

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26292125

研究課題名(和文) レベル2地震動に対するフィルダムの安全性検討手法の構築

研究課題名(英文) Development of evaluation method for fill-dam safety due to Level 2 earthquake

研究代表者

向後 雄二 (Kohgo, Yuji)

東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30414452

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最大規模の地震であるレベル2地震動に対するフィルダムの安全性検討手法の構築を目指した。そのために、締固めた土(不飽和土)の繰り返し変形特性を明らかにすること、繰り返し変形特性をモデル化すること、地震時のダムの振動特性を明らかにすること、およびそれらを統合して耐震解析法を検討すること、が必要である。この研究から次の点が明らかとなった。不飽和土の繰り返し変形特性は二つのサクション(負の土中水圧)効果でほぼ説明できること、その効果を考慮したモデルが良く変形特性をシミュレートできること、遠心模型振動実験等から含水比(土中水分量)がその振動特性に大きな影響を及ぼす等がわかった。

研究成果の概要(英文)：The object of this research project is to develop an analysis procedure for stability of fill-dams due to level 2 earthquakes. We conducted following four points. The first one is to clarify the deformation properties of compacted soils (unsaturated soils) due to cyclic loads. The second is to model the deformation properties. The third is to investigate dynamic behavior of dam models due to level 2 earthquakes, and the final is to develop an analysis procedure for stability of fill-dams due to level 2 earthquakes by unifying the research items mention above. The following points were found from this research. The cyclic deformation properties of unsaturated soils may be reasonably explained by using two suction effects that we have already proposed. The cyclic deformations could be well simulated by a cyclic model with the two suction effects. The water contents of fill-dam models significantly affected to the dynamic behavior of the fill dams.

研究分野：農業工学，地盤工学，ダム工学

キーワード：フィルダム レベル2地震 不飽和土 耐震 遠心模型振動実験 弾塑性モデル 間隙水圧

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、農業用施設にも大きな被害を出した。特に、福島県では、藤沼ダムが決壊し、死者8名、行方不明1名の人災となった。このダムの被害の原因は地震動の繰り返し載荷による盛土材の強度低下とされ、今までのフィルダム(石と土でできたダム)の設計では考慮されなかった現象であった。このような巨大地震(レベル2)の対するダムの耐震性は崩壊だけでなく、変形が許容範囲内であることも重要な検討項目となっている。

2. 研究の目的

本研究では、このようなダムに対する今まで考えられなかった盛土材の強度低下、および崩壊と変形の両者を同時に検討できる耐震性検討手法の開発を目指した。具体的には、盛土材(締固め土)の繰り返し荷重の影響による変形特性を明らかにすること、繰り返し変形特性をモデル化すること、フィルダムのレベル2地震での振動と破壊特性を明らかにすること、および耐震解析法を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

目的で記述したように、本研究では、主に次の三つの研究項目を行った。締固めた土(不飽和土)の繰り返し荷重による変形特性を明らかにするために、三軸圧縮試験装置を用いた繰り返し三軸圧縮試験を行った。繰り返しによる変形を予測できる弾塑性モデルの構築を行った。ダム模型を用いた振動実験を行い、振動性状と破壊特性を調べた。耐震解析法の検討を行った。

(1) 不飽和土の繰り返し三軸圧縮試験: シルトからなるDLクレイを用いて、排水条件で繰り返し三軸圧縮試験を行った。供試体の大きさは直径5cm、高さ10cmの円柱で、含水比17%で乾燥密度 1.30g/cm^3 になるように供試体を作製した。用いた拘束圧は100, 200 kPaで負の間隙水圧(サクション)0, 10, 30, 90 kPaを負荷した。その後、鉛直ひずみ速度0.05%で圧縮と引張の両方向に載荷と除荷を10回繰り返した。繰り返し応力比(軸荷重と拘束圧の比)は1.0である。

(2) 繰り返し弾塑性モデル: 我々が検討してきているモデルの能力検証とそのモデルの改良を目指した。繰り返し載荷では、その過程で除荷によって回復できない変形(塑性変形)が生じる。その点を考慮するために、このモデルでは図1に示すように正規降伏面の内側にその面と相似な負荷面(下負荷面)を配置した。そして、このモデルでは、次のような簡単化を行った。すなわち、(仮定1)相似中心は載荷方向が反転した時のみ移動(ジャンプ)する。(仮定2)ジャンプする点は、反転が生じた応力点とする。したがっ

て、我々はこのモデルをジャンプ硬化下負荷面モデルと呼んでいる。図1では、繰返し載荷過程での下負荷面の挙動を概念的に示している。このモデルを用いて、DLクレイの繰返し三軸圧縮試験を再現し、モデルの能力を検証した。

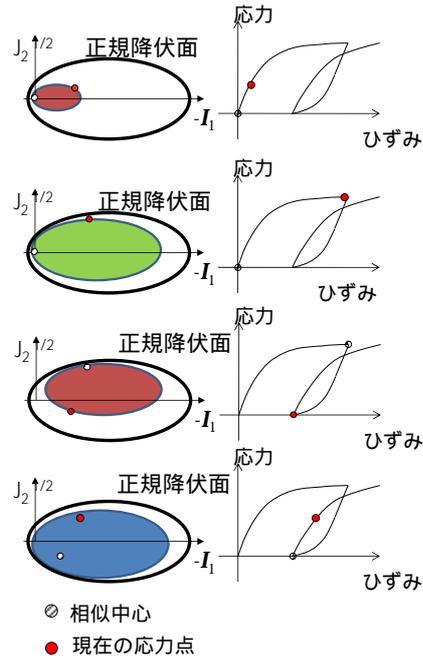


図1 繰り返し弾塑性モデルの概念図

(3) ダム模型を用いた振動実験: 振動実験は重力場(1g)と遠心場で行った。模型試料は6号珪砂とDLクレイである。まず、重力場の実験方法について述べる。図2に実験模型の概要を示す。模型堤体は堤高400mm、天端幅100mm、堤敷幅1300mm、奥行き1018mm、法面勾配1:1.5とした。6号珪砂模型では、基礎的検討としてダム盛土の間隙水圧が変形・破壊の進展過程に与える影響を調べることにした。そのため、模型は含水比5%、相対密度 $D_r = 50\%$ に締め固め作製した。DLクレイモデルでは、ダム盛土の振動特性への含水比(飽和度)の影響を調べることを目的とした。そのため、飽和度を50-85%に調整した3ケースの模型を作製した。乾燥密度は 1.38g/cm^3 と同じである。加振中は加速度、間隙水圧と変位を計測した。また、破壊や振動性状を調べるために、模型直上と模型前面から動画を、加振前後に静止画を撮影した。実験には重力場の三次元振動台を用い、水平方向(上下流方向)のみ加振を実施した。入力波は、周波数10Hzの正弦波50波に前後各5波のテーパ波を付したのを用いた。最大加速度を100galから100galずつ大きくし、模型に破壊が生じる加速度レベルまで段階的に加振した。

遠心場での実験では、遠心模型実験装置(最大積載質量3t、最大遠心加速度100g、有効アーム回転半径4.8m、最大振幅 $\pm 4.22\text{mm}$)を用いた。遠心装置には振動台が設置

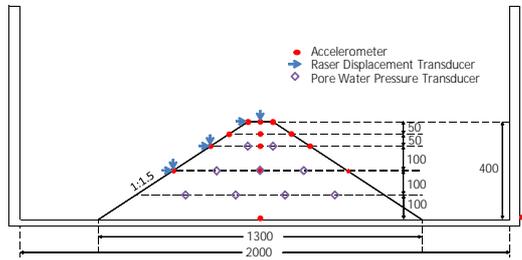


図2 振動模型の概要(重力場モデル)

されていて、その振動台の上に土槽(寸内は高さ60 cm、幅140 cm、奥行き40 cm、片側はガラス面)を乗せ、加振した。試料は6号珪砂では $D_r = 0, 50, 80\%$ の3ケースを行った。いずれも模型作製時の含水比は5%である。DLクレイ模型では、含水比が17, 29%の異なる2ケースを行った。いずれも模型作製時の乾燥密度は 1.30 g/cm^3 である。模型の寸法は高さ200 mm、天端幅50 mm、堤長650 mm、奥行き400 mm、斜面勾配は1:1.5である。加振中、加速度、間隙水圧を測定した。また、変位は模型側面からの写真撮影によった。加振は重力場と同様にし、遠心場での相似則に基づいて調整した。

(4) 耐震解析法の検討: 上記(1)(2)および(3)の研究結果を用いて、解析法の検討を行った。

4. 研究成果

(1) 不飽和土の繰り返し三軸圧縮試験結果: 典型的な実験結果を図3に示す。図(a)-(e)は軸差応力 q と軸ひずみ ε_a の関係である。拘束圧は $\sigma_{3net} = 100 \text{ kPa}$ である。繰り返し回数が増加するとともにヒステリシスループは小さくなり、より弾性的な挙動を示している。ヒステリシスループは最終的にほぼ一つのループに収束する。再載荷線のループはサクシジョンの影響を受け、サクシジョンの大きな試料ほどより勾配が大きくなっている。つまり、サクシジョンの大きな試料ほど大きな剛性を持っている。

図(f)-(j)は体積ひずみ ε_v と軸ひずみ ε_a の関係を示す。最初の載荷では、全てのケースで載荷と除荷とともに体積の減少が見られるが、それ以後の載荷では、低サクシジョンの試料では圧縮を、高サクシジョンの試料では膨張を示している。この膨張量(ダイレタンス)はサクシジョンの増加とともに増加している。体積の全減少量はサクシジョンの増加とともに減少している。このような特性は、我々が行った静的な三軸圧縮試験の考察から、不飽和土の特性を表すために、二つのサクシジョン効果の導入の必要性を述べたが、動的な(繰り返し載荷)挙動に対してもこの効果を用いて評価できることがわかった。二つのサクシジョン効果は次の通りである。サクシジョンの増加は有効応力を増加させる。サクシジョンの増加は内部拘束を増し、その結果降伏応力を増加させる。ここで求められた不飽和土の

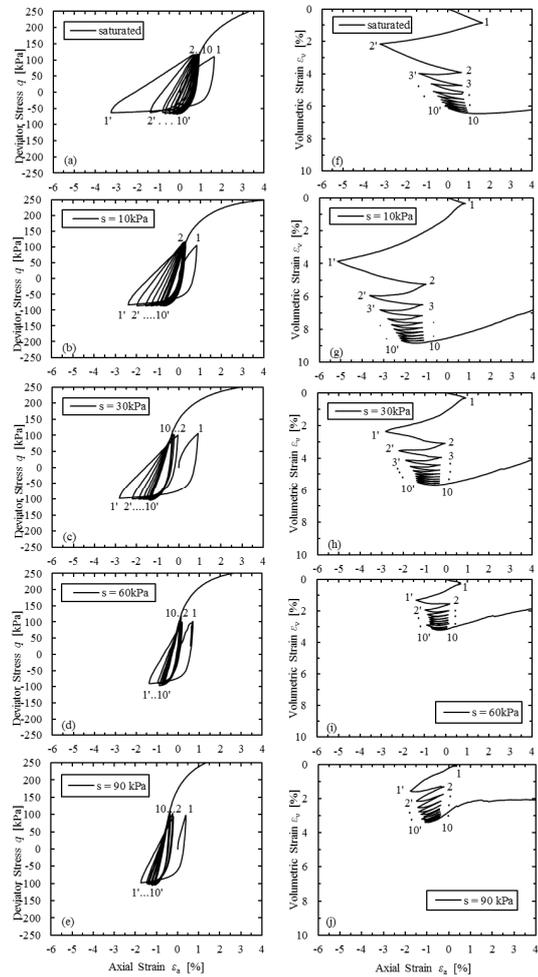


図3 不飽和土の繰り返し三軸圧縮試験結果

繰り返し特性を用いることによってより詳細に高精度の弾塑性モデルの構築が可能になる。

(2) 繰り返し弾塑性モデルの検証結果: 図4に提案したモデルによる解析結果の一例を示す。軸差応力-軸ひずみ結果である。載荷・除荷の1サイクルのみの結果であるが、基本的な性能としては満足する結果である。モデルはスムーズな応力-ひずみ関係をシミュレートできた。

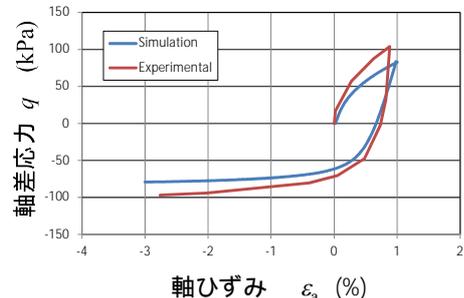


図4 繰り返し載荷モデルによるシミュレーション結果($\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, $s = 30 \text{ kPa}$)

(3) ダム模型を用いた振動実験結果: ここ

では、DL クレイの振動実験結果について述べる。重力場での試験結果を図5-7に示す。全ケースで最大加速度700 galまで明確な変形は生じなかった。また乾燥側および最適含水比のCASE1, 2においては、斜面表面の剥離を確認できたが、明確な変形は生じなかった。湿潤側のCASE3では、最大加速度900 gal時に破壊が確認され、破壊開始時刻は加振後、約2秒であった。

図5に900 gal時の天端中央部の応答加速度増幅率を示す。破壊が生じたCASE3では、その堤高が200mm以上の部分での応答加速度増幅率は減少し、天端への振動が伝播していない。図6は最大入力加速度900 gal時における天端直下の応答加速度の時刻歴を示している。破壊を生じたCASE3では、破壊後応答加速度が減衰しているが、変形を生じなかったCASE1, 2では、加振終盤において応答加速度の振幅が大きくなっている。

図7に900 gal加振中の間隙水圧分布の変化を示す。加振速度が最大となる時刻2.0秒ならびに3.0秒後(ii, iii)で模型堤体の間隙水圧が上昇している領域が見られる。この領域は各ケースで異なり、CASE1では堤体中央部で水圧が最大となる封入部があり広範囲にわたるが、CASE2では堤体中央部での水圧上昇は見られず左斜面側に偏る。CASE3の堤体破壊時刻は約2秒後であり、このとき堤体左側の間隙水圧はCASE1, 2同様上昇し、約4kPaの正圧を示した(i)。その後、破壊が進行している加振開始から3秒(iii)では、左側斜面部分での間隙水圧は消散し、堤体下部で水圧が上昇している。また、加振後3.05秒後の加振速度がゼロ(加振加速度極大)では全ケースにおいて間隙水圧分布の偏りはみられず、均一な分布となった。このように、飽和度の違いによって振動特性は大きく異なり、飽和度85%のケースでは、振動中過剰間隙水圧が発生し、流動的な破壊が生じた。破壊とともに応答加速度は減衰し、異なる振動モードを起こした。低飽和度時においても間隙水圧の上昇が見られ、間隙水圧の大きさは堤体の変形・破壊挙動に関係があることが示唆された。

遠心場においては、結論として次のような結果を得た。含水比29%のケースでは、加振により流動的な破壊が生じ、これは重力場における破壊の様子と一致した。また、破壊の有無によって応答加速度は変化し、異なる振動モードを起こした。堤体内部の間隙水圧は遠心力の载荷によって減少し、含水比の高低に関わらず加振によっても変動することが観察された。以上のような挙動は重力場での挙動と同様であった。このような実験結果は今まで十分に考察されて来なかった。特に間隙水圧の影響についてはさらに検討が必要である。

(4) 耐震解析法の検討結果

今回の研究では、レベル2地震動でのフィ

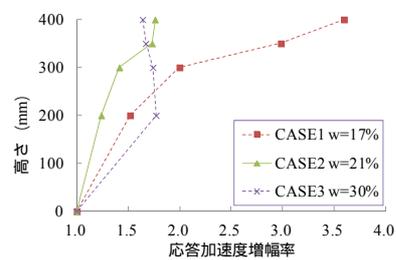


図5 ダム高さ方向への応答加速度の変化(900 gal)

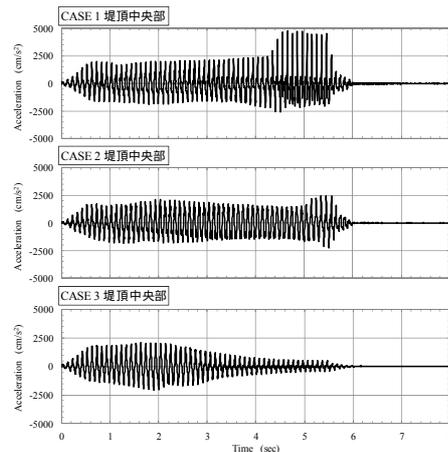


図6 応答加速度の時刻歴(900 gal)

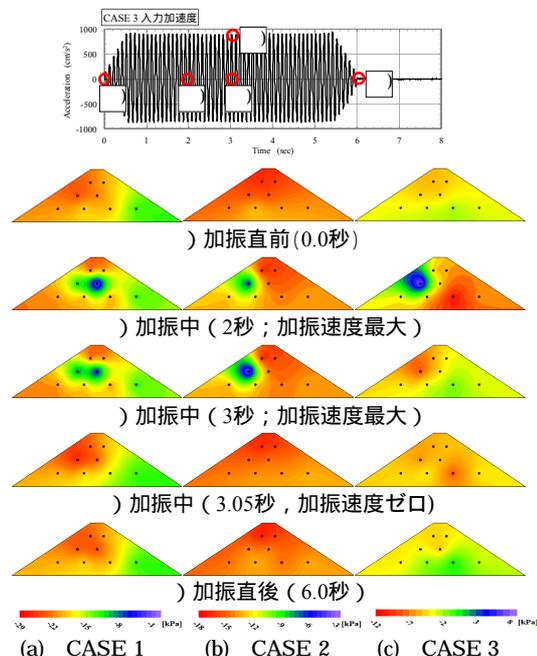


図7 間隙水圧の変化(Case 1:含水比17%; Case2:含水比21%; Case 3: :含水比30%)

ルダムの挙動を十分に把握しきれなかった。従って、耐震解析法についても、今後更に検討していく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

Sato, T., Saito, H. and Kohgo, Y., A cyclic

elastoplasticity model of unsaturated soils, Geomate 2015, Proc. 5th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, 435-440, Osaka, Japan, 2015.11. (査読有)
Suzuki, H., Kohgo, Y., Relationships between Seismic Intensities and Damages to Earth Dams during the 2011 Offshore Pacific Coast Tohoku Earthquake, Paddy and Water Environment 13(3), 255-267 DOI 10.1007/s10333-014-0435-1, 2015.7. (査読有)

〔学会発表〕(計 8件)

石松悠輝, 佐藤友孝, Tun Tun Win, 齋藤広隆, 向後雄二, 林田洋一, 田頭秀和, 振動台実験によるフィルダム砂模型の破壊挙動, 第51回地盤工学研究発表会発表講演集, 岡山, 2016.9.

佐藤友孝, Tun Tun Win, 石松悠輝, 齋藤広隆, 向後雄二, 林田洋一, 田頭秀和, 振動台実験によるフィルダム模型の変形・破壊に対する間隙水圧の影響, 第51回地盤工学研究発表会発表講演集, 岡山, 2016.9.

Tun Tun Win, Sato, T., Ishimatsu, Y., Saito, H. and Kohgo, Y., Deformation properties of an unsturated soil under cyclic loading, 第51回地盤工学研究発表会発表講演集, 岡山, 2016.9.

Tun Tun Win, 佐藤友孝, 石松悠輝, 向後雄二, 不飽和土の繰り返し载荷による体積変化挙動, 第12回地盤工学会関東支部発表会論文集, 東京, 2015.10.

佐藤友孝, Tun Tun Win, 齋藤広隆, 向後雄二, 不飽和土の繰り返し载荷による変形特性とそのシミュレーション, 第50回地盤工学研究発表会発表講演集, 札幌, 2015.9.

鈴木尚登, 中里裕臣, 小嶋創, 向後雄二, 地震動による被災農業用ため池の堤体形状特性, 農業農村工学会大会講演要旨集, 岡山, 2015.9.

鈴木尚登, 向後雄二, 中里裕臣, 小嶋創, 東北地方太平洋沖地震による福島県中域農業用ため池の被災要因分析, 農業農村工学会大会講演要旨集, 新潟, 2014.8.

向後雄二, 佐藤友孝, 齋藤広隆, 不飽和土の繰り返し载荷による変形特性とそのモデル化, 第49回地盤工学研究発表会発表講演集, 北九州, 2014.7.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~kohgo>

6. 研究組織

(1)研究代表者

向後 雄二 (KOHGO, YUJI)

東京農工大学・大学院農学研究院・教授
研究者番号：30414452

(2)研究分担者

齋藤 広隆 (SAITO, HIROTAKA)

東京農工大学・大学院農学研究院・准教授
研究者番号：70447514

(3)連携研究者

林田 洋一 (HAYASHIDA, YOICHI)

農業・食品産業技術総合研究機構・農村工
学部門・主任研究員

研究者番号：50414454