

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01519

研究課題名(和文)阿蘇カルデラで発生した地震被害メカニズム解明のための追跡調査と残存リスクの評価

研究課題名(英文) Follow-up study for elucidation of damage mechanism which occurred in the Aso caldera zone and evaluation of residual seismic risk

研究代表者

池田 隆明 (Ikeda, Takaaki)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：40443650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：2016年熊本地震の被害調査から得られたデータを用いて火砕流堆積地盤の地震応答解析を行い、特異な地震時挙動を数値解析的に評価した。単調及び繰返し載荷兼用の動的リングせん断試験装置システムを開発し、火砕流堆積地盤の強度特性評価を行うための静的せん断試験方法を確立した。地震被害を受けた大正橋、車帰橋の2橋を対象に2次元有効応力解析から火砕流堆積地盤に起因する被害メカニズムの検討を行った。河川および河川構造物害については、河床材料の流動性を高めるために矩形形状の堰開口部を設け、潜り堰上下流における静的平衡河床および動的平衡河床における河床形態および流れの三次元構造について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2016年熊本地震は震度7が2回発生するとともに、規模の大きい余震が連続し火砕流堆積地盤が卓越した震源周辺域では橋梁部の被害など、社会生活に影響を大きい被害が発生した。我が国には熊本地震の震源域と同様の地盤条件や同様の地震危険度を有する地域が多く、熊本地震での被害原因やメカニズムを明らかにすることは今後の地震防災対策に大きく貢献することが予測される。本研究では地震発生後に行われた様々な調査結果を活用することにより、効率的・効果的な検討が可能なることを明らかにしたため、今後の災害における追跡調査の方向性を示すことができたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Characteristics ground motions in Aso caldera were cleared by nonlinear dynamic response analysis using soil parameters based on survey data. We developed dynamic ring shear test equipment and established static shear test method for analyzing stress strain characteristics of pyroclastic flow deposit ground. Two-dimensional effective stress analysis was carried out on two bridges, Taisho Bridge and Kuruma-gaeri Bridge, which were damaged by earthquakes to investigate the damage mechanism caused by pyroclastic flow deposition. For river and river structure damage, a rectangular-shaped weir opening was installed to enhance the flow of riverbed material, and the three-dimensional structure of riverbed morphology and flow in static and dynamic equilibrium riverbeds downstream of the diving weir was clarified.

研究分野：地震工学

キーワード：2016年熊本地震 火山灰質地盤 阿蘇カルデラ 地震動 災害履歴

## 1 . 研究開始当初の背景

2016 年熊本地震では広範囲にわたり住宅を含む建築構造物 , 道路・橋梁・トンネル・ライフライン等の社会基盤構造物に被害が生じ , 斜面災害や液状化等の地盤被害も複数の場所で確認された . 直下の活断層の破壊による強震動に加え , 火山性岩土が広く分布し , その上に阿蘇火山からの噴出物が堆積した複雑な地質・地形・地盤条件 , 繰り返し発生した自然災害の地盤への蓄積が被害を誘引・拡大したことは予想に違わない . 起震断層と考えられる布田川断層および日奈久断層の未活動区間 , 近い将来発生が懸念されている南海トラフ地震を考えると , 被害メカニズムについて徹底的な追跡調査を行い , 残存リスクを明らかにすることが必要と考えられた . 日本列島の中央に火山脈が走る我国では , 同様の地盤条件を有する地域が多く , 地震防災・国土強靱化という観点からもこの取り組みは重要な意味を持つ .

地震被害メカニズムの解明は地震被害軽減につながる重要課題であるが , 地盤条件に起因する被害については眼に見えない場所で複雑化している場合があり , これを見落とすと残存リスクとして潜在するため , 詳細な調査に基づく検討が必要である . 地震後 1 年半を経て , 被害状況や直後に行われた地盤を含む調査データが開示され , 学術的要素の高い調査を追加することにより詳細な検討ができる状況が整ってきた . そこで , 研究対象エリアを限定し , 地盤条件に影響を受けたであろう現象・被害を対象とした本研究を着想した . 研究成果の復旧・復興への反映を考えると , 現時点が最適な実施時期と考えられる .

## 2 . 研究の目的

地震被害の復旧では , 被災構造物の早期機能回復という観点から , 目的に応じた範囲での調査・検討が行われる . 地震動に加え地盤条件や過去の災害履歴 , 気象条件に影響を受けたと考えられる被害のメカニズムは複雑であり , 災害復旧の範囲を超えた学術的要素が強い詳細な調査・検討が要求される . 本研究では , 地震直後から実施された様々な調査・検討結果の有効活用 , 近接した被害事例を対象としたことによる調査・検討結果の相互活用により , 効果的に被害の真相に迫り , あわせて将来の危険度評価のための残存リスクを明らかにする . 得られた結果は記録として確実にアーカイブし web を通じて公開することにより , 対象地点はもとより類似の地盤条件を有する地域の地震災害軽減に反映させる . この課題解決への取り組み方法が学術的特色であり , 災害軽減に対する学術的調査研究活動の還元となる .

本研究では , 2016 年熊本地震で特徴的であった , 阿蘇カルデラ内で発生した地震動の解明 , 火砕流堆積地盤で構成された緩傾斜斜面の地すべりメカニズムの解明および火砕流大滝地盤の強度特性の解明 , 地盤流動による橋梁被害メカニズムの解明 , 地盤災害により生じた河川への土砂流入による影響評価を目的とする .

## 3 . 研究の方法

阿蘇カルデラ内で発生した地震動の解明 , 火砕流堆積地盤で構成された緩傾斜斜面の地すべりメカニズムの解明および火砕流大滝地盤の強度特性の解明 , 地盤流動による橋梁被害メカニズムの解明 , 地盤災害により生じた河川への土砂流入による影響評価について , 以下の取り組みを行った .

地震動の解明については , 経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより構築された単純な震源モデルを使用し , 震源特性のパラメータスタディを行うことにより , 地震動の再現を試みた . また , 研究期間内に発生した 2019 年山形県沖地震は熊本地震と同様の地震タイプであることから , 震源近傍で観測された特徴的な地震動の再現についても試みた .

緩傾斜斜面の地すべりに対しては現地で採取した試料に対して三軸試験とリングせん断試験による強度評価を行う . 使用するリングせん断試験機については , 単調及び繰返し載荷兼用の試験装置システムを開発する . また , 当該地域での降雨災害・河川氾濫についての知見を収集し , 実験および解析的にその影響を評価する .

地盤流動による橋梁被害は , 一級河川黒川にかかる大正橋と車帰橋を検討対象とする . 地震による約 3m 程度の地盤の強制変位を再現する解析までは実施できず , 大正橋については , 現地のボーリング調査に基づいた地盤モデルと構造モデルを作成し , 地震時慣性力のみでどの程度の被害が起きるかを確認することとした . 車帰橋については , 現地のボーリング調査 , 並びに , 益

城町で採取した火山灰質粘性土の繰り返し載荷とせん断剛性の関係(繰り返し軟化特性)を考慮した土質モデルでの検討を行い、被害原因の考察に努めた。

河川への土砂流入については、ダムや堰などの河川横断構造物は川が本来有する連続性を遮断、物理・生物環境の多様性を消失、さらに自然攪乱を抑制する傾向を持つ。本研究では、堰に開口部を設けて土砂の流動性を高め、堰上流側で堆積した土砂を排砂、堰下流側の洗掘を緩和の評価、堰下流域における砂州の形成機構について相対越流水深(越流水深と堰高との比)を系統的に変化させ、流れの三次元構造と河床変動(砂州)との関係を実証的に説明する

#### 4. 研究成果

経験的グリーン関数法によるフォワードモデリングにより構築された単純化された震源モデルを用いて、阿蘇カルデラ内の地震動の評価を行った。その結果、震源パラメータのライズタイムと応力降下量が特徴的な地震動に影響を及ぼすことが判明した。また、2019年山形県沖の地震についても同様の検討を行った結果、ライズタイムと応力降下量以外にも、震源近傍の場合は破壊伝播特性の影響が現れることが判明した。

火砕流堆積地盤が卓越した緩傾斜斜面の被害については高野台地すべりを対象とした調査研究を実施した。現場調査により、地すべりの発生は破砕性を有する軽石の薄い堆積層が原因であろうと判断された。本研究では、原位置で採取した軽石試料による再構成供試体を用い、大変形挙動まで計測可能な中空ねじり試験装置により、一連の非排水単調ねじりせん断試験、および非排水繰り返しねじりせん断試験を実施した。その結果、阿蘇軽石土は単調せん断を受けると50%以上の大きなせん断ひずみが急激に発生するポストピークフロー型の破壊挙動を示す傾向があることがわかった。一方、繰返しせん断応力下では、過剰間隙水圧が徐々に上昇し、限界応力状態に達すると大きなせん断ひずみが急激に発生するフロータイプの破壊が発生した。また、高野台地すべりの斜面は比較的緩勾配であったが、高い慣性応力に加えて、初期せん断応力の存在が流動型破壊とそれに伴う大変形に大きく寄与していた可能性が示された。また、当初の計画通り、静・動的リングせん断試験システムを開発し、試験方法を確立した。

地盤流動による橋梁被害メカニズムについては以下の成果を得た。大正橋の地盤はほぼ砂質層とシルト層で構成されており火山灰質粘性土はほとんど見られないことがわかった。また、有効応力解析より、河川底面から7.45mから8.5mと17.4mから19.7mの砂層は液状化するものの、橋台が水平方向・鉛直方向ともにほとんど移動していなかった。鋼管杭が河川底面から33m地点まで打ち込まれており、地震時慣性力だけでは被害がほとんど起きないと想定された。つまり、大正橋は地盤の強制変位が生じなければ、大きな被害は発生していないことがわかった。車帰橋については、左岸側と右岸側で大きく地盤条件が異なることがボーリング調査から分かり、支持層までの深さも河川底面を基準にして、左岸側は約38mに対し、右岸側は約16mである。右岸側、左岸側ともに支持層より上の地盤はほぼ火山灰質粘性土とシルトで構成されている。粘性土は繰り返し載荷による剛性低下はほとんど生じないとされているが、事前に益城町で採取された火山灰質粘性土の繰り返しせん断試験の結果を基に軟化特性を定義し、解析を実施したところ、水平方向の応答については、繰り返し軟化を考慮してもほとんど変化が見られなかったが、鉛直方向の応答については、繰り返し軟化を考慮すると応答が大きくなり、橋台背面アプローチ部の地盤の沈下量が大きくなる結果となり、繰り返し軟化を考慮する必要性を明らかにした。

河川への土砂流入については、河床材料の流動性を高めるために矩形形状の堰開口部を設け、潜水堰上下流における静的平衡河床および動的平衡河床における河床形態および流れの三次元構造について明らかにした。さらに、開口部深さを系統的に変化させて堰上流に堆積した土砂の排砂機能について検討した。実験結果は、開口部を有する堰が、堰上流の掃流力を高め、河床を低下させることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yukiko KOJIMA, Takaaki IKEDA, Takumi MATSUMOTO and Atsuya MINAGAWA	4. 巻 -
2. 論文標題 Damage investigation of 2019 the Off the Yamagata Prefecture earthquake, Mj6.7	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Disaster FactSheets	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 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 加賀美 侑希、清田 隆、池田 隆明、ムハマッド ウマル、片桐 俊彦	4. 巻 71
2. 論文標題 熊本地震による阿蘇火山性堆積土の沈下メカニズムの検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 1071～1074
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11188/seisankenkyu.71.1071	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 Terunori Ohmoto and Hiroataka Une	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of weir with an opening on bed configuration and flow structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 38th IAHR World Congress	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 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Chiaro Gabriele, Umar Mohammed, Kiyota Takashi, Massey Christopher	4. 巻 -
2. 論文標題 The Takanodai Landslide, Kumamoto, Japan: Insights from Post-Earthquake Field Observations, Laboratory Tests, and Numerical Analyses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of 5th Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference	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） 10.1061/9780784481486.011	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Takaaki Ikeda and Yukiko Kojima	4. 巻 -
2. 論文標題 Source modeling of the mid-scale crustal earthquake by forward modeling using the empirical Green's function method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 Rock Dynamics Summit (RDS 2019)	6. 最初と最後の頁 279-286
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 有
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 該当する

1. 著者名 根本 峻、池田 隆明、清田 隆	4. 巻 70
2. 論文標題 2016年熊本地震で被災した秋田配水場周辺地盤の地震時挙動の推定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 429 ~ 432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11188/seisankenkyu.70.429	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 UNE Hirotsuka, OHMOTO Terunori	4. 巻 74
2. 論文標題 EFFECTS OF OBLIQUE WEIR WITH AN OPENING ON RIVER BED AND FLOW STRUCTURE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_829 ~ I_834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.74.5_I_829	査読の有無 有
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18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 池田隆明, 倉橋奨, 宮腰研, 染井一寛
2. 発表標題 2019年山形県沖の地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション
3. 学会等名 第39回地震工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島由記子, 池田隆明, 松本拓未, 皆川敦也
2. 発表標題 2019年山形県沖の地震 (Mj6.7) における震源近傍域の被害調査
3. 学会等名 第39回地震工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takaaki Ikeda
2. 発表標題 Source modeling and ground motion simulation of the mid-scale crustal earthquake
3. 学会等名 The 18th International Symposium on New Technologies For Urban Safety of Mega Cities in Asia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上和真, 齋藤深太, 梅山雄多, 五十嵐晃, 池田隆明
2. 発表標題 強震動の観測記録に基づく周期特性を考慮した2方向地震動の方向性分析
3. 学会等名 第39回地震工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 根本峻, 池田隆明
2. 発表標題 2016年熊本地震における秋田配水場周辺地盤の地震時挙動の推定
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木陽貴, 池田隆明, 小島由記子
2. 発表標題 地盤条件が構造物被害に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 第37回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 皆川敦也, 池田隆明, 郷右近英臣, 松本拓未
2. 発表標題 地震ハザード評価のための表層地盤の増幅特性に関する研究
3. 学会等名 第37回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Saito, K., Inoue, K. and Ikeda
2. 発表標題 Evaluation of directionality considering periodic characteristics for strong motion observation records, International Conference on Science of Technology Innovation
3. 学会等名 4th STI-Gigaku 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minagawa, A., T., Ikeda, T., Gokon, H., Matsumoto, T. and Tun Naing
2. 発表標題 Study on amplification factor of maximum acceleration for seismic hazard assessment
3. 学会等名 The 18th International Symposium on New Technologies For Urban Safety of Mega Cities in Asia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Suzuki, H., Ikeda, T. and Kojima, Y.
2 . 発表標題 Effect of surface ground characteristics on structural damage
3 . 学会等名 The 18th International Symposium on New Technologies For Urban Safety of Mega Cities in Asia ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takayuki Tanaka, Terunori Ohmoto
2 . 発表標題 Turbulent structure in open channel with longitudinally continuous side cavities
3 . 学会等名 38th IAHR World Congress ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K.Adachi, T.Ohmoto, and H. Kondo
2 . 発表標題 Effects of Hyper-Concentrated Sediment on Flow Resistance and Flow Structure in an Open Channel with Square Ribs
3 . 学会等名 14th International Symposium on River Sedimentation ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Muhammad Umar, Gabriele Chiaro, Takashi Kiyota and Hirotooshi Miyamoto
2 . 発表標題 Monotonic and cyclic undrained behavior of Kumamoto Aso pumice soil by triaxial and torsional shear tests
3 . 学会等名 16th European Conference on Earthquake Engineering ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年



1. 発表者名 池田隆明, 染井一寛, 倉橋奨, 宮腰研
2. 発表標題 経験的グリーン関数法を用いた震源のモデル化 - 2018年島根県西部の地震(Mj6.1) -
3. 学会等名 第38回地震工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根本峻, 池田隆明
2. 発表標題 数値解析法を用いた熊本地震における地盤の地震時挙動に関する解析的研究
3. 学会等名 第36回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shun Nemoto and Takaaki Ikeda
2. 発表標題 Evaluation of dynamic ground behavior at near source area during the 2016 Kumamoto earthquake by numerical analysis approach
3. 学会等名 The 7th International GIGAKU Conference in Nagaoka (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Terunori OHMOTO and Hirotaka UNE
2. 発表標題 Effects of Weir with an Opening on Bed Morphology and Flow Patterns
3. 学会等名 7th International Symposium on Hydraulic Structures (ISHS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Terunori OHMOTO, Kanji ADACHI, Shakila KAYUM and Ryuichi HIRAKAWA
2. 発表標題 Effects of a partial dam removal on river bed topography and flow fields
3. 学会等名 12th International Symposium on Ecohydraulics (ISE) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018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	鈴木 素之 (Suzuki Motoyuki)  (00304494)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授  (15501)	
研究分担者	梶田 幸秀 (Kajita Yukihide)  (10403940)	九州大学・工学研究院・准教授  (17102)	
研究分担者	大本 照憲 (Ohmoto Terunori)  (30150494)	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授  (17401)	
研究分担者	清田 隆 (Kiyota Takashi)  (70431814)	東京大学・生産技術研究所・准教授  (12601)	
研究分担者	小島 由記子 (Kojima Yukiiko)  (70780203)	長岡工業高等専門学校・環境都市工学科・助教  (53101)	

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