

海洋環境において腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力

Ultimate strength of corroded circular steel tube in marine environment

藤井 堅¹⁾, 近藤恒樹²⁾, 田村功³⁾, 渡邊英一⁴⁾, 伊藤義人⁵⁾, 杉浦征邦⁶⁾, 野上邦栄⁷⁾, 永田和寿⁸⁾
 Katashi Fujii, Tsuneki Kondoh, Isao Tamura, Eiichi Watanabe, Yoshito Itoh, Kunitomo Sugiura, Kunici Nogami, Kazutoshi Nagata

- ¹⁾ 工博, 広島大学大学院助教授 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)
²⁾ 広島大学大学院修士課程 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)
³⁾ 工修 鹿島建設(株) 東北本線長町駅付近高架化長町北工区/鹿島・仙建共同企業体 (〒982-0003 宮城県仙台市太白区郡山 1-1-1)
⁴⁾ Ph.D, 工博 京都大学名誉教授 (財)大阪地域計画研究所理事長 (〒561-0834 大阪府豊中市庄内栄町 2-21-1)
⁵⁾ 工博, 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)
⁶⁾ Ph.D 京都大学大学院助教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8510 京都市左京区吉田本町)
⁷⁾ 工博, 首都大学東京准教授 都市環境学部都市環境学科都市基盤環境コース 5 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
⁸⁾ 工博, 名古屋工業大学大学院助教授 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

This paper presents compressive tests of circular steel tubes that have been exposed in severe marine environment for 19 years. Before loading test, surface irregularities of them were measured by 3-dimensional portable measurement system. During tests, ultimate behaviors were investigated focusing on relation between buckling location and corrosion condition. Nonlinear FEM were also conducted, taking the corrosion conditions into account. From tests and analyses, following remarks can be listed; (1) an easy method to evaluate remaining compressive strength of corroded steel tube can be given by using the representative thickness made by statistical indexes of corrosion surfaces, (2) local buckling occurs at the thinnest cross-section in corroded tubes, corresponding to corrosion condition, (3) in the case of uniform corrosion, elephant-leg buckling mode appeared.

Key Word: corroded circular steel tube, compressive test, ultimate strength, finite element analysis,

キーワード: 腐食円形鋼管、圧縮試験、終局強度、有限要素解析

1. はじめに

現在、従来の仕様規定型設計法に代わり性能照査型設計法が広く定着しつつある。性能照査型設計法では維持管理性・環境性・安全性・使用性・施工性など様々な観点から、構造物の性能を正確に評価することが要求されている。一方、近年構造物の老朽化などによる様々な損傷事例が報告されており、維持管理が極めて重要な課題として認識されるようになった。この観点から、構造物の保有性能（本文では圧縮耐力）を正確かつ精度よく評価する必要がある。

鋼構造物の維持管理における主問題の1つである腐食に関しては、現状では腐食鋼材の保有強度評価法は確立されておらず、腐食損傷の評価について力学的根拠に基づいた判断はなされていないのが現状である。その要因として腐食表面のデータ採取が困難なこと、腐食表面の凹凸が力学的挙動に与える影響が未解明であること、また実験的資料及び研究例が少ない、などの理由から、既存のデータだけでは、残存強度を精度よく評価するには不十分であることが挙げられる。

筆者らは、19年間海洋環境において曝露された鋼管杭から切り

出した腐食鋼管供試体入手する機会を得た。本研究では、まず腐食鋼管に対して詳細な腐食表面形状及び板厚を測定した。つぎに圧縮試験を行うことにより鋼管の残存耐力を測定した。さらに腐食鋼管に対する弾塑性有限変位解析を行い、解析的に終局挙動と耐力を調べた。解析結果と実験結果を比較し、また既存の座屈強度評価式を用いて腐食鋼管の残存耐力を評価し、保有強度評価法確立のための基礎資料を提供する。

2. 腐食鋼管供試体と腐食表面計測

2.1 供試体の概要

圧縮試験に用いた供試体は、新日本製鐵光製鉄所構内の海洋環境において19年間曝露された鋼管杭（スパイラル鋼管、公称寸法：直径406.4mm×板厚9mm×全長約10m）から切り出し、鋼種はSTK50とSTK41の二種類（新規格ではSTK490とSTK400に対応する）である。鋼管を引き上げて、サンドブラストによる除錆処理を施した後、飛沫帯、干満帯および海中部に位置していたそれぞれの部位から供試体をガス切断により切り出

した。供試体の端面は、載荷実験で荷重を均等に載荷できるように、また両端面が平行および各面が平面となるよう機械仕上げした。なお、供試体の板厚は新日鐵において予備計測を行い、続いて京都大学において詳しい板厚計測および残存耐力解析するとともに、腐食鋼管から板状試験体を切り出し、その表面腐食形状を高精度に計測して、板状の引張試験片としてその断面性状と引張耐力、破断性状などと関連付け、性能評価のための板厚計測方法（計測間隔）について検討している¹⁾²⁾。

各供試体の採取位置、鋼種などを表-1に示す。

筆者らは文献2)において、各供試体の板厚を計測し、腐食の特徴についてすでに詳述しているので、ここでは、腐食状況の特徴を簡単にまとめて以下に述べる。

- 1) 腐食は、飛沫帯が最も大きく、次いで干満帯、海中部の順に小さくなる。
- 2) 鋼管外面では局部的に腐食が進行しており、腐食量、凹凸ともに激しいが、鋼管内面の腐食はわずかで凹凸も小さい。
- 3) 鋼管の設置位置にもよって、例えば東西と南北方向の面によって腐食量が異なる。これは波浪などの方向によると推察される。
- 4) 飛沫帯、干満帯、海中部ともに所々に直径 10~30mm 程度の深い凹み（孔食）があった。この種の孔食は、付着性生物によると推察されるが、河川などにおける真水中の腐食とは異なって、海中での腐食の特徴と考えられる。

2.2 材料特性

腐食鋼管から平滑仕上げした JIS12 号試験片 6 本作成し、引張試験により材料特性を求めた。

表-2 に STK50 鋼管及び STK41 鋼管の材料試験結果を示す。

2.3 腐食鋼管の腐食表面形状測定

既述のように筆者ら²⁾は、二つのレーザー変位計を対にし、その間に鋼管の板を挟むようにして、供試体の板厚を計測している。しかし、本方法では板厚は簡単に求められるが、腐食表面の凹凸形状や片面腐食にともなう偏心などの測定は難しい。本論文では、これらの問題に対して解決可能な計測法として、多関節式3次元座標測定器（スピナーーム）による表面計測もあわせて行った。スピナーームは、写真-1に示すように、3本の腕と3つの関節から構成されており、その先端に非接触式レーザー変位計を取り付けたものである。プローブによる測定原理は、レーザー光の反射によって表面の座標値を取得するもので、約5cmの幅でスキャニングでき、測点間隔はレーザーライン方向に約0.1mm間隔、データライン間隔は約0.5~1mmである。これを動かすことによって高密度で腐食面の座標を計測できる。本計測器は、任意に設定した3次元座標系に基づいて広範囲の腐食表面の座標値を直接計測でき、また、比較的手軽で携帯可能でもあるので、今回のような海中での計測は不可能であるが、現場での計測にある程度対応できる。なお、スピナーームにより測定した3次元座標値自体が有する誤差は±0.1mm以下であることを確認している⁴⁾。

表-1 供試体鋼管採取位置

鋼種	試験体	採取位置(mm)	
STK50	NO.1	飛沫帯	DL+2700~+3900
	NO.2	干満帯	DL +500~+1700
	NO.3	海中部	DL-1500~-2700
	NO.4		DL-3500~-4700
STK41	NO.5	飛沫帯	DL+2700~+3900
	NO.6	海中部	DL-3500~-4700

表-2 STK50 及び STK41（平滑材）材料試験結果

試験片	ヤング係数 (KN/mm ²)	ポアソン比	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
50A0-1	205.6	0.304	402.5	532.8**
50A0-2	220.2*	0.312	392.6	515.0
50A0-3	203.8	0.301	389.9	510.7
平均	204.7	0.303	395.0	519.5

*値が大きく外れているので平均値に含めない

**値は他の値と少し離れているが平均値に含める

試験片	ヤング係数 (KN/mm ²)	ポアソン比	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
41A0-1	207.4	0.300	379.3	493.7
41A0-2	208.3	0.305	389.5	501.7
41A0-3	205.7	0.295	382.4	492.3
平均	207.1	0.300	383.7	495.9



写真-1 表面形状測定状況

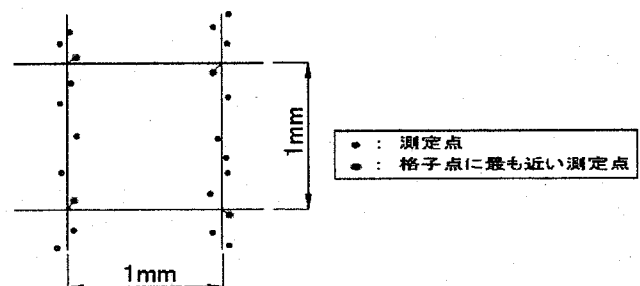


図-1 1mm間隔メッシュへの修正

さて、本計測器では、腐食表面の座標を密に計測できるが、測定された座標は所定のメッシュ点上の座標と異なっており、また平均板厚や標準偏差などの統計量を求めるためには、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データを用いて鋼管表面で 1mm 間隔のメッシュ点上の座標値を求めた。この時 1mm 間隔メッシュ点での座標値は、図-1 に示すようにその格子点に最も近い測定点の座標値とした。また、鋼管各点の残存板厚は鋼管裏面の座標データを差し引いて求めることとした。なお、上記の方法により求めた残存板厚は、最大で 0.3mm 程度の誤差であった³⁾。

このようにして得られた板厚の平均値などの諸量を、先に実施した板厚測定結果(京都大学の結果)と比較して表-3に示す。ここで、広島大学の計測では、平均板厚や平均腐食量の算出の際、スパイラル溶接部(シーム部)も測定結果に含めた。ただし公称板厚が9mmであるので板厚9mmを超えるものについてはその腐食量は0mmとした。京都大学の計測では公称板厚9mmから平均板厚を引くことで平均腐食量としている。

図-2～図-7には、各供試体の板厚の等高線およびそのヒストグラムを示す。

ここで板厚等高線図は鋼管を平面に展開した形で表現し、各断

面の断面積の変化もあわせて示している。これらの図表から、先の測定結果(京都大学の結果)とスピナーを用いた測定結果(広島大学の結果)と比較すると、残存板厚については、両者は約0.1mm～0.5mm程度の差があり、前者の測定結果の方が小さい。この差異の原因は、図-1に示すようなメッシュ点での板厚計算における誤差などが考えられるが十分には解明できなかった。また、板厚等高線をみると腐食形態は良く似ており、両測定における板厚の差は小さく、また、この程度の誤差の発生を防ぐことは難しいように思われる。

表-3 計測結果

鋼種	曝露環境	試験体	広島大学の結果							京都大学の結果			
			平均板厚 (mm)	平均腐食量 (mm)	標準偏差 (mm)	最小断面平均 板厚 (mm)	平均断面積 (mm ²)	最小断面積 (mm ²)	最小断面の 高さ位置 (mm)	平均板厚 (mm)	平均腐食量 (mm)	標準偏差 (mm)	最小断面平均 板厚 (mm)
STK50	飛沫帯	NO.1	5.48	3.60	2.41	3.96	6874	4429	155	5.28	3.72	1.84	3.72
	干満帯	NO.2	7.35	1.70	1.39	5.99	9101	7180	36	6.79	2.21	1.03	5.49
	海中部	NO.3	7.75	1.29	1.02	7.31	9538	9026	1139	7.63	1.37	0.50	7.33
	海中部	NO.4	7.99	1.06	0.94	7.86	9785	9569	68	7.76	1.24	0.53	7.45
STK41	飛沫帯	NO.5	5.11	3.91	1.69	3.59	6207	4017	455	4.78	4.22	1.68	3.12
	海中部	NO.6	7.89	1.15	0.83	7.75	9578	9097	797	7.73	1.27	0.43	7.49

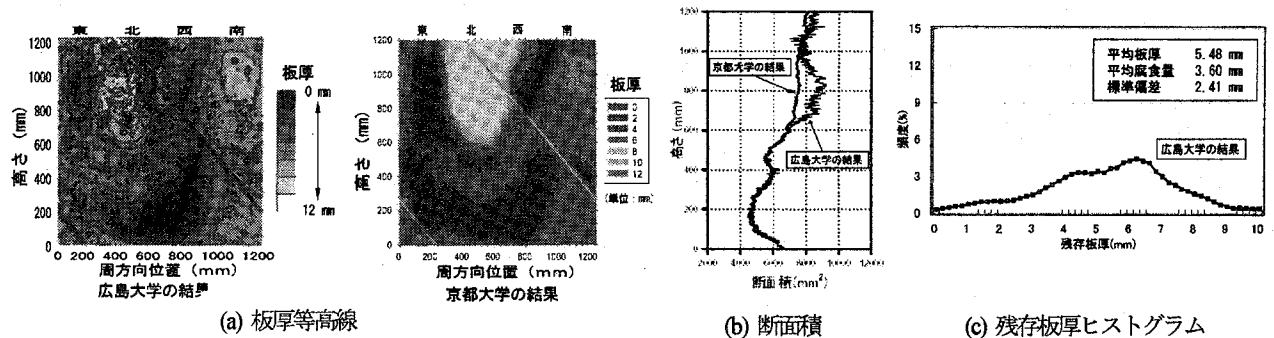


図-2 飛沫体NO.1

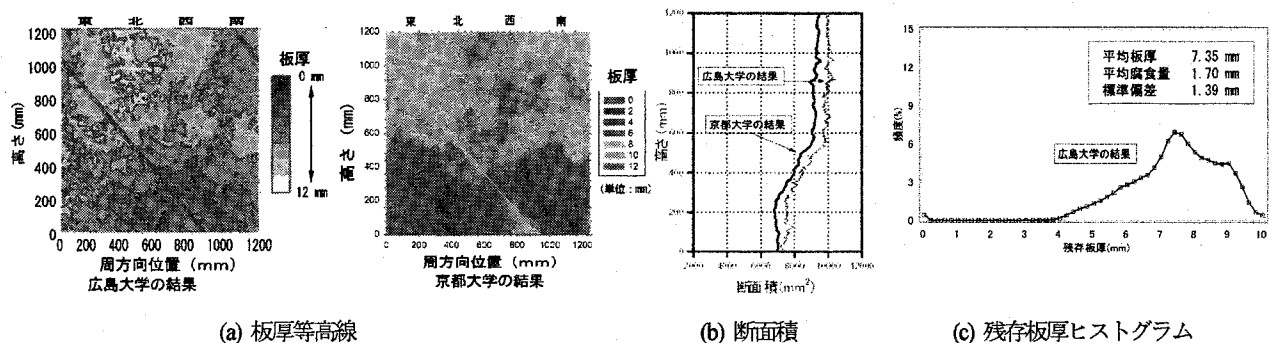


図-3 干満帯NO.2

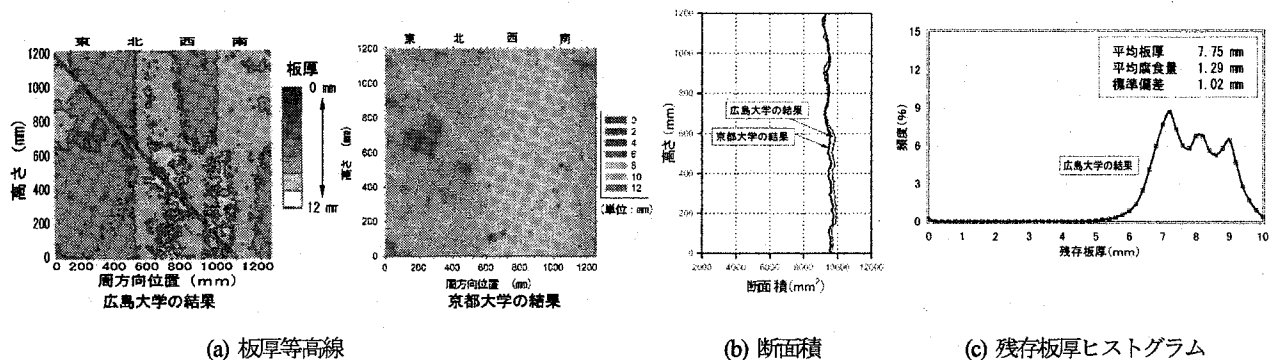
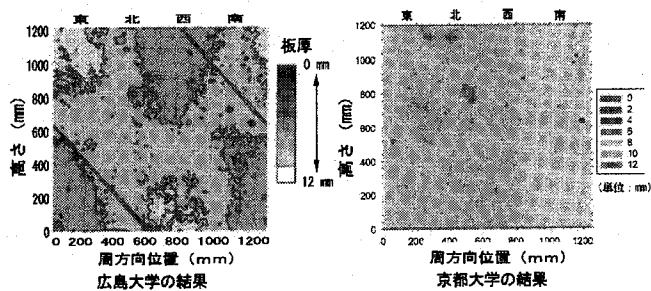
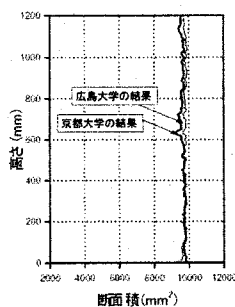


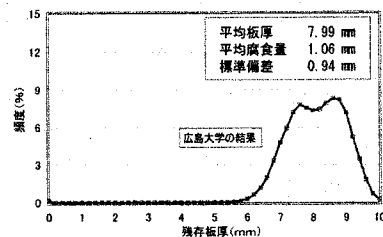
図-4 海中部NO.3



(a) 板厚等高線

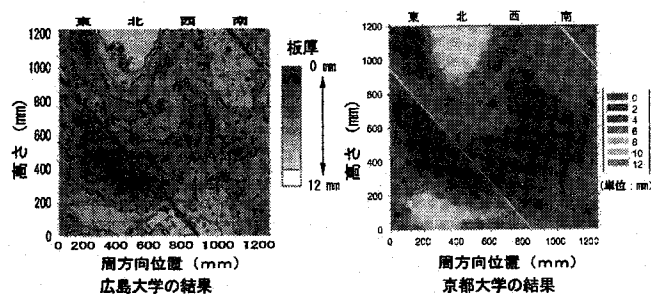


(b) 断面積

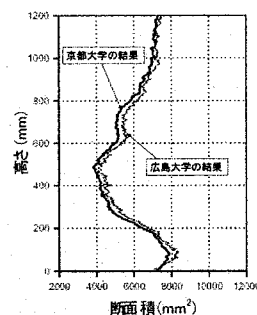


(c) 残存板厚ヒストグラム

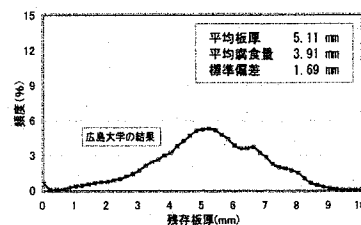
図-5 海中部NO.4



(a) 板厚等高線

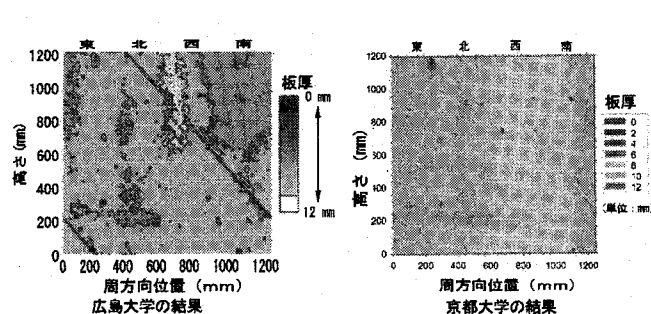


(b) 断面積

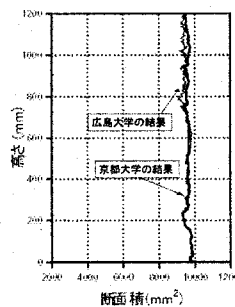


(c) 残存板厚ヒストグラム

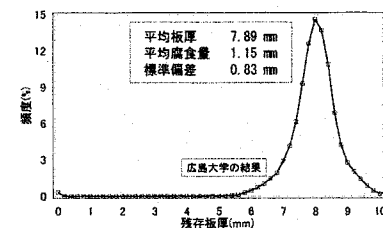
図-6 飛沫体NO.5



(a) 板厚等高線



(b) 断面積



(c) 残存板厚ヒストグラム

図-7 海中部NO.6

3. 腐食鋼管の圧縮載荷試験

3.1 載荷方法

広島大学所有の水平載荷型大型強度試験機を用いて、軸圧縮試験を行い、腐食鋼管の耐荷性状を調べた。

写真-2 に供試体の設置および載荷状況を示す。

載荷は荷重制御とした。鋼管端面に等分布圧縮力を作用させるために、端面の不整に対して写真-2 に示すようなジグを設置した。測定は①軸方向荷重、②縮み（軸方向変位）、③軸方向ひずみ、④周方向ひずみ、⑤面外たわみの5項目について行った。本試験機の載荷板はかなり大きいので、等変位圧縮状態（平押し状態）に近い境界条件となることを期待していたが、NO.1.5 供試

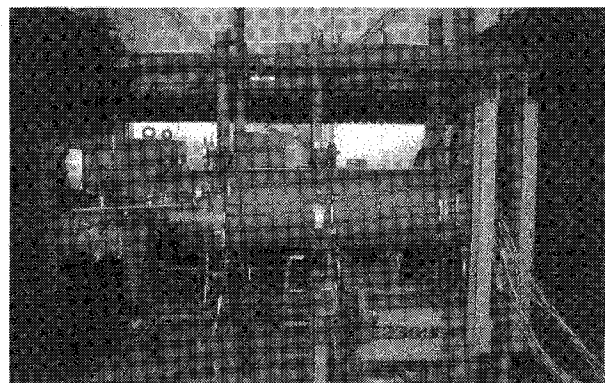


写真-2 載荷試験状況

表-4 圧縮試験結果

鋼種	暴露環境	試験体	平均板厚 (mm)	平均腐食量 (mm)	標準偏差 (mm)	平均断面積 (mm ²)	最小断面積 (mm ²)	最小断面平均 板厚 (mm)	最小断面の高 さ位置 (mm)	最大荷重 (kN)	公称寸法で 無次元化	最小断面で 無次元化	最大荷重時の縮み量 (mm)
STK50	飛沫帯	NO.1	5.48	3.60	2.41	6874	4429	3.96	155	868	0.20	0.50	3.18
		NO.2	7.35	1.70	1.39	9101	7180	5.99	36	2489	0.56	0.88	4.62
	海中部	NO.3	7.75	1.29	1.02	9538	9026	7.31	1139	3680	0.83	1.03	6.44
		NO.4	7.99	1.06	0.94	9785	9569	7.86	68	3829	0.86	1.01	8.53
STK41	飛沫帯	NO.5	5.11	3.91	1.69	6207	4017	3.59	455	883	0.20	0.57	3.04
	海中部	NO.6	7.89	1.15	0.83	9578	9097	7.75	797	3790	0.88	1.09	8.39

体は、座屈の発生後局所的な面外変位の増加につれて、載荷板が傾き、端部で回転変位が生じた。後述するが、これにともなうシミュレーション解析結果と実験結果の差となって現れたようである。なお、これ以外の供試体では、平押し境界条件に近い状態となった。

3.2 実験結果及び考察

図-8 にそれぞれの供試体鋼管 NO.1 から NO.6 までの荷重縮み曲線を示し、表-4 に圧縮試験結果を示す。

鋼管 NO.3、NO.4、NO.6 (海中部) については、腐食損傷が軽微であるため残存耐力は高く、約 3,500kN から 4,000kN の間となっている。次いで鋼管 NO.2 (干満帯) で約 2,500kN、残存耐力が最小の鋼管は、腐食が最も激しい NO.1 及び NO.5 (飛沫帯) という結果になった。

表-4 より、残存板厚が大きい (腐食量が小さい) 順に残存耐力が大きくなっていることがわかる。また鋼管 NO.2 は鋼管 NO.3、NO.4、NO.6 に比べ残存耐力が低い。これは鋼管の下部に局部腐食があり、その板厚が薄い最小断面付近で崩壊したことによる。図-8 に示すように、鋼管 NO.1 以外は、最大荷重後変位の増加につれて荷重が低下するという、典型的な腐食のない円形鋼管の挙動と同様の結果が得られているが、NO.1 は、まず腐食の激しい部分が先に座屈して荷重低下を起こした後、先の最高荷重付近まで再び荷重が増加しているのがわかる。これは、一つの座屈モードが大きく進展することにより再び荷重が増加して次の座屈モードが現れたと考えられる。しかしその後はゆるやかに荷重低下を伴って変位が増加している。すべての鋼管の座屈発生位置は、概ね鋼管の断面積が最小となる位置で発生し、とくに断面積の変化の激しい局部腐食した鋼管 NO.1、NO.5 では、この現象が明確であった。

4. 腐食円形鋼管の圧縮強度解析

4.1 解析モデルと解析条件

第2章で示した腐食表面形状計測結果、及び材料特性試験結果を考慮して、汎用構造解析コード ABAQUS を用いて腐食鋼管の圧縮耐力解析を行った。

耐力解析での解析モデルは、要素数 23,550 要素 (は、周方向 157 分割×長手方向 150 分割) で、1 要素の大きさは約 8mm×8mm である。なお解析には残留応力は考慮していない。使用した要素は、要素内で板厚変化を考慮できる 4 節点アイソパラメトリックシェル要素である。

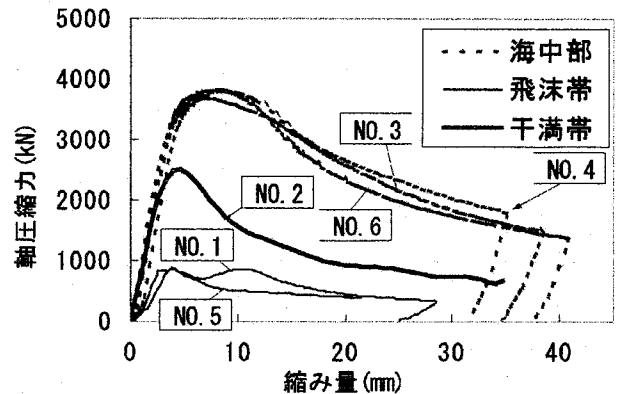


図-8 荷重-変位関係

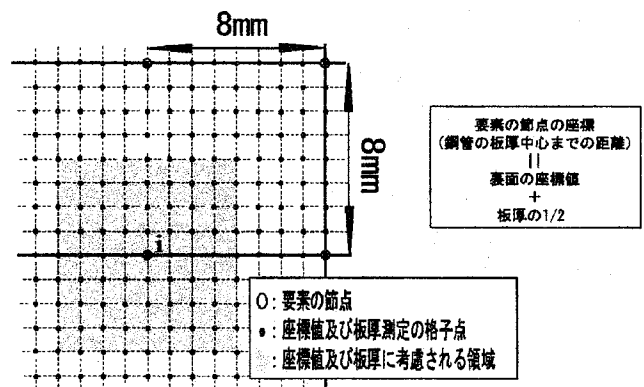


図-9 要素の節点と座標値及び板厚の格子点モデル

応力-ひずみ関係は材料試験結果の平均をとって公称応力-公称ひずみ曲線とした。最後の勾配を直線的にのばし、引張強度に達したところを終点とし、これを真応力-真ひずみに換算して解析に用いた。非弾性挙動に関しては、ミーゼスの降伏条件及び平方硬化則を採用した。

境界条件は実験での境界条件と対応させて端面が回転しない平押しモデルとした。

また、平押し鋼管の公称寸法は、直径 406.4mm、長さ 1,200mm、板厚 9mm である。解析では腐食していない鋼管 (以下、腐食前モデルという) の耐力もあわせて求めた。腐食前の鋼管モデルでは、鋼管の中央で板厚の 20% の最大値を持つ樽形の初期たわみを与えた。

ところで、耐力解析における腐食の影響は次のように考慮した。すでに述べたように、腐食表面の座標値は 1mm 間隔の格子点で求められているので、耐力解析における要素の節点 i の座標および板厚は、図-9 に示すように、節点 i の周りの影付き領域に含まれる腐食表面座標格子点の、それぞれ中央面 (鋼管の表面座標と裏面座標の平均) の平均値および板厚 (鋼管表面座標

から鋼管裏面座標を引いたもの)の平均値として与えた。

4.2 解析結果

図—10 および表—5 に、実験結果と解析結果を示す。また、図—11~16 には、載荷終了後の変形図および荷重-変位曲線を、実験結果と解析結果を比較して示す。これらの図で、a)は、実験終了後の供試体鋼管の外観写真と解析から得た変形図(各鋼管について特徴的な方角について)を比較したものであるが、図には、供試体の断面積の分布もあわせて示している。また、図のb)は、荷重-変位曲線であるが、これらの図には、腐食前モデルの解析結果もあわせて示す。

図—11 a)から、飛沫帯の鋼管 NO.1 では、実験結果と解析結果から得られた変形図はよく類似していることがわかる。また、実験、解析ともに断面積が最小となる位置で座屈していることが確認できる。図—11 b)から、実験結果の残存耐力は、解析結果よりも 600kN 程度低い。これは解析では、平押しモデルとしたため、鋼管が変形しても端面が回転しないと仮定しているのに対して、実験では腐食の著しい部分が座屈して試験機の載荷板が回転したために、両者の境界条件が終局付近で異なったことためと考えられる。

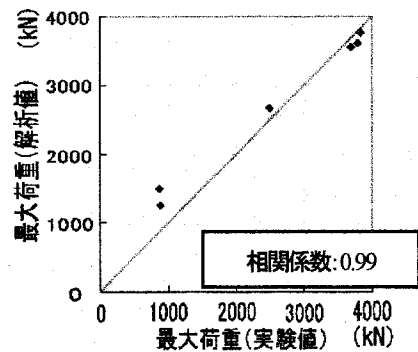
干満帯である鋼管 NO.2 では、図—12 a)に示すように、板厚の薄い鋼管の下部で、ダイヤモンド形の座屈形態がみられ、解析結果においても西下部で類似した結果が得られた。図—12 b)から、荷重-変位曲線から実験結果と解析結果の耐力は、ほぼ同じであるのがわかる。前章でも述べたが鋼管 NO.2 は、NO.3 や NO.4 と比較すると残存耐力が低い。これは、鋼管 NO.2 の下部で局部的に腐食が著しいことに起因する。このように局部的に弱い部分が存在する場合には、鋼管の耐力はこの部分に大きく影響されると判断できる。

海中部である鋼管 NO.3 について残存耐力は、図—13 b)に示すように、解析結果の耐力とほぼ一致した。図—13 a) に示すように、変形図をみると NO.3 では軸方向の断面積がほぼ一様であるため、象脚形の座屈形態になったと考えられるが、このような場合は座屈発生位置を特定するのは難しく NO.3 では上部で発生した。

海中部の鋼管 NO.4 についても残存耐力は解析とほぼ一致し、降伏後の荷重変位曲線についても解析とも一致しているのがわかる。鋼管 NO.4 では、中央付近に直径約 30mm および 20mm の孔食があるが、これによる応力集中は、耐力や変形能にあまり影響しないと考えられる。

図—15 に示す飛沫帯の鋼管 NO.5 では、実験結果と解析結果は、最高荷重で 400kN 程度の差がみられた。本供試体も、NO.1 と同様に腐食が最も著しい部分で座屈しており、最高荷重の差は実験では曲げ変形にともなって載荷板が回転したためと考えられる。

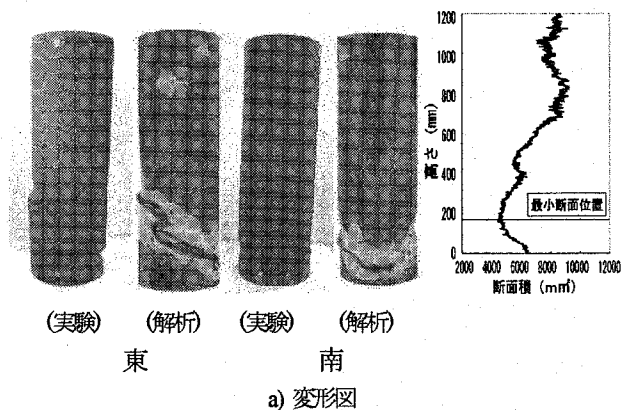
海中部である鋼管 NO.6 については、図—16 b)に示すように、耐力は解析結果とほぼ一致した。図—16 a)から、変形図をみると象脚形の座屈が認められるが、軸方向の断面積がほぼ一様であるため、NO.3 と同様に座屈発生位置は実験と解析とは異なっている。



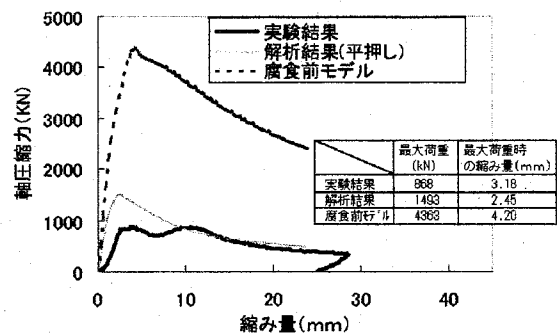
図—10 相関図

表—5 実験結果・解析結果比較

試験体	最大荷重 (kN)		公称寸法で無次元化		最大荷重時の変位 (mm)	
	実験値	解析結果	実験値	解析結果	実験値	解析結果
NO.1(飛沫帯)	868	1493	0.20	0.34	3.18	2.45
NO.2(干満帯)	2489	2670	0.56	0.60	4.62	2.66
NO.3(海中部)	3680	3551	0.83	0.80	6.44	3.90
NO.4(海中部)	3829	3756	0.86	0.85	8.53	4.73
NO.5(飛沫帯)	883	1251	0.20	0.29	3.04	2.46
NO.6(海中部)	3790	3602	0.88	0.84	8.39	3.90
腐食前モデル (STK50)	—	4363	—	0.98	—	4.20
腐食前モデル (STK41)	—	4218	—	0.98	—	4.20



a) 変形図



b) 荷重-変位曲線

図—11 飛沫帯 NO.1 供試体

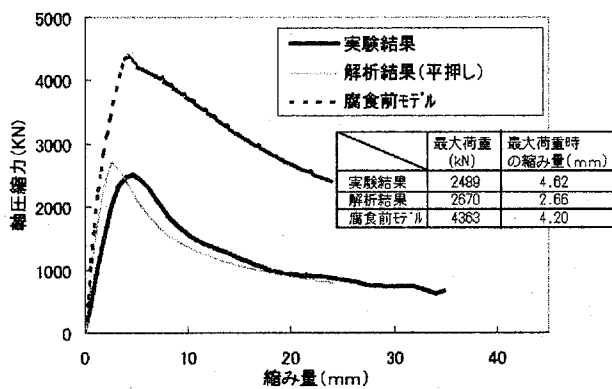
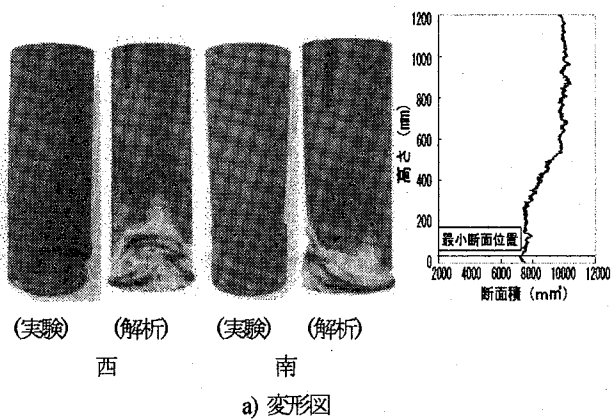


図-12 干満体NO.2 供試体

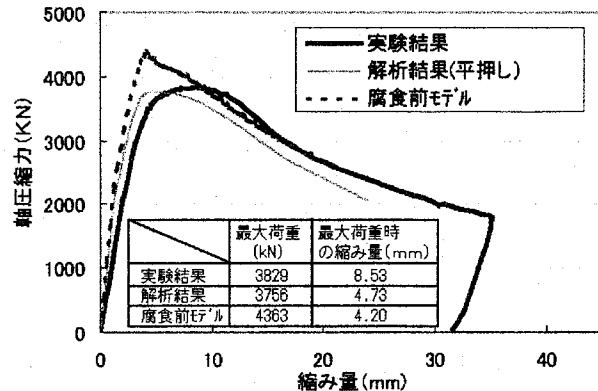
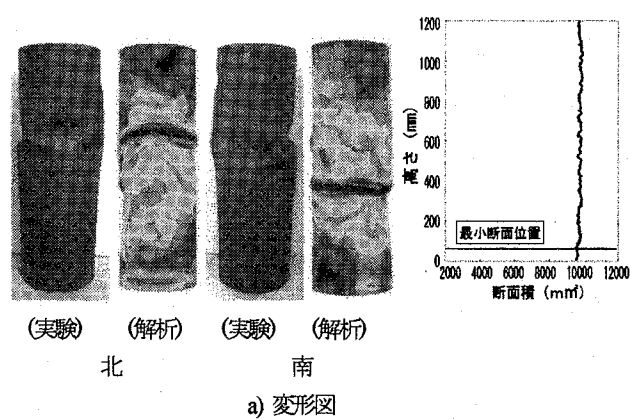


図-14 海中部NO.4 供試体

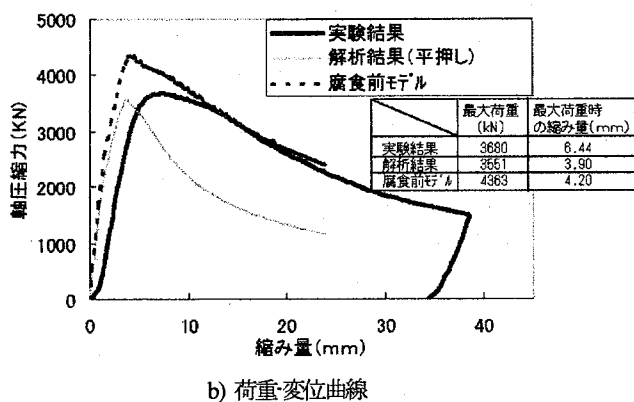
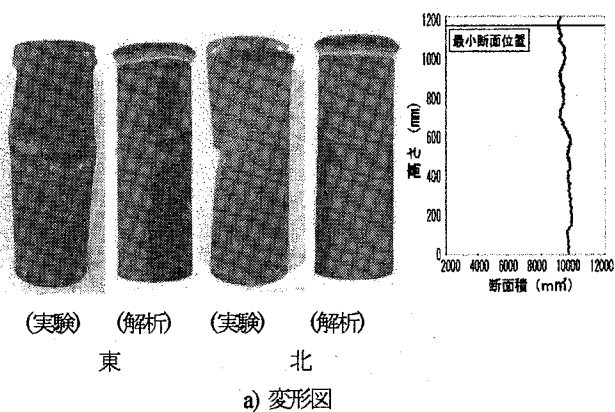


図-13 海中部NO.3 供試体

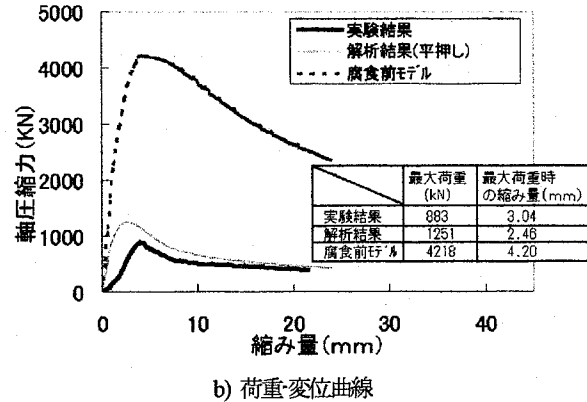
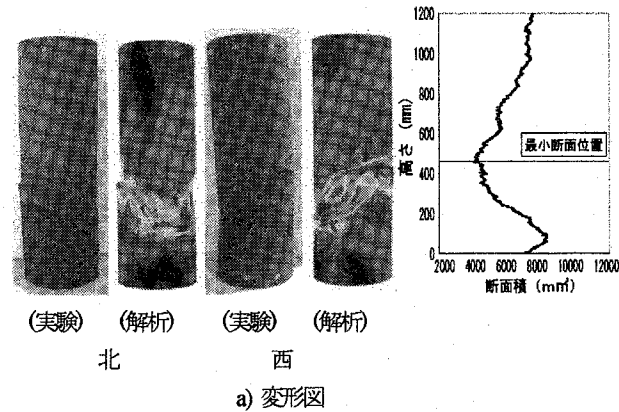


図-15 飛沫体NO.5 供試体

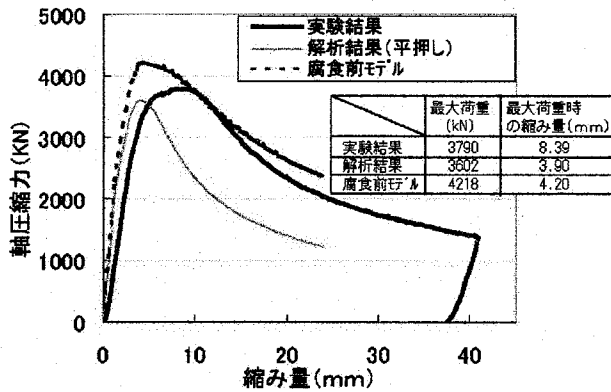
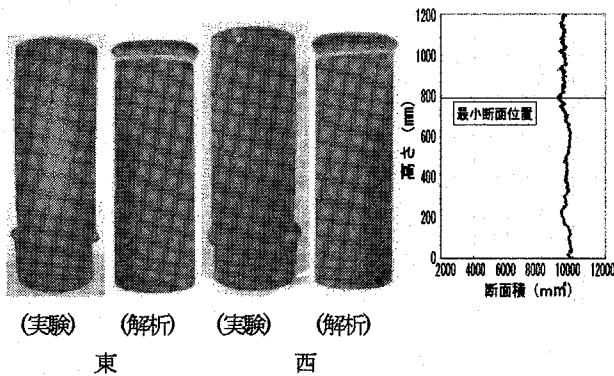


図-16 海中部 NO.6 供試体

5. 腐食円形鋼管の圧縮強度評価

5.1 強度評価に用いる統計量及び提案式

腐食円形鋼管の圧縮強度を推定する場合、測定された腐食表面形状やそれに基づく板厚などの統計指標を用いて簡易に評価できれば大変便利である。そこで、ここではいくつかの腐食を考慮した統計指標を腐食の無い鋼管の圧縮強度評価式に適用することによって、腐食した円形鋼管について圧縮強度の簡易評価式の提案を試みる。

腐食鋼管の強度評価にあたり、本研究では、腐食の無い座屈強度式で使用可能な統計指標としては、以下のような指標を考えることとした。

- (1) 供試体全体の平均板厚 t_{ave} およびその標準偏差 s
- (2) 供試体の最小断面における断面積から求めた平均板厚 t_{ave}^* およびその標準偏差 s^*
- (3) 鋼管の最小断面を中心として軸方向に $3\sqrt{Rt_{ave}^*}$ の長さの領域の平均板厚 t_{ave}^{**} およびこの区間の板厚の標準偏差 s^{**}

ここで、(2)および(3)については、実験では最小断面付近で座屈したこと、また、円筒シェルにおける象脚形の座屈変形の長さは約

表-6 各供試体の平均板厚と標準偏差

試験体	最大荷重 (kN) 実験値 P_u	解析値	t_{ave} (mm)	S (mm)	t_{ave}^* (mm)	S^* (mm)	t_{ave}^{**} (mm)	S^{**} (mm)
NO.1	868	1493	5.48	2.41	3.96	2.82	4.06	2.28
NO.2	2489	2670	7.35	1.39	5.99	1.84	6.01	1.21
NO.3	3680	3551	7.75	1.02	7.31	1.93	7.41	1.08
NO.4	3829	3756	7.99	0.94	7.86	2.32	7.90	1.17
NO.5	883	1251	5.11	1.69	3.59	2.49	3.61	1.86
NO.6	3790	3602	7.89	0.83	7.75	1.98	7.77	0.61

表-7 座屈強度提案式(Plantema の式)

Plantema (1946)		α : 無次元化局部座屈パラメータ
		$\alpha = (E/\sigma_y) / (2R/t)$
		E: ヤング率 σ_y : 降伏応力
		t: 板厚 R: 鋼管の板厚中心までの半径
σ_u/σ_y	1.0	$\alpha \geq 8$ に対して
	$0.75 + 0.031\alpha$	$2.5 \leq \alpha < 8$ に対して
	0.33α	$\alpha < 2.5$ に対して
		$R_t = (2R/t) * (\sigma_y/E) * \sqrt{3 * (1-\nu)}$
		ν が 0.3 の時 R_t は $R_t = 1.65 * (\sigma_y/E) * (2R/t)$

$3\sqrt{Rt}$ の区間 (ここに、 R は半径、 t は板厚) で発生するとされていること⁹⁷⁾、が理由である。

表-6 に各平均板厚と標準偏差をまとめて示す。

さて、軸圧縮力を受ける腐食の無い鋼管の座屈強度評価式として Plantema の式を用いる。この式は、現在の道路橋示方書にも採用されており⁹⁸⁾、製造管における圧縮座屈強度と降伏応力の比は、表-7 のように与えられる。

表-7 で、座屈強度曲線の横軸は径厚比パラメータ

$$R_t = 1.65 * (2R/t_R) * (\sigma_y/E) \quad (1)$$

で、 R は鋼管の半径、 t_R は径厚比パラメータを求めるための代表

板厚、 σ_y および E はそれぞれ降伏応力、弾性係数である。縦軸

は圧縮強度比 σ_u/σ_y で、

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{P_u}{A\sigma_y} = \frac{P_u}{2\pi R t_R} * \frac{1}{\sigma_y} \quad (2)$$

と表される。ここに P_u は圧縮強度、 A は断面積である。

5.2 圧縮強度評価

径厚比パラメータ式(1)および圧縮強度式(2)において、代表板厚 t_R に種々の統計指標を適用して実験結果を示せば、図-17-19 のようになる。これらの図には、表-7 に示す Plantema の座屈強度曲線もあわせて示している。

図-17 は、代表板厚 t_R を供試体全体の平均板厚 t_{ave} およびその標準偏差 s を用いて表した場合であり、図-18 は、最小断面の平均板厚 t_{ave}^* とその標準偏差 s^* を用いて t_R とした場合、そして、

図-19は、 $3\sqrt{Rt_{ave}^*}$ の区間の平均板厚 t_{ave}^{**} とその標準偏差 s^{**} によって代表板厚 t_R を表した場合である。

図-17 に示すように、供試体全体の統計指標を用いた場合は、ばらつきが大きく Plantema の式との相関が良くない。一方、図-18 あるいは図-19 に示すように、 t_{ave}^* 、 s^* や t_{ave}^{**} 、 s^{**} を用いた場合には、Plantema の式に近くなり、図-20、図-21 に示すように、代表板厚を $t_R = t_{ave}^* - 0.6s^*$ とした場合の相関係数は 0.91、

$t_R = t_{ave}^{**} - 0.8s^{**}$ の場合では 0.93 と、両者とも良い相関が得

られていることがわかる。両者を比べると、 $3\sqrt{Rt_{ave}^*}$ の区間の

平均板厚 t_{ave}^{**} とその標準偏差 s^{**} を用いて代表板厚

$t_R = t_{ave}^{**} - 0.8s^{**}$ とした場合の方が、若干評価精度が良いのがわかる。

以上から、 t_{ave}^* 、 s^* や t_{ave}^{**} 、 s^{**} を用いることにより、腐食した円形鋼管の圧縮強度を評価・推定できることを示した。腐食した円形鋼管の残存強度を推定するには、まず最も腐食の激しい断面を探し、その断面上の板厚を測定して平均板厚と標準偏差を求め、図-18 から残存強度を求めるのが、現在の計測機による板厚測定という作業性の面からは有利と考えられる。しかし、測定作業が容易に行える場合には、座屈長 $3\sqrt{Rt_{ave}^*}$ の領域の平均板厚と標準偏差を用いて、図-19 から残存強度を求める方がより高い精度が期待できよう。

6. まとめ

海洋環境下で腐食した円形鋼管の腐食表面形状測定を行ってその特徴を調べるとともに、圧縮強度実験を行って、腐食の影響という観点から終局挙動と耐力力について調べた。さらに、測定された腐食状態を示す統計指標を用いて、腐食の無い座屈強度曲線から残存強度を推定・評価する方法を提案した。本研究で得られた成果をまとめれば以下になる。

- (1) 腐食損傷は飛沫帯で最も激しく、次いで干満帯、海中部の順である。残存耐力は最も健全な海中部でもっとも高く、ついで干満帯、最も腐食損傷が激しい飛沫帯で残存耐力は最も低くなった。また、局所的に腐食損傷が激しい場合は、その残存耐力は大きく低下することがわかった。
- (2) 腐食表面計測結果を反映させて有限要素法により弾塑性有限変位解析を行えば、残存耐力や破壊性状をかなり正確に推定できることを示した。

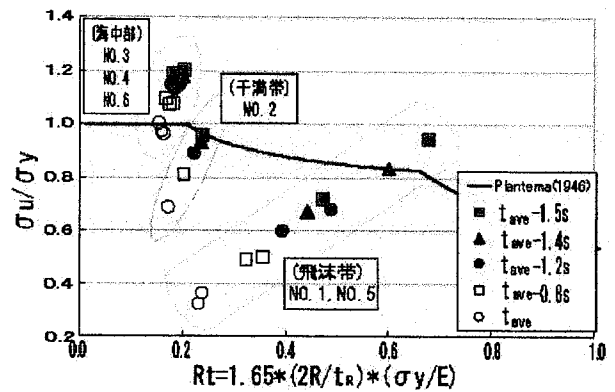


図-17 t_{ave} 、 s を用いた代表板厚 t_R の場合

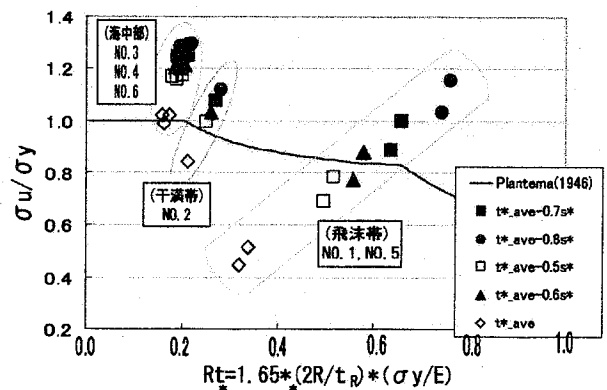


図-18 t_{ave}^* 、 s^* を用いた代表板厚 t_R の場合

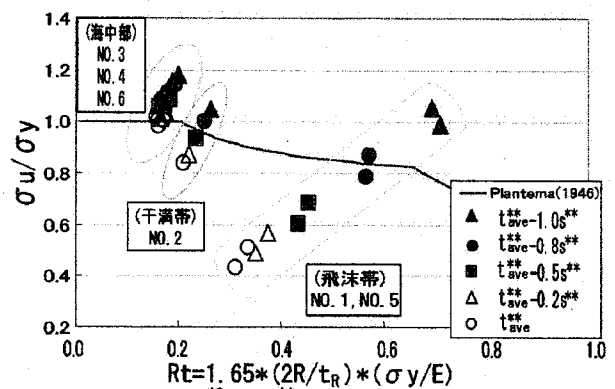


図-19 t_{ave}^{**} 、 s^{**} を用いた代表板厚 t_R の場合

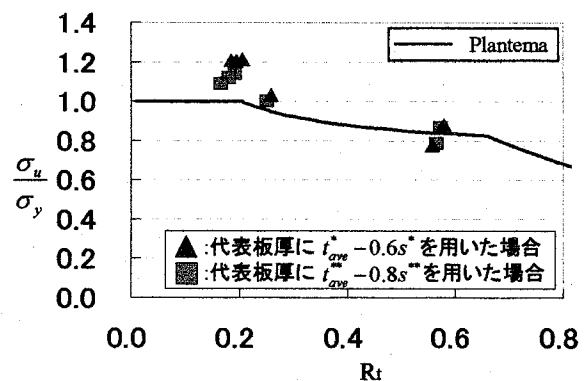


図-20 代表板厚 t_R に $t_{ave}^* - 0.6s^*$ 、 $t_{ave}^{**} - 0.8s^{**}$ を用いた場合

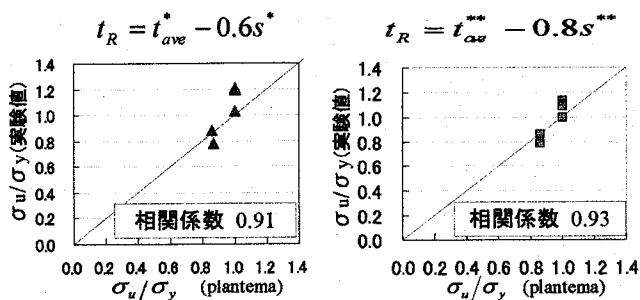


図-21 相関係数

- (3) 実用性を考えた場合、腐食鋼管の圧縮強度評価は代表板厚を $t_{ave}^* - 0.6s^*$ として用いることにより、腐食の無い鋼管の座屈強度曲線 (Plantema の提案式) を用いて簡易に評価できる。また、円筒シェルの象脚形の座屈変形長さ $3\sqrt{Rt_{ave}^*}$ を考慮した代表板厚 $t_{ave}^{**} - 0.8s^{**}$ を用いれば、より高い精度で評価でき、説明力も高いと考えられる。

なお、今回の実験だけでは、供試体数として必ずしも十分でないのは明らかである。今後、より多くの実験データを蓄積して評価式の精度を高める必要がある。

謝辞

本研究は、(社)日本鉄鋼連盟の委託を受け、土木学会構造工学委員会 沿岸環境における鋼・複合構造物の防食及び耐久性性能評価に関する研究小委員会(委員長：渡邊英一教授)活動の一部として実施されたものである。供試体の提供、作成等については、(社)日本鉄鋼連盟の関係各位の多大な御協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田村功, 渡邊英一, 杉浦邦征, 永田和寿, 山本正弘: 腐食損傷を有する海洋鋼構造物の耐荷力とライフサイクルコストに関する一検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 I 部 No.58, pp. 957-958, 2003.
- 2) 田村功, 渡邊英一, 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, 構造工学論文集, Vol. 51A, 2005.3.
- 3) 杉浦邦征, 田村功, 渡邊英一, 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, 構造工学論文集, Vol. 52A, 2006.3.
- 4) 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, 2004.7.
- 5) 海田辰将, 藤井堅: 腐食フランジの残存圧縮強度に対する評価指標の提案, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部, Vol.57, pp. 549-550, 2002.
- 6) 松浦真一, 中村秀治, 小木曾誠太郎, 大坪秀臣: 高速増殖炉容器の耐震設計法に関する研究 (第 5 報: 座屈解析法の適用性評価), 日本機械学会論文集 Vol.61A 編 NO.585, 1995.5.
- 7) 鋼構造シリーズ 12: 座屈設計ガイドライン 改訂第二版, 土木学会, 2005.
- 8) 道路橋示方書・同解説, 日本道路協会, 1996.12.
- 9) Plantema, F.J.: Collapsing Stresses of Circular Cylinders and Round Tubes, Report S.280, Nat. Luchtvaartlaboratorium, Amsterdam, The Netherlands, 1946.

(2005 年 9 月 10 日 受付)