

# (63) 道路橋の最適設計水平震度選択に関する検討

中央大学大学院 学生員 ○野中 昌明  
 日本道路公団 正員 猪熊 康夫  
 東京大学生産技術研究所 正員 片山 恒雄

## 1. はじめに

一般に、橋梁をはじめ各種土木構造物は他の工学分野の構造物とくらべて耐用期間が長く、巨額の建設費用を必要とする。従って、耐震にどの程度の費用をかけるべきかという投資効率が現実的に重要な問題となる。本報告では、『平均的な洪積地盤に建設される道路橋にどの程度の耐震性を与えれば、経済的かつ合理的な地震防災ができるか』という問題を考えた。まず、過去のいくつかの道路橋震害を経済的な側面から眺め、これにアンケートによって得られた耐震に対する専門家の考え方を勘案して最適な設計水平震度の見直しを試みた。定量的データが不足しているため解析結果の解釈は慎重に行わなければならないが、地震被害を考慮した道路橋の費用・便益分析を行うことにより、設計水平震度のもつ意味をより現実的に捉えようとする考え方は、将来の地震工学の重要な課題となろう。

## 2. 過去の道路橋震害から求めた平均被害率の算出方法と結果

地震による道路橋の直接被害額をCd(被害を受けた部分の復旧費用)被害時点ですべてに建設するのに要する費用をCrとすると、この道路橋の被害率DRを次のように定義する。

$$DR = \frac{Cd}{Cr} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

無被害ならばDR=0(%), 完全に破壊され再建が必要ならばDR=100(% )となる。

地震動の強さがほぼ一定と考えられる地域にある全橋梁の被害率の平均値MDRを平均被害率と名づけ、次のように定義する。

$$MDR = \frac{1}{n} \sum DR_i \quad (\%) \quad (2)$$

ここに、DR<sub>i</sub>は着目地域のi番目の道路橋の被害率、nは当該地域内の道路橋全数である。この平均被害率は、着目地域内にある道路橋の被害率の期待値と考えることができる。

平均被害率の算定はTable 1に示す5つの地域の約320橋を対象に行った。この中で、地震による被害額が示されているのは79橋にすぎず、これらの被害率は(1)式で算定した。次に、これら79橋の被害率DRを(3)式で変換し、震害報告書に記載されている被害状況から、上・下部工別をアイテム、5段階に分類した被害程度をカテゴリーとして数量化I類の解析を行った(Table 2)。

$$\text{外的基準 } Y = \begin{cases} \log DR & (0 < DR \leq 10) \\ 0.0434 DR + 0.566 & (10 < DR \leq 100) \end{cases} \quad (3)$$

下部工では被害程度2の方が被害程度1より小さな重みを示す

Table 1 Mean Damage Rates(%) Obtained from Past Earthquake Data

| Earthquake (Area)             | MDR (%) |
|-------------------------------|---------|
| Fukui (Intensity VII)         | 17.3    |
| Niigata (Intensity V)         | 5.71    |
| Miyagi-ken-oki (Intensity V)  | 1.62    |
| Miyagi-ken-oki (Intensity IV) | 0.352   |
| San Fernando (Intensity VI)   | 10.5    |

Table 2 Classification of Damage and Results of Statistical Analysis

| Item            | Damage Level (Category) | Descriptions   | Category Value |
|-----------------|-------------------------|--|----------------|
| Super-Structure | 1                       | Negligible damage. Repair not required.  | -0.0176        |
|                 | 2                       | Damage that does not cause decrease in load-carrying capacity.                                     | 0.1333         |
|                 | 3                       | Local failure that causes slight decrease in load-carrying capacity. Partial strengthening needed. | 0.8752         |
|                 | 4                       | Partial failure that causes decrease in load-carrying capacity. Partial replacement needed.        | 2.3997         |
|                 | 5                       | Overall failure including collapse.  | 2.4552         |
| Sub-Structure   | 1                       | Negligible damage. Repair not required.  | 0.0            |
|                 | 2                       | Damage that does not cause decrease in load-carrying capacity. Repair needed.                      | -0.2553        |
|                 | 3                       | Local failure that causes slight decrease in load-carrying capacity. Partial strengthening needed. | 0.2603         |
|                 | 4                       | Partial failure that causes decrease in load-carrying capacity. Partial replacements needed.       | 1.2633         |
|                 | 5                       | Overall failure (overturn, break or buckling). Must be demolished.                                 | 1.7302         |

Table 3 Mean Damage Rates(%) Determined from Experts' Opinions

| Seismic Coefficient | Intensity | IV   | V    | VI   | VII  |
|---------------------|-----------|------|------|------|------|
|                     |           | MEAN | 1.77 | 8.04 | 18.6 |
| 0.10                | S.D.      | 2.18 | 9.98 | 16.3 | 25.4 |
|                     | MEAN      | 0.62 | 3.58 | 9.47 | 21.6 |
| 0.20                | S.D.      | 0.97 | 3.57 | 10.3 | 18.2 |
|                     | MEAN      | 0.24 | 1.31 | 4.62 | 12.3 |
| 0.30                | S.D.      | 0.55 | 1.48 | 5.34 | 12.3 |

など解析結果にはいくつかの不合理な面も現われているが、この解析結果を用いて被害額不明の橋梁の被害率を推定した。

以上のようにして、着目地域内の全橋梁の被害率を集計し、(2)式により平均被害率を求めた (Table 1)。

### 3. 専門家の経験的判断に基づく平均被害率

道路橋の強さは設計水平震度  $k$  (0.1, 0.2, 0.3) で、地震動の激しさは気象庁震度階  $IL$  (IV, V, VI, VII) で代表されるとしたとき、これらの組合せに対し MDR がどの程度と考えられるかに関して、橋梁・耐震関係の専門家を対象としたアンケート調査 (76 名 / 128 名 = 62.8% の回答率) を行った (Table 3)。この結果から設計水平震度  $k$ 、気象庁震度階  $IL$  をパラメータとする平均被害率の回帰式をつくると次のようになる。

$$MDR(k, IL) = 0.23 \exp[-5.84 k + 0.815 IL] \quad (4)$$

次に、各着目地域における平均被害率 (Table 1) と、(4)

式で得られた平均被害率を組み合わせる (Fig. 1)。ここで被害時点での橋梁の設計水平震度  $k$  は福井・新潟・宮城県沖地震で 0.2, サンフェルナンド地震では 0.05 とした。設計水平震度  $k$  と気象庁震度階  $IL$  の変化にともなう平均被害率の増減に関し、(4) 式の形状で表わされる専門家の考え方の流れを基本とし、これを過去の震害例の解析から得られた平均被害率の値に最小二乗法ですりつけることにより、平均被害率 MDR の予測式を以下のように修正した。

$$MDR(k, IL) = 0.145 \exp[-5.84 k + 0.815 IL] \quad (5)$$

### 4. 最適な設計水平震度の決定方法

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と考え、年平均発生率  $SR(IL)$  は、日本の有史以来 1974 年 10 月までの地震データ等に基づき Table 4 のように評価した。このとき、この地域で震度  $k$  で設計された道路橋の期待年被害率  $EALR(k)$  は、次のように定義される (Fig. 2 参照)。

$$EALR(k) = \sum MDR(k, IL) SR(IL) \quad (\%) \quad (6)$$

耐用期間  $T$  年における被害率の期待値 (%) は、次式で与えられるものとする。

$$EDR(k) = \delta EALR(k) \quad (\%) \quad (7)$$

ここに、 $\delta$  は定数であり、物理的損耗、期待寿命の減少などによる資産価値の低減を考える場合と考えない場合で、次のようになる。

- i) 価値の低減を考えない場合  $\delta = T$
- ii) 価値の低減を考えた場合  $\delta = \frac{1 - A^{-1}}{1 - A^{-1/T}}$

ここに、 $A$  は残存割合 (%) であり、今回の検討では  $A = 10\%$  とした。

耐震を考えないときの建設費を 1 としたとき、震度  $k$  で設計された道路橋が耐震のために余分に必要とした建設費を  $IC(k)$  で表わす。

$IC(k)$  は設計震度  $k$  に比例するものと仮定すると次のように表わされる。

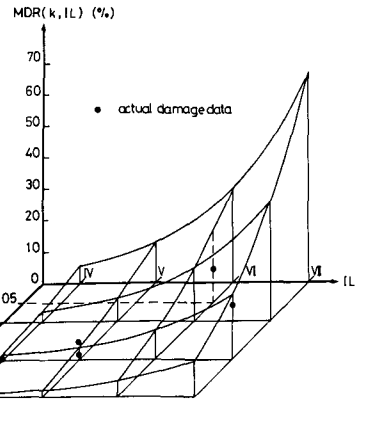


Fig. 1 Mean Damage Rate Surface Determined from Experts' Opinions and Mean Damage Rates Obtained from Past Earthquake Damage Data

Table 4 Mean Annual Occurrence Rates  $SR(IL)$ 's at Seven Sites Investigated

| District Intensity | TOKYO  | SENDAI | KYOTO  | OSAKA  | NIIGATA | SAPPORO | FUKUOKA |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| III                | 3.0658 | 1.9992 | 1.7616 | 0.6989 | 0.3498  | 0.3837  | 0.2327  |
| IV                 | 0.4420 | 0.2614 | 0.2159 | 0.1182 | 0.0779  | 0.0596  | 0.0535  |
| V                  | 0.0657 | 0.0362 | 0.0285 | 0.0218 | 0.0190  | 0.0112  | 0.0139  |
| VI                 | 0.0117 | 0.0070 | 0.0058 | 0.0059 | 0.0062  | 0.0039  | 0.0052  |
| VII                | 0.0040 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0032 | 0.0034  | 0.0029  | 0.0032  |

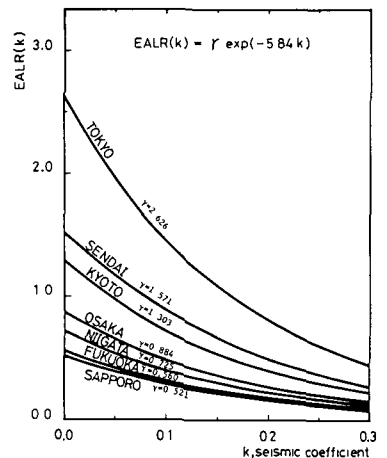


Fig. 2 Expected Annual Loss Rates at Seven Sites

$$IC(k) = 10 i k \quad (8)$$

ここに、 $i$  は設計水平震度を0.1 上げるのに必要な建設費増加率である。建築物を含み各種構造物に関する調査やいくつかの仮定をおいた橋梁の耐震化に要する費用の試算結果に基づき、道路橋の建設費増加率  $i$  は設計水平震度0.1 の増加に対し5~20%を考えればよいと判断した。

耐震のために余分に必要とした建設費と地震による直接被害額との線形和を総損失率TLR(k)と定義する。

$$TLR(k) = IC(k) + \alpha \delta \{1 + IC(k)\} \frac{EALR(k)}{100} \quad (9)$$

ここに、 $\alpha$  は耐震のために余分に必要とした建設費に対する直接被害額の重み係数であり、 $\alpha = 1$  のときは道路橋被害として直接被害のみを考えた場合、 $\alpha > 1$  のときは直接被害以外の被害も考えた場合である。重要度の高い道路橋では $\alpha > 1$ となる。なお、本解析では $\alpha$ の定量的な意味については評価しなかった。総損失率TLR(k)を最小とする設計水平震度 $k$ を求め、これを最適な設計水平震度 $k_{opt}$ とする。

### 5. 計算結果と考察

Fig. 3. は東京、大阪、福岡における耐用年数50年の道路橋の総損失率を設計水平震度 $k$ に対して示したものである。設計震度 $k$ を0.1 上げるのに必要な建設費増加率  $i$  の大きさは各総損失率曲線群の下から順に5%、10%、15%、20%である。重み係数 $\alpha$ は1.0 と2.0 の2つの場合について示してある。最適震度 $k_{opt}$ を0.0~0.3の間で考えたのは、(5)式で示した平均被害率MDR(k, IL)の値が $k = 0.0 \sim 0.3$ を対象として導かれており、建設費増加率が近似的ながら線形とみなされるのもおそらくこの範囲と思われるからである。以上のようにして求めた各都市地域の最適震度 $k_{opt}$ とそのときの総損失率TLRをTable 5に示す。たとえば東京の解析結果を見ると、 $\delta = T$ のとき、ほとんどの場合 $k_{opt}$ が0.3になる。これらの総損失率曲線は設計水平震度 $k$ が0.3のとき右下りのまま終わっていることにより、 $i = 5 \sim 20\%$ の範囲で $k_{opt}$ は本来0.3以上の値をもつものと考えられる。一方、福岡の解析結果を見ると、 $i$ が高いとき $k_{opt}$ が0.0となり、耐震措置を必要としない場合がいくつかある。たとえば、 $\delta = T$ 、 $\alpha = 1.0$ のとき、 $i$ が15%以上の総損失率曲線は $k_{opt}$ が0.0でそのときのTLRは0.280となっている。この場合は、「耐震を考えない道路橋が50年の耐用期間中に合計0.280の期待被害率しか見込まれていないとき、建設費増加率  $i$  が15%以上もかかる耐震措置を採るよりも、むしろ耐震措置を採らないほうが損失が少ない」と解釈できる。

Fig. 4は各  $i$  に対し $k_{opt}$  がどのように変化するかを示したものである。耐震のために余分に必要とした建設費と耐用期間に予想される地震被害率の両者がTLRの内に互いに占める割合が問題となり、各都市地域

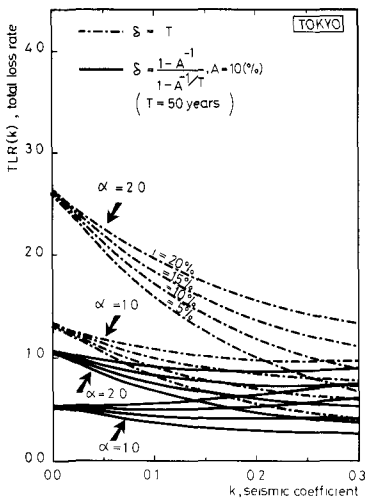


Fig.3(a)  
Total Loss Rates for Tokyo  
(Service Life = 50 Years)

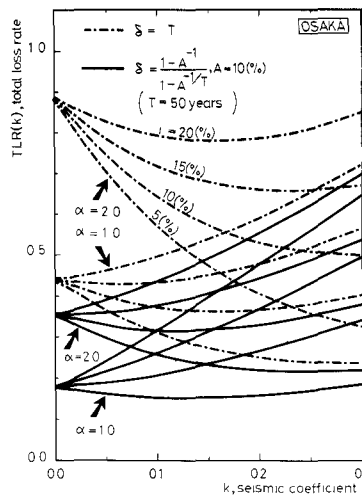


Fig.3(b)  
Total Loss Rates for Osaka  
(Service Life = 50 Years)

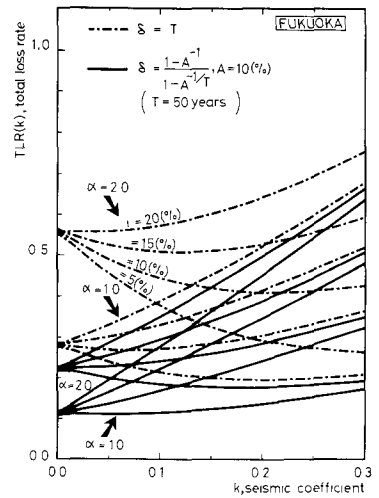


Fig.3(c)  
Total Loss Rates for Fukuoka  
(Service Life = 50 Years)

における  $k_{opt}$  は  $i$  の増加に  
 対しほぼ直線的に減少する関  
 係にあることがわかる。

Fig.4 (a) の場合、東京で  
 建設費増加率  $i$  が15%以下な  
 らば、設計水平震度  $k$  が0.3  
 以上でも経済的に有利である  
 ことや、反対に、建設費増加  
 率  $i$  が大阪では約18%，福岡  
 では約13%以上になると、む  
 しろ耐震措置を採らないほう  
 が経済的に有利であることを  
 示している。

Fig.4の結果を(8)式に代入  
 すると、最適震度  $k_{opt}$  で設計  
 された道路橋が耐震のために余  
 分に必要とする建設費  $IC(k)$  が  
 Fig.5のように求まる。たとえ  
 ば、Fig.5 (a) の場合、東京、  
 大阪、福岡に対してそれぞれ最  
 大でおよそ50%、15%、10%の  
 建設費の増加を必要とするこ  
 とがわかる。

6. あとがき

今回の解析結果から、最適震  
 度は各種パラメタの変化に対し  
 敏感に反応し、現行の設計示方  
 書がとりうる設計水平震度の範  
 囲0.10~0.24よりも広いことが  
 わかる。また、最適震度の現実  
 的な推定は、重要なパラメタが  
 より明確に定量化されて初めて  
 可能であることに注意したい。

本研究は猪熊康夫が昭和55年  
 に東京大学修士論文としてまと  
 めた結果を昭和56・57年度の科  
 学研究費補助金（一般研究(c)  
 -56550309）を受けて、さらに  
 発展させたものである。

Table 5 Total Loss Rates and Optimum Seismic Coefficients Evaluated at Seven Sites

| $\delta$                                   | $\alpha$ | $\tau(\%)$ | TOKYO         | SENDAI        | KYOTO         | OSAKA         | NIIGATA       | SAPPORO       | FUKUOKA       |
|--|----------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|  |          |            | TLR $k_{opt}$ | TLR $k_{opt}$ | TLR $k_{opt}$ | TLR $k_{opt}$ | TLR $k_{opt}$ | TLR $k_{opt}$ | TLR $k_{opt}$ |
| $\delta = T$                               | 2.0      | 5          | 0.674 0.30    | 0.463 0.30    | 0.410 0.30    | 0.326 0.30    | 0.295 0.30    | 0.254 0.30    | 0.262 0.30    |
|  |          | 10         | 0.892 0.30    | 0.654 0.30    | 0.594 0.30    | 0.499 0.30    | 0.460 0.26    | 0.394 0.19    | 0.409 0.21    |
|  |          | 15         | 1.111 0.30    | 0.845 0.30    | 0.778 0.30    | 0.655 0.22    | 0.592 0.18    | 0.484 0.10    | 0.508 0.12    |
|  | 1.0      | 5          | 1.329 0.30    | 1.036 0.30    | 0.954 0.26    | 0.779 0.16    | 0.685 0.10    | 0.521 0.00    | 0.558 0.02    |
|  |          | 10         | 0.412 0.30    | 0.307 0.30    | 0.280 0.30    | 0.238 0.29    | 0.220 0.25    | 0.189 0.19    | 0.196 0.21    |
|  |          | 15         | 0.596 0.30    | 0.476 0.28    | 0.439 0.24    | 0.362 0.16    | 0.321 0.12    | 0.254 0.05    | 0.269 0.06    |
| $\delta = \frac{i - A^{-1}}{1 - A^{-1/T}}$ | 2.0      | 5          | 0.360 0.30    | 0.275 0.30    | 0.254 0.30    | 0.217 0.25    | 0.202 0.21    | 0.168 0.15    | 0.175 0.16    |
|  |          | 10         | 0.537 0.30    | 0.432 0.23    | 0.394 0.19    | 0.317 0.11    | 0.276 0.07    | 0.208 0.00    | 0.223 0.02    |
|  |          | 15         | 0.710 0.26    | 0.546 0.15    | 0.484 0.10    | 0.354 0.01    | 0.290 0.00    | 0.208 0.00    | 0.224 0.00    |
|  | 1.0      | 5          | 0.857 0.20    | 0.616 0.06    | 0.521 0.00    | 0.354 0.00    | 0.290 0.00    | 0.208 0.00    | 0.224 0.00    |
|  |          | 10         | 0.255 0.30    | 0.207 0.23    | 0.189 0.19    | 0.153 0.12    | 0.135 0.08    | 0.104 0.02    | 0.110 0.03    |
|  |          | 15         | 0.396 0.20    | 0.293 0.09    | 0.254 0.05    | 0.177 0.00    | 0.145 0.00    | 0.104 0.00    | 0.112 0.00    |
| $A = 10\%$                                 | 1.0      | 5          | 0.487 0.10    | 0.314 0.00    | 0.261 0.00    | 0.177 0.00    | 0.145 0.00    | 0.104 0.00    | 0.112 0.00    |
|  |          | 10         | 0.525 0.00    | 0.314 0.00    | 0.261 0.00    | 0.177 0.00    | 0.145 0.00    | 0.104 0.00    | 0.112 0.00    |
|  |          | 15         | 0.525 0.00    | 0.314 0.00    | 0.261 0.00    | 0.177 0.00    | 0.145 0.00    | 0.104 0.00    | 0.112 0.00    |

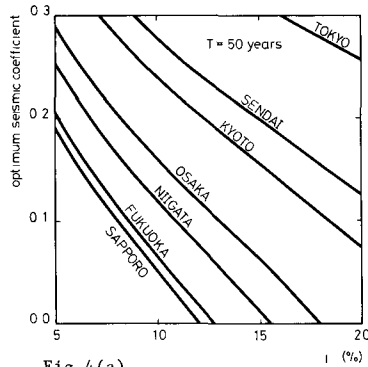


Fig.4(a) Effect of  $i$  on Optimum Seismic Coefficients at Seven Sites (Without Depreciation of Value, and Considering Direct Damage Costs)

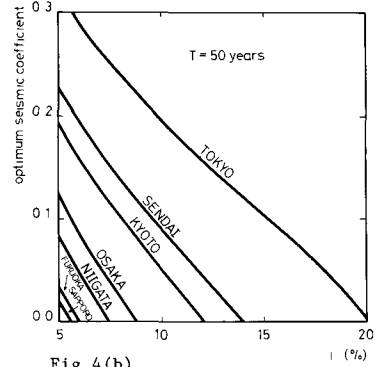


Fig.4(b) Effect of  $i$  on Optimum Seismic Coefficients at Seven Sites (With Depreciation of Value, and Considering Direct Damage Costs)

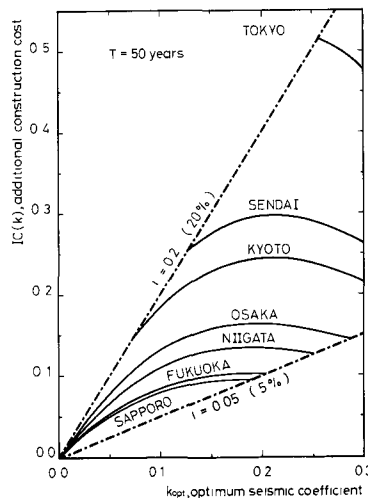


Fig.5(a) Extra Cost  $IC(k)$  for Earthquake-Resistant Highway Bridges Designed for Optimum Seismic Coefficients (Without Depreciation of Value, and Considering Direct Damage Costs)

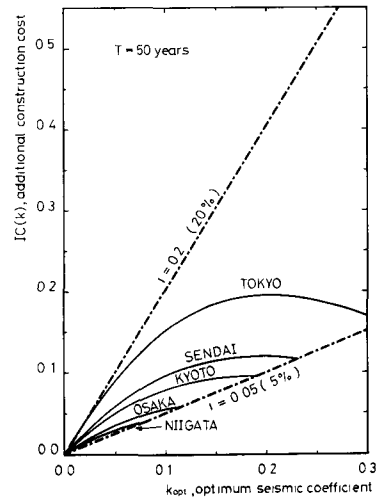


Fig.5(b) Extra Cost  $IC(k)$  for Earthquake-Resistant Highway Bridges Designed for Optimum Seismic Coefficients (With Depreciation of Value, and Considering Direct Damage Costs)