243

海洋環境下の腐食鋼管部材の耐力評価について

正員	Щ	根		信*	学生員	田	中	Ŧ.	治**
学生員	松	田		漠**	正員	藤り	、保	昌	彦**
正員	柳	原	大	輔**		岩	尾	直	樹***

Evaluation of the residual strength of corroded steel tubular members in marine environments

by Makoto Yamane, Member Baku Matsuda, Student Member

Daisuke Yanagihara, Member

Kimiharu Tanaka, Student Member Masahiko Fujikubo, Member Naoki Iwao

Summary

Steel tubular members of offshore frame structures can suffer from corrosion damages in marine environments. Paint coating is usually applied for tubular members in splash and tidal zones as a corrosion protection. A typical mode of corrosion experienced in those members is distributed pitting corrosions as a result of degradation of coating materials. On the other hand, tubular members in water and soil zones are generally protected by a cathodic protection without coating materials, and a general corrosion spreading all over the surface is a typical mode of corrosion. In order to evaluate the structural integrity and resulting failure risk of offshore frame structures with corrosion damages, it is important to investigate the residual strength of corroded steel tubular members. In the present study, compressive and bending strengths of steel tubular members with general or putting corrosion are examined. Surface roughness measurements are made for tubular members with general corrosions taken from the splash zone, and ultimate strengths under axial compression and pure bending are examined both experimentally and numerically. Pitting corrosions as a result of degradation of coating are modeled based on the existing related test results and ultimate strength is examined numerically. Based on the obtained results, the applicability of existing design formula for the evaluation of residual strength of corroded steel tubular members is examined.

1. 緒 言

ジャケット、鋼管杭式桟橋などの海洋鋼構造物は、腐食お よび波浪環境下に晒されているため、腐食・疲労等の経年劣 化を生じ、部材ひいては構造全体の強度が低下して、全体崩 壊に至る可能性もある。海洋鋼構造物の飛沫帯・干満帯に防 食工法として採用されている塗膜の劣化については、目視観 察により相対的な塗膜の変状を調査し、塗膜劣化度の標準図 と対比して劣化率を評価する方法が提案されている¹⁾。しか し、劣化した塗膜下の腐食の形態と進行について数量的に評 価された例は少なく、また劣化塗膜下の腐食を有する部材の 強度特性についての検討も余りなされていない。一方、飛沫 帯、干満帯以外の水中部や土中部では、一般に無塗装材が使 用され電気防食により防食が図られる。これらの領域の腐食

- * 新日本製鐵㈱エンジニアリングサポートセンター
- ** 広島大学大学院 工学研究科

*** 新日本製鐵㈱ 環境プロセス研究開発センター 原稿受理 平成 17 年 12 月 26 日 形態は比較的凹凸の少ない全面腐食に近いことが知られて いるが、このような全面腐食を有する劣化部材の強度特性を 明確化することも重要である。

松下・中井らは、孔食を有する船体構造部材の座屈最終強 度に関する一連の研究を行っている²⁻⁴)。一方、鋼管部材に 関して、西村ら⁹は、腐食による断面欠損を生じた鋼管の残 留強度の評価法を検討している。岡田ら⁹は、同様の腐食 損傷を有する鋼管骨組構造物の崩壊強度を検討している。し かしながら、全面腐食や劣化塗膜下の孔食を有する鋼管の残 留強度に関する研究は少ない。

以上の背景の下、本研究では飛沫帯を想定した塗膜劣化に 起因する孔食を有する鋼管部材、および水中部・地中部を想 定した全面腐食を有する鋼管部材のそれぞれについて曲げ および圧縮強度を調べる。全面腐食については、岸壁飛沫帯 に暴露した鋼管試験体について表面形状計測と強度試験お よび有限要素解析を行う。劣化塗膜下の孔食については、既 存の試験結果を基に腐食形態をモデル化し、有限要素解析に より耐力評価を行う。さらに、実用的観点から、全面腐食、 孔食のそれぞれの腐食形態について、API 設計算式⁷ に基 づく強度推定法との比較検討を行う。 244

日本船舶海洋工学会論文集 第3号

2. 全面腐食を有する鋼管部材の強度評価

2.1 海岸暴露部材の表面形状計測および強度試験

形状計測および強度試験の対象とした鋼管部材は、岸壁飛 沫帯に約20年間暴露された外径139.8mm、板厚4.5mmの電 縫鋼管から切り出したものである。Photo1に鋼管の設置状 況を示す。設置場所は岸壁に近接しており、飛沫帯と見なす ことができる。しかし、雨水で頻繁に塩分が洗い流されてお り、ジャケット、桟橋などのデッキ下にある部材が、塩分の 付着・乾燥・付着を繰り返して過飽和にあることに比べると、 水中・土中部の状態と同じく、塩分濃度の比較的低い環境に ある。Photo1のように鋼管は一部塗装されているが、塗膜 下には腐食は認められなかったため、暴露部のみを供試した。

Fig.1 に、表面形状計測装置の概略図を示す。図に示すように、鋼管を回転円盤の中央に垂直に立て、先端にレーザー変位計を取り付けた2本のアームを、内1本が鋼管の内側に入るよう筒壁を跨いで設置した。そしてアームを上下に変位させ、また円盤を回転させて試験体全表面の形状を自動計測した。計測のメッシュは、周方向に約0.5度ピッチ、鋼管長方向に1mmピッチである。Table1に表面形状計測から得られた外径と板厚の統計量を示す。鋼管内部の腐食はないため、内径*D_i*=130.8mm(一定値)に板厚平均値7を加えて平均外径*D*を求めた。各部材とも板厚の標準偏差は0.2mm程度と平均板厚に比べて小さい。また目視でも局所的に腐食が進んだ箇所は認められず、いずれの部材も腐食形態は、円筒全面



Photo 1 Corroded steel pipes at exposure site

Table 1 Cross-sectional geometries of tested pipes								
No.	\overline{D}	\overline{t}	σ_t	t _{max}	t _{min}			
CM1	138.48	3.84	0.152	4.21	3.26			
CM2	138.54	3.87	0.174	4.49	3.37			
CM3	138.44	3.82	0.156	4.30	3.31			
CM4	138.70	3.95	0.194	4.42	3.23			
CM5	138.60	3.90	0.130	4.36	3.50			
$\overline{\Omega} - \overline{\Omega}$	1 77 . Aug	naa outor	diamotor		(in mm)			

 $D = D_i + 2\overline{t}$: Average outer diameter (in mm) D_i : Internal diameter (=130.8mm)

 \overline{t} : Average thickness σ_t : Standard deviation of thickness t_{\max} : Maximum thickness t_{\min} : Minimum thickness

に比較的小さな凹凸が均等に広がった全面均等腐食⁸⁾(以 下略して全面腐食)の状態である。

これらの腐食鋼管を対象に圧縮試験および4点曲げ試験 を実施した。Fig.2 に圧縮試験および曲げ試験で得られた荷 重~変位関係を示す。同図(b)の CM2-1 および CM2-2 は、 同じ供試材 CM2 から切り出した 2 体の試験体を表す。対象 鋼管の腐食前の外径/板厚比は D/t=31.1 であり、ジャケット のブレース部材としては実機に使用される範囲であるが、レ グ部材や桟橋の杭としては相対的に厚肉である。結果として、





Fig.2 Load and load-point displacement relationships

2

圧縮強度、曲げ強度とも、試験体の最終強度は平均板厚から 求めた全断面塑性強度で推定出来ることが判明した。

一方、元厚が試験体よりも薄い場合には、腐食による表面の凹凸が同じでも最終強度に対する腐食の影響は増加すると考えられる。そこで内径 *D_i* が同じで元厚 *t*₀ が異なる鋼管

(外径 $D_0 = D_i + 2t_0$)を想定し、これに供試体と同じ表面の 凹凸量を与えた場合について有限要素解析を行って、全面腐 食が部材の断面強度に及ぼす影響を調べる。

2.2 強度解析および強度評価

有限要素解析には非線形構造解析ソフト ABAQUS を使用 する。要素には 4 節点シェル要素 S4R を使用し、平均的な 凹凸波長の約 1/2 に相当する 2mm×2mmのメッシュで分割す る。シェル節点の法線方向位置を、筒壁凹凸面の板厚中央に 合わせる。また要素板厚は、4 つの節点における板厚の平均 値とする。なお、比較のため実施した 1mm×1mm メッシュ の解析から、上記モデルによって $\overline{D}/\overline{t}$ =100 程度の腐食薄肉 鋼管の場合を含めて、同程度の精度で座屈・塑性崩壊挙動を 解析できることを確認している。

圧縮強度解析モデルの初期たわみは、軸方向に軸対称弾性 座屈波長の理論値 1.22 √*Dt* に近接する半波長を有する奇数 の半波を式(1)により与えた。最大値は供試体元厚 4.5mm の 1/100 とした。

w =
$$\frac{t_0}{100} \sin \frac{n\pi x}{L}$$
 (t₀ = 4.5mm) (1)

ここでは、鋼管の最終強度に関する腐食の影響を調べること を目的とするため、最大初期たわみは鋼管の許容不整量(外 径/100)に比べて小さめの値を設定している。曲げ強度解析 モデルの初期たわみは、シェル中央部で供試体元厚 4.5mm の 1/100 となる式 (2)によって与えた。



(a) CASE1 (b)CASE2 Fig.3 Deformation obtained by FEM ($D_0/t_0=60$)

圧縮試験の解析では試験体端面では、圧縮板との摩擦によ り横断面内の並進変位が拘束されると仮定した。曲げ試験で は、崩壊の生じる中央の450mmをシェル要素でモデル化し、 その外側は等価な梁要素に置換して両端支持および荷重載 荷を行った。

解析結果として、Fig.3 に平均外径/平均板厚比 $\overline{D}/\overline{t}$ = 80.8 (元厚に関する外径/板厚比 D₀ / t₀ = 60)の腐食鋼管モデル の圧縮崩壊モードを示す。Case 1は、平均板厚に等しい一様 板厚の鋼管を仮定した場合、Case 2 は腐食表面形状をモデル 化した場合である。Case 2 では相対的に板厚の薄い断面に面 外変形が集中しているが、Case 1 では端部に面外変形が集中 する。Fig. 4 に $\overline{D}/\overline{t}$ = 35.5, 55.6, 80.8, 111.9(D_0/t_0 = 31, 45, 60, 75)の各ケースについて得られた鋼管モデルの圧縮荷重~圧 縮変位曲線をCase1および2で比較して示す。またFig.5に、 それぞれの場合の最終強度を $\overline{D}/\overline{i}$ に対してプロットした結 果を示す。平均板厚iに対する凹凸の標準偏差 σ ,の割合は、 $\overline{D}/\overline{t}$ = 112 で 10%、 $\overline{D}/\overline{t}$ = 36 で 3%である。 $\overline{D}/\overline{t}$ が大きい ほど、板厚に対する凹凸量の割合が大きいが、Case1 と Case 2 で最終強度に有意な差はなく、圧縮最終強度は平均板厚に 基づいて概ね評価できることを示している。表面の凹凸は局 部的な応力集中を生じさせるが、凹凸による偏心は隣接部位 で複雑に変化し互いにキャンセルする作用があることから ⁹⁾、全面腐食の場合、ここで考慮した凹凸の標準偏差/平均 板厚比程度であれば、平均板厚で最終強度を評価可能と判断 できる。

ところで、Fig.5 の実線はアメリカ石油協会 (API) 規格の 圧縮座屈強度曲線^のを表しており、次式で与えられる。

$$\frac{P_{\text{max}}}{P_y} = 1.0 \qquad \text{for } \frac{D}{t} \le 60 \tag{3}$$

$$\frac{P_{\max}}{P_{y}} = 1.64 - 0.23 \left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{1}{4}} \qquad for \frac{D}{t} > 60$$
(4)

ここで、Pvは全断面降伏荷重を表す。API強度曲線は、



Fig.4 Compressive load-end shortening relationships (FEM)

日本船舶海洋工学会論文集 第3号

2006 年6月



Fig.5 Comparison of API compressive strength curve and FEM result plotted against diameter to average thickness ratio



Fig.6 Bending moment-rotational angle relationships (FEM)

多数の実験結果の下限を引いたものである。API 強度曲線の 基となった実験と比べて、解析は、初期不整を小さく評価し ている点で非安全側、ひずみ硬化を無視する点で安全側であ る。結果として API 曲線と比較的良い相関を示していると 考えられる。以下では、実用強度算式の例として API 曲線 を取り上げ、腐食材の FEM 解析結果と対比する。Fig.5 によ ると、腐食材の有限要素解析結果(Case 2)は、API 強度曲線 に近接しており、平均板厚を用いて API 強度曲線を適用す れば、最終強度を良好な精度で推定できることが判明した。

ところで、腐食鋼管の座屈強度の推定では、式(5)のよう に平均板厚iから凹凸量の標準偏差 σ_i の定数倍を減じた値 を有効板厚とする取扱いが従来から用いられている¹⁰⁾。

$$t_e = \overline{t} - \beta \sigma_t \tag{5}$$

ここで、 t_e は有効板厚、 β は定数である。式(5)で β =0.5 および 1.0 とした場合の t_e と、それより求めた P_y および D_e/t_e (:: $D_e = D_i + 2t_e$)に対して有限要素解析結果をプロットした結果を Fig.5 に Case 3 として示す。 β の増大に伴う有効板厚減により D_e/t_e が増加すると共に、 P_y の減少により P_u/P_y が見かけ上増加する。結果として、 β が大きい程 API



Fig.7 Comparison of API bending strength curve and FEM result plotted against diameter to average thickness ratio



Fig.8 Comparison of API bending strength curve and FEM result plotted against diameter to minimum thickness ratio

曲線から離れることになり、式(5)は有効板厚を過小に評価 することがわかる。この理由は、式(5)が本試験体 $(\sigma_t/\overline{\imath}=0.03)$ よりも凹凸量が相対的に大きい腐食鋼管の圧 縮試験¹⁰⁾ $(\sigma_t/\overline{\imath}=0.13\sim0.18)$ に基づくためである。文献 10) では式(5)の適用範囲を $\sigma_t/\overline{\imath}>0.1$ としており、本供試体 はその範囲外にある。本試験体のように板厚に対する凹凸量 の標準偏差値比率が小さい場合は、定数値 β による安全代を 考慮しない方がより正確な予測を与えることを示している。

このことより、従来、杭長の大きな範囲で腐食深さのばら つきの大きい試験体・計測結果を評価し、その範囲の平均板 厚と一律にβを考慮して残留強度を決定する方法に対して、 強度上クリティカルな範囲を限定し,孔食深さの標準偏差値 の少ないより狭い範囲で残留板厚計測を行い、強度の算定を 行い評価する方法の方が、より正確な値を与えると考える。

次に、Fig.6 に曲げモーメントと中央径間 450mm の範囲の 両端断面の相対回転角の関係を、また Fig.7 に曲げ強度に関 する API 強度曲線である式(6), (7), (8)と有限要素解析結果の 比較を示す。

$$\frac{M_{\text{max}}}{M_{p}} = 1.0 \qquad \text{for } \frac{D}{t} \le \frac{10340}{\sigma_{\gamma}} \quad (\sigma_{\gamma} \text{ in MPa}) \qquad (6)$$
$$\frac{M_{\text{max}}}{M_{p}} = 1.13 - 2.58 \frac{\sigma_{\gamma} D}{Et} \quad \text{for } \frac{10340}{\sigma_{\gamma}} \le \frac{D}{t} \le \frac{20680}{\sigma_{\gamma}} \qquad (7)$$

$$\frac{M_{\max}}{M_{p}} = 0.94 - 0.76 \frac{\sigma_{\gamma} D}{Et} \quad \text{for } \frac{20680}{\sigma_{\gamma}} \le \frac{D}{t} \le 300$$
(8)

ここで解析モデルでは、腐食による凹凸形状において、最も 薄肉の箇所を曲げ圧縮側に置いている。Fig.6 および Fig.7 より、曲げ強度の場合、Case2 は平均板厚モデル Case1より かなり低く、その違いは、板厚に対する凹凸量の割合が相対 的に大きい薄板ほど大きい。このことから曲げ強度は局所的 な凹凸の影響をより大きく受けることがわかる。なお、Fig.7 では平均板厚により整理しており、局所板厚との関係を整理 するため、Fig.8 のように座屈部位の最小板厚に対する *D*/*t*_{min} について最終強度をプロットすると、薄板側も API 強度曲線上に乗ってくる。

以上の結果より、水中部・地中部で見られる全面腐食を有 する鋼管の強度は、圧縮強度は平均板厚を用いて、また曲げ 強度については座屈部位の最小板厚で API 曲線を用いるこ とにより良好な精度で推定できることが明らかとなった。

3. 劣化塗膜下の孔食を有する鋼管部材の強度評価

3.1 重防食塗膜下の腐食形態とそのモデル化

海洋鋼構造物の防食対策として最も広く適用されている のは、塗装に代表される被覆防食工法により、酸素や水分を 遮断する材料で鋼材を被覆して鋼材の腐食を抑制する防食 法である。被覆材として使用される有機材料による防食塗膜 は、漂流・落下物の衝突による損傷や、紫外線等の影響によ り機能低下を起こし、水、酸素や塩分等の鋼材の腐食因子と 鋼材の接触を阻止する能力が低下して塗膜下に腐食が発生 する。陸上橋梁では、このような劣化塗膜下の腐食は軽微と 考えられているが、海岸域では腐食速度が大きいことが報告 されている¹¹⁾。海洋構造物ではさらに厳しい環境下にある と考えられる。

一般に海洋鋼構造物では、塗膜のさび発生面積率(塗膜表



Tust Cillue 5-1, 676 Husted

Fig.9. ASTM Standard of PSR (3% and 10%)

5

面に見えるさび面積率)に応じて補修が行われる。さび発生 面積率が増すほど補修費が増加するため、破壊リスクを含め たライフサイクルコスト評価の観点から、さび発生面積率に 応じた部材の残留強度を明確にしておくことは重要である。 以下、さび発生面積率を、PSR (Percent of Surface Rusted) と称する。また、Fig.9 に 3%と 10%の ASTM 標準図を示す ¹⁾。

上記のような塗膜劣化を生じた重防食塗装下の鋼材腐食 は、鋼・コンクリート境界部と同様のマクロセル形成¹²⁾ に よる局部腐食状態にある。しかしながら、この状態での腐食 状態の観察および実験データは非常に少ない。そこで、ここ では関連する既存研究結果を基に腐食モデルを想定する。

まず、鋼管断面寸法は実際の桟橋の杭寸法を参考に、外径 D=1500mm および初期板厚 t=18mm とする。有限要素解析モ デルの長さは、飛沫帯部の 3000mm とする。塗膜劣化およ び腐食進行は、次のように仮定する。

塗膜表面の劣化評価は、ASTM-D610の PSR 判定基準より、 PSR%値別に腐食点数をカウントし、腐食点数と1点当たり の表面積が ASTM 判定基準相当¹⁾ になるように設定する。 比較的細かい腐食点が広く分布する Pinpoint rusting type の 塗膜劣化パターン¹⁾を想定し、塗膜下の孔食(ピット)を設 定する。劣化位置は一様乱数により配置を決める。

劣化塗膜下のピット面積は、クロスカットを付した塗装部 材の腐食率の実験値¹³⁾より、塗膜表面のさび発生面積の5 倍に設定する。これは塗膜損傷時の想定であるので、安全側 の評価である。

ピットの深さ方向速度は、Corrosion Science Section¹⁴⁾より 平均全体腐食速度(0.3mm/year)の1および3倍に設定する。 以下、平均全体腐食速度に対する孔食速度の割合(相対孔食 速度率)を α で表す。オーストラリアの微生物腐食や淡水・ 海水が交わる海洋環境で観察された最大ピット深さの進行 速度は α =7であり¹⁴⁾、その約 1/2 の孔食速度を想定するこ とになる。

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 化は塗膜の経過年数の指数関数である Gompertz 曲線¹³⁾によ って表すことができる。ここでは、エポキシ、塩化ビニル系 の塗装を想定し、さび発生面積率 PSR が 3%となるまでの期 間を期待耐用年数(10年)とする。10年間で 3%の塗膜劣化に 到る条件から、塗膜の劣化進展速度を次式の形で評価する。

$$y = 0.001e^{0.8006x} \tag{9}$$

ここで、yはPSR(%)、xは経過年数(year)を表す。PSR が 0.3%に達すると、鋼管表面の腐食が始まると仮定する。 式(9)から、PSR が 0.3%に達するまでの期間は 7.12(year)と なり、腐食期間は 10.0-7.12 = 2.88(year)、PSR が 3%時の腐食 248

20 91.1 16.4

Tab	ble 2 Model size of pit corroded pipes at each PSR (α =1)							
		CASE1	CASE2					
PSR (%)	$\overline{D}/\overline{t}$	Ŧ	Number of pit	Area of a pit	Pit depth	Standard deviation		
		(mm)	(mm)	(mm ²)	(mm)	(mm)		
0	83.3	18.0						
3	83.9	17.9	9000	235.6	0.86	0.31		
5	84.5	17.7	9000	392.7	1.06	0.46		
10	86.4	17.3	12000	589	1.31	0.66		
12	87.3	17.2	14400	589	1.38	0.68		
16	89.1	16.8	19200	589	1.49	0.60		

Table 3 Model size of pit corroded pipes at each PSR (α =3)

		CASE1	CASE2						
PSR (%)	$\overline{D}/\overline{t}$	Ŧ	Number of pit	Area of a pit	Pit depth	Standard deviation			
		(mm)	(mm)	(mm ²)	(mm)	(mm)			
0	83.3	18.0							
3	85.1	17.6	9000	235.6	2.59	0.93			
5	87.1	17.2	9000	392.7	3.17	1.37			
10	93.3	16.0	12000	589	3.94	1.97			
12	96.4	15.5	14400	589	4.15	2.03			
16	103.5	14.4	19200	589	4.47	1.79			
20	112.3	13.3							

ピット深さは、相対腐食速度率 a=3では 0.3×2.88×3 =2.59(mm) となる。同様の計算で、さび発生領域の PSR 別 に、腐食期間と局部腐食ピット深さを求める。

Table 2 および Table 3 に、 $\alpha=1$ および $\alpha=3$ のそれぞれの 場合の PSR と腐食モデル (ピット数、ピット面積、ピット 深さ、および全表面に対する板厚の平均値および標準偏差) の関係を示す。PSR=10%以上については、ピット面積は一 定とし、各 PSR 値の腐食面積になるよう、腐食点数を計算 している。

3.2 強度解析および強度評価

有限要素法解析の手順は次の通りである。

PSRに対応する 3.1 で述べた腐食面積の矩形シェル有限要 素に鋼管を規則分割する。PSR に対応する個数の劣化点を一 様乱数により発生させ、腐食部要素の板厚を減じる。また、 外表面からの腐食による偏心の影響を考慮する。

Fig.10 に、PSR=3%の鋼管に純曲げ荷重を加えた時の最終 強度時の変形例を示す。細かい矩形の点が孔食部を表してお り、本 PSR の場合、一腐食点の面積は 15×15mm、また相対 孔食速度率 α=1,3、7 に対応する孔食深さは元厚 18mm に対 してそれぞれ 0.8mm, 2.6mm, 6.0mm である。α=1の場合に、 いくつかの PSR について圧縮最終強度を解析して得られた 圧縮荷重~圧縮変位関係を Fig.11 に、また平均板厚から求



Fig.10 Deflection at the ultimate bending strength of tube with 3% PSR



Fig.11 Compressive load-end shortening relationships (a=1)



Fig.12 Comparison of API compressive strength curve and FEM result plotted against diameter to average thickness ratio (α =1)

めた $\overline{D}/\overline{\iota}$ に対して最終強度をプロットした結果を Fig.12 に 示す。同様に曲げモーメント~回転角関係および曲げ最終強 度の解析結果を Fig.13 および Fig.14 にそれぞれ示す。圧縮、 曲げのいずれの場合も、PSR の程度にかかわらず一様平均板 厚鋼管の最終強度と孔食腐食鋼管の最終強度はあまり変わ らず、腐食による強度の低下が少ないことが分かる。また API 強度曲線の想定線とも比較的に一致している。

一方、α=3の孔食腐食速度下の結果(Fig.15~Fig.18)では、 孔食腐食鋼管の最大強度は、PSR10~12%の範囲で一様板厚 鋼管の最終強度から若干低下し、16%以上で一様板厚鋼管の 海洋環境下の腐食鋼管部材の耐力評価について



Fig.13 Bending moment-rotational angle relationships (α =1)



Fig.14 Comparison of API bending strength curve and FEM result plotted against diameter to average thickness ratio (α =1)

強度に近くなる。これは、PSR=16%では鋼管表面の腐食率 が80%となり、一様板厚に近い状態にあるためである。API 強度曲線との比較では、いずれの PSR においても最終強度 は API 曲線と良く一致する。ここで、PSR=10~12%付近(腐



Fig. 17 Bending moment-rotational angle relationships (α =3)



Fig.15 Compressive load-end shortening relationships (α =3)



Fig.16 Comparison of API compressive strength curve and FEM result plotted against diameter to average thickness ratio $(\alpha=3)$

食率 50~60%付近)は、標準偏差が最も大きく、凹凸による局所的偏心および降伏の影響が大きい。その結果、 PSR=10%付近が最終強度に対する孔食腐食の影響が最も現れていると考えられる。しかしながら、一様平均板厚鋼管の



Fig. 18 Comparison of API bending strength curve and FEM result plotted against diameter to average thickness ratio (α =3)

最終強度との違いは小さい。以上の結果から、検討対象とした孔食腐食速度率αが3以下の場合、平均板厚を用いて API 曲線を用いることにより圧縮および曲げ最終強度を評価で きることが判明した。

劣化塗装下鋼管の孔食による凹凸表面部材の最終強度に ついて、その平均の一様板厚を持つ部材の最終強度からの低 減割合と、減耗板厚と元厚の比率および塗装部の PSR から 推定される表面腐食面積率 (Surface Corrosion Rate) SCR と の相関を Fig.19,20 に示す。ここでは、塗膜に浮遊物が衝突 する等の損傷を起こした場合を想定した極端な例として、孔 食速度率が α=7 の場合も解析している。この結果より、圧 縮、曲げとも図中に破線で示した減耗板厚比 30%以下の範 囲では、局部腐食による強度の減少は小さいことが分かる。 減耗板厚比が 30%を超える場合には SCR に応じて、最終強 度は有意に低下する。



Fig.19 Reduction ratio of compressive strength due to pitting corrosion





4. 結 言

本研究では、全面腐食あるいは塗膜劣化による孔食を有する 鋼管の圧縮および曲げ強度について検討した。前者について は、岸壁飛沫帯の暴露試験体に対する表面形状計測、強度試 験と有限要素解析を、また後者については、仮定した腐 食モデルに関する有限要素解析を行い、腐食鋼管部材の強度 特性と実用的強度評価法について検討した。得られた主な結 果は、次の通りである

- (1) 全面腐食を有する鋼管の場合、圧縮強度は平均板厚の 鋼管の最終強度と、また曲げ強度は圧縮側の最小板厚 の鋼管の最終強度と大きな違いはなく、いずれも API 強度曲線の適用で、良好な精度で評価できる。
- (2) 塗膜表面に比較的細かい錆が一様に分布したピンポイント錆びタイプでの塗膜劣化による孔食を有する鋼管の最終強度は、孔食腐食速度が全面腐食速度の1倍、3倍の場合、圧縮および曲げ強度とも、平均板厚に対する API 強度曲線により、残留強度を良好な精度で推定可能である。
- (3) ピンポイント錆びタイプの塗膜劣化を有する鋼管の強度を減耗板厚比で整理すると、減耗板厚比30%以下であれば、圧縮、曲げ強度とも平均板厚相当の強度からの減少は小さい。

なお、今回の研究では、塗膜の劣化が比較的全面拡散型で 進行するピンポイント型で検討した。今後は、港湾構造物の 干満帯や塗膜の損傷部に見られる局所腐食での集中錆や普 通錆形態で比較的大きな腐食損傷を持つ部材についての強 度に与える影響を検討する。

また、塗膜下の腐食劣化形態や劣化速度について、損傷を 模した塗膜付き試験片の腐食劣化加速試験等による実験的 検証や、経年劣化した桟橋や岸壁に使用された部材の実測調 査を通して、環境や防食方法別に腐食劣化速度のデータベー スを構築し、実構造物の腐食劣化予測をより正確に行えるよ うにすることが今後の課題である。

参考文献

- ASTM: Standard Test Method for Evaluating Degree of Rushing on Painted Steel Surface, D610-01, 2001
- 2) 松下久雄,中井達郎,山本規雄,荒井宏範:船体構造 部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第1報)一実部 材での腐食ピット影響調査一,日本造船学会論文集, 第192号 (2002), pp.357-365.
- 3) 中井達郎,松下久雄,山本規雄,荒井宏範:船体構造 部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第2報)一人口 ピット材を用いた強度調査一,日本造船学会論文集, 第195号 (2004), pp.221-231.

- 4) 中井達郎,松下八雄,山本規雄:船体構造部材の静的 強度に及ぼす腐食の影響(第3報)一模擬腐食ピット を有する構造モデル4点曲げ試験一,日本造船学会論 文集,第195号 (2004), pp.232-242.
- 5) 西村宣男,竹内修治,村上茂之,田渕敦彦,伏見義仁: 断面に欠損を生じた円形鋼管部材の残留強度の評価 法,日本鋼構造協会,鋼構造年次論文報告集,第9 巻(2001), pp.489-496.
- 6) 岡田博雄,正岡孝治,北浦堅一,孫軍,山口忠則:損 傷を有する骨組構造物の崩壊強度低下の簡易推定の 一方法(有孔円筒部材を含む場合),JCOSSAR2000 論文集,pp.595-602 (2000).
- 7) API: Recommended Practice 2A-WSD Twenty-First Edition, December 2000.
- 8) (社)石油学会:腐食形態写真集,1978.
- 海田辰将,藤井堅,中村秀治:腐食したフランジの簡 易な圧縮強度評価法,土木学会論文集,No.766/I-68, pp. 59-71 (2004).
- 10) 高橋宏直、船橋香、横田弘: 腐食した鋼管杭の力学的 特性試験、国土技術政策総合研究所資料 NO.44 付属 資料 2 (2002)
- 11)藤原博,菅沼照造: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-35.1996.4、pp167-181.
- 12) 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-70,2005.1, pp97-114.
- 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, 2004.7
- R.E.Melchers: Pitting Corrosion of Mild Steel in Marine Immersion Environment - Part 1; Maximum Pit Depth, Corrosion (NACE International), Vol.60, No.9, 2004, pp.824-836.