

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450349

研究課題名(和文) 巨大地震によるフィルダム堤頂部の亀裂発生メカニズムの解明

研究課題名(英文) Study on the occurrence mechanism of cracks in the dam axis of fill dams caused by a huge earthquake

研究代表者

田頭 秀和 (Tagashira, Hidekazu)

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 施設工学研究領域・ユニット長

研究者番号：40414221

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：地震によってフィルダムに発生する被害形態の中で発生頻度が高いものに、堤頂部およびその周辺における堤軸方向の亀裂があるが、その発生機構十分には解明されていない。本研究では、フィルダム堤体模型を用いた遠心載荷振動実験を実施し、横断面の画像を用いた画像解析とFEM解析による分析を行ってその発生機構の解明を試みた。その結果、斜面部では上部で水平方向ひずみもしくは水平変位の差とせん断ひずみが集中して亀裂が発生し、変状の進行に伴って集中箇所と亀裂発生箇所が上側に移動すること、堤頂部では中央部にこれらの集中が発生し、亀裂に進展することがわかった。

研究成果の概要(英文)：Although a crack along the dam axis in the dam crest or the neighboring area is one of the most popular damage patterns of fill dams caused by an earthquake, the occurrence mechanism is not fully clear. In this study, the mechanism was examined with dynamic centrifuge model tests, subordinate image analyses for the cross section of the model and FEM analyses. On the slope, the local concentration of horizontal strain (or difference of horizontal displacement) and shear strain occurred and a crack appeared at the upper part. The next point of the concentration and a crack appeared at the upper side of it. At the crest, the concentration occurred in the middle part and grew into cracks.

研究分野：ダム工学

キーワード：フィルダム 地震被害 亀裂発生機構 遠心載荷振動模型実験 画像解析 FEM解析

1. 研究開始当初の背景

ダムの大規模崩壊は下流側の広大な地域に破滅的な被害を与えるため、安全性確保には万全の対策を講じなければならない。東日本大震災では従来の想定を超える地震動が観測され、これまで培われた安全性評価技術や耐震技術をさらに向上させる必要が生じている。地震によってフィルダムに発生する被害のうち、最も発生頻度が高いものが堤頂部の長手方向(ダム軸方向)の亀裂であり、東日本大震災でも多くの被害が発生した。この亀裂が発生するとダムの安全性が低下し、余震等で大規模崩壊に進展すると流域に破滅的な被害を引き起こすが、発生メカニズムは未解明であり、対症療法的な復旧・対策を採用せざるを得ないのが現状である。

2. 研究の目的

土質材料で作製したダム模型を使用した多種の遠心載荷振動模型実験を実施して巨大地震によるダムの変形を再現する。これを高精度の画像解析と数値解析で多面的に分析し、従来の問題であるフィルダム堤体の亀裂発生メカニズムおよび大規模崩壊への進展メカニズムを解明する。

3. 研究の方法

(1) 遠心載荷振動模型実験を用いた巨大地震によるダムの変形の再現

模型材料として、3種類の土質材料(A: 6号珪砂、B: 豊浦砂とカオリンの混合土(乾燥重量比は4:1)、C: 笠間土)を使用した。Bは実際のフィルダムコア材の粘着力と内部摩擦角に同等になるように調整したものである。(表1、図1、図2)

材料A~Cを土槽内に盛り立て、フィルダム堤体模型を作製した。奥行きは295mmである。(図3)

盛り立ては、材料Aは空中落下法、材料BとCは突き固めによって一層(材料A、B: 30mm厚、材料C: 15mm厚)ごとに密度を管理して実施した。

入力波は全て16サイクル(前後に別途各1.5サイクルのテーパ波付き)のサイン波であり、最大加速度を1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 m/s²の6種類に設定し、スベリの発生が目視で確認されるまで、順次大きくして入力した。周波数は、1.5 Hzである。(図4)

表1 材料の物性値一覧

材料番号	相対密度 D_r (%)	D値 (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (kN/m ²)	最適含水比 w_{opt} (%)
A	95	-	1.778	1.694	18.4
B	-	100	2.058	1.842	11.7
C	-	85	1.634	1.289	23.8
材料番号	模型含水比 w (%)	土粒子の密度 ρ_s (kN/m ²)	50% 粒径 D_{50} (mm)	粘着力 c_{net} (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ_{net} (°)
A	5.0	2.657	0.319	6.4	42.2
B	11.7	2.663	-	6.3	40.8
C	26.8	2.592	0.331	31.2	26.6

加振前の圧密と加振を実施した遠心力場は、材料A、Bは60 G場、材料Cは50G場である。

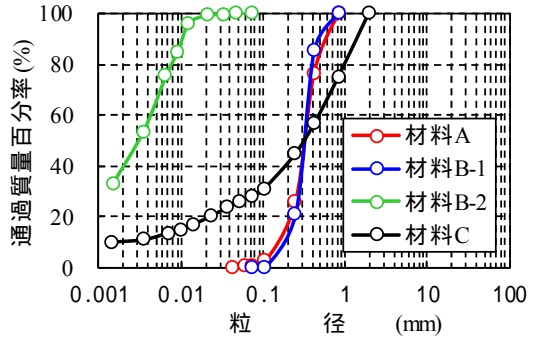


図1 粒径加積曲線

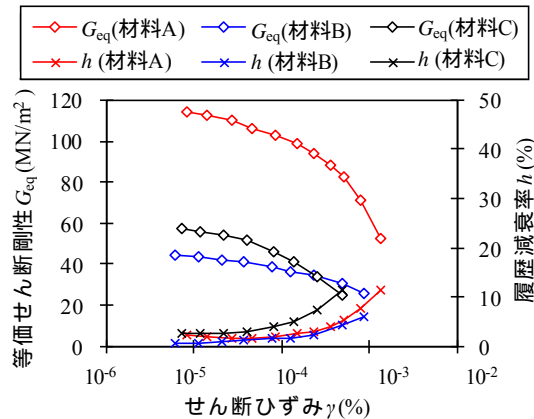


図2 せん断剛性と履歴減衰の特性

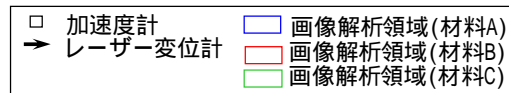


図3 模型断面図

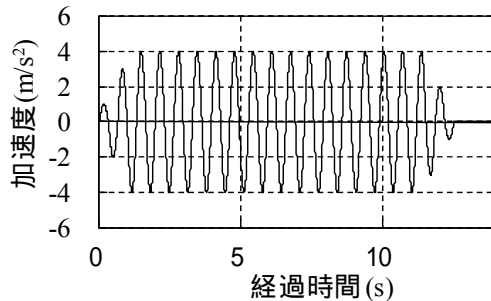


図4 入力波形の例(最大4.0 m/s²)

(2) 画像解析

堤体模型横断面内の変位分布等を調べるた

めに、画像解析を実施した。

土槽側壁にはめ込まれたガラス板に接する模型側面の画像を、各加振終了時に遠心力場で撮影し、画像解析に供した。

画像解析の方法は、相互相関係数によるパターン認識技術を砂の変位場計測に応用したもので、標点を用いないで変位場を計測できる CCIP 法(引用文献)を用いた。この方法では、解析範囲をメッシュ分割して要素ごとに変位等の評価を行う。

(3) 数値解析

逐次積分法による FEM 地震応答解析を実施した。

堤高 20.0 m、堤頂幅 6.0 m、斜面勾配 3 割の形状を持つ均一型フィルダムを解析対象とした。アイソパラメトリック一次要素を使用し、底面上の節点は水平方向と鉛直方向の変位を拘束した。

繰返しせん断特性のモデルとして修正 R-O (Ramberg-Osgood)モデルを使用し、材料 A、B について図 2 を近似した。材料 A、B のその他の土質材料パラメータは表 1 に基づいた。

自重圧密終了後、模型実験の入力地震波と同様の地震波(周波数は 3.5Hz)を最大加速度 1.0、2.0、3.0、4.0 m/s^2 の大きさで継続して入力した。時間刻みは 0.007s である。

材料 A、B の材料パラメータの数値を最大値と最小値とし、これら(2個)に両数値間を 3 段階に設定した数値(3個)を加えて、パラメータスタディを実施した。

周波数を変えた地震波を入力し、変状に与える影響を調べた。採用した周波数は 1.5、2.5、5.0、7.0 Hz で、時間刻みはそれぞれ、0.017、0.01、0.005、0.004 s である。堤体

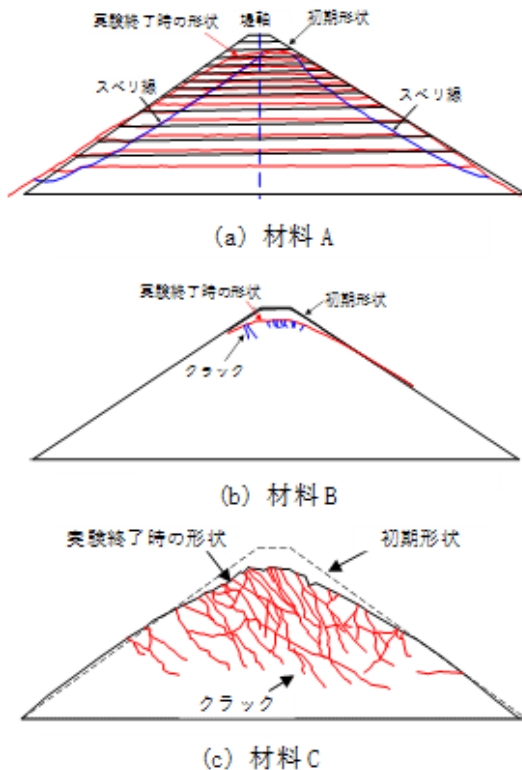


図 5 全加振終了時の模型中央断面の変状

材料は材料 A と B の中間的な物性とした。

4. 研究成果

(1) 全加振終了後の変状外観

材料 A は 4.0 m/s^2 の加振時にスベリが発生した。材料 B は 6.0 m/s^2 、材料 C は 5.0 m/s^2 まで加振し、クラックの発生や沈下などの大きな変状が生じたが、スベリ発生は認められなかった。また、材料 A では亀裂を目視確認できなかったが、実験中に模型表面の水分が蒸発してサクシオンが減少したことが影響している可能性がある。なお、材料 B では、変状の急激な進行を避けて状況を段階的に把握するため、同じ最大入力加速度の波形を用いた繰返しの加振(5.0 m/s^2 で 4 回、6.0 m/s^2 で 8 回)の加振を行った。(図 5)

(2) 画像解析結果

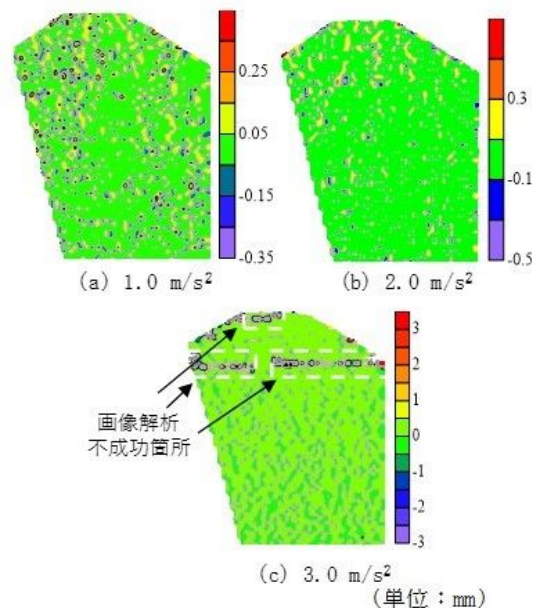


図 6 水平変位の差の分布(材料 A)

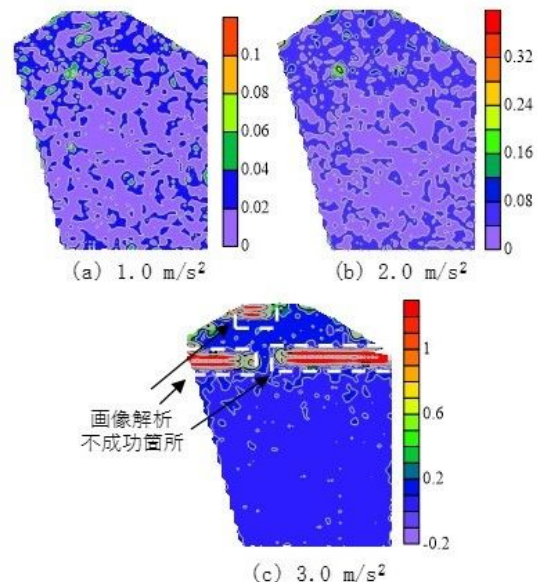


図 7 せん断ひずみの分布(材料 A)

材料 A と B の模型の水平変位の差（画像解析用メッシュの同一標高節点に関して、右隣りの節点との水平変位の差）とせん断ひずみの分布を図 6~9 に示す。また、材料 C の模型

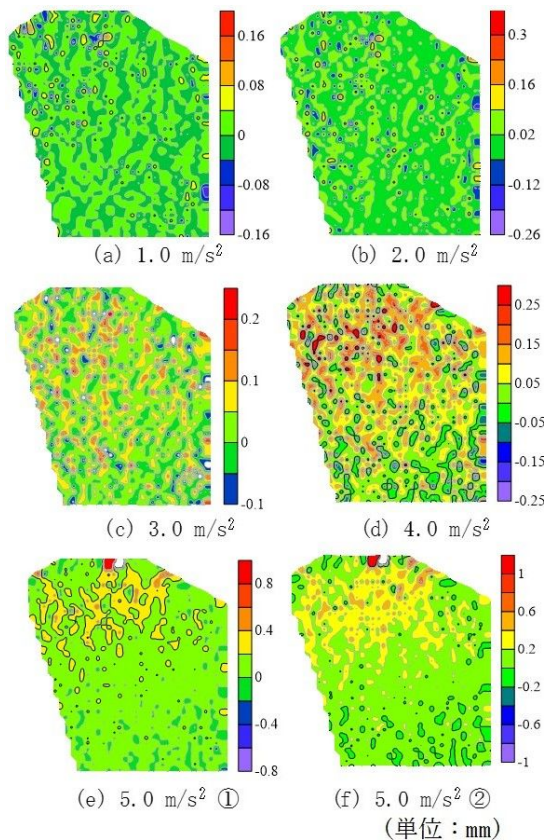


図 8 水平変位の差の分布（材料 B）

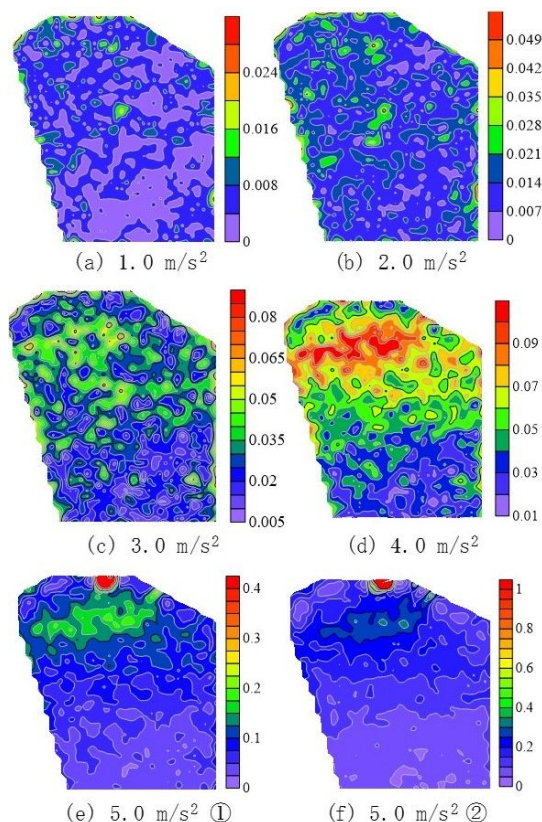


図 9 せん断ひずみの分布（材料 B）

の水平方向ひずみとせん断ひずみの分布をそれぞれ図 10、11 に示す。(a)~(f)の数値は、入力地震波の最大加速度である。

斜面部の変化については、水平方向ひずみもしくは水平変位の差とせん断ひずみの集中箇所が斜面上部に発生し、変状が進行するに従って集中箇所が上側に移動することを全ての材料に共通して確認できた（図 10、11 が特に明瞭）。これらの集中箇所とクラックの発生箇所はほぼ合致しており、フィルダム堤体の変状進行における特徴といえる。

堤頂部の変化については、材料 A と B では、天端の中央付近において、1.0~2.0 m/s²で水平変位の差とせん断ひずみの若干の集中が認められた（図 6、7、8、9 の(a)と(b)）。これらの集中は、材料 B では変状の進行に伴って著しく増大した（図 9 の(e)、(f)）。この集中箇所とクラックの発生箇所はほぼ合致していた。材料 C では堤頂部における有意な集中は認められなかった（図 10、11）。

堤体内の変化については、材料 B、C では、変状の進行に伴い、堤頂部からやや下方の堤体上部において、下に凸の緩やかな弧状にせん断ひずみの集中箇所が発達することを確認できた（図 9 の(d)~(e)、図 11）。（材料 A は解析対象領域全体の画像解析に成功した加速度レベルが 2.0 m/s²までのために不明。）すなわち、堤頂部が表面的に被害が軽微であってもその下方で大きなせん断ひずみが発生している可能性があり、地震によるフィルダムのダメージを確認する上で重要な知見といえる。

表面付近における水平変位の差もしくは

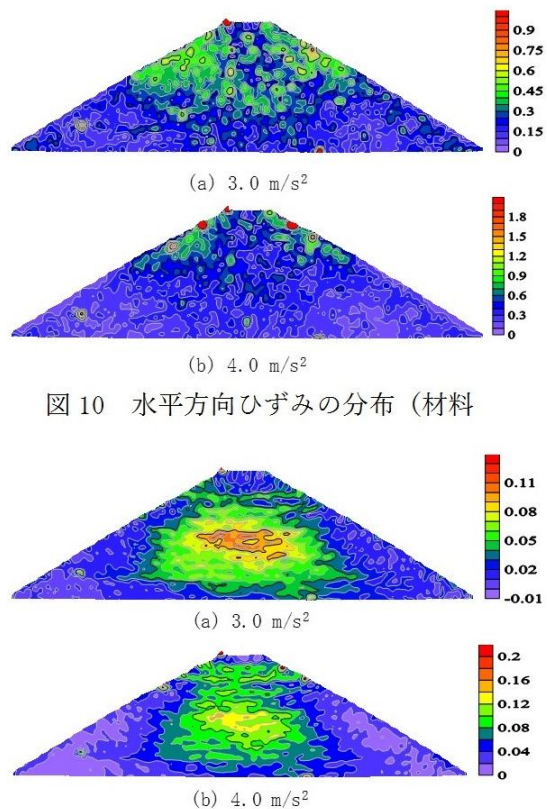


図 10 水平方向ひずみの分布（材料

図 11 せん断ひずみの分布（材料 C）

水平方向ひずみとせん断ひずみの集中箇所は概ね一致した。堤体内部における集中箇所は必ずしも一致しなかった。(例えば、図 10、11)

亀裂発生の前段階から、水平変位の正負分岐箇所(±0 箇所)が底部から堤頂部付近表面まで線状に繋がって伸展することを確認できた。

材料 B では、水平変位の正負分岐箇所は、堤頂部およびその近辺の亀裂発生箇所と一致した。堤頂部付近で最初に発達する亀裂は局所的な変形・変位ではなく、堤体全体の変形・変位が表面部に出したものである可能性がある。(図 12)

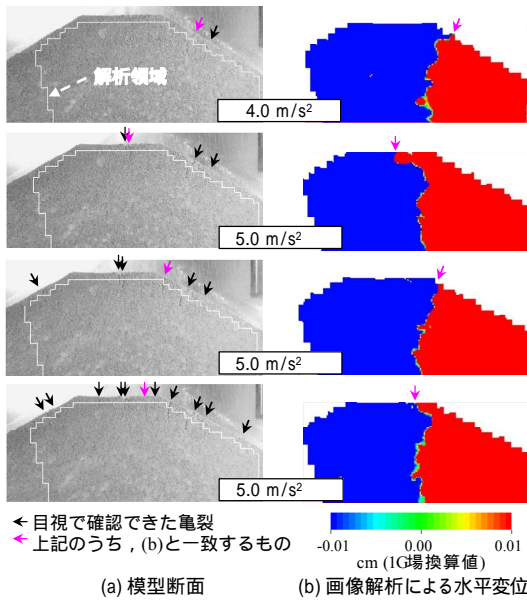


図 12 亀裂の発生と水平変位分布の履歴 (材料 B)

(3) 数値解析結果

砂質材料である材料 A は、粘性材料である材料 B に比べて、水平方向分岐点と水平方向ひずみ発達箇所の斜面上の位置が上側になる(図 13、14)。このことは、斜面上のクラックが砂質材料は粘性材料よりも上部で発生し易いことを示唆するものである。また、両材料共にせん断ひずみが堤体中央部から斜面に向けて発達するが、材料 B は材料 A よりも発達の程度が顕著である(図 15)。これらと模型実験結果から、砂質材料と細粒分を一定程度以上有する材料では亀裂発達

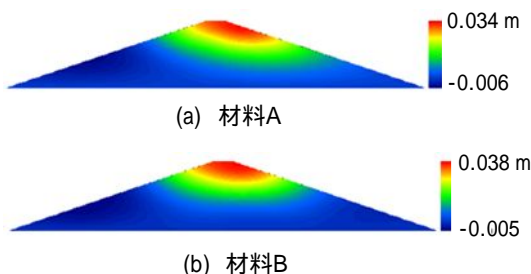


図 13 水平方向変位の分布 (加速度 4.0 m/s² 入力時)

や堤体破壊の機構が異なるといえる。

堤体の一次卓越周期より短周期の地震波は、変位・ひずみの極値発生箇所の多数化と分布形状の複雑化の効果を持つ(図 16~18)。

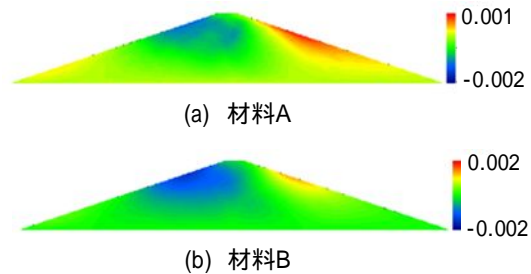


図 14 水平方向ひずみの分布 (加速度 4.0 m/s² 入力時)

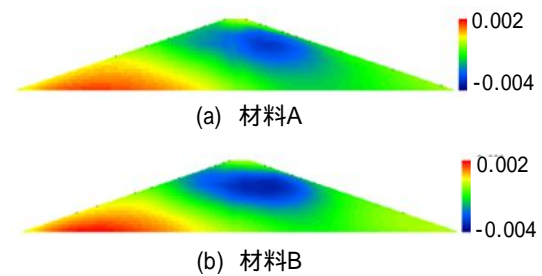


図 15 せん断ひずみの分布 (加速度 4.0 m/s² 入力時)

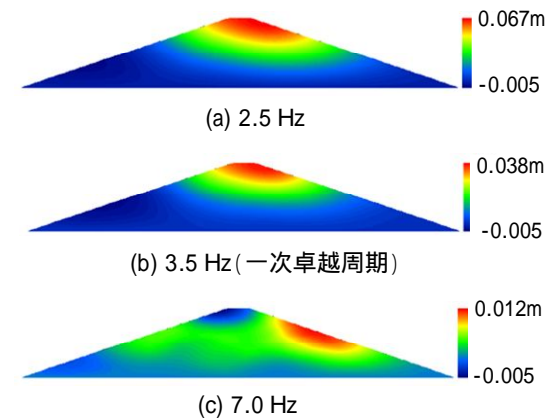


図 16 水平方向変位の分布 (加速度 4.0 m/s² 入力時)

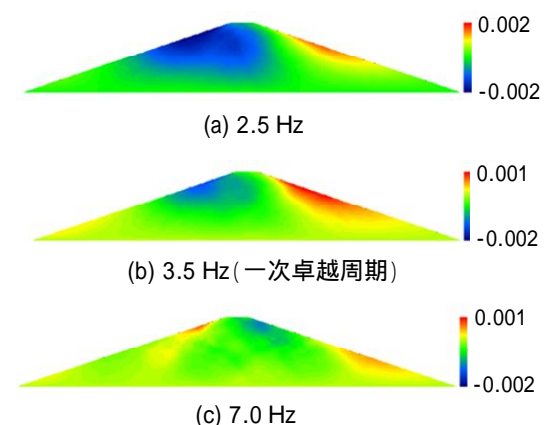


図 17 水平方向ひずみの分布 (加速度 4.0 m/s² 入力時)

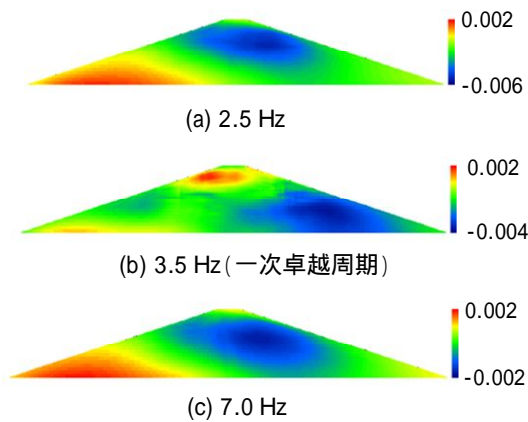


図 18 せん断ひずみの分布
(加速度 4.0 m/s^2 入力時)

< 引用文献 >

上野 勝利、高島 伸哉、望月 秋利、馬
 険峰、画像解析による簡便な砂の変位場計測
 方法、土木学会論文集、No.666、 -53、
 pp.339-344、2000.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

田頭 秀和、黒田 清一郎、林田 洋一
 画像解析を用いた遠心載荷振動模型実験に
 によるフィルダム堤頂部の亀裂発達過程 . 土木
 学会第 72 回年次学術講演会 .
 2017.9.11-13 九州大学(福岡県・福岡市)

〔図書〕(計 件)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

田頭 秀和 (TAGASHIRA Hidekazu)
 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 施設工学研
 究領域・ユニット長
 研究者番号：40414221

(2)研究分担者

増川 晋 (MASUKAWA Susumu)
 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 施設工学研
 究領域・領域長
 研究者番号：00414459

(3)研究分担者

向後雄二 (KOUGO Yuji)
 東京農工大学・農学研究員・教授
 研究者番号：30414452