

下フランジに腐食減肉の生じた合成桁の応力の補正方法に関する研究

長岡技術科学大学大学院 学生会員 ○富永 佑輔
長岡技術科学大学大学院 正会員 岩崎 英治

1. 研究背景及び目的

近年、重要な社会基盤構造物の一つである橋梁の経年劣化が進行しており、長期間供用している橋梁の腐食損傷事例が数多く報告されている¹⁾。そのため、適切な維持管理が求められる。最も損傷数の多いのは主桁であり、損傷の原因のほとんどが腐食である。

鋼 I 桁橋における、支間部の腐食は発生する割合は少ないものの、桁橋の主たる抵抗機構である曲げ強度に大きく影響を及ぼすことから、橋梁システムとしての耐荷性能に与える影響は大きく、無視できない損傷のひとつである。

一様な腐食が十分な長さにわたって生じている場合には、力のつり合い条件式により腐食部応力が求められるが、そうでない場合には、腐食部と健全部の境界部近傍での応力分布の乱れにより誤差が生じる。

そこで、つり合い条件式により求めた腐食部の応力に対して、腐食長さが変化した場合の補正係数の提案を行うことが本研究の目的である。非合成桁における研究結果は過去に発表している³⁾。そのため、本文では非合成桁の研究結果を引用し、合成桁を研究対象とする。

2. 腐食が生じた下フランジ応力の推定式

図 1 のような合成桁を想定し、力のつり合い式を用いて健全時の桁中央の下フランジ応力 σ_s と下フランジの腐食による図心の移動を考慮したときの応力 σ'_s の比率を示す。なお、 β_1 、 β_2 、 β_c はそれぞれ下フランジ断面積、上フランジ断面積、床版断面積とウェブ断面積との比であり、 α は腐食部の残存率である。

$$\frac{\sigma'_s}{\sigma_s} = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_c + 1}{\alpha\beta_1 + \beta_2 + \beta_c + 1} \cdot \frac{\delta}{\delta'} \quad (1)$$

この時、

$$\delta = \frac{12\beta_1\beta_2 + 4\beta_1 + 4\beta_2 + 1}{\beta_1 + \beta_2 + 1} + \beta_c\gamma_c^2 + \frac{3\beta_c(\beta_1 + \beta_2 + 1)}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_c + 1} \left(\frac{2\beta_1 + 1}{\beta_1 + \beta_2 + 1} + \gamma_c + 2\gamma_h \right)^2$$

$$\delta' = \frac{12\alpha\beta_1\beta_2 + 4\alpha\beta_1 + 4\beta_2 + 1}{\beta\alpha_1 + \beta_2 + 1} + \beta_c\gamma_c^2 + \frac{3\beta_c(\alpha\beta_1 + \beta_2 + 1)}{\alpha\beta_1 + \beta_2 + \beta_c + 1} \left(\frac{2\alpha\beta_1 + 1}{\alpha\beta_1 + \beta_2 + 1} + \gamma_c + 2\gamma_h \right)^2$$

$$\gamma_c = \frac{H_c}{H} \quad \gamma_h = \frac{H_h}{H}$$

式(1)を用いることで腐食前後の応力変化を確認することができる。しかし、式に腐食長さ L_d は含まれておらず腐食長さは考慮されていない。

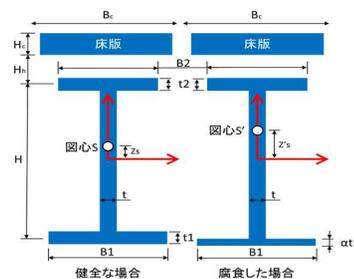


図 1 合成桁の断

3. 解析モデル

既往の研究²⁾において用いられた断面諸元を使用し、FEM 解析を行った。単純合成 I 桁としたケース・連続合成 2 主 I 桁としたケース・非合成桁であるが合成挙動を想定したケースの 3 ケースを想定した。橋軸方向のモデル化範囲は解析時間短縮のため、すべての断面において(ウェブ高さ H)×2+(腐食長さ L_d)とした。部材はすべて 4 節点シェル要素でモデル化し、メッシュサイズは 25×25mm とした。支持条件は片方を可動、もう片方を固定とし、可動側は橋軸方向変位および橋軸直角軸回りの回転を許容、固定側では橋軸直角軸回りの回転のみを許容した。荷重条件は両端部に曲げモーメントが作用するものとした。また、桁の中央部に腐食減肉を再現するために各腐食長さにおいて腐食率 $c(=1-\alpha)$ を 10%から 90%まで 10%ごとに変化させ、解析を行った。

4. 補正係数の導出

4. 1 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、次式のように表す。

$$\text{補正係数 } k = \frac{\sigma_s'^{\text{FE}}}{\sigma_s'} = Ae^{-B\left(\frac{L_d}{H}\right)} + 1 \quad (2)$$

式(2)を変形し、

$$\frac{\sigma_s'^{\text{FEM}}}{\sigma_s'} - 1 = Ae^{-B\left(\frac{L_d}{H}\right)} \quad (3)$$

これを図2にS-NC-40-G1-1²⁾とS-CC-40-G1-1²⁾の解析結果として示す。縦軸の値が0の時、つり合い式の値と解析値が等しいことを表している。各腐食率において腐食長さが長い場合は解析値とつり合い式の値は近づくが腐食長さが短い場合には差が大きく、力のつり合い式で求められる応力では腐食長さが短い場合において不十分であることが分かる。

4.2 補正係数の導出

各断面においてFEM解析を行い、式(3)のパラメータA及びパラメータBを求めて腐食率の関数とすると次式のような関係があることが分かった。

$$A = a_1 e^{-a_2 c} \quad B = b_1 c + b_2$$

ここで、 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 ：パラメータ、 c ：腐食率

また、パラメータ a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 を下フランジとウェブの断面積比 β_1 の関数とし、次に示すような関係となった。パラメータ a_1 、 a_2 においては非合成桁のパラメータ a_1 、 a_2 と同様の傾向をもった関数となったため、パラメータの決定断面に含めることとした。

$$\text{パラメータ } a_1 = a_{11}\beta_1^2 - a_{12}\beta_1 + a_{13}$$

$$\text{パラメータ } a_2 = a_{21}\beta_1 + a_{22}$$

$$\text{パラメータ } b_1 = b_{11}\beta_1 + b_{12}$$

$$\text{パラメータ } b_2 = b_{21}\beta_1 + b_{22}$$

下フランジの応力の補正を行う係数であるため、 β_2 の影響は小さいことから、これは使用せず、 β_1 のみを使用した。

本研究において補正係数 k を導出した断面は断面積比 β_1 、 β_2 の比である β_2/β_1 がおおよそ0.35~1.05の範囲であるため、補正係数 k の適用範囲は $0.35 \leq \beta_2/\beta_1 \leq 1.05$ とする。

4.3 補正係数の誤差

4.2節において導出した式の精度を確かめるために、補正係数を用いた腐食部応力と解析値の誤差を求めた。その結果を図3に示す。

補正係数の決定に使用した断面においても腐食長さが短くなるにつれて誤差が大きくなり、ほとんどの断面で最大の誤差が10%を超える結果となった。しかし、腐食率が50%を超えると健全時の応力の約

2倍の応力が腐食時には作用しており、そのような大きい力が作用する前に補修が行われると思われる。また、腐食率が50%以下の場合にはほとんどの桁において5%以下であるため、問題ないとする。

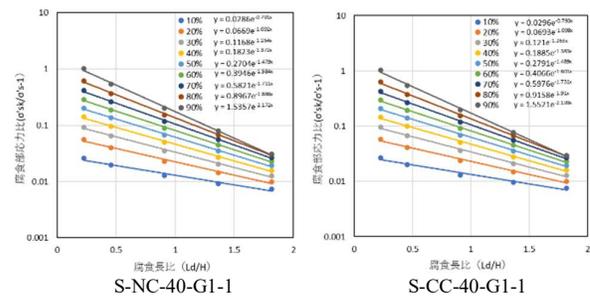


図2 解析結果

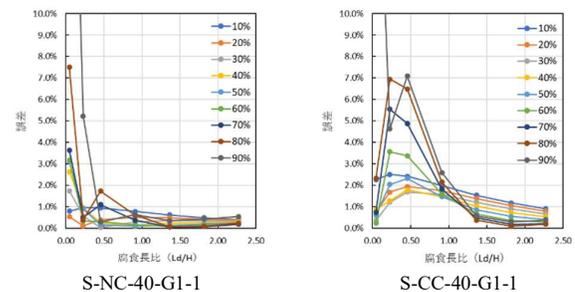


図3 誤差の比較

5. まとめ

合成桁における腐食減肉の生じた下フランジに生じる応力を、力のつり合い条件にもとづく図心の移動を考慮して導出し、補正係数の提案を目的として、有限要素法による解析を行い、その値をもとに補正係数 k を導出した。この補正係数 k は力のつり合い条件式により求めた腐食後の下フランジの応力 σ_s' にかけることによって腐食後の腐食長さに応じた下フランジの応力 σ'_{sk} の推定値を求めることが可能である。

精度に関しては断面によって大きく変わることが分かった。腐食長さが短い場合のみ誤差が大きい断面と、腐食長さが短くなるにつれて徐々に誤差が大きくなる2種類に分かれる結果となった。

参考文献

- 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，pp. 63-80，2021.08
- 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
- 富永佑輔，岩崎英治：下フランジに腐食減肉の生じた鋼I桁の腐食部応力の簡易評価法に関する研究，土木学会全国大会講演概要，2023.9