

大規模道路ネットワークを対象とする連結信頼性指標の解法に関する研究

Research on the solution of the connection reliability index target large-scale road network

室蘭工業大学建築社会基盤系学科 ○学生員 山城 孝哉 (Takaya Yamashiro)
 室蘭工業大学建築社会基盤系専攻 学生員 阿部 翔太 (Shota Abe)
 室蘭工業大学くらし環境系領域 正会員 有村 幹治 (Mikiharu Arimura)
 北海道大学北方圏環境政策工学 フェロー 田村 亨 (Tohru Tamura)

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。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。

具体的には、被災の影響により道路が途絶し、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指摘できる。従来の道路整備では道路ネットワークの連結信頼性は考慮されていない。そこで、阿部らは、連結信頼性に基づいた新たな評価指標を提案した。阿部論文では、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という問題があり、その解法については論究されていない。

本研究の目的は、阿部らが提案した連結信頼性指標を作成する上で、問題となる計算時間の短縮方法を提案し、評価手法を確立することである。本研究では、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作成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作成し、手法の有効性の検討を行う。

2. 道路ネットワークの防災機能評価に関するレビュー

2.1 連結信頼性の定義

「連結信頼性」は、Ramesh POKHAREL(2011)¹⁾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。本研究では「連結信頼性」の定義に関する研究を中心にレビューを行った。

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(1999)²⁾は、移動時間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(2002)³⁾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(2003)⁴⁾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。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到達できる確率を用いて、連結信頼性を定量化して指標を構築する。

2.2 連結信頼性指標

既存研究の中には、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(2011)⁵⁾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ている。また、リンク数が増加すると被災パターンが指数関数的に増加し、計算時間が増加してしまう問題点を挙げている。本研究では、大規模なネットワークを評価対象と考え、計算時間の問題に対して被災パターンを抽出し、正規化することにより連結信頼性指標を構築する。

3. 厳密解計算による指標作成

3.1 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。そのうえで全被災パターンを生成し、それぞれのノード間時間距離を算出した。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 については、丸で示す地点がノード、丸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。

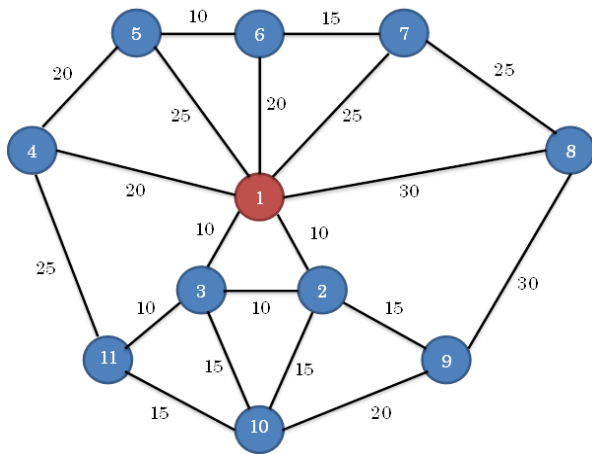


図-1 仮想ネットワーク

3.2 全点連結信頼性指標

本節では、3.1 節で求めた最短時間行列を基に、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。

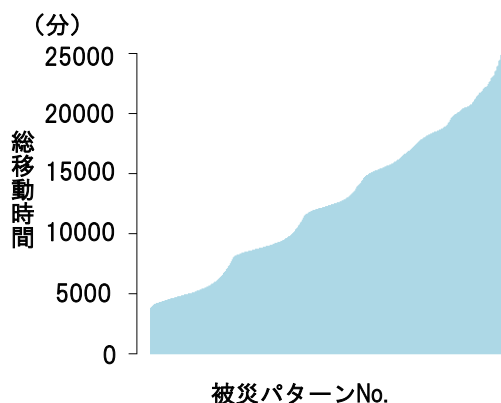


図-2 全点連結信頼性指標

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。

3.3 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図-3 に示す。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し、昇順に並び替えたものを図-3 に示す。

図-4 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。

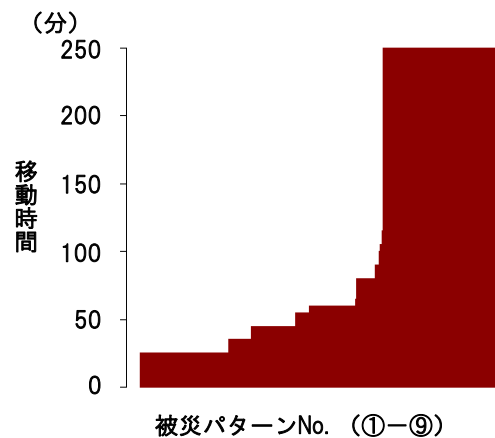


図-3 防災拠点からの連結信頼性指標（ノード①～ノード⑨）

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 のような指標を用いることで一定時間内に搬送できる確率を見極めることも可能である。

3.4 防災拠点からのアクセス時間別連結信頼性指標

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「ノード接続率」と呼ぶことにする。ノード接続率の定義は以下に示す。

$$\text{ノード接続率(\%)} = \frac{\text{防災拠点からY分以内に到達できるノード数}}{\text{全ノード数}} \times 100$$

本研究では式中の Y 値を 60 分と設定してノード接続率を求め、得られたノード接続率に従い降順に並び替えたものを図-4 に示す。なお、総移動時間との関連性を調べるため、こちらの折れ線グラフも合わせて図示する。以下の図を、防災拠点からのアクセス時間別連結信頼性指標とする。

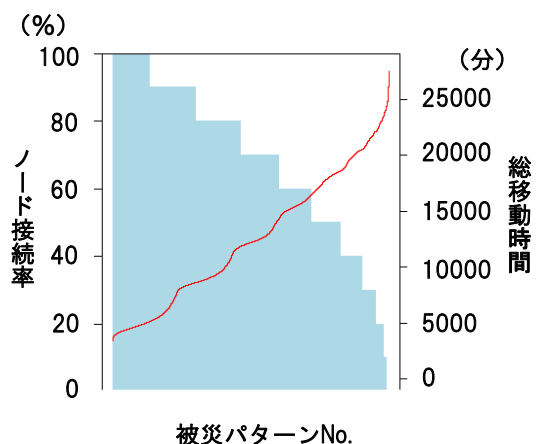


図-4 防災拠点からのアクセス時間別連結信頼性指標

まず、ノード接続率のグラフに着目すると、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、設定した 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、おおそ両者とも指数関数のように増加、減少しているのが、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えない。

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、指標作成した。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。

4.1 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連結信頼性指標を図-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。

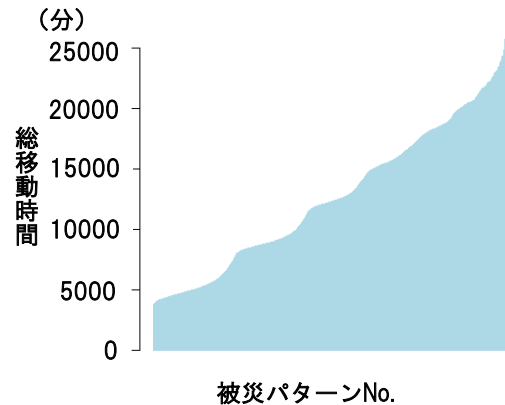


図-5 全点連結信頼性指標 (等間隔)

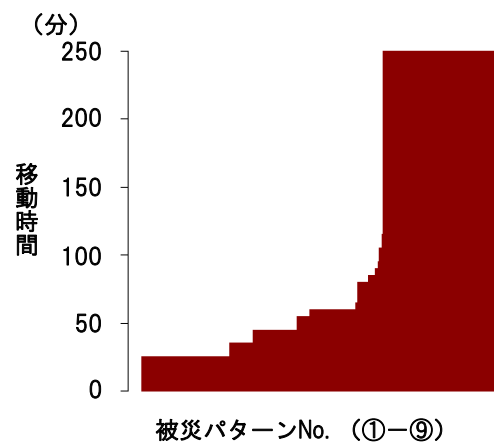


図-6 防災拠点からの連結信頼性指標 (等間隔)

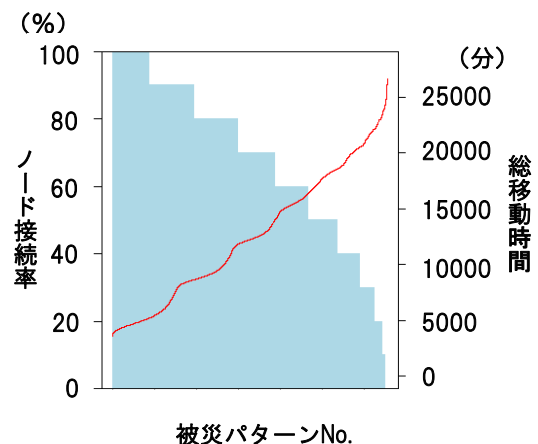


図-7 防災拠点からのアクセス時間別連結信頼性指標 (等間隔)

4.2 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。全点連結信頼性指標を図-8、防災拠点からの連結信頼性指標を図-9、防災拠点からのアクセス時間別連結信頼性指標を図-10 にそれぞれ図示する。

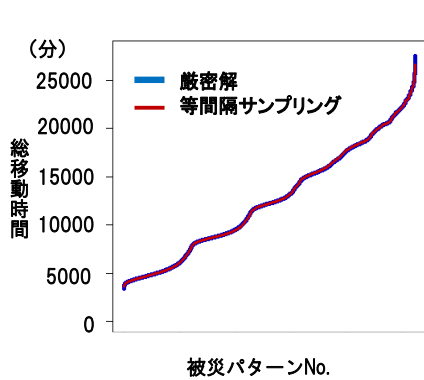


図-8 全点連結性指標の比較図

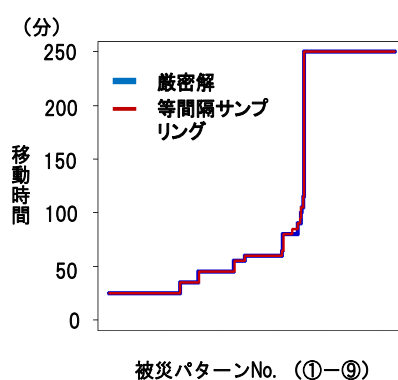


図-9 防災拠点からの連結信頼性指標の比較図

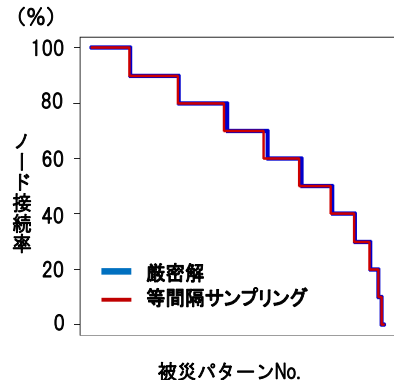


図-10 防災拠点からのアクセス時間別連結信頼性指標の比較図

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。

次に、各算出手法の計算時間については、厳密解計算が約4時間半であった。これに対し、等間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連結信頼性指標の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等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個所と被災しにくい個所を見極め、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。

今後の展望としては、本研究で提案した指標の精度向上及び現実に応用可能な指標の確立を目指したい。そして、後には実際の道路ネットワークを用いて、現況ネットワークおよび将来ネットワークの連結信頼性の評価を行い、リンク増設時における整備効果の評価等の検討も行っていきたい。

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、Vol.45、2012.
- 2) Iida, Y. (1999). "Basic Concepts And Future Directions Of Road network reliability analysis." Journal of Advanced Transportation 33(2): 125-134.
- 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、Vol.45、2012.