

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

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、目的地までの経路を維持することが可能となる。日本では災害が多いため、より信頼性の高い道路網が求められる。しかし、費用・技術的側面から全リンクの強化は困難であるため、道路網全体の信頼度への寄与度の高いリンクを発見する必要がある。ネットワークのリンクの重要度評価法はいくつか提案されているが、実際の道路網に適用すると不適切な結果を招く可能性が高い。そのため、本論文では道路網に適用しやすい計算方法を検討したうえで、従来使用されてきた重要度指標と、近年の安全対策で用いられるようになってきたPSA指標に加え、筆者らが提案している重要度指標を紹介し、簡単なネットワークで従来の方法との比較を行う。加えて、大規模な道路網に適用するための計算方法を考察・提案する。

Key Words : *Highway network reliability, Importance index, Probability Importance, Partial minimal path set, Cost-benefit analysis*

1. はじめに

地震・水害など自然災害の多い我が国では、道路網の一部が寸断されることがしばしばある。そのようなとき、代替路があれば道路網としての機能を維持(連結信頼性を確保)することが可能となる。道路の災害対策は、道路網の強靱化(信頼性の向上)に必要であるが、技術的・費用的な制約のためすべての経路を強くするのは困難である。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が必要であるといえる。これは後述の重要度評価¹⁾のことを指している。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、適切な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、前述の2つの課題を解決するため、田の字型ネットワークにおける重要度指標の比較分析と、連結信頼性の近似解法の比較分析を行った。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、選択パス数削減による近似計算法の提案と、その計算例を示す。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

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²⁾、信頼度とはその確率表現であると定義されている³⁾。

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⁴⁾や CI ⁵⁾、 FV 、 RAW 指標などが提案されている⁶⁾。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3)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。

重要度評価の種類については Van der Borst and Schoonakker (2001)⁶⁾が、原子力発電所などの分野で用いられている PSA(確率的な安全評価)によるものを概観している。PSA の目的は、炉心溶融などの重大事故を引き起こすカット(パス)セットを発見するとともに、各々の構成要素においてそのような事故を防止するのに寄与度の大きいものを判定することである。それを表現したのが、

$$R(X) = K(X) + L(X) \quad (1)$$

の式⁶⁾であり、ここで $K(X)$ はある特定の基礎事象である x_i を含むカットセットであり、 $L(X)$ はそれを含まないカットセットである。 $R(X)$ はリスク方程式と呼び、これは後述するリスク重要度指標により結果は異なってくる。表-1⁶⁾は、リスク重要度指標の種類と定義をまとめたものである。

上記において、 $R(x_i = 1)$ は事象 x_i が起きる確率が1(信頼度が0)と仮定した時に増加するリスクの程度を、 $R(x_i = 0)$ は事象(構成要素) x_i の信頼度が完全であると仮定した時に減少するリスクの程度を、

表-1 リスク重要度指標の種類と定義⁶⁾

リスク重要度指標		
指標	略称	定義
Risk Reduction	RR	$R(\text{base}) - R(x_i = 0)$
Fussell-Vesely	$FV(CI)$	$\frac{R(\text{base}) - R(x_i = 0)}{R(\text{base})}$
Risk Reduction Worth	RRW	$\frac{R(\text{base})}{R(x_i = 0)}$
Criticality Importance	$CR(CI)$	$\frac{BI}{R(\text{base})} \times x_i(\text{base})$
Risk Achievement	RA	$R(x_i = 1) - R(\text{base})$
Risk Achievement Worth	RAW	$\frac{R(x_i = 1)}{R(\text{base})}$
Partial Derivative	$PD(RI)$	$\frac{R(x_i + \partial x_i) - R(x_i)}{\partial x_i}$
Birnbaum Importance	$BI(RI)$	$R(x_i = 1) - R(x_i = 0)$

$R(\text{base})$ は現状でのリスクの割合(%)を、 $x_i(\text{base})$ は構成要素 x_i が使用不能な状態をそれぞれ表している。わかりやすくするため、これらのリスク重要度指標を一次方程式的に表すとこのような式⁶⁾になり、

$$R(X_i) = aX_i + b \quad (2)$$

故障確率とリスク頻度の関係を図-1⁶⁾に示す。

また、リスク重要度指標には以下のような相互関係がある⁶⁾。

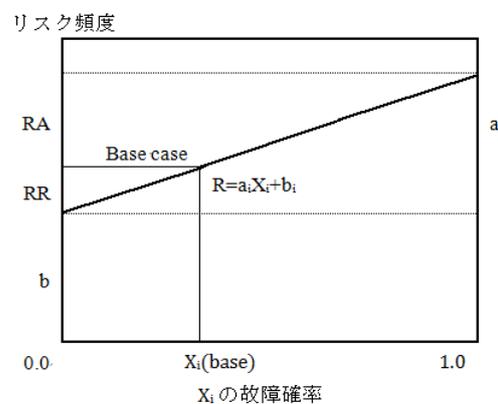


図-1 故障確率とリスク頻度の関係⁶⁾

$$FV(CI) = \frac{aX_i(\text{base})}{aX_i(\text{base}) + b} = \frac{RR}{R(\text{base})} \quad (3)$$

$$RRW = \frac{a}{b}X_i(\text{base}) + 1 = \frac{1}{1 - FV} \quad (4)$$

$$CR(CI) = \frac{aX_i(\text{base})}{aX_i(\text{base}) + b} = FV \quad (5)$$

$$RAW = \frac{a + b}{aX_i(\text{base}) + b} = \frac{RA}{R(\text{base})} + 1 \quad (6)$$

$$PD = a = RA + RR = BI(RI) \quad (7)$$

$FV(CI)$ と CR が、 PD と $BI(RI)$ が結果的には同一のものとしている⁶⁾。原子力の分野で最近よく用いられているのは FV と RAW である⁷⁾。 FV は、ある特定の構成要素の故障確率を0と仮定した時に、炉心損傷頻度(リスク頻度)がどの程度減少するかを表す指標である。この指標の値が大きい構成要素は改善対策の効果が大きいことを表す。一方、 RAW はある特定の構成要素の故障確率を1と仮定(必ず故障する)した時に、炉心損傷頻度(リスク頻度)がどの程度増加するかを表す指標である。この指標の値が大きい構成要素は、不具合が発生した時の影響が大きいことを表す。

上記の式などを見るとわかるように FV や RAW 指標は、システムの構造が同一であっても評価対象となる構成要素の故障確率によってその値は変化する。また、この計算方法は1つの構成要素のみを評価対象としているため、2つ以上の構成要素の故障を考える際は煩雑になる可能性がある。

これらの計算方法を道路網の重要度評価に用いる場合、以下のような課題があると思われる。

- 1) 評価対象となる、1つの構成要素とすべての構成要素の故障確率がわからないとリスク頻度を算出できない。
- 2) 炉心損傷頻度(リスク頻度)は、道路網でいえばノード間の信頼度に置き換えられるが、道路網のパスセットやODペアの数は1つとは限らない。
- 3) 個々の要素から全体のリスク頻度を測るという原子力分野での考え方と、道路網全体から個々のリンクの重要度を測るという視点の違いがある。

したがって、まだ検討が必要な部分はあるものの、本論文ではこれらの計算方法は重要度指標の比較の対象外とした。

次に、現状において用いられている道路網の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か保証がない。費用対効果の視点も必要である。

4) 計算量やメモリ量が指数的に増加する、大規模ネットワークへの適用性の課題がある。

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るとはいえないので、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。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10)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、10),11)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。

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

(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。

$$X_a \begin{cases} 1, \text{リンク} a \text{での円滑な走行移動が保証される場合} \\ 0, \text{そうでない場合} \end{cases} \quad (8)$$

リンク信頼度 r_a は以下のように与えられる。

$$r_a = E[X_a] \quad (9)$$

リンク信頼度の与え方については後述する。

直列システムの場合、ノード間信頼度である $R(\mathbf{r})$ は次の式で表すことができる。

$$R(\mathbf{r}) = E\left[\prod_{a=1}^l X_a\right] \quad (10)$$

ここで a はリンク番号、 l はリンク総数である。同様にして、並列システムの場合は、

$$R(\mathbf{r}) = E\left[1 - \prod_{a=1}^l (1 - X_a)\right] \quad (11)$$

このようにしてノード間信頼度を求めることができる。

しかし、実際の道路網は前述の直列・並列システムが組み合わさっているため、システム全体の構造関数の定義は以下になる。

$$R(\mathbf{r}) = E\left[1 - \prod_{s=1}^p \left(1 - \prod_{a \in P_s} X_a\right)\right] \quad (12)$$

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、

$$a_s = \prod_{a \in P_s} X_a \quad (13)$$

で表すとノード間信頼度の厳密値 R は、

$$R = E\left[1 - (1 - a_1)(1 - a_2) \cdots (1 - a_p)\right] \quad (14)$$

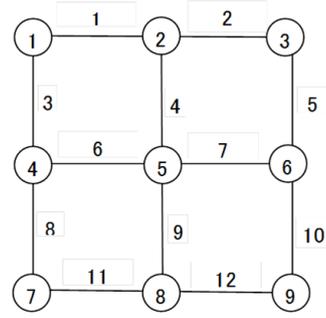


図-2 田の字型ネットワーク

と表すことができる。

田の字型ネットワーク (図-2) で、パスを3本だけ用いて ($\{1,2,5,10\}, \{1,4,9,12\}, \{3,8,11,12\}$)、ノード 1, 9 間の信頼度を計算すると (ノード間信頼度の近似値) 下記のような式で求めることができるが、

$$\begin{aligned} R(\mathbf{r}) &= E\left[1 - \prod_{s=1}^p \left(1 - \prod_{a \in P_s} X_a\right)\right] \\ &= E\left[1 - (1 - X_1 X_2 X_5 X_{10})(1 - X_1 X_4 X_9 X_{12})\right. \\ &\quad \left.(1 - X_3 X_8 X_{11} X_{12})\right] \quad (15) \end{aligned}$$

同一リンクが含まれているので、確率の重複計算を避けるため論理積に関するブール演算 ($X_a \cdot X_a = X_a$) が必要となる。

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、Birbaum⁴⁾の信頼性重要度 (RI) が提案されている。文献 13) 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クリティカリティ重要度を比較・考察する。

(2) 確率重要度の定義とその特徴

確率重要度 (Birbaum's Reliability Importance)⁴⁾ は、以下に定義される測度であり、

$$RI_a = \partial R_{AB}(\mathbf{r}) / \partial r_a \quad (16)$$

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⁴⁾。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。

図-3 のような直列ネットワークの場合、AB 間のリンク信頼度を r_1, r_2 、ノード間信頼度を R_{AB} とすると、

$$R_{AB} = r_1 \cdot r_2 \quad (17)$$

となる。リンク 1, 2 の確率重要度はそれぞれ

$$RI_1 = \frac{\partial R_{ab}}{\partial r_1} \quad (18)$$

$$RI_2 = \frac{\partial R_{ab}}{\partial r_2} \quad (19)$$

と表現できるので、

$$RI_1 = r_2 \quad (20)$$

$$RI_2 = r_1 \quad (21)$$

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

$$RI_1 > RI_2 \quad (22)$$

となり、これは信頼度の低い方のリンクの重要度が高い(改善の対象となる)ことを表している。この結果は、数理的にも道路整備の観点からも妥当と思われる。

次に、並列ネットワークの場合(図-4)、AB 間のノード間信頼度は

$$R_{AB} = 1 - (1 - r_1)(1 - r_2) \quad (23)$$

で計算されることから、

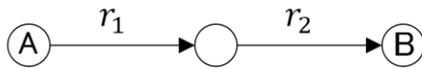


図-3 直列ネットワーク

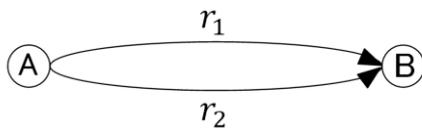


図-4 並列ネットワーク

$$RI_1 = 1 - r_2 \quad (24)$$

$$RI_2 = 1 - r_1 \quad (25)$$

である。仮に $r_1 < r_2$ である場合、

$$RI_1 < RI_2 \quad (26)$$

となり、これは信頼度の高い方のリンクの重要度が高い(改善の対象となる)ことを表している。この結果は数理的には妥当だが、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たままになるからである。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。

(3) クリティカリティ重要度の定義とその特徴

(2)で指摘した欠点—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ない—を改善したのがクリティカリティ重要度 CI (Criticality Importance) である⁵⁾。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⁵⁾。

$$\begin{aligned} CI_a &= \lim_{\Delta r_a \rightarrow 0} \left\{ \frac{\Delta R_{AB}(\mathbf{r})/R_{AB}(\mathbf{r})}{\Delta r_a/r_a} \right\} \\ &= \frac{\partial R_{AB}(\mathbf{r})}{\partial r_a} \times \frac{r_a}{R_{AB}(\mathbf{r})} \\ &= RI_a \times \frac{r_a}{R_{AB}(\mathbf{r})} \end{aligned} \quad (27)$$

直列ネットワーク(図-3)の場合、記法を 3.(2)と同様にすると、

$$CI_1 = \frac{r_1 \cdot r_2}{R_{AB}} = CI_2 \quad (28)$$

となり、どのリンクの重要度も同じとなる。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が合理的である。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は構造上の欠点があるといえる⁸⁾。

同様に、並列ネットワーク(図-4)の場合は、

$$CI_1 = \frac{r_1(1 - r_2)}{R_{AB}} \quad (29)$$

$$CI_2 = \frac{r_2(1-r_1)}{R_{AB}} \quad (30)$$

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

$$CI_1 < CI_2 \quad (31)$$

となる。これは RI と同じ結果であり、前述した問題点もそのままとなる。

(4) 改良型クリティカルティ重要度の定義とその特徴

上述した従来の重要度指標の欠点を克服するために提案されたのが改良型クリティカルティ重要度 (Improved Criticality Importance) である⁸⁾。クリティカルティ重要度を参考に、リンク不信頼度を

$$q_a = 1 - r_a \quad (32)$$

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⁾。

$$\begin{aligned} ICI_a &= \lim_{\Delta q_a \rightarrow 0} \left\{ -\frac{\Delta R_{AB}(\mathbf{r})/R_{AB}(\mathbf{r})}{\Delta q_a/q_a} \right\} \\ &= -\frac{\partial R_{AB}(\mathbf{r})}{\partial q_a} \times \frac{q_a}{R_{AB}(\mathbf{r})} \\ &= RI_a \times \frac{(1-r_a)}{R_{AB}(\mathbf{r})} \end{aligned} \quad (33)$$

よって、 ICI_a と RI_a の間には、

$$ICI_a = \frac{(1-r_a)}{R} RI_a \quad (34)$$

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-3)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、

$$ICI_1 = \frac{1-r_1}{r_1} = \frac{1}{r_1} - 1 \quad (35)$$

$$ICI_2 = \frac{1-r_2}{r_2} = \frac{1}{r_2} - 1 \quad (36)$$

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

$$ICI_1 > ICI_2 \quad (37)$$

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-4)では、クリティカルティ重要度はそれぞれ、

$$ICI_1 = \frac{1}{R_{AB}} \cdot (1-r_1)(1-r_2) \quad (38)$$

$$ICI_2 = \frac{1}{R_{AB}} \cdot (1-r_2)(1-r_1) \quad (39)$$

となる。これより、 ICI_1 と ICI_2 には、

$$ICI_1 = ICI_2 \quad (40)$$

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Nicholson¹¹⁾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。

(5) 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。

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、式(28)のように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。

4. Cost-Reliability 関数と費用対効果関数の設定

前述の改良型クリティカルティ重要度(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

$$\text{CostA} = 1000 \quad (41)$$

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

$$\text{CostB} = 5000 \times (r_a + 0.1) \quad (42)$$

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

$$\text{CostC} = 500 \times (50 \times r_a^2 + 15 \times r_a + 1) \quad (43)$$

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⁾。

$$\text{Eff}(Y, F) = \frac{R_{AB} - R_{AB0}}{\text{Cost}_{AB}} \times Y \times F \quad (44)$$

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。

まず、並列ネットワーク(図-4)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 回に改善する信頼度の改善幅を 0.1 として、4 段階に渡って改善を行った。その結果を図-5 に示す。

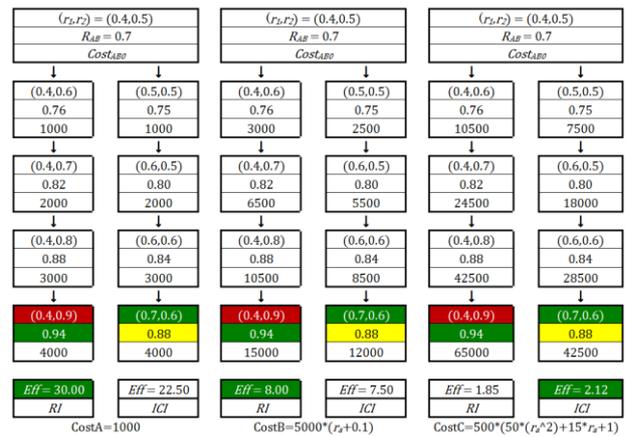


図-5 並列ネットワークでの *RI* と *ICI* の比較

3 段になっている太枠の中には、上から順にリンク信頼度、ノード間信頼度、改善にかかった総費用である。大きく分けて左から順に Cost-Reliability 関数のケース A~C で、それぞれ左側が *RI*、右側が *ICI* となっている。この図をみると、*RI* による改善はリンク信頼度の差が拡大する一方であることがわかる。ノード間信頼度についてはすべてのケースで *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た。

次に、田の字型ネットワーク(図-2)で *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については、最小値と最大値の差が小さいもの(Case1, 0.4 ≤ *r* < 0.6)と、差が大きいもの(Case2, 0.3 ≤ *r* < 0.7)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 とともに 4 パターン用意した。そして、*RI* と *ICI* ともに、重要度の値がもっとも大きいリンクを改善リンクとし、1 回に改善する信頼度の改善幅を 0.05 として、6 段階に渡って改善を行った。その結果を図-6~13 と表-2~9 に示す。

図-6~13 は、横軸に 12 本のリンク番号、縦軸にリンク信頼度をとった田の字型ネットワークによる *RI* と *ICI* の選択される改善リンクとリンク信頼度の推移である。

表-2~9 は、信頼度改善の各ステップでのノード間信頼度、リンク信頼度を用いた計算結果(最大値-最小値、平均、分散)と、Cost-Reliability 関数のケース A~C の計算結果である。最下段は、費用対効果(*Eff*)の計算結果である。

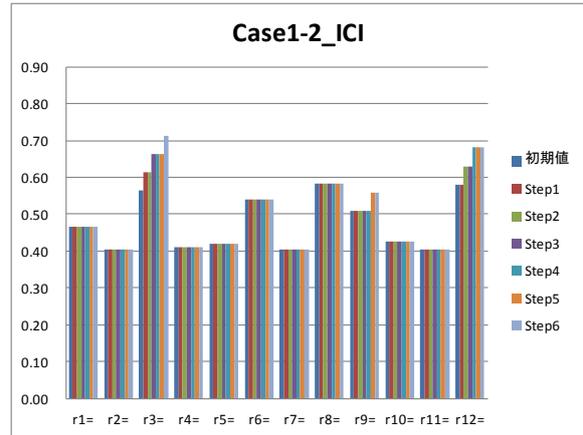
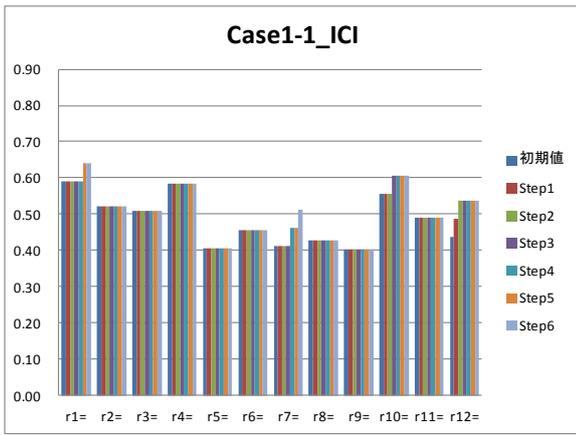
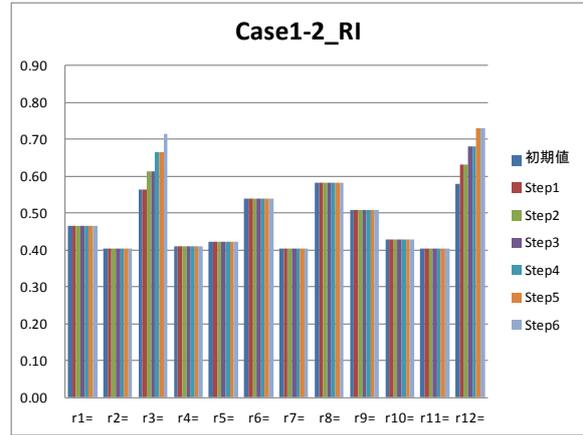
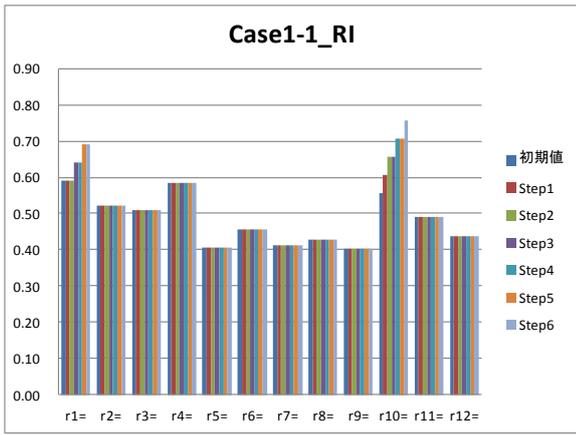


図-6 RI と ICI の改善リンクとリンク信頼度の推移の比較 (Case1-1)

図-7 RI と ICI の改善リンクとリンク信頼度の推移の比較 (Case1-2)

表-2 RI と ICI のノード間信頼度とリンク信頼度を用いた計算と Cost-Reliability 関数と費用対効果の比較(Case1-1)

Case1-1		r (リンク信頼度)			LinkReliability-Cost関数		
RI(0.4 ≤ r < 0.6)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC
0.2644644454	初期値	0.1882	0.4828	0.004397	500	3033.55	12173.48
0.2766138609	Step1	0.2050	0.4869	0.005204	500	3283.55	14002.75
0.2887632763	Step2	0.2550	0.4911	0.006393	500	3199.40	13373.06
0.3013875759	Step3	0.2550	0.4953	0.007407	500	3533.55	15957.03
0.3141741105	Step4	0.3050	0.4994	0.008943	500	3449.40	15285.26
0.3274355291	Step5	0.3050	0.5036	0.010304	500	3783.55	18036.30
0.3408591828	Step6	0.3550	0.5078	0.012188			
		sum			3000	20283.00	88827.87
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC
		50	10000		12.73246	1.88322	0.43002

表-3 RI と ICI のノード間信頼度とリンク信頼度を用いた計算と Cost-Reliability 関数と費用対効果の比較(Case1-2)

Case1-2		r (リンク信頼度)			LinkReliability-Cost関数		
RI(0.4 ≤ r < 0.6)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC
0.2597733673	初期値	0.1787	0.4759	0.005035	500	3151.85	13023.51
0.2728112893	Step1	0.2263	0.4801	0.006096	500	3069.05	12425.62
0.2864580020	Step2	0.2263	0.4843	0.006985	500	3401.85	14911.93
0.3002457696	Step3	0.2763	0.4884	0.008394	500	3319.05	14272.64
0.3146423278	Step4	0.2763	0.4926	0.009629	500	3651.85	16925.36
0.3291799410	Step5	0.3263	0.4968	0.011385	500	3569.05	16244.67
0.3443263448	Step6	0.3263	0.5009	0.012968			
		sum			3000	20162.70	87803.73
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC
		50	10000		14.09216	2.09677	0.48149

Case1-1		r (リンク信頼度)			LinkReliability-Cost関数		
ICI(0.4 ≤ r < 0.6)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC
0.2644644454	初期値	0.1882	0.4828	0.004397	500	2439.70	8329.34
0.2751015136	Step1	0.1882	0.4869	0.004214	500	2689.70	9861.69
0.2857385819	Step2	0.1882	0.4911	0.004413	500	3033.55	12173.48
0.2971492434	Step3	0.2050	0.4953	0.005151	500	2304.70	7553.84
0.3063296780	Step4	0.2050	0.4994	0.004639	500	3199.40	13373.06
0.3192710719	Step5	0.2382	0.5036	0.005584	500	2554.70	9018.69
0.3288312367	Step6	0.2382	0.5078	0.005419			
		sum			3000	16221.75	60310.09
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC
		50	10000		10.72780	1.98397	0.53363

Case1-2		r (リンク信頼度)			LinkReliability-Cost関数		
ICI(0.4 ≤ r < 0.6)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC
0.2597733673	初期値	0.1787	0.4759	0.005035	500	3069.05	12425.62
0.2726702345	Step1	0.2098	0.4801	0.005958	500	3151.85	13023.51
0.2864580020	Step2	0.2263	0.4843	0.006985	500	3319.05	14272.64
0.3001047147	Step3	0.2598	0.4884	0.008256	500	3401.85	14911.93
0.3146423278	Step4	0.2763	0.4926	0.009629	500	2790.15	10512.59
0.3251144479	Step5	0.2763	0.4968	0.009949	500	3569.05	16244.67
0.3399406552	Step6	0.3098	0.5009	0.011532			
		sum			3000	19301.00	81390.96
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC
		50	10000		13.36121	2.07677	0.49248

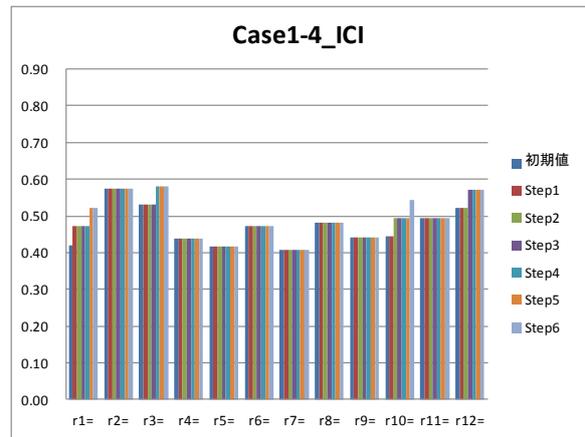
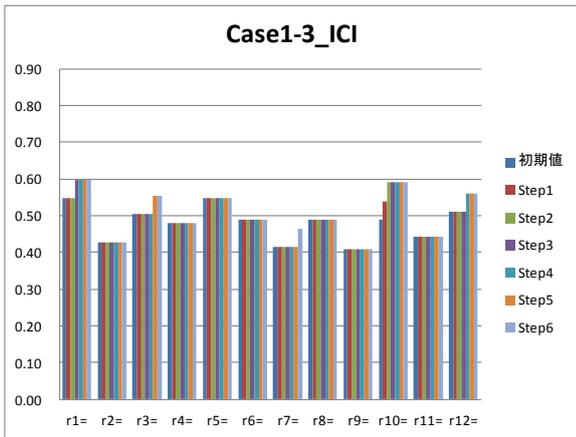
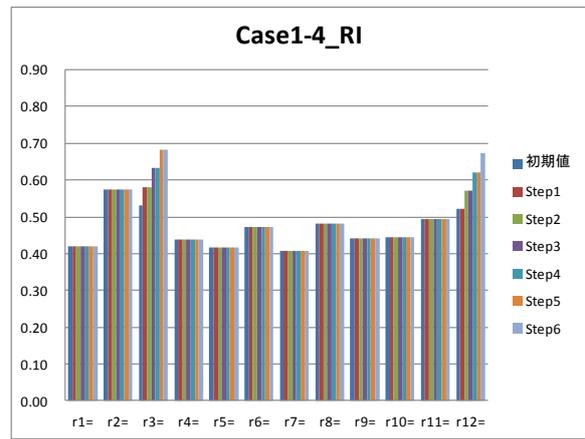
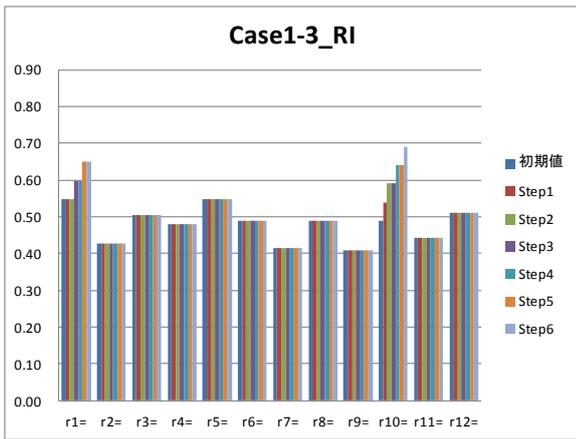


図-8 RI と ICI の改善リンクとリンク信頼度の推移の比較 (Case1-3)

図-9 RI と ICI の改善リンクとリンク信頼度の推移の比較 (Case1-4)

表-4 RI と ICI のノード間信頼度とリンク信頼度を用いた計算と Cost-Reliability 関数と費用対効果の比較(Case1-3)

Case1-3		r (リンク信頼度)				LinkReliability-Cost関数		
RI(0.4 ≤ r < 0.6)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC	
0.2524713228	初期値	0.1388	0.4797	0.002020	500	2700.10	9928.14	
0.2635878362	Step1	0.1388	0.4839	0.002298	500	2950.10	11590.69	
0.2747043495	Step2	0.1800	0.4880	0.002956	500	2994.35	11897.98	
0.2860546230	Step3	0.1888	0.4922	0.003654	500	3200.10	13378.24	
0.2977678290	Step4	0.2300	0.4964	0.004661	500	3244.35	13707.66	
0.3097147950	Step5	0.2388	0.5005	0.005706	500	3450.10	15290.79	
0.3220246936	Step6	0.2800	0.5047	0.007059				
			sum		3000	18539.10	75793.50	
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC	
		50	10000		11.59223	1.87586	0.45883	

表-5 RI と ICI のノード間信頼度とリンク信頼度を用いた計算と Cost-Reliability 関数と費用対効果の比較(Case1-4)

Case1-4		r (リンク信頼度)				LinkReliability-Cost関数		
RI(0.4 ≤ r < 0.6)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC	
0.2276287607	初期値	0.1686	0.4702	0.002529	500	2908.75	11307.08	
0.2387049056	Step1	0.1753	0.4744	0.003232	500	2859.00	10970.38	
0.2503926431	Step2	0.1753	0.4786	0.003818	500	3158.75	13073.95	
0.2621435570	Step3	0.2253	0.4827	0.004869	500	3109.00	12712.38	
0.2745060634	Step4	0.2253	0.4869	0.005803	500	3408.75	14965.83	
0.2869317462	Step5	0.2753	0.4911	0.007201	500	3359.00	14579.38	
0.2999690216	Step6	0.2753	0.4952	0.008481				
			sum		3000	18803.25	77609.00	
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC	
		50	10000		12.05671	1.92361	0.46606	

Case1-3		r (リンク信頼度)				LinkReliability-Cost関数		
ICI(0.4 ≤ r < 0.6)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC	
0.2524713228	初期値	0.1388	0.4797	0.002020	500	2700.10	9928.14	
0.2635878362	Step1	0.1388	0.4839	0.002298	500	2950.10	11590.69	
0.2747043495	Step2	0.1800	0.4880	0.002956	500	2994.35	11897.98	
0.2860546230	Step3	0.1888	0.4922	0.003654	500	2806.50	10620.44	
0.2961169721	Step4	0.1888	0.4964	0.004005	500	2768.10	10367.98	
0.3064915893	Step5	0.1888	0.5005	0.004256	500	2323.75	7661.06	
0.3149012290	Step6	0.1888	0.5047	0.003732				
			sum		3000	16542.90	62066.30	
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC	
		50	10000		10.40498	1.88691	0.50293	

Case1-4		r (リンク信頼度)				LinkReliability-Cost関数		
ICI(0.4 ≤ r < 0.6)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC	
0.2276287607	初期値	0.1686	0.4702	0.002529	500	2354.90	7837.95	
0.2368789918	Step1	0.1686	0.4744	0.002309	500	2465.70	8482.88	
0.2466595638	Step2	0.1686	0.4786	0.002240	500	2859.00	10970.38	
0.2575891223	Step3	0.1686	0.4827	0.002791	500	2908.75	11307.08	
0.2692117405	Step4	0.1753	0.4869	0.003391	500	2604.90	9327.90	
0.2788885529	Step5	0.1753	0.4911	0.003449	500	2715.70	10028.23	
0.2890976895	Step6	0.1753	0.4952	0.003657				
			sum		3000	15908.95	57954.42	
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC	
		50	10000		10.24482	1.93190	0.53032	

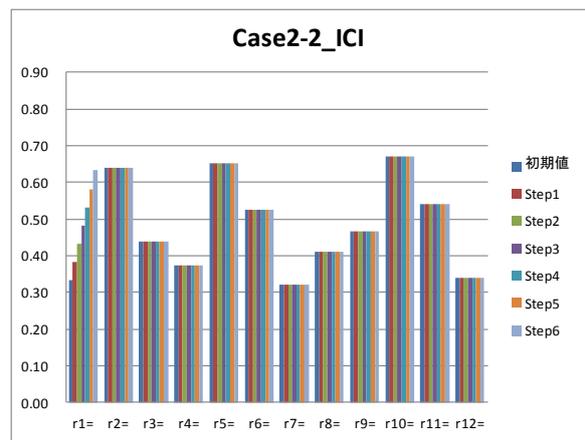
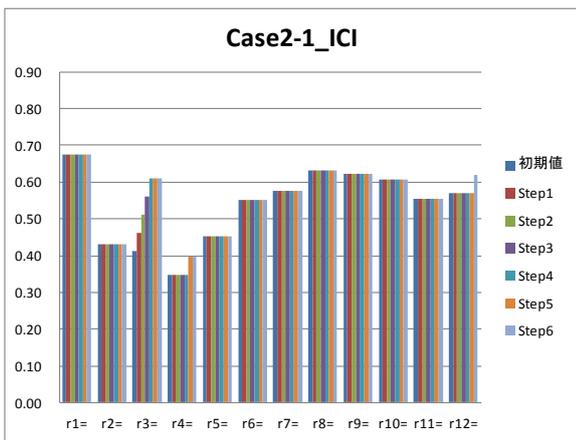
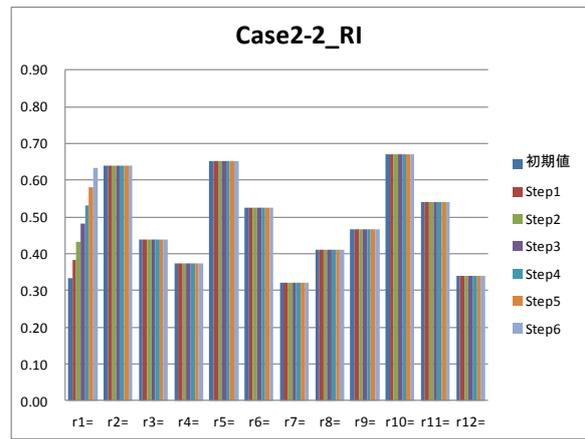
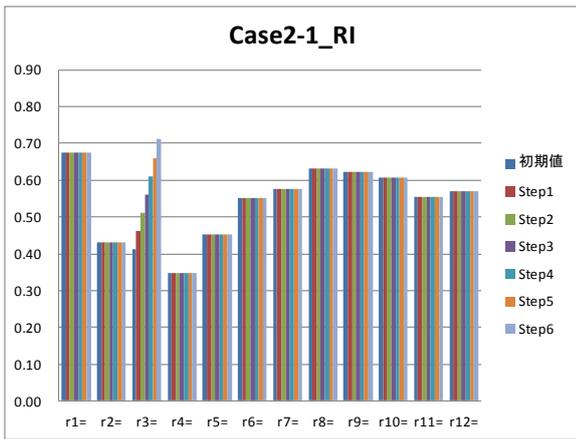


図-10 RI と ICI の改善リンクとリンク信頼度の推移の比較 (Case2-1)

図-11 RI と ICI の改善リンクとリンク信頼度の推移の比較 (Case2-2)

表-6 RI と ICI のノード間信頼度とリンク信頼度を用いた計算と Cost-Reliability 関数と費用対効果の比較(Case2-1)

Case2-1		r (リンク信頼度)			LinkReliability-Cost関数		
RI(0.3 ≤ r < 0.7)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC
0.3412032418	初期値	0.3282	0.5363	0.009454	500	2305.35	7557.49
0.3571204656	Step1	0.3282	0.5404	0.008602	500	2555.35	9022.66
0.3730376893	Step2	0.3282	0.5446	0.008131	500	2805.35	10612.84
0.3889549130	Step3	0.3282	0.5488	0.008043	500	3055.35	12328.01
0.4048721367	Step4	0.3282	0.5529	0.008337	500	3305.35	14168.19
0.4207893604	Step5	0.3282	0.5571	0.009012	500	3555.35	16133.36
0.4367065841	Step6	0.3627	0.5613	0.010069			
		sum			3000	17582.10	69822.56
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC
		50	10000		15.91722	2.71593	0.68390

表-7 RI と ICI のノード間信頼度とリンク信頼度を用いた計算と Cost-Reliability 関数と費用対効果の比較(Case2-2)

Case2-2		r (リンク信頼度)			LinkReliability-Cost関数		
RI(0.3 ≤ r < 0.7)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC
0.2169455425	初期値	0.3493	0.4760	0.015077	500	1910.95	5500.18
0.2317699529	Step1	0.3493	0.4801	0.014070	500	2160.95	6768.15
0.2465943633	Step2	0.3493	0.4843	0.013444	500	2410.95	8161.13
0.2614187737	Step3	0.3493	0.4885	0.013201	500	2660.95	9679.10
0.2762431841	Step4	0.3493	0.4926	0.013339	500	2910.95	11322.08
0.2910675944	Step5	0.3493	0.4968	0.013860	500	3160.95	13090.05
0.3058920048	Step6	0.3493	0.5010	0.014763			
		sum			3000	15215.70	54520.70
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC
		50	10000		14.82441	2.92285	0.81571

Case2-1		r (リンク信頼度)			LinkReliability-Cost関数		
ICI(0.3 ≤ r < 0.7)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC
0.3412032418	初期値	0.3282	0.5363	0.009454	500	2305.35	7557.49
0.3571204656	Step1	0.3282	0.5404	0.008602	500	2555.35	9022.66
0.3730376893	Step2	0.3282	0.5446	0.008131	500	2805.35	10612.84
0.3889549130	Step3	0.3282	0.5488	0.008043	500	3055.35	12328.01
0.4048721367	Step4	0.3282	0.5529	0.008337	500	1991.85	5896.82
0.4146768798	Step5	0.2782	0.5571	0.006823	500	3101.75	12660.10
0.4292563675	Step6	0.2782	0.5613	0.007124			
		sum			3000	15815.00	58077.92
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC
		50	10000		14.67552	2.78385	0.75806

Case2-2		r (リンク信頼度)			LinkReliability-Cost関数		
ICI(0.3 ≤ r < 0.7)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC
0.2169455425	初期値	0.3493	0.4760	0.015077	500	1910.95	5500.18
0.2317699529	Step1	0.3493	0.4801	0.014070	500	2160.95	6768.15
0.2465943633	Step2	0.3493	0.4843	0.013444	500	2410.95	8161.13
0.2614187737	Step3	0.3493	0.4885	0.013201	500	2660.95	9679.10
0.2762431841	Step4	0.3493	0.4926	0.013339	500	2910.95	11322.08
0.2910675944	Step5	0.3493	0.4968	0.013860	500	3160.95	13090.05
0.3058920048	Step6	0.3493	0.5010	0.014763			
		sum			3000	15215.70	54520.70
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC
		50	10000		14.82441	2.92285	0.81571

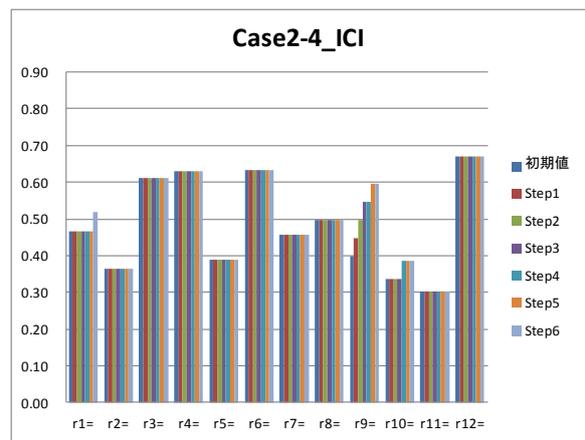
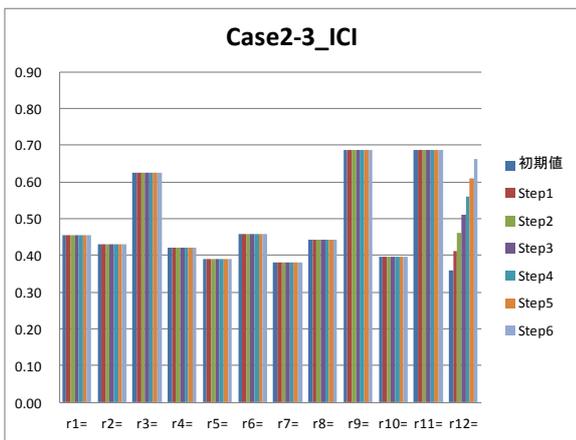
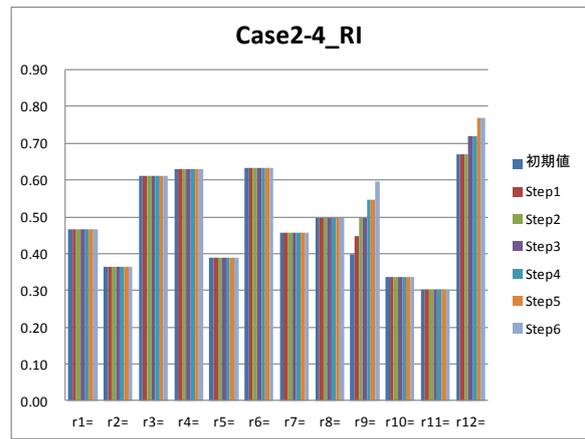
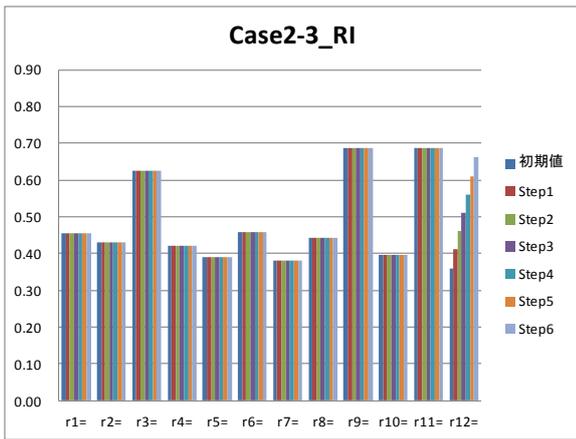


図-12 RI と ICI の改善リンクとリンク信頼度の推移の比較 (Case2-3)

図-13 RI と ICI の改善リンクとリンク信頼度の推移の比較 (Case2-4)

表-8 RI と ICI のノード間信頼度とリンク信頼度を用いた計算と Cost-Reliability 関数と費用対効果の比較(Case2-3)

Case2-3		r (リンク信頼度)				LinkReliability-Cost関数		
RI(0.3 ≤ r < 0.7)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC	
0.2235067890	初期値	0.3254	0.4780	0.012776	500	2055.50	6218.08	
0.2406803934	Step1	0.3052	0.4821	0.011993	500	2305.50	7558.33	
0.2578539977	Step2	0.3052	0.4863	0.011592	500	2555.50	9023.58	
0.2750276021	Step3	0.3052	0.4905	0.011573	500	2805.50	10613.83	
0.2922012064	Step4	0.3052	0.4946	0.011936	500	3055.50	12329.08	
0.3093748108	Step5	0.3052	0.4988	0.012681	500	3305.50	14169.33	
0.3265484152	Step6	0.3052	0.5030	0.013808				
			sum		3000	16083.00	59912.23	
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC	
		50	10000		17.17360	3.20343	0.85994	

表-9 RI と ICI のノード間信頼度とリンク信頼度を用いた計算と Cost-Reliability 関数と費用対効果の比較(Case2-4)

Case2-4		r (リンク信頼度)				LinkReliability-Cost関数		
RI(0.3 ≤ r < 0.7)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC	
0.2731889881	初期値	0.3660	0.4797	0.015053	500	2235.10	7168.27	
0.2868695148	Step1	0.3660	0.4838	0.014555	500	2485.10	8598.32	
0.3005500414	Step2	0.3660	0.4880	0.014440	500	3597.20	16474.55	
0.3150342514	Step3	0.4160	0.4922	0.016143	500	2735.10	10153.37	
0.3297222648	Step4	0.4160	0.4963	0.016374	500	3847.20	18585.65	
0.3452139615	Step5	0.4660	0.5005	0.018424	500	2985.10	11833.42	
0.3609094616	Step6	0.4660	0.5047	0.019003				
			sum		3000	17884.80	72813.58	
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC	
		50	10000		14.62008	2.45238	0.60236	

Case2-3		r (リンク信頼度)				LinkReliability-Cost関数		
ICI(0.3 ≤ r < 0.7)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC	
0.2235067890	初期値	0.3254	0.4780	0.012776	500	2055.50	6218.08	
0.2406803934	Step1	0.3052	0.4821	0.011993	500	2305.50	7558.33	
0.2578539977	Step2	0.3052	0.4863	0.011592	500	2555.50	9023.58	
0.2750276021	Step3	0.3052	0.4905	0.011573	500	2805.50	10613.83	
0.2922012064	Step4	0.3052	0.4946	0.011936	500	3055.50	12329.08	
0.3093748108	Step5	0.3052	0.4988	0.012681	500	3305.50	14169.33	
0.3265484152	Step6	0.3052	0.5030	0.013808				
			sum		3000	16083.00	59912.23	
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC	
		50	10000		17.17360	3.20343	0.85994	

Case2-4		r (リンク信頼度)				LinkReliability-Cost関数		
ICI(0.3 ≤ r < 0.7)		max-min	ave	varp	CostA	CostB	CostC	
0.2731889881	初期値	0.3660	0.4797	0.015053	500	2235.10	7168.27	
0.2868695148	Step1	0.3660	0.4838	0.014555	500	2485.10	8598.32	
0.3005500414	Step2	0.3660	0.4880	0.014440	500	2735.10	10153.37	
0.3142305681	Step3	0.3660	0.4922	0.014706	500	1929.15	5588.27	
0.3237102956	Step4	0.3660	0.4963	0.013594	500	2985.10	11833.42	
0.3369627109	Step5	0.3660	0.5005	0.014207	500	2588.30	9225.10	
0.3476827996	Step6	0.3660	0.5047	0.014125				
			sum		3000	14957.85	52566.75	
	Eff	Y	F		CostA	CostB	CostC	
		50	10000		12.41564	2.49012	0.70856	

その結果、田の字型ネットワークにおいてもノード間信頼度では RI の方がほぼ勝っていることが判明した。一方、改善の対象となるリンクは RI は ICI に比べると同一のリンクが選択され続ける傾向が強くなっている。それを裏付けるように、リンク信頼度のばらつき(分散)は ICI の方が値が小さくなっている。したがって、公平性の観点では ICI の方が勝っているといえる。費用対効果(Eff)は、主としてケース C で ICI の方が勝る結果となった。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。ただし、リンク信頼度の初期値によっては RI , ICI での改善対象となるリンクの選択が同一となるなど、不明な点もあるので今後の検証が必要である。

6. 厳密解法と近似解法の比較分析

連結信頼性の計算は、ネットワークの規模が拡大すると計算量が膨大になるため、その削減が必要となる。その一つの方法が一部のパスセットを用いて近似値を計算する方法である⁸⁾。

その初期的な検討例としては、田の字型ネットワーク(図-2)において、パスの生起確率順にパス数を減じていったものがある⁸⁾。道路網の連結信頼性の重要度評価で重視すべき点は、厳密値と近似値で、リンクの重要度の順序に変化がないことである。ここが変化すると、近似値を用いる意味が薄くなる。 ICI の計算結果として、全パス12本から7本程度まで減らすのなら、順序に大きな変化がないことが判明している。これは、ノードペア間(1,9)の中ですべてのリンクが含まれる範囲でパス数を減じれば、重要度の順位にあまり変化がないことを示唆しているといえる⁸⁾。

本研究ではそれを踏まえ、パスを減らす方法として新たに距離順を加えて生起確率順と比較を行うことにした。使用したのは、田の字型ネットワークで、リンク信頼度を($Case3, 0.1 \leq r < 0.9$)として乱数を発生させたものを用意し、パス数を生起確率順と距離順で減じてゆき、ノード間信頼度の値を比較することとした。新たにリンク信頼度の値を設定したのは、 $Case1, 2$ の値では生起確率順と距離順でパスの順序が全く同じだったためである。

その結果を図-14に示す。

図-14の上の表は、生起確率順と距離順のパスの順位の比較を表したものである。左下は、各々のリンク信頼度の値、右下のグラフが生起確率順と距離順でのノード間信頼度 R の比較となる。

順位	生起確率順	パス信頼度	距離順	パス信頼度
1	1 2 5 10	0.0485046431	1 2 5 10	0.0485046431
2	1 4 7 10	0.0444441587	1 4 7 10	0.0444441587
3	3 8 11 12	0.0423768088	3 8 11 12	0.0423768088
4	1 4 6 8 11 12	0.0316233933	3 6 7 10	0.0236840621
5	3 6 7 10	0.0236840621	1 4 9 12	0.0146522084
6	1 4 9 12	0.0146522084	3 6 9 12	0.0078080865
7	3 6 9 12	0.0078080865	1 4 6 8 11 12	0.0316233933
8	3 7 8 9 10 11	0.0056978250	3 7 8 9 10 11	0.0056978250
9	2 3 4 5 6 10	0.0051586311	2 3 4 5 6 10	0.0051586311
10	1 2 5 6 7 8 11 12	0.0031175297	1 2 5 7 9 12	0.0014444589
11	1 2 5 7 9 12	0.0014444589	1 2 5 6 7 8 11 12	0.0031175297
12	2 3 4 5 8 9 10 11	0.0012410446	2 3 4 5 8 9 10 11	0.0012410446

リンク番号	リンク信頼度
1	0.59865
2	0.45164
3	0.22600
4	0.44674
5	0.32445
6	0.63061
7	0.30055
8	0.81721
9	0.21054
10	0.55293
11	0.88175
12	0.26022
ave	0.47511

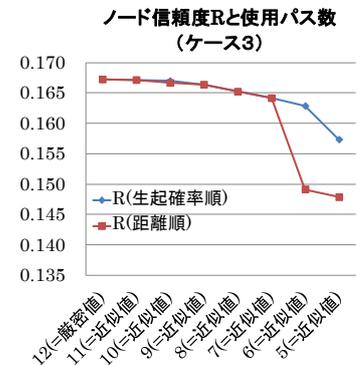


図-14 田の字型ネットワークでパスを生起確率順と距離順で減じていった際のノード間信頼度 R の比較

図-14をみると、全リンクが含まれる7パス程度までならノード間信頼度の近似値にはあまり変化がなく、また生起確率順と距離順でもほとんど差がないことがわかる。したがって、パス数の減じ方としては生起確率順のみならず距離順にも実用の可能性があることを、この結果は示唆しているといえる。

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のみに着目すると、 RI がもっとも優れている。
- (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.(3)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) 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 of 公平性の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。したがって、今後の課題として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。

(7) 部分的なミニマルパスを用いた近似解法において、パスの選択方法として新たに距離順を用いて計算を行った。生起確率順に類似した結果となったため、この方法による計算方法も実用の可能性があることが示唆された。

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) Barlow, R. E. and Proschan, F. (1965). Mathematical Theory of Reliability, p.6. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Henley, E.J. and Kumamoto, H. :Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, Inc., 418-436, 1981.
- 6) Van der Borst, M.; Schoonakker, H. : An overview of PSA importance measures Reliability Engineering and System Safety, Volume 72, Number 3, June 2001, pp.241-245(5) Elsevier.
- 7) 嶋田善夫:確率的安全評価による安全上重要な海外原子力発電所不具合情報抽出法 INSS journal 11, 87-94, 2004 原子力安全システム研究所

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) 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。

(2014.?? 受付)

EFFECTIVE HIGHWAY NETWORK RELIABILITY IMPROVEMENT AND DIFFERENCE IN COURSE OF LINK IMPROVEMENT BY SEVERAL IMPORTANCE INDICES

Takahiro NAGAE, Hiroshi WAKABAYASHI