

海洋環境における鋼管杭の圧縮強度の 経年変化予測法

藤井堅¹・橋本和朗²・渡邊英一³・伊藤義人⁴・
杉浦邦征⁵・野上邦栄⁶・永田和寿⁷・中村秀治⁸

¹正会員 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail:ken214f@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 (株)IHI 環境・プラントセクターエンジニアリング統括部
(〒135-8710 東京都江東区豊洲 3-1-1)

³フェロー会員 京都大学名誉教授 (財)大阪地域計画研究所理事長(〒561-0834 豊中市庄内栄町 2-21-1)

⁴フェロー会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁵正会員 京都大学大学院教授 工学研究科 社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁶正会員 首都大学東京大学院教授 都市環境科学研究科 都市基盤学域(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

⁷正会員 名古屋工業大学大学院准教授 工学研究科 社会工学専攻
(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

⁸フェロー会員 広島大学名誉教授 東電設計(株)顧問 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

海洋環境における円形鋼管杭の腐食にともなう強度低下の一予測法を示した。まず、防食工の損傷・劣化を考慮できる防食工の劣化モデルと腐食表面凹凸形状の経年変化を作成するモデルを作成し、これらのモデルを用いて海洋環境における円形鋼管杭の圧縮強度の経年変化を予測した。腐食表面作成モデルの支配パラメータは、19年間海洋環境に暴露された鋼管杭の腐食表面座標計測結果から決定し、FEMおよび簡易強度評価式により圧縮強度の将来予測を行った。その結果、ここで提案した鋼管杭の圧縮強度の経年変化予測法は、電気化学的な腐食メカニズムは考慮していないものの、数少ない支配パラメータにより実現象に近い鋼腐食表面形状を表現できるとともに、腐食進展にともなう強度の低下予測ができることを示した。

Key Words : *corrosion, axial compressive strength, cylindrical steel column, strength deterioration*

1. まえがき

近年、いままでに蓄積されてきた莫大な数の社会基盤構造物が経年し、安全性を脅かすような重大損傷も現れはじめています。他方、現在の厳しい社会状況に鑑みると、限られた経済的制約条件の下でこれらの構造物をどのように維持管理し安全性を担保していくかという厳しくかつ難しい維持管理課題が土木技術者に突きつけられています。

一般に、予防保全を目的とする構造物の維持管理は、点検・調査、評価・判断、現状対策・対処、将来予測とそれに基づく将来の維持管理計画、という流れになる。このとき、理想的には、構造物が有する残存保有性能を精度良く評価あるいは予測するために必要な点

検・検査を実施し、その結果に基づいて信頼性の高い評価結果を得た後、モニタリングや性能回復などの適切な対処を施すとともに、将来においてライフサイクルコストミニマムを指向した合理的・経済的な維持管理計画のシナリオを描くことになる。そのためには、損傷を有する現在の構造物の残存保有性能を把握する技術とともに、将来的な性能の変化を予測する技術が必要である。しかし、損傷を有する構造物の残存耐力などの要求性能の評価は難しく、まだ確立されていないのが現状であり、さらにその将来予測については、ほとんど手がつけられていないのが現状といえる。

そこで本研究では、構造物の安全性を支配する残存耐力に注目し、海洋環境にある鋼管杭を対象として、防食機能の低下と鋼表面の腐食進展を予測する一手法

を提案するとともに、これを用いた残存耐荷力の経年変化予測手法を示す。

このとき、防食機能の経年変化については、それぞれの防食法の特徴を考慮する必要はあるものの、鋼表面の腐食進展予測と同様の考え方が適用できることを示す。以下では、まず、防食工として塗装による防食法を取りあげて、鋼管杭の強度低下の経年変化を示す。次に、昨今注目されているペトロラタムによる被覆防食法に対して本モデルを適用することを試み、想定したいくつかのシナリオに基づいて強度低下予測を試みる。

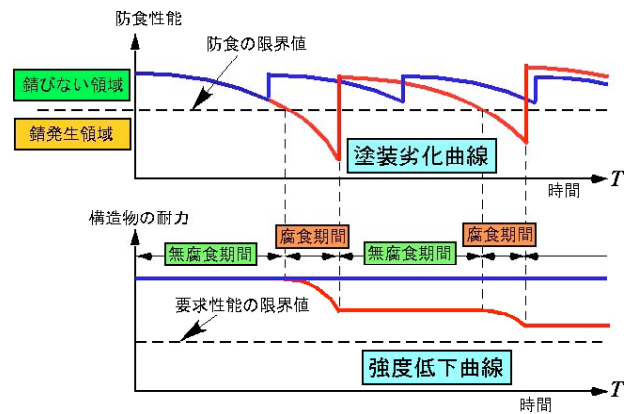


図-1 塗装防食と構造物強度の経年変化の概念

2. 鋼構造物の腐食に対する維持管理のあり方に関する一考察

従来、鋼橋に代表される鋼構造物の腐食に対する維持管理は、構造物の安全性を担保するために適切な防食対策を施して腐食の発生を防ぐことを重要視しており、専ら塗装劣化などの防食対策について議論されてきた。この考えでは、適切な防食対策を施せ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く永久安全に使用できる。ところが、現在の厳しい経済状況や、多数の鋼構造物において腐食損傷が顕在化し安全を脅かすような損傷が発現しつつある現実に鑑みると、ある程度の腐食損傷は許容しつつ、少なくとも要求される耐用年数の期間は確実に安全性を担保していくという維持管理の考え方も今後取り入れていかざるを得ないように思われる。とくに腐食環境の厳しい地域に設置される沿岸鋼構造物では、腐食を許容する(というよりも許容せざるを得ない)維持管理の考えが現実的であるようにみえる。

防食工の機能劣化と構造物の安全性を支配する強度の低下は別のものであり、図-1 に示すように、防食工が十分に機能している時は、構造物は腐食による減肉は無いので、強度は、低下せず一定のままである。しかし、防食機能が低下し、構造物が腐食減肉するとそれにもなって強度低下が起きる。その後、塗装塗り替えを行って腐食を止めても、強度は回復することは無く、強度低下したまま推移し、再び防食機能が低下して腐食が始まるとさらに強度が低下していく。

防食対策により構造物の腐食を完全に防ぐことができれば、図-1 の青線で示すように耐荷力の低下は無く、強度安全性の観点での耐用年数は無限期間となるので、強度面から耐用年数を設定してもその意味は曖昧になる。さらに、腐食損傷を有する構造物が供用されているという現実に鑑みれば、防食され腐食しないという維持管理のシナリオでは、そのなかに腐食による耐荷

力低下は考慮されていないので、腐食損傷への対策は「事後保全」で対処することになってしまい、性能回復のための費用はライフサイクルコストにおける維持管理費として計上することが難しくなる。さらに、初期設計において、腐食損傷を予見し腐食代を見込むために増加する初期費用の増加などの説明理由も難しくなる。

これに対して、腐食を考慮に入れて維持管理をとらえると、上記のような矛盾はなく、安全面での耐用年数、ライフサイクルコストの意味が明確になる。そして、種々の構造物の中でライフサイクルコストを最小化できる構造物を選択するという議論も可能となる。

ただし、維持管理のシナリオにおいて腐食進展を容認することになるので、腐食が強度安全性におよぼす影響を高い精度で評価・予測することがとくに重要となる。そして、この場合の強度低下曲線は、図-1 の赤線のようになり、耐用期間を通して要求性能の限界(強度安全性)を担保するように維持管理することになる。

ところで、鋼構造物の腐食は、それが置かれている周辺の環境に大きく影響され、さらに、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、さらには構造物を構成する部材ごとに腐食進展状況は異なる。そして、このことが保有性能の評価や将来予測をより一層難しくしている要因といえる。本論文は、上記課題を解決するための一手法と考えるが、今後、このほかにも種々のアプローチが提案されるものと期待している。ただし、その手法は、簡単かつ容易で実現象を説明できるものが望ましい。

本論文は、以下のような維持管理のあり方が実用的で実現可能との考えに基づいている。

初期計画段階では、全ての値を仮定して腐食に対する強度低下予測を行い、ライフサイクルコストを試算し、維持管理計画をたてる。このときの試算結果は、実際に起こる経年変化を正確に把握できないので、信頼性は最も低いと考えられる。供用を開始し、その後

の定期点検などで実際に発生した詳細な情報が得られたときに、その情報に基づいて、初期に仮定したパラメータを修正し、その後の予測解析を実施する。この結果は、初期の予測結果よりも精度は高くなるので、それに基づいて初期の維持管理計画を修正し、新たな維持管理計画をたてる。そして、定期点検毎に、過去から蓄積されたデータを考慮してこの作業を繰り返していけば、より一層信頼性の高い予測が可能となり、対処法や対処時期の適切な判断が可能となる。この一連の維持管理が、最終的にライフサイクルコストを最小にすることになると考えられる。

このとき、予測可能であれば構造物全体の残存保有性能を基準とするのが望ましい。しかし、実際の維持管理においては、構造物が単純で簡単な場合を除いて、一般には構造物全体の強度を評価、予測するのは極めて難しい。たとえば鋼管杭に支持された栈橋でも、鋼管杭の強度予測は比較的簡単であるが、栈橋としての構造全体の強度を予測するのは大変な労力を要すると予想される。したがって、維持管理でも、構造物を構成する部材の強度を基準にするのが、現在の段階では現実的と考えられる。

3. 鋼材腐食の経時予測

構造物の残存耐荷性能の予測法としては、以下のような手法が考えられる。

- 1) 残存耐荷力の経年変化を直接予測する方法
- 2) 平均板厚などの残存耐荷力を支配する評価指標の経年変化を予測し、簡易耐荷力評価法や有限要素解析などにより耐荷力を予測する方法
- 3) 腐食形態の経年変化を予測し、それを考慮した有限要素解析や、腐食形態の予測結果から得られる評価指標を用いて簡易耐荷力評価法により耐荷力を予測する方法

上記 1)では、耐荷力の将来予測は簡単に行えるが、正確な予測曲線を与えるのは難しい。たとえば、圧縮を受ける板が腐食していく場合には、減肉にもなって崩壊形式が塑性崩壊から座屈崩壊に変化する。このような、腐食にもなって崩壊形式が変化するような場合を考慮した予測曲線を直接与えるのは、実構造物では構造物毎に寸法諸元が異なることやそれが置かれている環境条件が異なることを勘案すると、さらに困難であると考えられる。2)の予測法は、実際の計測結果から評価指標を求め、腐食した構造物の残存耐荷力を評価・推定する場合に有用であり、現在の多くの残存耐荷性能評価に用いられているようである。計測結果から板厚などの評価指標の将来的な変化を推定し、そ

れに基づいて耐荷性能を予測するので実用的のようにみえるが、たとえば、構造物の強度を支配する板厚の経年変化を予測する場合でも、塗膜の劣化にともなう腐食進展を考慮して板厚変化を予測するのは難しい。

もしも、防食機能の予測も含めて、腐食進展にともなう表面凹凸形状が予測できれば、種々の評価指標を予測しなくてもそれらを求めることができる。3)の方法では、腐食表面凹凸形状の変化が予測でき、さらにそれらを解析に正確に反映できれば、精度の高い予測が可能となる。

以下では、未解決の問題は多々残されているものの、腐食表面形状の将来変化を予測し、予測された腐食表面形状を考慮した耐荷性能の将来予測解析例を示す。

(1) 腐食表面の腐食進展予測モデル

腐食表面を作成するための情報は多いほど正確に再現できるが、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で少ない方がよい。ここに示すモデルは、3つの評価指標を用いて腐食表面を作成する。構造物の供用初期においては、すべてのパラメータが不明であるから仮定値を用いるしかない。しかし、経時的な定期点検などにおいて腐食表面測定を繰り返すことによりパラメータを修正していけば、経年とともに信頼性の高い予測が可能となる。

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³⁾。

- 1) 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、その格子点の腐食深を以て凹凸を表現する。
- 2) 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 (mm/年)だけ掘り下げる。アタック因子は鋼板表面上にランダムに降る。

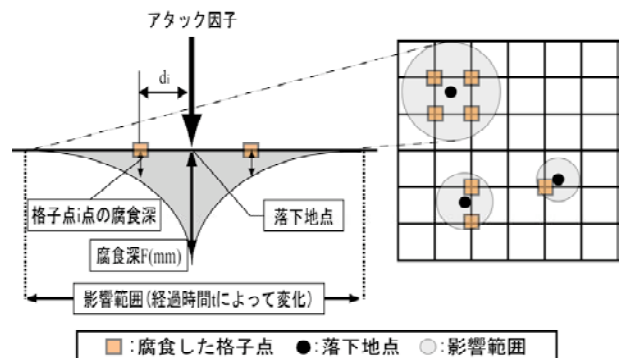


図-2 腐食深形状のモデル化

表-1 解析に用いた腐食した円形鋼管の実測結果(19年後)と腐食表面作成モデルのパラメータ

	平均板厚 [mm]	標準偏差 [mm]	最高荷重 実験値[kN]	残存強度率 [%]	F [mm]	n [個/year]	β
飛沫帯	4.15	1.96	868	19.9	5.38	8	0.03
	5.11	1.69	883	21.0			
海中部	7.53	0.88	3680	84.3	2.28	34	0.10
	7.99	0.94	3829	87.8			
	7.89	0.83	3790	90.0			

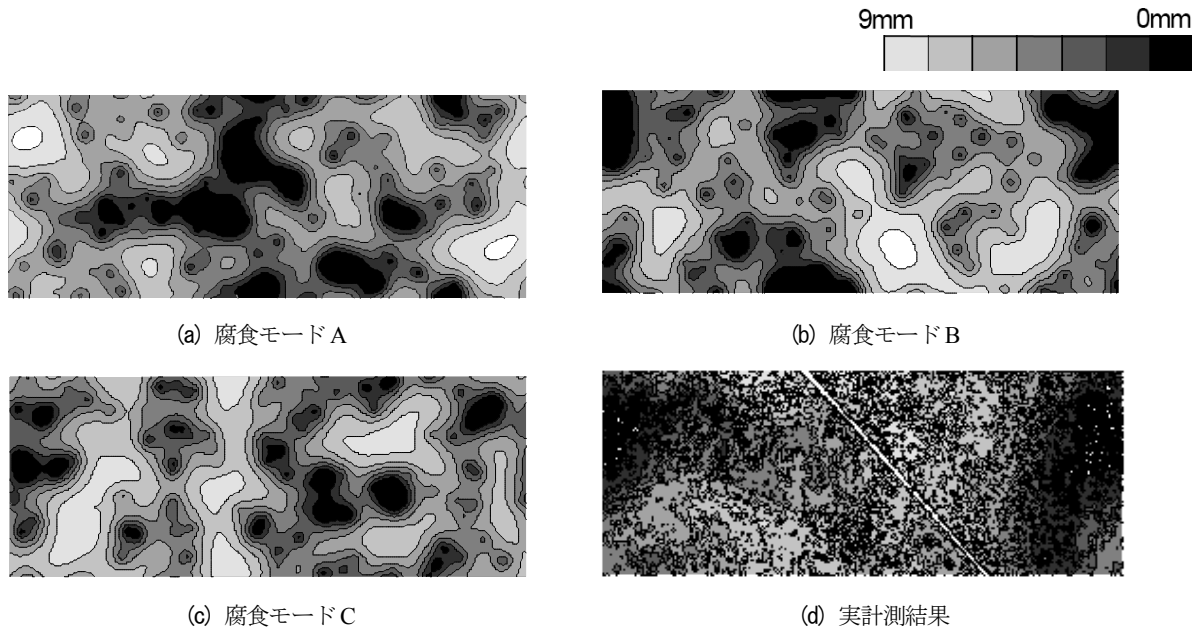


図-3 腐食モデルにより作成した鋼管の飛沫帯の板厚等高線分布 (19年経過後)

3) アタック因子は、毎年 n 個落下し、 n 個の腐食穴が空く。

アタック因子が落ちた地点 (図-2の落下地点●) の腐食孔の形は、空間的な広がりを持つと考え、その腐食深さは、落下地点から距離が離れるほど小さくなるとし、次式で仮定する。

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

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(mm)、 d_i は格子点 i 点とアタック因子の落下地点との距離(mm)、 β は距離減衰定数である。

アタック因子が掘り下げる深さ F と毎年の落下個数 n は、対象とする構造物の腐食表面形状の測定結果から得られた平均腐食深、腐食深の標準偏差、および腐食面を不規則波としてみたパワースペクトル分布を用いて決めることができる。

19年間無防食状態で海洋環境に暴露された円形鋼管の飛沫帯および海中部の腐食表面計測結果⁴⁾に基づいて求めた3つのパラメータを表-1に示す。表には、計測結果から得た平均板厚および標準偏差、载荷実験での圧縮耐荷力およびそれと無腐食の有限要素解析結果との比(残存強度率)もあわせて示す。

表-1に示す飛沫帯のパラメータの値を用いて作成し

た19年後の板厚と実測板厚を、等高線展開図として図-3に示す。図では、黒い部分ほど腐食が激しく板厚が薄いことを示している。また、腐食モードA)~C)は、落下地点(乱数発生シーズ)を変えた腐食表面であるが、いずれも腐食深の平均値と標準偏差は、概ね実測結果と同じである。図-3の腐食表面を作成したパラメータを用いて、腐食表面の経年変化を求め、その平均板厚、板厚の標準偏差の経年変化を示すと、図-4のようになる。図には19年経過後の円形鋼管の腐食表面計測結果を■で示す。実験結果に合わせるように F と n を決めているので、19年後の値は、どの腐食モードもよく一致している。図からわかるように、経年とともに鋼表面の凹凸が大きくなり標準偏差が大きくなるが、図では20年後からは徐々に凹凸が小さく平坦になる傾向を示し、対応して標準偏差は増加しなくなっている。これは、実際の比較的広い領域の腐食現象に対応している。なお、ここに示す試験体は無塗装暴露条件であるので、平均板厚は、モデルの仮定条件から、ほぼ直線的に減少する。

また、図-3で、実際の表面と作成した表面を比較すると、作成した表面は細かい波長の凹凸を十分に表現できていない。しかし、座屈に起因して崩壊するよう

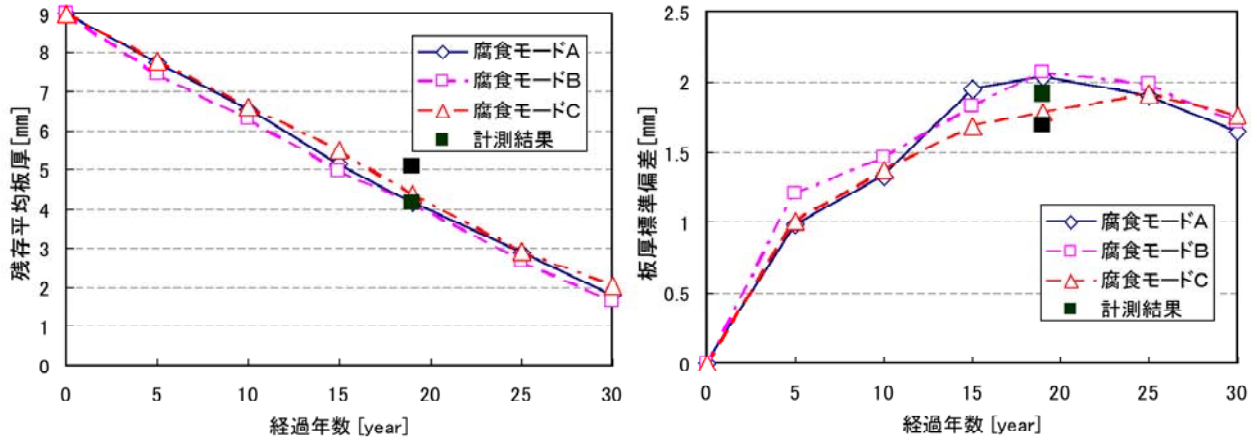
な崩壊形式では、耐荷力は板の曲げ剛性に支配されるため小さい凹凸は耐荷力にあまり影響しないようであり、強度評価においてはあまり問題にはならない。なお、図-3に示す各図の辺長は、500×1256mmである。

さて、上記のパラメータを用いて、腐食表面凹凸形状の経年変化を求め、板厚等高線の経年変化の一例を

図-5に示す。板厚の経年変化を検証することは不可能であるが、本解法により実際の腐食進展を説明できると考えられる。

(2) 防食工の劣化予測モデル

鋼構造物には防食対策が施されるのが普通である。



(a) 平均板厚の経年変化 (b) 標準偏差の経年変化

図-4 板厚の統計量の経年変化(飛沫帯)

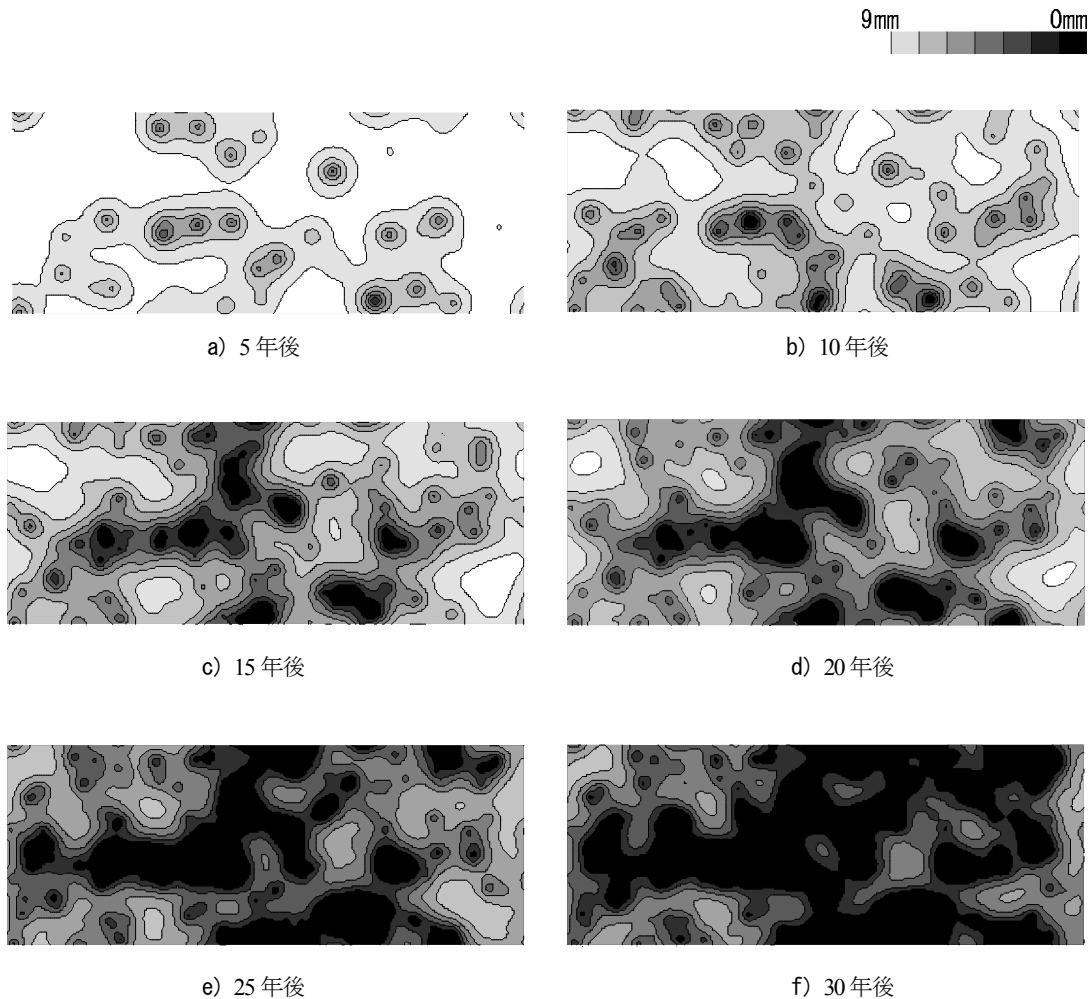


図-5 残存板厚等高線 (腐食モードA) (飛沫帯)

したがって、維持管理シナリオを描くためには、防食工を考慮した腐食進展予測が必要となる。塗装の劣化を考慮した腐食進展を扱った研究には、従来、伊藤ら⁵⁾、藤原・菅野⁹⁾などの研究があるが、実現象に対する説明力を持ったモデルの構築が必要と考えられる。以下では、塗膜の劣化を考慮した腐食進展モデルを示す。

塗装の劣化を示すモデルとして、藤井ら⁷⁾は、鋼表面を格子状に区切り、その格子点あるいはある領域に区切って、その格子点に防食能力を離散化して与え、その能力を経年とともに減少させていくことで、塗膜の劣化を表現している。しかし、この方法では、実際の防食機能の劣化を十分には表現できていない。そこで以下では、前項で示した腐食進展モデルの考えをそのまま応用した防食機能の劣化モデルを示す。

鋼表面を格子状に区切り、各格子点の初期の防食能力を同じ値に設定しておく(部分的な塗膜欠陥などがわかっているときは欠陥部位の格子点を異なる能力に設定しても何ら問題はない)。ある鋼表面の領域に劣化因子 D (式(1)の攻撃因子 F に対応する)が1年間に m 個ランダムに降ると仮定し、格子点 i は、一つの劣化因子 D によって、1年間に δA_i だけ防食能力が低下すると仮定すると、

$$\delta A_i = D \exp(-\kappa d_i) \quad (2)$$

と表すことができる。したがって、格子点 i の1年間に低下する防食能力 A_i^t は、

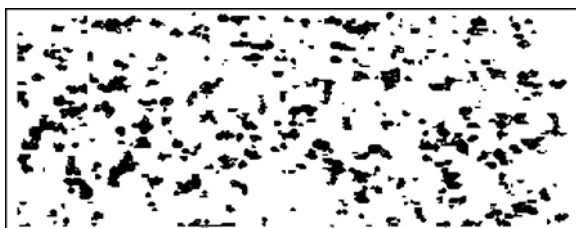
$$A_i^t = \sum_{j=1}^m \delta A_i = \sum_{j=1}^m D \exp(-\kappa d_i) \quad (3)$$

となる。したがって、この操作を T 回繰り返すことにより、 T 年後の i 点の防食能力は、

$$C = A_0 - A_i^t = A_0 - \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m D \exp(-\kappa d_i) \quad (4)$$

と表すことができる。これらの式で、 A_0 は初期($T=0$)の防食能力、 κ は腐食因子の影響範囲を示すパラメータ、 d_i は腐食因子の落下点から格子点 i までの距離(mm)である。

式(4)では、 A_0 に適当な値を入れて防食機能 C を低下させていき、 $C=0$ になったときに鋼表面の腐食が始まるとすれば、防食能力の劣化を表現できる。塗膜の防食



(a) 50年経過後

能力が無くなると式(1)にしたがって腐食が進展し、減肉する。

なお、このモデルでは、さびが塗膜欠損部から塗膜下に進展していく現象も表現でき、図-6に示すように、アタック因子が塗膜の切れ目付近に落下した場合、アタック因子の影響範囲内で減肉させた。さらに、本論文では、塗膜下腐食も模擬することとし、先のアタック因子の落下地点に塗膜劣化因子も落下させて、塗膜下の防食能力も減少させている。なお、このときの影響半径(κ)は塗膜劣化モデルと同じとし、劣化因子の大きさを $D/10$ とした。

さて、500mm×1024mm、初期の板厚9mmの鋼表面に、 $A_0=100$ (100%防食能力があることを示す)、 $D=57$ 、 $\kappa=0.1$ 、 $m=34$ の塗装劣化条件を仮定して、得られた塗膜の経年劣化の一例を、図-7に分布図として示す。図で、白色部分はまだ防食能力があり、アタック因子の落下に対して防護能力を持つ領域、黒は地金が露出し、防食能力が無くなった領域を示している。このような防食能力の経年変化を持つ塗装の場合を想定し、表-1に示す海中部の腐食パラメータを適用して得られた残存板厚の等高線図を図-8(a)に示す。図-8(b)では塗装のない場合の残存板厚も比較して示す。図からわかるように、無防食の場合には、100年後の残存板厚はほとんど無い状態になる。

また、図-9には、図-7に対応する防食能力を有する塗装を50年毎、30年毎および10年毎に塗り替えた場合(塗替時点で $A_0=100$ に回復すると仮定)の、鋼管の海中部における100年後の残存板厚の等高線を示す。さらに、

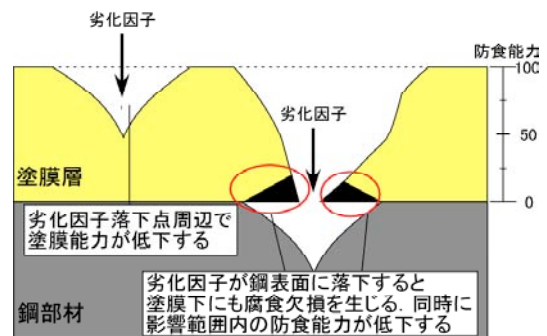
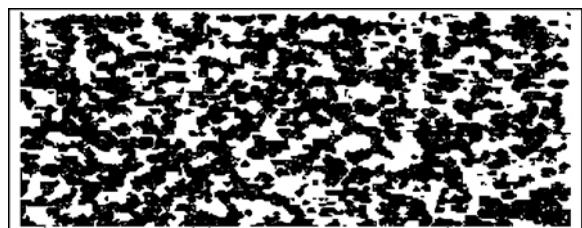


図-6 塗膜劣化イメージ



(b) 100年経過後

図-7 塗膜劣化状況 (黒い部分が地金露出部)

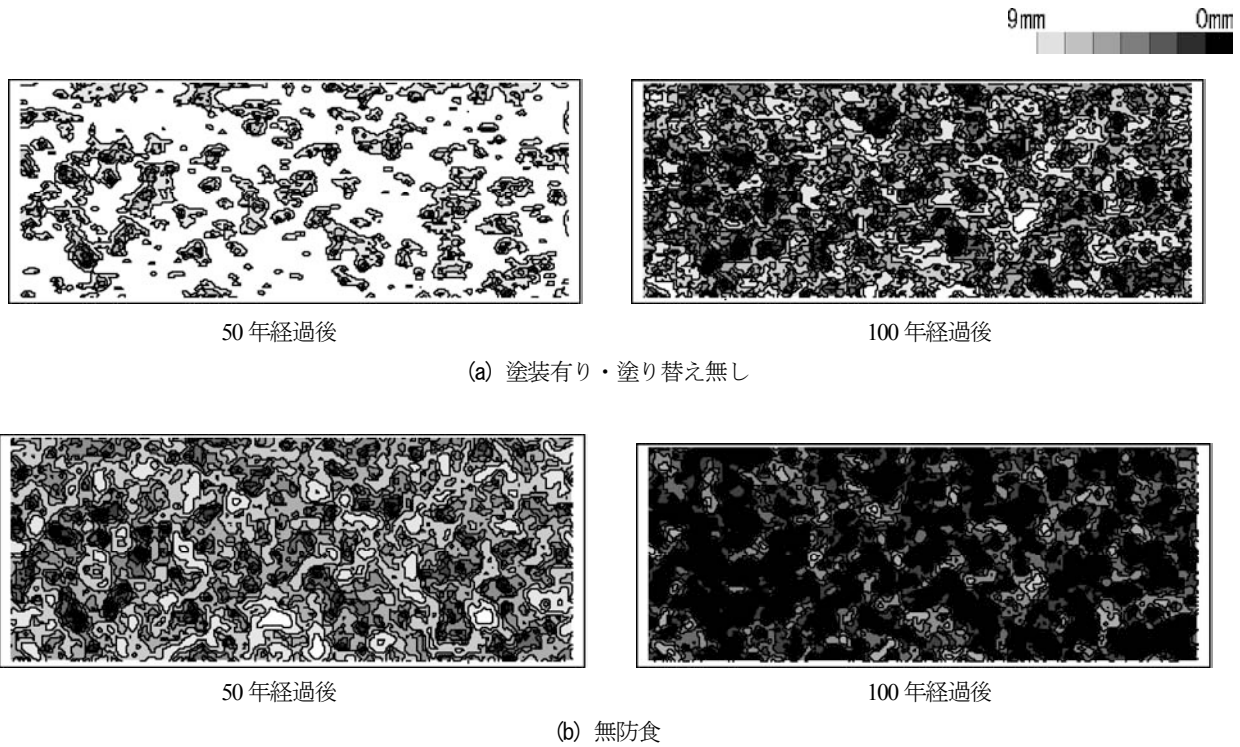


図-8 残存板厚の経年変化(海中中部)

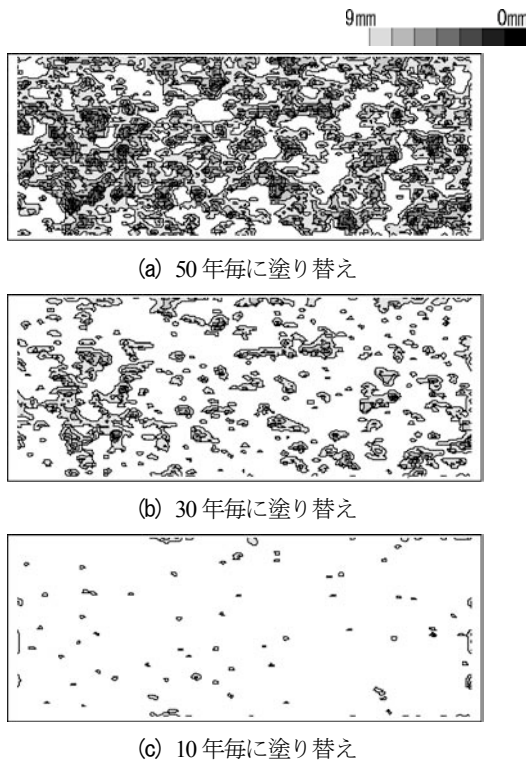
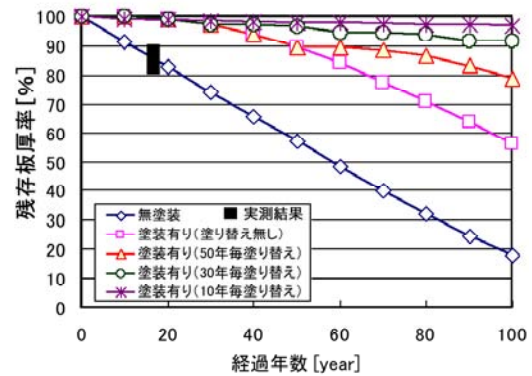
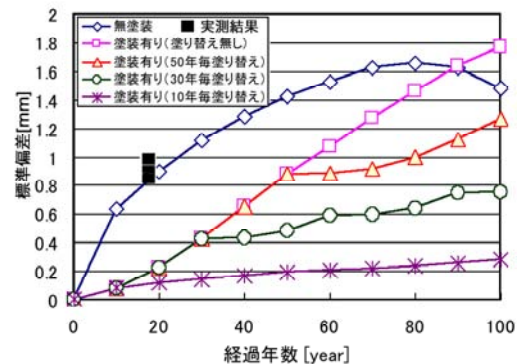


図-9 塗装塗り替え期間と残存板厚分布(海中中部)



a) 板厚残存率(平均板厚)の経年変化



b) 板厚標準偏差の経年変化

図-10 塗装塗り替え期間と板厚統計量の関係(海中中部)

図-10に、各塗装塗り替え期間に対応する残存平均板厚と板厚の標準偏差を示す。図-10には、無防食で19年間曝露した鋼管海中中部の実測結果もあわせて示す。図からわかるように、表-1に示す腐食パラメータは3体の実測結果と概ね一致しているのがわかる。また、塗り替

え期間が短いほど腐食量は小さくなることも表現できているのがわかる。

さて、図-7に示す露出した地金部分の面積の領域全面積に対するの割合は、塗膜の劣化面積率 y_t として以下のように表される。

$$y_t = (\text{地金の露出面積}) / (\text{塗装面積}) \quad (5)$$

塗膜劣化面積率の経時変化については、いままでにいくつ報告がなされている^{5),8),9),10)}。

1年に降る劣化因子の数 $m=34$ 、パラメータ $\kappa=0.1$ とし、劣化因子の強さ D を変化させて、本腐食モデルによる塗膜劣化面積率の経時変化を示すと、図-11のようになる。図には、西村・島田⁹⁾、伊藤ら⁵⁾によって提案されているGompertz曲線($y_t = a^{b^T}$)の係数をあてはめた劣化面積率曲線と、藤原・三宅¹⁰⁾がA塗装系の実態調査結果を2次式で近似した曲線(陸上の塩分飛来環境： $y_t = 0.206T^2$ およびマイルド環境： $y_t = 0.005T^2$)もあわせて示している。図から、本塗膜劣化モデルにより得られた塗膜劣化面積率の経年変化曲線は、Gompertz曲線に近い挙動となっており、実現象をよく表現できていることがわかる。なお、藤原らの曲線は、塗装塗り替え期間を議論したものであるが、面積率が小さい場合の現象をよくとらえているといえる。

なお、本論文で仮定した条件($D=57, m=34, \kappa=0.1$)の劣化面積率曲線を◇で示すが、この曲線は、藤原らのマイルド環境に近い曲線となっている。沿岸海洋構造物にA塗装系を用いることは無いと考えられるので、実際の腐食環境は、今回の腐食条件より厳しいことが予想される。

以上、本論文で提案した腐食進展モデルおよび塗膜劣化モデルは、支配パラメータが少なく簡単であり、実際の腐食進展現象を表現できることを示した。腐食進展解析に必要なパラメータは、アタック因子とその数、そして影響半径を示す減衰係数であり、防食効果の劣化では、劣化因子とその数および影響半径で、6つの支配パラメータを決定する必要がある。これらのパラメータは、供用初期では仮定値を用いるしかないが、経年とともに得られる測定データを用いて数回の試算により、容易により精度の高いパラメータを設定することができる。

4. 腐食にともなう円形鋼管の残存圧縮強度の経年予測

腐食にともなう鋼表面の経年変化が予測できれば、有限要素法や簡易解析法を用いて、構造物の強度予測は可能である。以下では、腐食した鋼管杭の圧縮強度

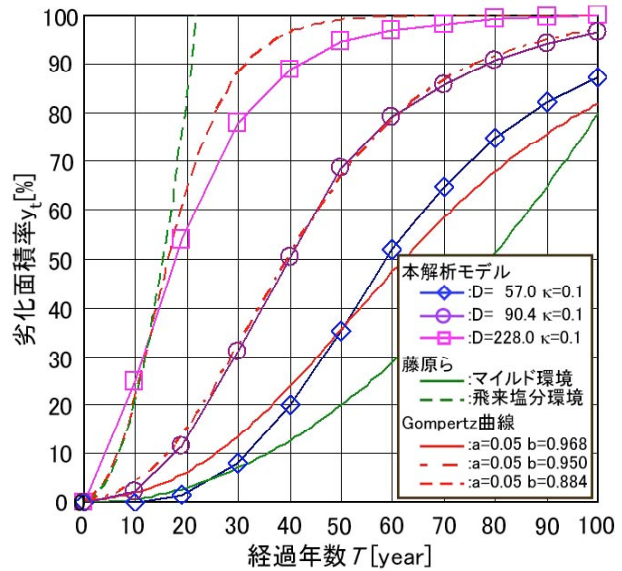


図-11 塗膜劣化面積率の経年変化

の経年変化を、簡易強度評価式と有限要素解析によりもとめた結果を示す。

(1) 簡易評価法による圧縮強度評価

海洋環境で腐食した円形鋼管の残存圧縮強度評価は、藤井ら⁴⁾がその評価式を提案しており、残存板厚の統計量(平均板厚と標準偏差)とPlantemaの座屈強度曲線¹¹⁾を用いて、

$$P_u = 2\pi r t_e \sigma_y \quad \text{ただし, } R \leq 0.119 \quad (6a)$$

$$P_u = 2\pi r t_e \left(0.723 + \frac{0.0330}{R} \right) \sigma_y \quad \text{ただし, } 0.119 \leq R \leq 0.355 \quad (6b)$$

で評価できるとしている。

ここに、 r は鋼管の半径、 t_e は強度を評価するための板厚、 σ_y は鋼管の降伏応力、 R は径厚比パラメータで、

$$R = 1.65(\sigma_y / E) \cdot (R / t_e) \quad (7)$$

である。強度評価のための板厚 t_e は、腐食した鋼管の断面積が最小となる断面を中心として軸方向に $3\sqrt{R t_{ave}}$ の長さの領域の平均板厚 t_{ave} とその標準偏差 s を用いて、次のように与えられる。

$$t_e = t_{ave} - 0.8s \quad (8)$$

前項で作成した腐食表面に対して、上記の平均板厚と標準偏差を求め、式(8)により求めた評価板厚 t_e を式(6)に代入すれば、残存強度の経年予測ができる。

(2) 有限要素法による圧縮強度評価

現在、有限要素法は広く普及しており、鋼構造物設計や照査にかなり使用されるようになった。残存強度

評価には複合非線形問題として終局強度解析を行う必要があり、関連する知識と経験が必要であるが、汎用解析ソフトなども容易に入手できるようになっている。以下では、ABAQUSを用いて、腐食した円形鋼管の弾塑性非線形圧縮強度解析を行った結果を示す。

解析の対象は、19年間海洋環境に暴露された円形鋼管の実験結果⁴⁾に対応させ、半径194mm、長さ1,200mm、初期の板厚9mmのSTK50(STK490)である。境界条件は両端固定とし、材料特性は引張試験結果(JIS12号試験片)を用いた。要素は、4節点アイソパラメトリックシェル要素で、要素の大きさは8mm×8mm程度、要素数は23,550、節点数は23,707である。それぞれの要素の板厚は前節で得られた腐食減肉を考慮して与え、節点座標は両腐食表面座標計測結果から板中央面の座標を求め、それをそのまま座標値として与えた。したがって、解析では腐食にともなう偏心の影響も考慮できている。

図-12に要素分割図を示す。要素の大きさは、過去の検討結果^{12), 17), 25)}をふまえて、1辺8～10mmの正方形(または正方形に近い長方形)とした。また、図-13に表-1の飛沫帯のパラメータの値を用いて作成した19年経過後の腐食形状の有限要素解析結果および腐食表面の実測結果を用いた有限要素解析結果、さらに載荷実験結果の崩壊状態を示す。圧縮耐荷力は、それぞれ、本予測モデル：736kN、実測板厚を用いた有限要素解析⁴⁾：1493kN、実験結果：868kNであり、予測モデルによって作成した腐食表面を用いて残存圧縮強度を評価できて

いるのがわかる。ただし、腐食状態が実際と異なるので、終局状態の変形様式は異なっている。

(3) 円形鋼管の腐食にともなう強度低下予測結果

3. で示した無防食状態で19年間海洋環境に暴露された円形鋼管(半径194mm、長さ1,200mm、初期の板厚9mm)に対して、3つの腐食形態(モードA～C)の平均板厚とその標準偏差の経年変化は、図-4のようになるから、Plantemaの式に基づく簡易評価式(6)に代入して残存強度を予測すると図-14のようになる。図から、モードA～Cは平均板厚と標準偏差がほぼ同じであるから、どれもほぼ同じ強度低下を示す。なお、暴露試験で得られた円形鋼管の圧縮強度実験結果⁴⁾を■で示す。残存圧縮強度の経年変化については、検証データがなく精度の検証はできないが、19年後において行った実験結果と簡易評価式から得られた残存強度はよく一致しているのがわかる。

また、有限要素解析と前述の簡易評価式および減肉を考慮した降伏軸力($= 2\pi r t_{ave} \sigma_y$)から求めた圧縮強度を図-15に比較して示す。図から、簡易評価式は有限要素解析結果よりもいくらか大きめに評価しているが、両者は概ね一致しており、この評価式を適用してよいと考えられる。また、鋼管杭は、10年後以降、座屈に起因して崩壊する。したがって、降伏軸力で評価した場合には座屈崩壊を表現できないので、他の評価式よりも高めの圧縮耐荷力となる。

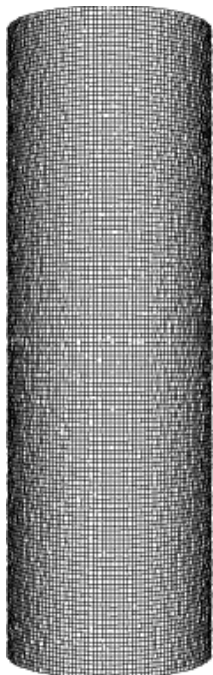
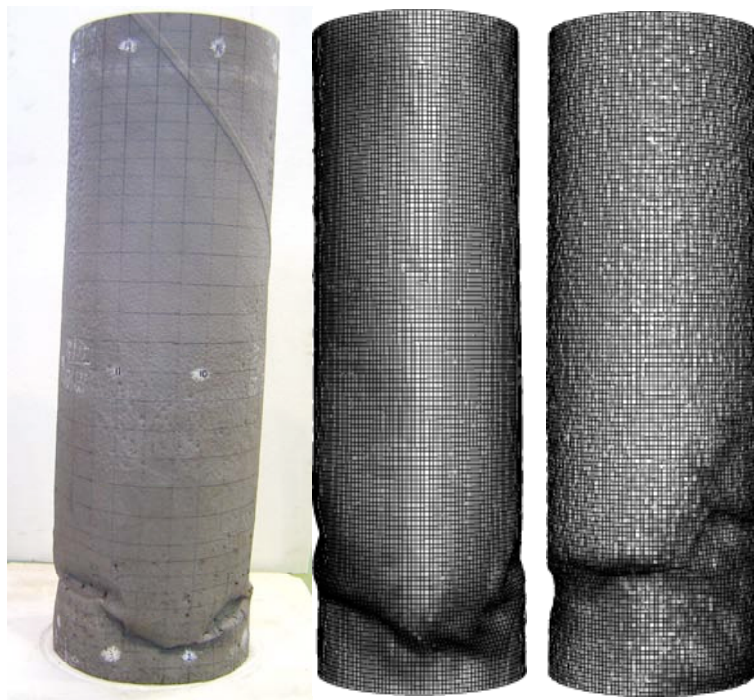


図-12 要素分割



(a) 載荷実験結果 (b) 実測板厚 (c) 予測モデル(モードA)

図-13 圧縮を受ける腐食鋼管杭の崩壊形態(飛沫帯)

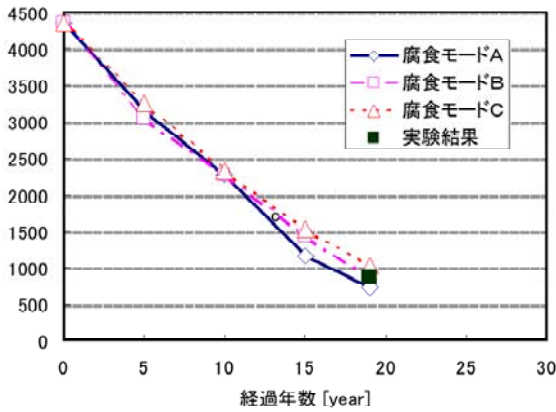


図-14 残存圧縮強度の経年変化(飛沫帯)

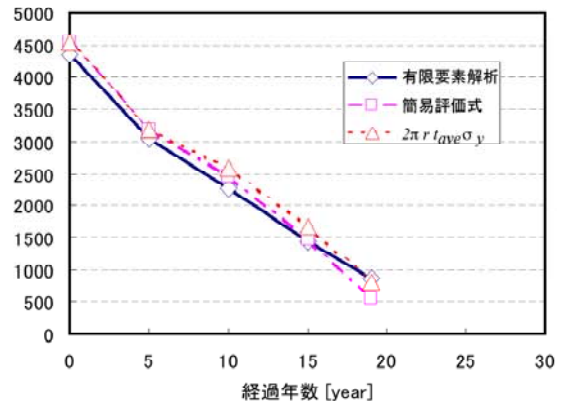


図-15 残存圧縮強度の評価法の比較(飛沫帯)

なお、式(6)の簡易評価式が適用できるのは、円周方向にほぼ一様に腐食している場合に限られ、局部的な腐食の場合には適用できないことには注意しておく必要がある。これは、簡易評価式に統計値を用いているためである。

さて、図-10に示すように、塗装塗り替え期間によって腐食進展状態が異なるが、この塗り替え条件の下で、表-1に示す海中部の腐食パラメータを用いて腐食表面を作成し、平均板厚と標準偏差を求め、残存圧縮強度を簡易評価式(6)によって評価すると、図-16のようになる。図から、本予測モデルにより、図-1に示す塗装の塗り替えを繰り返す強度低下曲線をうまく表現できることがわかる。塗装塗り替え期間を短くするほど経年にもともなう強度低下は小さくなり、図に示す塗装劣化条件の場合、30年毎に塗り替えれば、100年後の強度低下は約15%に抑えることができることを示している。また、図には、実験結果⁴⁾もあわせて示すが、19年後の実験結果3体ともに予測値よりもいくらか大きめの値である。これは、Pranteraの式(6)の精度誤差と考えられる。

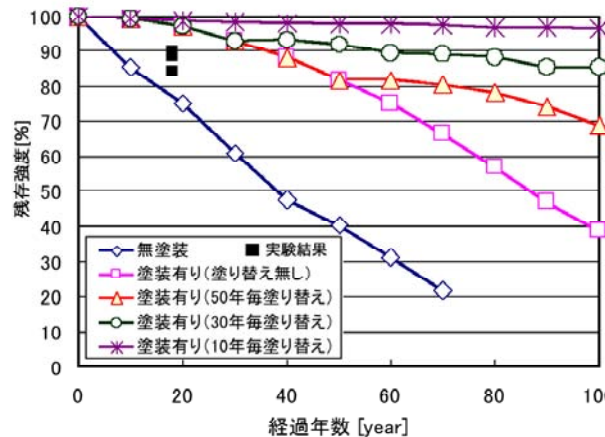


図-16 塗装の塗り替えと強度低下予測結果(海中部)

5. ペโตรラタムによる防食を考慮した円形鋼管の腐食進展と残存圧縮強度の経年予測の試み

ペโตรラタム被覆工法は、ペโตรラタム系防食材とその防食材を保護するためのカバー材を組み合わせた防食工法である。施工性・耐久性に優れるので、国内外の新設・既設の港湾構造物の防食への適用実績が多数存在する。この工法の特徴として、干満帯や海中部でも施工できること、使用する材料に海水中に溶出する成分や揮発する成分を含まないこと、防食層をカバー材により保護することで長期間良好に防食効果が得られることなどが挙げられる。特に、カバー材が健全である場合、約20年暴露環境におかれても鋼部材の腐食がないことが確認されている^{26),27)}。

以下では、このペโตรラタム被覆工法により防食された鋼管杭を想定して、前述の腐食表面作成モデルを適用して将来的な腐食進展予測を試みる。

ペโตรラタム被覆の劣化要因としては、カバー材の劣化・破損や接合部に肌隙が生じたとき、そこでの防食層の洗い流しや風化が考えられる。この防食機能の劣化減少について、詳細な基礎資料は得られておらず明確な根拠はないが、ここでは、いくつかの仮定、シナリオを想定して腐食進展解析を試みる。

防食層の劣化は以下のように仮定した。

- ・防食層はカバー材の隙間部(初期の幅:1mm)から流出し、減少する。
- ・防食層が減少する領域は1年間に2mm広がる。
- ・防食層は減少開始から20年後に無くなり、防食層が無い領域は腐食する。
- ・腐食進展は、3.に示す腐食進展モデルで表されるものとする。

図-17にペโตรラタム劣化進展のイメージを示す。

以上の仮定を用いて、海中部の鋼管杭の板厚測定データを参考に、ペโตรラタム被覆により防食されている鋼管杭の腐食進展と強度低下の将来予測を行う。こ

ここでは、FRP カバー材が破損した場合と防食工の補修・更新が行われる場合の維持管理シナリオを想定する。このとき、FRP カバー材の破損は、周方向 90° (全周の 1/4)、軸方向 250mm の領域でカバー材が剥離して防食剤が流出するものとし、また、流出は面的に起こると仮定する。FRP カバー材の更新時には接合部を腐食量が少ない箇所に配置するものとした。

表-2 にライフサイクルで想定した維持管理シナリオをまとめて示す。表中、シナリオ A は、当初の防食工のみで供用期間中に損傷は起こらず、また防食工の更新も行わない場合で、カバー材接合部の隙間からの防食剤の流出によって腐食する。シナリオ B は、50 年後にペトララタムの更新を行う。シナリオ C と D は、10 年後に衝突により上記の領域のカバー材が破損して剥離した場合で、それぞれ更新を行わない場合と行う場合を想定した。

腐食環境、すなわちシミュレーションでのアタック因子などのパラメータは、19 年海洋環境に無防食状態で暴露された初期の板厚 9mm の円形鋼管杭の腐食表面

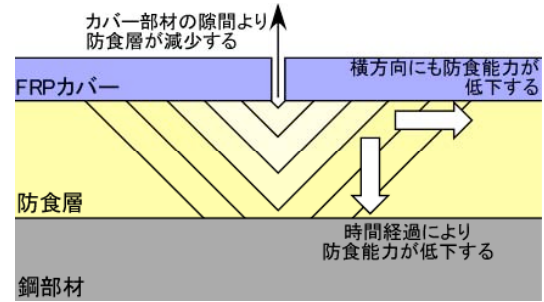


図-17 ペトララタムによる防食機能の劣化のイメージ

表-2 ライフサイクルで想定した損傷と維持管理のシナリオ

	破損	更新
シナリオA	なし	なし
シナリオB	なし	施工後50年
シナリオC	施工後10年	なし
シナリオD	施工後10年	施工後50年

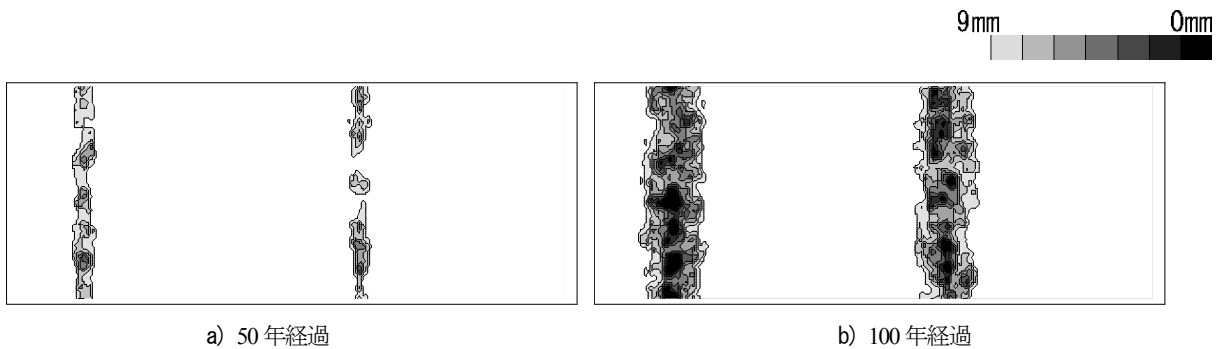


図-18 シナリオ A の板厚等高線 (防食有り・損傷無し・更新無し)

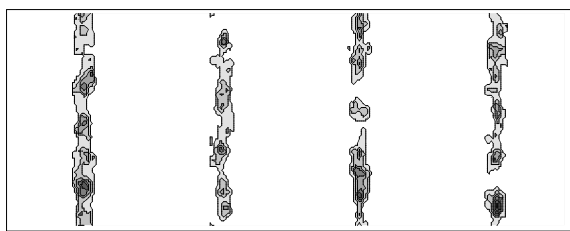


図-19 シナリオ B の 100 年経過後の板厚等高線 (防食有り・損傷無し・50 年目に更新)

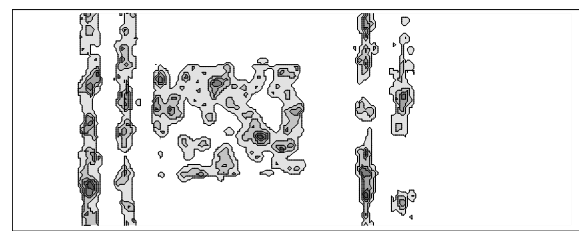
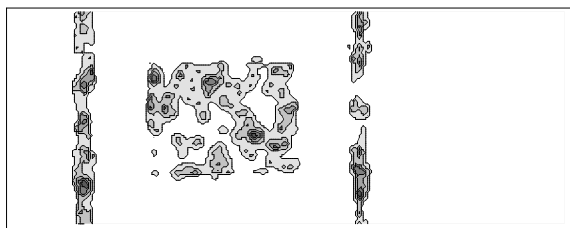
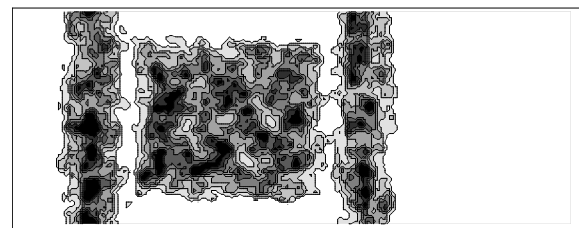


図-20 シナリオ D の 100 年経過後の板厚等高線 (防食有り・10 年目に損傷・50 年目に更新)



a) 50年経過



b) 100年経過

図-21 シナリオ C の板厚等高線 (防食有り・10 年目に損傷・更新無し)

計測結果⁴⁾を使用し、海中部でもっとも腐食が激しい500mmの区間を基に決定した。この鋼管杭の実測値の平均腐食深 $z_{me}=1.47\text{mm}$ 、腐食深の標準偏差 $\sigma=0.87\text{mm}$ であった。19年後にこれらの値が同じになるようにパラメータを試算した結果、アタック因子 $F=2.28\text{mm/年}$ 、 $n=34$ 個/年、 $\beta=0.1$ とした。

図-18~21に、上記の腐食条件で解析した結果(50年後と100年後の板厚等高線)を示す。これらの図で、シナリオBとDの50年経過後の等高線図は、それぞれシナリオAとCと同じである。経年腐食による残存量(%)を図-22に示す。残存量は残存平均板厚を示すが、図-18~21に示すように、腐食は局部的に発生している。したがって、このような場合には、式(6)のような簡易強度評価式を用いることはできず、有限要素解析を実施して残存強度を予測する必要がある。

それぞれのシナリオから得られる腐食の経年変化を考慮して有限要素解析を行い、得られた残存圧縮強度の経年変化を示せば、図-23のようになる。また、図-

24にシナリオAおよびCの100年経過後の状態での崩壊状態を示す。図-23に示すように、損傷が発生した場合、それを放置すると急な耐力低下が起こり、早期に補修することによって強度低下を抑えることができる。

以上、ペトロラタムにより防食された円形鋼管の圧縮強度の、防食剤の流出や損傷を想定した経年変化の一例を示した。ここではカバー材の隙間から防食能力が低下すると仮定したが、ここに示した手法は、例えば塗装による防食において塗膜割れが発生した場合のような強度低下の予測にも応用できる。

実際の構造物強度の経年変化を予測するためには、上述のように、防食機能の経年変化や損傷の想定およびそれらのモデル化と、腐食表面形状の経年変化と腐食進展を想定したモデル化が要求される。将来に発生する事象は予想・仮定するしかなく、船舶の衝突による損傷発生などの予測は不可能である。しかし、本論文で示した手法により、損傷が発生した後の腐食進展

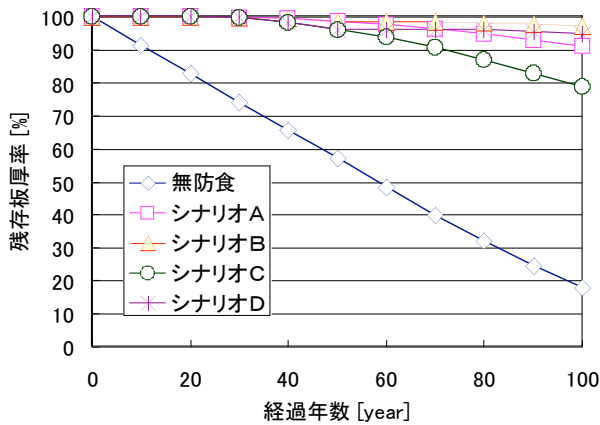


図-22 残存量の経年変化

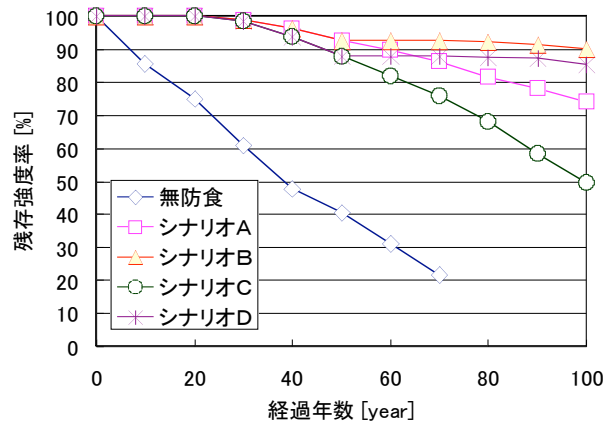


図-23 圧縮耐力の経年変化

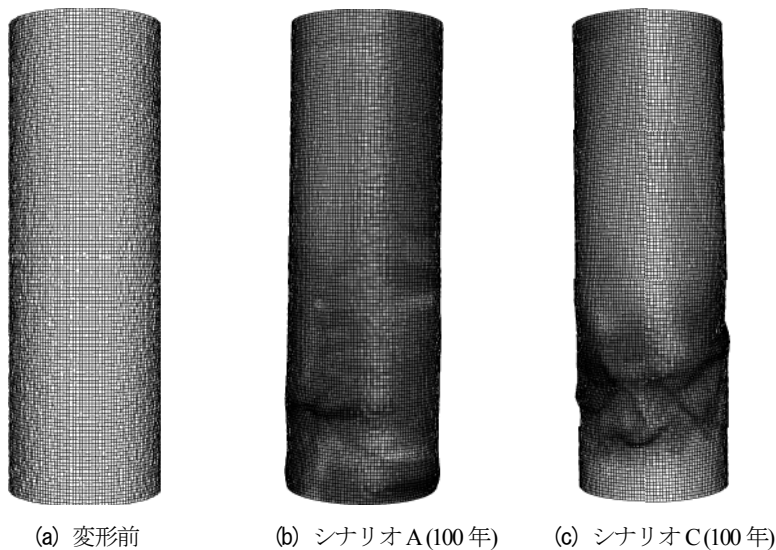


図-24 崩壊状態(100年後)

や強度低下の予測は可能と思われる。このとき、防食工の劣化や構造材料の特性、構造物が置かれた環境に支配される腐食進展状態の特性については、継続的に調査データを蓄積することによって、より信頼性の高い予測が可能になる。

6. 結論

本論文では、防食工の劣化を表す劣化モデルと腐食表面凹凸形状の経年変化を作成するモデルを作成し、2つのモデルを用いて、海洋環境における円形鋼管杭の腐食表面の経年変化を予測し、その結果に基づいて、鋼管杭の圧縮強度の経年変化を予測した。腐食表面凹凸形状作成については、19年間海洋環境に暴露された鋼管杭の腐食表面座標計測結果からモデルのパラメータを決定し、FEM および簡易強度評価式により圧縮強度の将来予測結果を示した。また、実現象をも勘案して、海洋環境における鋼構造物の維持管理のあり方について考察した。得られた成果をまとめると以下のようになる。

- 1) 海洋環境における鋼構造物の維持管理は、ある程度の腐食損傷は許容しつつ、要求される耐用期間の安全性を確実に確保するという維持管理のあり方も今後取り入れていかざるを得ないと思われる。この考えに基づくと、予防保全を目指した鋼構造物のライフサイクルコスト評価の観点から、矛盾が少なく説明力も高いと考えられる。
- 2) 腐食表面凹凸形状の経年予測モデルを示した。このモデルは、腐食の化学的メカニズムを考慮していないものの、種々の腐食表面形状を3つの支配パラメータを用いて再現できる。また、作成した表面形状から得られる平均板厚および標準偏差は、実際の腐食現象とよく対応していることを示した。
- 3) 防食工の劣化予測モデルを、腐食表面凹凸形状の経年予測モデルと同様なアルゴリズムを用いて示した。塗膜の防食能力の経年劣化も3つのパラメータを用いて表現できる。このモデルにより、得られた塗膜劣化面積率の経年変化は、実際の劣化現象を表現できることがわかった。
- 4) 腐食表面形状の経年予測モデルと防食工の劣化予測モデルを組み合わせることで、鋼管杭の圧縮強度の経年予測が可能であることを示した。予測結果は、防食工の経年劣化と強度の経年変化の関係を説明することができ、実際に起こるであろう強度低下を高い説明力を持って予測可能である。
- 5) 本論文で示した強度低下予測法は、6つの支配パラメータが必要となる。これらのパラメータは、構造物

の維持管理計画の当初は仮定値を用いるしかないが、繰り返し行われる定期点検などから得られる腐食表面状態の測定結果に基づいて、より信頼性の高い予測が可能となるよう修正できる。

- 6) 19年間海洋環境に曝露した円形鋼管の腐食表面計測結果から腐食モデルのパラメータを決め、塗膜劣化モデルのパラメータを仮定して、海中部の軸圧縮力の経年変化曲線を求めた。この解析条件の下では、無防食の場合には40年経過後で50%の強度低下となるのに対して、塗装を10年毎に繰り返せば100年後は5%、30年毎の塗装では100年後は15%の強度低下に抑えることができるという結果となった。
- 7) ペโตรラタムによる防食を例として、防食能力の劣化シナリオを想定して強度低下解析を行い、その低下予測を行った。その結果、防食能力を適切に仮定すれば、強度低下の予測が可能であると推察できる。
- 8) 本論文で示した強度低下予測法は、現在のところ検証データもなく困難であるが、たとえば塗膜の割れが発生した場合の腐食などについても適用できる。

謝辞：本研究は、土木学会鋼構造委員会 沿岸環境における鋼・複合構造の防食および耐久性評価に関する研究小委員会(主査：渡邊英一京都大学名誉教授)の活動の一部として行ったものである。研究を進めるに当たり、日本鉄鋼連盟から研究助成を賜り、また、小委員会の委員各位からは適切かつ有益なご指導ご協力を賜りました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 I共通編, 日本道路協会, 2002. 3.
- 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, 2001. 10.
- 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.672VI-50, pp.109-116, 2001.
- 4) 藤井堅, 近藤恒樹, 田村功, 渡辺英一, 伊藤義人, 杉浦邦征, 野上邦栄, 永田和寿: 海洋環境において腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.721-730, 2006.
- 5) 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.766I-68, pp.291-307, 2004.
- 6) 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.537I-35, pp.167-181, 1996.
- 7) 藤井堅, 山本治, 原考志, 中村秀治: 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, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.52A, pp.689-700, 2006.

- 8) 鋼橋塗膜の評価技術(その 2 塗膜劣化の経時変化モデルと寿命予測の検討), JSSC テクニカルレポート No.45, 日本鋼構造協会, 1998.
- 9) 西村昭, 島田喜十郎: 鋼構造物塗膜の長期劣化挙動の理論解析, 橋梁と基礎, No.5, pp.17-21, 1998.
- 10) 藤原博, 三宅将: 鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究, 土木学会論文集, No.696/I-58, pp.111-123, 2002.
- 11) 宇佐美勉: 鋼構造シリーズ 12 座屈設計ガイドライン 2nd ed., 土木学会, 2005.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Yamamoto, O., Fujii, K. and Kaita, T.: A Generating Model of Surface Irregularities with Corrosion Progress due to Aging in Steel Structures, *Collaboration and Harmonization in Creative Systems, Proceedings of the 3rd International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC-3)*, Taylor & Francis, Tokuyama, Japan, Vol.1, pp. 445-451, 2005.
- 15) 中村秀治, 藤井堅, 石川智巳: 多次元 AR 法に基づく鋼腐食面形状の生成について, 土木学会構造工学論文集, Vol.52A, pp.671-678, 2006.
- 16) 森猛, 渡邊一, 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力, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.675-686, 2003.
- 17) 海田辰将, 藤井堅, 勇秀憲, 長瀬竜一: 腐食鋼板の圧縮強度解析における板厚取得間隔と要素サイズの影響, JCOSSAR2007 論文集, Vol. 1, pp.89-96, 2007.
- 18) 田村功, 渡辺英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 杉浦邦征, 永田和寿, 岡扶樹: 海洋環境において腐食した鋼管の形状計測と残存耐力に関する検討, 土木学会構造工学論文集, Vol.51A, pp.1103-1110, 2005.
- 19) 杉浦邦征, 田村功, 渡辺英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 永田和寿, 岡扶樹: 腐食鋼板の力学特性評価のための板厚計測および有効板厚に関する考察, 土木学会構造工学論文集, Vol.52A, pp.679-687, 2006.
- 20) 杉浦邦征, 田村功, 渡辺英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 永田和寿: 腐食鋼板の圧縮強度の簡易評価法に関する検討, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 1, pp.43-55, 2007.
- 21) 西村宣男, 竹内修治, 村上茂之, 竹下主義, 軸屋一美, 伏見義仁: 断面に欠損を生じた円形鋼管部材の座屈強度特性, 鋼構造年次論文報告集, Vol.6, pp.55-66, 2001.
- 22) 西村宣男, 竹内修治, 村上茂之, 田淵敦彦, 伏見義仁: 断面に欠損を生じた円形鋼管部材の残存強度の評価法, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, Vol.9, pp.489-496, 2001.
- 23) 藤井堅, 中村秀治, 近藤恒樹, 橋本和朗, 沖元浩見, 中村剛裕: 腐食した円筒殻の曲げ座屈耐力に関する実験的検討, 土木学会構造工学論文集, Vol.53A, pp.784-793, 2007.
- 24) 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, No.51, 2002.
- 25) 土木学会鋼構造委員会鋼構造の残存耐荷性能評価と耐久性向上方策研究小委員会(委員長: 野上邦栄), 腐食した鋼構造物の残存耐荷性能評価および性能回復技術, 土木学会, 2007.
- 26) 志鶴真介, 守谷進: 飛沫部・干満部・海中部における鋼構造物の防食方法—ペトロラタムライニングの海洋曝露 20 年の研究成果, 土木学会第 62 回年次学術講演会 5-515, pp.1029-1030, 2007.
- 27) 宮田義一, 阿部正美, 濱田秀則, 清水一夫, 中野啓眞, 芥川博昭: 鋼管杭の防食工法に関する現地実験 (20 年目の中間報告), 港湾空港技術研究所資料, No. 1123, 2006.

(2009.2.4 受付)

A PREDICTION METHOD OF STRENGTH DETERIORATION IN AGING OF CIRCULAR STEEL TUBE CORRODED IN MARINE ENVIRONMENT

Katashi FUJII, Kazuaki HASHIMOTO, Eiichi WATANABE, Yoshito ITOH,
Kunitomo SUGIURA, Ikuei NOGAMI, Kazutoshi NAGATA
and Hideharu NAKAMURA

This paper presents a future prediction method of strength deterioration of circular steel column corroded along with aging in marine environment. Corroded surfaces along with aging are made by the two models. One model makes surface unevenness caused by corrosion progress and the other expresses deterioration of paint to prevent rust. And based on the corroded surface made by the models, the remaining strength after a passing period can be predicted by FEM analyses or other formulae evaluating the strength. It is concluded from results that the prediction method proposed herein is persuasive enough to express the actual phenomena of corrosion and can predict the compressive strength of circular steel tube along with aging.