

# 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

長岡技術科学大学大学院 ○富永佑輔  
長岡技術科学大学大学院 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老朽化が進行しており、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<sup>1)</sup>。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、FEM 解析を用い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。

## 2. 腐食が生じた下フランジ応力の推定式

図 1 のような I 桁を想定したときの非合成桁における下フランジが腐食した場合の腐食後の応力 $\sigma'_s$ と腐食前の応力 $\sigma_s$ の比率の力のつり合い条件式による導出を以下に示す。

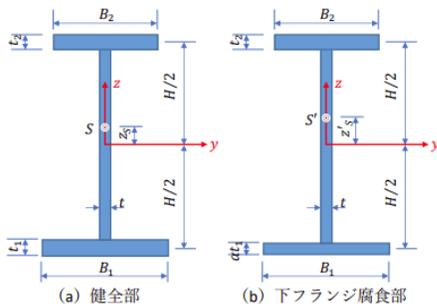


図 1 I 桁断面の諸元

$\beta_1$ を下フランジとウェブとの断面積比、 $\beta_2$ を上フランジとウェブとの断面積比とすると、図心 $z_s$ は次の通りとなる。

$$z_s = \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2 + A_w} \cdot \frac{H}{2} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_1 + \beta_2 + 1} \cdot \frac{H}{2}$$

図心軸回りの断面二次モーメント $I_s$ は

$$I_s = A_2 \left( \frac{H}{2} - z_s \right)^2 + A_1 \left( \frac{H}{2} + z_s \right)^2 + \frac{H^3 t}{12} + H t z_s^2$$

図心軸に曲げモーメント  $M$  が作用したときの下フランジの応力は次の通りとなる。

$$\sigma_s = - \frac{M}{I_s} \cdot \frac{2\beta_2 + 1}{\beta_1 + \beta_2 + 1} \cdot \frac{H}{2}$$

同様に下フランジが腐食減肉した場合の断面二次モーメント $I'_s$ と下フランジの応力 $\sigma'_s$ を求める。この時、残存率を $\alpha$ として断面積 $A_1$ が腐食により、 $\alpha A_1$ に変化したとして求める。

以上より、腐食前後の腐食比率は次の通りとなる。

$$\frac{\sigma'_s}{\sigma_s} = \frac{I_s}{I'_s} \cdot \frac{\beta_1 + \beta_2 + 1}{\alpha\beta_1 + \beta_2 + 1}$$

$I_s$ 、 $I'_s$ を代入し、

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

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。

## 3. 解析モデル

既往の研究<sup>2)</sup>において用いられた断面諸元を使用し、FEM 解析を行った。使用した断面諸元を表 1 に示す。支間長はすべての断面において(ウェブ高さ  $H$ ) $\times 2$ (腐食長さ  $Ld$ )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  $25 \times 25\text{mm}$ 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

表 1 断面諸元(単位: mm)

断面	下フランジ		ウェブ		上フランジ		断面積比	
	幅 B1	厚さ t1	高さ H	厚さ t	幅 B2	厚さ t2	$\beta_1$	$\beta_2$
S-NN-20-G1-1	490	26	1100	9	490	22	1.287	1.089
S-NN-20-G1-2	490	34	1100	9	490	34	1.683	1.683
S-NN-20-G2-2	420	33	1100	9	420	33	1.400	1.400
S-NN-20-G3-2	380	30	1100	9	380	30	1.152	1.152
S-NN-30-G1-1	550	32	1700	9	550	27	1.150	0.971
S-NN-30-G1-2	550	35	1700	9	550	35	1.258	1.258
S-NN-40-G1-3	700	36	2200	11	680	37	1.041	1.040
S-NN-40-G2-1	500	19	2200	11	450	20	0.393	0.372
S-NN-55-G1-4	890	49	3000	15	890	49	0.969	0.969

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 10%から 90%まで 10%ごとに板厚を減少させ，解析を行った．

#### 4. 補正係数の導出

##### 4.1 解析結果

図 2 に S-NN-20-G1-1 の解析結果を示す．縦軸の「腐食部応力比-1」が 0 の時，式(1)で求められる値となることを表している．どの腐食率においても腐食長さが長くなると FEM 解析値は式(1)の値に近づくが，腐食長さが短い場合には差が大きいことが分かる．

FEM 解析により求めた腐食後の応力 $\sigma_s^{FEM}$ と力の

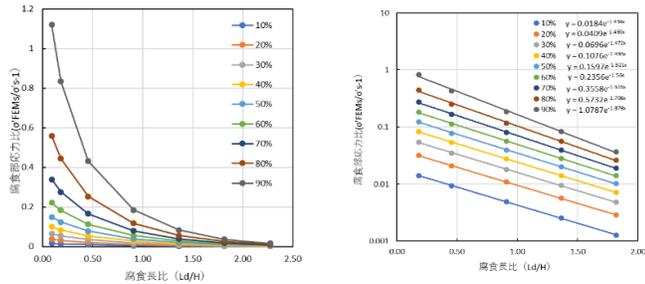


図 2 S-NN-20-G1-1 の腐食部応力比と腐食長さ比の関係(右図：縦軸対数)

つり合い条件式により求めた腐食後の応力 $\sigma_s'$ の比を補正係数  $k$  を，次式のように近似することとする．

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

式(2)を変形し，

$$\frac{\sigma_s^{FEM}}{\sigma_s'} - 1 = Ae^{-B(\frac{Ld}{H})} \quad (3)$$

これを図 2 右図に示す．

##### 4.2 補正係数の導出

表 1 に示した各断面において 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．

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

ここに， $a_1$ ， $a_2$ ， $b_1$ ， $b_2$ ：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

表 2 S-NN-20-G3-1 の推定式と解析値の誤差

腐食率 \ 腐食長さ比	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
0.09	0.8%	0.1%	0.7%	0.9%	0.5%	0.5%	1.6%	0.8%	10.7%
0.18	0.7%	0.1%	0.4%	0.5%	0.0%	1.1%	2.7%	3.3%	2.4%
0.45	0.6%	0.1%	0.2%	0.2%	0.1%	1.0%	2.3%	3.7%	3.3%
0.91	0.3%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.6%	1.3%	1.8%
1.36	0.2%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.3%	0.8%
1.82	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.4%
2.27	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%

ウェブの断面積比  $\beta_1$  の関数とすると次に示すような関係となる．下フランジの応力の補正を行う係数であるため， $\beta_2$  は使用せず， $\beta_1$  のみを使用した．

$$a_1 = -0.0175\beta_1 + 0.0372$$

$$a_2 = 0.3895\beta_1 + 4.208$$

$$b_1 = -0.4606\beta_1 + 1.2807$$

$$b_2 = -0.3445\beta_1 + 1.6747$$

##### 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，新たに「S-NN-G3-1」断面の解析を行い， $\sigma_s^{FEM}/\sigma_s'$  の値を求め，4.2 節において求められた式を用いて，FEM 解析値との誤差を求めた．その結果を表 2 に示す．また，S-NN-G3-1 の断面諸元を表 3 に示す．

表 3 S-NN-G3-1 の断面諸元

下フランジ		ウェブ		上フランジ		断面積比	
B1	t1	H	t	B2	t2	$\beta_1$	$\beta_2$
490	26	1100	9	490	22	1.287	1.089

表 2 から補正係数の導出に用いていない断面において，4.2 節において導出した式を用いても大きな誤差がないことが分かる．また，大きな誤差が出ているのは腐食率 90% で腐食長さが非常に短い場合である．このような条件が満たされることは無いと思われるため，問題ないと考えられる．

#### 5. まとめ

腐食減肉の生じた下フランジに生じる応力の補正係数の提案を目的として，構造力学にもとづく図心の移動を考慮した推定式を導出し，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 $\sigma_s$ をかけることで腐食後の腐食率に応じた下フランジの応力 $\sigma_s'$ の推定値を求めることが可能である．精度の関しても問題ないと思われる．

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