

社会基盤ネットワークシステムの地震時における機能損失の評価モデル

Evaluation of Function Loss of Infrastructural Network Systems after a Seismic Event

庄司学**・○笛木孝哲***

By Gaku SHOJI**・Takaaki FUEKI***

1. はじめに

大規模な地震災害が発生した場合には、道路、鉄道、電力、ガス、上下水道などの社会基盤構造物が被る損失は計り知れない。これは、これらの多くの構造物がネットワークを構成しており、ネットワークシステムとしての機能が損傷または喪失した場合の損失が甚大となるためである。このような社会基盤ネットワークシステムの機能損失に対する評価手法としては多方面からの研究が進められているが¹⁾、ネットワークシステムの機能性と構造被害との関係を明確に示していないため、耐震補強施策などの防災施策に十分寄与しているものとはなっていない。

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) ネットワークシステムの機能損失に伴う関連主体への影響の波及を「震災波及帰着構成表」でモデル化すると共に、2) 一方でネットワークシステムの機能損失と構造要素の損傷との関係を「損失マトリックス」でモデル化し、これらのモデルを関連付け、3) 兵庫県南部地震における事例を参考に道路ネットワークの機能に支障が生じた場合の機能損失コストの試算を行った。

2. 震災波及帰着構成モデルの提案

本研究では、交通経済学で活用されている費用便益帰着構成モデル²⁾を援用し、震災波及の影響のモデル化を行った。費用便益帰着構成モデルとは、**図一**

*キーワード：防災計画、計画手法論、整備効果計測法

**正員、博(工)、筑波大学大学院システム情報工学研究科
(茨城県つくば市天王台1-1-1、TEL&FAX:029-853-6190)

***学生員、筑波大学大学院理工学研究科
(茨城県つくば市天王台1-1-1、TEL:029-853-7366、

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

1に示すような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、便益として定量的に評価するものである。ここでは、経済プロジェクトをネットワークシステムの地震災害による機能損失問題として捉え、システムに関わる主体に対する震災波及の影響を列挙し、震災波及帰着構成表を作成した。なお、道路ネットワークとしては、地震時に様々な機能が要求される都市高速道路を対象として取り挙げた。**表一1**は道路ネットワークの機能を各主体に対して整理した結果であり、**表一2**はネットワークの被害レベルと機能損失を関連付けた結果である。以下では、**図一1**に示した利用主体としては**表一1**の利用主体の中でもネットワークに関わる生活者を想定し、また波及主体としては行政主体、道路事業主体を想定する。

以上に基づき、震災波及帰着構成表の作成にあたって、まず道路ネットワークの機能損失の影響が**図一2**に示すようにネットワークに関わるあらゆる主体に波及すると想定する。**表一3**は、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って各主体にどのような影響が波及するかを記述的に示した結果である。これは記述的に示した震災波及帰着構成表の一例である。一方、**表一4**は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である。なお、**表一3**、**4**では、**表一2**における被害レベルとしてLV1-2~LV2-2の場合を想定した。

次に、**表一3**、**4**に示した震災波及帰着構成表の定量化にあたっては、モデルに必要なパラメータの設定を行った上で(**表一5**)、**図一1**に示すような震災に伴う生活者および波及主体の行動原理をモデル化した。生活者の震災による損失は負の効用として解釈し、これらを予算制約式、時間制約式のもとで最小限に抑えるように生活者が行動するものとして次式のようにモデル化を行った。

$$v_i = \min_{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i11}} l_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i11}) \quad (1a)$$

$$\sum_i \left(\sum_{k=1}^{10} p_k x_{ik} + p_{12} x_{i12} \right) = \sum_{j=1}^2 \pi_j \quad (1b)$$

$$\sum_{k=1}^{12} T_k x_{ik} = T_{12} R_{x,12}(t) \quad (1c)$$

ここで、 v_i ：生活者の負の効用（間接効用関数）、 l_i ：効用関数、 k ：事象番号、 i ：生活者数、 p_k ：価格、 π_j ：波及主体 j の負の利潤、 T_k ：単位所要時間、 $R_{x,12}(t)$ ：生活者の労働保有量である。なお、事象としては、表－5に示すように13項目の事象（ $k=13$ ）と2つの波及主体（ $j=2$ ）を想定している。

波及主体の震災の損失に関しては、負の利潤を生産すると解釈し、各主体ともこれを予算制約式、時間制約式のもとで最小限に抑えるよう行動するものとして次式のようにモデル化した。

$$\pi_j = \min_{y_{j,1}, y_{j,2}, \dots, y_{j,10}, y_{j,13}} \left(\sum_{k=1}^{10} p_k y_{j,k} + p_{13} y_{j,13} \right) \quad (2a)$$

$$^j g(y_{j,12}) = p_{12} R_{y,12}(t) \quad (2b)$$

$$T_{12} y_{j,12} - \sum_{k=1}^{10} T_k y_{j,k} = T_{13} y_{j,13} \quad (2c)$$

ここで、 $^j g(y_{j,12})$ ：生産関数、 $R_{y,12}(t)$ ：波及主体の労働保有量である。式(1)、(2)に基づき、ラグランジュの未定乗数法を適用することで生活者および各波及主体の最適解 x_k 、 y_{jk} を次式のように求める。

$$L_v \equiv -l_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i11}) + \mu_1 \left[\sum_i \left(\sum_{k=1}^{10} p_k x_{ik} - q'_{i1} x_{i11} \right) - \sum_{j=1}^2 \pi_j + p_{12} R_{x,12}(t) \right] \quad (3a)$$

$$\frac{\partial L_v}{\partial x_i} = - \begin{bmatrix} l_{i1}(x) \\ \vdots \\ l_{i11}(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_{1,1} & \cdots & \mu_{1,11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q'_{11} \end{bmatrix} = 0 \quad (3b)$$

$$L_\pi \equiv - \left(\sum_{k=1}^{10} p_k y_{j,k} + p_{13} y_{j,13} \right) + \mu_2 \left[^j \bar{g}(y_{j,1}, \dots, y_{j,10}, y_{j,13}) - p_{12} R_{y,12}(t) \right] \quad (4a)$$

$$\frac{\partial L_\pi}{\partial y_j} = - \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_{10} \\ p_{13} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_{2,1} & \cdots & \mu_{2,10} & \mu_{2,13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ^j \bar{g}_1(y) \\ \vdots \\ ^j \bar{g}_{10}(y) \\ ^j \bar{g}_{13}(y) \end{bmatrix} = 0 \quad (4b)$$

$$\text{但し、} \quad q_k = p_k - \frac{p_{12}}{T_{12}} T_k$$

$$q'_{11} = \frac{p_{12}}{T_{12}} T_{11}$$

$$\Omega = \sum_{j=1}^2 \pi_j - p_{12} R_{x,12}(t)$$

ここで、 $^j \bar{g}(y)$ ：時間制約式を組み込んだ生産関数、 q_k, q'_{11} ：一般化価格、 Ω ：一般化所得、 μ_1, μ_2 ：ラグランジュ乗数である。

以上のモデルに基づき、生活者および各波及主体の最適解 x_k 、 y_{jk} により震災波及帰着構成表への帰着

分析を行う。その際には震災波及の影響を負の便益と考え、震災前後の状態変化量で便益を定義した³⁾。便益評価には補償的偏差 CV と等価的偏差 EV を用いる評価手法があるが、ここでは帰着分析法に基づき EV で評価する。以上より、生活者数 i で加算し、次式のように便益を評価した。

$$\sum_i EV = \oint_{A \rightarrow B} \phi(q_k) \left[\sum_{k=1}^{10} x_k dq_k - x_{i1} dq'_{11} + \sum_{j=1}^2 \left(\sum_{k=1}^{10} y_{j,k} dp_k + y_{j,13} dp_{13} \right) - df(p_{12}) \right] \quad (5)$$

但し、

$$df = R_{x,12}(t) dp_{12}$$

ここで、 $\phi(q_k)$ は支出関数 e を一般化所得 Ω で偏微分したものである³⁾。式(5)を表形式に表現したものが、表－6の震災波及帰着構成表である。

3. パラメータ解析および耐震補強施策への利用

本節では、表－5に示す各事象に対する価格 p_k および単位所要時間 T_k を想定し、パラメータ解析を行った。この際には、兵庫県南部地震における被害資料に基づき各値を仮定した⁴⁾。また、表－6における dq_k 、 dq'_{11} および dp_k を仮定し、モデルで重要となる生活者の効用関数 $l_i(x)$ および波及主体の生産関数 $^j \bar{g}(y)$ をコブ＝ダグラス型の関数としてモデル化した。

$$l_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i11}) = x_{i1}^{\alpha^1} x_{i2}^{\alpha^2} x_{i3}^{\alpha^3} x_{i4}^{\alpha^4} x_{i5}^{\alpha^5} x_{i6}^{\alpha^6} x_{i7}^{\alpha^7} x_{i8}^{\alpha^8} x_{i9}^{\alpha^9} x_{i10}^{\alpha^{10}} x_{i11}^{\alpha^{11}} \quad (6a)$$

$$^j \bar{g}(y_{j1}, \dots, y_{j10}, y_{j13}) = y_{j1}^{\beta^1} y_{j2}^{\beta^2} y_{j3}^{\beta^3} y_{j4}^{\beta^4} y_{j5}^{\beta^5} y_{j6}^{\beta^6} y_{j7}^{\beta^7} y_{j8}^{\beta^8} y_{j9}^{\beta^9} y_{j10}^{\beta^{10}} y_{j13}^{\beta^{13}} \quad (6b)$$

ここで、 $\alpha^1 \sim \alpha^{11}$ 、 $^j \beta^1 \sim ^j \beta^{10}$ 、 $^j \beta^{13}$ ：関数の指数部である。

以上より、兵庫県南部地震の際に被災した阪神高速道路3号神戸線のネットワークの一部が被災し、機能不全に陥った場合の機能損失の定量的評価を行うと、図－3のようになる。なお、図－3の作成にあたっては、文献5)を参考に道路事業主体の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機能損失コストによって、震災波及帰着構成モデルに支配的である価格 p_k および T_k の変動量 dp_k および dT_k にキャリブレーションを施した。

次に、図－4に示すように損失マトリックスから表－6に示す震災波及帰着構成表への関連付けを行った。損失マトリックスは道路ネットワークを構成する構造要素の被災度とネットワークの被災に伴う損失との関係を示すものである⁵⁾。なお、一例として表－7に

はネットワークの構造要素が鋼桁の場合の損失マトリックスを示している。

図－４の対応付けにより、道路ネットワークを構成する構造要素の被災度と震災波及による各主体の機能損失を関連付けることができる。以上より、道路ネットワークを構成する構造要素に対し、それぞれの保有耐震性能下において、ある一定のレベルの耐震補強を施すことによって震災波及の影響がどれだけ軽減されるかを明示化することができる。従って、耐震補強の優先順位を決定したり、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する際に、震災波及と帰着モデルを有用に活用することできると考えられる。

4. おわりに

本研究では、地震時に社会基盤ネットワークシステムの機能が低下・喪失した際に発生する損失を評価するモデルの提案を行った。ネットワークシステムとしては道路ネットワークを対象とし、兵庫県南部地震の際に被災した阪神高速道路3号神戸線の事例を参考にモデルのキャリブレーションを行った上で機能損失コストを試算した。得られた知見をまとめると以下に示すとおりである。

(1) 交通経済学で活用されている費用便益帰着モデルを援用し、ネットワークシステムに関わる主体に対する震災波及の影響を評価するモデルを提案した。本モデルを震災波及と帰着構成モデルと呼ぶ。

(2) 構築した震災波及と帰着構成モデルに基づいて、兵庫県南部地震の際の被害事例を参考にし、パラメータ解析を行った。

(3) 本モデルの活用の一例として、道路ネットワークを構成する構造要素の耐震補強施策へ適用できることを示した。

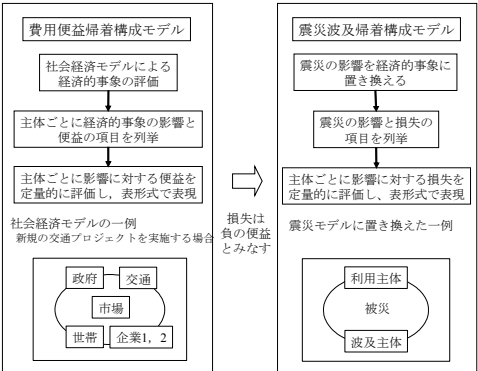
謝辞

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交通工学の見地から貴重なご意見を頂きました。

参考文献

1) 例えば、Taleb-Agha, G., Seismic Risk Analysis of Lifeline Networks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.67, No.6, pp.1625-1645, 1977.12.

2) 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, pp2-12, 1999.
3) 森杉壽芳: 社会資本整備の便益評価ー一般均衡理論によるアプローチー, 日本交通政策研究会研究双書, 12, 勁草書房, 1997.11.
4) 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ー土木構造物の被害(橋梁), 土木学会, 1996.12.
5) 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, JCROSSAR2003論文集, 第5回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, Vol.5, pp.109-116, 2003.11.



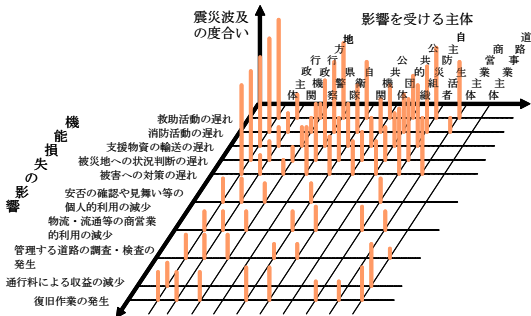
図－１ 震災波及と帰着構成モデルの概要

表－１ 道路ネットワークに求められる機能と関連主体との関係

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	安否の確認等の個人的利用
		F2	物流・流通等の商業的利用
P3	道路事業主体	F1	管理・運営

表－２ 道路ネットワークの被害レベルと機能損失の程度との関係

被害の大きさ	被害レベル	機能損失の程度
小 ↓ 大	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



図－２ 機能損失の影響による震災の波及

表－３ 「記述的」震災波及帰着構成表

	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	
			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増大					調査期間の通行差し止めによる収益の減少
通行料による収益の減少	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	復旧作業員の安全確保のための業務の増大	復旧作業にともなう施工管理業務の増大	復旧作業にともなう施工管理業務の増大	復旧作業にともな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	復旧作業に協力する業務の発生	復旧用資材の輸送業務の増大	復旧用資材の確保にともなう業務の増大	補修・補強材料の調製業務の増大	復旧作業の増大	復旧活動にともなう融資の発生	騒音・振動にともなう苦痛	騒音・振動にともなう苦痛	復旧業務の発生
	補助金・出資金の要請									復旧作業の担当					

表－４ 「記号的」震災波及帰着構成表

(表中、◎はコストの計測が可能であると思われるもの、○は精度に問題は生じますが、コストの計測は可能であると思われるもの、△はコストの計測は困難であると思われるものを示し、＋は正の影響、－は負の影響を示す。)

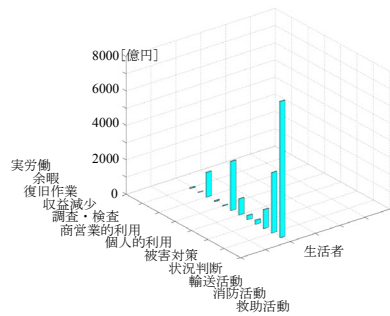
	行政主体	地方行政機関				県警察	公共機関				公共的団体	生活者	前営業 主体	道路事業 主体		
		市・県・国	労働局	地方整備局			運輸局	他の道路 管理団体	運送	電力・ ガス					建設・ メーカー	
				道路	河川											港湾
管理する 道路の調査・検査 の発生	○－		○－		河川		港湾		陸運		○－					◎－
通行料による収益 の減少	◎－															◎－
復旧作業 の発生	△－	△－	○－	○－	○－	○－	○－	○－	○＋	△－	○＋	○－	△－	△－	△－	◎－
	△－										○＋					

表－５ 震災波及に対するパラメータ設定

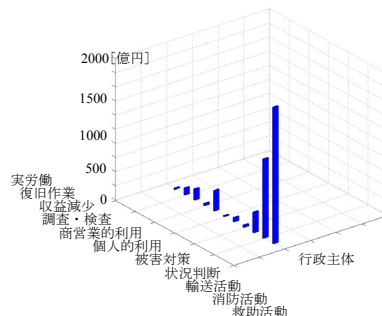
関連事象 k	生活者 i		波及主体 j				価格 [億円]	単位所要 時間 [日]
			行政主体		道路事業主体			
	量	所有量	量	所有量	量	所有量		
救助活動の遅れ	x_{11}	0	$y_{1,1}$	0	$y_{2,1}$	0	p_1	T_1
消防活動の遅れ	x_{12}	0	$y_{1,2}$	0	$y_{2,2}$	0	p_2	T_2
輸送活動の遅れ	x_{13}	0	$y_{1,3}$	0	$y_{2,3}$	0	p_3	T_3
状況判断の遅れ	x_{14}	0	$y_{1,4}$	0	$y_{2,4}$	0	p_4	T_4
被害対策の遅れ	x_{15}	0	$y_{1,5}$	0	$y_{2,5}$	0	p_5	T_5
個人的利用の減少	x_{16}	0	$y_{1,6}$	0	$y_{2,6}$	0	p_6	T_6
商業的利用の減少	x_{17}	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	x_{18}	0	$y_{1,8}$	0	$y_{2,8}$	0	p_8	T_8
通行料による収益の減少	x_{19}	0	$y_{1,9}$	0	$y_{2,9}$	0	p_9	T_9
復旧作業の発生	x_{10}	0	$y_{1,10}$	0	$y_{2,10}$	0	p_{10}	T_{10}
余暇	x_{11}	$R_{1,11}(t)$	-	0	-	0	p_{11}	T_{11}
労働	x_{12}	$R_{1,12}(t)$	$y_{1,12}(t)$	$R_{2,12}(t)$	$y_{2,12}(t)$	$R_{2,12}(t)$	p_{12}	T_{12}
実労働	-	0	$y_{1,13}$	$R_{1,13}(t)$	$y_{2,13}(t)$	p_{13}	T_{13}	

表－６ 震災波及帰着構成表

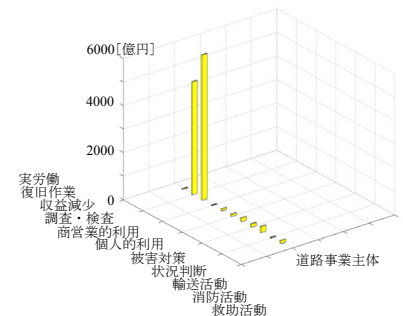
	生活者	行政主体	道路事業主体
救助活動の遅れ	$x_1 dq_1$	$y_{1,1} dp_1$	$y_{2,1} dp_1$
消防活動の遅れ	$x_2 dq_2$	$y_{1,2} dp_2$	$y_{2,2} dp_2$
輸送活動の遅れ	$x_3 dq_3$	$y_{1,3} dp_3$	$y_{2,3} dp_3$
状況判断の遅れ	$x_4 dq_4$	$y_{1,4} dp_4$	$y_{2,4} dp_4$
被害対策の遅れ	$x_5 dq_5$	$y_{1,5} dp_5$	$y_{2,5} dp_5$
個人的利用の減少	$x_6 dq_6$	$y_{1,6} dp_6$	$y_{2,6} dp_6$
商業的利用の減少	$x_7 dq_7$	$y_{1,7} dp_7$	$y_{2,7} dp_7$
管理する道路の調査・検査の発生	$x_8 dq_8$	$y_{1,8} dp_8$	$y_{2,8} dp_8$
通行料による収益の減少	$x_9 dq_9$	$y_{1,9} dp_9$	$y_{2,9} dp_9$
復旧作業の発生	$x_{10} dq_{10}$	$y_{1,10} dp_{10}$	$y_{2,10} dp_{10}$
余暇	$x_{11} dq'_{11}$	-	-
実労働	- df	$y_{1,13} dp_{13}$	$y_{2,13} dp_{13}$



(a) 生活者



(b) 行政主体



(c) 道路事業主体

図－３ 道路ネットワークの被災に伴う機能損失の評価

表－７ 損失マトリックス

主体	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、耐荷力低下	フランジの変形・ウェーブに相当規模の座屈	フランジの大変形・ウェーブに相当規模の座屈	桁の落
行政主体 P1	救助・消防活動 F1	LV1-1							
		LV1-2							
		LV2-1							
		LV2-2							
		LV3-1							
		LV3-2							
		LV4-1							
利用主体 P2	個人的利用 F1	LV1-1							
		LV1-2							
		LV2-1							
		LV2-2							
		LV3-1							
		LV3-2							
		LV4-1							
道路事業主体 P3	管理運営 F1	LV1-1							
		LV1-2							
		LV2-1							
		LV2-2							
		LV3-1							
		LV3-2							
		LV4-1							

震災波及帰着構成表

	生活者	行政主体	...
救助活動の遅れ	$x_1 dq_1$	$y_{1,1} dp_1$	
消防活動の遅れ	$x_2 dq_2$	$y_{1,2} dp_2$	
...			

$$B(dp_i^B, dT_i^B)$$

$$A(dp_i^A, dT_i^A)$$

損失マトリックス

		構造要素	桁			
主体	機能	被災度	D-1	D-2	C	...
		損傷形態	損傷なし	微小なクラック	び割れ	局部座屈・小変形
行政主体 P1	救助・消防活動 F1	LV1-1				
		LV1-2		$y_{1,1}^A dp_1^A + y_{1,2}^A dp_2^A$		
		LV2-1				
		LV2-2				
		LV3-1			$y_{1,1}^B dp_1^B + y_{1,2}^B dp_2^B$	
		LV3-2				
		⋮				

図－４ 震災波及帰着構成表と損失マトリックスとの対応付け