

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H02298

研究課題名（和文）豪雨と地震の複合作用下における溜池堤体の地震時挙動の解明と耐震性強化法の検証

研究課題名（英文）Seismic behavior of small earth dams under combined effects of heavy rainfall and earthquakes and verification of earthquake resistant countermeasures

研究代表者

澤田 豊（Sawada, Yutaka）

神戸大学・農学研究科・准教授

研究者番号：60631629

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年、豪雨が頻発化する中、地震と豪雨が近い間隔で発生する複合災害のリスクが高まっている。本研究では、ため池堤体への降雨浸透特性を解明することを目的に降雨模型実験および堤体内水位計測を行った。また、地震と豪雨の複合作用を受ける堤体の力学挙動を解明し、対策工の提案と効果を検証するため、遠心力模型実験ならびに数値解析を実施した。その結果、堤体内水位は豪雨時に大きく上昇し、先行降雨が堤体の地震時の変形に影響を及ぼすことがわかった。一方、先行地震による亀裂は降雨の浸透を促し、侵食に影響を及ぼすことが明らかとなった。さらに、フィルターユニットの法尻補強は堤体の変形抑制に効果的であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

降雨と地震の複合作用を受ける土構造物の挙動についてこれまで未解明な点が多くあったが、本研究で実施された遠心力模型実験から、先行する事象（地震や降雨など）がその後に発生する事象に及ぼす影響について明らかにした。また、本研究では堤体の補強方法としてフィルターユニットを提案したが、貯水した状態での施工が可能である点はこれまでの工法には無い特徴であり、供用中のため池堤体の簡易的な耐震補強方法として選択肢の一つとなり得る。

研究成果の概要（英文）：These days, heavy rain events are frequent, and there are growing concerns for combined disasters; earthquakes and heavy rains occur at close intervals. In this study, model tests and water-level-measurements were conducted to clarify the rainfall infiltration characteristics of earth dam embankments. Moreover, centrifuge model tests and numerical analyses were conducted to clarify the behavior of the embankments subjected to the combined effects of earthquakes and heavy rains, and to propose countermeasures and verify their effectiveness. The results show that the water level in the embankment rises greatly during heavy rainfall and that the preceding rainfall affects the deformation of the embankment during earthquakes. On the other hand, the cracks caused by the preceding earthquake promote rainfall infiltration and affect the erosion. In addition, the reinforcement of the embankment toe with filter units was effective in suppressing the deformation of the embankment.

研究分野：地域環境工学

キーワード：ため池 豪雨 地震 模型実験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化にともなう気候変動により、局地的大雨が増加傾向にあることは言うに及ばない。また、我が国は地震大国であり、2011年の東日本大震災、2016年の熊本地震をはじめ、巨大地震が頻発している。南海トラフ巨大地震の発生確率は、30年以内に70%程度と言われており、ハード・ソフト面における対策の整備は待ったなしの状況にある。

一方、全国に約16万個存在するため池の7割程度は、江戸時代より前に造られ、老朽化が進展している。古いため池は、機械化施工や近代的な施工管理が為されていないため、堤体自体が弱く、全国で一斉に実施された地震に対する調査の結果では、調査が行われたため池の半数以上が耐震性不足と判定された。また豪雨に対する調査では、1/3以上に豪雨対策が必要と判定された。実際、被災したため池の99%が豪雨あるいは地震が原因で被災しており、両者の発生リスクが高まる昨今、限られた予算での効率的な改修が不可欠である。

### 2. 研究の目的

上記のような背景のもと、本研究では、豪雨と地震の複合作用を受けるため池堤体の力学挙動を説明し、対策工の提案とその効果を検証することを目的としている。ため池堤体の地震時挙動や耐震性に関する研究は比較的多いことから、まずは降雨を受ける堤体に関する研究、すなわち(1)ため池堤体への降雨浸透特性、について検討する。降雨浸透特性を理解した上で(2)地震と豪雨の複合作用を受けるため池堤体の力学挙動および損傷メカニズムの解明を目指し、その結果に基づいて(3)対策工の提案ならびにその効果を検証する。

### 3. 研究の方法

上記の(1)ため池堤体への降雨浸透特性の把握については、降雨模型実験および供用中のため池での現地水位計測を行った。また、(2)地震と豪雨の複合作用を受けるため池堤体の力学挙動および損傷メカニズムの解明と(3)対策工の提案およびその効果検証については、遠心力模型実験ならびに動的FEM解析を実施した。以下、それぞれの具体的方法を述べる。

#### (1) ため池堤体への降雨浸透特性の把握

降雨が堤体の特に下流側斜面に浸透した際の浸潤線の上昇を検討するため、兵庫県のため池堤体内の水位ならびに貯水位を約1年間計測した。さらに、図1に示すような降雨装置を作製し、幅500mm、高さ200mm、奥行き200mmの模型地盤(勾配1:1.8)を対象に降雨浸透実験を行い、ため池堤体土のような細粒分を含む土の降雨浸透特性について検討を行った。締固め度の異なる2種類の模型地盤( $D=85$ と92%)に対して、3種類の降雨強度(35.5, 51.9, 74.9 mm/h)にて実験を行った。降雨の継続時間は全ケース6時間とした。

#### (2) 地震と豪雨の複合作用を受けるため池堤体の遠心力模型実験

実験には、幅1000mm、高さ500mm、奥行き300mmの剛土槽を使用した。土槽内に、図2(a)に示すような、締固め度95%の斜面勾配1:1.5の傾斜遮水性ゾーン型の堤体を作製した。実験は40Gの遠心力場で実施し、加振は300galから500galの正弦波を与え、降雨強度は25mm/hとした。Case1では300galの加振のみを堤体に与え、Case2では積算雨量250mmの後に300galの加振を与えた。また、Case2の降雨を与えた段階をCase3として、Case4では最大500galの加振後に250mmの降雨を与えた。Case1とCase2の比較から先行降雨、Case3とCase4の比較から先行地震の影響を検討する。

#### (3) 対策工の提案およびその効果検証

本研究では対策工として、フィルターユニット(以下FUと記載)を用いた押え盛土ならびに下流法先ドレーンを提案し、その効果について遠心力模型実験ならびに動的FEM解析を行った。FUのみを設置したCase5ならびにFUに加えドレーンを設置したCase6の模型に対して上記Case4と同条件、すなわち最大500galの加振後に積算雨量250mmの降雨を与えた。変形量および浸潤線を測定し、FUによる変形抑制効果およびドレーンによる浸潤線の低下を検討した。

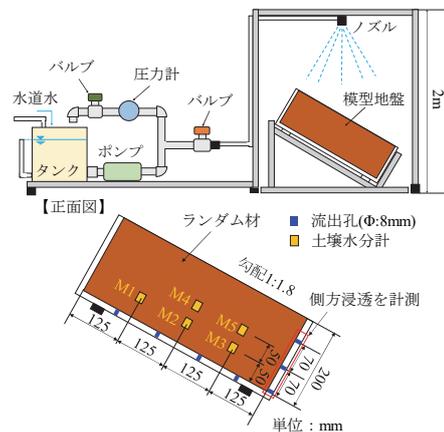


図1 降雨装置と模型地盤の計測機器

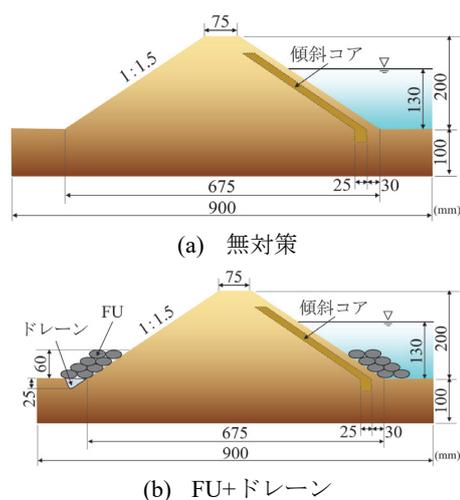


図2 遠心力模型実験の堤体模型

#### 4. 研究成果

##### (1) ため池堤体への降雨浸透特について

現地での水位計測の結果、本計測期間内に生じた豪雨により、雨水が堤体内に浸透することで、最も低い浸潤線の時に比べて豪雨時の浸潤線は、1m 以上も上昇することが明らかとなった。

降雨実験の結果、地盤密度が高く透水性の低い地盤の場合、終期浸透強度（本研究では実験終了時の浸透強度）は、降雨強度によらず、一定となった（図3）。一方、地盤密度が低く透水性の高い地盤では、降雨強度の増加に従い、終期浸透強度は大きくなった。このことは、降雨による地盤表面の侵食に関係があると考えられる。すなわち、降雨強度が大きいくほど侵食が大きくなり、細かい土粒子の流出に伴う間隙率の増加や、粗度係数の増加に伴う表面流速の低下等によって浸透能が増加したものと考えられる。

本実験結果をもとに終期浸透強度の予測式の検討を行った。既往研究<sup>2)</sup>にて、表面流出に働く自重の斜面方向成分 $\tau$ は以下の式で与えられている。

$$\tau \cong \rho g h S_0$$

$$h = \left( \frac{Q_0 n}{S_0^2 B} \right)^{\frac{3}{5}}$$

$\rho$ ：水の密度(g/cm<sup>3</sup>),  $g$ ：重力加速度(m/s<sup>2</sup>),  $h$ ：表面流の水深(m),  $S_0$ ：斜面勾配(=tan $\gamma$ ),  $\gamma$ ：傾斜角(°),  $Q_0$ ：単位時間当たりの表面流出量(m<sup>3</sup>/s),  $n$ ：粗度係数(m<sup>-1/3</sup>s),  $B$ ：斜面の幅(m)である。表面流の水深 $h$ に関しては、マンニングの式により算出している。上式のもととなった実験結果および本実験結果を図4に示す。 $\tau$ の増加に伴い、透水係数に対する終期浸透強度の比が反比例することがわかる。これより終期浸透強度の予測式として以下の式を提案した。

$$\frac{Q_d}{k_s} = 0.0487 \left( \rho g (r - Q_d)^{\frac{3}{5}} n^{\frac{3}{5}} S_0^{\frac{3}{5}} \right)^{-1}$$

##### (2) 地震と豪雨の複合作用を受けるため池堤体の力学挙動および損傷メカニズムについて

遠心力模型実験の結果、Case1（加振のみ）では、下流側法面にいくつか大きな亀裂が発生したものの、断面形状の変化はほとんど発生しなかった。一方、Case2（降雨→加振）では、図5に示すように、下流側法面で大きな変形がみられ、すべり面が発生していることが確認された（図6）。これは、先行降雨により、堤体内水位が平均2cm上昇したことと、飽和度の上昇によるサクシオン消失が要因として考えられる。

Case3（降雨のみ）では、堤体内水位が上昇し、下流側法面に浸潤線が浸出した。しかしながら、それに伴う変形は少なく、堤体形状の変化はほとんど見られなかった。一方、Case4（加振→降雨）では、図7に示すように、下流側法面で降雨による流動、侵食に起因する変形が大きいことが確認された。Case4では、降雨の前段階の加振時に堤体が大きく変形し、亀裂が多数発生しており、降雨による土の流出や侵食は、加振によって生じた亀裂部分付近で顕著であった。これらのことから、地震により、堤体斜面の安定性が低下し、降雨時に変形が進行することが明らかになった。特に、加振時に発生した亀裂は降雨の浸透を促進し、侵食を助長することがわかった。

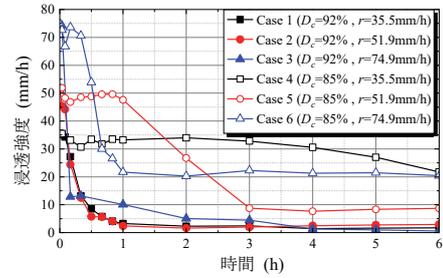


図3 浸透強度の変化

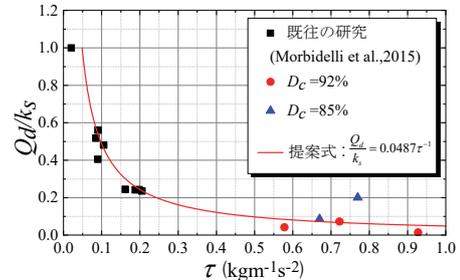


図4  $\tau$  と  $Q_d / k_s$  の関係

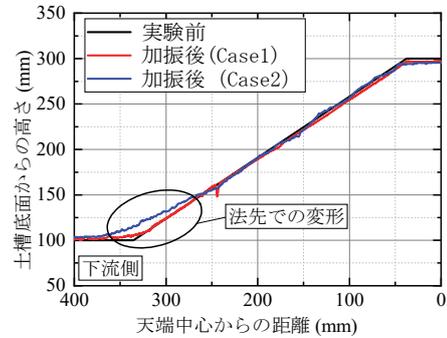


図5 加振後の堤体形状

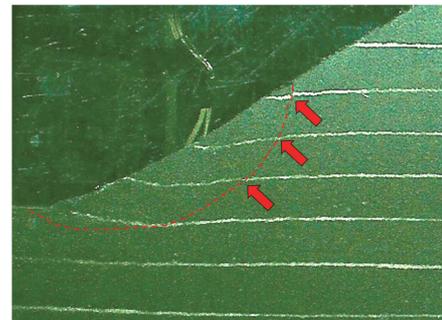


図6 下流法面の滑り (Case2)

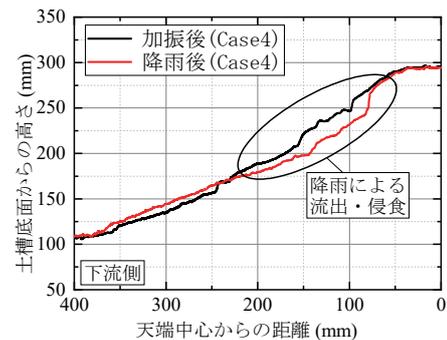


図7 加振後の降雨による変形

### (3) 対策工とその効果について

無対策および対策工を対象とした遠心力模型実験の結果、FUを設置したCase5では、天端の沈下は無対策と同程度であり、抑制効果は見られないものの、法面のはらみ出しは小さく、抑制されていることが確認できる。また、下流側法尻の過剰間隙水圧比の低下が確認されたが、これはFUの自重により、法尻の変形が抑制されたことに加え、土被り増加にともなう有効応力の増加に起因すると考えられる。以上より、FUを用いた押え盛土は法尻の安定性を向上させ、一定の補強効果を有することが確認された。

法尻ドレーンによる浸潤線の低下については、加振前の定常時では、ドレーンによる浸潤線の低下効果は認められないものの、降雨浸透による水位増分については抑えられることが確認された(表1)。

#### 引用文献

1) Morbidelli, R., Saltalippi, C., Flammini, A., Govindaraju, R.S. : Role of slope on infiltration: A review, Journal of Hydrology, Vol.557, pp.878-886, 2018.

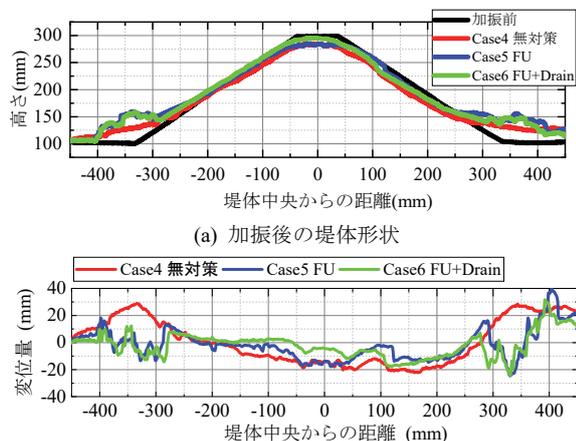


図8 堤体形状

表1 各段階での堤体内水位の変化

	Case4 (無対策)	Case5 (FU)	Case6 (FU+ドレーン)
加振前(mm)	167	194	185
降雨前(mm)	199	194	192
降雨後(mm)	218	217	199
降雨浸透による 水位増分(mm)	19	23	7

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 澤田 豊、眞木 陸、神信 浩一、谷本 幹夫、中澤 博志、河端 俊典	4. 巻 87
2. 論文標題 ジオシンセティッククレイライナーを用いて改修されたため池堤体の現地水位計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_357 ~ I_363
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11408/jsidre.87.I_357	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakazawa, H., Ishizawa, T., Danjo, T., Sawada, Y. Onoue, Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 Model tests on the deformation and collapse processes of small earth dams due to earthquakes and rainfall	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 阿部 春輝、眞木 陸、澤田 豊、河端 俊典
2. 発表標題 ベントナイト系遮水シートを敷設したため池堤体の浸潤線の位置に関する解析的検討
3. 学会等名 第76回農業農村工学会京都支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 眞木 陸、澤田 豊、河端 俊典、神信 浩一、谷本 幹夫、中澤 博志
2. 発表標題 ベントナイト系遮水シートを敷設したため池堤体の現地水位計測
3. 学会等名 第76回農業農村工学会京都支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部 春輝, 眞木 陸, 泉 明良, 澤田 豊, 堀 俊和, 河端 俊典
2. 発表標題 降雨と地震の複合作用を受けるため池堤体に関する遠心模型実験
3. 学会等名 2020年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 眞木 陸, 阿部 春輝, 松本 昶, 澤田 豊, 河端 俊典
2. 発表標題 ため池堤体法面内への降雨浸透に関する実験的検討
3. 学会等名 2020年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿部 春輝, 廣川 慎, 澤田 豊, 泉 明良, 堀 俊和, 河端 俊典
2. 発表標題 フィルターユニットのため池補強効果に関する遠心模型実験
3. 学会等名 2021年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中澤 博志, 澤田 豊, 石澤 友浩, 檀上 徹
2. 発表標題 竹を用いたため池堤体の侵食対策に関する模型実験
3. 学会等名 令和3年度全国大会 第76回年次学術講演会(土木学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

神戸大学大学院農学研究科土地環境学研究室HP  
<http://www.research.kobe-u.ac.jp/ans-soilenv/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	泉 明良  (Izumi Akira)  (10782203)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・研究員   (82111)	
研究分担者	中澤 博志  (Nakazawa Hiroshi)  (20328561)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主幹研究員   (82102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------