

道路橋の地震被害率に関する基礎的研究

Basic Studies on Seismic Damage Ratio of Highway Bridges

猪熊康夫*・片山恒雄**・久保慶三郎**

Yasuo INOKUMA, Tsuneo KATAYAMA and Keizaburo KUBO

1. 被害率の定義

1つの道路橋の地震による直接被害額を C_d (被害を受けた部分の復旧費), その道路橋を被害時点で新たに建設するに要する費用を C_r とするとき, 被害率を

$$\text{被害率 } DR = \frac{C_d}{C_r} \times 100 (\%) \quad (1)$$

と定義する. 無被害なら $DR = 0$, 完全に破壊されて再建設が必要なら $DR = 100$ となる.

地震動の強さがほぼ一定と考えられる地域の全橋梁に対する被害率の平均値を平均被害率と名づける.

$$\text{平均被害率 } MDR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DR_i (\%) \quad (2)$$

ここに

$$DR_i = \text{着目地域の } i \text{ 番目の道路橋の被害率}$$

$$n = \text{その地域内の道路橋の数}$$

である. 平均被害率は, 着目地域内のある道路橋の被害率の期待値と考えることができる.

2. 被害率調査の方法と結果

道路橋の被害率を以下の4つの場合に対して調査した.

- (a) 福井地震の際に家屋倒壊率が50%以上の地域に存在した道路橋(17橋)
- (b) 新潟地震の際に震央から100km以内の気象庁震度階Vの地域にあった橋長20m以上の道路橋(82橋)
- (c) 宮城県沖地震の際の宮城県内の道路橋(133橋)
- (d) 宮城県沖地震の際の岩手県北上川水系の道路橋(20橋)

これら約250橋のうちで, 地震による被害額が一応示されている新潟地震と宮城県沖地震による被災橋80橋に対しては, 地震当時に必要とされる建設費 C_r を推定することにより, 式(1)で被害率を算定した. 建設費は上部工の型式別に橋面積に比例するものと仮定し, 橋面

積あたりの建設費は実橋の建設費データを最小2乗法で整理して求めた. この際, 架設年度の影響は, 建設省所管土木工事費デフレーターによって勘案した. このようにして求めた昭和39年度現在の単位面積(1m²)あたり建設費は, ガーダー橋で94.5千円, トラス橋で93.1千円, PC橋で61.6千円, RC橋で62.5千円, ランガー橋で98.3千円となった. 宮城県沖地震が発生した昭和53年の建設費の推定には, 上記39年度建設費にデフレーター値2.94を乗じて用いた.

被害額が明示されていない残りの170余橋については, 上記80橋のデータに基づく数量化I類解析の結果から, 被害率を推定した. すなわち, 被害額と必要建設費から直接推定された80橋の被害率 $DR(\%)$ を変換して

$$\text{外的基準 } Y = \begin{cases} \log DR & 0 < DR \leq 10 \\ 0.0362 DR + 0.638 & 10 < DR \leq 100 \end{cases} \quad (3)$$

を定義した. 外的基準として DR を直接使わなかった理由は, 被害率 DR の小さいところでの予測精度を高めるためである. つぎに, 震害報告書等に記載されている情報から, これら80橋の上部工および下部工の被害程度を, それぞれ5段階に分類した(表1). 表1の分類をアイテム, カテゴリーとした数量化解析結果を表2に示す. 表2の重み係数を見ると, 下部工では被害程度2の方が被害程度1より小さな重み係数を示している等, いくつかの不合理な面も現れているが, この解析結果を用いて被害額不明の170余橋の被害率を推定した. たとえば, 上下部工ともに被害程度が5と判断される道路橋の被害率は, 表2と式(3)から

$$2.4473 + 1.3090 = 0.0362 DR + 0.638$$

$$DR = 86.1 (\%)$$

となる.

以上のように推定した被害率から計算された平均被害率 MDR を表3に示す. 宮城県沖地震においては, なんらかの被害があった153橋の他に多数の無被害橋があった. そこで文献(4)等を参考にして, 宮城県内お

* 日本道路公団

** 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

表1 数値化解析に用いた被害程度の分類

被害程度		備考
上	1 被害軽微, 補修不要	(1) 2, 3の差は交通に支障のない程度のは2に入れる.
	2 耐力力の減少に影響のない損傷, 補修を要す.	
	3 耐力力の減少, 局部的破壊, 部分的補強補修により再使用可.	(2) 下部の沈下に伴う上部構造の変状(上部には直接被害のない場合は交通に及ぼす影響の程度により, 1~3までに分類する.
	4 耐力力の減少, 部分的破壊, 部分構造の取替えにより再使用可.	(3) 一橋のうちもっとも被害の大きい個所をもって判定する. たとえば, 一径間でも落橋していた場合は, 5に入れる.
	5 橋全体の破壊(落橋を含む).	(4) 舗装, 沓, アンカーボルトの被害は上部に入れる.
下	1 被害軽微, 補修不要	(1) 橋軸方向のわずかの傾斜は1であるが, 断面の補強を必要とするような傾斜の場合は, 2もしくは3に入れる.
	2 耐力力の減少に影響のない損傷, 補修を要す.	
	3 耐力力の減少, 局部的破壊, 部分的補強により再使用可.	(2) 被害度は上部と同じく最大の被害のものをもってする.
	4 耐力力の減少, 部分的破壊, 部分構造の取替えにより再使用可.	(3) 取付道路のみの被害も一応下部に入れる.
	5 全体的破壊(折損, 破断, 座屈など)再使用不能	

表2 数値化I類の適用結果

被害程度	重み係数	偏相関係数	
上	1	-0.0979	0.698
	2	0.0769	
	3	0.7961	
	4	2.1894	
	5	2.4473	
下	1	0.0000	0.486
	2	-0.1742	
	3	0.3856	
	4	1.0928	
	5	1.3090	

重相関係数 = 0.8735
 予測誤差 = 0.6809

表3 過去の震害例から求めた道路橋の平均被害率

対象地震と地域	平均被害率 MDR(%)	データの出典
福井地震の震度階Ⅵの地域	17.5	(1), (2)
新潟地震の震度階Ⅴの地域	5.5	(3)
宮城県沖地震の宮城県内(震度階Ⅴ)	1.7	(4)
宮城県沖地震の岩手県内(震度階Ⅳ)	0.37	(4)

よび岩手県内の平均被害率を求める際の母数は, それぞれ $n = 436$ および $n = 170$ としてある.

3. 専門家による平均被害率の予測

道路橋の平均被害率は, 橋の強さと地震動の激しさの兼合いで決まる. この問題を極めて単純化し, 道路橋の耐震性は設計水平震度 k で, また地震動の激しさは気象庁震度階で代表されるものとする. ところで, 多数の橋が被害を受けた例の数は少ないので, この関係を過去の震害例の解析だけから求めることは難しい. そこで, 表4の組み合わせに対し, 前に定義した平均被害率 MDR がどの程度と考えられるかを, 橋梁・耐震関係の専門家を対象としたアンケート調査により検討した⁹⁾. アンケートは121名の専門家に送付し, 76名(回答率62.8%)から回答を得た. 質問では, 被害率 DR および平均被害率 MDR の意味を説明するとともに, 新潟地震で震央から100km以内の震度階Ⅴの地域にあった橋長20m以上の道路橋の平均被害率が約5.5%となることを付記しておいた.

アンケート調査から求められた平均被害率 MDR の平均と標準偏差を表5にまとめた. また, アンケートの各変数 $X_1 \sim X_{12}$ (表4参照)の間の相関係数を表6に示す. 表6によれば, いくつかの変数間には極めて高い相関があることがわかり, 設計震度と気象庁震度階の変化にともなって道路橋の被害率が増減するという事に関し, 専門家の考え方が非常に簡単な関係に要約されうることを示している. したがって, 専門家の考え方の流れが, 現在の技術水準における被害予測の1つの基準になりうるものとすれば, 表3に示した実地震による被害率との組み合わせにより, 設計震度と震度階の変化による道路橋平均被害率 MDR の合理的予測が可能である.

なお, アンケートでは, 「一般的な規模の道路橋(1等橋)を耐震的にするために, どの程度の建設費の増加

が許容されると考えるか」という質問に対する回答も求めたが、その結果は平均20.8%の増加を許容する(標準偏差11.8%)と言うものであった⁵⁾。

4. ま と め

前節までの調査結果をまとめれば以下のようなろう。

(1) 地震により比較的広い地域内の道路橋が受ける被害を、全体として定量的に表す指標(平均被害率MDR)が定義できた。

(2) 過去のいくつかの震害例を、この指標で整理したところ、かなり納得できる数値が得られた(表3)。

(3) 専門家に対するアンケートにより、設計水平震度と気象庁震度階の組み合わせによって、道路橋の平均被害率がどのように変化するかを検討した。

(4) アンケートから得られた予測結果(表5)は、震害例から求めた値とかなり良い対応を示しており、このアンケート結果がある種の解析に有用な資料となることがわかった。

表4 設計水平震度と気象庁震度階の組み合わせ

k \ 震度階	IV	V	VI	VII
0.10	X_1	X_2	X_3	X_4
0.20	X_5	X_6	X_7	X_8
0.30	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}

表5 専門家へのアンケート調査から得られた道路橋の平均被害率(上段 平均値; 下段 標準偏差)。

設計水平震度 \ 気象庁震度階	IV	V	VI	VII
0.10	1.8 (2.2)	8.0 (10.0)	18.6 (16.3)	37.3 (25.4)
0.20	0.6 (1.0)	3.6 (3.6)	9.5 (10.3)	21.6 (18.2)
0.30	0.2 (0.5)	1.3 (1.5)	4.6 (5.3)	12.3 (12.3)

表6 変数 $X_1 \sim X_{12}$ の相関係数

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
X_1	1.000	0.498	0.501	0.473	0.819	0.597	0.435	0.448	0.632	0.603	0.447	0.372
X_2		1.000	0.880	0.590	0.307	0.848	0.946	0.703	0.199	0.551	0.916	0.734
X_3			1.000	0.815	0.304	0.748	0.894	0.828	0.211	0.533	0.801	0.745
X_4				1.000	0.323	0.551	0.644	0.902	0.246	0.473	0.593	0.735
X_5					1.000	0.497	0.288	0.318	0.843	0.702	0.344	0.311
X_6						1.000	0.828	0.660	0.304	0.739	0.810	0.720
X_7							1.000	0.782	0.207	0.562	0.925	0.818
X_8								1.000	0.272	0.518	0.746	0.919
X_9									1.000	0.541	0.294	0.283
X_{10}										1.000	0.652	0.582
X_{11}											1.000	0.804
X_{12}												1.000

本論文は猪熊の修士論文の一部をまとめたものであり、データの詳細は文献(5)を参照されたい。最後になったが、アンケート調査に御協力いただいた多くの方々に深甚なる謝意を表す。

(1980年4月1日受理)

参 考 文 献

1) 建設省土木研究所報告, 第78号, 北陸震災調査報告.

2) 建設省土木研究所資料, 第256号, 南海地震および福井地震による橋梁基礎被害残存調査資料.
 3) 建設省土木研究所報告, 第125号, 新潟地震調査報告.
 4) 建設省土木研究所資料, 第1422号, 1978年6月宮城県沖地震被害調査概報.
 5) 猪熊康夫, 「道路橋の設計水平震度の選択に関する決定分析」, 東京大学大学院昭和54年度修士論文.