

道路ネットワークの防災機能向上のための 効果的な防災拠点設定に関する研究

大澤 脩司¹・中山 晶一郎²・山口 裕通³

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正会員 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: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

³学生会員 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: hyamaguchi@se.kanazawa-u.ac.jp

南海トラフ地震や首都直下地震など、今後も大規模災害の発生が想定される我が国では、その対策のため、道路の防災機能評価手法の深度化が重要視されている。災害時の重要な活動が迅速に展開されるような道路の防災機能を確保することが不可欠である。本研究では、このような道路の防災機能強化の観点から提案された防災拠点の時間軸を加味した重要度ランクを実際の道路の防災機能評価へ適用し、従来の防災機能評価との比較によってその有効性を検証した。この重要度ランクを活用することで、新たに防災対策の手段を選択可能となる点に有効性があることを確認した。また、従来手法が防災対策の手段選択を誤る可能性を孕んでいることを確認した。今後は防災拠点に設定すべき施設の規模、防災対策の目的別に適切な拠点設定の議論が必要である。

Key Words : *Disaster prevention base, Disaster prevention plan, Road network reliability, connectivity*

1. はじめに

阪神淡路大震災や東日本大震災、平成 28 年熊本地震のような地震災害、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨や平成 29 年 7 月九州北部豪雨のような豪雨災害など、我が国では大規模な災害が近年頻発している。さらに今後も南海トラフ地震や首都直下地震などに起因する大規模な災害が発生することが想定されており、こうした災害への対策が急務となっている。

過去の地震災害を例にとると、阪神淡路大震災や東日本大震災の際には、道路ネットワークが広範囲で損傷・寸断したことで、救急・救命活動や物資輸送、復旧・復興活動が大きく制限されることとなった。道路ネットワークに機能の低下あるいは機能不全が生じたことで、救急・救命活動の遅れによる人的被害の拡大、物資輸送の機能不全による避難所における物資不足の発生、復旧・復興の遅れなど、様々な問題の発生につながった。

災害時にこれらの活動が迅速に展開されることは、被害の拡大阻止や生活機能の迅速な復旧につながる。すなわち、道路ネットワークは災害時にこれら活動が迅速に展開されるために必要不可欠な要素と言える。活動の基

盤となる道路ネットワークに対して、活動のための具体的な機能を担うことになる、あるいは補助する施設・場所が防災拠点である。すなわち、救急・救命活動や物資輸送、復旧・復興活動といった活動を迅速に展開させることは、防災拠点の機能を支障なく発揮させることであり、これら防災拠点となる施設・場所間が災害時に走行可能な道路で接続されているような道路ネットワークとすることが、大規模災害への対策として重要な要件の 1 つであると言えよう。

具体的には、いくつかの道路リンクが使用不能となるような災害時においても、防災拠点間の接続性を確保する能力が道路ネットワークに求められる能力であり、防災拠点間の接続性を確保する上で重要となる道路リンクに対策を実施していくことが防災対策上の基本指針となる。以上のような背景・目的のもと、道路ネットワークの防災対策として活用されているのが 2016 年に国土交通省が発表した「道路の防災機能の評価手法 (案) ¹⁾」である。この手法では、地域の防災計画等に基づき、災害時において移動経路が確保されている必要のある拠点ペアを評価対象として抽出し、代替となりうる経路の期待所要時間によって道路整備による道路の防災機能の向

上効果を計測することを提案している。

しかし、平成 28 年熊本地震では、道路ネットワークの耐災害信頼性（防災機能）評価手法の深度化が課題として指摘されており³⁾、今後の大規模災害への対策として、より有効な対策を講じるためには、残された課題を克服していくことが必要であろう。

筆者らは、この課題の 1 つが、2 章に後述するように防災機能の評価における「防災拠点の設定方法」にあると考えている。そして、このような考えのもと、筆者らは道路ネットワークの防災機能の強化にあたって、「どのような拠点を防災拠点として重視すべきか、またどのような施設を防災拠点として設定すべきか」という疑問に答えることを目的とした研究を行ってきた⁴⁾。具体的には、まず、各都道府県の「地域防災計画」をレビューし、そこでの防災拠点の指定状況を整理した⁴⁾。その結果、防災拠点の種類や機能についての全国統一の基準はなく、都道府県ごとに指定の状況が大きく異なることが確認された。この現状を念頭に、道路ネットワークの防災機能の向上に向けて、防災拠点の災害時の「機能」と「時間軸」に着目したアンケート調査を実施し、防災拠点の重要度ランクの推定を試みた⁵⁾。防災拠点の重要度ランクの推定結果としては、道路の防災機能評価に適用することで、より効果的な道路ネットワークの防災機能の強化への活用が期待される結果が得られている。

本研究は以上の成果を現行の道路の防災機能の評価手法¹²⁾に防災拠点の設定手段として適用し、曖昧な拠点設定による道路の防災機能評価の限界および課題について考察するものである。これによって、道路の防災機能を向上させる上で効果的な防災拠点の設定方法に関する基本的知見を収集するとともに、道路ネットワークの防災機能評価手法の深度化における拠点設定面での課題を明らかとすることが本研究の目的である。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章では、道路の防災機能評価を目的とした研究および緊急輸送道路の指定における拠点設定の扱いという視点で整理し、本研究の位置付けを示す。3 章では各都道府県の地域防災計画における、防災拠点の指定状況その課題について整理する。4 章では自治体の防災担当者および防災を専門とする研究者を対象としたアンケート調査に基づく防災拠点の重要度ランクの推定方法とその結果について述べる。5 章ではこの結果を道路の防災機能評価手法¹²⁾に適用し、現行の道路の防災機能評価手法の限界・課題および道路の防災機能評価における拠点設定のあり方について考察する。最後に、6 章に本論文のまとめ及び結論を示す。

2. 既往研究の整理と本研究の位置付け

本章では、災害時の道路の防災機能評価を目的とした研究および緊急輸送道路の指定における拠点設定の扱いという視点で整理し、その結果を踏まえた本研究の位置付けを示す。

(1) 災害時の道路の防災機能評価に関する研究の整理

1 章に述べたように、現在我が国で採用されている国土交通省が 2016 年に発表した道路の防災機能の評価手法（案）¹²⁾では、防災機能の評価対象とする「防災拠点ペア」を地域防災計画等に基づいて設定するアプローチを採っている。災害時における道路ネットワークの防災機能評価を目的として提案された他の多くの手法⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾においても、いくつかの防災拠点を設定した上で、それら拠点間の接続性を評価する、国土交通省の手法と同様のアプローチが採られている。例えば、大澤ら⁶⁾は、想定しうる複数のハザードを組み込みながら、道路リンクの途絶による迂回所要時間と拠点間が到達不可能になるリスクを両方扱いつつ、道路リンクの脆弱性を評価する手法を提案している。この研究では防災機能の評価する防災拠点として、県庁と市役所の拠点ペアを設定した際の数値計算例を提示して、提案手法の有効性を議論している。しかし、これらの研究では大澤ら⁶⁾のように計算「例」を示すに留まっており、「どのような拠点を防災拠点として重視すべきか、またどのような施設を防災拠点として設定すべきか」という疑問に対して明確な回答はなされていない。加えて、計算例として採用される拠点ペアについても研究によって大きく異なっている。我が国内を評価対象とした研究だけに絞っても、岩手県および高知県を対象に「高次医療施設間」の信頼性を試算した原田ら¹⁰⁾、「県庁と市町村役場間」の緊急輸送道路による到達可能性を分析した UDDIN ら¹¹⁾、「役所・消防署・病院・物資輸送拠点」を対象に道路網の復旧優先度に関する基礎指標を提案した渡辺ら¹²⁾、「物資集積地と物資供給点としての港・空港・高速道路」を対象に道路ネットワークの復旧戦略検討のための合意形成支援システムを開発した高橋ら¹³⁾、非重複経路とアクセシビリティを考慮した防災機能評価指標を提案し、道路交通センサスにおけるセントロイドから大規模病院間を対象に試算を実施した原田ら¹⁴⁾、非重複経路とアクセシビリティ指標を用いて、道路交通センサスにおける B ゾーンを代表するセントロイドと病院間を対象とした医療施設配置計画を検討した瀬戸ら¹⁵⁾など、様々な拠点設定が計算例として採用されている。これら既往研究では、それぞれの拠点設定による計算例の結果解釈において何らかの位置付けが述べられているものの、どのような拠点設定が提案手法に対して有効かまで議論したものはない。

(2) 緊急輸送道路指定における防災拠点の扱い

行政では、阪神淡路大震災での教訓¹⁶⁾を踏まえて、今日では緊急輸送道路を指定している。国土交通省は、緊急輸送道路を「災害直後から、避難・救助をはじめ、物資供給等の応急活動のために、緊急車両の通行を確保すべき重要な路線で、高速自動車国道や一般国道及びこれらを連結する幹線的な道路」¹⁷⁾と定義している。この定義からは、緊急輸送道路は防災拠点を相互に接続する道路として指定される道路であると見ることができる。このような定義に該当する重要な道路を緊急輸送道路に指定して強化する取り組みは各自治体で共通して行われているが、表-1に示した緊急輸送道路の指定例のように、細かな指定の区分には自治体によって隔たりが見られる。すなわち、緊急輸送道路の指定区分に対応する防災拠点の考え方には統一の基準は存在していないと言える。この結果、「災害時にどのような拠点が走行可能な道路と接続されているべきか」が明確にされないまま、多くが単に規格の高い道路を指定しているだけに過ぎない。すなわち、道路ネットワークにおいて拠点間の接続性が考慮されて緊急輸送道路が指定されているとは言い難いのが現状である。

(3) 本研究の位置付け

道路の防災機能評価の視点、緊急輸送道路の指定の視点から見てきたように、道路ネットワークの防災機能の強化を図る上では、機能の評価基準として「防災拠点」を設定することが重要となるが、「どのような拠点を防災拠点として考えるべきか？」という重要な問いに対する答えが定まっておらず、この点が曖昧なままに道路ネットワークの防災対策が検討・実施されているのが我が国の現状である。

多くの防災拠点がその機能を発揮するために、広域に渡って道路ネットワークの接続性が確保されている必要があることを踏まえると、防災拠点の考え方が共有されず、曖昧な状態のまま道路ネットワークの防災機能の強化を図ることは非効率であろう。一部の地域のみで

重要拠点として防災機能を強化したとして、関連地域の拠点が重要視されず、そちらの道路ネットワークで途絶が発生してしまえば、防災機能の強化を図った地域があっても、全体としては拠点の機能は発揮されない。このような補完的性質は、医療拠点間での重症患者処置・救助機能・インフラ復旧等に関する域外からの応援体制、なども同様に考えるものである。

防災拠点の考え方を広域で共有することは、拠点の代替性の視点からも重要である。ある防災拠点が被害を受けた場合でも、道路ネットワークの接続性が確保されていれば、近隣の同じ役割を持つ拠点を代替的に活用でき、防災機能を最低限維持できる可能性があるためである。

以上のような防災機能の補完的・代替的側面を踏まえると、道路ネットワークの防災機能の効率的な強化を図るためには防災拠点設定の考え方を広域で共有して道路の防災機能評価を実施する、すなわち強化すべき道路リンクを抽出することが求められると言える。

広域で共有可能な防災拠点設定の考え方は、筆者らのこれまでの研究⁵⁾で提案した。しかし、この考え方が実際に道路の防災機能評価においてどの程度有効であるかは検討されていない。また、現行の道路の防災機能評価手法(案)¹²⁾に対して、道路ネットワークの評価指標という面での限界・課題は指摘されてきた²¹⁾が、評価指標と同様に、評価結果を左右する要因であるにも関わらず、防災拠点の設定という視点からは手法の限界・課題は検討されてこなかった。以上を踏まえ、本研究では既往研究⁵⁾で提案した防災拠点設定の考え方を、現行の道路の防災機能の評価手法(案)¹²⁾に適用し、防災機能評価における有効性を検証するとともに、現行手法の防災拠点設定から見た限界・課題について考察する。

3. 防災拠点の指定における現状と課題

本章では、広域で共有可能な防災拠点設定の考え方を提案するに至った背景である地域防災計画における防災

表-1 自治体ごとの緊急輸送道路の指定区分の例

区分	詳細			
	国土交通省 ¹⁷⁾	国土交通省中部地方整備局 ¹⁸⁾	群馬県 ¹⁹⁾	大分県 ²⁰⁾
1次	県庁所在地、地方中心城市及び重要港湾、空港等を連絡する道路	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	群馬県と隣接県との広域的な連携を確保する緊急輸送道路ネットワークの骨格となる道路、県内の広域的な連携を確保するための道路、これらの路線と第1次防災拠点を連絡する道路	大分県と九州主要都市とを連絡する路線、大分県と他県の主要都市とを連絡する路線、県都と地方生活圏中心城市とを連絡する路線、隣接する地方生活圏中心城市間を連絡する路線、大分空港へアクセスする路線、重要港湾へアクセスする路線、高速道路ICへアクセスする路線、多重化・代替性を考慮する路線、関連計画における路線
2次	第1次緊急輸送道路と市町村役場、主要な防災拠点(行政機関、公共機関、主要駅、港湾、ヘリポート、災害医療拠点、自衛隊等)を連絡する道路	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	県内市町村相互の連携及び第1次緊急輸送道路の代替性を確保し、緊急輸送道路ネットワークを形成する道路、第1次緊急輸送道路と第2次防災拠点を連絡する道路	県庁、地方生活圏中心の庁舎とその他市町村庁舎等とを連絡する路線、他県との調整で選定した路線、多重化・代替性を考慮する路線
3次	その他の道路	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	第1次、第2次緊急輸送道路の機能を補完する道路	指定なし

拠点の指定状況とその課題について概説する。詳細は小泉ら⁴⁾に詳しい。

防災拠点の指定状況は次の 2 点にまとめられる。1 点目は、地域防災計画における「防災拠点」の扱いは都道府県で大きく異なっている。拠点を重要度別に区分しているような県もあれば、まったく「防災拠点」について記載がない県も多い。2 点目は、記載されている県の中でも、指定に関する基準は大きく異なっている。その結果として、全都道府県で共通に指定されている施設が全く存在しないというのが現状である。

道路ネットワークの防災機能の強化を考えると、防災拠点の指定に関する基準が各都道府県で全く統一されていないことは、2.(3)に指摘したように大問題である。

効果的な道路ネットワークの防災機能強化のためには、防災拠点が「機能の重要性」と「災害時の時間軸」の視点から、優先順位がランク付けされていることが望ましい。しかし、このような区分が設定されている都道府県は現時点では少数であり、その基準も各県で異なる。なかには、接続されている緊急輸送道路の区分が適用されており、道路ネットワークの機能評価に用いるには不適当な基準で重要度を設定しているケースも見られた。

4. 防災拠点の重要度ランクの検討⁵⁾

本章では、道路ネットワークの防災機能評価に用いるための防災拠点の重要度ランクの推定方法およびその結果⁵⁾を概説する。

(1) 重要度ランク設定に向けたアイデア

まず、道路ネットワークの防災機能評価には、防災拠点の分類は、a) その重要度に応じて区分分けされていること、b) 日本全国で統一して適用できる基準であること、という 2 つの要件を満たすものが望ましいと考える。

まず、a) の重要度の区分分けについて説明する。弱点となりうる道路リンクのすべてを強化することは非現実的であり、災害時に各リンクが担う機能（接続する拠点の機能）の重要性に応じて、強化の優先順位を設定することが必須である。この重要度が時間軸に応じて決められていれば、「ほとんどのハザードに対して途絶することなく耐えられる能力が求められるリンク」と「すぐに復旧できる状態であれば一次的な途絶も許容できるリンク」とにわけて、効果的に道路ネットワークの強化を行うことが可能となる。

つぎに、b) の日本全国で統一して適用できる基準について説明する。ある拠点について、他の県からの人的・物的な支援を受け入れながら、災害時に救命・救援・復旧機能を最大限に引き出すためには、同一の機能を持つ

ほかの自治体の拠点と接続されていることが望ましい。一部の自治体だけである拠点について高規格な接続性を確保したとしても、他の自治体のネットワークが脆弱であり、途絶が発生してしまえば、結局防災拠点の機能を発揮することは不可能になってしまう。そのため、ネットワークの災害対応能力を効果的に強化するためには、重要視する拠点・機能を統一しておく必要がある。

以上の問題意識のもと、本研究では、全国の都道府県やそれぞれで視点が異なると考えられる防災の研究者に対して、その結果から得られる統計的に有意な大小関係のみを抽出して拠点の重要度ランクを決める方法をとる。これによって、自治体の地域特性や研究者視点のばらつきを加味して安定的な重要度ランクを推定できる。

(2) アンケート調査の概要

本アンケートでは、2 パターンの地震災害の想定の下で、被災後早急に走行可能な道路で繋ぐべき拠点の「順位」と、その「時期」を質問した。2 パターンの地震災害は、以下のように設定した：

[想定 1]：熊本地震のように主に自県だけが被害に見舞われ、特に県の中心都市に顕著な被害が生じた場合

[想定 2]：東日本大震災のように複数の県が被害に見舞われ、自県の複数の都市で顕著な被害が生じた場合

このような想定を指定することで、災害の規模感を統一しつつ、その中で自治体の空間・経済的な状況による想定の違い、各研究者の視点による想定の違いを踏まえた防災拠点の優先順位データを得ることが期待できる。

アンケートではまず沖縄県の緊急輸送道路ネットワーク計画²⁾を参考に、拠点が担う機能によって本研究向けに分類し直した表-2 のような拠点分類に基づいて、「道路に繋ぐ」というポイントを前提に優先順位と必要となる時期を回答をいただいた。次に、発災後に各機能が必要となる時間について訪ねた。ここでは、回答者が考える時間オーダーを統一するために、「～12 時間」、「～24 時間」、「～48 時間」、「～72 時間」、「～以降」の 5 段階の選択肢を用意した。

アンケート調査の対象は、全国の 47 都道府県の県庁、政令指定都市 20 市・中核市 48 市の 115 の自治体と、全国土木系教員名簿 2016 年版（大学・高専）に記載されている教員のうち専門に「防災」「減災」と入っている教員（以下、研究者と示す）94 名とした。その結果、自治体からは 61 件（回収率：53.0%）の回答を、研究者からは 20 件（回収率：21.3%）の回答を得た。

(3) 二項検定による重要度ランクの決定

回収したアンケートを基礎集計した結果、単純な集計のみでは、防災拠点の明確な順位を確定することが不可能であることが分かった。そこで、優先順位について二

表-2 本研究で用いる 9 種類の拠点分類の一覧表

拠点分類名	施設例
A 役所	県庁, 市役所, 役場, 出先機関
B 医療機関	三次救急病院, その他病院, 診療所
C 救助機能拠点	消防本部, 消防署, 警察本部, 警察署, 自衛隊基地
D 物流拠点	トラックターミナル, 運送会社
E 空港・ヘリポート	空港, ヘリポート
F 港	重要港湾, 地方港湾, 漁港
G 道路関連施設	IC, SA, PA, 道の駅, 道路管理者
H インフラ管理者	電力会社, 水道局, ガス会社, 通信会社
I 備蓄拠点	備蓄基地, 備蓄庫

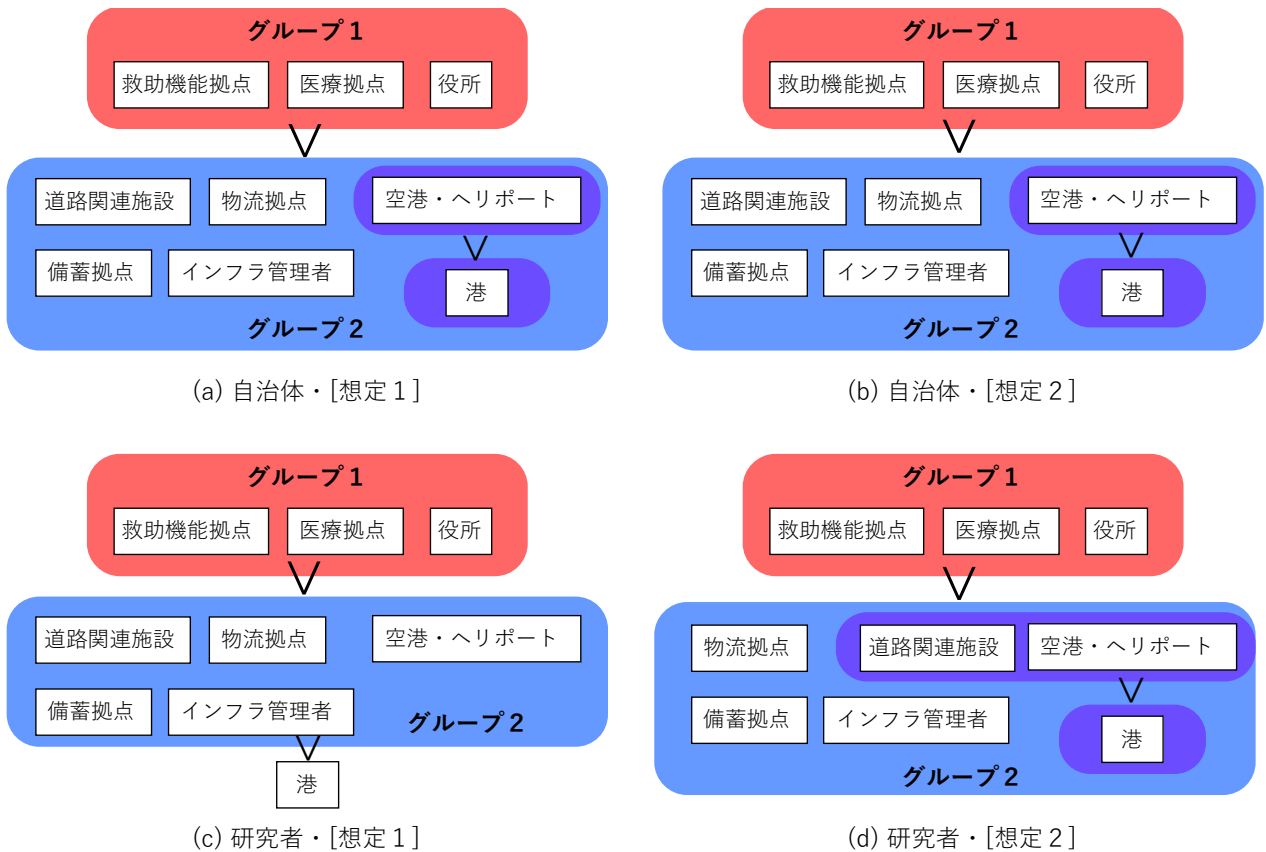


図-1 防災拠点の優先順位の二項検定結果

項検定を用いて統計的に有意に判断できる優先順位の大小関係を抽出することでグループ分けを試みていく。

二項検定の結果、図-1のようなグループ分けが得られた。この図は、9種類の拠点分類について、2つの統計的に有意な大小関係があることを表現している。これについて図-1(a)を例に概説する。1つ目の大小関係は、グループ1（救助機能拠点・医療拠点・役所）とグループ2（それ以外）の間の大小関係で、このグループ間のすべてのペアについて、グループ2よりグループ1の拠点の方が優先順位が高いことを示している。2つ目の大小関係は、グループ2に含まれる、空港・ヘリポートと港の間では前者の方が優先順位が高いという関係である。また、これら以外には有意な大小関係は見られなかった。

図-1より、港の優先順位については多少の差異が見られるものの、グループ1（救助拠点・医療拠点・役所）とグループ2（その他）の間の優先順位関係は、4つの結果全てで共通しており、空間的な要件・専門分野の違いによる視点の違いに対しても、非常に頑健な大小関係であることが分かる。このことから、道路ネットワークの災害対応能力の強化に向けては、防災拠点の重要度ランクとして、本研究で得られたグループ1とグループ2の2段階の分類を適用することが望ましいといえよう。

(4)時間軸を加味した優先順位ランク

図-2は、「防災拠点が必要となる時間」の回答結果を累積図の形で示したものである。ここでは、上述の優先

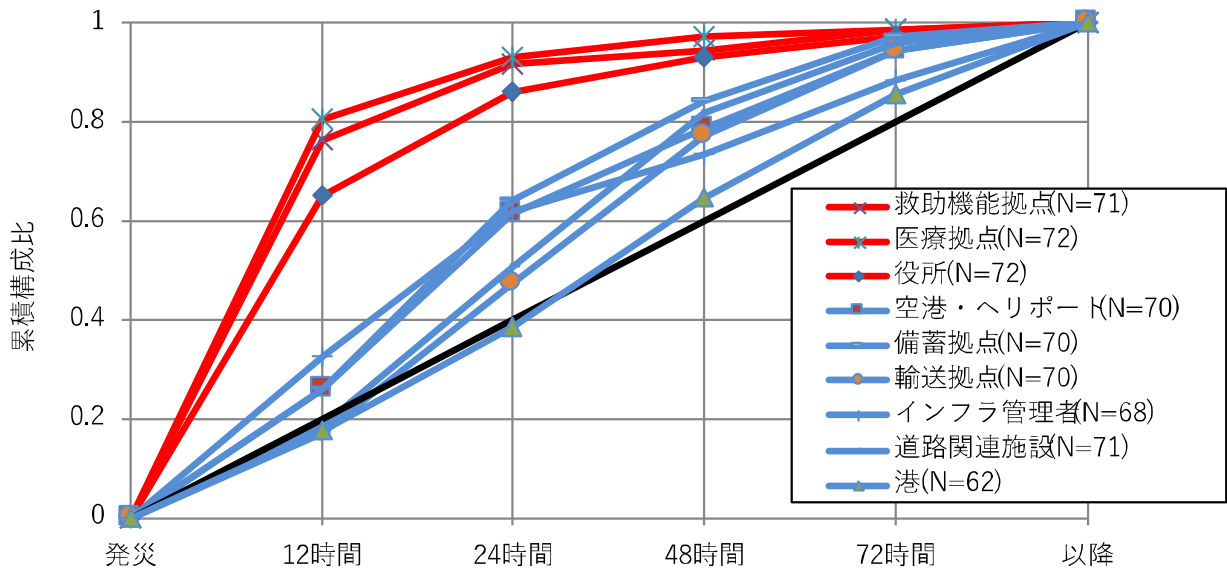


図-2 防災拠点が必要となる時期の回答結果（累積図）

順位ランクの検定結果から、グループ1を赤線、グループ2を青線で示している。この結果から、グループ1とグループ2で、必要と考えられる時間に明確な差があることが確認された。グループ1に属す拠点は、24時間以内につなぐ必要があると考える回答が80%以上であり、多くのケースにおいて、道路の途絶が発生しない、あるいは早期に道路による接続性を確保することが求められていることが分かる。一方で、グループ2では、24時間以内につなぐ必要があるという回答は多くても65%程度であり、一段階優先順位は低く、発災後一時的に接続性が確保できなくなっても、すぐに繋ぐことができるような環境を整えておく必要がある拠点であるといえよう。

5. 時間軸を加味した防災拠点の重要度ランクに基づく道路ネットワークの防災機能評価

本章では、4章のアンケート調査から得られた防災拠点の重要度ランクを、現行の道路の防災機能の評価手法（案）に適用し、提案する重要度ランクが実際の道路の防災機能評価において有効に機能することを検証するとともに、防災拠点の設定という視点から見た現行手法の限界・課題について考察する。

(1) 防災機能評価へ適用の目的と評価方法

アンケート調査から得られた時間軸を加味した防災拠点の重要度ランクは、道路ネットワークの防災機能評価における防災拠点設定として適用することで、道路ネットワークにおいて「ほとんどのハザードに対して途絶することなく耐えられる能力が求められるリンク」と「す

ぐに復旧できる状態であれば一次的な途絶も許容できるリンク」とを明らかとし、より効果的に防災機能の向上策が検討可能になることを期待したものである。これを実際の道路の防災機能評価に適用することで、提案する重要度ランクの有効性を検証することが目的の1つである。また、防災機能の評価手法として、現行の道路の防災機能評価手法（案）¹²⁾を対象としたことの目的は、2.(3)に述べたように、当該手法に対して、防災拠点の設定というこれまでにない視点から、手法の限界・課題を検討することにある。したがって、本章2節で実施する道路の防災機能評価では時間軸を加味した防災拠点の重要度ランク（グループ1とグループ2）による拠点の設定分け以外はすべて現行の評価手法（案）¹²⁾を踏襲する。拠点設定の議論としては、「どのような拠点を防災拠点とすべきか」や「どのような拠点ペアを設定すべきか」などとも検討すべき重要な視点であるが、本研究ではあくまでも「現行手法と同様の種別の拠点を対象とした場合」に、重要度ランクによる拠点の設定分けによって、得られる防災機能の評価結果がどのように変化するかを分析・考察することで、現行手法の、現行の拠点設定が持つ限界・課題について検討することを目的としている。拠点設定の議論における以上のような視点は、本研究の成果が得られた後に取り組むべきより発展的な課題であると考えられる。

次に、具体的な道路の防災機能の評価方法について解説する。現行の道路の防災機能の評価手法（案）¹²⁾では、平常時と災害時の各道路ネットワークにおける防災拠点間の期待所要時間の増加割合によって、拠点間の脆弱度を定義し、さらにこの脆弱度を、各拠点間の最短経路上にある災害危険箇所を持つリンク（災害時に途絶するも

のと想定するリンク) に累積して求めるリンクの累積脆弱度によって評価している。これは、複数の拠点間を結ぶ重要なリンクでありながら脆弱なリンクを把握することを目的としたものである。本研究ではこの手法を踏襲するが、結果解釈の単純化のため、拠点間の最小所要時間の増加割合によって拠点間の脆弱度を定義する、という変更を加える。具体的には、式(1)のようにネットワークの各拠点間における脆弱度を定義し、これを踏まえて式(2)のようにリンク単位の累積脆弱度を定義する。

$$z_{rs} = 1 - \frac{c_{rs}^N}{c_{rs}^H} \quad (1)$$

ここで、 z_{rs} :拠点間 rs における脆弱度、 c_{rs}^N :平常時の拠点間 rs の最短所要時間、 c_{rs}^H :災害時の拠点間 rs の最短所要時間である。

$$z_{la} = \sum_r \sum_s \delta_{rs}^a \cdot \delta_d^a z_{rs} \quad (2)$$

ここで、 z_{la} :リンク a の累積脆弱度、 δ_{rs}^a :拠点 rs 間の平時の最短経路にリンク a が含まれる場合は 1、含まれない場合は 0、 δ_d^a :リンク a が災害時に通行不能となる場合は 1、通行不能とならない場合は 0 である。

次に、対象地域、災害シナリオの設定、災害危険箇所(災害時に通行不能とする道路リンク)の設定について解説する。対象地域は石川県である。また、想定する災害の種類は地震災害とし、ハザードの規模としては 50 年間で超過確率 2%以上となる計測深度²⁹⁾を設定した(図-3)。災害危険箇所は、道路の防災機能の評価手法(案)¹²⁾では、地震災害の場合には「物資を輸送する大型車の円滑な通行が困難な箇所」、「昭和 55 年に改定された橋梁設計基準を満たさない橋梁」、「落石・土砂災害・雪崩等のおそれのある箇所」とされている。本研究ではこれを踏まえた上でいくつかの変更点を加え、「道路沿道の未耐震木造建物」、「定期点検における健全度評価において劣化損傷が見られた橋梁」、「土砂災害特別警戒区域に含まれる箇所、道路防災点検において近い将来崩壊の危険性が高いと判定された斜面を有する箇所」を災害危険箇所になりうる要素として考え、これら要素のうち、特に地震時に崩壊の危険性が高まる計測震度 5.5 以上の地震動が想定される箇所を災害危険箇所として設定した。

最後に、防災機能の評価対象とする防災拠点の種類について説明する。防災拠点の種類を選定においても、ここまでと同様に道路の防災機能の評価手法(案)¹²⁾を踏襲し、対象地域における地域防災計画を参照して決定する。対象地域は石川県、対象災害は地震災害であるため、石川県の地域防災計画の地震災害対策編²⁹⁾を参照した。具体的には、緊急輸送道路ネットワークの整備方針の中で、各指定区分の道路に接続される防災拠点として記載がある拠点を評価対象の拠点種別に設定した(表-3)。

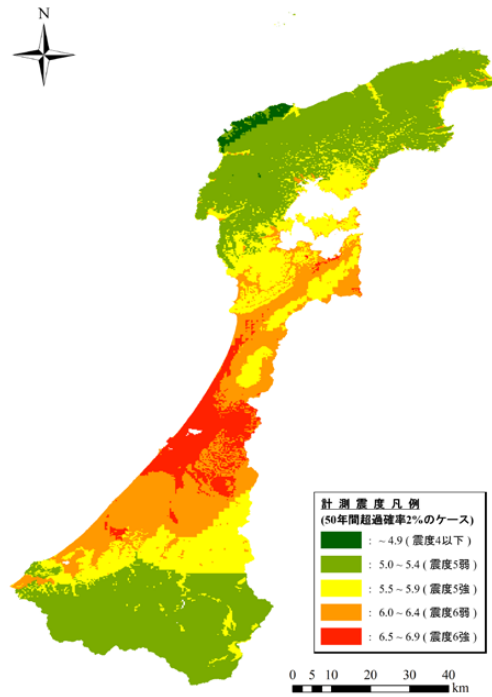


図-3 石川県における 50 年間で超過確率 2%の計測震度分布

表-3 石川県地域防災計画における接続すべき拠点一覧²⁹⁾

緊急輸送道路区分	接続される防災拠点
第1次緊急輸送道路	県庁、土木(総合)事務所、市役所・町役場、国土交通省・中日本高速道路等出先機関、空港、重要港湾、災害拠点病院、消防本部・消防署、自衛隊基地、警察署
第2次緊急輸送道路	市役所・町役場の支所、広域物流拠点、地方港湾、漁港、現地医療班派遣病院
第3次緊急輸送道路	—

ただし、地域防災計画に記載があっても、本研究で対象とした 9 種類の拠点分類(表-2)に含まれていない「中心都市駅」と「テレビ・ラジオ局」、拠点の所在に関する明確な情報が公開されていない「臨時離着陸場適地」については評価対象外として除外している。さらに、これら評価対象とした種別の拠点を道路の防災機能の評価手法(案)¹²⁾における「支援拠点」と「被災拠点」の区分に従って分類し、拠点ペアを設定する。なお、地震災害における被災拠点は「市町村」と記載されているが、ここでは市町村役場と解釈し、各支援拠点・市町村役場間を拠点ペアとして、道路の防災機能評価を実施する。

(2) 道路ネットワークの防災機能評価の試行結果

まず、時間軸を加味した防災拠点の重要度ランクを実際の道路ネットワークを対象とした道路の防災機能評価に適用し、その有効性を検証する。

本研究では図-4に示す石川県の緊急輸送道路網を対象の道路ネットワークとした。また、ここでは特別な拠点設定を行わない従来の手法通りの手順で防災機能の評価

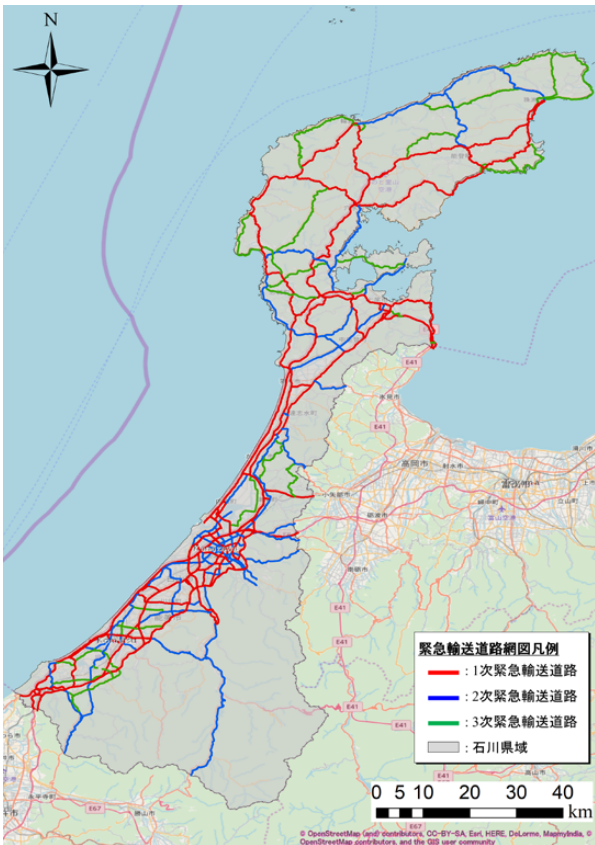


図-4 石川県の緊急輸送道路ネットワーク図

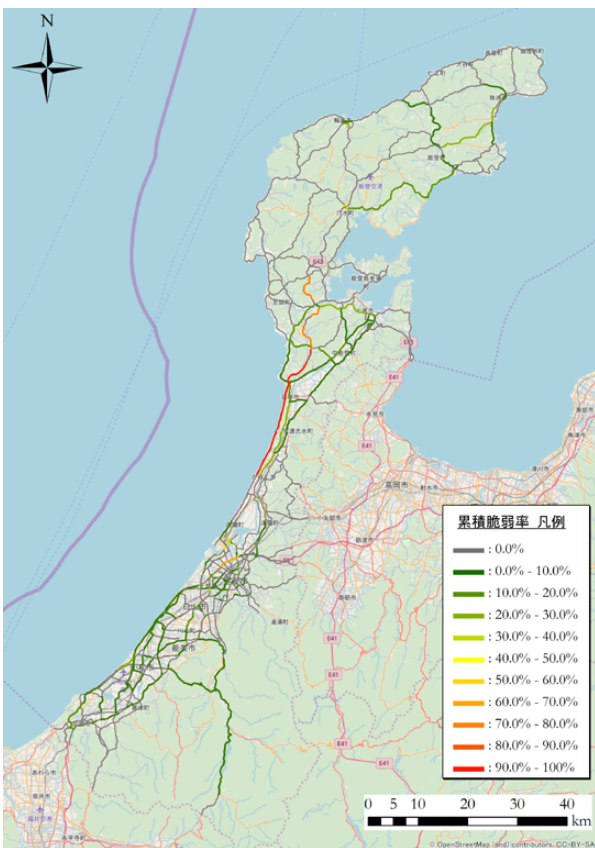


図-5 Case1 での脆弱率算出結果

するケース (Case1) と、防災拠点を 4 章で提案した時間軸を加味した防災拠点の重要度によってグループ 1 とグループ 2 とに分類し、グループごとに防災機能を評価するケース (Case2) という 2 つのケースを設定し、以下の手順で評価・比較することで、提案した防災拠点設定の有効性を検証する。

- [1] 式(2)で算出される各リンクの累積脆弱度について、最大値に対する比率 (脆弱率; 式(3)) へ変換

$$r_{zla} = \frac{zla}{\max_{zla \in ZL} zla} \quad (3)$$

ここで、 r_{zla} : リンク a の脆弱率,
 ZL : リンクの累積脆弱度集合である。

- [2] 脆弱率は各リンクのネットワーク内での相対的な脆弱度の高さであると解釈し、Case1 に比べて Case2 では脆弱率がどの程度変動したかを算出し、比較
 拠点設定による防災機能の評価結果の差異を比較・分析するためには、「防災対策上の重要なリンクの評価がどのように変化したか」に着目すれば良い。防災対策上の重要なリンクとは、すなわちリンクの累積脆弱度の高いリンクである。本研究ではケース設定によって、防災機能の評価対象とする防災拠点の絶対数は変わらないため、グループ分けによって細分している Case2 の方が、Case1 に比べてリンクの累積脆弱度は小さくなる。したがって単純なリンクの累積脆弱度の大小ではケース間比較ができないため、累積脆弱率に変換して、相対比較することとしている。

図-5 に Case1 でのリンクの累積脆弱率の算出結果を、図-6 に Case2 のグループ 1 の拠点設定下でのリンクの累積脆弱度の算出結果を、図-7 に Case2 のグループ 2 の拠点設定下でのリンクの累積脆弱度の算出結果をそれぞれ示す。また、図-8、図-9 にグループごとの拠点設定下での Case1 との脆弱率の差分を示す。これらより、発災直後から必要とされる拠点群であるグループ 1 と、ある程度時間が経過してから必要とされる拠点群であるグループ 2 とでは、各リンクの脆弱度が異なることが観察され、またそれぞれのケースで Case1 に対して相対的な重要度が増減していることも確認される。グループ 1 は災害発生直後から必要とされる拠点群であり、グループ 2 は発災からある程度時間が経過してから必要とされる拠点群である。この点を踏まえると、グループ 1 の拠点設定下で脆弱度が高いリンクとは、「ほとんどのハザードに対して途絶することなく耐えられる能力が求められるリンク」であり、グループ 2 の拠点設定下で脆弱度が高いリンクとは、「すぐに復旧できる状態であれば一次的な途絶も許容できるリンク」であると言える。この両者とは、明らかにリンク強化の質は異なる。前者は非常に頑

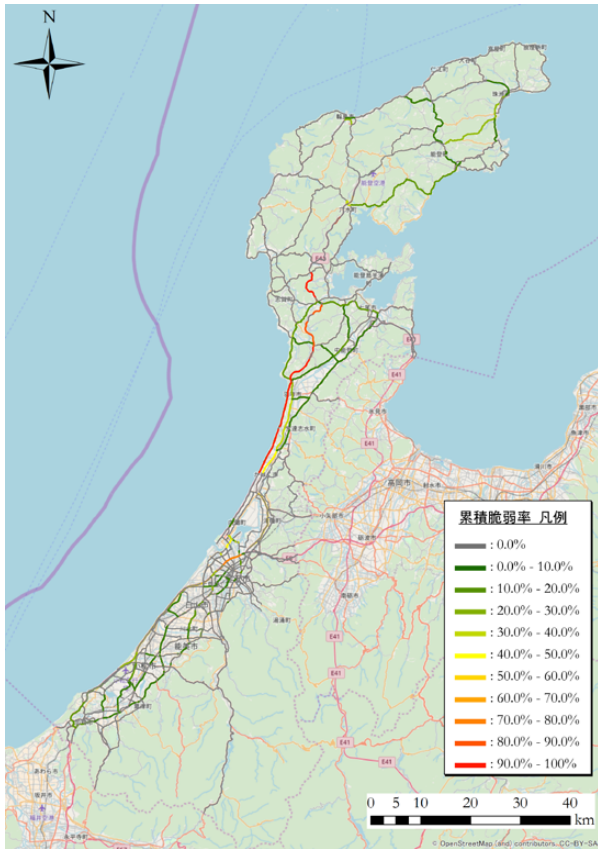


図-6 Case2のグループ1の拠点設定下での脆弱率算出結果

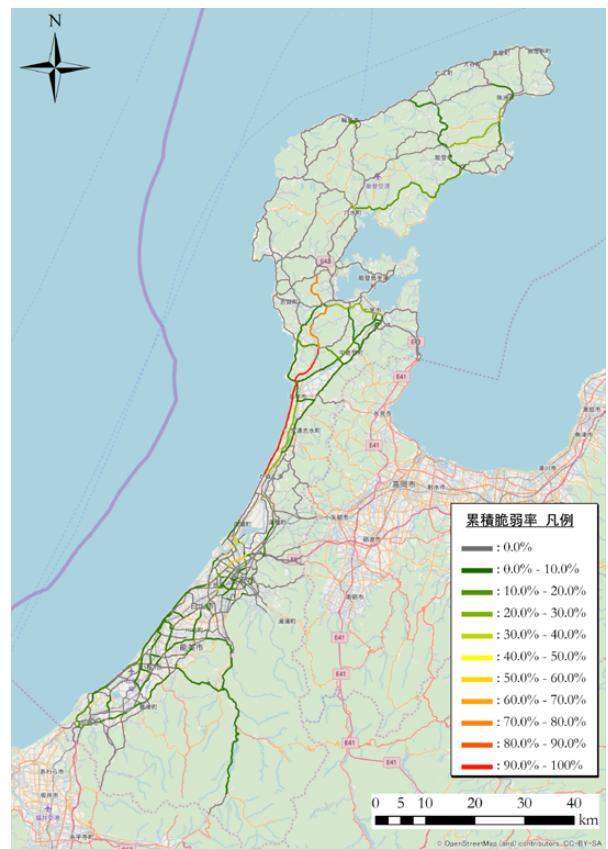


図-7 Case2のグループ2の拠点設定下での脆弱率算出結果

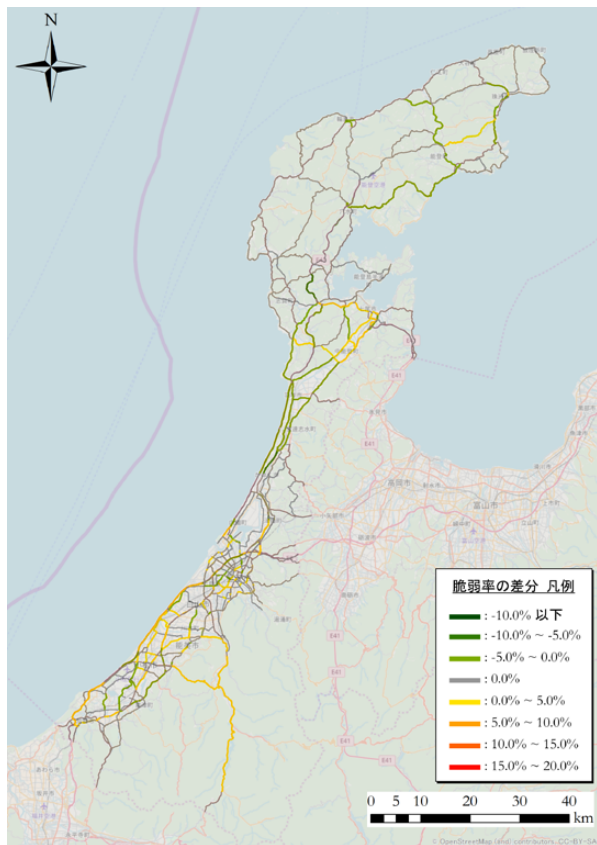


図-8 グループ1での拠点設定下での脆弱率の差分

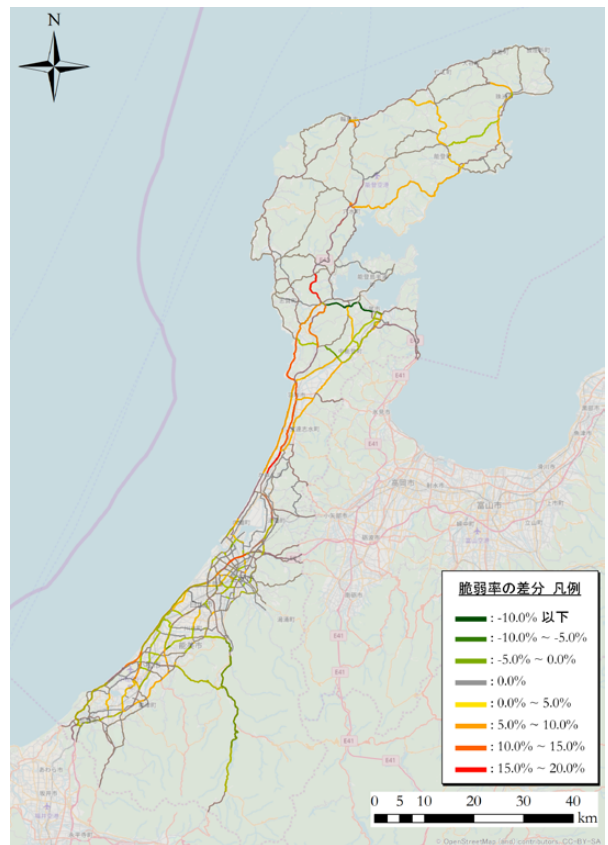


図-9 グループ2での拠点設定下での脆弱率の差分

健全なリンクとなるような対策が必要であるのに対し、後者は大規模な崩壊が生じない程度の対策を実施しておき、発災直後に一時的に通行不能な状態となったとしても、道路点検や道路啓開によって早期に通行可能な状態とすれば良いと言える。このように対策の種類を検討できるのは、特別な拠点設定を考えない従来手法にない、防災拠点の時間軸を加味した重要度による拠点設定の利点と言え、本研究で提案する時間軸を加味した防災拠点の重要度ランクは、実際の道路の防災機能評価においても有効に機能することが確認できたと言える。

以上の結果を踏まえて、防災拠点設定から見た現行手法の限界・課題について検討する。時間軸を加味した重要度による拠点設定の利点は、防災対策の種類を検討可能である点にあると述べたが、裏を返せば、これは現行手法の拠点設定による防災機能評価では、「何らかの対策を施す必要があるリンク」という評価に留まり、対策の水準を検討することは困難であることが限界であることを示唆していると考えられる。このような意味の評価結果のもとでは、万全を期せば「ほとんどのハザードに対して途絶することなく耐えられる」水準のリンクとなるように対策を施すことになる。これは、本来は「すぐに復旧できる状態であれば一次的な途絶も許容できる」水準の対策で良いリンクに対して過剰な対策を施す可能性があり、非効率的である。反対に、「ほとんどのハザードに対して途絶することなく耐えられる」水準が求められるリンクに対して「すぐに復旧できる状態であれば一次的な途絶も許容できる」水準の対策を施した場合には不十分な対策を施したことになる。以上のように、現行手法の拠点設定には、対策手段の選択を誤る可能性があることが課題として指摘できると考える。

6. 本研究のまとめと今後の課題

本研究では、道路ネットワークの対災害能力強化の視点から現状の防災拠点の指定・設定の問題点を整理し、アンケート調査から防災拠点の重要度を推定した。また、この結果を活用した道路ネットワークの防災機能評価を試行し、時間軸を加味した防災拠点の重要度ランクに基づく防災拠点設定を行うことで、リンクへの防災対策の水準が選択可能となることの示唆を得た。現行の道路の防災機能の評価手法(案)に示されている防災拠点設定による評価には、リンクへの防災対策の水準を選択することは困難であることが限界として指摘され、同時にリンクへの対策手段を誤る可能性を孕んでいることが課題としてできる。

次に、今後の課題を整理する。本研究では、既往研究⁹⁾の成果を活用して、道路の防災機能評価における拠点設定の細分化を試みたが、細分化は「防災拠点の種類」

にのみ着目したものである。2(3)に述べたような防災拠点の代替性を考慮するためには、「防災拠点の種類」に留まらず、「各種別の防災拠点となる施設の規模」にも着目する必要がある。「どのような規模の施設を防災拠点として設定すべきか?」という議論に発展させる必要がある。また、「防災拠点」という一律の括りを用いたが、防災拠点の種類に応じて、どのような活動が展開されるかには当然差異がある。例えば医療施設の配置計画問題を扱った瀬戸ら¹⁰⁾のように、特定の拠点・活動に着目することも考えられる。したがって、「どのような目的に対して、どのような拠点設定が必要であるか?」という議論も必要となろう。

本研究では道路の防災機能評価における拠点の設定方法と道路ネットワークの評価指標とは独立して扱った。しかし、拠点の設定方法によってはネットワークの評価指標そのものにも検討の余地が生じうる。こうした点も今後の研究展開として重要であると考えられる。

謝辞: 本研究の一部は、国土交通省新道路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。さらに、本研究を遂行するにあたり、多くの自治体・研究者の方々に、防災拠点に関するアンケート調査にご協力をいただいた。これらの方々のご協力により集まった貴重な情報がなければ、本論文を執筆することは不可能であり、この場を借り、ご協力いただいた皆様に心より感謝いたします。

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.
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/pdf/hyouka.pdf>(2018. 4. 12 閲覧).
- 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,
http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/pdf/nw_manual.pdf(2018. 4. 12 閲覧).
- 3) 土木学会 熊本地震・広域交通ネットワーク調査団:調査報告(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,
<http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/%E7%86%8A%E6%9C%AC%E5%9C%B0%E9%9C%87%E3%83%BB%E5%BA%83%E5%9F%9F%E4%BA%A4%E9%80%9A%E3%83%8D%E3%83%83%E3%83%88%E3%83%AF%E3%83%BC%E3%82%AF%EF%BC%88%E4%B8%AD%E9%96%93%E3%81%A8%E3%82%8A%E3%81%BE%E3%81%A8%E3%82%81%EF%BC%89.pdf>(2018.07.29 閲覧).
- 4) 小泉奏子, 中山晶一郎, 山口裕通, 高山純一, 藤生慎: 全国の防災拠点の指定の現状とその重要度のランク付け

- 方法に関する研究, 平成 29 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.503-504, 2018.
- 5) 山口裕通, 小泉奏子, 大澤脩司, 中山晶一郎: 道路ネットワークの接続性強化に向けた防災拠点の重要度ランクの推定, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, 2018 (投稿中)
 - 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, pp. I_467-I_478, 2017.
 - 7) M. Sanchez-Silva, M. Daniels, G. Leras, and D. Patino: A transport network reliability model for the efficient assignment of resources, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 39, No.1, pp.47-63, 2005.
 - 8) M.G.H. Bell: A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 34, No.6, pp. 533-545, 2005.
 - 9) W.Y. Szeto: Cooperative game approaches to measuring network reliability considering paradoxes, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 19, No.2, pp. pp.229-241, 2011.
 - 10) 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.67-74, 2013.
 - 11) A. W. UDDIN, 大澤脩司, 藤生慎, 高山純一, 中山晶一郎: 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.72, No.4, pp.756-767, 2016.
 - 12) 渡辺素弘, 鈴木勉: 復旧優先度指標による震後復旧優先道路形状に関する数理的研究, 都市計画論文集, 44, pp.30-37, 2009.
 - 13) 高橋亨輔, 白木渡, 岩原廣彦, 井面仁志, 磯田千雅子: 道路ネットワーク復旧戦略検討のための合意形成支援システムの開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.71, No.2, pp.167-187, 2015.
 - 14) 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.
 - 15) 瀬戸裕美子, 宇野伸宏, 塩見康博: 非重複経路数を考慮したアクセシビリティ指標に基づく医療施設配置計画, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp. I_57-I_68, 2011.
 - 16) 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 (2018.07.29 閲覧).
 - 17) 国土交通省 HP, 緊急輸送道路: <http://www.mlit.go.jp/road/bosai/measures/index3.html> (2018.07.29 閲覧).
 - 18) 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 (2018.07.29 閲覧).
 - 19) 群馬県 HP, 緊急輸送道路ネットワーク計画: http://www.pref.gunma.jp/06/h28g_00017.html (2018.07.29 閲覧).
 - 20) 大分県緊急輸送道路ネットワーク計画図 (平成 26 年度更新 平成 29 年度改定版): http://www.pref.oita.jp/up-loaded/life/293342_2144457_misc.pdf (2018.07.29 閲覧).
 - 21) 原田剛志, 小野剛史, 倉内文孝, 高木朗義: 道路ネットワーク防災機能の便益評価に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.73, No.2, pp.109-123, 2017.
 - 22) 沖縄県緊急輸送道路ネットワーク計画等策定協議会: 緊急輸送道路ネットワーク計画, 2011, <http://www.pref.okinawa.jp/site/doboku/dorokan/hoshu/kinkyu.html> (2018.07.29 閲覧).
 - 23) 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/> (2018.07.29 閲覧).
 - 24) 石川県防災会議, 石川県地域防災計画 (地震災害対策編): http://www.pref.ishikawa.lg.jp/bousai/bousai_g/bousaikaikaku/documents/06_30jishinn_zenntai.pdf (2018.07.31 閲覧).

(2018. 7. 31 受付)

A STUDY ON EFFECTIVE DISASTER PREVENTION BASE SETTING FOR IMPROVEMENT OF DISASTER PREVENTION FUNCTION ON ROAD NETWORK

Shuji OSAWA, Shoichiro NAKAYAMA and Hiromichi YAMAGUCHI