

災害による通行規制時における道路網信頼性評価モデルの適用*

Application of Network Reliability Estimation Model with Degraded Links Due to Disasters*

高木一浩**, 朝倉康夫***, 柏谷増男****

by Kazuhiro Takagi, Yasuo Asakura and Masuo Kashiwadani

1. はじめに

著者らはこれまで、豪雨などの災害によって、ネットワークの一部またはすべてが通行規制されることを想定した道路網の信頼性評価に関する研究を進めてきた。通行規制されたネットワーク上でのドライバーの迂回・待機・中止行動のモデル化¹⁾や、Du and Nicholson²⁾のモデルを展開したネットワーク信頼性の近似計算法³⁾を提案してきている。しかしながら、著者らの研究を含め、これまでのネットワーク信頼性評価に関する研究の多くでは方法論の開発が重視され、実際規模のネットワークでのモデルの検証は十分ではないように思われる⁴⁾。本研究の目的は、先に提案したドライバーの行動モデルを組み込んだ信頼性評価モデルを四国地域の道路ネットワークへ適用し、そのパフォーマンスを調べることにある。

2. 道路網信頼性評価モデル

2.1 信頼性評価の考え方

本研究で用いる信頼性評価モデルでは、ネットワークを構成する個々のリンクが通行規制される確率は与件であるとする。この確率は、過去の通行規制の実績などから推定することになる。個々のリンクが通行できるか否かを1,0で表すと、ネットワークの状態はベクトル $x = \{x_1, \dots, x_n, \dots, x_L\}$ で表される。リンクが通行できるとき $x_i = 1$ 、通行できなければ $x_i = 0$ である。状態に対してネットワーク上で生じうるフローを求め、ODペア間が機能しているか否かを評価する。この過程を稼働・停止関数の評価と呼ぶ。

どのような方法でフローを求めるかにもよるが、稼働・停止関数にはいくつかのものが考えられる。たとえば、OD間に利用可能な経路が残されているか否か、OD間の所要時間が許容範囲にあるか否かなどである。後述するように、本研究では通行規制時におけるドライバーの迂回・待機・中止行動をモデル化しており、OD間の交通需要の減少を信頼性評価に反映させることができる。そこで、稼働・停止関数としては、平常時に比較したOD需要の減少率が許容範囲にあるか否かを用いるものとした。

生じうるすべての状態ベクトルに対して、稼働・停止関数の数学期待値を求めると、それがODペア間の信頼性指標となる。

2.2 近似解法

ネットワークを構成するリンク数が L のとき、すべての状態を調べるには 2^L 回のフロー計算が必要であるため、信頼性指標を厳密に計算しようとすると、ネットワークの規模が大きくなれば、計算量は膨大になる。そこで、一部の状態ベクトルに対してのみフロー計算を行い、近似的に信頼性指標を求めるのが近似解法である。その手順を以下に示す。

【Step.1】状態ベクトルの並び換え：それぞれの状態ベクトルの発生確率 p を求め、その値の大きい順番に並び換える。 $J = 0$ とおく。

【Step.2】交通処理能力の推定：状態ベクトル x_J に対してフロー分析を行い、OD交通量を求める。

【Step.3】OD交通量の減少率の計算：平常時のOD交通量に対して減少率を求める。減少率は次式により求められる。

$$y_{ij}(x_J) = [f_{ij}(x_0) - f_{ij}(x_J)] / f_{ij}(x_0)$$

ここで、 $f_{ij}(x_0)$ は、平常時のOD交通量、 $f_{ij}(x_J)$ は、状態ベクトル x_J のときのOD交通量である。

【Step.4】稼働・停止関数の計算： $y_{ij}(x_J)$ の値と別途に

*Keywords：配分交通，ネットワーク交通流

**学生員，愛媛大学大学院博士前期課程土木海洋工学専攻
(〒790松山市文京町，TEL.089-927-9829，FAX.089-927-9843)

***正会員，工博，愛媛大学工学部環境建設工学科(同上)

****フェロー，工博，愛媛大学工学部環境建設工学科(同上)

求めた判断基準 θ によって O D ペアの状態を関数 $Z_{ij}(\theta, x_j)$ で表す。

$\theta \leq y_{ij}(x_j) \leq 1$ なら $Z_{ij}(\theta, x_j) = 0$ (機能しない)

$0 \leq y_{ij}(x_j) < \theta$ なら $Z_{ij}(\theta, x_j) = 1$ (機能)

【Step.5】信頼性の近似値，誤差の絶対値の上限値の計算：以下の式を用いて近似解 $M_{ij}(\theta)$ および誤差 $\epsilon_{ij}^U(\theta)$ を求める。

$$M_{ij}(\theta) = [R_{ij}^L(\theta) + R_{ij}^U(\theta)] / 2$$

$$\epsilon_{ij}^U(\theta) = [R_{ij}^L(\theta) - R_{ij}^U(\theta)] / 2$$

ただし， $R_{ij}^U(\theta)$ ， $R_{ij}^L(\theta)$ は θ に対する信頼性の上限値と下限値であり，次式で求められる。

$$R_{ij}^U(\theta) = \sum_{k=0, J-1} p_k Z_{ij}(\theta, x_j) + [1 - p(J)] Z_{ij}(\theta, x_0)$$

$$R_{ij}^L(\theta) = \sum_{k=0, J-1} p_k Z_{ij}(\theta, x_j) + [1 - p(J)] Z_{ij}(\theta, x_w)$$

ここに x_0 は平常時の状態ベクトル， x_w は最悪の状態の状態ベクトルである。

【Step.6】繰り返し判定： $\epsilon_{ij}^U(\theta)$ があらかじめ設定された許容誤差の範囲内であれば計算を終了させる。そうでなければ， $J = J + 1$ として【Step.2】へ。

3. ネットワーク上でのフロー分析

信頼性評価の【Step.2】において，一部のリンクが通行規制されたネットワークでのフローを求めるための方法論（配分モデル）としては，これまでにいくつかのモデルが提案されてきた。しかしながら，いずれの場合でも道路網の一部が利用できない状態におけるドライバーの交通行動の記述が十分であったとはいえない。以下では，ドライバーの交通行動を反映させたネットワーク配分モデルについて述べる。

3.1 迂回・待機・中止のモデル

配分モデルに組み込むことのできる簡明な選択行動モデルとするために，説明変数を所要時間に限定した。平常時の所要時間(t_0)，迂回経路の所要時間(t_d)，一旦待機して再びトリップしたときの所要時間(t_w)を組み合わせて説明変数を作成し，非集計ロジットモデルにより通行規制時の交通選択行動を分析した。

ドライバーは第1段階としてトリップを中止するか

(行動s) 中止しないか(行動 $\bar{s}$)を選択する。第2段階として，中止しない場合は，迂回するか(行動d)，待機するか(行動w)を選択するものとした。第2段階の選択の説明変数には平常時経路との時間比あるいは時間差を用いた。第1段階の選択には，下位の選択である第2段階の選択のlogsum変数あるいは時間比(時間差)の小さい方を説明変数とするモデルを考えた。以下，便宜的に第2段階，第1段階の順に選択モデルとその推定結果を示す。

<迂回・待機行動モデル>

トリップを中止しない場合に迂回する確率は次式で与えられる。

$$p(d|s) = 1 / [1 + \exp(V_w - V_d)] \quad (1)$$

ここに， V_d ， V_w はそれぞれ迂回および待機する場合の効用の確定項である。時間差を用いると効用の差は，

$$V_w - V_d = \alpha_0 + \alpha_1 (t_w - t_d)$$

である。(α_0 ， α_1 はパラメータ)

<中止行動モデル>

中止行動の選択確率は，

$$p(s) = 1 / [1 + \exp(V_{\bar{s}} - V_s)] \quad (2)$$

である。ここに， V_s ， $V_{\bar{s}}$ はそれぞれ中止した場合とし

なかった場合の効用の確定項である。平常時の所要時間と比べたときの迂回あるいは待機した場合の時間の比(あるいは時間の差)を求め，その小さい方をトリップする場合の効用関数に組み込んだモデルを考える。これを便宜的に比較最小モデルと呼ぶ。時間差を用いると効用差は，

$$V_{\bar{s}} - V_s = \beta_0 + \beta_1 \min. (t_w - t_0, t_d - t_0)$$

で与えられる。(β_0 ， β_1 はパラメータ)

仮想的状況下での選択行動調査によって得られたデータを用いて，式(1)，式(2)のモデルパラメータを推定した結果を表1に示す。

表1 パラメータの推定結果

モデル	迂回・待機行動		中止行動	
パラメータ	α_0	α_1	β_0	β_1
通勤	0.037	-0.015	3.016	-0.015
業務	0.022	-0.010	2.576	-0.008
観光	0.220	-0.006	1.181	-0.011
私用	-0.280	-0.005	2.004	-0.020
その他	-0.060	-0.008	1.448	-0.008

3.2 フロー分析に用いる交通量配分モデル

信頼性評価の近似解法では、一部の状態ベクトルに対してのみ配分計算を実行することにより、計算量を減らす工夫をしているが、それでも全体としての計算量は少なくない。そこで、配分計算そのものの計算量を削減するために、上記の行動モデルをAll-or-Nothing配分に組み込むものとした。通行規制されたネットワークでフローを求めるための計算手順は以下の通りである。

【Step.1】初期設定：ODペア間の平常時の経路とその所要時間 C_{ij}^0 を求める。

【Step.2】待機した場合の所要時間の計算：平常時の最短経路に通行規制リンクが含まれるとき、規制時間の最大値を平常時所要時間に加えて待機時のOD間所要時間 C_{ij}^w とする。

【Step.3】迂回したときの所要時間の計算：平常時の最短経路に通行規制リンクが含まれるとき、規制ネットワーク上で最短経路探索を実行し、迂回時のOD間所要時間 C_{ij}^d を求める。通行規制されたリンク所要時間を平常時所要時間に通行規制時間を加えた値とする。

【Step.4】中止モデルの計算：式(2)により、ODペアごとにトリップ中止率 $p(s)$ を求める。ODペアごとの中止トリップ数を記憶する。

【Step.5】迂回・待機モデルの計算：式(1)により迂回率 $d(s)$ を求め、迂回トリップを【Step.3】で求めた迂回経路に配分する。迂回トリップ数は、 $T_{ij}p(s)[1-p(d(s))]$ である。併せてODペアごとの待機トリップ数を計算して記憶する。

中止率や迂回率のパラメータは交通目的別に得られているので、【Step.4】【Step.5】は交通目的別に計算することになる。

なお、実際の道路網では一部区間が通行規制されると、その区間を通行していた車両が他の経路へ迂回することで、別のリンクに新たな混雑が発生することもある。ネットワークの規模が小さければ、混雑を考慮した配分計算（たとえば容量制約付きの均衡配分）を用いればよい。しかし、ネットワーク規模が大きい場合には、多大な計算量を見込まなければならない。

4. 四国ネットワークへの適用

4.1 通行可能確率と規制継続時間

平成元年～5年までの直轄国道の通行規制データを調べ、規制日時がほぼ共通するものを集約すると48回の規制に集約できた。38本のリンクが規制されていたが、隣接するリンクなど同一区間の規制であると考えられるものについて集約すると、16本のリンク（図1）が規制を受ける可能性があるリンクとなった。

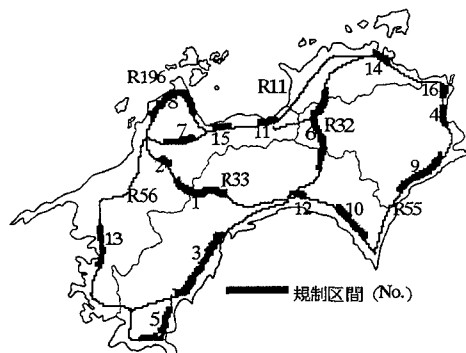


表2 状態ベクトルの発生状況

状態番号	状態 区間番号																発生確率
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.2363542
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1074338
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0702675
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0157570
100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0007184
500	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0000556

表3 近似解の誤差の上限値

状態番号	誤差の上限値
1	0.32311
2	0.29297
3	0.26934
10	0.19157
100	0.05214
500	0.01084

表5 信頼度の小さいODペア（平常時トリップ数1000以上）

ODペア	平常時トリップ数	信頼度
吾川郡⇄高岡郡	5628	0.442
高知市⇄高岡郡	8612	0.444
高岡郡⇄高岡郡	7227	0.444
須崎市⇄高岡郡	5560	0.444
高岡郡⇄幡多郡	1646	0.495
高知市⇄中村市	1123	0.498

四国内の市群をゾーンとし、交通目的別のOD交通量がゼロではない全てのODペアについて信頼度を計算した。稼働・停止関数の判断基準の値は、 $\theta=0$ とした。すなわち、中止トリップが発生すればそのODペアは機能していないと判断することになる。四国全体で信頼度が0.5に満たないODペアは24であり、その多くは四国南西部に集中している。

表4は、とくに信頼度の小さい5つのODペアを示したものである。上位3番目までは、起点もしくは終点に愛媛県上浮穴郡を含んでいる。これは、高知と松山を結ぶ国道33号線の規制発生頻度が高いことと対応している。

表4 信頼度の小さいODペア（5つ）

ODペア	信頼度
上浮穴郡⇄高岡郡	0.333
上浮穴郡⇄吾川郡	0.431
海部郡⇄上浮穴郡	0.434
松山市⇄土佐市	0.436
吾川郡⇄高岡郡	0.442

平常時のOD交通量が1000以上で、かつ信頼度の小さいODペアを示したものが表5である。高知県中西部のODペアが多く抽出された。これは、海岸部の国道56号線以外に利用可能な経路が少ないことが原因であると思われる。

5. おわりに

本研究では、道路網信頼性評価モデルの適用計算を行った。通行規制確率の定義にもよるが、四国のネットワークに関する限り、100番目までの状態を取り出して近似計算すれば、実用的な意味では十分な精度が得られると考えられる。信頼性の低いODペアは、経験的・常識的な傾向と一致しており、それを数値化して比較できるようになったことは研究成果の一つであるといえる。もちろん、フロー分析の方法を始め、今後に残された課題も少なくない。それらについては、稿を改めて発表したい。

【参考文献】

- 1) 朝倉康夫, 柏谷増男, 高木一浩, 藤原健一郎: 災害による道路通行規制時の交通選択行動に関する実証分析. 土木計画学研究・論文集, No.14 (投稿中)
- 2) Du, Z.-P. and Nicholson, A.: Degradable Transportation Systems Performance, Sensitivity and Reliability Analysis. Research Report 93-8, Dept. of Civil Eng., University of Canterbury, NZ., 1993.
- 3) 朝倉康夫, 柏谷増男, 藤原健一郎: 交通ネットワークにおける迂回の限度を考慮したODペア間信頼度の指標. 土木学会論文集, No.555/IV-34, pp.41-49, 1997.
- 4) 朝倉康夫, 柏谷増男, 為広哲也: 災害時における交通処理能力の低下を考慮した道路網の信頼性評価モデル. 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.475-484, 1995.