

腐食減肉の生じた鋼 I 桁の腐食部応力の補正法に関する研究

長岡技術科学大学 鋼構造研究室 PARMYEN SUNKHAR

指導教員 岩崎 英治

1. 研究背景及び目的

日本では高度経済成長期の 1955 年から 1973 年にかけては社会インフラ施設，その中で道路橋の設備が多数建設された．それで，現在において建設後 50 年以上経過する橋梁の割合は約 34%であるが，今後 10 年 (59%)・20 年 (80%) ではその割合がさらに増加すると予想されているし，橋梁の腐食損傷事例も数多く報告されている．そのため，橋梁の経年劣化に従う腐食損傷に対する適切な維持管理が求められる．

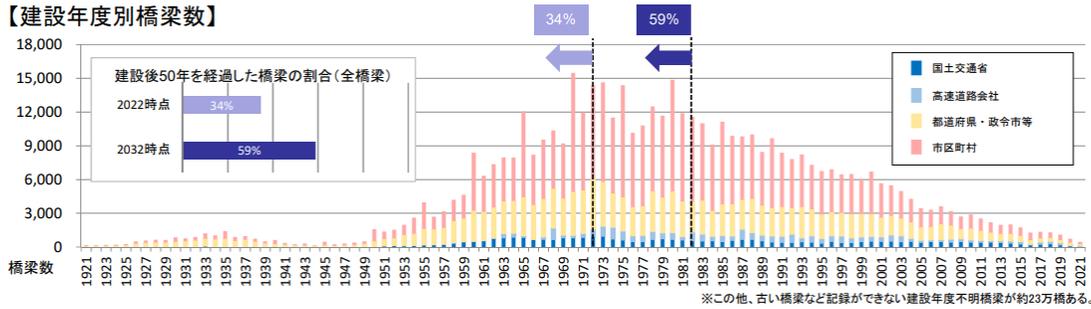


図-1 建設年度別橋梁数

鋼橋の腐食は主に主桁や支承部に発生することが多いが，床版の漏水や下フランジ上面の堆積物などが原因で支間部にも発生する事例が見られる．支間部の腐食は，桁橋の主たる抵抗機能である曲げ強度に大きく影響を及ぼすので，無視できない損傷である．

本研究の目的は，腐食減肉の生じた鋼 I 桁の下フランジの腐食部応力を簡単に求めるため，力のつり合い条件式で求めた値を腐食長さが増加した場合に補正できる補正係数を，FEM 解析を用いて提案することである．

2. 下フランジの腐食部応力の推定方法

腐食部応力を求める方法としては FEM 解析による方法と力のつり合い式による方法という 2 つがある．しかし，FEM 解析には非常に時間がかかるし，力のつり合い条件式には腐食長さを考慮できないという欠点がある．従って，推定式で求める応力と解析結果を基に補正係数の導出を行う．

2.1. 力のつり合い条件式による方法

以下，曲げモーメントを受ける非合成桁の下フランジ応力の推定式のつり合い式による導出を示す．

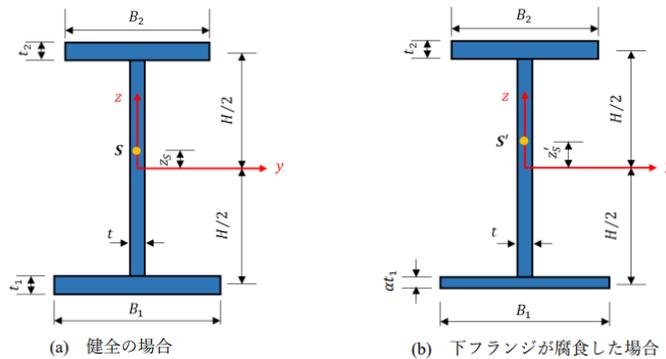


図-2 I 型断面

図-2 のような I 型断面を想定し，下フランジが健全な場合・腐食した場合の応力をそれぞれ「腐食前応力 σ_s 」と「腐食後応力 σ'_s 」とする．また，下フランジが腐食減肉した時，残存率を α とし，下フランジの断面積 A_1 が腐食により αA_1 となるとする．それで，下フランジの腐食前後の応力は次のように求める．

(a) 下フランジが健全な場合 (図-2a)

断面二次モーメントは，

$$I_s = \frac{3\beta_2(2\beta_1+1)^2+3\beta_1(2\beta_2+1)^2+(\beta_1+\beta_2+1)^2+3(\beta_2-\beta_1)^2}{(\beta_1+\beta_2+1)^2} \cdot \frac{A_w H^2}{12} \quad (1)$$

下フランジの健全部応力は，

$$\sigma_s = -\frac{M}{I_s} \times \frac{2\beta_2+1}{\beta_1+\beta_2+1} \times \frac{H}{2} \quad (2)$$

(b) 下フランジが腐食した場合 (図-2b)

断面二次モーメントは，

$$I'_s = \frac{3\beta_2(2\alpha\beta_1+1)^2+3\alpha\beta_1(2\beta_2+1)^2+(\alpha\beta_1+\beta_2+1)^2+3(\beta_2-\alpha\beta_1)^2}{(\alpha\beta_1+\beta_2+1)^2} \cdot \frac{A_w H^2}{12} \quad (3)$$

腐食後の下フランジ応力は，

$$\sigma'_s = -\frac{M}{I'_s} \times \frac{2\beta_2+1}{\alpha\beta_1+\beta_2+1} \times \frac{H}{2} \quad (4)$$

ここで， β_1 と β_2 はそれぞれ下フランジの断面積 (A_1) ・上フランジの断面積 (A_2) のウェブの断面積 (A_w) との比率を表している．以上に示した式では腐食後の応力を求めるが，腐食長さが変化した場合考慮できないので，不十分である．

つきまして，腐食前後の比率は以下のようになり，この式と FEM 解析結果を用いて補正係数を導出する．

$$\frac{\sigma'_s}{\sigma_s} = \frac{\alpha\beta_1+\beta_2+1}{\beta_1+\beta_2+1} \cdot \frac{3\beta_2(2\beta_1+1)^2+3\beta_1(2\beta_2+1)^2+(\beta_1+\beta_2+1)^2+3(\beta_2-\beta_1)^2}{3\beta_2(2\alpha\beta_1+1)^2+3\alpha\beta_1(2\beta_2+1)^2+(\alpha\beta_1+\beta_2+1)^2+3(\beta_2-\alpha\beta_1)^2} \quad (5)$$

2.2. FEM 解析により求める方法

解析対象の橋梁は，単純非合成 I 桁で，断面諸元は道路橋示方書に基づいて設計されたものである．解析にあたり鋼桁部はすべて 4 節点シェル要素でモデル化し，メッシュサイズは 25mm×25mm とした．支点条件は両端部に可動・固定とし，可動側は橋軸方向変位及び橋軸直角軸回りの回転を許容し，固定側では，橋軸直角軸回りの回転のみを許容した．両端部に曲げモーメントを配置し，桁の中央部に腐食減肉が生じ，腐食率は 10% から 90% まで 10% ごとに板厚を減少させるとし，解析を行った．

3. 解析結果

「FEM 解析により求めた腐食後の応力 σ_s^{FEM} 」と「力のつり合い条件式により求めた腐食後の応力 σ'_s 」の比を補正係数 (k) とし，次のように表す．

$$k = \frac{\sigma_s^{FEM}}{\sigma'_s} \quad (6)$$

そこで、FEM 解析を行った結果、以下のようになった。例として、「S-NN-20-G1-1」断面の解析結果を図-3 に示す。

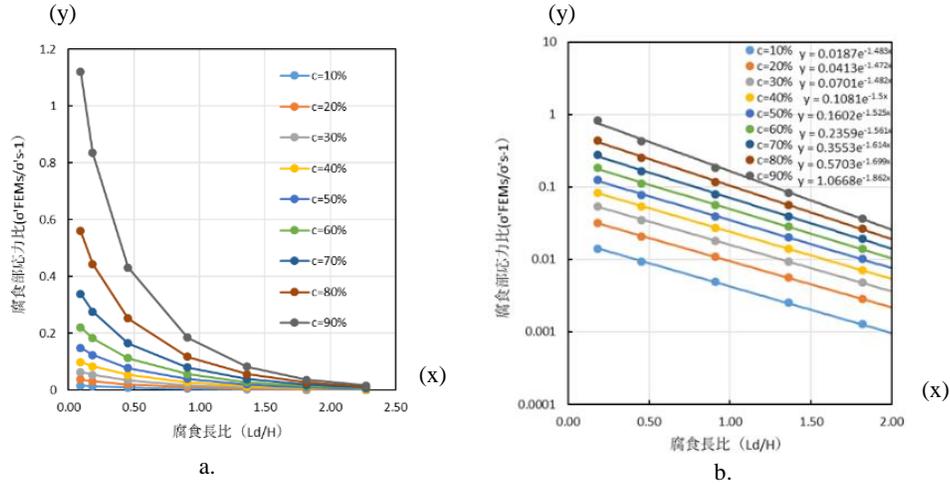


図-3 腐食部応力比と腐食長比の関係 (S-NN-20-G1-1)

従って、全ての断面に対して解析を行い、それぞれの断面について図-3b のような結果を出した。それらの結果により以下のような近似式が得られた。

$$\frac{\sigma'_S{}^{FEM}}{\sigma'_S} - 1 = Ae^{-B\left(\frac{L_d}{H}\right)} \quad (7)$$

よって、以上の式を変形すると、補正係数は次のように表せる。

$$k = Ae^{-B\left(\frac{L_d}{H}\right)} + 1 \quad (8)$$

4. 補正係数の導出

まず、それぞれの得られた近似式によりパラメータ A とパラメータ B にあたる部分の係数を抜き出し、腐食率の関数とすると次のような近似が成り立つ。

$$A = a_1 e^{a_2 c} \quad (9)$$

$$B = b_1 c + b_2 \quad (10)$$

ここで、 c は腐食率で、 a_1, a_2, b_1, b_2 はパラメータである。

次に、図-4 に示す通り、パラメータ a_1, a_2, b_1, b_2 をそれぞれ断面積比 β_1 の関数で表すと以下のようになる。図-4a, b により、

$$a_1 = 0.0123\beta_1^2 - 0.0412\beta_1 + 0.0466 \quad (11)$$

$$a_2 = 0.325\beta_1 + 4.31 \quad (12)$$

なお、図-4c, d により、 b_1 と b_2 の近似式は β_1 と β_2 の大小で異なっていることが分かった。よって、

$$b_1 = 2.1031e^{-1.161\beta_1} \quad (\beta_1 > \beta_2) \quad (13a)$$

$$b_1 = 1.814e^{-0.779\beta_1} \quad (\beta_1 \leq \beta_2) \quad (13b)$$

$$b_2 = -0.1394\beta_1 + 1.4286 \quad (\beta_1 > \beta_2) \quad (14a)$$

$$b_2 = -0.2518\beta_1 + 1.657 \quad (\beta_1 \leq \beta_2) \quad (14b)$$

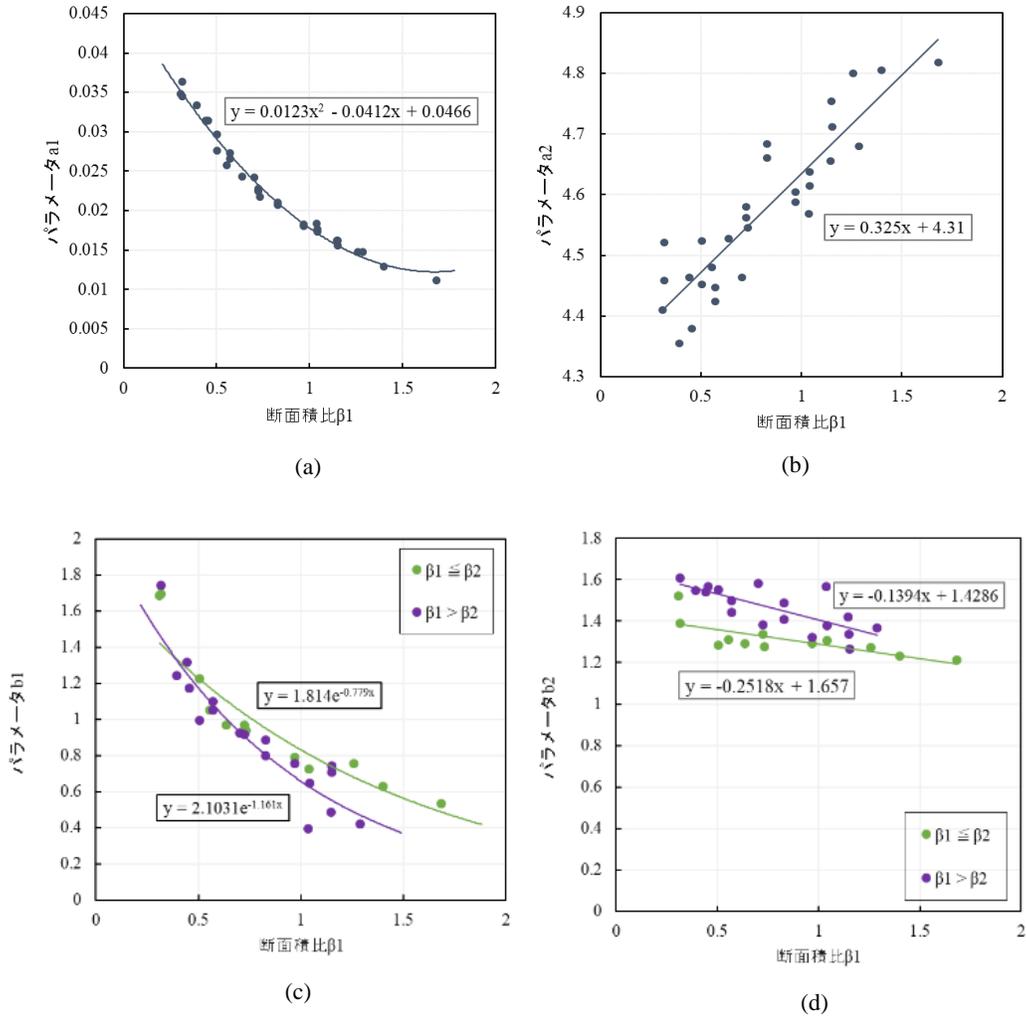


図-4 パラメータ a_1, a_2, b_1, b_2 と β_1 の関係

5. 補正係数の精度

補正係数の精度を検討するため全ての断面に対して誤差を求め、グラフにまとめた。(例：図-5)

$$\text{誤差} = \left| \frac{\text{FEM 解析値}(\sigma_s^{\text{FEM}})}{\text{補正係数}(k) \times \text{腐食部応力}(\sigma'_s)} - 1 \right| \times 100(\%)$$

それで、次のような結果が得られた。まず、全ての断面について腐食長比が 0.50 以上の場合は、腐食率が 90%であるケースの誤差は 9%に達しておらず、腐食率が 80%である時も殆ど 5%を下回っており、それらの以外の腐食率に対して誤差が 3%未満である。一方、腐食長比が 0.50 以下の場合、腐食率が非常に大きい (90%) 場合の誤差は 10%を超えていることが分かった。このような誤差が出た理由とは、FEM 解析では下フランジの健全部と腐食部の境目は不連続的にモデル化されているためであろう。

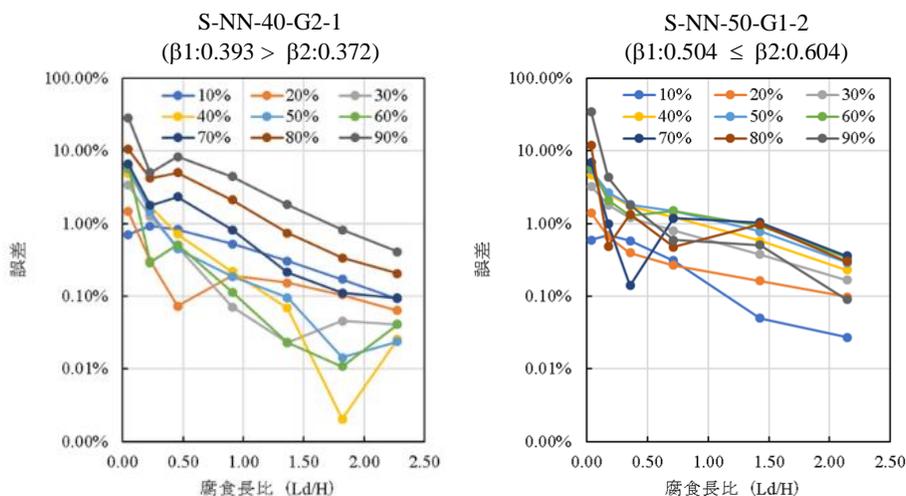


図-5 解析値と補正係数による推定値の誤差（例）

さらに、 $\beta_1 \leq \beta_2$ といった条件に応じる断面の誤差は $\beta_1 > \beta_2$ という条件を満たす断面の誤差に比較すると精度がより高いことが明らかになった。その原因としては、鋼 I 桁の図心の腐食による移動が考えられる。つまり、 $\beta_1 > \beta_2$ のときは図心の移動は大きい、 $\beta_1 \leq \beta_2$ のときは腐食による図心の移動は小さい（図-6）ため 2 つの条件によって精度が異なっているだろう。

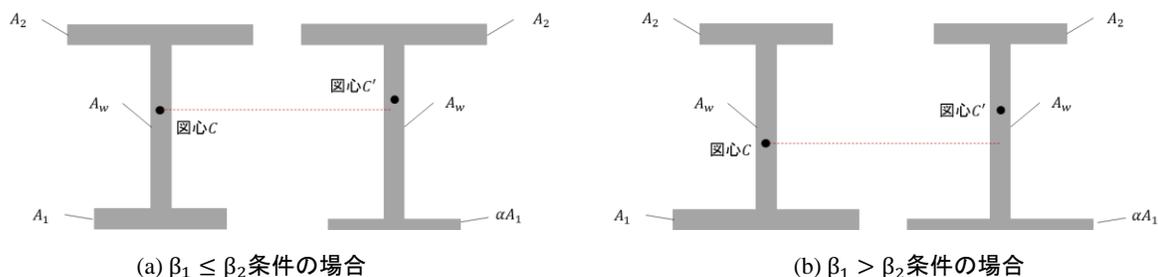


図-6 鋼 I 桁の図心の移動

6. まとめと今後の課題

本研究で、腐食減肉の生じた鋼 I 桁の下フランジの応力の補正係数を提案することを目的として、力のつり合い条件式と FEM 解析の結果を基に、補正係数(k)を導出した。この補正係数を用いて、腐食率及び腐食長さに応じた腐食後の下フランジの応力を推定できる。それは腐食率(c)が非常に大きい、かつ腐食長さ(Ld)が非常に短い場合を除いて妥当と言える。また、 $\beta_1 \leq \beta_2$ という条件を満たす断面に関しては全部の腐食率において、誤差が 2%未満で、精度がもっと高いという結果に至りました。それは、鋼 I 桁の図心の腐食による移動に関連する。さらに、今度の課題として連続非合成桁の場合も補正係数の検討や合成桁に対しての補正係数を提案する必要がある。

【参考文献】：

- 1) 国土交通省：老朽化の現状・老朽化対策の課題，2022
- 2) 土木研究所：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，2009.3