

経年変化を考慮した腐食表面生成モデル

A model generating surface irregularities with consideration of corrosion progress in aging

藤井 堅*, 海田 辰将**, 中村 秀治***, 有尾 一郎****

Katashi Fujii, Tatsumasa Kaita, Hideharu Nakamura, Ichiro Ario

* 工博, 広島大学大学院助教授, 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4番1号)

** 工修, 広島大学大学院博士課程後期, 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4番1号)

*** 工博, 広島大学大学院教授, 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4番1号)

**** 工博, 広島大学大学院助手, 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4番1号)

This paper presents a model which generates surface irregularities of corroded plates so as to analytically predict corrosion progress in maintenance of steel structures. A special feature of the model is that time-dependent corrosion progress can be taken into consideration. Corrosion depths of a steel plate will be given by two procedures, i.e., generating randomized depths based on probability and spreading them spatially according to spatial auto-correlation model, where the randomized depths will be made by attacks of corrosion factors with an intensity of corrosion and a region in a term. By comparing with measured irregularities of an actual corroded steel girder, it is certified that the model can generate irregularities similar to actual corroded surfaces with its aging.

Key Words: Corrosion, Surface irregularity, Steel structure, Maintenance

キーワード: 腐食, 表面形状, 鋼構造物, 維持管理

1. はじめに

現在, 性能照査設計法が広く定着しつつあるが, この設計法の大きな特徴は, 構造物のライフサイクルを通したコスト評価が要求されていることといえる. 初期コストのみならず維持管理経費なども含めてのライフサイクルコストを正確に評価することは, 従来の初期コスト重視の評価に比べて格段に難しい. それは, たとえば腐食の場合は構造物が置かれている環境条件によってその進行が大きく影響されるので, 劣化予測が曖昧にならざるを得なくなり, 結果として, 構造物の供用期間中になされる維持管理行為のシナリオを精度良く描くことが極めて難しくなることに起因する. したがって, ライフサイクルコストの評価精度を向上させるためには, 構造物の構造形式や立地条件, 環境条件に柔軟に対応できるとともに精度の高い将来予測モデルの開発が望まれる.

鋼構造物における維持管理の対象は疲労と腐食である. 腐食は, 進行が緩やかであるので急を要する対処の必要性は少ないものの, すでに多数の橋梁などで腐食損傷が問題になっている現状をみると^{1), 2)}, 無視できないのは明らかである. そして, 供用中の鋼構造物においては, 発見された腐食損傷が耐力をどの程度低下させているかという評価はもちろん, その損傷が将来においてどのように進行しどのように耐力を低下させていくかという, 難しいけれども

できるだけ正確な評価予測が, その後の合理的な維持管理計画には不可欠である. また, 新設構造物においても, 保有性能の劣化予測において説明力のある高信頼性の評価が要求されるのはいうまでもない.

ところで, 昨今の構造解析技術およびコンピュータハード技術は非常に高く, 高精度かつ大容量の解析が手軽にできるようになった. このような現状を鑑みると, 腐食表面の凹凸を考慮した強度解析も容易に精度良くできるであろうから, 腐食表面の凹凸状態が実際の状態を模擬できれば, 腐食損傷による強度劣化は解析的に予測可能となる³⁾⁻¹¹⁾. すなわち, 腐食表面形状の経年変化を表現できるモデルが開発されれば, 既設あるいは新設構造物の維持管理において, 説明力のある将来予測が可能となる.

本研究では, 以上の議論から, 腐食表面の経時変化が考慮できる腐食表面生成モデルを考案・提案する. このとき, モデルはできるだけ簡単に説明力があるとともに, 塗装の防食効果などの腐食進展に影響する要因も考慮できるような拡張性に富むものが要求されよう. したがって, モデルの構築にあたってはこれらを満足するよう, とくに注意を払っている.

さらに, 本研究で提案する腐食表面生成モデルにより作成された腐食表面と実際の腐食鋼材の表面形状測定結果を比較することにより, 本モデルの妥当性を検証する. この検証には, 鋼材の腐食表面を詳細かつ継続的に測定した

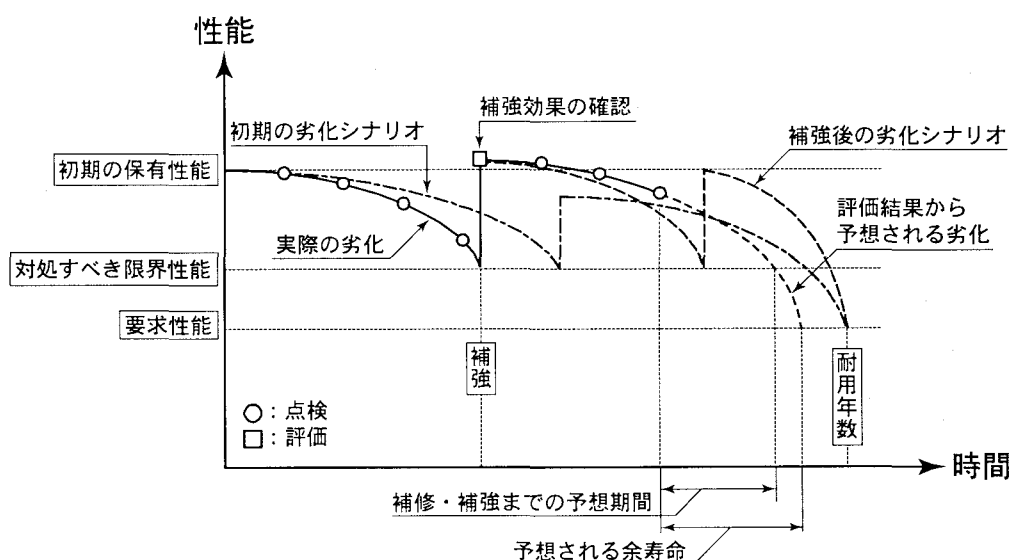


図-1 維持管理における構造物の経年劣化

データを用いることが望ましいが、そのようなデータは入手困難であった。そこで今回は、約100年間供用された後、腐食が原因で撤去された総リベットプレートガーダーの鋼材表面における凹凸状態の測定結果と比較した。

2. 構造物の経年劣化と維持管理のあり方に関する一考察

図-1に維持管理問題でよく用いられている構造物の経年劣化曲線と維持管理のイメージを示す。図中、縦軸は耐力などの性能を示すが、構造物の保有する性能が要求性能を上回っていれば構造物は健全である。このように、構造物に要求される耐用年数(供用期間)を通して、保有性能が要求性能を上回るように保持するための行為が維持管理である。この考えにしたがえば、維持管理は保有性能が要求性能に低下するまで構造物を放置してもよいことになるが、実際にはある安全性を考慮して限界値(図では対処すべき限界性能)を決め、これに達する前に補修や補強などが施されることになる。

さて、構造物のトータルライフコストを試算するためには、構造物に要求される耐用年数を決定し、その期間中の構造物の劣化曲線を予測(あるいは仮定)して、維持管理コストを算出する必要がある。ところが、腐食は構造物のおかれている環境によって大きく影響されるので、実際に起こる劣化進行は、当初に想定した劣化曲線と異なることが予想される。

初期に描いた維持管理シナリオは、不確定要素を多く含み、現実とかけ離れた仮定を用いている場合もあるので、その精度は低いと考えられる。これに対して、点検・評価、あるいはモニタリングなどにより実現現象を把握・蓄積してきたデータは、その時点では最も高精度で信頼性が高いといえる。したがって、腐食に対する維持管理は、現時点での点検結果から構造物の健全度を評価するとともに、その

時点まで蓄積された健全度評価結果に基づいて将来の劣化予測を行い、その後の対処を決めるスタンスが望ましいと考えられる。換言すれば、維持管理のシナリオは点検・評価を行うごとに修正・更新し、信頼性を高めていく必要がある。

この考えに基づくと、本文で提案する経時変化を考慮できる腐食表面作成モデルは、次のように使用できる。

設計初期段階では、本モデルで使用するパラメータを仮定して腐食状態を予測し、強度劣化曲線を求める。これにより、板厚などの設計諸量や補修計画が決定される。供用後は、実際の腐食進行は当初の仮定とは異なるであろうから、点検毎に過去の一連のデータを基に腐食モデルのパラメータを修正・変更して、その後の腐食進行の予測精度の精緻化を図る。これにより、より合理的な維持管理が期待できる。

なお、本論文で示したモデルでは、将来的には塗装などの防食性能や局部的な腐食作用の影響を考慮して、より実際の腐食形態に近い経年変化を表現できるように拡張する予定であるが、今回は鋼板表面に一樣に凹凸が発生するような腐食形態のみにとどめた。

3. 腐食表面生成モデル

3.1 腐食進展現象の基本仮定

鋼の腐食は化学的には鉄分の酸化現象であるが、本研究では、鋼材表面の凹凸形状の時間的変化としてモデル化する。すなわち、ここで提案するモデルは、腐食による表面の減肉深さ(ここでは、これを独立腐食深と呼ぶ)は、ある強さのアタック因子が鋼表面を攻撃することによって起こると仮定する。これは、「ある広さの領域に、ある期間中n個の爆弾が投下され、その投下位置に穴があく」と考えると理解し易いであろう。このとき、n個の爆弾(アタック因子)は、ある領域にランダムにふりまかれると仮定し、ま

た、一つの爆弾による穴の深さ（独立腐食深）は爆弾の破壊力（アタック因子の強さ）に起因すると仮定する。

一方、実際の腐食表面の凹凸形状の観察結果から、腐食は深さ方向のみならずある広がりを持って進展すると考えると、より説明力が高いことが、すでに明らかにされている⁶⁾。上記で得られた独立腐食深は、アタック因子の位置の深さ方向のみに穴が掘られることになり、空間的な広がりを有していない。そこで本研究では、上記の独立腐食深に、すでに筆者らが提案している空間的自己相関モデル⁶⁾の考えを適用して、深さのみならず空間的な広がりをも考慮したより実際に近い腐食表面形状を生成する。

以下では、上記の考えにしたがって、経時変化を考慮した腐食表面形状作成モデルを具体的に説明する。

3.2 独立腐食深の生成

いま、ある期間に、ある面積あたり q の腐食強さを有するアタック因子 f_i を考える。これがある期間 ΔT に鋼板表面にランダムに n 個ばらまかれ、アタック因子がばらまかれた位置では d_{A_i} の面積に q だけの独立腐食深が発生すると仮定する。そして、鋼板の腐食は、この現象がある期間毎に繰り返されて進行していくことと仮定する。したがって、本モデルでは、独立腐食深は、アタック因子の強さとその面積（広さ）およびそのばらまかれる分布（アタック因子の数 n と位置）によって決定される。

これらの独立腐食深の決定要因は鋼材が置かれている環境条件によって刻々と変化し、また位置的にも変化すると考えられるが、維持管理での時間スキーム（恐らく年単位くらいで十分と思われる）や健全度を評価するための構造要素の大きさ（板要素あるいは部材レベル程度の大きさを考えている）からみれば、各々のアタック因子の強さは同じとして問題はないと予想される。また、鋼板表面は連続的に扱うべきであろうが、腐食表面の凹凸形状の表現やその統計的処理を行うためには、図-2に示すように、格子状に離散化して考えるのが便利である。そこで、本モデルでは、図-2のような正方形メッシュを有する格子点の独立腐食深を与えることとする。独立腐食深は、アタック因子の強さ F とそれが単位期間内に降り注ぐ個数 n によって決定される。

ここに、アタック因子の強さ F は、

$$F = q \cdot A \quad (1)$$

で、 q は単位面積当たりの腐食強さ、 A は格子一つの面積である。また、アタック因子は、 n 個の乱数を発生させて、対応する格子点（格子点数 N ）にランダムに振り分けられる。なお、次式

$$Q = F \cdot n \quad (2)$$

は、単位時間における総アタック量と考えることができる。

さて、上記の独立腐食深を腐食期間について積分すると、各格子点の経過時間 T における独立腐食深が得られる。たとえば、単位時間を $\Delta T = 1$ 年、アタック因子の数を $n = 10$ 個/年として、1年目および2年目の腐食格子点を描けば、図-2に示すようになる。図(b)で、○と△が重複している格子

○△:抽出された格子点($n=10, N=81, \Delta T=1$ 年)

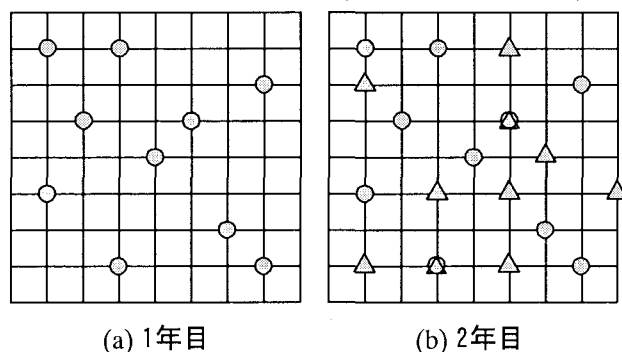


図-2 経年変化モデル概念

点は、2年続けてアタック（腐食）を受けたことを示す。

3.3 鋼板の腐食表面形状の作成

前節で求めた経過時間 T における独立腐食深は、鋼表面の格子点にランダムに腐食深を与えたもので、実際の腐食表面の凹凸形状とは異なっている。すなわち、実際の腐食表面では、一つの深い腐食ピットの隣り合う点はそのピットの影響を受けたような形状となることが確認されているが、上記の独立腐食深は必ずしもこのような腐食形態を表現できていない。したがって本モデルでは、実際の腐食形状により近い腐食状態すなわち腐食の空間的な広がりを考慮するために、空間的自己相関モデルを適用して、独立腐食深を補正する。

空間的自己相関モデルは、ある格子点 i での独立腐食深はその点からある距離をもって離れた格子点 j の腐食深に影響するというモデルであり、

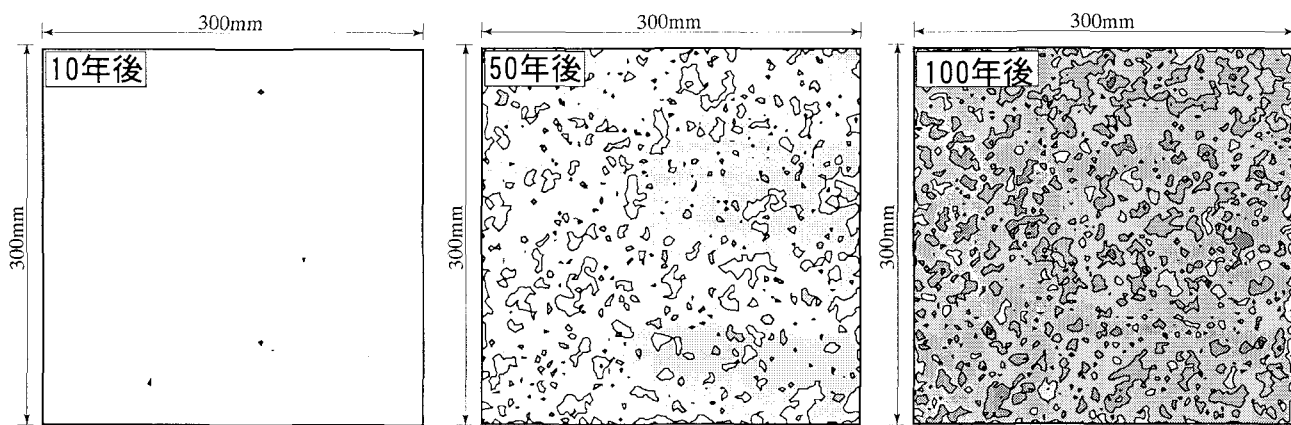
$$\{Z_i\} = \left\{ \sum_{j \in \Omega} \left(e^{-\beta d_{ij}} \right) V_j \right\} \quad (3)$$

のように表される。ここに、 Z_i は、表面の腐食深、 V_j は前節で得られた独立腐食深で、 d_{ij} は点 i と j との距離、 β は距離減衰定数、 Ω は空間的自己相関の影響範囲である。経過時間 T における鋼材表面の独立腐食深が得られると、腐食表面形状は式(3)で与えられる。このとき、距離減衰定数 β と影響範囲 Ω については、過去の資料に基づいて一応 $\beta = 0.4$ 、 $\Omega = 50\text{mm}$ を採用した。

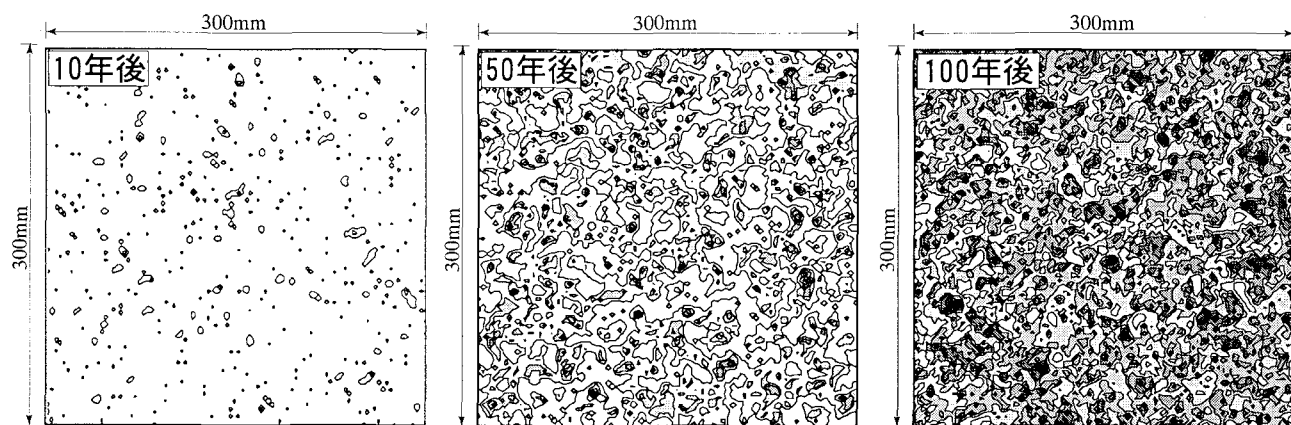
3.4 腐食表面作成モデルにおけるパラメータ F および n の影響

本論文で提案するモデルでは、腐食表面形状はアタック因子の強さ F およびその個数 n によって決定される。ここでは、これらの二つの支配パラメータの有する特徴について検討する。

本モデルによって作成した腐食表面形状の例を図-3～4および表-1に示す。各図表の(a)および(b)はそれぞれアタック因子の大きさを $F = 0.1$ および 0.5mm/年 とし、単位時



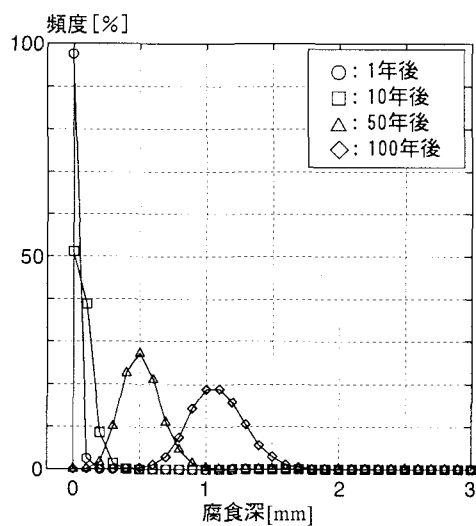
(a) $F=0.1\text{mm/年}$, $n/N=0.025$



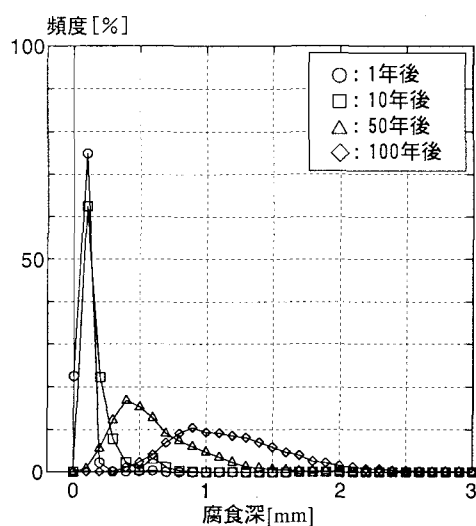
(b) $F=0.5\text{mm/年}$, $n/N=0.005$

:0.0~0.5
 :0.5~1.0
 :1.0~1.5
 :1.5~2.0
 :2.0~2.5
 :2.5~3.0 [mm]

図-3 腐食深等高線図の経時変化



(a) $F=0.1\text{mm/年}$, $n/N=0.025$



(b) $F=0.5\text{mm/年}$, $n/N=0.005$

図-4 腐食深の頻度分における経時変化

表-1 腐食深に関する各統計量

	経過時間[年]	平均腐食深[mm]	標準偏差[mm]	最大腐食深[mm]	最小腐食深[mm]
○	1	0.011	0.019	0.159	0.000
□	10	0.114	0.064	0.547	0.007
△	50	0.568	0.145	1.279	0.096
◇	100	1.135	0.209	2.074	0.401

(a) $F=0.1\text{mm/年}$, $n/N=0.025$

	経過時間[年]	平均腐食深[mm]	標準偏差[mm]	最大腐食深[mm]	最小腐食深[mm]
○	1	0.011	0.045	1.000	0.000
□	10	0.114	0.142	1.214	0.000
△	50	0.569	0.312	2.501	0.018
◇	100	1.134	0.431	3.470	0.201

(b) $F=0.5\text{ mm/年}$, $n/N=0.005$

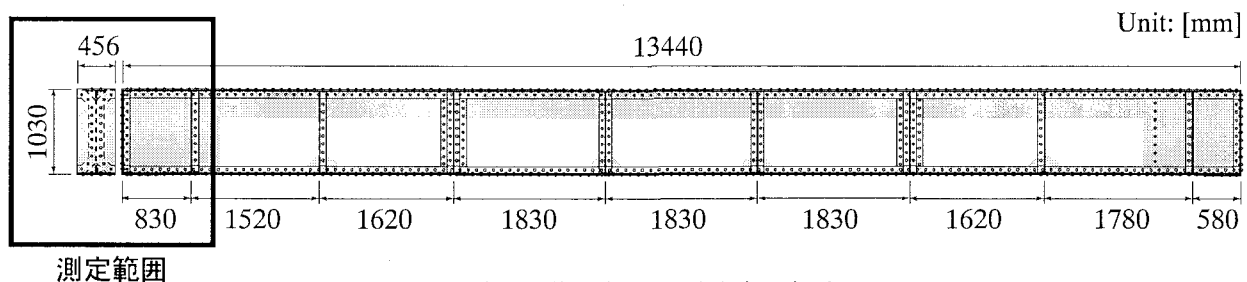


図-5 表面形状測定に用いた鋼桁の概略図

間当たりの総アタック量 $Q=25$ [個・mm/年]となるように n を決めた。また、鋼板の寸法は $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ で全格子点数 $N=10000$ 個(100×100)とした。ここで、 n と N の比 n/N は、アタック因子が表面に及ぼす影響面積率を示す。

図-3に、10年、50年および100年後の鋼板の腐食深等高線図を示す。図から、本モデルのような考えに基づけば、適当な F および n を用いることによって時間の経過とともに進展する腐食表面を表現できることが予想される。パラメータ F , n/N がそれぞれ異なる図(a)と図(b)を比較すると、図(a)では腐食表面の起伏が比較的緩やかであるのに対し、図(b)ではかなり起伏の激しい腐食表面が形成されているのがわかる。これらの腐食表面の腐食深頻度分布を図-4に示すが、図(a)は図(b)に比べてばらつきが小さい(標準偏差が小さい)。このように、腐食面積率 n/N が大きい場合は、一様な腐食がほぼ全面に分布する腐食(腐食深の標準偏差が小さい)となり、起伏の小さい腐食表面が形成される。一方、腐食面積率 n/N が小さい場合は、腐食深のばらつきが大きくなり、激しい起伏を有する腐食表面が形成される。

ところで、表-1にこれらの腐食深の統計量を示すが、表からアタック量 Q を一定とした場合、経過時間が同じであれば平均腐食量はほとんど同じであることがわかる。このことから、点検で得られた平均腐食量をもとにアタック量 Q を求め、腐食深測定結果の標準偏差からパラメータ F と n/N を決めれば、本モデルによって構造物の腐食の将来予測が可能となろう。

4. 腐食表面作成モデルと実測結果との比較

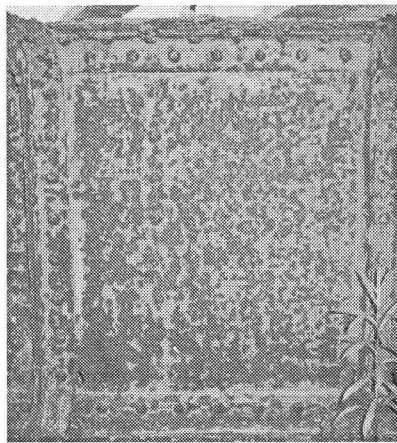
実際の構造物において経年的に観測された腐食表面があれば、本モデルの妥当性を検証するためには、それと比較するのが最も望ましい。しかし、継続的に測定した表面の凹凸形状は入手できなかったため、ここでは、実際の腐食橋梁の一部を用いて本モデルによる表面形状と比較する。

本橋梁は供用後約100年を経過し激しく腐食しているが、幾度か塗装替が行われていると考えられる(実際の塗装履歴は十分には把握できなかった)。このような防食対策が施された橋梁の腐食と本モデルを直接比較するのはいくらか問題がある。すなわち、塗装が十分な防食機能を果たしている間は鋼地肌まで到達するアタック因子の数が減少すると考えられるが、本モデルではこのような防食対策の効果を全く考慮していない。本モデルでは、腐食表面はアタック因子の強さ F とその個数 n (面積)で決定されるが、以下で示すこれらの値は防食効果を無視して得られたもので、腐食表面形状をうまくとらえてはいるものの、これらの値を腐食進展予想にそのまま適用するのは十分ではない。

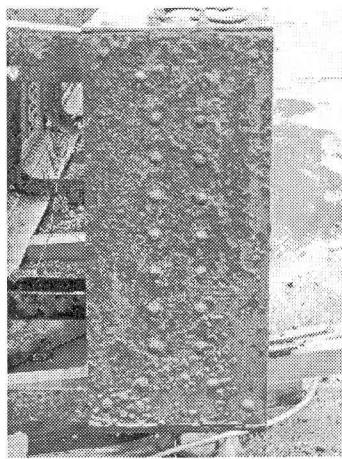
4.1 腐食した鋼桁の表面形状測定

(1) 供試体概要

腐食表面形状の測定を行った鋼桁は、高知県穴内川河口において102年間供用され、2002年に著しい腐食のために撤去された6径間単純支持プレートガーダー橋(総リベット接合)の一部である。当初は鉄道橋として供用されていた



(a) ウェブ



(b) エンドプレート

写真-1 ウェブおよびエンドプレートの外観写真

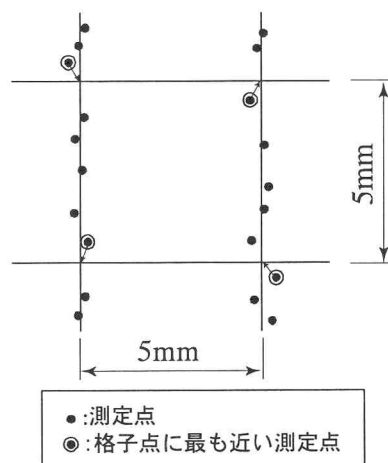


図-6 測定データの修正方法

が、1975年からRC床版を打設して歩道橋として使用された。本橋の設置場所は太平洋からわずか200m程度しか離れておらず、飛来塩分の影響を大きく受けている。

図-5に表面形状測定を行った鋼桁の概略と腐食状況を示す。腐食は桁全体に及んでいるが、特徴的な腐食が確認された箇所を図中に影付きの領域で示している。ウェブは、上フランジ側の腐食が激しいのが特徴的であるが、桁の両端を除いて腐食の程度は比較的軽微であった。上フランジは枕木が設置されていたと思われる箇所に激しい局所腐食がみられた。また、下フランジは、上面に大きな孔食が局所的に点在する腐食形態であった。エンドプレート（桁端の補剛プレート）については全面に層状錆が発生していた。

写真-1に、腐食状態の例として、ウェブとエンドプレートの外観を示す。

(2) 表面形状測定方法および腐食深の算出

腐食表面形状は、表面の錆や残存塗膜を除去した後、図-5に示す測定範囲を測定した。表面の凹凸測定は、写真-2に示すポータブル3次元計測装置を採用した。この計測装置は、全ての任意点（腐食表面）の座標値を、予め設定した3次元座標系を用いて計測できる。測定に先立って表面に5mm間隔でガイド線を描き、これにプローブを沿わせて鋼表面の座標を測定した。なお、測線方向には1～2mm間隔で座標データを取得している。

ところで、腐食深の測定結果を統計的に処理するためには、測定点の場所的な偏りをなくす必要がある。そこで、測定された表面の座標から、5mm間隔メッシュでの腐食深データに修正した。このとき、5mm間隔メッシュ点での座標値は、図-6に示すようにその点に最も近い位置にある測定点の座標値とした。

また、測定された表面の座標値には、図-7に示すように、鋼板の初期たわみが含まれているので、表面の腐食深を求めるにはこの初期たわみを座標値から取り除く必要がある。本研究では、鋼板表面の全測定結果を用いて、板の基準面（初期たわみ面）を双2次関数としてその係数を最小2乗法により求め、さらに、腐食していない（あるいは



写真-2 3次元計測システム

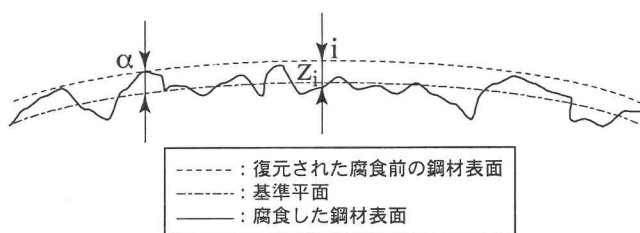
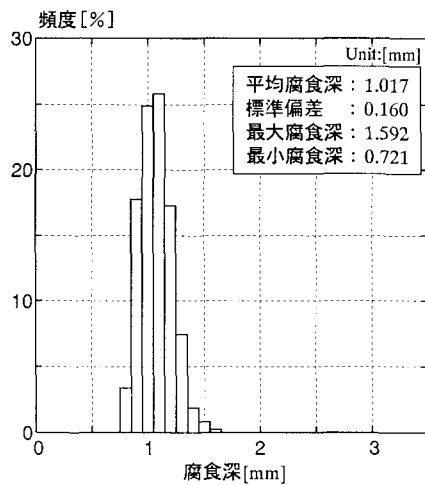


図-7 腐食深の算出方法

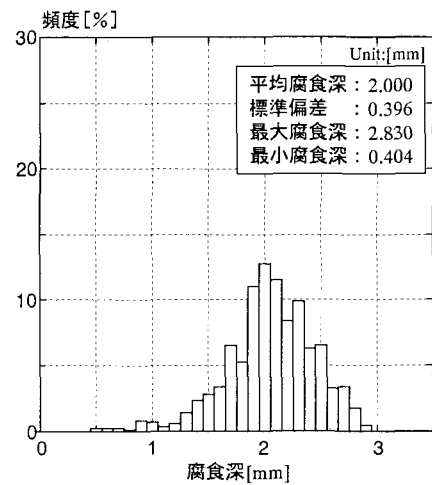
そのように思われる) 箇所の座標データの腐食深が0となるように基準面全体を補正した。このようにして求めた初期たわみ面の座標を用いて測定結果を補正し、各点の腐食深 Z_i を求めた。

4.2 生成された腐食表面の妥当性

さて、本研究での腐食表面生成モデルを用いて鋼板の腐食表面を作成し、その結果と前節で示した腐食鋼桁のウェブおよびエンドプレートの腐食深ヒストグラムを図-8お

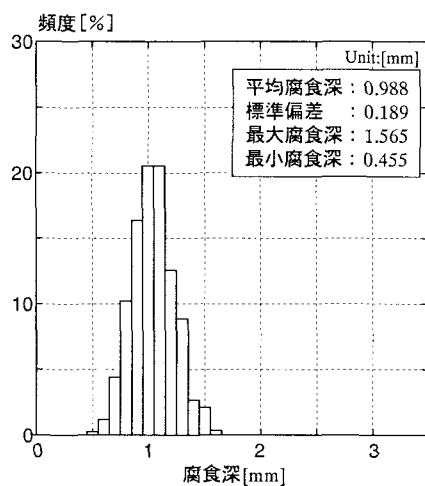


(a) ウェブ

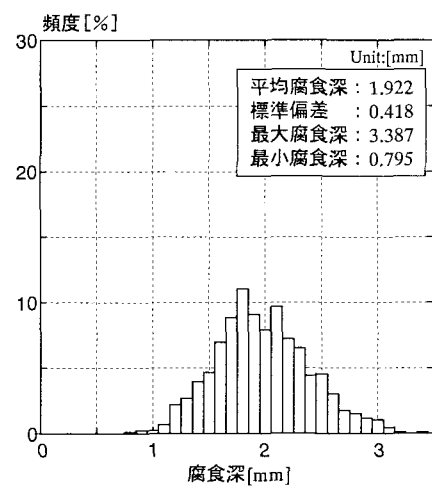


(b) エンドプレート

図-8 ウェブおよびエンドプレートの腐食深ヒストグラム (実測値)



(a) ウェブ ($F=0.072\text{mm/年}$, $n/N=0.069$)



(b) エンドプレート ($F=0.165\text{mm/年}$, $n/N=0.059$)

図-9 経年変化モデルによって再現されたウェブおよびエンドプレートの腐食深ヒストグラム

および図-9に示す。なお、比較対象とした腐食表面の領域は、それぞれの板の一部(200mm×100mm)である。ここで、図-8は、ウェブおよびエンドプレートの腐食深実測値のヒストグラムであり、図-9は、本モデルによる腐食深で、ヒストグラムが実測値に合うようアタック因子の強さ F および個数 n を試算した結果の一例である。ここで、パラメータ F および n の値は、本モデルにより作成された腐食深の平均値と標準偏差が実測値に一致するように試算して決めた。図-8と図-9を比較すると、この方法でパラメータを決めると最大および最小腐食深はほぼ実測値に近い値となるようにみえる。

図-8と図-9を比べると、実測結果とモデルによる結果とはよく類似しており、図-9に示すパラメータ F および n/N の値を用いることにより、本モデルは102年後の腐食深ヒストグラムの分布を表現していることがわかる。

また、両図に示すように、ウェブとエンドプレートで、実測値の腐食深ヒストグラムは大きく異なっているのがわかる。すなわち、ウェブでは平均腐食深付近の比較的狭い範囲に腐食深が集中し、ばらつき(標準偏差)が小さい分布形状であるのに対して、エンドプレートでは最大腐食深と最小腐食深の差が大きく、標準偏差の大きい分布形になっている。そして、図-9に示すように、腐食進展状況を支配するパラメータ F あるいは n/N の値も異なっている。これは、ウェブに比べてエンドプレートの腐食進行が激しいことに起因すると思われるが、このように、構造物の部位によっても腐食環境が異なることに起因して腐食深ヒストグラムの形状が大きく異なることがわかる。したがって、本モデルで腐食表面形状を模擬する場合、精度の良い推定を行うためには、各部位ごとの実際の腐食進展状態を再現できるパラメータ F および n/N を決定することが大変重要となる。

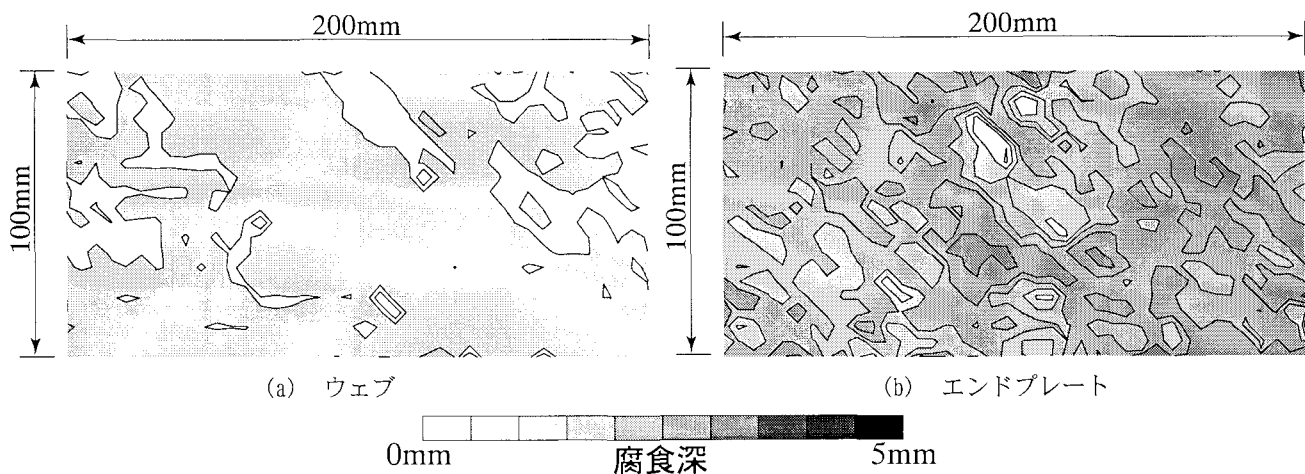


図-10 ウェブおよびエンドプレートの腐食深等高線図（実測値）

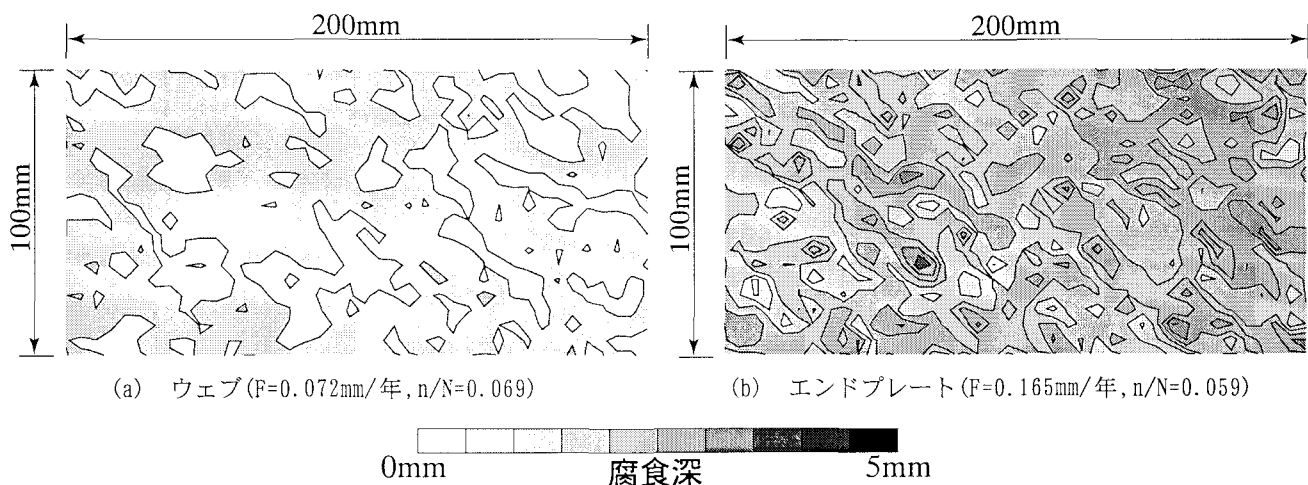


図-11 経年変化モデルによって再現されたウェブおよびエンドプレートの腐食深等高線図

本提案モデルを用いて経年変化を考慮した腐食表面形状を作成するとき、その表面形状はアタック因子の強さ F とその数 n で決まることはすでに述べたが、上記のように、実際の腐食を高精度で予測するための F と n の決定は簡単ではない。筆者らは、この問題に対して、2.で述べた維持管理手法を適用することによって、 F および n を比較的容易に決定できるのではないかと期待している。すなわち、構造物の供用後に行われた点検結果を用いてこれらのパラメータを決定あるいは修正していくことによって、信頼性の高い将来予測が可能となろう。

なお、パラメータ F および n の値については、今後、種々の腐食環境条件における数多くの測定データを踏まえて把握する必要がある。加えて、今回の測定機は比較的容易にかつ精度良く表面形状を測定できるので実務に適用可能といえるが、さらに簡便かつ高精度の計測技術の開発が望まれるところである。

図-8および図-9に対応して、腐食表面の腐食深等高線図を図-10および図-11に示す。両図を比較すると、腐食表面の等高線間隔や腐食深の分布については、ウェブおよびエンドプレートともに本モデルは実測結果をよく表現で

きていると判断できる。しかし、本モデルによる腐食表面は、実測よりも凹凸が激しく、また凹凸の数も多いようにみえる。これは、パラメータ F あるいは n 以外に、腐食の空間的な広がりを表すために使用した空間的自己相関モデルにおいて距離減衰定数 β の設定にも起因する。本研究では、文献6)にしたがって $\beta=0.4$ としたが、 β についてもなお検討すべき課題が残されている。

5. あとがき

本研究は、経時変化を考慮した鋼材の腐食表面生成モデルを考案し、実際に腐食した橋梁の鋼板の腐食表面測定結果と比較することにより、本モデルが、維持管理において腐食による強度劣化予測の精緻化に有用であることを示した。本研究の主な成果をまとめると以下になる。

- (1) 鋼材表面の腐食による凹凸形状を模擬的に発生させる食表面作成モデルを考案した。本モデルの大きな特徴は、腐食表面の経時変化を考慮できるので腐食表面の将来予測を可能にしたことである。
- (2) 本モデルは、独立腐食深を与え、その独立腐食深が経時的に蓄積される様子を乱数を用いて表現し、さらに、「腐

食は深さのみならず空間的な広がりを以て進行する」ことを表現するために、空間的自己相関モデルの考えを適用して腐食表面をより現実的なものとしている。

- (3) 本モデルでは、腐食進展を、鋼板表面に腐食の引き金となるアタック因子が降り注ぎこれが蓄積されることで表現しており、腐食形態は、アタック因子の強さ F とその個数 n の二つのパラメータに支配される。総アタック量 $Q(=F \cdot n)$ が一定の下では、アタック因子の強さ F が小さく腐食面積率 n/N が大きい場合は、腐食深のばらつきは小さく起伏の緩やかな表面が形成される。逆に、 F が大きく n/N が小さい場合は、腐食深のばらつきが大きくなり起伏の激しい表面となる。
- (4) 腐食した鋼橋の腐食表面形状の測定結果と比較することにより、本モデルが腐食表面の凹凸状況および腐食の進行を実際に近い状態で表現できることを示した。

謝辞

腐食した鋼桁の入手に際し、高知県 坂上高義氏には多大なご協力をいただいた。また、本研究を進めるに当たり、塗膜や錆の除去にはウォーターブリッド工法を有する豊稜技研(株)の惜しみないご尽力を賜り、さらに、腐食表面形状計測についてはミットヨ(株)の多大なご協力を頂いた。関係各位の暖かいご助力に対し記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室:既設橋の架替実態に関する調査, 土木技術資料, No. 40-4, pp. 38-43, 1998.
- 2) 名取暢: 鋼橋の腐食事例とその対策, 第1回鋼構造の維持管理に関するシンポジウム資料集, 1997.
- 3) 藤井堅: 腐食した鋼材の材料特性と残存耐荷力評価法, 第1回鋼構造物の維持管理に関するシンポジウム資料集, pp. 21-30, 1999. 7.
- 4) Fujii, K., Satoh, M., Minata, O., Ohmura, H. and Muranaka, A., :A Proposal on Effective Thickness for Evaluation of Buckling Strength of Corroded Steel Plate, *Proc. of the 5th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, pp.2105-2110, 1995.
- 5) Vo Thanh Hung, 永澤洋, 佐々木栄一, 市川篤司, 名取暢: 腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析, 土木学会論文集, No. 710/I-60, pp. 141-151, 2002. 7.
- 6) 奥村誠, 藤井堅, 塚井誠人: 空間的自己相関を考慮した鋼板腐食形状のモデル化, 土木学会論文集, No. 642/IV-50, pp. 109-116, 2000. 3.
- 7) 藤井堅, 海田辰将, 平井勝志, 奥村誠: 腐食鋼板表面形状モデル作成における空間的自己相関モデルの適用性, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 1031-1038, 2002.
- 8) 中村秀治, 藤井堅, 石川智己, 海田辰将: 経年水力鋼構造物の腐食面形状の統計的性質について, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 687-696, 2003.
- 9) 森猛, 渡辺一, 正井資之: 腐食した鋼板の表面形状シミュレーションと腐食鋼桁の曲げ耐荷力, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 675-686, 2003.
- 10) 社団法人日本鋼構造協会: 既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集(鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術), JSSC テクニカルレポート No. 51, 2002.
- 11) Kaita, T., Fujii, K. & Okumura, M. : Ultimate Strength Analysis of Corroded Plates Under Compression. *Proceedings of the First International Conference on Civil and Environmental Engineering*, pp.69-77, 2002.

(2003年9月12日受付)