

道路橋の地震被害率関数の一作成法

山村 猛1・三神 厚2・辻原 治3・澤田 勉4

 ¹徳島大学大学院 先端技術科学教育部(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1) E-mail: yamamura@ce.tokushima-u.ac.jp
 ²徳島大学大学院准教授 ソシオテクノサイエンス研究部(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1) E-mail: amikami@ce.tokushima-u.ac.jp
 ³和歌山工業高専准教授 環境都市工学科(〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77) E-mail: tsujihara@wakayama-nct.ac.jp
 ⁴徳島大学大学院教授 ソシオテクノサイエンス研究部(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1) E-mail: sawada@ce.tokushima-u.ac.jp

本研究は,各種構造物の地震被害予測に用いる被害率関数の一作成法を提案し,その妥当性を検討した ものである.木造住宅や道路橋等の被害率関数を構築する際には,被害地域に存在する対象構造物の全数 を調査するか,推定することが必要である.しかし,この全数調査には多大の労力と時間が必要である. 本研究では,被害地域に存在する道路橋の被害データのみを用いて被害率曲線を作成する方法を開発した. 具体的には,被害率曲線を規定する2つのパラメータ以外に,被害地域に存在する全橋梁数も未知のパラ メータとし,それらを最適化手法を用いて推定することにより,被害率関数を作成する.

Key Words : Fragility function, Seismic damage of highway bridges, Database of damage degrees of bridges

1.はじめに

地震による道路橋の被害は,短期的には救急活動や復 旧活動に,また中長期的には地域経済や国民生活に大き な影響を及ぼす.1995年の兵庫県南部地震以降,全国の 自治体では重要な道路橋に対して耐震補強等の対策がと られ,それらについては概ね耐震性が確保されている. しかし,これらの対象となる道路橋はほんの一握りであ り,その他多くの橋梁については有効な対策がとられて いないのが現状である.

近年,震災対策のもととなる各種構造物の被害予測が 行われてきた.木造住宅やRC建物といった建築分野の 地震被害予測では,一般に被害率関数(または被害率曲 線)がよく用いられる.これは,被害率を地震動強度 (最大加速度,最大速度,震度等)の関数として表し, 横軸に地震動強度を,縦軸に被害率をとり図示したもの である^{たとえば(),2)}.

一方,土木分野での道路橋の被害予測では,震度と建設年代をパラメータとする粗い推定方法が用いられている^{3,4,5}.これに対し,道路橋の地震被害の推定精度を向上させる試みもいくつかなされており,その中でも山

崎らは[®], 兵庫県南部地震の際に被害をうけた高速道路 橋を対象として地震動強度と被害程度の関係を調べ, 被 害率関数を構築した.また,筆者らは[®], 地震被害報告 書をもとに道路橋の被害調査を行い, 被害状況を損傷度 として定量化するとともに,数量化 類を用いた地震被 害予測方法を提案した.しかし,山崎らの研究では対象 が高速道路橋に限定されており一般性に欠けること,ま た,筆者らの研究は手法が繁雑であり実用性に欠けると いった欠点がある.

上述したように,道路橋の被害率関数は山崎らの研究 以外には見あたらないが,一般道路橋の被害率関数を構 築することは,今後の道路橋の地震被害予測や防災計画 の策定に有用であると言える.

各種構造物の被害率関数を構築する際には,以下のような問題がある.その1つは,構造物が被害をうけた地域(以下被害地域と呼ぶ)をどのように定義するかである.その方法としては,地震動強度がある値以上(たとえば,最大速度が20cm/s以上)の地域とすること,構造物に軽微な被害以上の被害が発生した地域とすること, また特定の市全域を対象とすることなどが考えられる. 家屋の地震被害率関数の研究では,特定の市全域を被害

No.	地震名	発生年月日	М
1	南海地震	1946.12.21	8.0
2	福井地震	1948.6.28	7.1
3	新潟地震	1964.6.16	7.5
4	十勝沖地震	1968.5.16	7.9
5	宮城県沖地震	1978.6.12	7.4
6	日本海中部地震	1983.5.26	7.7
7	釧路沖地震	1993.1.15	7.8
8	北海道南西沖地震	1993.7.12	7.8
9	北海道東方沖地震	1994.10.9	8.1
10	三陸はるか沖地震	1994.12.28	7.5
11	兵庫県南部地震	1995. 1.17	7.2
12	鹿児島県北西部地震	1997. 3.26	6.3
13	鳥取県西部地震	2000.10.6	7.3
14	芸予地震	2001.3.24	6.4
15	宮城県北部地震	2003.7.26	6.2
16	十勝沖地震	2003.9.26	8.0

表-1 調查対象地震

地域とすることが多い^{1),2}.2つ目の問題点は,被害地 域に存在する構造物の全数を推定しなければならないこ とである.そのためには,無被害データを含む全構造物 の数を調査するか,またはそれに準じる方法(住宅の場 合には固定資産税台帳や地域メッシュ統計の利用¹⁾)を 用いて全構造物数を推定することが必要となる(以下, 全数調査と呼ぶ).しかし,被害地域に存在する構造物 の全数調査を行うには,多大な時間と労力が必要となる. また,前述の被害地域の定義により対象地域の大きさが 変わるとその地域に存在する構造物の全数が変わるので, 被害率関数が異なるものになるという問題点が生じる. このように,被害地域に存在する構造物の全数を推定す ることはそれ程容易なことではない.

本研究は,地震被害をうけた道路橋のデータのみを用 いて,被害地域に存在する全橋梁数を推定することによ リ,道路橋の地震被害率関数を構築する一手法を提案し たものである.道路橋の被害データとしては,過去の地 震による被害報告書から得られるデータを用いる⁷.提 案手法では,被害率関数を規定する2つのパラメータ以 外に,被害地域における無被害データを含む全橋梁数を 最適化手法により推定するので,全数調査は不要となる.

2.道路橋の被害データについて

表-1に示す16地震についての被害報告書を用いて,道路橋の地震被害を調査し,それらをデータベース化した.



図-1 被害橋梁の頻度分布

このデータベースは,筆者らによる既往の研究⁷⁰のデータに最近の地震被害データ⁸⁾⁻¹³を追加したものである. このデータベースでは,道路橋の構造特性として適用示 方書,スパン,幅員,上部工形式,支承形式,橋脚形式 等を,また,地震動パラメータとして地震タイプ,マグ ニチュード,断層距離,地盤種別等を考慮した.

道路橋の地震被害の程度は,日本道路協会発行の「道路震災対策便覧(震災復旧編)」⁴⁹に記載された損傷度により表した.この便覧では,道路橋の耐荷力に関する損傷度を以下のような5ランクに分類している.

- As(5): 落橋・倒壊...落橋・倒壊した場合(取り 替え).
- A (4):大被害...耐荷力の低下に著しい影響の ある損傷を生じており,落橋等致命的 な被害の可能性がある場合(取り替 え).
- B(3):中被害...耐荷力の低下に影響のある損 傷であるが,余震,活荷重等による被 害の進行がなければ,当面の利用が可 能な場合(補強).
- C (2): 小被害...短期間には耐荷力の低下に影響のない場合(補修).
- D(1): 被害なし...耐荷力に関して特に異常が 認められない場合.

本研究では,上述のランクAs~Dの代わりに()内に 示す5~1を用いて損傷度を表すこととした.損傷度は, 上部工,支承,橋脚の3つの部位ごとに評価し,そのう ちの最大のものを道路橋の総合的な損傷度とした.次章 以下の解析では,損傷度1(D)のデータは除去し,損傷度 2(C)以上のデータを用いる.図-1は,データベースに含 まれる損傷度2以上のデータの頻度分布を示したもので ある.図より,被害橋梁数は損傷度が小さい場合に多く, 損傷度が大きくなると少なくなることがわかる.

ところで,被害地域に存在する全橋梁数は地震が発生 した年代により大きく変化し,時代と共に増加する傾向



図-2 被害橋梁の累積数

にある.そこで,本研究では,被害橋梁数の年代による 変化を考慮するため,道路統計年表¹⁵により補正を行っ た.具体的には,道路統計年表に記載されている全国の 橋梁数で重み付けをして,被害橋梁数の年代補正を行った.

3.地震動強度について

構造物の損傷に関係する地震動強さの指標には,最大加速度,最大速度,震度,応答加速度,SI値などが利用 される.本研究では既往の研究との比較を行うため,構 造物被害と密接な関係を持つといわれ,被害率曲線のパ ラメータとして頻繁に用いられている最大速度を用いる こととした¹⁾.地震被害をうけた道路橋建設地点での最 大速度は,司・翠川が提案した距離減衰式¹⁰を用いて推 定した.地震動の地表面最大速度vは次式から算出され る.

$$v = rv_h \tag{1}$$

ここで,v=地表面最大速度(cm/s), $v_b=$ 工学的基盤に おける最大速度(cm/s),r=表層地盤の増幅率である. 基盤最大速度 v_b は地震マグニチュード M_w ,断層面から の最短距離R(km)の関数として次式より求められる.

$$\log v_b = b - \log(R + c) + kR \tag{2}$$

上式に含まれる係数 c, k は次のように与えられる.

$$c = 0.0028 \times 10^{0.5M_{w}} \tag{3}$$

$$k = 0.002$$
 (4)

また,係数bは,断層タイプにより次式のようになる.

内陸地震: $b = 0.58M_w + 0.0038D - 1.29$ プレート間地震: $b = 0.58M_w + 0.0038D - 1.31$ プレート内地震: $b = 0.58M_w + 0.0038D - 1.17$ (5)

ここで, D=震源深さ(km)である.

表層地盤の増幅率 r は , 表層より30mまでの平均 S 波 速度 AVS₃₀ を用いて次式より算出される .

$$\log r = 1.83 - 0.66 \log AVS_{30} \tag{6}$$

本研究では,地盤条件を道路橋示方書・同解説 耐震 設計編¹⁷の地盤種別で表すため,式(6)を用いて増幅率 *r* を求める際に,各地盤種別に対する*AVS*₃₀を地盤卓越周 期 *T*_gをもとに次のように仮定した.

種地盤:
$$T_g = \sim 0.2 \sec, AVS_{30} = 600(m/s)$$

種地盤: $T_g = 0.2 \sim 0.6 \sec, AVS_{30} = 200 \sim 600(m/s)$
種地盤: $T_g = 0.6 \sim 1.2 \sec, AVS_{30} = 100 \sim 200(m/s)$ }(7)

式(6),(7)より,各地盤種別に対する平均増幅率rが次のように求められる.

種地盤:
$$r = 1.0$$

種地盤: $r = 1.5$ (8)
種地盤: $r = 2.6$

以上の式および増幅率を用いると,式(1)より地表面最 大速度vの推定値が得られる.

4. 道路橋の被害率関数の作成

(1) 被害率関数の作成方法

3.で述べた方法により被害橋梁建設地点の最大速度 を求め,それに対する被害橋梁の累積数をプロットする と図-2のような図が得られる.図の横軸は地表面最大速 度,縦軸は被害橋梁の累積数である.ただし,図中の4 種類のプロットは,上から損傷度2以上,3以上,4以上 および5に対応する.被害地域に存在する全橋梁数 N が 全数調査等により推定されれば,図-2の縦軸をNで除す ことにより,被害率関数の実測値が得られる.しかし, 一般には被害地域に存在する無被害データを含む全橋梁 数 N は一部を除き殆ど調査されないので,これを何ら かの方法で推定することが必要となる.以下では,被害 率関数の形を対数正規分布^{1,2,0}と仮定し,被害データ のみを用いて被害率関数を推定する方法について述べる. 地表面最大速度がvのとき,道路橋が損傷度2以上の

被害をうける確率 $\widetilde{F}(
u;\lambda_2,\zeta_2)$ は次式で表される.

表-2 損傷度レベルごとの平均値と標準偏差

損傷度	平均値()	標準偏差())
2以上	1.834	0.415
3以上	2.115	0.426
4以上	2.433	0.444
5	2.899	0.529

(N=547)



図-3 各損傷度以上の被害率の実測値と推定値

 $\widetilde{F}(v;\lambda_2:\zeta_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_2}} \int_{-\infty}^{\log v} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log v - \lambda_2}{\zeta_2}\right)^2\right\} d(\log v)$ (9)

ここで, λ_2 , ζ_2 は損傷度が2以上の場合の $\log v$ の平均値および標準偏差である.

$$\lambda_2 = E[\log v] \tag{10}$$

$$\zeta_2^2 = E\left[\left(\log v\right)^2\right] - \lambda_2^2 \tag{11}$$

いま,被害地域に存在する無被害データを含む全橋梁数 をN,損傷度2以上の被害をうける橋梁数を N_2 とする と,地表面最大速度が $v = v_j$, $j = 1 \sim N_2$ のときの被害 橋梁累積数の推定値 $\tilde{n}(v_j; N, \lambda_2, \zeta_2)$ は次式で与えられ る.

$$\widetilde{n}_2(v_i; N, \lambda_2, \zeta_2) = N\widetilde{F}(v_i; \lambda_2, \zeta_2)$$
(12)

他方,前述の被害データベースと地表面最大速度 v_j を用いると, v_j に対する損傷度2以上の被害橋梁の累積数の実測値 $n_2(v_j)$ が図-2のように得られる.式(12)に含まれる未知パラメータN, λ_2 , ζ_2 は,被害橋梁の累積数の推定値 $\tilde{n}_2(v_j; N, \lambda_2, \zeta_2)$ と実測値 $n_2(v_j)$ との残差平方和を最小とする評価基準により決定される.

$$S_e(N,\lambda_2,\zeta_2) = \sum_{j=1}^{N_2} \left[\widetilde{n}_2(v_j;N,\lambda_2,\zeta_2) - n_2(v_j) \right]^2 \to \min \quad (13)$$

以上により,損傷度2以上に対する被害率関数 $\tilde{F}(v; \lambda_2, \zeta_2)$ と被害地域に存在する全橋梁数Nの推定値 が得られる.損傷度3以上に対する被害率関数 $\tilde{F}(v; \lambda_i, \zeta_i)$,i = 3,4,5は,全橋梁数Nを上で得られた 推定値に固定し,式(13)の最小化問題を解き, $\lambda_i, \zeta_i, i = 3,4,5$ を求めることにより得られる.式(13)の 最小化問題の解析にはMSLP法(改良反復線形計画法) ¹⁸を用いた.

(2) 数値計算および考察

前述の被害橋梁データベースに含まれる損傷度2以上 の被害データを用いて解析を行い、道路橋の被害率関 数を求めた.式(13)の最小化問題を解くことにより, 損傷度2以上,3以上,4以上および5の被害率関数に対 **する**log v の平均値(_i) および標準偏差(_i) が表-2のように得られた.図-3は,表-2の平均値 および 標準偏差 。を用いて求めた被害率関数をプロットした ものである.図の横軸は地表面最大速度、縦軸は被害率 である.図中には,被害橋梁データベースより得られ た被害率の実測値も示している.この実測値は図-2の 被害橋梁の累積数を全橋梁数N(推定値)で除したも のである.また,図中の4つの曲線は,損傷度2以上,3 以上,4以上および5に対応する.図より,被害率関数 の推定値は実測値とよく対応することがわかる.この ことにより,本研究で作成した被害関数の妥当性が検 証できたと考える.

次に,提案手法による被害率関数と既往の研究のそれらを比較する.比較対象としては,中央防災会議支援マニュアル⁵⁰,山崎らによる高速道路橋の被害率関数⁰⁰,岡田らによる木造軸組工法建物の被害率関数²⁰を用いた.

中央防災会議の被害想定支援マニュアル⁵⁾では最大 速度による橋梁被害率が示されている.これは,兵庫 県南部地震で被災した道路橋が立地する地域の全橋調 査結果より算出されており,最大速度が 60cm/s 以上, 損傷度 4 以上の道路橋被害率は 0.075,損傷度 5 では 0.024 と報告されている.本研究の被害率曲線では,最 大速度 60cm/s の損傷度 4 以上の被害率は 0.070,損傷度 5 で 0.012,最大速度 120cm/s の損傷度 4 以上の被害率 は 0.21,損傷度 5 で 0.060 となり,若干被害率が大きく 評価されているが,これらは中央防災会議のそれと比 較的よく対応しているといえる.



図-4 山崎らによる被害率関数 ⁶⁾との比較



図-5 岡田らによる被害率関数²との比較

図-4 は,本研究より得られた被害率関数と山崎らの それを比較したものである.図より,山崎らの被害率 関数は最大速度が大きい場合に本研究のそれより大き く評価されることがわかる.これは,山崎らの被害率 関数が対象橋梁を高速道路橋のみに限定していること から差異が生じたものと考えられる.

図-5 は,本研究より得られた被害率関数と岡田らの それを比較したものである.図中の4つの点線は木造 建物の被害程度を表しており,D2が一部破損,D3が 半壊,D4が全壊,D5が倒壊または崩壊を示す.岡田 らの被害率関数は木造軸組工法建物に対するものであ るが,損傷度D2~D5が本研究の損傷度2以上,3以上, 4以上および5のそれぞれに対応し,本研究結果に近 い傾向を示している.ただし,岡田らによる木造軸組 工法建物の被害率は本研究の道路橋の被害率より若干 大きく評価されている. 5.おわりに

本稿では,道路橋の被害率関数の一作成法を提案し, その妥当性を検討した.本研究の内容を要約すると, 以下のようになる.

- (1) 被害率関数を規定する2つのパラメータに加え,被 害地域に存在する全橋梁数も未知パラメータと仮 定して,それらを被害データのみを用いて推定す る方法を提案した.そして,提案されたパラメー タを用いて被害率関数を作成し実測値と比較した 結果,よく対応し妥当な結果が得られた.提案手 法は被害地域における全橋調査を必要としないた め,簡便かつ実用的な方法である.
- (2)本手法による被害率関数を既往の研究のそれと比較した結果,提案した道路橋の被害率関数は,中央防災会議⁵⁰で示された全数調査から得た被害率と比較的よく対応をした.また,木造軸組工法建物のそれに類似する傾向となった.

本研究では,道路橋の構造特性たとえば,適用示方 書,上部工形式,支承,下部工形式と被害率の関係を 検討するには至らなかった.これについては,今後の 課題としたい.

参考文献

- 長谷川浩一,翠川三郎,松岡昌志:地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測、日本建築学会構造系論文集、第505号,pp.53-59,1998.
- 2) 岡田成幸,高井伸雄:地震被害調査のための建物分類と破壊 パターン、日本建築学会構造系論文集、第524号, pp.65-72, 1999.
- 3) 奈良県:第2次奈良県地震被害想定調査報告書, 2005.
- 4) 静岡県:第3次地震被害想定の概要, 2005.
- 5) 中央防災会議: 被害想定支援マニュアル, 2001.
- 6)山崎文雄,大西淳一,田山聡,高野辰雄:高速道路構造物に 対する地震被害推定式の提案,第10回日本地震工学シンポジ ウム論文集,pp.3491-3496,1998.
- 7)山村猛,澤田勉,中内優子,三神厚:数量化 類を用いた既 設道路橋の地震被害予測手法について、地域安全学会論文集, No.7, pp.255-262, 2005.
- 8) 鹿児島大学:1997年鹿児島県北西部地震の総合的調査研究報 告書,1998.
- (株飛島建設:1997.5.13鹿児島県北西部地震被害調査報告書, 1997.
- 10) (株飛島建設: 2000.10.6鳥取県西部地震被害調査報告書, 2000.
- 11) 土木学会: 2001.3.24芸予地震被害調查報告, 2001.

- 12) 土木学会: 2003.7.26に発生した宮城県北部地震被害調査報告, 2004.
- 13) (株飛島建設: 2003年十勝沖地震被害調査報告書, 2004.
- 14) 日本道路協会:道路震災対策便覧(震災復旧編),2002.
- 15) 全国道路利用者会議:道路統計年表2006年版,国土交通省道路局企画課監修,2006.
- 16) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプおよび地盤条件を考慮した 最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論 文集, 第523号, pp.63-70, 1999.
- 17) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 耐震設計編,丸善(株),2002.
- 18) 辻原治・澤田勉・平尾潔:地震時地盤同定問題に適用する 非線形最適化手法の比較,土木学会論文集, No.489/I-27, pp.277-280, 1994.

(2007.4.6 受付)

A PROPOSAL OF THE METHOD FOR PRODUCING SEISMIC FRAGILITY FUNCTION OF HIGHWAY BRIDGES

Takeshi YAMAMURA, Atsushi MIKAMI, Osamu TSUJIHARA and Tsutomu SAWADA

This study proposes a method for producing the seismic fragility function of highway bridges and examines its applicability by comparing the method with previous study. In the first stage, the database of seismic damage of highway bridges is constructed, which consists of damage degrees, structural types of bridges, seismic parameters, etc. In the second stage, a method for producing seismic fragility function is developed, in which the average and standard deviation of the fragility function as well as the total number of bridges in the damage areas are also estimated. The fragility function of highway bridges is produced in numerical example and its validity is examined by comparing with the observed values of damage degrees.