

# 大規模道路ネットワークを対象とした 連結信頼性指標の解法に関する研究

山城 孝哉<sup>1</sup>・阿部 翔太<sup>2</sup>・有村 幹治<sup>3</sup>・田村 亨<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 室蘭工業大学 建築社会基盤系専攻 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)  
E-mail: s2121102@mmm.muroran-it.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 室蘭工業大学 建築社会基盤系専攻 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

<sup>3</sup>正会員 室蘭工業大学 暮らし環境系領域 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

<sup>4</sup>フェロー会員 北海道大学 北方圏環境政策工学 (〒060-0808 北海道札幌市北区北8条西5丁目)

東日本大震災後の早期の道路啓開過程が注目されたように、道路ネットワークの連結信頼性評価は、減災のための事前評価において重要な視点となる。しかし、連結信頼性を用いた評価指標を作成する際、ネットワークの規模が大きくなると計算時間が膨大になる問題がある。本研究では、近似解法により計算時間を短縮し作成する評価指標を提案した。また、大規模道路ネットワークを対象とした連結信頼性指標を作成し、手法の有効性の検討をした。

**Key Words :** *large road network, Network reliability, connection reliability index, approximate solution method*

## 1. はじめに

東日本大震災が引き起こした大津波は、太平洋沿岸部の広域に亘り道路ネットワークへ壊滅的な被害をもたらした。被災の影響により道路は途絶し、迂回路が存在しない、あるいは迂回時間が膨大になるといった、道路ネットワークの脆弱性が露呈した。その結果、緊急物資の輸送や重症患者の救援、救助が困難となる等、道路整備のあり方や広域な道路ネットワークの見直しを余儀なくされた。

しかし、従来の道路整備評価においては道路ネットワークの連結信頼性は十分には考慮されてこなかった。これは連結パターンの評価に莫大な時間を要することが一つの要因となっていた。

そこで本研究では、全被災パターン毎のネットワーク全体の総移動時間やノード間の移動時間の増加傾向により評価を行う新たな連結信頼性指標を作成する。その上で、計算で用いる被災パターンをサンプリングすることで計算時間を短縮し、連結信頼性指標を近似する評価手法を提案する。また、大規模な道路ネットワークを対象とした連結信頼性指標をケーススタディとして算出し、手法の有効性の検討を行う。

本研究では、まず第2章において道路ネットワークの防災機能評価に関するレビューを行い、既存研究におい

て重要な箇所や問題点について取り上げる。第3章では、計算で用いる仮想ネットワークを作成した上で、全被災パターンを総当たりで計算を行い、厳密解を算出する。第4章では、近似解法により被災パターンを抽出して厳密解と同様の計算を行い、近似解を算出する。最後に、第5章において厳密解との計算結果及び計算時間の比較を行い、考察とする。

## 2. 道路ネットワークの防災機能評価に関するレビュー

### (1) 連結信頼性の定義

「連結信頼性」は、Ramesh POKHAREL<sup>1)</sup>によって詳しくレビューされている。POKHARELは既存の信頼性研究をそれぞれ、概念の研究、数学的理論の研究、評価の実践的方法論、記述的研究、評価手法の応用研究、信頼性を向上させる方法の6種類に細分化させてレビューを行っている。

信頼性の概念に関する研究は、その大半が移動時間を用いて定義されている。Iida<sup>2)</sup>は、連結信頼性は与えられた既定の時間内に目的地へ到達できる確率として定義している。Berdica<sup>3)</sup>は、与えられた二つのノード間の移動時間が指定された時間を超えない確率を連結信頼性として定義している。このように、これらの研究は目的地

に到達するために必要な移動時間が指定された時間内であるか否かに焦点を当て、「連結信頼性」を定義している。この他にも、Nicholson, Schmockerら<sup>4)</sup>のようにノードが接続されている確率、すなわちそれは目的地に到達することが可能か否かという接続性の観点から信頼性を定義している例もある。

## (2) 連結信頼性指標

本節では、道路ネットワークの連結信頼性の評価を行うための指標の研究レビューを行う。阿部ら<sup>5)</sup>は仮想ネットワークを用いて全点連結信頼性指標、ノード間の連結信頼性指標を作成した。前者は、総移動時間の増加のしかたによって、ネットワークが密であるか粗であるかを判断することができる。後者も同様にノード間の連結性について判断することが出来る。また、地方都市を対象として、大都市との連結信頼性を緊急輸送の観点から評価するため、ノード間の連結信頼性指標をカーラーの救命曲線を用いて評価する指標も提案している。

しかし、これらの指標においては評価するリンクを増設する場合、パターン数が指数関数的に増加するため、現況ネットワークと将来ネットワークを比較する際には移動時間と被災パターン数を正規化して評価する必要があると考えられる。また、リンク数の増加に伴う被災パターン数の指数関数的増加により、計算時間が増加してしまう問題点が挙げられる。

## (3) 本研究の位置付け

本章の第1節では連結信頼性の定義について、第2節では評価指標として考案された連結信頼性指標についてレビューを行った。これらを参考に、本研究では移動時間及び既定の時間内に目的地へ移動できる被災パターンに着目して、連結信頼性を定量化する指標の構築を試みる。さらに、大規模な道路ネットワークを対象に、計算時間の問題に対して被災パターンを抽出し、近似することにより連結信頼性指標を算出する。

## 3. 厳密解による指標作成

### (1) 仮想ネットワークおよび計算手法

本研究では阿部らの研究を基に、ノード数11、リンク数20の仮想ネットワークを用いて各連結信頼性指標の計算を行う。この仮想ネットワークを図-1に示す。防災拠点はノード①に設定した。その上で全被災パターンを生成し、それぞれのノード間の移動時間を算出した。被災によって完全に途絶したノード間の移動時間は、本研究では仮想的に十分大きな値として250分に設定し、同一ノード間の移動時間は0として取り扱い、所要時間の算出を行った。図-1に仮想ネットワークを示す。図中、丸

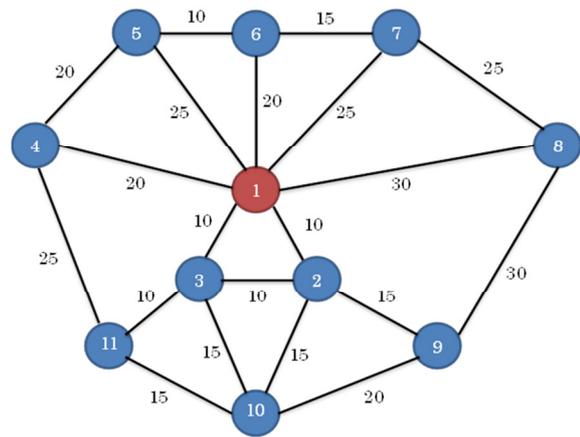


図-1 仮想ネットワーク

の中の数字がノードの番号である。ノードを結ぶ線がリンク、線の横の数字がリンクの移動時間を表す。

## (2) 全点連結信頼性指標

本節では、前節で求めた全ノード間の移動時間を基に全点連結信頼性指標の作成を行う。阿部らによる全点連結信頼性指標は任意のネットワークの全被災パターンにおける全ノード間の移動時間の総和により定義される。図-2に仮想ネットワークの全点連結信頼性指標の計算例を示す。

仮想ネットワークにおける全点連結信頼性指標の内訳をみると、被災パターンの変化により、全体の移動時間が波打つように増加する傾向を示した。総移動時間が急増するパターンは、ネットワークの途絶により、孤立するノードが発生したと考えられる。

## (3) 防災拠点からの連結信頼性指標

本節では、防災拠点（ノード①）から他ノード間の一組に着目した二点間の連結信頼性指標の計算事例を示す。防災拠点からノード⑨へ移動するときの移動時間を抽出

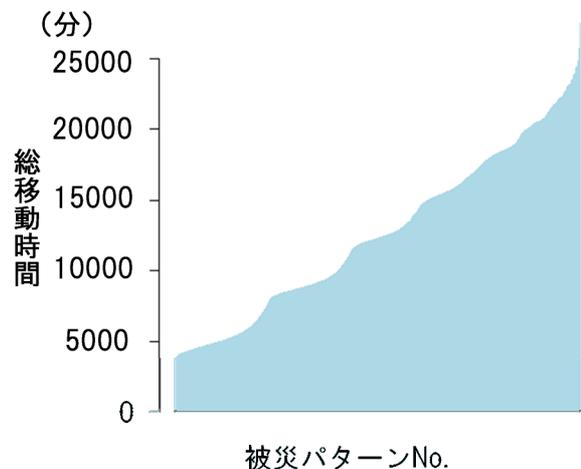


図-2 全点連結信頼性指標

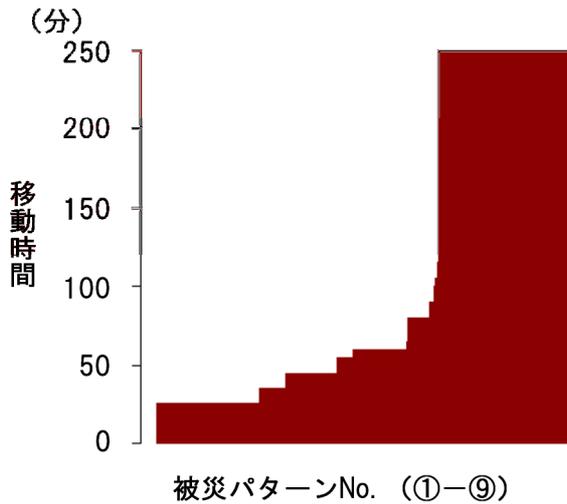


図-3 防災拠点からの連結信頼性指標（ノード①～ノード⑨）

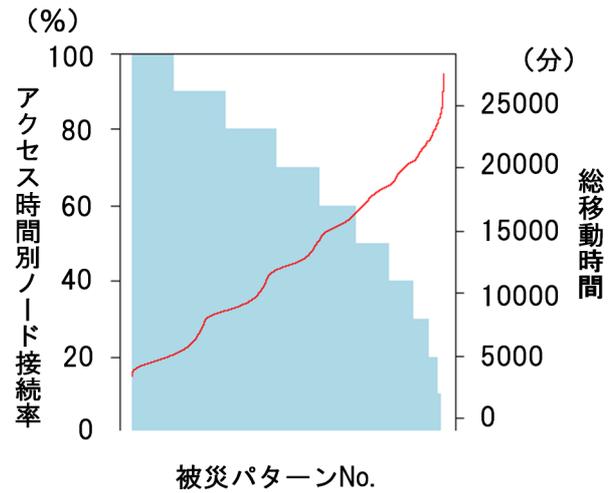


図-4 防災拠点からのアクセス時間別ノード接続率

し、昇順に並び替えたものを図-3に示す。

図-3では、他ノードと防災拠点間の組み合わせの事例と比べると移動時間の増加が大きく、防災拠点まで移動不可となるパターン数が多い。これは、ノード⑨から防災拠点へ移動するには他のノードを必ず経由しなければならないため、防災拠点までのリンクが1本でも被災すると移動時間が増加してしまうためと考えられる。

ここで仮に災害が発生し、重症患者を一刻も早く防災拠点へ搬送しなければならないシナリオを想定すると、図-3の指標を用いることで一定の時間内で移動可能な被災パターンの出現傾向を見極めることが重要となる。

#### (4) 防災拠点からのアクセス時間別ノード接続率

本節では、防災拠点から各ノードへ指定した時間内に到達できる確率に着目した連結信頼性指標の作成を行う。以降、この確率を「アクセス時間別ノード接続率」と呼び、その定義を式(1)に示す。

$$P = \frac{OD_{Y \geq t}}{OD_{all}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、Pはアクセス時間別ノード接続率(%),  $OD_{Y \geq t}$ は防災拠点からY分以内に到達できるノード数,  $OD_{all}$ は全ノード数である。

ここで、式中のY値を60分と仮定してノード接続率を求め、得られたアクセス時間別ノード接続率に従い降順に並び替えた図を図-4に示す。なお、折れ線は総移動時間を示している。

アクセス時間別ノード接続率に着目すると、接続率が急激に低下するまでは一次関数のように緩やかな減少を描き、そこから曲線のように値が急降下している。これは、1リンク当たりの移動時間を短く設定したことに加え、仮定したY値がやや大きかったためと考えられる。

次に、総移動時間とノード接続率の関連性に注目すると、おおよそ両者とも指数関数のように増加、減少しているため、全体の概形は反比例している。ただ、ノード接続率が階段状になっている個所と総移動時間の変位点がうまく連動しているようにも見えるが、そうではない個所もあるため、一概に関連しているとは言い難い。

なお、このノード接続率を用いた連結信頼性指標は、救命曲線と連動させて活用することも可能である。例えば、多量出血での死亡率が50%に達するまでの時間が30分とすると、Y値を30としてノード接続率を求めて指標を作成することで重症患者を円滑に防災拠点まで搬送することが出来るか否かといった評価も可能な指標となっている。

## 4. 近似計算による指標作成、及び厳密解計算との比較

3章では全ての被災パターンについて計算を行い、3つの指標を作成した。しかしながら、この方法ではリンクが増える毎に被災パターン数も指数関数的に増加するため、大規模ネットワークを扱う場合には計算時間が膨大になる問題がある。そこで、本章では計算量の軽減及び計算時間の短縮を目的に、被災パターンをランダムに抽出し、指標を作成する近似計算法を提案する。

### (1) 等間隔サンプリング法

本研究では、被災リンク数や被災パターンの形状に関係なく、全被災パターンから一定の間隔で被災パターンをサンプリングする手法を提案する。この手法においては、サンプル数を $2^{16}$ （全被災パターン数の1/16）と設定して計算を行い、厳密解と同様に3つの指標を作成した。全点連結信頼性指標を図-5、防災拠点からの連結信

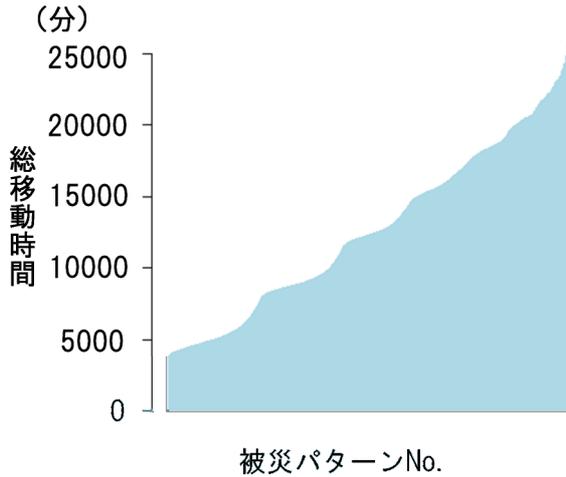


図-5 全点連結信頼性指標 (等間隔)

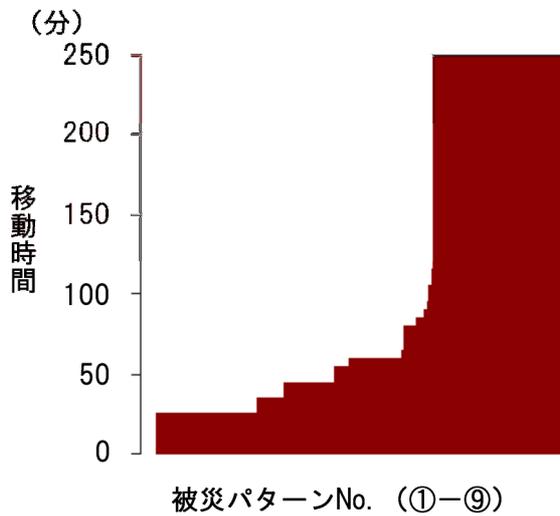


図-6 防災拠点からの連結信頼性指標 (等間隔)

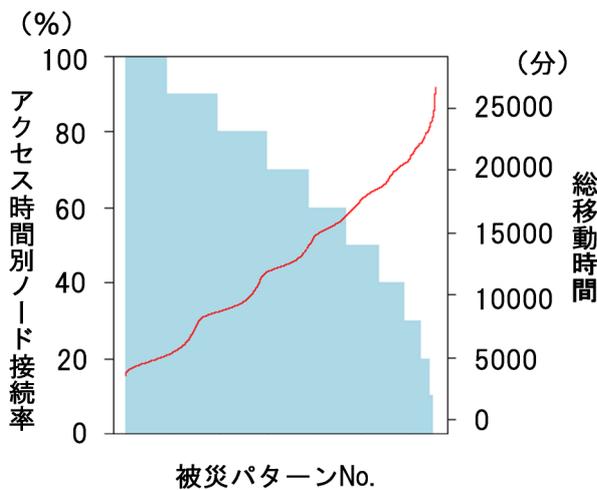


図-7 防災拠点からのアクセス時間別ノード接続率 (等間隔)

信頼性指標 (ノード①～ノード⑨のみ) を図-6, 防災拠点からのアクセス時間別ノード接続率を図-7に示す. 厳密解と比較すると, グラフの概形, 変位点ともにほぼ一致しており, 今回の計算結果においてはサンプリング数を1/16まで減らして指標を作成しても, 十分正確な評価が可能であると判断できる.

この手法の利点は, 等間隔にサンプリングを行うため, 正規化の手間を省くことが出来る上にグラフの作成にかかる時間も短縮させることが可能である. しかし, 全被災パターンを無条件でランダムに抽出するため, 組み合わせのパターンによっては計算結果にばらつきが生じる可能性がある. この点については今後, 繰り返し計算を行い結果にどれくらいの誤差が生じるか等, 詳しく検証していく必要がある.

## (2) 厳密解計算との比較

本節では, 近似計算と厳密解計算の比較を行う. 全点連結性指標を図-8, 防災拠点からの連結信頼性を図-9, 防災拠点からのアクセス時間別ノード接続率を図-10にそれぞれ図示する.

3つの指標とも厳密解計算のグラフとほとんど誤差がなく一致した. 等間隔サンプリング法は被災リンク数毎においても厳密解と一定の間隔で抽出を行う. 本研究にて抽出された被災パターンの組み合わせが, 途絶しやすいパターンあるいは途絶しにくいパターンに偏ることなく均等に抽出されたため, このように一致した結果が表れたと考えられる. この結果を踏まえると, サンプル数をさらに減らして同様に検証することで, さらなる計算時間を短縮につなげることが出来ると考える.

今回, 各算出手法の計算にはワークステーション (UNI-XW-E5S12core) を使用した. その結果, 計算時間は厳密解計算が約4時間半となった. これに対し, 等間

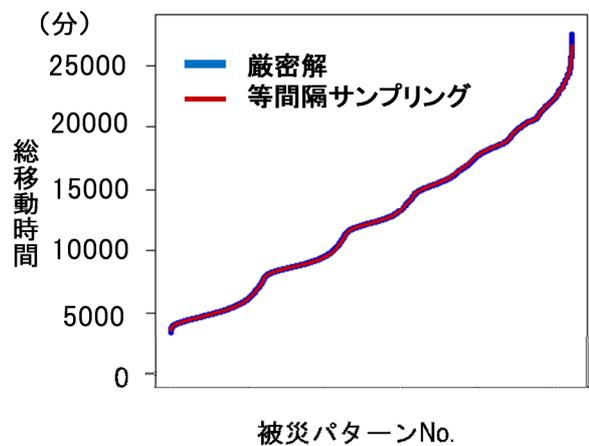


図-8 全点連結性指標の比較図

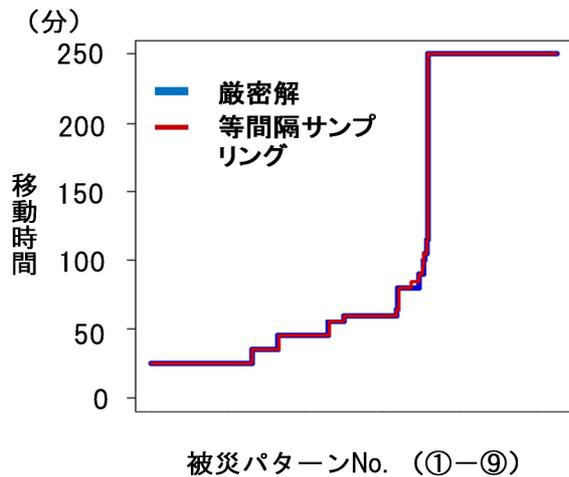


図-9 防災拠点からの連結信頼性指標の比較図

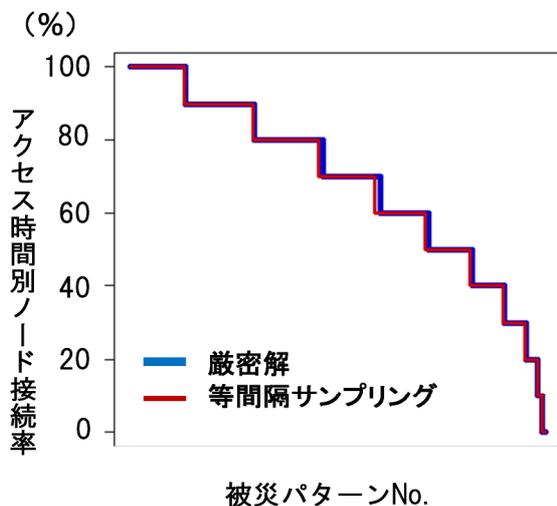


図-10 防災拠点からのアクセス時間別ノード接続率の比較図

隔サンプリング法は24分と厳密解と比べて約1/12であった。サンプリングの比率ほど計算時間は縮まらなかったが、計算時間の短縮という目的を十分果たすことが出来た。以上より、ケーススタディで扱った仮想ネットワークに関しては、等間隔サンプリング法は計算時間を短縮し、かつ厳密解とほぼ変わらない指標を算出することができたといえる。

## 5. おわりに

3章では、ネットワーク全体およびノード間における連結信頼性の正確な定量化を行うために、全点連結信頼性指標、防災拠点からの連結信頼性指標、防災拠点からのアクセス時間別ノード接続率の3つを厳密解計算にて構築した。これらの指標により、ネットワークを改善する

ための優先度や緊急輸送における観点からの改善の度合い等を評価することが出来る。

次に4章では、等間隔サンプリング法により計算時間を短縮させて同様に3指標の構築を行い、厳密解との誤差等の比較を行った。その結果から、今回提案した手法にて厳密解と同様な評価が可能か否かについて考察した。

今回の結果を考慮して、近似解法による評価手法で実際の道路ネットワークへ適用することを考えた場合、現段階ではそのまま適用するのは難しいと考えられる。本研究の等間隔サンプリング法では厳密解とほぼ一致する結果が出たが、無条件のランダム抽出によって計算を行う以上、今回のような結果が必ずしも出るとは限らない。今後は、同様の計算を何度か繰り返して行い、計算結果にどのくらい誤差が発生するか検証する必要がある。さらに、近似解法による評価手法を実際の道路ネットワークへ適用することを考えると、実際に道路が被災しやすい箇所と被災しにくい箇所を見極め、それに応じてリンク毎に重みを付けてサンプリングを行うと、より精度の高い計算を行うことが出来るのではないかと考えられる。

今後の課題としては、今回提案した近似解法が実際の道路ネットワークへの適用が可能とするためにも、近似解法による評価指標の精度を向上させることが挙げられる。この他にも、ノード接続率による指標を用いる場合は、救命曲線とリンクさせてより非常時を想定した評価を行い検証していく必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) Ramesh POKHAREL : Reliability and Vulnerability of Road Network: A Research Review from Practicability Perspective, 土木学会論文集・講演集(CD-ROM), Vol.45, 2012.d
- 2) Iida, Y. (1999). "Basic Concepts And Future Directions Of Road network reliability analysis." Journal of Advanced Transportarion 33(2): 125-134.d
- 3) Berdica, K. (2002). "An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done." Transport Policy 9(2): 117-127.
- 4) Nicholson, A., J.-D. Schmocker, et al. (2003). "Assessing Transport Reliability: Malevolence and User Knowledge." The Network Reliability of Transport ,Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability(INSTR), Elsevier Science Ltd.: 1-22.
- 5) 阿部翔太：地方道路ネットワークの連結信頼性指標の構築に関する研究, 土木学会論文集・講演集(CD-ROM), Vol.45, 2012,

(2013. 4. 1 受付)