

ファジィ理論を用いたリンク信頼度の推定法に関する一考察

藤田 衛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 (〒461-8534 愛知県名古屋市東区矢田南4-102-9)

E-mail:173781501@ccmailg.meijo-u.ac.jp

²正会員 名城大学教授 都市情報学部 (〒461-8534 愛知県名古屋市東区矢田南4-102-9)

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

自然災害によって我が国の道路網に深刻な被害が生じた場合、その迅速な復旧・復興が国民生活の安定に繋がり、日々の経済活動の停滞を抑制できる。このような強靱な道路網を構築するためには、道路網の連結信頼性向上が鍵であり、常日頃から脆弱な箇所を特定し、リンクの重要度を評価する必要がある¹。実在する道路網の連結信頼性解析においては、その基本情報となるリンク信頼度の推定が重要となる²。リンク信頼度の推定には、裏付けとなる十分な量の統計データを必要とし、種々の災害ごとに特性が大きく異なることから、その推定は困難である。本研究では、リンク信頼度に『数値のゆれが発生するという意味での』不確定性が存在することとし、リンク信頼度を厳密に規定された値ではなく、あいまいさを含んだ情報をあいまいなまま入力情報とし、あいまいな形で処理をしようとするファジィ理論を用い、それを信頼性解析に組み合わせた方法を考察する。

Key Words : highway network reliability, national resilience, link reliability, Fuzzy logic

1. はじめに

道路網の連結信頼性解析では、入力情報としてリンク信頼度が必要である。リンク信頼度とはある2地点間を単位時間中に円滑な走行移動が保証する確率とされており、リンク信頼度を確率変数と位置づけると、その推定には裏付けとなる十分な量の統計データを得ることが要求される。しかし、その推定には裏付けとなる十分な量の統計データが必要であり、ネットワークが大規模になるにつれ、リンク信頼度を厳密に評価することは非常に困難になる。また、あるリンクにおいて何らかの障害が生起することが、きわめて稀な事象の確率、もしくは一度もそれが生起していないリンクの信頼性を得るためには、そのデータを蓄積することに、莫大な時間を要し、その時間遅れは避けられない。したがって、事前対策として、これらリンク信頼度を事前に確定値として与えることには困難があると考えられる。こうした場合、すべてのリンク信頼度を定量的に捉えることが難しくなり、ベイズ法やあいまい事象を取り扱うファジィ論理など、定性的、質的な解析や技術的、主観的判断を取り入れざるを得なくなる。

一方、リンク信頼度の推定の困難性とは別に、現実の道路網の対災害脆弱性を克服し、レジリエンス（強靱性）

の強化が要請されている。上述のように、リンク信頼度推定には、交通量データとともに長期的なデータが蓄積されている地域と中山間地域のように十分なデータが蓄積されていない地域がある。後者の地域においては、リンク信頼度の推定には不確定性が伴う。しかし、このような地域に対して強靱化対策や、合理的メンテナンス計画（アセットマネジメント）を行うことは社会的・地域的要請であり、多少の不確定性を包含したままシステムの評価や信頼性向上計画を実施することが必要となってくる。

このようにリンク信頼度の推定は、統計的にデータが不十分な状況で行わなければならないという状況にある。これは、未だに壊れていない部品・製品・システムの信頼度を推定する問題に通ずる課題である。

一方、技術者による統計的判断、技術的判断に加えて、自然環境等を考慮した技術的・人間的判断を、その人間的判断のあいまいさを含んだまま維持管理計画・メンテナンス計画等へ利用することができれば有用であると考えられる。本研究では、上述に合致した方法として、ファジィ理論を用いたリンク信頼度推定法を構築して、その有用性と実用性を検討するものである。

リンク信頼度の推定が自然環境の種類により大きく異なり、中には非常に困難であることを前論文³⁾で述べた。地震災害など多くの不確定要素を含んだ自然災害を想定した場合は、その発生時期だけでなく、地震規模、伝播方向などによってリンクに与える影響は大きく異なり、リンク信頼度の推定には困難が伴う。一般に、地震予知とは、「場所」、「大きさ」、「時期」の3要素を、ある程度狭い範囲で事前に指定することが必要とされており、前兆と思われる現象も、地震発生前に前兆である可能性が広く認められた例はほとんどないとされている。また、地震の長期的な予測では、過去の地震活動に基づいて対象地域の地震活動の特徴（最大地震規模、発生間隔、最終発生年代など）を求める必要があり、これはG-R則が成り立つといわれている。しかし、単純なG-R則では、マグニチュードが1増えると発生回数はほぼ1/10になり、最大規模の地震は発生頻度が非常に低いため、その予測は大きな不確定性を伴うことになる。また、震源メカニズムや破壊伝播方向、伝播経路における媒質（速度、減衰構造）の不均質性、地盤の不整形性や入射角などによる地震動強さの違いも生じるため、こうした挙動の不確定性を含んだ場合、リンク信頼度の厳密解を求めるためには、確率的地震評価、地震危険度解析、断層モデル、地震動のスペクトル特性等を考慮せねばならず、道路網における信頼性解析において、合理的ではなく主観的確率を取り入れた近似解法の開発が必要である。そこで本研究では、リンク信頼度を厳密に規定された値ではなく、例えば『0.9ぐらい』という表現を用いて、あいまいさを含んだ情報をあいまいなまま入力情報とし、あいまいな形で処理をしようとするファジィ理論を道路網の信頼性解析に適用することを試みる。この手法を用いることで、リンク信頼度にFuzziness表現をし、それぞれのリンク信頼度に一定の『幅』をもたせることで、災害発生による被災を想定したリンク信頼度が表現されると考えられる。

したがって、自然災害など生起確率が極度に低い故障事象や、致命的な信頼性低下をもたらす要因が少ないとされる高規格な道路リンクに対し、技術的・人間的判断を、その人間的判断のあいまいさを含んだままリンク信頼度として推定することを目指す。

2. ファジィ集合とその演算

(1) ファジィ集合とファジィ数

ファジィ集合を数学的に定義すると次のようになる。

全体集合 U におけるファジィ集合 (fuzzy set) A とは、

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1],$$

なるメンバーシップ関数 μ_A によって特性付けられた集合で、値 $\mu_A(u) (\in [0,1])$ は要素 $u (\in U)$ のファジィ集合 A における帰属度 (別名、グレード) を表す。グレード $\mu_A(u)$ は u が集合 A に属する程度を示す。

(2) ファジィ数の演算方法

従来のクリスプ数を対象とした演算は、次に述べる2つの方法でファジィ数にも作用させることが可能となる。

a) 拡張原理による方法

$$f \text{ を } U \times V \rightarrow W \text{ なる2項演算* } (f(u, v) = u * v \text{ とおく})$$

とし、 A, B をそれぞれ U, V におけるファジィ数とする。 $u (\in A)$ のグレードを $\mu_A(u)$ 、 $v (\in B)$ のグレードを $\mu_B(v)$ とすると、2項演算*は A, B に拡張定義され、演算結果は、

$$A * B = \sum \{ \mu_A(u) \wedge \mu_B(v) \} / (u, v),$$

で与えられるファジィ数である。これを拡張原理という。 \wedge はminを意味している。

b) α -レベル集合による方法

ファジィ数 A の α -レベル集合とは、

$$A_\alpha = \{ u \mid \mu_A(u) \geq \alpha \}, \quad (0 < \alpha \leq 1),$$

なるクリスプ集合である。分解定理によってファジィ数と α -レベル集合を結びつけることが可能となる。分解定理とは次のように表せる。

$$A = \bigcup_\alpha A_\alpha, \quad (0 < \alpha \leq 1),$$

分解定理によってファジィ集合をクリスプ集合である α -レベル集合に分解すること、逆に α -レベル集合をファジィ集合に還元することが可能となる。したがって、各レベルごとに演算*を行い、その結果を重ね合わせれば、ファジィ数の演算結果を得ることができる。

3. 岐阜県中山間地域における試算

本章では実ネットワークを用い、リンク信頼度をファジィ数で与えた場合のノード間信頼度を算出する。

(1) 対象エリア

主要な幹線道路を2路線以上含み、一部に極端な通行

困難リンクを含むこと、おおよそ30km四方に限定し、ODに都市部を含むことなどを留意し、岐阜県飛騨地方の実ネットワークから9箇所のノード及び12本のリンク（田の字型ネットワーク）を選択し、猪谷（富山県富山市）から高山（岐阜県高山市）をODとし算出を行う。

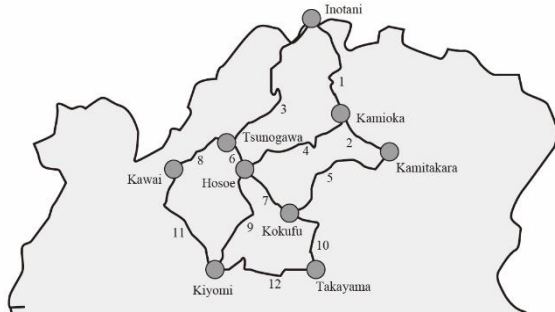


図-1 対象としたネットワーク

(2)リンク信頼度の設定

ここでは岐阜大学の高木ら⁴⁾本城ら⁵⁾および岐阜県県土整備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箇所の斜面崩壊データ^{12),13)}を基にリンク信頼度の推定を進める。

この斜面崩壊データは、2004年度から2008年度までの5年間に道路面に到達した落石履歴データである。このデータは、発生年・発生箇所（キロポスト）・落石高（m）・落石径（m）・落石個数（個）等の他に、安定度調査票（＝1996年度に実施された道路防災点検において専門家による各種点検対象項目の評価の結果、詳細な調査を行った道路斜面の点検結果を記述したもの）の管理番号が記述されている。本研究では、事故データについては「落石・崩壊」と「岩石崩壊」を区別せずに集計し、処理した。

表3.1に示すように1リンクでの最大斜面崩壊箇所は171箇所であり平均で25.8箇所である。

表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

(2)メンバーシップ関数の設定

各斜面崩壊確率を一様にして $A'_{0.9}=0.03$ としたファジィ数を設定する。また、ファジィ数の演算は α レベル集合を用いて行う。この方法は、演算の入力変数の α レベル集合から演算結果のグレード α に対応する値を求める方法である。本研究では、ファジィ数であるリンク信頼度

の α レベル集合を用いて、各レベルごとにODにおけるノード間信頼度を算出し、得られた結果（信頼度の近似値の α レベル集合）を重ね合わせることにより、ファジィ数としてのノード間信頼度を求める。

なお、ここでの斜面崩壊確率は、すべて独立で生起するものと仮定し算出を行う。

4. 結果および考察

選出した12本のリンクの斜面崩壊確率ごとにファジィ数を設定し、リンクごとのメンバーシップ関数を示したものが図1である。ここで注目すべきは、一つのリンクに含まれる斜面崩壊箇所の数である。斜面崩壊箇所が多ければ多いほど、その台集合のレンジは極端に大きくなり、この場合、リンク信頼度としての不確定要素が強まっていると考えられる。

また、今回、斜面崩壊データにおける路線管理番号ごとにリンク内をダミーノードで区切り、それぞれを独立として算出したため、路線管理番号が多く割り振られているリンクほど分散が大きくなる結果となった。これは、リンクがより短い区間で区切られることから、それぞれのファジィ数が幾重にも掛け合わされ、 α レベル集合のグレード値が低くなればなるほど、その信頼性に大きな差異が生じるためである。しかし、信頼性推定に必要な詳細な統計データが存在しない区間では、リンクをある一定区間長で区切ることで、その路線の長さを簡易的に表現することができ、そのようなリンクに対しても何らかの信頼度を付与することができる。また、山間部のネットワークに関してはリンク長が長くなればなるほど、そのリンクにおける斜面崩壊のリスクが高まると考えられるため、このようにしてリンク長を簡易的に与えることで、ある種の重み付けが可能となり、リンク長ごとの斜面崩壊確率を表現することが可能であると考えられる。

つまり、統計データのみで算出された信頼性が同一のリンクであっても、その路線長を一定区間で区切り、斜面崩壊確率をファジィ数で与えることで、 α レベル集合の広がりから、それらのリンクを別として捉えることができるため、実ネットワーク分析においてはこの手法は評価できるものである。

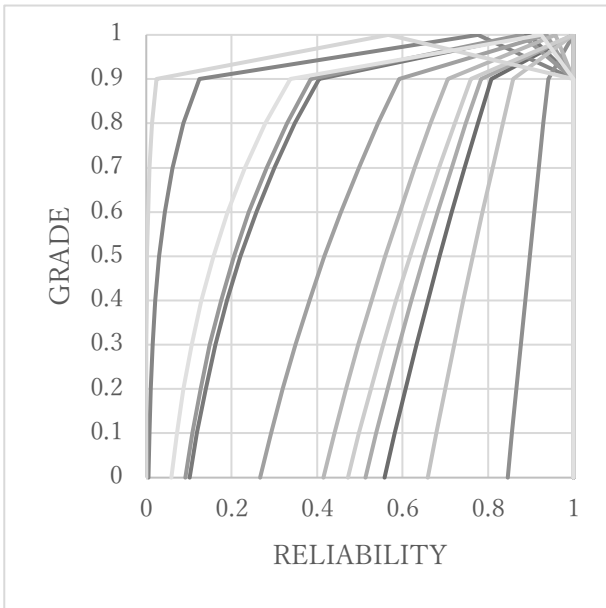


図-2 各リンクにおけるリンク信頼度のメンバーシップ関数

次に、グレード値ごとにノード間信頼度を算出した結果を図に示す。グレード $\alpha=1.0$ においては信頼度 0.9999961をとっており、ファジィ数を与えない場合は極めて高い信頼性を示す結果である。これは選出したリンクの中に、高い信頼性を示す幹線道路が2路線存在するため、このような結果になっている。その一方で、グレード $\alpha=0.0$ において下のレンジは0.129803785となり、グレード $\alpha=0.9$ においても0.6を下回っていることから、リンク信頼度と同様にして、台集合に大きな分散が見られる。

この分散が大きくなるほど、ネットワーク全体が抱える斜面崩壊リスク（非信頼性）が高く、これは、平常時と災害時で大きな差異が生じると捉えることができる。

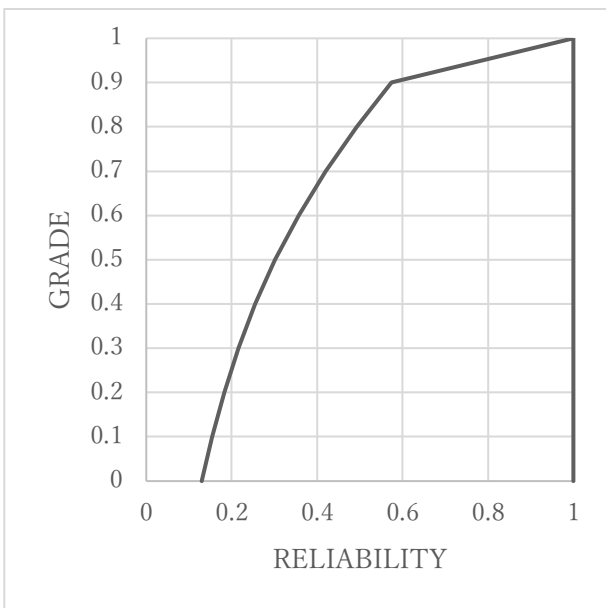


図-3 ノード間信頼度のメンバーシップ関数

5. まとめと課題

(1) リンク信頼度の与え方

本研究ではリンク信頼度を一様にして、 $A'_{0.9}=0.03$ としたファジィ数を与えたが、リンクに含まれる斜面崩壊箇所が増えれば増えるほど、そのリンクの α レベル集合の幅が大きく開いてしまうため、実用的なリンク信頼度を得られなくなる可能性があり、その数値の検証が必要である。ただ、そのようなリンクは斜面崩壊のリスクを多く抱えているとして捉えれば、不確定要素の表現として、ある程度、評価できるものだと捉えることができる。また、リンク内を路線管理番号ごとに区切ってそれぞれの信頼度を算出した。これは、リンクをある一定区間で区切ることで、そのリンク長を簡易的に再現することができるので、データが乏しいリンクに対して信頼度を与えることに寄与するが、本研究で扱ったデータは路線管理番号ごとの区切りが一定距離で定められたものでないため、これを改めて規定する必要がある。

(2) リンク信頼度のメンバーシップ関数の与え方

リンク信頼度のメンバーシップ関数の決定法には合理的な方法論が確立されておらず、統計的に得られるクリップ数としてのリンク信頼度と、そのリンクが存在する環境（地質、地盤、地理的特性等）を踏まえた上で、それをどのように定量化するかが課題である。

謝辞：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。また、名城大学学術研究奨励助成費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) 長江貴弘, 若林拓史：道路網の効率的な連結信頼性向上のための重要度指標の大規模ネットワークの適用例, pp.1-9, 土木計画研究・講演集, 2015.
- 2) 若林拓史：道路網の信頼性解析に関する基礎的研究, pp.11, 1989.
- 3) 藤田衛, 若林拓史：リンク信頼度推定の困難性に関する一考察, 土木計画研究・講演集, No.59, CD-ROM(PDF-No.96.6pages), 2018.
- 4) 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.
- 5) 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.

(2019. 3. 10 受付)

Method for Link Reliability Estimation by Fuzzy Theory

Mamoru FUJITA and Hiroshi WAKABAYASHI