

大規模震災に伴う社会基盤ネットワークの機能損失に関する評価方法

庄司学¹・笛木孝哲²

¹筑波大学機能工学系講師（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1）E-mail:gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

²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）E-mail:kfueki@kz.tsukuba.ac.jp

本研究では，社会基盤ネットワークの地震時に求められる機能を明示化し，ネットワークを構成する構造要素の損傷と機能の連関を定量的に評価するものである．道路ネットワークを具体的な対象として取り挙げ，地震時に求められる機能と構造要素の被災度の連関を損失マトリックスとして表現し，道路ネットワークの被害レベルに応じた機能損失の波及を震災波及帰着構成表でモデル化した．これらに基づいて1995年の兵庫県南部地震において被害を受けた阪神高速道路3号神戸線のネットワークに関して機能損失コストならびに復旧コストを算出し，施設としての損失コストを試算した．

Key Words : *Infrastructural network, function, seismic risk, cost evaluation, loss cost, repair cost*

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ネットワーク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ため，地震時における社会基盤ネットワークの機能性に関する評価は社会的に極めて重要である．従って，本分野に関しては国内外を問わず，多方面から研究が進められている^{1)~6)}．しかし，ネットワークの機能性に構造的被害が具体的にどのような影響を与えているのか，必ずしも明確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として代表的な道路ネットワークを取り挙げ，1)これらの地震時における機能を明示化した上で，2)ネットワークを構成する構造要素の損傷と1)において明示化した地震時における機能の連関に関するモデルを構築することとした．

2. 損失マトリックスおよび震災波及帰着構成表の構築

(1) 損失マトリックス

道路ネットワークの地震時における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が指定されている⁷⁾．以下では，緊急活動路や緊急輸送路クラスの道路ネットワークを対象

表 - 1 道路ネットワークに関わりあう立場と地震時に求められる機能

関わりあう立場		求められる機能	
P11	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・流通等の商営業利用
P3	管理団体	F1	運営・経営

表 - 2 被害レベルと機能損失の程度

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	数日程度の補修のうち通常走行
LV2-2	数日程度の補修のうち交通制限
LV3-1	数週間程度の補修期間のうち通常走行
LV3-2	数週間程度の補修期間のうち交通制限
LV4-1	数ヶ月程度の補修期間のうち通常走行
LV4-2	数ヶ月程度の補修期間のうち交通制限
LV5-1	数年程度の補修期間のうち通常走行

として地震時に求められる機能を考える．

まず，道路ネットワークに関わりあう立場と地震時に求められる機能との関係を表 - 1 のように整理した．表 - 1 に示した道路ネットワークの機能（以下，P1-F1～P3-F1の合計6通りの組合せ）は，地震による構造的被害の程度によって損失の程度が異なる．従って，表 - 2 に示す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1995年の兵庫県南部地震における道路ネットワークの被害例を

表 - 3 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連関（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	LV1-1								
		LV5-1								
	F2	LV1-1								
		LV5-1								
	F3	LV1-1								
		LV5-1								
一般 利用者 P2	F1	LV1-1								
		LV5-1								
	F2	LV1-1								
		LV5-1								
管理 団体 P3	F1	LV1-1								
		LV5-1								

表 - 4 管理団体に関する機能損失の影響（震災波及帰着構成表）

	行政	地方行政機関				県警察	公共機関				公共的団体		生活者	商営 業団 体	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													
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増大					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	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		
	補助金・出資金の要請										復旧作業の担当							

参考にした^{8),9)}．表 - 2 に基づいて、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 - 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連関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．

(2) 震災波及帰着構成表

次に、道路ネットワークの被害レベルに応じた機能損失による影響は個々の機能に関わるすべての主体の社会・経済活動に波及すると考え、表 - 4 に示す震災波及帰着構成表を構築した．これは、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¹⁰⁾．表 - 4 は管理団体に関する機能損失の影響を震災波及帰着構成表としてま

表 5 記号的震災波及帰着構成表

	行政	地方行政機関					県警察	公共機関				公共の団体		生活者	商営 業団 体	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	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-
	-										+					

とめた結果であり，ネットワークの被害レベルとして LV1-2~LV2-2 (表 - 2 参照) 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たものを表 - 5 に示す．表 - 5 ではコストで計測可能な場合を $-$ ，精度に問題はあがる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には $+$ ，負の影響である場合には $-$ で表現している．このような震災波及及び帰着構成表に基づいて機能損失による影響をコストで計測可能な項目のみ選り出し，損失コストの定式化を試みる．

3. 損失コストの定式化

ここでは，道路ネットワークの機能が影響を受けた場合に生じる損失コスト (以下，全損失コスト ${}_j C_t$) を，機能損失コスト ${}_j C_{fl}$ と復旧コスト ${}_j C_r$ の和として次式により求めることとした．

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

ここで， j は道路ネットワークに関わる立場 $j = P1 \sim P3$ である．

(1) 機能損失コスト

a) 行政の立場 P1 における機能損失コスト

立場 P1 における機能損失コスト ${}_1 C_{fl}$ は，次式に示すように，機能 F1~F3 ごとに異なり，さらに道路ネットワークを構成する構造要素 i の被災度 di によって異なる．

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

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

ここで， ${}_1 N_{fl}^{di}$: 機能 F1~F3 に要する車両数， ${}_1 D_{fl}^{di}$: 通行できるまでに要する日数， ${}_1 c_{fl}^{di}$: 機能 F1~F3 の価値， ${}_1 rf_{fl}^{di}$: 道路の遮断等の影響により機能 F1~F3 の価値が低減する割合， ${}_1 Cred_{fl}^{di}$: 機能 F1~F3 の代替手法 (ヘリの運用等) に要するコスト， ${}_1 Cs_{fl,3}^{di}$: 対策活動を支援する資機材の遅延等に伴うコストである．

b) 一般利用者の立場 P2 における機能損失コスト

立場 P2 における機能損失コスト ${}_2 C_{fl}$ は機能 F1, F2 に対してそれぞれ次式により求められる．

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

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

ここで， ${}_2 N_{fl}^{di}$ ， ${}_2 D_{fl}^{di}$ ， ${}_2 c_{fl}^{di}$ ， ${}_2 rf_{fl}^{di}$: 立場 P1 の場合と同様のパラメータ， ${}_2 Cred_{fl}^{di}$: 機能 F1, F2 の代替手法 (歩行，自転車，電車，バス等) にかかるコスト， ${}_2 Cs_{fl,2}^{di}$: 賠償行為 (取引における損失の補償・補填等) に伴うコストである．

c) 管理団体の立場 P3 における機能損失コスト

立場 P3 における機能損失コスト ${}_3 C_{fl}$ は運営・経営の機能 F1 を考え，次式により算定する．

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

ここで， ${}_3 C_{iv}^{di}$: 施設の被害状況の調査に伴うコスト， ${}_3 C_{fee}^{di}$: 収益の減少に伴う損失コスト， ${}_3 C_{ml}^{di}$: 施設の管理 (料金所管理等) に関わるコスト， ${}_3 Cs_{fl}^{di}$: 損失に伴う補償・補填等のコストである．

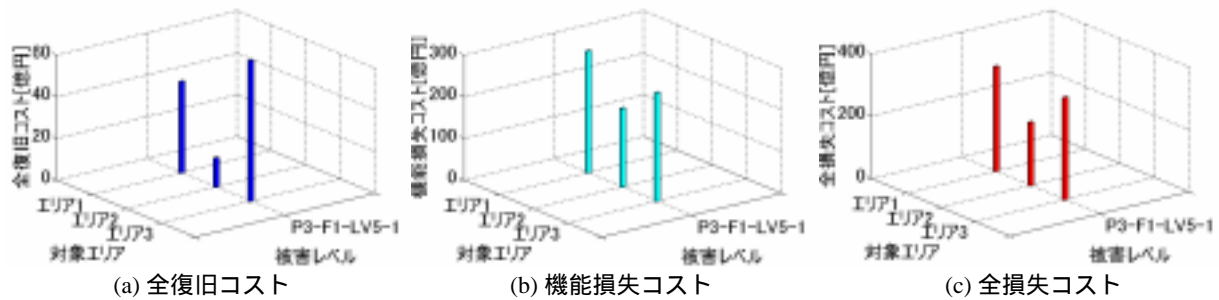


図 - 1 対象エリアにおける損失コストの試算

(2) 復旧コスト

復旧コスト jC_r は、構造要素 i の被災度 di に応じて、構造部材の再構築，補修，補強に必要とする材料コスト $j^i c_m^{di} \times j^i V_m^{di}$ ，復旧作業に関わる作業員の人工費 $j^i c_w^{di} \times j^i N_w^{di} \times j^i D_w^{di}$ ，また，復旧作業に必要となる資機材の搬送，設置，撤去，リースに伴うコスト $j^i C_{in}^{di} + j^i C_t$ により算定される。

$$jC_r = j^i C_r^{di} = j^i c_m^{di} \times j^i V_m^{di} + j^i c_w^{di} \times j^i N_w^{di} \times j^i D_w^{di} + j^i C_{in}^{di} + j^i C_t \quad (7)$$

4. 損失コストの試算例

以上のモデルに基づき，兵庫県南部地震において甚大の被害を受けた阪神高速道路 3 号神戸線の 3 つのエリアを抽出し，管理団体 P3 の立場に立った場合の損失コストの試算を行った。

式(7)に基づき，各エリアに対してネットワークを構成する構造要素の復旧コストを求め，各エリアにおける復旧コストの総和（以下，全復旧コスト）を求めると，図 - 1(a)のようになる。さらに，式(6)に基づき機能損失コストを各エリアに対して求めると図 - 1(b)のようになる。以上より，式(1)に基づき全損失コストを算定すると図 - 1(c)のようになる。これらによれば，全復旧コストは機能損失コストの 7% ~ 20% になっており，いずれのエリアでも機能損失コストの占める割合が大きい。全復旧コストおよび機能損失コストはネットワークの復旧日数に強く依存していることから，全損失コストも復旧日数に応じてエリア 2, 3, 1 の順に大きくなっている。

5. 結論

本研究では，地震時における社会基盤ネットワークの機能を明示化し，ネットワークを構成する構造要素の損傷と機能の連関に関するモデルを構築した。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機能と構造要素の被災度の関係に対応づけ，損失マトリックスを構築するとともに，機能損失の波及効果を震災波及帰着構成表に

よって定量的に表現するモデルを提案した。

2) 道路ネットワークの機能が影響を受けたときに生じる損失コストを機能損失コストと復旧コストに分けて定式化した。

3) 以上，本研究で構築したモデルに基づき，兵庫県南部地震において被害を受けた阪神高速道路 3 号神戸線を例として損失コストの試算を行った。

謝辞：阪神高速道路公団の足立幸郎氏，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様々な資料を提供して頂くとともに貴重なご助言を頂きました。また，川崎市建設局の広瀬市郎氏ならびに茨城県つくば市の小野村一雄氏には行政の立場から貴重なご意見をいただくとともに資料を提供して頂きました。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Taleb-Agha, G., Seismic Risk Analysis of Lifeline Networks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.67, No.6, pp.1625-1645, 1977.
- 3) 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.
- 4) 山田善一，家村浩和，野田茂，伊津野和行，道路ネットワーク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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.

(2003. 9.11. 受付)