

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

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 理工学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 理工学域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

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

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

E-mail: yutose.kanazawa-u.ac.jp

過去の災害における被災経験を踏まえて、発災後の各種対応の拠点となる施設間の接続性を確保することの重要性が強く認識されている。一方で、各種対応の迅速性を考えると、それら施設間は可能な限り短い距離の経路で接続されていることが望ましい。本研究では以上のような要請を満たす道路ネットワークの接続性評価法を提案するものである。具体的には、危険箇所へのみ着目していた既存手法に k 番目経路探索の考え方を導入することで手法の改良・拡張を行った。提案手法を単純仮想ネットワークに適用した結果、本提案手法によって、接続性を確保しつつ距離の条件も満足させ、発災後の災害対応の確実性と迅速性を両立させるような防災対策の検討に資する評価が可能であることを確認した。

Key Words: *vulnerability, connetivity, weakness on the road, disaster prevention base, earthquake disaster*

1. はじめに

我が国では、度重なる地震被害を受けて、重要な道路の走行性を確保することの重要性が強く認識されている。

平成7年1月17日5時46分に発生した兵庫県南部地震では、高速道路、鉄道などの高架構造物の倒壊、沿道建物の倒壊、路面倒壊などによって、道路容量が著しく減少し、避難活動、救急・救助活動、救援活動、復旧・復興活動等に関連して平時とは異なる交通需要が発生した。しかし、わが国の東西交通を担う主要幹線が被害を受けていたことから、発災翌日の18日に、これを補う形で東西2ルートの緊急輸送ルートを設定したが、緊急車両のみに通行を規制することは事実上困難であった。この教訓¹⁾を踏まえ、今日では緊急輸送を円滑に実行するための道路ネットワークとして緊急輸送道路²⁾が表-1のような位置付けで指定されている。

平成23年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震では、強い地震動に加え、巨大な津波による甚大

な被害が発生した。発災翌日からは、救命・救援ルート確保のため、東北地方の内陸部を南北に貫く東北自動車道と国道4号から、沿岸部に伸びる国道を車両が通行できるだけのルートを切り開く道路啓開が実行された³⁾。この経験から、近い将来発生が予測される東海・東南海・南海地震等、南海トラフを震源とする巨大地震に備え、救援・救護活動、円滑な緊急輸送、復旧・復興を見据えた道路啓開オペレーション計画について、中部版くしの歯作戦が策定されている⁴⁾。

以上のように、災害後の様々な交通需要に対応するための核となる道路の選定や、発災後の道路啓開についての検討が進められるなど、我が国の道路防災は過去の被

表-1 緊急輸送道路の種別とその位置づけ

種別	位置づけ
第1次	高規格幹線道路、一般国道等の広域的な重要路線及びアクセス道路で輸送の骨格をなす道路
第2次	第1次緊急輸送道路と市町村役場及び重要な拠点を結ぶ道路
第3次	第1次、第2次緊急輸送道路と市町村役場支所を結ぶ道路及びその他の道路

災経験を踏まえて進展してきた。しかし、これら対策では十分対応できないような事態も近年発生している。平成28年熊本地震では、九州自動車道に架かる跨道橋が落橋し、緊急輸送道路が寸断された事例⁹⁾など、緊急輸送道路が通行不能となる事例が発生した。この事例は、道路網の中で特に重要度が高く、優先的に防災対策が実施されている緊急輸送道路等の高水準の道路でも、地震時に通行不能となる可能性は否定できないこと示している。

道路施設には、沿道建物、盛土や斜面、橋梁など、災害によって損傷することで通行性を悪化させ、最悪の場合には通行不能としてしまう要素が多数含まれている。災害時に重要な道路の走行性を確保し、各種災害対応のための拠点施設を相互に連結するためには、これら道路施設に対する適切な対策の実施が必要となる。このためには、どの道路でどのような道路施設の被害が発生しやすいのかを捉えることができれば、優先的な対策箇所を見出すことができると考えられる。しかし、自然災害外力を受けた時の道路施設の被害率に関する研究はこれまでに多く実施されているものの、被害の要因は未だ全てが解明されたとはいえず、道路施設の被害確率を把握することは容易ではない。このことから、事象の生起確率には重きを置かず、事象が発生した際の影響の大きさに着目するということが、道路施設の災害に対する維持管理の1つの方向性として考えられる。交通ネットワークの研究分野では、この方向性としてネットワーク脆弱性の考え方が提案されている^{6),7)}。

以上のような背景を踏まえ、筆者らは道路施設の被害確率ではなく、その道路施設が有する災害に対して脆弱な構成要素の有無によって災害発生時に被害を生じる恐れがあるか、すなわち対策を要する可能性のある施設であるかを判断し、その判断結果をもとに道路ネットワークの接続性を分析することで、補修や補強などの対策を優先的に実施すべき道路を把握するための手法の開発に取り組んできた⁹⁾。この方法では、発災後に各種災害対応を実施する上で道路ネットワークに要求される「災害対応のための各種拠点施設間の接続性を確保する」という視点に重きを置き、接続の可能性が高い経路の中から対策の優先箇所を抽出していた。一方で、発災後の災害対応という点では、単に対応が実施できるだけでなく、可能な限り迅速に実施される必要があるが、この点は考慮されていない。そこで、本研究ではこのような災害対応の迅速性を確保する、すなわち経路の長さも同時に考慮した手法への改良を試みる。

2. 既往研究の整理と本研究の位置付け

本章では、1章に示した研究の目的に沿い、道路ネッ

トワークの信頼性、脆弱性評価の観点から既往研究を整理し、本研究の位置付けを示す。

(1) 道路ネットワークの信頼性・脆弱性に関する研究

まず、道路施設の維持管理を実施する各自治体でどのような評価が行われているか整理する。地震災害のように、被災地域が広範囲に及ぶような災害では、道路区間単体の被害の可能性を評価するだけでなく、ある区間の被害が道路ネットワーク全体にどのような影響を与えるか、すなわち接続性を分析することが重要となる。利用される経路の中でも特に重要な区間を把握することや、途絶時の影響が高い区間を把握することは、効果的な対策を検討する上で有用となりえよう。しかし、自治体の被害想定では、あるメッシュ内での被災箇所数や一部の道路の通行可能確率を評価するに留まっている例がほとんどであり、先に述べた接続性を考慮した分析はほとんど実施されていない。いくつかの自治体で、通行可能性の予想という形で、道路ネットワーク全体としての接続性を視野に入れた分析を行っている^(例えば10),11)が、高速道路のインターチェンジ間の不通確率や路線ごとの被害箇所数での評価に留まっている。

災害時も視野に含めるとされる連結信頼性の分野では、例えば、若林¹²⁾は道路網における信頼性を任意の地点間において、あるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率的指標と定義して、各道路区間の信頼性を評価する確率重要度を提案している。更に若林¹²⁾では確率重要度の課題であった信頼度の高い区間の信頼度を更に改善することは困難であるという点を改良したクリティカリティ重要度を提案している。一方で、これら研究^{12),13)}では、信頼度とは平時の交通量で決定されるものであり災害に対する脆弱性は考慮されていない。

安藤・喜多¹⁴⁾は災害規模を考慮した連結信頼性による道路施設の補修・補強のための整備計画策定手法を提案している。ただし、本手法では連結確率の精緻な設定が必要となるが、1章に指摘したように、道路の被害確率を精緻に推定することは現状では困難である。

脆弱性の概念に着目した原田¹⁵⁾は災害発生時の影響評価のために、接続性が著しく低下する弱点箇所を把握するための方法として接続脆弱性評価手法を提案している。原田¹⁵⁾は落石や斜面崩壊、深刻な交通事故といった単一の道路区間が途絶する状況を想定した評価の枠組みであり、地震や洪水のような複数の道路区間が同時多発的に途絶する事態は想定されていない。

効果的な防災対策を実施するためには、どこが道路ネットワークの構造上重要となるかを把握することは重要であり、この点で以上の既往研究はその要請に込えている。一方で、道路ネットワークの構造としての重要区間と災害に対する危険箇所は必ずしも一致しない。防災対

策はネットワーク上で重要でありながら、更に災害時に危険が想定される箇所において実施されるべきである。しかし、これの既往研究では後者の災害に対する危険箇所は考慮されていない。また、災害時を想定した場合には道路の連結確率に相当する被害確率や災害時の交通量といった評価に要する入力データを推定することに困難が伴うこともまた、防災対策を検討するために道路ネットワークを評価するという目的においては課題となる。

(2) 本研究の位置付け

先に指摘したように、防災対策を実施すべき箇所を検討するという点では、道路ネットワークの機能を精緻に評価できたとしても、評価に要するデータの推定に困難が伴うことや、災害に対する危険箇所を考慮しないのは不十分であると考えられる。

災害に対する危険箇所を考慮して防災対策を検討する手法として、家田ら¹⁶⁾や大澤ら¹⁷⁾の手法がある。ここでは道路ネットワークの接続性は旅行時間の増減によって評価されている。円滑な緊急輸送や災害対応のための交通行動を確保するという視点では旅行時間による評価は望ましいと言えよう。しかし、災害発生後の被災地の道路状態や交通状態の予測には困難が伴う。予期せぬ混雑や道路被害により想定した旅行時間で走行できないことも考えうる。すなわち、平時の道路条件に基づいた旅行時間による評価も必ずしも適切とは限らないと言える。

前節及び以上の議論から、交通量や旅行時間に依らない指標を用いた評価手法を検討することの意義が指摘される。交通機能に関する他の代表的な指標として、道路容量が考えられる。道路の被災によって道路容量が減少すれば、平時には発生しえなかった混雑が発生する可能性があり、重要な指標の1つと言える。ただし、交通容量を指標とする上では発災からの時間軸の捉え方が重要となる。交通容量の不足による問題は、発災からある程度時間が経過し、生活再建・復興に向けた活動が開始される中で日常の交通需要が回復し始める段階になって特に顕在化すると考えられる。発災直後にも避難行動に起因する混雑の発生が想定されるが、これは道路の被災による道路容量の低下以外に、同一時期に同一方向への交通需要が大量に発生することの影響が大きい。このような状態では、例え平時とほぼ同様の健全な状態の道路が多数残ったとしても、渋滞の発生を避けることは困難であろう。このような避難時の混雑回避については道路容量の確保ではなく、避難誘導など避難計画的視点からの対策が重要になると考えられる。

本研究では、発災からの時間軸として特に発災直後に着目する。すなわち、緊急輸送や災害対応のための交通行動が最低限実施できるよう、災害対応上の重要な拠点間の接続性を確保するために防災対策を実施すべき道路

区間を評価することを目的とする。拠点間の接続性を低下させる要因の全てを取り除くことは、昨今の財政事情を鑑みれば非常に困難であり、このような中でも効果的な防災対策を実施するためには、拠点間の接続性を低下させる要因（被災リスク）を低減するという考え方が必要となる。本研究では拠点間の経路上に存在する災害に対する危険箇所数を被災リスクとして捉え、拠点間の接続性を評価する。また、本研究ではある条件下で最適な対策案を提案するのではなく、比較的簡便な手法を提案することで、防災対策を検討する際の検討材料として活用されることを期待している。

以上は筆者らがこれまでに提案した手法⁹⁾と本研究における共通点である。すでに述べたように、発災後の災害対応が実施されるためには、それら対応のための拠点施設間が走行可能な道路で接続されていることは最低限の条件である。しかし、理想的にはそれら対応は円滑に実施されることが望ましく、このためには接続性を確保するだけでは不十分であり、可能な限り短い経路で接続性を確保するという視点へ改めることが望ましい。そこで、本研究では既往の手法⁹⁾に対して、所定の距離を満足するような経路のみを抽出する制約を付加することで、発災後における災害対応の確実性と迅速性の向上を両立させることを試みる。

なお、本研究ではすでに述べたように、特に発災直後の最低限の緊急輸送・災害対応の実施に着目しており、提案する手法は道路啓開戦略や被災道路の復旧戦略をもカバーするものではない。災害時の道路交通問題に関するこれら異なる視点・目的を有する手法とは補完的に用いるべき手法であると言える。

3. 危険箇所を考慮した接続性評価法の概要

(1) 危険箇所の定義と設定方法

道路ネットワークにおける災害に対する危険箇所とは、災害時に当該箇所が被害を受けることで、道路を通行不能たらしめる可能性がある箇所と定義する。例えば、地震であれば建物の倒壊による道路閉塞、橋梁の落橋や損傷による通行不能、切土や盛土、斜面などの土構造物の崩壊による閉塞や路面崩壊による通行不能などが考えられ、大雨による河川氾濫であれば、越水による道路の浸水や土構造物の崩壊による道路閉塞や路面崩壊による通行不能などが考えられよう。どのような要素・要因を危険箇所として定義すべきかについては、今後の議論が必要な課題とし、本研究では提案手法の有効性を検証するためのケーススタディでは、いくつかの要素・要因を考慮した危険箇所の設定を行う。具体的には、大澤ら⁹⁾で採用した災害想定、危険箇所の設定方法と同様のものを

用いる。なお、これには手法の比較・検討の意味もある。

(2) 接続性評価の基本的な考え方

すべての危険箇所に対策を実施することは、昨今の社会情勢・財政状況から明らかに困難であるため、少ない投資で対策効果を可能な限り高めることが望ましい。このような視点では、各弱点箇所の対策費用や被災した場合の復旧費用の大小、復旧にかかる時間の大小によって対策箇所を選定するという方針が考えられる。しかし、危険箇所はある程度地域の特性によってその要素が偏ると想定されることから、前者の方針下では安価な要素への対策が優先され、地域間で対策の格差を生じる可能性がある。また、後者の方針下では復旧時間の予測結果が評価を大きく左右するが、同じ道路の同じ危険箇所でも被害の規模によって復旧時間は大きく変動する。これまでの被災経験から道路被害に関する様々な知見が蓄積されているが、被害規模を精緻に予測することは現時点では困難である。そこで、本研究では、当初の目的が「ある防災拠点間の接続性を高める」ことにあり、このためには拠点間の経路上にある危険箇所を除去する必要があることに立ち返った方針を設定する。具体的には、拠点間の経路について、通過する危険箇所数が最も少なくなるような経路を選定し、当該経路上の危険箇所を有するリンクを対策の候補とすることを基本的な考え方として設定する。ただし、すでに述べたように通過する危険箇所数が少なくとも、それが所定の距離を満足しない、すなわち平時の最短経路距離に対して長大な経路であるために、災害対応の迅速性が損なわれる可能性がある経路である場合は、対策候補の経路から除外し、次に危険箇所の少ない別の経路を対策候補の経路として抽出する。以上のような考え方によって、危険箇所の要素の種類を同等に扱うものの、その数の大小に着目することで、一部の要素や地域へ対策優先度が偏ることを抑制する。また、拠点間の接続性をより頑強なものとするために重複しない2本の経路を選定する。複数経路を抽出する際の考え方としては、重複を許して純粋にコストの小さい順に経路を抽出するというものもあるが、一般的にコストの大小関係が似通った順番同士の経路については、経路を構成するリンクの内容もまた似通ったものである場合は多い。この考え方を採用した場合、危険箇所が最も少ない2本の経路を抽出できるが、それらはリンクの構成に共通点が多く、あるリンクが災害時に通行不能になった際に、同時に2本の経路を使用不能としてしまう恐れがある。こうした事態を避けるための考え方が、先に述べた「重複しない2本の経路を抽出する」ということにつながる。

以上の経路選定を全拠点ペアに対して実行し、危険箇所を有するリンクごとに、経路に選択された回数を集計

する。最後にこの累積値をリンクの危険箇所数で除し、1危険箇所あたりの経路数に換算した値をリンクの対策優先度評価値とする。なお、対象とするリンクを危険要素を有するリンクに限定したが、弱点箇所のないリンクは対策の必要がないために優先度評価の対象からは除外したものである。以上より、弱点箇所を有するリンク（弱点リンク）の対策優先度評価値は式(1)で表される。

$$E_a = \frac{1}{N_a^w} \sum_{i=1}^{N_r} \delta_{a,i} \quad (1)$$

ここで、 E_a ：弱点リンク a の対策優先評価値、 N_a^w ：弱点リンク a の弱点箇所数、 N_r ：全経路数、 $\delta_{a,i}$ ：弱点リンク a が i 番目の経路に含まれるとき1、そうでないとき0

(3) 単純仮想ネットワークを用いた接続性評価例

図-1に、危険箇所の集計から接続性評価までの一連のフロー図を示す。このフロー図に従い、図-2に示す単純ネットワークを用いて、前項に示した考え方に基づく接続性の評価例を示す。

図-1に示すように、接続性評価はリンクの危険箇所数の集計プロセスとリンクの対策優先評価値の算出プロセスの2段階構成で実行する。危険箇所数の集計にあたっては、想定する災害の種類によって適切な要素を設定し、各要素に該当する危険箇所が対象とする道路ネットワーク上にどの程度存在するか、対応する道路施設の管理データなどから設定することになる。

危険点箇所数が確定したら、その値をリンクコストとしたネットワークを作成する。このネットワークで最短経路探索を実行することで、基本的な考え方示した「危険箇所の通過数が少ない経路」を求めることができる。2つ求める経路のうち、1番目に求める経路を第1選択経路と呼ぶ。仮に経路距離の条件を満足する経路が一度で選定できる場合には、第1選択経路は、Dijkstra法などの経路探索アルゴリズムを用いることで容易に求まる。2番目に求める経路を第2選択経路と呼ぶ。第2選択経路については、南ら¹⁸⁾の考え方を参考に、第1選択経路を削除したネットワーク上で再度最短経路探索を実行することで求める。この時、原田ら¹⁹⁾が指摘するように、正しく最短経路を求めることができない場合が発生する。この場合には、第1選択経路に含まれるリンクを通過しないと目的地へ到達できない場合には、そのリンクのみ通過を許すという緩和条件を設ける（図-3参照）。経路距離の条件が満足されない場合であっても、基本的な考え方は上記から逸脱しない。ただし、条件を満足したかった経路の次に通過する危険箇所数が少ない経路を抽出するために、 k 番目経路探索の手法を援用する。 k 番目経路探索とは、その名の通り、あるODペアについて、コ

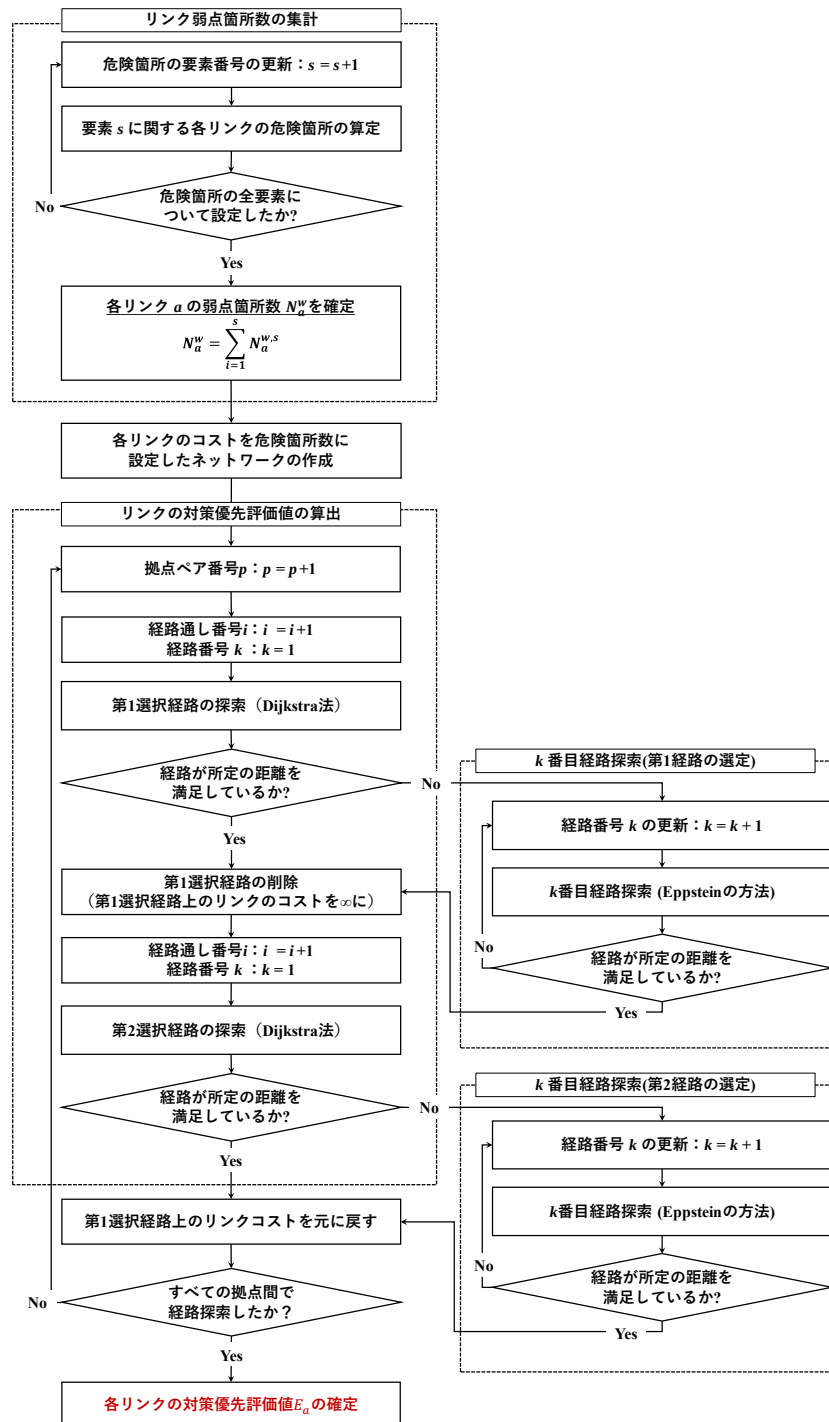


図-1 危険箇所と k 番目経路探索に基づく接続性評価のフロー図

ストが k 番目となる経路を求める手法である。この問題を解くための手法はこれまでに数多く提案されているが、手法の差異は計算の効率性にあり、最終的な結果に差異はない。本研究では k 番目経路探索の一般的な手法の1つである Eppstein の方法¹⁹⁾を使用する。 k 番目経路探索を用いるタイミングは、図-1に示したように、第1・第2各経路を Dijkstra 法を用いて抽出する段階で、所定の距離を満足しない経路が現れた時である。この際に k 番目経路探索を実行し、まず通過する危険箇所数が2番目となる

経路の距離をチェックし、距離の条件を満足していればその経路を選定し、満足していない場合は更に3番目の経路距離をチェックし.....というのを、距離の条件を満足する k 番目の経路が現れるまで繰り返す。経路探索自体は危険箇所数をコストとして実行しているため、 k 番目経路は k の値が大きくなるにつれて危険箇所数が増大するような特性を持っている。すなわち、1番目から順にその経路距離をチェックしていくという方法を採用することで、距離の条件を満足する経路の中で最も危険箇所

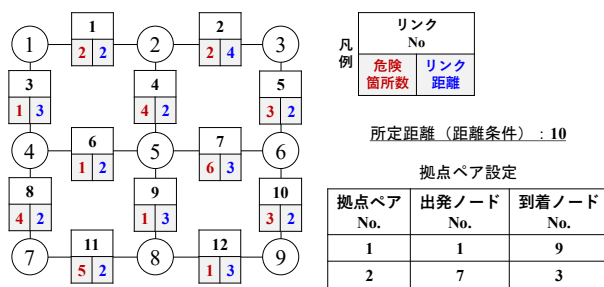


図-2 単純仮想ネットワーク図

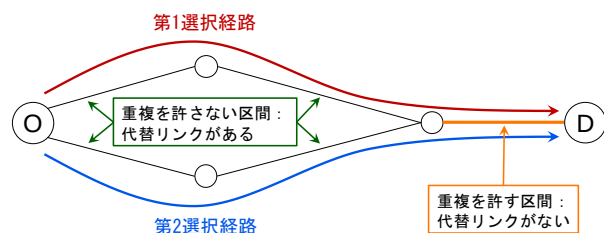


図-3 第2選択経路探索の緩和条件 説明図

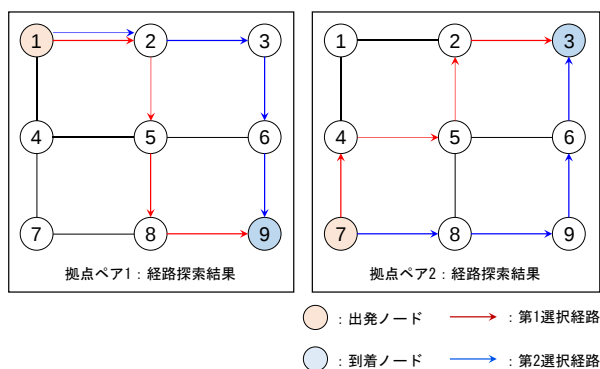


図-4 単純仮想ネットワークでの経路抽出結果

表-2 単純仮想ネットワークでの対策優先度評価結果

リンク No	Ea	優先順位
1	1.00	2
2	1.00	2
3	0.00	11
4	0.50	8
5	0.67	6
6	1.00	2
7	0.00	11
8	0.25	9
9	1.00	2
10	0.67	6
11	0.20	10
12	2.00	1

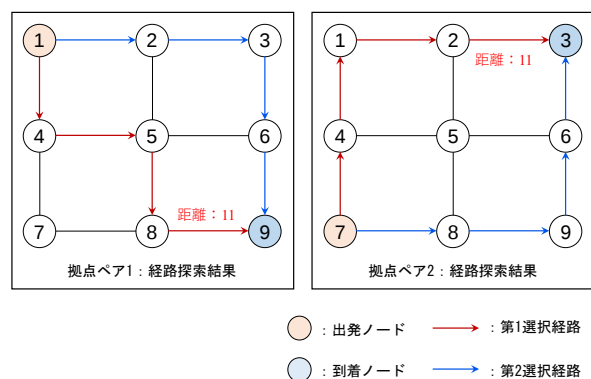


図-5 距離制約なしの場合の経路抽出結果

所数が少ない、つまり相対的には災害時に接続性が保たれる可能性が高い経路が抽出される。故に、災害対応の確実性と迅速性とが両立されると考えられる。

図-2のような条件を持つ単純仮想ネットワークにおいて、以上のような手順で対策優先度の評価を実施すると、図-4に示すような経路が抽出され、各リンクの対策優先評価値は表-2のような結果となる。リンク12は危険箇所数が1箇所ですぐに通過する経路数が2本であるため、対策優先度が最も高く評価されている。次点のリンク1, 2は危険箇所数が2箇所ですぐに通過する経路数が2本であり、リンク6, 9は危険箇所数が1箇所ですぐに通過する経路数が1本であるため、同率の評価値になるという結果となった。図-2に示したように、今回は所定距離（距離条件）として、距離が10以上となる経路は、どれだけ危険箇所の少ない経路であっても、対象から除外している。図-5に距離に条件を設けなかった場合の経路の抽出結果を示す。図-4と図-5を比較すると、拠点ペア1では本来の第1経路が距離条件を満たさないため、その代替経路が抽出されることがわかる。ここで選ばれた第1経路は目的のノード9へ到達するために1箇所は通過しなければならないリンクの全てが含まれているため、第2経路では最低限の重複として、リンク1を共有するような経路が抽出されている。拠点ペア2の場合は、拠点ペア1の場合と同様に第1経路が距離条件を満たさないため除外され、それに変わる経路が抽出されている。第2経路については変化は見られない。以上のように、距離の制約を課すことで、距離を考慮しなかった場合とは異なる経路が抽出され、場合によっては第1, 第2経路とで、距離制約の有無で経路の構成が大きく変わる可能性もあることが示唆された。

4. まとめと今後の課題

本研究では、災害発生時に災害対応の拠点となる施設間の接続性を確保し、円滑な災害対応を実施可能とする

防災対策を検討するためには、道路ネットワーク上の災害に対する危険箇所を考慮した上で、更に施設間を接続する経路の距離にも制約を設けることが、災害時における道路ネットワークの接続性を評価する上で重要であることを指摘した。これを踏まえて既存研究⁹⁾で提案された防災拠点間を経路上の危険箇所が最も少なくなるような経路を評価する手法を改良し、経路上の危険箇所は可能な限り少なく、かつ所定の距離を満足するような経路を評価する手法を提案した。

提案手法の有効性は単純仮想ネットワークにおける試算から検証を行ったものの、実道路ネットワークにおける試算は行っていない。講演時には実際の道路ネットワークを用いた試算及び、その結果を踏まえた本提案手法の有効性に関する考察を示す。

本研究では拠点ペアごとに、通過する弱点箇所の総数が最小となる2本の経路を評価しているため、拠点ペア全体で通過する弱点箇所の総数が最小となるような最適な経路を求めた場合と結果が異なることが予想される。この点は今後取り組むべき課題と言える。また、拠点間の移動経路として2本のみを考えたが、それ以上の本数を考慮することにも検討の余地がある。

また、本研究では単に道路網上の危険箇所数に着目した指標を提案しており、危険箇所の種類ごとに異なる対策費用や被災した場合の費用や復旧時間の議論に踏み込んでいない。防災対策上、これら要素をいかに扱うべきかは今後の重要な課題と言えよう。

参考文献

- 1) 内閣府：防災情報のページ 阪神淡路大震災教訓情報資料集，
http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/data/detail/1-6-1.html (2018.02.20 閲覧)
- 2) 国土交通省中部地方整備局：緊急輸送ルート選定の考え方について，
http://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/daikibo_saigai/pdf/01.pdf (2018.02.20 閲覧)
- 3) 啓開「くしの歯」作戦，東北地方整備局震災伝承館，
<http://infra-archive311.jp/s-kushinoha.html> (2018.02.20 閲覧)
- 4) 中部地方幹線道路協議会 道路管理防災・震災対策検討分科会，中部版くしの歯作戦，平成26年5月改訂版，2014，
http://www.cbr.mlit.go.jp/road/kanri-bunkakai/pdf/kushinoha_kaitei.pdf (2016.10.31 閲覧)
- 5) 常田賢一：平成28年熊本地震の現地調査による被害の特徴と今後の対応に関する考察一般財団法人 災害科学研究所，平成28年度災害等緊急調査報告書—平成28年4月熊本地震による被害調査—，
http://csi.or.jp/uploads/2016kumamoto_jishin_1v1.pdf (2018.02.20 閲覧)
- 6) 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.
- 7) D'Este, G. M. and Taylor, M. A. P.: Modelling network vulnerability at the level of the national strategic transport network, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 4, No. 2, pp. 1-14, 2001.
- 8) D'Este, G. M. and Taylor, M. A. P.: Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks, Bell, M. G. H & Iida, Y. eds., *The Network Reliability of Transport*, Pergamon, Oxford, U.K., pp. 23-44, 2003.
- 9) 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.4, pp.1_591-1_603, 2018.
- 10) 福岡県：福岡県地震に関する防災アセスメント調査報告書，第3編 被害想定 5.交通施設被害の想定，
http://www.pref.fukuoka.lg.jp/up-loaded/life/69065_17480130_misc.pdf (2018.02.20 閲覧)
- 11) 広島県：広島県地震被害想定調査検討委員会，資料4-2 被害想定手法，
<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/79003.pdf> (2018.02.20 閲覧)
- 12) 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.
- 13) 若林拓史，大野隆晴，鈴木宏章：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. 751-759, 2005.
- 14) 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，行動工学論文集，Vol. 62A, pp. 114-127, 2016.
- 15) 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，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 70, No. 1, pp. 76-87, 2014.
- 16) 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.
- 17) 大澤脩司，藤生慎，中山晶一郎，高山純一：地震に対する道路網脆弱区間評価手法の構築と緊急輸送道路網への適用，土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 4, pp. 1_467-1_478, 2017.
- 18) 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.
- 19) Eppstein, D.: Finding the k Shortest Paths, *SIAM Journal on Computing*, Vol.28, No.2, pp.652-673, 1998.

(Received September 10, 2019)

IMPROVEMENT OF ASSESSMENT FOR DISASTER RESISTANCE ABILITIES
OF ROAD-NETWORK THAT AIMED TO DANGEROUS SECTIONS UNDER THE
NATURAL DISASTER

Shuji OSAWA, Jyunichi TAKAYAMA, Makoto FUJIU and Yuto SHIOZAKI