高速道路点検による待ち時間を考慮した耐震化計画モデル*

Optimal Seismic-Proof Reinforcement Planning, considering Inspection Time of Expressway Links*

佐々木和寛**・奥村誠***・大窪和明****
By Kazuhiro SASAKI**・Makoto OKUMURA***・Kazuaki OKUBO****

1．はじめに

大規模地震発生時には広域で同時多発的に発生する重傷者をいかに早く病院へ搬送するかが重要である．筆者らは，大規模地震発生直後の重傷者搬送中の死亡リスクを最小化するような道路網と医療施設の耐震化を求める混合整数線形計画モデルを提案し[1]，一県レベルの実用的規模の問題を求解できることを確認した[2]．さらに，その枠組みを用いて，地震発生直後から高速道路の通行を維持することが，一般道路や医療施設の耐震化費用を節約する効果を持つことを示した[3]．

しかし，高速道路会社の実際の運用では，観測所での計測震度が4.5度を上回ると，その観測所付近の高速道路区間を一時通行止めにしている[4]．その後，点検部隊が通行止め区間を巡回し安全が確認された後に初めて開放されることになるため，地震発生直後の搬送に高速道路を利用できないのが現状である．

例えばNEXCO東日本では，過去の大地震時に高速道路が二次的な災害の拡大の防止に役立ったという経験を踏まえて，支社ごとにできる限り早期に点検が実施できるように対応訓練などを行っている．しかしどの程度の時間を目標に点検を行うべきなのか，それに伴う人員や資源の追加的投入の意義があるのかという点について，定量的な議論が行われているわけではない．

高速道路の点検体制を強化すれば，通行止めの時間を短縮できると考えられるが，この点検体制の計画と，道路と医療施設の耐震化計画との関連性については，2つの異なる考え方を採ることができる．1つ目として，高速道路の点検体制の計画は短期的な問題であり，まず長期的な視点で耐震化計画を策定し，その結果を所与として点検体制を計画するという考え方である．2つ目は，高速道路の点検体制の計画は，それほど短期的な問題とはいえないという考え方である．なぜなら，地震等の発生時期が分からない以上，迅速に対応できる点検体制をとることは，日常的に余裕を持った人員配置を行うことを意味しており，その人員を雇うべきか，あるいはETC化等を促進して人員を減らすべきかといった長期的な高速道路の運営計画に連動して，点検体制の概要が決まってしまうためである．

本研究ではこの後者の考え方を採用して，高速道路の点検体制がより長期的な視点から所与とされている状況の下での一般道路と医療施設の耐震化計画問題を考える．つまり，高速道路の開放時間を外生的に与え，その時間以降に高速道路が使用可能となるという制約を考慮した耐震化計画問題を考える．この問題はミニマックス構造を含む問題として表現できるため，前稿[1]のモデルと同様に，Churchら[5]が提案した手法を用いることで，混合整数線形計画問題として定式化できる．最後に簡単な仮想ネットワークの計算例を用いて，本モデルの解の特徴を述べる．

2．重傷者搬送と施設耐震化の枠組み

まず，本論文が対象とする耐震化問題の基本的な設定と記号の定義を述べるが，本章の内容は筆者らの先行研究[1) 3)]と共通するものであることをご了承願いたい．

（1）救急医療施設への重傷者搬送と道路ネットワーク

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 $|I|$ 個は居住地を代表するセントロイドであり，有向リンクのうち $|K_0|$ 本は一般道路とする．また，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 で表す．一方，地域内には $|J|$ 個の救急医療施設が存在する．

この地域では，1 種類の地震の発生が想定されており，その発生によって各居住地 $i \in I$ で P_i 人の重傷者が発生するとともに，一般道路リンク $k \in K_0$ の一部が被災して交通容量が低下すると想定されている．このときの道路交通容量を S_k，リンク所要時間を d_k で与える．リ

*キーワーズ：計画手法論，防災計画
**正会員,修（工）,仙台市役所広瀬総合支所
(E-mail: sasaki1986@hotmail.co.jp)
***正会員，博（工),東北大学東北アジア研究センター
（〒980-8576 仙台市青葉区川内41番地,
TEL022-795-7571，FAX022-795-7477,
E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp)
****正会員，博（学術），東北大学東北アジア研究センター
(E-mail: okubo@cneas.tohoku.ac.jp)

ンク所要時間d_kは，OD 需要の増加による所要時間の増加を考えない flow independent な設定を用いる．ただし，道路構造物や舗装の損傷，沿道建物の倒壊による車線幅減少等による所要時間の増加は外生値として与えることができる．また，橋梁の落下等が予想される場合には被災時の道路交通容量S_kが 0 であると設定することで途絶を表現できる．

このような地震発生直後の状況下で，各居住地で発生した重傷者を，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．しかし，救急医療施設$j \in J$も地震の被害を受けており，重傷者をQ_j人しか受け入れることができないとする．

本研究では，耐震化の効果を重傷者搬送中の死亡リスクで評価する．死亡リスクは発生する重傷者数とその重傷者の搬送中の死亡確率の積で表され，その死亡確率の目安として，カーラーの救命曲線と呼ばれる負傷から救命行為を受けるまでの所要時間tに対するS字カーブ状の関数$g(t)$が使われることが一般的である．ここでは，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で近似し，各居住地から救急医療施設までの搬送所要時間の線形関数として扱う．

$$g(t) \approx \begin{cases} 0 & (t \le t_1) \\ g \cdot (t - t_1) & (t_1 \le t \le t_2) \\ 1 & (t \ge t_2) \end{cases} \tag{1}$$

ただし，$g = (t_2 - t_1)^{-1}$は定数である．

死亡リスクの算出に必要な重傷者の搬送時間を求めるため，交通流と救急医療施設の利用を1つのネットワーク上で整合的に取り扱う必要がある．そこで，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，それにつながる2種類の仮想リンクを付加する．1つは救急医療施設の利用を表す仮想リンクで，施設に隣接する道路ノードから仮想ノードfに，施設到着後医療行為が開始されるまでの時間を所要時間として持つリンクを設定する．もう1つは，各居住地で救命が期待できる時間内$(t \le t_2)$に輸送できない重傷者が存在することを表現する救命可能時間超過リンクで，居住地iから仮想ノードfに，所要時間$d_i = t_2$のリンクを設定する．これらの仮想リンクを含めたリンク集合を，以下では$\bar{K}$と表現する．

なお，負傷者の捜索・救出や救急車両の手配などのため，負傷発生から搬送開始までの所要時間を考慮する必要がある場合には，各居住地から最寄りの道路ノードとの間に仮想リンクを設定し所要時間を与えることによって，同一のモデルの枠組みで計算することが可能である．

（2）耐震化計画問題の枠組み

本論文では，高速道路は高い基準の耐震性能を有しており，破壊しないものと考える．したがって耐震化は一般道路リンクと救急医療施設に対して実施できると仮定する．一般道路リンク$k \in K_0$では橋梁や斜面の耐震化にはc_kの費用を要するが，その実施により被災時の交通容量をΔS_kだけ増加させることができる．この一般道路リンクの耐震化実施の有無を，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時の受け入れ可能重傷者数をΔQ_jだけ増加させることができる．この救急医療施設の耐震化実施の有無を，0-1変数であるY_jで表現する．

我々が取り扱う耐震化計画問題は，耐震化のための総費用が予算額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小化するように，耐震化すべき一般道路リンクと救急医療施設の組み合わせを求めるという問題となる．

3．高速道路点検による待ち時間を考慮した耐震化計画モデル

（1）高速道路点検に関する想定

高速道路はある程度の地震に対しては破壊しないような基準で設計されているが，舗装の損傷や付属物の落下等の可能性もあるため，地震発生後に安全点検が行われなければ，開放することはできない．

そこで，高速道路の点検は区間ごとに行なわれ，完了次第その区間に入るインターチェンジのオンランプ$r \in R$が開放されると仮定し，その開放までの時間が外生的にD_rで与えられている状況を想定して，2.で示した耐震化計画問題を考える．ただし，各インターチェンジの開放時間D_rの差は大きくなく，高速道路に一度進入できれば，次の区間に進入する際にインターチェンジで再び点検終了まで待機することはないものとする．

（2）高速道路利用時の待ち時間の表現

インターチェンジ$r \in R$におけるオンランプのリンクも同じ記号$r \in R$で定義する．いま，前稿[1]と同様に居住地$i \in I$において発生した重傷者P_iの搬送においてリンク$k \in \bar{K}$を用いる人数を表わす変数x_{ik}を導入すると，居住地$i \in I$の重傷者のうちインターチェンジ$r \in R$を経由する重傷者はx_{ir}で表される．

彼らが一般道路を経由してインターチェンジに到達する時刻が当該インターの開放時間D_rよりも前であれば，その差の時間だけ待機しなければならない．このとき，

インターチェンジまでの一般道路の所要時間は，操作変数である一般道路リンクの耐震化 Z_k の影響を受けるために，あらかじめ定数として設定することができない．そこで，居住地 $i \in I$ からインターチェンジ $r \in R$ へアクセスする間に一般道路リンク $k \in K_0$ を使用する重傷者数を v_{irk} で定義し，この所要時間を内生化する必要がある．

以上により，居住地 $i \in I$ からインターチェンジ $r \in R$ まで到達した後，高速道路を利用するまでに必要な延べ待ち時間を考慮した死亡リスクは，以下のようなミニマックス構造を含む式で表現することができる．

$$\min_{v,x,Y,Z} \sum_{i \in I} g\left[\sum_{k \in K} d_k x_{ik} + \sum_{r \in R} \max\left(0, D_r x_{ir} - \sum_{k \in K_0} d_k v_{irk}\right)\right] \quad (2)$$

式(2)の第 1 項は道路リンクの所要時間とそのリンクを使用する重傷者の積を足し合わせた総搬送時間であり，第 2 項では，その搬送において高速道路を使用する際に発生する延べ待ち時間を示している．

ここで，Church ら[5] が提案したミニマックス問題を線形計画問題に変換する手法を用いると，式(2)は以下の 3 式で書き換えることができる．

$$\min_{x,Y,Z} \sum_{i \in I} g\left(\sum_{k \in K} d_k x_{ik} + \sum_{r \in R} E_{ir}\right) \quad (3)$$

$$E_{ir} \geq D_r x_{ir} - \sum_{k \in K_0} d_k v_{irk} \qquad \forall i \in I, \forall r \in R \quad (4)$$

$$E_{ir} \geq 0 \qquad \forall i \in I, \forall r \in R \quad (5)$$

式(4)，(5)の右辺は，居住地 $i \in I$ で発生した重傷者がインターチェンジ $r \in R$ へアクセスした際の延べ待ち時間を表しており，E_{ir} がその 2 つを下回らないことを保証している．式(3)でこの E_{ir} を最小化することによって，ミニマックス構造を含む目的関数を 3 つの線形式として表現している．

さらに，式(4)の右辺第 2 項は，居住地 $i \in I$ を始点とし，インターチェンジ $r \in R$ を終点として x_{ir} 人を最適に一般道路リンクに割り当てる補助問題を解くことにより計算できる．この補助問題の目的関数は式(6)のように書ける．

$$\min_{v} VF = \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K_0} d_k v_{irk} \quad (6)$$

（3）待ち時間を考慮した耐震化計画問題の定式化

以上により，本来の計画問題と補助問題の目的関数の和を新しい目的関数と設定すると，高速道路点検による待ち時間を考慮した耐震化計画問題は以下のような一つの混合線形計画問題として定式化できる．

$$\min_{x,v,Y,Z} \sum_{i \in I} g\left(\sum_{k \in K} d_k x_{ik}\right) + \sum_{i \in I} g\left(\sum_{r \in R} E_{ir}\right) + VF \quad (7)$$

s.t.

$$VF = \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K_0} d_k v_{irk} \quad (6)$$

$$E_{ir} \geq D_r x_{ir} - \sum_{k \in K_0} d_k v_{irk} \qquad \forall i \in I, \forall r \in R \quad (4)$$

$$E_{ir} \geq 0 \qquad \forall i \in I, \forall r \in R \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ik} \leq S_k + \Delta S_k Z_k \qquad \forall k \in K_0 \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R} v_{irk} \leq S_k + \Delta S_k Z_k \qquad \forall k \in K_0 \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq Q_j + \Delta Q_j Y_j \qquad \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K_0} c_k Z_k + \sum_{j \in J} e_j Y_j \leq B \quad (11)$$

$$Z_k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \qquad \forall k \in K_0 \quad (12)$$

$$Y_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \qquad \forall j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{k \in L_i} x_{ik} \geq P_i \qquad \forall i \in I \quad (14)$$

$$\sum_{k \in M_f} x_{ik} \geq P_i \qquad \forall i \in I \quad (15)$$

$$\sum_{k \in L_a} x_{ik} = \sum_{k \in M_a} x_{ik} \qquad \forall a \in A - \{i\}, \forall i \in I \quad (16)$$

$$0 \leq x_{ik} \qquad \forall i \in I, \forall k \in \overline{K} \quad (17)$$

$$\sum_{k \in L_i} v_{irk} \geq x_{ir} \qquad \forall i \in I, \forall r \in R \quad (18)$$

$$\sum_{k \in M_r} v_{irk} \geq x_{ir} \qquad \forall i \in I, \forall r \in R \quad (19)$$

$$\sum_{k \in L_a} v_{irk} = \sum_{k \in M_a} v_{irk} \qquad \forall i \in I, \forall r \in R \quad (20)$$

$$0 \leq v_{irk} \qquad \forall i \in I, \forall r \in R, \forall k \in K_0 \quad (21)$$

以上の定式化において，式(8)，(9)は一般道路リンクの容量に関する制約，式(10)は救急医療施設の容量に関する制約である．式(11)は複数の耐震化を行う際の予算制約式である．式(12)と式(13)は，耐震化の決定はそれを行うか，行わないかという二者択一的な決定であることを示している．

式(14)では，変数 x_{ik} を居住地 $i \in I$ を起点とするリンク $k \in L_i$ について合計することで居住地 $i \in I$ から搬出される重傷者数を与え，この人数が居住地 $i \in I$ に発生する重傷者数 P_i を上回ることを保証している．すなわち，居住地ごとにすべての重傷者が搬送計画の対象

となることを保証している．式(15)では，変数x_{ik}を救急医療の終了ノードfを終点とするリンク$k \in M_f$について合計することで救急医療を終えた居住地$i \in I$の重傷者数を与え，この人数が居住地$i \in I$の重傷者数P_iを上回ることを保証している．つまり，式(15)は居住地ごとに重傷者がいずれかの救急医療施設に搬送されるという条件であるが，時間超過リンクを設けることにより，救命可能時間t_2内での搬送が不可能な重傷者が存在することも認めている．以上の式(14)と(15)は等式として定式化しても差し支えないが，ここでは線形計画法パッケージへの入力の際に，より一般的な形である不等式として表現している．もちろん最小化の結果，最適解においては両者とも等号が成立する．

式(16)はネットワーク上の交通流の保存条件であり，式(17)は交通流の非負条件である．

式(18)から式(21)は補助問題の交通流v_{irk}に関する制約式である．式(18)は補助問題の交通流の居住地$i \in I$から流出するリンクにおける合計値が，式(19)は，同じく補助問題の交通流の目的インターチェンジ$r \in R$に流入するリンクにおける合計値が，それぞれ上位の問題において居住地$i \in I$を出発しインターチェンジ$r \in R$に到着する人数x_{ir}を上回ることを保証している．これらの式も最適解では等号が成立する．式(20)はネットワーク上の交通流の保存条件であり，式(21)は交通流の非負条件となっている．

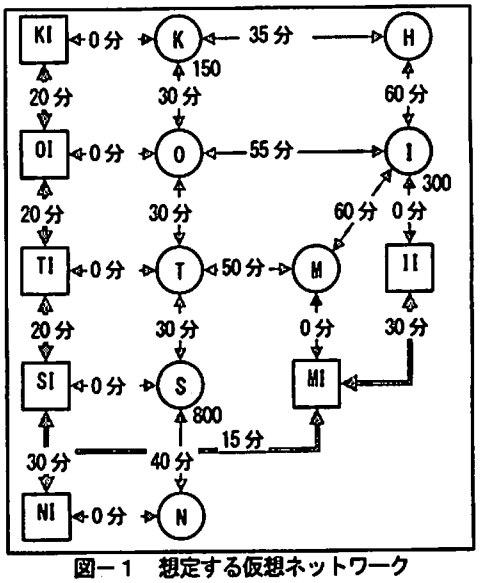
4．小規模仮想ネットワークでの計算例

（1）仮想ネットワークの設定

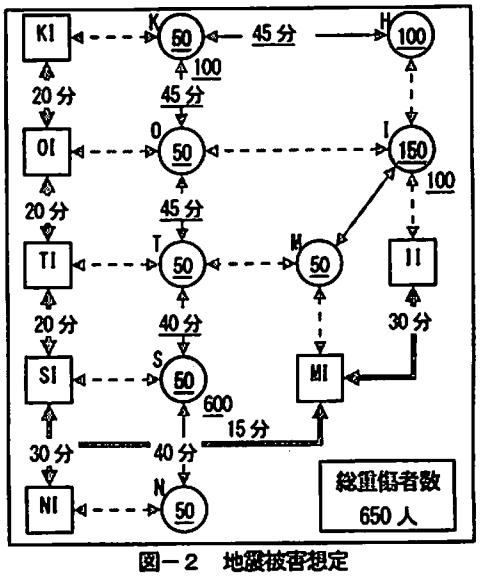
本章では以上のモデルの特性と意義を説明するための仮想的な計算例を示す．以下では簡単化のために一部非現実的な値を設定している．また，各居住地における地震発生後搬送開始までの時間，および各医療施設到着後医療行為開始までの時間も無視しており，得られた解は現実的な意味を持っていない．具体的な地域に適用する際には，実証的な裏付けをもった数値の設定が必要であるが，モデルの本質的な構造は変化しない．

a）計算対象ネットワークと救急医療施設

図－1のような仮想の道路ネットワークを考える．この道路ネットワークは，丸で表した 8 つの居住地（I）のセントロイドと，四角で示した 7 つのインターチェンジをノードとして持ち，太線の矢印で示した高速道路 6 区間と細線の矢印で示した一般道路 9 区間及びこれらを接続するオンランプ・オフランプ 7 区間を含む 22 区間の方向別のリンク（K）を持っている．リンク



図－1　想定する仮想ネットワーク



図－2　地震被害想定

に付した数字は通常時の所要時間（分）である．灰色を
つけた 3 つの居住地にはそれぞれ救急医療施設（J）
があり，その横の斜体の数字が通常時の受け入れ能力を
表わしている．モデルの計算には，この道路ネットワー
クに対し，さらに 1 つの仮想ノードと 3 本の医療施設用
用の仮想リンク，8 本の時間超過仮想リンクを追加した
16 個のノード（A）と 55 本のリンク（$\bar{K}$）から成る
ネットワークを用いる．

b）想定地震被害

図－1で設定した地域では，代表的な地震が 1 つ
定されており，それにより図－2に示すように全域で
害が発生すると仮定する．各居住地では図－2のセン
ロイド内の下線付き数字に示す重傷者が発生する．さ

に，全ての救急医療施設の受け入れ能力が低下し，点線で示した3つの一般道路区間が途絶して5つの一般道路区間で所要時間が増加すると想定する．なお，図－2において救急医療施設の受け入れ容量や一般道路区間の所要時間が変化した後の数値には下線を付して示している．

c）耐震化オプションの設定

一般道路の耐震化は，橋梁が存在し途絶が生じる可能性がある3つの区間(HI，IO，MT)において実施可能で，その耐震化により双方向とも通常時の所要時間で通行できるようになると仮定する．耐震化に必要な費用はHI間5億円，IO間5億円，MT間5億円とする．また，救急医療施設の耐震化はI市20億円，K市10億円，S市40億円で実施でき，その結果，地震発生後にも通常時と同じ容量の重傷者を受け入れできるようになると仮定する．

d）カーラー救命曲線の設定

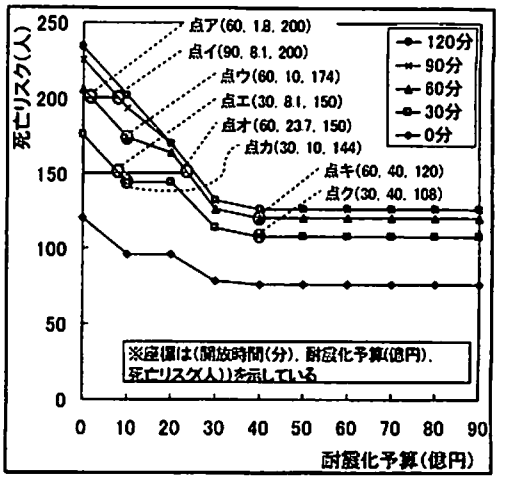
式(1)による死亡リスクの計算に当たり$t_1=0$（分），$t_2=125$（分），$g=1/125=0.008$と設定した．ここでは搬送前に簡単な止血などの救急処置が行われることを想定して，一般のカーラーの救命曲線の大量出血時の値である$t_2=70$（分）より大きめの値を設定している．現実的な適用の際には，疫学的な知見に基づき実際的な値を設定することが必要である．

（2）点検時間および耐震化予算と死亡リスクの関係

開放時間Dに外生的に異なる値を与えた上で，耐震化予算Bを0億円から90億円まで変化させた時の最適耐震化戦略を計算した．開放時間及び耐震化予算と死亡リスクの関係を図－3に示す．

まず，図－3を縦方向に読んで，耐震化予算Bを一定とした時，開放時間短縮による死亡リスクの低減効果を分析する．耐震化予算Bが10億円の時，開放時間Dを60分(点ウ)から30分(点カ)まで短縮させることにより，死亡リスクを30人分だけ低減できる．耐震化予算Bが40億円の時では，開放時間Dが60分(点キ)から30分(点ク)まで短縮することで死亡リスクは12人分だけ低減できる．したがって，確保できる耐震化予算が少ないときほど，開放時間短縮による死亡リスクの低減効果は大きいと言える．これより，目標とする死亡リスクが低い方が高速道路の開放時間短縮による耐震化予算削減効果は高いことがわかる．

次に，図－3を横方向に読んで，死亡リスクを一定値に抑える時，開放時間短縮による耐震化予算の削減効果を分析する．死亡リスクを200人に抑えようとする時，開放時間Dが90分(点イ)の時は約8.1億円が必要となるが，開放時間Dが60分(点ア)であれば，約1.8億円で済む．このとき，開放時間Dが30分短縮することは約6.3億円の価値があると言える．また，死亡リスクを150人に抑えようとする時，開放時間Dが60分(点オ)の時は約23.7億円が必要となるが，開放時間Dが60分(点エ)ならば，約8.1億円で済み，開放時間Dが30分短縮することは約15.6億円の価値があると言える．これより，目標とする死亡リスクが低い方が高速道路の開放時間短縮による耐震化予算削減効果は高いことがわかる．



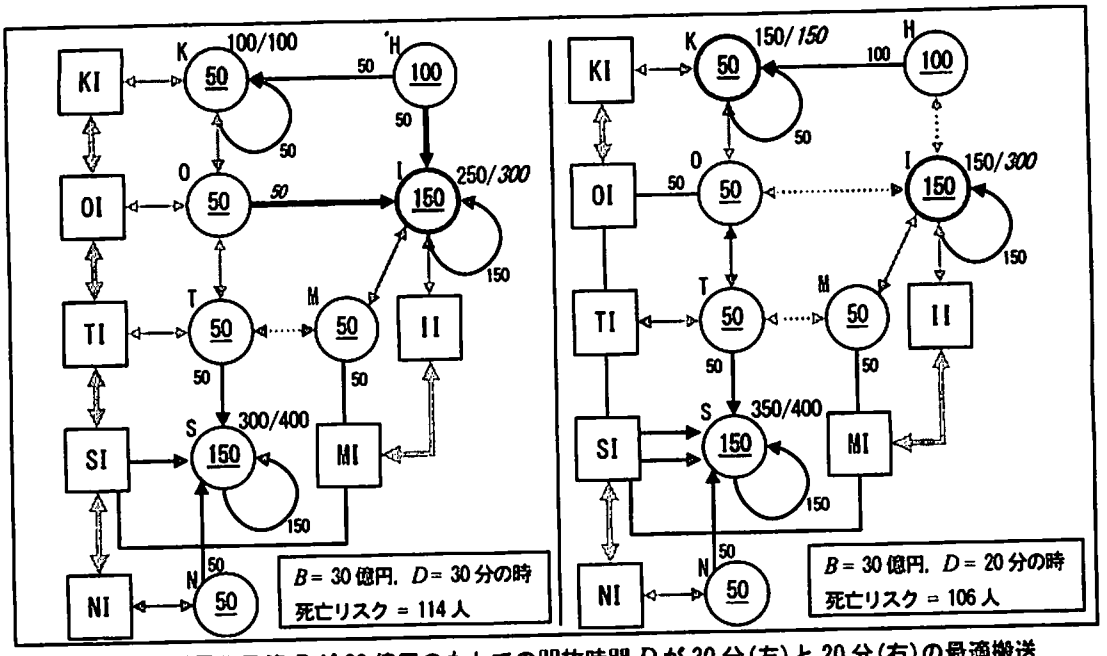
図－3　開放時間及び耐震化予算と死亡リスク

表－1　耐震化予算及び開放時間と最適耐震化戦略

耐震化予算B（億円）	開放時間D（分）	死亡リスク（人）	道路区間の耐震化 HI (5)	IO (5)	MT (5)	医療施設の耐震化 I (20)	K (10)	S (40)
30	120	132	1	1	0	1	0	0
	110	132	1	1	0	1	0	0
	100	132	1	1	0	1	0	0
	90	132	1	1	0	1	0	0
	80	132	1	1	0	1	0	0
	70	130	1	1	0	1	0	0
	60	126	1	1	0	1	0	0
	50	122	1	1	0	1	0	0
	40	118	1	1	0	1	0	0
	30	114	1	1	0	1	0	0
	20	106	0	0	0	1	1	0
	10	94	0	0	0	1	1	0
	0	78	0	0	0	1	1	0
40	120	126	0	1	1	1	1	0
	110	126	0	1	1	1	1	0
	100	126	0	1	1	1	1	0
	90	126	0	1	1	1	1	0
	80	126	0	1	1	1	1	0
	70	124	0	1	0	1	1	0
	60	120	0	1	0	1	1	0
	50	116	0	1	0	1	1	0
	40	112	0	1	0	1	1	0
	30	108	0	1	0	1	1	0
	20	104	0	1	0	1	1	0
	10	92	1	0	0	1	1	0
	0	76	1	0	0	1	1	0

（3）開放時間の短縮による最適耐震化戦略の変化

同じ耐震化予算Bにおいて，開放時間Dの短縮による最適耐震化戦略の変化を分析する．具体的な計算結果



図－4　耐震化予算 B が 30 億円のもとでの開放時間 D が 30 分(左)と 20 分(右)の最適搬送

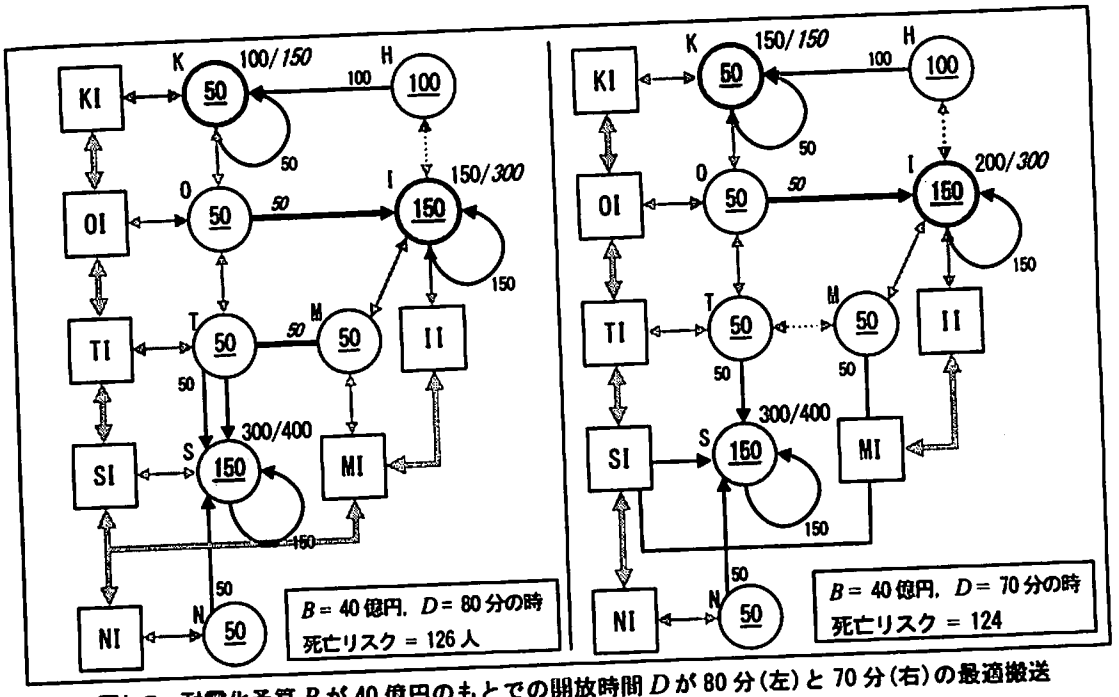
を確認したところ，まず，予算増加によって新たに採用された耐震化政策が死亡リスクの改善効果につながっておらず，予算増加が無駄に使われるため，その解を最適耐震化戦略とはみなすことができないケースがある．次に，開放時間が異なっても最適耐震化戦略が変化しないため考察の必要性がない場合がある．さらに，耐震化予算 B が 20 億円の場合には，死亡リスクの改善に効果が見られた開放時間のケースに限定すると，開放時間の変化が耐震化戦略に影響を与えておらず，やはり考察の必要性がないと判断された．

以上のようなケースを除くと，結果的に開放時間の違いが意味を持っていたのは耐震化予算 B が 30 億円と 40 億円の場合であった．これらの予算における最適耐震化戦略とそのときの死亡リスクの値を表－1 に示した．同じ耐震化予算のもとで開放時間 D が 10 分短縮された後と比較して最適耐震化戦略が異なるケースが存在し，それらには灰色を付けた．

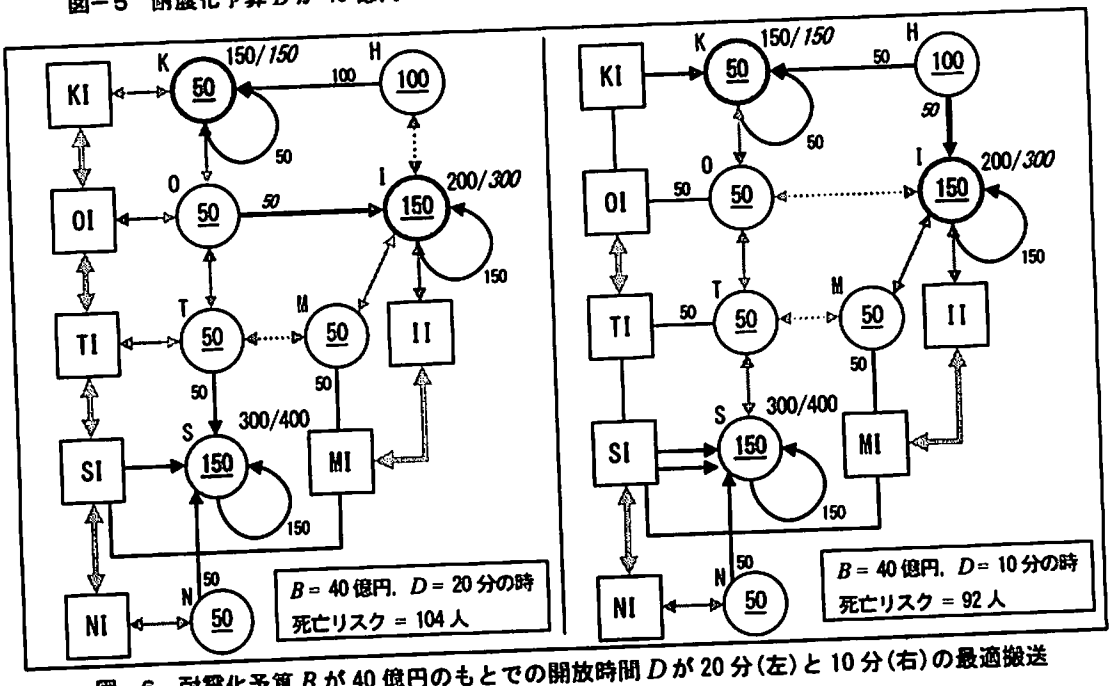
耐震化予算 B が 30 億円のもとで開放時間 D が 30 分から 20 分へ短縮した時，一般道路区間 HI，IO の代わりに K 市の救急医療施設が耐震化される．このときの最適搬送パターンと最適耐震化戦略を図－4 に示す．図中では重傷者を，居住地から救急医療施設までの搬送ルートに沿う矢印で示した．さらに，耐震化が行なわれた施設は太線を用いて表現し，そのうち，一般道路区間はその区間を利用する重傷者数を，救急医療施設は増加した容量を斜体数字で示した．O 市と H 市の重傷者は当初，耐震化された一般道路を用いて K 市と I 市の救急医療施設まで搬送されていた．これが，高速道路がより早く利用できるようになると，O 市の重傷者が遠方の S 市の救急医療施設に搬送されるようになり，一般道路区間 IO の耐震化が不要になる．また，H 市の全重傷者を K 市の救急医療施設へ搬送することで HI 間の耐震化も不要となるため，それらの予算を K 市の救急医療施設の強化に転用できるようになった．このように，高速道路の開放時間の短縮によって一般道路の耐震化費用を救急医療施設の耐震化費用に回すことが可能となり，死亡リスクを低減できるケースが存在する．

次に，耐震化予算 B が 40 億円のもとで開放時間 D が 80 分から 70 分へ短縮されるケースを図－5 に示す．この時，一般道路区間 MT の耐震化が不要になる．これは，M 市から重傷者を S 市の救急医療施設に搬送する際一般道路を経由するよりもインターチェンジで高速道路が開放されるのを待って搬送することで総搬送時間が短縮されるためである．

さらに，耐震化予算 B が 40 億円のもとで開放時間 D が 20 分から 10 分へ短縮された時の結果を図－6 に示している．この時，一般道路区間 IO の代わりに一般道路区間 HI の耐震化が行われる．O 市の重傷者を耐震化された一般道路を用いて I 市へ搬送するよりも，高速道路を用いて K 市へ搬送する方が搬送時間を短縮できるため，一般道路区間 IO の耐震化が不要となる．一方，H 市からの重傷者搬送によって K 市の救急医療施設は H 市の全重傷者を受け入れることができなくなるが一般道路区間 IH の耐震化を行うことにより H 市の残りの重傷者を I 市の救急医療施設へ搬送することが可能となる．また，T 市から S 市への重傷者の搬送が一般道路から高



図－5　耐震化予算 B が 40 億円のもとでの開放時間 D が 80 分(左)と 70 分(右)の最適搬送



図－6　耐震化予算 B が 40 億円のもとでの開放時間 D が 20 分(左)と 10 分(右)の最適搬送

道路経由に置き換わっている．このように，高速道路の開放時間短縮により，ある一般道路区間の耐震化費用を他の一般道路区間に回すことができる場合もある．

以上より，高速道路の開放時間の短縮によって，一般道路区間の耐震化が不要となり，その費用を救急医療施設の耐震化の費用に回したり削減したりできる可能性があることが確かめられた．

5．おわりに

本論文では，高速道路の開放時間を外生的に与えた上で，その時間以降に高速道路が使用可能となるという制約を考慮した一般道路と医療施設の耐震化計画問題をミニマックス問題として定式化した．さらに，この問題を前稿のモデル[1]と同様，Church ら[5]が提案したミニ

マックス問題を線形計画問題として表現する手法を用いることで，混合整数線形計画問題として定式化できることを示した．

さらに，小規模な仮想の計算例を用いて，高速道路の開放時間に外生的に異なる値を与えた上で，耐震化予算を変化させて最適耐震化戦略を計算した．開放時間および耐震化予算と実現される死亡リスクの関係について分析した結果，耐震化予算を一定とした時，高速道路の開放時間の短縮よる死亡リスク低減効果は，確保できる耐震化予算が少ないとき程，大きいことが分かった．また，同じ耐震化予算額のもとで高速道路の開放時間短縮が最適耐震化政策に与える影響を分析した結果，高速道路の開放時間の短縮により一般道路区間の耐震化が不要になり，その費用を救急医療施設の耐震化に回したり削減したりできる可能性があることを確認できた．

以上の結果は，非現実的な仮定値における結果であり現実の問題にそのまま適用できる最適解を与えているわけではないが，高速道路の開放時間と一般道路，医療施設の耐震化計画が密接に関連しあっていることを示すものであり，本研究のような統合モデルによる検討の必要性を物語っている．

今後は，実問題のサイズのネットワークに対して現実的なパラメータ値を設定して，本稿のモデルによる分析を進め，高速道路の開放時間の短縮策の効果を定量的に明らかにしていきたい．また，開放時間の短縮のための具体的な政策の内容とその実現可能性，コストに関する検討を進めていくことが重要である．

最後に，本研究の実施に当たり，東北大学防災科学研究グループ，Nexco 東日本東北支社との有用な意見交換，発表会における電気通信大学長江剛志先生，熊本大学円山琢也先生からの建設的なコメントに対して，深く感謝を表する次第です．

参考文献

1) 奥村誠，堀内智司：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，土木計画学研究・講演集，No. 38，CDROM125，2008.
2) 奥村誠，堀内智司，佐々木和寛：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，土木計画学研究・論文集，No. 26，pp. 93-100，2009.
3) 佐々木和寛，奥村誠，堀内智司：地震重傷者搬送における道路ネットワーク維持の効果分析，土木計画学研究・講演集，No. 39，CDROM86，2009.
4) 垂水祐二，佐藤亜樹男：地震時通行止め基準値の見直し，技術情報誌「EXTEC」，Vol22，No3，2006.
5) Church, R. L. and Scaparra, M. P.: Protecting Critical Assets: The r-interdiction Median Problem with Fortification, *Geographical Analysis*, 39, pp. 129-146, 2007.

高速道路点検による待ち時間を考慮した耐震化計画問題*

佐々木和寛**・奥村誠***・大窪和明****

大規模地震発生時には広域で同時多発的に発生する重傷者を迅速に搬送し治療することが重要となるが，高速道路は地震発生直後に道路点検の実施により通行止めになるため重傷者搬送に利用できないのが現状である．そこで，本論文では，高速道路の点検体制を所与と仮定し，高速道路の開放時間を外生的に与えた上で，その時間以降に高速道路が通行可能となるという制約を考慮した一般道路と医療施設の耐震化計画問題を提案する．本稿のモデルを小規模なネットワークに適用した結果，高速道路の開放時間の短縮により，一般道路の耐震化が不要になり，その費用を医療施設の耐震化に回したり削減したりできる可能性を確認できた．

Optimal Seismic-Proof Reinforcement Planning, considering Inspection Time of Expressway Links*

By Kazuhiro SASAKI**・Makoto OKUMURA***・Kazuaki OKUBO****

This paper discusses the effects of shortening inspection time of expressway to reinforcement planning of both medical facilities and ordinary road network. Therefore this paper proposes the advanced model adding the condition of traffic availability after the inspection time of expressway given exogenously to the reinforcement planning model proposed by the previous paper. Application of this model to a small network shows a possibility that shortening inspection time of expressway eliminates the need for ordinary road reinforcement, and further enables to transfer the budget to medical facility reinforcement.