

災害発生後の交通規制を考慮した道路ネットワーク防災性能評価*

Evaluation of Disaster Prevention Performance of the Road Network Considering Traffic Regulation after a Disaster.*

倉内文孝**・田中秀忠***・高木朗義****・Sumalee, Agachai *****

By Fumitaka KURAUCHI **・Hidetada TANAKA ***・Akiyoshi TAKAGI****・Agachai, SUMALEE *****

1. はじめに

道路交通ネットワークは、災害時において救命救急活動・ライフラインの復旧活動などに関して重要な役割を担っている。一方、道路施設を含め我が国の都市地域はひとたび被害が生じれば復旧・復興まで長期にわたって使用不能になることも考えられる。そのため、災害が発生しても深刻な機能低下に陥らない道路交通ネットワークの構築が重要である。また、災害時には被災の程度に応じて交通規制が実施されるため、適用される交通規制施策を考慮し、道路交通ネットワークの災害に対する性能評価を実施することが必要と考える。本研究では都市部を対象とし、災害発生後における交通規制を考慮しつつ、道路交通ネットワークの防災性能評価を行うための方法を検討した結果を報告する。また、提案した手法を、岐阜市を模した道路ネットワークに適用し、計算結果を考察する。

本研究においては、災害時の交通管理の考え方として、エリア交通規制¹⁾を前提とする。エリア交通規制とは、被災地を被災の程度に応じてゾーンに分割し、各ゾーンへの流入量を規制する考え方である。災害対策基本法改正前は、緊急ルート指定等の線の規制のみが行われており、規制の影響を受けた交通が迂回分散するため、規制対象外の道路や被災地域内において交通渋滞が発生していた。エリア交通規制は、阪神淡路大震災を契機とした改正により、面的な流入規制が可能となったことにより提案されたものである。この目的は、被災地域内での交通の混乱を緩和し緊急車両や救急車両の通行の妨げとなる交通を規制することにある。

2. 防災性能評価方法の概要²⁾

2.1 ネットワーク容量モデル

エリア交通規制量は、道路ネットワークに混雑が生じないという制約のもと最大の受け入れ可能な交通量、すなわち

*キーワード：容量信頼性，災害時交通規制，MPEC

**正員，博（工），岐阜大学工学部社会基盤工学科
(岐阜市柳戸 1-1, 058-293-2443, kurauchi@gifu-u.ac.jp)

***非会員，丹青モールマネジメント

****正員，博（工），岐阜大学工学部社会基盤工学科

*****非会員，Ph.D, 香港理工大学

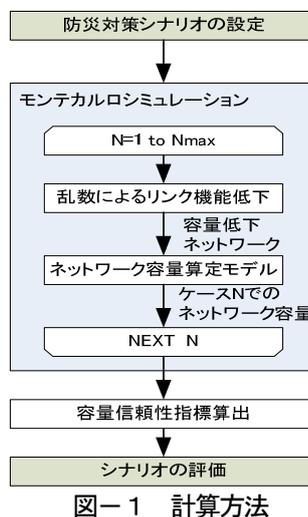


図-1 計算方法

ネットワーク容量を求めることによりその規制方針を決定できる。ただし、道路上の混雑により経路選択行動は変化する。経路選択行動を考慮しつつ、混雑による均衡状態を明示的に考慮するため、本研究では Probit 型確率的利用者均衡状態を下位問題として有する MPEC 型の数理最適化モデルとした。ネットワーク容量算定モデルは、(1)式で表される。

$$\begin{aligned} \underset{(x, \theta)}{\text{Max}} Z &\equiv \theta^T \cdot \mathbf{q} \\ \text{s.t.} & \\ \mathbf{x}^*(\theta) &\leq \mathbf{s} \\ \mathbf{0} &\leq \theta \leq \mathbf{1} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{x}^*(\theta) = \Delta \cdot \{(\Omega \cdot \mathbf{q} \otimes \theta) \otimes \mathbf{P}(\Delta^T \cdot \mathbf{t}(\mathbf{x}^*))\}$$

ここで、目的関数 Z は生成交通量を示し、 \mathbf{q} は OD 交通需要、 θ は各 OD に関する規制量である。 \mathbf{s} はリンク容量、 \mathbf{x}^* は、 θ の関数として表現される、Probit 型利用者均衡が成立する際のリンクフローを表す。また、 Δ はリンク・パス接続行列、 Ω は OD・パス接続行列、 $\mathbf{P}(\mathbf{t})$ は経路所要時間が \mathbf{t} の場合のプロビット型の経路選択確率、 $\mathbf{t}(\mathbf{x}^*)$ はリンクパフォーマンス関数を示している。

2.2 道路ネットワークの防災性能評価方法

道路ネットワーク防災性能は、容量信頼性指標³⁾を用いて評価する。容量信頼性の考え方は、式(1)の定式化と比較すれば、規制量 θ を全 OD に対して均一とすることと一致する。容量信頼性指標とは、ある要求水準を与件としその

水準を満たす確率と定義される。すなわち要求水準を 10 万台としたとき、容量信頼性は 10 万台以上である確率、と定義できる。計算方法を図-1 に示す。所与のリンク機能低下確率を用いモンテカルロシミュレーションを適用し、容量低下時におけるネットワーク容量を算出する。この行程を N_{max} 回行うことで容量信頼性指標を算出する。手順は以下の通りである。

【Step0】繰り返し番号 $N=1$ を設定する。

【Step1】各リンクに 0 から 1 の範囲の一様乱数 $Y1_a$ を発生させる。

【Step2】 $Y1_a < \gamma_a$ (リンク機能低下確率) ならば、異なる一様乱数 $Y2_a$ を発生させ、 $(1 - \beta_a Y2_a) Ca_a$ としてリンク a の最大リンク容量 Ca_a を減少させる。ここで γ_a, β_a は入力パラメータである。

【Step3】 N の容量低下時ネットワークにおける最大の受け入れ可能交通量を算出する。

【Step4】 $N < N_{max}$ ならば $N=N+1$ として【Step1】へ。 $N < N_{max}$ でなければ計算を終了する。

N 回の容量低下時ネットワークにおける最大の受け入れ可能交通量計算結果から、以下の(2)式を用いて容量信頼性指標を算出することができる。

$$R(\mu_r) = \sum_{N=1}^{N_{max}} \delta_N^{\mu_r} / N_{max} \quad (2)$$

ここで、 $R(\mu_r)$: 容量信頼性、 $\delta_N^{\mu_r}$: N 回目計算時のネットワーク容量比率が容量 μ_r 以上であるときは 1、そうでなければ 0 となるダミー変数である。

2.3 ネットワーク容量算定モデルの解法

式(1)で示したネットワーク容量算定モデルを解く際には、SUE フローの未知変数 θ に対する 1 階微分の情報を活用する方法を用いた。Clark and Watling⁴⁾により示された SUE フローのリンクコストに関する微分値を用い、下記の Gap 関数を定義することで、式(4)のようにリンクフローの θ に関する微分値が求まる。

$$\mathbf{g}(\theta) = \mathbf{x}^* - \Delta \cdot \{ (\Omega \cdot \mathbf{q} \otimes \theta) \otimes \mathbf{P}(\Delta^T \cdot \mathbf{t}(\mathbf{x}^*)) \} \quad (3)$$

$$\nabla_{\theta} \mathbf{x}^*(\theta) = \lim_{\theta \rightarrow \theta_0} \frac{\mathbf{x}^*(\theta) - \mathbf{x}^*(\theta_0)}{\theta - \theta_0} = -(\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{g}(\theta_0))^{-1} \cdot \nabla_{\theta} \mathbf{g}(\theta_0) \quad (4)$$

ただし、

$$\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{g}(\theta_0) = \mathbf{I} - \Delta \cdot [(\Omega \cdot \mathbf{q} \otimes \theta) \cdot \mathbf{1}_{(1,|H|)} \otimes \mathbf{I}] \cdot \nabla_{\mathbf{c}} \mathbf{P} \cdot \Delta^T \cdot \nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{t}$$

$$\nabla_{\theta} \mathbf{g}(\theta_0) = -\Delta \cdot (\mathbf{P} \otimes (\Omega \cdot \nabla_{\theta} \mathbf{q}))$$

である。この関係を用いることで式(1)の非線形制約式の 1 階微分値を定義することが可能となり、非線形計画問題の汎用的アルゴリズムを活用できる。ただし、SUE フローは θ に関して非凸の関数となっていることから、ここでの計算方法により得られた解は局所的最適解に過ぎない。

3. 仮想ネットワークにおける性能検証

提案したアルゴリズムを 3 x 3 の田の字の仮想ネットワークに適用し、性能検証を行った。対象となる仮想ネットワ

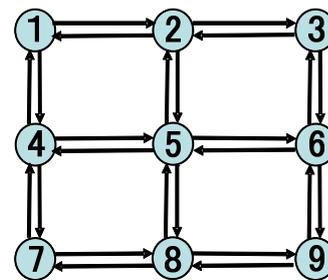


図-2 仮想ネットワーク

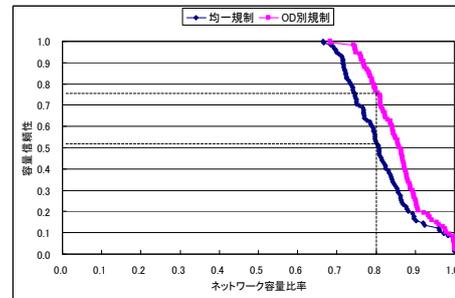


図-3 均一規制と OD 別規制の比較

クを図-2 に示す。リンク数は 24、ノード数は 9、リンク容量は片方向あたり 10 とする。OD ペアは、(4, 6), (3, 7), (2, 8), (1, 9) の 4 つとし、各需要は 10 とした。リンク機能低下確率および容量低下比率はいずれも 0.3、試行回数を 100 回として計算を進めた。また、適用する交通規制のきめ細かさによるネットワーク性能への効用の比較として、均一規制を実施する場合と OD 別規制を実施する場合の 2 つの場合について検証を行った。図-3 に、均一規制と OD 別規制の容量信頼性指標算出結果を示す。ネットワーク容量比率とは、算定された被災時ネットワーク容量を被災のないケースのネットワーク容量によって除したものである。例えば、被災のないケースのネットワーク容量の 80% を確保したいとすると、容量信頼性の値は、均一規制の場合は 0.52、OD 別規制の場合は 0.77 とよみとれる。一様に均一規制より OD 別規制のほうが高い容量信頼性値を示している。OD 別規制のほうが、ネットワークを有効利用できることを意味する。適用する交通規制すなわち規制のきめ細かさによってネットワーク性能は向上し、より多くの交通需要を受け入れることができるといえる。また、被災の程度が大きいほど、規制がきめ細かいことによる効用が大きく、災害時の道路ネットワークの有効活用に有用であることを確認した。

4. 実ネットワークにおける適用計算

4.1 設定

次に、岐阜市の道路ネットワークを単純化したネットワークにモデルを適用する。リンク数は 110、ノード数は 33 (そのうちセントロイドは 9) である。OD 交通需要、リンク容量は道路交通センサスを参考に設定した。まず被災のないネットワークにおいてネットワーク容量を算定し、被災時の容量低下はこの平常時ネットワーク容量との比

をもって比較評価する。さらに、 γ_a は全て 0.3 と仮定して、乱数を用いて被災パターンを生成した。 β_a は 0.5 と設定し、シミュレーション回数は 100 回とする。適用する規制は均一規制とした。

4.2 被災がない場合の混雑状況把握

平常時における道路交通状況として、被災のないケースのネットワーク容量の算定を行う。図-4に平常時における混雑度レベルを示す。ここで、平常時における混雑度レベルをみると、ノード 2 と 30, 7 と 31 を繋ぐリンクが混雑度レベルが高い。また、ノード 2 と 16, 2 と 29, 5 と 22, 8 と 20 を繋ぐリンクにおいても混雑度レベルが比較的高い。今回の設定においては、東側に比較的高い混雑度の高い箇所が集中していることになる。

平常時において混雑が生じない道路ネットワークの創出を目的とするのであれば、平常時の渋滞状況をもとに、シナリオを設定し評価すればよいことになる。一方で、本研究の目標とするところは、大規模災害が発生したとしても機能低下に陥らない道路ネットワークの構築である。そこで、被災想定時における道路交通を踏まえたシナリオを設定した評価を行い、この結果と比較することとする。

4.3 被災を想定した場合の容量信頼性

被災を想定した場合の岐阜市道路ネットワークにおける交通状況として、被災を想定した場合において均一規制を実施する場合のネットワーク容量の算定を行った。図-5には、計算結果から得られたクリティカルリンクを示している。ここで、クリティカルリンクとは、混雑度が 1 になる確率の高いリンク、すなわちネットワーク容量を規定するリンクとなった頻度の高いリンクと定義しており、図中に 100 回の試行中どの程度の比率で混雑度が 1 になったかを示している。この結果より、ここで用いた岐阜市ネットワークにおいては、ノード 2 と 30, 7 と 31, 8 と 20 をそれぞれ繋ぐ双方方向のリンクが、特にクリティカルなリンクとなっており、本ネットワークの性能において重要なリンクであるといえる。被災を想定した場合の平均規制率は 46.5%で、平常時の半分の OD 交通需要しか受け入れることができず、ネットワークの機能が大きく低下していた。また容量信頼性の結果からも設定した道路ネットワークは、多少のリンクの機能低下でも大きくネットワーク容量が減少し、災害に対して比較的脆弱であった。

4.4 災害時の容量低下低減を目的としたシナリオ分析

さらに、適用計算結果を踏まえ、災害時においても道路ネットワークが機能低下に陥らないよう防災対策シナリオを設定した。具体的には、クリティカルリンクと判定されたリンクに対して代替路を設定することとした。図-6にシナリオ設定時の道路ネットワークを示す。図中の破線が防災対策シナリオとして設定した代替路である。本研究における防災対策シナリオの評価は、被災を想定した道路ネットワークを対象としているため、被災を想定した際の整備なしの場合と整備ありの場合の算出結果で比較を行うことと



図-4 平常時における混雑度レベル



図-5 被災を想定した場合のクリティカルリンク



図-6 シナリオ設定時の道路ネットワーク

する。適用する規制は均一規制とした。

平常時における整備ありの場合の混雑度レベルを図-7に示す。図-4、図-7より、道路整備によって、平常時においても多くの箇所混雑度レベルが低下していることがわかる。特に整備なしの場合では、ノード 2 と 30, 7 と 31 を繋ぐ双方方向のリンクが混雑度 0.9 から 1.0 であったが、シナリオを設定することで、大きく軽減されている。また、シナリオにより設定されたノード 5 と 8 を繋ぐ代替路は、平常時においても比較的多く利用されていることが図から読み取れる。つまり、この防災対策シナリオは平常時においても効果が期待できるシナリオであるといえる。

被災を想定した場合における整備有無を比較する。まず、図-8より、同程度の被災であっても、整備なしの場合より

り整備ありの場合のほうが、容量信頼性は一様に高くなり、ネットワーク容量比率が大きく低下することもなくなった。また、平均規制率も 46.5%から 31.0%と減少した。道路整備を行うことによって、道路ネットワークの災害に対する脆弱性も解消され、平常時においても被災を想定した場合においてもより多くの OD 交通需要を受け入れることができ、道路ネットワーク性能が向上したといえる。

整備ありの場合のクリティカルリンクをそれぞれ図-9に示す。防災対策シナリオとして設定したノード2と17、5と8を繋ぐ経路は、有効に利用されており代替性があるといえる。防災対策シナリオとして設定したもうひとつの経路であるノード2と7を繋ぐ経路においては、有効に利用されているという結果は得ることができなかったが、防災対策シナリオ設定前クリティカルリンクであったノード2と30を繋ぐ経路に効果をもたらしたといえる。岐阜市ネットワーク全体としても、防災対策シナリオの設定により、整備なしの場合ではあまり有効に利用されていなかった中心部を有効利用できており、道路ネットワークをより有効かつ効率的に利用できているといえる結果となった。

以上より提案したアルゴリズムを用いて、実ネットワークにおいても道路ネットワークの防災性能を評価できることを確認した。また、災害時を考慮した防災計画を設定することは、災害が発生しても機能低下に陥らない道路ネットワークの創出に有用であるといえる。

5. おわりに

本研究では、災害発生時の交通規制を考慮した道路ネットワーク防災性能評価を目指し、仮想及び実ネットワークにおける計算結果を示した。また、平常時の道路交通状況とともに災害時に予想される交通管理や道路交通状況を踏まえた道路交通計画を実施することの必要性・重要性を示した。今後の課題としては、計算に多大な時間を要する点、局所最適解の対応に関する配慮、及び他の交通規制についての試行計算などが挙げられる。

謝辞

本研究は、(財)関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の平成20年度研究助成により実施された研究成果の一部である。記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 飯田恭敬ら：阪神・淡路大震災の実態調査に基づいた震災時の道路交通マネジメントの研究，国際交通安全学会，1998。



図-7 整備ありの場合の混雑度レベル

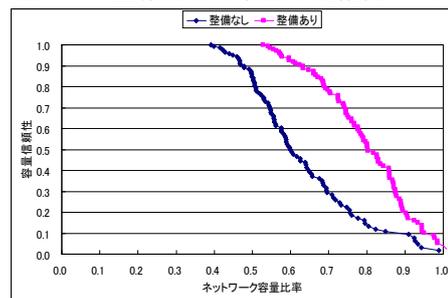


図-8 整備有無による容量信頼性比較



図-9 整備ありの場合のクリティカルリンク

- 2) Sumalee, A. and Kurauchi, F. "Network Capacity Reliability Analysis Considering Traffic Regulation after a Major Disaster", Networks and Spatial Economics, 6, 205-219, 2006
- 3) Chen A, Yang H, Lo HK, Tang WH : Capacity Reliability of a Road Network : an Assessment Methodology and Numerical Results, Transportation Research, Part B:Methodological 36(3), 225-252, 2002.
- 4) Clark, S.D. & Watling, D.P. (2002) Sensitivity analysis of the probit-based stochastic user equilibrium assignment model, Transportation Research Part B: Methodological 36 (7), 617-35.