

# 複数経路の確保を前提とした 耐震化費用を最小とする緊急輸送道路整備計画

杉浦 聡志<sup>1</sup>・倉内 文孝<sup>2</sup>・高木 朗義<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 岐阜大学助教 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)  
E-mail:sugi\_s@gifu-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)  
E-mail:kurauchi@gifu-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)  
E-mail:a\_takagi@gifu-u.ac.jp

緊急輸送道路は広域災害時の物資や救急搬送などの輸送のために各防災拠点間をできる限り複数の経路が確保できるよう各都道府県により指定されている。道路管理者は緊急輸送道路のリンク途絶を防ぐため整備を進めている。ただし、この整備費用は大きく、これに無配慮に緊急輸送道路を指定すれば、全体事業費の増大はもちろん、予算制約により整備完了までの工期が長くなることで、効果の発現が遅れることも考えられる。そこで本研究では、事前の整備により災害の影響が極めて小さいリンクの存在を前提として、その整備費用を最小とする複数経路を確保した緊急輸送道路整備計画立案モデルを提案する。ネットワークを用いた試算により提案したモデルの挙動を確認する。

**Key Words :** *Improvement Planing, Emergency Route, Mixed Integer Linear Programming Problem*

## 1. はじめに

緊急輸送道路は広域災害時における物資や救急搬送などの輸送のために各都道府県により指定されている。緊急輸送道路を指定するときには多重性を確保するため、各防災拠点間をできる限り複数の経路で接続するよう配慮している(例えば徳島県<sup>1</sup>)。各道路管理者は緊急輸送道路に指定された道路について、橋梁耐震対策や斜面对策により被災時にリンクが途絶しないよう整備を進めている。しかしながらこの整備費用は大きく、これに無配慮に緊急輸送道路を指定すれば、全体事業費が増大する。また、予算制約により整備完了までの工期が長くなることで、効果の発現が遅れることも考えられる。したがって、事前に道路ネットワークの耐震化整備費用を把握し、必要な防災拠点間経路を複数確保する前提において整備費用を最小とするような緊急輸送道路を指定できれば、防災事業効率化の一助となろう。以上を踏まえて、防災拠点間の複数経路を確保する制約の下、耐震対策費用が最小となる緊急輸送道路を指定し、整備箇所を特定するモデルを構築する。構築したモデルをネットワークで試算し、挙動を確認する。

## 2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

### (1) 災害時における道路接続性評価に関する研究

災害時における道路網の接続性を評価するアプローチは、Wakabayashi and Iida<sup>2)</sup>などの信頼性、岡田ら<sup>3)</sup>などの多重性、Kurauchi et al.<sup>4)</sup>などの脆弱性が提案されている。これらの研究は道路網、あるいはその構成要素を評価する方法について議論したものであり、道路網整備の計画問題まで取り扱ったものではない。

南ら<sup>5)</sup>は道路途絶が生じたときの機能低下が小さい道路を選定することで2つの経路を確保するネットワーク構成問題を定義し、解法を提案している。提案された方法では、ある都市から1つ目の目的地への機能低下が小さい経路を指定する。指定された道路を与件として、機能低下の制約を満足しつつ整備費用最小となるように、2つ目の目的地への経路を指定する。近藤ら<sup>6)</sup>は災害による道路の途絶リスクと公的サービスの享受機会を表現する指標を開発し、この指標に基づいて最適投資となる道路網、医療施設計画モデルを立案している。

### (2) 本研究の位置づけ

本研究では信頼性評価はインプットとなる事象の発生確率を精度よく推定することが容易ではないという認識

に基づいて脆弱性の概念を援用する。Kurauchi et al.<sup>4)</sup>は OD間に複数の経路が確保され、その経路間でリンクの重複を認めない「非重複経路」の概念を採用している。非重複経路数の最大化問題の求解によって、頑強な道路網の形状把握を目指している。しかし、この方法を用いて緊急輸送道路を指定するとき、ネットワークが疎な地域においてリンク重複を認めなければ複数の経路を確保できない場合も考えられる。このとき、複数経路を確保するためには道路の新規建設が必要となるが、非災害時の便益が小さければ投資合理性の面から現実的ではないだろう。ここで、十分な耐震化などの整備、あるいは迅速な復旧が可能となるような事前の準備により、災害による影響が極めて小さいリンク(以下、強化リンクという)を考える。強化リンクは、整備のために費用を必要とするが、経路間の重複を認めてもネットワークの脆弱性に影響がないという仮定をおく。強化リンクの存在によりリンクの重複を認めれば、ネットワークが疎な地域においても複数経路を確保することができる。そこで本研究では強化リンクの存在を前提とし、整備費用を最小とする複数経路を確保した緊急輸送道路整備計画立案モデルを提案する。

### 3. 緊急輸送道路整備計画立案モデル

#### (1) モデルの構築方針

本研究で提案するモデルは以下の要件を持つものとする。緊急輸送道路の指定においては接続が必要なODペアに対して、任意の複数経路を確保する。各リンクの整備費用は事前に調査されており、既知であるとする。費用最小とするために、強化リンクは少ない方が有利であることから、接続が必要な全てのODを同時に考慮することで異なるODでの共有を図る。あまりに冗長な経路は緊急輸送の目的を鑑みれば不適切であると考え、経路の所要時間上限も設ける必要がある。

#### (2) 定式化

道路ネットワーク上のリンクは全て有向リンクで定義する。リンク $a$ はその集合 $A$ において $a \in A$ で定義する。耐震化整備では上下線が分離されず共有された道路の場合、上下線を同時に施工されると想定される。そのため、該当する道路においては上下線を同期させた。区間として整備の是非を判断する必要がある。そこで、複数のリンクを含む道路の区間 $k$ を定義し、その集合 $K$ において $k \in K$ で表現する。この定義において $k(a)$ はリンク $a$ が存在する道路区間 $k$ のことを指す。緊急輸送道路整備計画立案モデルは道路区間 $k$ における整備是非を示すデザイン変数 $y_k$ 、ODペア $w$ における経路を検討するための

デザイン変数 $x_{wa}$ の2つを定義する。定式化にあたって必要となる変数を以下に示す。

- $x_{wa}$  : リンク $a$ を通過するODペア $w$ の経路数を示す正の整数 (未知変数)
- $t_a$  : リンク $a$ の所要時間
- $y_k$  : 区間 $k$ を強化整備するのであれば1, そうでなければ0をとる二値変数 (未知変数)
- $c_k$  : 道路区間 $k$ を強化するための費用
- $P_w$  : ODペア $w$ の必要経路数
- $W$  : 接続すべきODペアの集合
- $T_w$  : ODペア $w$ における目標到達平均時間
- $S_{wa}$  : リンクの重複可否を示す変数
- $H$  : 十分に大きい数
- $n$  : 道路ネットワーク上のノード
- $N$  : ノードの集合
- $K$  : 道路区間の集合
- $A$  : リンクの集合
- $o_w$  : ODペア $w$ の出発地ノード
- $d_w$  : ODペア $w$ の目的地ノード
- $In(n)$  : ノード $n$ に流入するリンクの集合
- $Out(n)$  : ノード $n$ から流出するリンクの集合

以上の要件を踏まえると、緊急輸送道路整備計画立案モデルは二値の整備戦略をもつネットワークデザイン問題で記述でき、次のような混合整数線形計画問題で定式化できる。

$$\min \sum c_k y_k \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{a \in A} \frac{x_{wa} t_a}{P_w} \leq T_w \quad \forall w \in W \quad (2)$$

$$\sum_{a \in Out(o_w)} x_{wa} = P_w, \quad \sum_{a \in Out(d_w)} x_{wa} = 0 \quad \forall w \in W \quad (3)$$

$$\sum_{a \in In(o_w)} x_{wa} = 0, \quad \sum_{a \in In(d_w)} x_{wa} = P_w \quad \forall w \in W \quad (4)$$

$$\sum_{a \in In(n)} x_{wa} - \sum_{a \in Out(n)} x_{wa} = 0 \quad (5)$$

$$\forall n \in N, n \neq o_w, n \neq d_w, w \in W \quad (6)$$

$$x_{wa} \leq S_{wa} \quad (6)$$

$$S_{wa} = H y_{k(a)} + (1 - y_{k(a)})$$

$$\forall w \in W, a \in A$$

$$x_{wa} = \{0, 1, 2, \dots\}, y_k = \{0, 1\} \quad (7)$$

$$\forall a \in A, w \in W, k \in K$$

定式化の解説を加える。(1)式は強化リンクの整備費用合計を示す目的関数である。(2)式はODペア間経路の平均所要時間に関する制約条件であり、冗長な経路の生

成を回避するためのものである。(3), (4), (5)式はフロー保存則を示しており, (3), (4)式は起終点ノードにおける条件, (5)式は起終点以外のノードにおける条件である。(6)式は経路間のリンク重複に関する条件である。整備が実施される, すなわち $y_k = 1$ のときは,  $S_{wa}$ が大きな値となり, リンクの重複を認め,  $y_k = 0$ のときは $S_{wa} = 1$ となり, 重複を認めない。(7)式はデザイン変数の取りうる値に関する条件である。

なお, 本稿では取り扱わないが, 新規建設の計画があるリンクをネットワークに配置し, 建設コストを $c_k$ に設定すれば, 新規リンクの建設による経路確保の有意性もこの定式化で検討できる。

#### 4. ネットワークにおける試算

緊急輸送道路整備計画立案モデルをネットワークで試算する。ネットワークは岐阜県内の国道, 主要地方道, 一般県道, 都市計画道路, 高速道路を対象としたもので, リンク数は有効リンクで4,768, ノード数は1,780である。県内の主要10都市の市役所を緊急輸送用の拠点として, それぞれの組み合わせを接続が必要なODとする。起終点間経路は対称であると仮定し, ODペア数は45である。(2)式で用いられるODペア間経路の平均所要時間 $T_w$ は, 各ODペア間で最短経路探索により最小となる所要時間を求め, その値に1.5を乗じた値とした。(3), (4)式における全ODペアについて必要な経路数 $P_w$ を3とする。各リンクの整備費用 $c_k$ は事前の調査により求めることが必要であるが, 本稿ではモデルの挙動確認を主目的とするため, 乱数で与えた。

以上の条件で試算した結果, 図-1から4に示す結果を得た。図中緑色の菱形が緊急輸送拠点である。図-1で通過経路数が0でないリンクが緊急輸送道路として指定されるリンクである。図中で通過経路数が大きいリンクは主に高速道路である。図-2で赤色のリンクは強化するリンクである。いずれも県南部のネットワークが疎な地域で生じていることが確認できる。図-3は都市部のネットワークが密な地域のOD間経路を示す。経路が通過するリンクのほとんどが重複しておらず, 岐阜県庁付近の1つリンクが重複している。拠点にごく近い地点ではアクセスする道路が限られるため, やむを得ず重複する場合がある。図-4は山間地を経由するOD間経路を示す。図中中央に, 通過経路数が3のリンクが連続していることがわかる。これらのリンクはいずれも高速道路である。OD間に高速道路があれば最小所要時間が小さくなり,  $T_w$ が小さくなる。そのため, OD間に有力な代替路がないときは(2)式の制約により高速道路を強化リンクとする解が最適となると考えられる。図-4の場合には高速道

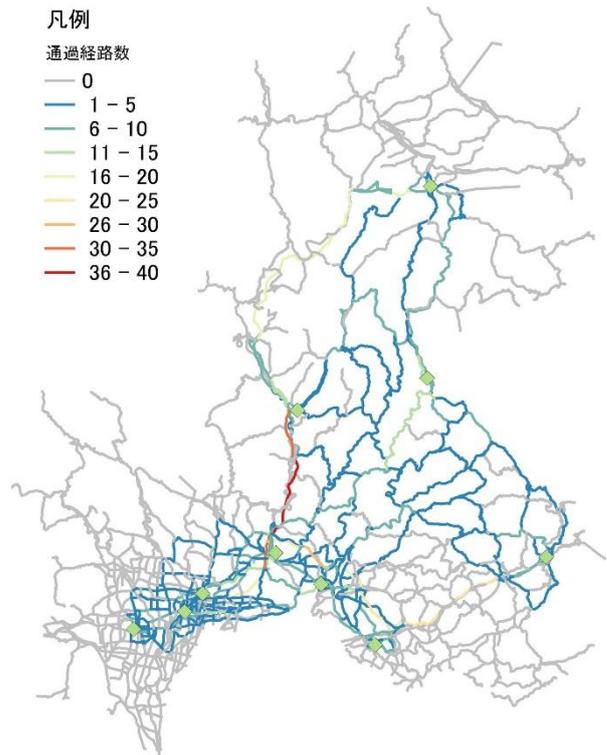


図-1 リンクの通過経路数

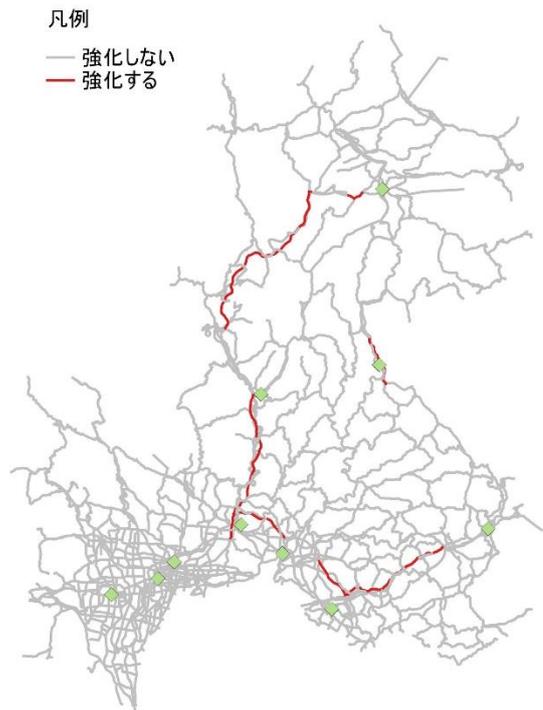


図-2 強化するリンクの位置

路に並走する一般国道があるが, 本試算ではOD間必要経路数を3で設定しているため, (2)式の制約を満たすような3つ目の経路が確保できないと考えられる。このように(2)式の条件によっては長距離にわたる整備が必要となり, 費用が膨大となることも考えられる。予算等の制約により整備の実施が困難となるときには, あまりに冗長な経路が生じないように留意しつつ, (2)式の $T_w$ を緩

和することで費用を削減することも検討できる。

## 5. おわりに

本研究では事前の整備により災害の影響が極めて小さいリンクの存在を前提として、その整備費用を最小とする複数経路を確保した緊急輸送道路整備計画立案モデルを提案した。ネットワークを用いた試算により提案したモデルの挙動を確認した。試算の結果、OD間のネットワークの条件によっては、リンク整備を長距離にわたって必要とするODも生じることがわかった。ただし、これはOD間経路所要時間の上限値設定によって緩和できると考えられ、あまりに冗長な経路が生じないように留意しつつ、適当な値を設定することもできる。

今後の課題を以下に挙げる。本研究では事前の準備により災害の影響が極めて小さいリンクの存在を前提としているが、このためにはどのような整備が必要なのか、明らかでない。また、本稿では耐震化を対象とした。しかし、災害の種類によっては、あるいは人為的な破壊行為を対象とする場合において強化リンクの仮定は成立しないことも考えられる。したがって、緊急輸送道路が機能を発現すべき対象範囲を検討したうえで、整備の方法、費用を求める必要がある。

本試算では10市役所間の接続を検討した。しかしながら、緊急輸送道路は救急救命医療の拠点や消防、警察など多くの施設を接続する必要がある。各種施設は災害時における機能は異なるため、それぞれの重要性を鑑みて、機能に応じた階層的な検討が必要である。具体的には、ODペアの接続重要性によって複数のステップで順に緊急輸送道路の指定、強化リンクの抽出を行い、上層のステップの解を下層のステップの制約条件に設ける方法が考えられる。

### 参考文献

- 1) 徳島県緊急輸送道路整備計画等検討協議会：徳島県緊急輸送道路ネットワーク計画，pp.2，2012。  
[<http://www.pref.tokushima.jp/docs/2012070900201/files/01network-keikaku.pdf>]，（最終閲覧日：2016年4月21日）
- 2) Wkabayashi, H. and Iida, Y.: upper and lower bounds of terminal reliability of road networks; an efficient method with Boolean algebra. Journal of Natural Disaster Science,

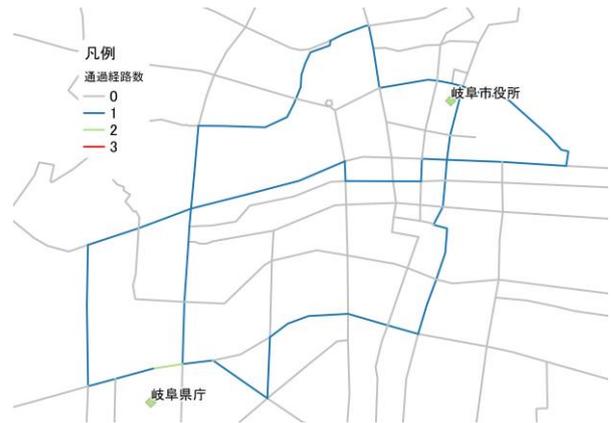


図-3 都市部におけるOD間経路の例

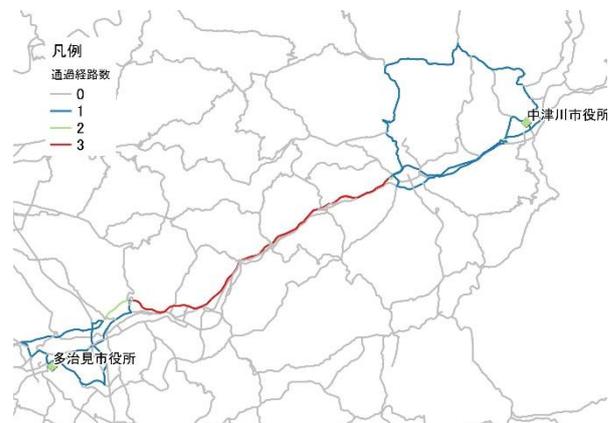


図-4 山間地を経由するOD間経路の例

- 14(1), 29-44, 1992
- 3) 岡田憲夫, 梶谷義雄, 榊原弘之, 多々納裕一：直下型地震の発生を想定した都市圏道路網の分散・集中特性の性能評価モデルに関する研究，土木学会論文集，No.632，1999.10，pp.93-104.
- 4) Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A. and Seto, Y.: Network evaluation based on connectivity vulnerability, Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee, pp.637-679,2009.
- 5) 南正昭, 高野伸栄, 加賀屋誠一, 佐藤馨一：拠点的医療施設へのアクセスを2系統で保障する道路ネットワーク構造，土木計画学研究・論文集，No.14，pp.679-686，1997.
- 6) 近藤竜平, 塩見康博, 宇野伸宏：アクセシビリティと連結信頼性を考慮した道路網・医療施設計画モデル，土木計画学研究・論文集，pp. 579-588，2010.

(2016.4.22 受付)

## IMPROVEMENT PLANNING OF EMERGENCY ROUTE ASSUMED ENSURING MULTIPLE ROUTE WITH MINIMIZING THE CONSTRUCTION COST

Satoshi SUGIURA, Fumitaka KURAUCHI and Akiyoshi TAKAGI