

鋼表面の腐食進展に基づく鋼板圧縮強度低下の経時予測

Prediction of Remaining Compressive Strength of Steel Plate based on Its Corroded Surface Changing with Time

藤井 堅*, 山本 治**, 原 考志***, 中村 秀治****

Katashi Fujii, Osamu Yamamoto, Takashi Hara, Hideharu Nakamura

*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 4-1)

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

***川田工業株式会社 大阪技術部 設計一課 (〒550-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)

****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 4-1)

Not only evaluating the remaining strength but also predicting strength of a structure is necessary to accurately estimate life cycle costs and to design a rational maintenance plan. This paper presents a method that predicts the compressive strength of steel plates damaged by corrosion. The strength of the plate is evaluated by non-linear finite element analysis etc. using the modeled appearance of the corroded surface. Surface unevenness of the plate due to corrosion is determined by a simple model which generates surface irregularities changing with time. The effect of paint coating is also taken into account in the model. It can be shown through several examples that the proposed prediction method can offer feasible deterioration curves that can be useful in the design of maintenance plan for steel structures.

Key Words: Corrosion, Deterioration, Corrosion surface, Compressive strength, Steel plate

キーワード: 腐食, 経年劣化, 腐食表面, 圧縮強度, 鋼板

1. まえがき

近年, 従来の仕様規定型設計方法から性能照査型設計法への移行にともなって, 構造物のライフサイクルコスト評価が要求されるようになった^{1,2)}. ライフサイクルコストを評価するためには, 構造物の保有性能の経時的な劣化曲線を想定して維持管理シナリオを作成し, コスト評価を行う必要がある. このとき, 経時劣化曲線の精度がライフサイクルコストの評価精度に大きく影響するのは明らかである. また, 既設構造物の維持管理においても, 現時点の保有性能が十分であるかどうかの判定のみならず将来的にそれがどのように変化するかを精度良く推定することが, その後の適切かつ合理的な維持管理計画を立案するためには不可欠である. しかしながら, 十分な説明力を持った保有性能の将来予測手法はもちろん腐食鋼構造物の現況の保有性能評価法も十分には確立されていないのが現状である.

一方, 我が国では, 高度成長期に架設された多数の土木鋼構造物に腐食損傷が現れ, これらの構造物を今後どのように維持・管理していくかという社会的な大命題に対する解決策が強く要求されている. 鋼構造物の腐食はそれが置かれている周辺環境に大きく影響され, また, その各部材についても配置状況等によって腐食環境が異なるので, 個々の構造物あるいは部材ごとに腐食進展状況は異なる. したがって, 構造物の腐食に起因する強度低下を

一律に評価することは難しく, 個々の構造物ごとあるいは一つの構造物でも部材あるいは部位ごとに推定するのが合理的といえる. そして, 強度評価を行うためには, 板厚の減肉などといった腐食現象から得られる2次的な因子の経時変化を推定するよりも, 腐食表面そのものの進展を推定する方が, 直接的で説明力も高く, 高精度の評価が期待できると考えられる.

以上の議論から, 筆者らは, 鋼構造物の腐食表面を数値的に再現を試み, いくつかの腐食表面作成モデルを提案した^{3,4)}. しかし, 実際の腐食表面形状と比較すると, これらのモデルはまだ改善すべき余地が残されていることが明らかとなった. また, 鋼構造物では, 通常, 塗装などの防食対策が施されるが, その効果を考慮していなかった.

そこで本研究では, すでに提案した腐食表面生成モデル^{3,4)}を修正し, 実際の腐食形態により近い腐食表面を作成できるモデル(以下, 経時変化モデルと呼ぶ)を作成する. このとき, 塗装による防食効果の劣化について, 防食能力の経年変化を数値化することによってモデルに取り込むを試みる. さらに, この経時変化モデルを用いて腐食表面の進展を予測し, 腐食鋼板の圧縮強度解析を行って, 腐食進展に伴う強度の経年変化の解析例を示すとともに, ライフサイクルコスト試算における適用法について考察する.

2. 鋼構造物の維持管理における本論文の意義

鋼構造物の維持管理の一般的な流れを図-1に示す。図の右側には、本論文で示す腐鋼構造物の強度低下予測の流れを合わせて示す。図-1の左側に示すように、鋼構造物維持管理は、点検、評価、判断、現状対策、将来予測、将来計画と維持管理計画といった流れとなる。

鋼構造物が腐食すると、定期点検や異常時点検あるいは詳細調査において腐食状態が調査・測定される。実際の腐食状態調査では、表面の腐食状況を写真や数十点くらいの板厚は得られるであろうから、板厚の平均値や標準偏差は求めることができるであろう。さらに詳しい計測が可能なら腐食表面の凹凸状態や腐食表面の波形スペクトルなども求めることができよう。図-1右側に示すように、本論文の目的は、計測された腐食状態の測定結果に基づいて腐食表面を再現し、それを考慮した強度解析によって現状の強度評価を行うとともに、腐食表面の将来変化を予測し、さらにその予測結果に基づいて強度低下を予測するという、一連の腐食損傷評価手法の一例を示すことによって、将来の補修計画や維持管理計画において説明力のある判断材料あるいは評価資料を提供できる維持管理システムの構築に資することである。

ところで、我が国では性能照査設計法が定着しつつあるが、この設計法では、構造物の耐用年数（供用期間）を決め、その期間を通して構造物に要求される性能を保持することが要求されており、初期の設計・製作費のみならず耐用期間を通して要求性能を保持するために必要な維持管理費や廃棄、更新費を含めたライフサイクルコストの試算が要求されている。

従来の鋼構造物の腐食に関する維持管理においては、構造物の腐食は許容されておらず、構造物の耐久性については専ら塗装劣化などの防食対策に関して議論されてきたようにみえる。この考え方に基くと、適切な防食対策が施されれば構造物は腐食しないので腐食にともなう強度低下は無いことになるから、腐食については耐用年数を決めること自体無意味となる。このことは、構造物の延命化も含めて耐用年数を永久にしようという考えの下では別の話になるが、腐食を許容しないという従来の概念では、ライフサイクルコストを求めることはできなくなり、また、意味を持たなくなる。また一方で、著しい腐食損傷が生じて問題となっている橋梁が多数存在しそれらがまだ供用されているという現実があり、腐食を許さないという考え方は現実的でないと思われる。さらに、構造物に腐食が発生した場合、維持管理のシナリオには腐食の発生は考慮されていないので、「場当たり保全」しかできなくなり、その後の腐食進展にともなう強度低下を予測・評価し「予防保全」を行うという考えは、腐食を許すことになるから上記の考えとは矛盾するようにみえる。

これに対して、腐食を許容する維持管理の考え方は、現実的であり、性能照査設計におけるライフサイクルコストの持つ意味が明確となり、種々の構造物の中でライフサイクルコストを最小にする構造物を選択するという議論が可能になると考えられる。ただし、この考えは十分な維持管理の下に成り立つものであって、やみくもに腐食を許すという意味ではない。

以下では、維持管理において構造物の腐食を許容する考えに基

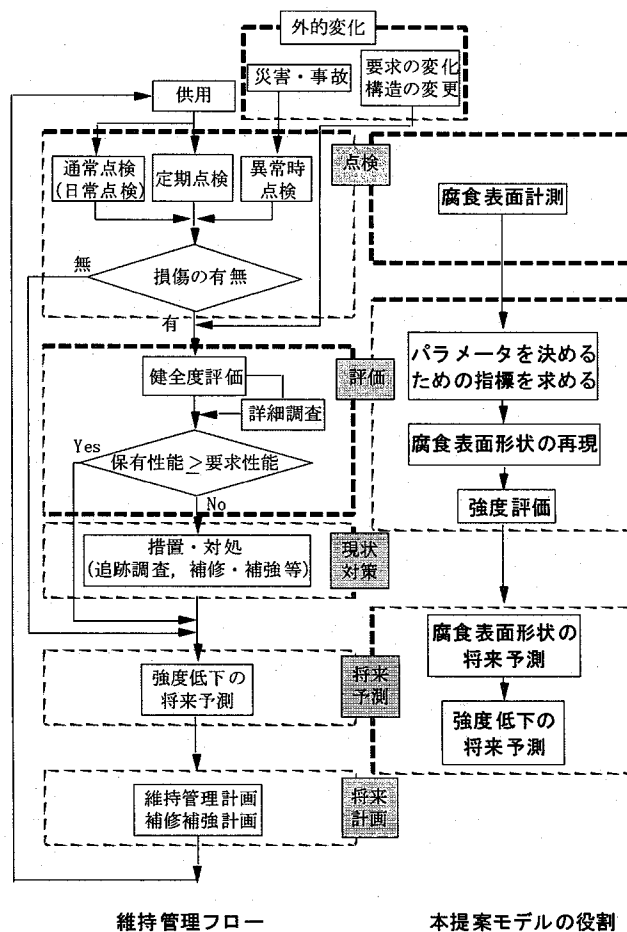


図-1 維持管理の流れと本モデルの位置づけ

づいて強度低下予測を行うが、構造物の腐食を許すか許さないかについては、今後様々な面から検討する必要がある。

3. 腐食表面の経時変化モデル

腐食表面を作成するために必要なパラメータは、多いほどより正確な表面を再現できるであろうが、実務レベルで測定可能な限られた情報から腐食表面を作るという面からはできるだけ簡単に少ない方がよい。本論文で示すモデルは、3つのパラメータを用いて腐食表面を作成するので比較的簡単であるが、それでも測定された情報が不十分な場合は推定値を用いることになる。また、構造物の供用初期における劣化シナリオの作成では、すべてのパラメータが不明であるから推定値を用いるしかないが、経時的に点検などにおいて腐食表面測定を繰り返すことにより、その精度は格段に向上すると推察される。

さて、先に提案した腐食表面の経時変化モデル^{3,4)}では、実際の腐食表面と比較して、まだいくつかの問題に対して改良する必要があると思われる。以下では、この問題点を指摘するとともに修正した新しい経時変化モデルについて述べる。

3.1 腐食表面の経時変化モデルの概要

鋼の腐食は電気化学的な反応現象であるが、本モデルでは、腐食表面は以下に示すような過程で進行すると仮定する。

1) 湿気や飛来塩分のような腐食を引き起こす外的因子（ここでは

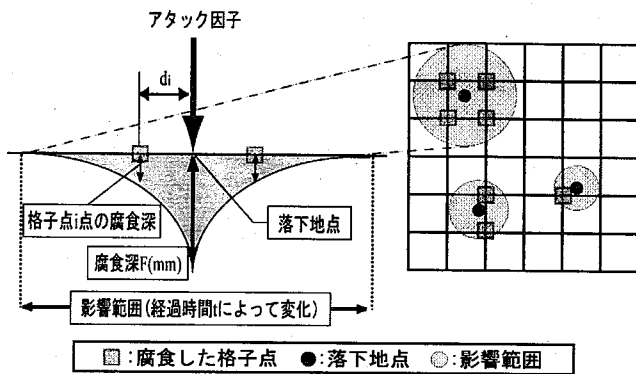


図-2 腐食のモデル化

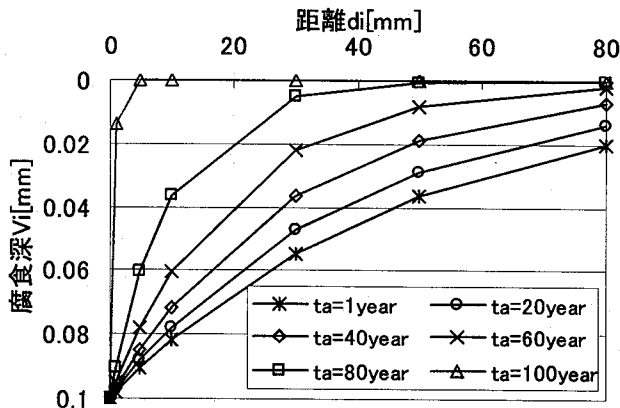


図-3 影響範囲の広がり

アタック因子と呼ぶ)が、鋼表面に落下しその地点をある深さ $F(\text{mm})$ だけ掘り下げる。

- 2) アタック因子は、毎年 n 個落下し、 n 個の腐食穴が空く。
- 3) 腐食穴は、図-2の薄墨部分で示すように、腐食深が大きくなるとともに、放射状にその腐食領域を拡大する。

また、腐食表面の凹凸は空間的に連続であるが、ここでは板の表面を等間隔の格子点からなるメッシュに離散化して考える。

以上は、すでに提案したモデル⁴⁾と同じである。しかし、実際の腐食表面形状と比較した結果、以下の改良を加えると実腐食表面により近い腐食表面を再現できると考えられる。

- 1) 長期間腐食した表面は凹凸が比較的なめらかな全面腐食に近づくようであるが、以前に提案したモデルにより作成した腐食表面は凹凸が激しく、また緻密であるように見える。これは、腐食が空間的に広がるという特徴はとらえているものの、空間的な広がりにはアタック因子が落下した後の経過時間にも依存して広がるであろうことを表現できていなかったためと考えられる(以前のモデルでは、空間的な広がり(図-2の薄墨部分)は時間に依存せず一定であった)。したがって、本モデルでは、この点を考慮して、アタック因子が落下した後の空間的な広がりが時間の経過とともに板平面内で放射方向に拡大するよう修正する。
- 2) 過去のモデルでは、メッシュの格子点にアタック因子を落下させて空間的自己相関モデルを適用して腐食表面を作成していた。この場合、同じパラメータ F, n を用いて腐食表面を作成しても、メッシュ幅に依存して、生成される腐食表面形状が異なってしまうという欠点があった。そこで、今回は、メッシュの切り方に依存しないよう工夫する。

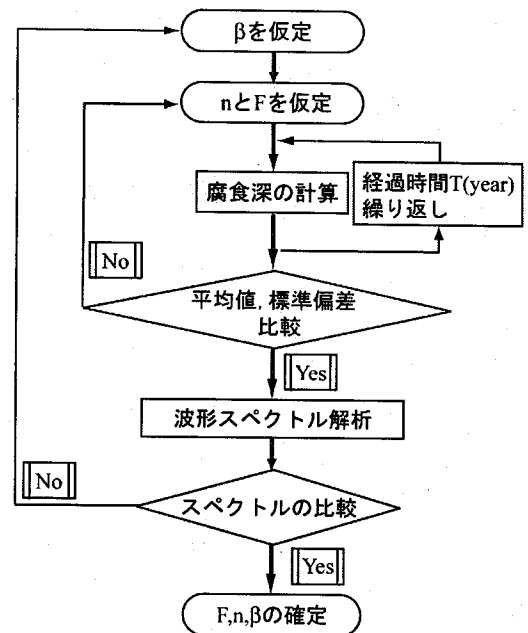


図-4 パラメータの決定方法

- 3) 塗装による防食効果が考慮されていなかったため、本論文では、塗装の防食効果と塗膜劣化を新に考慮する。

3.2 腐食表面の作成

アタック因子は鋼表面に1年間に n 個降ると考え、アタック因子が落ちた地点(図-2の落下地点●)は、深さ $F(\text{mm})$ の孔が空く。文献4)では、アタック因子の落下地点をメッシュの格子点に限定していたが、本モデルでは鋼板表面上にランダムに降るよう改善した。これにより、格子点幅に依存しない腐食深の生成が可能となった。また、空間的な広がり(図-2の薄墨部分)を空間的自己相関の考え(以下SACと呼ぶ)を適用して表現するが、この広がりが時間とともに拡大していくと仮定して、次式を用いてこれを表現する。

$$V_i = F \exp(-\beta d_i / (T - t_a)) \quad (1)$$

ここに、 V_i は一つのアタック因子によって発生する格子点 i の腐食深、 d_i は格子点 i 点とアタック因子の落下地点との距離、 β は距離減衰定数である。また、 T は構造物の供用開始時点からの経過時間(year)、 t_a は供用開始からアタック因子が降るまでの時間(year)で、 $T - t_a$ はアタック因子が落下した後の経過時間を示す。一例として、供用開始から $t_a=1, 20, 40, 60, 80, 100$ 年目に降ったアタック因子一個 ($F=0.1\text{mm}$, $\beta=2.0$) による、供用開始後 $T=100$ 年経過した時点における腐食深の広がりを図-3に示す。このように、経過時間にもなって、腐食の影響範囲が広がる現象を表現できることがわかる。

本モデルでは、1年間に n 個のアタック因子が降り、これが T 年繰り返されるので、格子点 i の腐食深 Z_i は、次式で与えられる。

$$Z_i = \sum_{\Delta T=1}^T \sum_{k=1}^n V_i \quad (2)$$

さて、本腐食表面作成モデルでは、上記のようにアタック因子の強さ F 、1年間に降るアタック因子の数 n 、そして減衰係数 β の

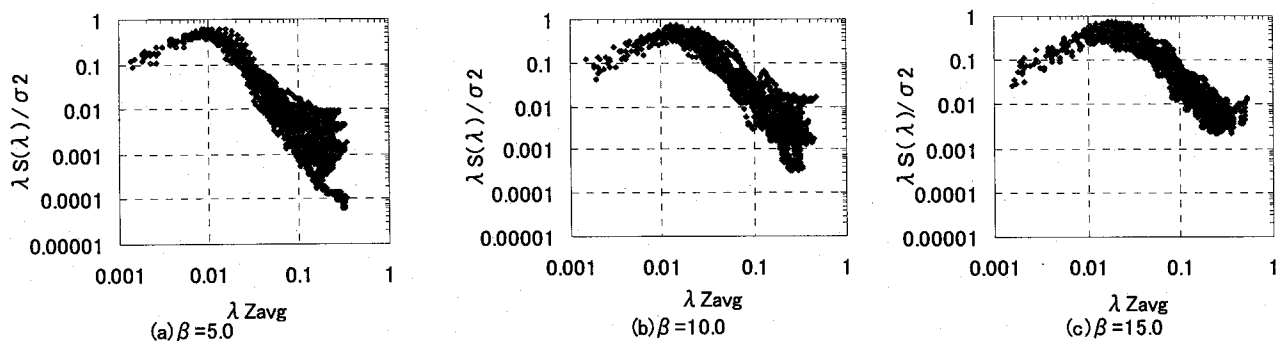


図-5 減衰係数 β とパワースペクトル密度の関係

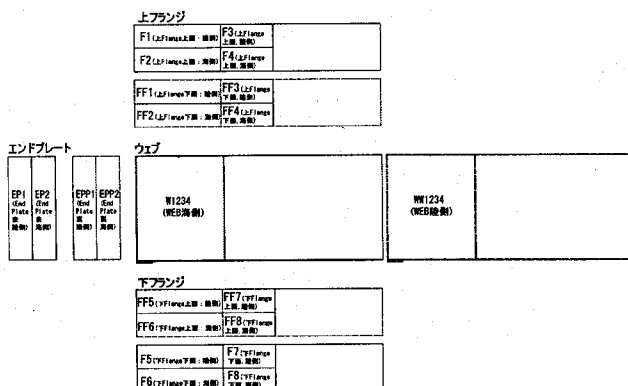


図-6 表面形状測定に用いた鋼桁の概略図

3つのパラメータを用いて腐食表面を表現する。これらのパラメータは、腐食表面の実測結果を基に決定することになる。

図-4に、パラメータ β, n と F の決定方法のフローを示す。まずパラメータ n, F を決定するために、①パラメータ β の値を仮定し、②パラメータ n と F を仮定する。③仮定したパラメータを用いて、式(1)、(2)を用いて腐食表面を生成し、経過時間 T (year)での腐食表面を生成する。④この鋼表面の腐食深の平均値と標準偏差を求め、これらの値が実測結果に一致するように F と n を求める。②において、パラメータ n と F を簡易に決定するために、腐食体積を用いると便利である。経過時間 T における本モデルによる腐食体積 Q は、 $Q = (\text{アタック因子の個数}) \times (\text{アタック因子1個による腐食体積 (図-2の薄墨部分の体積)})$ の経過時間 T (year)までの総和となるから、

$$Q = \sum_{i=1}^T \left(n \times \int_F^{\infty} \frac{F \cdot \exp(-\beta z)}{\beta^2} \cdot \pi \cdot (T - t_a)^2 \cdot \left\{ \ln \left(\frac{F}{z} \right) \right\}^2 dz \right) \quad (3)$$

と表される。ここに、 Q (mm)は空間的自己相関の影響範囲で、アタック因子の落下地点の周囲の格子点に生成される腐食深が微小になり、無視できるくらいに離れた格子点と落下地点の距離である。他方、実際に測定した実測腐食深の結果から求めた腐食体積 Q は、 $Q = (\text{平均腐食深}) \times (\text{鋼板面積 } A(\text{mm}^2))$ となるから、これを式(3)に代入し、標準偏差が実測結果に一致するよう n もしくは F の試算をすれば、容易にこれらの式を用いて F と n を求めることができる。

一方、減衰係数 β については、⑤腐食表面に数本の直線を引き、その腐食表面形状の波形パワースペクトル密度 $\lambda S(\lambda)$ から決めるこ

とができる。

以下では、減衰係数 β と表面波形パワースペクトル密度の相互関係について考察する。鋼板面積 $A=90000\text{mm}^2$ ($x=300\text{mm}$, $y=300\text{mm}$), 平均腐食深 $Z_{\text{avg}}=1.0\text{mm}$, 標準偏差 $\sigma=0.2\text{mm}$ として、減衰パラメータ β を5.0, 10.0, 15.0と変化させて腐食表面を作成し、この腐食表面に20測線を引いて各測線の波形のパワースペクトル密度を求めた。その結果を、平均腐食深と標準偏差で無次元化して図-5に示す。ここに $S(\lambda)$ はパワースペクトル密度(mm^3), Z_{avg} は側線の平均腐食深(mm), σ は標準偏差(mm), λ は波数($1/\text{mm}$)を示す。図から分かるように、減衰パラメータ β が大きくなると、アタック因子の影響範囲が狭くなるので腐食形状は凹凸の激しい腐食波形になり、波数が大きい成分のパワースペクトル密度が大きくなる。また、スペクトルピークを与える波数も大きくなることから、本解析では、この最大パワースペクトル密度を示す時の波数すなわち最も支配的な波長が実測値のそれと一致するよう β を試算した。

図-4に示すように、もしスペクトルのピークが実測腐食深と一致しなければ、もう一度パラメータ β を仮定しなおして、再度手順①からパラメータを決定しなおすことになる。以上に示したように、パラメータ β, n, F は、腐食表面の実測結果から得られたいくつかの指標に一致するよう繰り返し計算によって決定することになるが、それぞれのパラメータが腐食表面に及ぼす影響が明確であるので、数回の試算によって求めることができる。

3.3 実測腐食深との比較

比較の対象とした腐食表面形状は、図-6に示すような約100年を経過した6径間単純支持プレートガーダー橋のウェブ、エンドプレートおよびフランジの一部である。腐食表面の凹凸は、ウォータージェットによる除錆後、多関節式ポータブル3次元表面座標計測装置を用いて図-6に示す区間を測定した。測定結果を表-1に示す。表-1から、平均腐食深、標準偏差ともに、部位ごとに変動があるものの、変動係数 V は0.2~0.5の間に分布していることがわかる。またスペクトルピークを与える波数も0.01~0.09の間で分布しており、構造物の部位ごとに、スペクトルピークが異なることがわかる。

腐食表面の再現に先立ち、修正前(過去のモデル)と修正した後の経時変化モデル(修正モデル)を用いて、経過年数 $T=60$ 年の腐食表面形状を作成し、上記のプレートガーダーの腐食表面と比較

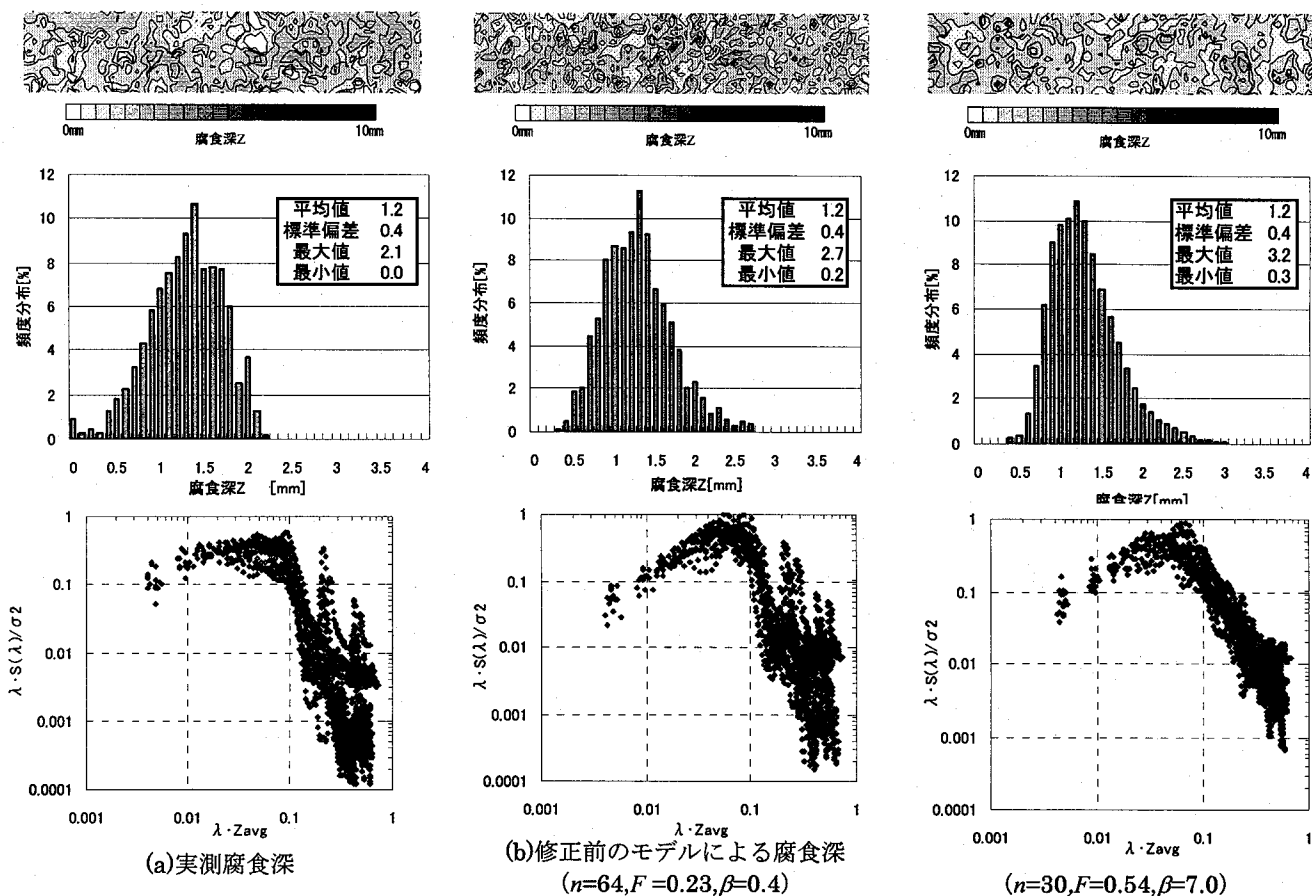


図-7 エンドプレートの実測腐食深とモデル腐食深の等高線図 (上), ヒストグラム (中), パワースペクトル密度 (下)

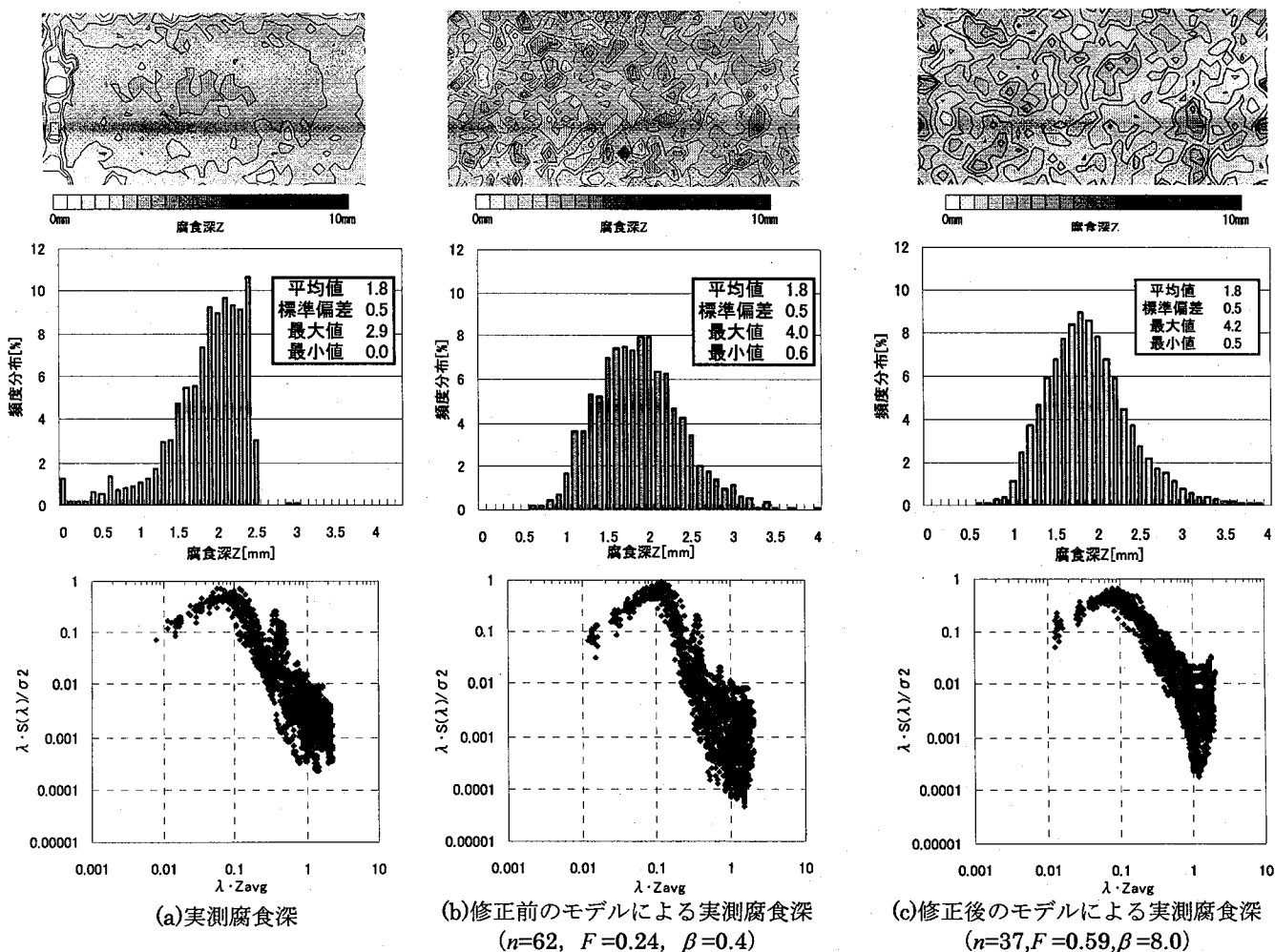


図-8 フランジの実測腐食深とモデル腐食深の等高線図 (上), ヒストグラム (中), パワースペクトル密度 (下)

表-1 実測腐食深の統計量

測定場所	平均腐食深 Z_{avg}	標準偏差 σ	変動係数 V	最大腐食深 Z_{max}	最小腐食深 Z_{min}	スペクトルピークを与える波数 $1/\lambda_{avg}$
単位	(mm)	(mm)	無次元	(mm)	(mm)	無次元
エンドプレート						
EP1	1.24	0.42	0.34	2.12	0.00	0.053
EP2	2.12	0.70	0.33	3.37	0.00	0.050
EPP1	0.30	0.07	0.24	0.55	0.00	0.014
EPP2	0.34	0.33	0.97	3.57	0.00	0.013
上フランジ						
F1	3.40	0.97	0.28	9.00	0.00	0.071
F2	2.70	1.42	0.53	8.69	0.00	0.049
F3	1.10	0.54	0.49	4.15	0.00	0.025
F4	2.41	1.11	0.46	12.38	0.00	0.029
FF1	1.00	0.44	0.43	2.85	0.00	0.014
FF2	3.40	0.97	0.29	6.17	0.00	0.073
FF3	2.43	0.44	0.18	3.23	0.00	0.057
FF4	3.17	0.87	0.27	9.24	0.00	0.070
下フランジ						
F5	1.81	0.51	0.28	2.94	0.00	0.080
F6	2.00	0.60	0.30	4.04	0.00	0.095
F7	1.28	0.48	0.38	2.18	0.00	0.036
F8	1.04	0.43	0.42	2.24	0.00	0.012
FF5	1.50	0.73	0.48	3.37	0.00	0.051
FF6	2.07	0.99	0.48	5.96	0.00	0.085
FF7	0.99	0.41	0.42	2.37	0.00	0.056
FF8	0.99	0.52	0.52	5.32	0.00	0.090
ウェーブ						
w1234	0.60	0.19	0.32	2.10	0.00	0.014
ww1234	0.63	0.15	0.24	2.54	0.00	0.017

してみた。なお、このプレートガーダーの経過年数は100年であるが、この間少なくとも2回の塗装はなされていると考えられる(実際の塗膜履歴は不明)ので、塗膜の耐用年数を20年と仮定し、残りの60年間に腐食したと仮定した。

エンドプレートの一部(図-7のEP1(400mm×80mm)、フランジの一部(図-8のF5(210mm×105mm))の腐食深のヒストグラムと等高線図、そしてパワースペクトル密度の算出結果を、それぞれ図-7、図-8に、実測腐食深、過去のモデルおよび修正モデルにより作成した腐食表面と比較して示す。図-8のフランジ腐食表面の等高線図を見ると、腐食深がなだらかな場合、過去のモデルと修正モデルを比較すると、修正モデルの方がなだらかな形状を再現できていることがわかる。しかし、個々の凹凸形状はなだらかなであるが、実測結果にみられる腐食表面全体がなだらかな形状を再現するまでは至っていない。これについては、今後、なお改善すべき余地があると判断される。

一方、図-7に示すエンドプレートのように凹凸形状が激しい腐食に対しては、修正モデルは、ヒストグラムについて、腐食深の大きな部分で頻度に若干の差があるものの、平均腐食深、標準偏差、等高線とともによく似た形状を作成できていることがわかる。また、パワースペクトル密度について、エンドプレートで16側線、フランジで22側線について計算した結果、図-7および8に示すように、0.1~1.0付近の波数が大きな領域でパワースペクトル密度に差があるものの過去のモデルに比べて、修正モデルは、スペクトルピークをほぼ再現していることがわかる。

4. 塗膜による防食効果のモデル化

一般鋼構造物では、防錆・防食のために塗装されるのが普通である。したがって、腐食表面の腐食進展を実構造物に近い形で精度良く予測するためには、塗装の防食効果および塗膜劣化を考慮する必要がある。また、それが適切な維持管理計画の作成やライフサイクルコストの精度の向上につながるのは明白である、そ

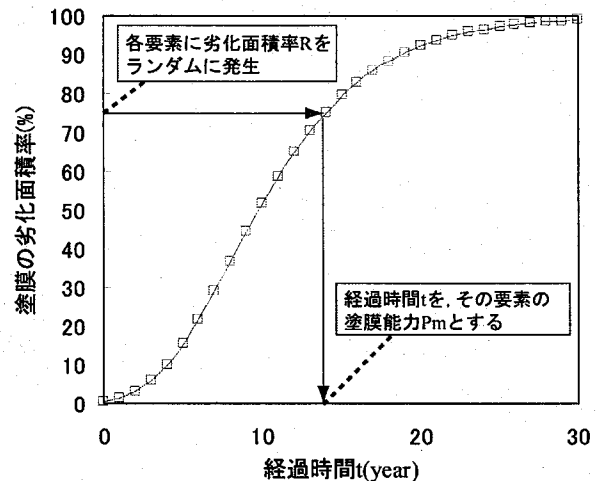


図-9 塗膜劣化面積率の経年変化

こで、本節では、先に述べた腐食表面経時変化モデルに、塗膜の防食効果および塗膜劣化をモデル化して、付加することを試みる。

4.1 塗装と塗膜劣化の仮定

塗膜は経年とともに劣化し防食能力が低下する。鋼表面には浮き錆びが現れ、やがて塗膜が剥離すると本格的に腐食が促進することは周知のことである。そして、塗膜の劣化度を測る指標の一つに次式で表される塗膜劣化面積率 y_i (%)がある。

$$y_i = \frac{\text{塗膜のはがれた面積} [\text{mm}^2]}{\text{鋼板の面積} [\text{mm}^2]} \times 100 [\%] \quad (4)$$

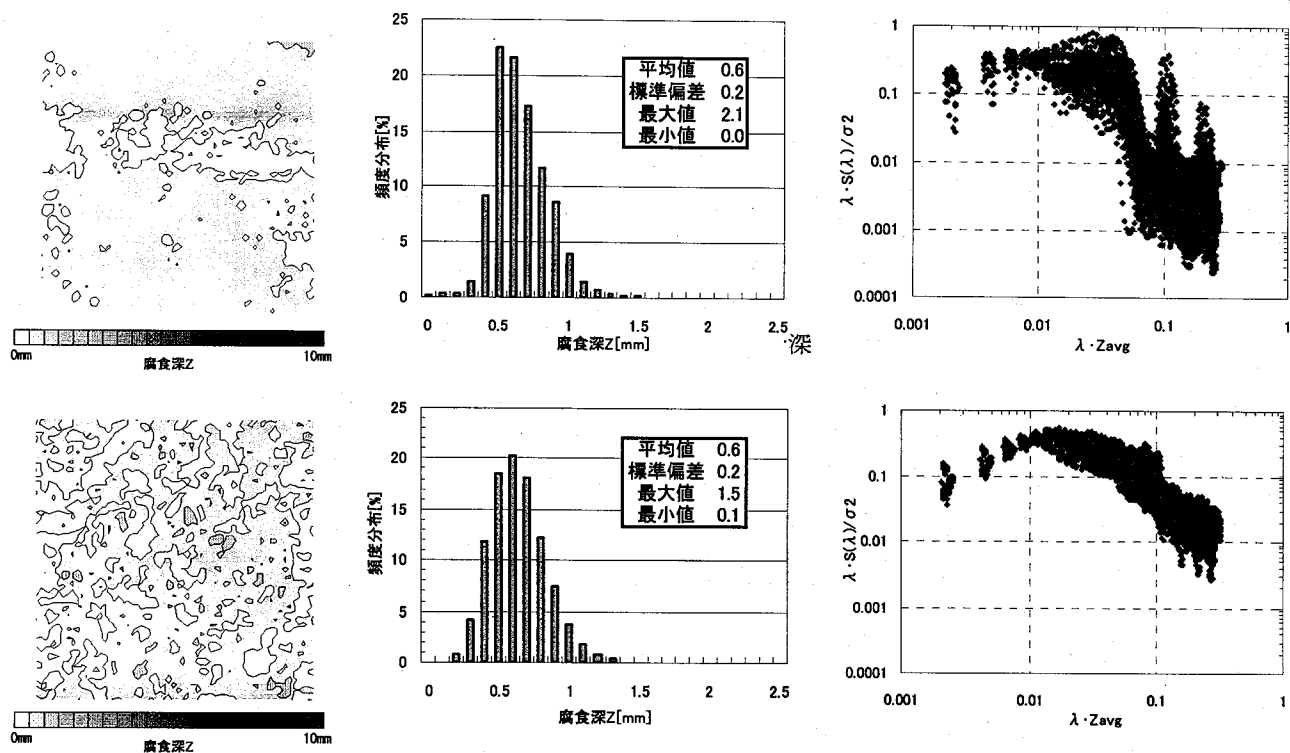
塗膜劣化面積率は時間の経過とともに増加するが、その変化はGompertz 曲線⁷⁾

$$y_i = a^{b^{t_{pass}} / t} \quad (5)$$

によって表すことができる。ここに、 t_{pass} は塗膜の経過年数(year)、 a, b は曲線を定める係数であり、一例を示せば図-9のようになる。図に示すように、一般には塗膜の劣化進展につれて腐食面積が急激に増加する。

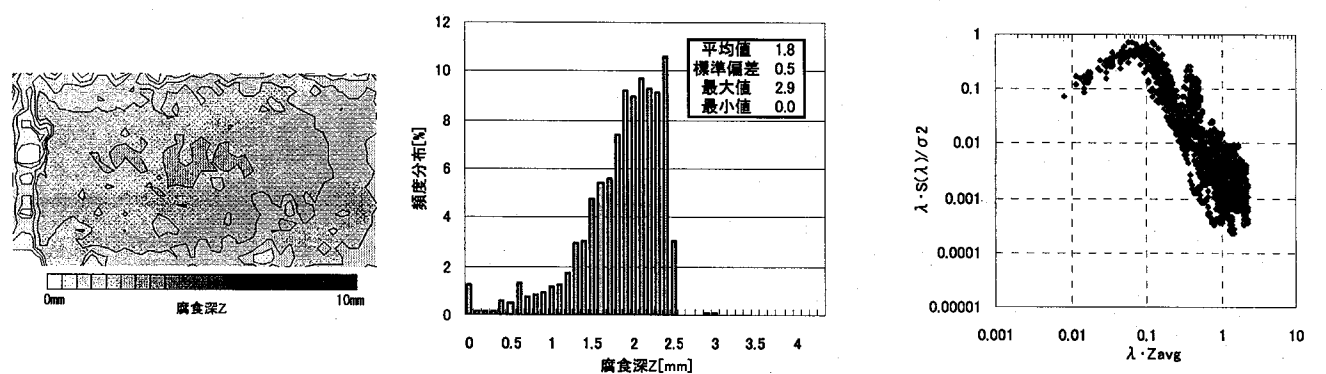
さて、本解析では、上記の現象を表現するために、以下のようにモデルを構築する

- 1) 鋼表面を、腐食の格子点とは別に、M個の要素に区切り、各要素mはそれぞれ防食能力 P_m を持っていると仮定する。
- 2) 防食能力 P_m は、要素ごとに異なっており、ある期間(ここでは1年とする)ごとにその能力が1ずつ減少し、能力が0になったときその要素内にあるメッシュ格子点(腐食深を表現するために離散化した図-2の格子点)は腐食し始めると仮定する。
- 3) ある防食能力Pよりも小さい能力を有する要素の個数をMpとすると、P年経過したときに錆が発生している要素数はMp個となるから、Mp/Mの値が劣化面積率 y_i に対応しているので、これが式(5)を満たすように各要素の防食能力を分布させる。各要素の防食能力は、乱数Rを発生させて分布させる。
- 4) 塗装の塗り替えが行われた場合、いままでの腐食深はそのまま、新しく乱数Rを発生させて各要素の防食能力を分布させ、その後は再び1年ごとに防食能力を減少させる。実際の塗装塗り替えでは、素地調整によって初期の塗膜劣化年数よりも小さ

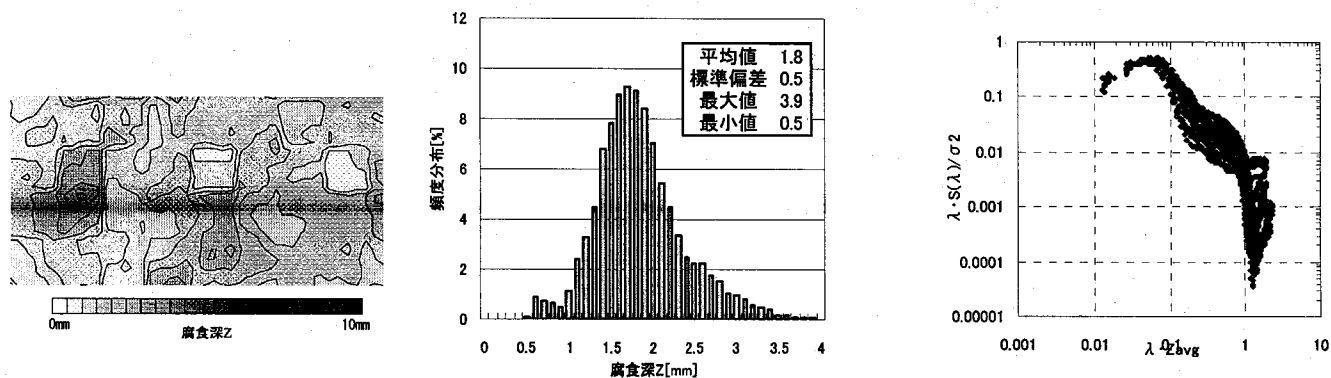


(b)塗膜劣化を考慮したモデルによる腐食深
($n=185, F=0.17, \beta=15.0$)

図・10 ウェブの実測腐食深とモデル腐食深の等高線図 (左), ヒストグラム (中), パワースペクトル密度 (右)



(a)フランジの実測腐食深



(b)塗膜劣化を考慮したモデルによる腐食深
($n=5, F=0.34, \beta=4.0$)

図・11 フランジの実測腐食深とモデル腐食深の等高線図 (左), ヒストグラム (中), パワースペクトル密度 (右)

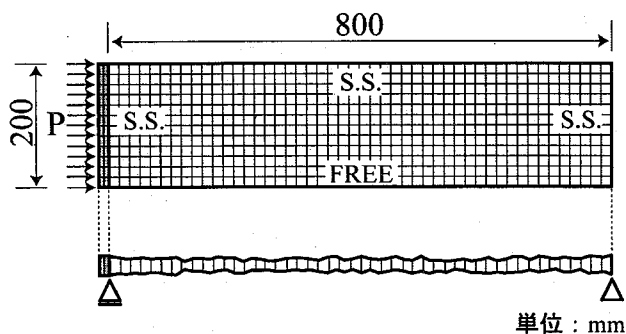


図-12 解析モデル

いことも指摘されている⁷⁾が、本モデルでは塗り替え時の新しい防食能力の最大値を低減させれば、この現象にも対応できる。なお、文献⁸⁾では、塗膜のピットを通して塗膜下で錆が発生した場合、塗膜剥離が発生して塗膜下においても腐食が進行することが指摘されているが、ここでは考慮しないこととする。

具体的な計算は、まず塗装時の初期劣化面積率を 0.05%、塗装の耐用年数を経たときを 100%として、パラメータ a , b を決定する。なお、図-9 は、耐用年数を 30 年とした場合の塗膜劣化曲線(係数 $a=0.005$, $b=0.999428$)である。次に、各要素の防食能力については、図-9 に示すように、乗算合同式法により塗膜劣化面積率に対応させて 0~100 の値 R (図-9 では 75(%))をランダムに各要素に当てはめ、その値に対応する経過時間 t (図-9 では 13(year))を、その要素 m の防食能力 P_m とすればよい。

4.2 実測腐食深との比較

塗膜劣化を考慮した腐食の経時変化モデルを用いて、いくつかの実測腐食表面の再現を試みた。比較対象とした腐食表面は、図-3 に示したウェブおよびフランジ部分である。腐食表面の作成条件は、経過時間 $T=100$ 年、塗膜の耐用年数 20 年間(ここでは、20 年で塗膜が完全に無くなるとしている)とし、実際に行われた塗装替えの履歴は不明であるので、架設当初と本橋梁が鉄道橋から道路橋に用途目的を変えたとき(約 50 年後)の 2 度は塗装されたと考え、塗装替えを 50 年目に一度行ったと仮定した。

図-10 にウェブの一部 $w1234(300\text{mm} \times 300\text{mm})$ の等高線図、ヒストグラム、パワースペクトル密度を示す。また図-11 には、フランジの一部 $F5(210\text{mm} \times 105\text{mm})$ の結果を示す。なお、図-11(a)の実測腐食深は、図-8(a)に示した実測腐食深と同じである。塗膜劣化を考慮した腐食の経時変化モデルによって作成した腐食表面と実測結果を比べると、腐食深等高線、ヒストグラムは両者で若干差異があるものの、パワースペクトル密度についてはかなり似通った分布となっていることがわかる。

以上のように、本モデルによって塗膜の防食効果と劣化現象を考慮した腐食表面形状を作成できることを示した。表面波形のパワースペクトル密度のピークに対応する波数、板厚の平均値や標準偏差を実測値に一致させることはできるように改善できたが、なお実測表面形状に近い十分な腐食表面が作成できたとは必ずしもいえない点もある。たとえば、図-11(b)に示したモデルにより作成したフランジの等高線図では、塗装の防食能力を要素に区切っ

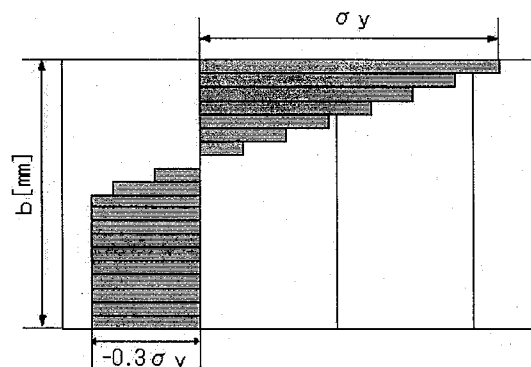


図-13 解析に用いた溶接部残留応力

てそれぞれの要素内で一定としているので、要素形状に影響された等高線図となっているなどである。これらのさらなる改良は今後の課題であろう。

5. 腐食進展を考慮した腐食鋼板の圧縮強度解析

ここでは、上述の腐食表面の経年変化モデルを用いて、プレートガーダーの圧縮フランジを想定した 3 辺単純支持 1 辺自由の鋼板圧縮強度の、腐食進展にともなう経時的な強度低下を求める。

5.1 解析モデルと条件

解析モデルを図-12 に示す。モデルの寸法は $200\text{mm} \times 800\text{mm}$ で、強度解析での要素幅は 1cm (20×80 要素)である。解析は、汎用構造解析プログラム ABAQUS による弾塑性有限変位解析である。要素は 4 節点シェル要素で、応力-ひずみ関係は完全弾塑性、Mises の降伏条件を用いた。材料特性は SS400 クラスを想定し、降伏応力 235MPa 、弾性係数 206GPa 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。

初期不整については、道路橋示方書¹⁾に規定されている製作誤差の許容値 $b/100$ を自由辺の中央に与えた、ここに b は板幅(フランジ半幅)である。残留応力については、図-13 に示す溶接組み立て時に導入される残留応力(圧縮残留応力: $0.3 \sigma_y$ 、引張残留応力: σ_y)を考慮した場合と考慮しない場合の 2 ケースについて解析した。なお、腐食にともなって表面に凹凸が生じると、それにつれて残留応力の分布は変化する。しかし、腐食表面がほぼなめらかな凹凸で腐食する全体腐食の場合は、凹凸付近の変化を無視すれば、もとの残留応力分布と変わらないと考えられる。そこで、図-13 に示す腐食前の状態と同じ分布とした。

また、腐食にともなって鋼表面に凹凸ができると、その中央面は元の平面から偏心を生じる。本解析では、それぞれの腐食メッシュ格子点の中央面偏心量の平均値(平均偏心量)が 0 となるように等圧縮変位を载荷した。

解析ケースを表-2 に示す。解析した経過年数は $T=100$ 年、塗膜の耐用年数を 20 年として、20 年ごとに塗装替えを繰り返した場合を想定する。腐食表面については、どの解析ケースも 100 年間に元の板厚 $t_0=12\text{mm}$ から平均板厚 $t_{avg}=7\text{mm}$ まで腐食すると仮定し、表-2 に示すように、表裏それぞれの面の腐食深 z_s , $z_b=2.5\text{mm}$ とし、表と裏の腐食深の変動係数 V_s , V_b がともに 0.3, 0.5, 0.7 となるように、標準偏差 σ_s , σ_b を決め、3 種類の腐食表面を作成

表-2 解析モデルの統計量

Type	Model	t_p [mm]	t_{avg} [mm]	z_u [mm]	z_s [mm]	σ [mm]	σ_s [mm]	V_u	σ_{su} [mm]	V_{su}	t_{max} [mm]	t_{min} [mm]	e_{avg} [mm]	n	F	β	残留応力
TypeA	1	12.0	7.0	2.5	2.5	1.2	0.8	0.3	0.8	0.3	10.4	1.6	0.02	750	0.25	4.0	残留応力なし
	2	12.0	7.0	2.5	2.5	1.8	1.3	0.5	1.2	0.5	11.4	0.0	0.00	113	1.65	4.0	
	3	12.0	7.0	2.5	2.5	2.4	1.7	0.7	1.7	0.7	11.8	0.0	-0.02	47	3.90	4.0	
TypeB	1	12.0	7.0	2.5	2.5	1.2	0.8	0.3	0.8	0.3	10.4	1.6	0.02	800	0.23	4.0	残留応力あり
	2	12.0	7.0	2.5	2.5	1.8	1.3	0.5	1.2	0.5	11.4	0.0	0.00	113	1.65	4.0	残留圧縮応力度
	3	12.0	7.0	2.5	2.5	2.4	1.7	0.7	1.7	0.7	11.8	0.0	-0.02	47	3.90	4.0	$\sigma_{rc} = -0.3 \text{oy}$

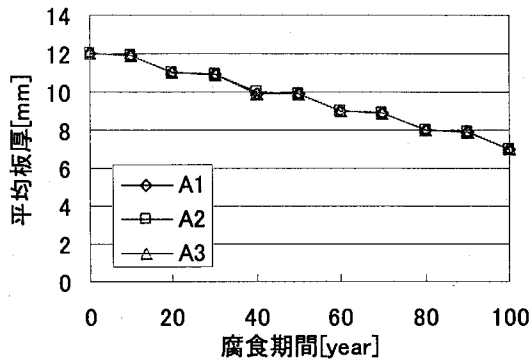


図-14 腐食期間-平均板厚関係

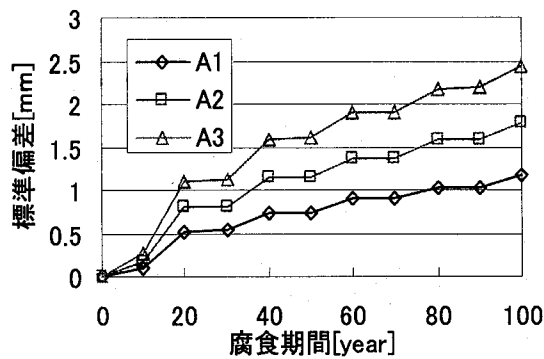


図-15 腐食期間-標準偏差関係

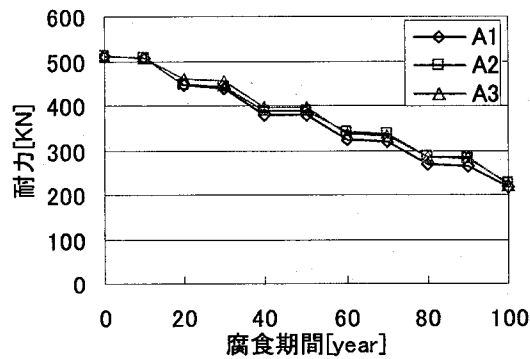


図-16 耐力-腐食期間 (Model-A)

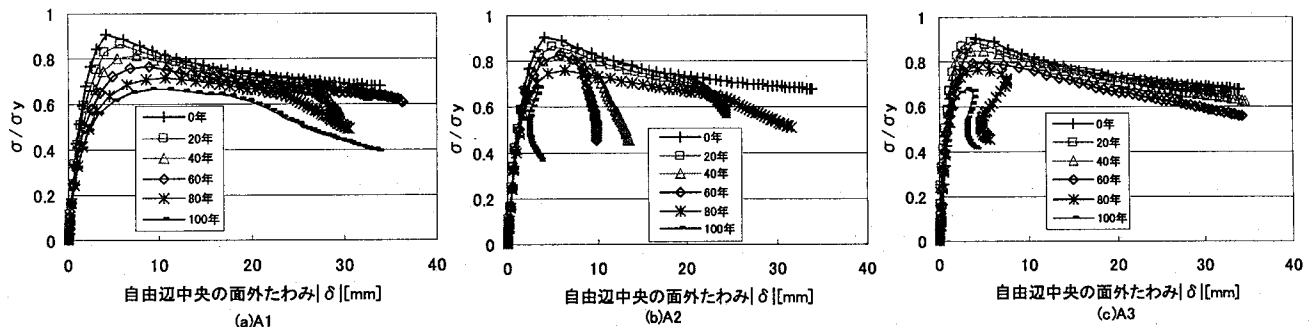


図-17 荷重-たわみ関係

した。また、表-2で、Model-AとModel-Bの違いは残留応力を考慮するかどうかであり、経時変化にともなう腐食表面形状はどちらも同じである、この条件下で腐食表面を作成し、平均板厚と標準偏差の変化を示せば、図-14および図-15のようになる。塗膜の防食能力は式(5)で与えているので、図-14に示すように、板厚の減少は、部分的には20年より短い期間で腐食が始まる。そして、塗膜塗替え後10年間はあまり腐食していないが、その後は急激に腐食が進展する様子をうまくとらえていると考えられる。また、図-14に示すように腐食量の推移は同じでも、アタック因子の強さ F が大きいほど標準偏差が大きくなる(凹凸が激しくなる)ことが図-15からわかる。

5.2 残存強度解析結果

図-16にModel-Aの残存強度の経年変化を示す。図で、A1, A2, A3は、それぞれ表-2のModel-Aの1~3を示す。図-16から、アタック因子の強さ F が大きい、すなわち標準偏差が大きいA3ほど残存強度は大きくなることがわかる。これは、海田らの解析結果と一致する⁹⁾。

図-17にModel-Aの各解析ケースの、それぞれ20, 40, 60, 80, 100年後の腐食状態に対して、圧縮強度解析で得られた荷重-たわみ曲線を示す。図で、縦軸は平均圧縮応力

$$\sigma_{avg} = \frac{P}{t_{avg} \cdot b} \quad (6)$$

を、降伏応力 σ_y で除した値である。ここに、 P : 軸圧縮力、 t_{avg} : 平均板厚、 b : 板幅を示す。また、横軸は自由辺中央の面外たわみ δ の絶対値である。

図-17からわかるように、腐食が進行した鋼板は最高荷重後、とくに腐食表面の標準偏差の大きいModel-A3(図-17中(c)A3)のケースで、耐力低下とともにたわみが減少するような傾向がみられる。これは、表面の凹凸が激しくなると最高荷重後に1次モード(正弦半波形)から高次のモードにたわみ形が移行するためである。

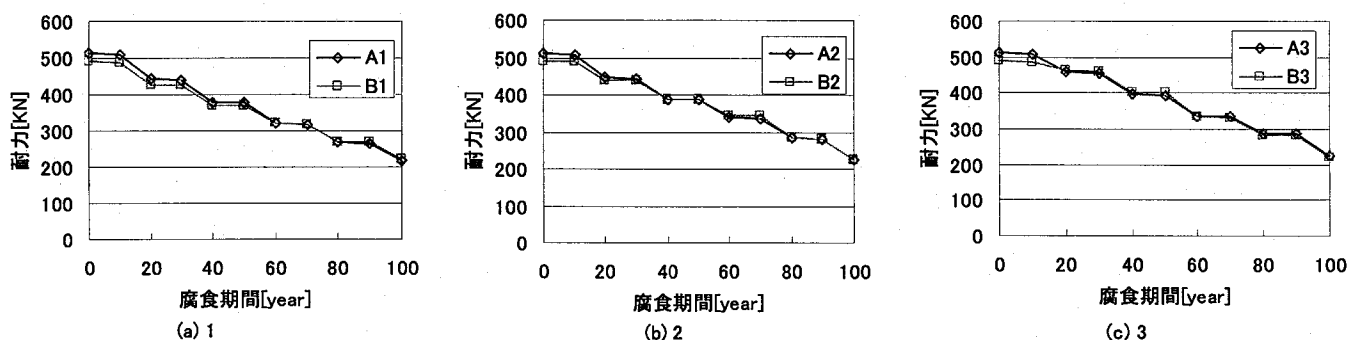


図-18 各解析モデルの耐力-腐食期間関係

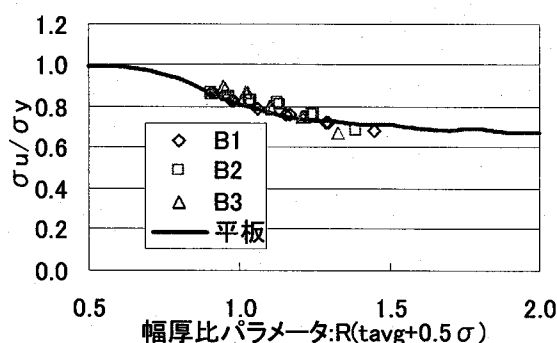
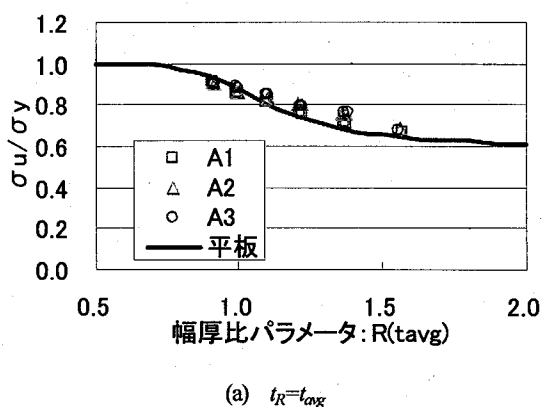


図-20 代表板厚 t_R と座屈強度曲線の適合性

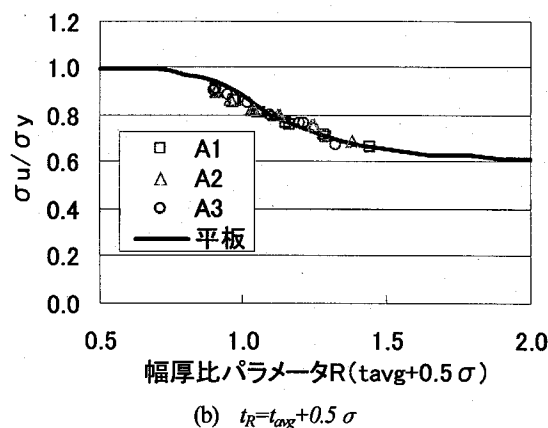


図-19 代表板厚 t_R と座屈強度曲線の適合性

Model-A と B の強度低下の推移を図-18 に示す。残留応力がある場合(Model-B)でも、残留応力の無い場合と同様に、腐食表面の凹凸が激しい(標準偏差が大きい)ほど強度が大きくなった。図-18 から、残留応力がある場合には、無い場合より強度は低く、本解析の範囲では、最大 5 % 程度低いことがわかる。

ところで、海田ら⁹⁾は、腐食フランジの圧縮強度は幅厚比パラメータ

$$R = \frac{b}{t_R} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (7)$$

に、代表板厚 t_R を用いて評価できるとし、代表板厚に板厚の平均値 t_{avg} と標準偏差 σ を用いて $t_R = t_{avg} + 2\sigma$ を提案している。式(7)で、 b は板幅、 t_R は代表板厚、 E 、 ν はそれぞれ弾性係数とポアソン比で、 k は座屈係数(=0.425)である。

本研究でも腐食期間 100 年までの腐食表面に対する圧縮強度解析結果を用いて、代表板厚 t_R について検討してみた。その結果を

表-3 塗膜条件の違い

Model	塗膜の耐用年数	塗膜の塗替え期間
1	20	10
2	20	20
3	20	30
4	30	20

図-19 および図-20 に示す。図-19 からわかるように、板厚の標準偏差が大きくなると残存強度は上昇するものの、 $t_R = t_{avg} + 2\sigma$ ではそれを大きめに評価することになり、 $t_R = t_{avg} + 0.5\sigma$ 程度となった。残留応力を考慮した図-20 でも代表板厚は $t_R = t_{avg} + 0.5\sigma$ 程度となることがわかる。これらのことから、腐食鋼板の座屈耐力は、偏心の無い場合には平均板厚を用いて強度評価すれば安全側であり、平均板厚を代表板厚とするのが良いと考えられる。

6. 経時変化モデルによる残存圧縮強度低下の経年評価

鋼橋の腐食に対する耐久性評価では主に塗装劣化などの防食機能の低下を問題にする場合が多く、従来の設計では、防食対策により鋼橋の腐食進展はないものとされてきた。一方で、塗装替えが不十分なために腐食損傷が問題となっている橋梁が存在しているのも事実である。このような塗装替え期間が塗装の防食能力の保証期間よりも長い場合に、強度がどのように低下していくのかを知ることは興味ある問題である。以下では、本論文で示した塗装の効果を検討した腐食の経年変化モデルを用いて、上述の問題を解析的に求め、維持管理コストと強度低下の相関について考察する。

さて、腐食パラメータ $F=1.65 \text{ mm}$ 、 $n=113 \text{ 個/年}$ 、 $\beta=4.0$ とし、

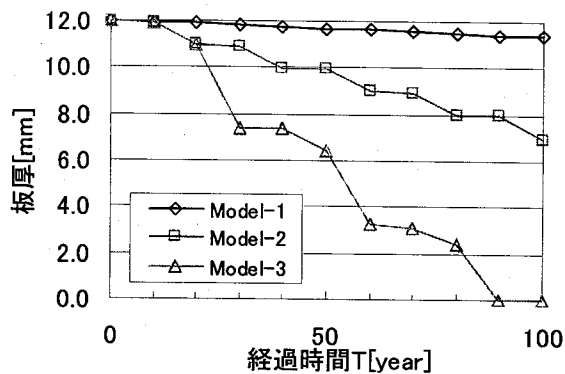


図-21 塗膜の塗替え期間の違いによる平均板厚の変化

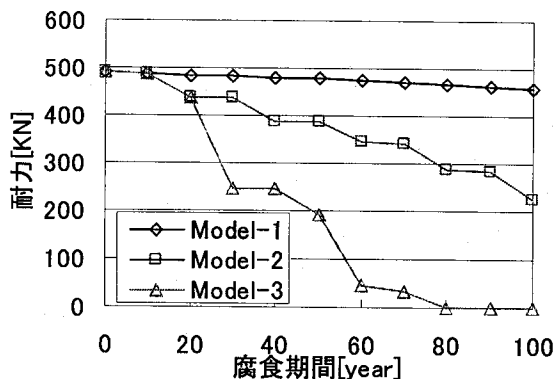


図-22 塗膜の塗替え期間の違いによる耐力低下の変化

表-3に示す耐用年数を持つ塗装を、同表に示す塗装塗り替え期間で塗り替えを繰り返したときの、先に示した3辺単純支持1辺自由の鋼板の圧縮強度の経時低下を解析的に求める。表-3に示す各Model-1~4は、Model-1:塗膜の劣化が進んでいない状態で塗装替えした場合、Model-2:塗膜が劣化しほぼ完全に防食効果を失ったとき塗装替えした場合、Model-3:防食効果が消滅して後10年間放置して塗装替えした場合、Model-4:塗膜の種類を変えて耐用年数を長くした場合、である。その結果を図-21図-23に示す。

図-21はModel-1~3の平均腐食深の経年変化を示したものであるが、図から、塗装替え期間の短いModel-1は、ほとんど腐食が進んでいないこと、一方、Model-3では、塗膜が全く存在しない期間に急激に腐食が進展することがわかる。Model-1~3の耐力低下の変化を図-22に示すが、腐食深の進展と対応して、Model-1は耐力低下がほとんどないのに対して、Model-3は耐力が大きく低下していることがわかる。

塗膜の耐用年数を変えたModel-2、とModel-4の耐力低下を示す。図-23は、耐用年数が短いModel-2の耐力は、100年後には元の耐力の約50%程度低下するが、耐用年数が長いModel-4では約30%程度の低下に抑えることができることを示している。

これらの現象を検証する手段は現在のところ無いけれども、上述のように、本モデルは、塗膜の防食効果を考慮し、腐食に起因する板強度の経年変化を評価できると考えられる。

最後に、本節で求めた強度低下の予測結果と塗装替え費用について考察してみる。耐用年数20年の塗料を10年ごとに塗装替えした場合の費用を10とし、同じ手法で同じ塗料を用いると仮定すると、100年間に行う塗装替えの回数に比例して、図-24の□で示

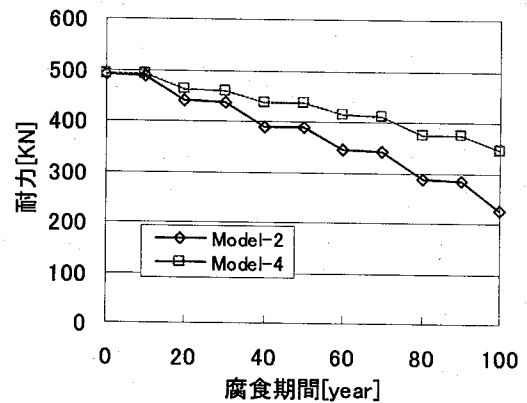


図-23 塗膜の耐用年数の違いによる耐力低下の変化

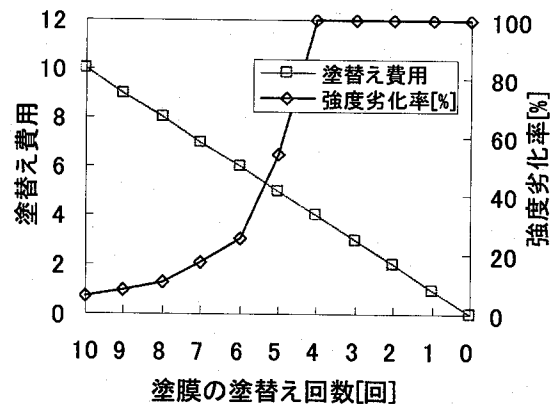


図-24 塗膜の塗替え回数の変化による塗替え費用と強度劣化率

す右下がりの直線となる。一方、◇で示した強度の低下率曲線は、耐用年数以上に放置するような塗装替え回数で急激な耐力低下を起こすことを示している。

もしも、この構造物の要求耐用年数が100年で、架設当初の安全率が1.7だけあったと仮定して、その安全率が1まで低下することを許容するならば、強度が約40%低下しても一応健全であるということになるから、6回の塗り替えが必要ということを、図-24は示している。このように、必要な塗装替え期間の計画、維持管理費用の算定などに、本モデルは有用であると考えられる。

7. 結論

本研究では、塗装の塗膜劣化にともなう防食効果を考慮し、鋼板の経年的な腐食表面の変化のモデル化解析を行い、得られた腐食表面から腐食鋼板の強度低下予測を行った。本論文で得られた知見をまとめれば以下になる。

- 1) 塗膜の防食能力の低下を考慮できる腐食表面の経年変化モデルを提案した。これにより、防食能力の劣化と腐食進展の関係、強度低下の予測を可能にした。
- 2) 提案した腐食表面の経時変化モデルは、実腐食形状を正確に表現するまではできなかったものの、実測された腐食表面の支配指標（平均値、標準偏差、スペクトルピークを取る波数）を満たし、実測値にかなり近い表面形状を作成できる。
- 3) 種々の腐食進展を想定した圧縮強度解析結果から、無腐食板の座屈強度曲線を用いた簡易強度評価での代表板厚を修正した。板厚の標準偏差が大きい(凹凸が激しい)腐食鋼板の強度は、同

じ平均板厚を持つ平板のそれよりも大きくなるが、代表板厚としては、偏心が小さい場合には、平均板厚を用いるのが安全側に評価でき、また、平均板厚を求めるのは比較的容易である。また、残留応力を考慮した場合でも代表板厚は平均板厚を採れば安全側に評価できる。

- 4) 塗装替え期間の変化にともなう強度変化予測などのいくつかの例題を通して、本モデルが、一応の説明力を持って維持管理費用、維持管理計画に使用することができることを示した。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 日本道路協会, 平成 14 年 3 月。
- 2) 土木構造物の性能設計に関する調査研究小委員会 (委員長: 宇佐美勉): 土木構造物の性能設計ガイドライン, 日本鋼構造協会, 平成 13 年 10 月。
- 3) 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。
- 4) 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, 土木学会構造工学論文集, Vol. 50A, pp. 657-665, 2004。
- 5) 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, 土木学会構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 687-696, 2003。
- 6) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1997
- 7) 伊藤義人, 金仁泰, 貝沼重信, 門田佳久: 素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp. 291-307, 2004。
- 8) 藤原博, 菅野照造: 鋼橋の塗膜劣化と塗膜下腐食との相関性に関する研究, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 167-181, 1996。
- 9) 海田辰将, 藤井堅, 中村秀治: 腐食したフランジの簡易な圧縮強度評価, 土木学会論文集, No. 766/I-68, pp. 59-71, 2004。
- 10) 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, 土木学会構造工学論文集, Vol. 48A, pp.1031-1038, 2002。
- 11) 野上邦栄, 山沢哲也, 小栗友紀, 加藤美幸: 腐食減厚に伴う曲げ及び圧縮部材の残存耐力評価に関する一考察, 土木学会構造工学論文集, Vol.47A, 2001。
- 12) 村上茂之, 西村宣男, 亀井義典: 腐食鋼板の等価板厚算定に関する一考察, 土木学会第 48 回年次学術講演会, pp.220-221, 1993。
- 13) 渡邊一, 正井資之, 森猛: 全面腐食を有する鋼 I 桁の曲げ耐力の解析と評価方法の検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.537-538, 2002。

(2005 年 9 月 10 日受付)