

## 腐食進展予測モデルを用いた模擬局所腐食表面の生成と耐荷力低下予測

徳山工業高等専門学校 学生会員 ○丸橋 憲伸  
中電技術コンサルタント 正会員 川見 周平

徳山工業高等専門学校 正会員 海田 辰将  
ショーボンド建設 正会員 寺西 冨映

## 1. はじめに

鋼橋における腐食は部材全体あるいは橋梁全体の視点から見ると極めて局所的かつ構造が複雑な箇所において進展するケースが多いものの、その根本的な腐食原因を取り除き、腐食環境を改善することは容易ではない。

また、局所腐食の場合には腐食領域の中でも場所的な偏りを持って減肉することから鋼表面における凹凸の差が比較的大きく、孔食や断面欠損に発展しやすいため、定期点検の結果から腐食の特徴を把握し、腐食進展と残存耐荷力の将来的な低下量を予測することが重要である。

そこで本研究では、腐食の場所的な偏りを表現するための確率分布形を考慮した腐食進展予測モデル<sup>1),2)</sup>を用いて実際の局所腐食損傷を数値的に模擬することを試みる。また、約20年間供用後に撤去された耐候性H形鋼の局所腐食を模擬した解析モデルの曲げ耐荷力解析を行い、現有耐荷力に関する実験結果<sup>3)</sup>との比較と数十年先の耐荷力低下の予測を通じて、局所腐食に対する模擬腐食表面形状の生成方法について考察する。

## 2. 局所腐食を考慮した腐食進展予測モデル

## 2.1 腐食進展予測モデルとは

本研究で適用する腐食進展予測モデル<sup>1),2)</sup>では、鋼表面をメッシュ分割して離散化し、その格子点に腐食の原因(アタック因子)が爆弾のようにランダムに降り注ぐことにより減肉が生じると考える。このとき、1個のアタック因子が落下地点直下に生じさせる腐食深(爆弾の威力)を $F$  [mm/year]、アタック因子の落下地点と格子点 $i$ の距離を $d_i$ 、距離減衰係数を $\beta$ とすれば、格子点 $i$ に生じる腐食深 $V_i$ は、式(1)により表される。

$$V_i = F \cdot \exp(-\beta d_i) \quad (1)$$

局所腐食を表現するためには、アタック因子は全ての格子点上に同じ確率で降り注ぐのではなく、実際に生じている局所腐食形態に近い状態を再現できる確率分布形を選定し、落下地点を決めるようにプログラムに組み込む必要がある。本研究では、できるだけ少ないパラメータで分布形状を制御することが望ましく、また左右対称形の分布形状が腐食環境を簡易に表現する際に都合がよいことなどから、正規分布を採用することとした。

## 2.2 確率密度関数を考慮した模擬腐食表面の生成例

500mm×500mmの正方形領域を $x,y$ 方向に25分割(20mm

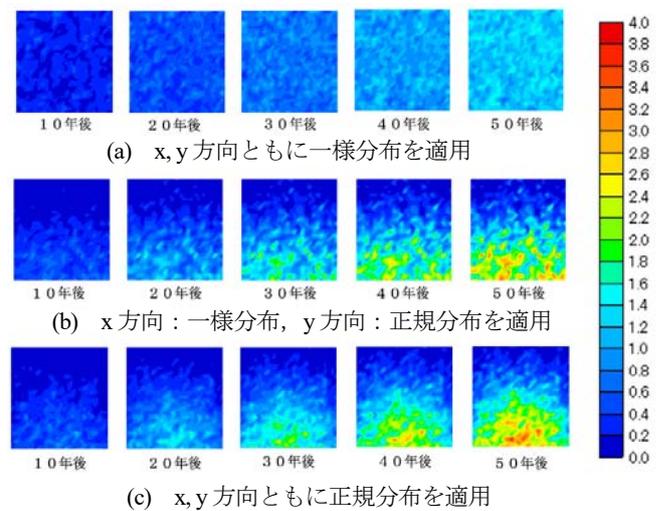


図-1 適用した確率密度関数と模擬腐食表面形状線形

間隔)で生成した模擬腐食表面形状の一例を図-4に示す。生成条件には $F=0.3$  [mm/year]、 $n=200$ 個、 $\beta=0.2$ を仮定し、再現期間は $m=50$ 年を設定した。図は、10年毎に描いた腐食深等高線図であり、赤い領域ほど減肉が大きいことを表している。

図-1(a)は、アタック因子が落下する座標値を決める確率分布として、 $x,y$ 方向ともに一様分布を仮定した場合の腐食進展状況を示す。アタック因子はランダムに鋼板上に降り注ぐため、一定の腐食環境下で進展していくような腐食形態(全面腐食)への適用が想定される。

図-1(b)は、 $x$ 方向に一様分布、 $y$ 方向には正規分布を仮定した局所腐食形態を示す。図では、腐食領域の下辺で最大頻度となる正規分布を $y$ 方向に仮定しているため下辺に近いほどアタック因子が多く降り注ぐことからグラデーションのような減肉状況が再現できている。これは、実際の鋼橋においても多く見られる線状の腐食原因によって生じる腐食形態への適用が想定される。

図-1(c)は、 $x,y$ 方向ともに正規分布を仮定した局所腐食形態を示す。図から、下辺中央を中心とした扇形のグラデーション形状に腐食領域が進展している様子が確認できる。これは、点あるいは小さい面的な領域に生じる腐食原因によって引き起こされるような腐食形態への適用が想定される。

このように、模擬腐食表面の生成に適用する確率密度関数は、現時点で生じている腐食形態、すなわち腐食表面の統計的特徴や主な腐食要因によって、使い分けることが望ましい。

キーワード 腐食進展予測モデル、アタック因子、確率分布、残存曲げ耐荷力

連絡先 〒745-8585 山口県周南市学園台 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 海田研究室 TEL 0834-29-6331

表-1 生成パラメータ

	$F$ [mm/year]	$n$ [個]	$\beta$
ブロック1	1.2	27	0.2
ブロック2	0.2	120	0.2
ブロック3	0.2	91	0.2

表-2 板厚統計量の比較

上フランジ	平均板厚	標準偏差	最小板厚	板厚減少量
	$t_{avg}$ [mm]	$\sigma$ [mm]	$t_{min}$ [mm]	$R$ [%]
実測結果	6.22	0.67	3.50	22.27
模擬腐食表面	6.20	0.65	3.40	22.45

### 3. 耐候性鋼における模擬腐食表面の生成

#### 3.1 供試体概要と腐食形態の特徴

本研究で腐食表面形状を模擬する供試体は、四国地方の山間部で約20年間供用された後、撤去された歩道橋の縦桁である。過去に文献3)の中で曲げ載荷試験が行われており、圧縮フランジに局所的なねじれ座屈が発生して崩壊した。このことから、本研究では崩壊のトリガーとなった上フランジの腐食表面形状を腐食進展予測モデルにより生成する。

上フランジの腐食形態の特徴として、自由端付近に約220mm間隔で局所腐食が存在する。この間隔は、縦桁の上に設置されていた床板の幅とほぼ一致していることから、凍結防止剤を含んだ雨水が床板の継ぎ目部分から上フランジに漏水したことによって生じたと考えられる。

#### 3.2 上フランジにおける模擬腐食表面の生成

上フランジの模擬腐食表面は、板厚統計量が実測結果とできるだけ近い値になるように $F, n, \beta$ をパラメトリックに変化させて生成した。このとき、 $x$ 方向（横方向）の3か所（110mm, 330mm, 500mm付近）で床板からの漏水による顕著な腐食の偏りが見られるため、 $x=220$ mm,  $x=440$ mm位置で3つのブロックに分割し、腐食原因である床板目地の位置と正規分布に与える平均値の座標を設定した。各ブロックの模擬腐食表面の生成に用いた具体的な生成パラメータに表-1に示す通りである。

表-2に実測結果と生成した模擬腐食表面（再現期間20年）の板厚統計量を比較して示す。本研究では、板厚統計量の中でも平均板厚 $t_{avg}$ と板厚標準偏差 $\sigma$ が実測結果とほぼ一致するように、上述した生成パラメータを決定しているが、表に示した模擬腐食表面の板厚統計量はいずれも実測値と概ね一致しており、実物に近い板厚統計量を有する模擬腐食表面が生成できていることがわかる。

図-2に、実測結果と模擬腐食表面の減肉量等高線図を示す。図-2(a), (b)の比較から、模擬腐食表面における腐食深の等高線レンジおよび腐食領域の大局的な様相は、実測結果と概ねよく対応しており、本腐食進展予測モデ

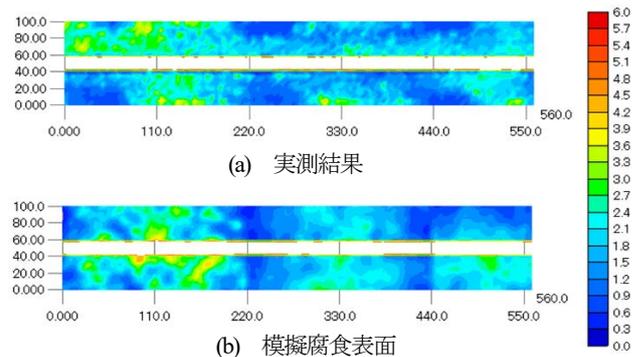


図-2 減肉量等高線図の比較

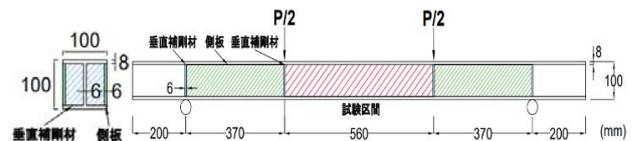


図-3 解析モデルの概要

ルによって局所腐食が概ね再現できていることがわかる。ただし、模擬腐食表面は乱数がベースになっているため、凹凸の細やかな平面形状までは一致しない。図-2(b)の模擬腐食表面は、 $m=20$ 年後の状態を再現した数値モデルであるため、鋼材の腐食原因や腐食環境が変わらないという仮定の下で、 $m=20$ 年（現在）以降の将来における腐食進展状況が予測可能であり、その腐食深データを数値的に生成できる。

### 4. 模擬腐食表面を用いた曲げ耐荷力解析

本章では、第3章で生成したH形鋼上フランジの模擬腐食表面形状を考慮した解析モデルを作成し、残存曲げ耐荷力に関する解析結果と実験結果3)を比較することで、本研究で作成した模擬腐食表面のFEM解析への適用性について考察する。また、上フランジのみを50年後まで腐食進展させた解析モデルにより耐荷力低下曲線を描く。

#### 4.1 解析モデルと解析条件

図-3に、文献3)で実施された曲げ載荷実験に対応した解析モデルの概要を示す。載荷方法は単純支持された供試体に対する4点曲げ載荷とし、スパン中央560mmの試験区間における上フランジ（圧縮側）に模擬腐食表面の腐食深データから算出した板厚を考慮している。また、実験では試験区間外にあるウェブのせん断座屈を防止するため両支点側370mm区間を箱形断面とした。

解析は、汎用有限要素解析ソフトウェアABAQUSを用いた弾塑性非線形有限要素解析である。鋼材の材料特性は、材料特性試験結果より、弾性係数 $E=184.7$ [GPa]、降伏応力 $\sigma_y=429.4$ [MPa]、ポアソン比 $\nu=0.277$ を仮定した。

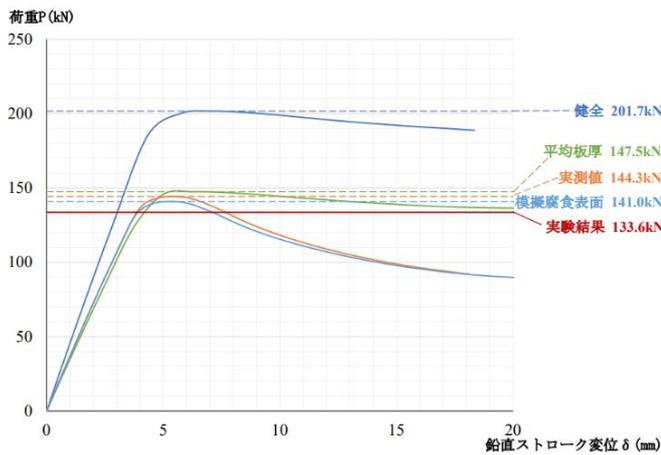


図-4 荷重-変位曲線

荷重条件は載荷点にP2をはり軸方向に対して直角な線荷重として与えた。はりの支持条件は両端単純支持である。

#### 4.2 残存耐力と崩壊性状の比較

本研究では、4つの解析モデル(①健全モデル②平均板厚モデル③実測値モデル④模擬腐食表面モデル)を作成し、実験結果との比較を通して、模擬腐食表面のFEM解析への適用性について考察した。

①健全モデルとは、腐食の無い解析モデル( $m=0$ 年)であり、図-3に示した初期板厚が設定されている。

②平均板厚モデルとは、実験結果の平均板厚を試験区間の上下フランジとウェブに考慮した解析モデルであり、腐食減肉の場所的な偏りは無く、平均板厚と同じ新規鋼板で製作されたイメージである。なお、平均板厚は上フランジ6.22mm、ウェブ3.67mm、下フランジ6.11mmである。

③実測値モデルとは、上フランジに図-2(a)に示した実測結果から得た板厚データを適用しており、実物に最も近い解析モデルと位置付けられる。なお、ウェブと下フランジは平均板厚モデルと同じである。

④模擬腐食表面モデルとは、図-2(b)に示した $m=20$ 年後の模擬腐食表面を上フランジに考慮した解析モデルである。この解析モデルについてもウェブと下フランジは平均板厚モデルと同じである。

図-4に各解析モデルの結果から得た荷重-たわみ関係を示す。変位は、解析モデルの載荷点における鉛直たわみを示す。健全モデルの解析結果から、本供試体の初期耐力は201.7kNであったことが推定される。これに対して実験結果は133.6kNであることから、20年間における曲げ耐力の低下量は約34%であったと推定される。

また、腐食減肉を考慮した3つの解析モデルの耐力低下は27~30%に留まっており、実験結果よりも若干高い結果となった。これは、解析モデルではウェブおよび下フランジに平均板厚と同じ板厚を有する凹凸の無い板を仮定しているため、実際の供試体に見られるようなウェ

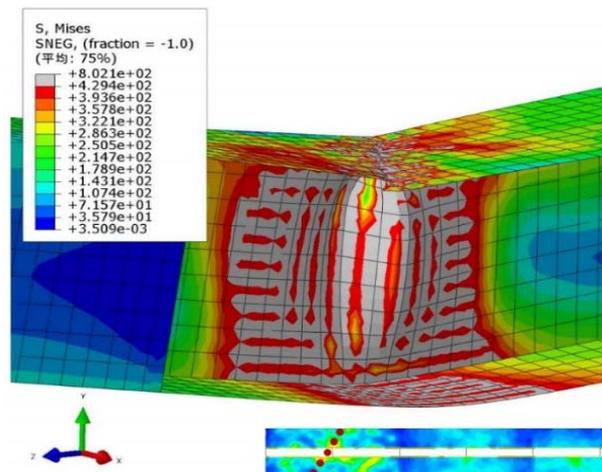


図-5 FEM解析モデルの座屈形状(変形倍率=3)

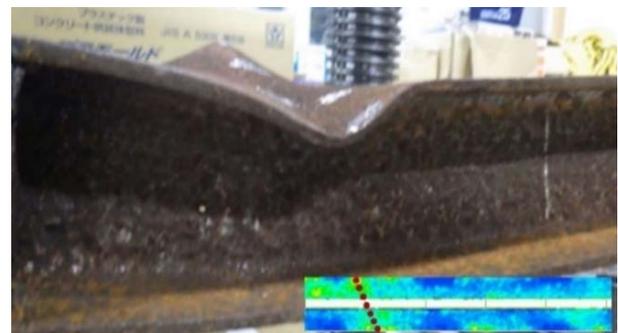


写真-1 上フランジの座屈形状

ブや下フランジに生じる応力集中の影響が乏しいことで上フランジがねじれを起こして崩壊している。模擬腐食表面モデルにおける写真-1と同じ箇所の座屈性状を図-5に示す。腐食表面形状が実際と異なること、写真-1は実験終了後の状態であることから、上フランジのねじれの大きさは異なっているが、アタック因子が多く降り注いだ断面(漏水箇所付近)で上フランジに斜めの降伏域が形成され、自由端にねじれが発生して崩壊する様相は、実験結果と概ね一致していた。

#### 4.3 耐力低下の将来予測

模擬腐食表面モデルは、 $m=20$ 年以降についても腐食進展を予測することが可能であり、腐食表面データを生成できる。腐食を進展させていくと、3つのブロックに分けた腐食領域内において、局所腐食による減肉領域が徐々に拡大していき、 $m=40$ 年の頃から減肉量が6mmに達する領域が局所的に発現しており、貫通孔に相当する減肉が生じている状態である。

全モデルの上フランジの局所腐食のみを50年後まで進展させた解析結果から得た耐力の低下曲線を図-6に示す。図から、腐食環境が変わらない状態を仮定した場合、本H形鋼の残存曲げ耐力は、経過年数とともにほぼ線形の耐力低下となることが予想され、50年間で37.68%

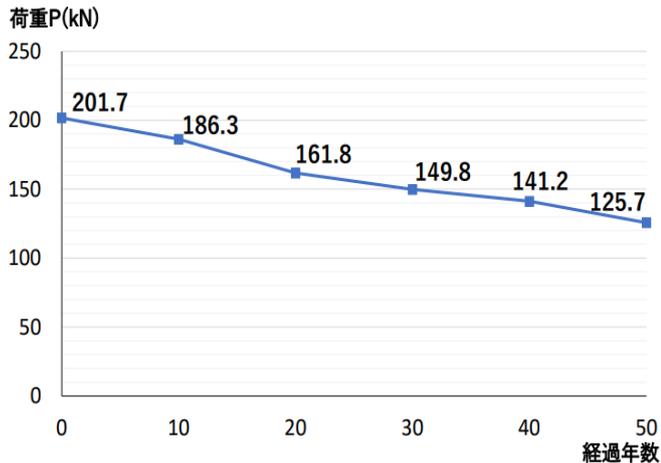


図-6 耐荷力低下曲線

の耐荷力低下が見込まれる。この解析では、上フランジのみを腐食進展させているため、実現象とは異なっているが、ウェブや下フランジについても現時点での点検・計測データがあれば同じように模擬腐食表面を生成可能であり、任意の経過年数に応じた残存耐荷力や崩壊性状が解析的に予測できる。

ただし、本研究では耐候性鋼を対象としていることから、基本的に塗装等の防食性能は考慮しておらず、裸使用のまま、現在の腐食環境や腐食原因が不変であるという仮定の下に模擬腐食表面が生成されていることに注意が必要である。

## 5. おわりに

### (1) 本研究から得られた主な成果

本研究では、20年間供用後に撤去された耐候性H形鋼の上フランジについて、腐食進展予測モデルによって局所腐食を考慮した模擬腐食表面形状を生成し、その腐食進展と部材の耐荷力低下をFEM解析によって予測することを試み、耐荷力解析への適用性を検証した。

本研究から得られた主な成果は以下の通りである。

- 1) 腐食進展予測モデルにおけるアタック因子の落下位置を決める確率分布として正規分布を採用し、実際と同じ経過年数を想定した模擬腐食表面を数値的に生成し、実測結果と良い対応を示すことを確認した。
- 2) H形鋼の曲げ耐荷力解析の結果から、模擬腐食表面を考慮した解析モデルの耐荷力は実験結果とほぼ一致した。また、フランジの座屈崩壊性状についても実験結果とよく対応していた。
- 3) 実際の鋼部材に生じた局所腐食損傷の点検・計測結果を用いた模擬腐食表面の生成方法とシェル要素モデルによる耐荷力解析への適用例を示した。

### (2) 今後の展開

- 1) 腐食進展予測モデルの生成パラメータ $F$ ,  $n$ ,  $\beta$ について、様々な腐食鋼材の表面形状計測を実施し、腐食表面の統計的特徴や腐食形態に応じた適切な決定方法について検討を重ねる必要がある。
- 2) 腐食進展予測モデルに防食性能の概念を考慮し、塗装履歴が既知である部材の表面形状計測を実施して、耐荷力低下曲線を描く。
- 3) 重度に腐食した耐候性鋼の表面形状計測を実施し、距離減衰係数 $\beta$ の再評価を行う。
- 4) 鋼橋にみられる代表的な局所腐食について、それぞれの腐食形態の特徴を表現するためのアタック因子の確率分布形について検討する。

### [参考文献]

- 1) 藤井堅, 海田辰将, 中村秀治, 有尾一郎: 経年変化を考慮した腐食表面生成モデル, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.657-665, 2004.3.
- 2) 藤井堅, 橋本和朗, 渡邊英一, 伊藤義人, 杉浦邦正, 野上邦栄, 永田和寿, 中村秀治: 海洋環境における鋼管杭の圧縮強度の経年変化予測法, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.92-105, 2010.3.
- 3) 河村篤志: 圧縮フランジの座屈に着目した腐食H形鋼の残存曲げ耐荷力評価, 令和元年度 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 卒業研究論文集(CD-ROM), 2020.2.