群馬県多野郡を対象とする想定地震における 斜面崩壊と橋梁の損傷による道路閉塞を考慮した 孤立リスクの評価

佐藤 景也1・井上 和真2・渡邊 祥庸3・齋藤 渓太4・池田 隆明5

¹学生会員 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学課程(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1) E-mail: s213255@stn.nagaokaut.ac.jp

²正会員 群馬工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580) E-mail:inoue@cvl.gunma-ct.ac.jp

³正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30) E-mail: wyoshino@kajima.com

⁴学生会員 群馬工業高等専門学校 専攻科 環境工学専攻 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580) E-mail: ae20913@gunma.kosen-ac.jp

⁵正会員 長岡技術科学大学教授 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1) E-mail: ikeda@vos.nagaokaut.ac.jp

群馬県には多くの中山間地があり、県南部には深谷断層帯という活断層群が存在している.令和元年東 日本台風では、豪雨による斜面崩壊が原因で道路閉塞が生じ神流町で孤立が発生した.これらの地域では、 急峻な斜面が多いことから、強震動が発生すると斜面崩壊に伴う道路閉塞により再び孤立が発生すると考 えられる.加えて、地震時に孤立が発生する原因としては橋梁の損傷に伴う道路閉塞も考えられる。そこ で、本研究では神流町を含む多野郡について、斜面崩壊に伴う道路閉塞と橋梁の損傷に伴う道路閉塞を考 慮した孤立リスクの評価を行う.孤立リスクを評価した結果、多野郡の孤立リスクは非常に高いことが確 認された.また、斜面崩壊確率や斜面崩壊に伴う道路閉塞確率について、令和元年東日本台風による被害 と同様の傾向が見られた.

Key Words: road network, slope failure, bridge damage, road closure, isolation risk

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

群馬県南部には深谷断層帯という活断層が存在してい る(図-1). この断層帯の平均活動間隔は 10000~25000 年 程度,最新活動時期は約 6000 年前であり,今後 30 年以 内の地震発生確率は約 0.1%である.また,令和元年東 日本台風(台風 19 号)の際,嬬恋村,南牧村,神流町では 豪雨が原因の斜面崩壊に伴う道路閉塞により孤立が発生 した.これらの地域では勾配が急である斜面が多く存在 し,深谷断層帯で地震が発生した場合,斜面崩壊に伴う 道路閉塞により再び地域の孤立が発生する可能性は十分 にある.そこで,本研究では令和元年東日本台風の際に 孤立が発生した3 つの市町村のうち,深谷断層帯から近 い神流町に着目し、深谷断層帯の想定地震における孤立 リスクを評価する.

地震時に孤立が発生する原因としては、斜面崩壊に伴 う道路閉塞の他に橋梁の損傷に伴う道路閉塞が考えられ る.これらに関する既往研究は、後述の地震時の斜面崩 壊に伴う道路閉塞を考慮した孤立リスクの評価方法の研 究と、地震時の橋梁の損傷による道路閉塞確率をフラジ リティ曲線を用いて表した研究がある.

そこで、本研究では深谷断層帯の想定地震における斜 面崩壊に伴う道路閉塞に加え、橋梁の損傷に伴う道路閉 塞を考慮したうえで孤立リスク評価を行う.



- 図-1 深谷断層帯と神流町の位置関係 1)
- (2) 既往研究のレビュー
- a) 地震時の斜面崩壊に伴う道路閉塞を考慮した孤立リ スクの評価

小野・本郷 2は地震時の斜面崩壊に伴う道路閉塞を考 慮した孤立リスクの評価方法を提示している. これは、 中山間地の集落の地震時の孤立リスクを道路ネットワー クの非連結確率として定量的に評価する手法である. ま た、小野・本郷の評価手法の有用性について、新潟県中 越地震時の山古志村と熊本地震時の南阿蘇村を用いて小 野・日比 3が検討している. 山古志村は小野・本郷の手 法を用いた評価では孤立確率の高い集落が多いという結 果になり、実際の地震時の被害は村の全域で孤立が発生 した.一方,南阿蘇村は小野・本郷の手法を用いた評価 では孤立確率の高い集落は一部という結果になり、実際 の地震時の被害は一部の集落のみが孤立した. このこと から、小野・本郷の孤立リスク評価手法が有用であるこ とが確認された.また、小野・日比は想定地震において も小野・本郷の孤立リスク評価手法が有用であることを 確認している.

b) 地震時の橋梁の損傷による道路閉塞確率

笛木・庄司 ⁴は兵庫県南部地震における高架道路橋の 被災データより, RC 橋脚,支承,桁の被災度を D(無被 害), C(小破), B(中破), A(大破)の4つに分類し,橋梁全体 系のイベントツリーを作成するとともに各構造要素にお ける地震時のフラジリティ曲線を作成している.大峯ら ⁵は,笛木・庄司が作成したイベントツリーにおいて, 各構造要素の最大被害がその構造物における被災レベル を代表するものとし,同被災レベルのフラジリティを総 和することにより地震時の橋梁全体系のフラジリティ曲 線を作成した.笛木・庄司,大峯らの作成したフラジリ

ティ曲線の指標には PGV(Peak Ground Velocity:地表面最大 速度)が用いられているが、喜納ら[®]は大峯らが作成した フラジリティ曲線において地震動指標間の経験的な関係 を用いて PGV を PGA(Peak Ground Acceleration:地表面最大 加速度)に変換し、新たな橋梁全体系のフラジリティ曲 線を作成した.



2. 地震時の孤立リスクの算出方法

(1) 本研究における孤立の定義

平成 16 年の新潟県中越地震時に多数の孤立集落が発 生したことを受けて、平成 17 年に内閣府により実施さ れた「中山間地等の集落散在地域における孤立集落発生 の可能性に関する状況調査」^つにおいて、孤立とは「道 路交通及び海上交通による外部からのアクセス(四輪自 動車に通行の可否)が途絶し、人の移動・物資の流通が 困難となり、住民生活が困難もしくは不可能となる状態」 と定義されている.そこで、本研究では「中山間地等の 集落散在地域における孤立集落発生の可能性に関する状 況調査」を参考に、「対象地域から対象地域外へ至る経 路が存在しない状態」を孤立と定義する.

(2) 想定地震における孤立リスクの算出方法の概要

本研究では、想定地震における斜面崩壊に伴う道路閉 塞確率と橋梁の損傷に伴う道路閉塞確率をそれぞれ算出 し、両者を考慮した道路閉塞確率を算出した後、孤立リ スク(道路ネットワークの非連結確率)を算出する.本研 究における研究方法のフローチャートを図-2に示す.ま た、各段階における詳細な算出方法は付録に後述する.



図-3 対象地域の道路ネットワークと深谷断層帯の位置関係



図-4 対象地域の道路ネットワーク

3. 分析条件と計算結果

(1) 対象地域の選定

本研究の孤立リスクを算出する対象地域を多野郡とする.多野郡は,群馬県の南西に位置し,神流町と上野村から成り立つ中山間地の地域である.多野郡の道路ネットワークと深谷断層帯の位置関係を図-3に示す.

(2) 多野郡の道路ネットワーク

多野郡の道路ネットワークの詳細図を図-4に示す.赤 色で示した道路は国道 462 号であり、この道路沿いには 避難所や公共施設が位置しており多野郡の幹線道路とな っている.また、南北には山間地を通る長い道路が存在 している.リンクの長さの平均は 969m であり、最長の リンクは 14185m、最短のリンクは 7m であった.

(3) 多野郡の斜面勾配

対象地域の斜面勾配をオープンソース GIS ソフトウェ アである QGIS¹²⁰の地形解析プラグインにより求め, 図-5 に示す. 道路が含まれるメッシュにおける斜面勾配の平 均は 24.2°,最大値は 77.2°であった.なお,地形解析 プラグインでは周囲のメッシュとの標高差より斜面勾配 を計算している.そのため,道路が含まれるメッシュの 斜面勾配の値が実際の道路の斜面勾配と等しいというこ とではない.



図-5 対象地域の斜面勾配



図-6 深谷断層帯の想定地震における多野郡の PGA 分布

(4) 想定地震における PGA 分布の算出

深谷断層帯の想定地震における多野郡周辺の PGA 分 布を算出する. PGA の算出には各地点の断層最短距離 が必要となる. そのため, 深谷断層帯の座標を csv ファ イルに入力し、QGIS からそれを読み込み深谷断層帯を QGIS 上に作成する. なお, 深谷断層帯は深谷断層とそ の副次的な断層により構成されるが、QGIS 上に作成す る断層は各地点から最短距離を取りうる断層である深谷 断層と平井断層とする. 深谷断層は南西方向に 45°傾い ていることを考慮し、各メッシュの断層最短距離の算出 を QGIS 上の Python コンソールを用いて行う. 深谷市建 築物耐震改修計画13をもとに、深谷断層のモーメントマ グニチュードを 7.1, 震源深さを 12.7km, 平井断層のモー メントマグニチュードを 6.8, 震源深さを 20.0km とする. 各値を用いて、深谷断層、平井断層の想定地震における それぞれの PGA 分布を QGIS 上のラスタ計算機を用いて 計算する. 本研究では安全側に孤立リスクの算出を行う ため、各メッシュで深谷断層の想定地震における PGA と平井断層の想定地震における PGA を比較し、値が大 きい方をその地点の深谷断層帯の想定地震における PGA とする、対象地域内の全ての地点で比較を行い、 作成した深谷断層帯の想定地震における PGA 分布を図-6 に示す. 道路部での PGA 分布最大値は 468.5gal, 平均 値は351.2galとなった.



図-7 想定地震における斜面崩壊確率



図-8 道路部の想定地震における斜面崩壊確率

(5) 想定地震における斜面崩壊確率

図-6の PGA 分布を用いて求めた想定地震における斜 面崩壊確率を図-7に示す.山間部の斜面勾配が大きい部 分では斜面崩壊確率が高く, 平坦な幹線道路部分では斜 面崩壊確率が低いという結果になった. また, 道路が含 まれるメッシュに限定した想定地震における斜面崩壊確 率を図-8に示す. 道路を含むメッシュの斜面崩壊確率を 全て表示すると図-8において情報の判別が困難であるた め、斜面崩壊確率が0.01未満の地点は非表示にした.道 路部での斜面崩壊確率の最大値は 0.430, 平均値は 0.010 となった.

(6) 想定地震における斜面崩壊のみに伴う道路閉塞確 率

求めた想定地震における斜面崩壊に伴う道路閉塞確率 (リンクの破壊確率)を図-9に示す.道路閉塞確率の最大 値は 1.000, 平均値は 0.325 であった. 1 メッシュ当たり の斜面崩壊確率毎の道路閉塞確率と道路長の関係を図-10 に示す.本研究の手法では,道路の一部の斜面が崩 壊すると、その道路は通行不可となることから、道路長 が長いほど道路閉塞確率は高くなる傾向にある. そのた め、南北に位置する山間部の長い道路部では道路閉塞確 率が高く、対して、多野郡の中心部を通る平坦な幹線道 路部では道路閉塞確率が低いという計算結果になった.



想定地震における斜面崩壊のみに伴う道路閉塞確率 図-9



図-10 1メッシュ当たりの斜面崩壊確率毎の道路閉塞確率と 道路長の関係



(7) 想定地震における橋梁の損傷による通行不可確率

対象地域における橋梁構造物の数は179である。想定 地震における橋梁の損傷による通行不可確率を図-11 に 示す.橋梁の通行不可確率の最大値は 0.339, 平均値は 0.230 であった. 橋梁の通行不可確率はその地点の PGA 分布が大きくなるにつれ増加するため、深谷断層帯から 近い橋梁ほど閉塞確率が高くなるという計算結果になっ た.



図-12 想定地震における橋梁の損傷のみに伴う道路閉塞確率



図-13 想定地震における斜面崩壊と橋梁の損傷の両者を考慮 した道路閉塞確率

(8) 想定地震における橋梁の損傷のみに伴う道路閉塞 確率

想定地震における橋梁の損傷に伴う道路閉塞確率(リ ンクの破壊確率)を図-12 に示す.道路閉塞確率の最大値 は 0.805,橋梁構造物が存在するリンクの平均値は 0.284, すべてのリンクにおける平均値は 0.084 であった.橋梁 構造物が多く存在するリンクはそれに伴い閉塞確率が増 加するという計算結果となった.

(9) 想定地震における斜面崩壊と橋梁の損傷の両者を 考慮した道路閉塞確率

想定地震における斜面崩壊に伴う道路閉塞と橋梁の損 傷に伴う道路閉塞のいずれも考慮した想定地震における 道路閉塞確率を算出し図-13 に示す.道路閉塞確率の最 大値は1.000,平均値は0.377であった.

(10) 想定地震における孤立リスク(道路ネットワークの 非連結確率)

a) 想定地震における斜面崩壊のみに伴う孤立リスク

図-9の想定地震における斜面崩壊のみに伴う道路閉塞 確率を用いて、各ノードのネットワークの非連結確率を 求め、計算結果を図-14 に示す.各ノードのネットワー クの非連結確率の平均値は0.825、最大値は1.000であっ た.接続ノードの周辺では道路ネットワークの非連結確 率が低いノードが存在するが、対象地域内の9割以上の ノードでネットワークの非連結確率が0.6以上であった.



図-14 想定地震における斜面崩壊のみに伴う孤立リスク



図-15 想定地震における橋梁の損傷のみに伴う孤立リスク



図-16 想定地震における斜面崩壊と橋梁の損傷の両者を考慮 した孤立リスク

b) 想定地震における橋梁の損傷のみに伴う孤立リスク

図-12 の想定地震における橋梁の損傷のみに伴う道路 閉塞確率を用いて、各ノードのネットワークの非連結確 率を求め、計算結果を図-15 に示す.各ノードのネット ワークの非連結確率の平均値は 0.058、最大値は 0.810 で あった.ネットワークの非連結確率が 0.1 を超えたノード はおよそ 2割であった.

c) 想定地震における斜面崩壊と橋梁の損傷の両者を考 慮した孤立リスク

図-13 の想定地震における斜面崩壊と橋梁の損傷の両 者を考慮した道路閉塞確率を用いて、各ノードのネット ワークの非連結確率を求め、計算結果を図-16 に示す. 各ノードのネットワークの非連結確率の平均値は 0.885, 最大値は 1.000 であった、





4. 令和元年東日本台風の被害との比較

本研究における計算結果と他災害の関連性の有無を検 討するために、令和元年東日本台風の被害との比較を行 う.本研究における地震時の斜面崩壊確率は、斜面勾配 と PGA 分布より求められる. PGA 毎の斜面勾配と斜面 崩壊確率の関係を示した図-17 と、斜面勾配毎の PGA と 斜面崩壊確率の関係を示した図-18 を比較すると、地震 時の斜面崩壊確率は PGA よりも斜面勾配による影響が 大きいことがわかる.また、降雨時の斜面崩壊も同じく 斜面勾配の影響を受ける.そこで、断層最短距離に影響 される PGA 分布を一定として地震時の斜面崩壊確率を 計算することにより、令和元年東日本台風の被害との比 較を試みる.

(1) PGA 分布の設定

令和元年東日本台風は近年稀に見る大型の台風であり, 非常に激しい大雨,暴風を引き起こした.全国では 118 名の死亡事故が発生しており,群馬県内でも4名の死亡 事故が発生している¹⁴⁾.群馬県県土整備部が作成した 『令和元年 洪水記録』¹⁵によると,令和元年東日本台 風における神流町万場観測所の時間最大雨量は42.0mm/h である.令和元年東日本台風における神流町の災害調査 図¹⁹によると,複数の地点で斜面崩壊による道路閉塞が 発生した.このように,令和元年東日本台風における降



図-19 PGA を 600gal と一定にした場合の斜面崩壊確率



雨は対象地域においても非常に強いものである.また,本研究で算出した多野郡全体での想定地震における PGA分布の最大値はおよそ 600gal であった.令和元年東 日本台風の非常に強い降雨による被害と地震による被害 の比較を行うには、一定とする PGA 分布の値をあらか じめ高く設定する必要がある.そこで、PGA 分布を想 定地震における対象地域における最大値の 600gal と一定 にして、令和元年東日本台風の被害との比較を行う.

(2) PGA を一定とした場合の斜面崩壊確率

PGA 分布を 600gal と一定にして求めた対象地域全域に おける斜面崩壊確率の計算結果を図-19,道路が含まれ るメッシュに限定した斜面崩壊確率の計算結果を図-20 に示す.それぞれを図-7,図-8 と比較して,全体的に斜 面崩壊確率が高くなっていることが読み取れる.また, 神流町の道路部で斜面崩壊確率が高い(上位5%)地点を, 図-21 に示す.令和元年東日本台風において斜面崩壊が 発生した箇所は詳細な座標情報が無い等の理由から定量 的な比較は行えなかったが,図-21 に青色の丸で示した 部分について,神流町の災害調査図において斜面崩壊が 発生した箇所との一致が見られた.



図-21 道路部において斜面崩壊確率が高い箇所

(3) PGA を一定にした場合の斜面崩壊に伴う道路閉塞 確率

図-19の斜面崩壊確率を用いて計算した道路閉塞確率を図-22に示す。令和元年東日本台風の際に豪雨が原因の斜面崩壊により通行不可となった道路は19本あり、そのうち図-22において道路閉塞確率が0.8以上である道路は14本であった。

5. おわりに

本研究では群馬県の南西に位置する多野郡を対象とし, 深谷断層帯の想定地震における孤立リスクを評価した. 評価に用いたデータは,対象地域の道路ネットワーク, 標高データ,想定地震における PGA 分布,道路上の橋 梁の地点と数である.評価の結果,多野郡が全体的に孤 立リスクの高い地域であることが判明した.孤立リスク の高くなった原因としては,多野郡の道路ネットワーク のリンクの長さであると考える.本研究の手法では,長 い道路ほど道路閉塞確率が高くなるという計算結果を示 す.小野,日比の既往研究で用いた山古志村,南阿蘇村 の各道路ネットワークのリンクの長さ平均値はそれぞれ 376m,233m であった.それに対し,多野郡の道路ネッ トワークのリンクの長さ平均値は 969m である.そのた め,多野郡の孤立リスクが高いという結果になったと考 える.

また、本研究では小野・本郷が提案した地震時の斜面 崩壊に伴う道路閉塞に加え、橋梁の損傷に伴う道路閉塞 を考慮したうえで多野郡の孤立リスクの評価を行った. 斜面崩壊のみを考慮した道路閉塞確率の平均値は 0.325、 道路ネットワークの非連結確率の平均値は 0.825 であっ た.それに対し、斜面崩壊と橋梁の損傷を考慮した道路 閉塞確率の平均値は 0.377、道路ネットワークの非連結 確率は 0.855 であった.いずれも斜面崩壊のみを考慮し た値より 0.05~0.06 ほど増加しており、孤立リスクの評



図-22 PGA を 600gal と一定にした場合の斜面崩壊に伴う道路 閉塞確率

価において橋梁の損傷による道路閉塞を考慮する価値は あると考える.

さらに、断層最短距離に影響される PGA 分布を一定 として斜面崩壊確率と道路閉塞確率を計算し、令和元年 東日本台風における神流町の被害との関連の有無の検討 を試みた.その結果、斜面崩壊確率、道路閉塞確率、共 に両者の一致性が見られた.これは、地震による斜面崩 壊と降雨による斜面崩壊がどちらも斜面勾配の影響を受 けるためであると考える.

今後の課題として、本研究では平成 17 年に内閣府に より実施された「中山間地等の集落散在地域における孤 立集落発生孤立集落発生の可能性に関する状況調査」に おける孤立の定義を用いた.しかしながら、実際の災害 時では避難所や公共施設などのアクセスが可能かどうか ということも重要視される.そこで、災害時における重 要構造物を対象とした道路ネットワークの非連結確率を 算出し、孤立リスクが高い地域における対策方法の考案 などが今後の課題として挙げられる.

謝辞:本研究では OpenStreetMap の道路ネットワークデ ータ,国土地理院の基盤地図情報数値標高モデルを使用 させていただきました.また,本研究は令和2年度高専 -長岡技術科学大学共同研究助成のご支援の下,遂行さ せていただきました.ここに感謝の意を表します.

付録 地震時の孤立リスクの算出方法

(1) GIS データの取得

a) 道路ネットワークデータの取得

対象地域の道路ネットワークを OpenStreetMap よりダ ウンロードする. OpenStreetMap はオープンデータの地理 情報を作成することを目的としたプロジェクトである. OpenStreetMap のウェブサイトでは XML 形式でデータが 提供されている. そこで, GIS ソフトウェアでの取り扱 いが容易な Shapefile 形式としてダウンロードするために, 道路ネットワークのダウンロードにはプログラミング言 語 Python のパッケージである OSMnx^{I7}を用いる. OSMnx を用いることで,指定した地域の道路データを OpenStreetMap からダウンロードし,グラフ化(ノードと リンクから構成されるネットワークに変換)した上で Shapefile として保存できる. OpenStreetMap では道路を識 別するタグが設定されている.本研究では道路ネットワ ークを車両が通行可能なものに限定するために,

OpenStreetMap から OSMnx を用いてデータをダウンロー ドする際,指定する network_type を drive とした. OSMnx で network_type を drive と指定すると,歩行者専用道路や 二輪車専用道路といった車両が通行できない道路が除外 された道路ネットワークがダウンロードされる.

b) 標高データの取得

対象地域の斜面勾配を算出するために、標高データが 必要となる.国土交通省国土地理院の基盤地図情報サイ トから、基盤地図情報数値標高モデルの10mメッシュの データをダウンロードして利用する.このデータのフォ ーマットはJPGIS(GML)形式である.そこで、GISソフト ウェアでの取り扱いが容易な GeoTIFF 形式に変換するた めに、株式会社エコリス¹⁸⁾の「基盤地図情報 標高 DEM データ変換ツール」を用いる.

(2) 想定地震における PGA 分布の算出

対象地域の地震時斜面崩壊確率を算出するために、地 震動の PGA 分布が必要となる.小野・日比の研究では 米国地質研究所の ShakeMap Atras¹⁹のデータを用いて実在 の地震における PGA 分布を使用した.本研究では司・ 翠川の距離減衰式より、深谷断層帯の想定地震動におけ る PGA 分布を算出して使用する.

 $log_{10} PGA = 0.50M_w + 0.0043D + 0.61$ $-log_{10}(X + 0.0055 \times 10^{0.50M_w}) - 0.003X$ (1)

ここに,

Mw:モーメントマグニチュード
 D:震源深さ(km)
 X:各地点の断層からの最短距離(km)
 である。

(3) 想定地震における斜面崩壊確率の算出

対象地域の地震時斜面崩壊確率を酒井らの評価式を用いて10m×10mの大きさのメッシュで求める.

$$p = \frac{1}{1 + \exp\{-(-7.89 + 0.09\phi + 0.0019\alpha)\}}$$
(2)

ここに,

φ:斜面勾配(°)

 $\alpha:\text{PGA}$

である。斜面勾配は前述した基盤地図情報数値標高モデルから QGIS 上での地形解析プラグインにより求める. その後, QGIS 上のラスタ計算機により(2)式に斜面勾配 と PGA を代入し各メッシュの地震時の斜面崩壊確率を 求める. なお,式(2)では斜面勾配が極端に小さな場合 でも,確率は小さいものの斜面崩壊が起こりうるという 不自然な結果となる.そこで,Jibson²⁰らを参考に斜面 勾配が 10°未満の場合の斜面崩壊確率はゼロとする.

(4) 想定地震における斜面崩壊に伴う道路閉塞確率の 算出(リンクの破壊確率)

斜面崩壊により道路ネットワークのリンクが破壊される確率を求める. リンクの破壊確率は、そのリンクが 通過するすべてのメッシュの斜面崩壊確率の値を用いる. あるリンクjが通過するメッシュをi(i = 1, ... M), その 斜面崩壊確率を p_{f1}^i とすると、リンクの破壊確率は式(3) で求められる.

$$q_{f1}^{i} = 1 - \Pi_{i=1}^{M} \left(1 - p_{f1}^{i} \right) \tag{3}$$

リンクの破壊確率の計算は、ラスタデータとベクタデー タを組み合わせた処理が必要となる.本研究では各リン クに分類のための番号を割り振りラスタ化した後、プロ グラミング言語 Pythonによりリンクが存在するメッシュ の斜面崩壊確率を式(3)に代入してリンクの破壊確率の 計算を行う.

(5) 想定地震における橋梁の損傷による通行不可確率 の算出

橋梁の損傷による通行不可確率の算出には、橋梁構造 物の位置を QGIS に打ち込む必要がある. OpenStreetMap では、そのリンクに橋梁構造物が存在する場合には bridge のタグが Yes と設定される. そこで、bridge のタグ が Yes と設定されているリンクにおいて、goo 地図²⁰上 で橋梁構造物が示されている位置に QGIS 上でノードの 生成を行う.

次に、喜納らの橋梁構造物のフラジリティ曲線(図-23) を用いて、橋梁構造物の位置をプロットした地点の PGAより QGIS 上のフィールド計算機により地震時の橋 梁の損傷による通行不可確率を算出する.なお、図-23 において無被害、小破(小規模な変形)は通行可能、中破、 大破(過大な変形、落橋)は通行不可となる.



(6) 想定地震における橋梁の損傷に伴う道路閉塞確率 の算出(リンクの破壊確率)

橋梁の損傷による通行不可により道路ネットワークの リンクが破壊される確率を求める. 斜面崩壊に伴う道路 閉塞確率と同様に,あるリンク*j*上に存在する橋梁構造 物をi(i = 1, ...M), その通行不可確率を p_{f2}^i とすると, リンクの破壊確率は式(4)で求められる.

$$q_{f2}^{i} = 1 - \prod_{i=1}^{M} \left(1 - p_{f2}^{i} \right) \tag{4}$$

橋梁構造物が存在するリンクのみを対象とし,橋梁の通 行不可確率を代入しリンクの破壊確率を算出する.橋梁 構造物が存在しないリンクの道路閉塞確率は0とする.

(7) 想定地震における斜面崩壊と橋梁の損傷の両者を 考慮した地道路閉塞確率の算出

橋梁の損傷に伴う道路閉塞と、斜面崩壊に伴う道路 閉塞のいずれも考慮した道路閉塞確率(リンクの破壊確 率)を求める.斜面崩壊に伴う道路閉塞確率を $q_{f_1}^i$,橋 梁の損傷に伴う道路閉塞確率を $q_{f_2}^i$ とすると、両者を考 慮した地震時の道路閉塞確率は式(5)で求められる.

$$q_f = 1 - \left(1 - q_{f1}^i\right) \times \left(1 - q_{f2}^i\right) \tag{5}$$

式(5)に斜面崩壊に伴う道路閉塞確率と橋梁の損傷に伴う道路閉塞確率を代入し,QGIS上のフィールド計算機により地震時の道路閉塞確率を算出する.

(8) 想定地震における孤立リスク(道路ネットワークの 非連結確率)の算出

各ノードから対象地域外へ至る経路が存在しない確率 を道路ネットワークの非連結確率と定義する.

道路ネットワークに対して、各ノードの道路ネットワ ークの非連結確率をモンテカルロ法²⁰により求める.用 いるリンクの破壊確率は、斜面崩壊のみを考慮した値、 橋梁の損傷のみを考慮した値、両者を考慮した値の3つ でそれぞれ計算を行う.具体的な計算方法を以下に示す. ① ネットワークの Shapefile を読み込む.

- ネットワークの始点と終点となるノードを指定する.
- ③ モンテカルロ法の試行回数Nを設定する.
- ④ 連結したネットワークを数えるための変数 kを0と する.
- ⑤ 全てのノードとリンクに[0,1]の一様乱数 r^i を発生さ せ、 $r^i \ll p_f^i$ であればそのノードまたはリンクをネ ットワークから削除する.ここで、 p_f^i はノードま たはリンクiの破壊確率である.
- ⑥ 始点と終点について最短経路探索を行い,経路が 存在した場合にはk ← k + 1とする.
- ⑦ ⑤と⑥をN回繰り返し、与えられたネットワーク の非連結確率 $P_f \approx P_f = 1 - k/N$ と求める.

モンテカルロ法の試行回数は、小野・本郷が十分な試行 回数として定めている 3000 回として計算を行う. 最短 経路探索には、Python のパッケージである NetworkX²³の 関数 has_path を用いる. NetworkX では有向グラフ, 無向 グラフのいずれも取り扱うことができるが、本研究では 道路ネットワークを無向グラフとして扱う. また、本研 究では、対象地域の内部と外部の境界に位置するノード を接続ノードと定義する. 対象地域から対象地域外へ出 るためには、いずれかの接続ノードを通過する必要があ る. 対象地域において、接続ノードは複数設けることが できるものとする.

参考文献

政府 web ページ 『地震調査研究推進本部ホームページ』:

https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_katsudanso/f031_fukaya-ayasegawa/(2020年10月8日閲覧)

- 小野祐輔,本郷峻介:地震時の斜面崩壊確率に基づく中 山間地の孤立可能性の定量化の試み,地震工学論文集, 第37巻, Vol.87, No.4, pp.I 313-I 319, 2018.
- 3) 小野祐輔,日比慧慎: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,日本地震工学会論文 集,第19巻,第6号,pp232-243,2019.
- 笛木考哲, 庄司学:高架道路橋の地震時機能損失評価, 構造工学論文集, vol55A, pp449-459, 2009.
- 5) 大峯秀人,吉川弘道,矢代晴実,大滝健:リスクファイ ナンスのための線状施設の地震リスク評価,土木学会論 文集 F6(安全問題), Vol.67, No.1, pp.1426, 2011.
- 内閣府 webページ『地方都市等における地震防災対策』:

http://www.bousai.go.jp/jishin/chihou/chihoutoshi_top.html(2020年 12月 20日閲覧)

8) OpenStreetMap: https://www.openstreetmap.org/(2020年8月21 日閲覧)

9) 国土交通省国土地理院基盤地図情報サイト:

https://www.gsi.go.jp/kiban/(2020年9月2日閲覧)

- 10) 司宏俊, 翠川三郎:断層タイプおよび地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式,日本建築学会構造系論文集,第523号,63-70,1999.
- 酒井久和,奥村誠,塩飽拓司,香川敬生,長谷川浩一, 澤田純男,多々納裕一:地震時における斜面の簡易信頼 性評価法に関する基礎的研究,土木学会論文集 A1(構 造・地震工学), Vol.69, No.4, pp.I_142-I_147, 2013.
- 12) QGIS: https://qgis.org/en/site/index.html (2021年5月22日閲覧)
- 深谷市建築物耐震改修促進計画: http://www.city.fukaya.saitama.jp/shisei/keikakushisakuchosa/sisetukanri/1391400461151.html (2020年10月12日閲 覧)
- 14) 総務省消防庁 令和元年/平成 31 年 災害情報一覧: https://www.fdma.go.jp/disaster/info/2019/ (2021 年 2 月 8 日閲 覧)
- 群馬県 洪水記録: https://www.pref.gunma.jp/06/h4000060.html (2021 年 2 月 8 日閲覧)
- 神流町オフィシャルサイト: http://www.town.kanna.gunma.jp/ (2021年1月8日閲覧)

- Boeing, G.: OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks, Computers, Environment and Urban Systems, Vol.65, pp.126-139, 2017.
- エコリス 基盤地図情報標高 DEM データ変換ツール: https://www.ecoris.co.jp/contents/demtool.html(2020 年 9 月 2 日閲 覧)
- UGGS ShakeMap: https://earthquake.usgs.gov/data/shakemap/(2020 年12月20日閲覧)
- Jibson, R. W., Harp, E. L. and Michael, J. A.: A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps, Engineering Geology, Vol.58, pp.271-289, 2000.
- 21) Goo 地図: https://map.goo.ne.jp/(2021年6月18日閲覧)
- 22) 田村重四郎,川上英二:モンテカルロ法による地中埋設 管システムの耐震性の評価方法,土木学会論文報告集, No.311,pp.37-48,1981.
- 23) NetworkX: https://networkx.org/(2020年12月11日閲覧)

(Received ? ?,?) (Accepted ? ?,?)

EVALUATION OF ISOLATION RISK IN TANO COUNTRY, GUNMA PREFECTURE CONSIDERING ROAD CLOSURE DUE TO SLOPE FAILURE AND BRIDGE DAMAGE CAUSED BY SCENARIO EARTHQUAKE

Keiya SATOH, Kazuma Inoue, Yoshinobu WATANABE, Keita SAITOH and Takaaki IKEDA

Gunma Prefecture has many mountainous regions and there is an active fault called Fukaya Fault Zone in the south. The slope failure caused by heavy rainfall led to road closure and isolation in Kanna Town during Typhoon No. 19 in 2019. Regional isolation is likely to recur due to road closure due to slope failure caused by strong earthquake as well. In addition, road closure due to bridge damage caused by earthquake is also considered as a cause of isolation. This research will evaluate the risk of isolation caused by scenario earthquake in Tano Country, including Kanna Town, by considering road closure due to slope failure and bridge damage. As result, it was confirmed that the risk of isolation in Tano Country is very high. In addition, the probability of slope failure and road closure due to slope failure caused by earthquake showed the same trend as the damage caused by Typhoon No. 19 in 2019.