

脆弱断面を判定する 道路防災機能評価手法

栄徳 洋平¹・横井 祐治²・石倉 麻志³・飯田 恭敬⁴

¹正会員 株式会社福山コンサルタント (〒812-0842 熊本県熊本市南千反畑町1番21号)

E-mail: eitoku@fukuyamaconsul.co.jp

²非会員 株式会社福山コンサルタント (〒802-0062 北九州市小倉北区片野新町1丁目11番4号)

E-mail: yokoi@fukuyamaconsul.co.jp

³正会員 株式会社福山コンサルタント (〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町13-17)

E-mail: a.ishi@fukuyamaconsul.co.jp

⁴非会員 京都大学名誉教授

東日本大震災等、近年様々な災害が発生していることから、信頼性の高い道路ネットワークを形成することが必要となっている。このため、本研究は最も脆弱な断面を選定する手法を提案し、その優先度の評価により、実務の道路整備計画策定時の評価に活用することを目的とする。道路網の最脆弱断面を選定するため、モンテカルロシミュレーションを用いた最脆弱断面を選定する手法、解の信頼性を確保する収束判定手法、最脆弱断面の遮断確率の厳密解を算出する手法を提案している。また、岩手県を対象にした大規模な実ネットワークで評価しており、実務上において活用可能な手法となっている。

Key Words :reliability of network, connectivity, vulnerability, road of network

1. 研究の背景

近年、東日本大震災、ゲリラ豪雨等の多発による災害により、道路の各所が通行止めとなり、道路の連結信頼性を確保することが必要となっている。道路強靱化を図るため新たな道路整備が進められており、優先順位を持って整備することが求められている。本研究は、道路信頼性の観点から、最脆弱断面を選定する手法を提案している。

2. 防災機能評価手法の問題点

災害時の道路の重要性が再認識されたことから、災害時の道路の必要性や有効性を評価するため、国土交通省では、「道路事業における防災機能の評価手法(暫定手法)」が導入された。この評価手法は、「事業予定路線

または事業中路線の事業評価」を目的に、防災面に着目して、早期に啓開し、救助・救援、緊急物資の輸送、復旧活動を支える基幹経路となる広域的防災に資する道路ネットワークの評価を目的としたものである。特定のある道路事業を対象に、「耐災害性」(評価する拠点間最短ネットワークが災害時に通行できるか否か)と「多重性」(評価する拠点間最短ネットワークが通行できない場合の代替路が存在するか、また代替路の迂回度がどの程度か)で評価する手法である。

ネットワークの信頼性を評価する手法には、拠点間のアクセシビリティの低下を評価する手法¹⁾、ネットワークのリダンダンシーを評価する方法²⁾、ネットワーク信頼工学から派生した連結確率からネットワーク連結信頼性を評価する方法がある。

さらに、連結確率からネットワークの連結信頼性を評価する方法には、ミニマルパス・カットによる信頼性評

価方法³⁾やモンテカルロ法³⁾がある。

ミニマルパス・カットによる信頼度の算出においては、同一リンクを表す確率変数の重複を除去するためのブール演算が必要であり、実行は現実的には困難であり、このため、飯田ら⁴⁾、中川ら⁵⁾、原田ら⁶⁾により近似解を求める手法が提案されている。

また、クリティカルリンクを選定する手法として瀬戸ら⁷⁾の研究があるが、リンク信頼度を与件とせずODペア間に重複のない経路を数え上げる手法を提案している。

3. 最脆弱断面選定の意味

表-1は、交通需要の評価手法と連結信頼性の評価方法を対比したものである。上記のように、従来、連結信頼性の地点間評価方法に関する研究成果はあるものの、一方、リンク信頼度を与件とし、そのリンクが損傷した際に最も脆弱となる断面やリンクに関する評価方法に関する研究は少ない。

本手法の特徴は、ある拠点間で最も脆弱な断面を特定し、対策箇所を選定することにある。近年の地震・豪雨災害は、広域的に発生する特徴があり、面的に災害が発生したとしても、地域間の移動が確保されることが望まれ、全体道路ネットワークの中で要対策箇所を特定することは重要なことである。さらに、最脆弱断面上の特定リンクについて対策を講じることで、その効果を算出する方法について提案する。

連結信頼性を評価するためには、下記に示す3つの課題がある。

- ① リンク信頼度の設定方法
- ② 最脆弱断面、最脆弱リンクの選定と、その遮断確率の算出方法
- ③ ネットワーク信頼性を考慮した便益評価方法

本研究は、②番目の課題に対する研究成果であり、その際、最脆弱断面の選定手法と、算出結果の信頼性を確保する方法が課題となる。

表-1 交通需要、連結信頼性の評価方法の対比

	道路要因	区間評価	地点間評価	便益
交通需要	道路容量	旅行速度 混雑度 損失時間	地点間 旅行速度	走行時間便益等 (平常時便益)
連結信頼性	リンク 信頼度	脆弱リンクの 連結確率 (最脆弱断面、 リンク)	地点間の 連結確率	迂回路による走行 便益等 取止め交通便益 (緊急時原単位)

4. 本研究手法

(1) 連結信頼性の定義と目的

道路ネットワークの特定のノード間の連結信頼度 R の厳密解は、ミニマルパスで表すと

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

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。状態ベクトルの要素 X_a は、

機能しているとき $X_a = 1$ (連結)

機能停止しているとき $X_a = 0$ (非連結)

である。リンク信頼度 r_a は、

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

で与えられる。 a はリンク番号である。

一方はミニマルカットで表すと、

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

で与えられる。ここで K_s は、 s 番目のミニマルカットセット、 k はカット総数を表している。

図-1のネットワークに対して、ミニマルカットによるシステム構造関数を図形で表したのが図-2である。本手法で着目する最脆弱断面は、図-2に示すミニマルカットのうち最も遮断確率の高い断面であり、この断面を特定することで、対策の実施箇所を明確にする。

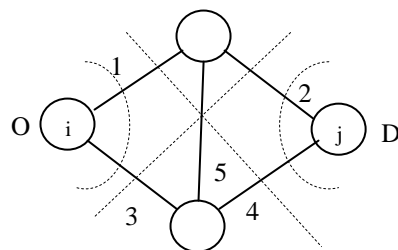


図-1 道路ネットワークのカット

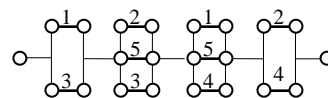


図-2 ミニマルカットセットによるシステム構

(2) 基本的な手法⁸⁾

モンテカルロシミュレーションにおいて、非連結状態となる遮断断面の出現回数を数え上げ、遮断断面のうちで出現回数が最大となる遮断断面を選定する。この出現回数が最大となる遮断断面が、最脆弱断面となる。

遮断断面の選定においては、ラベリング法を活用する。起点から終点に向かって到達判定を行い、ネットワークが非連結となるときは、ラベリング法によって、ラベル付与のノード集合とラベル不能のノード集合に分ける。この到達可能ノードと到達不可ノードを結ぶリンクが、遮断断面を構成するリンクの候補となる。

(3) 遮断断面選定における課題

ラベリング法を用いて選定された遮断断面を構成するリンクには2つの問題がある。1点目は、起点からラベリング法を実施しているため、選定された候補リンク以外に、終点側にも新たな遮断断面が構成されている可能性がある。(図-3参照) 2点目は、選定されたリンクが遮断断面でない可能性がある。図-4で言えば、ノード③のように、起点グループに囲まれてドーナツの穴のようにになっている場合がある。

(4) 遮断断面選定方法

1) 遮断断面以外のリンクの除去

図-4に示すL(3→6)とL(8→15)の違いは、このリンクが通行可能となった場合、起点から終点に到達できるか否かで判定できる。下記の方法で遮断断面リンクを選定する。

Step1: 遮断断面リンク候補以外をすべて、「機能状態」にする。

Step2: 図-5のネットワーク上で、遮断断面リンク候補のうち1リンクのみ「機能状態」にして、起点①→終点⑳の到達を判定する。

○到達可能: そのリンクは遮断断面構成リンク

○到達不可: そのリンクは遮断断面構成リンク外

例えば、L(8→15)を「機能状態」にすると、起点から終点に到達でき遮断断面と判定できるが、L(3→6)を「機能状態」にしても、起点から終点に到達できないため遮断断面でない判定できる。

2) 遮断断面の複数選定

遮断断面が複数ある場合、起点を再設定することで、複数の遮断断面を選定できる。図-6に示すように、新たな起点をノード⑨に設定することで、終点側に新たな遮断断面を選定できる。

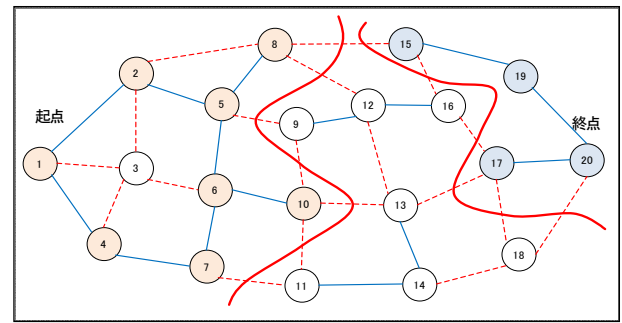


図-3 起点から終点間での複数の遮断断面

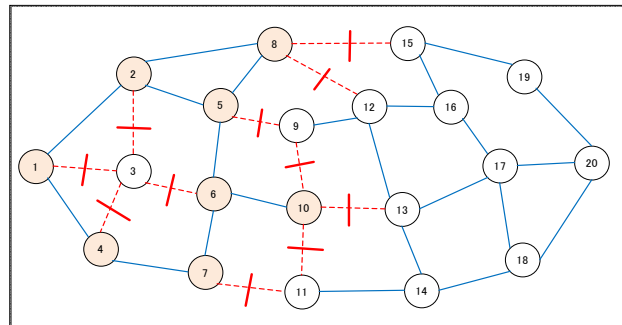


図-4 遮断断面とならないリンクの選定

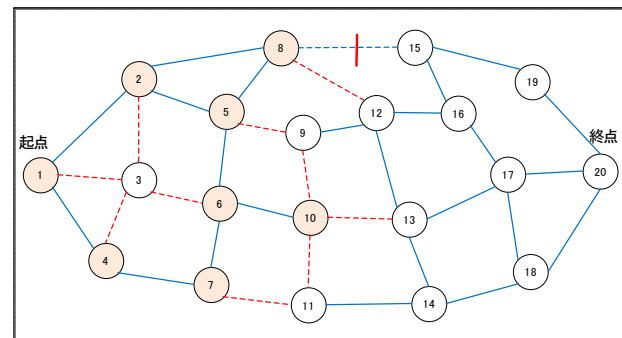


図-5 遮断断面以外のリンクの除去方法

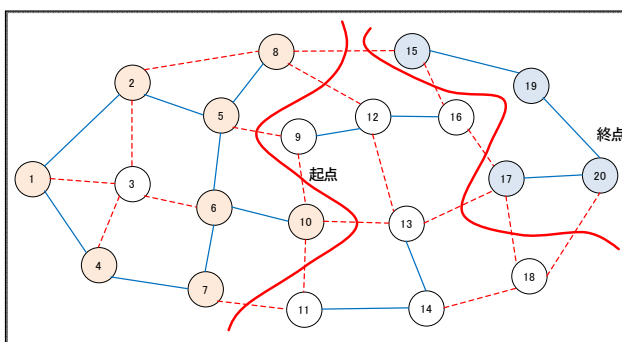


図-6 遮断断面の複数選定

(5) 算出結果の信頼性判定基準

1) 信頼性確保のための判定基準の考え方

モンテカルロシミュレーションは、乱数を用い十分多くの回数のシミュレーションを繰り返すことにより、近似的に解を求めることができる手法である。このため、

算出結果の信頼性を確保するために必要な収束回数を実施することが必要となる。収束回数を判定するため、以下の2点の判定基準を設定する。

・判定基準①: ODペア間の連結確率の収束判定

シミュレーションを繰り返すことにより算出されるODペア間の連結確率の信頼性を確保する。

・判定基準②: 遮断確率の上位n個の最脆弱断面の遮断確率の収束判定

シミュレーションを繰り返すことにより算出される遮断確率の高い上位n個の最脆弱断面の信頼性を確保する。各収束回数ごとに、遮断確率が上位n個となる最脆弱断面について、以下に示す「収束判定比率」を用いて検証を実施する。

収束判定比率

= (シミュレーションでの最脆弱断面の遮断確率) / (最脆弱断面を構成するリンクのリンク信頼度から算出される遮断確率)

2) 判定基準の検証

① 検討対象と検証ケース

東北地域全体のネットワークを対象に、盛岡市と釜石市間の連結信頼性について算出する。対象ネットワークは、リンク数14,000、ノード数11,000で構成されている。また、各リンク信頼度の入力条件による算出結果の信頼性を検討するため、表-2に示す3ケースのリンク信頼度を設定する。

② ODペア間の連結確率による信頼性評価

図-7は、ケース別の収束回数別の連結確率の推移を示している。10万回収束した連結確率に対する各収束回数別の連結確率を縦軸で表している。

回数を増やすごとに連結確率は収束し、概ね6万回程度実施すれば、ほぼ収束していると判断される。ケース別に見ると、リンク信頼度が低い場合、多くの収束回数が必要となる。

③ 最脆弱断面の収束判定比率

図-8, 9, 10は、各3ケースの収束判定比率の推移を表している。各ケースとも収束回数が増加するに従い、収束判定比率は1に収束している。ケースによって収束するまでの回数が異なり、リンク信頼度が低いネットワークケースほど、多くの収束回数が必要となる。また、ODペア間の連結確率の収束回数判定よりも、最脆弱断面の収束回数判定で多くの収束回数が必要となっている。

表-2 ケース別のOD間の連結確

	ケース①	ケース②	ケース③
1kmでのリンク信頼度	0.99	0.97	0.95
盛岡～釜石間連結確率	0.99	0.86	0.41

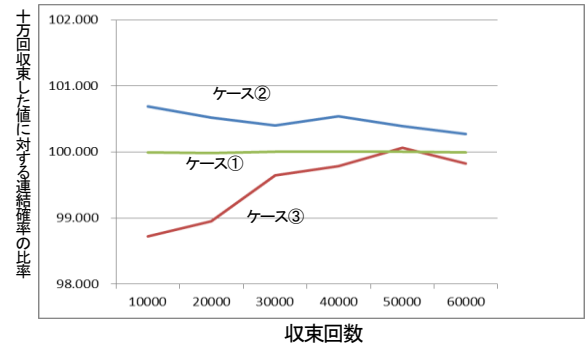


図-7 収束回数別の連結確率の推移

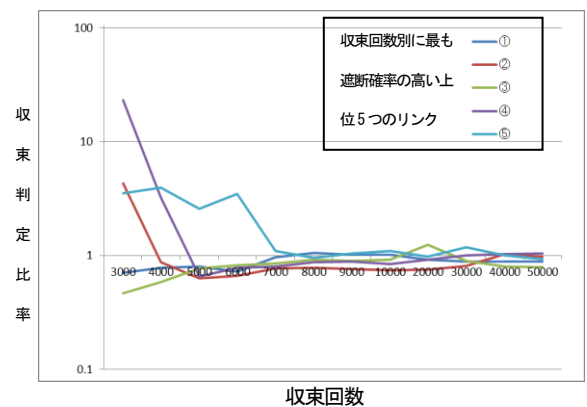


図-8 収束回数別の最脆弱5断面の収束判定比率 case1

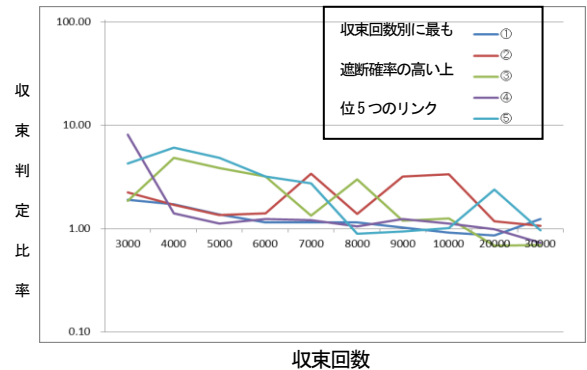


図-9 収束回数別の最脆弱5断面の収束判定比率 case2

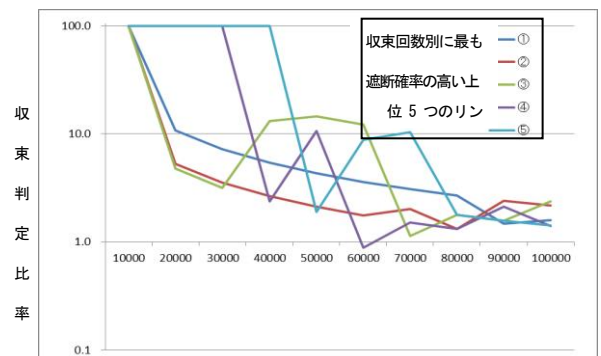


図-10 収束回数別の最脆弱5断面の収束判定比率 case3

3) 収束回数判定方法の提案

上記分析結果を踏まえて、以下のような収束判定を実施し、基準値に達するまでモンテカルロシミュレーションを繰り返すことが必要である。また、収束判定となる基準値については、任意に設定することとなる。

- ① OD間の連結確率の判定
 - ・収束回数ごとの連結確率の差が、基準値以下。
例(4000回目連結確率－5000回目連結確率)
<基準値
- ② 遮断確率の上位n個の最脆弱断面の判定
 - ・上位n個までの断面の収束判定比率が、すべて基準値を下回る

(6) 遮断確率の厳密解の算出

選定されたn個の最脆弱断面を構成するリンクはOD間を結ぶ並列リンクとなることから、選定された最脆弱断面の遮断確率は、下式で厳密解を算出することが可能となる。

$$S(r) = E \left[\prod_{a \in K} (1 - x_a) \right] \quad (4)$$

また、最脆弱リンクはすべての遮断断面を構成するリンクの中で、最も出現頻度の高いリンクとして選定できる。

5. モデル地域における適用検討

(1) 評価の概要

地域の道路ネットワークを連結信頼性の視点で評価するためには、一般的には、図-11のフローで検討することが必要となる。まず、連結信頼性の低い都市間を選定し、その原因となっている最脆弱断面、最脆弱リンクを選定し、その対策案を策定し、その改善効果を確認するフローとなる。

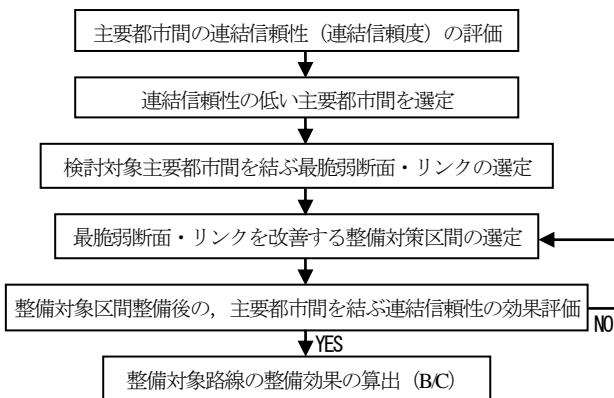


図-11 連結信頼性評価の検討フロー

(2) 対象地域と前提条件

検討対象地域として、盛岡市～釜石間の連結信頼性の評価を実施する。平成23年3月に開通した釜石山田道路を未整備とした現況ネットワークで連結信頼性の評価を実施する。

各区分別の橋梁・トンネル等の道路構造の頑丈性や、災害の発生強度によって、本来、各リンクの信頼度は異なる。ここでは簡便的に、単位延長当たりのリンク信頼度 r を固定とし、各リンク（リンク長 L ）の連結信頼度は、 r^L として設定する。また、リンク信頼度 r を 0.97 と仮定し、収束回数を 10 万回とする。

(3) 評価結果

1) 現況ネットワークの評価

現況ネットワークで、盛岡市～釜石間の連結信頼度は、0.85 となる。この時、最脆弱断面は、図-12に示すように釜石市街地に流入する道路を横断する断面が選定される。釜石市街地は、国道45号、国道283号でしかアクセスできない閉鎖した道路網形態であり、この評価結果は、この地域の道路網の特徴を表現している。

また、釜石山田道路に並行する国道45号区間、及び国道283号釜石流入区間等では、上位の最脆弱断面が重複し、ネットワーク連結信頼性上、ネックとなる区間であったことが判明した。つまり、釜石山田道路が震災直前に供用しており、今回の指標に基づく信頼性の観点からも、この区間の整備を優先したことは有効であったと言える。

最脆弱断面の遮断確率を表-3に示しているが、遮断確率の高い順番に概ね脆弱断面が選定されているが、6位、7位、9位では遮断確率の順番が逆転している。このため、本手法で上位の最脆弱断面を選定した後、選定された最脆弱断面の遮断確率の厳密解を算出することで、正確に最脆弱断面を検証することができる。

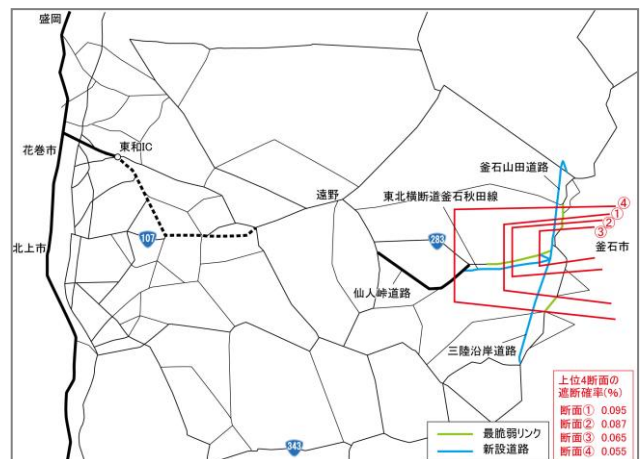


図-12 上位4位の最脆弱断面の遮断確率

表-3 シミュレーションでの上位 10 位の最脆弱断面

	遮断確率 (%)		遮断確率 (%)	
第1位	0.095	①	第6位	0.059 ⑥
第2位	0.087	②	第7位	0.072 ③
第3位	0.065	④	第8位	0.051 ⑨
第4位	0.055	⑦	第9位	0.062 ⑤
第5位	0.054	⑧	第10位	0.049 ⑩

※①～⑩:最終的な遮断確率での順番

表-4 整備前後の盛岡～釜石間の連結確率

	整備前(現況)	整備後
所要時間	158分	143分
連結確率	0.85	0.91

2) 対策後のネットワークの評価

現況ネットワークにおいて遮断断面の重複する最脆弱リンクとして、釜石市街地流入部の3区間が選定される。このため、この3区間に並行して図-12に示す新たな新設道路を対策案として選定できる。これらの区間は、釜石山田道路を含め、自動車専用道路の計画が進められているところである。これらの新設道路は、一般道路に比べて頑丈な道路構造であると想定されるが、ここでは、一般道路と同様にリンク信頼度 r を0.97と仮定する。その結果、盛岡市～釜石市間の連結信頼度は、0.85から0.91に向上する。つまり、ある災害が発生した際、盛岡市～釜石市間に到達できない確率が0.06向上したこととなり、取止め交通による損失額の計算も可能となる。

6. おわりに

震災時等のネットワークの連結信頼性を評価するため、モンテカルロシミュレーションを用い最脆弱断面を選定手法の提案を行った。この手法を用いて、ネットワーク信頼性の視点から、対策すべき道路区間の選定が可能となり、実務での適用が容易となった。

今後、リンク信頼度の設定方法について、その事象に応じた設定が必要となるが、当面、道路種別にリンク信頼度を一律に与えることで、全体ネットワークとして網構成の評価について活用することも可能であろう。また、連結信頼度の改善効果から便益を算出することも可能であり、災害時の取止め時間原単位等の研究と合わせて実用化の検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 相沢圭俊, 金子雄一郎: 都市間交通ネットワークの脆弱性評価指標の比較検討, 土木計画学研究・講演集 Vol.45,2012
- 2) 原田剛志, 倉内文孝, 高木朗義: 道路ネットワークの接続脆弱性評価に基づくリダンダンシーの経済価値の計量化手法の検討, 土木計画学研究・講演集 Vol.45,2012
- 3) 若林拓史: 「道路網の信頼性解析に関する基礎的研究」, 学位論文, 1989.12
- 4) 飯田恭敬, 若林拓史, 吉木務: 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, pp.3-13, 1988.
- 5) 中川真治, 若林拓史, 飯田恭敬: n 番目最短経路探索を用いた簡便な道路網信頼性解析法とその交通管理運用策への適用, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.861-868, 1996.
- 6) 原田慎也, 栄徳洋平, 戸根智弘, 三木智, 若林拓史: 道路の連結信頼性の実用的な評価方法の提案, 土木学会論文集D3 (土木計画学) Vol.69, No.5, I_67-I_74, 2013.
- 7) 瀬戸裕美子, 倉内文孝, 宇野伸宏: 脆弱性の概念を用いた道路網接続性評価に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, CD-ROM, 2007
- 8) 飯田恭祐, 栄徳洋平: 道路ネットワーク評価方法、道路ネットワーク評価装置、プログラム、並びに情報記録媒体 特許第 5697768 号 平成 27 年 2 月 20 日

(2015. 4. 24 受付)

METHOD TO SELECT THE MOST CRITICAL SECTION FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF THE ROAD NETWORK

Yohei EITOKU, Yugi YOKOI and Asashi ISHIKURA and Yasunori IIDA

In this paper, the method to select the most critical section is proposed to form a highly reliable road network. Specifically, 3 methods are proposed. The first is the method to select the most critical section using the Monte Carlo simulation. The second is the method to judge the convergent number of times to secure the reliability of the solution. The third is the method to calculate exact solution of an insulation probability.

In addition, we estimate the reliability evaluation of the road network for Iwate Prefecture, and verified the applicability in practice.