

地震による道路網の寸断に着目した 脆弱区間の評価に関する研究

大澤 脩司¹・中山 晶一郎²・山口 裕通³・藤生 慎⁴・高山 純一⁵

¹学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: osawa-cd904@stu.kanazawa-u.ac.jp

²正会員 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 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: hyamaguchi@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: fujiu@se.kanazawa-u.ac.jp

⁵フェロー 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

平成28年熊本地震では橋梁の損傷、土砂崩れ、盛土崩壊など様々な要因で、緊急輸送道路を含む多くの道路で通行止区間が発生し、救援活動や緊急輸送などに混乱を生じた。このことから、重要な道路が通行不能となった場合に生じる影響を分析し、対策を検討・実施することが重要である。このような問題意識のもと、著者らは道路の被災が道路ネットワークへ与える影響を分析・評価し、その結果に基づいて防災対策を実施すべき道路の脆弱区間を評価する手法に関して研究している。本研究では特にネットワークで分断が生じる場合を対象に、その原因となるリンクの抽出及び対策優先度の決定手法に関して報告する。

Key Words : earthquake, vulnerability, emergency transportation road, road damage, vulnerable section evaluation

1. はじめに

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、高架構造物の倒壊、沿道建物の倒壊や路面崩壊などにより道路容量が著しく減少した。発災後は避難活動、救急・救助活動、救援活動、復旧・復興活動等に関連した平時とは異なる交通需要が発生したが、主要幹線が被害を受けていたことから、これを補う形で発災翌日の18日に緊急輸送ルートが設定された。しかし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¹⁾。この教訓を踏まえ、今日では災害時に緊急輸送を円滑に行うために緊急輸送道路が設定されている(表-1)。また、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・救援ルートを確保するため、主要な道路において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、甚大な津波被害が予想される東海・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である中部版くしの歯作戦が策定されている⁴⁾。以上のように、過去の震災での教訓を踏まえ、発災後の交通需要に対応するための核となる道路区間の選定と防災対策の実施や、発災後の道路啓開についての検討が進められており、地震時に重要な道路の走行性を確保するための取組が行われている。

一方で、こうした従来の道路防災対策のみでは十分な対応ができない事例も発生している。平成28年4月14日21時26分に前震が、同16日01時25分に本震が発生した平成28年熊本地震において、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⁵⁾をはじめ、橋梁の損傷や土砂崩れ、盛土の崩壊など、様々な要因で緊急

表-1 緊急輸送道路の種別とその位置づけ¹⁾

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

輸送道路を含む多くの道路が通行不能となった。これにより、被災地では発災直後の救援活動や緊急輸送のみならず、復旧・復興期における日常交通まで、道路交通に多大な混乱を生じた。この経験から、災害時の重要道路に位置付けられ、一般道路に比べ優先的な防災対策が実施されてきた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。こうした道路が通行不能となれば、平成28年熊本地震での事例に見られるように、発災直後の災害対応から復旧・復興期まで長い期間に渡って多大な影響が生じることは想像に難しくない。このことから、震災時に通行不能になった場合に、道路網全体でどのような影響が生じるのかという視点を含めて道路網を評価し、事前・事後それぞれの防災を検討・実施することが重要である。このような問題意識のもと、著者らはこれまで地震による道路被害の推定と、推定結果に基づく道路網の脆弱区間の評価手法を構築・提案してきた^{6,7)}。本研究では道路網が分断される状況を対象に、分断の原因となるリンクを評価する。また、これらリンクに対し、分断を防止する上での重要度を評価する手法を提案する。

2. 関連研究と本研究の位置付け

(1) 道路被害の推定手法について

道路被害の推定手法は、例えば鳥澤ら⁸⁾のような震動被害や津波被害のように根本的な原因別に扱う手法と、自治体の被害想定のように個々の被災要因別に被害を推定する2通りに大別される。根本的原因が同じでも、地理的特徴や構造的な特徴など、道路の特徴によって被害の規模・起こりやすさは異なる。このため、本研究は道路被害を被災要因別考える後者のアプローチを採用。地震による道路被害の具体的な要因には、「建物倒壊による道路閉塞」、「橋梁被害による通行止め」、「斜面・切土崩壊」、「盛土崩壊」などが考えられる。本節ではこれら要因別に関連研究を整理し、本研究の位置付けを示す。

建物の倒壊による道路閉塞を対象とした研究として、大都市大震災軽減化特別プロジェクト⁹⁾、赤倉ら¹⁰⁾、源ら¹¹⁾、市川ら¹²⁾がある。大都市大震災軽減化特別プロジェクト⁹⁾では、詳細版と簡易版の2つの手法が開発されている。赤倉ら¹⁰⁾は、個々の建物の倒壊は扱わず、地震動強さと街路幅員との関係から道路閉塞を推定している。源ら¹¹⁾も個々の建物の倒壊は扱わず、幅員と沿道の建物棟数や老朽建物割合から道路閉塞を推定している。市川ら¹²⁾は、道路幅員と瓦礫の流出状況との関係性から道路閉塞を推定している。本研究の目的は道路の被害推定に基づいた道路網の評価である。このため一般に入手可能なデータによる被害推定が可能である必要がある。この点で、大

都市大震災軽減化特別プロジェクト⁹⁾の手法は精緻ではあるが、手法が要求する精度のデータを必ずしも得られない可能性があり、援用が困難である。赤倉ら¹⁰⁾、源ら¹¹⁾の手法では比較的容易に入手可能なデータから道路閉塞を推定できるが、建物の倒壊による道路閉塞の重要な要因である建物高さが考慮されていない。市川ら¹²⁾では建物高さが考慮されているが、地震動強さは考慮されない。以上を踏まえ、データ入手の容易性、建物高さや地震動強さを考慮できるUDDINら¹³⁾の手法を援用する。

橋梁の被害推定は、自治体の地震被害想定に様々な手法が見られる。近年では、例えば首都直下地震による東京の被害想定報告書¹³⁾のような阪神・淡路大震災での橋梁被害を踏まえ、耐震補強の有無ごとに大被害・中小被害それぞれの被害率を乗じて被害箇所数を算出する手法や、大分県地震津波被害報告¹⁵⁾のような建設後の耐震補強の有無、計測震度に基づいて3段階評価する手法、橋梁の建設時に適用された示方書ごとにSI値に基づいて4段階の損傷度で評価する日下部ら¹⁶⁾の手法などがある。本研究では東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会が示した橋梁の被災率曲線¹⁷⁾に基づく被害推定を行う。

斜面・切土の崩壊による被害推定では、例えば大分県¹⁵⁾が気象庁震度階別の被害確率に基づく被害推定を行っている。他にも、自治体の地震被害想定資料を調査・整理した損害保険料算出機構の報告書¹⁸⁾によると、道路防災点検結果を踏まえて被害確率を設定している事例もある。しかし、道路防災対点検の対象箇所以外での被害も想定されるため、本研究では大分県¹⁵⁾の手法を援用する。

道路盛土の被害推定については、新潟県中越地震の被害事例から被害関数を構築した丸山ら¹⁹⁾、全面通行止発生確率を示した常田ら²⁰⁾などがある。しかし道路盛土の位置的な情報が一般のデータからは取得困難であるため、本研究では道路盛土については被害推定の対象外とした。

(2) 道路の脆弱区間の評価手法について

1章で地震時の道路網評価では、通行止めの発生が道路網全体に与える影響を分析することが重要であることを述べた。しかし、自治体の被害想定では、あるメッシュにおける被災道路区間数や、道路区間の通行可能確率での評価に留まっている例がほとんどである。いくつかの自治体では、通行止による影響の評価視野に入れた分析が行われている^(例えば21),22)が、高速道路のインターチェンジ間の不通確率の評価や路線ごとの被害度での評価に留まっている。本研究では道路網全体を評価の対象に含める。

災害時の道路網の機能性評価に関してはこれまで多く研究されている。例えば、連結信頼性の研究分野では、若林ら²³⁾はあるサービスレベル以上での移動が保証される確率的指標として確率重要度指標を提案している。ま

た若林ら²⁴⁾によりこれを改善したクリティカリティ重要度も提案されている。一方で、これら研究^{23), 24)}では災害に対する道路自体の脆弱性は考慮されていない。連結信頼性と類似した概念である脆弱性に着目した原田ら²⁵⁾は接続脆弱性評価手法を提案しているが、落石や斜面崩壊、深刻な交通事故といった単独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、地震災害のような複数の道路が同時多発的に被災する事態は想定していない。実際の地震災害では複数の道路が同時多発的に被災することから、こうした状況を考慮することが不可欠である。

(3) 道路網の耐震化の検討手法に関する研究

道路網の耐震化の検討手法に関する研究としては、能島ら²⁶⁾、喜多ら²⁷⁾、Nagae et al.²⁸⁾などがある。能島ら²⁶⁾は地震時の道路網の交通容量に着目し、最大フローを評価指標とした信頼性解析手法を提案している。ただし、評価結果は解析におけるOD設定に依存する。

喜多ら²⁷⁾はゲーム理論を援用した耐震補強の優先順位設定手法を提案している。しかし、単純なネットワークでの検証に留まっており、実際規模の道路網における適用性は明らかでない。

Nagae et al.²⁸⁾では道路ネットワークの耐震化戦略問題を最適化問題として定式化し、災害によって増加する交通不便益の期待値と耐震化費用の和である社会的費用が最小になるような耐震化戦略を求めている。この中で、交通不便益の期待値を算定するために交通需要を設定する必要があるが、地震時の交通需要には不明な点も多く、必ずしも適切な設定ができるとは限らない。

以上を踏まえ、本研究では解析結果がOD設定に依存せず、不明点の多い地震時の交通需要に関する問題に立ち入らない手法の構築を目指す。また実際の道路網においてその適用性を検討する。

3. 道路被害の推定手法について

本章では道路被害の推定手法について、道路の被害要因ごとに詳細を述べる。本研究では地震による道路の被害要因として、建物倒壊、橋梁損傷、切土・斜面崩壊の3要因を考慮する。道路被害の推定手法には、推定精度は高くとも、推定に用いるデータが一般には入手困難である場合など、援用が困難である手法は援用せず、一般に入手可能なデータを用いる手法で、かつ一定以上の推定精度を有する手法を援用する。

(1) 建物の倒壊による道路閉塞の推定手法

建物の倒壊による道路被害を良好な精度で推定するた

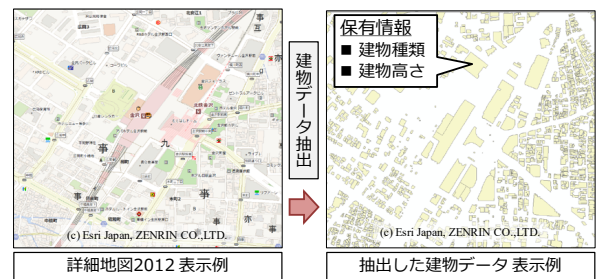


図-1 利用する地図データと抽出した建物データの表示例

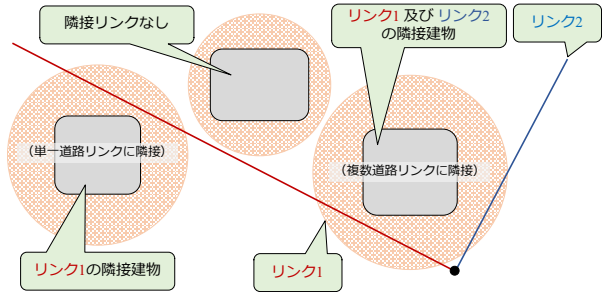


図-2 建物の隣接リンクの決定プロセス 概念図

めには2章に述べたように、個々の建物に対して倒壊判定を実施できること、建物高さを考慮できること、各建物の立地位置での地震動強さを考慮できることという3つの要請を満たす必要がある。本研究では、この条件を満たす手法として、GISで利用可能な市販の地図データから、建物高さを含む建物データを作成する手法を提案し、更にそのデータを用いた建物倒壊による道路閉塞の推定手法を提案したAhmedら¹³⁾の手法を援用する。この手法では、図-1のように、一般の地図データから個々の建物の立地位置と高さを有する建物データを抽出する。また、地図データ上で設定された建物用途から、建物の構造形式を推定する。建物の建築年代に関するデータは得られないため、すべての建物は最新の建築基準で建設されていると仮定し、道路閉塞の発生規模についてその下限値を推定すると位置付けている。

抽出した建物については、さらに図-2に示すように、建物の重心から建物の高さに一致する円形のバッファを内に含まれる道路リンクに隣接した建物であるとする。

建物の倒壊を判定するための基準となる建物の被害関数としては、関数の具体的な数値を公開している南海トラフによる東京の被害想定²⁹⁾に示されている全壊率曲線(図-3、図-4)を建物の被害関数として採用する。

建物倒壊による道路閉塞は、各建物に対して0から1までの範囲で0.1刻みの一様乱数を発生させ、被害関数から得られる建物の全壊確率と比較した時、乱数値が全壊確率以下であれば、その建物は全壊すると判定する。すべての建物の全壊判定が終了した時点で、1棟でも全壊した建物がある道路リンクを閉塞リンクと考える。

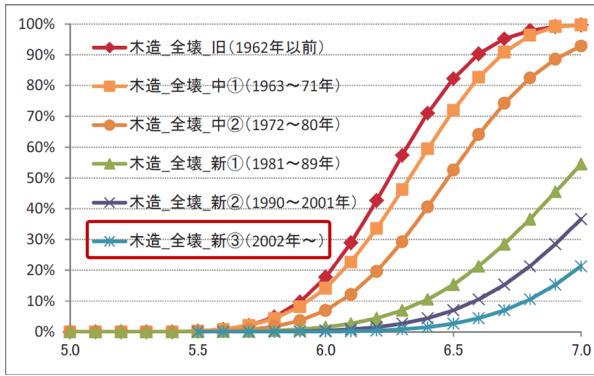


図-3 木造建物の全壊率曲線²⁹⁾

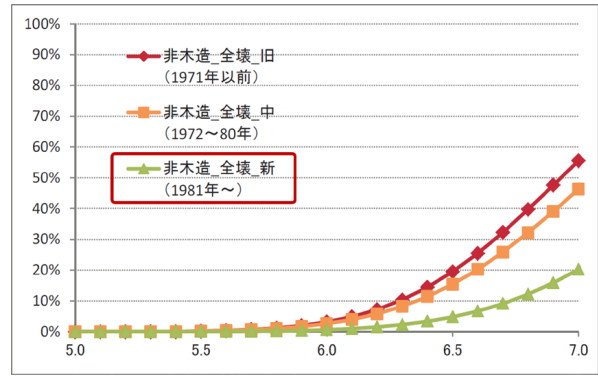


図-4 非木造建物の全壊率曲線²⁹⁾

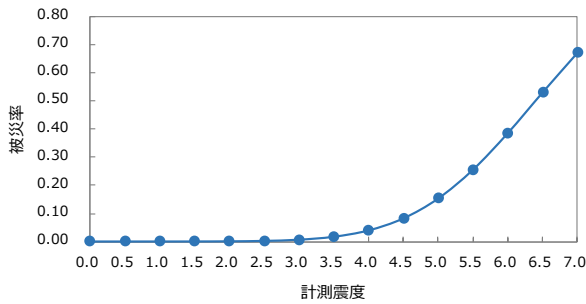


図-5 橋梁の被害率曲線¹⁷⁾

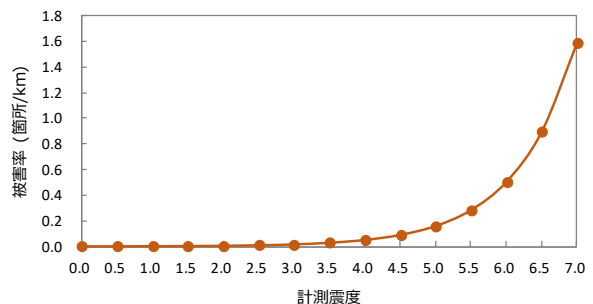


図-6 切土・斜面の被害率曲線¹⁵⁾

表-2 気象庁震度階と計測震度の変換表

気象庁震度階	震度 4	震度 5 弱	震度 5 強	震度 6 弱	震度 7
計測震度	4.0	5.0	5.5	6.0	7.0

(2) 橋梁損傷による道路被害の推定手法

地震による橋梁被害は、東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書¹⁷⁾が示した橋梁の被災率曲線(図-5)を用いて推定する。なお、東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書¹⁷⁾では、被災率は橋梁に何らかの損傷が生じる確率として定義している。本研究では、一度損傷を受けた橋梁は、余震により損傷が拡大する可能性があることから安全上の問題があると考え、損傷した橋梁は通行できないものとする。すなわち、図-5を橋梁部の通行不可率として考える。橋梁の位置的情報は市販の道路網データ³⁰⁾から取得する。

橋梁の損傷・通行不能判定では、建物の倒壊判定と同様に、一様乱数を用いたシミュレーションによって行う。各橋梁に対し、0から1の範囲で0.1刻みの一様乱数を発生させ、被災率曲線から得られる各橋梁の被災率と、発生させた乱数値とを比較し、乱数値が被災率以下であれば、その橋梁は損傷し、通行不能になるとして判定する。

(3) 切土・斜面崩壊による道路被害の推定手法

切土・斜面崩壊による道路被害の推定手法には、道路防災点検の対象外である切土・斜面にも適用可能な手法¹⁴⁾を採用する。この手法では、被害率は気象庁震度階を基準として与えられている。本研究では建物倒壊・橋梁損傷の推定は計測震度を基準としており、基準となる地震動強さの扱いが異なる。基準となる地震動強さの扱いは統一されるべきであるため、本研究では計測震度に基準を統一するため既往手法¹⁵⁾が示す被害率のうち、気象庁震度階を表-2のように変換して被害率をプロットし、近似曲線を導出することで、計測震度ごとの被害率に変換した。その結果、指数近似によって図-6のような被害率曲線が導出された。なお、表-2の変換表のうち、震度4以外は全て前後の震度との計測震度の差は0.5であるため、震度4についても統一して4.5とすることも考えられるが、4.5とした場合より4.0とした場合の方が、作成した近似式の決定係数が良好であったため、本研究では震度4に対応する計測震度は4.0と設定した。

切土・斜面崩壊の影響を受けるリンク(土砂災害警戒リンク)は、図-7のように、土砂災害警戒区域内に含まれる区間とする。土砂災害警戒区域は国土数値情報ダウ

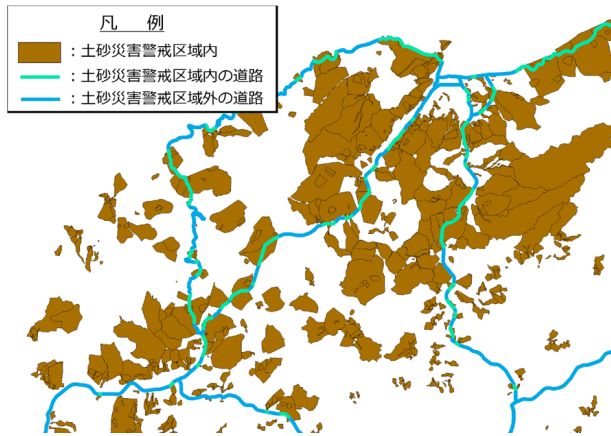


図-7 切土・斜面崩壊の影響を受けるリンクの決定法 概念図

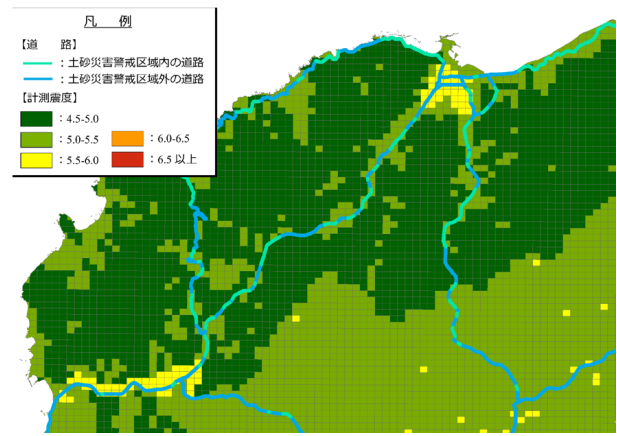


図-8 計測震度ごとの土砂災害警戒リンク長の集計法 概念図

ンロードサービスで公開されているデータ³¹⁾を使用する。

切土・斜面の被害率曲線は、建物の被害関数や橋梁の被害率曲線と異なり、被害率の単位は単位距離あたりの被害箇所数である。このため、切土・斜面による影響を受ける道路リンク長を計測震度別に集計する必要があるが、図-8に示すように、想定地震動強度分布のメッシュ内に含まれる土砂災害警戒リンクの道路リンク長を計測震度別に集計すればよい。

4. 道路網で分断が生じる被災パターンの抽出

(1) 地震時の道路網における脆弱区間の定義

本研究は地震に対して脆弱であり、かつ道路交通上重要な役割を持つ区間を評価することを目的とする。ここで、地震に対して脆弱な区間とは、地震によって被害を受けやすい要素を持ち、かつ通行不能となった場合の影響が大きな区間であると定義する。道路網の構造的な弱点区間でも、その区間が地震に対して頑強であれば、脆弱な区間とはならない。また被害を受けやすい要素を有していても、利用されにくい区間であれば道路交通への影響は少なく、脆弱な区間とはなりえない。以上のような、被害を受けやすく、道路交通への影響が大となる道路区間について、前者に対する評価を道路網の被害推定によって、後者に対する評価を道路網評価によって行う。道路交通への影響としては、孤立地域の発生を意味する道路網で分断が発生する状態を想定し、このような状態を引き起こす道路リンクの被災パターンの抽出と、分断防止のために重要となるリンクの評価を試みる。

(2) 道路網を分断する被災リンクの抽出方法

道路網が分断される状況は、ほとんどの場合、複数の道路リンクが同時に通行不能となることで発生する。このような状態はネットワークのカットを検討することで

分析することが可能である。しかし、その組合せは多数存在するためすべてのカットについて検討することは困難である。この課題に対応するため、本研究では3章に示した道路被害推定手法に基づいて道路の被災パターンを生成し、ネットワークの分断が発生した生成した被災パターンについて、ネットワーク評価を行う。

ここで、本研究の目的を達成するためには、生成した被災パターンにおいて、ネットワークで分断が発生しているのか、分断が発生している場合、その原因はどのリンクなのかを解析する必要がある。著者らはこれまでに最短経路探索に基づくネットワークの分断・分断の原因リンクの解析を提案している⁷⁾。この方法では任意の2地点間で分断が生じていることと、その原因リンクを判断しているが、ただ1つの分断断面しか判断することができない。すなわち、ネットワークが3つ以上に分断されているような場合には、その一部しか判断できない。この問題を回避するため、本研究ではリンクのコストを無視し、単純なネットワーク構造の探索のみに着目する。これは、分断（孤立地域）が発生したネットワークでは、ある地点への到達時間の短縮よりも、分断を解消しネットワークの接続性を保つことの優先度の方が高いとの立場に立ったものである。具体的には、適当なノードを探索開始点として、グラフ探索アルゴリズムの援用によって、ノードの接続関係を探る。このとき、通常の探索アルゴリズムでは、分断の発生しているネットワークでは探索開始ノードと連結関係にあるノードの集合（連結成分）のみしか探索できない。そこで、探索アルゴリズムを以下のように拡張する（図-9参照）。

- i) 探索開始ノードから、連結関係にあるすべてのノードを探る。
- ii) 探索済みノード数 n_{es} をカウントし、ネットワーク全体のノード数 N と比較する。 $n_{es}=N$ のとき、探索を終了する。 $n_{es} \neq N$ のとき、未探索のノードを開始点として、i)に戻る。

以上の拡張により、ノードを連結成分ごとに分類することが可能となり、ネットワークの分断の有無が把握できる。分断の原因であるリンクは、リンクを形成する2つのノードについて、各ノードが所属する連結成分を比較することで判断する。具体的には、リンクを形成する2つのノードを便宜的に、始点ノードを n_{sp} 、終点側ノードを n_{ep} 、各ノードが所属する連結成分をそれぞれ c_{sp} 、 c_{ep} と区別した時、 $c_{sp} \neq c_{ep}$ であれば、そのリンクは連結成分 c_{sp} と c_{ep} とを分断するリンクの1つであると判断する(図-10)。

(3) リンクの重要度評価方法

防災対策を検討・実施するためには、抽出された分断の原因となるリンクのうち、いずれに対して対策を実施すべきなのか、その重要度が示されることが望ましい。前節に示したネットワーク構造の探索手法を用いることで連結成分ごとにノードを分類可能である。そこで、同一連結成分に属するリンクは1つのノードにまとめる(これを集約ノードと呼ぶ)ことにし、ネットワークを集約化することを考える。ここで、簡単のためにネットワークは無向グラフとして考える。このように考えると、連結成分間に存在する分断原因となるリンクも1つのリンクに集約されると考えることができる(これを集約リンクと呼ぶ)。ここで集約後の各ノードの重要度を定義することを考えよう。平時の道路ネットワークでは分断は

発生しておらず、ネットワークは1つの連結成分で構成されている。すなわち平時の連結成分は N 個のノードで構成されている。災害時のネットワークは I 個に分断されているとする。このとき、各集約ノードを構成するノード数を $nc_i (i=1, \dots, I)$ とする。ここで、式(1)に示すように、ネットワークの総ノード数に対する各集約ノードの構成ノード数の比をとる。すなわち式(1)は平時のネットワークに対して各集約ノードがどの程度の連結度を持つのかを示す指標として考えることができる。

$$CR_i = \frac{nc_i}{N} \quad (i = 1, \dots, I) \quad (1)$$

各集約ノードは、分断の原因である集約リンクが仮に通行可能であれば、さらに大きな集約ノードとしてまとめることができる。すなわち、 CR_i の値が1に近づいていく。分断されたネットワークにおいて、平時の連結状態に近づけていくためには、 CR_i 値が大きい連結成分同士を連結させることが重要となる。すなわち、このような特徴を持つ集約ノード同士を連結する役割を持つ集約リンクほど重要度が高いと考えることができる。そこで、集約ノード i と集約ノード j を結ぶ集約リンクを cl_{ij} とし、その重要度を式(2)で評価する。式(2)は集約リンク cl_{ij} が通行可能とすることで集約ノード i と集約ノード j とが連結してできあがる新たな集約ノードの CR 値に等しいことを示しており、この値が大きくなるような集約リンクほど、重要度が高いと判断できる。

$$II_{cl_{ij}} = \frac{nc_i + nc_j}{N} = CR_i + CR_j \quad (2)$$

式(2)のように評価することで、ネットワークの縁付近に存在するために分断されやすいリンクの影響を除外することができる。式(2)では集約リンク cl_{ij} の重要度を評価したが、当初の目的である防災対策の検討・実施のためには、元のネットワークにおける各リンク l_a の重要度が評価されていることが望ましい。そこで、式(3)のように $II_{cl_{ij}}$ を集約リンク cl_{ij} を構成するリンクの数 $m_{cl_{ij}}$ で除して評価する。これは、連結成分間を連結できるリンクが1本しかない場合と、複数のリンクが存在する場合とでは1本あたりのリンクの重要度は異なることを考慮したものである。

$$II_{l_a} = \delta_{ij,a} \frac{II_{cl_{ij}}}{m_{cl_{ij}}} \quad (3)$$

ここで、 $\delta_{ij,a}$ はリンク l_a が集約リンク ij に含まれる場合に1、そうでない場合は0をとる変数である。

以上のような評価指標で、ある分断ネットワークにおける各分断原因リンクの重要度が評価可能である。本研究では分断ネットワークは道路被害推定によって決定される。道路被害推定では結果の一般性を確保するため、十分な数の被災リンクパターンを生成する必要がある。

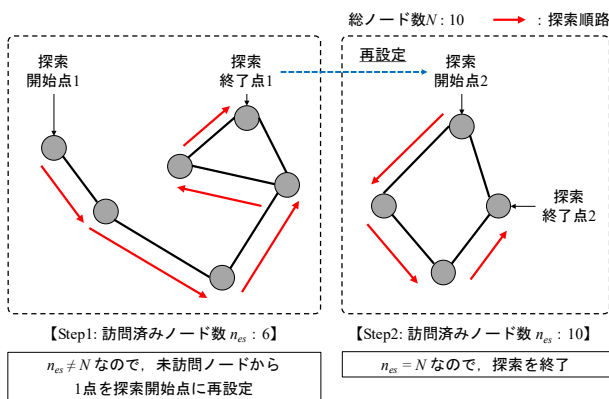


図-9 ネットワーク構造の探索アルゴリズム概念図

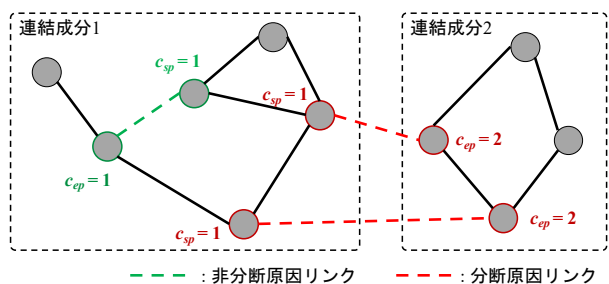


図-10 分断原因リンク概念図

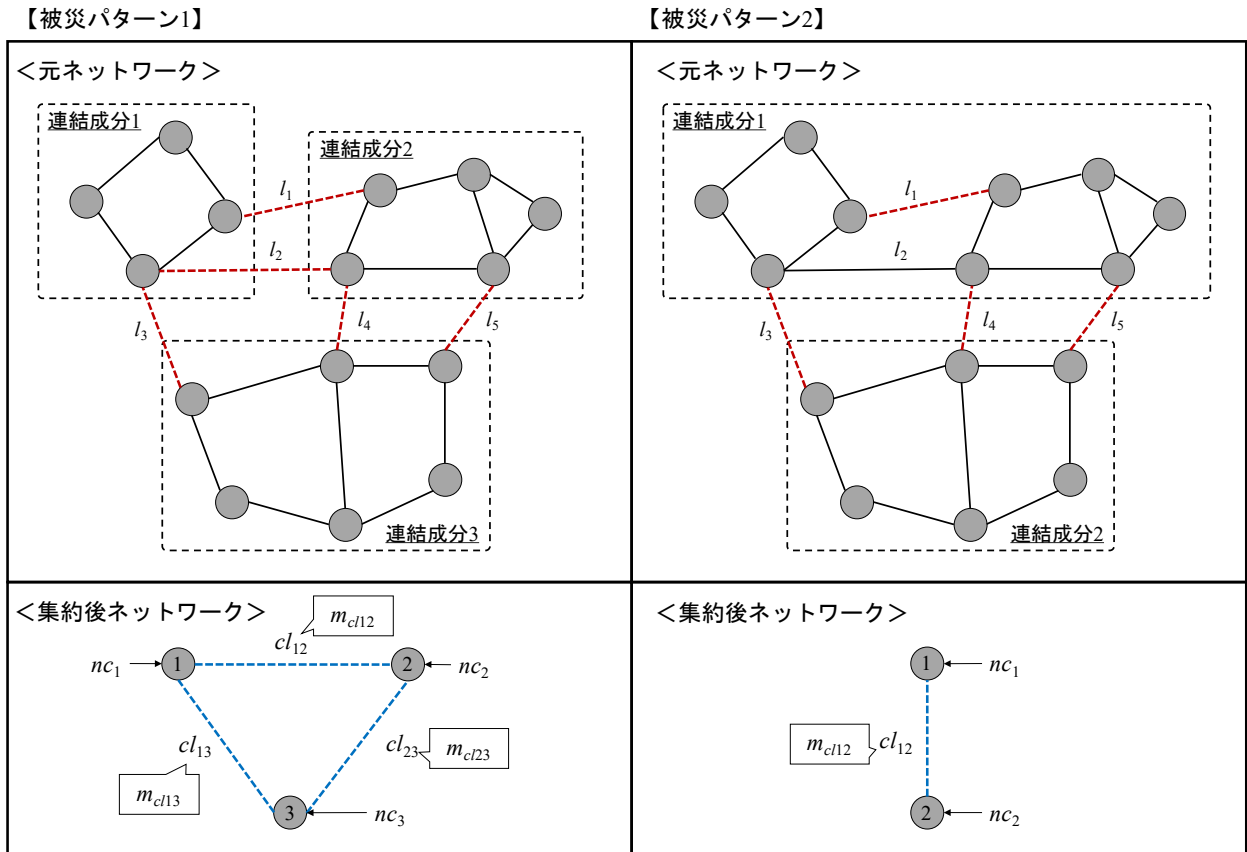


図-11 リンク重要度の計算手順例示のための単純なネットワーク図

表-3 単純ネットワークの条件設定

被災パターン1			被災パターン2		
ネットワーク条件	値	詳細	ネットワーク条件	値	詳細
nc_1	4	連結成分1のノード数	nc_1	9	連結成分1のノード数
nc_2	5	連結成分2のノード数	nc_2	6	連結成分2のノード数
nc_3	6	連結成分3のノード数			
m_{cl12}	2	l_1, l_2	m_{cl12}	3	l_3, l_4, l_5
m_{cl13}	1	l_3			
m_{cl23}	2	l_4, l_5			

このため、様々なパターンの分断ネットワークが生成されることになり、そのネットワークに対応した分断原因リンクの重要度が評価されることになる。そこで、分断が発生するような状態を想定したときの各リンクの対策優先度（重要度）を、式（4）のように定義する。式（4）は分断ネットワークにおける各リンクの平均的な重要度と解釈することができる。

$$II_{l_a}^* = \frac{II_{l_a}}{nd_{l_a}} \quad (4)$$

ここで、 nd_{l_a} ：リンク l_a が分断原因リンクであった回数

(4) リンク重要度の計算例

図-11に示す単純なネットワークを用いて、前節に示したリンク重要度の計算例を示す。本節では2つの被災パターンが与えられた場合のリンク重要度の計算例を示す。

図-11の単純ネットワークにおいて、赤の破線は元ネットワークにおける通行不能リンク、青の破線は集約後のネットワークにおける集約リンクを示している。灰色の丸はノードを示しており、集約後のネットワークにおけるノード内の数字は、連結成分の番号に対応している。図のようなネットワークが与えられた時、ネットワークに関する条件は表-3のように整理される。まず、

表-4 単純ネットワークにおけるリンク重要度の評価過程

被災パターン1		被災パターン2	
集約ノード	CR_i	集約ノード	CR_i
1	0.267	1	0.600
2	0.333	2	0.400
3	0.400		
集約リンク	II_{clij}	集約リンク	II_{clij}
cl_{12}	0.600	cl_{12}	1.000
cl_{13}	0.667		
cl_{23}	0.733		
リンク重要度	II_{la}	リンク重要度	II_{la}
l_1	0.300	l_1	0.000
l_2	0.300	l_2	0.000
l_3	0.667	l_3	0.333
l_4	0.367	l_4	0.333
l_5	0.367	l_5	0.333

表-5 単純ネットワークにおけるリンク重要度評価結果

総合評価 II_{la}^*					
リンク	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
nd_{la}	1	1	2	2	2
II_{la}^*	0.300	0.300	0.500	0.350	0.350

各集約ノードの評価値 CR_i について、各被災パターンともに集約ノード1を例に説明する。連結成分1のノード数 n_{cl} はパターン1では4、パターン2では9である。したがって、評価値 CR_1 はそれぞれ $4/15 \cong 0.267$ 、 $6/15 \cong 0.400$ となる。次に、集約ノード1と2間のリンクである cl_{12} を例に集約リンクの評価値 II_{clij} を求める。 II_{clij} はリンク両端の集約ノードの評価値の和であるので、 $II_{cl_{12}}$ はそれぞれ、 $0.267+0.333=0.600$ 、 $0.600+0.400=1.000$ となる。パターン2では集約リンク cl_{12} が連結であると、ネットワーク全体が連結状態となる、すなわちすべてのノードが連結状態となるので、評価値が1となっている。最後に、リンク重要度 II_{la} は、各リンクが含まれる集約リンクの評価値 II_{clij} を、集約リンクに含まれるリンク数 m_{clij} で除すことで得られるので、 l_3 を例にとると、パターン1では $0.667/1=0.667$ 、パターン2では $1.000/3 \cong 0.333$ となる。なお、パターン2では l_1 および l_2 はいずれの集約リンクにも属さないため、その評価値は0となる。以上を整理すると、表-4のような結果を得ることができる。この結果から、すべての被災パターンを総合的に解釈したときのリンクの重要度 II_{la}^* は表-5のように計算され、リンク l_3 が最も重要なリンクであると結論付けられる。

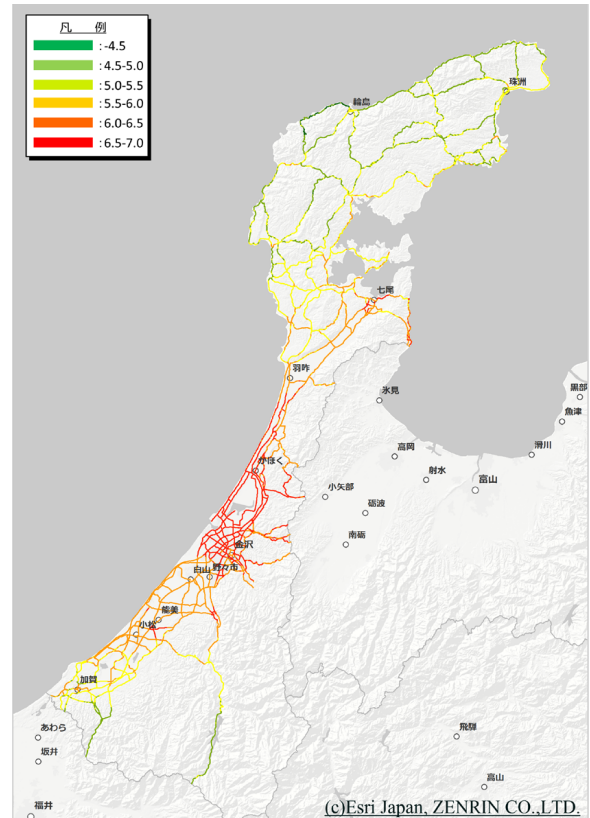


図-12 石川県の緊急輸送道路における50年間超過確率2%となる計測震度の分布

5. 実際の道路網への適用

(1) 適用条件

本章では、4章で示した災害によって分断されたネットワークにおけるリンクの重要度評価方法について、石川県の緊急輸送道路ネットワークを対象とした分析により検討する。なお、対象道路ネットワークの大きさはリンク数3,150、ノード数2,190である。

本研究では、長期的な視点での緊急輸送道路における拠点間を到達不能とするような脆弱区間を評価することを目的とし、想定ハザードとして、防災科学研究所のJ-SHIS地震ハザードステーションで公開されている確率的地震動予測地図のうち、50年間超過確率2%となるような地震動を想定地震動として設定する。図-12に対象道路ネットワークにおける想定計測震度の分布を示す。

解析結果の一般性を確保するため、解析では被災リンクパターンの生成は1万回実施し、各パターンについてネットワークの分断の有無を判断する。

(2) 適用結果

図-13に対象とした石川県の緊急輸送道路ネットワークにおける、式(4)に基づくリンク重要度の評価結果を示す。この図より、県中央部から南部にかけて位置する

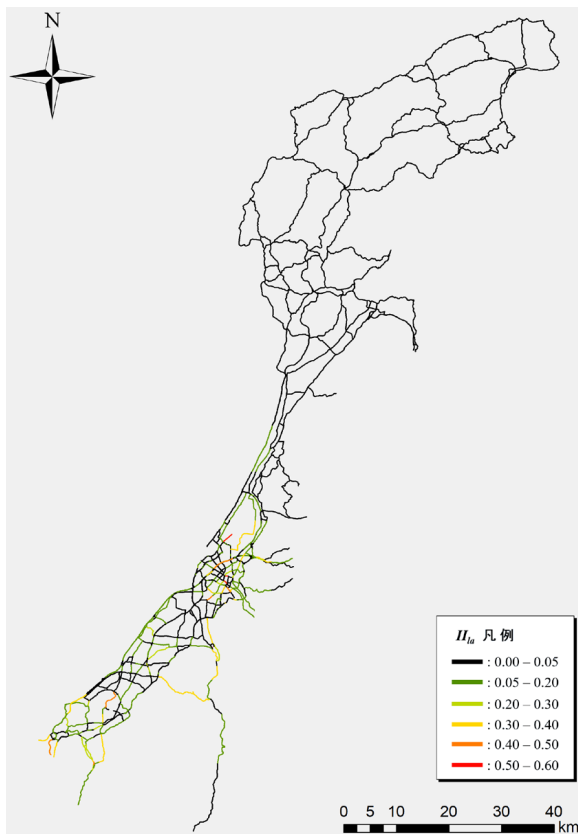


図-13 石川県の緊急輸送道路網における
リンク重要度の評価結果

金沢都市圏や小松市など、石川県でも人口規模の大きい都市周辺のリンクの重要度が高く評価されており、県北部に位置する能登半島のリンクは軒並みリンク重要度が低く評価されていることが読み取れる。このような結果となった理由の1点目として、金沢都市圏及び小松市周辺は緊急輸送道路が密に存在しており、1つあたりの連結成分に含まれるノード数が多くなりやすい（大きな連結成分になりやすい）傾向にあることが考えられる。式(4)による評価では、通行可能であればより大きな連結成分を形成できるようなリンクの重要度が高く評価される。金沢都市圏周辺のリンクはこの条件を満たしていることになる。2点目の理由として、県北部の能登半島では土砂災害警戒区域が多く存在することに加え、緊急輸送道路網も疎であることから、1つの連結成分が小さくまとまりやすいという特徴が挙げられる。こうした小さなまとまりの連結成分同士を結ぶリンクは式(4)による評価では低評価となる。このため、重要度が高く評価リンクは大きなまとまりである金沢都市圏のせいぜい北縁付近に位置するという結果になったと考えられる。

現段階では、OD設定に依らずに道路ネットワークの重要リンクを評価できるという点で有意性が認められるが、提案した評価指標では、1対1の連結成分間での連結度の

向上効果しか考慮できていない。図-12に示したように、大きなまとまりを持つ連結成分に隣接するリンクを頑強とすれば、本来は孤立していた地域へのアクセス性は大きく改善されることになるため、そうしたリンクが重要なリンクの1つであることに疑いの余地はない。しかし、本分析で示した能登半島方面については、小さなまとまりの連結成分に多数分断されていたとしても、それらを総合すれば金沢都市圏や小松市に次ぐ規模のまとまりになるものである。したがって、直接的な連結関係はなくても、いくつかの連結成分を介することで連結されるような成分についても連結効果の計測に含めることができれば、より有用な指標となりうると考えられる。

6. まとめと今後の課題

(1) まとめ

本研究では、平成28年熊本地震での被災事例を踏まえ、道路ネットワークにおいて被災・通行不能区間が発生した場合に、ネットワーク全体でどのような影響が生じるかを分析し、事前・事後それぞれの防災対策を検討・検討することが重要であるという問題意識のもと、地震による道路被害の推定と、推定結果に基づく道路網の脆弱区間の評価手法を構築・提案を試みた。特に、地震による道路の被災がもたらす影響として、道路ネットワークが分断されるような状況に着目し、そのような事象を引き起こすリンクの抽出方法を提案した。抽出されたリンクに対し、防災対策上の重要度を検討するための指標として、ネットワークの連結状態を平時の状態に近づける効果の大きいリンクほど重要であるという立場でのリンク重要度評価指標を提案した。また実際の石川県の緊急輸送道路網を対象とした分析を行い、まとまりの大きな連結成分と、その周囲に位置する孤立可能性の高いまとまりが小さな連結成分とを連結する上で重要なリンクを評価可能であることの示唆を得た。

(2) 今後の課題

本研究で提案した評価指標は直接的な接続関係にある連結成分間での連結性能の向上効果を評価するものであり、間接的な接続関係にある連結成分同士の連結性能の向上効果は考慮されていない。ネットワーク全体で連結性能を向上させるためには、こうした間接的接続関係にある成分間の連結性能の向上効果を含めた枠組みでの評価指標に拡張することが課題である。

本研究では各連結成分の連結度（まとまり）をネットワークの総ノード数に対する成分内のノード数との比で表現した。これはノードの重みを一律に捉えた立場での評価であるが、ノードには単純な交差点であるもの、物

資輸送の拠点となるもの、負傷者搬送の拠点となるものなどが存在し、ノードが様々な特性を有すると考えられる。成分内のノード数は少ないが、そのノードが災害対応上重要な役割を担うものである場合、重みを一律で扱うことは適切ではない。こうしたノードの属性や重みの設定に関する検討も必要である。

また、本研究で提案する道路網評価手法は、地震に対する道路被害推定に基づくものであり、評価結果はその精度に左右される。このことから、単純なモンテカルロ法から工夫した被災リンクパターンの生成手法に改善するなど、道路被害推定の精度向上が望まれる。

謝辞：本研究の一部は国土交通省新道路技術会議において採択され、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究により実施したものである。ここに記して感謝いたします。

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/datadetail/1-6-1.html(2017.7.31 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
(2016.10.31 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>, (2016.10.31 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, (2017.7.31 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(2017.7.31 閲覧)
- 6) 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の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 (構造・地震工学), Vol.73, No.4, 2017 (in press) .
- 7) 大澤脩司, 中山晶一郎, 藤生慎, 高山純一：地震による道路被害の影響を考慮した道路ネットワーク評価法に関する研究, 第55回土木計画学研究・講演集, CD-ROM, 2017
- 8) 鳥澤一晃, 吉田聡, 佐土原聡：サプライチェーンのBCPのための道路網被害予測と事業継続への影響評価, 日本地震工学会論文集, 第14巻, 第2号, pp.84-103, 2014.
- 9) 文部科学省, 大都市大震災軽減化特別プロジェクト総括成果報告書 III.1 震災総合シミュレーションシステムの開発, 平成19年3月, http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/gaibu/ddt-all/view/0614s_308.pdf, (2017.7.31 閲覧)
- 10) 赤倉康寛, 高橋宏直, 中本隆：大規模地震による街路閉塞予測シミュレーションの構築, 土木学会論文集, Vol.1999, No.632, pp.77-92.
- 11) 源貴志, 成行義文, 天野健, 平尾潔：GISによる道路網ネットワーク及び属性データの作成方法と道路閉塞予測への適用, 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.127-138, 2006.
- 12) 市川総子, 阪田知彦, 吉川徹：建物倒壊および道路閉塞のモデルに化による避難経路の危険度を考慮した避難地への到達前能性に関する研究, GIS—理論と応用, Vol.12, No.1, pp.47-56, 2004.
- 13) Ahmed WAHID UDDIN, 大澤脩司, 藤生慎, 高山純一, 中山晶一郎：緊急輸送道路の災害リスクを考慮した都道府県庁と市町村役場間の到達可能性に関する分析, 土木学会論文集A1, Vol.72, No.4, pp.756-767, 2016.
- 14) 東京都：東京都防災ホームページ 首都直下地震による東京の被害想定報告書, 手法編 5 交通被害,
http://www.bousai.metro.tokyo.jp/_res/projects/default_project/_page_001/000/422/shuho5.pdf(2016.10.31 閲覧)
- 15) 大分県：大分県地震津波被害調査報告について, 第8編 ライフライン・交通施設被害の想定,
http://www.pref.oita.jp/uploaded/life/287382_350112_misc.pdf(2017.7.31 閲覧)
- 16) 日下部毅明, 谷屋秀一, 吉澤勇一郎：道路施設に対する地震の防災投資効果に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, 第160号, 2004.
- 17) 公益社団法人土木学会 地震工学研究委員会：東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会 最終報告書, 2015.
- 18) 損害保険料算出機構：国・自治体の地震被害想定における被害予測手法の調査(平成25年度調査) 報告書, 2014.
- 19) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之：新潟県中越沖地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集A, Vol.64, No.2, pp.208-216, 2008.
- 20) 常田賢一, 小田和広, 鍋島康之, 江川祐輔：新潟県中越地震における道路施設の被害水準と道路機能の特性, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 論文番号173, 2005.
- 21) 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/uploaded/life/69065_17480_130_misc.pdf(2016.10.31 閲覧)
- 22) 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>(2017.7.31 閲覧)
- 23) 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.
- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) 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, No.J-12, pp.3205-3210, 1998.
- 27) 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.
- 28) Nagae, T., Fujihira, T. and Asakura, Y.: Anti-seismic reinforcement strategy for an urban road network, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol.46, No.5, pp.813-827,2012
- 29) 東京都防災会議, 南海トラフ巨大地震等による東京の被害想定報告書 第 3 部被害想定手法 4-2 各被害の想定手法, 2013,
http://www.bousai.metro.tokyo.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/000/402/part3-4-2.pdf (2016.10.31 閲覧) .
- 30) Esri ジャパン: ArcGIS データコレクション 道路網,
<http://www.esri.com/products/arcgis-data-collection-network/specifications/spec2016/>(2017.7.31 閲覧)
- 31) 国土交通省国土政策局国土情報課: 国土数値情報 ダウンロードサービス, 国土数値情報 土砂災害警戒区域データ,
http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A33-v1_3.html(2017.7.31 閲覧)
- (???)受付)

A STUDY ON EVALUATION OF VULNERABLE SECTION CONSIDERING ROAD NETWORK DAMAGE ON EARTHQUAKE

Shuji OSAWA, Shoichiro NAKAYAMA, Hiromichi YAMAGUCHI, Makoto FUJIIU
and Jyunichi TAKAYAMA