

災害時の通行規制下における道路網の信頼性評価モデル*

Evaluation of Road Network Reliability under Traffic Closure Caused by Natural Disasters

為広哲也**, 朝倉康夫***, 柏谷増男****

by Tamehiro Tetsuya, Asakura Yasuo, Kashiwadani Masuo

1. はじめに

道路網あるいはODペア間の信頼性評価に関する研究は、ネットワークが連結されているか否かを表す連結性（連結確率）と、許容できる所要時間の範囲内でトリップ可能か否かを表す時間信頼性（遅刻確率あるいは到着確率）の両面から行われている。災害時あるいは異常時には連結性、通常時あるいは平常時にはネットワークが機能的に連結網であることを前提に時間信頼性を適用するのが適切であると考えられている。しかし、災害時であっても許容できる時間や迂回距離の範囲でトリップが完結できなければ、交通目的が達成されない場合も少なくない。また、従来の「連結度指標」には必ずしもネットワークの交通処理能力が反映されているとは言えない。そこで本研究では、「許容できる範囲内の交通処理能力を維持した状態での連結性」に着目して、道路ネットワークの災害時の信頼性評価モデルを構築することを目的とする。以下、2ではモデルの枠組みについて述べ、3～5ではそれらの詳細を説明する。

2. 信頼性評価の枠組み

豪雨などによって、土砂崩れなどの災害が発生したり、事前規制が行われたりすると、交通容量が低下したりあるいは全面通行止めになる区間をいくつか含んでいる状態のネットワークになる。このようなネットワークの故障の状態を考慮して、その状態でのネットワークの交通処理能力（たとえば、交通量や所要時間など）の推定を行い、これを用いて信頼性の評価を行う。

そのためには、まず、ネットワークの故障の状態を考慮する必要がある。ネットワーク中にN区間の規制区間があるとする、考えられる通行止めのパターンは全部で 2^N 通り存在する。すべてのパターンを列挙して交通フロー分析/予測を行って交通処理能力を調べれば非常に精度の高い信頼度指標が計算できる。しかし、Nが大きくなるとすべてのパターンについて考えることは困難であり、かつ膨大なコストがかかるため効率的とは言えない。そこで、考えられるすべての通行止めの状態集合の中から部分的に状態ベクトルを抽出して、この部分集合だけについて考えるものとする。ここに、状態ベクトルの要素はネットワークの個々のリンクが通行止めか否かを表す0, 1変数とする。この方法の枠組みを以下に段階的に示す。

【step.1】状態ベクトル空間Xの明確化

考えられるすべての通行止めの状態集合の中から部分的に抽出した状態を状態ベクトル x_s とし、これらの集合により状態ベクトル空間Xの明確化を行う。

【step.2】発生確率 P_s の推定

状態ベクトル空間Xに含まれるそれぞれの状態ベクトル $x_s \in X$ について、発生確率 P_s を推定をする。

【step.3】交通処理能力の推定

それぞれの状態ベクトル x_s に対して後述するいずれかの方法でネットワークの交通フロー分析を行い、 x_s に対するODペアやネットワーク全体の交通処理能力を推定する。

【step.4】稼働/停止関数 $z(\theta, x_s)$ の計算

ネットワークに故障がない状態の下で推定されたODペアあるいはネットワーク全体の交通処理能力を基に、ODペアやネットワーク全体が機能しているか否か判断するための基準 θ をあらかじめ設定しておく。この基準 θ に対して、状態ベクトル x_s の下での稼働/停止関数 $z(\theta, x_s)$ を求める。

【step.5】信頼性の計算

*Keywords : 道路網信頼性, ネットワーク交通流

**学生員 愛媛大学大学院 土木海洋工学専攻

***正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部
土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町)

****正会員 工博 愛媛大学教授 工学部
土木海洋工学科

信頼性を「ある基準に対して、ODペアあるいはネットワーク全体が機能している確率」と定義する。基準 θ に対する信頼性を $R(\theta)$ として、これを次式より求める。

$$R(\theta) = \sum_j p_j \cdot z(\theta, x_j) \quad (1)$$

ここに述べた枠組みは、Du and Nicholson (1993)¹⁴⁾によって提案されたものを援用しており、状態ベクトルの発生確率の大きい順に交通フロー分析を行えばより簡易に $R(\theta)$ の値を求めることができることが既にわかっている。

3. 状態ベクトル空間 X の明確化、および状態ベクトル x_j の発生確率 p_j の推定

step 1における状態ベクトル空間 X の明確化については次のように考える。考えられるすべての通行止めの状態集合の中から発生確率の高い状態だけを抽出して、この部分集合を状態ベクトル空間 X とする。

一般に、過去に実際に生じた通行止めの状態は、考えられるすべての状態集合の中で発生確率が高い状態であると考えられる。そこで、過去の通行止めのデータから得られる1組の通行止めのパターンを1つの状態ベクトルとし、それらの全体を状態ベクトル空間 X とする。そして、それぞれの状態ベクトル x_j の発生確率 p_j は、過去の通行止めのデータにおいてその状態の発生回数より推定する。

将来の道路網の信頼性評価の場合には、このような方法で状態ベクトル空間を設定したり、その発生確率を推定するには限界がある。ひとつの代替的な方法は、個々のリンクが通行止めになる確率を与件としたとき、ネットワーク全体で発生しやすい通行止めのパターンを1つの状態ベクトルとすることである。このときは、状態ベクトルの発生確率も同時に求められる。また、実際に災害が発生しなくても道路管理者により事前の通行規制が行われるが、物理的な道路構造の改良などに伴って規制基準が変更されればそのことを個々のリンクの通行止め確率に反映させることができる。これにより、規制基準の変更が信頼度に及ぼす影響が分析できるし、間接的には災害時の信頼度からみた道路整備効果の分析が可能となる。

4. 交通ネットワーク交通流の記述方法

与えられたそれぞれの状態ベクトルに対して、ネッ

トワーク上を流れる交通流を記述するために、次の3つの方法を考える。

(1) OD需要固定型の利用者均衡配分

災害によってネットワークの一部のリンクが欠落している場合にもOD需要は変化せず、また、利用者均配分が成立すると仮定できるなら、最も簡便な方法はOD固定の利用者均衡配分を用いることである。この場合、BPR関数のようなリンクコスト関数を用いることで間接的にリンク容量制約を考慮することはできるが、Davidson関数のようにリンク交通量が容量を越えないような明示的な形でリンク容量制約導入することは難しい。なぜなら、ある状態ベクトルに対してネットワークが非連結であれば配分計算そのものが不可能となるし、仮に連結網であってもOD需要を固定しているため、リンク交通量が容量を越えないという条件を満足する実行可能解が存在しないこともあるからである。一方、リンク容量制約を付けなければ、利用可能な経路が限定されたときには、特定のリンクの交通量が容量を著しく上まわることも生じるであろう。また、OD需要を固定することにより、災害時やその復旧時にしばしば見られるトリップ数自体の減少（トリップメーカーの出控え）を考慮することができないという問題もある。しかしながら、先に限定した状態ベクトルの集合を調べて、少なくともネットワークが非連結になるような通行止めが生じることはなく、また、需要の水準が容量に比べてそれほど多くない場合には、明示的なリンク容量制約のないOD固定の均衡配分を用いても差し支えがないと考えられる。

(2) OD需要変動型の利用者均衡

リンク容量制約を明示的に考慮することと、ネットワークのサービスレベルの低下によるOD需要の減少の両者を同時に考慮するためには、OD需要変動型の利用者均衡配分においてリンク交通量が容量を越えることのないリンクコスト関数（たとえば、Davidson関数）を用いればよい。

平常時からの需要の減少を考慮するためには、需要関数としてたとえば、

$$D_{ij}(t_{ij}) = D_{ij}^0 \exp \left(-\gamma (t_{ij} - t_{ij}^0) \right) \quad (2)$$

t_{ij} : OD間の所要時間

t_{ij}^0 : 平常時のOD間所要時間（既知）

D_{ij}^0 : 平常時のOD需要（既知）

γ : パラメータ

を考えればよい。このとき、フローの保存条件は、

$$\sum_k h_{ijk} = D_{ij}^0 - \Delta D_{ij} \quad (3)$$

h_{ijk} : ODペア ij 間のパス k のフロー

ΔD_{ij} : 平常時からOD交通流の減少量
(Hyper-Network上の流れ)

と表わすことができる。ODペア ij 間が非連結であれば $\Delta D_{ij} = D_{ij}^0$ となり、OD需要は顕在化しないことになるだけで配分計算そのものは可能である。OD需要変動型の配分問題は、Hyper-Networkの考え方によりOD固定の配分に帰着できること(たとえば, Sheffi, 1983²⁾)はよく知られており、リンク容量制約を持つ利用者均衡問題の解法は Daganzo (1977)³⁾により示されている。

(3) 迂回と待機および中止を考慮した配分方法

大規模な法面崩壊のように一部リンクが欠損した状態がある程度長期間継続する場合や、通行止めの形態がパターン化しており利用者がそれを熟知しているような場合には、平常時でなくても(1)、(2)で述べた利用者均衡仮説は妥当性をもつ。

しかし、突発的な通行止めや事前規制のように通行止めの継続時間が長くない場合には、均衡概念は必ずしも適当でない。また、(1)、(2)の配分では、すべての利用者がすべての経路について完全な情報を得ており、その情報を基にして合理的な経路選択を行うという決定論的な選択行動理論である。しかし、実際には、利用者の知覚する所要時間は真の所要時間に対して知覚誤差を含んでいると考えられるため、すべての利用者がすべての経路について一様に完全な情報を得ているとはいえない。さらに、利用者は許容できる時間の範囲内でトリップを完了することができなければそのトリップの目的を達成できない場合が少なくない。このため、利用者は許容できる時間の範囲内でトリップ可能な迂回路がなければ車によるトリップを中止するかも知れない。そこで、以下では、リンクの所要時間がある確率分布で与えられているとして、許容できる所要時間を考慮した利用者の迂回と待機および車によるトリップの中止という選択行動をモデル化した配分を考える。

モデル化に際し、以下の仮定を設ける。

(i) リンク a の所要時間は相互に独立な確率変数である。その期待値と標準偏差をそれぞれ μ_a 、 σ_a で表わ

す。

(ii) 平常時の μ_a 、 σ_a は、あらかじめ与えられており、他のリンクが通行止めでも当該リンクが通行止めでなければその値は変わらない。

(iii) リンク a が通行止めになった場合、所要時間の期待値 μ_a は通行止め時間 d_a と平常時の μ_a の和で表される。 σ_a の値は変わらない。

(iv) ODペア間の最短所要時間が、許容できる範囲内(ある設定された値 m に対して、平常時の所要時間の m 倍以下)であればドライバーはその経路を選択する。そうでなければ、そのODペアのトリップは中止される。

以上の仮定に基づいて、利用者の迂回と待機および車によるトリップの中止を考慮した配分方法を示す。この方法は、OD表を N 分割してそれぞれの繰り返しごとにOD間の最短経路へすべてのOD交通量を流す(あるいは、配分されないOD交通量として処理する)方法である。なお、ODペア ij について1回当たりの配分交通量は $\Delta D_{ij} = D_{ij}^0 / N$ で表わされる。

【Step. 1】リンクの所要時間の期待値の変更

通行止めになったリンクのみについて、その所要時間の期待値を通行止め時間だけ大きくして $\mu_a = \mu_a + d_a$ とする。 $n = 1$ (n : 繰り返し回数)とする。

【Step. 2】リンク所要時間を与える

リンクの数だけ標準正規乱数 $\varepsilon_a \sim N(0, 1)$ を発生させる。これを用いてリンク a の所要時間を $t_a = \mu_a + \varepsilon_a \sigma_a$ で表す。

【Step. 3】最短経路探索

それぞれのODペアについて最短経路を行い、(最短経路上の所要時間) $< m$ (平常時の所要時間) ならば、その経路へ ΔD_{ij} を All-or-Nothing 配分する。そうでないなら、トリップ中止により配分しない。

【Step. 4】フローの集計

配分されなかったフロー、リンクフロー、OD間所要時間を記憶する。

【Step. 5】 $n = N$ ならば終了。そうでなければ、 $n = n + 1$ において Step 2へ。

配分結果により、あるODペアにおいて、トリップメーカーのトリップ中止の数は配分されなかったOD交通量により示され、その影響はリンクフローの減少量によりわかる。また、通行止めリンクを流れたフロ

一は、一時待機して結局そのルートを利用したものとみなす。

5. 稼働/停止関数 $z(\theta, x_s)$ の定義

災害時であっても、ODペアあるいはネットワーク全体が平常時と比較してある程度の交通処理能力を維持していなければそのネットワークは機能しているとは言えない。 $z(\theta, x_s)$ は、ある設定された基準 θ に対して、状態ベクトル x_s の下でそのODペアあるいはネットワーク全体が機能しているか停止しているかを表す関数である。ある状態の下で、ODペアあるいはネットワーク全体がもっている交通処理能力がある基準を満足していれば $z(\theta, x_s) = 1$ （機能している）、それ以外は0（停止している）とする。 θ については、信頼性評価における指標の基準値を表すものであり、ここでは次の2つの信頼性指標を考える。

(1) 交通量の減少率

災害などによる通行規制時には、かなり大きな迂回をしなければ目的地にたどり着けないなどの理由により、トリップの目的によっては、そのトリップを取りやめる出控えなどが生じるであろう。これによるOD交通量の減少が著しく大きい場合、そのネットワークは機能しているとは言えないのではないか。ここでは、災害時における交通量の許容減少率の上限値を設けて、ある状態での交通量の減少率がその範囲内であるか否かの程度を信頼性の指標と考える。すなわち、信頼性とは、「交通量の減少率が許容できる範囲内である確率」と定義する。

あるODペア i, j 間について、平常時のOD交通量 $f_{ij}(x_0)$ に対する状態ベクトル x_s のときのOD交通量 $f_{ij}(x_s)$ の減少率を $y_{ij}(x_s)$ とする。

$$y_{ij}(x_s) = \frac{f_{ij}(x_0) - f_{ij}(x_s)}{f_{ij}(x_0)} \quad (4)$$

ここで、 $0 \leq y_{ij}(x_s) \leq 1$ である。

この減少率が許容できる範囲内であれば、そのODペアは機能しているとし、そうでなければ停止しているとする。ある設定された許容減少率 θ （ $0 < \theta < 1$ ）に対して、あるODペア i, j 間の状態ベクトル x_s の下での稼働/停止関数 $z_{ij}(\theta, x_s)$ を以下のように定義する。

$$z_{ij}(\theta, x_s) = \begin{cases} 1 & \text{if } y_{ij}(x_s) \leq \theta \\ 0 & \text{if } y_{ij}(x_s) > \theta \end{cases} \quad (5)$$

ネットワーク全体についても同様に考える。

(2) 許容できる所要時間の範囲内でのトリップ

先に述べたように、利用者側から見れば災害時であっても許容できる時間の範囲内でトリップを完了することができなければ、そのトリップの目的を達成できない場合が少なくない。あるトリップにおいて、通常のルートが通行規制された場合、その利用者は迂回時の許容できる所要時間の上限を決め、その範囲内でトリップすることを考えるだろう。ここでは、迂回時の許容時間の上限値を設けて、その範囲内でトリップが可能であるか否かの程度を信頼性の指標と考える。すなわち、信頼性とは、「許容できる所要時間の範囲内でトリップを完了することができる確率」と定義する。

あるODペアについて、許容できる所要時間の上限値はそのODペアの平常時の所要時間の m 倍で求められるとする。許容時間の範囲内でトリップを完了できるならばそのODペアは機能しているとし、できなければ停止しているとする。ODペア i, j 間について、状態ベクトル x_s の下での所要時間を $t_{ij}(x_s)$ とすると、設定された m （(1)の θ に相当する）に対して状態 x_s の下でのODペア i, j 間の稼働/停止関数 $z_{ij}(m, x_s)$ を次のように定義する。

$$z_{ij}(m, x_s) = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{t_{ij}(x_s)}{t_{ij}(x_0)} \leq m \\ 0 & \text{if } \frac{t_{ij}(x_s)}{t_{ij}(x_0)} > m \end{cases} \quad (6)$$

$t_{ij}(x_0)$ ：あるODペア i, j 間の平常時の所要時間
ネットワーク全体についても同様に考える。

【参考文献】

- 1) Du, Z.P. and Nicholson A. J. (1993): Degradable Transportation Systems Performance, Sensitivity and Reliability Analysis, Research Report 93-8, Dept. of Civil Eng., University of Canterbury, NZ.
- 2) Sheffi, Y. (1985): Urban Transportation Networks. Prentice-Hall, N.J. pp.146-153.
- 3) Daganzo, C.F. (1997): On the Traffic Assignment Problem with Flow Dependent Costs - I. Transpn. Res. Vol.11, pp.433-437.