

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05892

研究課題名(和文) 強震時の材料非線形化によるフィルダム堤体損傷機構の解明

研究課題名(英文) Damage mechanisms of fill dams induced by nonlinearization of its material during earthquakes

研究代表者

林田 洋一 (Hayashida, Yoichi)

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・上級研究員

研究者番号：50414454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、堤体損傷モードの発生要因の一つとして、堤体材料の非線形化に起因する振動モードの時間的・空間的不連続に着目し、現象の発生メカニズムおよび堤体の健全性(機能)への影響を検証した。その結果、一般的な砂質材料模型を対象とした正弦波による加振実験において、入力動の振幅の増大により堤体天端での応答加速度が減少し、入力動と同等もしくはそれを下回る現象が確認された。このことから、2008年岩手・宮城内陸地震本震時に荒砥沢ダムで観察された現象は、ダムの特殊性によるものではないと考えられる。また、加速度応答の増大と堤体変形には明確な関係が認められず、現行の設計体系における課題を示す結果となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2008年岩手・宮城内陸地震本震時に荒砥沢ダムで観察された現象(堤体天端での応答が、基礎の加速度を下回る)は、ダムの特殊性によるものでなく、大規模な地震動が生じた場合、土質材料で築造されたダムにおいて一般的に生じうる現象であることを明らかにした。また、堤体での加速度応答の増大が堤体変形に直結しない結果となっており、現行の設計体系における課題を明らかにする有益な知見が得られたものと考えている。堤体の減衰特性が、入力動の振幅特性および周波数特性の影響を受けることを明らかにし、その評価が堤体の地震時挙動において重要な役割を示すことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Discontinuities about seismic modes in time and space regions are considered as a factor of dam's failures during earthquakes. In this study, their generation mechanisms and their effects on the dam's functions are focused on. Shaking tests using sine waves are performed on the simple models made of popular sandy soils. It is revealed that the response acceleration at the crest converges when the amplitude of input wave increases, and the response acceleration at the crest becomes same as or below the amplitude of input wave. From this fact, it is considered that the seismic behavior of Aratozawa dam during the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 was not caused by the peculiarity of the dam, and its behavior will generate in usual fill type dams when huge earthquake occurs. The relationships between the increase of response acceleration of dam and the settlement of the dam's crest are not recognized. These results show the inconsistency with conventional design concepts.

研究分野：ダム工学、農業農村工学

キーワード：農業用ダム 地震時挙動 振動模型実験 ひずみ依存性

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 従来、フィルダム堤体の耐震設計には震度法による安定解析が用いられ、地震時の安全性はすべり破壊の有無が念頭におかれてきた。しかしながら、過去の大規模地震時における既往の被害調査¹⁾では、斜面表層部ですべりが生じた事例はあるものの、多くの被害事例はすべりに起因しない堤頂部でのクラックや沈下等、設計では考慮されていない損傷モードであることが確認されている。なお、既往の被害が比較的軽微なものであることに鑑みると、現行の耐震設計法で用いられる震度法、また設計パラメータとして用いられる設計震度および安全率の値が、実際にダムで観察された堤体損傷モードに対し、直接ではないにしろある程度の安全性を担保するものと考えられる。

(2) 現行の設計法および耐震性能照査法では、実際にダムで観察された堤体損傷モードに対しある程度の安全性を担保することは期待されるが、直接的な評価は行われておらず、これまでに確認されてきた堤体損傷モードによる堤体の安全性について、科学的な知見に基づいた議論が今後望まれるところである。また、現行の体系では、堤体の応答が低下し地震慣性力が低下すれば堤体は損傷（すべりの発生）しないことになる。しかしながら、このことはすべりに対する安定性を担保するものであり、他の損傷モードに対する堤体の安全性および健全性を保証するものでないことは、現行の体系における大きな課題だと考える。

2. 研究の目的

(1) 実際にダムで観察された堤体損傷モードは、現行の設計法および耐震性能照査法において直接的に評価されておらず、それらの損傷モードに対する堤体の安全性を評価する科学的手法の確立が必要だと考える。しかしながら、実際にダムで観察された堤体損傷モードは多岐にわたる要因が複雑に関連し生ずるものと考えられ、その発生メカニズム等、科学的な知見に乏しいのが現状である。そこで本研究では、従来設計で考慮されていない堤体損傷モードが、非定常な地震動下での堤体変形モードの時間的・空間的な不連続により生じたものと仮定し、その発生メカニズムを検証する。

(2) 堤体変形モードの時間的・空間的な不連続が生じる要因とし、次の3点が想定される。

- ① 堤体の三次元的形状や地震動の卓越方向により生じる複雑な三次元挙動に起因する振動モードの時間的・空間的不連続
- ② 堤体材料の非線形化（「せん断剛性および履歴減衰率のひずみ依存性」）に起因する振動モードの時間的・空間的不連続
- ③ 地震時の繰り返し荷重および堤体の変形に伴う過剰間隙水圧発生による有効拘束圧の変化に起因する振動モードの時間的・空間的不連続

このうち、②については、2018年岩手・宮城内陸地震において荒砥沢ダムで観測された天端と基礎での加速度応答倍率が、上下流・ダム軸方向で0.5倍、鉛直方向で0.9倍と1以下となった事例²⁾と関連するものと考えられる。また、この現象は従来の設計および耐震性能照査体系における課題とも直結する重要なテーマと位置付けられる。このため、現象の発生メカニズムおよび堤体の健全性（機能）への影響を検証する。

3. 研究の方法

(1) 地震時における堤体挙動を、実際のフィルダムに設置された地震計の観測データ（既公表データ）から詳細に分析し、堤体損傷の要因と考えられる特異な振動挙動や地震中における振動特性の変化について検証を行う。

(2) 堤体材料の非線形化（「せん断剛性および履歴減衰率のひずみ依存性」）に起因する堤体応答特性の変化に着目し、単純化された条件下での挙動を模型実験により検証する。実験にあたっては、模型作製の簡便さを考慮し遠心载荷装置を使用する。発生するせん断ひずみと堤体の応答特性の変化の程度の間関係を明らかにするため、入力波の振幅を段階的に増加させる加振実験を行う。また、顕著な過剰間隙水圧の発生による有効拘束圧の変化の影響を抑制し、焦点を「せん断剛性および履歴減衰率のひずみ依存性」に絞るため、模型は不飽和状態の土質材料にて作製する。

(3) 堤体材料の非線形化に起因する堤体の応答特性の変化の程度について、堤体材料の動的変形特性（せん断剛性および履歴減衰率のひずみ依存性）を変化させた数値実験を実施し、その影響を分析する。

4. 研究成果

(1) 2008年岩手・宮城内陸地震時（2008年6月14日8:43）の発生日に荒砥沢ダムで観測された波形（18回）を分析した結果、三成分（上下流、ダム軸、鉛直）ともに天端の加速度が基礎地盤での加速度を下回ったのは本震のみであったことが分かった（図-1）。本震について、堤体天端部および基礎部でのランニングスペクトル（図-2）を比較したところ、堤体天部では地震当初1Hz程度の成分が卓越するが、時間経過に伴い卓越周波数が1.5Hzへと移行しており、加振当初

に堤体の振動特性が長周期化したものと考えられ、このことが天端での応答が基礎での応答を大きく下回った要因の一つと考えられる。

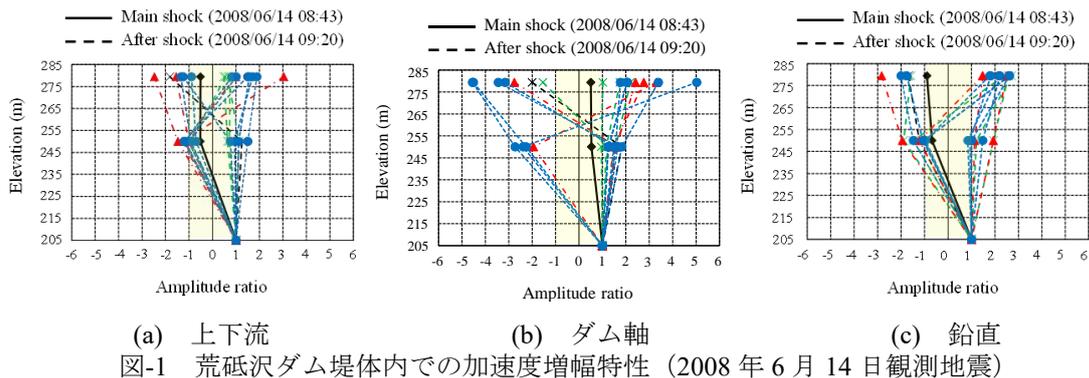


図-1 荒砥沢ダム堤体内での加速度増幅特性 (2008年6月14日観測地震)

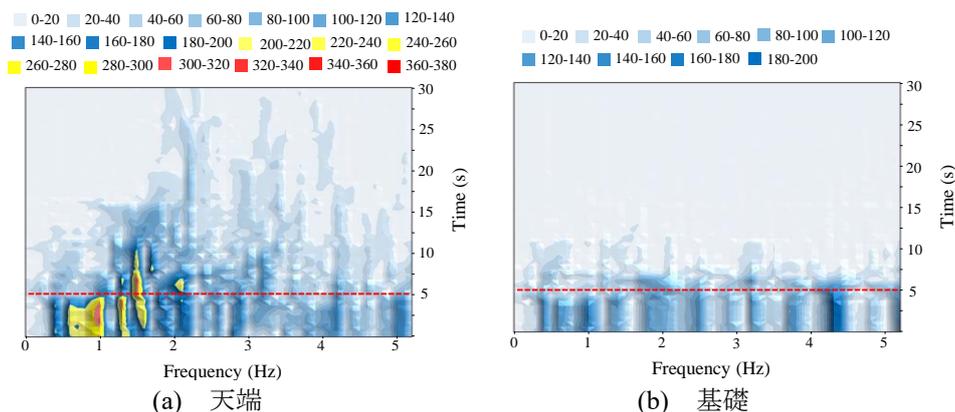


図-2 荒砥沢ダムで観測された地震動 (2008年6月14日 8:43) のランニングスペクトル

(2) 荒砥沢ダムで観測された現象のメカニズム解明のため、一般的な砂質材料で模型 (図-3) を作製し、遠心力場における振動模型実験を実施した。本実験は、 300 m/s^2 の遠心力場において、周波数 4Hz および 10Hz の正弦波の振幅を段階的に増加させ行った。各周波数ともに 14 step の加振を実施した。

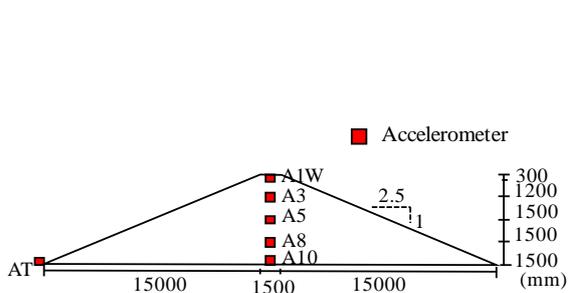


図-3 実験模型の概要 (プロトタイプ換算)

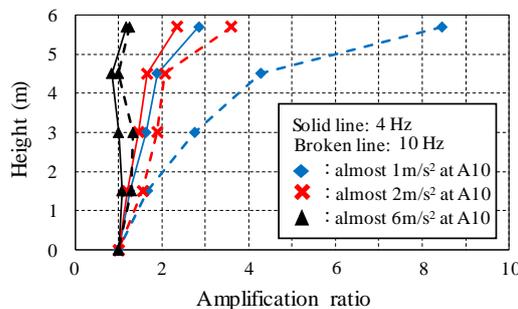


図-4 堤体内部での加速度増幅率の比較

(3) 図-4 に堤体内部での加速度増幅率の比較を示す。A10 での加速度が大きくなるに従い、入力動の周波数特性に関わらず、堤体内部での加速度増幅は低下し、堤敷き部での値と同等かそれを下回る結果となった。一般的な砂質材料を用いた単純な条件下での模型実験においても荒砥沢ダムと同様な現象が生じることを確認した。

(4) 図-5 に各測点で観測された加速度波形のフーリエスペクトルの比較を示す。両周波数ともに、 2.0 m/s^2 では堤体上部に向かう程フーリエスペクトル値が増加するのに対し、 8.5 m/s^2 では堤体内部で増幅がピークを迎え、天端ではその値が減少する傾向を示した。最大値で正規化したフーリエスペクトルで比較すると (図-6)、 10Hz ではほぼ同様の形状であるが、 4Hz では入力動の振幅の違いにより形状が大きく異なった。図-7 に $1/\sqrt{2}$ 法で求めた減衰定数の入力加速度による変化を示す。 4Hz での天端部 (A1W) で減衰定数が大きく変化しており、堤体天端部での減衰特性に周波数依存性があることが認められた。

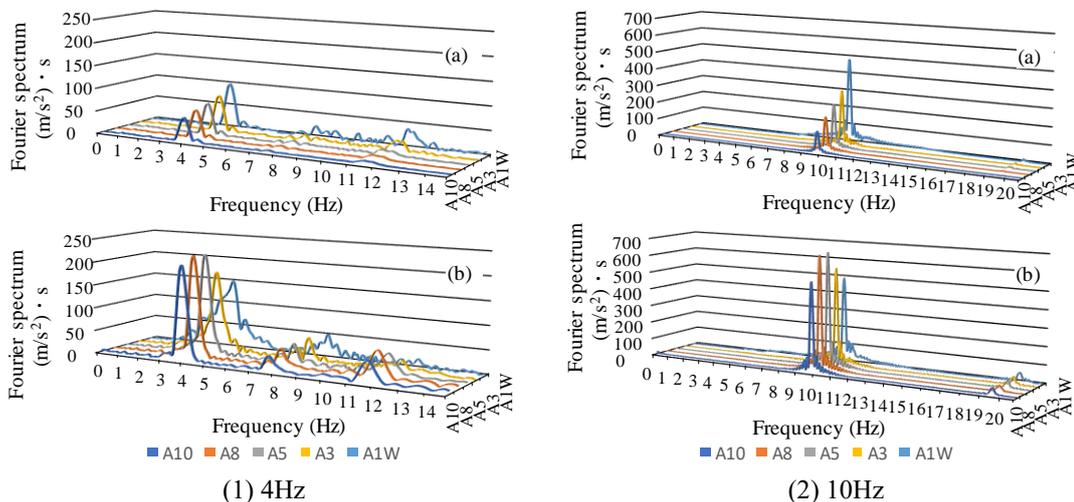


図-5 各位置での加速度フーリエスペクトルの比較 (a)2.0m/s²、(b)8.5m/s²

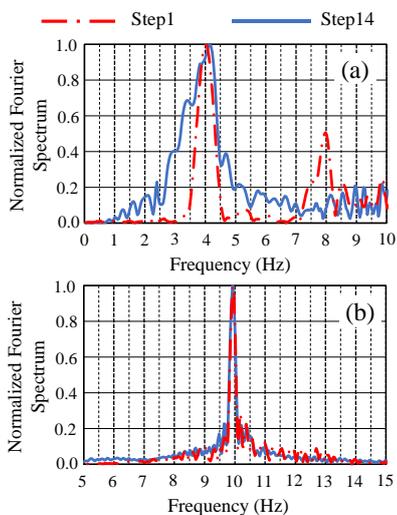


図-6 A1Wでの正規化フーリエスペクトルの比較 (a) 4Hz、(b) 10Hz

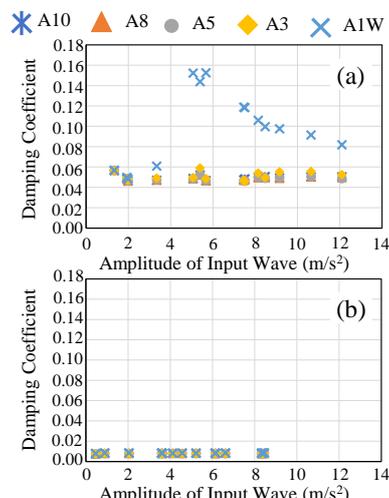


図-7 入力加速度による減衰定数の変化 (a) 4Hz、(b) 10Hz

(5) 図-8、9 に天端沈下量と入力および天端応答加速度の関係を示す。図-8 より、入力加速度が大きくなる程、天端での沈下量は増加し、累積沈下量も増大している。一方、図-9 では、天端応答加速度が6~8m/s²間で沈下量の値に幅があり、天端での応答加速度と沈下量の間に明瞭な関係が認められない。このことは、入力動が大きくなることで天端での沈下量が頭打ちとなること、堤体の応答に伴う慣性力の大きさに関係なく天端での沈下が進行するためと考えられる。

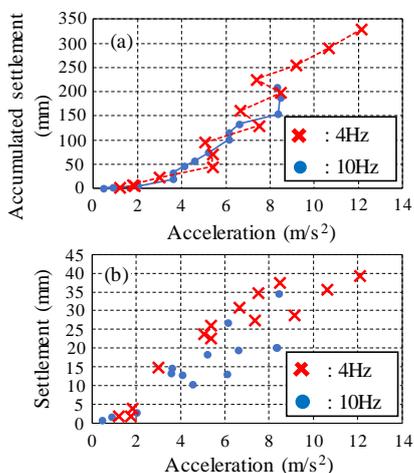


図-8 入力加速度 (AT) と天端沈下量の関係 (a) 累積沈下量、(b) 各ステップでの沈下量

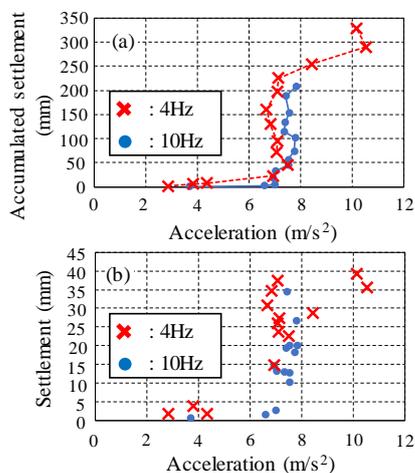


図-9 天端加速度 (A1W) と天端沈下量の関係 (a) 累積沈下量、(b) 各ステップでの沈下量

(6) 地震動による非線形化が堤体の振動特性に及ぼす影響を、堤体の非線形化特性および地震動の強さを変化させた数値実験により検証した。堤体の非線形化特性は $\tau=G_0\gamma/(1+\gamma/\gamma_r)$ 、 $h=h_{max}(\gamma/\gamma_r)/(1+\gamma/\gamma_r)$ で表される H-D モデルで設定し、 γ_r 、 h_{max} 、入力動振幅を変化させた。図-10 より、 $\gamma_r=5.0\times 10^{-4}$ 、 1.0×10^{-3} においてフーリエスペクトル比（天端/基礎）は入力動の振幅が増大するにつれ低下し、 h_{max} の値が大きい程その傾向は顕著である。一方、 $\gamma_r=5.0\times 10^{-3}$ の場合には、入力動の振幅が増大してもスペクトル比はほぼ一定の値をとり、線形的な挙動を示した。図-11 に $\gamma_r=5.0\times 10^{-4}$ での堤体内の加速度増幅率を示す。これより $h_{max}=10\%$ では入力動の振幅 (AR) の増加により天端 (43.8m) での応答加速度が他に比べ高い値で収束することが分かる。このことは、減衰定数を過少に評価した場合、天端での応答加速度が入力加速度の増加に伴い十分に低下せず、高い値で収束する可能性を示唆するものと考えられる。

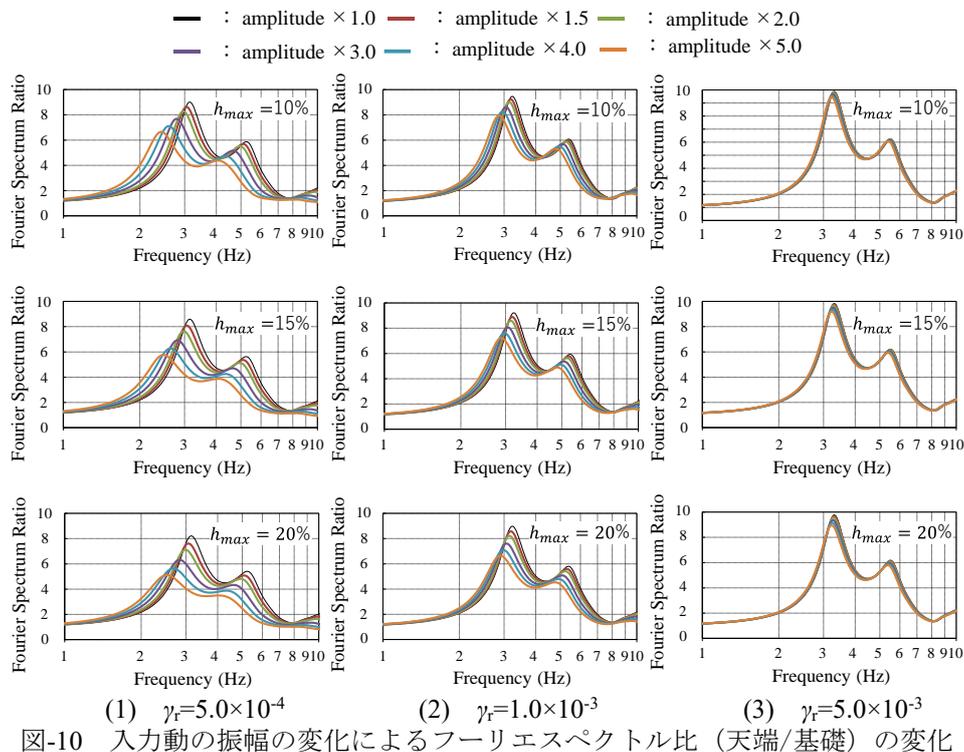


図-10 入力動の振幅の変化によるフーリエスペクトル比（天端/基礎）の変化

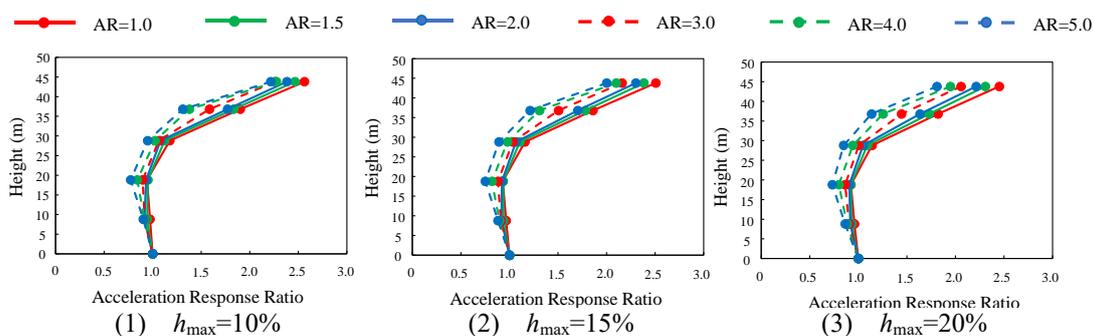


図-11 堤体内における加速度増幅率の比較

(7) 以上の結果から、入力動の振幅の増大により堤体天端での応答加速度が減少し、入力動と同等もしくはそれを下回る現象は、特殊な現象ではなく、一般的な砂質材料から成る模型を対象とした正弦波による加振実験でも確認された。しかしながら、荒砥沢ダムでの岩手・宮城内陸地震本震での天端での応答は基礎の半分程度と、同日の地震動や模型実験の結果と比較しても減少の程度が極めて大きくなっている。このことは、ランニングスペクトルの結果が示すように、地震動特性が大きく影響したのと考えられる。また、模型実験および数値実験の結果から、堤体の減衰特性が、その地震時挙動において重要となることが確認され、今後も研究の進展を図るべき重要な課題の一つであると考えられる。

<引用文献>

- 1) 増川ら、農村工学研究所技報、No.25、2014、185-217
- 2) 鎌田ら、農業農村工学会誌、Vol.85、No.4、2017、23-26

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 林田洋一、増川晋、 田頭秀和、 本間雄亮
2. 発表標題 弾塑性解析による地震時沈下量予測に及ぼす入力パラメータの影響
3. 学会等名 創立90周年記念2019年度（第68回）農業農村工学会大会講演会講演要旨集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江口慧、佐藤友孝、ツンツンウィン、榎谷麻衣、田頭秀和、林田洋一、向後雄二
2. 発表標題 遠心載荷振動実験によるフィルダム砂模型の動的挙動への入力地震波周波数の影響
3. 学会等名 創立90周年記念2019年度（第68回）農業農村工学会大会講演会講演要旨集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎谷 麻衣、佐藤 友孝、Tun Tun Win、江口 慧、田頭 秀和、林田 洋一、向後 雄二
2. 発表標題 遠心載荷振動実験によるフィルダム砂模型の変形・破壊挙動に対する含水比の影響
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林田洋一、増川晋、 田頭秀和
2. 発表標題 基礎地盤の液状化に伴う堤体変形挙動に及ぼす入力地震動の周波数特性の影響
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎谷 麻衣、佐藤 友孝、田頭 秀和、林田 洋一、斎藤広隆、向後 雄二
2. 発表標題 遠心載荷振動実験によるフィルダム模型の動的挙動に対する含水比の影響
3. 学会等名 2020年度（第69回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林田 洋一、向後 雄二、増川 晋、田頭 秀和
2. 発表標題 遠心力載荷振動模型実験によるフィルダム堤体の増幅特性に及ぼす入力動の影響検証
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榎谷 麻衣、佐藤 友孝、田頭 秀和、林田 洋一、向後 雄二、斎藤広隆
2. 発表標題 材料の異なるフィルダム模型の変形特性の定量的評価
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林田 洋一、向後 雄二、増川 晋、田頭 秀和
2. 発表標題 加振時の堤体天端沈下挙動に及ぼす入力および応答加速度の影響
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林田 洋一、向後 雄二、増川 晋、田頭 秀和
2. 発表標題 堤体の非線形化に伴う減衰特性の変化に関する遠心力載荷模型実験
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林田 洋一、向後 雄二、増川 晋、田頭 秀和
2. 発表標題 等価線形化法により算定される堤体応答特性に及ぼす減衰定数の影響
3. 学会等名 2021年度（第70回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	増川 晋 (Masukawa Susumu) (00414459)	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・研究領域長 (82111)	
研究分担者	向後 雄二 (Kohgo Yuji) (30414452)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授 (12605)	
研究分担者	田頭 秀和 (Tagashira Hidekazu) (40414221)	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・ユニット長 (82111)	

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
---------	---------