

# 利用者均衡概念を用いた道路ネットワーク耐震化問題の枠組みと手法\*

## A Road Network Reinforcement Problem based on User Equilibrium with Variable Demand\*

藤原友\*\*・長江剛志\*\*\*・朝倉康夫\*\*\*\*

By Tomo FUJIHARA\*\*・Takeshi NAGAE\*\*\*・Yasuo ASAKURA\*\*\*\*

### 1. はじめに

地震などの自然災害による道路施設の損壊は、甚大な社会的不便をもたらす。この社会的不便は、一般に、損壊した施設の復旧費用（撤去および再建設）などの直接的なものと、損壊道路の迂回による交通混雑や経路途絶による機会費用といった間接的なものから構成される。こうした社会的不便は、橋梁などの道路施設を耐震改修することで軽減し得る。しかし、その不便軽減効果は全ての道路施設について同様というわけではない。そのため、少ない耐震改修費用でより多くの不便軽減を達成するような耐震化戦略——換言すれば、（ストックとして支払われる）耐震改修費用と（フローとして支払われ得る）社会的不便で構成される社会的LCC (Life Cycle Cost)を最小化するような耐震化戦略——を決定することが求められている。

長江ら<sup>1)</sup>は、こうした道路施設の耐震化による不便軽減効果を、GIS (Geographical Information System, 地理情報システム)と利用者均衡モデル<sup>2)</sup>を用いて計量するモデルを提案した。しかし、この研究は、ある与えられた耐震化戦略の効果を計量するに留まり、社会的LCCを最小化する耐震化戦略そのものを求めるものではない。そこで、本研究では、耐震化戦略を求める枠組へと、長江ら<sup>1)</sup>のモデルを一般化する。具体的には、①想定される地震シナリオ毎に、各道路施設が損壊する確率を、GIS上で表現される地震外力分布、および道路施設の耐震性能を表す脆弱性曲線 (fragility curve) を用いて計量する；②施設損壊により一部のリンクが利用不能になった道路ネットワーク上の交通状況および社会的不便を、変動需要型利用者均衡配分モデルを用いて算出する；③各道路施設の耐震性能を離散的レベルで表現し、それらの組み合わせで表現される耐震化戦略集合の中から社会

的LCCを最小にする耐震化戦略を求める。

本稿の残りは以下のように構成される。まず、2章で使用するデータおよび数理的枠組みを示し、3章では実際のネットワークを用いた場合に、その枠組みで生じる問題とそれに対するアプローチ方法を述べる。最後に、4章はまとめである。

### 2. 研究の枠組み

#### (1) 使用するデータ

本研究では、地震発生時に利用可能なネットワークを、図1で示す2つのデータ・セット (GIS および交通均衡配分ネットワーク・モデル) と、道路橋の脆弱性曲線から求める。第1に、GIS上のデータは、交差点、路線、道路橋、地震強度の分布などを、緯度と経度からなる共通の座標空間上に表現したマップである。本研究では、街路マップ、道路橋マップ、および地震強度マップの3つのGISデータを用いる。街路マップおよび道路橋マップは、それぞれ、街路リンクおよび道路橋を識別する地物IDと、その地物の基準座標 (緯度、経度) の組によって構成される。地震強度マップは、想定される地震シナリオ (活断層) ごとに用意される。各地震強度マップは、ある断層が活動した場合の各地点 (メッシュ) における基盤面での地震強度を、地震工学分野における研究成果<sup>3)</sup>を活用して求めたものである。第2に、交通均衡配分ネットワーク・モデルは、現実の交差点や路線を適当に集約化し、そのトポロジカルな構造と道路の性能を扱いやすく表現した、仮想的なネットワークである。以下では、このネットワークを“配分ネットワーク”と呼ぶ。この配分ネットワーク・モデルは、配分リンク・データとOD (起点・終点) ペア・データの2つのデータで構成される。配分リンク・データは、ネットワークの構造および性能 (i.e., サービス供給能力) を表し、各リンクの発ノード、着ノード、およびリンク性能 (自由旅行時間、容量、長さ、料金、etc) から構成される。一方、ODペア・データは、ネットワーク需要を表し、各ODペアの起点ノード、終点ノード、およびOD需要から構成される。配分ネットワークと街路マップおよび道路橋マップは、それぞれ、“街路=配分”と“道路橋=配分”の2つの関

\*キーワード：変動需要型利用者均衡配分，道路網耐震化

\*\*学生員，神戸大学大学院自然科学研究科

(兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1,

TEL078-803-6360, FAX078-803-6360)

\*\*\*正会員，博士 (情報科学)，神戸大学大学院工学研究科

\*\*\*\*正会員，工博，神戸大学大学院工学研究科

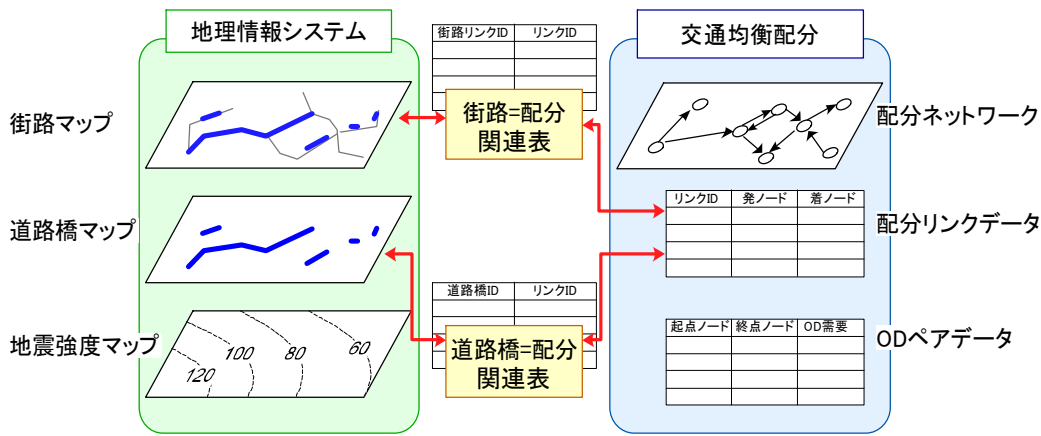


図-1 GIS および配分ネットワーク・モデル

連表によって関係付けられている。最後に、地震時に道路橋が被る損害を、以下のいずれかの値をとる確率変数として定義し、各被災度の生起確率を、当該道路橋が受ける地震強度の関数（脆弱性曲線<sup>4)</sup>）として与える：

S：被災無し（発災直後から利用可能）

F：被災あり（発災後一定期間は利用不可能）

図2は縦軸に損壊確率、横軸に地震外力をとり、ある橋梁の脆弱性曲線を示したものである。本研究では、図2のように橋梁の耐震性能によって、この脆弱性曲線（i.e.、地震時の道路橋の被災確率）が異なるものとし、それによって各橋梁の被災の有無が変化すると仮定する（耐震性能を高めることで、ある地震シナリオにおける損壊確率が $\phi_L$ から $\phi_H$ に下がる）。この枠組の下で、ある地震シナリオにおける利用可能なネットワークは、以下の手続きで求められる。第1に、想定する地震シナリオに対応する地震強度マップと、道路橋マップを重ねることで、各橋梁が受ける外力を求める。第2に、この外力と各橋梁の脆弱性曲線から、それぞれの橋梁が被害を受ける確率を求める。第3に、各橋梁の被災確率から、起り得る道路橋被災パターンとその発生確率を求める。最後に、これらの道路橋被災パターンと“道路橋=配分”関連表より通行不可能となるリンクを求め、欠損リンクパターン（後述）を決定する。なお、地震強度マップと脆弱性曲線の導出方法については、本稿の範疇を超えるので、詳細な説明は割愛する。

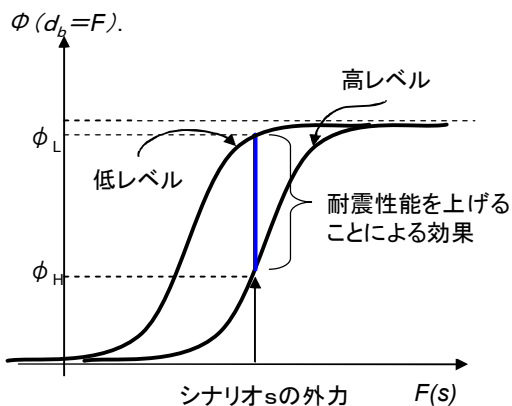


図-2 脆弱性曲線

## (2) モデルの定式化

本節では、上述の枠組およびデータ・セットの下で、モデルを定式化する。まず、配分ネットワーク上のノード集合およびリンク集合を、それぞれ、 $N \equiv \{n_1, n_2, \dots\}$  および  $L \equiv \{l_1, l_2, \dots\}$  で表し、起終点ペア集合を  $OD \equiv \{od_1, od_2, \dots\}$  で表す。起終点ペア  $od$  間の平常時の OD 交通量を、所与の定数  $Q^{od}$  で表す。この配分ネットワーク上に存在する橋梁の集合を  $B \equiv \{b_1, b_2, \dots\}$  で表す。

本研究において、耐震化戦略とは、それぞれの橋梁に要求する最低限の耐震性能レベルと定義される： $i$  番目耐震性能戦略を  $\mathbf{u}^i \equiv \{u_b^i \mid b \in B\}$  で表す。ここで、 $u_b^i \in \{H, L\}$  は  $b$  番目橋梁の要求耐震性能であり、 $u_b^i = H$  は当該橋梁に高レベルの耐震性能が要求されること、 $u_b^i = L$  は低レベルの耐震性能が要求されることを意味する。耐震化戦略集合を  $\mathbf{U} \equiv \{\mathbf{u}^1, \mathbf{u}^2, \dots\}$  で表す。

この枠組の下で、最適耐震化問題は、以下のように定式化される：

$$[P] \quad \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} Z(\mathbf{u})$$

ここで  $Z(\mathbf{u})$  は、ある戦略  $\mathbf{u}$  を選択したときの社会的 LCC であり、以下の式で定義される。

$$Z(\mathbf{u}) \equiv \frac{1+\rho}{\rho} \sum_{s \in S} \lambda(s) f(s, \mathbf{u}) + K(\mathbf{u}) \quad (1)$$

ここで、 $S \equiv \{s_1, s_2, \dots\}$  は地震シナリオ集合、 $\lambda(s)$  は  $s$  番目地震シナリオの生起確率であり、 $\rho$  は社会的割引率である。式(1)右辺の第1項は、毎年発生し得る社会的不便益（フロー）の期待現在賞味価値(ENPV: Expected Net Present Value)を表す；第2項は、戦略  $\mathbf{u}$  を実現するために必要な総改修費用であり、以下の式：

$$K(\mathbf{u}) \equiv \sum_{b \in B} K_b(u_b) \quad (2)$$

で定義される。ここで、 $K_b(u_b)$  は、橋梁  $b$  を要求耐震性能  $u_b$  に応じて耐震化するための費用である。

式(1)の右辺第1項の  $f(s, \mathbf{u})$  は、耐震化戦略  $\mathbf{u}$  を選択して地震シナリオ  $s$  が生じたときに発生する年間社会的不便益である。これは、以下の式で定義される：

$$f(s, \mathbf{u}) \equiv \sum_{\mathbf{d} \in \mathbf{D}} \{T(\mathbf{d}) + r(\mathbf{d})\} p(\mathbf{d} | s, \mathbf{u}) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{D} \equiv \{\mathbf{d}^1, \mathbf{d}^2, \dots\}$  は橋梁被災パターン集合であり、 $j$  番目橋梁被災パターン  $\mathbf{d}^j \equiv \{d_b^j | b \in B\}$  は、各橋梁の被災度  $d_b^j \in \{S, F\}$  の組み合わせとして表現される。ここで、 $j$  番目橋梁被災パターンにおいて、 $d_b^j = S$  は橋梁  $b$  が被害を受けておらず、発災直後から利用可能であることを表し、 $d_b^j = F$  は当該橋梁が被災し、発災から  $\Delta t$  日間（所与の定数）利用できないことを表す。

式(3)の右辺において、 $p(\mathbf{d} | s, \mathbf{u})$  は、耐震化戦略  $\mathbf{u}$  および地震シナリオ  $s$  を与件とした橋梁被災パターン  $\mathbf{d}$  の条件付生起確率であり、以下の式で定義される：

$$p(\mathbf{d} | s, \mathbf{u}) \equiv \prod_{b \in B} \phi(d_b | F_b(s), u_b) \quad (4)$$

ここで、 $\phi(d_b | F_b(s), u_b)$  は、耐震性能レベル  $u_b$  の橋梁  $b$  が、外力  $F_b(s)$  を受けたときに被災状態が  $d_b$  となる確率（i.e. 脆弱性曲線）である。外力  $F_b(s)$  は、図1の地震強度マップから求められる。

式(3)右辺の  $r(\mathbf{d})$  および  $T(\mathbf{d})$  は、それぞれ、橋梁被災パターン  $\mathbf{d}$  の下での復旧費用（瓦礫撤去や再建設費用を含む）および年間交通不便益である。ここで、年間交通不便益  $T(\mathbf{d})$  は、以下の式で定義される。

$$T(\mathbf{d}) \equiv \pi(\mathbf{v}(\mathbf{d}))\Delta t + \pi(\mathbf{v}_0)(365 - \Delta t) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{v}(\mathbf{d}) \equiv \{v_l(\mathbf{d}) | l \in L\}$  は、橋梁被災パターン  $\mathbf{d}$  に対応する欠損リンクパターンであり、その  $l$  番目要素は、リンク  $l$  上に損壊した橋梁が1つでもあれば1となり、それ以外では0となる。すなわち、リンク  $l$  上の橋梁集合を  $B(l)$  で表せば、

$$v_l(\mathbf{d}) = \begin{cases} 1 & \text{if } d_b = F, \exists b \in B(l) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

と定義される。なお、各リンク上の橋梁集合  $\{B(l) | l \in L\}$  は図1の“道路橋=配分”対応表と等価である。 $\mathbf{v}_0$  は平常時の欠損リンクパターン（全てのリンクについて  $v_l = 0$ ）である。

式(5)において、 $\pi(\mathbf{v})$  は、ある欠損リンクパターンの下での1日あたりの交通不便益であり、以下の式で定義される：

$$\pi(\mathbf{v}) \equiv \sum_{od \in OD_C(\mathbf{v})} q_{od}^*(\mathbf{v}) C_{od}^*(\mathbf{v}) + \sum_{od \in OD_C(\mathbf{v})} (Q_{od} - q_{od}^*(\mathbf{v})) \Theta + \sum_{od \in OD_{DC}(\mathbf{v})} Q_{od} \Pi \quad (6)$$

この式の右辺の各項は、それぞれ、総旅行時間、（交通混雑のために）トリップを中止する利用者の機会費用および経路途絶のためにトリップできない利用者の機会費用である。ここで、 $OD_C(\mathbf{v})$  および  $OD_{DC}(\mathbf{v})$  は、それぞれ、欠損リンクパターン  $\mathbf{v}$  の下で、少なくとも1つの経路が存在する起終点ペア集合と、その補集合を表す。式(5)右辺の第1項の総旅行時間は、欠損リンクパターン  $\mathbf{v}$  のネットワーク上で達成される利用者均衡状態でのOD交通需要  $q_{od}^*(\mathbf{v})$  とOD間交通費用  $C_{od}^*(\mathbf{v})$  の積を各起終点ペアについて足し合わせたものとして定義される；第2項のトリップ中止費用は、トリップを中止した利用者数（i.e. 平常時の交通需要  $Q_{od}$  と被災時の交通需要  $q_{od}^*(\mathbf{v})$  との差）に、トリップを中止することの機会費用  $\Theta$ （所与の定数）を乗じたものとして定義される；第3項のトリップ中止費用は、経路が存在しないためにトリップできなかった利用者数（i.e. 平常時の交通需要  $Q_{od}$ ）と、トリップが出来ないことの機会費用  $\Pi$ （所与の定数）との積として定義される。

### 3. モデル特有の困難さとその近似的解決法

前章で述べた問題[P]を、実ネットワークを対象として具体的に解くことは極めて困難である。これは、このモデルが、以下に挙げる2つの“規模の問題”を有するためである。本章では、それぞれの規模の問題の特性を述べ、それに対する近似的解決法を議論する。

#### (1) 被災パターンの膨大さ

第1の問題点は、地震時に生起し得る欠損リンクパターンの組合せが無数に存在することである。問題[P]において、ある戦略  $\mathbf{u}$  を選択したときの目的関数  $Z(\mathbf{u})$ （ひいては、当該戦略下で地震シナリオ  $s$  を与件とした条件付期待年間交通費用  $f(s, \mathbf{u})$ ）を厳密に評価するためには、地震時に生起し得る全ての欠損リンクパターン  $\mathbf{d}$  について、年間交通不便益  $T(\mathbf{d})$  を求める必要がある。しかし、この欠損リンクパターンの組合せは  $2^L$  通り存在するため、その列挙は、事実上、不可能である（例えばリンク数が10本の場合、発生する欠損リンクパターン数は約1000通りであるが、リンク数が20本になるとおよそ100万通り発生することになる）。

そこで、本研究では、以下の方法を用いて、 $f(s, \mathbf{u})$  を近似する。まず、ある程度の数（例えば1000個程度）のサンプル欠損リンクパターンを用意しておき、その集合を  $\hat{\mathbf{D}}$  とする。そして、それぞれのサンプル欠損リンクパターンについて、年間交通費用  $T(\mathbf{d})$  を計算しておく。次に、戦略  $\mathbf{u}$  の下で地震シナリオ  $s$  を与件とし

た条件付期待年間交通費用を、以下の式で近似する：

$$f(s, \mathbf{u}) \approx \hat{f}(s, \mathbf{u}) \equiv \sum_{\mathbf{d} \in \hat{\mathbf{D}}} \{T(\mathbf{d}) + r(\mathbf{d})\} \hat{p}(\mathbf{d} | s, \mathbf{u})$$

ここで、 $\hat{p}(\mathbf{d} | s, \mathbf{u})$  は、全欠損リンクパターン集合  $\mathbf{D}$  に対する  $\mathbf{d}$  の生起確率を、サンプルパターン集合  $\hat{\mathbf{D}}$  を母集団と見なして拡大したものであり、以下の式：

$$\hat{p}(\mathbf{d} | s, \mathbf{u}) \equiv p(\mathbf{d} | s, \mathbf{u}) / \sum_{\mathbf{d} \in \hat{\mathbf{D}}} p(\mathbf{d} | s, \mathbf{u})$$

で定義される。

ここで、戦略  $\mathbf{u}$  および地震シナリオ  $s$  を与件としたパターン  $\mathbf{d}$  の条件付生起確率  $p(\mathbf{d} | s, \mathbf{u})$  は、当該地震シナリオで各橋梁が受ける外力  $\{F_b(s)\}$  を、当該戦略下での各橋梁の脆弱性曲線  $\phi(\cdot)$  に代入するだけで計算できる。

従って、 $\{T(\mathbf{d}) | \mathbf{d} \in \hat{\mathbf{D}}\}$  および  $\{r(\mathbf{d}) | \mathbf{d} \in \hat{\mathbf{D}}\}$  を予め計算しておけば、任意の戦略  $\mathbf{u}$  に対して目的関数  $Z(\mathbf{u})$  (の近似値) を極めて効率的に計算できる。

本手法の近似精度は、明らかに、サンプル欠損リンクパターン集合の取り方に依存する。特に、被害が大きなパターンや、発生頻度の高いパターンは、近似精度に大きく影響するものと考えられる。そこで、本研究では、最も発生しやすいパターン、最も発生し難いパターン、被害が最大となるパターン (全てのリンクが欠損)、被害が最小となるパターン (全てのリンクが健全) を含む、十分な数のパターンを用いる。こうしたサンプル欠損リンクパターンのシステムティックな列挙方法については今後の検討課題である。

## (2) 戦略集合の膨大さ

第 2 の問題点は、問題[P]が、橋梁数  $B$  だけの制御変数を持つ 0-1 組合せ計画問題 (i.e. NP 困難) となっていることである。そのため、たとえ  $Z(\mathbf{u})$  が極めて効率的に計算できたとしても、その厳密解を多項式時間で求めるアルゴリズムは存在しない。

そこで、本研究では、補強戦略  $\mathbf{u}$  を少数のパラメータを用いて表現するスキームを構築する；そして、戦略  $\mathbf{u}$  を直接操作する代わりに、このパラメータを操作することで組合せ数を減少させる方法を検討する。具体的には、まず、図 3 のように縦軸に「各橋梁上の (平常時) 交通量」、横軸に「各橋梁が受ける平均地震外力」をとり、全ての橋梁をプロットする。ここで、“地震外力が  $\theta_1$  より大きいか、交通量が  $\theta_2$  より多い橋梁については、高い耐震性能を要求する” というスキームを考える。このスキームの下で LCC を最小化するような  $\theta_1, \theta_2$  を求める以下の問題を考える：

$$\min_{\theta_1, \theta_2} Z(\mathbf{u}(\theta_1, \theta_2))$$

ここで、 $\mathbf{u}(\theta_1, \theta_2)$  は、地震外力および交通量の閾値  $\theta_1, \theta_2$  に対応する耐震化戦略である。

この方法を用いることで、以下の 2 つが可能となる；①制御変数の組合せ数を大幅に減らすことができる；②組合せ計画問題をヒューリスティックに解いて得

られる“無機質”な解よりも、ステークホルダーの直感と整合的な戦略を求め易い。例えば、数理的に解いた場合、交通量が多く、受ける地震強度が大きい橋梁に対して、耐震化しないという解が出る可能性があるが、この手法を用いた場合、上述のような直感から外れた解が導かれることは無い。ただし、この方法以外にも戦略をあらかじめ絞る方法は考えられ、さらにそれらによって導きだされる戦略の妥当性を予め検証しておくことが必要不可欠であることは言うまでもない。

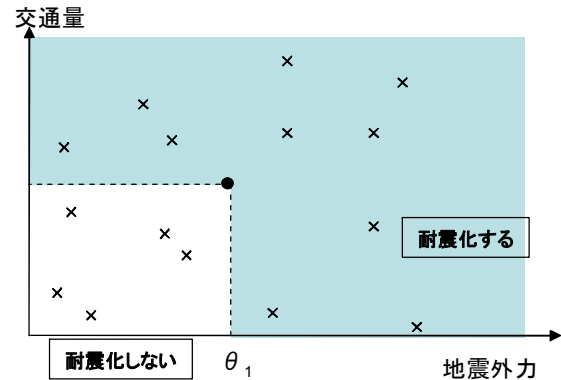


図-3 戦略を絞る基準の例

## 4. おわりに

本研究では、最適な耐震戦略を、利用者均衡概念を考慮した LCC を用いて求める枠組みを提案した。この枠組みをもとに、耐震性能レベルの細分化や、被災状態を複数考慮するといったモデルにも拡張可能である。

本稿では、本研究の枠組みとそれ特有の問題点にのみ言及するに留まったが、1つの目標として、本枠組みを用いた神戸市道路ネットワークにおける試算を考えている。その際、3章でも述べたように、膨大な数のラベルパターン、あるいは欠損リンクパターンに対し、提案する手法がどのくらい有効かを検討したいと考えている。その結果については、発表会で報告する予定である。

### 参考文献

- 1) 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, 2007. 印刷中
- 2) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析, 最新の理論と解法, 1998.
- 3) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地震及び応答スペクトル推定式の提案, 土木学会第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.161-164, 1997.
- 4) 加賀山泰一, 奥西史伸, 鈴木直人, 澤田吉孝: 阪神高速における地震防災システムの開発, 土木学会第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1033-1036, 1999.