

# 道路構造物の地震時における機能性を考慮した耐震設計法の提案

## A MODEL OF PERFORMANCE-BASED SEISMIC DESIGN OF A HIGHWAY NETWORK

庄司学\* ・ 笛木孝哲\*\*

Gaku SHOJI and Taka-aki FUEKI

\*博 (工) 筑波大学講師 機能工学系(〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

\*\*筑波大学 工学システム学類(〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

This paper describes a model of performance-based evaluation in seismic design of a highway network. Functions of a highway network necessary to sustenance of human life and well-being are identified and the loss of functions due to structural damages consisting of a highway network after a seismic event is evaluated as 'loss matrix.' Effects of the loss of functions on involved various sectors, which are local governments, public and private corporations are clarified as 'seismic damage influence table.' Based on these concepts, total loss cost of a highway network after a seismic event is obtained combining the function loss cost and repair cost.

*Key Words* : Seismic Design, Highway network, Function, Cost Evaluation

### 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、道路、鉄道、電気、ガス、上下水道等の社会基盤構造物に甚大な被害が発生した。このような構造物の機能が地震時において適切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ため、社会基盤構造物の地震時における機能損失に関する評価は社会的に極めて重要である<sup>1)</sup>。構造物の機能性に基づく耐震性能評価手法としては、想定地震に対する構造物の被災度に基づいて機能損失をコストで評価する方法が一般的である。例えば、PGAやPGV等の想定地震の特性値と小破、中破、大破等の構造物の被災度との関係をハザード曲線、被災度と機能損失コストの関係を地震損失曲線として評価し、これらを組み合わせて構造物の地震による機能損失を評価するかたちとなっている<sup>2)~8)</sup>。

一方、これらの構造物の共通点としてはネットワークを形成しており、このことが構造物の機能性と密接に関連していることである。従って、構造物の機能性はネットワークを構成する構造要素の損傷によって影響を受ける。しかし、ネットワークを構成する構造要素の損傷が構造物の機能性にどのような影響を与えているのか、具体的な関連が明確になっているとは言えない。これは前述した既往のアプローチがいずれも構造物の被災度を「マクロな」指標でしか表現し得ていないためである。本来、構造物の地震による被災は、ネットワークを構成する構造要素の「ミクロな」損傷が組み合わさって生じる。構造物の「ミクロな」損傷の度合いと機能損失の関連が定量的に明示化できれ

ば、ネットワークを構成する構造要素の耐震補強策の立案などに際して有用な知見になると考えられる。

以上を踏まえ、本研究の目的としては、社会基盤構造物として代表的な道路構造物を取り挙げ、1)これらの地震時における機能性を明示化した上で、2)構造物の「ミクロな」損傷と1)において明示化した地震時における機能の関連を明らかにし、道路構造物の耐震設計に関する一つの方法論を提案することである。地震時において道路構造物に求められる機能の明示化にあたっては、「震災波及帰着構成表」を提案するとともに構造物の「ミクロな」損傷と被災度の連関を「損失マトリックス」として評価する。さらに、これらに基づいて道路構造物の地震時における機能が失われた場合の損失コストの定式化を試みる。

### 2. 道路ネットワークの地震時における機能

#### 2.1 対象とする道路ネットワーク

地震災害が発生した場合に道路ネットワークを介して行われる活動には救助活動、消防活動、支援物資の輸送活動等が挙げられる。このような機能を効率的に確保するために、行政機関によって緊急活動路や緊急輸送路の指定がなされている<sup>9)</sup>。本研究では、このような緊急活動路、緊急輸送路クラスの道路ネットワークを対象とし、周辺建物の倒壊等によって道路閉塞の問題が生じうる幅員10m以下の道路ネットワークについては対象外とする<sup>10)</sup>。

#### 2.2 地震時における機能

道路ネットワークの機能を考える上で、道路ネットワー

表-1 道路ネットワークに関わりあう立場に応じた機能

関わりあう立場		求められる機能	
P1	行政	F1	救援活動・消防活動
		F2	支援物資の輸送活動
		F3	被災地への状況判断及び対策活動
P2	一般利用者	F1	安否の確認等の個人的利用
		F2	物流・流通等の商営的利用
P3	道路管理団体	F1	運営・経営

表-2 道路ネットワークの被害レベルと機能損失の関係

被害レベル	機能損失の程度
LV1-1	補修なし，通常走行
LV1-2	補修なし，交通制限
LV2-1	数日程度の補修のち通常走行
LV2-2	数日程度の補修のち交通制限
LV3-1	数週間程度の補修期間のち通常走行
LV3-2	数週間程度の補修期間のち交通制限
LV4-1	数ヶ月程度の補修期間のち通常走行
LV4-2	数ヶ月程度の補修期間のち交通制限
LV5-1	数年程度の補修期間のち通常走行

表-3 損失マトリックス

立場	機能	機能損失の程度 LV1-1 ↓ LV5-1	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 P1	F1	↓	■	■	■	■	■	■	■	■
	F2	↓	■	■	■	■	■	■	■	■
	F3	↓	■	■	■	■	■	■	■	■
一般利用者 P2	F1	↓	■	■	■	■	■	■	■	■
	F2	↓	■	■	■	■	■	■	■	■
道路管理団体 P3	F1	↓	■	■	■	■	■	■	■	■

クに関わりあう立場を明確にする必要があると考えられる。そこで、地震時において求められる機能と関わりあう立場との関係を表-1のように整理した。

行政の立場（以下、P1）に立つと救助活動、消防活動、支援物資の輸送活動等が考えられる。地震によってネットワークが寸断、あるいは交通が規制される場合には、これらの活動に関与する車両が混雑に巻き込まれ、迂回を余儀なくされる。そのため、想定する時間内に活動を速やかに行うことができなくなり、防災上の機能損失が甚大となる可能性がある。従って、道路ネットワークへの通行基準は以下に示す一般利用者の立場（以下、P2）とは異なると考えられる。例えば、高架タイプの道路ネットワークを想定し、仮に隣接する上部構造間にずれや段差程度の損傷が生じたとしても上下部構造の耐荷力の問題がない場合には、救助活動、消防活動に用いられる緊急車両は自治体の判断で通行させることもありえよう。

一般利用者の立場に立つと個人的利用と物資・流通等の商営的利用が考えられる。個人的利用として考えられるのは、親族に対する安否の確認や食料、毛布等の支援物

資の搬送等である。一方、地震時においても物流・流通等の活動はネットワークの沿道内、沿道外に関係なく続けられる。これらの活動が寸断したり停滞したりすることによる時間的損失および商営上の損失が機能損失と解釈できる。また、道路管理団体の立場（以下、P3）としては施設の運営・経営が考えられる。構造的被害によって復旧作業が生じ、復旧作業を行う期間は道路ネットワークが通行止めとなる。従って、復旧作業による経済的損失ならびに通行止めによる収益の減収が機能損失として考えられる。

### 3. 損失マトリックスの構築

表-1に示した道路ネットワークの地震時における機能は、ネットワークの構造的被害の程度によって損失の程度が異なる。そこで、表-2のように道路ネットワークの被害レベルをLV1-1からLV5-1までの9段階に分類した。表-2の作成に当たっては兵庫県南部地震における道路ネットワークの被害事例を参考にした<sup>11),12)</sup>。

本研究で対象とする道路ネットワークは、2.1で述べたような緊急活動路等の高規格道路である。高規格道路とし

表-4 桁の損傷を想定した場合の損失マトリックス

立場	機能	被災度	D-1	D-2	C	B	A	As	
		損傷状況	損傷なし	耐荷力に影響のない軽微な損傷	桁のたわみ、ずれ・段差等	残留変位による小規模なずれ・段差、耐荷力の低下	フランジの大変形	フランジの大変形	桁の落下
		損傷形態		微小なひび割れ、クラック	局部座屈・小変形	ウェブに小規模の座屈	ウェブに相当規模の座屈		
行政 P1	救助・消防活動 F1	LV1-1							
		LV1-2							
		LV2-1							
		LV2-2							
		LV3-1							
		LV3-2							
		LV4-1							
一般利用者 P2	個人的利用 F1	LV4-2							
		LV5-1							
		LV1-1							
		LV1-2							
		LV2-1							
		LV2-2							
		LV3-1							
道路管理団体 P3	管理・運営 F1	LV3-2							
		LV4-1							
		LV4-2							
		LV5-1							
		LV1-1							
		LV1-2							
		LV2-1							

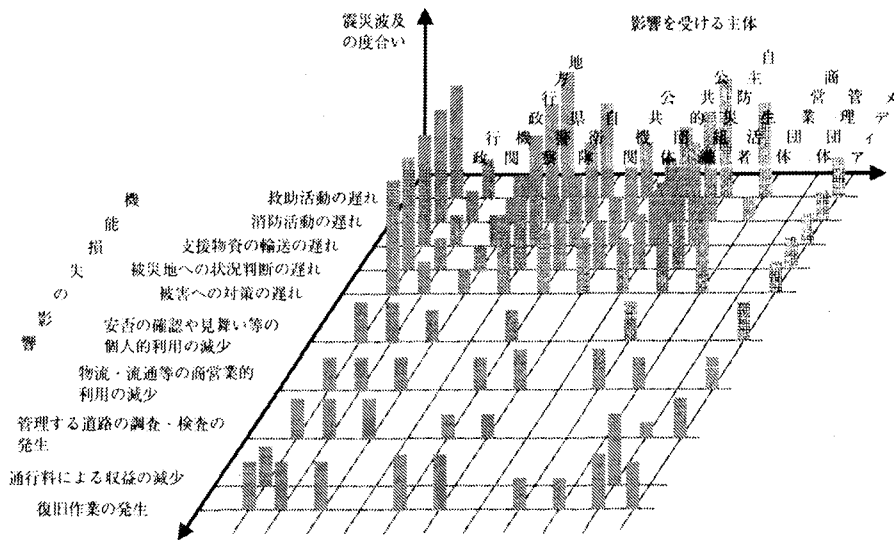


図-1 機能損失の影響の波及

て代表的な道路ネットワークとしては、日本道路公団や首都高速道路公団、阪神高速道路公団等が管理する高速道路ネットワークである。これらの道路ネットワークは都市部において高架道路橋となる場合が多いので、都市部においては道路ネットワークの地震による被害は兵庫県南部地震で見られたように高架道路橋の構造的被害が主となるケースが多い。

従って、ここでは兵庫県南部地震における阪神高速道路の被害事例を参考に高架道路橋を構成する構造要素の損傷状況を詳細に分類した上で、道路ネットワークの被害レベルに応じた機能損失の程度と高架道路橋を構成する構造要素の被災度との関係を表-3のように対応づけた。表-3は道路ネットワークの機能損失とネットワークを構成

する構造要素の被災度の関連をマッピングしたものであり、以下では損失マトリックスと呼ぶ。

ここで、行政、一般利用者、道路管理団体の立場における道路ネットワークの機能損失を縦軸、構造要素の被害として桁の被害を横軸とした場合の損失マトリックスを表-4に示す。表-4は表-3で示した損失マトリックスの一部を抜き出したものである。これによれば、例えば桁の被災度C（たわみ、ずれ・段差等）の損傷は、行政の立場に立ち、道路ネットワークの機能として救助・消防活動を想定するとLV3-1程度（数週間程度の補修期間のうち通常走行可能）の損傷と解釈できる。すなわち、被災度Cの桁の損傷には数週間程度の補修が必要となるため、この期間は救助・消防活動という機能を当該道路ネットワークが担え

表-5 道路管理団体の立場に立った場合の震災波及帰着構成表

	行政	地方行政機関					県警察	公共機関			民間	公共的団体		生活者	商 業 団 体	道路管 理 団 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		
			道路	河川	港湾												陸運
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					調査期間の通行差し止めによる収益減少
通行料による収益減少	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	復旧作業に伴う施工管理業務の増大	復旧作業に伴う施工管理業務の増大	復旧作業に伴う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	復旧資機材の確保に伴う業務の増大	補修・補強材の製作業務の発生 復旧作業の担当	復旧作業の調整業務の増大	復旧活動に伴う融資の発生	騒音、振動に伴う苦痛	騒音、振動に伴う苦痛		復旧業務の発生

表-6 記号的に表現した震災波及帰着構成表

	行政	地方行政機関					県警察	公共機関			民間	公共的団体		生活者	商 業 団 体	道路管 理 団 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		
			道路	河川	港湾												陸運
管理する道路の調査・検査の発生	○-		○-				○-	○-			○+	○-					◎-
通行料による収益減少	◎-																◎-
復旧作業の発生	△- △-	△-	○-	○-	○-	○-	○-	○-	○+	△-	○+ ○+	○-	△-	△-	△-	△-	◎-

ないことになり、桁の被災度Cの損傷がその程度の機能損失を引き起こす損傷であると考えられる。このように損失マトリックスは、ネットワークの機能損失がネットワークを構成する構造要素の損傷によって具体的にどのような影響を受けるのか、俯瞰的に示すものとなっている。

4. 震災波及帰着構成表の提案

損失マトリックスは道路ネットワークの機能損失とネットワークを構成する構造要素の被災度の関連をマッピングしたものであり、機能損失の程度を定量的に評価できていない。

そこで、次のステップとして個々の機能損失の程度をコストで定量的に評価することを試みる。その際には、道路ネットワークの被災に伴う機能不全や機能停滞を総じて機能損失と捉え、図-1に示すように機能損失による影響は個々の機能に関わるあらゆる主体の社会・経済活動に波及すると考える。このように、道路ネットワークの被害レベルに応じた機能損失の影響を負の波及効果として評価し、表-5に示す「震災波及帰着構成表」を構築するこ

とで機能損失の程度を定量的に評価することとした。この震災波及帰着構成表は、交通経済学の分野で着目されている便益帰着構成表の考え方を援用したものである<sup>13)</sup>。表-5は道路管理団体に関わる機能損失の影響をまとめた結果であり、道路ネットワークの被害レベルとしてLV1-2～LV2-2を想定している。さらに、震災波及の影響の度合いをコストで計測可能かどうかを記号的に表現し、同様に震災波及帰着構成表としてまとめなおしたものを表-6に示す。表-6ではコストで計測可能な場合を◎、精度に問題はあが計測可能な場合を○、計測困難な場合を△で表現し、影響が主体にとって正の影響である場合を+、負の影響である場合を-として表現している。

図-1ならびに表-5、表-6によれば、例えば、LV1-2～LV2-2の被害が生じ、道路ネットワークを介した救助活動に遅れが生じた場合には、その影響は行政機関の業務量に波及するだけでなく、関連する地方行政機関や県警察、自衛隊、公共機関、公共的団体等の様々な主体の業務に波及することがわかる。震災波及の形態は直接的な影響から間接的な影響まで考えられ、コストでの評価が可能である

ものから評価が困難なものまで多様な様相を呈している。以下では、表-5、表-6に示した震災波及帰着構成表を行政および一般利用者の立場に対して作成し、機能損失による影響をコストで計測可能な項目のみ選び出し、損失コストの定式化を試みた。

## 5. 損失コストの定式化

道路ネットワークに求められる機能が影響を受けた場合に生じる損失コスト ${}_j C_l$  ( $j$ は立場 P1~P3)は、機能が失われたことにより生じる機能損失コスト ${}_j C_{fl}$ と高架道路橋の損傷により生じる復旧コスト ${}_j C_r$ との和であると考え、次式のように定式化した。

$${}_j C_l = {}_j C_{fl} + {}_j C_r \quad (1)$$

以下では、機能損失コスト ${}_j C_{fl}$ ならびに復旧コスト ${}_j C_r$ の算定方法について示す。

### 5.1 機能損失コスト

行政の立場 P1 における機能損失コストに関しては、高架道路橋を構成する構造要素 $i$ およびそれらの被災度 $di$ に応じ、地震時に求められる機能 F1~F3 ごとにそれぞれ次式のように定式化した。

$${}_1 C_{fl,2} = {}_1 C_{fl,2}^{di} = {}_1 N_{fl,2}^{di} \times {}_1 D_{fl,2}^{di} \times {}_1 c_{fl,2}^{di} \times {}_1 rf_{fl,2}^{di} + {}_1 Cred_{fl,2}^{di} \quad (2)$$

$${}_1 C_{fl,3} = {}_1 C_{fl,3}^{di} = {}_1 N_{fl,3}^{di} \times {}_1 D_{fl,3}^{di} \times {}_1 c_{fl,3}^{di} \times {}_1 rf_{fl,3}^{di} + {}_1 Cred_{fl,3}^{di} + {}_1 Cs_{fl,3}^{di} \quad (3)$$

ここで、 ${}_1 C_{fl,1} \sim {}_1 C_{fl,3}$ ：立場 P1 の機能 F1~F3 に関する機能損失コスト、 ${}_1 N_{fl,1}^{di} \sim {}_1 N_{fl,3}^{di}$ ：救助・消防活動、支援活動、被災地への状況判断や対策活動に要する車両数[台/日]、 ${}_1 D_{fl,1}^{di} \sim {}_1 D_{fl,3}^{di}$ ：通行できるまでに要する日数[日]、 ${}_1 c_{fl,1}^{di} \sim {}_1 c_{fl,3}^{di}$ ：救助・消防活動、支援活動、被災地への状況判断や対策活動の価値[円/台]、 ${}_1 rf_{fl,1}^{di} \sim {}_1 rf_{fl,3}^{di}$ ：道路の遮断等による迂回、遅延の影響により救助・消防活動、支援活動、被災地への状況判断や対策活動の価値が低減する割合、 ${}_1 Cred_{fl,1}^{di}$ 、 ${}_1 Cred_{fl,2}^{di}$ ：救助・消防活動、支援活動、被災地への状況判断や対策活動の代替手法（ヘリの運用等）に要するコスト[円]、 ${}_1 Cs_{fl,3}^{di}$ ：対策に関する活動（余震に対する処置等）を支援する資機材の遅延等に伴うコスト[円]である。

同様に、一般利用者の立場 P2 における機能損失コストに対しても機能 F1, F2 に対してそれぞれ次式のように定式化した。

$${}_2 C_{fl,1} = {}_2 C_{fl,1}^{di} = {}_2 N_{fl,1}^{di} \times {}_2 D_{fl,1}^{di} \times {}_2 c_{fl,1}^{di} \times {}_2 rf_{fl,1}^{di} + {}_2 Cred_{fl,1}^{di} \quad (4)$$

$${}_2 C_{fl,2} = {}_2 C_{fl,2}^{di} = {}_2 N_{fl,2}^{di} \times {}_2 D_{fl,2}^{di} \times {}_2 c_{fl,2}^{di} \times {}_2 rf_{fl,2}^{di} + {}_2 Cred_{fl,2}^{di} + {}_2 Cs_{fl,2}^{di} \quad (5)$$

ここで、 ${}_2 C_{fl,1}$ 、 ${}_2 C_{fl,2}$ ：立場 P2 の機能 F1, F2 に関する機能損失コスト、 ${}_2 N_{fl,1}^{di}$ 、 ${}_2 N_{fl,2}^{di}$ ：個人的利用、商営業の利用の車両数[台/日]、 ${}_2 D_{fl,1}^{di}$ 、 ${}_2 D_{fl,2}^{di}$ ：通行できるまでに要する日数[日]、 ${}_2 c_{fl,1}^{di}$ 、 ${}_2 c_{fl,2}^{di}$ ：個人的利用、商営業の利用の価値[円/台]、 ${}_2 rf_{fl,1}^{di}$ 、 ${}_2 rf_{fl,2}^{di}$ ：道路の遮断等による迂回、遅延の

影響により個人的利用、商営業の利用の価値が低減する割合、 ${}_2 Cred_{fl,1}^{di}$ 、 ${}_2 Cred_{fl,2}^{di}$ ：個人的利用、商営業の利用の代替手法（歩行、自転車、電車、バス等）に要するコスト[円]、 ${}_2 Cs_{fl,2}^{di}$ ：賠償行為（取引における損失の補償・補填等）に伴うコスト[円]である。

さらに、道路管理団体の立場 P3 における機能損失コストに関しては運営・経営の機能 F1 を考え、次式のように定式化した。

$${}_3 C_{fl,1} = {}_3 C_{fl,1}^{di} = {}_3 C_{fl,1}^{di} + {}_3 C_{fl,1}^{di} + {}_3 C_{fl,1}^{di} + {}_3 C_{fl,1}^{di} + {}_3 C_{fl,1}^{di} \quad (6)$$

ここで ${}_3 C_{fl,1}$ ：立場 P3 の機能 F1 に関する機能損失コスト、 ${}_3 C_{fl,1}^{di}$ ：施設の被害状況の調査・検査に伴うコスト[円]、 ${}_3 C_{fl,1}^{di}$ ：収益（通行料）の減少に伴う損失コスト[円]、 ${}_3 C_{fl,1}^{di}$ ：施設の管理（料金所管理等）に関わるコスト[円]、 ${}_3 C_{fl,1}^{di}$ ：損失に伴う補償・補填等のコスト[円]である。

### 5.2 復旧コスト

復旧コストとしては、高架道路橋を構成する構造要素 $i$ と被災度 $di$ に応じ、構造部材の再構築や補修、補強に必要な材料コストや復旧作業に関わる作業員の人件費、また復旧作業に必要な仮設ペントや資機材の搬送・設置・撤去・リースに伴うコストの総和として次式のように求めることとした。

$${}_j C_r = {}_j C_r^{di} = {}_j c_m^{di} \times {}_j V_m^{di} + {}_j c_w^{di} \times {}_j N_w^{di} \times {}_j D_w^{di} + {}_j C_m^{di} + {}_j C_l^{di} \quad (7)$$

ここで、 ${}_j C_r$ ：立場 P1~P3 における復旧作業に伴う復旧コスト、 ${}_j c_m^{di}$ ：再構築、補修、補強に必要な材料コスト[円/m<sup>3</sup>、円/tf]、 ${}_j V_m^{di}$ ：材料の使用量[m<sup>3</sup>、tf]、 ${}_j c_w^{di}$ ：補修、撤去、再構築に伴う作業員の人件費の単価[円/人・日]、 ${}_j N_w^{di}$ ：作業人数[人]、 ${}_j D_w^{di}$ ：作業に要する日数[日]、 ${}_j C_m^{di}$ ：補修方法に伴う必要な資機材（搬送、設置、撤去、リース）のコスト[円]、 ${}_j C_l^{di}$ ：架設（機材の搬送、設置、撤去、リース）に要するコスト[円]である。

## 6. 結論

本研究では、社会基盤構造物の中で道路ネットワークを対象として取り挙げ、道路ネットワークの地震時における機能を明示化し、道路ネットワークを構成する構造要素の損傷と機能との関連を明らかにするとともに、機能損失の定量的な評価方法に関して検討した。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 道路ネットワークの地震時における機能と高架道路橋を構成する構造要素の被災度との関係に対応づけ、損失マトリックスを構築した。
- 2) 道路ネットワークの被害レベルに応じた機能損失は機能と関わるあらゆる主体にその影響が波及する。このような機能損失の影響の波及効果によって機能損失の定量的評価を試みることで、震災波及帰着構成表を構築した。
- 3) 道路ネットワークの地震時における機能が影響を受けたときに生じる損失コストを、機能が失われたことにより

生じる機能損失コストと高架道路橋の損傷により生じる復旧コストに分けて定式化を試みた。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたって阪神高速道路公団工務部の足立幸郎氏、金治英貞氏、長沼敏彦氏、石崎浩氏には震災資料を提供して頂くとともに、本研究に関して度重なる貴重な助言を頂きました。また、立命館大学理工学部 of 塚口博司先生、東京工業大学理工学研究科の上田孝行先生、京都大学防災研究所の多々納裕一先生には交通工学並びに経済学の見地から貴重なご意見を頂きました。神奈川県川崎市建設局の広瀬市郎氏、石井利幸氏、原達行氏、岸泰治郎氏ならびに茨城県つくば市の小野村一雄氏には、本研究に関して行政の立場から貴重なご意見を頂き、また多数の資料を提供して頂きました。ここに記して全ての方々に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 岡田憲夫, 若林拓史, 多々納裕一, 社会基盤整備の計画・管理のためのリスク分析的アプローチ, 土木学会論文報告集, No.464, IV-19, pp.33-42, 1993
- 2) Ang, A.H-S., Structural Risk Analysis and Reliability-Based Design, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.99, No.ST9, pp.1891-1909, 1973
- 3) Taleb-Agha, G., Seismic Risk Analysis of Lifeline Networks, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.67, No.6, pp.1625-1645, 1977
- 4) 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, 第327号, pp.1-12, 1982
- 5) 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災復旧過程の評価, 土木学会論文集, 第368号, I-5, pp.355-362, 1986
- 6) 野島暢呂, 亀田弘行, 幹線・支線の階層性を考慮したライフライン系の最適震後復旧アルゴリズム, 土木学会論文集, No.450, I-20, pp.171-180, 1992
- 7) 市東哲也, 星谷勝, 上水道システムの地震リスクマネジメント, 土木学会論文集, No.584, I-42, pp.201-213, 1998
- 8) Floren, A. and Mohammadi, J., Performance-Based Design Approach in Seismic Analysis of Bridges, Journal of Bridges Engineering, Vol.6, No.1, pp.37-45, 2001
- 9) 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
- 10) 塚口博司, 戸谷哲男, 中辻清恵, 阪神・淡路大震災における道路の被災状況と発災直後の自動車流動特性, 土木計画学研究講演集, No.18(2), pp.843-846, 1995
- 11) 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
- 12) 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.
- 13) 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