

2. 鋼構造部材の経時腐食挙動に対する空間統計数値シミュレーションに関する研究

ヴウ ダット ヴアン

1. 目的 鋼構造物を安全かつ経済的に供用するためには、腐食損傷の経時性を正確に把握した上で、残存耐荷力を精度良く評価する必要がある。しかし、部材単位の腐食損傷の経時性をシミュレートする手法は確立されていない。そこで、本研究では空間統計学的な手法の一つである Conditional simulation を用いることで、複数の腐食形態を有する腐食表面をシミュレート可能な手法を提案した。このシミュレーション手法の検討では、致命的な腐食損傷が報告されている下路トラス橋の箱断面斜材を対象とした。

2. 内容

2.1 腐食促進実験の概要¹⁾ 鋼板のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動を明らかにするため、図-1 に示す JIS Z 2201 の 1A 号試験片に部分的にコンクリートを巻き立てた試験体の腐食促進実験が行われた。なお、供試鋼材には、板厚 $t_0=9$ mm の SM 490 材が用いられた。無塗装とした鋼板の表面粗さは、グリットブラスト処理により約 $70 \mu\text{m}$ とされた。腐食サイクルには S6-cycle が用いられ、その繰り返し回数 n_c (cycle) は 600 cycle 毎に 600 ~ 2400 cycle とされた。本研究では、マクロセル腐食がコンクリート境界線近傍に生じた試験体を対象とした。図-1 (a) 中に示す腐食表面には全面腐食と局部腐食が混在している。そこで、腐食深さ z (mm) を反応変数、試験体表面座標 x (mm) と y (mm) を予測変数とした回帰樹分析を用いることで腐食表面を各腐食領域へ分類した。分類結果を元に腐食表面の構成は一般部、中間部および境界部とした。その一例 (No.20, $n_c=2400$ cycle) を図-1 (b) に示す。各腐食領域における表面性状とその平均腐食深さ μ (mm) の概念を図-2 に示す。

2.2 異なる腐食形態を有する腐食表面性状の空間統計数値シミュレーション 試験体の腐食領域は、図-3 で示すように、Conditional simulation による格子 (間隔: 0.6 mm) を用いることで離散化した。この格子にシミュレーションで腐食深さを求める推定点と拘束条件として事前に腐食深さを与える拘束点を設定する。

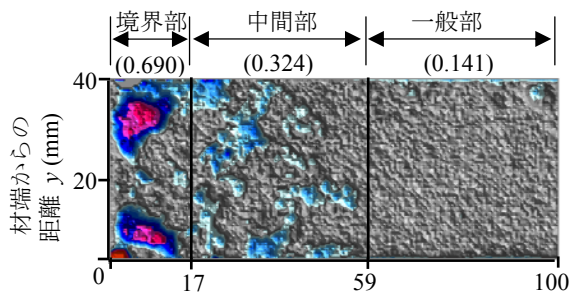
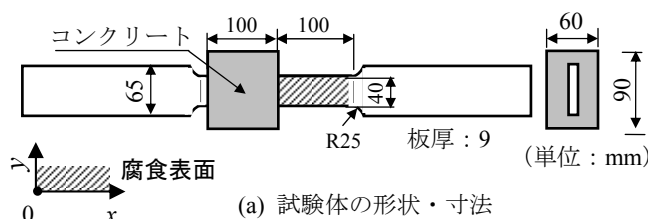


図-1 一般部、中間部および境界部の腐食領域 (No.20, 2400 cycle)

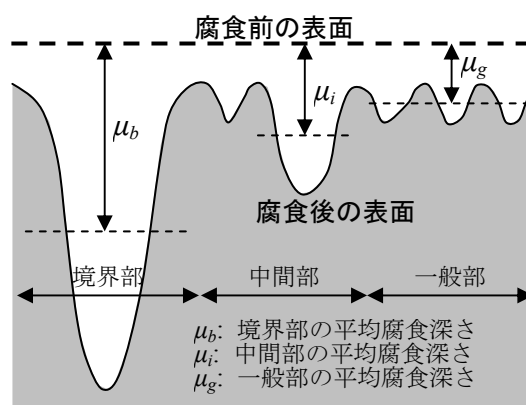


図-2 各腐食領域における腐食表面性状の概念

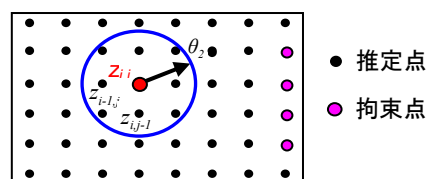


図-3 Conditional simulation の概念図

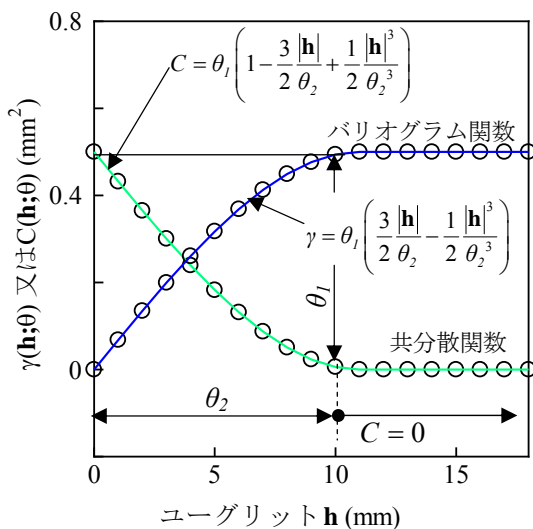


図-4 球型共分散関数とそのバリオグラム関数

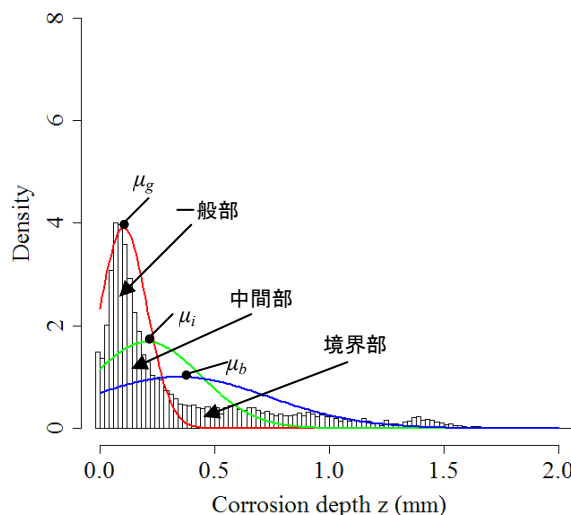


図-5 腐食深さのヒストグラムの重ね合わせ (No.20, 2400 cycle)

回帰樹分析で分類した各腐食領域における表面性状を表わす統計量であるレンジ θ_2 (mm)・シル θ_l (mm^2) を算出するために、実験結果と適合性がある球型バリオグラムモデルを適用したバリオグラム解析を用いた。 θ_2 と θ_l は、図-4 に示すように、バリオグラム解析結果を理論モデルへ当てはめることで求めた。その際、バリオグラム γ (mm^2) を重み係数とした非線形最小二乗法を適用することとした。このように、各腐食領域における腐食表面性状の経時性を表す μ , θ_2 および θ_l を n_c を用いた近似で明らかにした。本シミュレーションでは、式 (1) の乱数場に任意の推定地点の腐食深さ $z_{i,j}$ は $z_{i,j}$ の位置より半径 θ_2 内の全点 (θ_2 の関数である $N(\theta_2)$ 点) の腐食深さ $z_{i-1,j-1}$ などを線形結合とする推定手法 (クリギング) を用いることで求めた。なお、式 (1) の重み係数として、空間的な自己相関を表す、ユーグリット距離 \mathbf{h} (x および y の関数) と空間統計量 (θ_2 および θ_l) の関数である球型共分散関数 C (mm^2) を用いた。共分散関数とそれに対応するバリオグラム関数との間には式 (2) の関係があると知られている。 C の形状は図-4 に示している。

$$z_{i,j} = \sum_{N(\theta_2)} C(\mathbf{h}; \theta) z_{k,l} \tag{1}$$

$$C(\mathbf{h}; \theta) = \theta_l - \gamma(\mathbf{h}; \theta) \tag{2}$$

図-5 には、2400 cycle の試験体 (No.20) の境界部における腐食深さのヒストグラムを示している。図中には試験体の各腐食領域の腐食深さの分布を正規分布で近似した結果も実線で示している。境界部のヒストグラムは、これらの正規分布を重ね合わせた結果と良く一致している。したがって、境界部の腐食表面は一般部、中間部および境界部の腐食表面を重ね合わせることで生成できると言える。そこで、本シミュレーションは図-6 に示す手順で行うこととした。各腐食領域のサイズについては、対象とした全試験体の平均値に基づき、一般部は x を 50~100 mm, 中間部は x を 15~50 mm, 境界部については x を 0~15 mm と設定した。シミュレーションは n_c を 1200, 2400, 4800 および 9600 cycle と変化させて行った。2400 cycle における試験体の腐食表面性状をシミュレートした結果を図-7 に示す。本シミュレーションの結果は図-1 (b) で示した試験体の腐食表面性状の傾向と良く一致している。また、図-8 (a), (b) に示す腐食表面全体における腐食深さのヒストグラムの分布性状も良く一致している。さらに、実験とシミュレーションの最大腐食深さは、それぞれ 2.7 mm と 2.5 mm で同程度である。試験体の幅方向 (y 軸) の平均腐食深さ d_c を図-9 に示す。各 n_c の腐食表面において隣同士の腐食領域間の境界上の腐食表面性状の連続性を確保した。これら

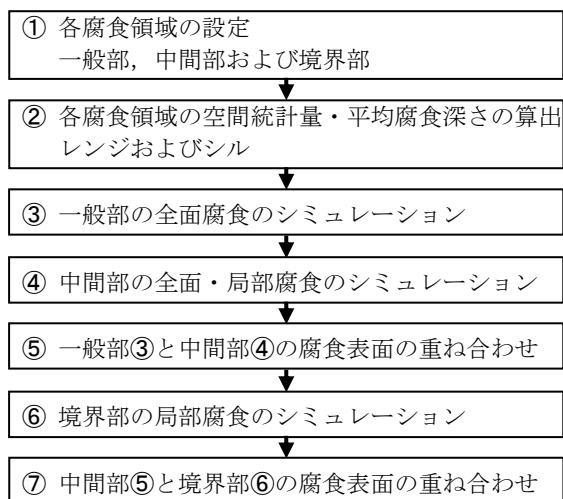
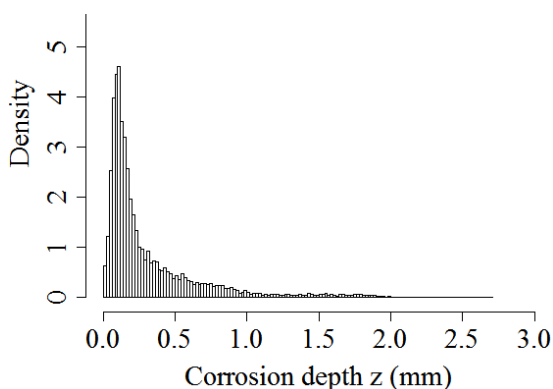
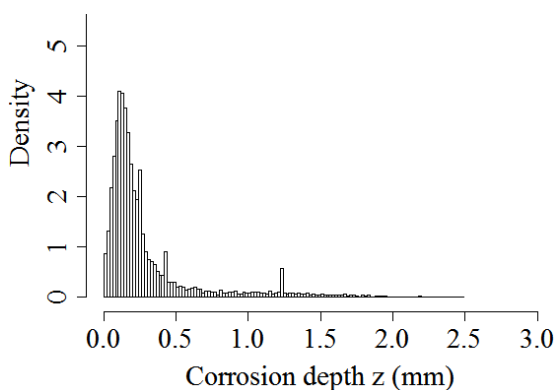


図-6 空間統計数値シミュレーションの手順

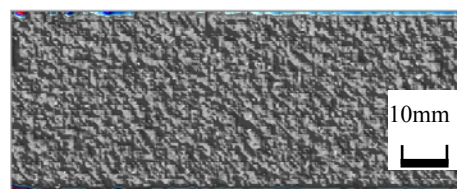


(a) 試験結果 (No.20, 2400 cycle)

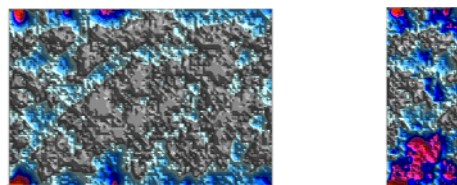


(b) 試験体シミュレーション (2400 cycle)

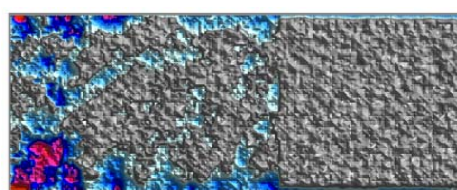
図-8 試験体全体におけるヒストグラムの比較



(a) 一般部の全面腐食



(b) 中間部の全面・局部腐食 (c) 境界部の局部腐食



(d) 試験体のシミュレーションの結果

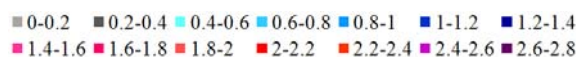


図-7 試験体シミュレーションの結果

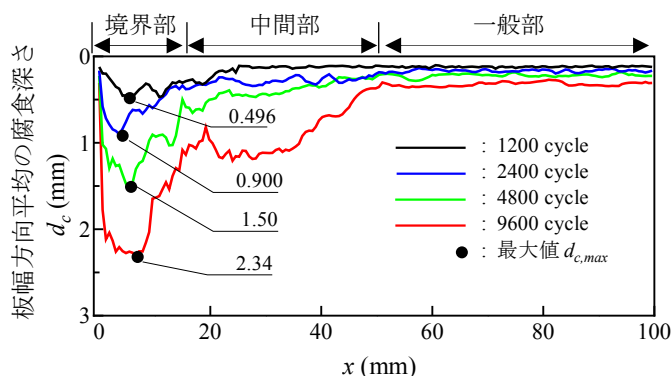


図-9 腐食促進試験とシミュレーション結果

の結果から、本手法を用いることで、複数の腐食形態が混在する腐食表面をシミュレートできると考えられる。

2.3 鋼構造部材単位の腐食シミュレーション

2.1 で提案した手法を用いて、図-10 (a) で示す下路トラス橋の圧縮力が作用する箱断面斜材を対象として、部材単位のシミュレーションを行う。斜材の断面の形状・寸法を図-10 (b) に示す。対象とする腐食領域は、腐食斜材の実測データに基づき、図-10 (c) に示すように、コンクリート地際から斜材長手方向に 100 (mm) の範囲とした。コンクリート床版の地際近傍のみが滞水による塗膜の膨潤により劣化し、その劣化領域のみにマクロセル腐食が生じるため、図-10 (c) で示した腐食領域

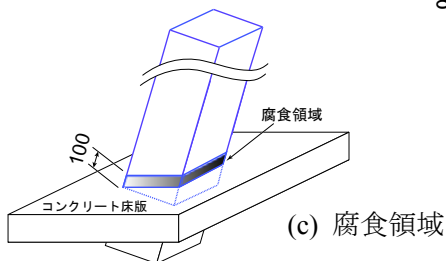
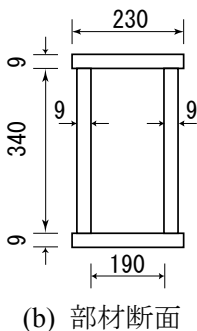
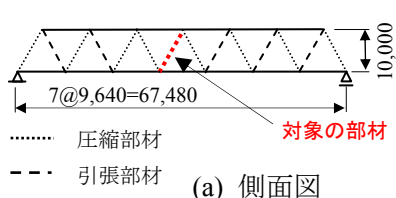
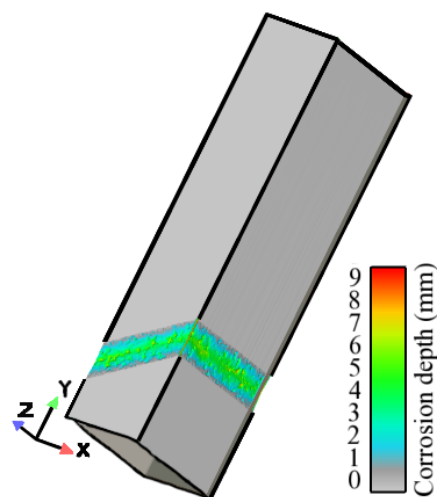
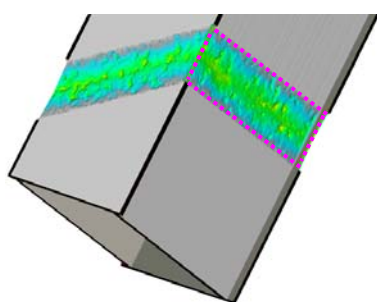


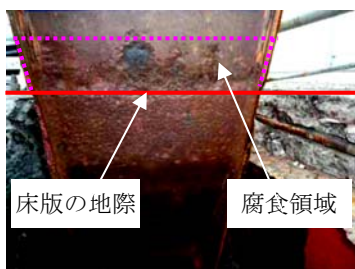
図-10 下路トラス橋の斜材とその腐食領域



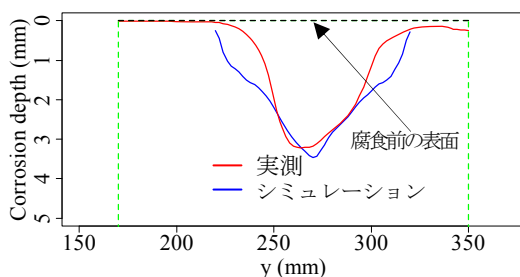
(a) 一般部, 中間部および境界部の混合腐食



(b) シミュレーション結果



(c) 実腐食部材の損傷状況



(d) 実腐食部材とシミュレーションの腐食表面

図-11 空間統計数値シミュレーションの結果

以外では、斜材は腐食しないものと仮定した。そのため、図-10 (c) の腐食領域の上下端を腐食領域の平均腐食深さで拘束することとした。部材の離散化にはピッチ間隔 2 mm とした。シミュレーションの対象とするコンクリート地際の腐食領域には、図-1 (b) に示す一般部, 中間部および境界部の腐食が混在している。そこで、これらの腐食表面性状の空間統計量と平均腐食深さの関係 ($n_c=18,000$ cycle) に基づき、各々シミュレートし、それらを重ね合わせることで、斜材を構成している鋼板の一般部における腐食表面性状をシミュレートした。また、斜材の箱断面のコーナー部の腐食深さについては、実構造部材の腐食挙動を参考にして、境界部の平均腐食深さと仮定した。斜材のシミュレーションは、鋼板の一般部およびコーナー部のシミュレーションで求めた腐食表面性状を組み合わせることで行った。斜材のシミュレーションの結果を図-11 に示す。図-11 (c) は実橋の斜材の腐食状況を示している。図-11 (d) はシミュレーションと同程度のサイズの腐食領域・最大腐食深さの実腐食部材の断面を一緒に示している。図-11 (b) および図-11 (d) で示したシミュレーション結果は、実構造物の腐食表面性状のようにコンクリート地際の近傍で溝状に腐食しており、傾向が概ね一致している。

3. 結論 ① 複雑の腐食形態が混在している腐食表面性状を回帰樹分析により各腐食形態の領域に分類できることを示した。また、それらの腐食領域に対してバリオグラム解析を行うことで領域内にある腐食表面性状の経時性を明らかにできる手法を提案した。② Conditional simulation による空間統計学的手法を用いることで、複数の腐食形態を有する腐食表面を部材単位でシミュレート可能とする手法を提案した。

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.