

自然災害による孤立集落発生防止のための リンク信頼度推定法 ～岐阜県飛騨地方を対象として～

藤田衛¹・若林拓史²・長江貴弘³

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: 153781005@ccalumni.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@meijo-u.ac.jp

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)
E-mail: 133781501@ccalumni.meijo-u.ac.jp

我が国は、災害などによって度々道路網が遮断され、これにより中山間地域からの外部アクセスが途絶し、孤立集落が発生しやすい。より信頼性の高いネットワークを構築することで、災害発生時の孤立集落の発生を防止できる。本研究では、より強靱なネットワークを構築する方法を考察する。道路ネットワークの信頼性向上を図るには、重要度評価が必要で、重要度評価を行うには道路網のノード間信頼度の計量化が必要である。計量化にあたり各リンクの信頼度を得る必要があるが、現状では各リンクの信頼度を推定する方法は確立していないか、データの入手に大きな制約がある。このため、本研究では岐阜県飛騨地方での斜面崩壊データをもとに、リンク信頼度を推定する方法を3種類提案し、実ネットワークでのリンク信頼度を計算し比較考察する。

Key Words : highway network reliability, national resilience, slope failure

1. はじめに

近年、我が国では、震災や豪雨災害、火山噴火などの被災を契機に「国土強靱化」¹⁾が求められており、それは道路網についても同様である。道路網は、豪雨などが引き起こす土砂災害等で、山間部の一部が通行不能になる場合がしばしばあり、中山間地域に人々や物の往来ができなくなる「孤立集落」が発生する。孤立集落は地上からのアクセス手段が一切途絶するため、災害時の緊急車両の通行にも大きな支障をきたし、一分一秒を争う人命救助という視点で見ると、きわめて重大な問題となる。そのような事態を防止すべく、重要とされる道路網を事前に把握し、効率的に強靱化する方法が鍵である。そのためには、対象となる経路の評価と選択が必要である。

どの経路を強化するのが望ましいか評価・判断するための客観的な基準を与えるには重要度評価²⁾と呼ばれている指標がある。重要度評価に関しては若林・長江³⁾によって研究が進められているが、これは重要度評価やその指標の特性分析に重点をおいた研究であるため、リンク信頼度の値を与件として与えており、現実的なリン

ク信頼度の与え方を課題としている。また、将来的には実ネットワークでの重要度評価に適用するため、リンク信頼度の推定方法を確立する必要がある。

したがって、本論文では連結信頼性評価や重要度評価の前段階として、リンク信頼度の推定に重点を置き、その推定法を3種類提案する。また、それらを用いて岐阜県飛騨地方の斜面崩壊確率から実在区間のリンク信頼度を算出し、それを比較・分析する。

以下、本論文の構成を述べる。2.では既存のリンク信頼度推定を取り上げた研究をレビューし、それらの位置づけや問題点を略述する。3.ではリンク信頼度を推定する方法論を紹介し、岐阜県飛騨地方における斜面崩壊確率を用いて、リンク信頼度の推定を試みる。4.では得られた結果をまとめる。5.では、結果を考察し、本研究で得られた問題点や改善点をまとめ、将来の展望を述べる。

2. リンク信頼度の推定：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おり、連結信頼性とその重要度評価については長江らによって検討されてきた。しかし、重要度評価の研究における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、簡単のためリンク信頼度を与件として与えていた。そのため、実在するネットワークでの検証が進んでおらず、重要度評価をより実用性のあるものとするため、本研究では重要度評価の算出に十分用いることのできるリンク信頼度の推定方法を提案する。

リンク信頼度推定を扱った論文は多くないが、その事例の1つとして、高山⁴⁾による北陸地方の異常気象時における道路網の連結性を評価した連結性能評価法がある。これは災害時における道路網の連結性を対象として、全点間信頼度を近似計算する解法を提案し、奥能登道路網に適用しているものである。

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。

- (1) まず、最終的な目標をノード間信頼度が必要要件を満たしているかどうか、とする。
 - (2) この計算方法が重要度評価である。
 - (3) (1)(2)を実行するには、リンク信頼度とノード間信頼度の推定法が必要である。ノード間信頼度および重要度評価法は、若林・長江ら³⁾による方法を用いることができるものとする。
 - (4) 結局、課題となるのはリンク信頼度の推定法である。
- 本研究では、岐阜県飛騨地方の斜面崩壊確率をもとに、リンク信頼度を推定するものである。

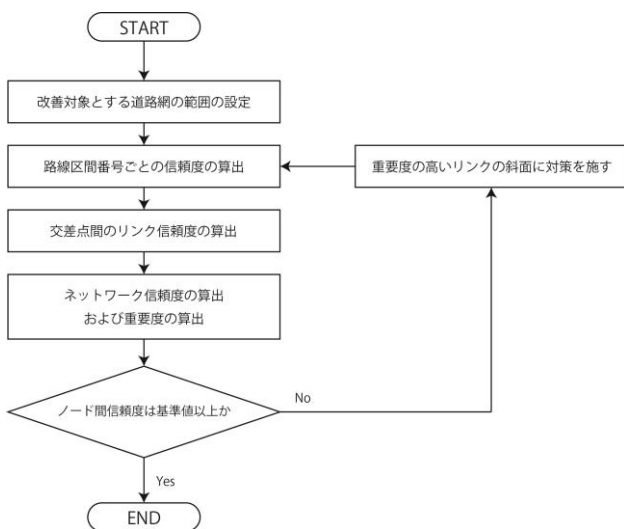


図-1 斜面崩壊確率を基とする重要度評価のフロー

本研究では、通行可能確率を算出して重要度評価に使用できるように、実際の斜面崩壊確率データを用いて、

リンクの年間斜面崩壊確率を算出し、それを通行止め確率としてリンク信頼度を推定する。

3. 岐阜県飛騨地方における信頼度推定の試み

(1) 斜面崩壊危険性データについて

岐阜大学の本城らおよび岐阜県建土部によって作成された、岐阜県飛騨地方の一般国道、及び県道、主要地方道を含めた2784箇所⁵⁾の斜面崩壊データ⁶⁾（および謝辞参照）を基に推定を進める。また、それらの崩壊箇所を岐阜県飛騨地方にプロットしたネットワークマップも用いる。

(2) リンク信頼度推定の方法

本研究では、リンク信頼度推定法として3種類の方法を試みる。

- a) 斜面崩壊（落石発生）が独立で生じる場合、
- b) 斜面崩壊が従属的に生じる場合、
- c) a)に基づきリンク信頼度をより簡略な方法で与える場合、

の3種類である。これらの3種類のリンク信頼度推定によってどの程度の差異が生じるか、生じないのであればその理由、生じるのであればその理由を考察する。

a) 斜面崩壊が独立で生じる場合（方法1）

道路法面において、斜面崩壊が発生した箇所は直ちに通行止めになると仮定する。さらに、1つのリンク上でのそれぞれの斜面崩壊が直列システムでかつ、斜面崩壊が独立事象であると仮定する。すると、図-2のように考えることが可能で、リンク信頼度は式(1)のように算出できる。リンク a 上で1箇所でも斜面崩壊が発生しない確率、すなわち通行可能確率をリンク信頼度 r_a とする。

$$r_a = (1 - R^{a_1}) (1 - R^{a_2}) (1 - R^{a_3}) \dots (1 - R^{a_n}) \quad (1)$$

このとき R^{a_n} はリンク a 上に存在する n 番目の斜面崩壊確率として表すことができる。これは高木ら⁵⁾、本城ら⁶⁾による岐阜県飛騨圏域を対象とした道路斜面のリスクマネジメント論文にも記されている。



図-2 直列システムにおける独立故障

b) 斜面崩壊が従属的に生じる場合（方法2）

次に、大地震などによって複数の斜面崩壊箇所が従属

的に（同時に）崩壊する場合を考える。従属故障には、大きく分けて共通原因従属故障とカスケード型従属故障がある⁷⁾が、本ケースは前者に相当する。

直列システムの場合は、以下のように考える。

$$r_a |_{independence} = (1 - R^{a_1})(1 - R^{a_2}) \dots (1 - R^{a_m})$$

$$< 1 - \text{Max}\{R^{a_i}\} \approx r_a |_{dependence} \quad (2)$$

が成立し、 R^{a_i} の値がどんな数値であっても（独立故障時の信頼性）<（従属故障時の信頼性）が成立する。並列システムの場合は、（独立故障時の信頼性）>（従属故障時の信頼性）となることと対照的である。

別の考え方として、故障箇所が2箇所するとき、 r_a を一般的に表現すると、

$$r_a = (1 - R^{a_1})^{(1-\rho/2)}(1 - R^{a_2})^{(1-\rho/2)} \quad (3)$$

と表すことができる。ここに ρ は、相関係数である。このとき独立故障時は $\rho=0$ 、従属故障時は $\rho=1$ となり、 a_1 と a_2 が独立の場合、

$$(1 - R^{a_1})^{(1-\rho/2)}(1 - R^{a_2})^{(1-\rho/2)} = (1 - R^{a_1})(1 - R^{a_2}) \quad (4a)$$

となり、これは独立の式と一致する。

完全従属の場合は $\rho=1$ で、特に $R^{a_1} = R^{a_2} = R$ の場合には、

$$(1 - R^{a_1})^{(1-1/2)}(1 - R^{a_2})^{(1-1/2)}$$

$$= (1 - R)^{(1-1/2)}(1 - R)^{(1-1/2)} \quad (4b)$$

$$= (1 - R)$$

となり、2ユニットの直列表現が1ユニットの直列表現となることで、従属性の表現ができる。したがって、直列システムの従属故障による信頼性は、故障率（信頼度）がどんな値であっても、独立による信頼度よりも大きくなる。そこで、本研究では従属故障を簡略的に表現する方法として、リンク内での最も大きい斜面崩壊確率を、そのリンクの故障率、すなわち通行不可能率として与える方法（式(2)による方法）を用いることとする。

c) 斜面崩壊を簡略に与える場合（方法3）

小規模な斜面崩壊など、生じる人的損失（＝通行する車輛に落石が生じ、死亡、怪我、物損を被る被害額）が0であれば⁹⁾、その対象区間に関しては通行可能であると仮定し、当該区間の通行可能確率を1.0として与える方法である。

(3) 岐阜県飛騨地方の実ネットワークへの適用例

今回は、岐阜県飛騨地方を対象とした実ネットワークから、斜面崩壊確率の与えられている108本のリンクを抽出し、合計で2784箇所の年間斜面崩壊確率より前述した方法1～方法3を用いてリンク信頼度を算出した。表-1

に示すように1リンクにおける斜面崩壊箇所は最大で171箇所平均で25.8箇所である。

表-1 1リンクあたりの斜面崩壊箇所数

| | | |
|-------------------------|----|------|
| 1リンクあたりの 斜面崩壊箇所数(箇所) | 最大 | 171 |
| | 最小 | 1 |
| | 平均 | 25.8 |
| | 合計 | 2784 |

4. 計算結果

(1) リンク信頼度の算出

表-2～表-4は各計算結果を各方法1～3ごとに示したものである。独立故障を想定した方法1では、最も危険度の高いリンクの信頼度が約0.46となり、これは年間の半数近い日数で通行ができないことを意味する。しかし、ここで与えられた斜面崩壊確率は、人的な損失が生じていない斜面崩壊も含むため実際は通行可能であり、方法3による結果では年間を通してリンク信頼度は約1.0となる。同様に、方法1で著しく低い信頼度を示している他のリンクも、方法3では1.0ないし、それに近きわめて高い信頼度を示す。したがって方法1で2リンクだった1.0は、方法3では27リンクに増大した。一方で、人的損失の生じた崩壊箇所を含む84リンクでは信頼度の変化は少なく、方法1で示した値に準ずる信頼性となった。よって、局所的に大幅な向上はあるものの、ネットワーク全体で大幅な平均値の上昇はない。また、特に低い値を示したリンクであるが、斜面崩壊箇所が171箇所ときわめて多く、仮に一箇所の確率を0.999で与えるとリンク信頼度は0.842を示すことから、これは独立故障における計算特性に準ずるものであるといえる。

従属故障を表現した方法2（表-3）では、前述の通り0.98を上回る最小値をとり、分散の度合いも極端に小さい。これは独立故障とは異なり、リンク内で最も高い一箇所の故障確率を与えるものであるため、そのような結果となる。また、斜面崩壊箇所の少ないリンクでは、独立故障時とデータを共有するため、際立った変化はなく、1.0を示すリンク数も2本と、同様の結果となった。また、それぞれで求められた信頼度をグラフ上に表したものが図-3である。方法1と方法3では多くのリンクが信頼性を共有しており、山の形状が酷似している。

表-2 独立故障によって求めた信頼度 (方法1)

| | |
|----------|-------------|
| 平均 | 0.900570547 |
| 中央値 | 0.945432247 |
| 最頻値 | 1.0 |
| 標準偏差 | 0.110639711 |
| 分散 | 0.012241146 |
| 最小 | 0.464040628 |
| 最大(リンク数) | 1.0(2) |
| リンク数 | 108 |

表-3 従属故障によって求めた信頼度 (方法2)

| | |
|----------|-------------|
| 平均 | 0.992099357 |
| 中央値 | 0.991194855 |
| 最頻値 | 0.988359956 |
| 標準偏差 | 0.003121618 |
| 分散 | 0.000009745 |
| 最小 | 0.98756844 |
| 最大(リンク数) | 1.0(2) |
| リンク数 | 108 |

表-4 簡略計算法によって求めた信頼度 (方法3)

| | |
|----------|-------------|
| 平均 | 0.918405069 |
| 中央値 | 0.963508475 |
| 最頻値 | 1.0 |
| 標準偏差 | 0.105483417 |
| 分散 | 0.011126751 |
| 最小 | 0.580240862 |
| 最大(リンク数) | 1.0(27) |
| リンク数 | 108 |

(2) リンク信頼度の可視化

次に、信頼度を階級別で色分けし、地図上に示した。ここで、図-3は独立故障(方法1)によって求めたものであり、図-4は従属故障(方法2)、図-5は簡略に与える手法(方法3)である。前述のとおり、方法1および方法3ではリンク信頼度の最小値が50%前後であるのに対し、方法2では98%を上回る最小値を示し、分散がきわめて少ない。よって、個別のリンク信頼度がネットワーク内において、どの位置づけになっているかを可視化するために、25パーセンタイルの階級区分とし、信頼度の下位25パーセンタイルがマゼンタで、それから上位に向かうにつれ、オレンジ、グリーン、シアンで示した。なお、斜面崩壊確率の与えられていないリンクは灰色で示している。灰色のリンクに関しては、国道41号線や国道256号線、国道267号線等の主要幹線道路が多く含まれることから、これらは信頼度=1.0として与えることができると考えた。信頼度の値には、独立故障と従属故障で大きな開きが見られたが、信頼性の下位に位置するリンク、または上位に位置するリンクには地理的共通点が見られる。山間の県道では平行して新道や高速道路が開通している箇所や、運転者の経路選択行動によって、通行頻度の著しく少ないリンクが下位に位置し、高山市等の市街地や、国道41号線等の幹線道路、他県との県境、および市境においては比較的高水準な信頼性が確認できる。特に北部の岐阜県と富山県の県境付近である、猪谷へ接続するリンクは高山市内から高水準なリンク信頼度を保っており、それは南部や中津川方面でも同様のことがいえる。また、高速道路ICに接続するリンクでも一部を除き、比較的高い信頼性が確保されているといえる。

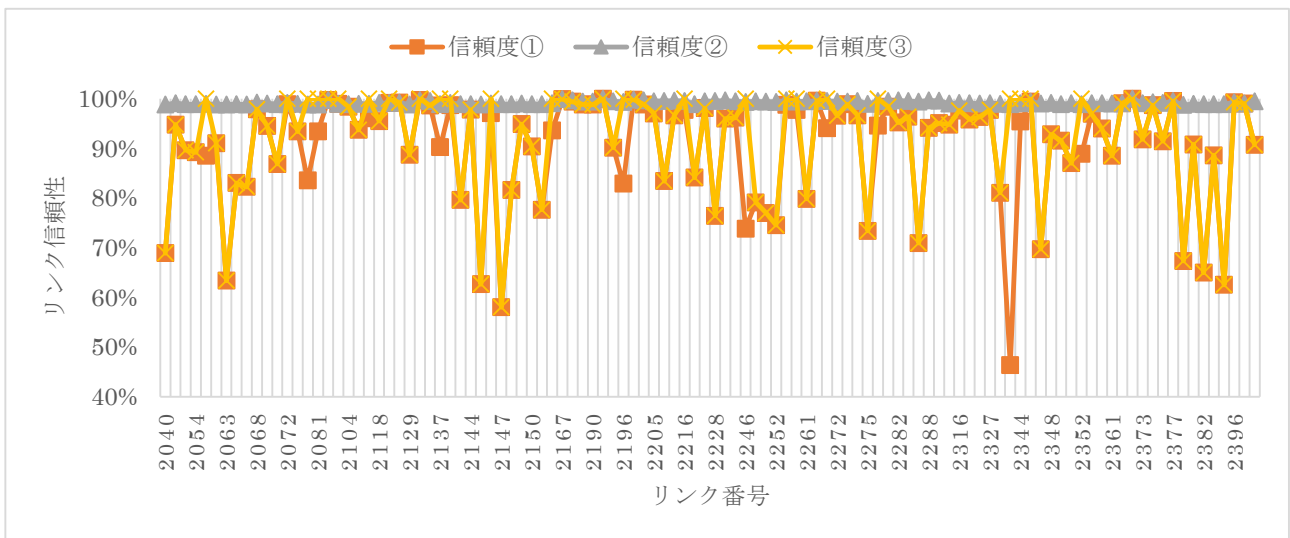


図-3 方法1～方法3の比較

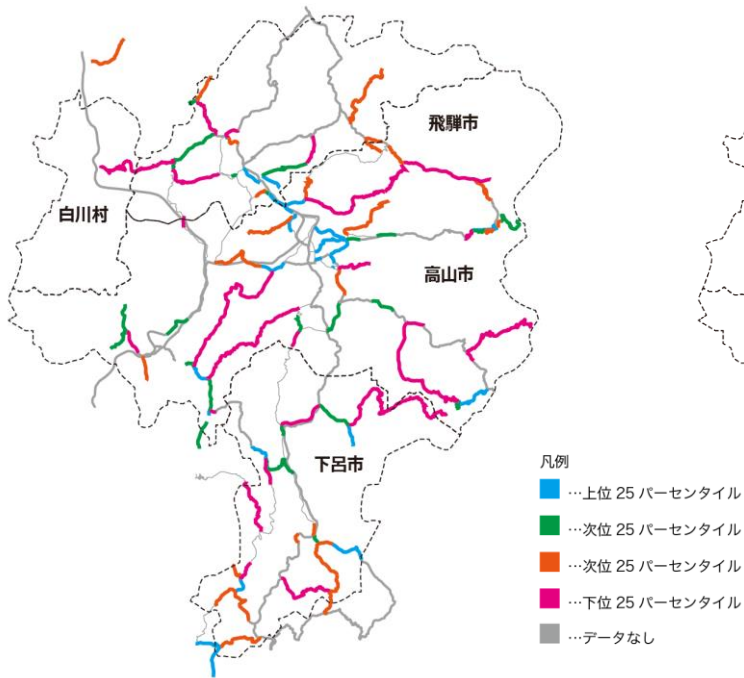


図-4 独立故障によって求めたリンク信頼度



図-6 簡略法によって求めたリンク信頼度

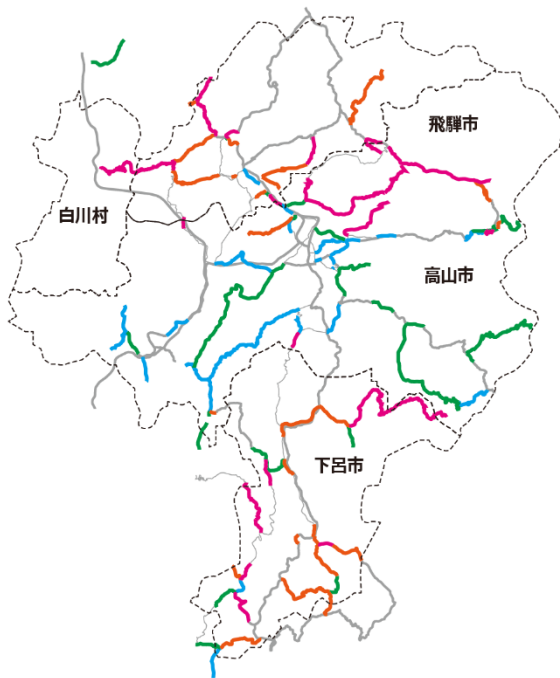


図-5 従属故障によって求めたリンク信頼度

5. まとめ

(1) 考察

リンク信頼度の推定にあたり、システムにおける独立故障と従属故障の関係性と、それぞれの位置づけを確認した。そして、今回は3つの方法で斜面崩壊データを用いて岐阜県飛騨地方のリンク信頼度を算出し、各リンクの比較を行った。得られた結果は、信頼性の高いリンク信頼度もあれば、比較的信頼性の低いリンク信頼度もあったことである。とりわけ、独立故障による推定法では、リンク内に故障箇所が多いほど信頼性の低下が顕著に見られ、斜面崩壊に人的損失を考慮することにより、実際には通行可能なリンクも存在し、それらにおいては大幅な信頼性の改善が確認できた。ネットワーク全体では局所的に低い信頼性がある一方で、中央値は95%付近であり、それぞれが比較的高水準なリンク信頼性を示している。また、従属故障による推定法では、地震等の大規模災害を想定したものであり、通常の状態では高水準なリンク信頼性は当然のことである。岐阜県飛騨地方の主要道路は、異常時に通行止めになるリスクを抱えており、孤立集落発生防止のためにもより高信頼度、つまり強靱性の高い道路網を構築する必要があるといえる。このための方法論の構築が今後の課題である。

計算法の整合性から考えて、落石確率は独立性の仮定の方が望ましいと考えられる。

(2) 今後の課題と展望

まず、今回は従属故障を簡略的に置き換える手法で、従属的落石確率を近似的に表現し、暫定的なリンク信頼度を算出したが、より数理的整合性を兼ね備えた推定法を確立する必要がある。また、本研究で得られたリンク信頼度を基にし、実ネットワーク内での連結信頼性評価や重要度評価に繋がることが期待される。

謝辞：本研究は、岐阜大学と岐阜県が共同で進めている「社会基盤施設アセット総合マネジメント」プロジェクトのデータを提供いただくことで成り立っています。斜面崩壊の落石確率データは、本城勇介岐阜大学名誉教授らのグループ⁶⁾による研究、高木朗義岐阜大学教授らのグループ⁷⁾による研究です。データをご提供いただいた岐阜大学および岐阜県建土部にはここに記して感謝申し上げます。また、倉内文孝岐阜大学教授には、落石確率データの説明やGISでの展開でご助言ならびにご教示を賜りました。ここに記して、心から感謝の意を表します。

また、本研究はJSPS科研費（基礎研究（c）, 課題番号：26420522）の助成を受けたものです。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 内閣官房国土強靱化推進室：『国土強靱化とは ～強くて、しなやかなニッポンへ～』, http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/kokudo_pamphlet.pdf [2016/04/21 accessed].
- 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) 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.
- 4) 高山純一：異常気象時における道路網の連結性能評価法, 土木計画学研究・講演集 12, pp.559-565, 1989.
- 5) 高木朗義・本城勇介・倉内文孝・浅野憲雄・原隆史・沢田和秀・森口周二・北浦康嗣・八嶋厚：岐阜県飛騨圏域を対象とした道路斜面のリスクマネジメント～落石災害を対象として～, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.68, No.2, 109-122, 2012.
- 6) 本城勇介・町田裕樹・森口周二・原隆史・沢田和秀・八嶋厚：岐阜県飛騨圏域を対象とした道路斜面危険度評価, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.67, No.3, 299-309, 2011.
- 7) 松岡猛：確率論的安全性評価における従属故障と外的事象の取り扱い, システム/制御/情報, Vol.36, No.3, pp. 158～170, 1992.

(2016. 7. 31 受付)

**ESTIMATION OF LINK RELIABILITY FOR DEGRADABLE ROAD NETWORK UNDER
NATURAL DISASTER ENVIRONMENT**

Mamoru FUJITA, Hiroshi WAKABAYASHI and Takahiro NAGAE