

道路ネットワークの連結信頼性指標に関する研究

Study on connection reliability index of the road network

室蘭工業大学建設システム工学科	○学生員	阿部翔太(Shota Abe)
室蘭工業大学建築社会基盤系専攻	学生員	菊池光貴(Kohki Kikuchi)
室蘭工業大学くらし環境系領域	正会員	有村幹治(Mikiharu Arimura)
室蘭工業大学くらし環境系領域	フェロー	田村 亨 (Tohru Tamura)

1. はじめに

平成23年3月11日、マグニチュード9.0を観測した東北地方太平洋沖地震が引き起こした大津波は、太平洋沿岸部の道路ネットワークに広域に亘り壊滅的な被害をもたらした。土砂災害や落石、橋梁の崩落などといったこれまでの局所的な被害とは全く異なり、史上類を見ない超広域な道路ネットワークの途絶現象は、今後の道路整備のあり方について多くの示唆を残した。

その最たるものとして、平常時には何ら問題はなくても、被災の影響により道路が遮断され、迂回路が存在しない、あるいは迂回時間が甚大になるといった、脆弱な道路ネットワークの存在が露呈したことが挙げられる。しかし、時間短縮効果を主として評価する既往の費用便益分析では、多重に結ばれた道路ネットワークの連結信頼性については考慮されておらず、その評価方法も一般化には至っていない。

本研究の目的は、実際の道路ネットワークにおける連結信頼性の評価を行うことが可能な指標の構築である。そこで、本研究ではまず仮想ネットワーク上における被災シミュレーションの結果を基に指標の構築を試み、その指標を用いて仮想ネットワークを評価し、実際の道路ネットワークへの適応および考察を行うものとする。

2. 連結信頼性について

連結信頼性とは、多くの場合は移動時間のばらつきの少なさを表す「時間信頼性」を意味する。時間信頼性については中山ら¹⁾が詳しく研究を行っている。本研究では中山らの研究を参考にしつつ、道路ネットワーク上における「連結信頼性」についての研究を取り扱う。

2.1 連結信頼性の概念

連結信頼性とは、あるノード間が既存の道路ネットワークによって連結されている場合、そのノード間が常に移動可能であるかどうかで連結信頼性の高さを左右する。従って、ノード間が複数の経路で密に連結されているほど途絶する可能性が低い。すなわち連結信頼性が高いと言える。また、道路整備による連結信頼性の向上効果は無視できないと考えられるが、利用者が最短経路を選択することを前提として均衡配分を行う費用便益分析では、その効果を便益として正確に取り扱うことができない場合がある。

2.2 連結信頼性指標

既存研究では、連結信頼性はノード間信頼度とリンク信頼度の2つの信頼度によって指標化されている。ノード間信頼度はノード間が走行可能な確率であり、リンク信頼度は当該リンクを走行可能な確率である。本研究では、ノード間が少なくとも一つの利用可能な経路で結ばれているかというノード間の連結信頼度を取り扱う。

2.3 連結信頼性の向上による効果

上述の通り、本研究ではノード間の連結信頼性を取り扱う。ここでは、新規の道路整備等によって道路ネットワークの連結信頼性が向上した場合に生じる効果について取りまとめる。

- 1) トータルの交通容量が増え、既存利用者に対するサービスレベルが向上する。
- 2) 新規整備部分を中心に新たな利用が可能となり、新規利用者に対する便益が発生する。
- 3) 災害等が発生してもノード間の連結が途絶しにくい強靱なネットワークになる。
- 4) 複数の経路でノード間が繋がるため、ある経路で混雑や事故等が発生しても全体の移動時間の増加が抑えられ、時間信頼性が向上する。

上記中、3)及び4)の2点が信頼性に関するものである。本研究では、連結信頼性指標として3)の効果に着目し、その評価指標の構築を試みる。なお、その評価に際して「ノード間が連結していない(途絶している)」ということは「そのノード間の旅行時間が無限大(到達できない)」として取り扱う必要があるが、本研究の分析では十分に大きな時間を設定することで代替的にその状態を表現している。

また、連結信頼性と類似した脆弱性という概念がある。既存研究を踏まえると、脆弱性は、生起する確率が非常に小さい事象であるものの、発生した場合甚大な被害・損傷が生じることがあるカタストロフ性を対象としている。このような場合、正規確率を厳密に把握し、それを考慮して、期待的な被害・損害を考えることにはあまり意味を見いだせない。また、確率を考えずに、ネットワークの脆弱さや脆弱な箇所を考えるのが脆弱性の研究のモデリング上の特徴であり、米国では、ハリケーンカトリナの被災を受け、防災投資の評価方法の再構築が始まっている²⁾。

3. 最短時間行列の作成

3.1 Warshall Floyd 法

本研究では最短時間行列を求める手法として Warshall Floyd 法を用いている。その手順を以下に示す。

手順 0 $d_{ij}^{(0)} = d_{ij}, (i, j = 0, 1, \dots, m), l = 1$

手順 1 $d_{ij}^{(l)} = \min(d_{ij}^{(l-1)}, d_{il}^{(l-1)} + d_{lj}^{(l-1)})$

手順 2 $d_{ii}^{(l)}$ の中に負の値があれば終了する

手順 3 $l = m$ ならば終了する。 $l < m$ ならば手順 1 から繰り返す

この方法は、まずノード L を固定した上でノード I, J に対して、経路 $I \rightarrow L \rightarrow J$ に至る経路を調べる。もし、経路 $I \rightarrow L \rightarrow J$ の所要時間の方が、それまで求めている経路 $I \rightarrow J$ の最短移動時間より短ければ、それを採用する。ここで、変数 L が表すものは中継点であり、経路 $I \rightarrow L \rightarrow J$ の所要時間の方が今までの最短移動時間より短いということは、 $I \rightarrow J$ へ直接行くよりもノード L を中継した方が早く到達できることを表している。次に、計算に用いた仮想ネットワークを図-1に示す。

3.2 計算結果

本研究では仮想ネットワーク（図-1）を用いて、想定される全ての被災パターンにおける各ノード間の所要時間を算出した。想定される全ての被災パターンについて計算を行ったが、現実的にはあり得ない被災パターンの中にはある（全てのリンクが切れる場合、一つのリンクだけが被災しない場合など）。本仮想シミュレーションでは高規格道路でも被災すること前提に行っており、シミュレーションは All or Nothing（途絶するか途絶し

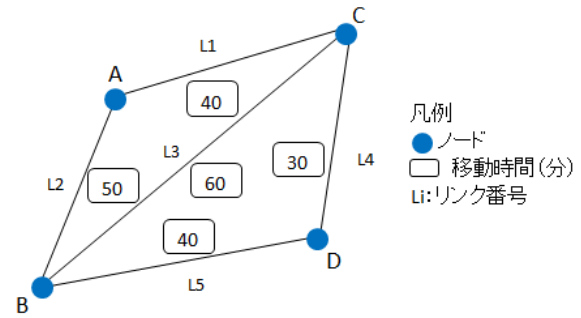


図-1 仮想ネットワーク

ないか）で計算を行ったため、パターン数は 2 の link 数乗になっている。計算結果を図-2に示す。

図-2 は各計算パターンにおける被災想定リンクと、移動時間（横軸）に対するノードペア数（縦軸）を示している。赤の破線で示されている箇所が被災リンクである。なお、被災によって完全に途絶したノード間の移動時間は十分に大きな値として 200 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。

結果が示すように、リンクが 1 本切れた場合には移動時間に大きな差異は無いが、リンクが 2 本以上切れると孤立するノードが発生してしまうため、移動時間が増加し始める。これはリンク数が 5 本という簡単なネットワークによるものであることに起因するものである。また、ヒストグラムに 0 が表示されているのは、同一ノード間の移動によるものである。

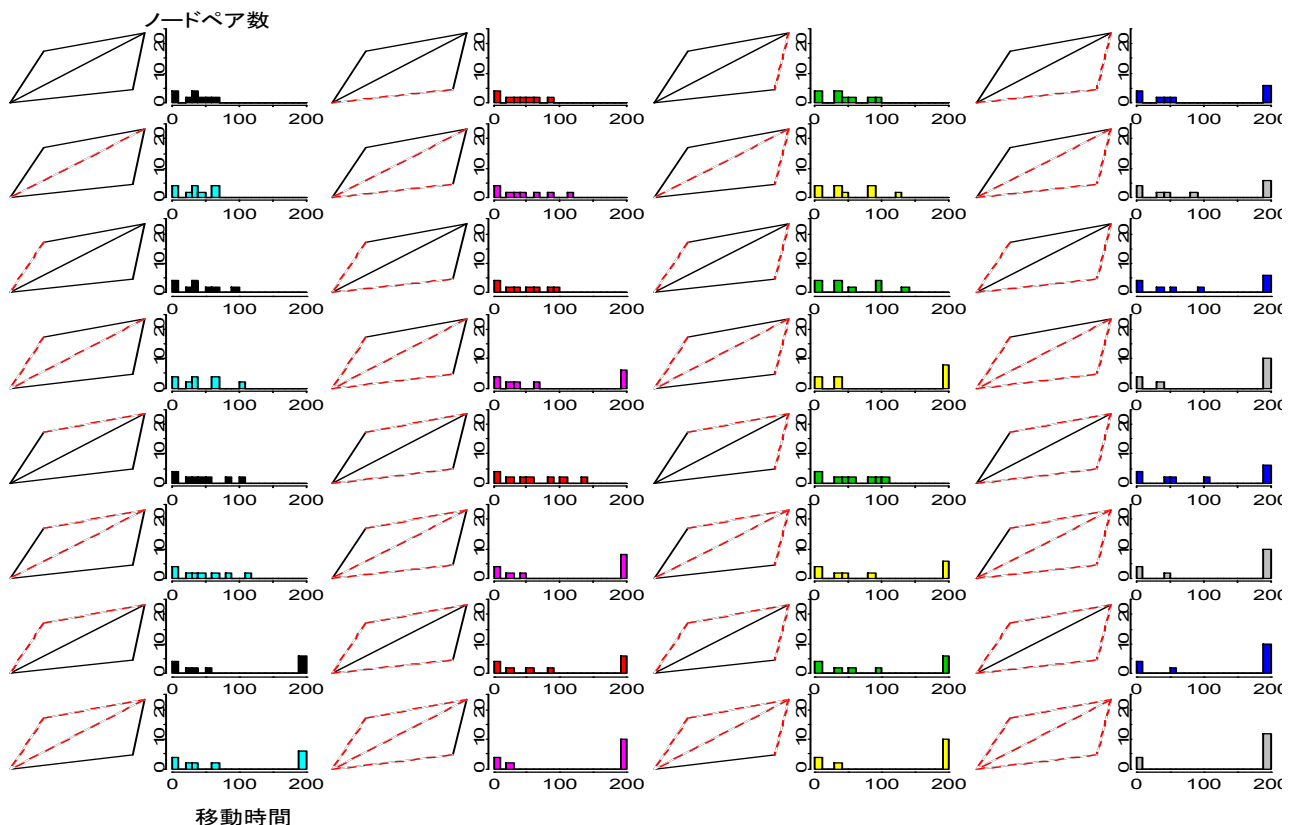


図-2 各被災パターンにおけるノードペア数の分布

4. 指標の作成

以上の結果を基に、連結信頼性指標の作成を行う。本章では①全点連結信頼性指標、②ノード間の連結信頼性指標の作成を行う。詳細は以下の節において行う。

4.1 全点連結信頼性指標の作成

まず、ネットワーク全体の連結信頼性の定量化のため、全点連結信頼性指標を作成する。

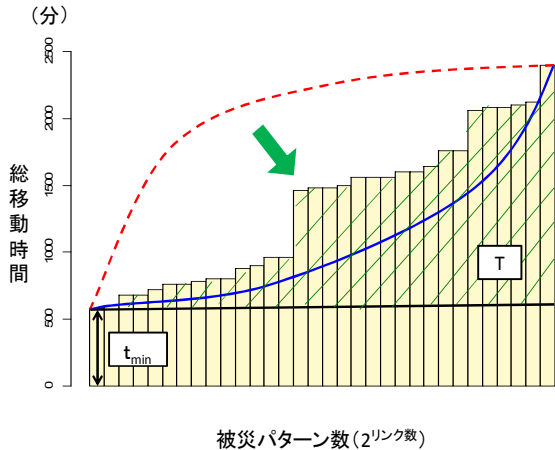


図-3 全点連結信頼性の評価

3 章において算出した時間距離行列を基に、パターン毎に総移動時間を求め、得られた総移動時間に従って昇順に並び替えたものが図-3 である。

各パターンの総移動時間から最小総移動時間を引いた値の合計値を T とすると T は以下の式で表される。

$$T = \sum_{i=1}^n (t_i - t_{\min}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 n は全てのパターン数 ($2^{\text{link数}}$)、 t_i はパターン i の総移動時間、 $t_{\min}$ はネットワークの総移動時間の最小値である。

図を見ると、被災パターンがネットワークにとって深刻であるほど、全体の移動時間が増加していることがわかる。換言すれば被災によってリンクが途絶しても、ネットワークの総移動時間があまり変わらないネットワークほど連結信頼性が高いと言える。従って、本指標においては T の値が小さいほど良いネットワークと言える。

なお、図-3 に示した赤の破線はリンクが途絶すると総移動時間が急激に増えるネットワーク、青の実線はリンクが途絶しても総移動時間の増加が緩やかなネットワークのイメージをそれぞれ表しており、赤の破線のネットワークは図-4 の左図のような疎なネットワークであると考えられ、青の実線のネットワークは、図-4 の右図のような密なネットワークであると考えられる。

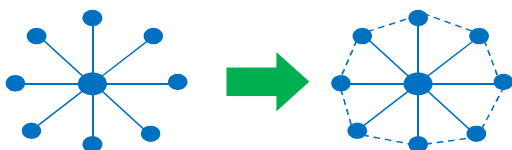


図-4 連結信頼性のイメージ

図-3 より、本研究で用いた仮想ネットワークは青の

実線に近いが、一部、移動時間が大きくなるパターンが見られる。このことから、全体的なネットワークの連結信頼性は高いが、クリティカルな被災パターンが存在することが推察される。これは、極めてシンプルなネットワークであるために、特定の被災パターンによって複数のノードが孤立し、移動時間が急激に増加したためと考えられる。連結信頼性の観点から現実のネットワークを考えた場合においては、そのような被災パターンほど、優先的な対策が必要であると言える。

本指標から得られた知見を基に、次節ではネットワーク上における問題点を明らかにするために、各ノード間の連結信頼性について評価を行っていく。

4.2 ノード間連結信頼性指標の作成

本節では一組のノード間に着目した連結信頼性指標の作成を行う。本研究ではサンプルとして図-1 の仮想ネットワークのノード A からノード D 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-5 に示す。

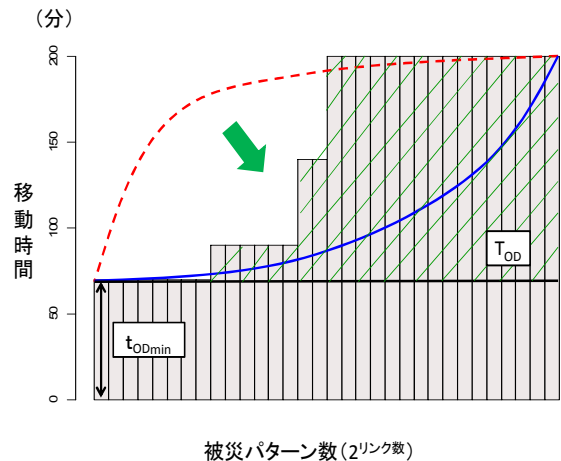


図-5 ノード間連結信頼性の評価

各パターンのノード間の移動時間から、ノード間の最小移動時間を引いた値の合計値を T_{OD} とすると T_{OD} は以下の式で表される。

$$T_{OD} = \sum_{i=1}^n (t_{ODi} - t_{OD\min}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 n は全てのパターン数 ($2^{\text{link数}}$)、 t_{ODi} はパターン i のノード間の移動時間、 $t_{OD\min}$ はノード間の移動時間の最小値である。4.1 節のように、被災によってリンクが途絶してもノード間の移動時間があまり変わらないほど連結信頼性が高いとして、 T_{OD} が小さいほどノード間連結信頼性が高いとした。従って、赤の破線のようにノード間の移動時間が分布する道路ネットワーク形状は、途絶数が少ない場合でも移動時間が大幅に増えると共に、ノード間の移動が不可能になるパターンが増えるため、ノード間連結信頼性が低いと言える。青の実線で表した曲線のように、多くのリンクが途絶した場合でも移動時間の増加が小さく、またノード間の移動が可能なパターンが多いネットワークに近づけることが重要である。

図-5を見ると、ノード A からノード D 間では早い段階から移動時間が 200 分（移動不可）を示しており、その波形が赤の破線に近く、ノード間連結性が高いとは言えない。このように、本指標によってネットワーク全体の中からノード間の連結が脆弱となる箇所とその被災パターンを特定することができる。

連結信頼性を改善するにはノード A からノード D 間のリンクを増設することが考えられるが、その際には複数のリンクが途絶した場合でも互いのノードが孤立せず、なおかつ迂回による移動時間の増加を抑制できるような代替路の整備が必要となる。その場合に最も効果的な整備箇所については、3 章で行った Warshall Floyd 法を用いた計算方法を応用し、整備想定リンクを設定することで、それぞれのパターンごとの整備効果を評価することが可能である。

5. カーラーの救命曲線を用いた評価指標

東日本大震災の教訓として、道路ネットワークの途絶により救援物資が輸送できない・重症患者を搬送できない・迅速な避難ができない、といった事態が発生したことが挙げられる。これらを踏まえると、非常時の円滑な走行の確保についても連結信頼性の観点から議論する必要がある。そこで本章では、防災拠点からの移動時間に対するノードペア数を、カーラーの救命曲線を用いて評価する指標を提案する。概念図を図-6 に示す。

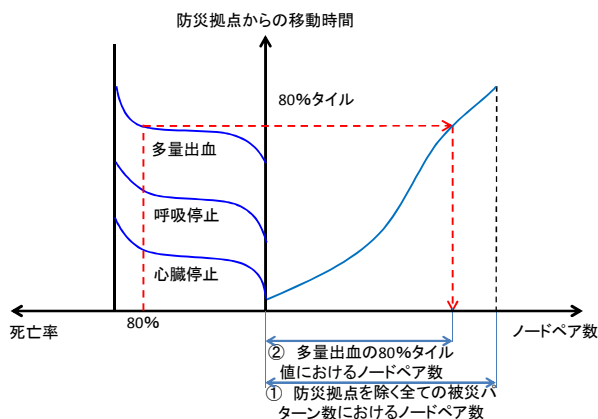


図-6 救命曲線を用いた評価

本章における指標では各種危篤症状による死亡率が一定に達するまでの時間内に移動が完結するノード数 (②) と、全ての被災パターン数における防災拠点を除くノードペア数 ($2^{\text{link 数}} \times (2 \times \text{ノード数} - 1)$) (①) との比 (連結比: Node Connection Ratio = ② / ①) によって評価するものである。連結比の値が 1.0 に近いネットワークほど、より多く被災パターンに対する耐性を持ち、治療が可能な間に他都市の医療機関等へアクセスできることを意味している。

図-6 は防災拠点を除く各パターンの OD ペア間の移動時間を昇順に並び替えて累加した曲線とカーラー曲線との関係を概念的に表したものである。図中に示した赤の破線は多量出血による死亡率 80% を基準とした場合について示したものである。この値の内側のノードペアが

救命可能であり、またこの時の連結比が 1.0 に近いほど、より多くのノードペアが救命できると言える。

この指標は主に高度な医療施設を持たない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ことに適している。また、この指標は緊急輸送の観点からのネットワーク評価及び改善が必要なリンクの抽出を可能とする。

なお、本研究では仮想的に評価基準を多量出血のタイル値 80% と設定したが、適切な値については今後の研究課題とする。

6. 考察

4.1 節ではネットワーク全体の連結信頼性の定量化を行う全点連結信頼性指標の構築を行い、4.2 節ではネットワーク上における改善点を明らかにするために、ノード間連結信頼性の評価指標を構築した。この二つの指標を用いることで、現況の道路ネットワークを改善するための優先度を評価することができる。5 章では非常時の円滑な走行の確保について連結信頼性の観点から議論するための指標を構築した。この指標によって、緊急輸送の観点から改善が必要なネットワークを評価することができる。

本研究では上記の指標を用いて、現況のネットワークについて考察を行った。その結果、ノード間が複数の経路で密に連結されており、複数のリンクが途絶した場合でも互いのノードが孤立せず、なおかつ迂回による移動時間の増加を抑制できるネットワークが、連結信頼性が高いネットワークと言えよう。

本研究で構築した指標を実際のネットワークへ適用することを考えた場合、現況のネットワークのみを評価するには本指標をそのまま適用することができる。しかし、リンクを新たに増設する場合、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る。また、5 章で用いたカーラー曲線の事象には、救援物資の輸送、被災者の被災地からの退避等に要する時間を指標として用いることが考えられる。

今後の課題として、実際の道路ネットワーク上におけるシミュレーションを基にした評価指標のさらなる精度の向上、リンク増設時における整備効果の評価、被災時の最適復旧パターンの評価を行うことなどが挙げられる。

今後の展望としては、本研究で構築した指標を基に様々な現況ネットワークの分析を行い、現実適用可能であり、精度の高い指標の構築を目指す。さらには、道南ネットワークという広域な連結信頼性の評価及び分析にも取り掛かっていきたい。

参考文献

- 1) 中山晶一郎：ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便益評価の一考察、土木学会論文集 D3、Vol67, No.2, pp.147-166, 2011.
- 2) US Army Corps of Engineers : Sustainable solutions to America's water resources needs, 2011.