

部分係数設計法における部分係数設定に関する試設計

東北学院大学工学部 学生員 松本佳久
東北学院大学工学部 学生員 小野雄也
東北学院大学工学部 正員 中沢正利

1. まえがき

国際規格 ISO2394(構造物の信頼性に関する一般原則)では、構造設計に際して構造物および構造要素に要求させる性能を適切な信頼性で検証することが求められており、信頼性指標 β が一般に用いられる。米国 AASHTO LRFD 橋梁設計コードでは、供用期間 75 年で終局限界強度に対して、目標信頼性指標 $\beta_T=3.5$ として荷重および抵抗に関する部分係数を設定している。日本でも、設計の自由度と信頼性の向上を目指し、次期道路橋示方書の改訂に向けて、合理的な検証手段としての部分係数設計法の導入が検討されている。ここでは、これまでの許容応力度設計法によって設計された鋼道路橋の有する信頼性指標をプレートガーダー(以下 PG)の試設計例から評価し、さらに部分係抵抗係数の設定に関する検討を行うものである。

2. PG の試設計

これまでの研究例¹⁾の適用範囲に含まれていない比較的短スパン(15,20,25m)の3主桁非合成 PG 橋を対象とし、車道幅員 3.7, 3.9, 4.1m の計 9 ケースを試設計した。図-1に設計断面の代表例を示す。設計では B 活荷重に対する設計せん断力および設計曲げモーメントを算出した後、鋼 I 形断面桁の断面形状を決定し、その断面形からウェブ断面積 (A_w)、断面二次モーメント I などの断面諸量を算出した。

3. 各種性能関数

非合成 PG 橋の主桁の終局強度に関する安全性を確率論により示す性能関数 Z を以下のように定義する。

$$Z = R - S = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

ここで R, S は抵抗および荷重を表す統計量であり、材料強度や部材強度および断面諸量などの確率変数 x_1, x_2, \dots, x_n で構成され、 μ_{x_i}, σ_{x_i} の平均および標準偏差が分かっているものとする。主桁の強度には以下に示す 4 種類を考慮する。

(1) 腹板のせん断強度：

$$Z = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \cdot A_w - (S_D + S_L) = x_1 \cdot x_2 - (S_D + S_L) \quad (2)$$

(2) 桁の曲げ降伏強度：

$$Z = \sigma_Y \cdot \left(\frac{I}{y_c} \right) - (M_D + M_L) = x_1 \cdot x_2 - (M_D + M_L) \quad (3)$$

(3) 桁の横倒れ座屈強度：

$$Z = \sigma_Y \cdot \left(\frac{I}{y_c} \right) \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} \right) - (M_D + M_L) \quad (4) \\ = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - (M_D + M_L)$$

ここで、 σ_{cr}/σ_Y は横倒れ座屈パラメータの関数である。

(4) 圧縮フランジの自由突出板の座屈強度：

$$Z = \sigma_Y \cdot \left(\frac{I}{y_c} \right) \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} \right) - (M_D + M_L) \quad (5) \\ = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - (M_D + M_L)$$

ここで、 σ_{cr}/σ_Y は自由突出端幅厚比 R の関数、 I, y_c は断面二次モーメントおよび圧縮縁端距離である。また、 $(S_D, S_L), (M_D, M_L)$ は死荷重および活荷重による設計せん断力と設計曲げモーメントで、荷重変動に関する十分なデータが無い場合、ここでは PG の試設計から得られた一定値であるとするとする。

4. FORM 法による信頼性指標 β の算出法

上記の性能関数 $g(x_1, x_2, x_3)=0$ を破壊点(標準正規座標系の原点) $g(x_1^*, x_2^*, x_3^*)=0$ のまわりに Taylor 展開して線形近似することにより、以下の手順で信頼性指標が求められる方法を FORM 法と呼ぶ。

(1) α_i^* および β の初期値を仮定する。

(2) $x_i^* = \mu_{x_i} - \alpha_i^* \beta \sigma_{x_i}$

(3) 感度係数: $\alpha_i^* = \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}}$

(4) $\mu_Z = g(x_1^*, x_2^*, x_3^*) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right) (\mu_{x_i} - x_i^*)$

(5) $\sigma_Z = \sum_{i=1}^n \alpha_i^* \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \right) \sigma_{x_i}$

(6) $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$

5. 解析結果

許容応力度設計法により設計された鋼 I 形断面桁(外桁)の信頼性指標 β の値を図-2および3に示す。これらの図から、最小の信頼性指標 β の値はスパン中央で得られ、曲げ降伏あるいは桁の横倒れ座屈強度が支配的であることが指摘できる。この最小 β 値は 4.0 ~ 7.0 となり、米国 LRFD の目標値 3.5 よりも一般的に大きいことが分った。また、せん断強度はスパン中央側より支点側が危険であるが、全体的にかなりの余裕を持っている。

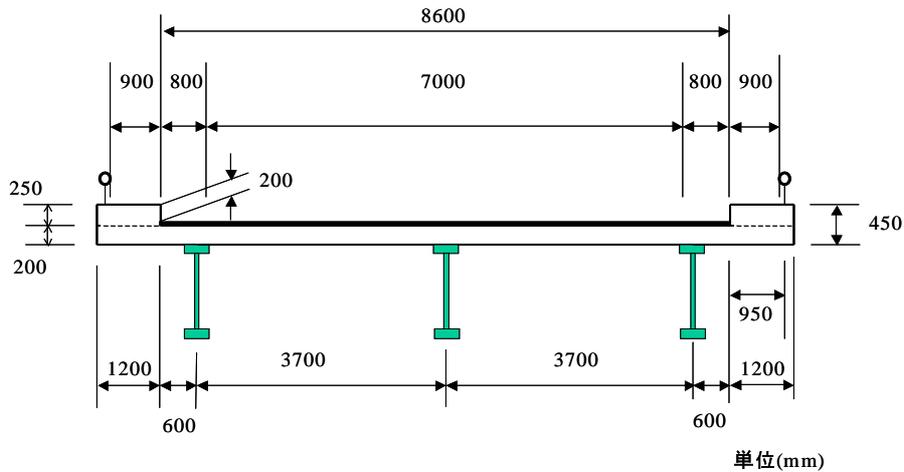


図-1 主桁間隔 370cm のプレートガーダー橋の断面図

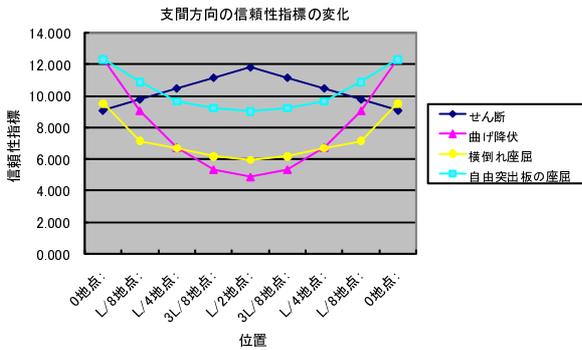


図-2 信頼性指標 β の変化 (スパン長 15m、主桁間隔 3.7m)

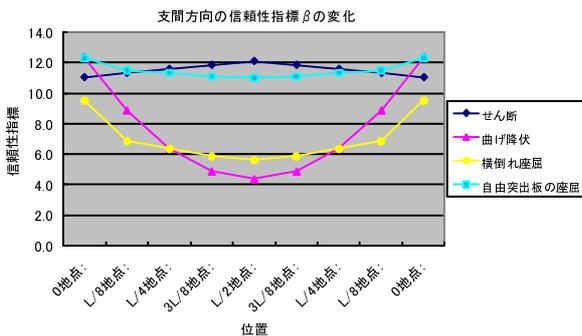


図-3 信頼性指標 β の変化 (スパン長 20m、主桁間隔 3.7m)

6. 部分係数の設定法

性能関数 $Z=R-S$ において、 R と S は独立な正規確率分布関数で、各々平均値 μ_R, μ_S 、標準偏差 σ_R, σ_S の特性をも

つと仮定すると、

$$\beta = \frac{\mu Z}{\sigma Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (6)$$

と表される。いま、目標信頼性指標を β_T とすると、

$$\beta_T \leq \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\alpha_R \sigma_R + \alpha_S \sigma_S} \quad (7)$$

ここで、 R と S の感度係数が以下のように定義される。

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad \alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (8)$$

上式に変動係数 $V_R = \sigma_R/\mu_R, V_S = \sigma_S/\mu_S$ を導入して書き替えると $(1 - \beta_T \alpha_R V_R) \mu_R \geq (1 + \beta_T \alpha_S V_S) \mu_S$ となる。

よって、 R と S の特性値 (設計基準値) を \bar{R}, \bar{S} とすると、信頼性指標 β_T に基づく部分抵抗係数 γ_R および部分荷重係数 γ_S は

$$\gamma_R = \frac{\mu_R}{\bar{R}} (1 - \beta_T \alpha_R V_R), \quad \gamma_S = \frac{\mu_S}{\bar{S}} (1 + \beta_T \alpha_S V_S) \quad (9)$$

と表され、一方設計照査式は

$$\gamma_R \bar{R} \geq \gamma_S \bar{S} \quad (10)$$

となる。今回、荷重の変動特性は考慮できなかったため、一定値として $V_S=0.0$ と置くことになる。

7. 結論

- (1) FORM 法を用いて、現行の許容応力度法により設計された非合成鋼 I 形桁の設計信頼性を評価した結果、強度を支配しているのは曲げ降伏強度あるいは横倒れ座屈強度であり、最小信頼性指標の値は 4.0 程度であった。
- (2) 桁の曲げ強度に比較して、せん断および自由突出板の座屈強度にはかなりの余裕がある。

参考文献

「鋼道路橋の部分係数設計法に関する検討」、土木研究所資料第 4141 号、平成 21 年 3 月。