

地震時における道路交通システムの機能損失評価*

Evaluation of Functional Impairment for Road Infrastructure Systems in View of a Seismic Disaster Risk *

笛木孝哲**・庄司学***

By Takaaki FUEKI**・Gaku SHOJI***

1. はじめに

跨川橋等の高架道路橋は、道路交通システムの機能を維持する上で、構造信頼的な側面からみて、きわめて高い地震リスクを負っている。これらは、震災後、ネットワーク内に新規の建設や復旧を実施する際、多大な労力・時間を要するシステムであり、耐震対策を促す立場にある行政機関においては、損傷に伴う社会的・経済的影響を最低限に抑制するために、事前事後の様々な施策を実施する必要がある。このため、高架道路橋が有する地震リスクを定量的に評価し、保有する耐震性能を十分に把握することは、きわめて重要な課題といえる。

これに対し、近年では、対象とする構造物の被害形態を分類・整理し、既往の被災データに基づきフラジリティ評価を行い、イベントツリー解析(ETA)を用いて期待損失を算定するなど^{1)・2)}、様々な手法で地震リスクの評価が行なわれてきているが、システムを構成する構造要素のフラジリティ特性を踏まえた評価は少なく、システムの地震損傷およびそれに伴う復旧要件とシステムの機能性との関係性が十分に明確になっていない。

以上を踏まえ、本研究では、社会基盤システムの中でも道路交通システムを取り挙げ、地震時における機能を明確に定義した上で、1)システムの地震損傷と機能損失との関係性をETAに基づいた地震リスクアセスメント手法でモデル化し、2)1995年兵庫県南部地震および2004年新潟県中越地震の事例を参考にして道路交通システムの機能に支障が生じた場合の機能損失に係わる地震リスク評価を試みた。

2. 地震時フラジリティ特性に関する分析

(1) ETAを活用した被害形態分析

既往の研究において、高架道路橋に対する詳細な地震リスク評価が積極的になされていない理由として、同一地震による被災データが十分でなかったためと考えられるが、現在では、1995年の兵庫県南部地震における、阪神高速道路3号神戸線、5号湾岸線等、同一地震による高架道路橋の被災データが多数保有されている³⁾。ここでは、高架道路橋のフラジリティ特性を評価するため、3号神戸線の被災データを用いることとした。

構造要素に関する既往の研究では、被災した高架道路橋に対して、マクロ的な視点に立って被害分析⁴⁾等が行われているが、構造種別や構造形式を詳細に検討することには主眼が置かれていない。そこで、まず、高架道路橋を構成する構造要素の損傷がどの程度相互に関連しているかを把握することとし、高架道路橋の被災データをもとに、構造要素の被災度判定に基づき、被害形態に関するイベントツリーを作成した(図-1)。図-1によれば、橋脚のみ、あるいは支承のみに被害が生じているケース、橋脚と支承に損傷が生じているケースが多いことがわかる。また、桁の損傷は比較的支承の損傷が大きい場合には、被災度が大きくなっている傾向もみられるが、全体的にばらつきは大きく、マクロ的にみて構造要素間の損傷時における相互の関連性は低いと考えられる。

また、図-1では、3号神戸線の復旧に関する検討事例⁵⁾に基づきツリーごとの復旧費用を示すとともに、費用便益分析マニュアル⁶⁾を参考に、3章で後述する想定橋梁の交通量や迂回等を仮定し、道路交通システムによる機能損失をコストで示している。

(2) フラジリティ特性の評価

前節より、構造要素間の損傷の関連性は低いと考えられることから、高架道路橋を構成する桁、支承、橋脚、基礎の各構造要素に対し、地震時のフラジリティ特性について個別に分析することとし、それぞれの構造形式、構造種別、適用示方書年次の違いに着目し、分類・整理した。その上で、山口・山崎⁷⁾により兵庫県南部地震における家屋被害から町丁目単位で推定された最大速度

*キーワード：システム分析、防災計画

**正員、修(工)、日本技術開発(株)

(東京都中野区本町5-33-11、
TEL03-5341-5134、FAX03-5385-5830)

***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、
TEL029-853-6190、FAX029-853-6190)

(以下、PGV)に基づき、3号神戸線の橋梁立地地点と対応付けることで、道路高架橋の各構造要素の被災率との関連付けを行った。

構造物に対する地震応答評価は、例えば地震耐力では構造物を構成する各種部材の材料強度のばらつきや施工性など、地震動の推定誤差を含め様々な不確実性を伴うことから、ここでは確率論的な評価を行う。

道路構造物を構成する構造要素の地震応答、地震耐力はともに対数正規分布に従うと仮定し、それぞれR (r_m, r), C (c_m, c)と定義する。ただし、r_mは地震応答の中央値、rは地震応答の変動係数、c_mは地震耐力の中央値、cは地震耐力の変動係数である。これより、構造要素の損傷確率は、地震応答が地震耐力を超える確率として、確率変数Zを用いて次式のように定義される。なお、確率変数Zに用いる地震動指標は、PGVとした。

$$P_f = F_z(r_m)$$

$$= \int_0^{r_m} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \zeta} \cdot \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln z - \ln c_m}{\zeta}\right)^2\right] dz \quad (1)$$

ただし、 $Z = (C/R) \cdot r_m$

式(1)に対し、対数正規確率紙を利用した最小二乗法により各構造要素の対数標準偏差および中央値を推定した。この際、要素数の少ないPGV帯域や、被災度の分布に偏りがある帯域の影響を抑えるため、データのフィッティングを行った。ここで、桁については、構造形式の違い等詳細に分類するとPGV帯域別のデータ数が不十分となることから、桁種のみでの分類とした。また、基礎については、損傷を受けた数が極端に少なく、統計分析を行う上で不十分であると考えられたため、対象外とした。

以上の抽出・整理を踏まえて、各構造要素に対するパラメータ推定値および fragility 曲線を、表-1および図-2～図-4に示す。

3. 実被害事例への適用

本節では、前節で算定した fragility 特性を用いて、2004年新潟県中越地震の事例を参考に、機能損失評価を試みる。

まず、新潟県新潟市内の跨川橋を想定し、当該地点に影響を及ぼしうる約445km x 550kmの領域を解析対象領域としてモデル化し、地震ハザード評価を行った。これより、前節で分析した各構造要素の fragility 特性と合わせて、地震損失曲線を算出する。

ここで、耐震補強が機能損失に与える影響を定性的に分析するため、橋脚を対象に、表-1で示したパラメ

基礎	橋脚	支承	桁	3号神戸線	復旧費用(万円)	復旧日数	機能損失(万円)
D	D	D	D	82	0	0	0
			C	9	2000	3	6300
			B	4	2000	30	63000
			A	0	13000	90	315000
		C	D	80	600	3	6300
			C	13	2600	3	6300
			B	1	2600	30	63000
			A	0	13600	90	315000
		B	D	40	600	30	63000
			C	15	2600	30	63000
			B	7	2600	30	63000
			A	0	13600	90	315000
		A	D	4	600	90	315000
			C	8	2600	90	315000
			B	40	2600	90	315000
			A	3	13600	90	315000
	C	D	D	82	100	3	6300
			C	6	2100	3	6300
			B	4	2100	30	63000
			A	0	13100	90	315000
		C	D	32	700	3	6300
			C	5	2700	3	6300
			B	3	2700	30	63000
			A	1	13700	90	315000
		B	D	25	700	30	63000
			C	15	2700	30	63000
			B	9	2700	30	63000
			A	1	13700	90	315000
		A	D	4	700	90	315000
			C	1	2700	90	315000
			B	46	2700	90	315000
			A	7	13700	90	315000
		D	D	28	800	30	63000
			C	2	2800	30	63000
			B	0	2800	30	63000
			A	0	13800	90	315000
		C	D	9	1400	30	63000
			C	4	3400	30	63000
			B	2	3400	30	63000
			A	0	14400	90	315000
		B	D	6	1400	30	63000
			C	10	3400	30	63000
			B	3	3400	30	63000
			A	1	14400	90	315000
		A	D	1	1400	90	315000
			C	4	3400	90	315000
			B	10	3400	90	315000
			A	5	14400	90	315000
	A	D	D	41	4500	90	315000
			C	1	6500	90	315000
			B	2	6500	90	315000
			A	0	17500	90	315000
		C	D	11	5100	90	315000
			C	2	7100	90	315000
			B	1	7100	90	315000
			A	1	18100	90	315000
		B	D	8	5100	90	315000
			C	5	7100	90	315000
			B	4	7100	90	315000
			A	0	18100	90	315000
		A	D	5	5100	90	315000
			C	2	7100	90	315000
			B	14	7100	90	315000
			A	5	18100	90	315000
				734			

図-1 ETによる各構造要素の被害形態分類

表-1 構造要素に対するパラメータ推定値

		対数標準偏差	中央値[kine]	決定係数
鋼桁	As or A	1.95	1664	0.08
	B以上	1.10	225	0.34
	C以上	0.88	115	0.58
RC単柱 39	As or A	0.64	171	0.38
	B以上	0.70	127	0.82
	C以上	1.07	66	0.54
支承-move	As or A	1.32	270	0.36
	B以上	1.36	150	0.74
	C以上	1.49	80	0.58

ータ値が倍程度、3倍程度、5倍程度に耐震補強がなされた3つのケースを想定し、機能損失に関する感度分析を行うこととした。

以上を踏まえ、ここでは、構造要素の損傷に対して、耐震補強していない場合と、倍程度の耐震補強を行った場合の地震損失曲線について、図-5に示している。図-5より、構造要素の損傷のみでは、耐震補強による優

位な差はあまり見られないが、100kine前後の帯域で確率は低いが耐震補強による損失の低下がみられる。今後は、耐震補強の程度により、迂回等による道路交通の間接的な損失がどの程度の割合で低減するかを確認するため、感度分析を行っていく。

図 - 5の地震損失曲線より、地震リスクカーブを作成した(図 - 6)。図 - 6によると、発生確率が高く期待損失の少ない帯域では、地震損失曲線と同様に、耐震補強による優位な差はみられず、ある程度発生確率が低く期待損失が大きくなってきた帯域で、耐震補強により損失が低下することがわかった。

4. おわりに

本研究では、道路構造物の中でも道路高架橋を取り挙げ、1995年兵庫県南部地震および2004年新潟県中越地震の事例を参考にして道路交通システムの機能に支障が生じた場合の機能損失に係わる地震リスク評価を試みた。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ・高架道路橋の被災データをもとに、構造要素の被災度判定に基づき、被害形態に関するETA分析を行い、高架道路橋を構成する構造要素の損傷について、相互の関連性の評価を行った。
- ・高架道路橋の各構造要素に対して、構造形式や準拠基準に基づき整理した上で、フラジリティ特性の評価を行った。
- ・高架道路橋を対象に、道路交通システムとしての機能に支障が生じた場合の機能損失評価を試みた。具体的には、構造要素が損傷した場合に道路交通に与える間接的な損失を考慮して、ET解析のモデルを構築した。

今後は、橋脚に耐震補強を施したケーススタディを行うことにより、機能損失に与える影響について感度分析を行い、構造要素の被災度のランクが上がることによる道路交通への影響の定性的な評価を行う。

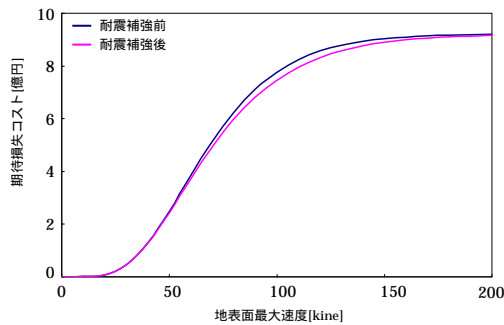


図 - 5 地震損失曲線

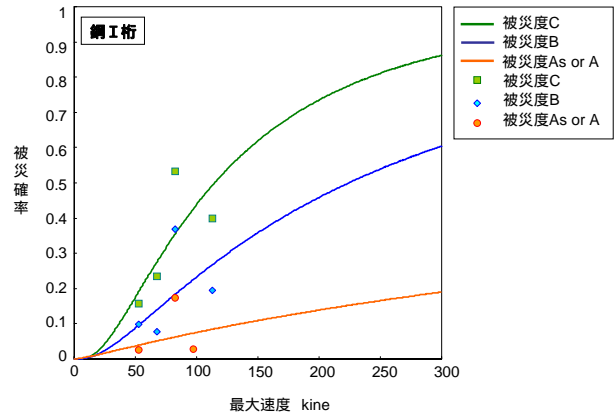


図 - 2 鋼工桁のフラジリティ

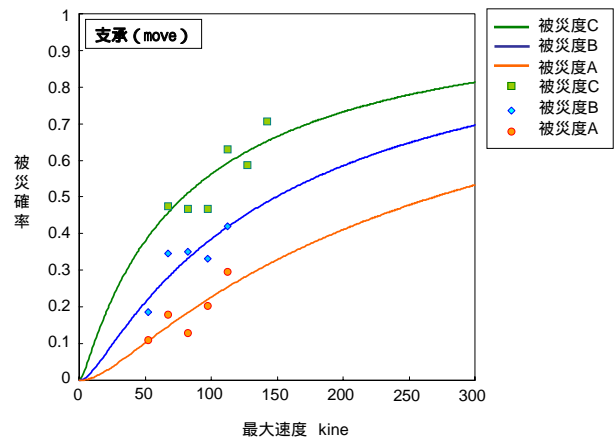


図 - 3 支承のフラジリティ

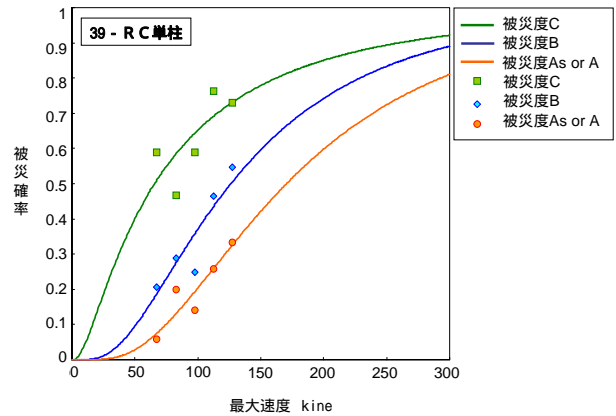


図 - 4 適用示方書39年RC単柱のフラジリティ

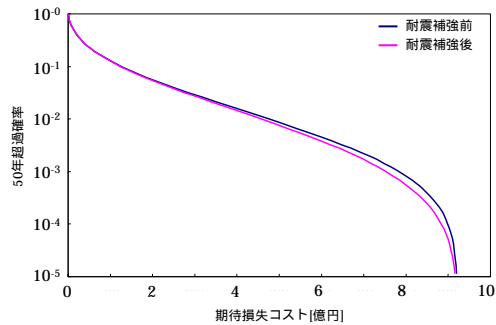


図 - 6 地震リスクカーブ

謝辞

本研究を行うにあたり、阪神高速道路公団の金治英貞氏、東京大学の藤野陽三先生、阿部哲子氏には、1995年兵庫県南部地震の際に被災した阪神高速道路3号神戸線に関する被災資料および研究資料を提供していただきました。また、千葉大学の山崎文雄先生、日本技術開発（株）の山口直也氏には、兵庫県南部地震における町丁目単位での推定地震動分布を提供していただきました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 星谷勝, 中村孝明: 構造物の地震リスクマネジメント, 山海堂, 2002.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 阿部哲子, 藤野陽三, 阿部雅人: 1995年兵庫県南部地震による阪神高速高架橋の被害と2, 3の分析, 土木学会論文集, No.612, I-46, pp.181-199, 1999.1.
- 5) Shoji, G. and Fueki, T.: Modeling Effects of Functional Impairment after Seismic Damage to Road Networks, Structural Eng./Earthquake Eng., Japan Society of Civil Engineers, Vol.24, No.1, pp.38s-50s, 2007
- 6) 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, 2003.8.
- 7) 山口直也, 山崎文雄: 1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定, 土木学会論文集, No.612, I-46, pp.325-336, 1999.1.