

# 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

大澤 脩司<sup>1</sup>・中山 晶一郎<sup>2</sup>・藤生 慎<sup>3</sup>・高山 純一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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:s.osawa.ku.sed@gmail.com

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>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、地震時には重要な道路が被災することを念頭に置き、重要な道路が通行不能となった際に道路交通へ与える影響を分析・評価し、対策を行っていくことが重要である。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。これまで、脆弱区間を被災により発生する迂回時間と、拠点間を到達不能とする被災区間の空間分布によって評価する手法を提案している。本研究では特に拠点間を到達不能とする場合について、そのような事象を引き起こす要因となる被災区間の組合せ及びその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て、平時とは異なる交通需要が発生したが、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<sup>1)</sup>。この教訓を踏まえ、今日では地震直後から発生する緊急輸送を円滑に行うため、表-1<sup>2)</sup>のような位置づけで、緊急輸送道路が設定されている。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<sup>3)</sup>。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について、中部版くしの歯作戦が策定された<sup>4)</sup>。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・防災対策や、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

表-1 緊急輸送道路の種類とその位置づけ

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

取組が多くなされている。

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<sup>9)</sup>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から避難生活における日常交通まで、被災地の道路交通事情は大きく混乱した。このことから、重要な役割を果たすと位置付けられた道路であっても、地震時に通行不能となる被害が発生する可能性は否定できない。こうした道路で通行不能区間が発生すれば、被災地では交通需要に対応できなくなり、移動が制限される事態が発生することが容易に想定される。したがって、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考え。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・提案を行っている<sup>9)</sup>。本研究では道路網の脆弱区間評価について、拠点間に到達不能とする事象に繋がる道路リンクのクリティカルな被災ペアを抽出することを目的とする。また、抽出されたクリティカルな被災ペアに対し、対策の優先度を検討するための指標を提案する。

## 2. 関連研究と本研究の位置付け

### (1) 道路の被害推定手法について

道路被害の推定手法としては、例えば鳥澤ら<sup>7)</sup>のように、個々の被災要因を、被害を引き起こす根本的な原因別に統合的に扱うという手法や、自治体の被害想定で採用されているような個々の被災要因別に道路被害を推定するという2通りの手法に大別される。鳥澤ら<sup>7)</sup>のアプローチは、道路被害を比較的容易に推定できるという点で優れている。しかし、同じ震動被害であっても、道路の地理的特徴、構造的特徴など、道路が有する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、本研究では道路被害を被災要因別に分類して推定するというアプローチを採る。

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<sup>8)</sup>、赤倉ら<sup>9)</sup>、源ら<sup>10)</sup>、市川ら<sup>11)</sup>がある。大都市大震災軽減化特別プロジェクト<sup>7)</sup>では、詳細に道路閉塞を判定する手法と、簡易に道路

閉塞を判定する2つの手法が開発されている。赤倉ら<sup>9)</sup>は、建物個別の倒壊を考慮するのではなく、地震動強さと街路幅員との関係から道路閉塞を推定する手法を提案している。源ら<sup>10)</sup>も赤倉ら<sup>9)</sup>と同様に建物個別の倒壊は考慮せず、道路幅員と、道路沿道の建物棟数や老朽建物割合から建物倒壊による道路閉塞を評価している。市川ら<sup>11)</sup>では、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。本研究は、道路の被害推定手法を活用した道路網の脆弱区間評価手法を構築することを目的としている。このため、一般に入手可能なデータを用いた被害推定が可能でなければならない。この点で、大都市大震災軽減化特別プロジェクト<sup>8)</sup>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ることから、援用は困難である。赤倉ら<sup>9)</sup>、源ら<sup>10)</sup>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<sup>11)</sup>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。以上を整理すると、建物倒壊による道路閉塞の推定手法には、個々の建物データを一般的なデータから入手可能であること、建物高さを考慮できること、地震動強さを考慮できることが求められる。本研究ではこれらの要請を満たす手法を提案したAhmedら<sup>12)</sup>の手法を用いて、建物倒壊による道路閉塞を推定する。

橋梁の被害推定については、自治体の地震被害想定において、これまで多くの手法が用いられている。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<sup>13)</sup>のように、阪神・淡路大震災で震度6強以上のエリアにおいて被害が発生したことを踏まえ、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という手法や、大分県地震津波被害報告<sup>14)</sup>のように、示方書、建設後の耐震補強の有無と計測震度を考慮して、支障影響度を3段階でランク評価するといった手法、日下部ら<sup>15)</sup>が示した橋梁の建設時に適用された示方書ごとにSI値の大きさによって、無被害から落橋・大損害までの4段階の損傷度で評価する手法などがある。本研究が目指す道路網の脆弱区間評価では本研究ではこれら段階的評価ではなく、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<sup>15)</sup>を用いる。

地震による斜面・切土の被害推定については、例えば大分県<sup>14)</sup>では、秋田県が1997年に地震被害調査報告書で示した気象庁震度階別の切土・斜面の被害確率を用いて、被害を推定している。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<sup>17)</sup>によると、道路防災点検における評価ランク及び気象庁震度階別に切土・斜面の震度別被害確率を設定している事例もある。切土・斜面の中には道路防災点検の対象外であ

る箇所が含まれることも想定されることから、本研究では秋田県が1997年に示した被害率を援用する。

道路盛土の被害推定については、新潟県中越地震の被害データを用いて、高速道路の盛土部における地震動強さと被害との関係を統計的に分析し、被害関数を構築した丸山ら<sup>18)</sup>、同地震における現地調査と関係資料から道路盛土・斜面の被害に起因する全面通行止発生確率を示した常田ら<sup>19)</sup>などがある。道路盛土の崩壊は、地震時の道路の被害要因として考慮すべき重要な要因の1つであるが、道路盛土の位置的な情報は一般に入手可能なデータから得ることが困難である。このため、本研究では道路盛土については被害推定から除外する。

## (2) 道路の脆弱区間の評価手法について

地震時の道路網の被害推定では、既述のように、被害の可能性を道路区間単体の通行不能確率で評価するだけでなく、通行止めの発生がネットワーク全体へ与える影響を分析することが非常に重要である。利用される経路の中で特に重要な区間を把握することや、防災対策の効果が高い区間を把握することは、効果的な防災対策を検討・実施する上で重要である。しかし、自治体の被害想定の中では、あるメッシュ内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、道路ネットワークでの移動性を視野に入れた分析を行っている<sup>(例えば20),21)</sup>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、地震発生直後における重要拠点間の移動性に着目し、ネットワーク全体へ影響を及ぼす脆弱な区間を評価する。

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。災害時を視野に入れた研究として、連結信頼性に関する研究がある。例えば、若林<sup>22)</sup>は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して確率重要度指標を提案している。更に若林ら<sup>23)</sup>では確率重要度の課題であった信頼度の極めて高い道路区間の信頼度を更に改善することは困難であることを考慮したクリティシティ重要度を提案している。一方で、これら研究<sup>22), 23)</sup>では害に対する道路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<sup>24)</sup>は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途絶する事態は想定していない。本研究で着目する拠点間が到達不能となるような事象は、複数の道路が同時多発的に途絶することで発生することが多い。より実際の被害形態に近い形で分析を行うためには、

同時多発的な道路被害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<sup>25)</sup>、喜多ら<sup>26)</sup>、Nagae et al.<sup>27)</sup>などがある。能島ら<sup>25)</sup>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の提案している。しかし、同時に複数のODパターンで道路網が利用されることは考慮されていない。

喜多ら<sup>26)</sup>はゲーム理論を援用し、各道路構造物の耐震レベルの向上による効用と道路ネットワーク全体の効用が同時に最大になるような道路構造物の耐震補強の優先順位設定を行う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、実際の道路網における適用性は明らかでない。また、道路網の特性として最大フローを考慮しているが、リンク単体での最大フローであり、任意地点間の移動は考慮されていない。

Nagae et al.<sup>27)</sup>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、本研究では複数のOD設定での評価が可能であり、不明点の多い地震時の交通需要に関する問題に立ち入る必要がない手法の構築を目指し、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

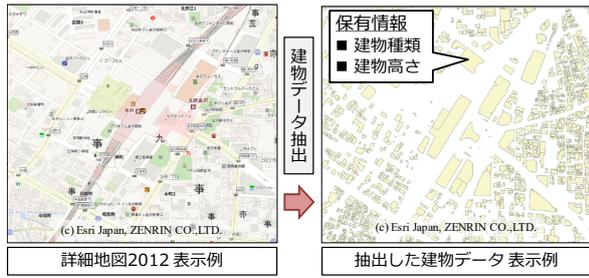


図-1 利用する地図データと抽出した建物データの表示例

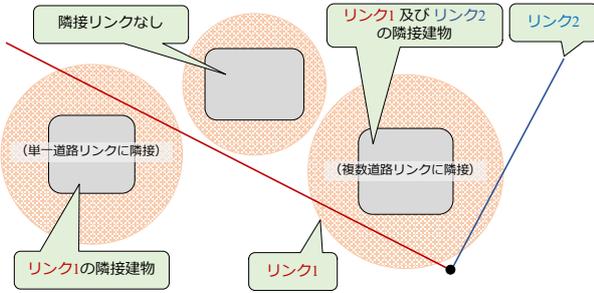


図-2 建物の隣接リンクの決定プロセス 概念図

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<sup>12)</sup>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含む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<sup>28)</sup>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。

## (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<sup>16)</sup>が示した橋梁の被災率曲

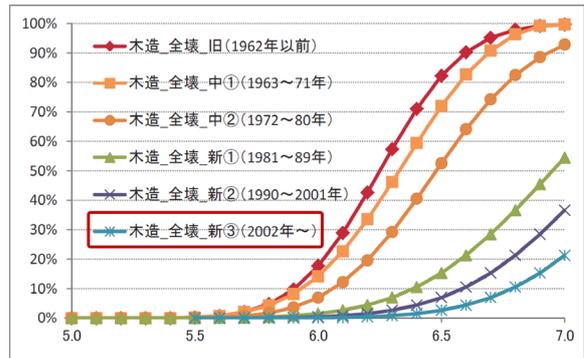


図-3 木造建物の全壊率曲線

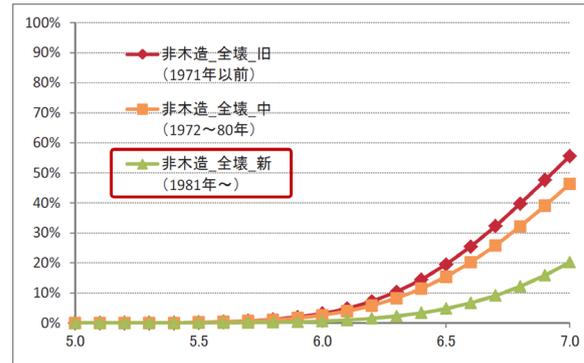


図-4 非木造建物の全壊率曲線

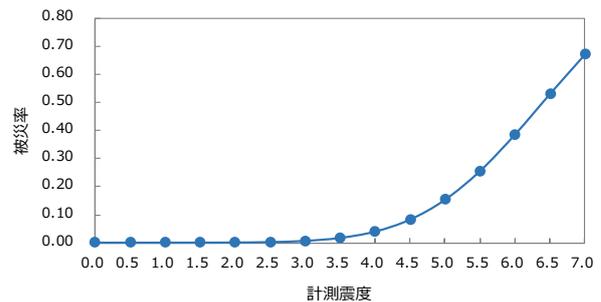


図-5 橋梁の被災率曲線<sup>16)</sup>

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<sup>16)</sup>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<sup>29)</sup>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。

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

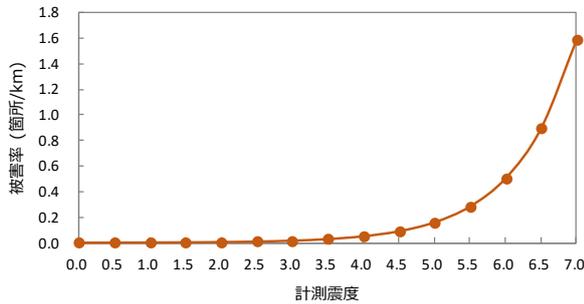


図-6 切土・斜面の被害率曲線

(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<sup>14)</sup>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<sup>14)</sup>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ンロードサービスで公開されているデータ<sup>30)</sup>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. 拠点間を到達不能とす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

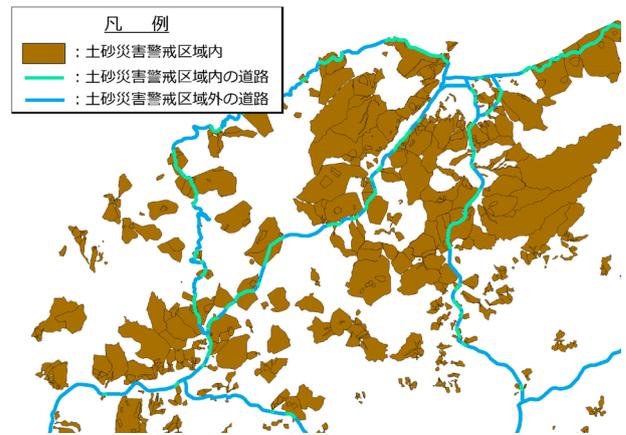


図-7 切土・斜面崩壊の影響を受けるリンクの決定法 概念図

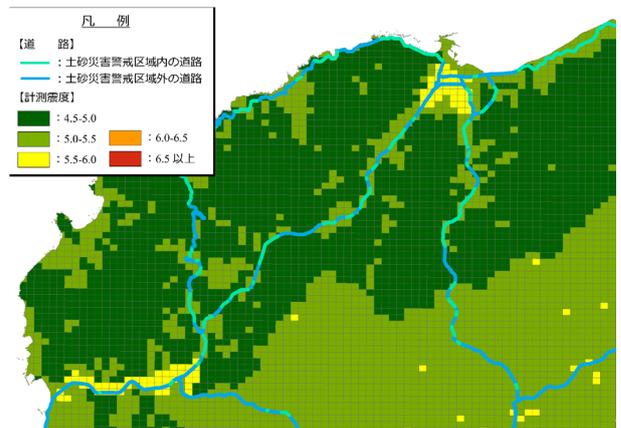


図-8 計測震度ごとの土砂災害警戒リンク長の集計法 概念図

本研究では、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。道路ネットワークの構造的な弱点区間であっても、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、利用頻度が低い区間であれば、ネットワークへの影響は少なく、やはり脆弱な区間とはなりえない。このような被害を受けやすく、かつ通行不能による影響が大となる道路区間を本研究では前者に対して道路網の被害推定によって、後者は道路ネットワーク評価によって行う。通行不能による影響としては、ある地域の孤立発生を意味する拠点間が到達不能となる状態を想定し、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を抽出することを試みる。

(2) 拠点間を到達不能とする被災パターンの抽出方法

拠点間（任意地点間）が到達不能となる状況は、多く

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。これはネットワークが2分されている状態に他ならない。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、その組合せは複数存在し、さらにそれらがそれぞれの程度発生しやすいものなのかを把握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、生成した被災パターンにおいて、道路ネットワークの任意地点間の到達性を分析する。設定した任意地点間が到達不能である場合、道路ネットワークでは図-9に示すように、起点から到達できる領域と到達できない領域とに分割された状態が発生している。これら2つの領域にまたがる道路リンクがその拠点間を到達不能とさせる重要な被災リンクの組合せの1つであると言える。このような組合せを抽出するため、本研究では最短経路を行うことで得られる起点から各ノードまでの移動コストに着目する。途絶した区間の移動コストを $\infty$ と仮定すると、図-9において到達可能な領域に含まれるノードまでの移動コストは必ず実数で定義され、到達不能領域に含まれるノードまでの移動コストは $\infty$ となる。すなわち、ネットワークにおいて接続関係にあるノード同士の起点からの移動コストを比較し、片側のノードまでの移動コストが実数で、もう一方のノードまでの移動コストが $\infty$ であるような場合、これら2つのノードで構成されるリンクは対象地点間を到達不能とさせる要因となるリンクの1つであると考えることができる。このような関係を持つリンクをすべて列挙したとき、それらは対象地点間を到達不能とさせる被災リンクパターンの1つとなる。本研究では道路被害推定は一樣乱数を用いたシミュレーションによって実施しているため、道路被害推定の偏りを防ぐため、また考えうる多くの被災リンクパターンを得るため、被災リンクの生成は十分な回数実行するものとする。以上の手順について、図-10にフロー図を示す。

### (3) 対策優先度の設定手法

防災対策を検討・実施するためには、抽出された脆弱な道路リンクのうち、いずれに対して対策を実施すべきなのか、その優先度が示されることが望ましい。本研究で対象としたある拠点間が到達不能となる状況とはすなわち孤立地域が発生する状況であるため、それを防止するために、検討対象とした拠点間すべてにおいて、最も発生頻度の高い被災リンクパターンを対象に、対策を実施することが考えられる。一方で、拠点間が到達不能となる状況は特定の組合せでリンクが同時に通行不能となることによるのみ発生する。すなわち、組合せに含まれるいずれか1つのリンクに対して手厚い対策を実施す

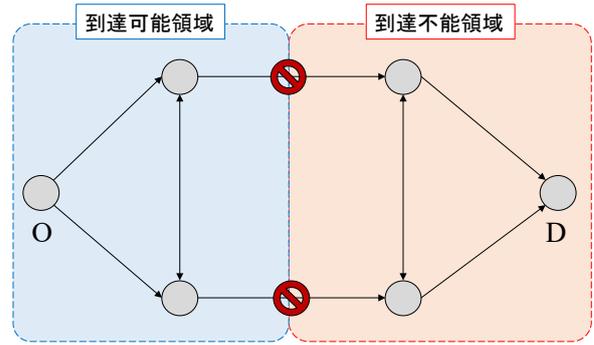


図-9 任意地点間が到達不能なネットワークの状態

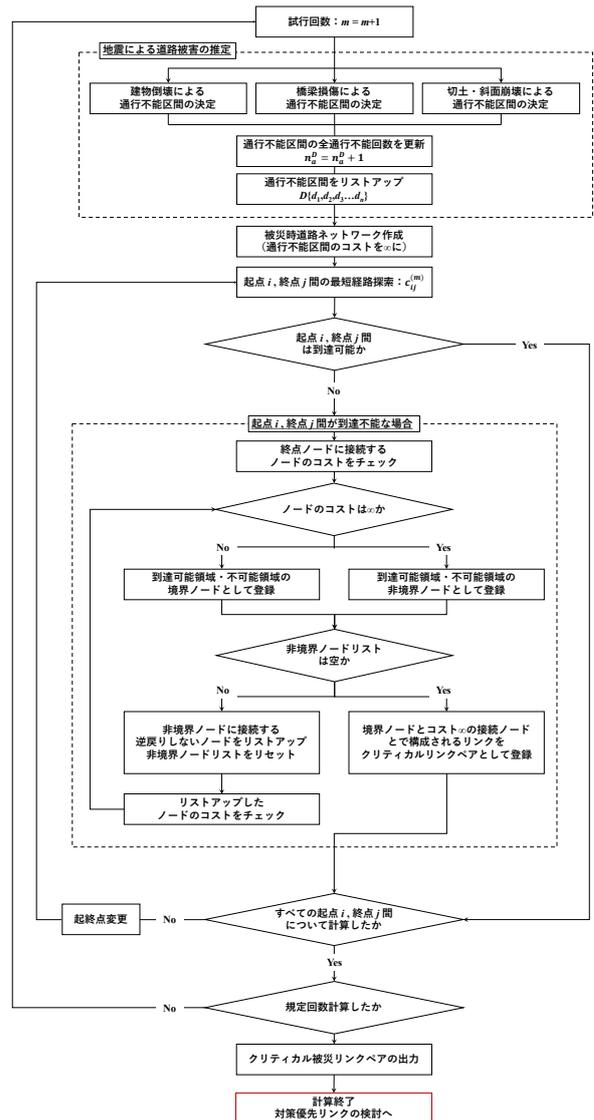


図-10 拠点間を到達不能とするクリティカルな被災ペアの抽出フロー

ることで、孤立の発生を防止する方法も考えられる。本研究ではこのような考えに立ち、次のような優先度決定手法を提案する。1) OD単位で対策を検討する場合、そのODにおいて最も多く発生した被災リンクペアに含まれるリンクのうち、最も通行不能確率の高いリンクほど対策

優先度を高く設定する、2) ネットワーク全体で対策を検討する場合、各ODにおいて最も多く発生した被災リンクペアに含まれるリンクを優先対策候補とし、その中で最も多くのODの状況改善に寄与するリンクの対策優先度を高く設定する。3) ネットワーク全体で対策を検討する場合、抽出された被災リンクペアに含まれるリンクについて、出現頻度の高いリンクの対策優先度を高く設定する。

## 5. 実際の道路網への適用

### (1) 適用条件

本章では、4章で示した地震時に拠点間を到達不能とする被災リンクパターンの抽出手法の適用性について、石川県の緊急輸送道路ネットワークを対象とした分析を行うことで検討する。

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、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論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-11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。

ネットワーク解析においては、石川県の代表的な拠点間(地域間)の到達可能性を分析することを目的として、始点を県庁、終点を各市町村役場に設定する。また、結果の一般性を担保するため、解析では被災リンクの生成は10万回実施し、各生成段階で、設定したすべての起終点間について到達可能性を分析する。なお、各道路区間の走行時間について、災害時の交通量は推定が困難であるため、交通混雑による影響を考慮しない形として、各道路区間の規制速度を道路区間長で除すことで得られる自由旅行時間で設定した。

### (2) 適用結果

図-12に対象とした石川県の緊急輸送道路ネットワークの全景と、設定した起終点の位置を示す。適用結果について、抽出された被災リンクペア単位で結果を示すことが困難であることから、本稿では図示しやすい、対策優先度について被災リンクペアに含まれるリンクについて、出現頻度の高いリンクの対策優先度を高く設定するという方針をとった場合に、対策優先度の上位10リンクを図-13に示す。これらのリンクは橋梁をもつリンクや、土砂災害警戒区域内に含まれるリンクであり、道路の構造として、地震に対して被災しやすい要素を有しているリンクである。更に同一リンク内に複数の橋梁が含まれている、土砂災害警戒区域内に含まれるリンク長が長いなど、同様の道路構造を持つ他のリンクに比べて地震に対

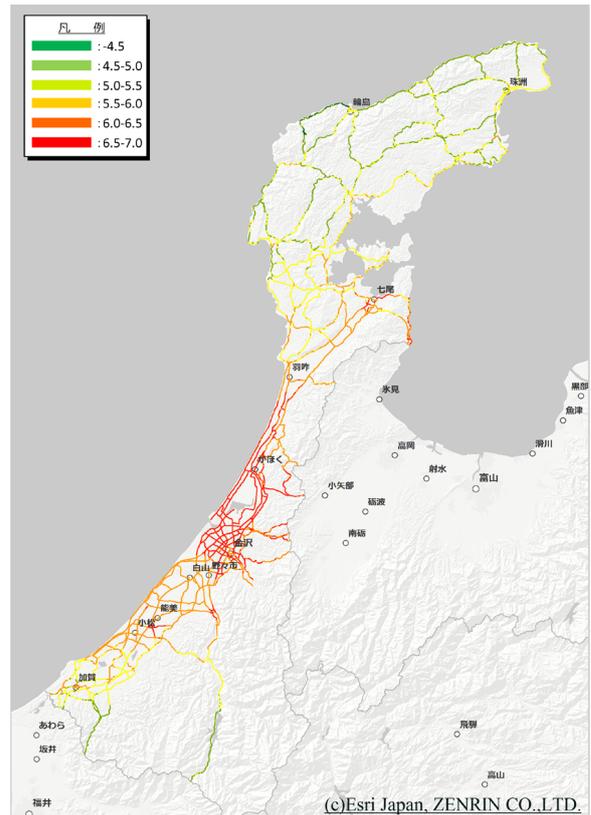


図-11 石川県の緊急輸送道路における 50 年間超過確率 2%となる計測震度の分布

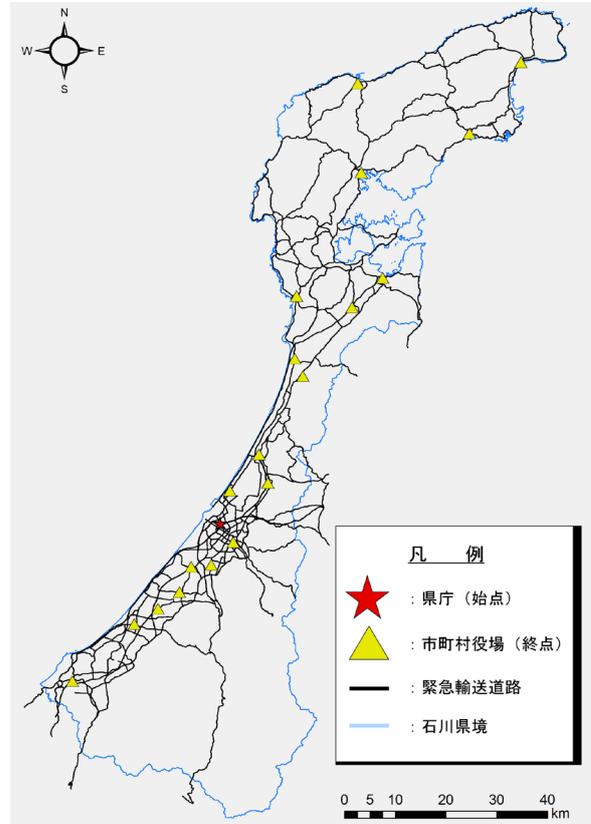


図-12 石川県の緊急輸送道路網と起終点位置

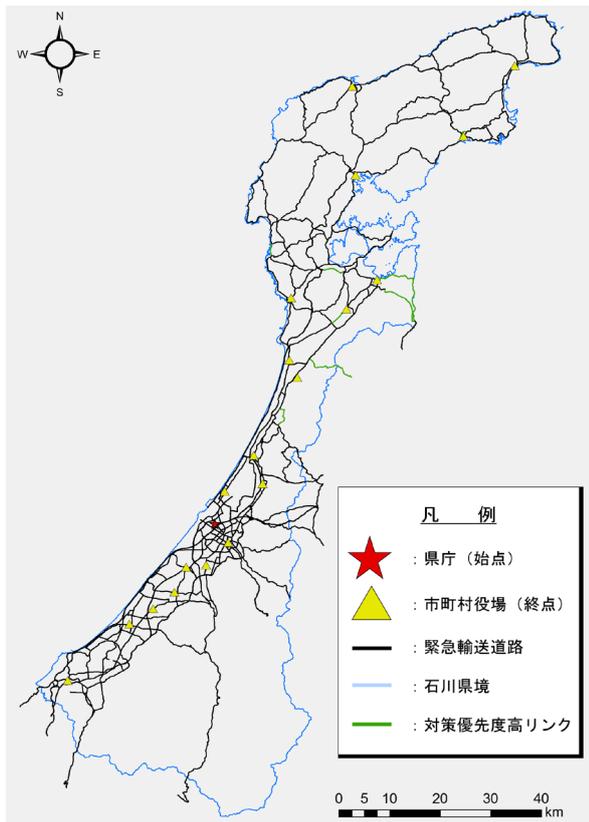


図-13 対策優先度の上位 10 リンクの分布

して脆弱なリンクである。5章で脆弱な道路区間の定義として述べたように、道路ネットワークの構造的な弱点部位でなく、災害に対しての脆弱性を有するリンクを対策優先度の高い区間として抽出できているものと考えられる。道路の空間的な位置に着目すると、対策優先度の高い道路は、設定した終点を囲むように位置していたり、ネットワークが疎な部分での数少ない迂回路上に存在していたりすることが分かる。このことは、本来は代替路として確保されるべき道路が地震に対する脆弱性を有しており、地震時に想定した機能を果たさない可能性を示唆していると考えられる。

## 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ネットワーク全体へもたらす影響として、ある拠点間が到達不能となるような事象に着目し、その

ような事象を引き起こすクリティカルなリンクの被災ペアを抽出する手法を提案した。また、抽出されたクリティカルな被災リンクペアに対し、対策の優先度を検討するための指標として、クリティカルな被災リンクペアに含まれるいずれかのリンクを頑強とすることで、拠点間が到達不能となるリスクを低減することが可能であるとの立場のもと、ODごと・ネットワーク全体それぞれの単位での対策優先度検討指標を提案した。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、抽出されたクリティカルな被災リンクペアに出現する頻度の高かったリンクについて考察することで、代替路となるべき道路自体が地震に対する脆弱性を有しており、地震時に要求した性能を果たさない可能性があるとの示唆を得た。

### (2) 今後の課題

本研究では道路の被災がもたらす影響として特に拠点間が到達不能となる自体に着目したが、実際の事象としては、拠点間が到達不能となる場合より、拠点間の到達時間に遅れが生じる場合の方が発生頻度は高い。今後はこちらの事象についても、評価指標を検討する必要がある。また、拠点間が到達不能となる事象についても、クリティカルなリンクの被災ペアを抽出することは可能だが、抽出したペアから対策優先度を決定するためにODごとの被災ペアの中で最も頻度の高いものに着目する、出現頻度の高いリンクに着目するといった指標を提案したが、それら着目したリンクに対策を施すことで得られる効果は、到達不能となる状況を防止するだけにとどまらない。そうした効果も踏まえ、より効果的に対策優先度を検討できるような指標への改良の余地があると考えられる。

### 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/detail/1-6-1.html](http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/detail/1-6-1.html)(2016.10.31 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](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\\_kaitai.pdf](http://www.cbr.mlit.go.jp/road/kanri-bunkakai/pdf/kushinoha_kaitai.pdf), (2016.10.31 閲覧)
- 5) 大澤脩司，藤生慎，中山晶一朗，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) .
- 6) 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](http://csi.or.jp/uploads/2016kumamoto_jishin_1v1.pdf)(2016.10.31閲覧)
- 7) 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.
  - 8) 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](http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/gaibu/ddt-all/view/0614s_308.pdf), (2016.10.31閲覧)
  - 9) 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, No632, pp77-92.
  - 10) 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.
  - 11) 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.
  - 12) 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.
  - 13) 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](http://www.bousai.metro.tokyo.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/000/422/shuho5.pdf)(2016.10.31閲覧)
  - 14) 大分県: 大分県地震津波被害調査報告書について, 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](http://www.pref.oita.jp/uploaded/life/287382_350112_misc.pdf)(2016.10.31閲覧)
  - 15) 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.
  - 16) 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.
  - 17) 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.
  - 18) 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.
  - 19) 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.
  - 20) 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](http://www.pref.fukuoka.lg.jp/uploaded/life/69065_17480_130_misc.pdf)(2016.10.31 閲覧)
  - 21) 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/7903.pdf>(2016.10.31 閲覧)
  - 22) 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.
  - 23) 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.
  - 24) 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.
  - 25) 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.
  - 26) 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.
  - 27) 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
  - 28) 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](http://www.bousai.metro.tokyo.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/000/402/part3-4-2.pdf) (2016.10.31 閲覧) .
  - 29) 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/>(2016.10.31 閲覧)
  - 30) 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://nfltp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A33-v1\\_3.html](http://nfltp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A33-v1_3.html)(2016.10.31 閲覧)

(???)受付

## A STUDY OF ROAD NETWORK EVALUATION METHOD CONSIDERING THE INFLUENCE OF ROAD DAMAGE CAUSED BY EARTHQUAKE

Shuji OSAWA, Shoichiro NAKAYAMA, Makoto FUJII, Jyunichi TAKAYAMA