

災害危険箇所に基づく拠点施設間の道路の 災害リスク評価に関する研究

大澤 脩司¹・高山 純一²・藤生 慎³・塩崎 由人⁴

¹学生会員 金沢大学 大学院自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: osawa-ed904@stu.kanazawa-u.ac.jp

²フェロー 金沢大学教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: takayama@se.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 金沢大学准教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: fujiu@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 金沢大学特任助教 大学院自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: yuto@se.kanazawa-u.ac.jp

近年の自然災害における道路被害を踏まえて、多様な道路被害を考慮した道路ネットワーク評価手法の必要性が指摘されている。このような背景のもとで提案された大澤ら(2018)の手法に対し、本研究では全体の災害危険箇所を大きく低減できるようなリンクを対策上の注目リンクとみなす評価指標を新たに構築した。石川県の緊張輸送道路ネットワークを対象としたケーススタディを行い、提案指標の妥当性を確認するとともに、リンクの対策注目度の考え方によって対策候補となるリンクの構成が大きく変化する可能性があることを確認した。これより、道路防災対策に対する方針・考え方によって適切な手法選択が必要であることを指摘した。

Key Words : natural disaster, road-network, network analysis, road damage, connectivity, vulnerability

1. はじめに

避難・救助・救援・復旧・復興など、災害対応のための活動の多くは道路ネットワークを介して行われる。首都直下地震や南海トラフ地震など、今後も大規模の発生が想定されており、将来の自然災害への備えの1つとして、道路ネットワークの機能を向上させることが重要であることは論を俟たない。このためには、防災対策をすすめるための道路ネットワークの評価手法が必要不可欠である。我が国では現在、東日本大震災での教訓を踏まえて導入された「道路の防災機能の評価手法(案)」¹⁾²⁾³⁾が活用されている。しかし、道路ネットワークの評価手法にはまだ改良・改善の必要性も指摘されている。例えば、2016年熊本地震では緊急輸送道路を含む多数の重要な道路で通行止めが発生したことを受け、防災対策検討のための道路ネットワークの評価手法の深度化の必要性が指摘された⁴⁾。また、近年の自然災害での被害・教訓を踏まえて「斜面災害や隣接する河川の増水、倒木などの外的要因を含めてどこに脆弱性があるのか」という道路の被災リスクを評価し、対策箇所の優先順位を検

討することが望ましいという提言も出されている⁵⁾。道路ネットワークの評価手法に関する研究はこれまでに数多く行われており、様々な考え方の手法が提案されている。対象とする道路ネットワークの形状や対策の方針、地域の実状などによって適用されるべき評価手法は異なると考えられることから、「道路ネットワークの評価手法の深度化」は様々な評価手法を対象にすすめられる必要があると言える。しかし、前述した提言⁵⁾で触れられているような道路の被災リスクの評価とそれに基づく対策箇所の検討が可能であるような評価手法はこれまでに提案されていない。このような問題意識のもと、筆者らは特に道路の被災リスクに着目した評価手法に関する研究を行ってきた⁶⁾。これら研究では、「災害危険箇所」という概念を導入することで簡便な計測手段ではあるものの、提言⁵⁾で考慮の必要性が指摘された多様な道路の被災リスクを考慮した評価を可能とし、対策検討のための基礎資料の充実化に資する評価手法を提案した。

既報⁶⁾では道路ネットワークの接続性向上を目的として、各防災拠点間で災害危険箇所が最も少ない経路に着目することで対策上の注目箇所を抽出する手法を提案し

た。具体的には、上記条件で抽出した経路が多数通過するリンクで、さらにそのリンクにある災害危険箇所が少ないほど対策上の注目度が高いと考えるものである。このような災害危険箇所1箇所あたりの対策効果が及ぶ経路数が多いようなリンクという視点は、対策上の注目度を考えるうえで有効な視点の1つである。一方で、経路上の災害危険箇所が減少するほど、災害時の接続性が向上すると期待されることを踏まえると、経路全体の総災害危険箇所を大きく減少させるようなリンクが対策上の注目度が高いと考えることもできる。そこで、本研究でこのような視点でのリンクの対策注目度指標を新たに構築する。加えて、既報⁹⁾で提案した評価指標に基づく評価結果と比較することで、道路防災対策に対する考え方や方針によって対策上の注目箇所は変化することを示す。評価手法や評価指標を適切に選択する必要があることを

本稿の構成は以下の通りである。第1章では本研究の背景と目的を整理した。第2章では道路ネットワーク評価手法に関する既往研究を整理し、本研究の位置づけを整理する。第3章では本研究の提案手法の中心的概念である災害危険箇所について解説する。第4章では災害危険箇所を用いた道路ネットワークの評価手法に関して、その枠組みおよび対応する道路防災対策上の思想について解説する。第5章で石川県の緊急輸送道路ネットワークと地域防災計画、確率論的地震動予測地図を用いたケーススタディを行い、その結果を整理する。第6章では既往手法⁹⁾と分析結果を比較・考察することでその差異について議論する。第7章では本研究のまとめと今後の課題を整理する。

2. 既往研究の整理と本研究の位置付け

まず連結信頼性評価・脆弱性評価・道路ネットワークの幾何構造に基づく評価・最適化手法等に基づく最適対策戦略に関する各研究について整理し、それらを踏まえた本研究の位置付けを示す。

(1) 連結信頼性評価に関する研究

災害発生時の道路ネットワーク評価において古くから研究されているのが連結信頼性評価であり、交通機能のサービス水準に着目して信頼性を定義した研究（例えば、若林⁷⁾、若林ら⁸⁾、朝倉ら⁹⁾とネットワークの連結性能に着目して信頼性を定義した研究（例えば、高山¹⁰⁾、廣瀬ら¹¹⁾、能島・山中¹²⁾）がある。両者の信頼性評価としての違いは、前者が交通量や旅行時間等の交通サービスの水準に着目しているのに対して、後者はリンクの切断確率（非切断確率）に着目している点にある。近年では特に後者のアプローチで、リンクの切断確率の定義方法に

着目した研究（例えば、小野・日比¹³⁾、伊藤・庄司¹⁴⁾）やリンクの切断確率と道路整備に係る何らかの評価指標（全点間連結確率や交通量・旅行時間、整備費用）に基づく整備計画・整備手法に関する研究（例えば、原田ら¹⁵⁾、安藤・喜多¹⁶⁾、松田ら¹⁷⁾）が見られる。両者は目的の異なる研究であるが、共通点として「考慮できていない被害要因をどう考慮してリンクの切断確率を定義するか、あるいはリンク信頼度をいかに設定するか」が課題に挙げられている。

(2) 脆弱性評価に関する研究

連結信頼性と類似した考え方として、道路ネットワークの脆弱性が提案されている。自然災害等の事象が生起する確率は非常に小さいが、一方でその生起確率の大小に依らず、これら事象が生じた場合の被害や影響は甚大である。Taylor et al.¹⁸⁾はリンク途絶の確率とは関係なく、ネットワークの構造上の弱点とリンク途絶で生じる影響とに密接した概念が「脆弱性」とであると定義し、途絶によって甚大な影響を生じるリンクが重要であるとした。Taylor et al.¹⁸⁾の提案した脆弱性の考え方に沿った研究では、リンク途絶による影響度合いをアクセシビリティの考え方をを用いて計測しようとしたものが多い（例えば、Lleras-Echeverri, Sánchez-Silva¹⁹⁾、Sohn²⁰⁾、Chang, Nojima²¹⁾、原田ら²²⁾）。アクセシビリティは用いていないものの、道路の防災機能の評価手法（案）^{1),2),3)}も脆弱性評価に分類される手法の1つと言える。

(3) 道路ネットワークの幾何構造に基づく評価に関する研究

倉内²³⁾は連結信頼性や脆弱性評価に関する研究には大規模ネットワークでの計算困難性や、ネットワークの詳細度や範囲次第で結果が変化するという可能性がある等の問題を指摘した。このような問題意識のもと、Network Science分野の知見を援用した研究が見られる（例えば、Bellet al.²⁴⁾、Nouzar et al.²⁵⁾、中南ら²⁶⁾、坪川ら²⁷⁾）。また、ネットワークの構造に着目した異なるアプローチでの研究として、ネットワーク中心性やグラフ理論に着目した研究もある（例えば、土屋ら²⁸⁾、竹之内ら²⁹⁾、羽深・丸山³⁰⁾）。前者ではネットワークの隣接行列を用いた固有値解析から得られるネットワークの特徴量を用いて、ネットワークの構造上の弱点箇所あるいは重要箇所の抽出を試みている。後者ではどのノードがネットワークにおける「要」であるかを評価するネットワークの中心性指標や、辺連結度やスペースシンタックス理論等のグラフ理論における知見を援用して道路ネットワークの評価へ適用している。

(4) 最適化手法等による最適対策戦略に関する研究

連結信頼性評価・脆弱性評価・幾何構造に基づく評価に関する研究はいずれも何らかの評価指標によって防災対策上の重要箇所あるいは脆弱性箇所を抽出することを目的としていた。これらと異なる視点として、ネットワークの最適な補強計画や新規整備計画等の最適な対策戦略を議論した研究も行われている。目的によって最適化の条件は異なるが、特に道路整備のみを対象とした研究に着目すると、整備費用や社会的費用等を最適化の条件として、緊急輸送道路の整備計画や橋梁の耐震化戦略を議論した研究が行われている（例えば、杉浦ら³¹⁾、長江ら³²⁾、Nagae et al.³³⁾）。また、ゲーム理論を援用した橋梁の耐震化戦略に関する研究も行われている³⁴⁾。いずれの研究でも、より実態に即した入力データや制約、パラメータの与え方を検討するということが共通の課題として挙げられている。

(5) 本研究の位置付け

道路の耐災害性評価に関する提言⁵⁾で掲げられたのは、斜面災害や隣接する河川の増水、倒木、横断構造物や隣接する建造物の耐震性の不足などの多様な道路の被災リスクを考慮した上での対策箇所の評価の必要性である。これを踏まえ、本研究は「多様な道路の被災リスクを考慮し、その被災リスクを低減することで自然災害に対する道路ネットワークの機能向上を図る」ための基礎情報を提供する評価手法を構築することを目的とする。既往研究に対する位置づけは以下の通りである。

連結信頼性評価に関する研究で用いられる信頼度の概念自体は多様な道路の被災リスクを扱うるものである。しかし、実際には既往研究の共通課題として挙げられているように、信頼度の具体的な定義方法は議論の途上にあり確立されていない。これより、信頼度とは異なる考え方で多様な道路の被災リスクを扱うことが可能な評価手法の必要性が指摘される。

脆弱性評価に関する研究では、リンク途絶の影響の大きさとして、交通機能の悪化度合いを評価することを目的としている。このような手法から得られるのは「甚大な交通機能の悪化を招く箇所」の情報である。換言すれば、「交通機能を悪化させる箇所への対策による道路ネットワークの機能向上」を対策方針とする手法であり、多様な道路の被災リスクに着目する本研究とは手法適用の目的が異なる。

幾何構造に基づく評価に関する研究では、ネットワークの特徴量から弱点箇所や重要箇所を捉えることを目的としている。このような手法から得られるのは「ネットワークの構造上の弱点箇所や重要箇所」の情報である。換言すれば「構造上の弱点箇所や重要箇所への対策による道路ネットワークの機能向上」を対策方針とする手法であり、多様な道路の被災リスクに着目する本研究とは

手法適用の目的が異なる。

最適化手法等に基づく最適対策戦略に関する研究では、道路の被災リスクを低減することを主目的とした研究は見られないものの、社会的費用など手法の枠組み自体は多様な道路の被災リスクを考慮することが可能であると考えられる。一方で、実態に即した入力データや制約、パラメータの与え方が課題であることから、連結信頼性評価に関する研究と同様、多様な道路の被災リスクを考慮するためには適用上の課題が残されていると考えられ、異なる考え方の評価手法が必要であると言える。

同様の目的に適用可能と思われる連結信頼性評価・最適化手法等に基づく最適対策戦略に関する研究の2つと本研究の違いは、災害危険箇所という概念を導入することで道路の被災リスクの計量方法を簡便化し、これら2手法で扱えなかった種類の被災リスクを考慮可能とする点にある。また、既報⁶⁾に対しては、経路全体の災害危険箇所数の低減に着目した新たな評価指標を構築し、ケーススタディによって既存の評価指標との差異を考察するものである。

3. 災害危険箇所の概念定義および設定事例

道路の耐災害性評価に関する提言⁵⁾において多様な道路の被災リスクを考慮することの必要性が指摘されたものの、道路ネットワーク評価において道路の被災リスクを考慮する試みは、斜面や橋梁等、特に主要な道路の構成要素についてしか行われてこなかった。その背景には各リスク要因による道路被害確率を精度良く推定することの困難さが挙げられる。そこで、本研究では被災リスクの計量方法を簡便化することで、扱うことができる被災リスクの種類を拡充することを提案する。このために、「災害危険箇所」という考え方を新たに提案する。具体的には、災害危険箇所を「分析者が道路被害のリスクがあると認識している箇所」と定義付ける。これは、災害危険箇所が「分析者が掲げる道路防災対策の方針次第で柔軟に定義付けられる余地を持つ概念である」ことを意味する。これより、分析者の「何をリスクとして認識するか」、「どこまでを対策の必要ありとみなすか」という道路防災に対する考えを重視した概念が災害危険箇所であると言える。また、災害危険箇所の考え方をを用いた道路ネットワークの評価指標として「災害危険箇所数」指標を提案する。これはリンクや経路上に存在する災害危険箇所の総数を意味する指標である。以上のような定義付けにより、災害危険箇所および災害危険箇所数は（分析者が認識する限りの）道路ネットワーク上の災害リスクに相当すると解釈できる。このことから、提案する評価手法を道路ネットワーク評価手法の中でも特に道路の災害リスク評価手法と位置づける。

以上の考え方によって、信頼度等の定義方法は確立されていないが、道路の被災要因（被災リスク）としては認識されているような被災リスクを道路ネットワーク評価で考慮できるようになる。ただし、本来の被災可能性の大小に依らず、道路が被災する要因になりうるものを等しく1つの災害危険箇所として扱う考え方であるため、災害危険箇所数が多いと評価された箇所が必ずしも被災確率が高い箇所を示さない場合も起こりうる。しかし、被災する要因になるものが多数存在する箇所は相対的に被災の可能性が高いと推測できることや、本来の被災可能性を評価すること自体が現時点では困難であることを踏まえると、これまで扱えなかった多様な道路の被災リスクが扱えるようになることは、現状より高度な道路防災対策上の検討をすすめる際の有効な示唆となると考えられる。

災害危険箇所の設定事例については既報⁹⁾に譲る。ここでは建物倒壊、橋梁の落橋・損傷、斜面崩壊に関する災害危険箇所の設定事例を示している。なお、災害危険箇所はこれら3事例以外の要素（例えば提言⁵⁾に挙げられているような倒木や横断構造物の耐震性の不足など）に対しても設定可能な概念であり、その具体的な設定方法については、本研究の成果が得られた後で取り組むべき課題である。

4. 災害危険箇所に基づく道路ネットワークの災害リスク評価手法

(1) 道路の災害リスク評価手法としての基本的考え方

本研究ではリンクの災害危険箇所数をネットワークの移動コストとして捉える。これを基に災害対応の拠点となる施設間（拠点ペア間）の経路の総コストを算出し、これを各拠点ペア間の災害リスクと考える。ここで、災害リスクが小さいほど災害時に接続性が維持されやすい状態であると考え、災害リスクを低減させることは拠点ペア間の接続性を向上させることと同義であると考えられる。既報の手法⁹⁾ではこのような条件で抽出された経路が多数通過するリンクで、かつそのリンクに存在する災害危険箇所数が少ないほど対策上の注目度が高いと考える評価指標を提案した。本研究では新たに経路全体の災害危険箇所数を大きく低減させるようなリンクほど対策上の注目度が高いと考える評価指標を構築する。これには、上記条件で抽出された経路が多数通過し、かつ災害危険箇所数が多いリンクが該当する。

(2) 災害リスク評価手法の評価フロー

本節では上記の基本的な考え方と対策方針を達成するための災害リスク評価手法のフローを整理する。

まず、拠点ペア間の経路は最も災害危険箇所数（災害リスク）が少ない経路と定義する。これは、最も接続性が高い経路に対策することでさらに高い水準の接続性を確保することを意図している。このように経路を抽出した時、経路が多数通過する「共通リンク」が生じる。このようなリンクに対策することで、より多数の拠点ペアの災害リスクを低減できる。リンクの対策上の注目度に関する評価の視点は先述したように以下の2視点である。

- 1) 災害危険箇所数が少ないリンクほど、対策箇所1箇所あたりで災害リスクを低減できる経路数が多く、効果的な対策が可能であると考え。
- 2) 災害危険箇所数が多いリンクほど、リンク1箇所あたりの経路全体での災害危険箇所数の低減効果が大きく、接続性を効果的に改善できると考える。

以上のような災害リスク評価手法のフローは図-1に示すとおりである。以下に図-1に示した5つのフローについて、その詳細を整理する。

a) 災害リスク評価の条件設定

想定ハザード、対象道路ネットワーク、評価対象の拠点ペア、災害危険箇所の要件の4種を災害リスク評価における基本条件として設定する。なお、これらは、想定する災害の規模・対策の実施を想定するエリア・想定する災害対応の種類・対策水準に関する方針など、分析者の想定や防災対策の方針等に基づいて慎重かつ柔軟に設定されるべきものである。

b) 各リンクの災害危険箇所の該当判定

各種道路構造物の管理データや地理空間情報等を用いて、フロー(1)で定義した災害危険箇所の要件に該当する災害危険箇所を抽出し、リンクと関連付ける。

c) 各リンクの災害危険箇所数の集計

未耐震建物のように狭い範囲に多数存在しうる要因や、劣化橋梁と土砂災害特別警戒箇所の双方を含む場合のように、災害危険箇所の要件次第では単一のリンクに複数の災害危険箇所を定義しうる。そこで、フロー(2)が終了した時点で各リンクに定義された災害危険箇所数を集計する（式(1)）。

$$N_a^w = \sum_{i=1}^w N_a^{w,i} \quad (1)$$

ここで、

N_a^w : リンク a の災害危険箇所数、

$N_a^{w,i}$: リンク a の要素 i に関する災害危険箇所数、

W : 災害危険箇所の要素集合である。

d) 災害危険箇所数に基づく各拠点ペアの経路評価

経路評価の基本的な考え方は既報⁹⁾と同様であり、その経路評価手順は以下の通りである。

- 1) 災害危険箇所数をコストとした最短経路探索によつ

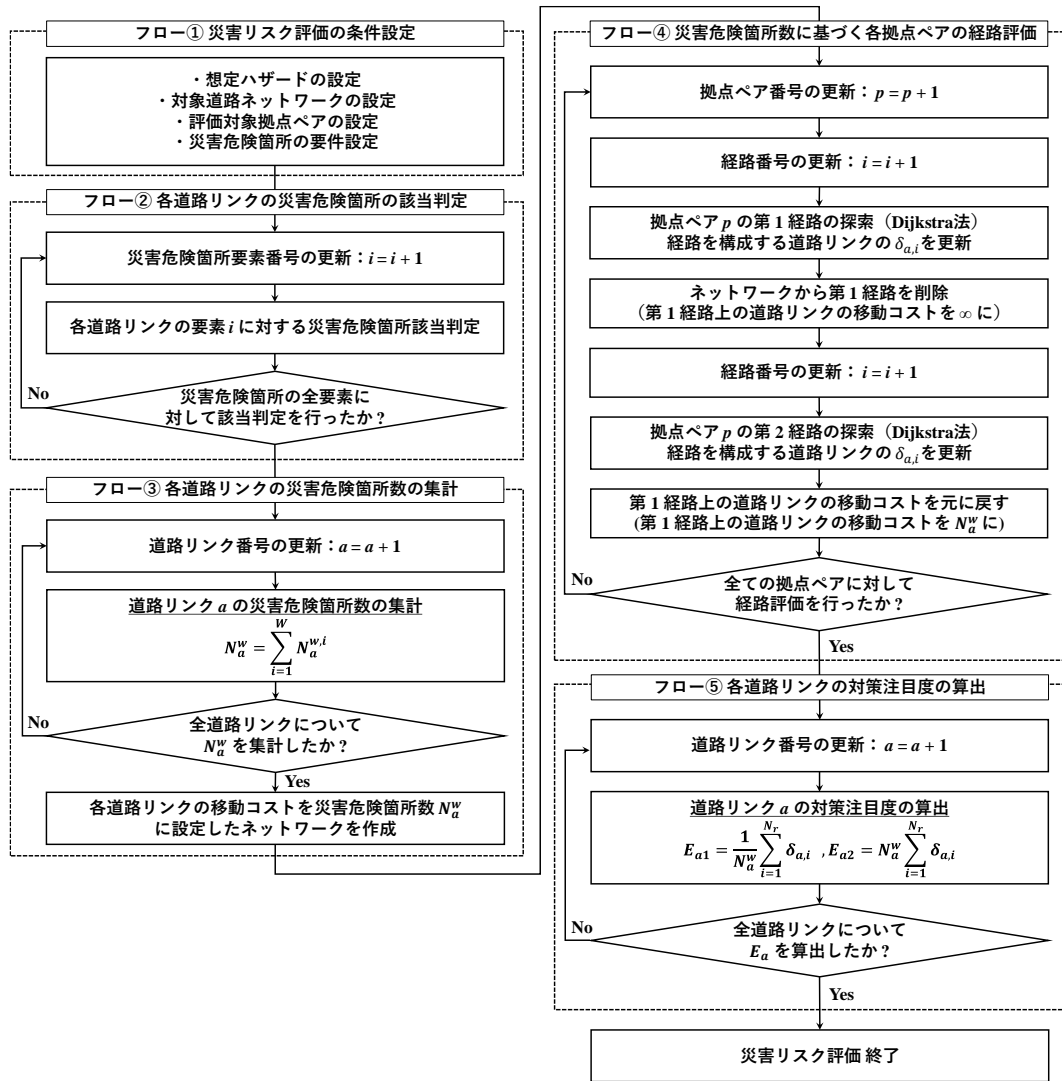


図-1 災害危険箇所に基づく災害リスク評価のフロー図

て第 1 経路を抽出する。

- 2) 南ら³⁰⁾の考え方と既報⁹⁾の緩和条件を用いて、災害危険箇所数をコストとした最短経路探索によって第 1 経路と可能な限り重複しない第 2 経路を抽出する。上記のような方法で第 2 経路を抽出することの目的は、冗長性を確保して拠点ペア間の接続性をより強固なものとするにある。

e) 各リンクの対策注目度の算出

「共通リンクのうち、災害危険箇所数が少ないリンクほど対策箇所 1 箇所あたりで災害リスクを低減できる経路数が多く、効果的な対策が可能であると考える」という考えを満足する指標は式(2)のように定義する。また、「共通リンクのうち、災害危険箇所数が多いリンクほど、リンク 1 箇所あたりの経路全体での災害危険箇所数の低減効果が大きく、接続性を効果的に改善できると考える」という考えを満足する指標は式(3)のように定義する。なお、式(2)を指標 1、式(3)を指標 2 と呼称する。

$$E_{a1} = \begin{cases} \frac{1}{N_a^w} \sum_{i=1}^{N_r} \delta_{a,i}, & N_a^w > 0 \\ 0, & N_a^w = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$E_{a2} = \begin{cases} N_a^w \sum_{i=1}^{N_r} \delta_{a,i}, & N_a^w > 0 \\ 0, & N_a^w = 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、

E_a : リンク a の対策注目度、

N_a^w : リンク a の災害危険箇所数、 N_r : 全経路数、

$\delta_{a,i}$: リンク a が経路 i に含まれるときに 1、そうでないときに 0 である。

5. 石川県緊急輸送道路ネットワークを対象としたケーススタディ

(1) ケーススタディの条件設定

分析結果の比較のために、ケーススタディの条件設定は既報⁹⁾と同様とした。各条件の詳細は既報⁶⁾に譲り、ここでは概要を述べる。

対象道路ネットワークは石川県の緊急輸送道路ネットワークとする。拠点ペア設定は、石川県の地域防災計画³⁶⁾を参考に、県庁、市町村役場、消防本部・消防署、警察本部・警察署を対象の拠点施設とした(図-2)。これは、災害対応として特に救命・救急活動や救助活動に着目したものである。なお、石川県の地域防災計画に記述されている防災拠点は他にも多数存在するが、問題設定の簡単化のため、簡易な設定とした。本手法を適用する際には、分析目的に応じて適切に拠点ペアを検討する必要がある。

対象ハザードは地震とし、ハザードの規模は50年間超過確率2%以上となるような計測震度³⁷⁾とした(図-3)。この設定は、各メッシュ(地域)で、今後50年間で2%以上の確率で発生する最大の計測震度を対策の水準とした場合を想定したものである。ここで、地震を対象とした場合は震源断層(シナリオ地震)を想定ハザードとすることもできる。この場合、震源からの距離や地盤の特性によって対象地域内での推定計測震度の分布は変化する。一方で、確率論的地震動予測地図ではすべてのメッシュにおいて想定条件下で最大となる計測震度の分布となるため、対象地域内で計測震度分布に大きな差は生じにくい。すなわち、このようなハザード想定をした場合には、災害危険箇所の要件定義次第ではハザードの規模ではなく道路ネットワークの形状と拠点ペア設定が分析結果を左右する可能性がある。したがって、本手法を適用する際にはハザード設定の違いが分析結果に大きく影響する場合があることを認識した上で、目的に合致した適切なハザード設定が行われる必要がある。

災害危険箇所は分析結果の比較のために既報⁹⁾と同様の要素(建物倒壊、橋梁の落橋・損傷、斜面崩壊)について同様の手法で設定した。災害危険箇所も、分析者の目的に応じて適切に設定される必要がある。

(2) 指標1による災害リスクの評価結果

図-4に各リンクの対策注目度 E_{d1} の空間分布を示す。これより、対策注目度の評価が特に高いリンク(図中の濃橙色～赤色)は石川県中央部から志賀町にかけての範囲に多く分布していることが確認される。

まず、対策注目度が0でないリンクに不連続な区間が観察される理由を再確認する。対策注目度 E_{d1} の定義式(式(2))より、災害危険箇所を持たないリンクの対策

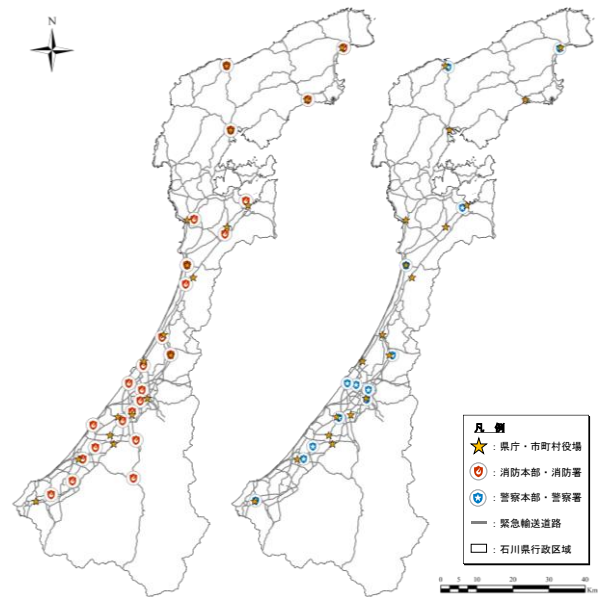


図-2 対象拠点ペアの空間分布

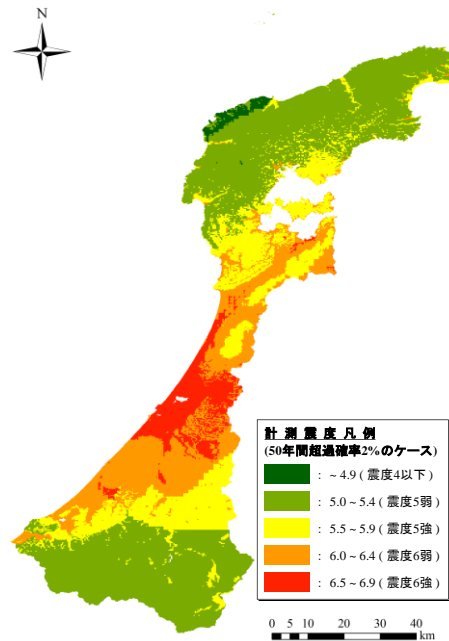


図-3 50年間超過確率2%となる計測震度の空間分布

注目度 E_{d1} は0となる。すなわち、図-4で着色されているリンクはすべて、災害危険箇所を有している。例えば、冒頭に取り上げた2地域では、河川が横断しており橋梁区間が多数存在することから橋梁に関する災害危険箇所が存在していたり、緊急輸送道路が山地を横断するため斜面崩壊に関する災害危険箇所が存在していたりする。

次に、対策注目度が高いリンクの空間分布が冒頭に述べたようなものとなることの妥当性を検証する。道路ネットワークの概形から明らかなように、県中央部から志賀町にかけては石川県の地理的構造上、緊急輸送道路の路線数が少ない。すなわち、この区間は一部のリンクに経路が集中しやすい条件を持っている。加えて、図-3に

示した拠点分布図からわかるように、県北部の拠点と県南部の拠点という組み合わせの拠点ペアが多く存在している。すなわち、前述した県中央部から志賀町にかけての区間を必ず通過する拠点ペアが多い評価条件となっている。以上を整理すると、当該区間を通過する経路数自体が多く、さらにその区間は一部リンクに経路が集中しやすい条件を持つことから、高い対策注目度を持つリンクが分布しているという冒頭の結果が得られたことは妥当であると評価できる。

(3) 指標2による災害リスクの評価結果

図-4に各リンクの対策注目度 E_{a2} の空間分布を示す。これより、対策注目度の評価が特に高いリンク（図中の濃橙色～赤色）は石川県中央部から志賀町にかけての範囲と能登半島の南側に多く分布していることが確認される。石川県中央部から志賀町にかけての範囲でこのような結果が得られた理由は前節と同様に説明される。一方で、能登半島南側で対策注目度の高いリンクが見られる理由は、この地域での災害危険箇所数の多さから説明できる。この地域は山地が多く、土砂災害警戒が多数存在するだけでなく、それら区域内を緊急輸送道路が通過している。また、図-3に示した拠点分布からも明らかのように、能登地方以外から能登地方の拠点へアクセスしようとした場合にはこの地域を通過する必要があるような道路ネットワーク構造となっており、石川県中央部から志賀町にかけての範囲ほどではないものの、この地域も経路が集中しやすい条件を持っている。よって、指標2の「多数の経路が通過し、かつ災害危険箇所数が多いリンク」を満たすような地域となっており、冒頭の結果が得られたことは妥当であると評価できる。

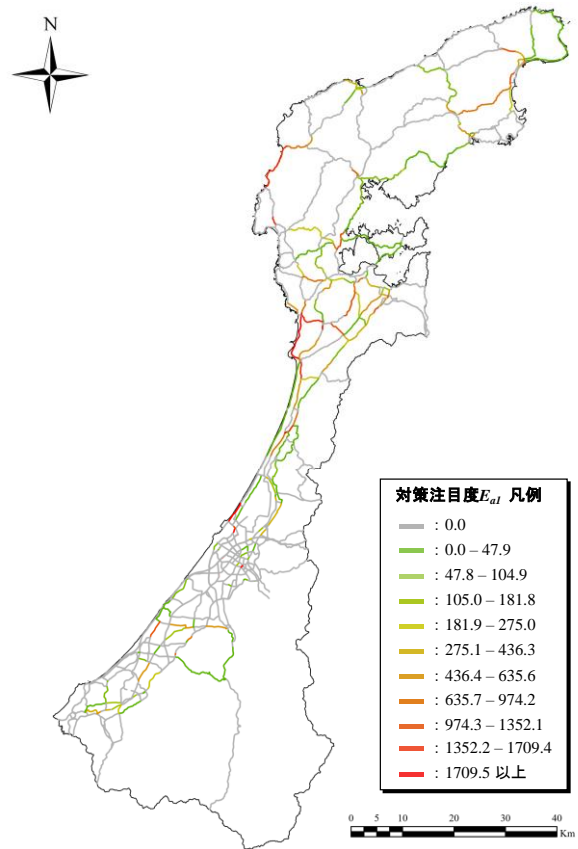


図-4 指標 1 による対策注目度の空間分布

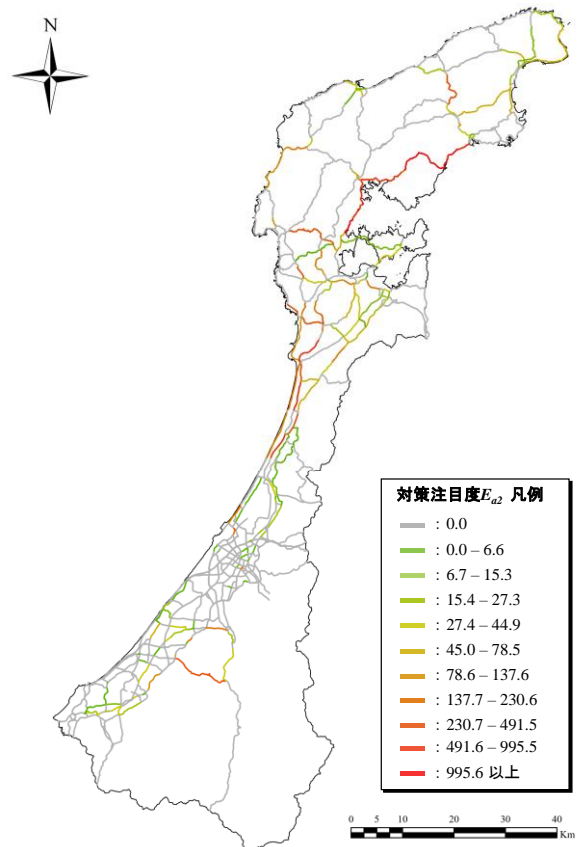


図-5 指標 2 による対策注目度の空間分布

6. 評価結果の差異に関する考察

図-6に指標1と指標2とでの対策注目度の順位の変化値を示す。変化値は指標1を基準として、式(4)によって求めた。この式で変化値がマイナスの場合は指標1に比べて対策注目度の順位が下がったリンク（紫～青系統色）で、反対に変化値がプラスの場合は指標1に比べて対策注目度の順位が上がったリンク（黄～赤系統色）である。灰色のリンクは順位変動が見られなかったリンクである。

$$Diff_a = E_{a1}^{rank} - E_{a2}^{rank} \quad (4)$$

ここで、

$Diff_a$: リンク a の対策注目度の順位の変化値、

E_{a1}^{rank} : リンク a の指標1による対策注目度の順位、

E_{a2}^{rank} : リンク a の指標2による対策注目度の順位 である。

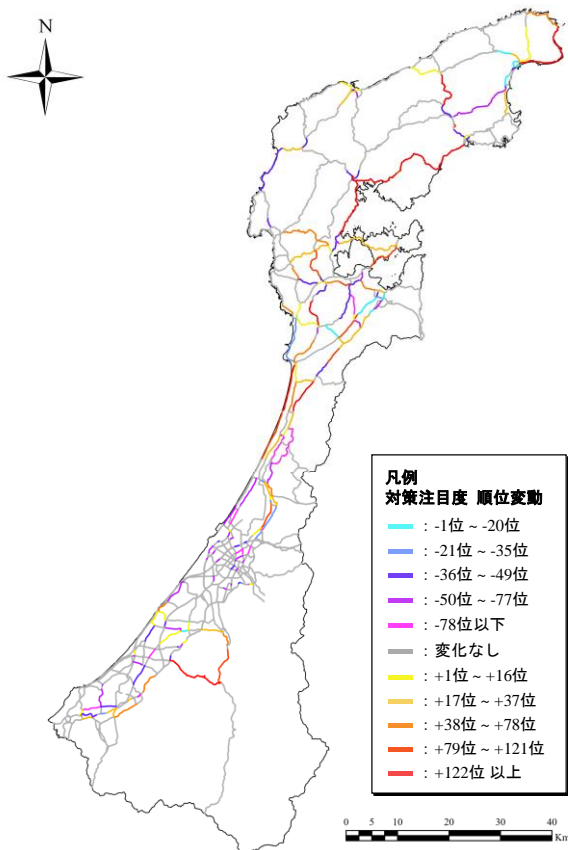


図-6 2指標間での対策注目度の順位変動

プラス側に変化したリンクの多くは、山間部にあるために土砂災害警戒区域を多数通過せざるを得ず、災害危険箇所数が多かったリンクである。指標1ではこのようなリンクの注目度は低く評価される構造であり、指標2では反対に注目度が高く評価される構造であることの違いが結果に明確に反映されていることがわかる。

また、図-6からは、順位は上昇方向・下降方向いずれでも小さく変化したものから大きく変化したものまで混在していることが確認される。この結果は、対策候補として抽出した経路は同様であっても、それら経路のうちどのリンクに対策上注目するかという視点が異なれば、対策候補となるリンクの構成が大きく変化する可能性があることを示唆している。すなわち、道路防災対策に対してどのような方針や考え方を持つかによって、分析者は適切に手法を選択する必要があることが指摘される。

7. 本研究のまとめと今後の課題

本研究では災害対応の拠点となる施設間の接続性向上を目的として提案された災害危険箇所に基づく道路ネットワークの災害リスク評価手法⁹⁾を基に、経路全体の災害危険箇所を効果的に低減できるようなリンクに対策上

注目するという考え方の評価指標を新たに構築した。また、石川県の緊急輸送道路ネットワーク及び地域防災計画を対象としたケーススタディを行い、設定した条件および新指標の設計意図を満足する妥当な結果が得られることを確認した。さらに、既存の評価指標と新指標での評価結果を比較した結果、2指標間では対策候補とした経路が同一であっても対策注目度の順位には大きな変化があることが確認され、リンクの対策注目度の考え方が異なると対策候補となるリンクの構成が大きく変化する可能性があることが示唆された。これより、分析者は道路防災対策に対してどのような方針や考え方を持つかによって適切に手法を選択する必要があることを示した。

本稿では既往手法⁹⁾に対して単純に新たな評価指標を構築することとどまったが、筆者らは災害危険箇所に加えて経路距離を考慮した場合の評価手法の開発も行っている³⁹⁾。今後は経路距離を考慮した場合の手法についても同様の分析を行っていく。また、これら手法ではいずれも道路防災対策の手段として「リンクの強化」に着目したが、他の手段として「拠点（ノード）の移設や新設」も考えられる。このようなノードの議論へも、災害危険箇所に基づく道路ネットワーク評価の枠組みが展開可能であるかを議論することは今後の課題である。さらに、本研究では災害危険箇所の定義方法について3つの事例を示したが、これら3に留まらず他にも多様な災害危険箇所が存在する。どのような要素を災害危険箇所として設定するか、そしてそれをどのようなデータからどのように判定するかを検討することも必要である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金特別研究員奨励費（代表：大澤脩司，課題番号：19J12627）の一環として行った研究成果の一部であります。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局都市局：道路の防災機能の評価手法（案），2016。
- 2) 国土交通省道路局都市局：道路ネットワークの防災機能の向上効果計測マニュアル（案），2016。
- 3) 家田仁，柳沼秀樹，堤啓：新たな「道路の防災機能評価手法」の開発とその適用事例，土木施工，Vol.57，No.5，pp.17-20，2016。
- 4) 家田仁，岩倉成志，平田輝満，柳沼秀樹：土木学会 熊本地震・広域交通ネットワーク調査団 中間報告（中間とりまとめ）～広域交通ネットワークの被災状況と今後の方向性～，2016。
- 5) 道路の耐災害性強化に向けた有識者会議：道路の耐災害性強化に向けた提言－教訓から学び、教訓を超えて－，2019。

- 6) 大澤脩司, 岡田真由子, 中山晶一郎, 山口裕通: 地震に対する道路の弱点箇所に基づく防災拠点間の接続性評価に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.L591-L603, 2018.
- 7) 若林拓史: 阪神淡路大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.391-400, 1996.
- 8) 若林拓史, 大野隆晴, 鈴木宏章: 14_道路ネットワークの重要度評価: 確率重要度とクリティカリティ重要度による信頼性向上効果, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, No.4, pp.751-pp.759, 2005.
- 9) 朝倉康夫, 柏谷増男, 為広哲也: 災害時における交通処理能力の低下を考慮した道路網の信頼性評価モデル, 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.475-484, 1995.
- 10) 高山純一: 異常気象時における道路網の連結性能評価法, 土木計画学研究・講演集, No.12, pp.559-565, 1989.
- 11) 廣瀬義伸, 近藤光男, 綾貴穂, 山根丈: 地震防災のための道路網および緊急施設整備計画に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.329-336, 1998.
- 12) 能島暢呂, 山中敏裕: 道路ネットワークの地震時機能信頼性解析に基づく施設改善の重要度評価, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, No.J-12, pp.3205-3210, 1998.
- 13) 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, Vol.19, No.6, pp.232-243, 2019.
- 14) 伊藤詩織, 庄司学: 道路ネットワークの津波災害時における機能支障の定量的評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.4, pp.L120-L130, 2018.
- 15) 原田慎也, 栄徳洋平, 戸根智弘, 三木智, 若林拓史: 道路の連結信頼性の実用的な評価方法の提案, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.69, No.5, pp.L67-74, 2013.
- 16) 安藤正幸, 喜多敏春: 連結信頼性を用いた整備計画策定手法の研究, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.114-127, 2016.
- 17) 松田洋一郎, 川村國夫, 平岸純, 喜多敏春, 安藤正幸: 緊急輸送道路の最適管理に向けた道路構造物情報の統合化と耐震化優先度の検討, 交通工学論文集, Vol.2, No.5, pp.31-40, 2016.
- 18) Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C. and D'Este, G.M.: Application of accessibility based method for vulnerability analysis of strategic road networks, *Network and Spatial Economics*, Vol.6, pp.267-291, 2006.
- 19) Lleras-Echeverri, G. and Sánchez-Silva, M.: Vulnerability analysis of highway networks, methodology and case study, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, Vol.147, pp.223-230, 2001.
- 20) Sohn, J.: Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.40, pp.491-506, 2006.
- 21) Chang, S. E. and Nojima, N.: Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, *Transportation Research Part A*, Vol.35, pp.475-494, 2001.
- 22) 原田剛志, 倉内文孝, 高木朗義: リダンダンシーを考慮したアクセシビリティに基づく道路ネットワークの接続脆弱性評価, 土木計画学論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.1, pp.76-87, 2014.
- 23) 倉内文孝: Network Science を援用した交通ネットワーク信頼性分析の可能性, 土木計画学研究・講演集, Vol.55, CD-ROM, 2017.
- 24) Bell, M.G.H., Kurauchi, F., Perera, S. and Wong, W.: Investigating transport network vulnerability by capacity weighted spectral analysis, *Transportation Research Part B*, Vol.99, pp.251-266, 2017.
- 25) Nourzad, S.H.H. and Pradhan, A.: Vulnerability of Infrastructure Systems: Macroscopic Analysis of Critical Disruptions on Road Networks, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.22(1), pp.04015014-1 - 04015014-13, 2016.
- 26) 中南孝晶, 中山晶一郎, 小林俊一, 山口裕通: 固有値解析による固有ベクトルを利用した緊急輸送道路ネットワークの脆弱性評価, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.L1141-1148, 2018.
- 27) 坪川秀太郎, 若林桂汰, 小林俊一, 中山晶一郎: バネ質点系の力学アナロジーを用いた道路ネットワークのリンク重要度のトリアージ手法について, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.74, No.2, 2018.
- 28) 土屋哲, 岩田千加良, 谷本圭志: 区間重複を考慮した地方都市道路網の冗長性指標に関する一考察, 地域安全学会論文集, No.30, pp.35-41, 2017.
- 29) 竹之内洋樹, 森田哲夫, 藤田慎也: 防災船着場整備による負傷者搬送への効果に関する研究—東京都江東区を対象として—, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5, pp.L63-L73, 2014.
- 30) 羽深裕希, 丸山善久: 移動効率に着目した高知県における広域物資拠点の選定, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4, pp.L257-264, 2015.
- 31) 杉浦聡志, 倉内文孝, 高木朗義: 複数経路の確保を前提とした耐震化費用を最小とする緊急輸送道路整備計画立案モデルの構築, 土木計画学論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, 2018.
- 32) 長江剛志, 藤原友, 朝倉康夫: 利用者均衡配分を内生化した都市圏道路ネットワークの耐震化問題, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, CD-ROM, 2008.
- 33) Nagae, T., Fujihara, T. and Asakura, Y.: Anti-seismic reinforcement strategy for an urban road network, *Transportation Research Part A*, Vol.46, No.5, pp.813-827, 2012.
- 34) 喜多敏春, 近田康夫: 道路ネットワークを考慮した道路構造物耐震補強の優先順位設定におけるゲーム理論の適用, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.244-251, 2013.
- 35) 南正昭, 高野新栄, 加賀屋誠一, 佐藤馨一: 拠点的医療

- 施設へのアクセスを2系統で保証する道路ネットワーク構造, 土木計画学研究・論文集, No.14, pp.679-686, 1997.
- 36) 石川県: 石川県地域防災計画 地震災害対策編, 2019.
- 37) 防災科学技術研究所, j-SHIS 地震ハザードステーション:
<http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2019.12.27 閲覧)
- 38) 大澤脩司, 高山純一, 藤生慎, 塩崎由人: 災害に対する道路の危険箇所に着目した道路の防災機能評価法の改良, 第 39 回地震工学研究発表会講演論文集, CD-ROM, 2019.
- (2020. 3. 8 受付)

A STUDY ON THE DISASTER RISK EVALUATION FOR ROAD NETWORK
BETWEEN DISASTER PREVENTION BASES BASED ON HAZARDOUS POINT

Shuji OSAWA, Jyunichi TAKAYAMA, Makoto FUJIU and Yuto SHIOZAKI