

地震時の斜面災害に対する緊急輸送道路の復旧性に関する研究

酒井, 久和 / SAKAI, Hisakazu

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

9

(発行年 / Year)

2020-06-17

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01343

研究課題名（和文）地震時の斜面災害に対する緊急輸送道路の復旧性に関する研究

研究課題名（英文）Restoration characteristics of damaged Emergency Transportation Routes caused by earthquake-induced slope failures

研究代表者

酒井 久和（SAKAI, Hisakazu）

法政大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：00360371

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：既往の被害地震に対して、斜面カルテ、地震動強度指標データ、降水量、地質図、土壌図、植生図などの空間情報を分析し、地質学、統計学の観点から斜面崩壊被害の特徴を掴んだ。さらに、防災カルテ、安定度調査表、地表面最大速度、勾配に基づく斜面崩壊評価を行い、道路ごとに途絶確率を算出する手法を検討した。新潟県中越地震後の道路の規制状況と比較することにより手法の妥当性を検証した。南海トラフ巨大地震時における和歌山県の緊急輸送道路に対して本手法を適用し、道路の途絶確率を算出した。道路ネットワークの途絶確率から孤立性評価を行い、対策すべき箇所について提案、その有効性の検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震強度と崩壊要因をともに考慮した簡易的に斜面耐震性評価手法を提案するとともに、過去の被害地震における斜面災害と復旧期間の関係資料を国や地方公共団体から収集し、統計分析により斜面災害と緊急車両通行までの復旧期間の関係を明らかにした。

中山間地域の孤立地域・期間を縮減するために、南海トラフ巨大地震後の和歌山県を対象として、斜面の地震対策の優先度を決定する方法論について検討し、その有用性を示した。

研究成果の概要（英文）：From viewpoints of geology and statistic, we analyzed the slope failure characteristics during earthquakes based on the damaged slope data, slope stable property lists, seismic indexes, precipitation, and geological, soil and vegetation maps and so on. We proposed the methodology of the stochastic estimations of earthquake-induced landslide and blockage of road caused by the landslide. We verified the methodology based on the data road traffic restrictions after the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake. We applied the method to the emergency transformation routes in Wakayama prefecture after the Nankai trough mega scenario earthquake. The route blockage rates calculated from the analysis taught us the regions with high isolation risk and the priority for the slopes to reinforce.

研究分野：地震地盤工学

キーワード：復旧性 道路ネットワーク 地震 孤立地域 道路規制 緊急輸送道路 道路防災点検データ 斜面カルテ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

我が国では、近年の被害地震で観測された地震動レベルの強化により、地震対策として損傷を許容する復旧性、修復性を基準とした設計体系が各種耐震設計基準、指針等に導入されている。その中でも地震後の各種ライフラインの復旧に欠かせない道路については、国土交通省が広域幹線道路や緊急輸送道路に対して、レベル 2 地震においても限定された道路は限定された損傷にとどめ応急対策によって緊急車両の通行が可能な区間の耐震性を有すること、ネットワークとしては多重性、代替性を確保することを求めている。

南海トラフの巨大地震は、今後 30 年間の発生確率が 70% で、太平洋側の広範な地域に巨大な津波と地震動によって甚大な被害を及ぼすと想定されている。当然のことながら、前述の要求性能を満足できるよう、事前に中山間地域の斜面や盛土の被害想定と地震対策が求められるが、地震強度と崩壊要因をともに考慮した簡易的に斜面耐震性評価手法は確立されていないのが現状である。

また、地震時の被災斜面の復旧性に関してはデータが少なく、一般的な傾向として、中山間地域の大規模な面・斜面崩壊による復旧に長期間要することが報告されているに過ぎない。これは被災斜面の規模、地質、受け盤、流れ盤等、様々な要因により復旧期間が影響を受けるためであると考えられる。そのため、上記の要求性能としての“応急対策によって緊急車両の通行が可能な区間の耐震性を有する”の判断が非常に困難であり、重要路線の危険斜面を全て非崩壊の耐震性を有する地震対策が取られかねない。現在、国や自治体の緊縮財政により未対策斜面が多数残存するが、このままでは徐々に重要路線周辺の危険斜面が人工斜面化されることが想定される。

2. 研究の目的

南海トラフの巨大地震などにおいて、道路ネットワークの途絶は孤立地域を発生される原因となるため、特に迂回経路の少ない中山間地域において道路ネットワークの確保は極めて重要なテーマである。一方、膨大な財政赤字を有する我が国において、地震で被害を受けそうな全ての斜面に対して地震対策を行うことは現実的ではなく、環境面からも推奨されるべきではない。本研究では、自治体において容易に算定できる斜面耐震性評価と緊急車両が通行可能となる復旧期間を関係づけ、復旧に長期間要するため対策が必要な斜面と対策が不要な斜面を選定する手法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 道路防災カルテは、道路の通行に障害となり得る崩壊危険性を有する斜面に対して、崩壊因子に基づいた調査を行った結果を取りまとめたものであり、道路管理者によって既に管理・更新されている。本研究では、このカルテに加え、独立行政法人等で調査、公開され入手が容易なデータ、既往の地震の崩壊データをもとに、簡易耐震解析評価手法の提案を行う。さらに、斜面崩壊の特性・崩壊確率と緊急車両が通行可能となる復旧日数との関係を相関分析することにより、カルテを有する道路ネットワークの途絶確率を求めるフローを提案する。手法の妥当性は、既往の被害地震における道路の規制状況で検証を行う。

(2) (1) とは異なり、特定の危険斜面に対して詳細な被害分析を行うために、粒子法の一つである Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法の高精度化を行う。妥当性の検証対象として、土質調査が豊富で、近傍で地震動が推定されている崩壊斜面を選定し、崩壊シミュレーション結果と被害状況の比較・分析を行う。

4. 研究成果

(1) 新潟県中越地震、岩手宮城内陸地震、熊本地震を対象に 831 件の斜面崩壊被災データ及び地質データ、先行雨量を基に、重回帰分析より崩土の到達距離の推定式を作成した。また、重回帰分析より作成した推定式に対して、残差分析や AIC の算出より推定式の精度の向上を確認した。推定式に用いた崩壊因子において、回帰係数及び p 値などから降雨、斜面勾配、地質の形成年代の因子は、崩土の到達距離の予測に必要な因子であることを示した。

斜面の信頼性評価手法の改善を目的として、各自治体の斜面カルテに加え、実降雨量、地質図、土壌図、植生図等を使用するとともに、斜面の安定性に関する地質学的な知見を反映させることで、斜面崩壊発生の因子の把握、共分散構造分析に基づいた検討を行った。既往の理学的研究成果と整合する傾向がみられたが、適合度が必ずしも十分ではなく、パス図の改良が必要であることが確かめられた。また、Deep Learning に基づく復旧期間予測モデルの検討し、許容誤差、Loss 率、相対誤差の 3 つの比較検証を行ったが、説明変数の検討、検証データの加増が必要であることが分かった。

(2) 粒子法 (SPH 法) を用いた地震による斜面の崩壊挙動の数値シミュレーション手法の三次元を行った。三次元化した解析コードを用いて岩手・宮城内陸地震で発生した荒砥沢地すべりの再現解析を実施した。これまでの解析では、被災状況を十分に再現するには至っておらず、修正あるいは改良すべき箇所を効率的に同定するため、体系的な Verification と Validation の方法論について検討を始めた。

2008 年岩手・宮城内陸地震の際の荒砥沢地すべりの再現解析を行った。砂岩・シルト岩が地震時の間隙水圧に伴いせん断強度が低下したことが考えられ、残留内部摩擦角を見かけのせん

断抵抗角まで低減することにより、実被害の流動量・残留変形の特徴が良好に再現された。人工粘性の値を適切に設定することで、荒砥沢地すべりの様な大変形を伴う問題に対しても SPH 法が適用可能であることを示した。

(3) 道路盛土に甚大な被害を受けた近年の 7 地震、新潟県中越地震、能登半島地震、新潟県中越沖地震、岩手宮城内陸地震、駿河湾地震、東北地方太平洋沖地震、熊本地震において、盛土被害 111 箇所を対象に、復旧に影響を与える要因の抽出と被災からの規制期間の予測について数量化理論第 1 類を用いて分析した。規制期間評価の高度化を図る目的で、道路盛土に甚大な被害を受けた 111 箇所の地震被害データを基にしてディープラーニングを用いた分析と予測を行った。その際、過学習を防ぐための Dropout と、効率化と学習率の設定が不要な Adam を導入、交差検証による評価を用いた改良モデルで検証をした。結果、データが少なく実用できるモデルは構築できなかったが、将来的には有効性があることが確認された。

(4) 横須賀にある小山（標高 55m）を対象に地震観測を行い、地震動増幅の周波数特性を確かめた。本研究では、同地形において山地形の地盤増幅率を解析的に検討するにあたり、観測記録と 3 次元解析結果の地震動増幅特性を比較した。結果、3 次元のモデル化を行う際に、地表面以深の領域が小さいと、底面境界に近い箇所の計算結果が過小評価される。また、短周期成分の増幅は堆積層の影響が大きいことを確かめた。

(5) 中山間地域の道路ネットワークにおいて、地震時斜面崩壊によって引き起こされる道路閉塞の発生確率を考慮した集落の孤立に関わる冗長性の評価手法を検討した。

まず、中山間地において地震時の斜面崩壊による集落の孤立対策として、優先されるべき道路区間を体系的に抽出する手法を開発した。道路ネットワークをノードとリンクから構成されるグラフにモデル化し、各リンクのクリティカル度を求める。クリティカル度は、そのリンクが閉塞した際に孤立する人口に閉塞確率を乗じた数値として定義した。クリティカル度が大きなリンクを優先的に補強することで、効率的に集落の孤立リスクを低減できることをケーススタディにより示した。

さらに、道路ネットワークの地震時機能性評価手法の確立を目的として、防災カルテ、安定度調査表、地表面最大速度等に基づく斜面崩壊評価を行い、道路ごとに途絶確率を算出する手法を検討した。新潟県中越地震後の道路の規制状況と比較することにより手法の妥当性を検証した。南海トラフ巨大地震時における和歌山県の緊急輸送道路に対して本手法を適用し、道路の途絶確率を算出した。道路ネットワークの途絶確率から孤立性評価を行い、対策すべき箇所について提案、その有効性を検証した。

(6) 近畿地方整備局道路部、東日本大震災時に陣頭指揮にあたった調整官から災害対応、復旧時の状況について聞き取り調査を実施し、地震後の道路ネットワーク復旧の障害要因を把握した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 5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 野本篤史, 酒井久和, 梶谷義雄 | 4. 巻 76 |
| 2. 論文標題 複数の地震災害の統計分析による道路盛土復旧予測モデルの構築 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) | 6. 最初と最後の頁 掲載決定 |
| 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 - |
| 1. 著者名 小野祐輔, 日比慧慎 | 4. 巻 19 |
| 2. 論文標題 地震時斜面崩壊による道路閉塞を考慮した中山間地の孤立リスク評価: 2004年新潟県中越地震と2016年熊本地震への適用 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 日本地震工学会論文集 | 6. 最初と最後の頁 6_232, 6_243 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.5610/jaee.19.6_232 | 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 - |
| 1. 著者名 柁丹人, 酒井久和, 梶谷義雄 | 4. 巻 39 |
| 2. 論文標題 斜面カルテと空間情報データベースを用いた斜面の地震時信頼性評価手法 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 地震工学研究発表会論文集 | 6. 最初と最後の頁 USB |
| 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 - |
| 1. 著者名 石川大地, 小野祐輔, 酒井久和 | 4. 巻 75 |
| 2. 論文標題 SPH法による人工粘性を考慮した 荒砥沢地すべりの滑動再現 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) | 6. 最初と最後の頁 I_720-I_726 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.2208/jscejsee.75.I_720 | 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 - |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 野本篤史, 酒井久和, 梶谷義雄 | 4. 巻 38 |
| 2. 論文標題 数量化理論第 類を用いた地震時の道路盛土部の復旧に関する分析と予測 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 地震工学研究発表会講演概要集 | 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 - |

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 藤並雄誠, 石丸達也, 酒井久和, 吉見雅行, 佐藤清隆 | 4. 巻 38 |
| 2. 論文標題 頂上部の堆積層が小丘陵地の地震動増幅に及ぼす影響に関する検討 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 地震工学研究発表会講演概要集 | 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 - |

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Yusuke Ono, Keishin Hibi | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Redundancy Analysis of Road Network in Mountainous Region Taking into Account Earthquake-induced Slope Failure | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 International Symposium on Earthquake Engineering for Lifeline and Critical Infrastructure Systems | 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 - |

| | |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名 小野祐輔, 岡本遼太, 河野勝宣, 酒井久和, 秦吉弥, 池田勇司 | 4. 巻 73 |
| 2. 論文標題 SPH法を用いた荒砥沢地すべりの三次元解析 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) | 6. 最初と最後の頁 I_346, I_356 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejsee.73.I_346 | 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 - |

| | |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名 藤並雄誠, 吉見雅行, 酒井久和, 佐藤清隆, 池田勇司 | 4. 巻 73 |
| 2. 論文標題 地震観測に基づく山地形の地盤増幅率の考察 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) | 6. 最初と最後の頁 I_907, I_913 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.2208/jscejsee.73.I_907 | 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10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 酒井久和 |
| 2. 発表標題 Estimation of ground amplification factors in a mountain district using earthquake observations and three-dimensional FEM analyses |
| 3. 学会等名 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 石丸達也 |
| 2. 発表標題 小丘陵地における地震動増幅に関する解析的検討 |
| 3. 学会等名 第73回土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石川大地 |
| 2. 発表標題 SPH 法による盛土の地震時安定性に関する三次元効果の検討 |
| 3. 学会等名 第73回土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 野本篤史 |
| 2. 発表標題 数量化理論第1 類を用いた地震時の道路盛土部の復旧に関する分析と予測 |
| 3. 学会等名 第73回土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石川大地 |
| 2. 発表標題 Three-Dimensional Effect on Seismic Stability of Embankment Based on SPH Simulation |
| 3. 学会等名 The Third CICHE-JSCE Joint Workshop in 2018 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 近野 玲央 |
| 2. 発表標題 防災カルテを用いた長野県北部地域における斜面の信頼性評価手法 |
| 3. 学会等名 第37回土木学会地震工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 藤並雄誠 |
| 2. 発表標題 3次元FEMに基づく山地形の地盤増幅率の推定 |
| 3. 学会等名 第37回土木学会地震工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石川大地 |
| 2. 発表標題 2008年荒砥沢地すべりに対するSPH法による三次元地震応答解析 |
| 3. 学会等名 第72回土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 近野 玲央 |
| 2. 発表標題 防災カルテを用いた長野県北部地域における斜面の信頼性評価手法 |
| 3. 学会等名 第72回土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 近野 玲央 |
| 2. 発表標題 3次元FEMに基づく山地形の地盤増幅率の推定 |
| 3. 学会等名 第72回土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2017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 | 小野 祐輔 (Ono Yusuke) (00346082) | 鳥取大学・工学研究科・教授 (15101) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|----------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 呉 建宏 (Wu Jian-Hong) | 台湾国立成功大学・土木工学科・教授 | |