コンクリート境界部で腐食した鋼構造部材の応力集中係数の評価・予測方法

(株) 東京鐵骨橋梁 正会員 〇細見 直史 九州大学 正会員 貝沼 重信

1. はじめに 下路トラス橋の斜材では、斜材がコンクリート床版との境界部に局所的かつ急速に進行する マクロセル腐食が生じる¹⁾.境界部にマクロセル腐食が生じると、断面欠損に加え著しい局部腐食による応 力集中が生じる. そのため, この応力集中部から疲労き裂が発生・進展することで斜材が破断することが懸 念される.これまで,著者らは境界部の腐食特性や疲労挙動について検討してきた¹⁾⁻³⁾.本研究では腐食後の 試験体および数値シミュレーションによる腐食表面性状のFEM応力解析を行なった. その結果に基づき, 鋼 構造部材の腐食劣化における経時的な腐食表面性状に対する応力集中係数の評価・予測手法を検討した.

2. 腐食数値シミュレーション²⁾ 境界部の経時的な腐食挙動を明らかにするため,図-1のJIS 1A 号試験片 にコンクリートを巻きたてたモデル試験体の腐食促進試験を行なった¹⁾.腐食サイクルにはS6-cycleを用い, その繰返し回数は 600cycle 毎に 600cycle から 2,400cycle とした. 腐食表面性状の数値シミュレーションは, 腐食させた試験体から抽出した腐食表面性状の各種統計量(平均腐食深さ、レンジおよびシル)を用いて行 なった²⁾. この数値シミュレーションにより, S6-cycle による腐食深さの経時性と空間的自己相関を考慮し た S6-2400cycle から 9600cycle に相当する腐食表面性状を生成した.

3. FEM応力解析³⁾ 腐食後の試験体¹⁾と数値シミュレー ションによる腐食表面性状²⁾の応力分布,およびこれら の板厚が変わった場合の応力性状を求めるため, FEM解 析を行なった.解析モデルは境界線から露出部側に 40mmの範囲をモデル化した.要素には8節点ソリッド要 素を用いた.境界条件は一端を固定とし、一端に9.8MPa の等分布荷重を作用させた. 解析モデルの要素分割例を 図-2に示す. 最小要素寸法は, 0.4×0.4×0.4mmとした.

4. 応力集中係数の評価・予測 鋼構造部材の残存板 厚が応力集中係数に及ぼす影響を検討するため,腐食前 の板厚tを100, 50, 25, 16, 11, 9および8mmに変化さ せてFEM解析を行なった.

腐食させた試験体における腐食前の板厚の逆数と総 断面の最大応力集中係数の関係を図-3(a)に示す.総断 面の最大応力集中係数K_{t(g),max}は,腐食前の断面の公称応 力に対する最大応力の比で定義した. $K_{t(g),max}$ は板厚が薄 くなるにしたがい大きくなっており, n_cの増加に伴い著

R

純断面の最大応力集中係数

0.15

12

100 100 60 コンクリート 90 65 R25 板厚:9mm





(a) 総断面

腐食前の板厚の逆数 1/t (mm⁻¹)

0.1

1

総断面の最大応力集中係数 Kutshmax

0

腐食サイクル数

0.05

▲4800 → 9600

(S6- cycles)

(b) 純断面

(c) 残存板厚の影響



キーワード 腐食、応力集中、鋼構造部材、コンクリート、境界部 連絡先 〒302-0038 茨城県取手市下高井 1020 (株) 東京鐵骨橋梁 橋梁事業本部 TEL 0297-78-5344

1-027



しく増加している.これは, n_cが増加するほど断面減少による公称応力の増加が大きくなるためと考えられる.そこで,最大応力集中係数を腐食後の平均断面の公称応力に対する最大応力の比で定義することで,板 厚減少を考慮した純断面の最大応力集中係数 K_{((n),max}を検討する.

図-3(b)に腐食後の板幅方向平均板厚の逆数 $1/t_d$ と純断面の最大応力集中係数 $K_{t(n),max}$ の関係を示す. 図中の実線は、 $1/t_d$ と $K_{t(n),max}$ の回帰直線である. $K_{t(n),max}$ は板厚減少による公称応力の増加の影響を取り除くことで、 n_c によらず板厚が薄くなるにつれ線形増加の傾向にある. 図中の回帰直線の切片は、 t_d が無限大の場合の $K_{t(n),max}$ を示すことから、残存板厚の影響を受けない腐食表面形状のみによる応力集中係数(以下、腐食表面形状による最大応力集中係数 $K_{t(gcp),max}$ と呼ぶ.)を表すものと考えられる. 一方、回帰直線の係数(以下、残存板厚係数αと呼ぶ.)は、腐食後の残存板厚による応力集中係数を定める定数を表すものと考えられる. ここでは、 $K_{t(n),max}$ を $K_{t(gcp),max}$ で無次元化することで、残存板厚による最大応力集中係数 $K_{t(pt),max}$ を定義する.

$$K_{t(n),max} = K_{t(gcp),max} \times K_{t(pt),max} \quad -----(1), \qquad \qquad K_{t(pt),max} = \alpha/t_d + 1 \quad -----(2)$$

K_{t(n),max}:純断面の最大応力集中係数,K_{t(gcp),max}:腐食表面形状による最大応力集中係数, K_{t(nt),max}:残存板厚による最大応力集中係数,α:残存板厚係数,t_d:腐食後の板幅方向の平均板厚(mm)

 $1/t_d \ge K_{t(pt),max}$ の関係を図-3(c)に示す.また,腐食表面に生じる腐食孔とその切欠き底部に発生する最大応力の概略図を図-4 に示す. $K_{t(pt),max}$ の α は, n_c が増加するにしたがって大きくなっている.これは,腐食が進むことで切欠き底部の残存板厚が小さくなるためと考えられる.図-3 から,鋼構造部材の腐食表面に生じる腐食孔の切欠き底部に発生する最大応力集中係数は,1)平均腐食深さ dc による公称応力の増加,2)腐食表面形状のみによる応力集中,3)残存板厚による応力集中,の影響を受けるものと考えられる.

S6-cycle 数 n_c と腐食表面形状による最大応力集中係数 $K_{t(gcp),max}$ の関係を図-5(a)に示す. 試験とシミュレーション結果は一致しており、シミュレーションは試験結果を良く再現している. シミュレーションおよび 促進試験による $K_{t(gcp),max}$ は、若干ばらついているものの、 n_c とほぼ累乗関係にある. $K_{t(gcp),max}$ は n_c が増加し た場合も3程度となっている. そのため、腐食が進行しても腐食孔の幅以上に腐食深さが大きくなりにくい 傾向にあると考えられる. 図-5(b)に n_c と残存板厚係数 α の関係を示す. シミュレーションおよび試験による α は、 n_c が増加するにしたがいばらつきが大きくなる傾向にあるものの、 n_c とほぼ線形関係にある.

以上から、図-5の図中に示す回帰式を用いることで、境界部を有する鋼構造部材の任意の板厚に対する応力集中係数を S6-cycle 数に基づいて簡易に評価・予測できると考えられる.なお、S6-cycle 数と実環境における構造物の供用年数との関係は、文献 1)で示している.

5. まとめ 最大応力集中係数に及ぼす各種パラメータ(腐食表面形状による最大応力集中係数,および残存板厚係数)と S6-cycle 数の関係を明らかにした.また,コンクリート境界部を有する鋼構造部材に対する 最大応力集中係数の評価・予測方法を提案した.

参考文献 1) 貝沼重信,細見直史,金仁泰,伊藤義人:鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動に関する研究,土木学会 論文集, No.780/I-70, pp.97-114. 2005., 2) 貝沼重信,細見直史:鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的腐食表面性状の数値シミュ レーション,土木学会論文集 A, Vol.6, No.2, pp.440-453, 2006., 3)細見直史,貝沼重信:コンクリート境界部で腐食した鋼構造部材の疲労挙 動に関する基礎的研究,土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, 2008.