

# 地震災害時における道路ネットワークの 機能損失評価モデル

庄司学<sup>1</sup>・笛木孝哲<sup>2</sup>

<sup>1</sup>博士（工学） 筑波大学講師 大学院システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻  
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

<sup>2</sup>筑波大学 大学院理工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:kfueki@kz.tsukuba.ac.jp

道路、鉄道、電力、上下水道、通信などの社会基盤ネットワークシステムが地震時において機能を十分に発揮できない場合には、社会・経済活動が被る損失は甚大となる。従って、社会基盤ネットワークシステムの地震災害時における機能損失を適切に評価するとともに、これらの評価結果をシステムに関わる主体の地震対策活動に還元する必要がある。本研究では、社会基盤ネットワークシステムの中でも道路ネットワークを取り上げ、1) 道路ネットワークの地震災害リスクに対する機能損失の評価モデルを構築し、1995年の兵庫県南部地震の事例に基づいて機能損失コストの試算を行なうとともに、2) 道路ネットワークの構造被害と機能損失の関連に関する分析を行なった。

**Key Words :** Road network, seismic disaster, seismic damage, function loss, 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、道路、鉄道、電力、上下水道、通信などの社会基盤ネットワークシステムに甚大な被害が生じ、これらのシステムの機能不全が人々の社会・経済活動に多大な影響を及ぼした。また、2004年の新潟県中越地震やスマトラ島沖地震では、社会基盤ネットワークシステムの機能不全の問題が再認識され、これらのシステムの地震災害時における機能損失の評価や社会・経済活動に対する影響に関する分析が喫急の課題となっている。

この中でも道路ネットワークの地震時における機能は多岐にわたる。これには、道路ネットワークに関わる主体と道路ネットワークの地震時における機能をリンクして考える必要がある。例えば、行政主体の立場で考えると、救助・消防活動や被災地に対する状況判断、および被害への対策活動などに道路ネットワークを活用することになる。一般利用者の立場に立てば、地震発生地内で被災した家族や縁者への安否確認や見舞いなどのために道路ネットワークを利用することになる一方で、災害の発生と関係なく、平常時と同じように余暇や仕事のために道路ネットワークに関わることになる。さらに、道路事業者の立場に立てば、被災した道路の復旧というかたちで直接的に道路ネットワークに関わることになる。

このように、地震時において道路ネットワークに対しては様々な主体が複雑に絡み合っていること

になるが、この際、道路ネットワークの地震災害時における機能が具体的にイメージできるものとならないと、ソフト・ハードのいずれの側面においても地震対策活動を実質化することはできない。

道路ネットワークの地震時における機能性の問題に関しては、地震工学、信頼性工学、土木計画学などの見地から様々な研究が行なわれている。川上<sup>1)</sup>は、道路ネットワークの地震による被害を評価する確率論的なモデルを構築し、これにより交通量配分を考慮した道路ネットワークの機能低下を評価している。山田ら<sup>2)</sup>および川島・杉田<sup>3)</sup>は、地震災害後の復旧プロセスに関するモデルの構築と復旧シミュレーションにより、道路ネットワークに関する地震後の復旧プロセスの特徴を明らかにしている。佐藤ら<sup>4)</sup>は、道路ネットワークの地震後の機能維持を考慮した防災対策を行なう上で、対策の優先順位を策定するための道路橋の重要度の評価手法を提案している。Chang et al.<sup>5)</sup>、Chang and Nojima<sup>6)</sup>、Taleb-Agha<sup>7)</sup>は、地震時における道路ネットワークに対する機能性評価を検証的な事例に基づいた上で行なっている。岡田ら<sup>8)</sup>、土屋・多々納<sup>9)</sup>は、計画学の立場から地震災害による道路ネットワークの機能低下の影響を経済的な側面から分析し、防災対策によって得られる被害軽減に関する定量的な評価を行なっている。このように、多くの既往の研究がストックされてきている一方で、地震時に道路ネットワークが停止・寸断した場合の機能不全の具体的なイメージが明らかになっているとは言いがたく、さらに道

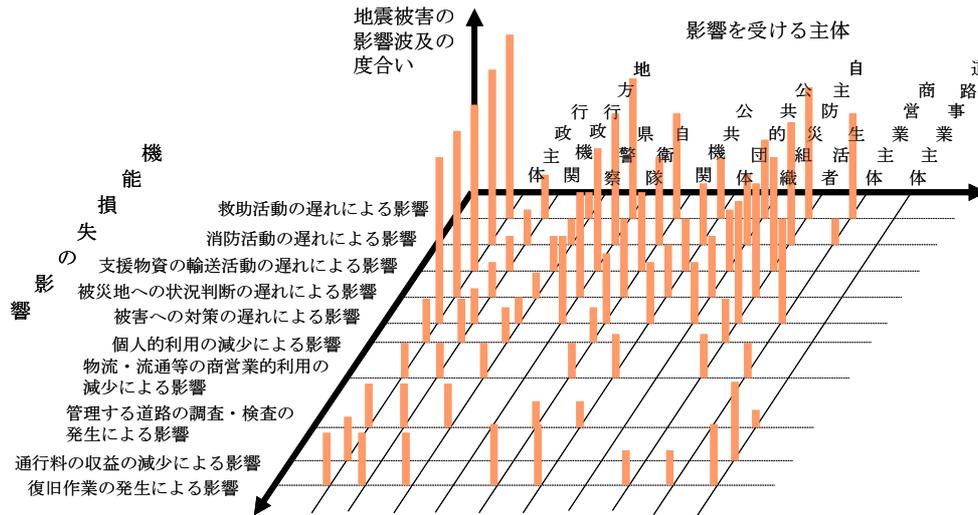


図-1 機能損失の影響による地震被害の影響波及

表-1 「記述的」な地震被害帰着構成表

	行政主体	地方行政機関				県警察	公共機関				公共的団体		生活者	商業主体	道路事業主体	
	市・県・国	労働局	地方整備局		運輸局		他の道路管理団体	運送	電力・ガス	建設・メーカー	建設業協会	金融・保険機関	沿道内	沿道内		
管理する道路の調査・検査の発生	調査・検査結果を踏まえた業務の発生		調査・検査結果を踏まえた業務の発生			道路交通の確保・統制業務の発生	調査・検査に協力する業務の発生			調査・検査に協力する業務の発生	調査・検査に協力する業務の発生					調査期間の通行差し止めによる収益の減少
通行料の収益の減少	補助金・出資金の増大															復旧期間の通行差し止めによる収益の減少
復旧作業の発生	報告を踏まえた業務の発生 補助金・出資金の要請	復旧作業員の安全確保のための業務の増大	復旧作業にもなる施工管理業務の増大	復旧作業にもなる施工管理業務の増大	復旧作業にもなる施工管理業務の増大	陸上輸送機関との連絡調整業務の発生	復旧作業における通行の確保・統制業務の増大	復旧作業に協力する業務の発生	復旧用資機材の輸送業務の増大	復旧用資機材の確保にもなる業務の増大	補修・補強材料の製作業務の発生	復旧作業の調整業務の増大	復旧活動にもなる融資の発生	騒音・振動にもなる苦痛	騒音・振動にもなる苦痛	復旧業務の発生

表-2 道路ネットワークの被害レベル

被害の大きさ	被害レベル	
	小 ↓ 大	LV1-1
LV1-2		補修なし，交通制限
LV2-1		数日程度の補修期間の後，通常走行
LV2-2		数日程度の補修期間の後，交通制限
LV3-1		数週間程度の補修期間の後，通常走行
LV3-2		数週間程度の補修期間の後，交通制限
LV4-1		数ヶ月程度の補修期間の後，通常走行
LV4-2		数ヶ月程度の補修期間の後，交通制限
LV5-1		数年程度の補修期間の後，通常走行

路ネットワークの構造被害と機能損失との関連も十分に明らかになっているとは言えない。

以上を踏まえ、本研究では、社会基盤ネットワークシステムの中でも道路ネットワークを取り上げ、1) 道路ネットワークの地震災害リスクに対する機能損失の評価モデルを構築し、1995年の兵庫県南部地震の事例に基づいて機能損失コストの試算を行なうとともに、2) 道路ネットワークの構造被害と機能損失の関連に関する分析を行なった。

## 2. 地震被害帰着構成モデルの提案

### (1) モデルの概要

ここでは、まず、道路ネットワークの被災に伴って発生する機能損失の影響を列挙し、これらがどのような主体のどのような活動に対して影響を及ぼすかを図-1のように明らかにした。この際には、地方自治体の地域防災計画書などを参考にし<sup>10)</sup>、また、防災担当者へのヒアリング調査により分析した。

図-1によれば、道路ネットワークの地震による被災に伴って、救助活動、消防活動、支援物資の輸送活動に遅れが生じるなど、様々な機能損失の影響が想定され、これらの影響は道路ネットワークに関わる様々な主体の活動に波及すると考えられる。こ

れらの関係を記述的に表として表現したものが地震被害帰着構成表である。一例として、表-1には管理する道路の調査・検査の発生や通行料の収益の減少、復旧作業の発生によって各主体にどのような影響が波及するかを示している。紙面の都合上、表-1は図-1の一部分を抜き出した結果である。さらに、図-1および表-1に示した道路ネットワークの機能損失の影響波及の度合いは、道路ネットワークの被害レベルとリンクしたものとなっている。従って、道路ネットワークの被害レベルを道路ネットワークに対する車両の通行可能性により表-2のように分類した<sup>11)</sup>。ここで、表-2における被害レベルとは、被災直後から完全復旧に至る経時的变化の中での1つの遷移的な状態を示すものであり、交通制限とは片側通行や徐行などの一時的な交通規制が行なわれ

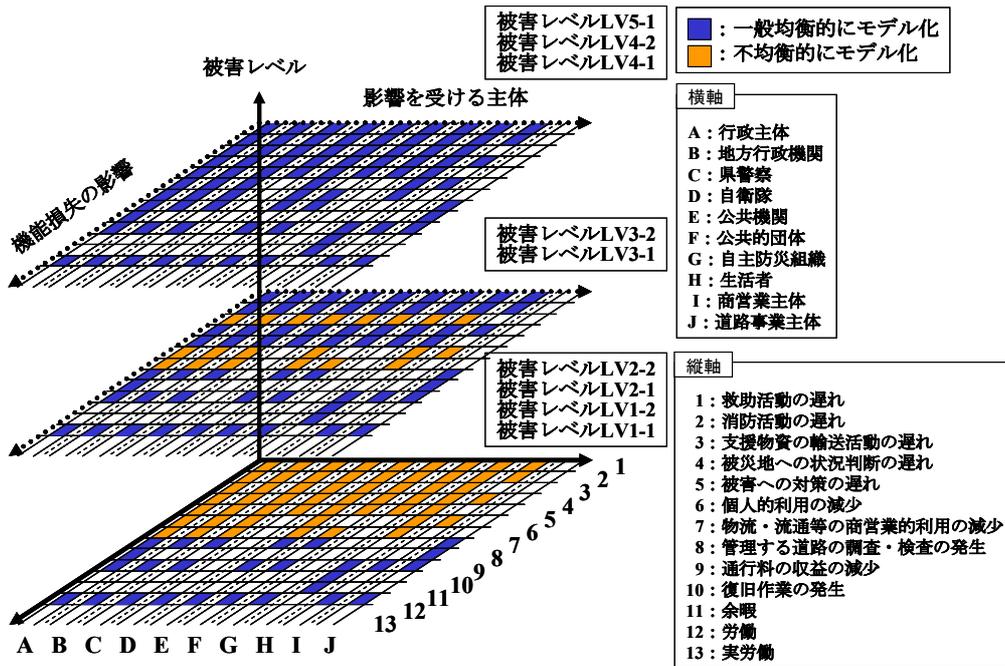


図-2 被害レベルに応じた機能損失の影響の相違

表-3 地震被害帰着構成表

	生活者	行政主体	地方行政機関	...	道路事業主体
救助活動の遅れによる影響	$C_{31}^{\beta}$	$C_{32}^{\beta}$	$C_{33}^{\beta}$	...	$C_{3n}^{\beta}$
消防活動の遅れによる影響	$C_{21}^{\beta}$	$C_{22}^{\beta}$	$C_{23}^{\beta}$	...	$C_{2n}^{\beta}$
支援物資の輸送活動の遅れによる影響	$C_{31}^{\beta}$	$C_{32}^{\beta}$	$C_{33}^{\beta}$	...	$C_{3n}^{\beta}$
被災地への状況判断の遅れによる影響	$C_{41}^{\beta}$	$C_{42}^{\beta}$	$C_{43}^{\beta}$	...	$C_{4n}^{\beta}$
被害への対策の遅れによる影響	$C_{51}^{\beta}$	$C_{52}^{\beta}$	$C_{53}^{\beta}$	...	$C_{5n}^{\beta}$
個人的利用の減少による影響	$C_{61}^{\beta}$	$C_{62}^{\beta}$	$C_{63}^{\beta}$	...	$C_{6n}^{\beta}$
物流・流通等の商業的利用の減少による影響	$C_{71}^{\beta}$	$C_{72}^{\beta}$	$C_{73}^{\beta}$	...	$C_{7n}^{\beta}$
管理する道路の調査・検査の発生による影響	$C_{81}^{\beta}$	$C_{82}^{\beta}$	$C_{83}^{\beta}$	...	$C_{8n}^{\beta}$
通行料の収益の減少による影響	$C_{91}^{\beta}$	$C_{92}^{\beta}$	$C_{93}^{\beta}$	...	$C_{9n}^{\beta}$
復旧作業の発生による影響	$C_{101}^{\beta}$	$C_{102}^{\beta}$	$C_{103}^{\beta}$	...	$C_{10n}^{\beta}$

る状態を示している。なお、表-1は表-2の被害レベルがLV1-1~LV2-2の場合について示している。

次に、道路ネットワークの機能損失の影響波及の度合いを表-3に示すようにコストで定量的に評価する。この際には、費用便益分析で活用されている均衡モデルの考え方を参考にすることとした。費用便益分析とは、社会経済モデルの中で経済プロジェクトにより発生する影響をプロジェクトに関わる各主体に対して列挙し、費用または便益として定量的に評価するものである<sup>12),13)</sup>。ここでポイントとなるのが、地震災害の発災、その後の復旧、復興に至る経時的变化の中で、ある時間断面における均衡状態ならびに不均衡状態をどのように定義するかである。上田ら<sup>14)</sup>によれば、均衡状態はある財の均衡価格において各主体が望む効用の最大化、利潤の最大化のための需要と供給ができる状態であり、一方、不均衡状態は互いに関わる複数の市場において、各主体の生産性の低下による供給量の変化などにより各市場における財の需要と供給が一致しない状態であるとそれぞれ定義されている。このような考え方をベースにおくと、表-1および表-3の地震被害帰着構成表をモデル化する際にも、表-2の被害レベルに応じて、地震災害の経時的变化の中で均衡状態および不均衡状態をそれぞれ定義する必要がある。例えば、救助活動の遅れなどの機能損失がある主体の活動に及ぼす影響は、発災直後から数日程度の短い経

時的变化の中で考えると、救助活動に関する需要と供給が一致せず、当該主体における他の影響と互いに関連しない状態に陥ると想定され、不均衡状態であると考えられる。一方、発災後、数週間、数ヶ月、さらに数年の期間が経過した後では、当該道路ネットワークに迂回ルートが形成されたり、補修され、一部供用されたりするなどして、主体の活動に及ぼす機能損失の影響が当該主体間で均衡状態に収束すると考えられる。本研究においては、道路ネットワークの被害レベルを表-2に示したLV1-1~LV5-1までの9段階に分類した上で、これらの被害レベルの各々の状態が機能損失に対する影響の観点から均衡的であるか不均衡的であるかを分類して図-2のように示すこととした。

図-2に示すように、各被害レベルに対して道路ネットワークの被災に伴う機能損失の影響の状態は異なり、表-3に示した地震被害帰着構成表がそれぞれの状態ごとに作成されることになる。ここでは、以上の考え方やモデル化を総じて、地震被害帰着構成モデルと呼ぶこととする。

## (2) 地震被害帰着構成モデル

### a) 均衡状態を想定した場合のモデル化

以下では、いずれの機能損失の影響も均衡状態であると想定した場合(図-2中の被害レベルLV4-1~LV5-1)のモデル化を示す。なお、図-2に示すように不均衡状態が混在した被害レベルLV1-1~LV3-2の場合については本稿ではモデル化に至っておらず、今後の課題とする。また、以下で示すモデルでは表-3および図-2で示した主体の中から表-4に示すように生活者、行政主体、道路事業主体の3つの主体を対象として取り挙げた。これは、表-1に示した「記述的」な地震被害帰着構成表による分析を通じて道路ネットワークに関わる主体として、地震災害を想定した場合に特に重要となる3つの主

表-4 地震被害帰着構成モデルにおけるパラメータの設定

関連事象 $k$	生活者 $i$		波及主体 $j$				価格	単位所要時間
			行政主体		道路事業主体			
	量	初期所有量	量	初期所有量	量	初期所有量		
救助活動の遅れによる影響	$x_{i1}$	0	$y_{1,1}$	0	$y_{2,1}$	0	$p_1$	$T_1$
消防活動の遅れによる影響	$x_{i2}$	0	$y_{1,2}$	0	$y_{2,2}$	0	$p_2$	$T_2$
支援物資の輸送活動の遅れによる影響	$x_{i3}$	0	$y_{1,3}$	0	$y_{2,3}$	0	$p_3$	$T_3$
被災地への状況判断の遅れによる影響	$x_{i4}$	0	$y_{1,4}$	0	$y_{2,4}$	0	$p_4$	$T_4$
被害への対策の遅れによる影響	$x_{i5}$	0	$y_{1,5}$	0	$y_{2,5}$	0	$p_5$	$T_5$
個人的利用の減少による影響	$x_{i6}$	0	$y_{1,6}$	0	$y_{2,6}$	0	$p_6$	$T_6$
物流・流通等の商業的利用の減少による影響	$x_{i7}$	0	$y_{1,7}$	0	$y_{2,7}$	0	$p_7$	$T_7$
管理する道路の調査・検査の発生による影響	$x_{i8}$	0	$y_{1,8}$	0	$y_{2,8}$	0	$p_8$	$T_8$
通行料の取益の減少による影響	$x_{i9}$	0	$y_{1,9}$	0	$y_{2,9}$	0	$p_9$	$T_9$
復旧作業の発生による影響	$x_{i10}$	0	$y_{1,10}$	0	$y_{2,10}$	0	$p_{10}$	$T_{10}$
余暇	$x_{i11}$	-	-	-	-	-	$p_{11}$	$T_{11}$
労働	$x_{i12}$	$R_{x_{i12}}$	$y_{1,12}$	-	$y_{2,12}$	-	$p_{12}$	$T_{12}$
実労働	-	-	$y_{1,13}$	-	$y_{2,13}$	-	$p_{13}$	$T_{13}$

体を抽出したためである。表-4には、主体ごとに機能損失の影響に関する量 $x_{ik}$ および $y_{j,k}$ と、機能損失の影響に関する初期所有量 $R_k$ 、価格 $p_k$ 、単位所要時間 $T_k$ をそれぞれ示している。

#### ・生活者に対する影響の評価

生活者に関しては、機能損失の影響による損失を最小限に抑え、得られる効用を最大化するように行動するものとし、次式のようにモデル化する。

$$v_i = \max_{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i10}, x_{i11}} \{u_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i10}, x_{i11})\} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{11} p_k x_{ik} - p_{12} x_{i12} = \sum_{j=1}^2 \pi_{ij} \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{12} T_k x_{ik} = T_{12} R_{x_{i12}} \quad (3)$$

ここで、 $v_i$ ：生活者の効用（間接効用関数）、 $u_i$ ：効用関数、 $\pi_j$ ：生活者に配分される行政主体および道路事業主体の利潤、 $i$ ：生活者数であり、式(2)および式(3)は式(1)に対する予算制約式、時間制約式である。式(2)と式(3)より $x_{i12}$ を消去することにより、次式が得られる。

$$\sum_{k=1}^{11} q_k x_{ik} = \sum_{j=1}^2 \pi_{ij} + p_{12} R_{x_{i12}} \quad (4)$$

ここで、 $q_k$ は一般化価格で、次式のようになる。

$$q_k = p_k + \frac{p_{12}}{T_{12}} T_k \quad (5)$$

また、式(4)の右辺は一般化所得 $\Omega_i$ である。

以上を踏まえ、式(1)および式(4)より $\mu_1$ をラグランジュ乗数としてラグランジュの未定乗数法を次式のように適用する。

$$L \equiv u_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i11}) + \mu_1 \left( \sum_{k=1}^{11} q_k x_{ik} - \Omega_i \right) \quad (6)$$

式(6)を $x_{ik}$ および $\mu_1$ について偏微分することにより式(7)、(8)を求め、これらの式を連立して解くことにより道路ネットワークの被災に伴い生活者が受ける機能損失の影響量 $x_{ik}$ を得る。

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_i(x)}{\partial x_{i1}} \\ \vdots \\ \frac{\partial u_i(x)}{\partial x_{i11}} \end{bmatrix} + \mu_1 \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_{11} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_1} = \sum_{k=1}^{11} q_k x_{ik} - \Omega_i = 0 \quad (8)$$

#### ・行政主体、道路事業主体に対する影響の評価

行政主体および道路事業主体は、地震被害の影響による損失（支出）を最小限に抑え、得られる利潤を最大化するように行動するものとし、次式のようにモデル化する。

$$\pi_j = \max_{y_{j,1}, y_{j,2}, \dots, y_{j,10}, y_{j,12}} \left\{ \sum_{k=1}^{10} p_k y_{j,k} - p_{12} y_{j,12} \right\} \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{10} y_{j,k} = {}^j g(y_{j,13}) \quad (10)$$

$$T_{12} y_{j,12} - \sum_{k=1}^{10} T_k y_{j,k} = T_{13} y_{j,13} \quad (11)$$

ここで、 ${}^j g(y_{j,13})$ は生産関数であり、式(10)および式(11)は式(9)の生産制約式、時間制約式である。式(10)と式(11)より $y_{j,13}$ を消去することにより、時間制約を含んだ生産関数 ${}^j \bar{g}$ が次式のように得られる。

$$\sum_{k=1}^{10} y_{j,k} = {}^j \bar{g}(y_{j,1}, \dots, y_{j,10}, y_{j,12}) \quad (12)$$

以上を踏まえ、式(9)および式(12)より $\mu_2$ をラグランジュ乗数としてラグランジュの未定乗数法を次式のように適用する。

$$L \equiv \left( \sum_{k=1}^{10} p_k y_{j,k} - p_{12} y_{j,12} \right) + \mu_2 \left[ {}^j \bar{g}(y_{j,1}, \dots, y_{j,10}, y_{j,12}) - \sum_{k=1}^{10} y_{j,k} \right] \quad (13)$$

式(13)を $y_{j,k}$ および $\mu_2$ について偏微分することにより式(14)、(15)を求め、生活者の場合と同様に行政主体と道路事業主体が受ける影響量 $y_{j,k}$ を得る。

$$\frac{\partial L}{\partial y_{j,k}} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_{10} \\ p_{12} \end{bmatrix} + \mu_2 \begin{bmatrix} \frac{\partial {}^j \bar{g}(y)}{\partial y_{j,1}} \\ \vdots \\ \frac{\partial {}^j \bar{g}(y)}{\partial y_{j,10}} \\ \frac{\partial {}^j \bar{g}(y)}{\partial y_{j,12}} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_2} = {}^j \bar{g}(y_{j,1}, \dots, y_{j,10}, y_{j,12}) - \sum_{k=1}^{10} y_{j,k} = 0 \quad (15)$$

#### ・均衡条件

以上の定式化に加え、次式に示すように各主体に対する機能損失の影響量が各主体間で均衡するという均衡条件を想定する。

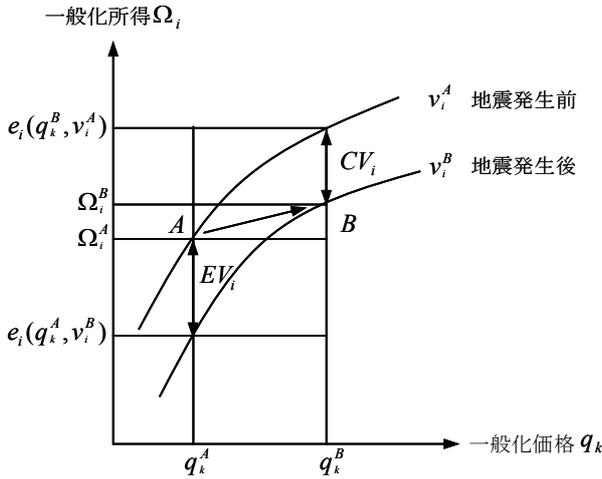


図-3 地震発生前後の効用水準の変化

$$\begin{bmatrix} \sum_i x_{i1} \\ \vdots \\ \sum_i x_{i10} \\ \sum_i x_{i12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^2 y_{j,1} \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^2 y_{j,10} \\ \sum_{j=1}^2 y_{j,12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \sum_i R_{x_i,12} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式(7), (8)より得られる $x_{ik}$ , 式(14), (15)より得られる $y_{jk}$ , および式(16)の均衡条件式を解くことにより, 機能損失の影響量に関する均衡解 $x_{ik}^*$ ,  $y_{jk}^*$  および表-4に示した機能損失の影響に関する価格 $p_k$ , 単位所要時間 $T_k$ が得られる.

#### b) 帰着分析による機能損失コストの評価

経済学の分野において, 経済プロジェクトに対する便益を計測する場合, プロジェクトによる効用水準の状態変化の偏差を便益と定義し評価する手法がある<sup>13)</sup>. このような偏差は図-3に示すように等価的偏差 $EV$ と補償的偏差 $CV$ の2種類に分類される. いずれも横軸の一般化価格 $q_k$ と縦軸の一般化所得 $\Omega_i$ の関係で表され,  $EV$ は状態変化前を基準に事象の価格変化がもたらす一般化所得の変化を表す.  $CV$ は状態変化後を基準に価格変化がもたらす所得の変化を表す. なお, 図-3の $e_i(q_k, v_i)$ は支出関数である. 支出関数 $e_i(q_k, v_i)$ は一般化価格 $q_k$ の状態下で効用水準 $v_i$ を達成するために必要な最小所得を示している. このため, 一般化所得 $\Omega_i$ は支出関数 $e_i$ の関数として表されている.

ここで, 効用水準 $v_i$ が地震の発生により $v_i^A$  ( $A$ は地震発生前の状態を表す) から $v_i^B$  ( $B$ は地震発生後のある状態を表す) へ変化すると仮定し, 等価的偏差 $EV$ を求めることで道路ネットワークの被災に伴う機能損失コストを求めることとする.

以上より, 生活者数 $i$ に対する等価的偏差 $EV$ を求めると, 次式のようなになる.

$$\sum_i EV = \int_{A \rightarrow B} \phi(q_k) \left[ \sum_{k=1}^{11} x_k dq_k - \sum_{j=1}^2 d\pi_j - R_{x,12} dp_{12} \right] \quad (17)$$

ここで,  $\phi(q_k)$ は価格関数であり,

$$x_k = \sum_i x_{ik}, \quad \pi_j = \sum_i \pi_{ij}, \quad R_{x,12} = \sum_i R_{x_i,12} \quad (18)$$

である.

一方, 式(9)を価格 $p_k$ に対し全微分することにより次式が得られる.

$$d\pi_j = \sum_{k=1}^{10} y_{j,k} dp_k - y_{j,12} dp_{12} \quad (19)$$

以上より, 式(19)を式(17)に代入することにより次式が得られる.

$$\sum_i EV = \int_{A \rightarrow B} \phi(q_k) \left[ \sum_{k=1}^{11} x_k dq_k - \sum_{j=1}^2 \left( \sum_{k=1}^{10} y_{j,k} dp_k - y_{j,12} dp_{12} \right) - R_{x,12} dp_{12} \right] \quad (20)$$

式(20)の各項に対して表-3の地震被害帰着構成表と対応させると, 機能損失コスト $C_{x_k}^{\text{fl}}$ ,  $C_{y_{j,k}}^{\text{fl}}$ が次式のように得られる.

$$C_{x_k}^{\text{fl}} = x_k dq_k \quad (21)$$

$$C_{y_{j,k}}^{\text{fl}} = -y_{j,k} dp_k \quad (22)$$

なお, 式(21), (22)の $x_k$ ,  $y_{j,k}$ には前節のモデルによって得られる均衡解 $x_{ik}^*$ および $y_{jk}^*$ を適用する.

### 3. 地震被害帰着構成モデルの修正的適用による機能損失コストの試算

#### (1) 地震被害帰着構成モデルの修正的適用

前節で示した地震被害帰着構成モデルでは, 生活者, 行政主体, 道路事業主体の3つの主体に対する機能損失の影響量 $x_{ik}$ ,  $y_{jk}$ が式(7), (8), (14), (15)および式(16)の均衡条件式によって求まり, 同時に機能損失の影響に関する価格 $p_k$ や単位所要時間 $T_k$ も求まることになる. その上で道路ネットワークの被災という状態変化(図-3に示す $A$ から $B$ への状態変化)を価格 $p_k$ および単位所要時間 $T_k$ の偏差 $dp_k$ ,  $dT_k$ で表現し, 式(21), (22)の $dq_k$ および $dp_k$ に代入することで機能損失コストを求めることになる. このようなモデル化に基づいて求められた価格 $p_k$ と単位所要時間 $T_k$ は式(1)および式(10)の効用関数や生産関数の関数形やパラメータに依存したものとなっているため, 実証的なデータと整合するものであるとは必ずしも言えない. 一方で, 1995年の兵庫県南部地震などの大規模な震災に対しては機能損失の影響に関する様々な統計的データが残されていることもあり, 価格 $p_k$ や単位所要時間 $T_k$ を観測されている統計量から直接的に推定することが可能である.

以上より, ここでは表-4に示す価格 $p_k$ および単位所要時間 $T_k$ を観測されている統計量から求め, 式(7), (8)および式(14), (15)に直接代入して $x_{ik}^*$ および $y_{jk}^*$ を求めることとする. これは, 式(16)の均衡条件式を厳密に考慮しないことを意味するが, 表-1に示したような道路ネットワークの機能損失の各主体に対する影響を個別に分析し, それぞれの影響の特徴を考慮すると, 均衡条件式は本モデルにおいて一方で厳しい制約であるとも言えるため, ここでは以上のような修正的な考え方を適用することとした.

表-5 対象とする道路ネットワーク

対象エリア	該当地区	距離[m]	復旧日数	特徴
エリア1	西宮市甲子園高潮町～ 西宮市本町	1981	623	周辺環境への配慮を特に重視した エリア
エリア2	神戸市中央区小野浜町～ 中央区新港町	848	399	大阪市内-神戸市内間の道路ネット ワークの早期復旧を目的として、 特に復旧作業を急いだエリア
エリア3	神戸市中央区東川崎町～ 兵庫区松原通	2569	548	道路事業主体の計画に沿って復旧 が進められたエリア

(2) 機能損失コストの試算

a) 対象とする道路ネットワーク

前節で述べた考え方にに基づき、道路ネットワークの被災に伴う機能損失コストの試算を行なう。対象とする道路ネットワークは 1995 年の兵庫県南部地震において被災した阪神高速道路 3 号神戸線であり、その中でも表-5 に示す 3 つのエリアを取り挙げることにした<sup>15)</sup>。エリア 1 は 3 つのエリアの中で復旧に最も期間を要したエリアであり、逆にエリア 2 は復旧に要した期間が最も短かったエリアである。エリア 3 はエリア 1, 2 の中間的な日数の復旧期間を要したエリアである。

b) パラメータの設定

- ・地震発生前後の機能損失の影響に関する価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  の設定

表-6 には地震発生前の機能損失の影響に関する価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  を示すとともに、3 つのエリアの被害状態に対応した地震発生後の価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  を示している。救助活動および消防活動の遅れに関する地震発生前の価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  は、年間消防活動における救助活動および消防活動に従事した消防団職員の延べ出勤人員数に基づき設定した<sup>16)</sup>。個人的利用、物流・流通等商営業的利用の減少に関する地震発生前の価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  については兵庫県内総生産に基づき、阪神高速道路 3 号神戸線の利用実態および対象とするエリアの兵庫県における人口比率を考慮して設定した<sup>17),18)</sup>。また、管理する道路の調査・検査の発生、通行料の収益の減少に関しては、平常時における運営実態に基づき地震発生前の価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  を設定した<sup>18)</sup>。道路ネットワークが被災しないと生じない機能損失（支援物資の輸送活動、被災地への状況判断、被害への対策の遅れ、復旧作業の発生）に関しては、地震発生前の価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  をゼロと設定した。

一方、地震発生後の機能損失の影響に関する価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  であるが、救助活動および消防活動の遅れに関しては、地震時に出勤した消防団職員数のデータに基づき設定した<sup>19)~21)</sup>。被災地への状況判断、被害への対策に関しては、同時に活動が行なわれ、分類が困難なことから、双方とも震災から対策本部が設置され、組織化した行動が取れるようになるまでの期間に対策業務に従事した職員数を割り出し、これらに基づき設定した<sup>19)~21)</sup>。個人的利用および物流・流通等商営業的利用の減少に関する地震発生後の価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  については、道路ネットワークの復旧が完了するまで利用がなくなると仮定しゼロと設定した。管理する道路の調査・検査の発生、通行料の収益の減少、復旧作業の発生に関しては、文献 11 の試算例に基づき設定した。

表-6 機能損失の影響に関する価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  の設定

(a) エリア 1 の被害事例に基づいた場合

機能損失の影響	地震発生前の状態		地震発生後の状態	
	価格 [億円]	所要時間 [日]	価格 [億円]	所要時間 [日]
救助活動の遅れ	307	1	321	3
消防活動の遅れ	6.4	1	6.7	3
支援物資の輸送活動の遅れ	0	0	0.16	623
被災地への状況判断の遅れ	0	0	10	7
被害への対策の遅れ	0	0	10	7
個人的利用の減少	7	1	0	623
物流・流通等の商営業的利用の減少	9.7	1	0	623
管理する道路の調査・検査の発生	0.01	1	0.76	7
通行料による収益の減少	0.59	1	0	623
復旧作業の発生	0	0	1.5	623
余暇	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1
労働	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1
実労働	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1

(b) 3 つのエリア被害事例の平均値に基づいた場合

機能損失の影響	地震発生前の状態		地震発生後の状態	
	価格 [億円]	所要時間 [日]	価格 [億円]	所要時間 [日]
救助活動の遅れ	307	1	321	3
消防活動の遅れ	6.4	1	6.7	3
支援物資の輸送活動の遅れ	0	0	0.18	523
被災地への状況判断の遅れ	0	0	10	7
被害への対策の遅れ	0	0	10	7
個人的利用の減少	5.8	1	0	523
物流・流通等の商営業的利用の減少	7.9	1	0	523
管理する道路の調査・検査の発生	0.01	1	0.72	7
通行料による収益の減少	0.48	1	0	523
復旧作業の発生	0	0	1.6	523
余暇	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1
労働	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1
実労働	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1

(c) エリア 2 の被害事例に基づいた場合

機能損失の影響	地震発生前の状態		地震発生後の状態	
	価格 [億円]	所要時間 [日]	価格 [億円]	所要時間 [日]
救助活動の遅れ	307	1	321	3
消防活動の遅れ	6.4	1	6.7	3
支援物資の輸送活動の遅れ	0	0	0.25	399
被災地への状況判断の遅れ	0	0	10	7
被害への対策の遅れ	0	0	10	7
個人的利用の減少	7.1	1	0	399
物流・流通等の商営業的利用の減少	9.8	1	0	399
管理する道路の調査・検査の発生	0.01	1	0.39	7
通行料による収益の減少	0.59	1	0	399
復旧作業の発生	0	0	0.74	399
余暇	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1
労働	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1
実労働	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1

なお、当該道路ネットワークに関わる地域を西宮市、芦屋市および神戸市（西区、北区を除く）と想定し、文献 22 から文献 24 に基づき地震発生時における世帯数を 60 万世帯と想定した上で、1 世帯の構成を 4 人と仮定し、1 世帯あたり 1 人の労働者を見込んで労働人口 15 万人と推定した。これらに基づき、労働、余暇、および実労働に関する価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  に関しては、文献 25 を参考にして設定した。この際、地震発生前後で価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  がともに変化しないと仮定した。

・効用関数および生産関数の設定

生活者、行政主体および道路事業主体の効用関数、生産関数については、次式のようにコブ-ダグラス型の関数を仮定した<sup>26)</sup>。

表-7 効用関数および生産関数の指数部パラメータの設定

機能損失の影響	生活者および波及主体		行政主体		道路事業主体	
	変数	値	変数	値	変数	値
救助活動の遅れ	$\alpha_1$	0.0150	${}^1\beta_1$	0.04	${}^2\beta_1$	0.200
消防活動の遅れ	$\alpha_2$	0.0020	${}^1\beta_2$	0.04	${}^2\beta_2$	0.150
支援物資の輸送活動の遅れ	$\alpha_3$	0.0005	${}^1\beta_3$	0.04	${}^2\beta_3$	0.155
被災地への状況判断の遅れ	$\alpha_4$	0.0005	${}^1\beta_4$	0.08	${}^2\beta_4$	0.045
被害への対策の遅れ	$\alpha_5$	0.0005	${}^1\beta_5$	0.08	${}^2\beta_5$	0.050
個人的利用の減少	$\alpha_6$	0.0005	${}^1\beta_6$	0.05	${}^2\beta_6$	0.045
物流・流通等の商営的利用の減少	$\alpha_7$	0.0010	${}^1\beta_7$	0.05	${}^2\beta_7$	0.145
管理する道路の調査・検査の発生	$\alpha_8$	0.4000	${}^1\beta_8$	0.20	${}^2\beta_8$	0.005
通行料による収益の減少	$\alpha_9$	0.5700	${}^1\beta_9$	0.20	${}^2\beta_9$	0.001
復旧作業の発生	$\alpha_{10}$	0.0050	${}^1\beta_{10}$	0.20	${}^2\beta_{10}$	0.004
余暇	$\alpha_{11}$	0.0050	-	-	-	-
労働	-	-	${}^1\beta_{12}$	0.02	${}^2\beta_{12}$	0.200

$$u_i(x_{i1}, \dots, x_{i10}, x_{i11}) = \prod_{k=1}^{11} x_{ik}^{\alpha_k} \quad (23)$$

$${}^j\bar{g}(y_{j1}, \dots, y_{j10}, y_{j12}) = \prod_{k=1}^{10} y_{j,k}^{{}^j\beta_k} y_{j,12}^{{}^j\beta_{12}} \quad (24)$$

これらの式において必要となるパラメータ  $\alpha_k$ ,  ${}^j\beta_k$  は、3つのエリアにおいて生じた管理する道路の調査・検査の発生、通行料による収益の減少、復旧作業の発生による道路事業主体に対する機能損失コストを別途求め<sup>15)</sup>、これらの数値を参考にキャリブレーションして、表-7のように設定した。

#### c) 機能損失コストの試算結果

表-8は、エリア1、エリア2の被害レベル、およびエリア1~3の平均的な被害レベルを想定した場合の機能損失コストの試算を示したものである。各エリアの被害レベルは表-2に基づき復旧日数より定義されており、復旧日数はそれぞれエリア1が623日、エリア2が399日、エリア1~3の平均値が523日である。これによると、表-6に示した地震発生前後におけるエリアごとの価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  の偏差  $dp_k$ ,  $dT_k$  の違いにより、支援物資の輸送活動の遅れ、個人的利用の減少、物流・流通等の商営的利用の減少および管理する道路の調査・検査の発生、通行料の収益の減少、復旧作業の発生に関する項目は、他の項目に比べて機能損失コストの相違が大きいことが明らかとなった。一方で、地震発生前後で価格  $p_k$  および単位所要時間  $T_k$  の変化がない救助活動や消防活動の遅れ、被災地への状況判断や被害への対策の遅れの項目に関しては、エリアごとの違いは見られなかった。これは、試算で対象とした3つのエリアの被害レベルがいずれもLV5-1であるため、地震後の経時的变化の中で比較的短期的スパンで考えなければならない救助活動や消防活動に関しては、3つの試算間でほとんど変化が見られなかったためであると考えられる。

### 4. 損失マトリックスの提案と地震被害帰着構成モデルとの関連付け

#### (1) 損失マトリックス

本研究で対象としている道路ネットワークは、都市部では高架道路橋の形式が適用される場合が多い。そこで、道路ネットワークの構造形式として高架道路橋を想定した上で、道路ネットワークの被災に伴

表-8 機能損失コストの試算  
(a) エリア1の被害事例に基づいた場合

(単位: 兆円)

	生活者	行政主体	道路事業主体
救助活動の遅れによる影響	2.1	1.9	0.22
消防活動の遅れによる影響	0.20	0.096	0.066
支援物資の輸送活動の遅れによる影響	0.12	0.054	0.036
被災地への状況判断の遅れによる影響	7.7	0.37	2.1
被害への対策の遅れによる影響	7.7	0.37	2.1
個人的利用の減少による影響	2.4	1.2	1.3
物流・流通等の商営的利用の減少による影響	4.6	1.6	2.1
管理する道路の調査・検査の発生による影響	0.58	0.20	0.0022
通行料の収益の減少による影響	0.45	0.15	0.57
復旧作業の発生による影響	1.2	0.39	0.081

(b) 3つのエリアの平均値に基づいた場合

(単位: 兆円)

	生活者	行政主体	道路事業主体
救助活動の遅れによる影響	2.1	1.9	0.22
消防活動の遅れによる影響	0.20	0.096	0.066
支援物資の輸送活動の遅れによる影響	0.14	0.060	0.041
被災地への状況判断の遅れによる影響	7.7	0.37	2.1
被害への対策の遅れによる影響	7.7	0.37	2.1
個人的利用の減少による影響	2.4	1.0	1.1
物流・流通等の商営的利用の減少による影響	4.2	1.3	1.7
管理する道路の調査・検査の発生による影響	0.54	0.19	0.00070
通行料の収益の減少による影響	0.37	0.13	0.47
復旧作業の発生による影響	1.23	0.42	0.090

(c) エリア2の被害事例に基づいた場合

(単位: 兆円)

	生活者	行政主体	道路事業主体
救助活動の遅れによる影響	2.1	1.9	0.22
消防活動の遅れによる影響	0.20	0.096	0.066
支援物資の輸送活動の遅れによる影響	0.19	0.084	0.056
被災地への状況判断の遅れによる影響	7.7	0.37	2.1
被害への対策の遅れによる影響	7.7	0.37	2.1
個人的利用の減少による影響	2.4	1.2	1.4
物流・流通等の商営的利用の減少による影響	4.6	1.6	2.1
管理する道路の調査・検査の発生による影響	0.29	0.099	0.0011
通行料の収益の減少による影響	0.45	0.15	0.57
復旧作業の発生による影響	0.57	0.19	0.040

う機能損失の程度と道路ネットワークを構成する構造要素の被災度との関係を表-9に示すように損失マトリックスとしてモデル化した。損失マトリックスの縦軸は、道路ネットワークの被災に伴う機能損失の程度を表しており、2章で示した10項目の機能損失の影響を表-10に示すように最も関連の強い主体に対応付けて分類した上で、表-2に示す被害レベルLV1-1~LV5-1ごとに表している。一方で、損失マトリックスの横軸は、高架道路橋の構造要素ごとの被災度を表している。なお、ここでは、構造要素の被災度ごとに別々に機能損失を対応付けているが、この際には高架道路橋が桁、支承、橋脚、基礎で構成される構造システムであることを考慮し、構造要素単体の被災が構造システム全体の被災としてどのように反映され、道路ネットワークとしての機能損失に至るかを分析した上で損失マトリックスを作成した。具体的な方法としては、3章で示した阪神高速道路3号神戸線の3つのエリアの被災状態を詳細に分析するとともに、関係する技術者に対するヒアリング調査を通じて求めた<sup>27)~31)</sup>。

以上、構築した損失マトリックスにより、道路ネットワークの構造被害と機能損失の関係が明確に示されることになる。また、同じ構造被害でも道路ネットワークの地震時における機能を考慮すると異なる影響を与える場合がある。

表-9 損失マトリックス

主体	機能	機能損失の程度	桁被災度		支承被災度		橋脚被災度		基礎被災度	
			小	大	小	大	小	大	小	大
行政主体 P1	F1	LV1-1								
		LV5-1								
	F2	LV1-1								
		LV5-1								
	F3	LV1-1								
		LV5-1								
生活者 P2	F1	LV1-1								
		LV5-1								
	F2	LV1-1								
		LV5-1								
道路事業主体 P3	F1	LV1-1								
		LV5-1								

表-10 道路ネットワークに関わる主体と地震時に求められる機能

関連主体	地震時に求められる機能
P1 行政主体	F1 救助活動・消防活動
	F2 支援物資の輸送活動
	F3 被災地への状況判断および被害への対策活動
P2 利用主体	F1 個人的利用
	F2 物流・流通等の商営業的利用
P3 道路事業主体	F1 管理・運営

地震被害帰着構成表

	生活者	行政主体	...
救助活動の遅れによる影響	$C_{s_1}^{\beta}$	$C_{y_{1,1}}^{\beta}$	
消防活動の遅れによる影響	$C_{s_2}^{\beta}$	$C_{y_{1,2}}^{\beta}$	
...			

$$B^{\beta} (dp_k^{\beta}, dT_k^{\beta})$$

$$B^{\alpha} (dp_k^{\alpha}, dT_k^{\alpha}) \quad \text{損失マトリックス}$$

主体	機能	構造要素	被災度		A	As
			D-1	D-2		
行政主体 P1	救助・消防活動 F1	LV1-1	損傷形態なし	微小ひび割れ、クラック	フランジの大幅変形、ウェブに相当層の座屈	桁の落下
		LV1-2				
		LV2-1				
		...				
		LV4-1				
		LV5-1				

図-4 地震被害帰着構成表と損失マトリックスの関連付け

(2) 損失マトリックスと地震被害帰着構成モデルの関連付け

ここで、図-4に示すように、表-3の地震被害帰着構成表より得られた機能損失コストと損失マトリックスの関連付けを行なった。ここでは、表-9に示した損失マトリックスの中から一例として構造要素が桁の場合を示している。ここでは、状態  $B^{\alpha}$  は桁の被災度がD-2、機能損失の被害レベルがLV1-1となる場合を想定しており、状態  $B^{\beta}$  は桁の被災度がA、機能損失の被害レベルがLV5-1の場合を想定している。

次に、地震発生後の状態を  $B^{\alpha}$ 、 $B^{\beta}$  の2通りを想定し、地震発生前からそれぞれの状態に陥る過程で機能損失の影響による機能損失コストを求め、構造要素の保有耐震性能の相違による機能損失コストの相違をシミュレーションした。なお、地震発生後の

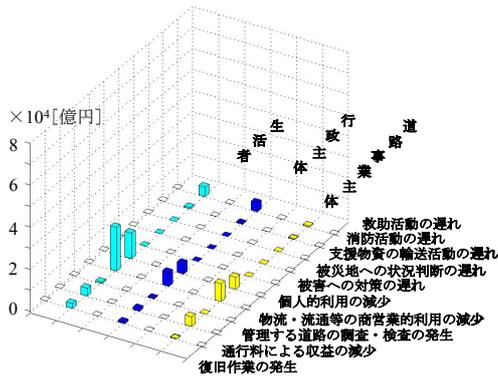
表-11 被害レベルLV1-2を想定したパラメータ設定

機能損失の影響	地震発生前の状態		地震発生後の状態	
	価格 [億円]	所要時間 [日]	価格 [億円]	所要時間 [日]
救助活動の遅れ	307	1	310	1
消防活動の遅れ	6.4	1	6.5	1
支援物資の輸送活動の遅れ	0	0	0	0
被災地への状況判断の遅れ	0	0	0	0
被害への対策の遅れ	0	0	0	0
個人的利用の減少	5.8	1	2.9	2
物流・流通等の商営業的利用の減少	7.9	1	4	2
管理する道路の調査・検査の発生	0.01	1	0.10	5
通行料による収益の減少	0.48	1	0	2
復旧作業の発生	0	0	0.3	10
余暇	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1
労働	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1
実労働	$1.5 \times 10^{-4}$	1	$1.5 \times 10^{-4}$	1

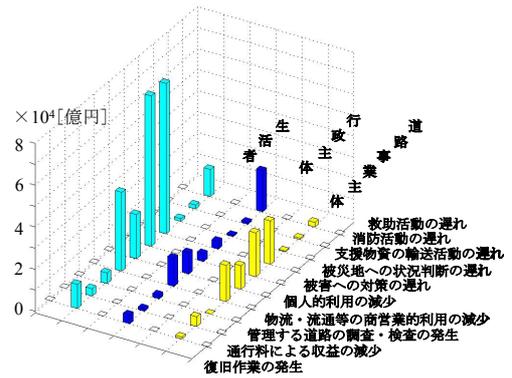
状態  $B^{\alpha}$  については、被害レベルLV1-2の被害状態を想定している。ここでは、被害レベルLV1-2における機能損失コストの参考値を導くという観点から、被害レベルLV1-2においても均衡状態が成立すると仮定した。表-11に示すように機能損失の影響に関する価格  $p_k$  と単位所要時間  $T_k$  を設定した。ここでは、支援物資の輸送活動、被災地への状況判断および被害への対策の遅れの項目は道路ネットワークの地震被害による影響を受けないと仮定している。また、個人的利用および物流・流通等商営業的利用の減少については、道路ネットワークの通行制限を考慮して設定した。一方、地震発生後の状態  $B^{\beta}$  については3. (2). c) で試算したエリア1~3の平均値に基づいた場合の結果を用いた。

また、効用関数および生産関数に関しては、 $B^{\alpha}$ 、 $B^{\beta}$  のいずれの場合も式(23)、(24)に示すコブ-ダグラス型の関数を仮定した。

以上より、被害レベルがLV1-2の場合とLV5-1の場合について機能損失コストをそれぞれ求めると図-5のようになる。図-5によれば、機能損失の被害レベルがLV5-1の場合に比べ、LV1-2の場合は大幅に機能損失コストが低減することがわかる。ただし、機能損失の影響項目によっては、得られた機能損失コストが数兆円に達する項目も見られる。これは、これらの数値が直接被害のみならず、間接被害も反映している値であるためである。しかし、兵庫県南



(a) 被害レベルLV1-2を想定した場合



(b) 被害レベルLV5-1を想定した場合

図-5 被害レベルの相違による機能損失の相違

主体		機能	被災度	D-1	D-2	C	B	A	As
行政主体 P1	救助活動 F1	損傷状況	被害なし	耐震性に影響のない軽微な損傷	桁の壊れ、ずれ、段差等	残存実位による小規模なずれ・段差、耐震力低下	フランジの歪形・ウェブに小規模の産屈	フランジの歪形・ウェブに相当規模の産屈	通行不可
		損傷形態	-	微小なひび割れ、クラック	局部産屈・小変形	フランジの歪形・ウェブに小規模の産屈	フランジの歪形・ウェブに相当規模の産屈	フランジの歪形・ウェブに相当規模の産屈	通行不可
		LV1-1	0.45						
		LV1-2							
		LV2-1							
		LV2-2							
		LV3-1							
		LV3-2							
		LV4-1							
		LV4-2							
生活者 P2	個人的利用 F1	LV1-1							
		LV1-2	1.2						
		LV2-1							
		LV2-2							
		LV3-1							
		LV3-2							
		LV4-1							
		LV4-2							
		LV5-1							
									2.4

図-6 道路ネットワークの構造被害と機能損失コストの関係

部地震における直接被害が約10兆円と推定されている中で<sup>32)</sup>、これらの数値はやや大きすぎるとも考えられるため、これらの数値については今後さらに精査していく予定である。

図-6は、図-5の結果に基づき損失マトリックスと機能損失コストを関連付けて示した結果である。図-6では、道路ネットワークの耐震保有性能が被害レベルLV5-1である場合に対して、行政主体に対しては被害レベルLV1-1に、生活者に対しては被害レベルLV1-2に被害を抑制するように耐震補強した場合を想定している。ここで、被災度が同じであるにもかかわらず被害レベルが異なる場合があるのは、前述したように道路ネットワークの機能が行政主体と生活者で異なるためである。例えば、ここでは、被災度D-2は桁が軽微な損傷であることを意味しているが、その場合には行政関係の車両の通行は優先させ、一般車両に対しては交通規制をかけるという状態を想定している。

以上を踏まえると、図-6に示すように現在の構造要素の耐震保有性能下において一定のレベルの耐震補強を施すことによって、地震被害の影響がどれほど軽減されるかを明示化することができる。図-6に示した機能損失コストはネットワークの被害レベルを反映した機能損失コストであるため、道路ネットワークを構成する構造要素の中から地震被害の影響波及が少なくなるように優先的に補強すべき要

素を選択したり、施策の意思決定者が耐震補強の位置付けを俯瞰的に把握したりする際に有用であると考えられる。

## 5. 結論

本研究では、社会基盤ネットワークシステムの中でも道路ネットワークを取り上げ、地震災害リスクに対する機能損失の評価モデルを構築した。その上で、1995年の兵庫県南部地震で被災した阪神高速道路3号神戸線の道路ネットワークを対象として機能損失コストを試算するとともに、道路ネットワークの構造被害と機能損失の関連を分析した。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 地震災害時の道路ネットワークの機能不全により道路ネットワークに関わる主体が受ける影響を評価するモデルを構築した。本モデルをここでは地震被害帰着構成モデルと呼ぶ。
- (2) (1)により構築したモデルを用い、兵庫県南部地震の際に被災した阪神高速道路3号神戸線の3つのエリアを対象として、道路ネットワークの被害による機能損失コストを試算した。
- (3) 道路ネットワークの地震時における構造被害と機能損失との関係を損失マトリックスとしてモデル化した。
- (4) 地震被害帰着構成モデルと損失マトリックスを関連付けて、道路ネットワークの耐震保有性能の差異による機能損失コストをシミュレーションした。

謝辞：本研究を進めるにあたり、阪神高速道路公団の足立幸郎氏をはじめ、関係各位には震災資料を提供して頂くと共に、研究に関して貴重な助言を多々頂きました。立命館大学の塚口博司先生、東京工業大学の上田孝行先生、京都大学防災研究所の多々納裕一先生には土木計画学の見地から貴重な御意見を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 川上英二：道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法，土木学会論文報告集，No.327, pp.1-12, 1982.
- 2) 山田善一，家村浩和，野田茂，伊津野和行：道路交通網の最適な震後復旧過程の評価，土木学会論文集，368, I-5, pp.355-362, 1986.
- 3) 川島一彦，杉田秀樹：広域震災を受けた道路ネットワークの復旧過程予測システムの開発，オペレーションズリサーチ，pp.57-61, 1993.
- 4) 佐藤次郎，篠塚之雄，佐伯光昭，磯山龍二：大都市における既設道路橋の地震防災上の重要度の評価手法，土木学会論文集，No.513, I-31, pp.213-223, 1995.
- 5) Chang,S.E., Shinozuka,M., Moore II ,J.E. : Probabilistic Earthquake Scenarios: Extending Risk Analysis Methodologies to Spatially Distributed Systems, *Earthquake Spectra*, volume 16, No.3, pp.557-572, 2000.
- 6) Chang,S.E., Nojima,N. : Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, *Transportation Research, Part A* 35, pp.475-494, 2001.
- 7) Taleb-Agha,G. : Seismic Risk Analysis of Lifeline Networks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.67, No.6., pp.1625-1645, 1977.
- 8) 岡田憲夫，若林拓史，多々納裕一：社会基盤整備の管理・計画のためのリスク分析アプローチ，水利用と道路利用問題を対象として，土木学会論文集，No.464, IV-19, pp.33-41, 1993.
- 9) 土屋哲，多々納裕一：SCGEモデルを用いた基幹交通網に関する地震リスクのパブリックマネジメント，社会技術研究論文集，Vol.2, pp228-237, 2004.
- 10) 川崎市防災会議：川崎市地域防災計画・震災対策編，川崎市，2002.
- 11) 新堀大祐：通行可能性を考慮した道路橋の耐震性能，東京大学工学部土木工学科卒業論文，2000.
- 12) 上田孝行，高木朗義，森杉壽芳，小池淳司：便益帰着構成表アプローチの現状と発展方向について，運輸政策研究，Vol.2, No.2, pp.2-12, 1999.
- 13) 森杉壽芳：社会資本整備の便益評価—一般均衡理論によるアプローチ—，日本交通政策研究会研究双書12，勁草書房，1997.
- 14) 上田孝行，高木朗義，長谷川俊英，森杉壽芳：防災投資評価のための不均衡経済モデル，土木計画学研究委員会阪神・淡路大震災調査研究論文集，土木学会，pp.31-38, 1997.
- 15) 庄司学，笛木孝哲：道路ネットワークの地震による機能損失に関する定量的評価，構造物の安全性および信頼性，Vol.5, pp.109-116, 2003.
- 16) 総務省消防庁：平成15年防災白書，2003.
- 17) 兵庫県：兵庫県統計情報，<http://web.pref.hyogo.jp/toukei/index.htm>
- 18) 阪神高速道路公団：阪神高速道路公団ホームページ，<http://www.hepc.go.jp/>
- 19) 兵庫県：阪神・淡路大震災の復旧・復興状況について，2005.
- 20) 兵庫県西宮市：一阪神・淡路大震災—震災復興6年の総括，2001.
- 21) 兵庫県芦屋市：阪神大震災 芦屋の記録，<http://www.city.ashiya.hyogo.jp/quake/index.html>
- 22) 兵庫県西宮市：西宮市ホームページ，<http://www.nishi.or.jp/>
- 23) 兵庫県芦屋市：芦屋市ホームページ，<http://www.city.ashiya.hyogo.jp/>
- 24) 兵庫県神戸市：神戸市ホームページ，<http://www.city.kobe.jp/>
- 25) 総務省統計局：統計データ，<http://www.stat.go.jp/>
- 26) 太田博史：地域・都市・交通分析のためのミクロ経済学，東洋経済新報社，2002.
- 27) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて—震災復旧工事誌，1997.
- 28) 阪神高速道路公団：地震時の道路交通システムの機能性能に関する研究，阪神高速道路公団・（財）防災研究協会報告書，2001.
- 29) 阪神高速道路公団：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，阪神高速道路公団・（財）防災研究協会報告書，2001.
- 30) 阪神高速道路公団：阪神高速道路からみた阪神・淡路大震災後の交通，土木学会関西支部阪神・淡路大震災調査研究委員会ライフライン分科会，共通-63, pp.1-30, 1996.
- 31) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告—土木構造物の被害（橋梁），土木学会，1996.
- 32) 兵庫県：兵庫県ホームページ，阪神・淡路大震災，<http://web.pref.hyogo.jp/syoubou/daishinsai/index.html>

(2005. 3. 15 受付)

## EVALUATION OF SEISMIC DAMAGE INFLUENCE CONSIDERING FUNCTION LOSS OF ROAD NETWORKS

Gaku SHOJI and Takaaki FUEKI

This paper describes evaluation of seismic damage influence considering function loss of road networks. Firstly, effect of the loss of functions on involved various sectors, which are for instance local government, public and private corporations is analyzed and modeled based on cost-benefit analysis to clarify the relation between the function loss of road networks due to a seismic event and seismic damage of road networks. Secondly, the loss of functions due to structural seismic damages consisting of road networks is modeled as loss matrix. Combining the model of seismic damage influence with the loss matrix, the cost of the function loss in the Hanshin Expressway Route 3 during the 1995 Kobe earthquake was evaluated.