

大規模地震被災者搬送のための道路・医療施設耐震化計画モデル*

Optimal Seismic-Proof Reinforcement Planning, Considering Transportation of Injured People*

奥村誠**・堀内智司***

By Makoto OKUMURA**・Satoshi HORIUCHI ***

1. 本研究の目的と既存研究

島嶼部における架橋や高速道路の整備効果として、大規模地震時等の災害時における死亡リスクを小さくすることが期待されており、実際、高速道路の IC 近くに高次救急医療施設を移転させた国立病院岡山医療センターや、救急車専用の高速道路出口を整備した山形県立中央病院などの例がある。

大規模地震発生時には広域で同時多発的に発生する被災者をいかに早く病院へ搬送して治療を行うかが重要であるが、このとき医療機関の患者受け入れ体制が十分であっても、道路の渋滞や寸断によってスムーズな搬送ができなければ適切な治療を行うことは不可能となる。近年の自治体財政の緊迫化により公立病院の閉鎖や統合が検討されている中で、医療機関の耐震化と道路の整備の効果的な組み合わせを検討することは、多くの地域の喫緊の課題となっている。そのためには、道路寸断が被災者の搬送に及ぼす影響を考慮する必要がある。

従来から、災害時などの道路の寸断の可能性を踏まえ、交通サービスの信頼性を評価する方法について多数の研究が蓄積されており、その概要は倉内ら¹⁾に簡潔にまとめられている。震災直後では迅速に被災者などを搬送できるかという物理的な連結性が問題になり flow independent な状況を想定すればよいのに対して、数日後からは通常時の交通分布や経路選択のパターンと整合するサービスが提供できるかが問題となり、flow dependent な状況を考慮する必要が生じる²⁾。そのような選択行動を前提とした耐震化の便益評価についても研究がなされつつある³⁾。一方で、震災直後の医療施設への搬送の実態を踏まえて、施設をいかに有効に活用するかという視点に立った分析も行われている⁴⁾。

道路ネットワークと医療施設の組み合わせに着目した

*キーワード：防災計画，計画手法論

**正会員，博（工），東北大学東北アジア研究センター
（仙台市青葉区川内41番地，
TEL022-795-7571, FAX022-795-7477,
E-mail: mokmr@cneas.tohoku.ac.jp)

***学生会員，東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
（E-mail: hori@cneas.tohoku.ac.jp)

ものとして、筆者らは震災により受け入れ能力が低下した医療施設への重傷者搬送問題を取りあげ、死亡リスクを最小化するような搬送の割り当てを線形計画モデルとして定式化した⁵⁾。しかしながら、道路施設の被災の影響を考える上では、同モデルの係数を外生的に操作しながら繰り返し問題を解く必要があり、最適な耐震化案を得ることは困難であった。

近年、施設利用に関わる移動コストを最小化する数理解計画問題において、人為的なテロや自然災害により一部の施設の機能が停止することの影響把握⁶⁾や、そのような機能停止を未然に防止する防衛策を最適化する問題の提案⁷⁾が行われている。本研究はこれらの定式化を参考にして、道路網の耐震化と医療施設の耐震化を総合的に比較して大規模地震直後の被災者搬送中の死亡リスクを最小化するような数理解計画モデルの提案を行う。提案するモデルは少数の0-1変数を含む混合整数計画問題となっており、既存の数理解計画法のパッケージにより計算可能であることを示す。

2. 耐震化問題の設定

(1) 計算対象のネットワークと救急医療施設

対象地域において、 $|A|$ 個のノードと $|K|$ 個の有向リンクからなる道路ネットワークを考える。ノードのうち $|I|$ 個は居住ゾーンを代表するセントロイドである。ノード $a \in A$ に流入するリンクの集合を M_a で、流出するリンクの集合を L_a と表す。一方、地域内には $|J|$ 個の救急医療施設が存在する。

この地域において異なるタイプの地震が $|H|$ 種類想定されており、被災パターン $h \in H$ によって各居住ゾーン $i \in I$ で P_i^h 人の重傷者が発生するとともに、道路リンクの一部が被災して通行が不能になると想定されている。この通行可能性を0-1変数 S_k^h で外生的に与える。また通行可能時のリンクの所要時間は交通量と無関係であると仮定して d_k^h で与える。

各居住ゾーンの被災者を、通行可能な道路リンクを辿って近隣の救急医療施設に運ぶ。ただし各施設には容量制約が存在し、その値は被災パターンにより異なる。被災パターン $h \in H$ のもとでの救急医療施設 $j \in J$ の

受け入れ可能重傷者数を Q_j^h とする。

救急医療施設への重傷者搬送中の死亡確率は、カーラの救命曲線と呼ばれる所要時間 t に対するSカーブ状の関数 $g(t)$ で与えることができる⁵⁾。後に本研究では数理的な取り扱いを容易にするためにこの関数を以下のような折れ線により近似し、所要時間に対する線形関数として扱う。

$$g(t) \approx \begin{cases} 0 & (t < t_1) \\ g \cdot (t - t_1) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ 1 & (t_2 < t) \end{cases} \quad (1)$$

(2) 計画問題の内容

ここでは道路リンクの耐震化と救急医療施設の耐震化という2種類の政策を実行できると仮定する。道路リンク $k \in K$ の耐震化には c_k の費用を要するが、その実施により被災パターン $h \in H$ のもとでの通行可能性を ΔS_k^h だけ向上させることができる。 ΔS_k^h も0-1変数であり、通行不能が解消されるか、効果がないかのどちらかであると仮定してその値は外生的に与える。この道路リンク耐震化の実施の有無を、0-1変数である Z_k で表現する。一方、救急医療施設 $j \in J$ の耐震化には e_j の費用を要するが、その実施により被災パターン $h \in H$ のもとでの受け入れ可能重傷者数を ΔQ_j^h だけ増加させることができる。救急医療施設耐震化の実施の有無を、0-1変数である Y_j で表現する。

我々が解くべき問題は、耐震化のための総費用が B を超えないという制約のもとで、重傷者搬送中の死亡リスクを最も減少させるように、耐震化すべき道路リンクと救急医療施設の組み合わせを求めることである。このとき、被災パターンの発生について不確実性があるため、以下のような2つの考え方を取ることができる。

- それぞれの被災パターン $h \in H$ の発生確率 ϕ^h が与えられているものとし、死亡リスクの期待値を最小化する問題を解く。
- 最も大きな死亡リスクを与えるような最悪の被災パターンを想定し、その死亡リスクを最小化する問題（ミニマックス問題）を解く。

3. 最適耐震化問題の定式化

(1) 定式化のための準備

ネットワークにおける交通流と救急医療施設の利用を統合的に取り扱うため、道路ネットワークに救急医療の終了を意味する1つの仮想ノード f と、以下の2種類の仮想リンクを付け加える。1つは救急医療施設の利用を表す仮想リンク $j \in J$ で、施設に隣接する交差点ノードから仮想ノード f に向けて移動時間 $d_j^h = 0$ の

リンクを設定する。第2は居住地域の孤立などが発生して、救命が期待できる時間内 ($t \leq t_2$) に救急医療施設に輸送できない重傷者が発生することを表現するための仮想リンクである。居住地域のセントロイド $i \in I$ から仮想ノード f に向けて移動時間 $d_i^h = t_2$ を持つリンクを設定する。仮想リンクを含めたリンク集合を \bar{K} とする。

(2) 死亡リスクの期待値を最小化する耐震化政策

被災パターン $h \in H$ において、居住ゾーン $i \in I$ において発生した重傷者 P_i^h の輸送に対してリンク $k \in \bar{K}$ を用いる割合を表現する変数 x_{ik}^h を導入することにより、死亡リスクの期待値を最小化する問題は以下のような数理計画問題として定式化できる。

$$\min_{x, Y, Z} W_\Phi = \sum_{h \in H} \phi^h \sum_{i \in I} P_i^h g\left(\sum_{k \in \bar{K}} d_k^h x_{ik}^h\right) \quad (2)$$

s. t.

$$x_{ik}^h \leq S_k^h + \Delta S_k^h Z_k \quad \forall k \in K, \forall i \in I, \forall h \in H \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} P_i^h x_{ij}^h \leq Q_j^h + \Delta Q_j^h Y_j \quad \forall j \in J, \forall h \in H \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} c_k Z_k + \sum_{j \in J} e_j Y_j \leq B \quad (5)$$

$$Z_k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$Y_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{k \in L_i} x_{ik}^h \geq 1 \quad \forall i \in I, \forall h \in H \quad (8)$$

$$\sum_{k \in M_f} x_{ik}^h \geq 1 \quad \forall i \in I, \forall h \in H \quad (9)$$

$$\sum_{k \in L_a} x_{ik}^h = \sum_{k \in M_a} x_{ik}^h \quad \forall a \in A - \{i\}, \forall i \in I, \forall h \in H \quad (10)$$

$$0 \leq x_{ik}^h \quad \forall i \in I, \forall k \in \bar{K}, \forall h \in H \quad (11)$$

目的関数の(2)式は、居住地ごとに救急医療施設までの搬送時間を通過リンクの所要時間を用いて求め、そこから死亡リスクに換算した上で重傷者数に乗じている。その値を被災パターンごとの発生確率で重み付けをして、期待値を求めている。(1)式のように折れ線近似を行うと、この問題は定数係数の混合整数計画問題となり、整数変数の個数が少ないことから一般の線形計画法のパッケージで実用解を得られる可能性が大きい。

(3)式は道路リンクの利用可能性に関する制約、(4)式は救急医療施設の容量に関する制約で、いずれも耐震化の実施により緩和されることを表している。(5)式は複数の耐震化を行う際の予算制約式である。(6)式と(7)式

は、耐震化の決定はそれを行うか、行わないかという2者択一的な決定であることを示している。

(8)式で居住ゾーンごとにすべての重傷者が搬送の対象となることを保障する。(9)式は重傷者がいずれかの救急病院に搬送されるという条件であるが、救命が期待できる時間 t_2 内で搬送できない場合には、救急医療施設の容量を消費しないように搬送を行わないことを認めている。本モデルの定式化ではその割合が仮想リンクの変数 x_{ii}^h として算出されるので、その上限値に関する制約を設けたり、目的関数に仮想リンク変数に対するペナルティコストを加算することも可能である。(10)式はネットワーク上の交通流の保存条件であり、(11)式は交通流の非負条件である。

(3) 最悪の被災パターンの下での死亡リスク最小化

もう一つの考え方として、どのような被災パターンが発生するのかわからない以上安全側を考え、最も大きな死亡リスクを与えるような最悪の被災パターンを想定し、その死亡リスクを最小化するという問題(ミニマックス問題)を考えることができる。この問題は、先の問題の目的関数(2)式を以下のように置き換えることによって定式化できる。(3)式から(11)式までの制約条件は同一である。

$$\min_{W, x, Y, Z} W \quad (12)$$

$$\text{s. t. } W \geq \sum_{i \in I} P_i^h g \left(\sum_{k \in K} d_k^h x_{ik}^h \right) \quad \forall h \in H \quad (13)$$

目的関数の W は、最悪の被災パターンのもとでの死亡リスクを表しており、その条件を(13)式により保障している。(13)式右辺の死亡リスク関数を(1)式を用いて折れ線で近似すれば、この問題もやはり少数の0-1変数を持つ混合整数計画問題となる。

4. 小規模な計算例

(1) 計算対象ネットワークと想定地震被害

図1のように6つの居住ゾーン(I)のセントロイドをノード(A)とする7本の有向リンクからなるネットワークを考える。リンクの横の数字は通常時の所要時間(分)である。円で囲った3つの都市に救急医療施設(J)があり、その横の斜体の数字が受け入れ能力を表わしている。準備段階として、1つの仮想ノードと3本の医療施設利用の仮想リンク、6本の時間超過の仮想リンクを追加するので、計算はノードが7つリンクが23本のネットワークを用いて行うことになる。

この地域には2つのタイプの地震(H)が同程度の確率 $\phi^h = 0.5$ で想定されている。海洋型の地震では図2のように、セントロイドのゴチック数字で示した重傷

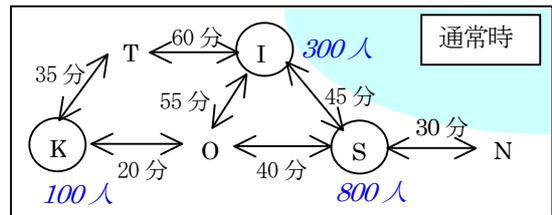


図1 計算例のネットワークと通常時所要時間

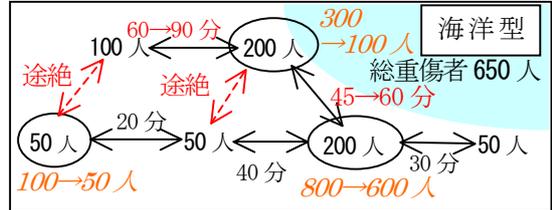


図2 海洋型地震による重傷者数と道路、救急医療施設の能力の変化

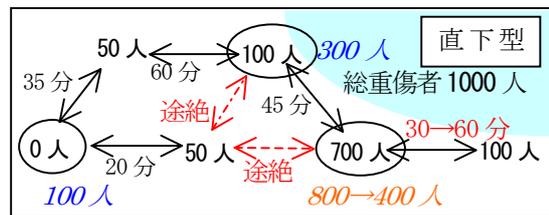


図3 直下型地震による重傷者数と道路、救急医療施設の能力の変化

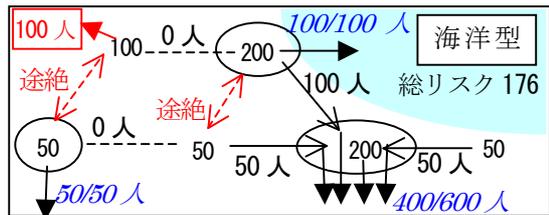


図4 耐震化なし海洋型地震時の最適輸送パターン

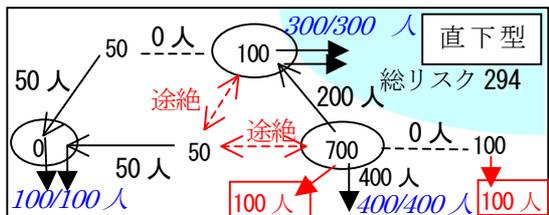


図5 耐震化なし直下型地震時の最適輸送パターン

者は、I市を中心に全域で発生し、医療施設の能力低下、2つの道路区間の途絶と2区間での所要時間の増加が発生すると想定する。直下型の地震では図3のように、重傷者が人口が多く震源に近いS市を中心に大量に発生し、同時にS市の医療機関の能力低下とS市の周辺の道路区間の途絶、所要時間の増加が発生すると想定する。

(1)式による死亡リスクの計算に当たり $t_1 = 0$ (分)、 $t_2 = 125$ (分)、 $g = 1/125 = 0.008$ と設定した。

計算には、GNUフリーウェアである線形計画法の計算パッケージglpkのver4.8を用いた。このパッケージは整数変数及び0-1変数を明示的に指定すると、整数緩和問題を上界として用いた分枝限定アルゴリズムによって効率的に計算する機能を有している。

表1 予算制約の変化による最適耐震戦略の変化

総予算 B (億円)	死亡リスク期待値の最小化								最悪被災パターンでの死亡リスク最小化							
	目的 関数値	増分	医療施設Y(j)			道路Z(k)			目的 関数値	増分	医療施設Y(j)			道路Z(k)		
			K市	S市	I市	KT	OI	OS			K市	S市	I市	KT	OI	OS
0	235	-	0	0	0	0	0	0	294	-	0	0	0	0	0	0
10	223	12	0	0	0	1	1	0	294	0	1	0	0	0	0	0
20	197	26	0	0	1	0	0	0	294	0	1	0	0	1	1	0
30	193	4	1	0	1	0	0	0	294	0	0	0	0	1	1	1
40	123	70	0	1	0	0	0	0	176	118	0	1	0	0	0	0
50	111	12	0	1	0	1	1	0	152	24	0	1	0	1	1	0
60	85	26	0	1	1	0	0	0	100	52	0	1	1	0	0	0
70	81	4	1	1	1	0	0	0	92	8	1	1	1	0	0	0
75	74	7	1	1	1	1	0	0	78	14	1	1	1	1	0	0
90	74	0	1	1	1	1	0	0	78	0	1	1	1	1	0	0

まず、耐震化予算 $B = 0$ として (2)-(11) 式の問題を解くことにより、現況の地震発生時における重傷者の最適搬送パターンを求めることができる。その結果を図4と図5に示している。

(2) 耐震化オプションの設定

道路の耐震化は、途絶が生じる可能性がある3つの区間において実施可能で、それにより通常時の所要時間で通行できるようになると仮定する。費用はKT間10億円、OI間5億円、OS間5億円とする。救急医療施設の耐震化はK市10億円、S市40億円、I市20億円で実施でき、その結果、地震時にも通常時と同じ容量の重傷者を受け入れるようになるものと仮定する。

(3) 予算制約の変化による最適耐震戦略の変化

2つのモデルで、耐震化の総予算 B の値を10億円ずつ増加させて最適解を求めた。その結果を表1に示している。これより、総予算が40億円未満ではミニマックス問題では目的関数値が改善できない。それ以上の予算額では2つのモデルの最適解は一致する。つまり、予算制約の範囲でできるだけ多くの医療施設の耐震化を図り、余った分で道路の耐震化を行うことが望ましいことがわかる。10億円ごとの目的関数値の変化を見ると、重傷者の数が多くネットワーク上も中央に位置するS市の医療施設の限界的效果が極めて大きい。I市の医療施設の耐震化の効果は中程度であるが、規模が小さく被災地から離れているK市の医療施設の耐震化効果は小さい。

さらに3つの医療施設と3区間の道路というすべての耐震化オプションが可能な額 ($B = 90$) の予算が設定されても、2つの道路区間の耐震化は選択されないことがわかる。これは、3つの救急医療施設とKT間の道路の耐震化によって重傷者を最も近い施設で受け入れ可能となるため、それ以上の道路の耐震化を行っても効果が生じないことによる。

5. おわりに

本論文では、最適耐震化計画問題の枠組みとモデルの定式化を述べ、簡単な事例により、予算制約に応じて異なる組み合わせの耐震化が得られることを示した。実際の計画問題の規模のネットワークデータにおける計算は今後の課題とする。

参考文献

- 1) 倉内文孝・宇野伸宏・嶋本寛・山崎浩気：交通ネットワークサービスの信頼性解析に関する研究動向，土木計画学研究・講演集CD-ROM, Vol.35, No.215, 2007.
- 2) 長江剛志，藤原友，朝倉康夫：GIS と需要変動型利用者均衡配分を用いた道路ネットワーク耐震化の便益評価，土木計画学研究・論文集，Vol. 24, No. 2, 233-242, 2007.
- 3) 長江剛志，藤原友，朝倉康夫：利用者均衡配分を内生化した都市圏道路ネットワークの耐震化問題，土木計画学研究・講演集，No.37, CDROM, 2008.
- 4) 小池則満，宇治和幸，秀島栄三，山本幸司，深井俊英：震災時における傷病者行動特性と搬送計画に関する一考察，土木計画学研究・論文集，vol.18, pp.325-330, 2001.
- 5) 奥村誠，塚井誠人，安村勇亮：大規模地震による重傷者の搬送計画モデル，交通工学研究発表会論文報告集，Vol. 26, pp. 903-912, 2006.
- 6) Church, R.L., Scaparra, M.P., and Middleton, R.: The r-interdiction Median Problem and the r-interdiction Covering Problem, Annals of the Association of American Geographers, 94, pp.491-502, 2004.
- 7) Church, R.L. and Scaparra, M.P.: Protecting Critical Assets: The r-interdiction Median Problem with Fortification, Geographical Analysis, 39, pp.129-146, 2007.