

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*

An Anti-seismic Reinforcement Problem of Urban Road Network using User Equilibrium Traffic Assignment*

長江剛志**・藤原友***・朝倉康夫****

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

1. はじめに

近年、阪神・淡路大震災、新潟中越地震、能登半島地震などの大規模地震により、橋梁やトンネルなどの道路施設が破壊される事象が多発している。こうした道路施設の損壊は、施設本体の物的損失や施設損壊に起因する人的損失といった直接的損失のみならず、迂回交通の発生、トリップ中止の発生、住民生活の快適性の低下といった間接的損失をもたらす。近い将来、東南海地震や首都直下地震などの大規模地震が想定されており、政府や地方自治体による防災計画や災害復旧計画の策定が急務である。

長江ら¹⁾は、GISと利用者均衡配分モデルを活用し、ある耐震化戦略のパフォーマンスをライフサイクル費用(LCC: *Life Cycle Cost*)を用いてシステムティックに評価するための枠組を提案した。しかし、この研究では、耐震化の対象となる道路施設集合が与えられた下で、耐震化を行ったときの対費用効果を分析したに過ぎない。そこで、本研究では、長江らの枠組を、望ましい耐震化戦略を求める問題へと拡張する。このような耐震化計画は均衡制約条件付の0-1整数計画問題であるため、その解の性質の分析や、厳密解法の開発が極めて困難である。そこで、本研究では、論理構造が理解しやすく、望ましい耐震化戦略を求める手続きが容易に実行可能であるようなヒューリスティックを提案する。本稿は以下のように構成される。まず、2.ではモデルの枠組を示し、モデルを定式化する。続く3.においてモデルの解法を示す。最後に、0.で結論を述べる。

2. モデルの枠組と定式化

本節では、対象とするネットワークとその上の橋梁、リスク源としての地震シナリオについて述べる。まず、対象とする道路ネットワークの位相構造を、ノード集合 N 、有向リンク集合 L から構成される有向グラフで表現する。誤解を恐れず荒っぽく表現すれば、ノードは“交差点”に対応し、リンクは“道路区間”に対応する。平常時に発生する交通需要は、その起点・終点ノードの組ごとに区別される。起終点ペアの集合を OD で表し、 OD 交通量を q で表す。このネットワーク

の位相構造を表す有向グラフ、(平常時)交通需要 q に加えて、リンクの性能(e.g. 道路長、容量、通行料金など)をまとめて“配分ネットワーク・モデル”と呼ぶ。

次に、対象とする道路ネットワーク上に存在する橋梁の集合を B で表す。それぞれの橋梁は、高々一本の道路リンク上にしか含まれないものとする(i.e. 複数のリンクにまたがる橋梁は存在しない)。道路リンク l 上に存在する橋梁群を B_l で表し、橋梁 b を含むリンクを l_b で表す。

最後に、対象とする道路ネットワークに影響を及ぼすことが想定される地震事象(シナリオ)の集合を S と表し、地震事象 s の年間生起確率を所与の定数 $0 < \lambda(s) < 1$ で表す。各地震事象は独立であるとする。ある地震シナリオ s において橋梁 b に作用する地震外力の大きさを $F_b(s)$ で表し、 $F(s) \equiv \{F_b(s)\}$ を地震シナリオ s における地震外力分布と呼ぶ。

上述の配分ネットワーク・モデル、橋梁集合および地震外力分布を特定化するためのデータは、本来、それぞれ全く異なるデータ構造を持つ。例えば、配分ネットワーク・モデルでは交通費用や道路利用状態をシステムティックに計量するために空間的情報を捨象しているが、ある橋梁 b が損壊したときに利用不可能となるリンク l_b を決定するためには当該道路リンクおよび各橋梁の地理的座標が必要である。そこで、本章では、これらのデータを整合的に扱うために地理情報システム(GIS: *Geographical Information System*)を用いる。図 1はそのデータ構造を示す。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。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、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の組によって構成される。なお、本研究では、ある地震シナリオの下で各メッシュに生じる地震外力(SI : 当該橋梁の基盤面における阪神高速道路公団修正スペクトル強度)は、

*キーワード: 防災計画, GIS, 変動需要型利用者均衡配分

** 正員, 博士(情報科学),
電気通信大学大学院情報システム学研究所
(調布市調布ヶ丘1-5-1)

*** 学生員, 工修, 西日本電信電話株式会社

**** 正員, 工博, 神戸大学大学院工学研究科
(神戸市灘区六甲台町1-1)

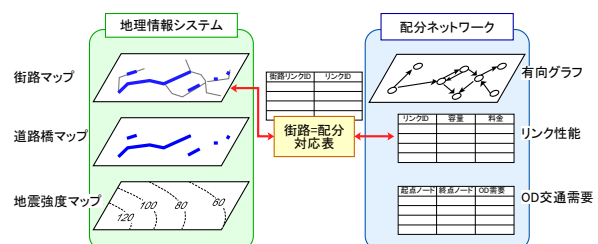


図 1 データ構造

安中ら²⁾の距離減衰式を用いて評価される。このGIS上の街路マップと配分ネットワーク・モデルのリンクとは“街路=配分対応表”によって1対1に対応づけられている。これにより、各地震シナリオの下で発生する交通費用の計量が可能となる。

ある橋梁 b が地震外力を受けたとき、その外力 $F_b(s)$ の大きさに応じた確率で「損壊 ($d_b = F$)」もしくは「損傷なし ($d_b = S$)」のいずれかの状態を確率的に取るものとする。ある外力を受けた橋梁が損壊する確率は、橋梁の耐震性能によって決定される。本研究では、限られたデータを用いて判りやすい分析手法を提案する目的から、以下の2つの仮定をおく: 第1に、耐震性能として「低レベル ($u_b = L$)」と「高レベル ($u_b = H$)」の2つのみを想定する。第2に、現状 (= 耐震化を行わない) における全ての橋梁は等しく「低レベル」の耐震性能を有し、耐震化された橋梁は全て「高レベル」の耐震性能を有するものとする。以下では、耐震性能 u_b をもつ橋梁 b が地震事象 s の下で損壊する確率(フラジリティ・カーブ)を $\psi_b(s, u_b)$ で表す。耐震化戦略を、各橋梁について「耐震化する(高レベルの耐震性能を付与する; $u_b = H$)」あるいは「耐震化しない(低レベルの耐震性能を付与する; $u_b = L$)」のいずれかを選んだ組み合わせの一つとして定義し、ベクトル $\mathbf{u} \equiv \{u_b\}$ で表す。耐震化戦略の集合を \mathbf{U} で表す。

各リンクは、それに含まれる橋梁の全てが損壊していないときのみ利用可能であるとし、そうでなければ発災後利用できなくなるものと仮定する。リンク l の被災状態を v_l (被災して利用できないとき $v_l = 1$, そうでなければ $v_l = 0$) で表す。リンクの被災パターンをベクトル $\mathbf{v} \equiv \{v_l\}$ で表し、その集合を \mathbf{V} で表す。耐震化戦略 \mathbf{u} の下で地震事象 s が生じたとき、集合 \mathbf{V} 内のいずれかのリンク被災パターンが確率的に生起する。このときのリンク被災パターン \mathbf{v} の生起確率を $p(\mathbf{v} | s, \mathbf{u})$ で表す。この生起確率は上述したフラジリティ・カーブ $\{\psi_b(s, u_b)\}$ から計算される。

一部のリンクが被災したネットワークでは、平常時と異なる交通利用パターンが生じ、結果、利用者は平常時よりも高い不便益を被る。この不便益の増加分を、以降では、(被災ネットワークで発生する)交通費用と呼ぶ。本研究では、この交通費用が以下の3つの要素から構成されると仮定する: ①旅行費用: 交通集中によって交通利用者が被る総走行時間(各車両の走行時間の和)の増加; ②トリップ不可能費用: 経路が途絶したことでトリップできない利用者が被る不便益; ③トリップ中止費用: 極度の混雑によってトリップを諦めざるを得なくなった利用者が被る不便益。これら3つの要素をシステムティックに評価する方法として、本章では、変動需要型利用者均衡配分モデルを用いる。通常、UE/EDモデルを実装するためには全ての起終点ペアについて、その交通需要関数を推計する必要がある。しかし、交通需要は、産業構造、立地選択行動、財・サービスの需要・供給や輸送行動などに依存するため、災害後の需要関数を推計することは極めて困難である。そこで、本章では、現存するデータを有効に活用し、恣意的な前提を最低限にとどめられる方法として、階段型の交通需要関数を仮定する: 利用者は起終点間の

費用が所与の定数 Θ より小さければ平常時と同じようにトリップを行うが、費用が Θ を超えた場合には一切トリップを行わない。換言すれば、 Θ はトリップしないことで失われる便益(機会費用)であり、起終点間費用が Θ を超えたときには、利用者は Θ だけの費用を支払ってトリップしないことを選択するのである。

このUE/EDモデルを用いて計算されるリンク被災パターン \mathbf{v} の下での1日あたりの交通費用を $\pi(\mathbf{v})$ で表す。地震によって損壊しなかった橋梁は(あたかも地震外力を受けていない橋梁と同様に)発災直後から利用可能とする。一方、地震で損壊した橋梁は、発災から Δt 日間(所与の定数)利用できないものとする。従って、リンク被災パターン \mathbf{v} の下で発生する年間交通費用は $T(\mathbf{v}) \equiv \pi(\mathbf{v})\Delta t$ で表される。

本研究では、ある耐震化戦略 \mathbf{u} の下でのLCCが、①耐震補強費用、②復旧費用および③交通費用で構成されると仮定する。以下では、まず、ある耐震化戦略 \mathbf{u} の下でのこれらの3つの要素の計量方法を述べ、次にLCCの計算方法を示す。まず、耐震化戦略 \mathbf{u} を実現するために必要な耐震化補強費用を $K(\mathbf{u}) \equiv \sum_b K_b(u_b)$ で表す。ここで、 $K_b(u_b)$ は、橋梁 b の耐震性能を u_b にするために必要な費用である。なお、後述するように、補強費用 $K(\mathbf{u})$ は耐震化を行う時刻に一括して支払われるストック変数である点に注意されたい。

次に、復旧費用は、通常、橋梁ごとに異なる。その上、瓦礫の撤去費用や資材調達費用には、撤去した瓦礫や資材の輸送費用が含まれるため、本来、交通利用状況などに影響される。しかし、本章では簡単のため、各橋梁 b の復旧費用は定数であるとしその値を r_b で表す。これより、耐震化戦略 \mathbf{u} の下で地震事象 s が生じたときの復旧費用の条件付期待値は $r(s, \mathbf{u}) \equiv \sum_b \psi_b(s, u_b)r_b$ で表される。

最後に、耐震化戦略 \mathbf{u} の下で地震事象 s が生じたときの交通費用は年間交通費用の条件付期待値であるから、

$$T(s, \mathbf{u}) \equiv \sum_{\mathbf{v} \in \mathbf{V}} p(\mathbf{v} | s, \mathbf{u})T(\mathbf{v}) \quad (1)$$

で表される。ここで、 $T(s, \mathbf{u})$ を厳密に評価するためには全てのリンク被災パターン \mathbf{v} について総和を取る必要がある点に注意されたい。このことは、後述するように、ある耐震化戦略に対するLCCを評価する際の重大な問題点となっている。

地震事象1回あたりに発生する復旧費用 $r(s, \mathbf{u})$ および交通費用 $T(s, \mathbf{u})$ は、それ自身は耐震化補強費用 $K(\mathbf{u})$ と同じく、ストック変数(単位: 円)である。しかし、その期待値

$$f(\mathbf{u}) \equiv \sum_s \lambda(s)\{T(s, \mathbf{u}) + r(s, \mathbf{u})\} \quad (2)$$

は、単位時間あたりに発生するフロー変数(単位: 円/年)となる。これは、 $\lambda(s)$ が“単位時間あたりの”生起確率であることに起因する。毎年 $f(\mathbf{u})$ だけの費用を支払い続けたときのストックとしての費用は、年間利子率 ρ を用いて $\{(1+\rho)/\rho\}f(\mathbf{u})$ と表せる。この金額は、利子だけで毎年 $f(\mathbf{u})$ だけの費用を捻出するために積み立てなければならない資金額とみなすこともできる。これより、耐震化戦略 \mathbf{u} の下でのLCCは、以下の式で表される。

$$LCC(\mathbf{u}) \equiv \frac{1+\rho}{\rho} \left\{ \sum_s \lambda(s) [T(s, \mathbf{u}) + r(s, \mathbf{u})] \right\} + K(\mathbf{u}) \quad (3)$$

上述の準備の下で、LCCを最小化にする耐震化戦略を求める問題は、以下のように定式化できる。

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

この問題は、それぞれの橋梁について「耐震化する ($u_b = H$)」もしくは「耐震化しない ($u_b = L$)」のいずれかを割り当てる0-1整数計画問題(0-1 IP: *Integer Programming*)である。このことは、問題[P]の厳密解(が存在したとして)を多項式時間内に計算できるアルゴリズムが存在しない(NP困難である)ことを意味している。さらに、問題[P]の目的関数を厳密に評価するためには、UE/EDモデルの解として $T(\mathbf{v})$ を求める必要がある点に注意されたい。このことは、問題[P]が均衡制約つき最適化問題(MP/EC: *Mathematical Program with Equilibrium Constraint*)でもあることを意味している。一般に、MP/ECは、その目的関数の凸性を保証できないため、大域的収束性が保証された数値解法が存在しない(i.e. 異なる初期条件を与えるごとに異なる解が得られる)ことが知られている。従って、問題[P]は、均衡制約付0-1整数計画問題(0-1 IP/EC)であり、その解(厳密解であれ近似解であれ)を求めることが極めて困難である。そこで、本章では、この問題点を克服するためのアプローチを示す。

3. モデルの解法

本研究では、最尤リンク被災パターンを用いて条件付交通不便益 $T(s, \mathbf{u})$ を近似した上で、問題[P]の特性を活用して戦略集合を縮約する接近法を採用する。以下では、まず(1)で最尤リンク被災パターンを用いた交通不便益の近似方法について述べ、(2)で戦略集合の縮約方法について述べる。

(1) 最尤リンク被災パターンを用いた目的関数の近似

本研究では、以下の方法で条件付期待交通不便益 $T(s, \mathbf{u})$ を近似的に求める: まず、戦略 \mathbf{u} のもとで地震シナリオ s を与件とした $T(s, \mathbf{u})$ を以下の式で近似する。

$$T(s, \mathbf{u}) \approx T^*(s, \mathbf{u}) \equiv T(\mathbf{v}^* | s, \mathbf{u})$$

ここで、 $\mathbf{v}^*(s, \mathbf{u})$ はシナリオ s 、戦略 \mathbf{u} のもとでの最尤リンク被災パターンであり、以下の式で定義される:

$$\mathbf{v}^*(s, \mathbf{u}) \equiv \left\{ v_l^* | v_l^* \equiv \arg \max_{v_l \in \{S, F\}} \varphi(v_l | s, \mathbf{u}) \mid l \in L \right\}$$

すなわち、それぞれのリンク $l \in L$ 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リンク被災パターンである。この方法では、戦略とシナリオの組 (s, \mathbf{u}) について、1度だけ利用者均衡配分を行えばよい。そのため、目的関数を求めるための計算量を大幅に減らすことができる。

以降では、この最尤パターンによって目的関数を近似する方法を“最尤近似法”と呼ぶ。この手法には、以下の利点が存在する。まず、交通不便益の近似値 $T^*(s, \mathbf{u})$ と最尤リンク被災パターンが1対1関係である。そのため、リンクの被災状況が交通不便益に与える影響などの因果関係の分析が容易である。次に、 $T^*(s, \mathbf{u})$ の計算方法が明確で、誰が計算しても同じ値を導出することができる。その際、シミュレーショ

ンの高速化・効率化やパラメタのチューニングといった“職人技”を必要としないことも、実践上の利点と考えられる。

(2) シナリオ別有向橋梁群と戦略集合の縮約

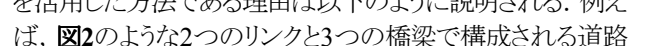
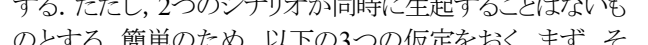
本研究では、問題[P]の特性を活用して戦略集合を縮約する方法を提案する。問題[P]において、戦略集合 U の規模が大きすぎるのが、実ネットワーク上における求解を困難としている。この困難さは、個々の橋梁に「耐震化する」か「耐震化しない」の耐震性能を割り当てるスキームを採用する限り、避けては通れない。そこで、本研究では、問題[P]の戦略集合を“数え上げられる”規模にまで縮約する解法を提案する。この方法は以下の3つの特徴を備える。第1に、後述する問題[P]の確率的構造を明示的に活用できる。第2に、高度な数学や特殊な知識を必要とせず、容易に理解できる。最後に、計算手順が明確で、誰が計算しても同じ答えを導ける。

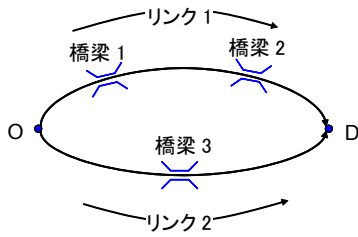
戦略集合を縮約するための具体的な手順は以下のようにまとめられる: まず、耐震化の対象となる橋梁 (s -有効橋梁) を定義する。本研究では、耐震化することによって最尤状態が変化しない橋梁は、耐震化の対象とはしない。以下では、あるシナリオ s において、耐震化することで最尤状態が変化する橋梁を“ s -有効橋梁”と呼び、その集合を“ s -有効橋梁群”と呼ぶ。このとき、 s -有効橋梁群 $B(s)$ は次のように定義される:

$$B(s) \equiv \{b \mid \psi(s, u_b = H) < 0.5 \text{ and } \psi(s, u_b = L) > 0.5\}$$

なお、 s -有効橋梁群以外の橋梁を耐震化しても、目的関数を最尤近似で求める限り、その効果は計量されないことに注意されたい。

このようにして定義された s -有効橋梁群を用いれば、戦略集合を縮約できる。具体的には、同じ橋梁群に含まれる橋梁について、等しく同じ耐震性能を割り当てる。橋梁群ごとに耐震性能を決定することにより、橋梁1つ1つに耐震性能を決定する場合よりも、戦略数の規模を大幅に縮約することができる: 1つのシナリオに s -有効橋梁群は1つなので、地震シナリオの数 $\|s\| = m$ とすれば、戦略数は 2^m 個となる。そのため、想定シナリオの数がそれほど多くなければ、全ての戦略を数え上げて比較することが可能である。

この手法が問題[P]の構造を活用した方法であることは、以下のように説明される。例えば、この提案方法が①の構造を活用した方法である理由は以下のように説明される。例えば、のような2つのリンクと3つの橋梁で構成される道路ネットワークを考えよう。対象区域でaとbの2つの独立な地震シナリオを想定し、それぞれの生起確率は等しく λ であるとする。ただし、2つのシナリオが同時に生起することはないものとする。簡単のため、以下の3つの仮定をおく。まず、それぞれのシナリオが生起したとき、各橋梁は「損傷なし」か「損傷」のいずれかを“確定的”に取るものとする。すなわち、耐震化されていない橋梁の(シナリオを与件とした)条件付損壊確率は1もしくは0である。各シナリオが生起したときの各橋梁の損壊状態をの表に示す。次に、地震によるコストは起終点が途絶したときのみ発生するとする。具体的には、リンク1および2の両方が利用できない場合にのみ社会的費用 C (所与の定数) が発生し、少なくとも一方利用できる場合にはコストは発生しないものとする。この社会的費用



	橋梁 1	橋梁 2	橋梁 3
シナリオ a	損傷なし	損傷	損傷
シナリオ b	損傷	損傷なし	損傷なし

図2 橋梁被害のシナリオ内相関の例は、適当な割引率によってストック換算されているものとする。第3に、各橋梁は耐震化されることで、いずれの地震シナリオでも損傷しなくなるものとし、1橋梁あたりの耐震化費用を K (所与の定数)とする。

これらの仮定の下で、以下の6つの耐震化戦略を考える：1) 橋梁1のみを耐震化；2) 橋梁3のみを耐震化；3) 橋梁1および2を耐震化；4) 橋梁1および3を耐震化；5) 全ての橋梁を耐震化；6) いずれの橋梁も耐震化しない。

各橋梁は耐震化されない限り、シナリオaかbのいずれか一方でのみ損壊する。これは、橋梁の損壊という確率事象は、シナリオの生起という確率事象と極めて強い相関を持っている。そして、この相関を無視した場合、明らかに不適切な耐震化戦略が選ばれる。以下では、これを説明しよう。まず、各地震シナリオと橋梁損壊の相関関係を無視した場合、各橋梁の損壊確率は λ であるため、各戦略のLCCは表1のように求められる。そのため、 λ が十分に大きければ (i.e. $\lambda \geq 1 - (1 - K/C)^{1/3}$) 橋梁3のみを耐震化することでLCCを最小化できる。しかし、図2は、どちらのシナリオにおいても少なくとも1つの経路が存在することを意味している。従って、このシナリオと橋梁損壊の相関関係を考慮した場合、どの橋梁も耐震化しないことLCCが最小化戦略となる。

この例は、耐震化戦略を適切に縮約するためには、こうした橋梁損壊の確率的構造を考慮する必要があることを示唆している。なお、上述の例は、一見、単純化されすぎているように思えるかもしれないが、その基本構造は、橋梁の条件付損壊確率や交通混雑などの社会的費用を考慮した、より一般的な場合にも共通である。以下に提案する手法では、シナリオごとの有効橋梁群を用いることで、この損壊事象の相関を明示的に活用できる。

最後に、有効シナリオ群を用いればLCC計算を簡略化できることを示しておこう。 s -有効橋梁が存在するシナリオ集合を、有効シナリオ群 S^* と定義する。本研究では、目的関数を最尤リンク被災パターンで近似しているため、有効シナリオ群 S^* 以外のシナリオは、LCCを算出する上で除外できる。具体的には、式(3)右辺の第1項は、シナリオ生起確率と、シナリオ s および戦略 \mathbf{u} の下での年間社会的な不便益 $T(s, \mathbf{u}) + r(s, \mathbf{u})$ の積を全シナリオ S にわたって足し合わせたものである。ここで、 $T(s, \mathbf{u})$ を最尤リンク被災パターンで近似する場合、 s -有効橋梁が存在しないシナリオに関しては、 $T(s, \mathbf{u})$ は戦略 \mathbf{u} によらず一定となる。このようなシナリオにおける交通不便益および復旧費用を、それぞれ $T(s)$,

表1 相関を無視したときの各戦略のLCC

戦略	耐震化される橋梁	LCC
1	橋梁 1	$K + [1 - (1 - \lambda)^2]C$
2	橋梁 3	K
3	橋梁 1 と 2	$2K$
4	橋梁 1 と 3	$2K + \lambda C$
5	橋梁 1, 2 および 3	$3K$
6	なし	$[1 - (1 - \lambda)^3]C$

$r(s)$ とかけば、目的関数は次のように書き換えられる：

$$Z(\mathbf{u}) \equiv \frac{1+\rho}{\rho} \sum_{s \in S^*} \lambda(s) \{T(s, \mathbf{u}) + r(s, \mathbf{u})\} + \frac{1+\rho}{\rho} \underbrace{\sum_{s \notin S^*} \lambda(s) \{T(s) + r(s)\} + K(\mathbf{u})}_{CONST}$$

すなわち、シナリオ $s \notin S^*$ で発生するコストは戦略によらない定数項でしかなく、これを除外しても以降の分析に影響は与えない。

4. おわりに

本研究では、耐震補強に要する投資費用と、地震時に生じ不便益を明示的に考慮した道路ネットワークの耐震化計画のための枠組を提案した。紙面の都合上省略した具体的な適用例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, Vol. 24, No.2, 233-242, 2007.
- 2) 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.
- 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) 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.
- 5) 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
- 6) 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, 2003.
- 7) 国土交通省道路局・都市地域整備局: 費用便益分析マニュアル, 2003.