Case1 より降雨量が少ないため降雨が表面を削る量が少なく、より表層流の

影響を受ける斜面下部が大きく侵食されたと考えられる。また d) のグラフでは $X=400\text{mm}$ の付近に段差が形成され、e) のグラフの $X=130\sim340\text{mm}$ の範囲、f) のグラフの $X=100\sim350\text{mm}$ の範囲において表面が円弧状に削られていることが確認できる。

Case1 と Case2 に共通して、同一斜面であっても場所によって侵食形態が異なっていることが分かる。原因としては降雨量と表層流量のバランスが考えられる。今回の実験では雨が降る位置が固定されているため、降雨によって直接削られるのは特定の地点のみである。そのため、降雨の影響のみを考える場合、堤体表面の特定の地点が地面に対して垂直に削られ、階段状の表面が形成される。一方、表層流は斜面下部方向に流れていくため、表面は X 軸方向に広く削られ、特に流量が大きい部分が円弧状に削られる。堤防の表面の侵食はこの 2 種類の侵食が組み合わせによって発生すると考えられる。これを踏まえて Case1 と Case2 を比較すると、Case1 は降雨の影響の方が大きいので階段状に近い斜面が多く形成され、Case2 は降雨量が少ないため表層流の影響が大きく、円弧状に近い斜面が形成されたと考えることができる。

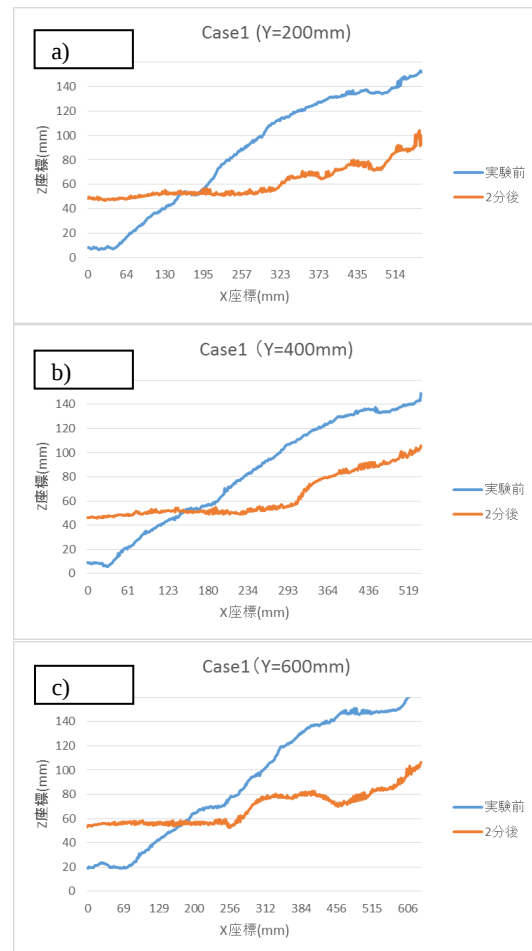


図-6 堤体の表面の変化(Case1)

a) $Y=200\text{mm}$, b) $Y=400\text{mm}$, c) $Y=600\text{mm}$

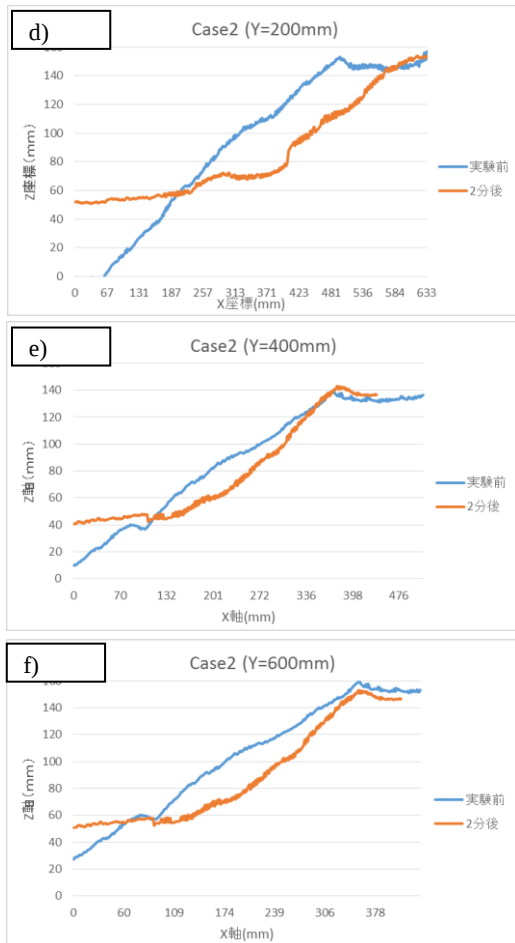


図-7 堤体の表面の変化(Case2)

d) Y=200mm, e) Y=400mm, f) Y=600mm

4-3. 加速度センサーによる測定結果

図-8 は加速度センサーの設置箇所である。今回の実験では堤体内に 24 個のセンサーを設置したが、加速度が大きく変化したエリア A について詳しく考察していく。図-9 はエリア A の Case1 と Case2 のセンサーの加速度の変動を示したものである。

Case1 は実験開始後約 160 秒後に加速度が Y 軸方向に 1G、Z 軸方向に 0.25G 変動している。このことから Case1 において斜面に対して横方向に削られた表面が流されたが発生していると推測できる。これは Case1 において階段状の斜面が形成され、表層流が横方向に流れたためだと考えられる。Z 軸方向の正の変化は水の浮力によるものと考えられるので、斜面上部に水が浸透していることが分かる。

Case2 においては、210 秒後に X 軸方向に加速度が 0.475G 変化している。このことから斜面下部方向にすべり崩壊が発生していると推測できる。これは Case2 において円弧状に斜面が削られたためと考えられる。

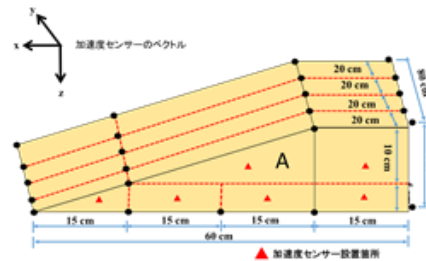


図-8 加速度センサーの設置箇所

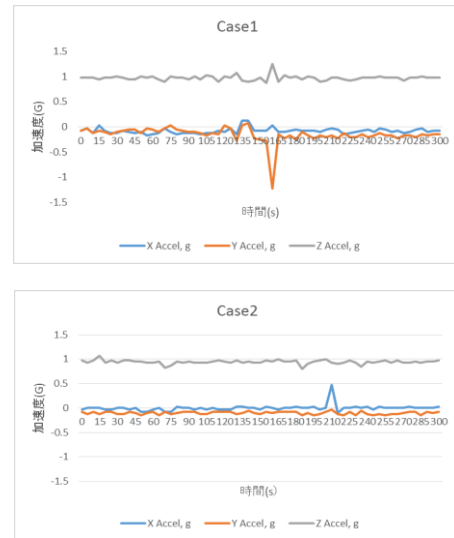


図-9 エリア A の加速度の変動

5. 結論

本研究は小型の堤防模型を用いた実験によって降雨によって堤体の表面がどのように侵食されるのかを観察した。その結論と課題を以下にまとめる。

- 1) 実験の観察の結果、表層流は一樣ではなく何本かに枝分かれして堤体の表面を流れてゆき、斜面を局部的に侵食する様子が見られた。
- 2) 3 次元画像の解析の結果、降雨の影響が大きい場合は階段状に侵食され、影響が少ない場合は円弧状に侵食されることが分かった。
- 3) 今回は同一の試料、斜面の角度の堤防模型を用いて実験を行ったが、試料内のシルトと水の割合、斜面の角度によって表面の侵食がどのように進むのか今後検討していく必要がある。

参考文献

- 1) Supapap Patsinghasanee : Experimental and Numerical Study on Overhanging Failure of River Bank, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.71, No.4, I_127-I_132, 2015.
- 2) 山村和也, 久楽勝行: 堤防への浸透と堤体の安定性, 土木研究所, 土木研所報告第 145 号, pp41-72, 1983
- 3) 島田友典, 平井康幸, 辻珠希: 千代田実験水路における越水破堤実験, 寒地土木研究所, 水工論文集第 54 巻, pp811-816, 2010
- 4) 朱偉: 降雨浸透が斜面崩壊に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.541, III-35, pp99-108,