

# 腐食減肉の生じた鋼 I 桁の応力特性に関する研究

環境社会基盤工学専攻修士 2 年 DO ANH TIEN

指導教員 岩崎 英治

## 1. 研究背景

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>。今後、建設後 50 年以上経過する橋梁の割合は加速度的に高くなり、補修・補強費用は確実に増加していくことが予想される。したがって、適切な維持管理が求められる。現在、最も損傷数の多いのは「主桁」、次に「支承」の順となっている。また、損傷の種類としてはほとんどが腐食となっていることが判る。

鋼 I 桁橋における、支間部の腐食は、桁端部の腐食に比べて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。しかし、これまで主桁の支間部に腐食が生じた鋼 I 桁橋の下フランジを対象として残存耐荷力に関する研究事例は数少ない。

## 2. 研究目的

本研究の目的は、腐食部の応力を推定するための基礎的な研究として、下フランジに腐食が生じた鋼 I 桁橋に対する応力特性の実用推定式を提案することである。初めに、曲げモーメントを受ける非合成桁（鋼桁のみ）と合成桁（床版と鋼桁）の 2 つの場合について、腐食した下フランジの応力を推定する式を導出する。次に、推定式の妥当性を確認するために、下フランジに腐食が生じた鋼 I 桁を再現した有限要素（FEM）解析を実施する。最後に、結果を比べて

結論を示す。

## 3. 腐食が生じた下フランジの応力を算出する推定式の導出

### 3.1 非合成桁の場合

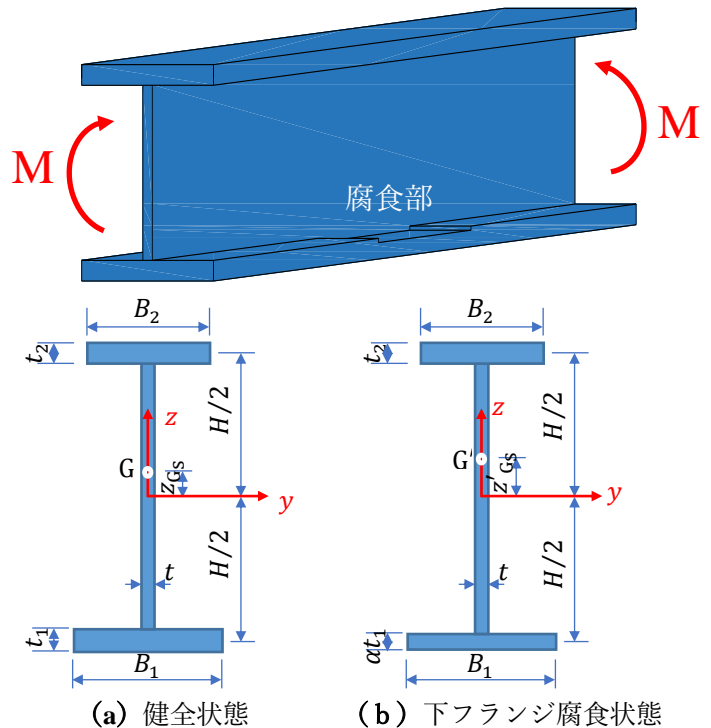


図-1 I 型断面

非合成桁の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 $\sigma_s$ の比率は、次式になる。

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

ここに、 $\beta_1$ と $\beta_2$ はそれぞれ鋼桁の下フランジおよび上フランジのウェブに対する断面積比、 $\alpha$ は下フランジの腐食による残存率である。

### 3.2 合成桁の場合

合成桁の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 $\sigma_s$ の比率は、次式になる。

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

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

式(3)の $\beta_1$ を $\alpha\beta_1$ で置換すると $\delta'$ の式を得る。

ここに、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\alpha$ は上述と同じで、 $\beta_c$ は床版とウェブとの断面積比、 $\gamma_c$ と $\gamma_h$ はそれぞれ床版およびハンチの高さとウェブ高さとの比率である。

#### 4. 下フランジに腐食が生じた鋼 I 桁を再現した FEM 解析

既往の研究<sup>2)</sup>を用いられた、実橋の寸法と近い断面諸元を使用し、FEM 解析を実施した。非合成桁の場合には、S-NN-20-G2-2（支間長 20m、上フランジ 420x33mm、ウェブ 1100x9mm、下フランジ 420x33mm）と、S-NN-50-G2-1（支間長 20 m、上フランジ 570x18mm、ウェブ 2800x14mm、下フランジ 620x20mm）の2つのモデルを使用した。合成桁の場合には、S-NC-40-G1-1（支間長 40m、上フランジ 680x27mm、ウェブ 2200x11mm、下フランジ 700x22mm、床版 2508x250mm、ハンチの高さ 80mm）のモデルを使用した。解析にあたり部材はすべて 4 節点シェル要素でモデル化し、サイズは 25x25mm 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およ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た。桁の中央部に腐食減肉が生じ、腐食時として 30%と 50%と 70%減厚をパラメータとして解析した。腐食長の影響を確認するため、腐食長とウェブ高さとの比率をパラメータとして解析した。

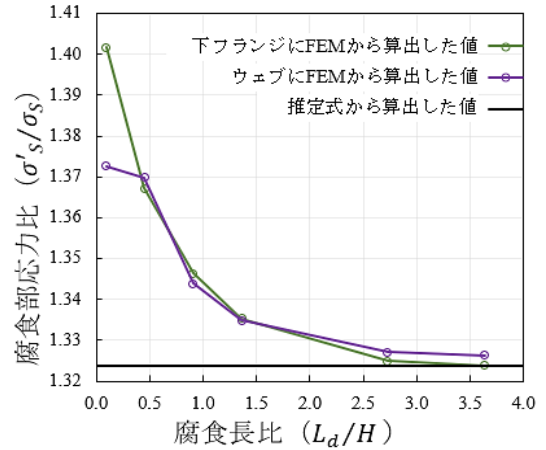


図-2 S-NN-20-G2-2 の結果  
(残存率 $\alpha = 0.7$ )

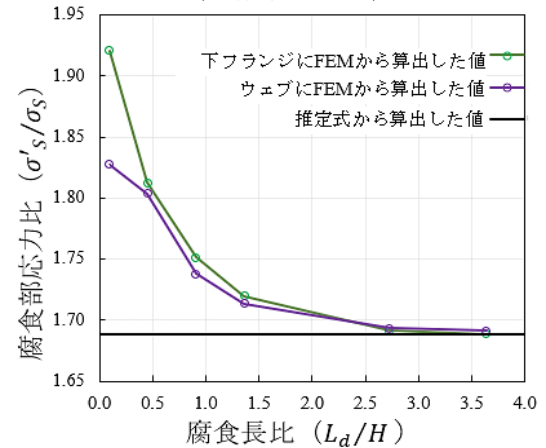


図-3 S-NN-20-G2-2 の結果  
(残存率 $\alpha = 0.5$ )

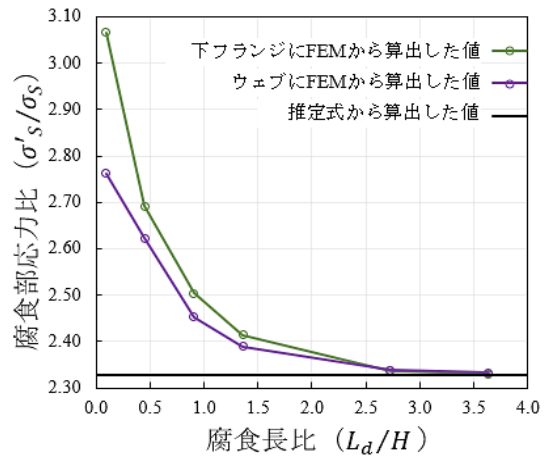


図-4 S-NN-20-G2-2 の結果  
(残存率 $\alpha = 0.3$ )

図-2 から図-4 に、非合成桁の S-NN-20-G2-2 モデルについて、腐食長と残存率の変化による、支間中央におけるウェブ下部の応力と下フランジの平均応力を示す。図から、支間中央の応力は、腐食長さ  $L_d$  が大きくなると、推定式から算出した値に収束することが分かる。一方、腐食長さが小さい場合には、腐食部の応力は、推定式から算出した値よりも大きくなる。また、下フランジの残存率が 0.7, 0.5, 0.3 に変わると、誤差が大きくなるが、収束のは同様であることが分かる。

同様に、非合成桁の S-NN-50-G2-1 モデルと合成桁の S-NC-40-G1-1 モデルの解析を実施した (図-5, 図-6)。結果は上述と同様である。

### 5. 推定式の高精度化

腐食長とウェブ高さとの比率が 2.5 以下の推定値は誤差が大きいことが分かった。そこで、推定の精度を上げる方法として、推定値を補正する方法を検討した。補正した腐食後の応力  $\sigma'_{s_k}$  と補正係数  $k$  を次式に示す。

$$\sigma'_{s_k} = \sigma'_s / k \quad (4)$$

非合成桁の場合は、

$$k = 0.96 \times \left(\frac{L_d}{H}\right)^{0.072 \times \frac{1-\alpha}{\beta \xi}} + \frac{0.07\alpha\beta_1}{1-\alpha} \quad (5)$$

合成桁の場合は、

$$k = 0.96 \times \left(\frac{L_d}{H}\right)^{0.56 \times \frac{1-\alpha}{\beta \beta_c \xi}} + \frac{0.07\alpha\beta_1}{1-\alpha} + 0.5(\gamma_c + \gamma_h) + 0.125\alpha - 0.1625 \quad (6)$$

ここに、 $\bar{\beta}$  は上下フランジとウェブの断面積比  $\alpha\beta_1$  と  $\beta_2$  の平均値、 $\xi$  はウェブ高さ 1.1m に対して現在の調査対象の高さの比率である。

補正した結果は図-7 から図-9 に示す。推定式から算出した平均応力の精度が良く推定できる。

### 6. 結論

本研究から得られた知見を以下に示す。

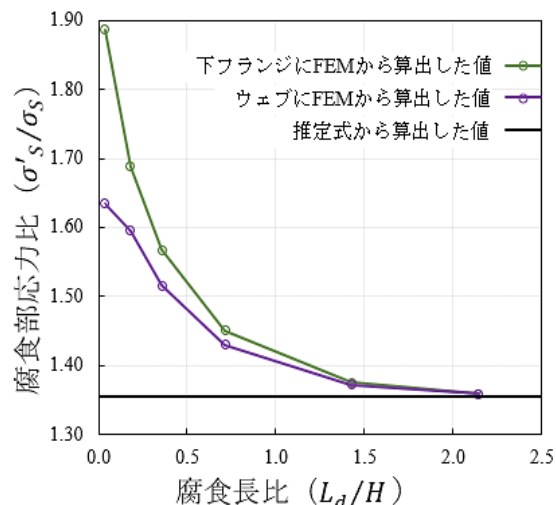


図-5 S-NN-50-G2-1 の結果  
(残存率  $\alpha = 0.5$ )

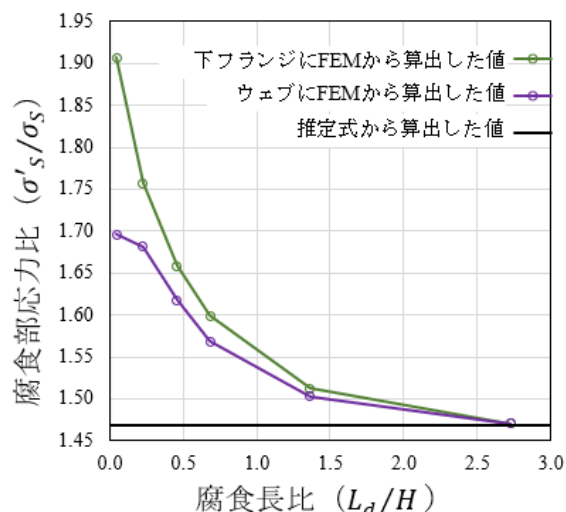


図-6 S-NC-40-G1-1 の結果  
(残存率  $\alpha = 0.5$ )

- ・非合成桁の場合でも合成桁の場合でも、支間中央の応力は、腐食長さが大きくなると、推定式から算出した値に収束する。また、腐食長さが小さい場合には、腐食部の応力は、推定式から算出した値よりも大きくなり、下フランジの残存率が小さくなると、誤差が大きくなる。しかし、変化の傾向が同様である。

- ・補正係数  $k$  を用いることで、提案した腐食部の推定平均応力と有限要素解析結果との誤差を小

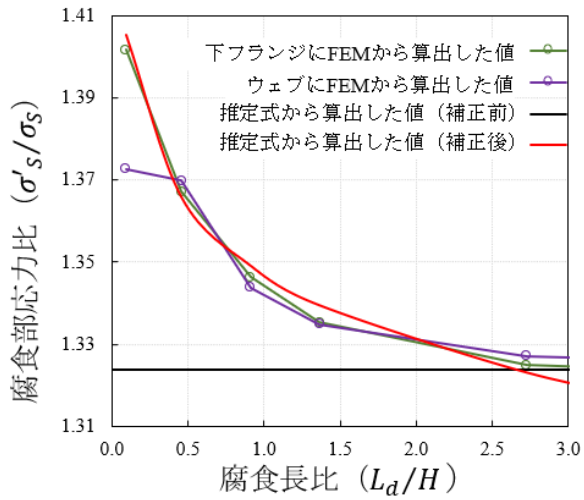


図-7 S-NN-20-G2-2 の補正した結果 (残存率 $\alpha = 0.7$ )

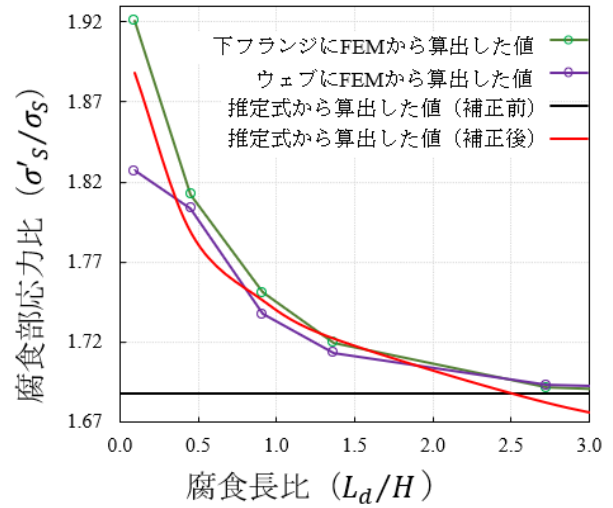


図-8 S-NN-20-G2-2 の補正した結果 (残存率 $\alpha = 0.5$ )

さくできることを示した。

本研究では，腐食減肉の生じた下フランジの応力特性の実用推定式を提案したが，推定式の妥当性を確認するために 3 つのモデルを検討した。今後，他のモデルでも検証が必要と考えられる。参考文献：

- 1) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，pp. 63-80，2021.08
- 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

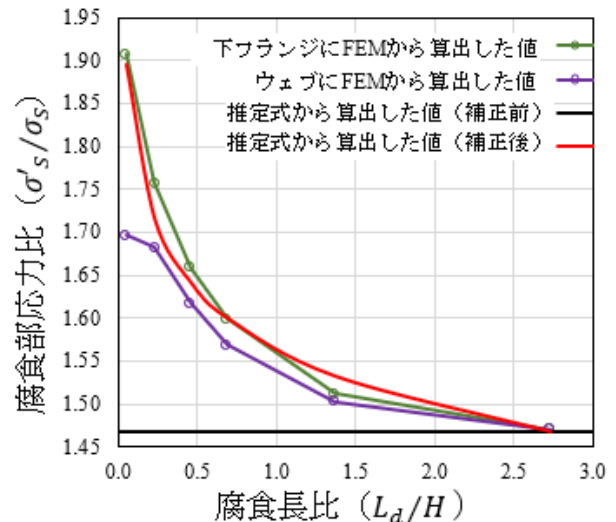


図-9 S-NC-40-G1-1 の補正した結果 (残存率 $\alpha = 0.5$ )