

道路網の連結信頼性の改善過程における 重要度指標の種類による差異

長江貴弘¹・若林拓史²

¹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)

E-mail: 133781501@c alumni.meijo-u.ac.jp

²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

道路網は、一部が使用不能となっても代替路があれば、その機能を維持することが可能となる。我が国は災害が多いため、高い信頼度の道路網が求められている。しかし、費用的制約から全てのリンクを同時に強化することは困難である。したがって、道路網においてどの部分を強化するのが望ましいか判断・評価するための客観的な基準(重要度指標)が必要であるといえる。ネットワークのリンクの重要度評価法はいくつか提案があるが、道路網に適したものかどうかの検証が不十分である。そのため、本論文では従来使用されてきた重要度指標と、筆者らが提案している重要度指標を紹介する。それぞれの指標の特性をより明確にするために、今回新たに乱数を用いたサンプルデータを大量に発生させて計算を行い、連結信頼性の改善過程の指標間比較分析を行う。

Key Words : Highway network reliability, Importance index, Probability Importance, Cost-benefit analysis

1. はじめに

近年、我が国では、東日本大震災などの被災を契機に「国土強靱化」が求められており、道路網についても同様である。道路の場合は、災害等で一部が通行不能になることがしばしばあるが、そのような時に代替路があれば道路網としての機能を維持することができる(連結信頼性の確保)。信頼性の高い道路網を形成するためには道路の災害対策が必要だが、すべての経路を強化することは費用的制約から困難である。したがって、どの経路を強化するのが望ましいか判断・評価するための客観的な基準が必要である。これは重要度評価¹⁾と呼ばれている。道路網の重要度評価には主として2つの課題がある。1つ

は、道路網に適した重要度評価指標の開発であり、もう1つは、効率的な重要度の計算方法と計算量の削減(近似解法)である。本論文では前者を取り上げる。

重要度評価については、既にいくつかの指標が提案されており、それらは筆者らによって整理されている^{2), 3)}が、どのような指標が道路網に用いるのに適しているかの検証と計算結果の蓄積が十分ではない。したがって、本論文ではリンク信頼度の組み合わせを乱数を用いて大量に発生させて単純なネットワークで重要度指標の比較分析を行う。

今回は、指標の特性の比較を行うのが主眼であるため、実在するネットワークにおける検証は今後の課題とする。

以下、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、各種指標の位置づけや問題点を略述する。3.では、連結信頼性の定義と従来の重要度評価の問題点を述べる。4.では、Cost-Reliability 関数を数種設定し、費用対効果関数について述べる。5.では、並列ネットワークと田の字型ネットワークにおいて2種類の重要度評価を用いてノード間信頼度と費用対効果の計算・比較を行う。6.では、2.で提起した課題に対する本研究での成果を取りまとめる。

2. 道路網の信頼性と重要度評価: 研究のレビュー²⁾

道路網の信頼性には、連結信頼性、旅行時間信頼性、容量信頼性などが提案されている¹⁾が、本論文では連結信頼性とその重要度評価について取り上げる。

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⁴⁾、信頼度とはその確率表現であると定義されている⁵⁾。

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、後述する確率重要度⁶⁾やクリティカリティ重要度⁷⁾などが提案されている。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のシステムの信頼度への寄与の程度と解釈することができる。文献4)においても、『直感的に、要素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、道路網の連結信頼性の重要度を、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。

道路網において重要度評価を用いて連結信頼性を改善するには以下のような手順が必要と考えられる。

- 手順 1. 改善対象となる道路網の範囲の設定
- 手順 2. 設定範囲内での各々のリンク信頼度の算出
- 手順 3. 重要度評価を用いてリンクの重要度を算出
- 手順 4. 重要度の高いリンクの信頼度を向上させる
- 手順 5. 手順 2.に戻る

手順 2.でのリンク信頼度については、想定する災害や設定対象となる道路によって算出の方法が変わると考えられるので、本論文では簡単のためリンク信頼度は与件とする。手順 3.で使用する重要度評価の種類によってリンクの重要度、すなわち改善対象となるリンクは異なってくる。したがって、手順 4.でリンク信頼度を実際に改善させた後に手順 2.に戻り、重要度の再計算を行う際は、前回の改善結果の影響を受けることになる。

次に、現状において用いられている重要度評価についての課題について述べる。

1) 確率重要度 RI (後述)では、信頼度の高いリンクの改良が、信頼度の低いリンクの改良より困難であることを考慮できない欠点がある。

2) 並列システムでは一般に、信頼度の高い側の改善が有効とされ、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可能なのか保証がない。費用対効果の視点も必要である。

1),2)については、これらの課題を解消するために新たに ICI 指標(後述)⁸⁾が提案されているが、ネットワークに当てはめて計算した際の結果の検証や RI 指標との比較がまだ十分になされていないので、本論文ではそれらを取り上げる。

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の改善を行った際の、結果として得られるノード間信頼度にどのような差異が出るかという比較がほとんどなかった点である。これについて費用とリンク信頼度の関係を表した Cost-Reliability 関数を設定すれば、リンク信頼度が大きくなればなるほど災害対策にかかる費用は増大し、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可能である⁸⁾。

本研究では、2),3)の問題に対し、数学的合理性のある解と公平性満足のある解とで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とする。この差が大きくなければ、重要度指標による数学的合理性のある解に必ずしもこだわらなくてもよいという考え方も可能だからである。さらに、複数の費用・リンク信頼度関数を設定し、数学的合理性のある解と公平性満足および費用便益分析を用いた解とを比較し、その違いが費用・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。そして、簡単なネットワークを設定して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』を計算する。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なリンクを発見する方法¹⁰⁾、費用・リンク信頼度関数による方法¹¹⁾、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¹²⁾などがある。最近では、中山¹³⁾が膨大な既存研究の整理と今後の課題をまとめている。さらに、旅行時間信頼性と連結信頼性を統合した費用便益分析による方法を提案している。文献11)では、リンク信頼度は交通量の関数で与えているので、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12)では、汎用的なコスト・リンク信頼度関数は与えているものの、1種類のみであり、かつリ

リンク信頼度の改善に伴う費用は余り増加していないので実効性のある結論を得ているのか疑問がある。また、11), 12) 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際や費用との関係評価にまでは至っていない。文献 13) では、便益を捉える視点が増えるため重複計算がないようにするのが課題であり、リンクが途絶する期間によって道路利用者の行動基準が変化することを基に、連結信頼性を旅行時間短縮による便益に置き換えて評価している。この指標については現段階では端緒についたばかりであり、道路網の形態によって便益がどのように算出されるかは未知数である。

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、従来の指標による改善の結果と、新たに提案する公平性満足の解を得られやすい指標による改善の結果を比較評価する。本論文では、3 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²⁾

(1) 道路網における連結信頼性の定義

道路網において、特定のノード AB 間を結ぶリンク a に二値確率変数 X_a を次のように定義する。

$$X_a \begin{cases} 1, \text{リンク} a \text{ での円滑な走行移動が保証される場合} \\ 0, \text{そうでない場合} \end{cases} \quad (1)$$

リンク信頼度 r_a は以下のように与えられる。

$$r_a = E[X_a] \quad (2)$$

システム全体の構造関数の定義は以下のようになる。

$$R(\mathbf{r}) = E\left[1 - \prod_{s=1}^p \left(1 - \prod_{a \in P_s} X_a\right)\right] \quad (3)$$

ここで、 $R(\mathbf{r})$ はノード AB 間のノード間信頼度、 p はパス総数、 a はリンク番号、 P_s はリンク信頼度 (s 番目のミニマルパス) を表している。ミニマルパスを、

$$a_s = \prod_{a \in P_s} X_a \quad (4)$$

で表すとノード間信頼度の厳密値 R は、

$$R = E\left[1 - (1 - a_1)(1 - a_2) \cdots (1 - a_p)\right] \quad (5)$$

と表すことができる。

上述のノード間信頼度を向上させることが、道路網の連結信頼性の向上に必要であるが、そのためにどのリンクを改善すればよいかを判断するのに用いるのが、次に述べる重要度評価となる。

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、Birbaum⁶⁾の信頼性重要度 (RI) が提案されている。文献 14) では、後に提案された重要度指標と区別するため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。確率重要度を道路網の連結信頼性に適用するには次節に述べる欠点があるため、本研究では確率重要度と独自に考案された改良型クリティカリティ重要度を比較・考察する。

(2) 従来の重要度の定義とその特徴

確率重要度 (Birbaum's Reliability Importance)⁶⁾ は、以下に定義される測度であり、

$$RI_a = \partial R_{AB}(\mathbf{r}) / \partial r_a \quad (6)$$

ノード間信頼度を当該リンク信頼度で偏微分したものである⁶⁾。ここで $R(\mathbf{r})$ はノード AB 間のノード間信頼度、 a はリンク番号、 r_a はリンク信頼度を表している。確率重要度には $0 \leq RI_a \leq 1$ という性質があり、この値が大きければ大きいほど重要、つまりノード間信頼度の改善への寄与度が大きいことを表す。確率重要度は、直列ネットワーク (図-1) では信頼度の低いリンクの重要度が高くなる特徴がある。この結果は数理的に見ても道路整備の観点からも問題はない。一方、並列ネットワーク (図-2) において信頼度の高いリンクの重要度が高くなる。この結果は、道路整備の観点からは妥当でない。というのは、この測度を使用している限り、信頼度の低いリンクは放置されるからである。また、既に信頼度の高いリンクを改善することは、費用的・技術的に困難であることを反映していないという欠点もある。

この欠点を改善したのがクリティカリティ重要度 CI (Criticality Importance) である⁷⁾。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、以下の式で与えられる⁷⁾。

$$\begin{aligned} CI_a &= \lim_{\Delta r_a \rightarrow 0} \left\{ \frac{\Delta R_{AB}(\mathbf{r}) / R_{AB}(\mathbf{r})}{\Delta r_a / r_a} \right\} \\ &= \frac{\partial R_{AB}(\mathbf{r})}{\partial r_a} \times \frac{r_a}{R_{AB}(\mathbf{r})} \\ &= RI_a \times \frac{r_a}{R_{AB}(\mathbf{r})} \end{aligned} \quad (7)$$

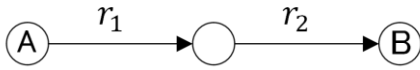


図-1 直列ネットワーク

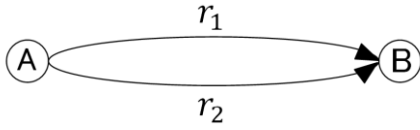


図-2 並列ネットワーク

しかし、 CI は直列ネットワーク (図-1) の場合はどちらのリンクも同じ重要度という計算結果になり、並列ネットワーク (図-2) の場合は RI と同じ結果でいずれにしても問題がある。

(3) 改良型クリティカルティ重要度の定義とその特徴

クリティカルティ重要度を参考に、リンク不信頼度を

$$q_a = 1 - r_a \quad (8)$$

として、改良型クリティカルティ重要度を以下の式のように定義される⁸⁾。

$$\begin{aligned} ICI_a &= \lim_{\Delta q_a \rightarrow 0} \left\{ - \frac{\Delta R_{AB}(\mathbf{r}) / R_{AB}(\mathbf{r})}{\Delta q_a / q_a} \right\} \\ &= - \frac{\partial R_{AB}(\mathbf{r})}{\partial q_a} \times \frac{q_a}{R_{AB}(\mathbf{r})} \\ &= RI_a \times \frac{(1 - r_a)}{R_{AB}(\mathbf{r})} \end{aligned} \quad (9)$$

よって、 ICI_a と RI_a の間には、

$$ICI_a = \frac{(1 - r_a)}{R} RI_a \quad (10)$$

の関係が成り立つ。したがって、確率重要度 (RI) の値が同じである 2 つのリンクがあったとしても、リンク信頼度の低い (r_a の値が小さい) リンクの方が ICI の値が大きくなることを示している。これにより、 ICI は信頼度の高いリンクの改善は低いリンクの改善よりも困難であることを反映しているといえることができる⁸⁾。

直列ネットワーク (図-1) の場合、 AB 間のリンク信頼度を r_1, r_2 とすると、リンク 1, 2 の改良型クリティカルティ重要度は、

$$ICI_1 = \frac{1 - r_1}{r_1} = \frac{1}{r_1} - 1 \quad (11)$$

$$ICI_2 = \frac{1 - r_2}{r_2} = \frac{1}{r_2} - 1 \quad (12)$$

となる。このとき、 r_1 と r_2 の関係が $r_1 < r_2$ ならば、

$$ICI_1 > ICI_2 \quad (13)$$

となり、直列ネットワークでは確率重要度 (RI) と同じ性質を持っているといえる。

並列ネットワーク (図-2) ではそれぞれ、

$$ICI_1 = \frac{1}{R_{AB}} \cdot (1 - r_1)(1 - r_2) \quad (14)$$

$$ICI_2 = \frac{1}{R_{AB}} \cdot (1 - r_2)(1 - r_1) \quad (15)$$

となる。これより、 ICI_1 と ICI_2 には、

$$ICI_1 = ICI_2 \quad (16)$$

となる関係がある。これは、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、改善リンクの選定には別の基準が実用であり、本論文では 4.以下で Nicholson¹⁵⁾ 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。

(4) 各種重要度指標の利害得失

以上述べてきた 3 種類の重要度指標の利害得失をまとめると以下の通りとなる (表-1)。

a) 確率重要度 (RI) の利害得失

RI は、定義と定式化からみて原則としては合理的である。しかし、信頼度の高いリンクを改善することは、信頼度の低いリンクを改善することより困難であることを反映できない欠点がある。また、並列ネットワークにおいて信頼度の低いリンクが放置されるという欠点がある。

b) クリティカルティ重要度 (CI) の利害得失

RI 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ことを反映できる。しかし、直列ネットワークで不合理な結果を与えることや、並列ネットワークで RI と同じ欠点をもつ。

c) 改良型クリティカルティ重要度 (ICI) の利害得失

RI 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ことを反映できる。直列ネットワークでは CI の欠点を克服しており、並列ネットワークではリンク間での公平な改善をもたらす可能性がある。

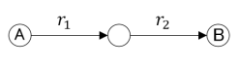
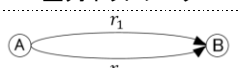
	<i>RI</i>	<i>CI</i>	<i>ICI</i>
直列ネットワーク	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$
	$R_{l1} > R_{l2}$	$Ch_1 = Ch_2$	$IC_{l1} > IC_{l2}$
判定	Good	NG	Good
並列ネットワーク	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$
	$R_{l1} < R_{l2}$	$Ch_1 < Ch_2$	$IC_{l1} = IC_{l2}$
判定	NG	NG	It says nothing

表-1 重要度指標の利害得失

4. Cost-Reliability 関数と費用対効果関数の設定²⁾

前述の改良型クリティカリティ重要度 (*ICI*) では、並列ネットワークにおいて重要度が同じとなる。したがって、改善するリンクを選択するために別の指標が必要となる。そのため、改善するリンクの信頼度とそれにかかる費用の関係を表した 3 種の Cost-Reliability 関数を設定した⁸⁾。

(1) ケース A: 費用一定型

$$CostA = 1000 \quad (17)$$

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 B: 費用線形増加型

$$CostB = 5000 \times (r_a + 0.1) \quad (18)$$

リンク信頼度が増加するにつれて、改善費用が線形に増加するケースである。

(3) ケース C: 費用 2 次関数増加型

$$CostC = 500 \times (50 \times r_a^2 + 15 \times r_a + 1) \quad (19)$$

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。

また、リンクの信頼度改善の費用対効果を測るために、以下の費用対効果関数 (*Eff*) を設定した⁸⁾。

$$Eff(Y, F) = \frac{R_{AB} - R_{AB0}}{Cost_{AB}} \times Y \times F \quad (20)$$

ここで、*Y* は道路網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、初期と改善後のノード間信頼度であり、*Cost_{AB}* は、改善にかかる総費用である。今回は計算の単純化のため、利率は考慮していない。

5. 並列、田の字型ネットワークによる計算例

直列ネットワークの場合、*CI* による改善に問題があり、かつ *RI* でも *CI* でも信頼度の低いリンクを改善させるのが効果的なのは自明なため、省略する。

ここでは、並列ネットワークと田の字型ネットワークによる *RI* と *ICI* の選択する改善リンクと費用対効果の比較を行う。田の字型ネットワークについては、今回新たに 2000 組の乱数を発生させてリンク信頼度の初期値を用意した。

(1) 並列ネットワークでの *RI* と *ICI* の比較

まず、並列ネットワーク (図-2) での *RI* と *ICI* の比較である。*ICI* の場合、並列では重要度の値が同じになるため、Cost-Reliability 関数を利用して費用が安い方を改善リンクとして選択するようにした。リンク信頼度の初期値は (0.4, 0.5) とし、1 回に改善するリンク信頼度の改善幅を 0.1 とし、4 段階に渡って改善を行った。その結果を図-3 に示す。

比較する項目は、リンク信頼度 (上段のネットワークの図中の数値、改善されたリンクは数値を下線で強調)、ノード間信頼度 (*R_{AB}*)、リンク信頼度を用いた計算結果 (max-min)、改善にかかる総費用 (CostB, CostC)、費用対効果関数 (*Eff*) の計算結果 (*Eff_B*, *Eff_C*) である。Cost-Reliability 関数のうち、改善回数のみで費用が決まるケース A は省略した。この図をみると、*RI* による改善はリンク信頼度の差 (max-min) が拡大するのみで、信頼度の低いリンクが放置されることがわかる。ノード間信頼度については *RI* の方が優れているが、改善にかかる総費用は *ICI* の方が安く済むことがわかる。また、費用対効果 (*Eff*) では、もっとも現実的な仮定と考えられるケース C で *ICI* の方が効果が大きい結果となっている。

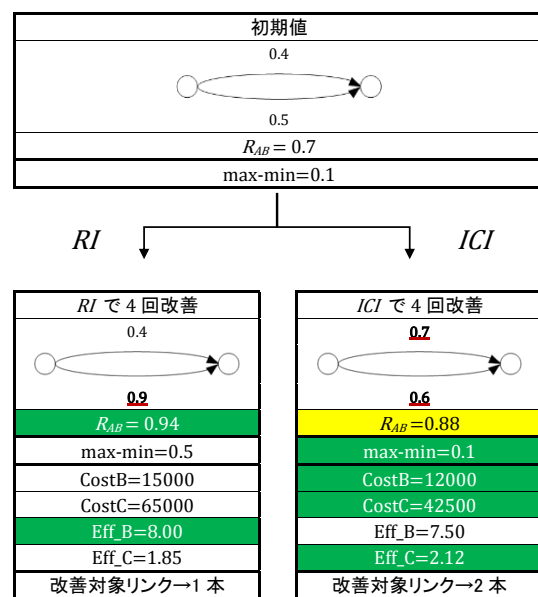


図-3 並列ネットワークでの *RI* と *ICI* の比較

(2) 田の字型ネットワークでの RI と ICI の比較

本論文では新たに、田の字型ネットワーク(図-4)で乱数のサンプルを用いて RI と ICI で選択されるリンクと費用対効果の比較を行った。リンク信頼度の初期値は、最小値と最大値の差が大きいもの(Case1:0.3 ≤ r < 0.7)と、差が小さいもの(Case2:0.4 ≤ r < 0.6)を用意し、それぞれにおいて乱数を発生させるものとした。初期値は、Case1,2ともに1000組を用意した。具体的な改善の手順は以下になる。

- 手順 1. 重要度評価(RI or ICI)を用いて各々のリンクの重要度を計算
- 手順 2. 重要度が最大となったリンクの信頼度を 0.05 向上させる
- 手順 3. 各種計算を行う
 - ・ ノード間信頼度
 - ・ リンク信頼度を用いた計算(max-min, var)
 - ・ 信頼度改善に伴う費用(CostB, CostC)
 - ・ 費用対効果関数(Eff_B, Eff_C)
- 手順 4. 手順 1.に戻る
- 手順 5. 1.~4.の手順を 6 回繰り返す

その結果を表-2、表-3 と図-5、図-6 に示す。
 図-5 は、Case1(0.3 ≤ r < 0.7)の 1 組目の RI と ICI による信頼度改善の計算結果の比較である。比較する項目は、それぞれリンク信頼度(上段のネットワークの図中の数値、改善されたリンクは数値を下線で強調)、ノード間信頼度(R_{AB})、リンク信頼度を用いた計算結果(max-min, var)、改善にかかる総費用(CostB, CostC)、費用対効果関数(Eff)の計算結果(Eff_B, Eff_C)、改善対象となるリンクの本数である。Cost-Reliability 関数のうち、ケース A は改善回数のみで費用が決まるため省略した。

図-5 を見ると、RI による改善では番号 1(0.5300 → 0.7300)と番号 4(0.4483 → 0.5483)の 2 本のリンクが改善対象リンクとして選ばれていることがわかる。ICI による改善では番号 1(0.5300 → 0.5800)と番号 3(0.3203 → 0.5203)と番号 4(0.4483 → 0.4983)の 3 本のリンクが改善対象リンクとして選ばれていることがわかる。

RI による改善では、最大値-最小値、分散の数値が初期値に比べて増加しているため、同じリンクを改善する傾向が強いことがわかる。改善対象となるリンクが何本あり、それぞれ何回改善されたかを具体的に表したのが表-2 であり、例えば Case1(0.3 ≤ r < 0.7)の 1 組目の RI による改善では番号 1 のリンクが 4 回、番号 4 のリンクが 2 回改善されていることがわかる。この表は 1000 組のうち 1~5 組目を抜粋したものだが、RI と ICI を比べるとやはり RI の方が同じリンクを改善する傾向が強いことがわかる。道路整備の観点からは RI の結果は良いとはいえ

ず、それが総費用(CostB, CostC)、費用対効果(Eff_B, Eff_C)の数値に表れている(図-5)。すなわち、総費用ではケース B, C とともに ICI よりも数値が大きく(費用がかかる)、費用対効果ではケース B, C とともに ICI よりも数値が小さくなっている。RI による改善では、ノード間信頼度(R_{AB})の改善の割には費用がかかるということである。それを裏付けるように、ノード間信頼度(R_{AB})の改善後の値は RI (0.3869)と ICI (0.3730)でそれほど差はない。

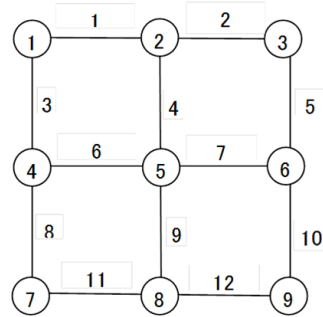


図-4 田の字型ネットワーク

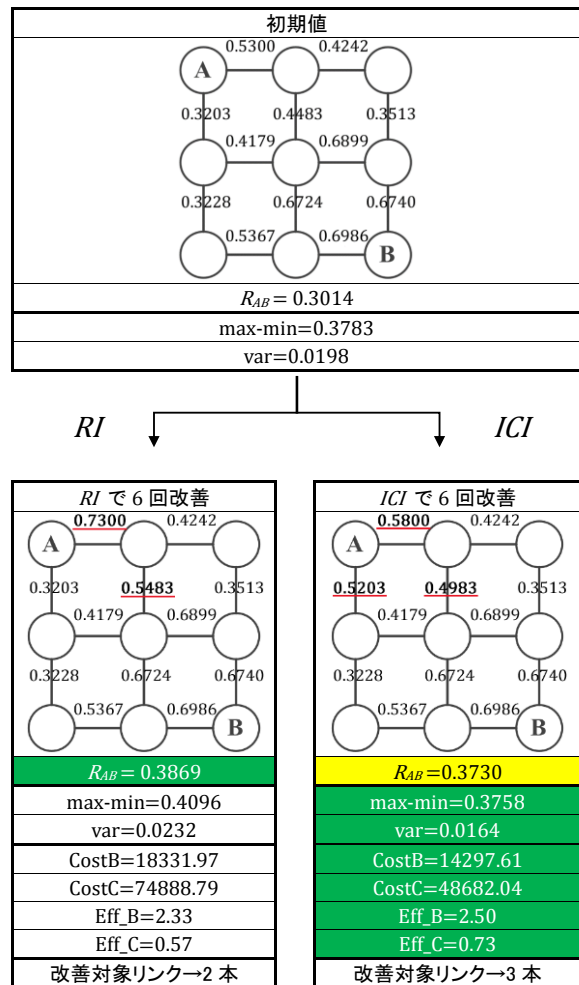


図-5 田の字型での RI と ICI の比較(Case1.の 1 組目)

表-2 1組目～5組目の改善対象リンクの比較

0.3 ≤ r < 0.7 RI													0.3 ≤ r < 0.7 ICI												
リンク番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	リンク番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1組目	4	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1組目	1	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2組目	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2組目	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3組目	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3組目	1	0	0	1	0	0	4	0	0	0	0	0
4組目	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4組目	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
5組目	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5組目	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0.4 ≤ r < 0.6 RI													0.4 ≤ r < 0.6 ICI												
リンク番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	リンク番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1組目	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1組目	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2組目	4	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2組目	4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
3組目	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3組目	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2
4組目	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4組目	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
5組目	0	0	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5組目	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1

表-3 RI と ICI による信頼度改善(1000組の平均値)

Case 1.		初期値	RI	ICI
0.3 ≤ r < 0.7				
ノード間信頼度	R	0.2775	0.3519	0.3453
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.3407	0.4203	0.3369
	var	0.0122	0.0165	0.0116
LinkReliability-Cost関数	CaseB	18741.44	15782.69	
	CaseC	79140.91	58268.46	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	2.011692	2.157906	
	CaseC	0.49435	0.595211	
改善対象リンクの本数		1.634	2.404	

Case 2.		初期値	RI	ICI
0.4 ≤ r < 0.6				
ノード間信頼度	R	0.2772	0.3439	0.3402
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.1703	0.2978	0.2108
	var	0.0031	0.0072	0.0043
LinkReliability-Cost関数	CaseB	18618.83	16863.12	
	CaseC	76907.57	64407.89	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	1.794786	1.867932	
	CaseC	0.438354	0.491649	
改善対象リンクの本数		1.893	2.879	

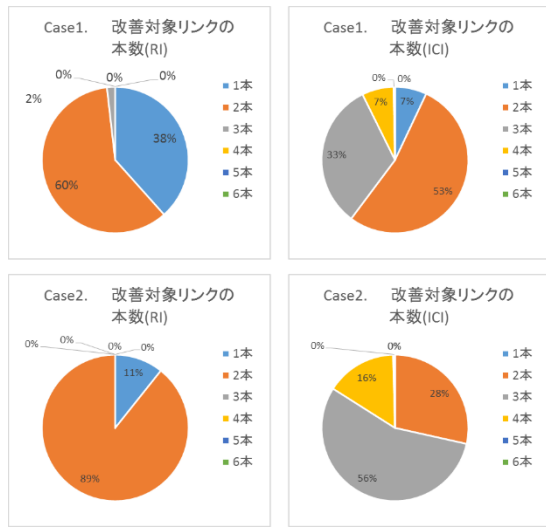


図-6 RI と ICI の改善対象となるリンクの本数の比較

このような計算を Case1, Case2 でそれぞれ 1000 組ずつ行った結果が表-3 で、これは 1000 組の平均値である。上から順にノード間信頼度、リンク信頼度を用いた計算結果(max-min, var)と、Cost-Reliability 関数を用いて計算した総費用と費用対効果、最下段が改善対象となったリンクの本数である。

表-3 を見ると、1000 組の平均値も図-5 と同様の結果となった。すなわち、RI は ICI と比較すると同じリンクを改善する傾向が強く、max-min, var の計算結果はともに RI の方が数値が大きくなっている。RI

は、改善したリンクを再び改善するので並行リンクに配慮した指標とはいえないことがわかる。

総費用・費用対効果は ICI は RI より優れており、RI と ICI でノード間信頼度の数値にそれほど差はない傾向にある。

図-6 は、Case1, Case2 の RI と ICI でそれぞれ 1000 組分の改善対象となるリンクがいくつあるかを表したものである。この本数が例えば 1 本ならば、同じリンクが 6 回改善されることを意味している。

Case1,2 ともに RI で改善されるリンクの本数は、1000 組のうち大半が 1 本か 2 本で、ICI に比べると少ない。したがって、公平性の観点では ICI の方が勝っている。

全体として見ると、並列ネットワークと類似の結果を得ることができたといえる。

6. 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のみに着目すると、RI が優れている。
- (2) しかし、RI の改善に要する費用は 4. のケース A,B,C の順で増加する。したがって、後述の(5)での ICI に劣る。
- (3) CI による改善は、3.(2)で述べた直列システムでの欠点があるため利点が全くない。
- (4) 田の字型ネットワークにおいて、ICI による改善は、選択されるリンクの公平性と費用対効果の 2 点において RI より優れている。
- (5) 以上の成果から、ICI 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) ただし、より複雑なネットワークでは改善の対象となるリンクの選択について、RI と ICI の差異が明らかでない部分があるので、今後の検証が必要である。
- (7) 今後の課題として、重要度評価は計算例の増加やネットワークの拡大などデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) Nicholson, A. Schmoecker, 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.

- 2) 長江貴弘・若林拓史：道路網の連結信頼性向上法と各種重要度指標による改善対象リンクの相違，土木計画学研究・講演集，No.50, CD-ROM(No.268), 2014.
- 3) Takahiro Nagae and Hiroshi Wakabayashi. Differences in Network Reliability Improvement by Several Importance Indices. Program and Abstracts - Paper 257, 18th Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015.
- 4) Barlow, R. E. and Proschan, F. (1965). *Mathematical Theory of Reliability*, p.6. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 5) 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.
- 6) Birnbaum, Z. W. (1969) On the Importance of Different Components in Multi-Component System. *Multivariate Analysis II* (P. R. Krishnaiah Ed.), Academic Press, New York.
- 7) Henley, E.J. and Kumamoto, H. :*Reliability Engineering and Risk Assessment*, Prentice-Hall, Inc., 418-436, 1981.
- 8) 若林拓史・後藤康佑・方樹名・長江貴弘：部分的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，土木計画学研究・講演集，No.48, CD-ROM(No.229), 2013.
- 9) 若林拓史：阪神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) Nicholson, A. (2007). *Optimising Network Terminal Reliability*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability, CD-ROM, 2007.
- 12) 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.
- 13) 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(土木計画学), Vol. 67, No.2, pp.147-166, 2011.
- 14) 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.
- 15) Nicholson, A. (2007). *Optimising Network Terminal Reliability*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability, CD-ROM, 2007.

(2015.?? 受付)

HIGHWAY NETWORK RELIABILITY IMPROVEMENT AND DIFFERENCE IN IMPROVED LINKS BY SEVERAL IMPORTANCE INDICES

Takahiro NAGAE, Hiroshi WAKABAYASHI