

# 道路橋の設計水平震度の選択に関する1つの考え方

A Method for Selecting Design Horizontal Seismic Coefficient of Highway Bridges

猪熊康夫\*・片山恒雄\*\*・久保慶三郎\*\*  
Yasuo INOKUMA, Tsuneo KATAYAMA and Keizaburo KUBO

## 1. 考 え 方

気象庁震度階が  $IL$  の地域にある道路橋が設計水平震度  $k$  で設計されているとき、その平均被害率<sup>1)</sup>を  $MDR(IL, k)$  とする。道路橋の地震被害は震度階 IV 以上で発生するものとし、ある地域における震度階 IV ~ VII の地震動の発生は互いに独立なポアソン過程と考え、それぞれの年平均発生率を  $SR(IL)$  とする。このとき、それぞれの道路橋の期待年被害率  $EALR(k)$  は

$$EALR(k) = \sum_{IL=IV}^{VII} MDR(IL, k) \times SR(IL) \quad (1)$$

となる。

道路橋は一般に比較的長い耐用年数を持っているので、この長期間にわたる被害率の期待値は、その期間内の期待年被害率の和で表し、形式的に

$$EDR(k) = \delta \cdot EALR(k) \quad (2)$$

ここに

$\delta$  = 定数

と書いておく。

設計水平震度  $k$  で道路橋を設計したことによる建設費の増加率を  $ICPR(k)$  とし、この増加率は設計水平震度  $k$  の線形関数と仮定する<sup>2)</sup>。ここでは、増加率は  $k = 0.10$  の設計に対する増加率と定義し

$$ICPR(k) = d(k - 0.10) \quad (3)$$

ここに

$d$  = 定数

とする。

いま、建設費増加率と地震による被害率との線形和を、ある設計水平震度を採用する当否の評価基準と考える。すなわち

$$TLR(k) = \alpha \cdot ICPR(k) + \frac{1}{100} \cdot \frac{EDR(k)}{(1 + ICPR(k))} \quad (4)$$

\* 日本道路公団

\*\* 東京大学生産技術研究所 第5部

$$= \alpha \cdot ICPR(k) + \frac{\delta}{100} \times (1 + ICPR(k)) EALR(k) \quad (4)$$

ここに

$\alpha$  = 直接的被害率に対する建設費増加率の重み係数

とし、この総損失率を最小とする設計水平震度を求める。

## 2. 実 際 の 手 順

設計水平震度と気象庁震度階の組み合わせに対する平均被害率  $MDR(IL, k)$  は、実地震の被害調査および専門家へのアンケートの両結果<sup>1)</sup>を参考にして与えた。まず、宮城県沖地震による宮城県下および岩手県下の平均被害率 1.7% および 0.37% が、設計震度  $k = 0.20$  における震度階 V および IV 地域の平均被害率を与えていると仮定した。新潟地震の被害率には液状化等の特殊な条件の影響が強いものと考え、代表的な値ではないと判断した。これら2つの値を出発点とし、アンケート調査による相関係数の高い変数間を表1のように順次推定した。推定の各段階で条件付標準偏差を用いて、予測の中央値のみならず、大きめの予測値と小さめの予測値を与えた。中央値  $X_i$  が与えられているときに、中央値  $X_j$  を求めるには

$$X_j = A + BX_i \quad (5)$$

ここに

$$B = \rho_{ij} \frac{\sigma_{Xj}}{\sigma_{Xi}} \quad A = \bar{X}_j - B\bar{X}_i \quad (6)$$

を使えばよい。また、ここで言う大きめ、小さめの予測値は

表1 実被害資料とアンケート調査結果に基づいた平均被害率推定の流れ

		気象庁震度階 IL			
		IV	V	VI	VII
設計水平震度 k	0.10	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
	0.20	0.37	1.70	$X_7$	$X_8$
	0.30	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$

$$X_j \pm \sqrt{\text{Var}(X_j | \bar{X}_i)}$$

$$= X_j \pm \sqrt{\frac{n-1}{n-2} \sigma^2_{x_j} (1 - \rho^2_{ij})} \quad (7)$$

により求められた値を指し、 $n$ としてはアンケートの有効回答数70を用いた。式(6)の $\bar{X}_i$ 、 $\sigma_{x_i}$ などは文献(1)の表5に示されており、式(6)、(7)の $\rho_{ij}$ は同じく文献(1)の表6に示されている。以上により求められた平均被害率MDRの大きめ、中央値および小さめの推定値を表2に示す。

震度階ILの地震の年平均発生率SR(IL)は以下のように求めた。マグニチュードMの地震発生に伴い震度階がIV、V、VI以上となる地域は、震央を中心に半径(km)がそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \log R_{IV} &= 0.41M - 0.75 \\ \log R_V &= 0.50M - 1.85 \\ \log R_{VI} &= 0.68M - 3.58 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

の円の内側であるとした<sup>3,4)</sup>。日本の有史以来の地震データを整理した資料<sup>5)</sup>から、式(8)により注目地点で震度階IV、V、VIとなる地震の個数を求める。この際、震度階IVに関しては1926年以降、Vに関しては1885年以降、VIに関しては1601年以降の $M \geq 6.1$ の地震をそれぞれ対象とした。期間の長さの相違を考慮した上で、震度階ILの地震動変換回数 $N(IL)$ につき、

$$\log N(IL) = a - b \cdot IL \quad (9)$$

の形の回帰分析を実施した。震度階VIIの地震動の回数は回帰分析の結果から求め、ベイズ流の考え方<sup>6)</sup>を加味して、注目地点における最終的なSR(IL)を推定した。式(2)の定数 $\delta$ は、耐用年数T年間における道路橋の価値の割引率を $\beta$ とすれば、次のように考えることができる。

$$EDR(k) = \left[ \sum_{i=1}^T (1-\beta)^{i-1} \right] \times EALR(k)$$

$$= \frac{1-(1-\beta)^T}{\beta} \cdot EALR(k)$$

$$\delta = \frac{1-(1-\beta)^T}{\beta} \quad (10)$$

国富統計<sup>9)</sup>の割引率にならい、道路橋の耐用年数を50年とし、耐用年数経過後の残存価値を10%とすれば、 $\beta = 0.045$ 、 $\delta = 20.0$ となる。

道路橋の建設費が設計水平震度の大小でどの程度増減するかの推定は難しい。設計震度の変化により影響を受けるのは主として下部工・基礎工であるが、これらは架設地点の地盤条件や上部工の型式により大きく変化するので、一般的な結論は出しにくい。極めて単純化した試算例の結果<sup>7)</sup>によれば、 $k = 0.10$ のときの建設費に対する $k = 0.20$ および $k = 0.30$ のときの建設費の増加率は

表2 平均被害率MDR(%)の予測

		気象庁震度階IL				
		IV	V	VI	VII	
設計水平震度k	0.10	大きめ	2.56	8.87	19.80	41.36
		中央値	1.31	3.58	12.52	30.37
		小さめ	0.06	0.00	5.24	19.38
	0.20	大きめ	0.89	3.59	8.47	26.23
		中央値	0.37	1.70	5.14	16.01
		小さめ	0.00	0.00	1.81	5.79
	0.30	大きめ	0.41	1.74	4.58	13.67
		中央値	0.11	0.74	2.55	8.83
		小さめ	0.00	0.00	0.52	3.99

7.2%および14.9%であった。建設省制定土木構造物標準設計では、数種の橋台について、設計水平震度が0.14から0.20の範囲で標準設計を与えている。標準設計は支承条件、橋台高さ、死荷重反力等により異なる上、直接には橋台1基あたりの積算しかできないので、そのままでは資料として使えない。しかし、いくつかの仮定のもとで簡単な検討を行ったところ、上記試算例から得られた値はそれほどおかしくないものと判断された。

### 3. 東京に注目した試算結果

前節に述べた方法により、東京における震度階ILの地震動の年平均発生率を求めると

$$SR(IV) = 0.4563$$

$$SR(V) = 0.0662$$

$$SR(VI) = 0.0116$$

$$SR(VII) = 0.0039$$

となった。これらの値と表2の平均被害率とから、式(1)により求めた期待年被害率を図1に示す。さらに、

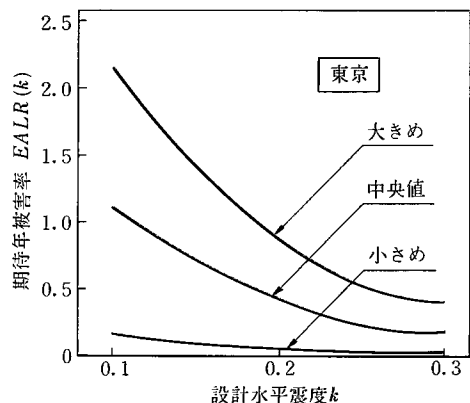


図1 東京における期待年被害率

研究速報

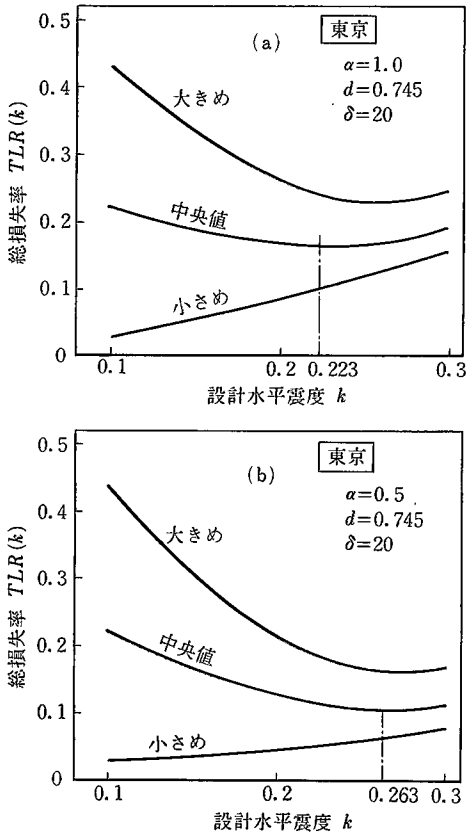


図2 東京における総損失率の試算例

前節の考えにより  $\delta = 20.0$ ,  $d = 0.745$  を仮定し、式(4)の  $\alpha$  を 1.0 および 0.5 としたときの総損失率の計算結果を図2 (a), (b) に示す。  $\alpha = 1.0$  は、建設費増加率  $ICPR$  と期待被害率  $EDR$  の重みを同じと見た場合にあたり、  $\alpha = 0.5$  は  $ICPR$  の重みを  $EDR$  の重みの  $1/2$  とした場合にあたる。平均被害率  $MDR$  を大きめに考えるか、小さめに考えるかで総損失率は大きな幅を示すが、いま一応中央値で判断すると、総損失率を最小とする設計水平震度は、  $\alpha = 1.0$  のときに 0.22,  $\alpha = 0.5$  のときに 0.26 となっている。

4. あとがき

耐震設計に伴う経済的側面から道路橋の設計外力を検討した例は従来ほとんど見られない。これは、道路橋のように1つ1つが個性の強い構造物に対し、単なるパラメータ解析としての一般論があまり意味を持たないことが一因であろう。本報文では、地震による道路橋そのものの直接被害に注目して、初期投資とのバランスの中で設計水平震度を選択するための決定分析の1つの手法を示した。必要な基本データの整理を含めて、筆者らなりにいくつかの工夫を示したが、まだ不完全なところも多く、論理的に厳密さを欠くところもある。用いたパラメータ値に問題なしとは言えないが、東京近辺では  $k = 0.22 \sim 0.26$  程度が1つの最適解になっているらしいこと等は、かなり興味深い。道路橋に限らず、ここで扱った種類の検討は、耐震に対する投資の妥当性を評価するために有用と思われる。

(1980年4月1日受理)

参考文献

- 1) 猪熊康夫, 片山恒雄, 久保慶三郎: 「道路橋の地震被害率に関する基礎的研究」, 生産研究, Vol. 32, No. 7, 1980.
- 2) Grandori, G. and D. Beneditti: "On the Choice of the Acceptable Seismic Risk, A New Approach", 5 WCEE, Rome, 1974.
- 3) 勝又 護, 徳永規一: 「震度IVの範囲と地震の規模および震度と加速度の対応」, 験震時報, Vol. 36, Nos. 3, 4, 1971.
- 4) 村松郁栄: 「震度分布と地震のマグニチュードとの関係」, 岐阜大学教育学部研究報告, 自然科学, No. 4, 1969.
- 5) Katayama, T.: "Engineering Prediction of Acceleration Response Spectra and Its Application to Seismic Risk Analysis", 第5回日本地震工学シンポジウム(1978)講演集.
- 6) 経済企画庁, 昭和45年国富調査
- 7) 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.