

I-158 長大スパン吊橋を例としたシステムとしての構造物の安全率について

山梨大学工学部 正員 杉山俊幸
 東京大学工学部 正員 藤野陽三
 東京大学工学部 正員 伊藤 学

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。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としての信頼性解析、すなわち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。この最適な信頼性レベルあるいは安全率は、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等を考慮して決定されるべきであろう。長大スパン吊橋の上部構造は、主塔と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としての土木構造物である。主塔およびケーブルにおいては、死荷重の占める割合が全荷重値の90%を超える場合も多く、死荷重が設計を支配するのに対し、補剛桁—特にトラス型式の補剛桁—の主要部材の設計は風荷重に左右されるのが通常である。死荷重の変動性は、品質および施工管理が十分になされている限り小さい。一方、風荷重の変動性は大きく、また、風的作用を受けている吊橋の挙動にはかなりの不確定要因が含まれている。これらの点を考慮すると、主塔やケーブルに対する安全率は小さく、補剛桁に対する安全率は大きく設定しておくのが妥当といえよう。しかしながら、現行の長大スパン吊橋の設計規準においては、これらの安全率の大小関係は逆転している。たとえば、本四の設計規準²⁾においては、ケーブルの終局限界状態に対し3.0、補剛桁に対し2.0以下の安全率が設定されている。

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するのが適切なかを、長大スパン吊橋を例として取り上げ、総費用最小化の観点から検討することにする。なお簡単のため、ここでは吊橋の上部構造はケーブルと補剛桁の2構成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する。

2. 総費用の評価

ケーブルおよび補剛桁の総費用が各々

$C_{TC} = C_{IC} + P_{FC} \cdot C_{FC}$ [ケーブル], $C_{TG} = C_{IG} + P_{FG} \cdot C_{FG}$ [補剛桁]
 で表わされるとすると、吊橋の総費用 C_T は、

$$C_T = (C_{IC} + P_{FC} \cdot C_{FC}) + (C_{IG} + P_{FG} \cdot C_{FG}) \quad \dots (1)$$

となる。吊橋の安全性に関与する部材の強度および死荷重・風荷重は全て対数正規分布に従うものとする。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

$$C_{IC}(\nu_C) = C_{IC}(\nu_0) \{1 + 0.6(\nu_C/\nu_0 - 1)\}$$

$$C_{IG}(\nu_G) = C_{IG}(\nu_0) \{1 + 0.6(\nu_G/\nu_0 - 1)\}$$

で与えられ、両者の和 $C_{IC} + C_{IG}$ は一定(定数)であると仮定する。また、ケーブルの破壊は吊橋全体の破壊に至るが、補剛桁の破壊は必ずしも吊橋の崩壊を意味しないものとする。すなわち、 $C_{FC} > C_{FG}$ とする。

3. 数値計算結果および考察

式(1)で表わされる総費用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。ここでは明石海峡大橋の設計計算例を参照して、以下に示す値を数値計算に用いている。

$$\nu_0 = 1.7, \quad C_{IC} : C_{IG} = 2 : 1, \quad C_{FC} : C_{FG} = 2 : 1, \quad C_{IC} : C_{FC} = 1 : 100 \\ V_{RC} = V_{RG} = 0.1, \quad V_D = 0.1 \text{ (死荷重)}, \quad V_W = 0.3 \text{ and } 0.5 \text{ (風荷重)}$$

数値計算結果を示したのが図1および図2である。図1の縦軸には、総費用 $C_T(\nu_C, \nu_G)$ を初期建設費用 $\{C_{IC}(\nu_0) + C_{IG}(\nu_0)\}$ で無次元化した値から1.0を減じた値を、図2の縦軸には、ケーブルおよび補剛桁の破壊確率 P_{FC} および P_{FG} 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。これより、

- (1) 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ことは経済的には得策ではないこと
- (2) しかしながら、 $\nu_{C,opt}$ に対応するケーブルの破壊確率は、 $\nu_{G,opt}$ に対応する補剛桁の破壊確率よりも小さくなっており、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を、変動性の大きい風荷重で決まる補剛桁よりも高くしておく方が、総費用最小の立場からは好ましいこと
- (3) ケーブルの破壊確率 P_{FC} は、安全率の増加に伴い急激に小さくなっているのに対し、補剛桁の破壊確率 P_{FG} は、安全率 ν_G の変化に対しさほど敏感でないこと

がわかる。この最適な安全率の大小関係は、現行の長大スパン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。数値計算に用いた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、現在用いられている安全率の大小関係について再考を要することを示唆しているといえる。

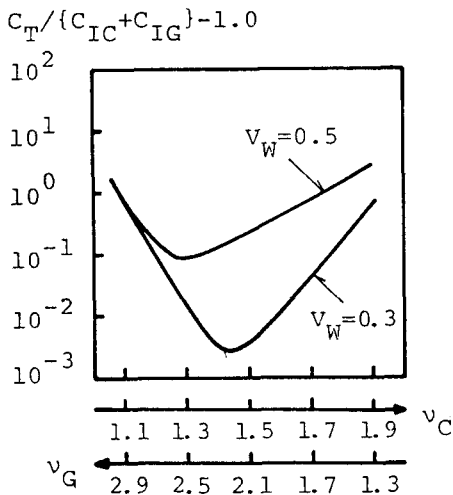


図1 総費用と安全率 ν_C, ν_G の関係

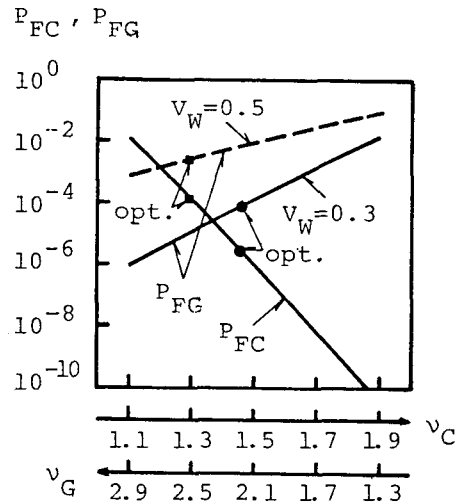


図2 ケーブル・補剛桁の破壊確率と安全率の関係

4. まとめ

システムとしての構造物の代表例として長大スパン吊橋を取り上げ、各々の構成要素に対しどのような安全率あるいは信頼性レベルを設定するのが適切であるの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に対して、より高い信頼性レベルを設定しておくのが、経済的な側面からは妥当であることが明らかとなった。また、本研究で得られた結果は、現行の長大スパン吊橋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の大小関係について、見直しが必要であることも示唆している。

【参考文献】

- 1) LIND, N.C., L.I. KNAB, and W.B. HALL: Economic Study of Connection Safety Factor; Proc. of Third Specialty Conference on Cold-formed Steel Members.
- 2) 本四公団：上部構造設計規準，1977年8月。