

複数管理者による道路ネットワークにおける 防災対策の優先度の検討

鈴木 春菜¹・大窪 和明²

¹正会員 山口大学准教授 創成科学研究科 (〒 755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: suzuki-h@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 埼玉大学助教 理工学研究科 (〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)
E-mail: okubo@dp.civil.saitama-u.ac.jp

交通データの乏しい地方部では、道路ネットワークの防災対策の達成度として橋梁や土構造物の防災対策数を用いられており、リンクの途絶がネットワーク全体にあたえる影響の大きさによって対策の優先度が設定されることは少ない。特に、都市間をつなぐ道路ネットワークが疎であるような地方部では、リンクの途絶によって大きな迂回が必要になるため、ネットワーク全体の観点からリンクの優先度を評価することが望ましい。さらに、道路ネットワーク上においては、道路リンクごとに管理する主体が異なり、現状では管理者間で調整が行われることは稀である。こうした状況においては、道路ネットワーク全体の観点から道路リンクの重要度を把握しておき、各管理者が防災対策の優先度を定める際の参考資料とすることが望ましい。そこで、複数管理者による道路ネットワークについて、複数管理者がそれぞれ評価した場合とネットワーク全体で評価した場合を比較し、複数管理者の存在がネットワークの管理に及ぼす影響を検討することとする。また、交通量を考慮した定量的な利便性を踏まえた場合と交通量を考慮しない公平性を踏まえた場合の優先度評価の枠組みを提示するとともに、関係機関へのヒアリングによって実用可能性の高い優先度評価手法を検討する。

1. はじめに

国土強靱化基本法の成立と基本計画の閣議決定に伴い、都道府県・市町村など各主体で防災計画の策定がすすめられている。このうち、発災・復興時の人流・物流の基盤となる都道府県規模の道路ネットワークの脆弱性については、国土強靱化地域計画等において順次検討が進められている。

道路ネットワークの脆弱性については、各種の評価手法について、研究が蓄積されているところである。しかし、パーソントリップ調査を始めとする OD 調査が定期的な実施されていない都市が多いため交通データの乏しい地方部では、このような手法を用いて道路ネットワークの評価を行うことは容易ではない。

その結果、各種の道路ネットワークを評価する機会において、道路ネットワークの防災対策の達成の評価は、橋梁や土砂災害危険個所の土構造物の対策数といった個別の道路構成要素の評価にとどまっておき、リンクを単位とした評価は行われることは少ない。例えば高知県¹⁾・香川県²⁾・山口県³⁾が策定した国土強靱化地域計画ではいずれも、緊急輸送道路をはじめとした主要道路の橋梁耐震化の割合や法面などの要対策箇所の対策の割合が、輸送ルートの確保についての業績指標として用いられている。

個別構造物の対策数では同一の達成度であっても、防災対策が完了したリンクが1つ存在する状況と1つも存在しない状況では、ネットワークへの影響が異なるであろう。さらに、都市間のリンク数が同じであっても、他都市の位置関係によってリンクの重要度が異なると考えられる。

特に、都市間をつなぐ道路ネットワークが疎であるような地方部では、リンクの途絶によって大きな迂回が必要になる。そのため、個別事業の評価において災害時のリンク途絶の影響が考慮されることはあるが⁴⁾、⁵⁾、リンクの途絶がネットワーク全体に与える影響の大きさによって事業や対策の優先度が検討されることは少ない。社会資本の効率的な維持・管理が求められるなか、個別構造物の対策の優先度と交通量をもとに事業が決定されていると推察される。しかし、道路のネットワーク全体への影響を踏まえれば、個別構造物にとどまらないネットワーク全体の脆弱性評価を踏まえてリンクの優先度を評価することが望ましい。

さらに、道路ネットワークの脆弱性評価を検討する際には、道路管理者に配慮することが求められる。道路ネットワーク上においては、道路リンクごとに管理する主体が異なり、現状では管理者間でネットワーク全体の脆弱性を検討する調整が行われることは稀である。すなわち、各主体で個別にネットワークを評価するだ

けでは、道路ネットワークを適切に評価することが困難であり、各主体で道路ネットワークの脆弱性を踏まえて事業を計画することを阻害していると考えられる。

こうした状況においては、道路ネットワーク全体の観点から道路リンクの重要度を把握しておき、各管理者が防災対策の優先度を定める際の参考資料とすることが望ましい。そこで本研究では、複数管理者による道路ネットワークについて、ネットワークの脆弱性評価を行い、複数管理者がそれぞれ評価した場合とネットワーク全体で評価した場合を比較し、複数管理者の存在がネットワークの管理に及ぼす影響を検討することとする。また、道路管理者が異なるリンクを管理していることを考えた上で、需要変動モデルを用いた評価手法を提案し、既存研究^{8),9),10),11)}との関係性を示す。

2. モデルの定式化

(1) 最大被害算出モデルの定式化

本研究では道路リンク a の途絶を $\sigma_a = 1$ 、通行できる場合を $\sigma_a = 0$ として表し、途絶した道路リンクの組み合わせ σ の下で利用者均衡条件に従って道路を移動したときの消費者余剰を用いて被害の大きさを評価する。はじめに OD ペア od 間の所要時間が c_{od} であったときの交通需要量 q_{od} が、需要関数 $q_{od} = D_{od}(c_{od})$ で表され、逆需要関数が

$$c_{od} = D_{od}^{-1}(q_{od}) \quad (1)$$

で表せると仮定する。道路リンク a の途絶の組み合わせが σ で与えられた下で、経路交通量が利用者均衡条件によって決まると考えると、変動需要型の利用者均衡配分モデルを用いて、

【UE/Excess Demand】

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{e}} Z(\mathbf{x}, \mathbf{e}|\sigma) = \sum_{a \in \mathcal{A}} t_a x_a - \sum_{od} \int_0^{\bar{q}_{od}} D_{od}^{-1}(w) dw + \sum_{od} \int_0^{e_{od}} D_{od}^{-1}(\bar{q}_{od} - w) dw \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} w_{od,k} f_{od,k} + e_{od} = \bar{q}_{od} \quad \forall od \in OD \quad (3)$$

$$x_a = \sum_{k \in \mathcal{K}} \delta_{a,k} f_{od,k} \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad (4)$$

$$x_a \leq (1 - \sigma_a) C_a \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad (5)$$

$$f_{od,k} \geq 0 \quad \forall od \in OD, k \in \mathcal{K} \quad (6)$$

$$e_{od} \geq 0 \quad \forall od \in OD \quad (7)$$

と表せる。ただし、

- OD : OD ペアの集合
- \mathcal{K} : 経路集合
- \mathcal{A} : リンク集合

- x_a : リンク a の交通量
- $f_{od,k}$: OD ペア od の k 番目経路の経路交通量
- e_{od} : OD ペア od で移動できない交通量
- \mathbf{f}, \mathbf{e} : $f_{od,k}, e_{od}$ のベクトル
- x_a : リンク a の交通量
- t_a : リンク a の所要時間
- \bar{q}_{od} : リンク od の最大交通量 (定数)
- $w_{od,k}$: 経路 k が OD ペア od の移動に持ちいることができるならば 1, それ以外は 0 をとる定数。
- Δ^g : Link Path Incidence 行列 (OD ペア od を移動可能な経路 k についてリンク a を含めば 1, それ以外は 0 をとる定数。)
- C_a : リンク a の容量

制約条件式 (3) はフロー保存則であり、各 $od \in OD$ の外生的な OD 交通量 \bar{q}_{od} が、少なくとも 1 つの経路を利用して移動できる交通量の合計 (左辺第一項) と、途絶によって移動できない OD 交通量 e_{od} (左辺第二項) によって表されることを意味している。ただし、 \mathcal{K} は利用可能な全ての経路集合であり、 $w_{od,k}$ は、ある od について経路 k が利用であれば 1, それ以外の場合は 0 の値をとるパラメータである。 e_{od} は非負の連続変数 (制約条件式 (7)) であり、経路が利用可能でもリンク容量 M_a の制約から移動できない OD 交通量も含めることができる一般的な枠組みとなっている。制約条件式 (4) の左辺はリンク交通量を表しており $\delta_{a,k}$ は、経路 k がリンク a を通るならば 1, それ以外の場合は、0 の値をとるパラメータである。制約条件式 (6) の右辺はリンク a の途絶の状態を表しており、リンクが途絶した場合 ($\sigma_a = 1$) の交通量はゼロになり、途絶しない場合 ($\sigma_a = 0$) には、容量の上限 M_a までリンク交通量を増やすことができる。ここでは目的関数 (3) の第一項に見られるように、リンク a の所要時間は交通量に関わらず t_a で一定であり、交通混雑は生じないとしている。これは各リンクの交通量に対して交通容量が十分に大きい場合を考えたためである。この場合 【UE/Excess Demand】は、

【CS/Excess Demand】

$$\max_{\mathbf{x}, \mathbf{e}} CS(\mathbf{x}, \mathbf{e}|\sigma) = \sum_{od} \int_0^{\bar{q}_{od}} D_{od}^{-1}(w) dw - \sum_{od} \int_0^{e_{od}} D_{od}^{-1}(\bar{q}_{od} - w) dw - \sum_{a \in \mathcal{A}} t_a x_a \quad (8)$$

subject to (3), (4), (5), (6), (7)

と書き直すことができ 【UE/Excess Demand】は消費者余剰を最大化することと等価であることが知られている。ここで、最大の被害を 【CS/Excess Demand】から求められる消費者余剰を最小にするような被害と定義する。すなわち、道路ネットワークの利用者が利用者均衡条件にしたがって経路を選択した結果として得られる消費者余剰が、最小となるような途絶リンクの組

み合わせを求める問題を考える．途絶するリンク数を p 本としたとき，この問題は min-max 構造を持つ次のような Flow Interdiction 問題として定式化できる．

【MinMax-CS/FI】

$$\min_{\sigma} v \quad (9)$$

subject to

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} \sigma_a = p \quad (10)$$

$$\sigma_a \in \{0, 1\} \quad (11)$$

$$v \geq \max_{\mathbf{x}, \mathbf{e}} CS(\mathbf{x}, \mathbf{e}|\sigma) \quad (12)$$

and constraints (3), (4), (5), (6), (7)

(2) 非弾力的な需要関数の下での算出方法

a) 混合整数計画問題としての表現

道路リンクの途絶によって迂回の必要性が生じても移動しなくてはならない交通を考えるため，OD ペア間の所要時間に応じて交通需要が変化することのない次のような非弾力的な逆需要関数を考える．

$$D_{od}^{-1}(q_{od}) = \bar{c}_{od} \quad (13)$$

非弾力的な逆需要関数は交通ネットワークの最大容量を求める際にも用いられている．本研究では，OD ペアの交通所要時間が \bar{c}_{od} を上回った場合には，その OD 間の移動をとりやめるような迂回許容時間と解釈できる．この仮定の下で【CS/Excess Demand】を書き直すと，

【LP-Primal-CS/Excess Demand】

$$\max_{\mathbf{x}, \mathbf{e}} CS(\mathbf{x}, \mathbf{e}|\sigma) = \sum_{od} \bar{c}_{od}(\bar{q}_{od} - e_{od}) - \sum_a t_a x_a \quad (14)$$

subject to

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} w_{od,k} f_{od,k} + e_{od} = \bar{q}_{od} \quad \forall od \in OD \quad (15)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \delta_{a,k} f_{od,k} \leq C_a(1 - \sigma_a) \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad (16)$$

$$f_{od,k} \geq 0 \quad \forall od \in OD, k \in \mathcal{K} \quad (17)$$

$$e_{od} \geq 0 \quad \forall od \in OD \quad (18)$$

となる．目的関数式 (14) を，式 (3),(16) を用いて書き換えると

$$CS(\mathbf{x}, \mathbf{e}|\sigma) = \sum_{od} \sum_{k \in \mathcal{K}} (\bar{c}_{od} - c_{od,k}) w_{od,k} f_{od,k} \quad (19)$$

となる．ただし， $c_{od,k}$ は経路 k の所要時間を表す．この式から，【LP-Primal-CS/Excess Demand】では，ある OD ペア od の経路 k について $c_{od,k}$ が \bar{c}_{od} よりも大きい状況では $(\bar{c}_{od} - c_{od,k})$ が負となるため，式 (19) を最大化する上で $f_{od,k} = 0$ となるのが最適であり，その経路交通量は発生しない．したがって，本モデルにおいて \bar{c}_{od} は許容迂回時間を表しており，OD ペアごとに設定することが可能である．

【LP-CS/Excess Demand】の式 (14) の第一項 $\bar{c}_{od}(\bar{q}_{od})$ は定数であることを考慮し，双対問題は次のような最小化問題になる．

【LP-Dual-CS/Excess Demand】

$$\min_{\lambda, \theta, \phi} CS^{Dual}(\lambda, \theta, \phi|\sigma)$$

$$= \sum_{od} (\bar{c}_{od} - \lambda_{od}) \bar{q}_{od} - \sum_a C_a(1 - \sigma_a) \theta_a \quad (20)$$

subject to

$$\bar{c}_{od} \geq \lambda_{od} \quad \forall od \in OD \quad (21)$$

$$t_a \geq \phi_a \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad (22)$$

$$\sum_a \delta_{a,k} (\phi_a - \theta_a) \geq \sum_{od} w_{od,k} \lambda_{od} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (23)$$

$$\theta_a \geq 0 \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad (24)$$

【MinMax-CS/Excess Demand】と【LP-Dual-CS/Excess Demand】から制約条件式 (13) の下での【MinMax-CS/Excess Demand】は，次のような混合整数線形計画問題として解くことができる．

【MILP-CS/FI】

$$\min_{\lambda, \theta, \phi, \sigma, \xi} \sum_{od} (\bar{c}_{od} - \lambda_{od}) \bar{q}_{od} - \sum_a \xi_a \quad (25)$$

subject to

$$\xi_a \leq C_a \theta_a \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad (26)$$

$$\xi_a \leq M C_a (1 - \sigma_a) \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad (27)$$

$$\text{and constraints (10), (11), (21)-(24)} \quad (28)$$

式 (20) の第二項は非線形であるため，制約条件式 (26), (27) を用いて混合整数計画問題に書き換えた．ただし，制約条件式 (27) 中の M は十分大きな定数である．問題【MILP-CS/FI】が最小化問題であるという性質上 ξ_a は大きくなるのが望ましく， $\sigma_a = 0$ の場合， ξ_a は制約条件式 (26) で決まる．一方， $\sigma_a = 1$ の場合は，制約条件式 (27) によって ξ_a は 0 となる．これは第二項に $C_a(1 - \sigma_a)\theta_a$ を考えた場合と等価である．

b) 標準的な Flow Interdiction 問題との関連性

ここで Murray et al. などによって提案されている標準的な Flow Interdiction と本モデルとの関連性について議論する．Murray et al. によって提案されたモデルと本研究との違いは，利用者均衡条件の考慮の有無という違いが挙げられるだけでなく，モデルが想定する被害の考え方にも違いがある【LP-Primal-CS/Excess Demand】を解いて得られる目的関数および制御変数を σ の関数として $CS(\mathbf{x}^*(\sigma), \mathbf{e}^*(\sigma)), x_a^*(\sigma), e_{od}^*(\sigma)$ のように表すと

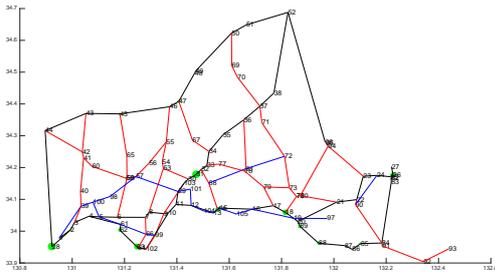


図-1 対象とするネットワーク

【MinMax-CS/FI】は

$$\max_{\sigma} \sum_{od} \bar{c}_{od} e_{od}^*(\sigma) + \sum_a t_a x_a^*(\sigma) \quad (29)$$

subject to

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} \sigma_a = p \quad (30)$$

$$\sigma_a \in \{0, 1\} \quad (31)$$

となる。ただし、 $\sum_{od} \bar{c}_{od} \bar{q}_{od}$ は σ によらない定数であるため、ここでは除外して考える。目的関数式 (29) では、途絶によって移動できなくなる交通量（第一項）と総所要時間の合計（第二項）で表されている。一方、Murray et. al では途絶によって移動できなくなる OD ペア数を取り扱っており、第一項のみを交通量も考えた定量的な評価や所要時間の増加も含めた意味での被害の考慮が求められている。すなわち本研究で提案したモデルでは、これらの要素も被害として考えることができる、より一般的な枠組みを提案したといえる。

3. データの作成

(1) 対象地域

本研究では、山口県の国道および高速道路から構成される道路ネットワークを対象とし、市役所および国道の交差点およびインターチェンジをノードとして設定し全部で 104 個のノード、142 本のリンクによって構成されている。管理者は国（以下、S）、県（以下、P）および NEXCO 西日本（以下、N）の 3 主体を考え、全リンクのうち、管理者 S が管理する道路リンクは 65 本、管理者 P が管理する道路リンクが 56 本、残りの 21 本は管理者 N である。

各 OD ペアの経路集合は Yen の K 番目経路探索法を用いて、最短経路から第 10 番目に所要時間の長い経路を列挙した。最適化計算は ILOG CPLEX ver 12.6.2 を使用して計算する。

4. まとめ

本稿では、ネットワーク全体の観点からリンクの優先度を評価する枠組みを提案した。発表会当日は、交通量を考慮した定量的な利便性を踏まえた場合と交通量を考慮しない公平性を踏まえた場合の優先度評価の計算結果を提示するとともに、関係機関へのヒアリングによって実用可能性の高い優先度評価手法を検討する。

参考文献

- 1) 高知県：高知県強靱化計画，2015。
- 2) 香川県：香川県国土強靱化地域計画，2015。
- 3) 山口県：山口県国土強靱化地域計画，2016。
- 4) 例えば，国土交通省中国地方整備局：平成 27 年度社会資本整備審議会道路分科会第 3 回中国地方小委員会資料 (<http://www.cgr.mlit.go.jp/bunkakai/h27/index3.htm>) 資料 2 (p21)，2015。
- 5) 秋田県：秋田県版道路事業費用便益分析マニュアル，2012。
- 6) 中山晶一郎：ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便益評価の一考察，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.67, No.2, pp.147-166, 2011.
- 7) 原田剛志，倉内文孝，高木朗義：リダンダンシーを考慮したアクセシビリティに基づく道路ネットワークの脆弱性評価，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.70, No.1, pp.76-87, 2014.
- 8) Church, R. and Scaparra, M.: Analysis of facility systems' reliability when subject to attack or a natural disaster, *Critical Network Infrastructure*, pp. 221-241, 2007.
- 9) O'Kelly, M. and Kim, H.: Survivability of commercial backbones with peering: a case study of Korean networks *Critical Infrastructure*, pp. 107-128, 2007.
- 10) Murray, A.T., T.C. Matisziw, and T.H. Grubestic.: Critical network infrastructure analysis: interdiction and system flow, *Journal of Geographical Systems*, Vol.39, 2007.
- 11) Matisziw, C., Murray, A.T. and Grubestic, T.H.: Bounding network interdiction vulnerability through cutset identification. *Critical Infrastructure*, pp.243-256, 2007.
- 12) Yen, J. Y.: Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network *Management Science*, Vol.17 No.11, pp.712-716, 1971.
- 13) 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-，土木学会，1998. *Contributions to the Theory of Games*, Annals of Mathematics Studies, Vol.28, pp.307-319, 1953.

(平成 28 年 4 月 22 日 受付)