

部分的なミニマルパスを用いた 道路ネットワークの重要度評価の簡便法

若林拓史¹・後藤康佑²・方 樹名³・長江貴弘³

¹正会員 名城大学教授 都市情報学部 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘4-3-3)

E-mail:wakabaya@urban.meijo-u.ac.jp

²非会員, 名城大学都市情報学部 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘4-3-3)

³学生会員 名城大学大学院都市情報学研究科 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘4-3-3)

2011年東日本大震災では道路ネットワークの一部が通行不能となり, その結果, 緊急交通や救援活動が阻害される要因となった. 『くしの歯』作戦によって代替路が確保されたが, 信頼性の高い道路ネットワークの確保は, 依然として重要である. 道路ネットワークの信頼度はキーとなるリンクのリンク信頼度向上によって効率的な向上が可能となる. しかし, このキーとなるリンクの発見法はいくつか提案されているが, 種々の問題点を有している. この問題点を有したまま, 現実のネットワークに適用すると不適切な結果に至る可能性が大きい. 本論文では, 従来筆者らが提案している新しい重要度評価法を紹介し, 従来の方法との比較を行う. 加えて, 大規模な道路ネットワークに適用するための新しい方法を提案する.

Key Words : Highway network reliability, Importance index, Partial minimal path set

1. はじめに

東日本大震災によって国道 6 号は途絶したが, 『くしの歯』作戦¹⁾によって代替経路が確保され, 国道 4 号や東北自動車道, さらに日本海側の種々のルートや横断ルートによって種々の物資が輸送された. 通常は主ルートほどの重交通に及ばないこれらのルートの重要性が再認識されたことになる. 今後は, 主ルートの途絶に伴う代替ルートの整備が重要である. 効果的に代替ルートを整備することによって信頼性の高い道路ネットワークが構築できる. しかし, これらの代替ルートの整備必要箇所の指摘やその効果を客観的に評価できる指標は従来少なかった. 本論文では, 道路ネットワークの信頼性を効率的に向上させるための評価指標と近似解析法について考察する. 本研究では, 指標の一般的特性を明確にするのが目的のため簡単なネットワークを対象とし, 現実ネットワークでの検証は今後の課題としたい.

本論文の構成を述べる. 2.では, 道路網の信頼性と重要度評価に関する研究をレビューし, 従来の指標の問題点を略述する. 本研究で明らかにしたい並行する道路の整備公平性を述べる. 3.では, 連結信頼性の定義と従来の重要度評価とその問題点を述べる. 4.では, Cost-Reliability 関数を数種設定し, 費用対効果関数を設定する. 5.では, 単純な並列ネットワークを対象に, ノード間信

頼度の『改善パス』を計算する. 6.では, 選択パス数の削減による近似計算法を提案し, 田の字型ネットワークにおける計算事例を示す. 7.では, 2.で提起した課題に対する本研究での成果をとりまとめる.

2. 道路網の信頼性と重要度評価: 研究のレビュー

道路網の信頼性には, 連結信頼性, 旅行時間信頼性, 容量信頼性等, 多くの概念が提案されている²⁾が, 本論文では連結信頼性を対象とし, 道路ネットワークの連結信頼性における重要度評価をとりあげる.

信頼性とは, 「システム等が規定の使用期間中, 所定の機能を遂行しうる状態にあること」を意味し³⁾, 信頼度とはその確率表現であると定義されている⁴⁾.

重要度指標の目的は, システムの信頼度を効率的に向上させるためのものであり, 構造重要度 (Structural Importance) や確率重要度 (Reliability Importance) 等の指標が提案されている⁵⁾. 構造重要度は, 要素の信頼度を考慮せずシステムの構成形態のみに着目し, 後に提案された重要度指標に包含されるので省略する^{5a)}. 重要度は, システムの構成要素の信頼度を向上させた場合, システムの信頼度への寄与の程度と解釈できる. 文献5)においても『直観的に(intuitively), 要素(component)の信頼度を向上させた場合のシステム信頼度向上への寄与度を, 当該

要素の重要度として計測することは妥当である』と述べている。本論文でも、同様に、道路網での重要度を、リンク信頼度を向上させた場合のノード間信頼度への寄与度と定義する。

重要度評価では、以下に述べる問題点が指摘されている。

- 1) 後述の確率重要度 RI では、信頼度のより高いリンクの改良が、信頼度のより低いリンクの改良より困難であることが考慮できない欠点を有している。
- 2) 並列システムでは、より信頼度の高い側の信頼度改善が有効とされ、より低い側の信頼度改善は無視される。
- 3) 重要度指標のみでノード間信頼度の妥当な改善が行えるのか保証がない。費用対効果の視点も必要である。
- 4) 大規模ネットワークへの適用性が課題である。というのは、連結信頼性解析ではシステムが大規模になればなるほど、計算量や必要メモリ量が指数的に増加するからである。

本論文では、1), 2), 4)を考察する。特に 2)は、実際のネットワーク整備では以下のように重要な案件である。

従来の方法では、並列システムの場合、後述の RI 指標や CI 指標では、信頼度の大きい側のルートの強化が数学的に合理性のある解である。しかし、この解では信頼度の低いルートは放置されるので、この解に従う限り道路間での不公平が拡大する解となる。この問題は、Nicholson⁷⁾が上述の Barlow and Proschan (1975) での“Intuitiveな解釈”に対し、“counter-intuitive”と指摘している問題点である。2)で指摘した並行するリンク間での不公平解消の方法は、構造的に弱いルートの強化である。公平性満足の解は、従来存在しなかったもので、本論文では CIW 指標を用いる。

3)については、従来の重要度評価指標によってネットワーク改良を行った場合、得られるノード間信頼度の改善にどのような相違があるのか、という比較考察が従来ほとんどなかった点である。費用とリンク信頼度の関係を表現した費用・リンク信頼度関数 (Cost-Reliability 関数) では、リンク信頼度が大きくなればなるほど、耐災性強化に要する費用は増加し、リンク信頼度の低いリンクを強化する費用は低いという仮説を設定できる⁹⁾。

本研究では、2)と 3)のそれぞれの問題に対し、数学的合理性のある解と公平性満足の解とでは、どの程度の乖離があるのかを理論的に明らかにすることを目的にする。この差が大きくなければ、重要度評価は指標として重要ではあるが、こだわらなくてもよいのではないかという問題意識を持っている。複数の費用・リンク信頼度関数を設定し、公平性満足および費用便益分析による解と数学的合理性のある解とを比較し、その相違が費用・リンク信頼度関数との関係でどのようになるのかを明らかにする。さらに、簡単な事例で、重要度評価および費用便

益分析による『初期値』から『最適解』に至る『改善パス』を数値計算する。代替案の比較のための評価指標は、ノード間信頼度およびノード間信頼度／費用比率を用いる。

以上を踏まえて従来の研究をレビューする。

道路網において重要度評価を扱った論文の事例は、阪神淡路大震災前後のネットワーク評価⁹⁾、交通制御の観点から重要リンクを評価する方法¹⁰⁾、費用・リンク信頼度関数による方法⁷⁾、連結強度と連結迂回率により強化すべきリンクを指摘する方法¹¹⁾、等がある。文献 10)では、リンク信頼度は交通量の関数で与えており、信頼度向上のためのコストの概念が明示的に考慮できていない。また、文献 7)では、汎用的な費用・リンク信頼度関数は与えているが 1 種類であり、かつリンク信頼度の改善に伴う費用はあまり増加しないので有用な結論を得ているのか疑問がある。また、7), 10)どちらの研究も、ノード間信頼度の改善を効果的に与える評価指標に焦点を当てているが、各重要度指標による改善の差違や費用との関係評価には至っていない。

このため、本研究では費用・リンク信頼度関数を明示的に 3 種類設定する。その上で、公平性満足の解を得られやすい評価指標の提案と従来の指標による改善結果との差違を比較評価する。本論文では、4 つの重要度評価指標を比較する。

3. 連結信頼性の定義と従来の重要度評価の問題点

道路ネットワークの特定のノード間のミニマルパス (ネットワークにおいて、任意のノード間が連結されるために、必要にして十分なリンクの集合) を P_s とすると信頼度の厳密値 R は、

$$R(\mathbf{r}) = E \left[1 - \prod_{s=1}^p \left(1 - \prod_{a \in P_s} X_a \right) \right], \quad (1)$$

で与えられる。ここで P_s は s 番目のミニマルパスセット、 p はパス総数を表している。この計算法を、ブール演算法とよんでいる。 X_a は、

$$X_a = \begin{cases} 1, & \text{リンク } a \text{ での走行移動があるサービスレベル以上の場合,} \\ 0, & \text{そうでない場合,} \end{cases} \quad (2)$$

で与えられる二値確率変数である。リンク信頼度 r_a は、

$$r_a = E[X_a], \quad (3)$$

で与えられる。リンク信頼度の与え方は後述する。

式(1)で与えられるノード間信頼度を効率よく向上させる問題を考える。これは高信頼性ネットワーク計画問題、あるいは、災害時などにおけるネットワーク信頼度改善問題として位置づけられる。

例えば、災害時等、交通ネットワークの信頼性を高く保つ必要のある場合どのようなリンクに着目して交通規制等をすればいいか、などが例として考えられる。従来、ネットワークの信頼度を効率的に向上させることのできるリンクの評価指標として Bimbaum¹²⁾の信頼性重要度 RI (2で述べた Reliability Importance) が提案されている。文献 6) においては後に提案された重要度指標と区別するために確率重要度と呼んでおり、本論文でも日本語表記は『確率重要度』とする。確率重要度 RI_a とは、

$$RI_a = \partial R(\mathbf{r}) / \partial r_a, \quad (4)$$

で定義される測度である⁹⁾。確率重要度には $0 \leq RI_a \leq 1$ という性質があり、そのリンクの信頼度の維持 (向上/低下) がノード間信頼度の維持 (向上/低下) に与える影響度を知ることができる。ここに、 R はノード間信頼度、 a はリンク番号であり、 r_a はリンク信頼度である。

確率重要度には、効果的にノード間信頼度を向上させる可能性がある反面、次節で述べる欠点も持ち合わせている。本研究では、従来から提案されている確率重要度に加え、本研究で独自に考案したクリティカリティ重要度と比較することで、これらの指標による信頼度の向上効果を数値計算して考察する。

3.1. 確率重要度とその利害得失

(1) 直列ネットワークの場合 (2リンクの場合)

直列システム (2リンク) の場合、ノード間信頼度 R は、AB間のリンク信頼度を r_1, r_2 とすると、

$$R_{AB} = r_1 \cdot r_2, \quad (5)$$

となる。確率重要度は、リンク 1, 2 それぞれ、

$$RI_1 = \partial R_{ab} / \partial r_1 \quad (\text{リンク 1}) \quad (6)$$

$$RI_2 = \partial R_{ab} / \partial r_2 \quad (\text{リンク 2}) \quad (7)$$

と表現できるので、

$$RI_1 = r_2, \quad (8), \quad RI_2 = r_1, \quad (9)$$

である。仮に、 r_1 と r_2 の関係が、 $r_1 < r_2$ であるならば、

$$RI_1 > RI_2 \quad (10)$$

が成立する。

ここから、直列システムの場合では信頼度の小さいリンクの信頼度を増加させる方が効率的であることがわかる。このことは、多数のリンクからなる直列システムにも容易に拡張される。すなわち、直列システムでは、確率重要度が高く計算されるリンクは、リンク信頼度が最も小さいリンクであり、このリンクの信頼度を向上させることによって効率的にネットワークの信頼度を向上さ

せることができる。この結果は、ネットワーク運用上あるいはネットワーク構築上、实际的、合理的である。

(2) 並列ネットワークの場合

図-1 のネットワークを考える。AB 間のノード間信頼度は、

$$R_{AB} = 1 - (1 - r_1)(1 - r_2) \quad (11)$$

で計算されるから、 $RI_1 = 1 - r_2, RI_2 = 1 - r_1$ である。

仮に $r_1 < r_2$ の場合、

$$RI_1 < RI_2 \quad (12)$$

となり、信頼度の高いリンク 2 が信頼度改善対象リンクとして選択される。信頼度の高いリンクを改善することでノード間信頼度は改善されるが、信頼度の低いリンクは放置される結果となり、リンク改善の公平性が確保できるかどうか、その保証がない。さらに、確率重要度には、信頼度の低いリンクの改善よりも信頼度の高いリンクの改善が困難であるという事実が考慮できないという欠点がある。

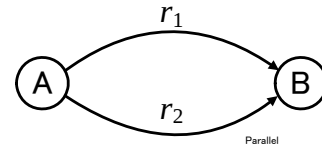


図-1 並列ネットワーク

3.2. クリティカリティ重要度とその利害得失

確率重要度には、3.1で述べたように信頼度の高いリンクの信頼度改善は信頼度の低いリンクの改善よりも困難であることを考慮できないという欠点がある⁹⁾。この欠点を改善したのが、クリティカリティ重要度 (Criticality Importance) である。クリティカリティ重要度は、リンク信頼度のパーセント変化に対するノード間信頼度のパーセント変化の比として定義され、次式で与えられる⁹⁾。

$$\begin{aligned} CI_a &= \lim_{\Delta r_a \rightarrow 0} \left\{ \frac{\Delta R(\mathbf{r}) / R(\mathbf{r})}{\Delta r_a / r_a} \right\} \\ &= \frac{\partial R(\mathbf{r})}{\partial r_a} \times \frac{r_a}{R(\mathbf{r})} \\ &= RI_a \times \frac{r_a}{R(\mathbf{r})} \end{aligned} \quad (13)$$

(1) 直列ネットワークの場合 (2リンクの場合)

直列システム (2リンク) の場合、記法を3.1(1)と同様にとすると、

$$CI_1 = \frac{r_1 \cdot r_2}{R_{AB}} = CI_2 \quad (14)$$

となる。この結果は、クリティカリティ重要度は直列ネットワークに対しては同じ値を与えることを意味している。しかし、直列ネットワークではリンク信頼度の小さいリンクを強化することに合理性がある。したがって、このような結果を与えるクリティカリティ重要度には、構造上欠点があるといわざるを得ない。

(2) 並列ネットワークの場合

並列ネットワークでは、

$$CI_1 = \frac{r_1(1-r_2)}{R_{AB}} \quad (15)$$

$$CI_2 = \frac{r_2(1-r_1)}{R_{AB}} \quad (16)$$

となる。仮に、 r_1 と r_2 の関係が、 $r_1 < r_2$ であるならば、

$$CI_1 < CI_2 \quad (17)$$

となる。この結果は、確率重要度 RI の結果と同じであり、並列ネットワークの場合は、信頼度の高いリンクが信頼度改善対象リンクとして選択される。信頼度の低いリンクが放置されるという点では、確率重要度と同様の欠陥をもっているといえる。

3.3. 改良型クリティカリティ重要度の提案とその利害得失

本節では、従来の重要度指標の一部を改良した重要度指標を提案する。FTA システム信頼性解析でのクリティカリティ重要度⁸⁾を参考に、リンク不信頼度を

$$q_a = 1 - r_a \quad (18)$$

とし、クリティカリティ重要度 CIW_a (Criticality Importance with Wide Area Extension)を

$$\begin{aligned} CIW_a &= \lim_{\Delta q_a \rightarrow 0} \left\{ - \frac{\Delta R(\mathbf{r}) / R(\mathbf{r})}{\Delta q_a / q_a} \right\} \\ &= - \frac{\partial R(\mathbf{r})}{\partial q_a} \times \frac{q_a}{R(\mathbf{r})} \\ &= RI_a \times \frac{(1-r_a)}{R(\mathbf{r})} \end{aligned} \quad (19)$$

で定義する。したがって、 CIW_a と RI_a の間には

$$CIW_a = \frac{(1-r_a)}{R} RI_a \quad (20)$$

の関係がある。

式(19)から導かれた式(20)は、仮に2つのリンクの確率重要度 (RI_a の値) が同じであっても、リンク信頼度の

低いリンク (r_a が小さいリンク) の方が改良型クリティカリティ重要度が大きく算出されることを示している。その結果、改良型クリティカリティ重要度では、信頼度の高いリンクの信頼度を改善することは、低いリンクの信頼度を改善することよりも困難であることを表現できる。

3.4. 改良型クリティカリティ重要度の性質

(1) 直列ネットワークの場合 (2リンクの場合)

前節までと全く同様に、AB間のリンク信頼度を r_1, r_2 とすると、式(5)と式(19)から、リンク1, 2の改良型クリティカリティ重要度はそれぞれ、

$$CIW_1 = \frac{1-r_1}{r_1} = \frac{1}{r_1} - 1 \quad (21)$$

$$CIW_2 = \frac{1-r_2}{r_2} = \frac{1}{r_2} - 1 \quad (22)$$

となる。 r_1 と r_2 の関係が、 $r_1 < r_2$ であるならば、

$$CIW_2 < CIW_1 \quad (23)$$

が成立する。すなわち、直列ネットワークの場合は確率重要度と同じ性質があることがわかる。

(2) 並列ネットワークの場合

同様に、式(11)と式(19)から、リンク 1, 2 の改良型クリティカリティ重要度はそれぞれ、

$$CIW_1 = \frac{1}{R_{AB}} \cdot (1-r_1)(1-r_2) \quad (24)$$

$$CIW_2 = \frac{1}{R_{AB}} \cdot (1-r_2)(1-r_1) \quad (25)$$

となる。確率重要度とは違って $r_1 > r_2$ であろうと $r_1 < r_2$ であろうと CIW_1 と CIW_2 の関係には、

$$CIW_1 = CIW_2 \quad (26)$$

の性質がある。このことは、並列システムの場合では信頼度の大小にかかわらずどちらのリンクを改善対象リンクとしても効果が同じであることを示している。この場合、対象リンク選定には別の基準が必要であり、この基準としては交通容量や改善容易性等が考えられる。本論文では、4.以下で Nicholson⁷⁾と同様の考え方である、『コストーリンク信頼度関数』を用いてノード間信頼度の『改善パス』を考察する。

3.5. 各種重要度指標の利害得失

以上述べてきた確率重要度とクリティカリティ重要度、改良型クリティカリティ重要度の利害得失を整理すると

以下の通りである。

(1) 確率重要度 (RI) の利害得失

- 1) 確率重要度 (RI) は、定義と定式化からみて原則的に合理的である。しかし、
- 2) 信頼度のより高いリンクを改善することは、信頼度のより低いリンクの改善よりも困難である事実を反映できない欠点がある。また、
- 3) 並列ネットワークでは、信頼度の弱い方を補強してもよい、という示唆を与えることができない。つまり信頼度のより低いリンクの改善ができないという欠点がある。

(2) クリティカリティ重要度 (CI) の利害得失

- 1) 確率重要度の欠点を克服し、信頼度の高いリンクの改善がより困難であるという一般的事実を反映できる。反面、
- 2) 式(14)のように直列ネットワークで不合理な結果を与える。また、
- 3) RIの3)と同じ欠点をもつ。

(3) 改良型クリティカリティ重要度 (CIW) の利害得失

- 1) CIの1)の性質をもつ。
- 2) CIの直列ネットワークでの欠点2)を克服している。
- 3) 並列ネットワークでは、強い側を補強すればよいという結論を導かない。リンク間での公平な改善をもたらす可能性がある。

4. Cost-Reliability 関数の設定と費用対効果関数の設定

次の3種類の Cost-Reliability 関数を設定する。

(1) ケース 1：費用一定型

$$Cost_a = 1000. \quad (27)$$

このケースでは、リンク信頼度の大小にかかわらず、信頼度改善費用は一定である。

(2) ケース 2：費用線形増加型

$$Cost_a = 5000 \cdot (r_a + 0.1). \quad (28)$$

リンク信頼度が増加するにつれて、改善費用が線形的に増加するケースである。

(3) ケース 3：費用 2 次関数増加型

$$Cost_a = 500 \cdot (500 \cdot r_a^2 + 15 \cdot r_a + 1). \quad (29)$$

リンク信頼度が増加するにつれて、改善費用が 2 次関数として増加するケースである。

費用対効果関数として、次式を仮定する。

$$Eff(Y, F) = \frac{R_{AB} - R_{AB0}}{Cost_{AB}} \times Y \times F \quad (30)$$

ここで、Y は道路網ネットワークの信頼性を評価する期間であり、F は、信頼度改善によって得られる年間の輸送交通量を費用換算したものである。R_{AB0} と R_{AB} は、初期および改善後のノード間信頼度であり、Cost_{AB}

は改善に要する総費用である。簡単のために利子率は考慮していない。

5. 並列ネットワークにおける計算例

直列システムの場合では、CI による改善に大きな問題があり、かつ、PI でも CIW でも信頼度の小さいリンクを改善させるのが効果的であることが自明であるので省略する。ここでは、並列システムの場合、改良型クリティカリティ重要度では、信頼度の大小にかかわらず、どちらのリンクを改善対象リンクとしても効果が同じである場合の問題点を示す。2つのリンクからなる並列ネットワーク(図-1)に着目して、費用対効果を簡単に分析する。リンクの信頼度を増加させる選択方法は、次の2つを設定する。

- 1) 信頼度が大きいリンクの信頼度を増加させる (RIによる改善)。
- 2) 信頼度が小さいリンクの信頼度を増加させる (CIW と CB による改善)。

図-2 に、ケース 1~3 に対する 1) と 2) の『改善パス』を示す。リンク信頼度は、(0.4, 0.5) から出発する。各ケースの左枝は、信頼度の大きいリンクを改善した場合、右枝は、信頼度の小さいリンクを改善した場合である。

結果として、

- 1) RI による改善では非常にバランスを欠いた改善結果となる。
- 2) CIW+CB による改善では、バランスがとれている。
- 3) ノード間信頼度の改善は、RI による改善の方が大きい。CIW による改善でも大きな差はない。
- 4) 費用効果分析に関しては、以下のようである。

ケース 1 と 2 では、1)の方が Eff が大きい結果を得ている。ケース 3 では、2)の方が Eff が大きい結果を得ている。この理由は、ケース 1 と 2 では、リンク信頼度を大きく改善しても費用がそれほどかからないことに理由

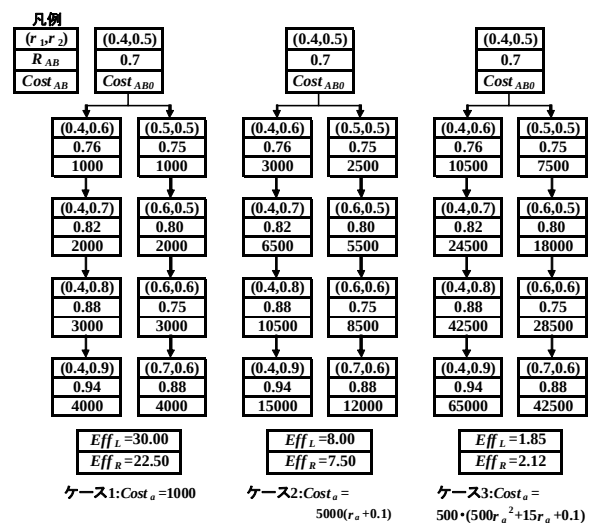


図-2 並列ネットワークにおける『改善パス』

がある。現実的には、リンク信頼度を上げれば上げるほど限界的に費用が増加する、つまり『信頼度のより高いリンクを改善することは、信頼度のより低いリンクの改善よりも困難である』⁹⁾ので、ケース 3 の結論が一般的であるといえる。

6. 厳密解法と近似解放の比較分析

連結信頼性の計算方法は、リンク、ミニマルパス、ミニマルカット等によるものがあるが、いずれの方法でもシステムの規模が拡大するとともに計算量とメモリ量は 2 の累乗で増加する性質がある。したがって、大規模システムの信頼度計算は、非常に困難になる場合がある。重要度解析は、連結信頼度に基づくので、同じ問題を抱える。本研究では、リンクによる計算法よりも計算ロードの低いミニマルパスカットによる方法を用いているが、大規模ネットワークでは同様の困難が生じる可能性がある。ここで、ミニマルパス数を 1 個ずつ減じると、計算量と必要メモリ量は 1/2 ずつ減少する。また、リンク数はネットワーク固有の数値となるので、ミニマルパスによる計算の方が操作性が優れるという利点もある。

ここでは、初期的な検討例を示す。

モデルとなるネットワークは、12 リンク、9 ノードで構成される田字型ネットワークである (図-3)。また、求めるのはノードペア(A,B)の信頼度とし、各リンクの信頼度には同一値が存在しないものとする。この条件をもとに、各リンク信頼度の値が違うものを種々用意する。本論文で紹介するのは、リンク信頼度の最も大きい値が 0.70 程度、最も小さい値が 0.30 程度となる、リンク信頼度の差が大きいネットワークである。

重要度評価で大切な点は、厳密解法と近似解法とでリンクの重要度 (整備優先度) に変化がないことである。この変化が大きい、あるいは順序が入れ替わると近似解法として意味が少なくなる。選択パス数の数ももちろん重要である。選択パスの削除は、生起確率の小さなものから除去し、生起確率の大きなものは最後まで残すという選択ルール¹⁹⁾である。

CIW による計算結果を図-4 に示す。このネットワークでは、厳密解法に用いるパス数は 12 個であり、図-4 の最も左側に重要度の値が示されている。右にシフトすると選択パス数が減じられ、選択パス数が 6~7 個程度なら順位に大きな変動がないことがわかる。これらのパスには、ノードペア(A,B)間に存在するリンクがすべて含まれ、ノード間のすべてのリンクを計算対象としてパス数を減じれば近似解法が成立することを示唆している。

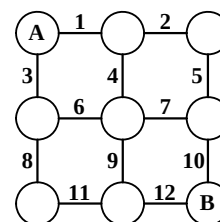


図-3 田字型ネットワーク

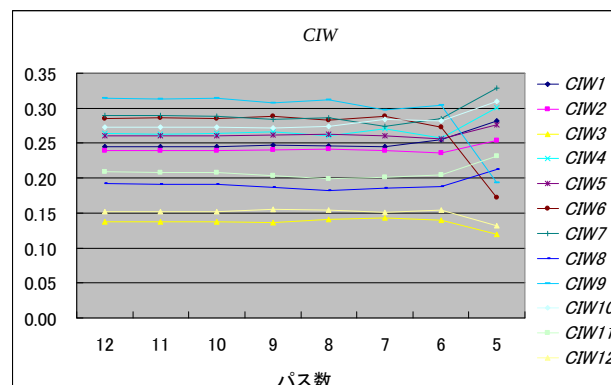


図-4 田字型ネットワークにおける部分的ミニマルパスによる近似計算結果

7. 研究成果のまとめ

以下の結論を得た。

- (1) ノード間信頼度の改善だけに着目すると、 RI が最も優れている。
- (2) しかし、 RI による改善に要する費用は、ケース 1,2,3 の順で増加する。結果として後述の(5)に劣る。
- (3) CI による改善は、3.2(1)で述べた直列システムにおける欠点があつて全く利点がない。
- (4) CIW による改善はバランスがとれている。結果も安定している。
- (5) 以上の成果から、本論文で提案した CIW 指標は、その数学的特性から並行するルートの公平性により配慮した指標であるといえる。
- (6) 部分的なミニマルパスによる重要度評価法を提案した。これに関しては、試行中の部分もあり、計算の安定性など計算の十分な蓄積が必要である。今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 国土交通省：「くしの歯」作戦について、
http://www.thr.mlit.go.jp/road/jisinkannenjouhou_110311/kushinohasakusen.html [27 April 2012]
- 2) Nicholson, A. Schmoeker, J. Bell, M.G.H. and Iida, Y.(2003). Assessing Transport Reliability: Malevolence and User Knowledge. In: Michael G H Bell and Yasunori Iida(Ed.) The Network Reliability of Transport, Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR), pp.1-22, Pergamon, 2003.

- 3) Barlow, R.E. and Proschan, F. (1965). *Mathematical Theory of Reliability*, p.6. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 4) 高木 昇：信頼性に使われる用語，日本機械学会誌，Vol.74, No.633, pp.1326-1330, 1971.
- 5) Barlow, R.E. and Proschan, F. (1975). *Statistical Theory of Reliability and Life Testing: Probability Models*, pp.26-28. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- 6) 井上威恭監修：FTA 安全工学，pp.87-102，日刊工業新聞社，昭和 54 年。
- 7) Nicholson, A. (2007). *Optimising Network Terminal Reliability*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability, CD-ROM, 2007.
- 8) Henley, E. J. and Kumamoto, H.: *Reliability Engineering and Risk Assessment*, Prentice-Hall, Inc., 418-436, 1981.
- 9) 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.
- 10) 若林拓史・大野隆晴・鈴木宏章：道路ネットワークの重要度評価：確率重要度とクリティカリティ重要度による信頼性向上効果，土木計画学研究・論文集，Vol.22, No.4, pp.751-759, 2005.
- 11) 栄徳洋平・横井祐治・溝上章志：連結強度による道路ネットワーク評価方法の提案，第 28 回交通工学研究発表会論文報告集，pp.169-172, 2008.
- 12) Bimbaum, Z. W. (1969). *On the Importance of Different Components in a Multi-Component System*. *Multivariate Analysis II* (P.R. Krishnaiah Ed.), Academic Press, New York.
- 13) 飯田恭敬・若林拓史・吉木 努：ミニマルパス・カットを用いた道路網信頼度の近似計算法，交通工学，Vol.23, No.4, 3-13, 1988. (2013. 8. 2 受付)

COMPARISON OF IMPORTANCE INDICES FOR HIGHWAY NETWORK RELIABILITY IMPROVEMENT AND APPROXIMATE CALCULATION FOR THE INDICES IN LARGE SIZE NETWORK

Hiroshi Wakabayashi, Kohsuke GOTO and Takahiro NAGAE