

大地震における広域的な道路ネットワークの信頼性分析

柴瀬 憲治¹・中山 晶一郎²・高山 純一³・藤生 慎⁴

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: like_base_ball_0504@yahoo.co.jp

²正会員 金沢大学教授 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フェロー 金沢大学教授 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

⁴正会員 金沢大学助教 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: fujii@se.kanazawa-u.ac.jp

東日本大震災以降我が国は地震活動期に入ったと言われている。そこで、非常時における交通機能がいかんとして確保し、速やかな社会回復を図るか、ということは重要な課題といえる。本研究では、非常時における道路網の連結性能を評価する信頼度の計算を行い、広域的な道路網の信頼性分析を行った。リンク信頼度は従来の研究から道路破壊に影響する様々な要素について考慮し、道路ネットワークについては、広域的なネットワークを作成した後にOD間の連結確率を近似解により求め、リンク毎の信頼性を分析した。石川県を対象に分析を行い、非常時の道路網における連結信頼性が特に低い箇所をGISによって表示した。

Key Words : Reliability, a major earthquake, wide-area road network, GIS

1. はじめに

道路は、生活を営む上で最も基本的な活動基盤の1つである。交通機能が麻痺すれば社会活動、産業活動に混乱を引き起こし、社会生活に大きな影響を与える。交通機能が麻痺する原因としては、非常時の場合、地震、豪雪、水害などシステム外部からの影響によって、交通機能が低下する場合が存在する。非常時における交通機能をいかんとして確保し、速やかな社会回復を図るか、ということは重要な課題といえる。

1995年に発生した阪神・淡路大震災では、狭い地域に交通システムが集中していたために、そのほとんどすべてが利用不能となった。交通システムの冗長性が事前に十分確保されていないと、大都市圏においても交通システムが麻痺してしまう可能性が認識された。また、2011年の東日本大震災や、首都直下地震の東海・東南海地震など、大規模な地震災害の発生が懸念される我が国において、地震災害が発生した時の被害や影響を想定しておくことには大きな意義があると言える。

これを踏まえて、地震などの大災害が発生した時（非

常時）の広域的な道路網の信頼性を分析する必要がある。本研究では、非常時における道路網の連結性能を評価する信頼度の計算方法を提案し、広域的な道路網の信頼性分析を行う。分析で得られた結果を用い、広域的な道路網における連結信頼性が低い箇所と高い箇所を明確にすることを目的とする。

2. 既存研究と本研究の位置付け

(1) 信頼性評価の既存研究

2点間信頼度を求める代表的な手段としては、最小パス法 (Minimal-Pathset Method) , 最小カット法 (Minimal-Cutset Method) が挙げられる。最小パス法¹⁾とは、対象とする2点間を枝列で結ぶ経路であるパスをすべて求め、それらのパスのうち少なくとも1本のパスが発生している確率を計算し、2点間の連結確率を求める方法である。最小カット法²⁾とは、それに属する枝を取り除くと、対象とする2点間が連結不能となる切断状態であるカットをすべて求め、それらのカットが1本も発生しない確率を計算し、2点間の連結確率を求める方法である。これ

らの特徴としては、各経路において通過するリンクが重複すると厳密解と離れた結果となる事、ネットワーク規模が大きくなると膨大な計算が必要になる事等が特徴として挙げられる。

ここで、ミニマムパス法を基本的な考えとしてここで、ミニマムパス法を基本的な考えとして、以下の式を用いる。

$$\phi_i = 1 - \prod_{s=1}^P \left(1 - \prod_{a \in P_s} x_a \right)$$

$\phi_i(x_a)$: i 番目のOD間の連結確立を表すシステム構造関数
 x_a : a 番目のリンクの連結確立を表すシステム構造関数

この方法では、乱数を発生させて、各リンクについて発生した乱数がリンク信頼度より小さい場合はそのリンクは通行可能とし x_a を1、リンク信頼度を超えている場合はリンクは通行不可能とし x_a を0として $\phi_i(x_a)$ を算出する。この結果、 $\phi_i(x_a)$ は1か0で表現され、1であれば連結、0ならば途絶しているという事になる。この方法は、従来の方法と比較して計算時間とメモリー量がきわめて少なく済み、大規模ネットワークにも適用が可能である事がメリットとして挙げられる。

連結信頼性の厳密解を求める場合には、ネットワーク規模の増大にともなう計算回数、計算時間の増加が問題となり、信頼性の近似解を求める場合にはその精度が問題となっている。道路網の信頼性解析を行う場合、どの程度の誤差まで許容できるのかを確認したうえで、短時間で計算が終わる近似解法が適当であると言える。本研究では上記での計算方法を用いて連結信頼性を評価する。

(2) リンク信頼度の既存研究

リンク信頼度の計算方法は今まであまり行われてきていない現状である。その原因は、リンクとなる道路の途絶が地震などの災害の大きさや、道路周辺の構造物、地盤の強さ、道路の長さ、幅員、車線数や構造といった様々な要因によって成り立っているためである。また、リンクの特性値というものは定量的に得ることが困難なことも挙げられる。しかし、道路ネットワークの連結信頼性を計算するに当たっては、リンク信頼度の存在はきわめて大きく、リンク信頼度を定義することによって計算でき、また、リンク信頼度の数値によって連結信頼性の結果に大きく影響を及ぼす。

塚口ら³⁾の研究では、京都市における地震災害時のリンクの通行可能確率を道路幅員に加え、沿道建物の状況を考慮して通行可能確率を計算している。ここで、道路機能障害に影響する諸要因を幅員に焦点を当て図1に

沿道建物条件	<ul style="list-style-type: none"> ・建物の構造 ・当該道路区間沿道の建物数 ・建物の倒壊確率 ・建物倒壊のうち道路内に倒壊する建物の割合 ・倒壊建物の倒壊幅の分布
建物条件	<ul style="list-style-type: none"> ・道路幅員 ・官民境界線から建物までの距離

図1 通行可能確率に影響する諸要因

示す。

廣瀬ら⁴⁾の研究では、橋梁を除く全道路リンクに対して、3つの指標を用いた指数分布に基づく信頼度判定モデルを構築し、モンテカルロシミュレーションによる信頼度解析を行っている。ここでは、リンク長、幅員、地盤特性値を道路リンクの被災に関わる評価指標として用いている。リンク長に関しては、リンクの長さが長くなるほど道路構造破壊の危険が高くなるという考え方、道路幅員については、幅員が狭くなるほど道路閉塞の危険が高まるという考え方である。これらのモデルには地震動を入力変数に用いている。また、地盤特性値に関しては、地盤条件が悪いほど道路本体、および沿道構造物の破壊危険度が高いという考え方である。

塚口らの研究では対象道路ネットワークが京都市、廣瀬らの研究では対象道路ネットワークが徳島県となっている。実際に地震が発生した際、物資の輸送のための道路ネットワークは発生地点のみではなく、隣接県、人口の多い都市であったり、また、それらの都道府県と発生地点を繋ぐ都道府県など、非常に広域的な道路ネットワークとなっているが、これらのような広域的な場合での連結信頼性の評価は行われていない現状である。

3. 道路ネットワークの作成

(1) 緊急輸送道路について

非常時の連結信頼性を分析するため、緊急輸送道路データを基に道路ネットワークの構築を行った。緊急輸送道路とは、阪神淡路大震災での教訓を踏まえ、地震直後から発生する緊急輸送を円滑に行うため、高速自動車国道、一般国道及びこれらを連絡する幹線道路と知事が指定する防災拠点を相互に連絡する道路で、都道府県毎に第1次～第3次まで設定されている⁵⁾。名称、選定基準ともに若干違いが見られるが基本的には1次道路が高速道路、一般国道などの幹線道路によって広域的な道路網を確保する。次に、2次、3次が1次道路と役場、防災拠点を連絡する形を取っている。地方毎で緊急輸送道路が定められているケースも見られ、救援・救護活動や人員・物資の緊急輸送を迅速に行うため、広域的な緊急輸送道路の確保に向けた検討を地方規模でも行っている。以上より、県境も連結していると判断できるため、緊急輸送道路を基に道路ネットワークの構築を行うものとする。



図2 本州の国道，高速道路ネットワーク図

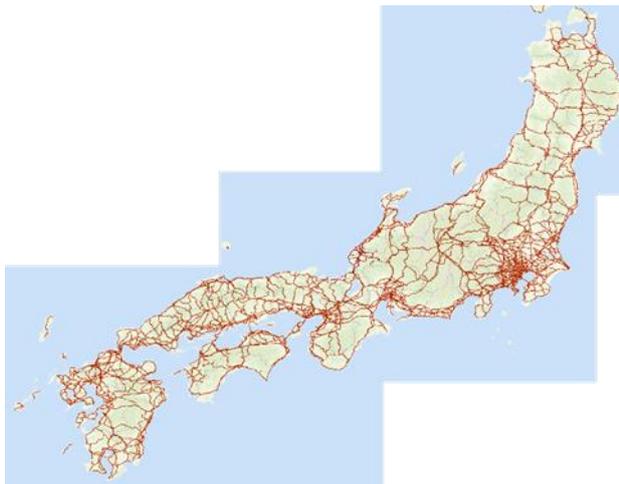


図3 1次緊急輸送道路

る。参考に、北海道，沖縄県を除いた本州の国道，高速道路ネットワーク図と緊急輸送道路の中で広域的な道路網の形成の役割を担っている1次道路を図2，3に示す。

(2) 石川県を対象としたリンク・ノードの作成

対象とする道路ネットワークの作成を，ArcGIS（地理情報を収集、整理、管理、解析、伝達、および配布するための包括的なシステム）⁹⁾を用いて行った。緊急輸送道路のデータは，国土交通省・国土数値情報⁷⁾のデータを使用した。このデータはリンク・ノードによって属性が分けられておらず，1次，2次，3次各々で道路種毎に属性が分かっている。本研究は上記のような属性に分けられた石川県の道路データをリンク・ノード毎で属性分けを行った。その結果，総経路数232の道路データからノード数634，リンク数638のデータが作成された。作成前後の石川県の道路ネットワークを図4に示す。

4. 連結信頼性の計算と分析

(1) 分析対象区間の選定と計算手順

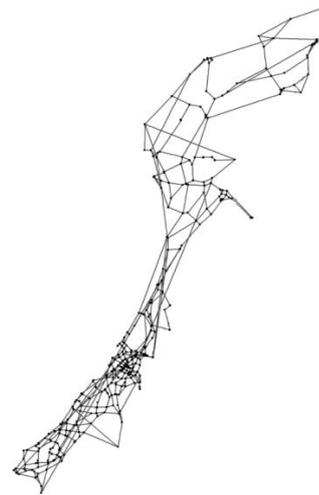


図4 作成前（上）と作業後（下）の石川県道路ネットワーク図

本研究に用いる計算方法の妥当性を確認するため，対象区間の選定を石川県のみを対象として計算を行った。分析対象区間は石川県庁(ノード番号411)と能登地方の珠洲市役所(ノード番号465)の相互間で，連結確率を計算した。ここで，ODを石川県庁能登地方においた理由は，災害時の対策本部，救援物資の管理などを都道府県庁で行うことが通常であるからである。リンク信頼度の値は，今回の道路ネットワークでは0.7として計算する。この値を定めた理由は，対象地域を石川県に限定しているため，震源からの距離による違いは大きくないものと仮定した為である。本研究では，緊急車両の通過や避難といった緊急を有する事象を対象とするために，OD間を結ぶ経路は遠回りをせず最短経路を通過することを考えた。そこでダイクストラ法を用いて最短経路を探索した。また，緊急車両の通過や避難といった緊急を有する事象を対象とするために，OD間を結ぶ経路は遠回りをせず最短経路を通過することを考えた。そこでダイクストラ法を用いて最短経路を探索した。連結確率の計算手順のフローを以下の図5に示す。道路データの情報を複雑にすると計算時間が膨大となるため，各リンクの自由

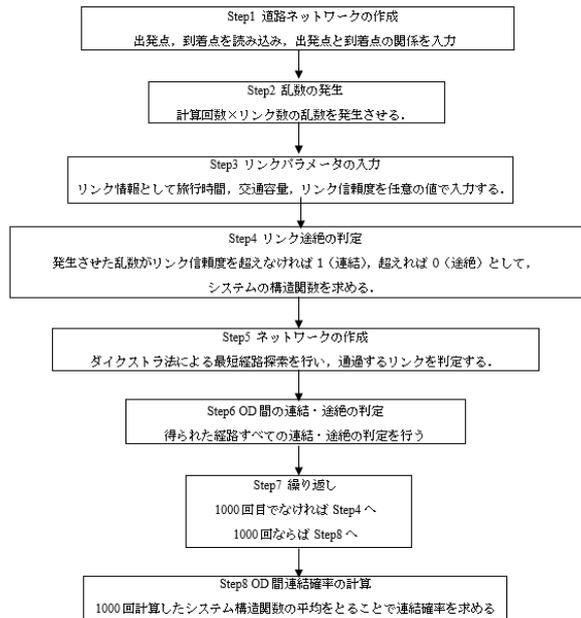


図5 OD間連結確率計算のフロー



図6 ArcGISによる可視化（全体図）

旅行時間、交通容量の値を一定の範囲内で任意の数字を入力した。以上の条件から、乱数毎に変わる最短経路での各リンク毎の連結・途絶を求め、システム構造関数からOD間の連結確率を求めた。以上の計算を1,000回行い、平均を取った結果、石川県庁から珠洲市役所までの連結確率は0.52となった。ただし、ここでは必要な情報を任意で入力しているため実際の値ではなく、前述した条件で計算が行えたことを確認出来た。

(2) 信頼性の分析

(1)の方法で得られた結果を用いてリンク毎の信頼性を分析し、分析結果をArcGISによって可視化させた。分析の方法としては、各計算回数においてOD間が途絶した場合の通過リンクネットワークと、その時の途絶リンクを比較すると、どのリンクがOD間の途絶に影響しているかを調査することが出来る。この調査を全ての計算回数において行い集計をすることでOD間の途絶に影響しているリンクの中でも特に影響回数の多かったものを抽出することが出来る。抽出されたリンクを図6, 7に示す。分析結果より、任意の値の場合は終点となる珠洲市役所周辺のリンクの途絶回数が多かった。これは、各計算毎で毎回最短経路探索を行っており、その度に経路は変わるが終点の周辺リンクはかなり高い確率で選択されるため、必然的に途絶回数が多くなっているのだと考察される。

5. おわりに

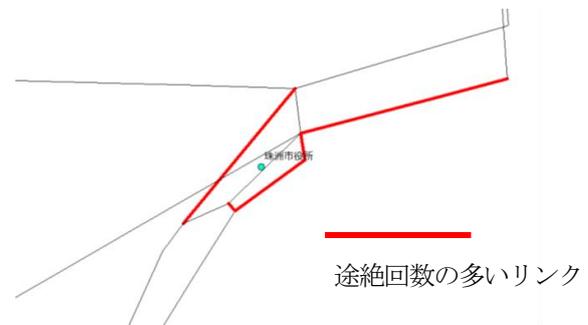


図7 拡大図

初めに、本研究の成果と課題について述べる。成果としては、リンク・ノードの情報がない道路のデータからリンク・ノードを作成する手法を構築したことは1つの成果である。本稿では石川県を対象としているが、本研究で構築した手法を用いれば更に広域的なネットワークを作成する事が可能になる。従って、石川県のみに限らず更に広域的な分析が期待できる。

計算方法に関しては、厳密解ではなく近似解を用いているが、この近似解はブール演算を用いた厳密解法との誤差は極めて小さいものであり、計算時間の短縮が期待できる計算方法である。また、本研究に用いられた道路データで経路探索が行えるようにプログラムを作成し、任意のパラメータで計算が可能であることが確認されたため、さらに細かいデータを入手出来れば更に精度の高い連結確率を算出することが出来る。

本研究の課題は、リンク信頼度の計算方法が挙げられる。本研究は、リンク信頼度の値を任意の値にした。災害時に道路が通行可能な確率はリンク長、地盤特性値、沿道建物状況など様々な要素に影響するものである。成果でも述べたが、当然、要素を多く取り入れたほうがよ

り正確なリンク信頼度を算出することが可能であり、より細かい分析を行うことが可能である。しかし、地盤特性値や沿道建物などのデータがなければ当然考慮することは不可能であり、また、広域的な道路網の場合はそれに伴いデータの量も膨大なものとなる。既存研究に計算方法は提案されてはいるが、予め用意したデータが計算方法に当てはまるとは限らず、当てはまらない場合、計算できる形に変換しなければならない。どの要素をどの程度考慮するかが重要な要素となる。

また、リンク・ノードの削除も課題として挙げられる。ネットワークの作成を成果に挙げたが、不要なリンク・ノードを削除も必要な事項である。本研究は広域的なネットワークで計算を行うので、計算の効率化を図るためには不要なリンク・ノードを削除して計算を迅速かつ正確に行わなければならない。

今後の展望は、先ず第一に全国道路ネットワークへの適用についてが挙げられる。石川県では本研究で構築した手法で計算可能であった。今後は全国を対象とした場合でもこの方法で行うことにする。石川県沖で大地震が発生したと仮定して全国からの車両の移動を考える。支援物資の基本的な流れとしては、まず発地から1次物資集積拠点、2次集積拠点、避難所といった流れになっている⁹⁾。この時、1次集積拠点は県庁になる場合が多い。従って、石川県庁と全国の地点間での連結信頼性を分析する。発地には、人口の多い大都市及び石油が確保できる都市を考える。人口の多い大都市として、東京都、大阪府、愛知県、を発地にする。また、石油の確保を石油精製所のある地域からの移動であると考え、岡山県を発地に考慮する。また、発地と石川県庁を結ぶ都道府県として、新潟県、埼玉県、群馬県、山梨県、長野県、岐阜県、富山県、福井、滋賀県、京都府、兵庫県、鳥取県を併せた道路ネットワークが以下の図8となる。図の赤色の点が発地となる各都道府県の庁舎で、青色の点が終点となる石川県庁である。この道路ネットワークからリンク・ノードを作成し、その後それぞれの発地から石川県庁までの連結確率を計算する。

次に、石川県のみの場合では、リンク信頼度は任意の数値を用いて計算している。この数値を算出するために必要なデータを集めなければならない。現段階では、リンクの長さは国土数値情報のデータから取得出来ておりリンクの長さからリンク信頼度を求める計算プログラムも出来ている。

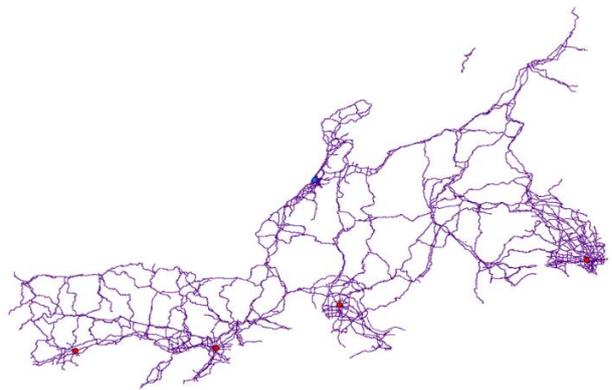


図8 対象道路ネットワーク

他の要素を考慮する際、データの取得と計算プログラムの作成を行う必要があるため順次行っていく予定である。

7. 参考文献

- 1) 井上紘一，稲垣敏之：大規模システムの信頼性解析へのグラフ理論の応用，システムと制御，Vol.20，No.12，pp.641～648，1976年。
- 2) 小林正美：道路網・ネットワークシステムの信頼度解析法に関する研究，第15回日本都市計画学会学術研究発表会論文集，pp.385～390，1980年11月。
- 3) 塚口博司，小川圭一，田中耕太，本郷伸和：歴史都市における道路機能障害の推定，歴史都市防災論文集，Vol.3，2009年6月。
- 4) 廣瀬義伸，近藤光男，綾貴穂，山根丈：地震防災のための道路網および緊急施設整備計画に関する研究，土木計画学研究・論文集，No.15，1998年9月。
- 5) 耐震ポータルサイト
<http://www.taishin.metro.tokyo.jp/yuso/index.html>
- 6) ArcGIS とは? | ArcGIS Resource Center
<http://resources.arcgis.com/ja/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- 7) 国土交通省HP
<http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudojoho.html>
- 8) 支援物資物流システムの基本的な考え方 「『支援物資物流システムの基本的な考え方』に関するアドバイザー会議」 報告書 pp.2，平成23年12月