

## 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

Assessment on Surface Profile Measurement and Effective Thickness Evaluation for Mechanical Behavior of Corroded Steel Plates

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\*\*\*\*\*

Kunitomo Sugiura, Isao Tamura, Eiichi Watanabe, Yoshito Itoh, Katashi Fujii, Kuniei Nogami, Kazutoshi Nagata and Tomoki Oka

\* 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)

\*\* 工修 鹿島建設株式会社 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 仙台市太白区郡山 1-1-1)

\*\*\* 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 豊中市庄内栄町 2-21-1)

\*\*\*\* 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)

\*\*\*\*\* 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)

\*\*\*\*\* 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 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

\*\*\*\*\* 博士(工学) 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)

\*\*\*\*\* 工修 新日本製鐵株式会社 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

The necessity of assessing the durability of structures such as bridges, offshore structures, has arisen recently. It is obvious that the maintenance of infrastructures has become a key issue to assure the desired performance in operational condition and to prolong the life of structures. As for the life cycle performance of the steel structures in the marine atmosphere, in particular, the damage due to corrosion is important rather than that by fatigue. Investigated herein is the guideline for the thickness measurement of steel elements that are subjected to the corrosion exposure at the specific inspection. Firstly, the measurement of the surface profile of strips cut from corroded steel pipes is made. Secondly, the tensile test is carried out in order to assess the effective thickness in the critical section for the mechanical property evaluation. It is shown that the precise surface profile measurement such as at the interval of about 0.3 mm is necessary to evaluate the strength in tension.

*Key Words:* corroded steel pipe, tension test, surface profile measurement, effective thickness

キーワード: 腐食鋼管、引張試験、表面形状計測、有効板厚

## 1. はじめに

現在、高度経済成長期に建設された多くの構造物が老朽化し、様々な損傷事例が報告されるにつれ、構造物の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。特に、鋼構造に関しては、供用期間における劣化要因の一つに腐食が挙げられる。例えば、名取らは、鋼道路橋を対象として、腐食損傷事例を紹介するとともに点検に際しての留意事項や重要点検部位などを取りまとめている<sup>1)</sup>。このような腐食鋼構造物に関する既往の研究成果としては、腐食形態の解析ならびに腐食形態のモデル化<sup>2)~4)</sup>、腐食鋼板の有効板厚評価や腐食鋼部材の耐荷力評価<sup>5)~13)</sup>、腐食を考慮した構造変化にも対応できる構造解析手法の開発<sup>14)~16)</sup>などが挙げられる。

このように最近多くの研究が進められているにもかかわらず、実務においては、腐食損傷の評価の多くが、技術者の主観に依存しており、力学的な根拠に裏付けられた判断はなされていないと考えられる。その要因としては、腐食を生じさせる環境が多様であること、現地での腐食形状のデータ採取が困難であること、腐食によって生じる鋼板表面の凹凸形状

が力学的挙動に与える影響に関して未解明な点が多く存在することなどが挙げられる。したがって、既存の研究成果に加え、系統立てた多方面からの取り組みが必要とされる。例えば、著者らは、沿岸環境における鋼構造物の耐久性評価を目的として、約19年間厳しい海洋環境において曝露された鋼管から切り出した試験体に対してレーザー変位計を用いて表面形状ならびに板厚の計測を行い、実環境における鋼部材の腐食形状を把握するためデータを収集した。この計測結果によると、腐食損傷は飛沫帯でもっとも激しく、続いて干満帯、海中部の順であり、部位により腐食形状は大きく異なり、それぞれの部位において適切な防食法を採用する必要性を示した。また、計測結果を反映させた腐食鋼管モデルを作成し、数値シミュレーションにより腐食鋼部材の圧縮性能評価を行い、腐食鋼部材の評価には平均板厚を標準偏差で補正することが有効であることを示した<sup>12)</sup>。性能評価ガイドライン策定に向けて、引張性能評価、板厚計測の再現性などの検討は現在も継続中である。

以上のような過去の多くの検討は、撤去された腐食構造物

に対して(もしくは、促進腐食試験により模擬試験体を作成)、設備の整った実験室内で形状計測を行い、続いて性能評価を行ってきた。しかし、腐食鋼構造物の補修・補強、もしくは撤去・再構築を検討する上で、実環境におかれた腐食鋼構造物の耐荷力・変形能などの力学性状を評価する必要があり、その腐食形状をどの程度正確に現場計測し、限られた計測結果に基づき如何に構造モデルを構築するかについて検討した研究事例はない。既存の港湾鋼構造物の防食・補修マニュアルによれば、10cm×10cm パッチ内において5点の板厚計測により平均板厚を決定するといったガイドラインが存在するのみである<sup>17)</sup>。一方、米国においても、既設鋼橋における腐食損傷の構造性能に対する影響に関する研究は多く行われており、それらの成果は文献[18]に詳細に取りまとめられているが、性能評価のための断面計測、部材形状計測をどのように実施すべきかまでは踏み込んでいない。

そこで、本研究では、文献[12]で対象とした腐食鋼管から、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、破断性状などに関連付け、性能評価のための板厚計測方法(計測間隔)について検討する。

## 2. 腐食鋼板の形状計測および有効板厚評価

### 2.1 対象とした腐食鋼管

対象とした鋼材は、新日本製鐵光製鉄所内において約19年間曝露された裸鋼管杭であり、外径406.4mm、厚さ9mm、全長約10mである。鋼種はSKK50とSKK41の2種類(新しい規格ではSKK490とSKK400に準ずる)がそれぞれ1本ずつの計2本あり、これらはともにスパイラル鋼管である。鋼管の曝露状況を写真-1に示す。方角は南が海側、北が陸側である。この鋼管を引き上げて付着物を取り除いた後にサンドブラストにより素地処理を施した。

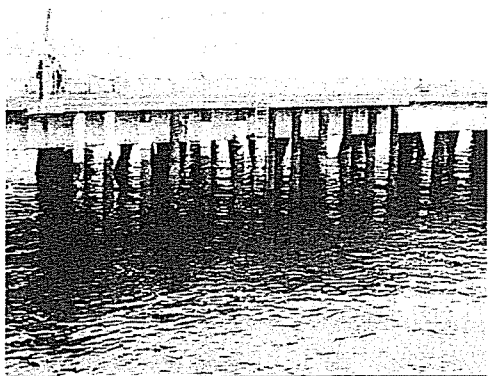


写真-1 鋼管杭曝露状況

新日鐵光製鉄所内において超音波厚さ計を用いた予備計測を行っているが、SKK50鋼管の鉛直板厚分布、断面板厚分布を一例に図-1に示す。鉛直板厚分布に関しては高さ方向に200mm間隔、各高さにおいて東西南北の4点を計測しており、その平均値を示している。断面板厚分布に関しては15°間隔で1断面につき24点、DL+3,600mm、DL+2,000mm、DL±0mm、

DL-1,000mm、DL-4,000mmの5断面を計測している(DL:水準面)。これらの計測結果より飛沫帯で腐食量が最大であり、腐食速度を腐食量曝露年数で定義すると、その平均腐食速度は約0.2mm/year程度であることがわかる。また、干満帯直下でも腐食量が大きくなっている。海中部では腐食速度が遅く、0.1mm/year以下である。海洋環境における腐食に見られる顕著な局部腐食は、さび層や付着生物などの存在で局部的に腐食が進行する飛沫帯、酸素濃淡電池により集中的に腐食が進行する干満帯直下の二箇所であり、採取した試験体においてもこのような傾向が顕著に見受けられた。断面内の板厚分布からは、海中部では方角によらず比較的一様に腐食が進展する傾向にあるのに対して、飛沫帯であるDL+3,600mm地点では東西で腐食が激しく、北側で腐食がほとんどない部分が存在するといったように、部位によって腐食速度は大きくばらついていることがわかる。なお、各部位での詳細な板厚分布については、文献[12]を参照していただきたい。

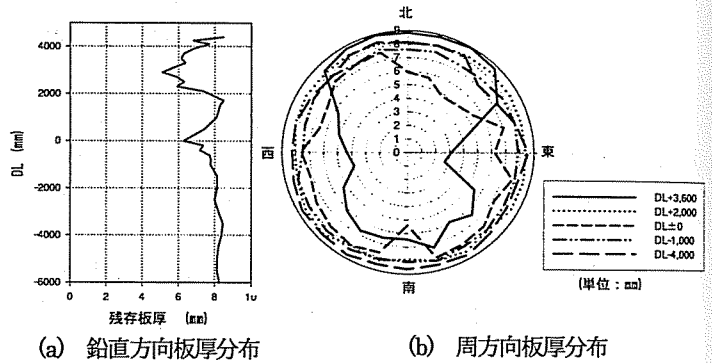


図-1 SKK50鋼管の概略計測結果<sup>12)</sup>

### 2.2 板状試験体の採取および表面形状計測

腐食試験片として板状試験体(引張試験片)を腐食鋼管から採取した。腐食試験片の採取位置を図-2に示す。SKK50鋼管からは上部のコンクリートに埋設されていた部分、飛沫帯、干満帯、海中部からそれぞれ3本ずつ、SKK41鋼管からはコンクリート中と海中部からそれぞれ3本ずつを腐食試験片として採取した。また、それぞれの鋼種の鋼管においてコンクリート中から別途採取した板状試験体に対しては、板表面を研磨して材料試験用の平滑試験片として3本ずつ用意した。すなわち、試験体は、平滑試験片6本、腐食試験片18本の合計24本である。なお、試験体名の数字は鋼種を、アルファベットはそれぞれ、A0は平滑試験片、Aはコンクリート中、Bは飛沫帯、Cは干満帯、Dは海中部から採取された腐食試験片を表している。ただし、図-2に示すように腐食鋼管からは、形状計測ならびに圧縮強度評価のために圧縮試験体(長さ:1200mm)も切り出している。SKK50鋼管から飛沫帯、干満帯それぞれ1本ずつと海中部2本、SKK41鋼管からは飛沫帯、海中部それぞれ1本ずつの計6本を切り出した(試験体No.1~6)。圧縮試験結果ならびに詳細なシミュレーション結果については、別途報告予定である<sup>19)</sup>。

引張試験片の表面腐食形状の計測は名古屋大学にて行った。

計測には、レーザーフォーカス深度計（スポット径：30 $\mu$ m $\phi$ 、分解能：0.1 $\mu$ m）を用いた。腐食試験片の寸法と板厚計測箇所の概要を図-3に示す。ここで、板厚計測は、軸方向150mm、幅30mmの区域を0.3mm間隔で行い、軸方向に約500点、幅方向に約100点で総計測点は約50000点である。なお、計測結果の補正は行っていない。

表-1 引張試験体の採取位置

鋼種	試験片	腐食環境	数量
SKK50	50A0	平滑試験片	3
	50A	コンクリート埋設部	3
	50B	飛沫帯	3
	50C	干満帯	3
	50D	海中部	3
SKK41	41A0	平滑試験片	3
	41A	コンクリート埋設部	3
	41D	海中部	3

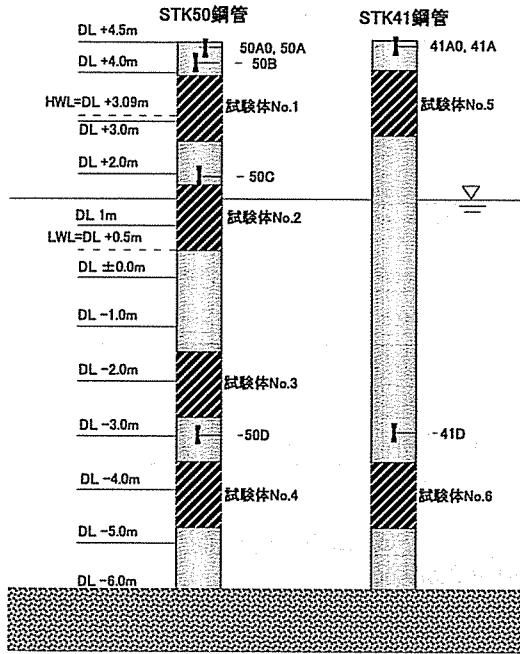


図-2 引張試験体および圧縮試験体の採取位置の概要

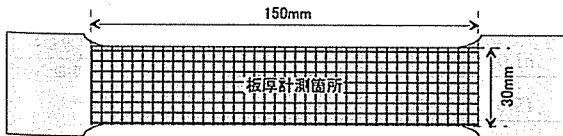


図-3 腐食試験片の寸法および板厚計測箇所

### 2.3 引張試験結果および考察

引張試験では、図-4に示すように平滑試験片には試験片中央の表裏に2軸の弾性ゲージ、端に塑性ゲージを斜め向か

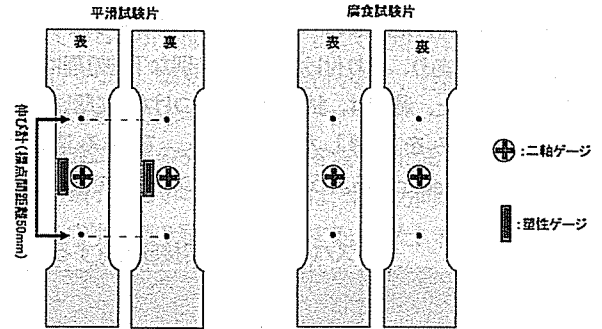
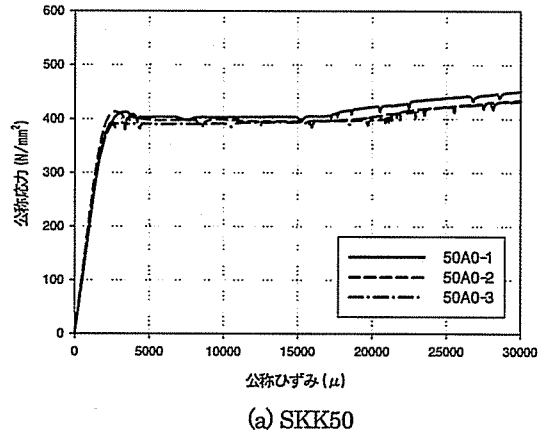
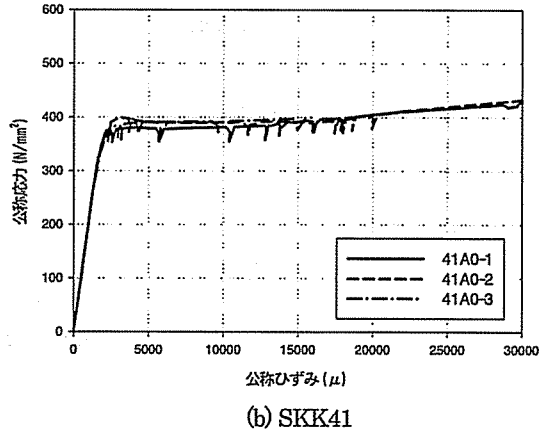


図-4 計測項目および計測位置の概要



(a) SKK50



(b) SKK41

図-5 平滑試験片の応力-ひずみ関係

表-2 鋼管の物性値

材質 (鋼種)	SKK50	SKK41
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	204.7	207.1
ポアソン比	0.303	0.300
降伏応力 (kN/mm <sup>2</sup> )	395.0	383.7
引張強度 (kN/mm <sup>2</sup> )	519.5	495.9
$E_{st}$ ( $\mu$ )	18800	15200
$E_{st}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	8.25	4.14
破断ひずみ (%)	35.8	35.0

注)3体の平均値を示す。ただし、異常値は除く。

いに貼り付けた。一方で、腐食試験片には中央の表裏に2軸ゲージを貼り付けた。なお、これらのひずみゲージのゲージ長は5mmであり、貼り付けに際して特別な下地処理は行っていない。また、載荷は、試験片に取りつけた伸び計で計測されたひずみを制御しながら行い、ひずみ速度が $10^{-4}$ (mm/mm/sec)となるように調整し、つかみ部で破断しない

よう十分なグリップ長を確保した。

応力-ひずみ関係を図-5、代表的な物性値を表-2にまとめて示す。降伏応力、引張強度はともにひずみ速度により変化することが知られている。応力-ひずみ関係の数箇所において応力が低下しているのは真の静的降伏応力を求めるためにひずみ速度をゼロとしたところである。平均約3~5%、

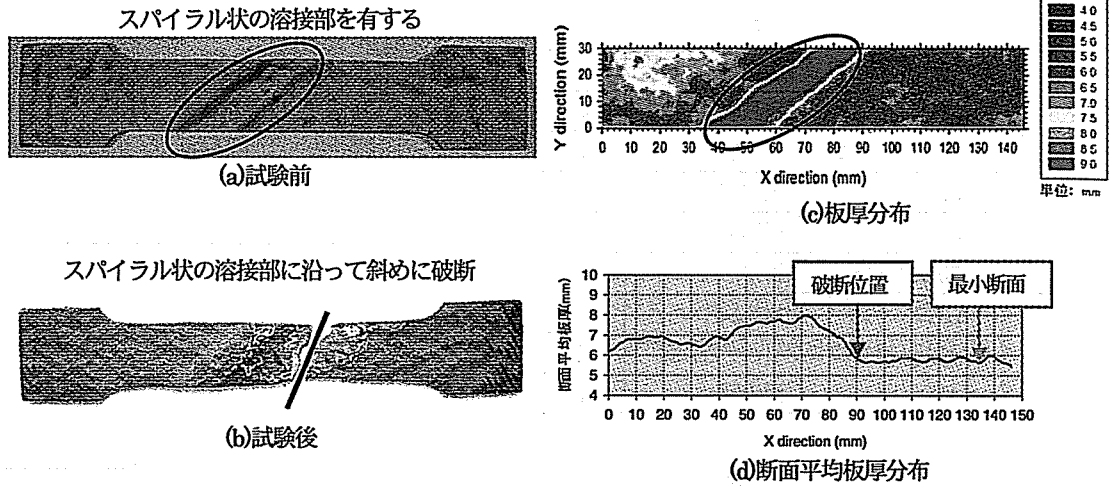


図-6 50B-2 (飛沫帯) の破断状況

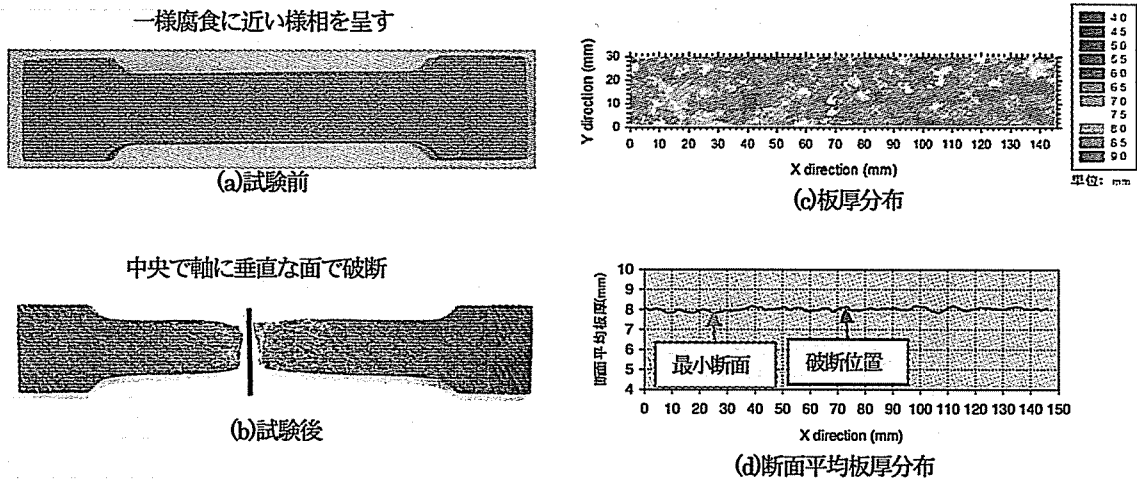


図-7 50B-3 (飛沫帯) の破断状況

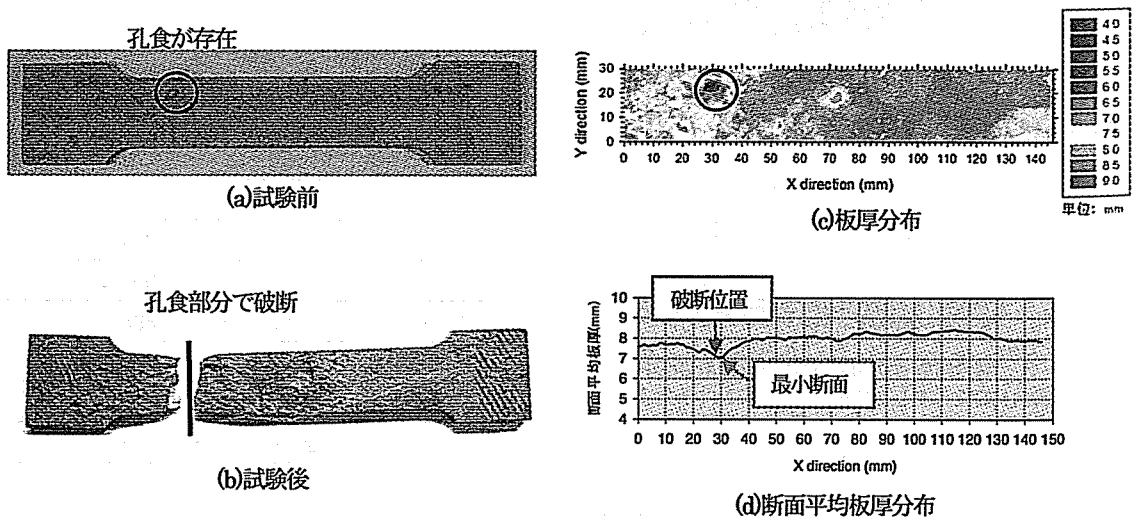


図-8 50C-2 (干満帯) の破断状況

最大で約7%の応力低下があり、静的降伏応力と動的降伏応力との差異は無視できない場合もあり、耐力評価に際してはいずれの降伏応力を用いるか注意しなければならない。ただし、表中の数値は、ひずみ速度が $10^{-4}$ mm/mm/secである時の値を記入している。

腐食試験片の中で特徴的な引張破断状況であったケースを図-6から図-8に示す。図-6に示すように50B-2は飛沫帯の腐食の激しい箇所から切り出した試験片で、中央にスパイラル状の溶接部を有しているが、この溶接部に沿って応力集中が発生したために板厚の薄い部分に沿うように斜めに破断している。このような傾向は、腐食損傷が著しい残存板厚の小さい鋼板に見られた。しかし、溶接部を有する他の試験体(50D-2、41A-1)では、溶接部が試験区間の端部に位置し、腐食はそれほど著しくないため、このような傾向は観察されなかった。次に、図-7に示すように50B-3は海中部の比較的一様腐食の様相を呈しているが、試験片の中央で部材軸に垂直に破断しており、平滑材に近い破断状況であるといえる。これは、腐食損傷が比較的小さく、鋼板の多くが残存し厚く、板厚変化の小さい一様腐食に近い場合に見られる傾向である。最後に、図-8に示すように50C-2は小さい孔食を有する試

験片であるが、孔食により断面積が減少している部位で破断している。引張部材においては、このように局所的な腐食が進行すると、弱点となる可能性が高く、性能評価においては重要な着目点と考えられる。

腐食試験片の引張試験結果を表-3にまとめて示す。ここで、最小断面平均板厚 $t_{\min}$ とは、板幅方向の計測点(約100点)の平均値の最小値と定義する。また、有効板厚 $t_e$ は、板幅 $B$ 、最大荷重 $P_u$ 、平滑試験片の引張強度 $\sigma_u$ を用いて以下のように算出した。

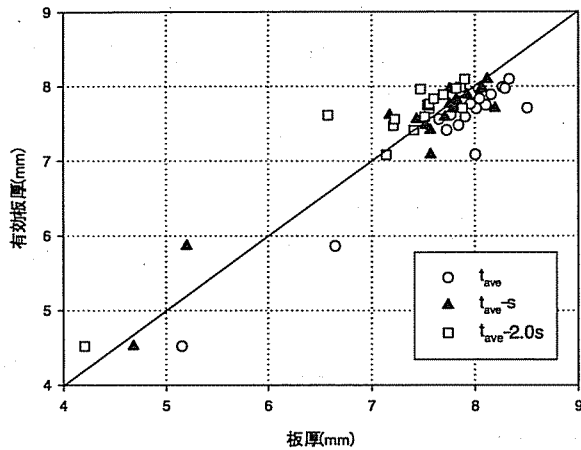
$$t_e = \frac{P_u}{B \cdot \sigma_u} \quad (1)$$

表中において記号(←)を記入した試験片は、最小断面付近で破断したケースであるが、腐食試験片18本中13本がこのケースに該当している。それ以外の場所で破断した試験片も破断面付近の断面の平均板厚は全体の最小断面平均板厚とほぼ等しいことがわかった。図-9(a)、9(b)にそれぞれ平均板厚、最小断面平均板厚を基にした有効板厚評価の結果を示す。図-9(a)より平均板厚を基本にするとばらつきが大きいことが分かる。また、標準偏差で平均板厚を補正しても、腐食形態

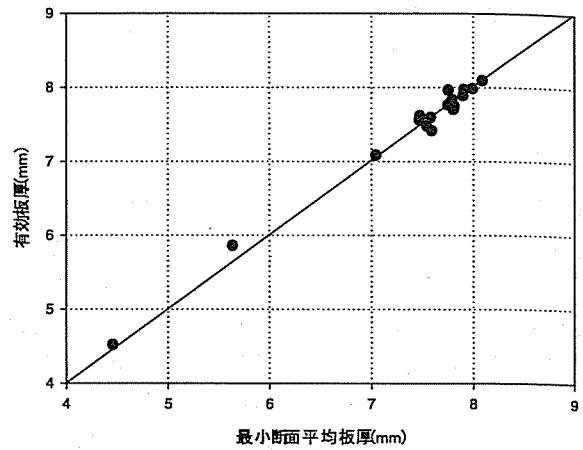
表-3 腐食試験体の引張試験結果

試験片	平均板厚 $t_{ave}$ (mm)	最大板厚 $t_{max}$ (mm)	最小板厚 $t_{min}$ (mm)	標準偏差 $s$ (mm)	最大荷重 $P_u$ (kN)	有効板厚 $t_e$ (mm)	最小断面平均板厚 $t_{\min}$ (mm)	破断面付近の最小断面平均板厚 (mm)	$P_u/A_{\min} \sigma_u$
50A-1	8.12	8.83	6.94	0.29	124.0	7.96	7.83	←	1.02
50A-2	7.86	8.80	6.57	0.33	116.4	7.48	7.54	←	0.99
50A-3	8.52	9.03	6.23	0.31	120.0	7.71	7.80	*	0.99
50B-1	5.15	6.12	3.01	0.48	70.4	4.52	4.46	←	1.01
50B-2	6.72	11.10	4.12	1.42	91.3	5.86	5.69	←	1.03
50B-3	8.01	8.58	6.97	0.23	119.9	7.70	7.80	7.90	0.99
50C-1	7.90	8.47	6.83	0.20	118.2	7.59	7.55	←	1.00
50C-2	7.99	8.66	5.04	0.43	110.3	7.08	7.04	←	1.01
50C-3	8.10	8.72	6.40	0.28	120.7	7.75	7.81	←	0.99
50D-1	8.18	8.72	4.76	0.20	124.4	7.98	7.91	←	1.01
50D-2	7.88	10.70	6.97	0.63	118.6	7.61	7.55	7.56	1.01
50D-3	7.65	8.27	5.58	0.16	115.4	7.41	7.52	7.54	0.98
41A-1	8.42	12.51	7.29	0.21	120.4	8.09	8.17	←	0.99
41A-2	8.08	8.65	6.12	0.23	117.3	7.89	7.82	←	1.01
41A-3	8.39	8.92	7.36	0.24	118.6	7.97	7.99	←	1.00
41D-1	7.96	8.52	6.74	0.20	115.5	7.76	7.75	←	1.00
41D-2	7.65	8.34	6.90	0.21	112.5	7.56	7.47	7.47	1.01
41D-3	8.04	8.55	7.17	0.23	116.5	7.83	7.78	←	1.01

B: 板幅(30mm)    板厚データは試験区域のみを使用    ←は最小断面付近で破断、\*はつかみ部で破断した試験片  
 $A_{\min}$ : 最小断面積     $t_e = P_u / \sigma_u B$  で算出     $\sigma_u$ : 平滑材の引張強度



(a) 平均板厚による評価



(b) 最小断面における平均板厚による評価

図-9 有効板厚の評価

が部位ごとに大きく異なる場合は、有効板厚評価のばらつきを小さくすることは難しいと考えられる。一方で、最小断面における平均板厚を用いた場合には有効板厚を精度良く評価できることが分かる。本研究で取り上げた応力分布は、引張試験片といった一般的な引張応力状態の特殊なケースであり、引張部材の応力伝達に貢献する断面積の算定が明確なためこのような結果が得られる。しかし、実構造物の応力分布性状は、組合せ断面力に対して、必ずしも部材断面積のみで評価できるものではなく、断面一次モーメント、断面二次モーメントなどにも関連するため、断面形状ならびに構造部位ごとに作用断面力と関連付け詳細な検討が必要である。

### 3. 表面形状計測の精度に関する考察

2.3節において、引張力を受ける腐食鋼材の有効板厚(有効断面積)は最小断面での平均板厚を用いると精度良く評価できることを示した。ここでは、有効板厚を精度良く推定するために必要な計測間隔、計測結果の信頼性、安全性についての検討を行う。

表-4に板厚データ抜き取り法を、図-10に計測間隔  $d$  を変化させたときの最小断面における平均板厚の変化を示す。最小断面平均板厚は、それぞれの計測間隔の格子上的板厚データを用いて算出している。図中の記号(□○△)は、各試験片の格子の取り方による最小断面平均板厚の取り得る範囲を示している。図-10より、計測間隔が大きくなるにつれて計測結果のばらつきは大きくなっていることが分かる。また、推定精度の指標として次のような誤差率  $E$ 、安全性の指標として危険率  $D$  を下記のように定義する。

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \frac{(t_e - t_m)^2}{t_e^2}} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

ここで、 $N$ : 試験片数、 $t_e$ : 有効板厚、 $t_m$ : 最小断面平均板厚である。

$$D = \frac{N_D}{N} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

表-4 板厚データ抜き取り法

計測間隔 (mm)	一断面あたりの板厚計測点数(個)	抜き取りパターン数
0.3mm	100	1
0.6mm	50	4
1.5mm	20	25
3.0mm	10	100
6.0mm	5	400
10.0mm	3	1089

ここで、 $N_D$ : 危険側の評価となる試験片数である。

図-11にそれぞれの計測間隔における誤差率と危険率を示す。計測間隔  $d$  が0.3mmのとき誤差率は1%程度と小さく非常に精度がよいが、 $d$  が大きくなるにつれて誤差率は大きくなり、推定精度が落ちることを表している。最小断面平均板厚で引張強度を推定すると有効板厚付近でばらつくので、ほぼ半数は危険側の評価(過大評価、図-11(b)の危険率の平均値が0.5)になるが、計測間隔が大きくなるにつれて危険率の取り得る範囲もばらつくことが分かる。

前述のように、引張部材の有効板厚を最小断面での平均板厚で評価すると任意の測定間隔により最小断面を過大評価する確率が0.5程度であり実用上には問題がある。そこで、危険率を低減する目的で板厚補正係数  $\alpha$  を用いて最小断面での平均板厚を低減し、設計有効板厚  $t'_e$  として考える。

$$t'_e = \alpha \cdot t_m \quad (4)$$

図-12に、係数  $\alpha$  をパラメータとして計測間隔  $d$  と誤差率  $E$ 、危険率  $D$  の関係を示す。ただし、それぞれの  $d$  における  $E$  や  $D$  は最大値のみをプロットしている。これらの図より、係数  $\alpha$  が小さくなると推定有効板厚が低減されて安全側に見積もられるために、誤差率  $E$  は大きくなり、危険率  $D$  は小さくなる。危険率が1/1000より小さくなる(今回は、すべての試

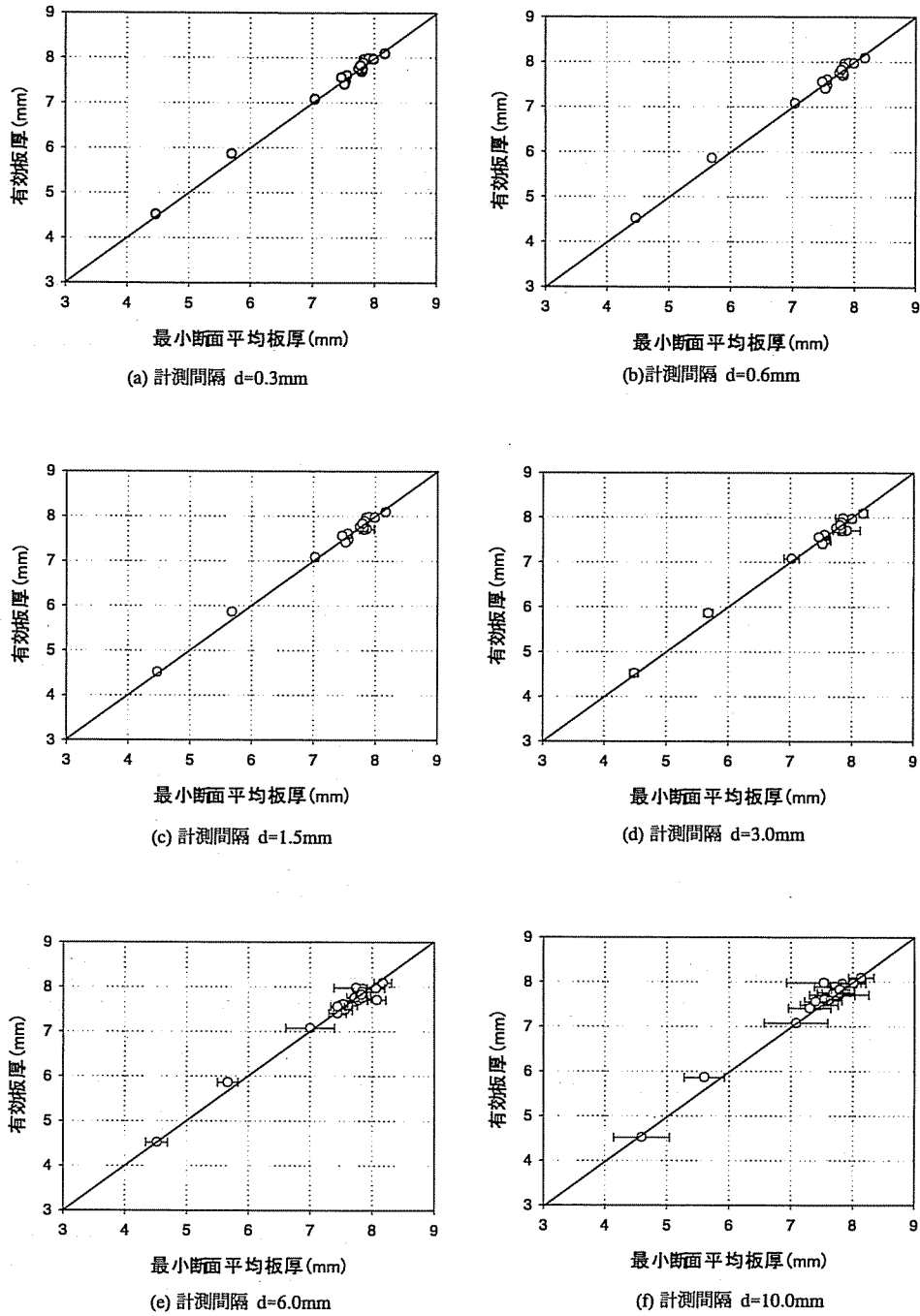


図-10 計測間隔と最小断面平均板厚の関係

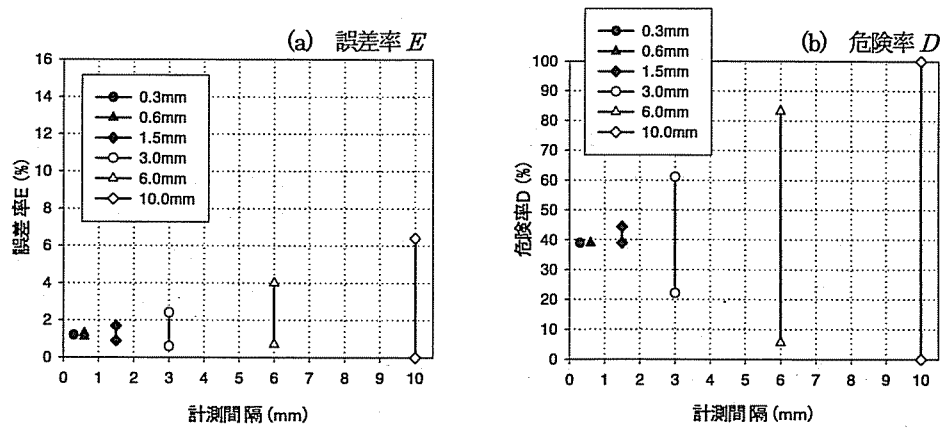


図-11 計測間隔と誤差率、危険率との関係

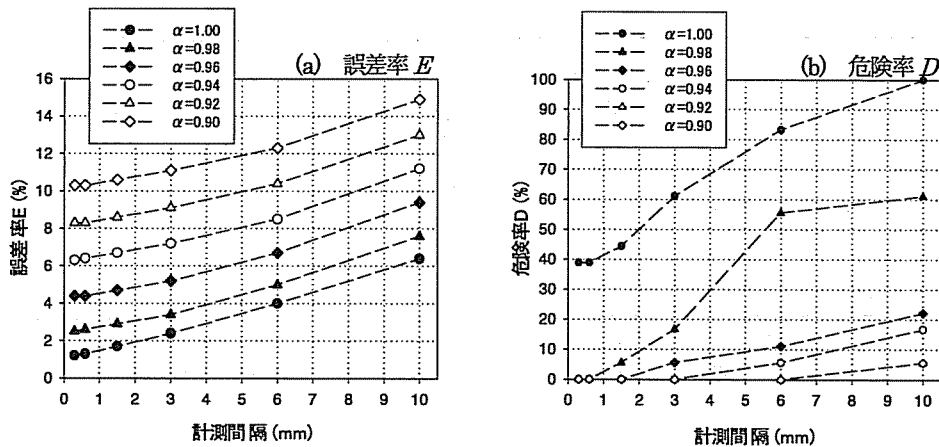


図-12 係数 $\alpha$ と誤差率、危険率との関係

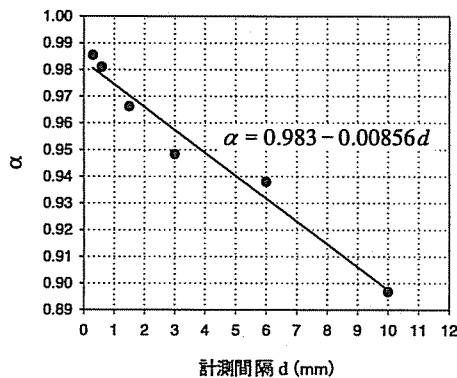


図-13 計測間隔と係数 $\alpha$ の関係

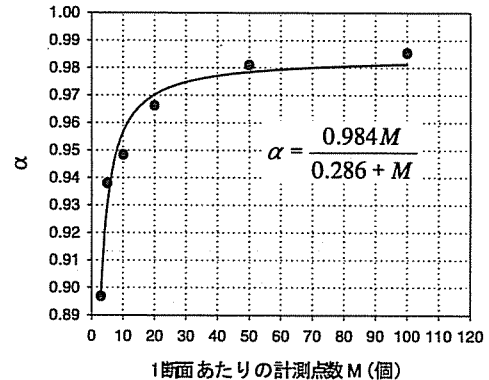


図-14 1断面あたりの計測点数と係数 $\alpha$

験片で安全側の評価となる) 計測間隔  $d$ 、1断面あたりの計測点数  $M$  と係数  $\alpha$  の関係を、それぞれ図-13および図-14に示す。図中にはプロットした点に対する最小二乗近似式の一例を示している。実構造物における測定板厚から有効板厚を評価する際には、誤差率  $E$ 、危険率  $D$  ともに小さいことが望まれるが、精度良く推定するためには多数の計測点を必要とする。すなわち、信頼ある評価結果を得るには、0.3mm程度の計測間隔で板厚計測を行う必要がある。しかし、これらは計測に要する労力と構造物の重要度によって適切な危険率の設定に基づき決められるべきものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、約19年間厳しい海洋環境において曝露された腐食損傷を有する鋼管から、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、破断性状などに関連付け、性能評価のための板厚計測方法(計測間隔)について検討した。得られた結論をまとめると以下の通りである。

- (1) 引張力を受ける腐食鋼部材の耐力評価で用いる有効板厚は、最小断面部位において、その平均板厚で精度よく評価できることが分かった。特に、破断部位は、孔食など、局所的な腐食による断面欠損に大きく影響される。
- (2) 計測間隔を変化させたときの有効板厚の推定精度や安全

性に関する検討を行い、計測間隔・計測点数と耐荷力評価に必要な安全係数の関係式の一例を示した。一定の安全性を確保するためには、計測間隔に応じて最小断面部位の平均板厚を減じる必要がある。また、一方で、危険率1/1000を確保するには、計測間隔は0.3mm程度とする必要がある。

本研究では、引張力を受ける板要素のみを対象として検討を行ったが、他の形状の部材、構造物としての挙動に関する検討を行う必要がある。また、引張力に加え、圧縮力、せん断力、ねじりなどの組み合わせ断面力に対しても同様な検討を行うことが今後の課題である。

#### 謝辞

本研究は、社団法人土木学会・構造工学委員会・沿岸環境における鋼・複合構造物の防食および耐久性評価に関する研究小委員会の研究成果をまとめたものである。社団法人日本鉄鋼連盟および委員の方々から貴重な試験体の提供ならびに有益な助言を頂いた。ここに記して、深謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 名取暢、西川和廣、村越潤、大野崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析、土木学会論文集、No.668/I-54、pp.299-311、



- 2001.1.
- 2) 山本正弘、広沢規行、吉田耕太郎、加藤忠一、羽田隆司：海洋で曝露した鋼材の腐食形態の解析、Zairyo-to-Kankyo、41、pp.803-808、1992.
  - 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、2001.3.
  - 4) 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、土木学会、Vol.48A、pp.1031-1038、2002.3.
  - 5) 松本勝、白井義朗、中村幾雄、白井成人：腐食鋼板の有効板厚評価法の一提案、橋梁と基礎、Vol.23、No.12、pp.19-25、1989.
  - 6) 村中昭典、皆田理、藤井堅：腐食鋼板の表面形状と残存耐力、構造工学論文集、土木学会、Vol.44A、pp.1063-1071、1998.3.
  - 7) 野上邦栄、山沢哲也、小栗友樹、加藤美幸：腐食減厚に伴う合成 I 桁及び I 断面柱の残存耐力評価に関する一考察、構造工学論文集、土木学会、Vol.47A、pp.93-102、2001.3.
  - 8) 森猛、渡邊一、花井資之：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、土木学会、Vol.49A、pp.675-686、2003.3.
  - 9) 海田辰将、藤井堅、原考志、中村秀治、上野谷実：腐食鋼板のせん断耐力とその評価法、構造工学論文集、土木学会、Vol.50A、pp.121-130、2004.3.
  - 10) 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.
  - 11) 海田辰将、藤井堅、宮下雅史、上野谷実、中村秀治：腐食したプレーガーダーの残存曲げ強度に関する実験的研究、構造工学論文集、土木学会、Vol.51A、pp.139-148、2005.3.
- 12) 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、土木学会、Vol.51A、pp.1103-1110、2005.3.
  - 13) 大西弘志、松井繁之：腐食鋼板の力学的挙動に関する実験的研究、構造工学論文集、土木学会、Vol.51A、pp.1111-1118、2005.3.
  - 14) 後藤芳顕、川西直樹：腐食や補修の影響を考慮した長期間の力学性能評価のための構造解析法の開発、土木学会論文集、No.689/I-57、pp.85-100、2001.10.
  - 15) 後藤芳顕、川西直樹：腐食と補修履歴を考慮した鋼構造物の耐震性能評価のための解析手法、土木学会論文集、No.738/I-64、pp.233-244、2003.7.
  - 16) 後藤芳顕、川西直樹：腐食などの体積欠損による鋼構造物の残留応力・残留たわみの変化の解析と圧縮板の残存耐力評価、構造工学論文集、土木学会、Vol.51A、pp.127-138、2005.3.
  - 17) (財) 沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(改訂版)、pp.239-240、1993.4.
  - 18) Kulicki, J.M., Prucz, Z., Sorgenfrei, D.F., Mertz, D.R. and Young, W.T.: Guidelines for Evaluating Corrosion Effects in Existing Steel Bridges, NCHRP Report 333, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, USA, 1990.12.
  - 19) 藤井 堅、近藤恒樹、田村功、渡邊英一、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、土木学会、Vol.52A、2006.3(印刷中).

(2005年9月10受付)