

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*

Cost-Benefit Analysis of Road Network Reinforcement using Geographical Information Systems and User Equilibrium with Variable Demand *

長江剛志**・藤原友***・朝倉康夫****

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

1. はじめに

道路施設耐震化の効果分析を行う場合、地震時に施設が被る金銭的（直接的）損失のみならず、施設損壊がもたらす社会的（間接的）不便益を明示的に考慮する必要があることが知られている。藤原ら¹⁾は、道路施設の損壊による社会的不便益をネットワークの混雑増加として定義し、これを利用者均衡交通配分モデル²⁾を用いて計量することで社会的 LCC (*life cycle cost*) を求める投資効果分析の枠組みを提案した。しかし、藤原ら¹⁾の枠組みでは、道路施設耐震化問題が持つ以下の2つの重要な側面を考慮できていない。第1に、地震時に利用できるネットワーク (i.e., 各リンクの被災パターン) を *ad hoc* に与えており、現存する活断層の規模、活動周期および道路施設の耐震性能を明示的に考慮していない。第2に、社会的 LCC に含まれる道路損壊の社会的不便益は、被災時の交通混雑コストしか考慮されておらず、起終点間が途絶する (i.e. 経路が存在しない) ためにトリップが不可能となる場合や、極度の交通集中 (および旅行費用の増大) によってトリップを断念せざるを得ない場合のコストが含まれていない。

本研究では、上述の2つの側面を明示的に考慮した、道路ネットワーク耐震化の便益評価のための枠組みを提案する。本手法では、第1に、GIS (*Geographical Information System*: 地理情報システム) を活用することで、地震工学的・橋梁工学的に妥当な被災ネットワークを与える。第2に、需要変動型利用者均衡配分を用いる。これにより、ネットワーク損傷がもたらす以下の3つの社会的不便益——①交通混雑増大による不便益；②起終点間が途絶する利用者が支払う機会費用；③旅行費用の増大によってトリップを中止する利用者の機会費用——を適切に計量できる。

本稿は、以下のように構成される。まず、2. において、本研究の基本的な考え方を示す。次に、3. において、期待交通不便益の具体的な計算方法を述べる。最後に、4. において、神戸市ネットワークを対象として、高速道路上の道路橋の耐震化を行った場合の便益を、提案手法を用いて試算する。最後に、5. はまとめである。

2. 本研究の基本的考え方

本章では、道路ネットワーク耐震化の費用便益分析の基本的考え方を示す。ある道路ネットワークを管理する主体（以下、管理者）を考え、その計画視野は無限とする。管理者が取り得る耐震化戦略の集合を $M \equiv \{1, 2, \dots, M\}$ で表し、ある耐震化戦略 $m \in M$ の下での期待 LCC (*life cycle cost*) を以下の式で定義する：

$$L^m \equiv E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \frac{\tilde{c}^m}{(1+r)^t} \right] = E[\tilde{c}^m] \left(\sum_{t=0}^{\infty} (1+r)^{-t} \right) \\ = \frac{1+r}{r} E[\tilde{c}^m]$$

ここで、 r は年間割引率であり、所与の定数とする。 $\tilde{c}^m$ は戦略 m の下で被る1年当たりの損害であり、確率変数として表現される。以下では、まず、(1) および (2) で提案手法の枠組および試算に用いるデータ・セットを示す。次に、(3) において、現実的な状況の下で期待 LCC を評価する際の問題点を述べ、続く (4) において、適切な近似によってこの問題点を回避するための方法を提案する。

(1) モデルの枠組

本稿で提案する枠組は①道路ネットワークと交通需要、②道路施設、③地震シナリオと地震強度分布、④補修戦略と脆弱性曲線 (*fragility curve*) から構成される。

第1に、対象とする道路ネットワークのノード集合およびリンク集合を、それぞれ、 N および L で表す。各ノードは、 $1, 2, \dots, N$ の整数で区別され、各リンクは上流側ノードと下流側ノードの組 (i, j) で区別される。ネットワーク上の起終点 (OD) ペア集合を OD で表し、各 OD ペアを、起点ノードと終点ノードの組 (o, d) で区別する。OD ペア $(o, d) \in OD$ 間の1日あたりの（潜在的）交通需要を q^{od} で表し、 $\mathbf{q} \equiv \{q^{od} \mid (o, d) \in OD\}$ とベクトル表現する。本稿では、この交通ネットワークとして、神戸市道路ネットワーク（ノード数 $N=1,001$ 、リンク数 $L=2,671$ 、OD ペア数 $OD=17,287$ ）を対象とする。

第2に、ネットワーク上の道路施設 (e.g. 橋、トンネル、高架) などの集合を $B \equiv \{1, 2, \dots, B\}$ で表す。道路施設集合 B とネットワークのリンク集合 L との間には、以下の対応関係 $\{l_b \mid b \in B\}, \{B_l \mid l \in L\}$ が存在する：

*キーワード：耐震補強, GIS, 需要変動型利用者均衡交通配分

**正会員, 博士 (情報科学),

神戸大学大学院自然科学研究科 (神戸市灘区六甲台町1-1,
TEL078-803-6360, FAX078-803-6360)

***学生員,

神戸大学大学院自然科学研究科

****正会員, 工博, 神戸大学大学院自然科学研究科

- $l_b \in L$: 道路施設 $b \in B$ を含むリンク.
- $B_l \subset B$: リンク $l \in L$ に含まれる道路施設集合.

本稿では、地震の影響を被り得る道路施設として、当該ネットワーク上の道路橋のみを想定する。

第3に、対象ネットワークを含む地域において想定される地震シナリオの集合を $S \equiv \{1, 2, \dots, S\}$ で表し、シナリオ $s \in S$ の年当り生起確率を、所与の定数 $0 < \lambda(s) < 1$ で表す。シナリオ $s \in S$ において道路施設 $b \in B$ が受ける地震外力を $G_b(s) \in R_+$ で表す。本稿では、上述の神戸市道路ネットワークを含む周辺地域を対象とし、後述する23種類の断層活性化シナリオを想定する。地震強度の指標として、阪神高速道路公団修正スペクトル強度³⁾ (SI')を採用する。そして、あるシナリオの地震が生起したとき、任意の地点における地震強度を、当該地点から断層までの最短距離を用いた距離減衰式⁴⁾を用いて求める。

第4に、地震によって外力を受けた施設 $b \in B$ は、以下の損害のいずれかを確率的に被るものとする⁵⁾：

1. 被災なし ($\varepsilon_b = 0$)
発災直後から通常通り通行可能.
2. 半壊 ($\varepsilon_b = B$)
発災後 120 日間は通行不可能. その後、通常通り通行可能.
3. 全壊 ($\varepsilon_b = A$)
発災後 310 日間は通行不可能. その後、通常通り通行可能.

ここで、地震外力を受けた施設 $b \in B$ が被災度 A 以上および被災度 B 以上の損害を被る確率を、それぞれ、外力 G と補修戦略 m の既知関数 $f_b^A, f_b^B : R_+ \times M \rightarrow [0, 1]$ で表す。ここで、 f_b^A, f_b^B は、それぞれ、 G に関する増加関数であり、 $f_b^A(G) \leq f_b^B(G), \forall G \in R_+$ を満たす関数として定義する。本稿では、この関数 f_b^A, f_b^B を当該施設の脆弱性曲線 (fragility curve) と呼ぶ。耐震化戦略 $m \in M$ の下で、シナリオ $s \in S$ の地震が生起したとき、

施設 $b \in B$ が被災度 ε の損害を被る条件付確率 $p_b^m(\varepsilon | s)$ は、この脆弱性曲線を用いて、以下のように表される：

1. $p_b^m(A | s) \equiv f_b^A(G_b(s), m)$:
被災度 A の損害を被る確率,
2. $p_b^m(B | s) \equiv f_b^B(G_b(s), m) - f_b^A(G_b(s), m)$:
被災度 B の損害を被る確率,
3. $p_b^m(0 | s) \equiv 1 - f_b^B(G_b(s), m)$:
損害を受けない確率.

本稿では、簡単のために以下の3つを仮定する：まず、全ての道路橋の構造物性状を、震度法で設計されたRC橋脚相当⁶⁾として扱うこととする。次に、耐震化戦略集合として、以下の2つのみを考える：①現況のまま何もしない；②高速道路上の全ての道路橋について、その橋脚の構造物性状を、地震時保有水平耐力法で設計されたRC橋脚相当に変更する。以下では、前者を“無耐震化戦略”，後者を“耐震化戦略”と呼ぶ。最後に、道路橋の脆弱性曲線として対数正規分布を採用し、その無耐震化および耐震化戦略の下でのパラメタを加賀山³⁾に基づいて推計する。

(2) 試算に用いるデータ・セット

本研究では、図-1 に示すように、地理情報システム (GIS: *Geographical Information Systems*) と交通均衡配分ネットワーク・モデルの2つのデータ・セットを用いる。まず、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 (あるいはメッシュコード) からなる共通の座標空間上に表現したマップ (あるいはレイヤー) である。本稿では、“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、対象地域で想定される地震シナリオごとに用意され、それぞれ、当該地域内の第3次メッシュ区画 (約 1km 四方) と、その区画における地震強度 $\{G_b(s)\}$ の組によって構成される。

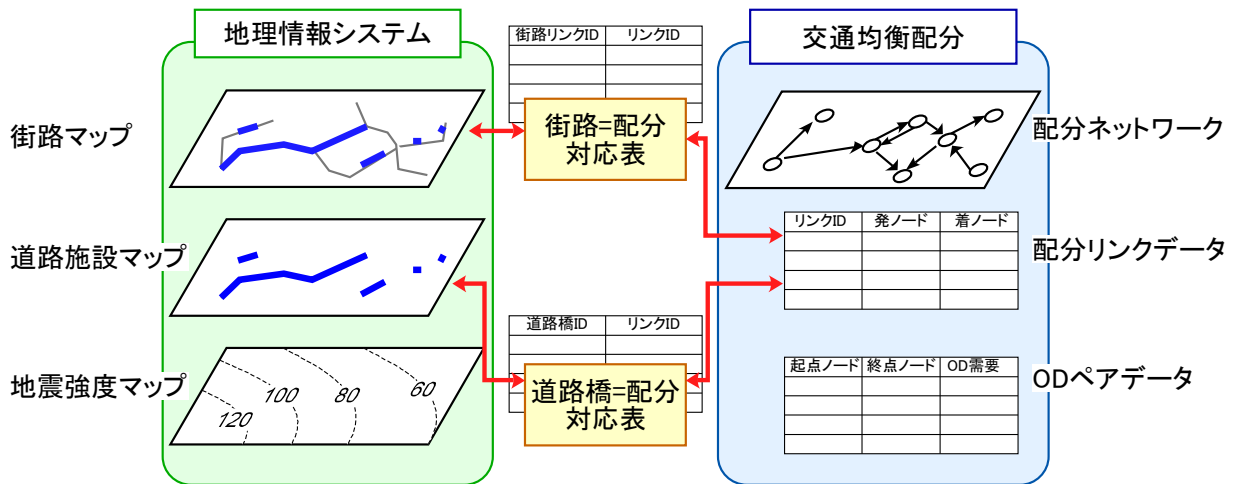


図-1 地震強度—道路橋—配分ネットワーク関係

次に、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。

配分ネットワーク・モデルは、配分リンク・データと OD ペア・データの 2 つのデータ・セットで構成される。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 $l \in L$ について、上流側ノード、下流側ノード、およびリンク性能 (i.e. 自由旅行時間、容量、長さ、料金など) から構成される。一方、OD ペア・データは、ネットワークに対する潜在的な交通需要を表し、各 OD ペア $(o, d) \in OD$ について、起点ノード、終点ノード、および OD 交通需要 q^{od} 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 つの対応表によって関係付けられている。

(3) 期待LCC最小化モデルとその問題点

前節までで示した枠組とデータ・セットを用いて、期待 LCC 最小化問題を定式化してみよう。まず、ネットワーク上の各施設の被災度の組み合わせを被災度パターンと呼び、 $\mathbf{e} \equiv \{\varepsilon_b \mid b \in B\}$ で表す。本稿では、各施設が被災する事象が互いに独立であると仮定する。このとき、耐震化戦略 $m \in M$ の下でシナリオ $s \in S$ の地震の生起と与件とした施設の被災度パターン $\mathbf{e} \in E$ が生起する条件付確率は、

$$p^m(\mathbf{e} \mid s) \equiv \prod_{b \in B} p_b^m(\varepsilon_b \mid s) \quad (1)$$

と定義できる。以下では、道路施設が取り得る被災度パ

ターンの全集合を $\mathbf{E} \equiv \left\{ \mathbf{e} \mid \underbrace{\{0, A, B\} \times \dots \times \{0, A, B\}}_B \right\}$ と記述

する。なお、いずれの道路施設も被災していない場合の被災度パターンを $\mathbf{e}^0$ で表す。

次に、耐震化戦略 $m \in M$ の下でネットワーク上の道路施設が被災度パターン $\mathbf{e} \in E$ の被害を受けたときの年間費用を、以下の式で定義する：

$$c^m(\mathbf{e}) \equiv T(\mathbf{e}) + R(\mathbf{e}) + V^m$$

ここで、 $T(\mathbf{e})$ 、 $R(\mathbf{e})$ は、それぞれ、被災パターン $\mathbf{e}$ が生起したときの年間交通不便益および道路施設復旧費用を表す。 V^m は耐震化戦略 m を継続するために必要な年間維持管理費用である。

耐震化戦略 $m \in M$ の下での年間費用の期待値は、各シナリオの地震の年間発生確率 $\{\lambda(s) \mid s \in S\}$ と、各被災パターン $\mathbf{e}$ が生起する条件付確率 $\{p^m(\mathbf{e} \mid s)\}$ を用いて、以下のように表現できる。

$$\begin{aligned} E[\tilde{c}^m] &\equiv V^m + \sum_{s \in S} \lambda(s) \sum_{\mathbf{e} \in E} \{T(\mathbf{e}) + R(\mathbf{e})\} p^m(\mathbf{e} \mid s) \\ &\equiv V^m + E[T(\mathbf{e}) \mid m] + E[R(\mathbf{e}) \mid m] \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $E[\cdot \mid m]$ は耐震化戦略 $m \in M$ を与件とした条件付期待演算で、任意の確率変数 $X: \mathbf{E} \rightarrow R$ に対して、 $E[X(\mathbf{e}) \mid m] \equiv \sum_{s \in S} \lambda(s) p^m(\mathbf{e} \mid s) X(\mathbf{e})$ と定義される。

このとき、LCC 最小化を目的とした耐震化問題は、形式的には、以下のように定式化できる：

$$[P] \quad \min_{m \in M} L^m \equiv \frac{r}{1+r} E[\tilde{c}^m]$$

しかし、この問題[P]の目的関数 L^m を厳密に評価することは、一般に、極めて困難である。なぜなら、道路施設の被災パターン集合 $\mathbf{E}$ の要素数が 3^B と巨大であり、期待演算 $E[\cdot \mid m]$ を厳密に評価することがほぼ不可能なためである。特に、各被災パターンの下での交通不便益 $T(\mathbf{e})$ の評価には、後述する利用者均衡配分を行う必要があるため、モンテ・カルロ・シミュレーションなどのナイーブな適用による評価も非現実的である。

そこで、本研究では、問題[P]の目的関数 L^m を適当に近似することで、現実的な規模の道路ネットワークに対してもシステムティックに L^m を評価できる方法を提案する。

(4) 期待LCCの近似的評価方法

本節では、戦略 $m \in M$ の下でシナリオ $s \in S$ の地震が生起したときの条件付期待交通不便益：

$$E[T(\mathbf{e}) \mid m, s] \equiv \sum_{\mathbf{e} \in E} p^m(\mathbf{e} \mid s) T(\mathbf{e}) \quad (3)$$

の評価を、当該状況下で最尤道路橋被災パターンにおける交通不便益：

$$E[T(\mathbf{e}) \mid m, s] \approx T(\mathbf{e}^*(m, s)) \quad (4)$$

によって代替する。ここで、 $\mathbf{e}^*(m, s)$ は最尤道路橋被災パターンであり、以下の式で定義される：

$$\mathbf{e}^*(m, s) \equiv \left\{ \varepsilon_b^*(m, s) \equiv \arg \max_{\varepsilon_b \in \{A, B, 0\}} p_b^m(\varepsilon_b \mid s) \mid b \in B \right\}$$

すなわち、それぞれの道路橋 $b \in B$ について、最も発生確率が高い被災度を割り当てたものが最尤道路橋被災パターンである。

こうして得られた各シナリオの最尤交通不便益を用いて、戦略 $m \in M$ の下での期待交通不便益を、以下の式で定義する：

$$E[T(\mathbf{e}) \mid m] \approx \sum_{s \in S} \lambda(s) T(\mathbf{e}^*(m, s)) \quad (5)$$

この提案方法は、各シナリオ $s \in S$ について 1 度だけ利用者均衡配分を行えばよいため、多数のシナリオや補修

戦略が存在する場合にも容易に拡張することができる。

最尤交通不便益(4)が条件付期待交通不便益(3)の適切な近似となることは、必ずしも保証されない。しかし、それでも最尤交通不便益を用いることには以下の3つの利点が存在する：第1に、最尤交通不便益(4)は、最尤被災パターンとの関係が明確である。このため、どの道路橋の破損が交通不便益に影響するのか、といった因果関係の分析が容易である。第2に、最尤交通不便益は、1つのデータ・セットから一意に決定される。これにより、評価主体の恣意性を可能な限り排除した客観的な政策立案に寄与し得る。最後に、最尤交通不便益は定義が明快で判りやすいため、様々なステークホルダの間で共通の理解を得られる事が期待できる。

3. 期待交通不便益の計算方法

本章では、前章までで示した枠組およびデータ・セットの下で、戦略 $m \in M$ の下でシナリオ $s \in S$ の地震の生起を与件とした条件付期待交通不便益 $T(\mathbf{e}^*(m, s))$ の計算方法を示す。具体的には、まず、(1)において、戦略 m の下で地震シナリオ s が生起したときの道路橋被災パターンの条件付生起確率 $p^m(\mathbf{e}|s)$ の導出方法を示す。(2)では、ある道路橋被災パターン $\mathbf{e}$ が生起したときの交通混雑（およびトリップ中止）による不便益 $T(\mathbf{e})$ の計算方法を述べる。

(1) 道路橋被災パターンの条件付確率の算出

シナリオ s の地震が生起したとき、橋梁 b が戦略 m の下で被災度 A および B の損害を被る条件付確率 $p_b^m(A|s), p_b^m(B|s)$ は、それぞれ、橋梁 b の脆弱性曲線を用いて算出できる。本稿では、まず、ある地震シナリオ $s \in S$ が生起したときに道路橋 b の基盤面に作用する外力（i.e. 阪神高速道路公団 SI' ） $G_b(s)$ で表す。この $G_b(s)$ は、図-1の地震強度マップと道路橋マップのレイヤーを重ねることで容易に求められる。次に、道路橋の脆弱性曲線を、以下の対数正規分布：

$$f_b^A(G, m) \equiv \Phi\left(\frac{\ln G - \theta_A^m}{\xi_A^m}\right), \quad (6)$$

$$f_b^B(G, m) \equiv \Phi\left(\frac{\ln G - \theta_B^m}{\xi_B^m}\right) \quad (7)$$

で定義する。ここで、 $\Phi(x)$ は標準正規分布関数である。 θ_i^m, ξ_i^m は、それぞれ、パラメタ μ_i^m, σ_i^m から決定される定数であり、任意の $m \in M$ 、 $i \in \{A, B\}$ について、それぞれ、 $\theta_i^m \equiv \ln \mu_i^m - (\xi_i^m)^2/2$ 、 $\xi_i^m \equiv \ln(1 + (\sigma_i^m/\mu_i^m)^2)$ と定義される。パラメタ (μ_i^m, σ_i^m) は、戦略 $m \in M$ の下で被災度 $i \in \{A, B\}$ に対応する脆弱性曲線の期待値および標準偏差である。

本稿では、この期待値および標準偏差として、加賀山

ら³⁾によって求められた以下の値を用いる。まず、補強の施されていない道路橋に対しては、 $\mu_B^0 = 50$ 、 $\sigma_B^0 = 20$ 、 $\mu_A^0 = 100$ および $\sigma_A^0 = 35$ とする。次に、耐震化を行った（高速道路上の）道路橋については、 $\mu_B^1 = 64.5$ 、 $\sigma_B^1 = 21.5$ 、 $\mu_A^1 = 157.5$ および $\sigma_A^1 = 67.6$ とする。

(2) 道路橋被災パターンに対する交通不便益

ある道路橋被災パターン $\mathbf{e} \in \mathbf{E}$ に対する交通混雑およびトリップ中止による不便益 $T(\mathbf{e})$ は、以下の手順によって計算される。まず、道路橋被災パターン $\mathbf{e}$ より、以下の2つの期間における利用可能リンク集合 $L^{A,B}(\mathbf{e})$ および $L^A(\mathbf{e})$ を、それぞれ求める：①発災直後から120日目までの期間（以下、第1復旧期間。被災度AおよびBの道路橋が利用不可能）；②発災後121日目から310日目までの期間（以下、第2復旧期間。被災度Aの道路橋のみ利用不可能）。次に、利用者均衡配分モデルを用いて交通量配分を行い、それぞれの利用可能リンク・パターン $\mathbf{e}$ の下での1日あたりの交通不便益 $\tau(N, L^{A,B}(\mathbf{e}))$ および $\tau(N, L^A(\mathbf{e}))$ を算出する。最後に、各期間の交通不便益に期間長を乗じて加えることで年間不便益 $T(\mathbf{e})$ を算出する。以下では、この手順の各段階を詳述しよう。

a) 利用可能リンク集合の導出

まず、配分ネットワーク上の任意のリンク $l \in L$ 上に存在する道路橋集合 $B_l \subset B$ を、図-1における道路橋=配分対応表を用いて、予め求めておく。次に、配分リンク l は、当該リンク上に存在する道路橋 $b \in B_l$ の内どれか一つでも損害を受けていれば通行できないものと仮定する。これより、第1復旧期間（被災度0の道路橋のみ通行可能）で利用できるリンク集合は、

$$L^{A,B}(\mathbf{e}) \equiv \{l \mid B_l \text{上の道路橋が全て被災度0}\}$$

と求められる。同様に、第2復旧期間（被災度Bあるいは0の道路橋のみ通行可能）で利用できるリンク集合は、

$$L^B(\mathbf{e}) \equiv \{l \mid B_l \text{上の道路橋が全て被災度0かB}\}$$

と求められる。

b) 利用者均衡配分モデルを用いた交通不便益の評価

第1、第2復旧期間における1日当たりの交通不便益は、各期間で利用できるネットワーク（被災ネットワーク） $(N, L^{A,B}(\mathbf{e}))$ 、 $(N, L^A(\mathbf{e}))$ の下での利用者均衡状態における総旅行時間、非連結OD需要、およびトリップ・キャンセル数から求められる。以下では、それぞれの用語を概説し、その計算方法を述べる。

まず、ネットワーク (N, L) における交通量パターンを $\mathbf{x} \equiv \{x_l \mid l \in L\}$ で定義し、それに対するリンク旅行時間パターンを $\mathbf{t}(\mathbf{x}) \equiv \{t_l(x_l) \mid l \in L\}$ とする。ここで、 x_l はリンク $l \in L$ の交通量、 $t_l(x_l)$ はリンク l を通過するために必要な時間（旅行時間）である。本稿では、このリンク旅行時間として、以下のBPR関数を採用する：

$$t_l(x_l) \equiv y_l (1 + \alpha(x_l/\mu_l)^\beta)$$

ここで、 y_l および μ_l は、それぞれ、リンクの自由旅行時間（交通混雑が発生していないときの旅行時間）および交通容量であり、**図-1**の配分リンク・データにより与えられる。 α, β はパラメタであり、本稿では、国内で一般的に用いられる $\alpha=1, \beta=3$ を採用する²⁾。

利用者均衡配分モデルでは、各 OD ペアの利用者は、当該起終点の経路集合のうち、一般化費用が最小となる経路を選択する。ここで、経路の一般化費用とは、当該経路上の全てのリンクの一般化費用の和として定義される。そして、リンクの一般化費用とは、当該リンクの旅行時間 $t_l(x_l)$ を金銭換算したものと、当該リンクの通行料金 e_l の和として定義される。各リンクの通行料金は **図-1**の配分リンク・データにより与えられる。本節では、時間価値を $v=50$ (円/分) とする。

上述の枠組みの下で、利用者均衡状態とは、以下のように定義される：全ての OD ペア $od \in OD$ に関して、どの利用者にとっても、自分だけがどのように経路を変更しても、それ以上 起終点間一般化費用を改善できない状態。

ここで、利用者均衡配分に用いるデータ（配分リンク・データ、OD ペア・データ）は、全てのリンクが利用できる場合のみを想定して推計されている点に注意されたい。そのため、これらのデータをそのまま被災ネットワーク $(N, L^{A,B}(e))$ 、 $(N, L^A(e))$ に用いる場合、以下の2つの問題が生じる：

1. 正の OD 需要が存在するにも関わらず、起終点を結ぶ経路が一つも存在しない OD ペア（非連結 OD ペア）が存在する。
2. 起終点間の一般化費用が極端に大きい（e.g., 起点から終点まで到着するのに1日以上必要となる）OD ペアが存在する。

これらの問題を回避するため、本研究では、以下の仮定を設ける：まず、災害時の“潜在的な”交通需要が、平常時に推計された OD ペア間の交通需要に一致すると仮定する。次に、OD 間に経路が存在しない場合や、OD 間の経路費用が著しく大きい場合には、利用者は、トリップを行わないこととする。すなわち、各利用者は許容できる OD 間経路費用の上限 $\Theta_{\max}$ を持ち、実際の旅行費用がこれを超える場合には、機会費用 $\Theta_{\max}$ を支払ってトリップを取りやめることを選択する。この仮定は、OD 間交通需要が経路費用によって変化する“変動需要型利用者均衡配分モデル”において、需要関数を階段型関数で近似したものと解釈することもできる。この仮定に基づき、本研究では、OD 間に経路が存在しない OD 需要の総和を“非連結 OD 需要”，経路費用が大きすぎるためにトリップを取りやめる利用者の総数を“トリップ・キャンセル数”として、それぞれ計上する。なお、本節では、経路間の許容費用（i.e. トリップを取り止めることの機会費用）を、 $\Theta_{\max} = 8 \text{ 時間} \times 60 \text{ 分} \times 50 \text{ 円} = 24,000 \text{ 円}$ とした。

上述の枠組の下で、あるネットワーク $(N, L(e))$ にお

ける利用者均衡状態での交通量パターン、非連結 OD 需要、およびトリップ・キャンセル数を、それぞれ、 $\mathbf{x}^*(L(e))$ 、 $Q_D^*(L(e))$ および $Q_C^*(L(e))$ とする。そして、当該均衡状態での1日あたりの交通不便益を、以下のように定義する：

$$\tau(N, L(e)) \equiv v \sum_{l \in L(e)} x_l^* t_l(x_l^*) + \Theta_{\max} \{Q_D^*(L(e)) + Q_C^*(L(e))\} \quad (8)$$

この式の右辺の各項は、それぞれ、ネットワークの総旅行時間を金銭換算したもの、トリップ不能による機会費用、およびトリップ中止による機会費用を表している。

c) 年間交通不便益の算出

道路橋被災パターン e が生じたときの年間交通不便益 $T(e)$ は、前項で求めた第1、第2復旧期間における1日あたりの交通不便益 $\tau^{A,B}(e) \equiv \tau(N, L^{A,B}(e))$ および $\tau^B(e) \equiv \tau(N, L^B(e))$ にそれぞれの期間長を乗じて総和した以下の式で求められる：

$$T(e) \equiv 120\tau^{A,B}(e) + 190\tau^A(e) + 55\tau^0$$

ここで、 τ^0 は、第2復旧期間が終了した後の55日間において、平常時のネットワーク (N, L) 上で発生する1日当たりの交通不便益である。

4. 試算：耐震化の交通不便益減少効果

最後に、提案手法を用いた高速道路の耐震化によるLCCの交通不便益減少効果を試算しておこう。戦略を $m=0$ （耐震化しない）から $m=1$ （高速道路のみを耐震化する）へ変更することで、期待交通不便益は、

$$E[\Delta L] \equiv \frac{1+r}{r} E[\tilde{T}^0 - \tilde{T}^1] = \frac{1+r}{r} \sum_{s \in S} \{T(e^*(0, s)) - T(e^*(1, s))\} \quad (9)$$

だけ減少する。以下では、まず、(1)において、地震シナリオごとの最尤道路橋被災パターンを求め、耐震化による道路橋の被災度の変化を分析する。次に、(2)では、耐震化による最尤交通不便益の変化を地震シナリオごとに分析し、式(9)で定義される期待LCC変化量を求める。最後に、(3)では、いくつかの地震シナリオについて、耐震化による道路橋被災度および均衡交通量の分布の変化を、GIS (Geographical Information System: 地理情報システム)を用いて可視化する。この方法は、前章までで示した、道路ネットワーク耐震化問題を数理最適化問題として記述・分析する方法とは異なる視座を与え、より説明力の高い耐震基準の検討に寄与すると考えられる。

(1) 地震シナリオごとの道路橋の被災度変化

表-1 は、耐震化による道路橋の被災度の変化を地震シナリオ $s \in S$ ごとに示したものである。第1列はシナ

表-1 地震シナリオごとの被災度変化

ID	地震シナリオ	耐震化前			耐震化後			耐震化効果		
		被災無し	B	A	被災無し	B	A	B→0	A→B	合計
1	地殻内	859	0	0	859	0	0	0	0	0
2	地殻内	859	0	0	859	0	0	0	0	0
3	南海トラフ	859	0	0	859	0	0	0	0	0
4	地殻内	859	0	0	859	0	0	0	0	0
5	地殻内	859	0	0	859	0	0	0	0	0
6	南海トラフ	859	0	0	859	0	0	0	0	0
7	地殻内	859	0	0	859	0	0	0	0	0
8	山崎	859	0	0	859	0	0	0	0	0
9	南海トラフ	859	0	0	859	0	0	0	0	0
10	地殻内	859	0	0	859	0	0	0	0	0
11	上町	859	0	0	859	0	0	0	0	0
12	淡路島西岸	859	0	0	859	0	0	0	0	0
13	有馬高槻	804	55	0	816	43	0	12	0	12
14	中央構造	859	0	0	859	0	0	0	0	0
15	地殻内	714	145	0	736	123	0	22	0	22
16	有馬高槻	312	491	56	396	420	43	84	13	97
17	大阪湾	475	384	0	559	300	0	84	0	84
18	六甲	297	517	45	315	523	21	18	24	42
19	六甲	291	281	287	292	356	211	1	76	77
20	大阪湾	291	178	390	291	309	259	0	131	131
21	六甲	291	4	564	291	95	473	0	91	91
22	六甲	291	0	568	291	2	566	0	2	2
23	六甲	291	0	568	291	0	568	0	0	0

表-2 耐震化効果のあるシナリオの生起確率

ID	地震シナリオ	生起確率(1/年)	再現期間(年)
13	有馬高槻	6.14E-04	1,628
15	地殻内	2.72E-04	3,681
16	有馬高槻	2.05E-04	4,866
17	大阪湾	1.63E-04	6,139
18	六甲	1.28E-04	7,818
19	六甲	9.30E-05	10,749
20	大阪湾	5.98E-05	16,736
21	六甲	3.61E-05	27,733
22	六甲	2.57E-05	38,904

リオ識別番号、第2列は当該シナリオにおける地震活動域名である。第3列から第5列までは、耐震化前に各シナリオの地震が生起したときに、各被災度——被災なし、被災度 B、被災度 A——ごとの道路橋の数を、それぞれ示したものである。同様に、第6列から第8列は、耐震

化後の被災度別道路橋数を示したものである。ただし、配分ネットワーク上には存在するが、**図-1**の地震強度マップの外にある291本の道路橋については、耐震化前後およびシナリオに関わらず被災しないと仮定した。**表-1**の第9列から第11列は、耐震化によって被災度が変化した道路橋の数を表す：B→0は耐震化によって被災を免れた（被災度がBから0に変化した）道路橋の数（以下、 $B^{B \rightarrow 0}(s)$ とする）、A→Bは、耐震化によって被災度がAからBに軽減された道路橋の数（以下 $B^{A \rightarrow B}(s)$ ）を表す。第11列は、それぞれの耐震化効果のあった道路橋の総数を表す。

表-1より、耐震化によって被災を免れる、あるいは、軽減できる道路橋は、シナリオ13および15～22で見られることが判る。**表-2**にこれらの地震の1年当たりの発生確率およびその逆数（再現期間）を示す。これを用いれば、耐震化による道路橋の期待被害軽減数は、それぞれ、以下のように求められる：

$$E[B^{B \rightarrow 0}] = \sum_{s \in S} \lambda(s) B^{B \rightarrow 0}(s) = 4.67 \times 10^{-2}$$

$$E[B^{A \rightarrow B}] = \sum_{s \in S} \lambda(s) B^{A \rightarrow B}(s) = 2.40 \times 10^{-2}$$

これより、耐震化によって被災度を軽減できる道路橋は1本にも満たないことが判る。

これらを用いて、耐震化による復旧費用の軽減効果を調べておこう。被災度A、Bの道路橋の（1橋あたりの）復旧費用を、それぞれ、 R^A, R^B とすれば、耐震化による復旧費用の年間減少および、ストックで計ったLCCの復旧費用軽減は以下の式で求められる：

$$E[\Delta R] = (R^A - R^B) E[B^{A \rightarrow B}] + R^B E[B^{B \rightarrow 0}]$$

$$E[\Delta L_R] = \frac{1+r}{r} E[\Delta R]$$

仮に道路橋復旧費用⁷⁾を $R^A = 16$ 、 $R^B = 10$ （億円/橋）、割引率 $r = 0.04$ とすれば、耐震化による復旧費用減少は年間 $E[\Delta R] \approx 6,110$ 万円であり、ストックで計ったLCC軽減効果は $E[\Delta L_R] \approx 15.8$ 億円となる。この金額は高速道路上の「全ての」道路橋を耐震化したことによる復旧

表-3 地震シナリオごとの均衡配分パターン

ID	耐震化前								耐震化後							
	発災～120日				120日～310日				発災～120日				120日～310日			
	総旅行時間 (百万分)	到達不可 (千台)	キャンセル (千台)	分/台	総旅行時間 (百万分)	到達不可 (千台)	キャンセル (千台)	分/台	総旅行時間 (百万分)	到達不可 (千台)	キャンセル (千台)	分/台	総旅行時間 (百万分)	到達不可 (千台)	キャンセル (千台)	分/台
13	106	89	0	36.9	73	0	0	24.6	77	51	0	26.4	73	0	0	24.6
15	87	298	240	35.7	73	0	0	24.6	126	216	150	48.7	73	0	0	24.6
16	111	558	381	54.9	108	89	0	37.7	94	558	335	45.4	77	51	0	26.4
17	158	503	157	68.8	73	0	0	24.6	197	300	129	77.8	73	0	0	24.6
18	58	914	190	31.2	93	94	0	32.4	58	888	212	31.1	80	34	0	27.4
19	58	914	190	31.5	154	438	97	63.3	58	914	190	31.5	146	284	27	55.2
20	58	914	190	31.5	162	503	158	70.5	58	914	190	31.5	121	150	291	47.9
21	58	914	190	31.5	58	914	190	31.2	58	914	190	31.5	124	606	304	60.6
22	58	914	190	31.5	58	914	190	31.5	58	914	190	31.5	58	914	190	31.5

費用軽減効果である点に注意されたい。これより、耐震化による LCC の復旧費用軽減効果は、次に分析する交通不便益の 10 分の 1 程度でしかないことが判る。

(2) シナリオ別の交通不便益の変化

表-3 は、耐震化効果が見られるシナリオ 13, 15~22 について、それぞれ、耐震化前後の各復旧期間での均衡状態を示したものである。それぞれの均衡状態について、総旅行時間 (106 台分)、非連結 OD 需要 (103 台)、トリップ・キャンセル数 (103 台)、および 1 トリップあたりの旅行時間 (分/台) を示している。平常時の均衡状態では、総旅行時間が 73×106 台分、トリップあたりの旅行時間は 24.6 分/台であり、非連結 OD およびトリップ・キャンセルは存在しない。

表-3 において、太字および斜体で示されている部分は、それぞれ、耐震化によってパフォーマンスが悪化した部分と改善した部分を示している。これより、以下の 3 点が明らかとなる。第 1 に、高速道路の耐震化は必ずしも総旅行時間 (交通混雑による不便益) を減少させない。これは、耐震化によって被害を免れた高速道路に交通が集中し、ネットワーク全体の効率性が悪化することを示唆している。特に、シナリオ 21 の地震では、第 2 復旧期間 (120 日~310 日) にトリップあたりの旅行時間がほぼ倍となり、トリップ・キャンセル数も増加して

表-4 シナリオ別の年間耐震化効果

ID	総旅行 時間減少 (百万分)	到達 不可減少 (千台)	キャン セル減少 (千台)	不便益 減少 (十億円)
13	3,485	4,595	0	285
15	-4,769	9,856	10,823	258
16	8,011	7,275	5,516	708
17	-4,650	24,455	3,336	434
18	2,370	14,732	-2,688	408
19	1,394	29,147	13,233	1,087
20	7,862	67,210	-25,177	1,402
21	-12,571	58,545	-21,745	255
22	0	0	0	0

表-5 シナリオ別年間耐震化効果の内訳

ID	総走行時間 減少	非連結 OD 減少	キャンセル 減少
13	61%	39%	0%
15	-92%	92%	101%
16	57%	25%	19%
17	-54%	135%	18%
18	29%	87%	-16%
19	6%	64%	29%
20	28%	115%	-43%
21	-247%	552%	-205%
22	-	-	-

いる。これは、耐震化が間接的にもたらす過剰な交通集中によって、トリップを取りやめる利用者が増加することを意味している。第 2 に、総旅行時間およびトリップあたりの旅行時間が減少しているにも関わらず、トリップ・キャンセル数が増加しているケース (シナリオ 18

の第 1 復旧期間およびシナリオ 20 の第 2 復旧期間) が存在する。これは、特定の OD ペア間で旅行時間が極度に増加してトリップがキャンセルされることで、他の利用者が混雑を回避できることを示唆している。最後に、耐震化効果を受ける道路橋の数と、非連結 OD 需要との関係は単調ではない。すなわち、耐震化によって被災度が軽減する道路橋が 131 本存在するシナリオ 20 よりも、耐震化効果を受ける道路橋の少ないシナリオ 19 や 21 の方により多くの非連結 OD 減少効果が表れている。これは、(高速道路全体ではなく) 一部の道路橋に対する重点的な耐震化がより効率的となる可能性を示している。

表-4 および **表-5** は、地震シナリオごとの年間耐震化効果を示したものである。**表-4** の第 1 列から第 3 列は、それぞれ、年間総旅行時間、年間非連結 OD 需要、年間トリップ・キャンセル数の耐震化による減少効果を表している。これは、表-3.7.3 に示した各道路橋被災パターンでの均衡状態に期間長を乗じ、耐震化前後の差をとることで計算できる。第 4 列は、各シナリオの地震が発生したときに発生する年間交通不便益減少 $\Delta T(s) \equiv T(e^*(0,s)) - T(e^*(1,s))$ であり、総旅行時間を金銭換算したものに、トリップ中止 (非連結 OD 需要とトリップ・キャンセル) による機会費用を加えたものとして計算される。**表-5** は、この年間交通不便益減少の構成比率を表している。**表-5** における負の値は、耐震化によって不便益が増加 (悪化) していることを表す。

表-4 より、シナリオ次第では耐震化によって年間総旅行時間が増加 (悪化) するにも関わらず、年間不便益は常に減少 (改善) していることが判る。これは、年間不便益の殆どが非連結 OD 需要によって決定されるためである。このことは、**表-5** から確認できる。

最後に、高速道路耐震化による年間交通不便益の減少およびストックで計った LCC の交通不便益軽減効果を求めておこう。これは、以下の式：

$$E[\Delta T] \equiv E[\tilde{T}^0 - \tilde{T}^1] = \sum_{s \in S} \lambda(s) \Delta T(s)$$

$$E[\Delta L_T] \equiv \frac{1+r}{r} E[\Delta T]$$

より、 $E[\Delta T] \approx 7.1$ 億円、 $E[\Delta L_T] \approx 184$ 億円と求められる。その内訳は、総旅行時間効果が 28 億円(15%)、非連結 OD 需要効果が 136 億円(74%)、トリップ・キャンセル数効果が 20 億円(11%)である。

以上より、高速道路耐震化によって交通不便益を軽減できるかどうかは、地震発生時にもトリップ可能な道路網を確保できるかどうかは鍵となることが判る。ここで、非連結 OD 需要を計量する際には交通均衡配分問題を解く必要がなく、短時間でより多くのケースを分析することに注意されたい。このことは、経済性照査を行う際に、計量が簡便でかつ重要な指標として非連結 OD 需要を援用できる可能性を示唆している。

(3) GISによる高速道路耐震化効果の可視化

最後に、高速道路耐震化の効果を、GIS を用いた別の視点から捉える事を試みよう。以下では、地震シナリ

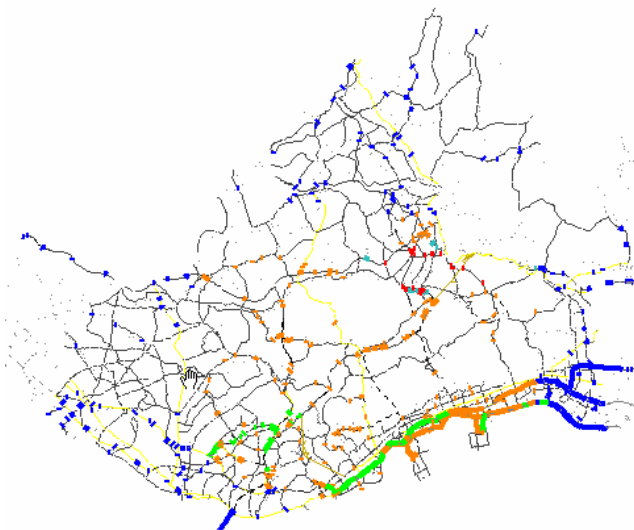


図-2 道路橋被災度と耐震化効果の分布

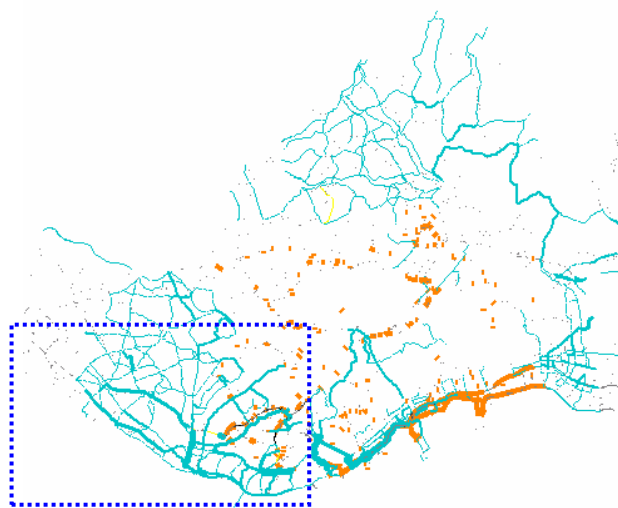


図-4 被災時の交通量分布（耐震化前）

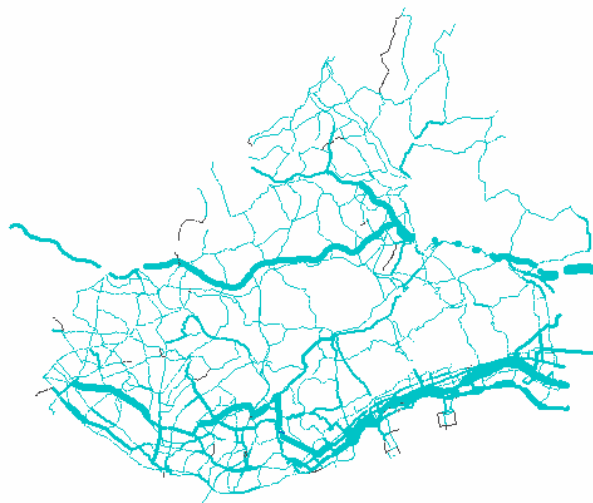


図-3 平常時の交通量分布

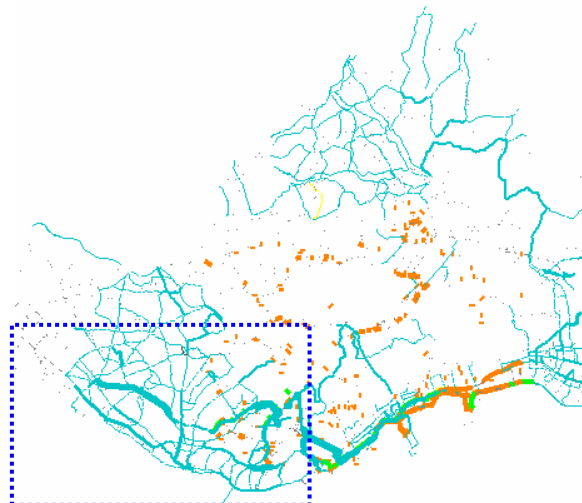


図-5 被災時の交通量分布（耐震化前）

オ 16（有馬高槻，再現期間 4,866 年）において，耐震化による道路橋の被災軽減効果と，それがもたらす被災時の均衡交通パターンの変化を示す．本小節の目的は，GIS を用いた詳細な分析結果や議論を示すことではなく，本手法がどのような用途に用いられ得るかを例示することにある点に注意されたい．

図-2は，神戸市配分ネットワークと，その上に存在する道路橋の被災度および耐震化効果の分布をプロットしたものである．この図において，赤色，オレンジ色，青色で記されているのは，それぞれ，耐震化を行うかどうかに関わらず被災度 A，B，0 の損害を受ける橋梁を表している．耐震化の効果があつた道路橋は，それぞれ，緑色と水色で表される：耐震化によって被災度が B から 0 に変化した橋は緑，被災度が A から B に軽減した橋は水色で表される．図-2より，耐震化によって被災度 B の被害を免れる高速道路橋梁は阪神高速神戸線（摩耶～月見山近辺），阪神高速北神戸線（白川ジャンクション～伊川谷近辺），神戸淡路鳴門自動車道（神戸西～垂水近辺）に偏っていることが判る．震源に近い中国自動車道，山陽自動車道でも被災度を A から B に軽減できる橋梁

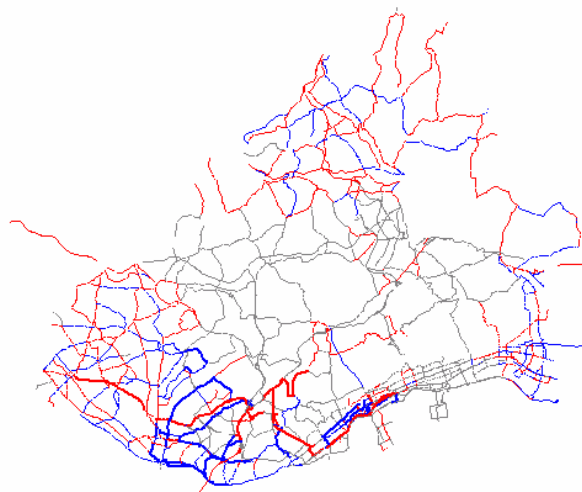


図-6 耐震化前後での被災時交通量の変化

が散見されるが，ネットワーク上の連続性がなく，道路交通が遮断されることに変わりはない．

図-3～図-5は，平常時と被災時（発災直後～120 日）の均衡交通量分布を表したものである．各図には正の交

通量が配分されているリンク（に対応する街路マップ上の地物）が表示されており、線の太さが交通量の大きさを表している。図-4 および図-5 は、それぞれ、耐震化を行わなかった場合、および耐震化を行った場合の被災時交通量分布を表す。ここで、オレンジ色の道路橋は、耐震化の有無によらず通行不可能（被災度 A または B）な橋を表し、緑色の道路橋は、耐震化によって被災を免れた（被災度が B から 0 に変化した）橋を表す。これらの図から、以下の 2 点が判る。第 1 に、震源に近い三木市～宝塚市では、耐震化の有無によらず、交通が完全に遮断されていることが判る。このことは、表-3 のシナリオ 16 の当該期間において、約 56 万台/日の非連結 OD 需要が発生していることから明らかである。第 2 に、耐震化によって被災時の交通量変化は、神戸市長田区以西の地域（青点線の枠内）で顕著である。これは、耐震化によって阪神高速北神戸線（白川ジャンクション～伊川谷）が被災を免れることにより、東西のトリップが国道 175 号線～県道 16 号線から第 2 神明道路～阪神高速北神戸線へとシフトすることを表している。これに伴い、阪神高速山手線～長田トンネルの交通量も増加していることが判る。

最後に、耐震化による被災時の均衡交通量の変化を図-6 に示す。この図は、耐震化前に比べて耐震化後の被災時の均衡交通量が増加したリンクを赤、減少したリンクを青で表し、交通量変化の絶対値の大きさを各リンクの太さで表したものである。この図は、ネットワーク全体で耐震化効果が以下のように概略できることを示唆している。第 1 に、交通量の変化は、上述した耐震化効果が顕著な地域のみならず、ネットワーク全体で確認できる。第 2 に、上述した阪神高速の耐震化効果により、東西方向のトリップが県道などから高速道路にシフトする。これにより、東西方向のリンクの交通量が減少し、高速道路へアクセスする南北方向のリンクの交通量が増加する。こうした可視化技術を用いた分析および参加型議論は、より説明力の高い耐震基準の検討に必要不可欠であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、GIS と需要変動型利用者均衡配分モデルを用いて、地震発生時の道路施設損壊が引き起こす経済不利益を定量的に評価するための枠組を示した。具体的には、まず、想定される各地震シナリオの地震強度マップを GIS 上で作成し、各シナリオの下で各道路施設が受ける地震外力の大きさを求めた。次に、この地震外力を、各補修戦略に対応した道路施設の脆弱性曲線に代入することで、各施設の被災確率を計量した。この被災確率に基づいて、任意の補修戦略とシナリオの組に対する最尤被災パターンを導出した。こうして求めた最尤被災パターンから GIS を用いて構築した配分ネットワークに対し、（需要変動型の）利用者均衡交通配分を行い、発災から復旧期間を経て通常時に戻るまでの交通量パターンおよび交通不利益を計量した。最後に、提案手法を神戸市道路ネットワークに適用し、高速道路の道路橋耐震化による交通不利益改善効果を試算した。そして、GIS を用い

てこの試算結果を表示し、不利益改善効果の分布特性やメカニズムを明らかにした。

本研究に残された課題として、第 1 に、最尤被災パターンのみを想定していることが挙げられる。地震時の被災状況を事前に特定化（あるいはモンテ・カルロ・シミュレーション的に列挙）し、それらについて分析を試みることは可能ではある。しかし、それが“低頻度・大規模”という災害の特性を考慮した事前の準備として適切であるかどうかについては疑問が残る。第 2 の課題として、本研究では、（本来、異なるはずの）平常時における交通需要と、復旧期間における潜在的な交通需要とを同一視している。一般に、災害発生直後のみならず、復旧期間および復旧期間後にどのような交通需要が実現するかに関する知見は、理論的にも実証的にも十分とはいえない。なお、上述したモデル・方法論の精緻化よりも重要で、すぐにも取り掛かれる課題も存在する。特に、現況では、道路橋の地理情報と構造特性情報とをリンクさせたデータベースを構築することは、災害リスクマネジメントのみならず施設の維持管理の観点からも必要不可欠かつ急務であるように思われる。いずれの課題に関しても、今後の研究進展およびデータ整備が望まれる。

参考文献

- 1) 藤原友，長江剛志，朝倉康夫：ネットワーク均衡配分を用いた道路耐震補強の対費用効果に対する一考察，第 33 回土木計画学研究発表会講演集，2006。
- 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) 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。
- 4) 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動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。
- 5) 阪神高速道路公団、(財)防災研究協会：「地震時における道路ネットワークのシステム機能と復旧プロセスのシミュレーションモデルの構築」報告書，March，2003
- 6) 米田慶太，川島一彦，庄司学，藤田義人：耐震基準の改訂に伴う RC 橋脚および古い基礎の耐震性向上度に関する検討，第 2 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム公演論文集，pp.453-460，1998。
- 7) 足立幸郎，庄司学：都市高速道路橋の復旧費に関する検討，土木学会地震工学論文集，Vol.27，論文番号 189，2003。

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*

藤原友**・長江剛志***・朝倉康夫****

本研究では、地震発生時の道路施設損壊が引き起こす経済損失に対し、道路ネットワーク耐震投資の効果分析のための枠組みを提案する。本手法は、地震発生時にリンク損壊がもたらす社会的費用に着目し、交通混雑コスト、旅行時間増大およびOD経路途絶によるトリップ取りやめコストの3つのコストを明示的に考慮する。具体的には、まず、需要変動型の利用者均衡配分モデルを用いて、これら3つの社会的不便益を計量する。次に、地理情報システム(GIS)を用いて、想定する地震シナリオに即したネットワークパターンを与え、耐震化前後での年間社会的費用を計算することで道路ネットワーク耐震化の効果分析を行う。

Cost-Benefit Analysis of Road Network Reinforcement using Geographical Information Systems and User Equilibrium with Variable Demand *

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

This study provides a framework for quantitative analysis for cost-benefit of anti-seismic reinforcement, using geographical information systems (GIS) and the user equilibrium with variable demand (UE/VD) traffic assignment model. In our framework, seismic intensity maps are estimated by using GIS, corresponding to 23 earthquake scenarios that are supposed around the Kobe urban network. Probabilities such that a road bridge is damaged by an earthquake are evaluated from the seismic intensity map and the fragility curve for each road bridge. The social benefit loss for each earthquake scenario is evaluated by using UE/VD applied to a maximum-likelihood damage network conditional to the scenario.
