

鋼部材コンクリート地際の腐食損傷の非破壊検査法と致命的損傷予知技術の開発

貝沼重信¹，永野徹²，北浩志³，細見直史⁴

¹九州大学工学研究院建設デザイン部門

^{2,3}(株)日本電測機 技術研究所 開発部

⁴(株)東京鐵骨橋梁 技術本部 技術研究所

鋼部材がコンクリート地際で腐食破断する事故が報告されている。しかし、この損傷に対する維持管理技術は確立されていない。本研究では異なる学術領域（電磁気学，空間統計学，力学）を横断する学際研究により，さびや塗膜を除去せず，損傷を非接触で高速に測定可能とする技術を開発する。また，この技術に著者らが確立した時空間統計手法を導入することで，損傷の経時予測や致命的損傷予知を可能とする技術開発を実現することを最終目的とする。

1. はじめに

腐食した鋼構造物を安全かつ経済的に維持管理するためには，腐食損傷を正確に把握し，その経時性を予測することが重要である。特に，鋼部材のコンクリート地際部の腐食損傷は，他部位に比して進行性が著しく高いため，危険視されており，損傷の把握や経時予測に基づく致命損傷予知が不可欠とされる。しかし，これらの維持管理技術は，個別の学術領域では開発困難であるため，実用に耐える技術が確立されていない。その結果，下路トラス橋の斜材（図1(a)），標識・照明柱や防護柵支柱などの破断事故が相次いで起こっている。この腐食損傷は鋼製橋脚基部（図1(b)）においても多数報告されており，鋼コンクリート複合構造物においては将来の致命的損傷が懸念されている。

本研究では，異なる学術領域（電磁気学，空間統計学，力学）を横断する学際研究により，従来の研究で開発の障壁とされてきた課題を解決し，実用性の高い腐食損傷の非破壊測定，その経時予測および致命的損傷予知の新技术を開発することを最終目的とする。

これまで，著者らは従来の渦流探傷（ECT）コイル（図2(a)）では，コイル先端の地際コンクリート外部で磁力線が発散してしまうため，コンクリート内部における腐食損傷を検出できない。そこで，本研究ではコイルの形状や磁気特性をパラメトリックに変化させた電磁気解析（図3）を様々な腐食モデルを対象に行った。また，このモデル

に基づき試験体を製作し，コイルの試作を繰り返すことで，地際部の腐食損傷を精度良く検出可能なECTコイル（図2(b)）の開発に成功した。

本研究では既往の研究で開発したECTコイルを用いて，実用性の高い非接触・非破壊測定のス



(a) 下路トラス橋・斜材の破断



(b) 鋼製橋脚基部の破断

図1 腐食損傷事例

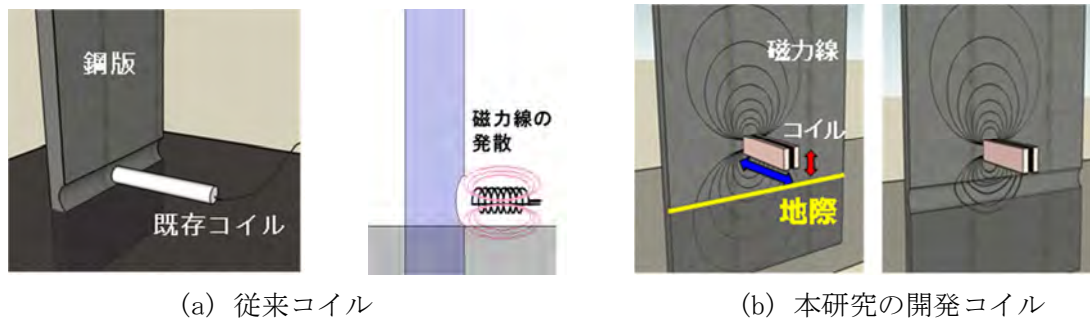


図2 従来コイルと本研究の開発コイルの磁力線

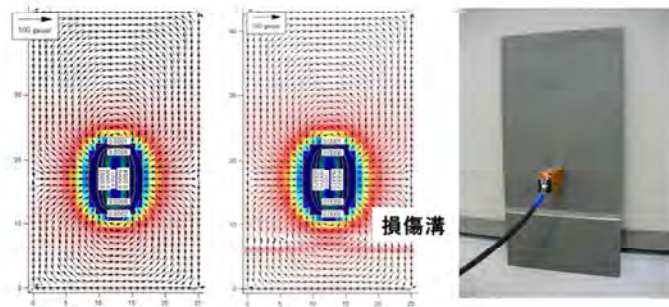


図3 地際モデルの磁界

テムを構築した．本システムを用いて，鋼製橋脚基部を測定し，その結果と実際の腐食損傷を比較・検討することで，ECT コイルの性能改善や走査装置を改良した．また，腐食損傷部材の将来の座屈耐荷力と疲労耐久性に対する致命的損傷予知を実現するために必要な腐食表面性状の経時性を予測する手法を構築した．

本稿では鋼構造部材のコンクリート地際における腐食損傷の経時性をシミュレートする手法について示す．

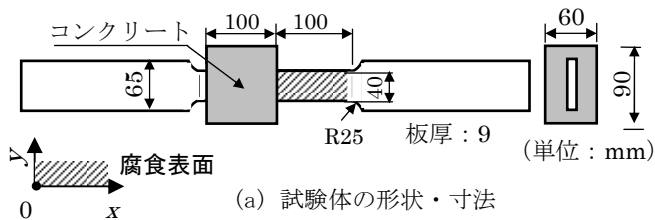
2. 腐食促進試験の概要^{1),2)}

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4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 $t_p=9$ 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

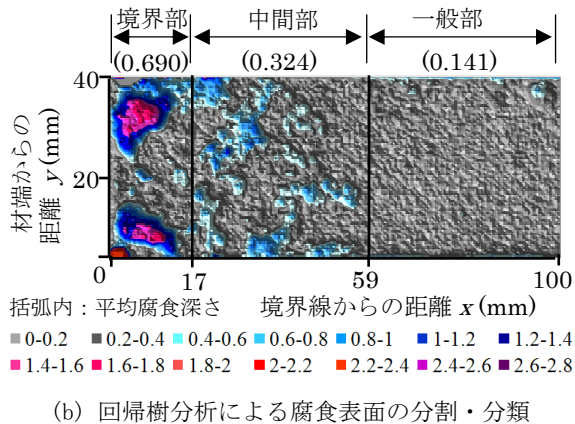
がコンクリート境界線近傍に生じた試験体を対象とした．図4(a)中に示す腐食表面には全面腐食と局部腐食が混在している．そこで，腐食深さ z (mm) を反応変数，試験体表面座標 x (mm) と y (mm) を予測変数とした回帰樹分析を用いることで腐食表面を各腐食領域へ分類した．分類結果を元に腐食表面の構成は一般部，中間部および境界部とした．その一例 (No. 20, $n_c=2400$ cycle) を図4(b)に示す．各腐食領域における表面性状とその平均腐食深さ μ (mm) の概念を図5に示す．

3. 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6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．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_1 (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



(a) 試験体の形状・寸法



(b) 回帰樹分析による腐食表面の分割・分類

図4 一般部，中間部および境界部の腐食領域 (No. 20, 2400 cycle)

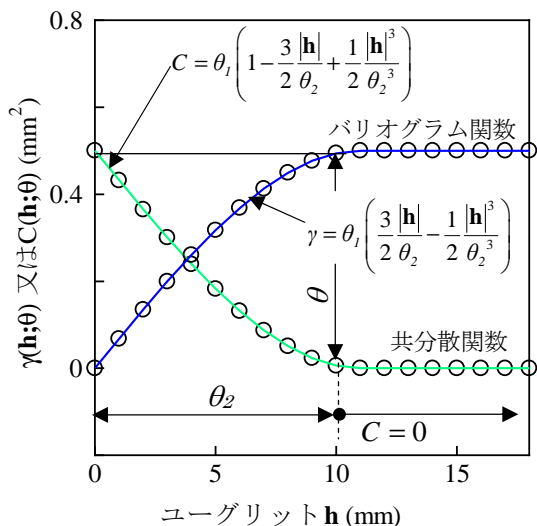


図7 球型共分散関数とそのバリオグラム関数

ム解析を用いた。 θ_2 と θ_1 は、図7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 (mm²) 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_1 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

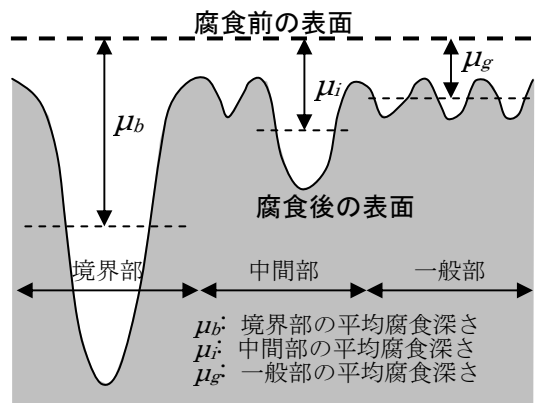


図5 各腐食領域における腐食表面性状の概念図

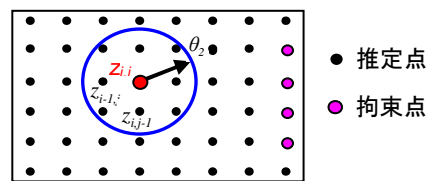


図6 Conditional simulation の概念図

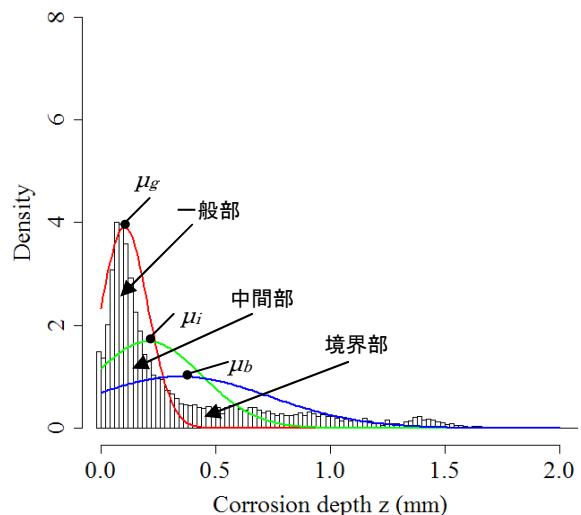


図8 腐食深さのヒストグラムの重ね合わせ (No. 20, 2400 cycle)

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 h (x および y の関数) と空間統計量 (θ_2 および θ_1) の関数である球型共分散関数 C (mm²) 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 の形状を図7に示す。

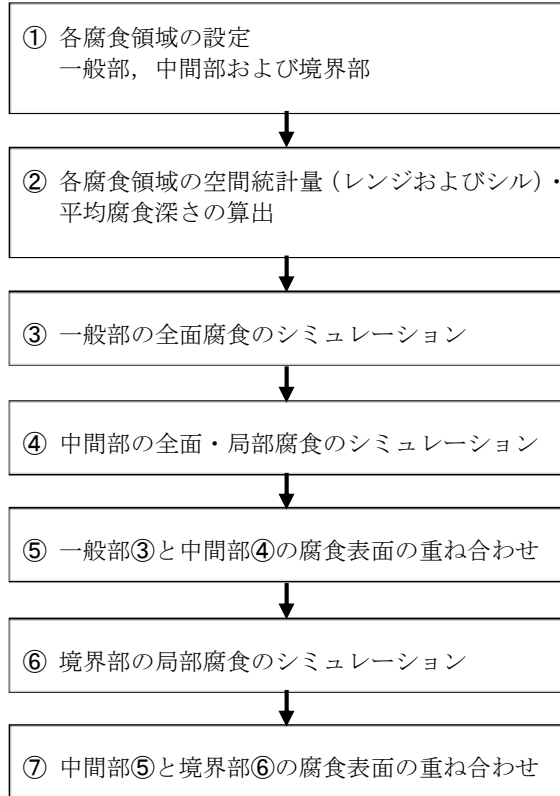


図9 空間統計数値シミュレーションの手順

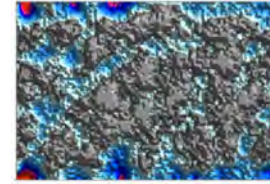
$$z_{i,j} = \sum_{N(\theta_2)} C(\mathbf{h}; \theta) z_{k,l} \quad (1)$$

$$C(\mathbf{h}; \theta) = \theta_1 - \gamma(\mathbf{h}; \theta) \quad (2)$$

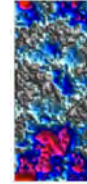
図8に2400 cycleの試験体(No. 20)の境界部における腐食深さのヒストグラムを示す。図中の実線は、試験体の各腐食領域の腐食深さの分布を正規分布で近似した結果を示している。境界部のヒストグラムは、これらの正規分布を重ね合わせた結果と良く一致している。したがって、境界部の腐食表面は一般部、中間部および境界部の腐食表面を重ね合わせることで生成できると言える。そこで、本シミュレーションは図9に示す手順で行うこととした。各腐食領域のサイズについては、対象とした全試験体の平均値に基づき、一般部は x を50~100 mm、中間部は x を15~50 mm、境界部については x を0~15 mm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



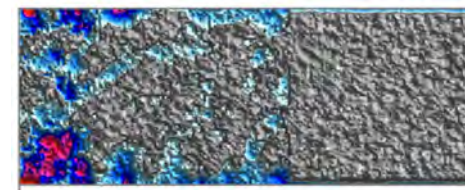
(a) 一般部の全面腐食



(b) 中間部の全面・局部腐食



(c) 境界部の局部腐



(d) 試験体のシミュレーションの結果

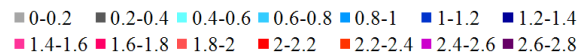


図10 試験体シミュレーションの結果

結果を図10に示す。本シミュレーションの結果は図4(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11(a)と(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12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。

4. 鋼構造部材単位の腐食シミュレーション

1.で提案した手法を用いて、図13(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13(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

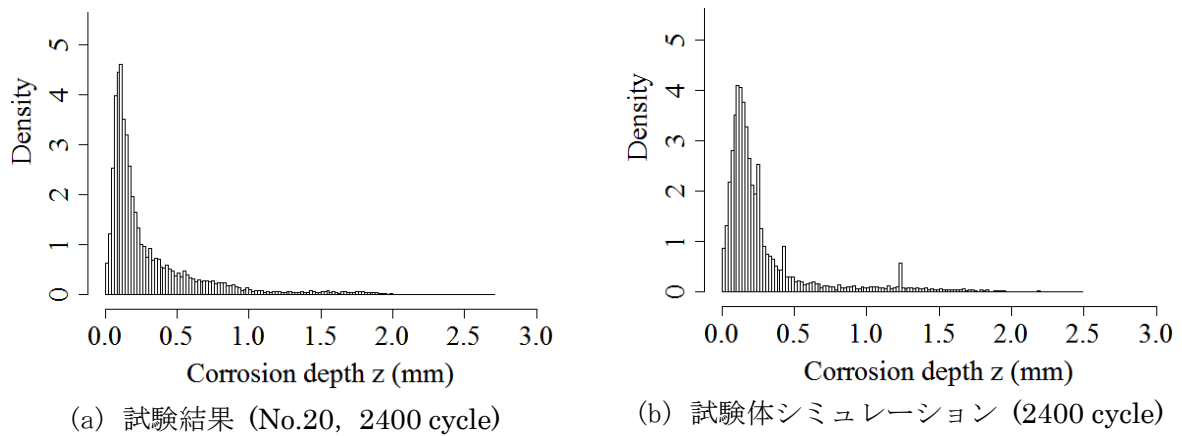


図 11 試験体全体におけるヒストグラムの比較

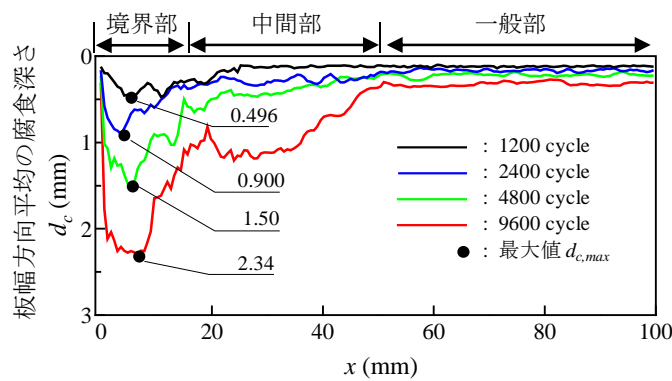


図 12 腐食促進試験とシミュレーション結果

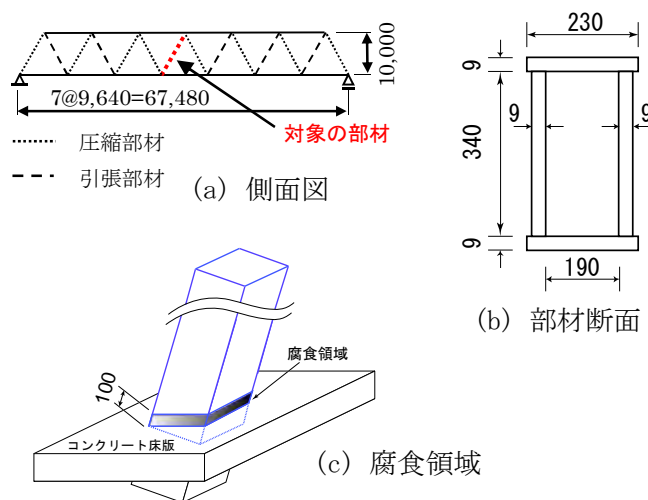
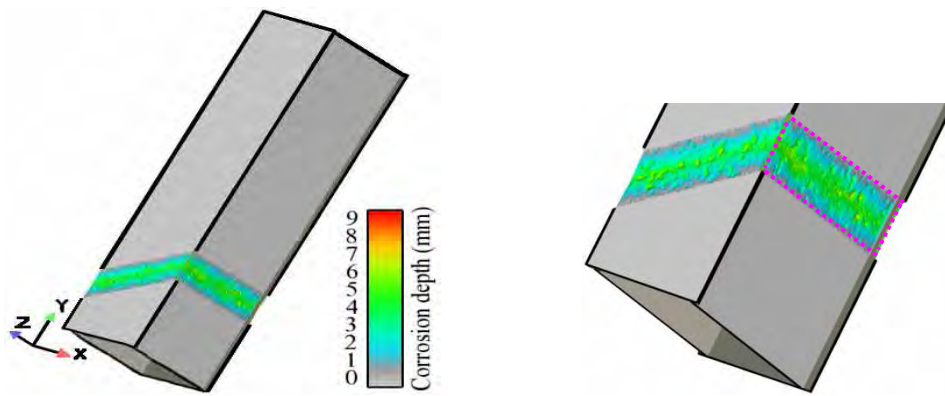


図 13 下路トラス橋の斜材とその腐食領域

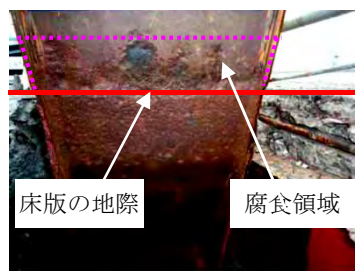
づき、図 13(c) に示すように、コンクリート地際から斜材長手方向に 100 (mm) の範囲とした。コンクリート床版の地際近傍のみが滞水による塗膜の膨潤により劣化し、その劣化領域のみにマクロセル腐食が生じるため、図 13(c) で示した腐食領域以外では、斜材は腐食しないものと仮定した。

そのため、図 13(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 4(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

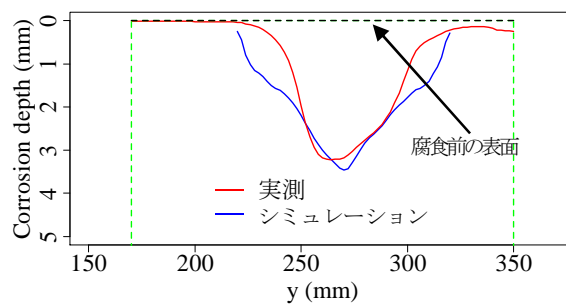


(a) 一般部，中間部および境界部の混合腐食

(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 14 空間統計数値シミュレーションの結果

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 14 に示す。図 14(c) は実橋の斜材の腐食状況を示している。図 14(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 14(b) および図 14(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。

5. まとめ

本研究では著者らが開発した ECT コイルを用い

て、実用性の高い非接触・非破壊測定システムを構築した。また、このシステムを用いて、実構造物の腐食損傷を比較・検討することで、ECT コイルの性能改善や走査装置を改良した。さらに、腐食損傷の経時性の予測手法を開発した。

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) S.Kainuma and N.Hosomi: Fatigue Life Evaluation of Corroded Structural Steel Members in Boundary with Concrete, International Journal of Fracture, Vol. 158, No.1, pp. 149-158, 2009.