

災害対応拠点施設の脆弱性評価と脆弱施設を めぐる災害への備えに関する基礎的考察

大澤 脩司¹・藤生 慎²

¹正会員 金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系／日本学術振興会特別研究員 (PD)
(〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: sosawa@se.kanazawa-u.ac.jp

²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 (Corresponding Author)

我が国では今後も大規模な災害の発生が危険視されており、これら災害に対する備えを進めていくことが急務である。防災拠点は交通行動を介した各種災害対応を実施する上で不可欠であり、これら拠点が機能を発揮できるような道路防災対策が重要である。しかし、すべての道路を強化することは困難であり、防災拠点が機能しない可能性も考慮した防災計画の策定が必要である。本研究では、道路ネットワークの接続性の視点から見た防災拠点の脆弱性評価と、脆弱な防災拠点における災害対応の代替策についての基礎的知見の獲得を試みた。その結果、脆弱性評価の水準から大きく離れた拠点では慎重に代替策を検討する必要があることや、水準の設定次第で評価が変化しうるため、防災計画策定に対する考え方に応じた適切な水準設定が必要であることの示唆を得た。

Key Words: road network, connectivity, disaster prevention base, vulnerability, disaster response

1. はじめに

我が国では近年大規模な自然災害が頻発しており、多大な被害をもたらしている。今後も南海トラフ地震や首都直下地震のような大規模な地震災害の発生が危険視されている。さらに、ここ数年では台風や豪雨による水害も多発しており、これら様々な自然災害が今後も継続的に発生することが想定される。したがって、これら災害に対する備えを進めていくことが急務であることは論を俟たない。災害への備えは多岐に渡るものがあるが、その中でも災害対応活動の拠点となる施設（防災拠点）は、各種災害対応を実施する上で不可欠であり、これら拠点が災害時に機能を発揮できるような対策を進めていくことは特に重要度が高いと言えよう。ところで、防災拠点が関連する災害対応の多く（例えば、避難・救助・救援・復旧・復興など）は道路ネットワークを介して行われる。このため、防災拠点が災害時に機能を発揮するためには、拠点間が走行可能な道路で接続されている必要がある。これを踏まえて、道路ネットワークの機能を強化することが被害軽減のための有効な対策の1つであるとして、どの道路を優先的に強化すべきかを評価・議論することを目的とした研究が数多く行われている。一方

で、すべての道路を強化することは困難であることから、これら道路の機能を強化するための手法を用いたとしても、すべての防災拠点間での接続性を確保することはできない。したがって、防災計画の策定段階で指定した防災拠点であっても、道路被害によるネットワークの損傷や寸断によって有効に機能しないケースが発生する可能性もある。これより、指定した防災拠点が災害時に使用できない可能性も視野に含めて事前の防災計画を策定することが必要であることが指摘される。

先に述べたような防災計画の策定を実現するためには、道路ネットワークの接続性の視点から、災害時に接続性が確保されない危険性が高い防災拠点（脆弱な防災拠点）を評価することが必要となる。さらに、その上で脆弱と評価された防災拠点が災害対応において担う役割に応じて、道路ネットワークの損傷や寸断によって拠点が有効に機能しなくなった場合における対応の代替策を検討することが必要である。

以上のような背景を踏まえて、以下の2点を本研究の目的として設定した。第1の目的は、道路ネットワークの接続性評価と一体となった（道路ネットワークの接続性の視点から見た）防災拠点の脆弱性評価を試みることである。そして、第2の目的は、この評価結果を踏まえ

て脆弱な防災拠点における災害対応の代替策について、その方向性についての基礎的な知見を見出すことである。

2. 既往研究の整理と本研究の位置付け

本章では、災害時を対象とした道路ネットワークの接続性評価に関する研究と、防災拠点の脆弱性評価に関する研究の2つの視点から本研究に関連する既往研究を整理する。また、これを踏まえた本研究の位置づけを示す。

(1) 道路ネットワークの接続性評価に関する研究

災害時を対象とした道路ネットワークの接続性評価に関する研究は様々な視点から行われている。代表的なのが連結信頼性評価に関する研究^(例えば1),2,3,4,5)、脆弱性評価に関する研究^(例えば6,7,8)、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^(例えば9),10,11)、最適化手法等による最適対策戦略に関する研究^(例えば12),13,14)である。いずれの研究も災害に対して頑健な道路ネットワークを整備するという点では共通の目的を有している。これら研究の差異は、頑健な道路ネットワークを実現するためのアプローチにある。このアプローチの差異は、防災対策においては対策の考え方や対策方法の差異に相当するものとも言える。

(2) 防災拠点の脆弱性評価に関する研究

防災拠点の脆弱性の評価に関連した研究は、主に構造物としての拠点施設の脆弱性の視点に立ったものが多いと見られる。小泉ら¹⁵⁾は大規模集客施設は防災拠点として活用することが期待できるものも多いとし、その災害リスクと防災対策について検討している。林・齊藤¹⁶⁾は防災拠点建物を対象としたリアルタイム耐震診断システムを構築し、その試験運用を行っている。大久保ら¹⁷⁾は農業水利施設が地震時に被災した場合には水害のリスクがあることを指摘し、幹線水路施設を対象に大規模地震時における災害対応を阻害するリスク源を明らかにしている。道路ネットワークに関連した視点での研究として、道路ネットワークの接続性を強化する際に重要視すべき拠点について、その重要度の推定を試みた山口ら¹⁸⁾がある。山口ら¹⁸⁾は道路ネットワークの接続性強化を検討する際には、拠点の重要度を考慮することが必要であることを指摘し、重要な拠点施設間の接続性を確保するための道路の強化策の評価・検討に資すると期待される防災拠点の重要度ランクを示している。

(3) 本研究の位置付け

上述したように、道路ネットワークの接続性評価については様々な研究が行われている。これら研究の差異は

手法としての優劣にはなく、手法を適用する差異の防災対策の考え方や対策方法の視点にあることから、目的に応じた適切な手法が適用されることが望ましいというのが本研究の立場である。これを踏まえ、第1章に述べた本研究の第1の目的に関連する道路ネットワークの接続性の視点から見た防災拠点の脆弱性評価を試みる上では、筆者らがこれまでに提案した接続性評価手法¹⁹⁾を活用する。道路ネットワークの強化と災害時における防災拠点の機能発揮の可否は密接な関係にあることから、道路ネットワークの接続性評価と防災拠点の脆弱性評価は一体的であることが望ましく、適用しようとする接続性評価手法に応じて防災拠点の脆弱性評価の方法についても検討すべきであるというのが本研究の立場である。

本研究の第2の目的に関連する防災拠点の脆弱性評価という点では、本章(2)に述べたように構造物としての防災拠点の脆弱性の視点に立ったものが多く、道路ネットワークの接続性の視点に立った本研究とは異なる。山口ら¹⁸⁾とは視点を共有するものがあるが、彼らの研究は、拠点の種類や役割によって異なる拠点の重要度を加味して強化すべき道路を評価すべきであると主張するものであり、本研究とは視点が異なる。本研究は道路ネットワークの接続性評価結果を踏まえて脆弱な防災拠点を抽出し、その拠点をめぐる災害対応について議論することを目的としたものであり、道路の強化に焦点を当てたものではない。

本研究では筆者らがこれまでに提案した道路ネットワークの接続性評価手法¹⁹⁾を石川県の緊急輸送道路ネットワークおよび防災計画を対象に適用し、脆弱な防災拠点の評価をするとともに、それら拠点における災害対応の代替案について考察する。

3. 災害危険箇所に基づく道路ネットワーク評価手法

本章では、本研究で適用する道路ネットワークの接続性評価手法¹⁹⁾の概要を整理する。

(1) 災害危険箇所の概念定義および設定事例

災害危険箇所とは、「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う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

危険箇所数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。

災害危険箇所の設定事例の詳細は既報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事例以外の要素に対しても設定可能である。考慮すべき要素やその具体的な設定方法については今後の研究課題である。

(2) 道路ネットワーク評価としての基本的考え方

本手法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。なお、この経路は最短経路探索をベースとして、可能な限り重複しない2本の経路を抽出する。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⁹⁾では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、1つの災害危険箇所あたりの対策効果が大きく、対策上の注目度が高いと考える評価指標を提案した。

(3) 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道路ネットワー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（第1経路）と、これを消去したネットワーク上で最も災害危険箇所数が少ない経路（第2経路）と定義する。経路を以上のように定義した意図は、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で、災害時でも拠点ペア間が接続される可能性を高めるということにある。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着目すれば、多数の拠点ペアの接続性向上に寄与する対策上の注目箇所を得ることができる。これらリンクの中でさらに注目すべきリンクを抽出する際の視点は次の通りである。

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が多く、効果的な対策が可能であると考え

以上をフロー図に整理したものが図-1である。

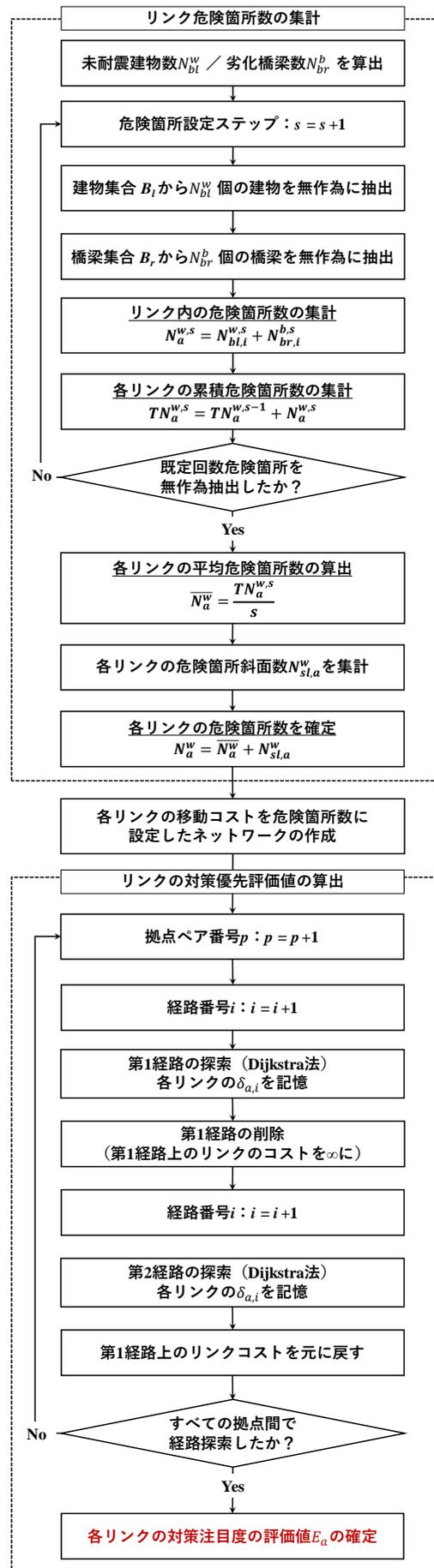


図-1 災害危険箇所に基づく接続性評価のフロー図

4. 防災拠点の脆弱性評価方法

本章では、既報¹⁹⁾の手法を活用した防災拠点の脆弱性評価方法について、脆弱性の考え方と評価フローをそれぞれ整理する。

(1) 防災拠点の脆弱性の考え方

脆弱な防災拠点とは、災害時に道路ネットワークの損傷や寸断によって到達が困難になるおそれが高い拠点であると定義する。このように定義した時、ここで適用する既報¹⁹⁾の手法では、防災拠点間を結ぶ経路上に存在する災害危険箇所数が多いほど、それら拠点間は災害時に到達が困難になるおそれが高いと考えることができる。また、災害危険箇所数の大小に加えて、経路を構成する道路（リンク）のうち、災害危険箇所を有するリンク（以下、危険リンク）が多いほど、やはり災害時に到達困難になるおそれが高いと考えることができる。この上で、危険箇所・危険リンクの比率にそれぞれ脆弱であると考えられる水準を設ければ、防災拠点の脆弱性は表-1のように整理できる。最も脆弱性が高いのは危険箇所と危険リンクの比率双方が水準を超える場合である。経路の危険箇所数は多いが危険リンクの比率は低い場合と経路の危険箇所数は少ないが危険リンクの比率が高い場合とでは、危険箇所数が多い経路の方が損傷や寸断されやすいと考えられるため、前者の方がより脆弱性は高いと考えられる。危険箇所・危険リンクの比率ともに水準が低い場合には、脆弱性は低いと考えられる。

ワークとする。拠点ペアは、石川県の地域防災計画²⁰⁾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載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

表-1 防災拠点の脆弱性評価マトリックス

		危険リンクの比率	
		水準以下	水準以上
危険箇所数	水準以下	脆弱性小	脆弱性中
	水準以上	脆弱性大	脆弱性特大

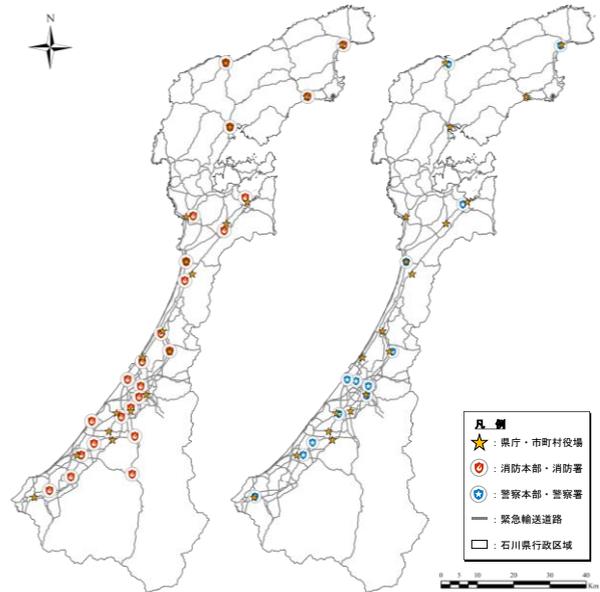


図-2 対象拠点ペアの空間分布

(2) 防災拠点の脆弱性の評価フロー

防災拠点の脆弱性評価は大きく3つのフローから構成される。第1フローは災害危険箇所数に基づく評価対象防災拠点 OD ペア間の経路評価である。第2フローは各 OD における経路の総危険箇所数と経路を構成するリンクに占める危険リンクの比率の集計である。第3フローは表-1 に示した脆弱性評価マトリックスに基づく各 OD の防災拠点に対する脆弱性評価である。この脆弱性評価によって脆弱性が高いと評価された防災拠点について、災害時に機能を発揮できなかった場合の影響と、それを踏まえた災害対応の代替策についての考察を試みる。

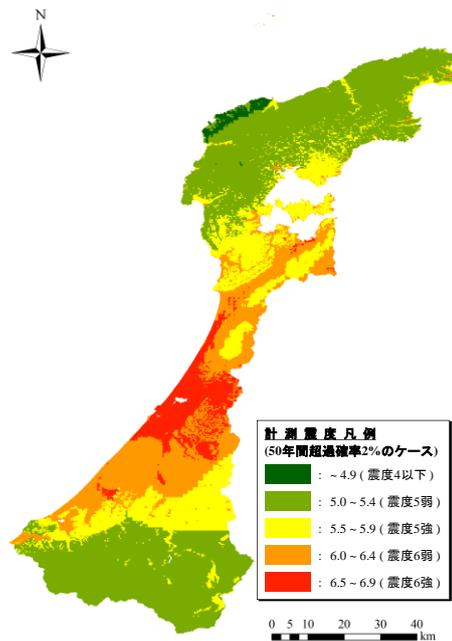


図-3 50年間超過確率2%となる計測震度の空間分布

5. 石川県緊急輸送道路ネットワークと防災計画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

ケーススタディの条件設定は既報¹⁹⁾と同様とした。各条件の詳細は既報¹⁹⁾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

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²⁾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。なお、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を検討する必要がある。

災害危険箇所は簡単のために既報¹⁹⁾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。

防災拠点の脆弱性を評価する上での危険箇所数および危険リンクの比率の水準については、ここではネットワーク全体を俯瞰した場合に相対的に脆弱度が高いと考えられるラインに設定した。具体的には危険箇所数および危険リンク比率の第3四分位数を超える場合には脆弱度が高いと考える。すなわち、分析対象とした防災拠点ODペアのうち危険箇所数が多い25%の防災拠点、危険リンクの比率が高い25%の防災拠点がそれぞれ脆弱性が高い拠点として評価される。

また、危険箇所数については、経路上にある危険リンク1本あたりの危険箇所数が多いほど、到達困難になるおそれが高いとする考えもあれば、経路全体の危険箇所

数が多いほど到達困難になるおそれが高いとする考えもある。本研究では道路ネットワークの接続性の視点で見た脆弱な防災拠点施設をめぐる災害対応の代替策についての基礎的な知見を得ることを目的としている。このため、前者をCase1(単位危険リンク水準)、後者をCase2(絶対数水準)とし、複数の視点下で議論することで、得られる知見の充実化を図ることとした。

(2) 分析対象拠点 OD ペアの経路特性の基礎集計

本節では分析対象拠点 OD ペアの脆弱性評価に先立ち、既報¹⁹⁾の手法で抽出した経路について、その特性の基礎集計を示す。この基礎集計は4.(2)に述べた第2フローに相当するものである。

表-2に全拠点 OD ペアの経路の総危険箇所数、危険リンクの比率、単位危険リンクあたりの危険箇所数に関する基本統計量を整理した。これより、いずれの項目でも最大値に比べ平均値は小さい値を示しているものの、標準偏差も考慮すると、中には危険箇所数や危険リンク比率の面で脆弱性の高いペアが混ざっていることが伺える。

図-4に危険リンクの比率に関するヒストグラムを、図-5に単位危険リンクあたりの危険箇所数に関するヒストグラムを、図-6に経路の危険箇所数に関するヒストグラムをそれぞれ整理した。いずれについても平均値付近の分布が最も多く、平均値から極端に離れたものは少ないことが分かる。

図-7に各拠点 OD ペアの経路を構成するリンクの総数と危険リンク数との関係を散布図で整理した。本図より、リンク総数が多くなるにつれて危険リンク数も多くなる傾向が全体的な傾向として読み取れる。

(3) Case1(単位危険リンク水準)の脆弱性評価結果

危険リンク比率の第3四分位数、単位危険リンクの第3四分位数に脆弱性判断の水準を設定した場合の、脆弱性評価結果を、表-3および図-8に示す。脆弱性区分ごとの OD ペアの比率は、脆弱性小が60.9%、脆弱性中が14.0%、脆弱性第が14.1%、脆弱性特大が11.0%となった。脆弱性評価の区分自体は同一だが、散布図の各領域に着目すると、それぞれの中でも分布にばらつきがあることが確認できる。これを踏まえると、脆弱性大あるいは脆弱性特大と評価された OD ペアのうち、水準から大きく離れているようなペアは特に災害時に到達困難となる可能性が高いことから、拠点が利用できない場合の対応の代替策を慎重に検討する必要があることが指摘される。

今回分析対象とした防災拠点の特性を踏まえると、脆弱性が高いと評価された OD ペア間では陸路での救命・救急活動や救助活動が困難となる可能性があることから、陸路に依らない対応活動を視野に、計画を策定する必要があると言える。

表-2 経路特性に関する基本統計量

統計量	危険箇所数	危険リンク比率	単位危険リンクあたり危険箇所数
平均	9.16	0.179	0.550
標準偏差	10.94	0.131	0.452
最大値	58.05	1.000	13.173
最小値	0.00	0.000	0.000
第1四分位数	1.89	0.086	0.316
第2四分位数	5.97	0.148	0.431
第3四分位数	10.26	0.235	0.609

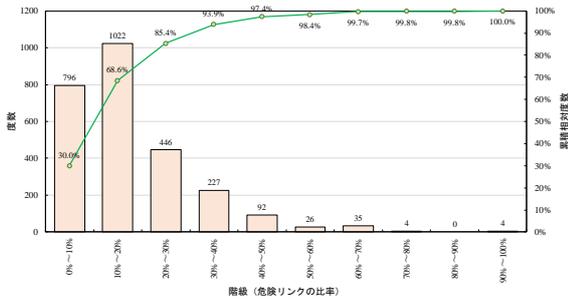


図-4 危険リンクの比率に関するヒストグラム

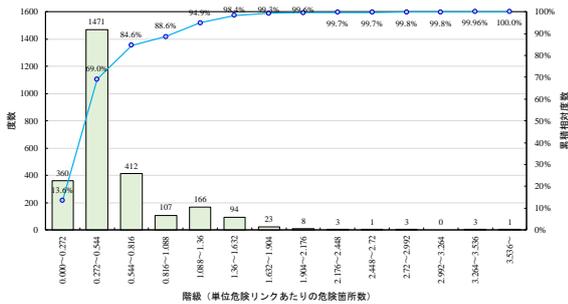


図-5 単位危険リンクあたりの危険箇所数に関するヒストグラム

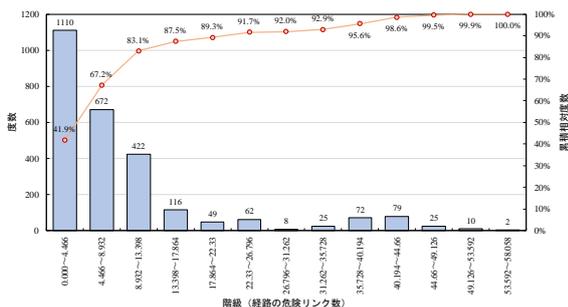


図-6 経路の危険箇所数に関するヒストグラム

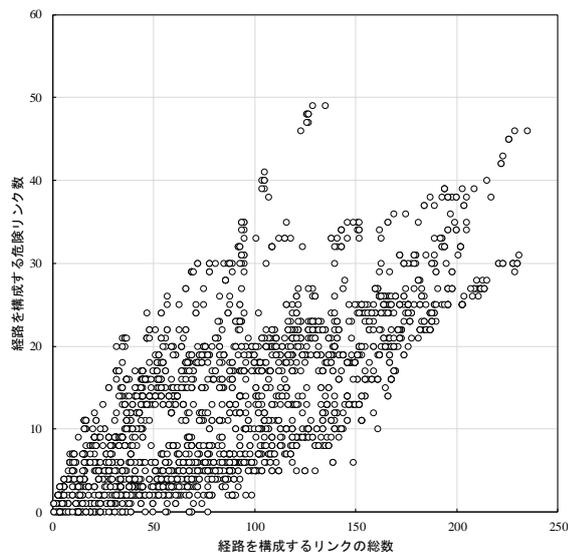


図-7 経路のリンク総数と危険リンク数の散布図

表-3 Case1 の防災拠点の脆弱性評価結果

Case1 (単位危険リンク水準)		危険リンク比率	
		水準以下	水準以上
危険箇所数	水準以下	1616 60.9%	371 14.0%
	水準以上	373 14.1%	292 11.0%

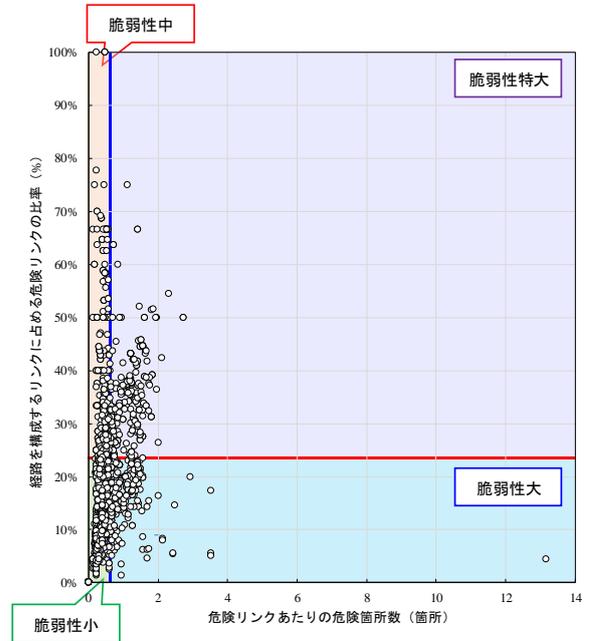


図-8 Case1におけるODペアの脆弱性区分の分布図

(4) Case2 (絶対数水準) の脆弱性評価結果

危険リンク比率の第3四分位数、経路全体の危険箇所数の第3四分位数に脆弱性判断の水準を設定した場合の、脆弱性評価結果を、表-4および図-9に示す。脆弱性区分ごとのODペアの比率は、脆弱性小が59.2%、脆弱性中が15.8%、脆弱性第が15.8%、脆弱性特大が9.2%となった。Case1と比較すると脆弱性特大と評価されたODペアは減少しているが、脆弱性大と脆弱性中と評価されたODペアがいずれも増加している。

散布図に着目した場合、脆弱性大あるいは脆弱性特大と評価されたODペアのうち、水準から大きく離れているようなペアは特に災害時に到達困難となる可能性が高いことから、拠点が利用できない場合の対応の代替策を慎重に検討する必要があることが指摘されることはCase1と同様である。一方で、散布図の分布には大きな差異が確認されている。Case1では水準から離れた位置に分布しているODペアは一部であったが、Case2の場合は水準から離れた位置にもまとまったODペアの分布が見られる。すなわち、水準の考え次第では特に注視して災害対応の代替策を検討すべき拠点の構成が変化しうる

表-4 Case2の防災拠点の脆弱性評価結果

Case2 (絶対数水準)		危険リンク比率	
		水準以下	水準以上
危険箇所数	水準以下	1570 59.2%	418 15.8%
	水準以上	419 15.8%	245 9.2%

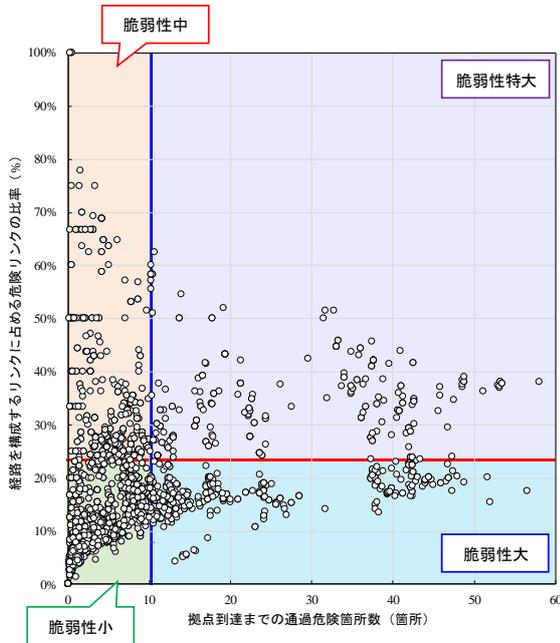


図-9 Case2における OD ペアの脆弱性区分の分布図

ことが示唆されたと言えよう。

今回分析対象とした防災拠点の特性を踏まえると、脆弱性が高いと評価された OD ペア間では陸路での救命・救急活動や救助活動が困難となる可能性があることから、陸路に依らない対応活動を視野に、計画を策定する必要があると言える。

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接続性評価と一体となった防災拠点の脆弱性評価とそれによる災害対応の代替策検討の必要性を指摘した。その上で、筆者らがこれまでに提案した道路ネットワークの接続性評価手法を用いた防災拠点の脆弱性評価手法を提案した。また、石川県の緊急輸送道路ネットワークおよび地域防災計画を対象としたケーススタディを行い、脆弱性が高いと評価された OD ペアの中でも、脆弱性評価の水準から大きく離れたような OD ペアについては特に慎重に災害対応の代替策を検討する必要があることを指摘した。また、防災

拠点の脆弱性評価結果は、同一の道路ネットワークの接続性評価手法を用いていたとしても、水準の設定次第で変化しうることから、防災計画策定に対する考え方に応じた適切な水準設定が必要であることの示唆を得た。

本研究では防災拠点のうち、救命・救急活動や救助活動に係る拠点のみを対象としていたが、今後は他の活動に係る拠点にも対象を広げた上で同様の分析を行い、脆弱な防災拠点をめぐる災害対応の代替策についての基礎的な知見を整理していく予定である。

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) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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，Vo.19，No.6，pp.232-243，2019。
- 5) 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。
- 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) 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。
- 8) 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。
- 9) Bell, M.G.H., Kurauchi, F., Perera, S. and Wongc, W.: Investigating transport network vulnerability by capacity weighted spectral analysis, *Transportation Research Part B*, Vol.99, pp.251-266, 2017.
- 10) 中南孝晶，中山晶一朗，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.1141-1148，2018。
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 小泉智也, 秋山徹太, 齊藤潤, 佐藤彰馬, 平野樹, 諫川輝之: 東京都江東区の大規模集客施設における災害リスクと防災対策, 人間・環境学会誌, Vol.33, No.1, p.45, 2019.
- 16) 林和宏, 齊藤大樹: 防災拠点建物を対象としたリアルタイム耐震診断システムの社会実装—市役所庁舎へのシステム導入とその運用状況. 日本地震工学会論文集, Vol.19, No.5, pp.5_378-5_387, 2019.
- 17) 大久保天, 本村由紀央, 中村和正, 小野寺康浩: 大規模地震時における災害対応の遂行を阻害するリスク源の特定, 農業農村工学会論文集, Vol.82, No.2, pp.91-100, 2014.
- 18) 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, 土木計画学研究・論文集, Vol.74, No.5, pp.I_303-I_314, 2018.
- 19) 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.I_591-I_603, 2018.
- 20) 石川県: 石川県地域防災計画 地震災害対策編, 2019.
- 21) 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)

(Received October 2, 2020)

(Accepted ??,?)

A VULNERABILITY ASSESSMENT OF DISASTER PREVENTION BASES
AND A BASIC STUDY OF DISASTER RESPONSES RELATED TO
VULNERABLE DISASTER BASES

Shuji OSAWA and Makoto FUJII