

地震・洪水の耐複合災害性評価のための河川堤防の地震応答シミュレーションの検証

東京理科大学大学院 学生会員 ○上野瑞樹  
東京理科大学 正会員 菊池喜昭, 二瓶泰雄

1. はじめに

近年、東日本大震災（2011年）や熊本地震（2016年）、東日本台風（2019年台風19号）と津波・地震・洪水と様々な形態の大規模災害が発生し、多くの河川・海岸堤防が被災している。堤防の被災要因として、地震動による堤体変形、津波・洪水の越流・浸透・洗堀などが挙げられる。また、これらの複数の災害が同時もしくは同時期に発生する複合災害の発生が懸念されており、2011年東日本大震災時には地震-津波、2016年熊本地震では、地震-洪水の複合災害が発生している<sup>1)</sup>。著者らは、地震-洪水もしくは地震-津波の複合災害実験を実施し、地震時に発生した被覆工の変形・亀裂が河川（海岸）堤防の耐越流性を低下させ、決壊までの時間を早めていることを指摘した<sup>2) 3)</sup>。このように、河川堤防の耐複合災害性の評価には、堤防の耐震性が重要となる。著者らはこれまで重力場における地震・洪水（津波）複合災害用水路を用いた室内実験を主に行ってきたが、模型実験実施には多くの労力が必要となる課題がある。本研究では地震・洪水の耐複合災害性評価に必要となる、地震時における河川堤防の動的応答シミュレーションの有効性を検証することを目的とする。ここでは、著者らが行った堤防模型の複合災害実験<sup>3)</sup>を対象として地震時動的応答シミュレーションを行い、実験結果との比較を通して解析結果の妥当性と限界を検討する。

2. 研究方法

(1)地震時動的応答シミュレーション手法の概要：地震時の動的応答解析には、有限要素法に基づく地盤の動的有効応力解析モデル（UWLC, 株）FORUM8製を用いる。本モデルは、有効応力に基づく弾塑性理論に基づいて、地震時の過剰間隙水圧や剛性低下を考慮できるものである。なお、本論文では、モデル解析の初期検討段階であるため、過剰間隙水圧の影響を考慮していない。初期応力解析時は全体に弾性モデル、加振時は基礎地盤に一般化塑性モデル<sup>4)</sup>、堤体土に Ramberg-Osgood モデル<sup>5)</sup>を用いる（表-1）。

(2)解析条件：本研究における解析対象の堤防は、図-1に示すように、複合災害実験で用いた堤防模型であり、基礎地盤厚さ30cm、堤体高さ40cm、のり面勾配が2割の実物の1/10スケールの模型である。補強条件としては、天端をアスファルト舗装した堤防（Case1）と、天端・表・裏のり面にコンクリートブロックを敷設し、一部のブロック下に碎石層を設置した堤防（Case2）である。解析では、各材料の重量のみを考慮し、その設定と位置は表-1、図-1にそれぞれ示すとおりである。また、コンクリートブロック厚さが及ぼす影響を見るため、Case2では、実験と同じ厚さ5cm（Case2-1）と倍の10cm（Case2-2）を対象とした。本解析の境界条件としては、模型実験に合わせて、側方を水平固定、底面を水平・鉛直方向固定とした。加振条件は、実験と同じく、800galで30波のsin波を与えた。地下水位は基礎地盤表面にセットした。

表-1 材料条件

材料区分	色	モデル	単位体積重量 $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
堤体土		ROモデル	17.75(湿潤)
基礎地盤		一般化塑性モデル	18.75(飽和)
天端工		弾性モデル	24.5
コンクリートブロック			22.54
碎石層			15.37

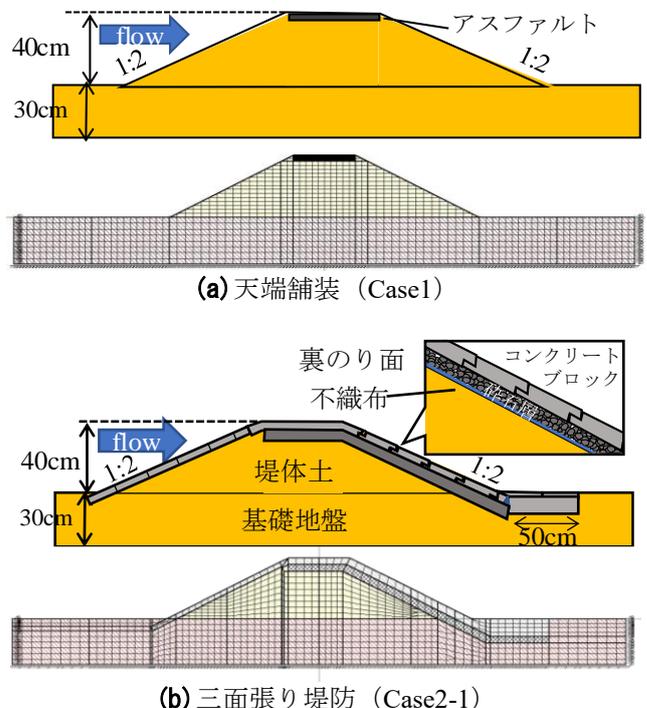


図-1 堤体条件（上：実験堤防，下：解析モデル）

キーワード 洪水，堤防，地震，複合災害，地震応答シミュレーション  
〒278-0022 千葉県野田市山崎 2641 TEL:04-7124-1501(内線 4069)

3. 結果と考察

(1)加振後の変形パターンの比較：本解析による堤体変形形状を見るために、加振前後の堤体変形形状の実験結果と解析結果を図-2に示す。ここでは、実験が行われた天端舗装堤防 (Case1) と三面コンクリート張り堤防 (Case2-1) を対象とし、30波加振後における堤体形状を示す。これより、まず Case1 では、実験結果では天端沈下と共に、大小様々な亀裂の発生や天端舗装部分の変形が見られる。同条件の解析結果に関しては、天端沈下は概ね再現しているものの、堤体土の亀裂や天端舗装部分の変形は再現できていないことが分かる。一方、三面に被覆工がある Case2-1 に関しては、実験結果を見ると、堤体変形が Case1 よりも小さく、被覆工の変形抑制効果が見られる。ただし、被覆工間の隙間や不陸が発生している。解析結果についても、堤体全体の変位が抑制されている様子は実験結果と同様な傾向が見られるが、被覆工の隙間や不陸は再現できていない。これは、モデル性質上の限界もあるが、被覆工部分の計算格子の配置に工夫が必要であり、今後の課題とする。

(2)天端沈下量の時間変化の比較：次に、堤体変形の時間的推移を調べるために、天端沈下量の時間変化を図-3に示す。ここでは、天端舗装堤防 (Case1) と2種類の被覆工厚さの三面コンクリート堤防 (Case2-1, 2-2) の解析結果を表示する。また、Case1 の実験値及び入力条件の加速度波形を図示し、全て30波分の結果を示す。これより、3ケースの解析結果共に、時間と共に天端沈下量はほぼ線形的に増加している。一方、Case1 の実験値は実験開始から18波目 (t=約7s) 以降に天端沈下が始まる非線形的な挙動を示しており、解析値とは一致しない。実験では過剰間隙水圧の増加に伴う堤体変形と天端沈下が発生しているが、解析には現段階では過剰間隙水圧影響を考慮していないため、実験値との差が生じた。一方、最終的な天端沈下量に関する実験値と解析値の差は、Case1 や Case2-1 においてそれぞれ 0.3cm, 0.0cm と小さく、モデルパラメータのチューニングを行えば再現性は高いと言える。さらに、天端沈下量は Case1 (厚さ 0cm) > Case2-1 (5cm) > Case2-2 (10cm) の大小関係となっており、天端沈下量の被覆工の厚さの違いによる天端沈下量の差を定量的に評価できており、本解析の一定の有効性を検証できたものと考えられる。

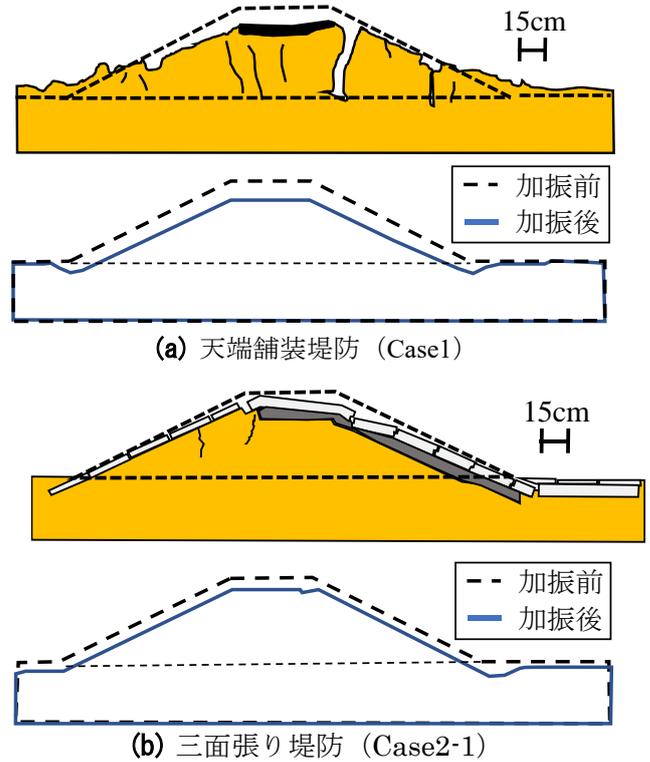


図-2 加振後の堤体変形形状に関する実験値 (上) と解析値 (下) の比較

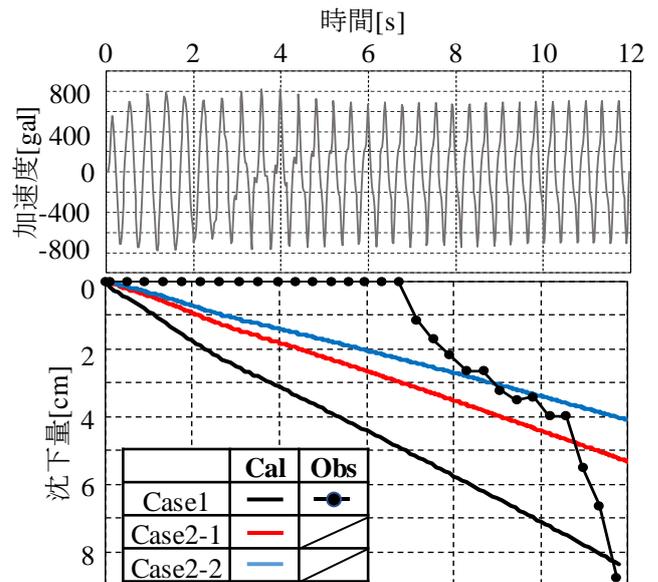


図-3 実験値と解析値による天端沈下量の時間変化の比較 (図中上には加速度の時間変化も示す)

参考文献

- 1) 桜庭・二瓶・倉上・入江, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.4, pp. I\_1297-I\_1302, 2017..
- 2) 安井, 倉上, 二瓶, 佐藤, ジオシンセティックス論文集, Vol.33, pp.39-46, 2018.
- 3) 上野・二瓶, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.75, No.2, pp. I\_859-I\_864, 2019.
- 4) O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor : マトリックスと有限要素法[改訂新版], 科学技術出版社, 1996.
- 5) 石原研而 : 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, pp.23-25, 1982\*.