

長大吊橋における安全率の配分に関する考察

OPTIMAL ALLOCATION OF THE SAFETY LEVELS OF A LONG-SPAN SUSPENSION BRIDGE

藤野 陽三* 杉山 俊幸**

by Yozo FUJINO and Toshiyuki SUGIYAMA

The optimal allocation of safety factors is discussed for long-span suspension bridge. The optimal allocation of the safety factors for cables and girders in suspension bridge has been obtained by the simple reliability optimization of structural system. The results suggest to increase the safety factor of girders for wind and to decrease the safety factor of cables for dead load. The current code appears to be not balanced and revision is suggested.

1. はじめに

土木構造物の多くは、一般に幾つかの異なった構成要素から成り、複数の破壊モードを有している。1つの要素が破壊することによって構造物全体が破壊するとみなされる場合もあれば、一部の要素の破壊によって生ずる部材力等の再分配に対し残された構成要素が破壊せず、必ずしも構造物全体の崩壊に至らない場合もある。そのため、こうした構造物の安全性を論ずる場合には、システム信頼性解析^{1)~3)}、さらには各々の構成要素に対しどのような信頼性レベルあるいは安全率を設定しておくのが構造物全体として最適となるかについての検討が必要となってくる⁴⁾。最適信頼性レベルあるいは最適安全率は、各々の構成要素を製作・架設するためのコストおよび各構成要素の破壊が構造物全体の安全性に及ぼす影響あるいは修復可能性等を考慮して決定されるべきであろう。

吊橋の上部構造は、主塔、ケーブルおよび補剛桁の3要素で構成されている典型的なシステムをなす構造物の一例である。現行設計によれば、明石海峡大橋クラスでは、主塔およびケーブルにおける死荷重の占める割合は全荷重値の90%を超えており、死荷重が設計をほぼ支配するのにに対し、補剛桁——特にトラス形式の補剛桁——の主要部材の設計は風荷重に左右される。死荷重の変動性は、品質管理および施工管理が十分になされている限り小さいと考えてよい。たとえば、設計時の死荷重仮定値と実橋の重量との比の調査結果⁵⁾によれば、その平均値はほぼ1.0であり、変動係数は0.7%と極めて小さい値となっ

* Ph.D 東京大学助教授 工学部土木工学科 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

** 工博 山梨大学助教授 工学部土木工学科 (〒400 甲府市武田4-3-11)

ている。一方風荷重に関しては、その設計荷重値は、スパン長・架設高度に関する補正や、ガスト応答に関する補正等を考慮して決定されているものの、設計基本風速の決定に用いている統計データの数はずしも十分ではなく、長い供用期間内に設計基本風速を超過するような極めて大きな台風が来襲する可能性も十分ありうると見受けられる⁶⁾。さらに現行設計では、風圧による横たわみのみを設計の対象とし、鉛直たわみ・ねじれ等は対象としていないのが実状である。そのため、風荷重の設計値は必ずしも安全側の値とはいえず、また、大きな不確定性を有しているといえよう。従って、純確率・統計的な意味での安全性のレベルを同一に保つという立場に立てば、主塔やケーブルに対する安全率は相対的に小さく、補剛桁に対する安全率は相対的に大きく設定しておくべきということになる。

次に、これらの要素が破壊・損傷を受けた場合の修復可能性について考えてみる。主塔およびケーブルは、吊橋という構造上の特性から、ひとたび破断・破壊が生じると構造物全体の破壊に至り、その修復はほとんど不可能である。社会的・経済的損失もかなり大きいと考えられる。一方、強風作用下での補剛桁の破壊は、部分崩壊に留まり、その修復は十分可能であると予想される。従って、各要素が破壊した場合の修復可能性という観点からは、ケーブルおよび主塔に対する安全率は相対的に大きく、補剛桁に対する安全率は相対的に小さくしておくのがよいという見方ができる。すなわち、前述した各要素の設計において支配的となる荷重の変動性を考慮した場合の安全率の設定のしかたと大小関係が逆になっている。

長大吊橋の現行設計規準⁷⁾では、ケーブルに関しては、0.7%全伸び耐力に対して2.0、主塔に関しては、主荷重での降伏および座屈に対し1.7、補剛桁に関しては、風荷重に対する許容応力度の50%割増しを考慮すると、降伏および座屈に対し1.14の安全率が設定されている。しかしながら、各構成要素の設計を支配する荷重の変動性および各構成要素の破壊・損傷が構造物全体の安全性に及ぼす影響やその修復可能性等を考慮すると、現行設計規準で規定されているこれらの値がはたして妥当な値なのかどうか疑問が生じてくる。これまでも、中央径間約2000mの世界最長の吊橋として計画されている明石海峡大橋のケーブルに対する安全率は、安全側に過ぎ経済性を損ねているのではないかと指摘がなされている⁸⁾。

そこで本研究では、幾つかの構成要素から成る構造物の各要素に対しどのような安全率を設定しておくのが適切なのかを、長大吊橋を例として取り上げ、現行設計規準と対比しながら、信頼性理論に基づく最適配分の観点から検討することにする。ただしここでは、取扱上の簡便さから吊橋の上部構造はケーブルと補剛桁の2要素のみから構成されているものとして取り扱うことにし、主塔は除いている。また、数値計算に用いる幾つかのパラメータの値は明石海峡大橋の設計計算例を参照して決定することにする。なお、荷重の変動性のみに着目し、荷重係数設計法の導入によりケーブルの安全率を低減させようとする試みもなされている⁹⁾が、長大吊橋のような構造物の安全性を論ずる場合にはシステムとしての取扱いが必要であり、ケーブルのみを対象として安全性を論ずるのは妥当ではないと考えられる。

2. 安全率の最適配分

2-1. 定式化

構造物の初期建設費用(維持管理費を含む)を C_I 、構造物が限界状態に達する確率を P_F 、構造物が限界状態に達したときの損失費用を C_F としたとき、構造物の総費用 C_T は

$$C_T = C_I + P_F \cdot C_F \quad (1)$$

で表される⁹⁾。この考え方を吊橋に適用すると、吊橋の総費用 C_T は、

$$\begin{aligned} C_T &= (C_{Ic} + P_{Fc} \cdot C_{Fc}) + (C_{Ig} + P_{Fg} \cdot C_{Fg}) \\ &= (C_{Ic} + C_{Ig}) + (P_{Fc} \cdot C_{Fc} + P_{Fg} \cdot C_{Fg}) \\ &= (C_{Ic} + C_{Ig}) + C_{Fg} (P_{Fg} + P_{Fc} \cdot \alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $\alpha = C_{FC} / C_{FG}$

で与えられる。添字“C”および“G”は各々ケーブルおよび補剛桁を表わしている。ここでは、安全率の最適な配分を考えるということで、初期建設費用（ケーブルと補剛桁の初期建設費用の和）を一定として C_T を最小にする、すなわち

$$(P_{FG} + P_{FC} \cdot \alpha) \quad (3)$$

を最小にすることを考える。このことにより、 C_{FC} 、 C_{FG} の評価はしなくてすむことになる。しかし本定式化では、絶対的な安全率の最適値を求めることはできない。

2-2. 限界状態に達する確率 P_F の評価

ここでは不確定変数として強度 R と荷重 S のみを考え、ともに対数正規分布に従うものとする。このとき、 R, S の平均を $\bar{R}, \bar{S}$ 、変動係数を V_R, V_S とすれば、限界状態に達する確率 P_F は次式で与えられる。

$$P_F = \Phi(-\beta)$$

ここで

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp(-x^2/2) dx \quad : \text{標準正規分布関数}$$

$$\beta = \frac{\ln(\bar{\theta} \sqrt{1+V_S^2} / \sqrt{1+V_R^2})}{\sqrt{\ln\{(1+V_R^2)(1+V_S^2)\}}} \quad : \text{安全性指標}$$

$$\bar{\theta} = \bar{R} / \bar{S} \quad : \text{中央安全率}$$

2-3. 初期建設費用 C_I の評価

設計強度値 R_d 、設計荷重（作用）値 S_d を用いて次式により構造物の安全性照査がなされたとする。

$$R_d / \nu \geq S_d \quad (4)$$

ここで、 ν は安全率である。初期建設費用 C_I は一般に式（4）の安全率を高くとるほど大きくなる。

橋梁上部工について、安全率のみを変えたときの総鋼重 W の変化量は安全率 ν の非線形関数となるが、その非線形性は弱いことが知られている¹⁰⁾。そこで、長大吊橋のケーブルおよび補剛桁に関しても、基準安全率を ν_0 とし、仮に安全率を ν にした場合の両者の鋼重比が

$$W(\nu) / W(\nu_0) = 1 + b(\nu / \nu_0 - 1) \quad (5)$$

で表わされるものとする。従って、初期建設費用 C_I が鋼重 W に線形比例するとすれば、

$$C_I(\nu) / C_I(\nu_0) = 1 + b(\nu / \nu_0 - 1) \quad (6)$$

と表わすことができる。ただし、 b は初期建設費用の増加の度合を表わすパラメータである。

以上より、長大吊橋のケーブルおよび補剛桁の初期建設費用 C_{IC} 、 C_{IG} は、共に安全率の関数として

$$C_{IC}(\nu_C) = C_{IC}(\nu_{0C}) [1 + b_C(\nu_C / \nu_{0C} - 1)] \quad (7-1)$$

$$C_{IG}(\nu_G) = C_{IG}(\nu_{0G}) [1 + b_G(\nu_G / \nu_{0G} - 1)] \quad (7-2)$$

で与えられる。一般に、補剛桁の安全率を高くし鋼重が増すと、それに伴って当然ケーブルの必要断面も増大するが、その増大の割合は極めて小さいという結果が得られている¹¹⁾。

次に、式（7-1）、（7-2）に含まれるパラメータ b_C 、 b_G （以下、このパラメータのことを初期建設費用の増分パラメータと称する）の値を決定する必要がある。

図-1 は、明石海峡大橋のケーブルを次式の安全性照査式に基づいて設計した場合のケーブル張力と死荷重係数 γ_D の関係を示したものである¹²⁾。

$$\sigma_C / \gamma_m \geq (\gamma_D \cdot D + \gamma_L \cdot L + \gamma_T \cdot T)$$

σ_C : 極限強度 160 kg/mm^2 (ケーブルの破断強度)

γ_m : 強度係数、 γ_D : 死荷重係数、 γ_L : 活荷重係数、 γ_T : 温度変化の影響に関する係数

D : 死荷重、 L : 活荷重、 T : 温度変化の影響

先に述べたように明石海峡大橋（トラス案）では、ケーブル張力のうち死荷重の占める割合が90%以上にも及ぶことから、「死荷重係数 γ_D = 式（4）の安全率 ν 」とみなしてもよいと考えられる。さらに、断面力と断面積がほぼ線形関係を有することを考慮すると、ケーブル張力の増加の割合と鋼重比の増加の割合は等しいとみなせよう。これらの仮定の下で図-1よりパラメータ b_c の値を算出すると、 $b_c = 1.1 \sim 1.3$ となる。

また表-1は、同じく明石海峡大橋の補剛トラスの設計において、43m/sの設計基本風速を40m/sおよび45m/sに変化させたときの安全率の変化と補剛桁の鋼重比の変化を示したものである¹¹⁾。ただし、設計基本風速43m/sのときの安全率1.14は、鋼材としてSM50Yを用いた場合、1.25はHT70を用いた場合である。これより、式（7-2）に含まれるパラメータ b_g の値を求めると、 $b_g = 0.2 \sim 0.3$ となり、ケーブルの b_c の値に比べ数分の1程度である。なお合成桁上部工の場合、式（5）のパラメータ b の値は、0.4～0.6であることが知られている^{10), 13)}。

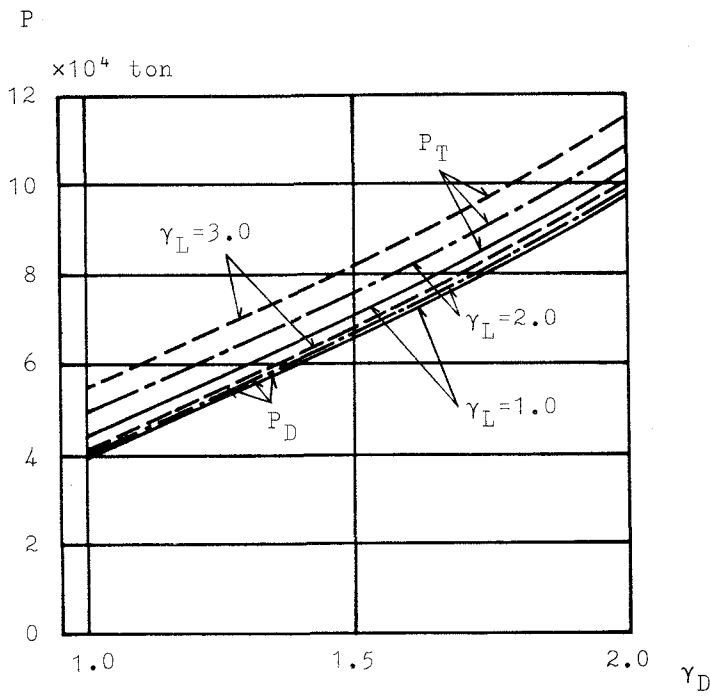


図-1 死荷重係数 γ_D とケーブル張力 P の関係¹²⁾
 P_D : 死荷重によるケーブル張力
 P_T : 全ケーブル張力

表-1 設計基本風速と安全率および鋼重比の関係¹¹⁾

設計基本風速 [m/s]	40	43	45
安全率 SM50Y	0.99	1.14	1.25
HT70	1.08	1.25	1.37
鋼 重 比	0.962	1.00	1.023

3. 数値計算および考察

式（3）で表わされるケーブルと補剛桁の破壊損失費用の和を最小にするような ν_c と ν_g の組合せを数値計算により求める。

3-1. 数値計算上の仮定

数値計算に際しては、明石海峡大橋の設計計算例^{5), 6), 11), 12)}を参照して、以下に示す仮定および値を用いている。

- a) ケーブルの破壊は構造物全体の破壊に至るが、補剛桁の破壊は修復可能であり、必ずしも構造物全体の破壊には至らないと考えられることから、 C_{FC} と C_{FG} の比を $\alpha = C_{FC}/C_{FG} = 2 \sim 10^6$ とする。
- b) ケーブルの設計は死荷重のみに、また、補剛桁の設計は風荷重のみに支配されるとし、死荷重および風荷重の変動係数を各々 $V_D = 0.1$ 、 $V_W = 0.3$ とする。文献5)によれば死荷重の変動係数は0.007と極めて小さい値となっているが、吊橋完成後ケーブルに作用する死荷重の載荷条件が変化する可能性や、付加死荷重のばらつき等を考慮して0.1とした。風荷重の変動係数については、設計基本風速のみの変動係数は0.1程度であるが、設計基本風速程度のデータのばらつきはかなり大きいこと⁶⁾、および設計時に風による鉛直・ねじれ変形等を考慮していないことに起因する不確かさなども考慮して一応0.3としている。なお、ケーブルおよび補剛桁を構成する材料強度の変動係数は、文献14)を参照して $V_R = 0.1$ とする。
- c) 設計計算例によると、上部工建設費のうちケーブルの占める割合はほぼ40%、補剛桁の占める割合は約37%であることから、ケーブルおよび補剛桁の初期建設費用の比は、 $C_{IC} : C_{IG} = 1 : 1$ とする。
- d) ケーブルの基準安全率を、0.7%全伸び耐力に対し $\nu_{ac} = 2.0$ とする。
- e) 風荷重に関する補剛桁の基準安全率は、許容応力度の割増し率50%を考慮して、風荷重作用下での降伏および座屈に対し $\nu_{og} = 1.71/1.5 = 1.14$ とする。
- f) ケーブルおよび補剛桁の初期建設費用の増分パラメータ b_c 、 b_g は、前節2-3より、 $b_c = 1.2$ 、 $b_g = 0.25$ とする。
- g) 式(4)の R_d 、 S_d として確率的特性値

$$R_d = \bar{R} \exp[-k_R \sqrt{\ln(1+V_R^2)}] / \sqrt{1+V_R^2}$$

$$S_d = \bar{S} \exp[k_S \sqrt{\ln(1+V_S^2)}] / \sqrt{1+V_S^2}$$

を採用し、強度および荷重の設計値 R_d 、 S_d のレベルを示す k_R 、 k_S の値は $k_R = k_S = 1.28$ とする。すなわち、 R_d 、 S_d はそれぞれ安全側の90%確率値であるとする。

- h) 吊橋の安全性に関与する部材の強度および死荷重・風荷重は、ここでは対数正規分布に従うものとする。

図-2に、c)～f)の仮

定により得られるケーブル、補剛桁各々の初期建設費用と安全率の関係の概略を示してある。これより、ケーブルの初期建設費用は安全率の変化に対してかなり敏感であること、それに対し補剛桁の初期建設費用は安全率の変化に対しさほど敏感でないことがわかる。

なお、ここで用いている幾つかのパラメータの値の仮定が数値計算結果に及ぼす影響も同時に調べることにする。

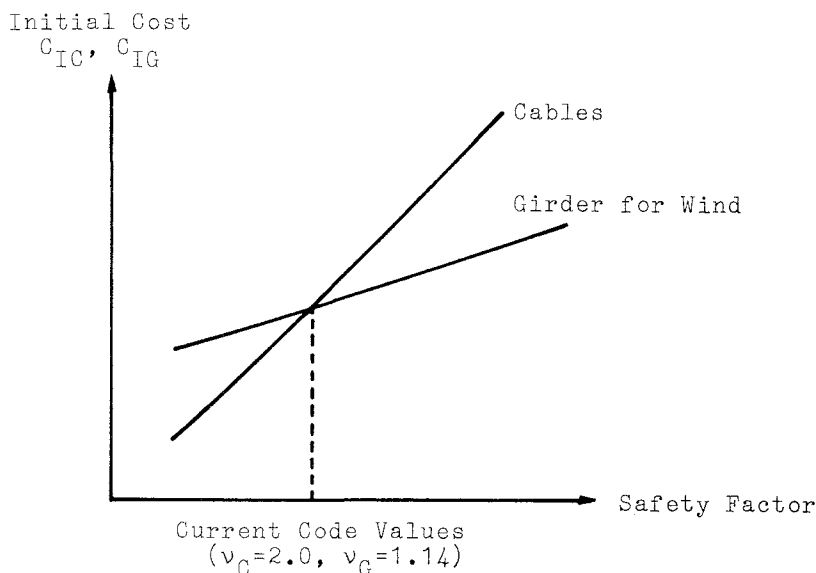


図-2 ケーブル・補剛桁の初期建設費用 C_{IC} 、 C_{IG} と安全率 ν_c 、 ν_g の関係の概略図

3-2. 結果および考察

数値計算結果を示したのが図-3 (a) および図-3 (b) である。図-3 (a) の縦軸には、 $(P_{FG} + P_{FC} \cdot \alpha)$ の値を、同図 (b) の縦軸には、ケーブルおよび補剛桁の安全性指標 β_c および β_g をとっている。横軸は、両図共にケーブル・補剛桁の安全率を示している。図-3 より、

- a) ケーブルの最適な安全率 $\nu_{c,opt}$ は、補剛桁の最適な安全率 $\nu_{g,opt}$ よりもかなり小さくてよく、 $\nu_{c,opt}$ を $\nu_{g,opt}$ よりも大きくしておくのは経済的には得策でないこと
- b) しかしながら、 $\nu_{c,opt}$ に対応するケーブルの安全性指標は、 $\nu_{g,opt}$ に対応する補剛桁の安全性指標よりも大きいか、あるいはほぼ同じ値となっており、変動性の小さい死荷重が支配的となっているケーブルの信頼性レベルは、変動性の大きい風荷重で決まる補剛桁の信頼性レベルよりも低くないこと
- c) ケーブルの安全性指標 β_c は、安全率 ν_c の増加に伴い急激に大きくなっているのに対し、補剛桁の安全性指標 β_g は、安全率 ν_g の変化に対しさほど敏感でないこと
- d) 風荷重の変動性が大きいほど、補剛桁の安全率をケーブルの安全率よりも相対的に大きくしておくのがよいこと

がわかる。このa)で得られた最適な安全率の大小関係は、現行の長大吊橋の設計で用いられているものと逆の結果となっている。

次に、数値計算より得られる結果が、パラメータの値の仮定に対しどの程度敏感であるのかを調べたのが図-4～図-10である。縦軸および横軸のとり方は図-3 (a) と同様である。着目したパラメータと各図との対応は以下の通りである。

図-4 死荷重の変動係数 V_D

図-5 強度の変動係数 V_R

図-6 ケーブルと補剛桁の破壊費用の比 $\alpha = C_{FC} / C_{FG}$

図-7 荷重の設計値のレベルを示す k_s

$P_{FG} + P_{FC} \cdot \alpha$

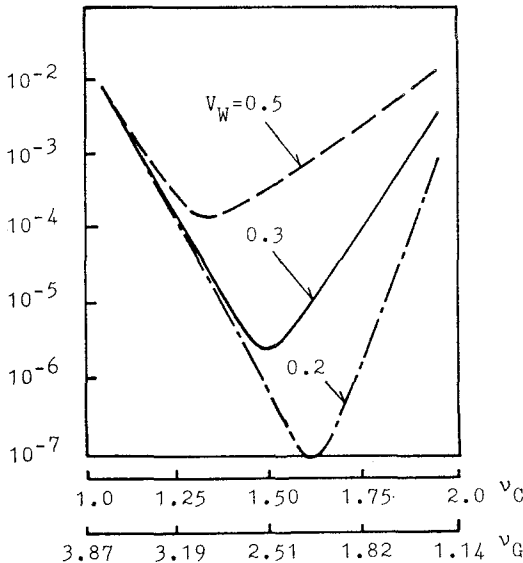


図-3 (a) 破壊費用と安全率 ν_c , ν_g の関係
(風荷重の変動係数 V_W に着目)

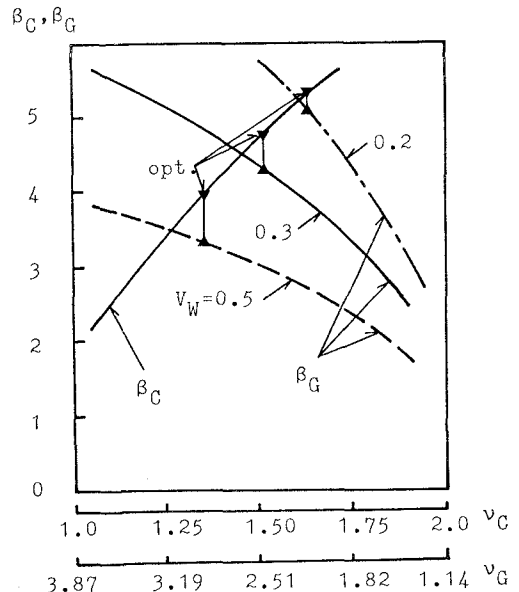


図-3 (b) ケーブル・補剛桁の安全性指標 β_c , β_g と安全率 ν_c , ν_g の関係
(風荷重の変動係数 V_W に着目)

図-8 ケーブルの初期建設費用の増分パラメータ b_c

図-9 補剛桁の初期建設費用の増分パラメータ b_g

図-10 補剛桁の基準安全率 ν_{gg}

$P_{FG} + P_{FC} \cdot \alpha$

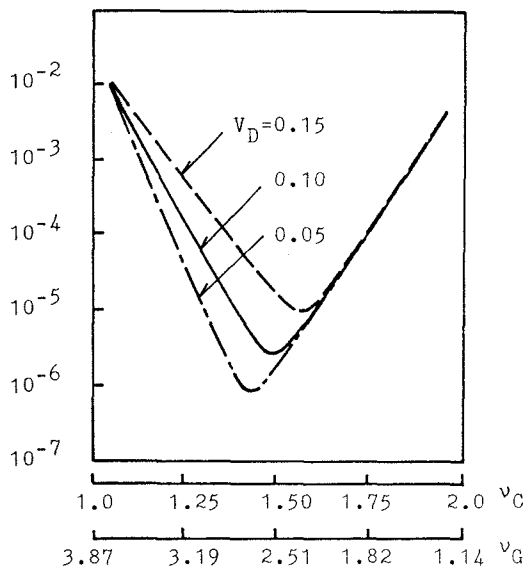


図-4 破壊費用と安全率 ν_c , ν_g の関係
(死荷重の変動係数 V_D に着目)

$P_{FG} + P_{FC} \cdot \alpha$

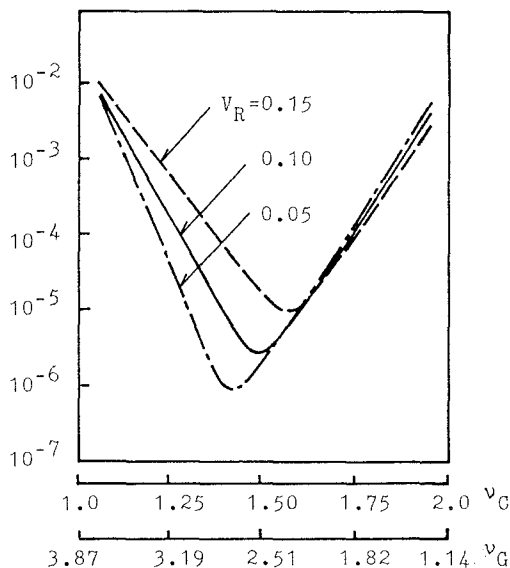


図-5 破壊費用と安全率 ν_c , ν_g の関係
(強度の変動係数 V_R に着目)

$P_{FG} + P_{FC} \cdot \alpha$

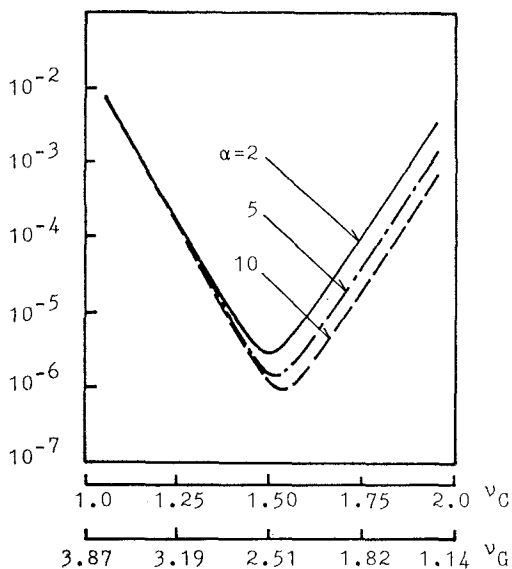


図-6 破壊費用と安全率 ν_c , ν_g の関係
(ケーブルと補剛桁の破壊費用の比 α に着目)

$P_{FG} + P_{FC} \cdot \alpha$

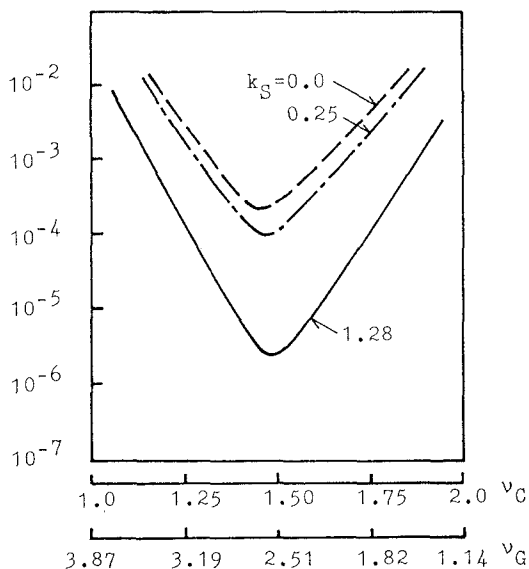


図-7 破壊費用と安全率 ν_c , ν_g の関係
(荷重の数設計値のレベルを示す k_s に着目)

$$P_{FG} + P_{FC} \cdot \alpha$$

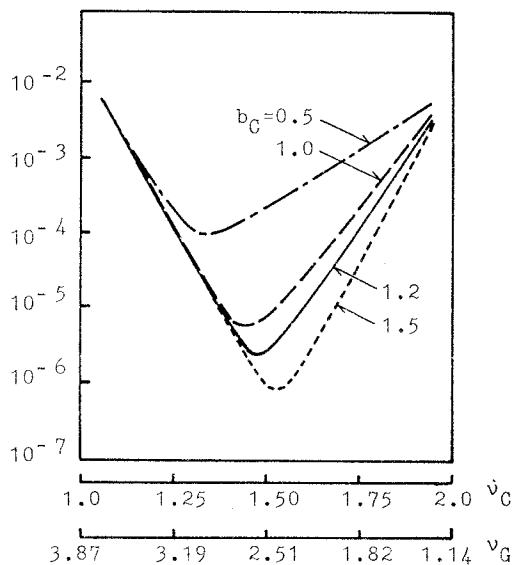


図-8 破壊費用と安全率 ν_C , ν_G の関係
(ケーブルの初期建設費用の増分
パラメータ b_C に着目)

$$P_{FG} + P_{FC} \cdot \alpha$$

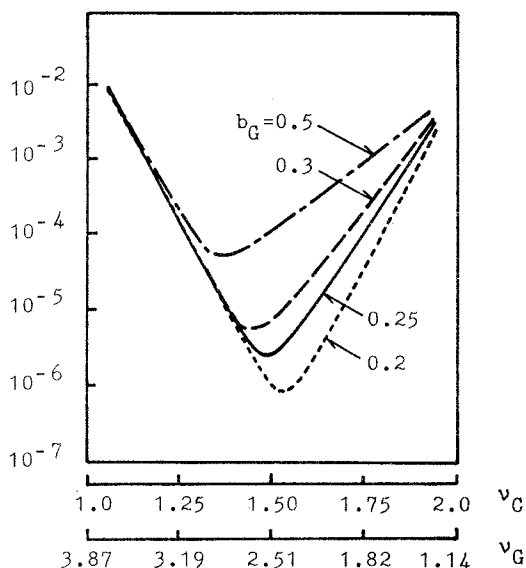


図-9 破壊費用と安全率 ν_C , ν_G の関係
(補剛桁の初期建設費用の増分
パラメータ b_G に着目)

なお、図-10で扱った補剛桁の基準安全率に関しては、使用鋼材がSM50Yの場合には1.14であるが、HT70の場合には1.25となることを考慮して変化させている。図-3も含めたこれらの図より、破壊費用を最小にする最適な安全率の組み合わせに大きく影響を及ぼすパラメータは、強度・荷重の変動係数および初期建設費用の増分パラメータであること、しかしながら、いずれの場合においても、前述したa)の知見はあてはまること等がわかる。また、図には示していないが、前記b)、c)と同様の知見も得られている。

$$P_{FG} + P_{FC} \cdot \alpha$$

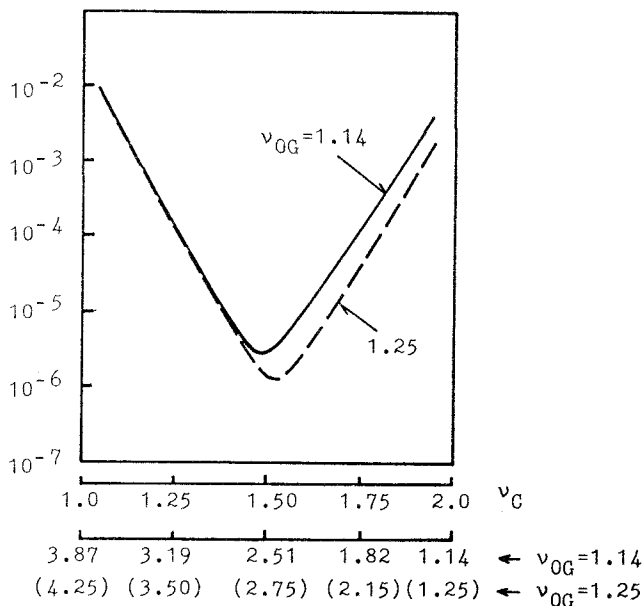


図-10 破壊費用と安全率 ν_C , ν_G の関係
(補剛桁の基準安全率 ν_{OG} に着目)

ここで取り上げた幾つかのパラメータのうち、ケーブルと補剛桁の破壊損失費用の比 $\alpha = C_{Fc}/C_{Fg}$ 以外のものは、十分な調査等によりある程度精度よくその値を知ることが可能と考えられる。これに対し α の値については、その評価が容易でない。そこで、 α の値をかなり極端と思われる範囲まで拡張し、 α の値により最適となる安全率 $v_{C,opt}$ 、 $v_{G,opt}$ がどのように変化するかを調べたのが図-11である。 α 以外のパラメータの値は3-1で仮定した値を用いている。これより、(1) α の値を大きくするとケーブルの安全率は大きくなり、現行の安全率2.0に近づいていくこと、(2)しかしながら、 α の値を 10^6 とかなり大きな値としてもケーブルの最適な安全率は1.8程度であること、(3)補剛桁の最適な安全率は α の増加に伴って減少するが、その値は1.5~1.7であり、現行の安全率1.14よりもかなり大きな値となっていること等がわかる。

以上より、数値計算に用いた確率モデルおよびパラメータの値は必ずしも十分な検討がなされたものではないが、初期建設費用一定という条件下で破壊費用を最小にするとの観点から得られるケーブルと補剛桁の最適な安全率の大小関係は、現行の設計で用いられているものと逆の結果になっており、現在用いられている安全率については再考を要するといえよう。

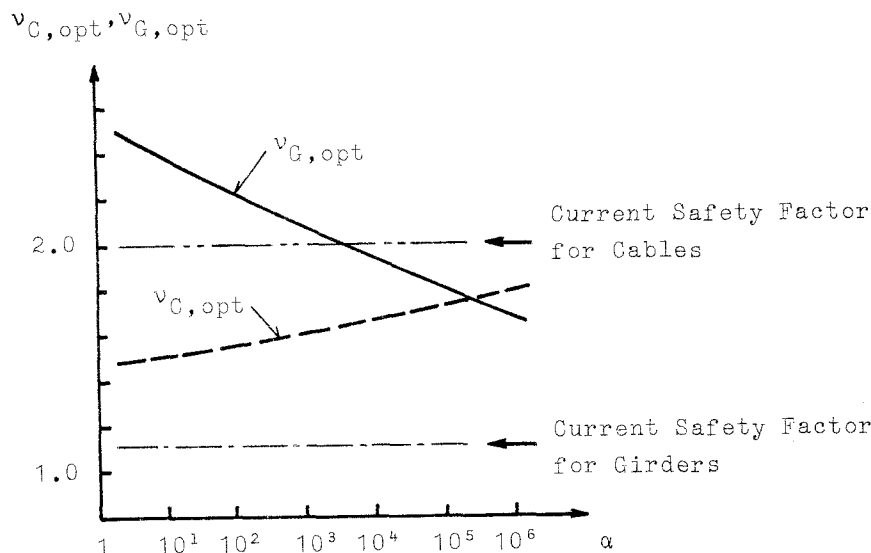


図-11 ケーブルと補剛桁の破壊損失費用の比 $\alpha = C_{Fc}/C_{Fg}$ と最適な安全率 $v_{C,opt}$ 、 $v_{G,opt}$ の関係

4. まとめ

システムとしての構造物の代表例として長大吊橋を取り上げ、各々の構成要素に対しどのような安全率を設定するのが適切であるかについて、検討を加えた。その結果、変動性のより小さい荷重が支配的である構成要素（ケーブル）に対して、変動性のより大きい荷重で決まる構成要素（補剛桁）の安全率を相対的に大きくしておくのが、経済的な側面からは適切であることが明らかとなった。ただしこの場合、前者の達成している信頼性レベルは、後者の達成している信頼性レベルよりも低くないことが確かめられている。本研究で得られたこの最適な安全率の大小関係は、現行の長大吊橋の設計で用いられているものと逆

の結果となっている。すなわち、ケーブルに対する安全率はより小さくし、補剛桁に対する安全率はより大きくする方が、初期建設費用一定という条件下で破壊費用を最小にするという観点からは妥当であることが結果として得られている。ここで用いた確率モデルは、各構成要素が限界状態に達した後の破壊に至るまでの余剰耐力等を考慮したものでなく、パラメータの値も必ずしも十分な検討がなされたものではない。また、いわゆるグロスエラーに対する配慮を組み込んだモデルではない。しかしながら、現行の設計規準に規定されているケーブル・補剛桁等に対する安全率についての見直しが必要であることを数値計算結果は示唆している。

謝辞：本研究は本州四国連絡橋公団の補助を受けて行ったものである。また、東京大学伊藤学教授より有益な助言を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Cornell, C.A.: Bound on the Reliability of Structural System, Proc. of ASCE, Jour. of the Structural Division, Vol.93, No.ST1, pp.171-200, Feb., 1967.
- 2) Ang, A.H-S and Amin, M.: Reliability of Structures and Structural Systems, Proc. of ASCE, Jour. of the Engineering Mechanics Division, Vol.94, No.EM2, pp.671-691, April, 1968.
- 3) Rosenblueth, E. and Mendoza, E.: Reliability Optimization in Isostatic Structures, Proc. of ASCE, Jour. of the Engineering Mechanics Division, Vol.97, No.EM6, pp.1625-1641, Dec., 1971.
- 4) Lind, N.C., Knab, L.I. and Hall, W.B.: Economic Study of Connection Safety Factor, Proc. of Third Specialty Conference on Cold-formed Steel Members.
- 5) 本州四国連絡橋公団：明石海峡大橋の設計荷重に関する調査試験——ケーブルに作用する死荷重、土木学会本四耐風委員会資料、1984年（第3回委員会）。
- 6) 本州四国連絡橋公団第一建設局、日本気象協会：垂水観測塔風の20年集成、1985年2月。
- 7) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計規準、1977年8月。
- 8) 建設省土木研究所：本州四国連絡橋の設計施工に関する研究報告、土木研究所資料第2357号、第4章、1986年3月。
- 9) 例えば、高岡宣善：構造物の設計・安全性、土木学会誌、Vol.61, No.3, 1976年3月。
- 10) 林羽山：安全性照査からみた橋梁設計規準の考察、東京大学大学院修士論文、1980年3月。
- 11) 本州四国連絡橋公団：基本風速による鋼重比較、本州四国連絡橋公団報告書、1986年3月。
- 12) (財)海洋架橋調査会、本州四国連絡橋公団：明石海峡大橋限界状態設計法に関する調査研究、研究会資料、1984年3月。
- 13) Lind, N.C.: Approximate Analysis and Economics of Structures, Proc. of ASCE, Jour. of the Structural Division, Vol.102, No.ST6, pp.1177-1196, June, 1977.
- 14) 伊藤学：構造設計における安全性の規範、土木学会誌、Vol.60, No.10, pp.35-43, 1975年9月。

(1986年10月17日受付)