



橋梁の耐震設計における重要度係数の評価法

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-11-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 宮脇, 幸治郎 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00007974

橋梁の耐震設計における重要度係数の評価法*

Evaluations of the Important Coefficient for Earthquake Design of Bridges.

宮 脇 幸治郎**

Kohjiro MIYAWAKI

(昭和60年4月10日受理)

あ ら ま し

本研究は、橋梁系の耐震設計を行う際の重要度係数 λ の一評価法について取扱った。すなわち、橋梁の社会的価値を力学的要因となる破壊確率と関係づけて、一般の橋梁が破壊した異常時とそうでない平常時とにおいて重要な橋梁の有する社会的価値で分けて評価し、これに橋梁の建設費用を考慮した効用を考える。そして、これを重要度によって最大化するように係数を評価した。

その結果、重要度係数は、安全率 n 、変動係数 V_R, V_S 、耐用年数 T 、利率 r 、社会的効用の換算係数、一般橋梁の破壊確率、橋梁の形式による価格比 $\Delta C/C$ などとの関数として評価できた。そして数値計算の結果、つぎのようなことがわかった。

- 1) λ は、力学的要因の V_R, V_S, n に対して比例的に増加し、とくに n の効果が大きい。
- 2) λ は、社会的要因の T, r に対して、その効果はあまり大きくない。
- 3) 経済的要因の $\Delta C/C$ は、下部構造の橋梁形式により大きく影響される。
- 4) 誘導された λ は、実際の設計時に $(\lambda-n)$ の値を重要度別補正係数として用いればよい。

1. は し が き

土木構造物を設計する場合、その構造物の重要度を考慮した設計が必要である。この場合、重要度の評価に、必要性、迷惑度、代替性、機能回復の難易度などを加味して定められる必要がある¹⁾とされている。すなわち、対象構造物が破壊した場合、救援活動、復旧活動に必要とされる度合、その構造物が他の構造物・施設に影響を及ぼす度合、他の代替構造物・施設によってそれまでの機能を維持できるような代替物の充実の度合、破壊後その機能回復に要する時間、費用の大きさなどを定量的に算定しなければならない。

実際の設計指針等においては、たとえば道路橋設計示方書で、計画交通量に關したもののみが数値的に表示されており、具体的に定量的な取扱いは検討の余地があると考えられる。重要度に関する取扱い方法は少なく、青木の建築物のシステムに対して力学的・経済的・社会的要素を加味して取扱ったもの²⁾がある。本研究は、青木の方法を参考にし、社会資本の構造物としての橋梁系を対象にして具体的に評価してみる。

すなわち、本研究は、橋梁の社会的価値を力学的要因の破壊確率とに関係づけて、一般の橋

* 本論文の一部は、第40回土木学会年次学術講演会に発表したものである。

**土木工学科 (Department of Civil Engineering)

梁が破壊した異常時とそうでない平常時とにおいて重要な橋梁の有する社会的価値で分けて評価し、これに橋梁の建設費の加味した効用を考えた。そして、これが重要度によって最大化するように重要度の係数を評価した。

その結果、重要度係数は、構造物の耐力と荷重の最大値の外力とに対する平均値および変動係数、社会的価値に関係する構造物の耐用年数および社会的利率さらに橋梁の形式によって定まる建設価格比との関係で求められた。また、耐震設計における重要度と経済的要因とを関係づけるために、重要度の関数である設計震度と経済的要因である建設費との関係を実際に数値計算を実行して求めた。さらに、求められた重要度係数に関するパラメーターと重要度係数との関係を検討するために数値計算も実行し、いくつかの結果が得られた。

2. 重要度係数の基礎式の誘導

2.1 力学的要因

まず、構造物に作用する最大外力は、 $S (s_1, s_2, \dots, s_m)$ とする。このときの外力の統計量は、ある一定期間にそこで発生する外力から決定される最大外力の統計量とし、単位期間を1年にとって考える。同様に、構造物の耐力は、施工上のばらつきなどの不規則変数として、 $R_0 (r_1, r_2, \dots, r_n)$ とする。さらに、重要度係数 λ を与えて設計された構造物の耐力は、 $R_1 (r_1', r_2', \dots, r_n', \lambda)$ となる統計量として表わせる。さらに、 R_0, R_1, S の確率密度関数が、それぞれ $f_{R_0}(r_1, r_2, \dots, r_n)$, $f_{R_1}(r_1', r_2', \dots, r_n', \lambda)$, $f_S(s_1, s_2, \dots, s_m)$ であるとする。

このように定義された力学量により、構造物が安全とか破壊するとかの力学的表示が種々の形式で表わせる。ここでは、破壊確率 P_f を次式のように定義する。

$$P_f \equiv P_i[R_1 < S] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_R^{\infty} f_{R_1}(r) f_S(s) ds dr \quad (1)$$

上式は、破壊の危険性を表わし、 $1 - P_f (=L)$ は、安全の信頼性を表わす量となる。

2.2 経済的要因

橋梁の建設のための建設費 C_0 は、請負工事費として積算され、直接工事費と間接工事費から構成された工事原価に一般管理費等を加えたものとなる。この場合主として重要度に関係する要素は直接工事費の中の材料費、一般管理費の中の調査研究費等に相当するものと考えられる。しかし、建設費と重要度係数との関係は、非常に複雑な関数で表示されるものと考えられる。この場合の共通特性は、建設費が重要度係数に対して非減少関数と仮定できるものと考えられる。すなわち、

$$\frac{\partial C_0}{\partial \lambda} \equiv \alpha \geq 0 \quad (2)$$

となる。

2.3 社会的要因

橋梁の価値は、各状況によって異なる。一般の橋梁が破壊した場合を異常時、そうでない場合を平常時と呼ぶことにすれば、重要度の高い橋梁が異常時と平常時とにおいて正常に機能している場合と機能停止した場合とにその価値は分けて考えられる。この場合社会的価値は、機能上の貢献度、被害の影響の大きさ、他の施設との補完性、復旧の容易性などが関係してく

る。しかし、ここでは力学的要因で述べた破壊の危険性の評価方法により表-1のように表示して考える。

このような各組合せによる効用は、各状況下で1年間に得られた社会的価値の和を意味することになる。価値 U_{11} , U_{21} は、その機能上の意味から、正の符号をもったものであり、価値 U_{12} , U_{22} は負の符号をもった失われた1年間の損失となる。

まず、価値は単位年限ごとに計量されるとすると、重要度の高い橋梁の有効使用年限 T がくるまでは、この橋梁が破壊されるまでの価値を加えた値が社会的価値の総和となる。そこで1年目の社会的価値の期待値は、

$$U_{s0} = (1-p_0)(1-p_1)U_{11} + p_0(1-p_1)U_{21} + (1-p_0)p_1U_{12} + p_0p_1U_{22} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、各状況での価値は変動しない。すなわち、時間の関数でないと考えると、単に利子率 r に依存した形で2年目以降の価値が得られ、使用年限内の総和 U_s は、

$$U_s = U_{s0} \sum_{i=1}^T \left(\frac{1-p_1}{1+r} \right)^{i-1} \quad (4)$$

となる。

2.4 重要度の算定

効用は、社会的価値の総和 U_s から建設に必要な費用を除いた値である。また、建設時期がこの橋梁の利用の T_0 年前とすると、利用開始時を基準とした効用は、

$$U = U_s - C \quad (5)$$

ここに、

$$C = C_0(1+r)^{T_0} \quad (6)$$

である。重要度係数は、他の諸条件が与えられている場合式(5)の総効用を最大化することにより定める必要がある。すなわち、式(5)を重要度係数 λ で偏微分し、これを0と等置することにより次式が得られる。

$$-\frac{\partial p_1}{\partial \lambda} = \frac{\partial C}{\partial \lambda} / \frac{\partial U_s}{\partial p_1} \quad (7)$$

上式の左辺は、重要度係数と破壊確率の関係を表わす力学的側面から決定されるものである。さらに、右辺の分子は、耐力を増加させることにより生じる建設費の増加の割合を示すものである。分母は、破壊確率と社会的利益の損失の問題であり、広い意味での公共投資の問題で取り上げられるべきものである。このように重要度は、力学的要因、経済的要因に係わった形で表示される。

式(7)を評価するために右辺の分子・分母をつぎのように変形する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \lambda} &= (1+r)^{T_0} \alpha \\ -\frac{\partial U_s}{\partial p_1} &= (1+r)^{T_0} \gamma \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに、 α は重要度の費用増加率を表わし、 r は破壊確率による社会価値変動率を表わしている。式(8)を式(7)に代入すると、

$$\frac{\partial p_1}{\partial \lambda} = \frac{\alpha}{r} \tag{9}$$

となり、この式が基礎的な関係式となる。

具体的な評価をするためには、つぎのように考える。まず、橋梁への外力、耐力などの合成されたスカラー変数は、正規分布であると仮定する。いま、 R_0, R_1, S がそれぞれ正規分布 $[\mu_R, \sigma_R], [\mu_R/\lambda, \sigma_R], [\mu_S, \sigma_S]$ で与えられる場合を考える。このとき、各変数が独立で変動すると考えれば、重要度の高い橋梁に対して、

$$p_1 = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_R - \lambda\mu_S}{\sqrt{\mu_R^2 V_R^2 + \mu_S^2 V_S^2}}\right) \tag{10}$$

ここに、

- μ_R, μ_S : R_0, S の期待値
- V_R, V_S : R_0, S の変動係数
- $\Phi(\)$: 正規確率分布

となる。したがって、式(9)を式(10)に代入し、整理すると、

$$\lambda = \frac{\mu_R}{\mu_S} + \frac{\sqrt{\mu_R^2 V_R^2 + \mu_S^2 V_S^2}}{\mu_S} \sqrt{2 \log_e \left(\frac{r}{\alpha \sqrt{2\pi}} \frac{\mu_S}{\sqrt{\mu_R^2 V_R^2 + \mu_S^2 V_S^2}} \right)} \tag{11}$$

なる関係式を得る。

3. 重要度の社会価値変動率および費用増加率の評価

3.1 社会価値変動の検討

式(8)の第2式によって定義された社会価値変動率 r を検討するためには、式(4)および式(3)を p_1 で偏微分して整理する。しかるのち p_1 は一般に1に比べて非常に小さいのでテーラ級数展開を行い、近似的な評価し、また、 p_0 と p_1 の積の項も無視し、単位費用あたりの次式のように、評価できる。

$$\begin{aligned} \frac{r}{C_0} = \frac{U_{11}}{C_0} & \left\{ (q_{01} - q_{11}) - q_{01} \frac{U_{12}}{U_{11}} - \left\{ q_{01} \left(1 - \frac{U_{21}}{U_{11}} - \frac{U_{12}}{U_{11}} + \frac{U_{22}}{U_{11}} \right) + q_{11} \left(\frac{U_{21}}{U_{11}} - 1 \right) \right\} p_0 \right. \\ & \left. - \left\{ (q_{02} - q_{11}) \left(1 - \frac{U_{12}}{U_{11}} \right) - q_{12} \right\} p_1 \right\} \end{aligned} \tag{12}$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} q_{01} &= \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^{T-1+T_0}}, \quad q_{02} = \frac{(1+r)^T - r^T}{r(1+r)^{T-1+T_0}}, \quad q_{11} = \frac{(1+r)^T - 1 - r^T}{r^2(1+r)^{T-1+T_0}} \\ q_{12} &= \left\{ \frac{(1+r)^T - r^T - T}{r^2} - \frac{(1+r)^T - 1}{r^3} \right\} \frac{1}{(1+r)^{T-1+T_0}} \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

式(13)の U_{11} は、平常時における社会的価値であり、この値に対する評価が必要となる。そのためまず、社会的価値の総和は、建設費用を上回っていなければならない。しかし、計画の段階でなされている価値は、対象とする橋梁の機能が使用期間中、正常に機能したとして考え

られる。すなわち、一般の橋梁も重要な橋梁も破壊しないとした場合の社会的価値の総和が建設費を上回っていなければならない。ゆえに、

$$U_s \Big|_{\substack{P_0=0 \\ P_1=0}} \geq C \quad (14)$$

左辺は、社会的価値の総和から $(1+r)^{T_0} q_{01} U_{11}$ となる。したがって、

$$U_{11} \geq \frac{C}{(1+r)^{T_0} q_{10}} \quad (15)$$

なる関係になり、平常時の重要度の高い橋梁の年間あたりの価値 U_{11} は、総建設費の $1/(1+r)^{T_0} q_{01}$ より大きくなければならない。そこで、不等式(15)の条件下において、平常時の価値 U_{11} をどの程度に見積ればよいかが問題となる。いま、社会的価値の総和と総費用が等しくなる年数を T_* とし、利用開始点での建設費 C_0 とすれば、

$$U_{11} = k_r C_0 \quad (16)$$

ここに、

$$k_r = \frac{r(1+r)^{T_*-1+T_0}}{(1+r)^{T_*}-1} \quad (17)$$

と評価できる。ここに、 k_r は資本回収率と呼ばれる量である。

つぎに、平常時の社会的価値を基準にして各状況での価値を、

$$U_{21} = \gamma U_{11}, U_{12} = -\gamma^*_1 U_{11}, U_{22} = -\gamma^*_2 U_{11} \quad (18)$$

と表現できるとする。

3.2 費用増加率の検討

式(2)で定義された重要度に対する費用増加率 α は、つぎのように考える。

まず、橋梁構造における耐震設計において、震度法あるいは修正震度法を用いるものとすれば、設計水平震度 k は、次式の形で与えられる³⁾。

$$k = \lambda k_0 \quad (19)$$

ここに、

$$k_0 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \bar{k}_0$$

λ_1 : 地域別補正係数

λ_2 : 地盤別補正係数

λ_3 : 修正震度法の場合の固有周期による応答の修正係数

\bar{k}_0 : 基準設計震度

λ : 重要度別補正係数

したがって設計震度の変化を基準とする震度 k_0 で割ったものが単位重要度の変化率を表わし、

$$\Delta \lambda = \lambda - 1 \quad (20)$$

となる。このとき費用の増加は、設計震度の変化に伴った建設費用の増加 ΔC_0 であり、単位費用あたりの費用増加率は $\Delta C_0 / C_0$ と算定される。したがって、

$$\frac{\alpha}{C_0} = \frac{4C_0/C_0}{\lambda-1} \tag{21}$$

となる。

4. 数値計算

4.1 設定モデル

耐震設計における重要度係数の変化による建設費用の変化を調べるために、構造設計^{4),5),6)} および積算⁷⁾の数値計算を行った。図-1に示すような橋台2基、合成桁橋1基のモデルが標準の橋梁系として設定された。そして、耐震的な考慮は、橋台のみについて設計震度を变化させて設計計算を行った。

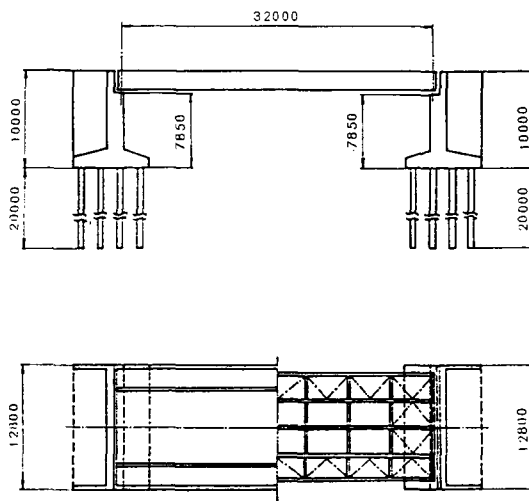


図-1 対象とした標準橋梁系モデル

重要度係数の算出には、構造物の耐用年数 T 、資本回収年 T_* 、構造物の耐力および荷重の変動係数 CV_R 、 CV_S 、社会的利率 r 、その他のパラメータは表-2に示すように仮定して計算を行った。

表-2 仮定された諸元

耐用年数	T (年)	50, 70, 100
資本回収年	T_* (年)	7
変動係数	荷重 CV_S (%)	5 ~ 50
	耐力 CV_R (%)	5 ~ 50
利	率 r	0.06, 0.10
一般橋梁の破壊確率 ⁹⁾	P_0	1.0×10^{-3}
社会的価値の換算係数	η	500
	η_1^*	4
	η_2^*	1

4.2 価格比と設計震度

設計水平震度の橋梁の直接工事費に及ぼす影響について調べた計算例が図-2である。計算結果より、建設費用は杭基礎部の工事費用が震度の影響度合が大きくなっている。また、震度に対する建設費用は、下に凸な放物線状に増加する傾向をもっている。すなわち、式(9)の分子は、

$$\frac{4C_0}{C_0} = a_0 + a_1k + a_2k^2 - 1$$

と表示できるであろう。ここに、 a_0 、 a_1 、 a_2 ：図-2より定まる定数。

以上の結果は、荒川・川島・田村ら⁸⁾が行った数値計算結果においてもほぼ同様の傾向を示しており、一般的な傾向を示したものである。

4.3 重要度係数と変動係数

重要度係数 λ は、式(11)のように評価されるものとする、耐力、外力の変動係数 V_R 、 V_S 、安全率 $n (= \mu_S / \mu_S)$ および社会的価値の変動率 r 、費用増加率 α の関数である。

まず、図-3は、 $\lambda - V_S - n$ の関数を図示したものである。図からわかるように、 λ は V_S 、 n に対して比例的に増加する傾向を示すが、 V_S より n の方の影響の度合が非常に大きい傾向

を示している。 λ を増すことは、安全性を増すことであり、すなわち、 n を上げればよいという関係である。また変動係数が大きい場合は、同じ安全性を保持しようとするとき λ を大きくしてやる必要があることを示している。

図-4は、 $\lambda-V_s-V_R$ の関係を図示したものである。 λ は、 V_R, V_s によりともに同様の影響を受けている。大体 V_R, V_s の10%程度の増加に対して λ は約20%程度の増加を呈している。

図-5は、 $\lambda-V_R-T$ の関係であり、 λ は橋梁の使用年限 T に対してあまり変化しないがごくわずかに増加している。すなわち、耐用年限 T が長くとれば、来襲するであろう地震の期待値を上げることが意味し、 λ を上げることになる。

図-6は、 $\lambda-V_R-r$ の関係を図示したものである。耐用年限の場合と同様に対象利率6~10%ではあまり λ には影響していない。

以上、各種パラメーターとの相関について述べたが、重要度係数 λ の値が示方書に用いられている重要度別補正係数に比較してかなり大きい数値となっている。これは、式(11)で評価した λ が $n+4n$ という形式になっており、構造設計する際、安全率 n をもつように設計されており、重要度の効果が $4n$ に表現されている。したがって、設計する際の重要度の係数は、 $(\lambda-n)$ の値を用いればよいであろう。

5. あとがき

本研究は、橋梁系の耐震設計における重要度係数の評価法について、構造計算（力学的効果）だけでなく、橋梁の経済的効果、社会的効果を考慮して提案し、数値計算を実行して幾つかの結果を得た。

まず、設計震度と建設費用との関係は、次のようになった。

- (1) 設計震度を上げると、建設費用は放物線状に増加する。
- (2) 橋梁の基礎部の費用は大きく、全建設費の中の杭基礎部のみの費用が占める割合が大きい。

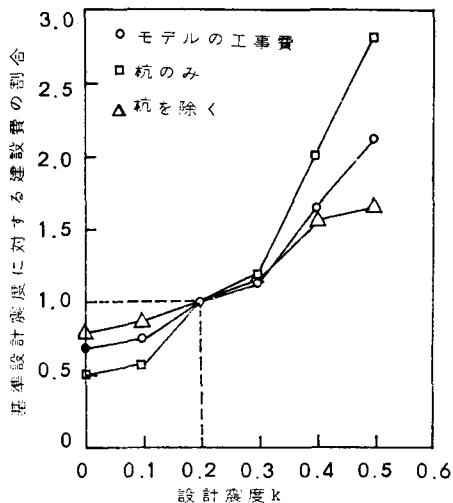


図-2 価格比と設計震度

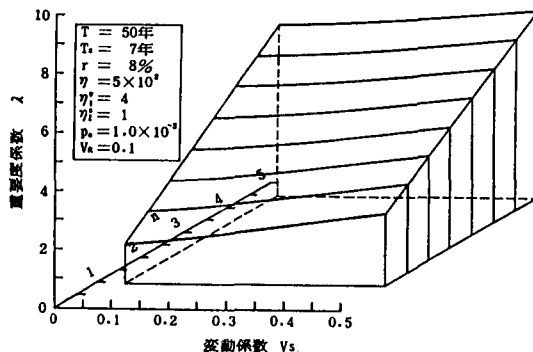


図-3 $\lambda-V_s-n$ の関係

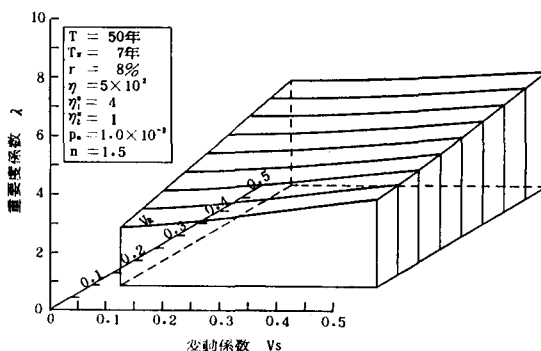


図-4 $\lambda-V_s-V_R$ の関係

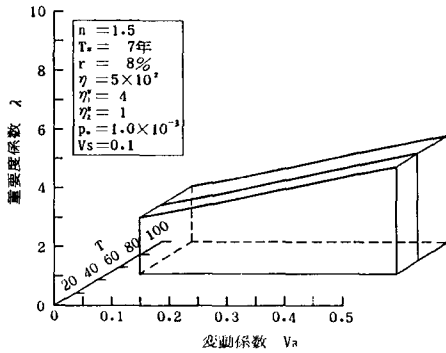


図-5 λ-V_R-T の関係

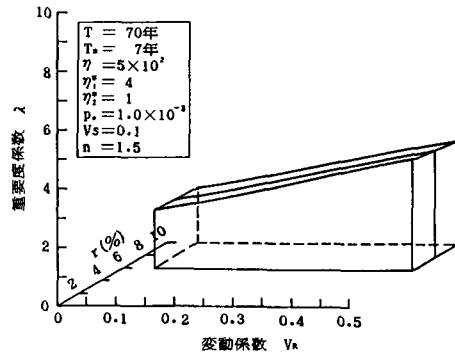


図-6 λ-V_R-r の関係

(3) 橋台部のみ費用は、ほぼ直線的に増加する。

つぎに、重要度係数についてまとめるとつぎのようになった。

- (1) 安全率、変動係数による重要度係数の影響は大きい。
- (2) 社会的要因の耐用年数、利率の重要度係数の影響は小さい。
- (3) 重要度係数を実際の設計における重要度補正係数として評価するには、安全率を引いた形のもので評価すればよい。

なお、今後検討すべき事項は、

- (1) 社会的価値の換算係数 η , η_1^* , η_2^* などの合理的な評価法の確立。
- (2) 種々の橋形式に対する積算プログラムの開発

などが考えられる。

最後に、本研究においての構造計算ならびに積算などの計算にお世話になった阪神高速道路公団甲元克明君に感謝の意を表わす。

参考文献

- 1) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説V，耐震設計編」，1980. 5, pp. 2~35.
- 2) 青木義次：“重要度係数の最適化”，建築研究報告，No. 74, Oct, 1976.
- 3) 前述1)，p. 24.
- 4) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説I，共通編」，1980. 5.
- 5) 同上：「道路橋示方書・同解説IV，下部構造編」，1980. 5.
- 6) 土木施工設計計算例委員会編：「橋りょう構造物の設計計算例」，山海堂，1984. 4.
- 7) 建設工事積算研究会編，建設大臣官房技術調査官監修：「土木工事積算基準マニュアル」，(財)建設物価調査会，1984. 6.
- 8) 荒川直士・川島一彦・田村敬一：“設計水平震度が橋梁建設費に及ぼす影響”，第39回年次学術講演会I，1984. 10, pp. 899~900.
- 9) 栗林栄一・田崎忠行：“耐震性向上の設計手法”，土木技術資料，18-9，1976, pp. 27~34.