【土木計画学研究・講演集 No.18(2) 1995年12月】

交通ネットワークにおける災害時のフローの変化を考慮したODペア間の信頼度の指標 *

A Reliability Measure of an Origin and Destination Pair t on a Deteriorated Transport Network with Variable Flows

藤原健一郎**，朝倉康夫***，柏谷増男****
by Fujiwara Ken-ichiro,Asakura Yasuo,Kashiwadani Masuo

1．はじめに

交通ネットワークの信頼性評価に関する従来の研究は，平常時を対象とするものと，災害時を対象とするものに大別できる．前者は，交通ネットワークは物理的に連結網であり容量低下も生じていないが，交通システムの処理能力に対して需要が過度であるために自然渋滞のようなシステムの機能低下が発生する場合を対象としたものである．信頼性の指標には，所定の時間の範囲内で2点間のトリップが可能である確率といった「時間信頼度」が用いられることが多い．後者は，ネットワークの一部のリンクやノードが物理的に機能しなくなる事象が生起するとして，ネットワークがトポロジカルな意味で連結しているか否かの確率，すなわち，「連結度」を信頼性の指標とすることが多い．この場合，迂回時間や迂回距離が著しく長くなった場合であってもネットワークが構造的に連結していれば，そのネットワークは連結網であるとみなしている．しかし，災害時であっても許容され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，本来の交通目的が達成できない場合が少なくない．

本研究では「許容され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，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．

2．信頼度の指標

(1)信頼度の定義と計算手順

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含んだ状態のネットワークになる．このような状態でのネットワークの交通処理能力（交通量や所要時間）の推定を行い，これを用いて信頼性の評価を行う．

*keywords：ネットワーク交通流，信頼性
**学生員 愛媛大学大学院 土木海洋工学専攻
（〒790松山市文京町，TEL0899-24-7111，FAX0899-23-0672）
***正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部 土木海洋工学科
****正会員 工博 愛媛大学教授 工学部 土木海洋工学科

ODペア間の信頼度を「平常時のネットワーク上での所要時間に対して，許容できる迂回の範囲の所要時間でトリップを完了することができる確率」と定義する．この値は稼働・停止関数の期待値として与えられる．稼働・停止関数とは，あるネットワークの状態のもとでODペアが持っている交通処理能力が許容できる範囲内であるか否かを表す0,1関数のことであり，ODペアが機能しているとき1，停止しているとき0である．従来のOD間の連結度指標は許容できる範囲を極めて大きな正の値としたときのトッリプ可能確率に他ならない．本研究でいう信頼度指標は，以下の手順により近似的に計算できる．

Step.0 初期設定．計算繰り返し回数J=0とおく．

Step.1 発生確率の大きい方から第J番目の状態ベクトルx_Jを抽出する．

Step.2 状態x_Jに対するネットワーク交通流を求める．

Step.3 稼働・停止関数の値を求め，信頼度の上限，下限値を計算する．

Step.4 上，下限値が十分近ければ，上，下限値の平均を信頼度の近似値をして計算終了．そうでなければJ=J+1とおいてStep.1へ．

(2)状態ベクトルとその発生確率

n本のリンクからなる連結されたネットワークを考える．障害はリンクのみで発生し，ノードでは発生しない．障害が発生したリンクは機能を完全に停止して，片側交互通行などで運用されることはないものとする．このとき，ネットワークに含まれるリンクの状態は，状態ベクトル$x=\{x_1,\cdots,x_a,\cdots,x_n\}$で表すことができる．状態ベクトルの要素$x_a$は，リンク$a$が機能しているとき$x_a=1$，機能していないとき$x_a=0$である．すべてのリンクが機能しているとき（平常時）と，ただの1本のリンクも機能していないときの状態ベクトルをそれぞれ$x_0=\{1,\cdots\cdots,1\}$，$x_w=\{0,\cdots\cdots,0\}$で表す．

各リンクの障害発生確率は与件であり，それぞれのリンクごとに障害はランダムに発生し，その確率はリ

ンク間で相互に独立であると仮定する．リンクaが機能している確率を$p_a(a=1,\cdots\cdots,n)$とすると状態ベクトルxの発生確率$P(x)$は次式のように示される．

$$P(x)=\prod_a p_a^{x_a}(1-p_a)^{(1-x_a)} \quad \cdots\cdots(1)$$

発生確率の大きい順番に状態ベクトルを抽出する効率的な方法は，Lam and Liに述べられている．

なお，ネットワークを２次元空間で取り扱うために，リンクの機能停止時間はトリップ長に対して十分長いものとする．なぜならば，機能停止時間がトッリプ長に比べて短ければ，迂回せずに待機することでトリップ運行が可能となる場合を考慮しなくてはならず，ネットワークを時間・空間的に扱う必要が生じるからである．

(3)ネットワーク交通流の推定

災害時においてネットワークの一部の機能停止の状態がある程度長期間にわたって継続する場合は，利用者均衡仮説は妥当性を持つと考えてもよい．そこでネットワークの状態がxであるときに利用者均衡が成立すると仮定し，リンク容量制約付きＯＤ需要変動型利用者均衡モデルを用いて交通流を記述する．以下にその理由を示す．

(a) 災害時の需要の変動を記述できる．

(b) リンク容量を明示的に導入しても実行可能解が存在する．

(c) 特定のリンクのみが利用可能になった場合でもリンク交通量がリンク容量を超えない．

リンク容量制約を明示的に導入するために，リンクパフォーマンス関数としてDavidson関数を用いる．

$$t_a(V_a)=t_a^0\left\{\frac{C_a-(1-J)V_a}{C_a-V_a}\right\} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに，t_a^0：リンクaの自由走行時間，C_a：リンクaの容量，V_a:リンクaの交通量（$V_a<C_a$），J：パラメータ（$0\leqq J\leqq 1$）である．

また平常時からの需要の減少を考慮するために需要関数として次式を用いる．

$$D_{rs}(t_{rs})=D_{rs}^U exp\left\{-\gamma(t_{rs}-t_{rs}^0)\right\} \quad \cdots\cdots(3)$$

ここに，D_{rs}：ＯＤペアrs間の需要，t_{rs}：ＯＤペアrs間の所要時間，t_{rs}^0：ＯＤペアrs間の自由走行による所要時間，D_{rs}^U:ＯＤペアrs間の需要の上限，γ：パラメータである．

ＯＤ需要変動型の配分問題は需要固定型の配分問題に変形できる．ＯＤペア間のトリップの上限値D_{rs}^Uを設定すると，超過需要量は$e_{rs}=D_{rs}^U-D_{rs}$と表される．ネットワークの構造は，実際のネットワークにＯＤペア間の起，終点ノードを直接結ぶ仮想リンクをつけ加えたネットワークになる．超過需要は仮想リンクの交通量となり，この値e_{rs}と顕在化するＯＤ交通量D_{rs}との和はD_{rs}^Uとなるので，図-1に示すように需要固定型配分問題と同様に解くことができる．リンク容量制約を持つ利用者均衡問題の解法はDaganzoにより示されている．

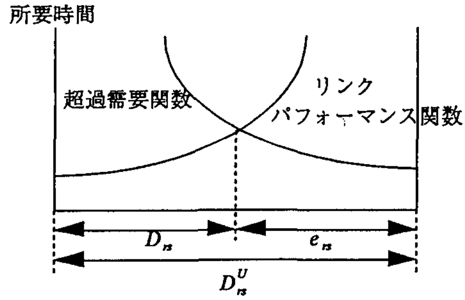

図-1 超過需要関数を用いた均衡フローの記述

(4)稼働・停止関数

平常時ネットワークx_0におけるＯＤペアrs間の均衡所要時間$t_{rs}(x_0)$に対し，状態xなるネットワーク上での均衡所要時間$t_{rs}(x)$が許容できる範囲にあるとき，そのＯＤペアは機能していると考える．ここでは，所要時間の比が別途に与えられた基準値θ以下であれば，そのＯＤペア間は機能しているとみなす．稼働・停止関数は，この関係を(0,1)で記述した関数で次式のように表される．

$$Z_{rs}(\theta,x)=\begin{cases}1 & if \quad t_{rs}(x)/t_{rs}(x_0)\leq\theta \\ 0 & if \quad t_{rs}(x)/t_{rs}(x_0)>\theta\end{cases} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここにθは許容できる迂回の上限に関する基準値（$1 \leqq \theta < \infty$）であり，その値は外生的に与えられるものとする．

(5)信頼度の上，下限値

平常時ネットワーク上での所要時間に対して，許容できる範囲の所要時間でOD間のトリップを完了できる確率が信頼度の定義であった．これは，$t_{rs}(x_0)$に対する$t_{rs}(x)$の比がθ以下である確率に他ならない．その厳密な値は稼働・停止関数の期待値

$$R_{rs}(\theta)=\sum P(x)Z_{rs}(\theta x) \quad \cdots\cdots(5)$$

で与えられる．厳密解を求めるためにはすべての状態ベクトルを抽出しなければならないが，これは大規模ネットワークに対して有効ではない．そこで，発生確率が大きい方から第J番目の状態ベクトルに対する稼働・停止関数の値を用いて信頼度の上限値R_{rs}^Uと下限値R_{rs}^Lを計算し，信頼度を近似することを考える．上，下限値はそれぞれ以下のように計算できる．

$$\begin{aligned} R_{rs,J}^U(\theta) &= \sum_{j=1}^{J} P(x_j)Z_{rs}(\theta x_j) + \left\{1-\sum_{j=1}^{J} P(x_j)\right\} \\ R_{rs,J}^L(\theta) &= \sum_{j=1}^{J} P(x_j)Z_{rs}(\theta x_j) \end{aligned} \quad \cdots\cdots(6)$$

(6)信頼度の近似解と収束判定

第J-1番目，第J番目の状態ベクトルまでを取り出したときの上，下限値をそれぞれ$R_{rs,J-1}^U, R_{rs,J-1}^L, R_{rs,J}^U, R_{rs,J}^L$とすると，$R_{rs,J-1}^U \geq R_{rs,J}^U$，$R_{rs,J-1}^L \leq R_{rs,J}^L$である．またすべての状態ベクトルを取り上げると上，下限値は厳密値に収束することは明らかである．これらより，上，下限値の平均値を信頼度の近似値$R_{rs}(\theta)$とする．すなわち

$$R_{rs}(\theta)=\left\{R_{rs,J}^U(\theta)+R_{rs,J}^L(\theta)\right\}/2 \quad \cdots\cdots(7)$$

収束判定は，上，下限値の差が別途に与えた差以下であるかどうかで判断する．すなわち，

$$R_{rs,J}^U(\theta)-R_{rs,J}^L(\theta) \leq \varepsilon \quad \cdots\cdots(8)$$

ならば，計算を終了する．

ここに述べた枠組みは，Du and Nicholsonによって提案されたものを採用している．

3．OD間の所要時間の確率分布の計算

ネットワークのある状態の生起は確率事象であるから，OD間の所要時間$t_{rs}(x)$もある確率分布に従う．状態xの発生確率が$P(x)$であるので，所要時間が$t_{rs}(x)$となる確率も$P(x)$である．そこで所要時間の確率分布を推定し，その累積確率分布を求めれば，判断基準θをパラメトリックに変化させたときの信頼度の値の変化を簡単に求めることができる．さらに，累積確率分布の逆関数を求めておけば，信頼度をパラメトリックに変化させたときの迂回時間を求めることができる（図-2）．このようにすれば，所要時間を稼働・停止関数に置き換えることなくそのまま使用することになるので，計算コストの面からも効率的である．

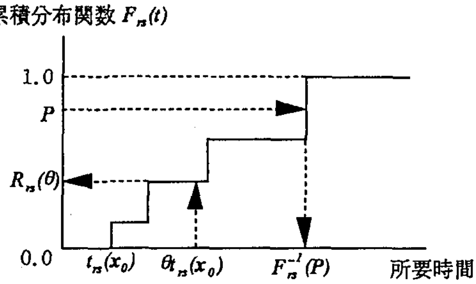

図-2 OD間所要時間の累積分布関数

信頼度の近似解と同様に，一部の状態ベクトルxに対して，OD間の所要時間$t_{rs}(x)$を計算することにより，その分布関数$F_{rs}(t)$を近似的に計算することができる．発生確率の大きい順番にJ番目までの状態ベクトルx_j $(j=1,\cdots\cdots,J)$と，それに対応する発生確率$P(x_j)$ $(j=1,\cdots\cdots,J)$の値を用いると，信頼度の近似解の場合と全く同様の方法で分布関数の上限値$F_{rs}^U(t)$，下限値$F_{rs}^L(t)$を求めることができるからである．具体的な計算手順は以下の通りである．

Step.0 初期設定

平常時の状態ベクトルx_0に対し，ODペア間の所要時間$t_{rs}(x)$を求める．繰り返し回数J=1と置く．

Step.1 状態ベクトルの抽出

状態発生確率$P(x)$の大きい方からJ番目の状態ベクトルx_Jを取り出す．

Step. 2 ネットワーク交通流の推定

x_jに対するＯＤペア間の所要時間を求める.

Step. 3 累積分布関数の上限値と下限値の計算

$t_{rs}(x_0) \le t$なる範囲のtに対して累積分布関数の上限値$F^U_{rs}(t)$および下限値$F^L_{rs}(t)$を次式によって計算する.

$$F^U_{rs}(t) = \sum_{j \in T(t)} P(x_j) + \left\{ 1 - \sum_{j=1}^{J} P(x_j) \right\}$$
$$F^L_{rs}(t) = \sum_{j \in T(t)} P(x_j) \qquad \cdots\cdots(9)$$

ここに$T(t)$は$t_{rs}(x_j) \le t$なるj $(j=1, \cdots\cdots, J)$の集合である.

Step. 4 収束判定

十分小さい正の数εに対し, $F^U_{rs}(t) - F^L_{rs}(t) \le \varepsilon$ならば, $t_{rs}(x_0) \le t$なる範囲のtに対して累積分布関数の近似値を

$$F_{rs}(t) = \left\{ F^U_{rs}(t) + F^L_{rs}(t) \right\} / 2 \qquad \cdots\cdots(10)$$

として計算終了. そうでなければ, J=J+1としてStep. 1へ.

任意の繰り返し回数におけるStep. 4の収束判定の際, 上限値, 下限値の差$F^U_{rs}(t) - F^L_{rs}(t)$の値は$t$によらず一様であるから, 収束判定の幅が$t$の値によって異なることはない. 図-3は, ある繰り返し回数における分布関数の上限値, 下限値を示したものである. 信頼度の場合と同様, 繰り返しを重ねて状態ベクトルを順に加えるごとに, 上限値は上から, 下限値は下から分布関数に漸近していく性質を持つ.

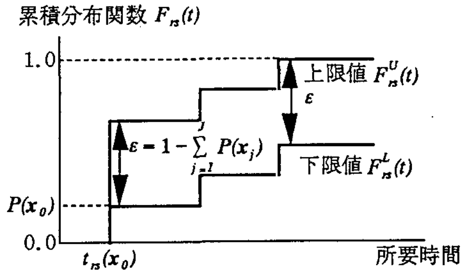

図-3 累積分布関数の近似

4. おわりに

本研究では, 迂回時間の上限を考慮したＯＤ間信頼度指標について考察してきた. 発生しやすい一部の状態ベクトルだけを使って信頼度を近似的に計算する方法を示したほか, その方法を応用してＯＤ間の所要時間の確率分布を求める方法を開発した.

従来の研究と異なることは, 信頼度を「構造的な連結度」とは定義せず, 「平常時のネットワーク上での所要時間に対して, 許容できる迂回の範囲の所要時間でトリップを完了することができる確率」と定義したことである. このことにより, 信頼度の過大評価を防ぐことができる.

求められた信頼度や所要時間の確率分布は, 交通網計画におけるネットワーク評価に利用できる. あるリンクの整備後にそのリンクの通行規制確率が減少すれば, 信頼度の向上効果を読みとることができる.

迂回の上限に関する判断基準であるパラメータθの値の具体的な設定方法は今後の課題である. 交通システムの供給側の視点で設定する場合は, 交通ネットワークが保つべきと考えられるサービス水準に対応させて設定することになるだろう. 需要側からの視点で設定する場合は, 迂回時間に関する交通行動分析などを行って迂回の上限値を求め, それを参考に設定することが考えられる.

【参考文献】

1)岡田憲夫, 若林拓史, 多々納祐一(1993)　社会基盤整備の計画・管理のためのリスク分析アプローチ. *土木学会論文集*, No.464/IV-19,pp.33-42.

2)Lam,Y.F.and Li,V.O.K.(1986)An Improved Algorithm for Performance Analysis of Networks with Unreliable Components.*IEEE Transactions on Communications,* Vol.COM-34,No,5,pp.496-497.

3)Sheffi ,Y.(1985)*Urban Transportation Networks*.Prentice-Hall,N.J.pp.146-153.

4)Daganzo,C.F.(1977)On the Traffic Assignment Problem with Flow Dependent Costs-I.Transpn,Res.Vol.11,pp.433-437.

5)Li,V.O.K.and Silvester,J.A.(1984)Performance Analysis of Network with Unreliable Components.*IEEE Transactions on Communications,* Vol.COM-32,No.10,pp.1105-1110.

6)Du,Z.P.and Nicholson A.J.(1993)Degradable Transportation System Performance,Sensitivity and Reliability Analysis, Research Report,No.93-8,Dept.of Civil Eng.,University of Canterbury,NZ.