# 第I部門

### 1. はじめに

鋼構造物では腐食損傷が数多く報告されている.鋼I桁で は桁端部の腐食が多いが,支間部においても排水直下の下フ ランジなどに腐食が生じている.下フランジの腐食は,曲げ 強度に大きく影響を与える損傷である.文献1)では,下フ ランジの断面欠損量が同じであっても,断面欠損の長さに応 じて,断面欠損した下フランジに生じる応力が変化し,断面 欠損部の断面2次モーメントを用いた応力より高くなる場 合があることが明らかにされている.さらに,上フランジ, ウェブおよび下フランジの断面積と断面欠損の長さを考慮 した補正係数で応力を推定する方法が提案されている.

本研究では、断面欠損を有する鋼I桁下フランジについて 有限要素解析(以下, FEM 解析)を行い、断面欠損した下フラ ンジの分担軸力を算出する.そして、鋼I桁のウェブと下フ ランジの接合部において両者の断面力が伝達される状態を 弾性バネでモデル化し、解析結果との比較から一定のバネ定 数を与える事で、様々な寸法の鋼I桁下フランジ断面欠損部 に生じる分担軸力の簡易的推定法を提案する.

### 2. FEM 解析

本研究では汎用の有限要素解析ソフト MARC を用いて線 形有限要素解析を行い、下フランジ断面欠損部および健全部 の断面力を評価する.解析モデルは対称性を考慮して 1/4 モ デルとした.載荷荷重は等曲げ区間の健全な桁の下フランジ の縁応力  $\sigma_{LFL}$ が 100 N/mm<sup>2</sup>となるように図-1の載荷位置に P/2=164 kN を与えた.桁のヤング係数は  $E_S=200$  kN/mm<sup>2</sup>, ポアソン比は v = 0.3 とした.解析モデルの寸法の一例を図 -1 に示す.補剛材厚は 16 mm とした.下フランジ中央の断 面欠損の条件として,残存板厚量  $t_{Sd} / t_{Sn}$ を 0.25, 0.5, 0.75, 断面欠損長  $2l_d$  (mm)を 40, 80, 200, 400 に変化させた.ここ で,  $t_{Sn}$ は健全な板厚であり、 $t_{Sd}$ は残存板厚である.また,断 面欠損に対して,欠損部がウェブと結合している場合(A)と 分断されている場合(B)の解析を行うこととした.

# 3. 断面力の推定式の導出

図-2に鋼I桁の下フランジおよびウェブと上フランジに 生じる分担断面力を示す.下フランジとウェブの分担断面力 の伝達を簡易的に評価するために,両者の結合を連続した弾



性バネ(バネ定数 k)でモデル化している.下フランジとウェ ブとの間に水平ずれ δ と単位長さ当たりの水平せん断力 H がフックの法則に従うと仮定することで下フランジの断面 力 N<sub>LFi</sub>(x<sub>i</sub>)に関する微分方程式が次式で与えられる.

$$\frac{d^2 N_{LFi}(x_i)}{dx^2} - \lambda_i^2 N_{LFi}(x_i) = -\gamma_i M \tag{1}$$
$$\lambda_i = \sqrt{\frac{I_{vi}\gamma_i}{a_{LFi}A_{LFi}}}, \quad \gamma_i = \frac{k_i a_i}{E_S(I_{LFi} + I_{UFW})}$$

ここに、M:作用曲げモーメント、 $A_{LFi}$ 、 $A_{UFW}$ : それぞれ下フ ランジおよび上フランジとウェブからなる部材の断面積、  $I_{LFi}$ 、 $I_{UFW}$ : それぞれ下フランジおよび上フランジとウェブか らなる部材の断面 2 次モーメント、 $x_i$ :下フランジの断面欠 損位置に応じた距離(**図**-2)、 $a_i$ :下フランジ図心と上フラン ジとウェブからなる部材の図心の間の距離、 $a_{LFi}$ 、 $a_{UFW}$ :鋼I 桁断面の図心から、それぞれ下フランジ図心および上フラン ジとウェブからなる部材の図心までの距離、 $l_i$ :対象区間の 片側長さ.ただし、iは欠損部( $0 \le x_d \le l_d$ )でi = d、健全部 ( $0 \le x_n \le l_n$ )でi = n とする.

式(1)から、欠損部および健全部における下フランジの断面力 *N<sub>LF</sub>(x<sub>i</sub>*)の一般解が次式で与えられる.

$$N_{LFi}(x_{i}) = \begin{cases} A_{11} \cosh(\lambda_{n} x_{n}) + A_{12} \sinh(\lambda_{n} x_{n}) + \gamma_{n} M / \lambda_{n}^{2} \\ (0 \le x_{n} \le l_{n}) \\ A_{21} \cosh(\lambda_{d} x_{d}) + A_{22} \sinh(\lambda_{d} x_{d}) + \gamma_{d} M / \lambda_{d}^{2} \\ (0 \le x_{d} \le l_{d}) \end{cases}$$
(2)



ここに, A11~A22: 未定係数である.

式(2)に対して、 $x_n = l_n$ で下フランジの分担軸力 $N_{LFI}(x_n = l_n)$ が、健全部に曲げモーメントMが作用した際の下フランジの分担軸力 $N_{LFvn}$ と等しくなる条件、断面欠損部と健全部の境界( $x_d = l_d$ および $x_n = 0$ )で下フランジの分担軸力が連続し、弾性バネ変位が連続する条件、鋼I桁中央( $x_d = 0$ )が0となる条件から次式で未定係数 $A_{11}$ ~ $A_{22}$ が与えられる.

$$A = B^{-1}F \tag{3}$$

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}^{\prime}$$
(4)

$$F = \left(0 \quad \gamma_d M / \lambda_d^2 - \gamma_n M / \lambda_n^2 \quad 0 \quad 0\right)^T \tag{5}$$

ここに、*B*は各成分が*b*<sub>11</sub>=cosh( $\lambda_n l_n$ ), *b*<sub>12</sub>=sinh( $\lambda_n l_n$ ), *b*<sub>21</sub>=1, *b*<sub>23</sub>=-cosh( $\lambda_d d_n$ ), *b*<sub>24</sub>=-sinh( $\lambda_d d_n$ ), *b*<sub>32</sub>= $\lambda_n k_n$ , *b*<sub>33</sub>=- $\lambda_d sinh(\lambda_d d_n)$ / *k<sub>d</sub>*, *b*<sub>34</sub>=- $\lambda_d cosh(\lambda_d d_n)/k_d$ , *b*<sub>44</sub>= $\lambda_d$ , その他の成分が0となる 4×4 の行列である. CFRP 接着された鋼桁のせん断遅れ理論 <sup>2)</sup> との比較からバネ定数 *k<sub>n</sub>* は, 鋼のせん断弾性係数 *G<sub>S</sub>* と *k<sub>n</sub>* =*Gsb<sub>W</sub>*/*h* の関係がある. ここに、*b<sub>W</sub>*: ウェブ板厚, *h*: せん 断力に影響する範囲である. ただし, せん断力に影響する範 囲は、本研究では 100 mm として、一定の *k<sub>n</sub>* = 8 kN/mm<sup>2</sup>を 用いることとした. 断面欠損が生じてもウェブと下フランジ が結合されている場合(A), 断面欠損部のバネ定数 *k<sub>d</sub>* も *k<sub>n</sub>* と同じ値を用いた. 断面欠損部で、ウェブと下フランジが分 断されている場合(B), 断面力が伝達されないのでバネ定数 を非常に小さな値(*k<sub>d</sub>*=1.0×10<sup>3</sup> kN/mm<sup>2</sup>)とした.

# 4. 解析値と推定値の比較

図-3 に曲げモーメントを受ける鋼I桁下フランジ断面欠 損部と健全部の下フランジの分担軸力の分布を示す. 図-3 の縦軸は下フランジの分担軸力の解析値 NLF(FEM)と推定値 NLF(x)を鋼 I 桁の健全部に曲げモーメント M が作用した際 の下フランジの分担軸力 NLFm で無次元化している.また, 図には断面欠損後の位置の鋼I桁の断面2次モーメントを用 いて算出した下フランジの分担軸力 NLFvi の分布も破線で 示している. 図-3から断面欠損部は断面積が小さくなって いるので、分担軸力が小さくなっていることがわかる.また、 FEM 解析結果から得られる下フランジの軸力は断面欠損長 4に依存して変化するが、鋼I桁の断面欠損部の断面2次モ ーメントを用いて算出した下フランジの分担軸力 NiFy は、 断面欠損部と健全部でそれぞれ一定の値となる.他方,式(2) のNLFi(xi)は,FEM 解析結果と同様に、断面欠損長しに応じ て変化する下フランジの分担軸力となっていることがわか る. 図-4 に、縦軸に FEM 解析で得られた断面欠損部の下 フランジの分担軸力 N<sub>LF</sub>(FEM), 横軸に式(2)の N<sub>LFd</sub>(x<sub>d</sub> = 0)あ



るいは断面欠損位置の鋼I桁の断面2次モーメントを用いて 算出した断面欠損部の下フランジの分担軸力 $N_{LFvd}$ の関係を 示す. 両軸は鋼I桁の健全部に曲げモーメントMが作用し た際の下フランジの分担軸力 $N_{LFvn}$ で無次元化している. 図 -4から、 $N_{LFvd}$ は断面欠損長さに依存しない一定の値となる ため、FEM 解析結果 $N_{LFd}$ (FEM)と異なる場合があることがわ かる.しかし、式(2)の $N_{LFd}(x_d=0)$ は、FEM 解析結果 $N_{LFd}$ (FEM) との誤差が±10%以下であることがわかる.また、いくつか の残存板厚が薄いモデル(残存板厚量 $t_{Sd}/t_{Sn}=0.25$ )以外は ±5%以下で推定できていることがわかる.したがって、式(2) の鋼I桁下フランジ断面欠損部の分担軸力は、FEM 解析結 果と同程度であると言える.

#### 5. まとめ

本研究では、鋼I桁下フランジ断面欠損部の分担軸力を簡 易的に評価する推定式を与えた.推定式を用いて、FEM 解 析結果と同程度の下フランジの分担軸力を推定できた.

#### 参考文献

- 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,土木学会年次 学術講演会講演概要集,第78回,1-141,2023.
- 石川敏之: プレストレスが導入された CFRP 板接着鋼部材のは く離曲げモーメント,構造工学論文集, Vol.56A, pp.991-998, 2010.