

地震・洪水複合災害実験水路に基づく浸潤面が加振時の堤体変形に及ぼす影響

東京工業大学	学生会員	○入江	美月
東京理科大学	学生会員	倉上	由貴
東京理科大学	正会員	二瓶	泰雄
東京理科大学	学生会員	桜庭	拓也

1. 序論

H27年鬼怒川決壊のように、豪雨に伴う堤防決壊が近年各地で多発している。また東日本大震災では、地震による堤防被災が2100箇所強（東北・関東）も生じた。堤防が決壊しひとたび洪水氾濫が発生すると甚大な浸水被害が生じるため、堤防の設計・整備・管理は重要であることは論をまたない。河川堤防の設計で扱う外力は、洪水に起因する侵食（洗掘）や浸透及び地震である。堤防は「計画高水位以下の水位の流水の通常的作用（侵食、浸透）に対して安全な構造」と「平水時に、地震により壊れても浸水の二次災害を起こさない」ことを原則とする。これらの洪水と地震の作用は別々に扱われているが、地震と洪水がほぼ同時期に発生する複合災害も散見される。古くは1948年福井地震と豪雨、最近では2016年熊本地震と豪雨による熊本県木山川の堤防決壊がある。このように、地震と洪水の同時発災は現実的な課題として考慮する必要がある。

本研究では、地震実験用振動台と洪水用水路を結合した“地震・洪水複合災害用実験水路”を新たに製作した。これを用いて地震・浸透同時発生による堤防被災の基礎実験を行い、浸透状況が加振時の堤体変形に及ぼす影響を調べる。

2. 研究方法

(1) 地震・洪水複合災害用実験水路の概要

地震・洪水の同時発生を再現するために、地震・洪水複合災害実験水路を製作した。その概要を図-1に示す。実験水路の寸法は、長さ5.0 m、奥行き0.6 m、高さ1.0 mであり、水路全体が振動台上に設置されている。振動台は水平一方向（水路流下方向）に加震でき、駆動方式は空圧式エアシリンダーである。エアシリンダーは圧縮空気を生成するエアコンプレッサーとレギュレータを介して配管で接続し、シリンダー内におけるピストン往復運動の方向切替用センサ2つが設置されている。この中で、レギュレータの空気圧 P_a 、スピードコントロール用バルブの開度 V_{ap} 、切替用センサ間隔 L の3つの指標により加振条件を調整する。また、洪水用の浸透実験では、水路下流側に堰を設け定水位浸透実験ができる。将来的には、水路を延長し、洪水流や津波による越水実験も可能となるように拡張する。

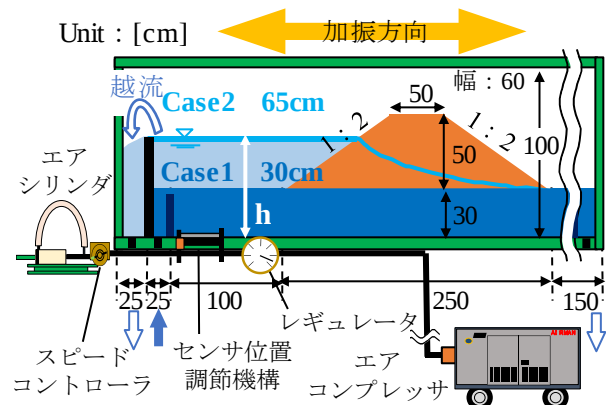


図-1 地震・洪水複合災害用実験水路の概観

(2) 実験方法の概要

水路内に堤体高さ H 50 cm、天端幅50 cm、表・裏のり面が2割勾配、基礎地盤厚さ30 cmの模型堤防を設置した。これは実物（高さ5 m）の1/10の縮尺比となる。堤体土として銚田砂（ $D_{50}=0.185$ mm, $F_c=3.6$ %, 茶色）を使用し、層厚2.0 cm、最適含水比13.5 %, 締固め度 $D_c=90\%$ で模型とした。本実験では、表-1に示すように、堤防模型作製後、まず加振し、次に浸透を定常となるまで行い、その状態で再度加振した。浸透実験の水位 h はCase1では基礎地盤上端の0.3 m、Case2では $0.7H$ に相当する0.65 mとした。地震波の入力条件は、正弦波①（加速度410～460 gal, 周波数1.9～2.0 Hz）、正弦波②（加速度770～790 gal, 周波数1.9～2.4 Hz）とし、順に与えた（各々30波）。表中には実堤防スケールの値も表記しており、実スケールの加速度は同じ、周波数は0.3～0.4 Hz（周期2～3 s）になる。

堤体変形計測用に複数のビデオカメラ等を設置すると共に、可視化用に白色の珪砂7号を2 cm間隔で層状に設置した。また、堤体内水位用にマノメータや自記式小型水位計（U-20, Onset 製）、加振中の間隙水圧変化用に間隙水圧計（BPB-A, 共和電業（株）製）をそれぞれ水路底面に固定設置した。

キーワード 河川堤防, 複合災害, 地震, 洪水, 浸透

連絡先 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学 TEL (03) 3726-1111

3. 結果と考察

(1) 加振時の堤体変形挙動と浸潤面高さの影響

加振時における堤体の変形挙動を見るために、Case1（基礎地盤高さの水位）で浸透後の正弦波②を与えた加振実験における堤体正面を斜め上から撮影した画像を図-2に示す。ここでは、加振後19波、22波目の結果を示す。なお、Case1, 2共に、浸透前の正弦波①、②、浸透後の正弦波①を与えた加振実験では堤体変形や間隙水圧の上昇は見られなかった。これより、まず、開始10波目程度までは堤体の目立った変位は見られないが、その後、堤体が水平・鉛直方向に変位し、天端の沈下が始まった。その変位が時間と共に増加し、のり面中央では縦断亀裂が発生し、その亀裂が大きくなった（19波目）。さらに、亀裂はのり面上部や天端にも発生し（22波目）、亀裂深さは基礎地盤上面付近まで達した。天端は大きく沈下するとともに、のり面の亀裂が発達し段差も現れた。

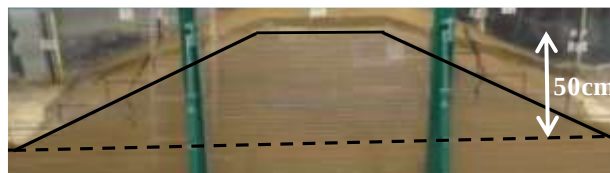
Case1, 2における正弦波②の加振終了後の堤体形状をまとめたものを図-3に示す。ここでも、浸透後の正弦波②を対象とする。これより、浸潤面が基礎地盤高さにセットされたCase1では、前述したように、のり面や天端において大きな縦断亀裂が発生し、最大深さは25.0cmであった。また、天端も約6cm（=堤体高さの1/8）も沈下し、表・裏のり面共にはらみ出しが発生した。一方、 $h=0.7H$ （堤体高さの7割の水位）の浸透を行ったCase2では、縦断亀裂がいくつか発生するが、その深さはCase1よりも小さく、最大亀裂深さは16.5cmであり、小さな亀裂の数も少ない。天端の沈下は約6cmであり、Case1と同程度であった。また、はらみ出しは裏のり面のみに見られた。このように、浸潤面高さが異なると、天端沈下量は同程度であったが、縦断亀裂の数や深さ、のり面のはらみ出しの発生状況が大きく異なることが示された。今回のCase2では表のり面の水を張ったまま実験を行っており、静水圧が表のり面に作用することで安全側にシフトした。

(2) 加振前後のピエゾ水頭の横断分布

同じCase1と2における加振前後のピエゾ水頭（浸潤面高さ）の横断分布を図-4に示す。加振前はマノメータ、加振後は間隙水圧計の値を用いた。これより、加振前は両ケースとも上流側に与えた水位から裏のり尻にかけて滑らかに変化するピエゾ水頭の変化となる。一方、加振後は両ケースとも大きく増加した。特に天端中央ではピークとなり、過剰間隙水圧に相当するピエゾ水頭の増加分は、Case1, 2でそれぞれ50cm（5kPa）、40cm（4kPa）となった。天端沈下量は同程度であったが、その他の主な堤体変形である縦断亀裂の数や深さ、のり面のはらみ出しがCase2よりもCase1のほうが顕著に表れているのは、この加振前後のピエゾ水頭の増大分の過剰間隙水圧の大きさがCase2よりもCase1の方が大きいことに起因していると考えられる。

表-1 実験条件

実験ケース		Case1				Case2			
実験項目		加振		浸透		加振		浸透	
加振条件	波形	①	②	①	②	①	②	①	②
	加速度 [gal] ※縮尺 $\times 1$	414	791	402	752	460	774	376	-
※縮尺 $n=10$ 倍 実堤防 の場合 $\times 1/n^{0.75}$	周波数 [Hz] $\times 1/n^{0.75}$	1.9	2.4	1.9	2.2	2.0	2.2	1.9	-
	水位h [cm]	—		約30		—		約65	

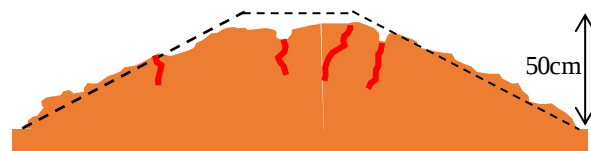


(a) 19波目

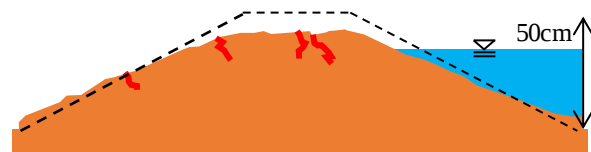


(b) 22波目

図-2 加振中の堤体変形状況（Case1・浸透後、正弦波②、斜め上からの撮影）



(a) Case1



(b) Case2

図-3 加振終了後の堤体変形状況（浸透後、正弦波②）

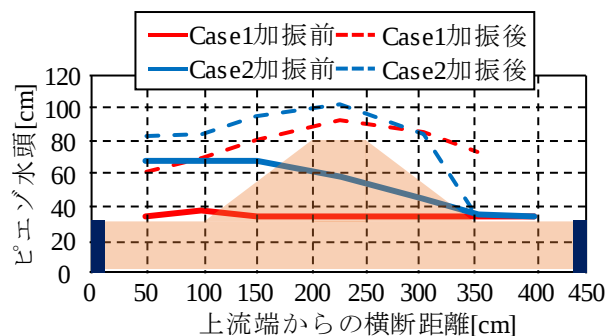


図-4 Case1と2における加振前後のピエゾ水頭の比較