中山間地の地震時孤立リスク低減のための重要道路区間の抽出法

日比 慧慎[1]・小野 祐輔[2]

[1]学生員　鳥取大学大学院　持続性社会創生科学研究科工学専攻
（〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101）
E-mail: m18j6028c@edu.tottori-u.ac.jp

[2]正会員　鳥取大学　工学部社会システム土木系学科
（〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101）
E-mail: ysk@tottori-u.ac.jp

中山間地において地震時の斜面崩壊により引き起こされる道路閉塞で集落の孤立が発生することがある．本研究では，このような集落の孤立リスクを低減するための対策を行う際に，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を通じて示した．

Key Words: *Isolation risk, road closure, mountainous region, critical degree*

1. はじめに

地震時の土砂災害により道路ネットワークが寸断され発生する孤立現象に対し，減災対策を実施することは重要である．内閣府[1]によると，孤立する可能性がある集落は全国で約 1 万 7 千集落となっており，これらすべての集落に対し，防災対策を実施することは難しい．そこで孤立リスクを定量的に評価し，優先度を決定することが望まれる．また，集落の孤立に及ぼす影響度の大きな道路区間を抽出することが出来れば，その区間を補強することでより効率的に孤立リスクを抑えることが可能となる．

本研究では，既往の研究[2,3]を活用し，集落の孤立リスクを低減する際に，優先的に対策が行われるべき道路区間の抽出を行う手法について検討した．

2. リンクのクリティカル度

(1) 道路ネットワークのモデル化と孤立の定義

本研究では，既往の研究[2,3]と同様に対象とする道路網をノードとリンクで構成されるグラフとして扱う．すべてのノードとリンクについて，地震時の斜面崩壊による閉塞確率を算定する．対象地域の道路ネットワークの情報として利用できるもの複数考えられるが，本研究では OpenStreetMap[4]を利用する．

本研究において，対象地域内のあるノードから，地域内に一箇所設けた防災対応拠点まで到達する経路が存在しない場合，そのノードは孤立していると定義する．

(2) ノードとリンクの閉塞確率の評価

地震時に道路ネットワークを構成するノードとリンクが閉塞する確率は，それらが存在する地点の斜面の崩壊確率を利用して求める．斜面の崩壊確率 p は酒井ら[5]に従い次式で求める．

$$\mathrm{p} = \frac{1}{1+\exp(7.89-0.09\phi+0.0019\mathrm{a})} \tag{1}$$

ここで，ϕ は斜面勾配（°），a は地表面最大加速度（cm/s/s）である．斜面勾配 ϕ は数値標高モデル（DEM）から求める．地表面最大加速度 a は対象地域の想定地震の評価結果等を利用して設定する．

(3) リンクのクリティカル度の定義と求め方

本研究では，あるリンクが閉塞した際に孤立する人口にそのリンクの閉塞確率を掛け合わせた値をリンクのクリティカル度 C_R と定義する．リンクのクリティカル度 C_R は，次の手順で求める．

1) ある一つのリンクに着目し，元の道路ネットワークからそのリンクを削除したサブネットワークを作成

する．

2) サブネットワークにおいて，すべてのノードから防災拠点までの経路の有無を調べる．すなわち，着目したリンクを削除することで孤立するノードを抽出する．
3) 着目したリンクが閉塞した際に孤立する人口 N^{iso} を，孤立したノードに割当てた人口の総和として求める．
4) 孤立する人口 N^{iso} に着目したリンクの閉塞確率を乗じ，そのリンクのクリティカル度 C_R とする．
5) 1 から 4 の手順をすべてのリンクに対して繰り返す．

このように求めたクリティカル度 C_R^p の値が大きなリンクを選択することで，閉塞する確率が高く，かつ閉塞した際の影響が大きな道路区間を抽出することができる．

3. ケーススタディ

(1) 対象地域

ここでは，鳥取県智頭町を対象としてリンクのクリティカル度 C_R を求めた事例を示し，その有用性を確認する．鳥取県智頭町は，鳥取県の南東部の中山間地域に位置しており，地震時の斜面崩壊による道路閉塞により集落の孤立が発生することが危惧されている．**図-1**に OpenStreetMap を利用して智頭町の道路ネットワークをノードとリンクによりグラフ化したものを示す．智頭町内の道路の総延長距離はおよそ354㎞である．図中に示した通り，このネットワークは1131個のノードと1381個のリンクで構成されている．ノードはリンクが交差する部分に設けた．ただし，図上ではリンクが交差していても，立体交差等で相互に直接行き来できない場合にはノードは設けらていない．孤立を判断するための防災対策拠点として役場を設定した．また，道路ネットワークは，智頭町内で閉じたものとして扱う．当然，現実には一旦町外に出た後に再び町内に戻る経路が存在するが，範囲を限定する必要があることから，このような仮定を設けた．当然，複数の市町村にまたがる道路ネットワークを分析の対象とすることは可能である．

(2) リンクの閉塞による孤立人口

リンクのクリティカル度 C_R を求めるためには，まずそのリンクが閉塞した際の孤立人口 N^{iso} を求める．そのためには，各ノードに人口を割り当てる必要がある．ここでは，2015 年の国勢調査[6]のデータを基づき，簡易的に設定した．GIS での取り扱い用にベクタ化された国勢調査のデータでは，地区ポリゴン毎に人口が与えられている．地区ポリゴンに含まれるノードをそれぞれ抽出し，その地区の人口を抽出されたノードに均等に割り振った．

孤立人口 N^{iso} を求めた結果を**図-2** に示す．図中，孤立人口 N^{iso} が三番目まで大きなリンクにその数字を示した．これらのリンクは，図中央のやや右寄りに集中している．一つのリンクの閉塞により孤立する人口は最大で 443 人である．また， 図左側にも孤立人口 N^{iso} が大きな値となるリンクが存在している．これらのリンクは，町中央部から境界部へ放射状に伸びる区間で，かつ代替経路が存在しないことが確認できる．

図-1 鳥取県智頭町の道路ネットワーク

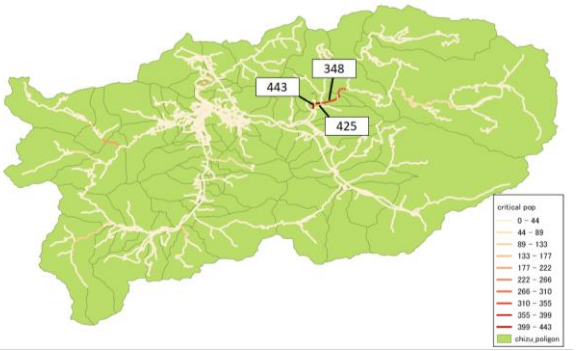

図-2 リンクの閉塞によって生じる孤立者数

孤立人口 N^{iso} が大きなリンクは，対象とした地域におけるネットワークの構造的な弱点となっており，災害の種類を問わず，災害時の孤立の発生を抑制するために何らかの対策が必要となる区間とみなせる．

(3) リンクのクリティカル度

前項で求めたリンク別の孤立人口 N^{iso} に閉塞確率を乗じることで，そのリンクのクリティカル度 C_R^p を求めた結果を示す．

まず，リンクの閉塞確率を求める．このとき必要な数値標高モデルは，国土地理院の 10m メッシュのもの[7]を用いた．最大値表面加速度は，簡単のため対象地域内で一律に 400 cm/s/s とした．最大値表面加速度の分布は，震源断層からの距離やサイト増幅特性の影響を受けるものであり，本来は地点ごとに評価すべきものである．あるいは，対象地域において想定地震としてすでに示されたものがあればそれを利用できる．しかしながら，中山間地では平野部に比べて地震動のサイト増幅が小さいこ

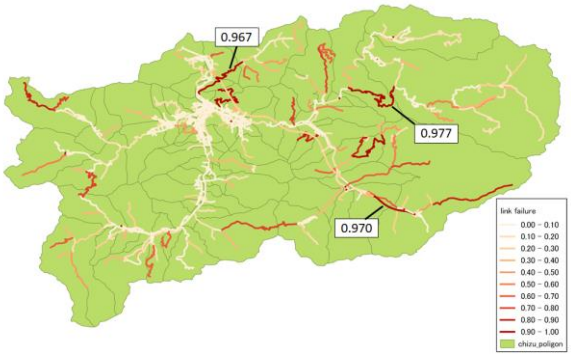

図-3 リンクの閉塞確率

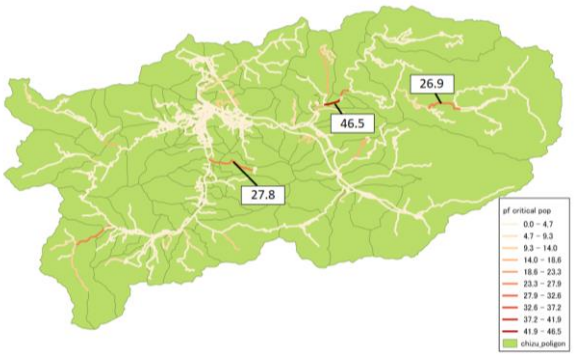

図-4 リンクのクリティカル度

と，距離減衰による地震動の評価はばらつきが大きいことを考えると，対象地域内で一律の地表面最大加速度を仮定し，集落の孤立を分析することには合理性があると思われる．

以上のデータセットと条件設定により得られたリンクの閉塞確率の分布を**図-3** に示す．リンクの閉塞確率の大きなものから順に三番目までその値を図中に示した．最大値は 0.977 と極めて大きな値となっている．ここで得られた閉塞確率は，最大地表面最大加速度を一律と仮定したため，斜面勾配の大きな地点を通過するほど，あるいは距離が長くなるほど，大きな値をとる傾向がある．ただし，短いリンクであっても勾配の極めて大きな箇所を通過していれば，大きな閉塞確率を持つ．智頭町では，役場のある中心部は比較的平坦で，そこから町境界に向かって起伏の多い地形であること，周辺部では道路の交差が減り一つのリンクが長くなりがちであることから，中心部よりも周辺部でリンクの閉塞確率が大きな値を示している．

図-2 に示した孤立人口と**図-3** に示したリンクの閉塞確率を掛け合わせることで，リンクのクリティカル度 C_R が得られる．その結果を**図-4** に示す．**図-2**，**図-3** と同様に，大きなものから三番目までその値を図中に示した．この図によって，地震時の斜面崩壊によって閉塞が起こる可能性が高く，かつ閉塞が生じた際に孤立する人口が大きなリンクが選択的に示されている．すなわち，

表-1 補強戦略による孤立総人口の期待値の比較

補強戦略	孤立総人口の期待値	補強区間の総距離
なし	1153.31 人	0
①	1001.82 人	17.72 km
②	986.96 人	17.72 km

対象地域内の孤立対策を進める上で重要な道路区間が抽出できたことになる．

リンクのクリティカル度は，対象地域内の孤立対策を考える上でリンクの相対的な重要度を与える指標である．そのため，現段階において，絶対値の持つ意味についての議論は行わない．

(4) リンクのクリティカル度に基づく補強戦略の設定と効果検証

前項において，孤立リスクを低減するために重要なリンクが抽出できたため，この情報を活用した補強戦略を検討することができる．ここでは，次の 2 つの補強戦略を考えた．

補強戦略①：閉塞確率の大きなリンクから順に，地域内の道路総延長の 5%まで補強を行う．

補強戦略②：クリティカル度の大きなリンクから順に，地域内の道路総延長の 5%まで補強を行う．

なお，補強を行ったリンクの閉塞確率はゼロとみなした．この他，単位長さあたりの補強コストを設定し，総コストで制限するなどの戦略も考えられる．

補強の効果の検証は，智頭町における孤立総人口の期待によって行う．まず，小野・本郷 [2]に従い各ノードの孤立確率を求めた．さらに，各ノードについて，孤立確率にそのノードに割当てられた人口を乗じ，孤立人口の期待値を求めた．さらに，すべてのノードの孤立人口の期待値を足し合わせることで，孤立総人口の期待値を求めた．

補強戦略による孤立総人口の期待値を比較したものを**表-1** に示す．参考のため，補強を行った区間の総距離も併せて示している．補強を行わない状態での孤立総人口の期待値は 1153.31 人と，分析に用いた総人口 7032 人の 16.4%であるのに対し，補強戦略①では 1001.82 人（総人口の 14.2%），補強戦略②では 986.96 人（総人口の 14.0%）であり，いずれも補強の効果により孤立総人口が低減できている．補強戦略①と②では，いずれも補強を行った道路延長はほぼ等しいにも関わらず，補強戦略②の方がより孤立総人口を抑制している．この結果は，本研究で提示したリンクのクリティカル度を用いることで，有効な補強戦略の立案が可能となることを示している．

４．結論

本研究では，中山間地において地震時の斜面崩壊に起因する道路閉塞により孤立集落が発生することを背景として，道路ネットワークを構成する各リンクが孤立に与える影響の大小を比較するための指標として，リンクのクリティカル度を定義した．リンクのクリティカル度は，リンクの閉塞確率とそのリンクが閉塞した際に孤立する人口を掛け合わせた値であり，容易に算出できるものである．ケーススタディとして，鳥取県智頭町の道路ネットワークにおけるリンクのクリティカル度を求めた．さらに，リンクのクリティカル度を活用した補強戦略を示し，リンクのクリティカル度を用いることで，効率的な孤立抑制対策が可能となることを示した．ただし，これらの分析を実施する上で必要な条件設定は十分に吟味されたものではないため，現実の防災対策にそのまま利用することはできない．

謝辞：本研究で用いた道路ネットワークのデータは OpenStreetMap から得た．数値標高モデルは国土交通省国土地理院から得た．本研究の一部は JSPS 科研費 JP17K01343 の助成を受けた．

参考文献

1) 内閣府：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，2005.
2) 小野祐輔，本郷竣介： 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，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.74，p. I_313-I_319，2018..
3) 日比慧慎，小野祐輔：道路ネットワークの非連結確率を考慮した中山間地の地震時孤立リスクの定量化，土木学会中国支部第 70 回研究発表会，2018.
4) OpenStreetMap Foundation: OpenStreetMap, http://www.OpenStreetMap.org（2019 年 9 月 9 日閲覧）
5) 酒井久和，奥村誠，塩飽拓司，香川敬生，長谷川浩一，澤田純男，多々納祐一：地震時における斜面の簡易的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.
6) 独立行政法人統計センター：統計で見る日本，https://www.e-stat.go.jp（2019 年 9 月 9 日閲覧）
7) 国土交通省国土地理院：基盤地図情報サイト，http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html（2019 年 9 月 9 日閲覧）

Extraction method of important road sections to reduce isolation risk during earthquake in mountainous region

Keishin HIBI, Yusuke ONO

Isolation of small hamlets may occur in mountainous regions due to road blockage induced by slope failure during an earthquake. In this study, we developed a method to systematically extract the road sections that should be prioritized when taking measures to reduce the isolation risk of hamlets. The road network is modeled as a graph consists of nodes and links, and the critical degree of each link is calculated. The critical degree was defined as a value obtained by multiplying the population isolated when the link was blocked by its probability of closure. Through case studies, it was shown that the isolation risk of hamlets could be effectively reduced by preferentially reinforcing links with a high value of the critical degree.