

腐食環境下の鋼部材の残存耐力

構造物の維持補修技術研究会(RAMS) 会長 大村 裕*
Rehabilitation And Maintenance of Structures

皆田 理*, 藤井 堅**, 村中 昭典*

1. まえがき

ここ数十年間の解析技術や施工技術の発展は目覚ましいものがあり、また材料の進歩もあいまって、とくに昭和30年代の高度成長期から多くの橋梁が架設されてきた。しかし、一方で、老朽化あるいは自動車の大型化、交通量の増大などの社会環境の変化にともなって様々な損傷事例が報告されるようになり、維持管理の重要性が認識されつつある。

構造物に損傷が発見されると、その損傷に対する適切な判断とその後の適切な対処が要求される。しかし、これらの対処法を決定する判断基準は、現時点では十分に確立されているとは言い難い。従来、疲労損傷については精力的に研究され、疲労設計指針¹⁾などある程度解明された観もある。しかしながら腐食損傷については、判断基準のための基礎資料すらなく、施主の感覚的な判断で対処法が決められているのが現状といえる。それは、腐食損傷を有する構造物の残存耐力を正確に把握することが、極めて複雑かつ難しい問題であることに起因する。

当研究会では、腐食および疲労損傷が著しいため部分的に補修されたフェリー渡橋の残材を入手する機会を得た。そこで本研究は、鋼構造物の合理的健全度評価法の確立に寄与することを目的として、腐食により減肉した鋼板の残存耐力評価のための基礎資料を提供する。すなわちフェリー渡橋から採取した残材を用い、まず、座屈強度の観点から座屈崩壊形式や座屈荷重を調べ、等価板厚の評価について提案する。次に、疲労寿命におよぼす腐食の影響を鋼板表面形状測定結果に基づいて検討する。

2. 渡橋概要・材料特性

試験片採取のためのフェリー渡橋は、図-1に示すように、スパン20m、幅員4.4mの吊り上げ形式の2主桁鋼床版橋で、吊り上げジャッキ側にエプロンを有している。主橋部の陸側支承付近でとくに激しい腐食が認められ、この部分とエプロン部が取り替え補修された。試験片は、主橋の陸側支承付近の床版、縦リブ、および陸から2番目の横桁から採取した。なお、縦リブにはバルブプレート、床版のデッキプレートは編付き鋼板が使用されている。載荷あるいは疲労実験に先立ち、各部材の材料特性を調べるために静的引張試験を行った。引張試験は、腐食した両表面を平滑仕上げしたJIS1号および5号試験片を用いて行った。引張試験結果を表-1に示す。

3. 腐食した鋼材の残存圧縮耐力

従来、維持補修の観点から、腐食速度の調査や腐食代設計のための暴露試験などの基礎的資料はかなり蓄積されているものの、腐食した構造物の残存耐力を定量的に把握しようとした試みは極めて少ない。松本、白石²⁾は、腐食した水門施設を用いて腐食鋼材の引張試験を行い、引張強度に対する等価板厚評価を試みている。しかし、鋼構造の基本ともいえる座屈設計の面から等価板厚の評価を試みた例は、現在のところないようである。西村³⁾は、腐食状態を仮定して、自由突出板と周辺単純支持板の圧縮強度に及ぼす腐食の影響の解析的解明を試みている。また、促進試験を用いて構造物の残存耐力を評価した試みもあるが、この場合には腐食面が実際状態よりもきれいに錆びることかわれている。このように腐食した鋼材の残存耐力を正確に把握するためには、未だ十分な基礎資料が与えられておらず、今後の多くの実験データが必要といえる。ここでは、座屈強度の観点から、腐食した鋼板の圧縮試験を行い、減肉にともなう残存耐力評価のための基礎資料を提供する。

3. 1 試験片

試験片は、可動橋の陸側の横桁(ウェブ、下フランジ)とその周辺の鋼床版の縦リブの、残留応力の影響が少ないと思われる場所から切り出した。設計図に示されている鋼種はSS400で公称板厚は、縦リブ9.5mm、横桁ウェブ9mm、横桁下フランジ12mm、である。座屈強度を把握するための圧縮試験は、幅3cmの短冊状の矩形板で、長さを変化させて、36本用意した。

圧縮試験片の名称は次のように定めた。

* 広島工業大学工学部土木工学科 ** 広島大学工学部第四類

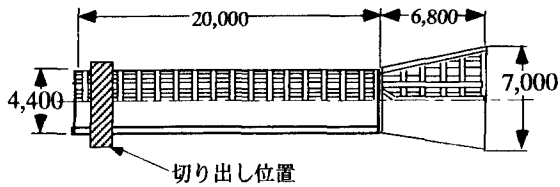
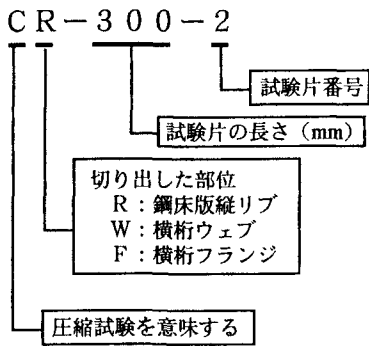


図-1 渡橋概略図

表-1 材料特性

	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び率 (%)
縦リブ	206.6	0.287	273.6	409.2	
横桁ウェブ	202.1	0.274	277.5	410.3	
横桁フランジ	196.5	0.275	259.7	406.5	
デッキプレート			253.2	397.2	30.2

3. 2 板厚および偏心量の測定結果

切り出された圧縮試験用試験片は、あらかじめ塗膜除去材（リムーバ）とワイヤブラシを用いて表面の錆を除去した。そして試験片の一方の表面に5mm間隔の格子状のメッシュをけがき、その格子点の板厚と偏心量を測定する。以下では、メッシュをけがいた面をA面、裏面をB面と呼ぶことにする。

板厚は各メッシュ点をダイヤルゲージで直接測定した。使用したダイヤルゲージは板厚測定用に開発されたもので、各メッシュ点の板厚を直接読みとることができる。偏心量については、次のようにして求めた。まず、試験片を定盤上に固定し、定盤面と平行に基準面を設定する。次に定盤面と平行に試験片に中立面をけがき、基準面から中立面までの距離を測定し、さらに基準面から試験片のA面にけがかれたメッシュ点までの距離を測定する。すでに測定されている板厚とこれらの測定結果から、各メッシュ点における中央面と中立面との距離を求めれば、格子点における偏心量となる。なお、本研究で言う偏心量は、板厚中央面からこの中立面までの距離を意味しており、片面腐食などによる実構造物における偏心量とは大きく異なることに注意されたい。

表-2 圧縮試験片の測定結果と座屈荷重

試験片名	有効座屈長(mm)	最大板厚(mm)	最小板厚(mm)	平均板厚(mm)	標準偏差 σ_t	最大偏心量(mm)	平均偏心量(mm)	座屈荷重(kN)
CR-450-1	470	9.07	5.35	7.25	0.57	1.070	0.460	---
CR-450-2		9.39	6.14	8.47	0.71	1.715	0.448	15.27
CR-450-3		9.31	7.08	8.36	0.42	1.090	0.053	12.16 *
CR-350-1	370	8.97	6.07	7.84	0.55	0.875	-0.003	20.54 *
CR-350-2		9.30	6.65	8.19	0.52	0.690	0.166	20.20 *
CR-350-3		9.73	6.09	8.24	0.79	-0.910	0.113	19.19
CR-250-1	270	8.39	5.36	7.05	0.68	0.995	0.147	19.10
CR-250-2		8.17	4.39	6.77	0.80	1.305	0.243	21.18
CR-250-3		9.33	8.62	9.12	0.14	0.570	0.154	43.99 *
CR-250-4		8.62	4.89	7.37	0.76	0.980	0.107	19.40
CR-250-5		9.25	4.91	8.17	0.76	-1.635	-0.446	22.85
CR-150-1	170	8.01	4.32	6.10	0.80	-0.980	-0.115	24.32
CR-150-2		9.32	8.35	9.05	0.19	-0.425	-0.031	60.60 *
CR-150-3		8.89	5.57	8.00	0.67	0.890	0.308	48.79
CW-450-1	470	8.79	5.91	7.73	0.57	-0.980	0.165	17.43 *
CW-450-2		8.61	6.00	7.63	0.54	1.770	0.565	17.13 *
CW-450-3		8.90	7.43	8.52	0.27	0.890	0.003	---
CW-350-1	370	8.74	5.81	7.63	0.53	1.090	0.369	18.18
CW-350-2		8.95	7.65	8.71	0.21	-0.425	-0.146	23.57 *
CW-350-3		8.61	5.50	7.36	0.63	-0.760	-0.043	9.86
CW-200-1	220	8.80	8.33	8.66	0.10	0.310	-0.052	48.70 *
CW-200-2		8.86	8.48	8.70	0.06	0.190	0.028	52.86 *
CW-200-3		8.70	7.84	8.45	0.17	0.500	0.165	62.78 *
CW-200-4		8.81	7.34	8.49	0.37	0.700	0.083	61.69
CW-200-5		8.87	7.42	8.47	0.27	0.290	0.013	37.19 *
CW-100-1	120	8.74	8.69	8.73	0.01	-0.075	-0.008	73.99 *
CW-100-2		8.75	8.70	8.73	0.01	-0.105	-0.072	79.34 *
CW-100-3		8.86	8.60	8.81	0.04	-0.170	-0.011	75.47 *
CF-450-1	470	10.69	6.86	9.24	0.66	0.148	0.376	20.81
CF-450-2		10.06	6.03	8.34	0.74	-1.140	0.339	13.72 *
CF-300-1	320	10.56	6.51	9.31	0.67	1.780	0.621	35.37 *
CF-300-2		10.23	6.27	8.46	0.72	1.340	0.403	19.40
CF-300-3		9.98	7.29	8.72	0.50	-1.240	-0.165	20.31
CF-300-4		10.38	7.71	9.08	0.51	-1.100	-0.309	32.09 *
CF-150-1	170	10.70	6.81	9.62	0.78	1.990	0.759	52.96
CF-150-2		9.80	5.63	8.19	0.83	1.260	0.050	31.64

* : 全体座屈による崩壊を示し、無印は局部座屈崩壊を示す。

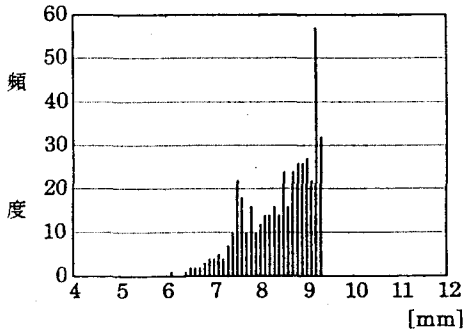


図-2 板厚のヒストグラム (CR-450-2)

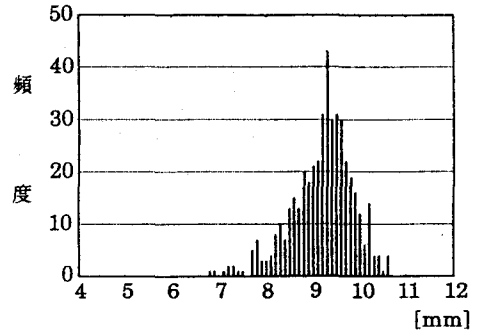


図-3 板厚のヒストグラム (CF-450-1)

さて、各試験片の板厚および偏心量の測定結果を表-2に示す。表中、有効座屈長 l は、圧縮試験片の長さ(2cm)に支承部の長さ(2cm)を加えたもので、得られた座屈荷重は、有効座屈長 l を用いて考察する。また、板厚のヒストグラムの代表例を図-2、図-3に示し、対応する試験片の表面の状態を中立面を基準にして図-4、図-5に示す。

板厚のヒストグラムから、それぞれの試験片の腐食特性がある程度把握できる。例えば、図-2および図-4から、CR-450-2では、元の板厚9.5mmに対して測定値に9mm前後の値が多く、最大3mm以上の減肉がある。全体的にみれば腐食は少ないといえるが局所的な腐食がみられる。図-3および図-5に示す試験片CF-450-1では、ヒストグラムの分布は正規分布に近く、最大5mm以上、最小でも1mm以上の減肉がある。この試験片の腐食はかなり激しく表面にもかなりの凹凸があるが全体的に腐食していると判断できる。

偏心量については、表-2からわかるように、最大2mm程度で小さい。この偏心量が座屈強度に及ぼす影響は小さいといえる。

以上、試験片全体の測定結果について考察したが、試験片の長さ方向の板厚変化を少し詳しく調べてみる。試験片の軸直角方向断面における5つのメッシュ点の平均板厚および平均偏心量を用い、中立面(載荷面)を基準とする両表面および中央面の位置の軸方

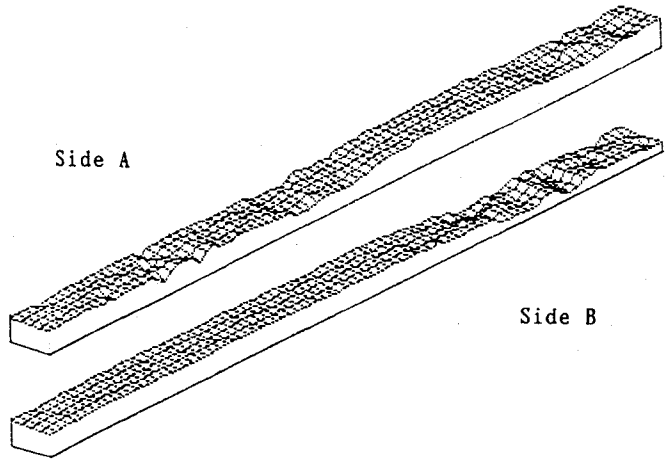


図-4 表面状態 (CR-450-2)

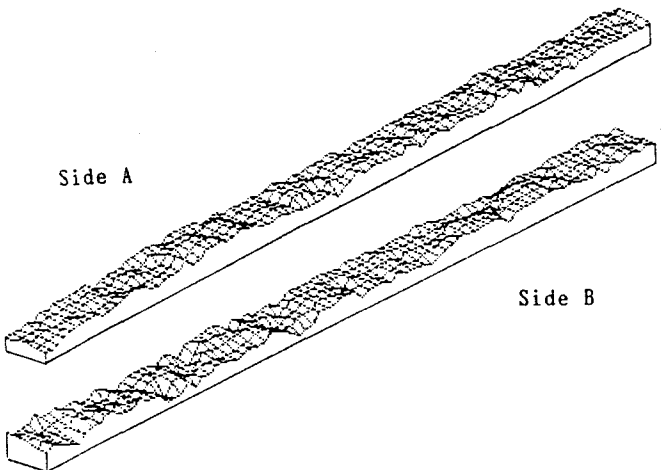


図-5 表面状態 (CF-450-1)

向分布の例を、図-6および図-7に示す。これらの図からわかるように、試験片の中央面は中立面から一つの方向に偏心しているのではなく、中立面をはさんで凸凹であり、偏心量も小さいことがわかる。図-6では、偏心はほとんどなく、板厚の軸方向の変化も小さい。一方、図-7では、端部左から5cmの位置で部分的な腐食が認められる。

図-6に示す試験片CR-350-1は、試験片全体が座屈する崩壊形式であったのに対し、図-7のCR-250-1では部分的に折れ曲がるような座屈たわみを生じて崩壊した。このような差異が、全ての試験片について必ずしも明確には現われなかったけれども、このように各断面の表面状態を描くことによって、座屈崩壊形式をある程度推定できるといえる。

3. 3 圧縮試験結果

座屈耐力を得るために、25 t 材料試験機を用いて定ひずみ圧縮載荷試験を行った。圧縮試験では、試験片の中立面と載荷面が一致するように特に注意した。支持条件は両端ピン支持とし、ナイフエッジ型の支承を用いた。

今回の圧縮試験では、試験片全体が正弦半波形の横たわみを生じて座屈崩壊する場合（ここでは全体座屈と呼ぶ）と試験片の一部が折れ曲がるようなたわみ形で耐力を失う局部座屈の2種類の崩壊形式が現われた。写真-1および写真-2にそれぞれ全体座屈、局部座屈崩壊を示す。また、圧縮試験により得られた座屈荷重を表-2に示す。表中、右に*を記したものは全体座屈による崩壊である。局部座屈による崩壊は、例えば図-7に示すように、試験片の部分的腐食が激しい場合に発生する。腐食による減肉が大きい場合でも、全体がほぼ一様に腐食している図-6のような場合は、全体座屈が現われる。また、表-2で、測定板厚の標準偏差と座屈崩壊形式を比較すると、試験片CW-200-4などのいくつか例外があるものの、標準偏差が概ね0.7mm以上になると局部座屈による崩壊となることがわかる。

なお、CR-450-1、CW-450-3については、実験装置の故障により座屈荷重が得られなかった。

3. 4 板厚評価法に関する一考察

腐食した鋼材の残存耐力推定のための等価板厚評価法の一提案を試みる。従来、等価板厚として、平均板厚、最小板厚、断面毎の平均板厚の最小値などが用いられているが、残存耐力を十分な精度で評価できていないようである。

表-2に示す座屈強度試験結果と座屈理論解

$$P_{Cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \text{ と比較する。ここに } l \text{ は表-2に示す有効座屈}$$

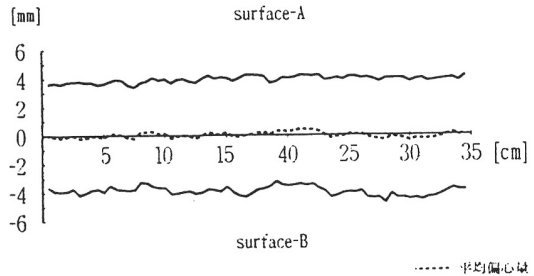


図-6 平均縦断面 (CR-350-1)

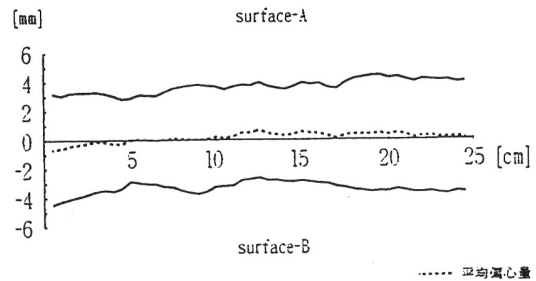


図-7 平均縦断面 (CR-250-1)

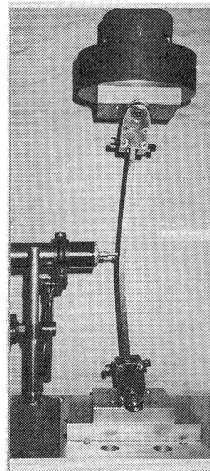


写真-1 全体座屈崩壊

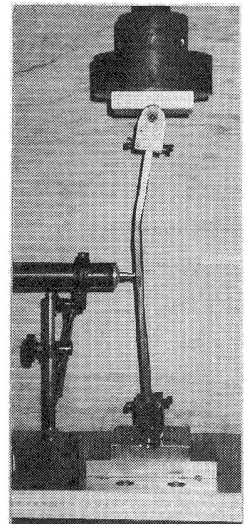


写真-2 局部座屈崩壊

長, E は弾性係数で, I は断面2次モーメント ($=\frac{bt^3}{12}$, b :板幅=3cm, t :評価基準となる板厚)である。まず, 評

価の基準となる板厚に平均板厚 t_{avg} を適用すると, 例えば, CW-100-2のような短い試験片では, 上式から弾性座屈荷重 $P_e=230.6\text{kN}$ が得られ, また実験から得られた座屈強度 $P=79.34\text{kN}$, 一方, 降伏軸力 $P_y (=tb\sigma_y) = 72.7\text{kN}$ で, 明かにこの試験片は塑性座屈であると判断できる。一方, 試験片CR-350-3のような比較的長いものでは, 同様の計算を行うと, $P_e=20.84\text{kN}$, $P=19.19\text{kN}$, $P_y=67.63\text{kN}$ となり, 弾性座屈を起こしていることがわかる。このとき実験値 P と弾性座屈荷重 P_e の比 $P/P_e=0.92$ となり, 残存耐力を平均板厚を用いた弾性座屈荷重で評価すると危険側の評価となる。同様のことはCF-300-1でもいえ, 残存耐力評価に平均板厚を用いるのは適切とはいえない。

そこで, 表-2に示す板厚の標準偏差 σ_t を考慮した $t_{avg}-\sigma_t$ を評価板厚として採用すると, CR-350-3では, $P_e=15.40\text{kN}$, $P/P_e=1.25$ となり安全側の評価が可能になる。また, CF-300-1でも $P/P_e=1.16$ と安全側の値を評価できる。評価板厚に $t_{avg}-2\sigma_t$ を用いても安全側になるものの, この場合にはそれぞれ P/P_e は1.74, 1.48とやや安全側過ぎる結果となる。したがって, 残存圧縮強度評価においては, 等価板厚として $t_{avg}-\sigma_t$ 程度を用いるのがよいと考えられる。

等価板厚に $t_{avg}-\sigma_t$ を適用して, 細長比パラメータ

$$\bar{\lambda} \left(= \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{l}{t} \right)$$

$u \left(= \frac{P}{t_{avg}-\sigma_t} \right)$ を降伏荷重 σ_y で無次元化して実験結果

をプロットすると, 図-8のようなになる。図では, 全体座屈崩壊を○で, 局部座屈崩壊を●で示す。また, 実験結果を基に求めた回帰曲線もあわせて示す。図から, 回帰曲線は実験結果をよく表現しているといえる。また, 局部座屈により崩壊した試験片は全体座屈崩壊のそれよりも若干低めの圧縮強度を与えることも図は示している。

図-8に与えた回帰曲線から図に示す実験値と回帰曲線の誤差の標準偏差 σ ($=0.083$)を差し引いて, 下限値相当の耐荷力曲線を次のように提案する。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \left(\frac{0.628}{\bar{\lambda}} \right)^{1.04} - 0.083 \quad \text{----- (1)}$$

式(1)で与えた耐荷力曲線と実験値を比較して図-8に示す。図から式(1)は実験結果の下限値をよく評価しているといえる。

3. 5 偏心量の影響

表-2の偏心量測定結果から偏心による曲げモーメント M を算出し, 等価板厚 $t_{avg}-\sigma_t$ を用いて全塑性モーメント M_p および圧縮座屈荷重 P_u 求め, 曲げと軸力を受ける強度相関を示せば図-9を得る。ここで P_u の計算にはECCS-b曲線によった。図-9から, 本実験の偏心量は小さく, ほとんどの場合曲げの影響は無視できると判断できる。ただし, 実験で求めた偏心量は, 適当に選んだ荷重載荷面から板中央面までの偏心である。した

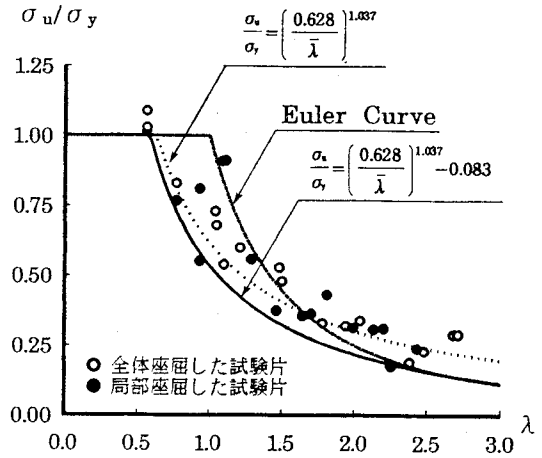


図-8 耐荷力曲線

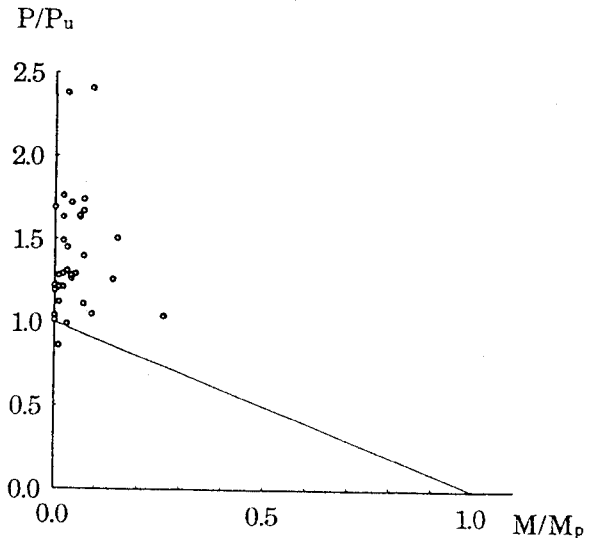


図-9 曲げと圧縮の強度相関

がって、片面腐食状態のような実際の構造物において現われる偏心量の影響は、今後十分に検討すべき課題であるといえよう。

4. 腐食した鋼板の疲労強度

我国は高温・多雨・多湿で地理的にみても海塩粒子の影響を受け易く、また、工業地帯も多いので、鋼構造物に対する腐食環境は厳しいものと言える。一般に、鋼構造物の腐食状態は均一腐食となることは希であり、局部的に深い孔食を有する場合が多いため繰返し応力を受ける鋼構造物では疲労問題に対する配慮が極めて重要となる。

鋼部材の腐食が進行すれば板厚の減少に伴って耐荷力は低下する。従って、鋼構造物の健全度を鋼部材の強度低下という概念で評価するためには、腐食鋼板の強度劣化過程を正確に判定する手法の開発は必要不可欠なものとなる。

近年、鋼材料、溶接継手などの環境強度試験が各所で実施され、それらの資料が多数報告されている。^{4, 5)} しかしながら、実環境下に置かれる鋼構造物の場合、応力・腐食環境が多様多様に異なるため、設計並びに健全度評価に対してただちに適用できる腐食部材強度に関する資料は非常に少ない。

そこで、ここでは鋼橋より採取した腐食鋼板の静的引張強度諸量、並びに疲労強度を実験的に明らかにするとともに、それらの試験結果と腐食鋼板表面形状とに基づいて腐食鋼板の有効板厚評価法について検討を加えた。

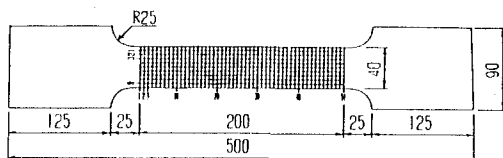
4. 1 試験片および試験要領

試験片は、図-1に示すように、フェリー渡橋の陸側支承・第一横桁近傍のデッキプレートより腐食鋼板を採取した。これらの鋼板の表面は海水飛沫の影響を受け、錆層が厚いため、約10% HCl 水溶液に数日間浸漬後、ワイヤブラシで錆を除去した。なお、試験に用いた鋼板は縞付き鋼板であるが、縞のついた側はほとんど腐食していない。試験片は、鋼板の縞のついた側を平滑仕上げして作成した。したがって、試験片は片面のみ腐食した状態にある。図-10は静的、並びに疲労試験に供した試験片の形状、寸法、及び板厚測定位置を示す。静的引張試験用試験片では、4mmピッチで引いた9本の横測線（荷重軸方向）と51本の縦測線（荷重軸垂直方向）との交点計459点の板厚を、また、同様に疲労試験用試験片については縦測線26本、横測線14本の交点計364点の板厚をマイクロメーターで測定した。後述する「亀裂周辺40mm×40mm範囲の平均腐食量」とは、図-11に示す81点の平均腐食量である。疲労試験は完全片振り引張試験、繰返し速度は10Hzで実施した。

4. 2 腐食鋼板の静的引張試験結果、及び考察

図-12は静的引張試験によって得られた荷重-伸び曲線を示す。また、表-3は各試験片の腐食量を示したものである。ここで腐食量は無腐食鋼板の平均板厚(12.01mm)から測定板厚を差引いたものである。図-12によると、No.2、及びNo.5の試験片では、降伏点が明瞭に現れず、変形能(伸び)も他の試験片に比較してかなり小さい。図-13はNo.4、及びNo.5の試験片の表面形状、静的破壊位置、及び最大腐食位置を示したものである。No.1, 3, 4試験片のように鋼板表面の凹凸が比較的小さいものではほぼ荷重軸垂直方向に、また、No.2, 5試験片のような鋼板表面の凹凸の激しいものでは荷重軸垂直方向に破断せず斜め方向に破壊を生ずる傾向が見られた。静的破壊位置は、ほぼ最大腐食位置で生じ、また、破壊位置の平均断面積(軸直角方向断面における平均板厚×試験片

引張試験片



疲労試験片

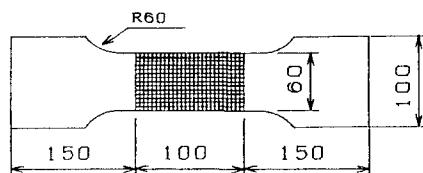


図-10 試験片寸法および板厚測定箇所

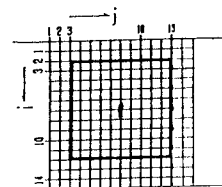


図-11 亀裂発生周辺40x40mm範囲の平均腐食量

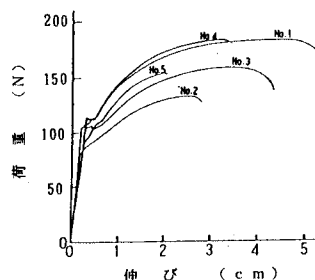


図-12 各試験片の荷重-伸び曲線

表-3 引張試験用鋼板の腐食量

試験片	平均腐食量 (mm)	最小腐食量 (mm)	最大腐食量 (mm)
No.1	0.91	0.51	1.75
No.2	4.01	1.60	6.34
No.3	3.07	1.92	4.35
No.4	1.26	0.78	3.26
No.5	2.13	0.76	5.29

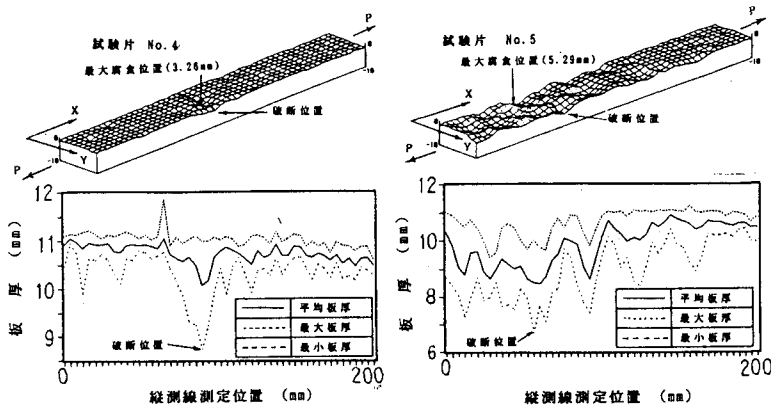


図-13 腐食鋼板の表面形状と破壊位置

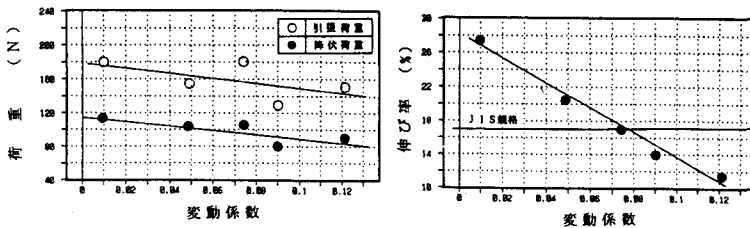


図-14 静的強度諸量と変動係数との関係

の幅)は他の平均断面積に比して最小となる。図-14は破断面の変動係数と降伏荷重、引張荷重、及び伸び率との関係を示したものである。ここで、変動係数は破断面が複数の縦測線を横断している場合にはそれらの最大値を使用した。同図からわかるように静的強度諸量は変動係数の上昇とともに低下の傾向を示す。これは変動係数の上昇、すなわち、鋼板表面の凹凸状態が激しくなることによって局部的に鋼板表面の応力集中が増大するためと考えられる。伸び率は変動係数が約0.07以上になるとJIS規格⁶⁾(Elog>17%)を大きく下回る。

図-12に示したように、鋼板表面の形状不整の大きい試験片では明瞭な降伏点が現れなかった。そこで、両面平滑材の引張試験により得られた降伏ひずみ($\epsilon_y=0.00123$)を用いて各試験片の降伏荷重 P_y を求め、次式により有効板厚 t_e を算出した。その結果を表-4に示す。なお、この場合鋼板降伏点は板厚の大小にかかわらず不変と仮定した。

$$t_e = \frac{P_y}{B \sigma_y}, \quad A_e = t_e B \quad \text{-----}(2), (3)$$

ここで t 、 P_y 、 σ_y 、及び B はそれぞれ腐食鋼板の降伏荷重、両面平滑材の降伏点、及び板幅である。表-4より、有効板厚は変動係数の増大と共に減少の傾向が認められる。ここで求めた有効板厚は引張試験結果に基づき得たものである。しかしながら、実構造物に同様の試験を実施することは不可能である。従って、実務的には板厚を実測し、その結果から有効板厚を推定することを要求される。以下、測定板厚に基づく有効板厚評価方法について検討する。

腐食鋼板の有効板厚は、鋼板表面が均一に腐食している場合は平均板厚に支配され、局部的に腐食している場合には、最小板厚あるいは部分的に断面積が小さくなっている箇所の板厚に支配されるものと考えられる。図-15、及び16

表-4 破断面の板厚測定値および有効板厚

試験片	平均板厚(mm)	最小板厚(mm)	標準偏差(mm)	変動係数	有効板厚(mm)
No. 1	10.94	10.76	0.106	0.009	10.65
No. 2	7.45	6.32	0.672	0.090	7.74
No. 3	8.57	7.74	0.420	0.049	9.68
No. 4	10.01	8.74	0.743	0.074	9.58
No. 5	8.46	6.71	1.026	0.121	8.71

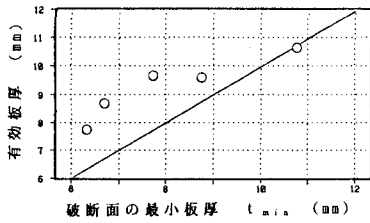


図-15 有効板厚と最小板厚との関係

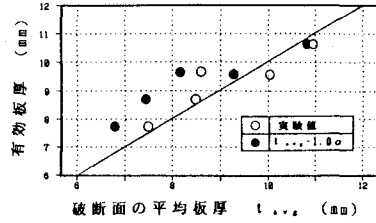


図-16 有効板厚と平均板厚との関係

は静的引張試験によって得られた有効板厚と破断面最小板厚、及び破断面平均板厚との関係を示したものである。同図より、最小板厚と有効板厚との間にある程度の相関性は見られるが、そのばらつきは大きく、また、腐食量が大きくなると最小板厚で作用応力を算定した場合、過度に安全側の評価となることを示している。一方、平均板厚と有効板厚との間には腐食量の大小にかかわらず比較的良好な相関性を有している。従って、平均板厚で有効板厚を評価する方が適当であるように思われる。この場合、作用応力算定板厚として $t_{avg} - \sigma$ (t_{avg} : 荷重軸垂直方向の平均板厚、 σ : 荷重軸垂直方向の板厚標準偏差) 程度の板厚を考えれば安全側の評価となろう。

4. 3 腐食鋼板の疲労試験結果、及び考察

腐食鋼板の疲労強度は鋼板表面形状によって影響を受ける。そこで、本研究に用いた疲労試験片の腐食特性を見るため、縦測線26本の最大腐食量を求めGumbel確率紙にプロットして例示したものが図-17である。同図に見られるようにばらつきはあるものの腐食データは比較的良好な直線関係を示している。他の試験片においてもほぼ同様であった。この事実から、海岸地帯で腐食した鋼橋の腐食状態が最大値の2重指数分布に適合するものと推定される。疲労試験用試験片の尺度パラメータ α 、及び位置パラメータ λ はそれぞれ0.28~1.18、及び0.88~6.18の範囲に分布している。一般に、この分布に従う腐食状態は孔食を有する場合が多いと言われている。

図-18は公称板厚(12mm)を用いて算定した作用応力 S_r と疲労亀裂が約5mm進展したときの繰返し回数 N_c との関係 ($S_r - N_c$ 関係) を示したものである。同図に示すように疲労寿命データは極めて大きなばらつきを有している。そこで、各試験片の疲労亀裂周辺81点の腐食深さの平均値 ($\bar{\delta}$) を用い、腐食深さ2mmの領域ごとに分類して整理し直したものが図-19である。同図より、各腐食領域の疲労データは比較的良好な直線関係を示している。平均腐食量 $0.6 < \bar{\delta} < 2\text{mm}$ 、 $2 < \bar{\delta} < 4\text{mm}$ 、及び $4 < \bar{\delta} < 6\text{mm}$ の鋼板の 2×10^6 回疲労強度は、平滑材の疲労強度(250MPa)に対してそれぞれ約54、66、及び73%程度低下する。この結果は、すみ肉溶接継手の疲労強度が腐食によって上昇するのと対症的なものであり、鋼板表面に生じる孔食が疲労寿命に対して極めて高い切欠き感受性を有して

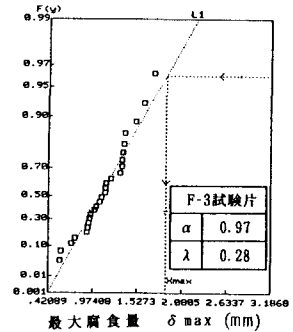


図-17 腐食鋼板の最大腐食深さ分布

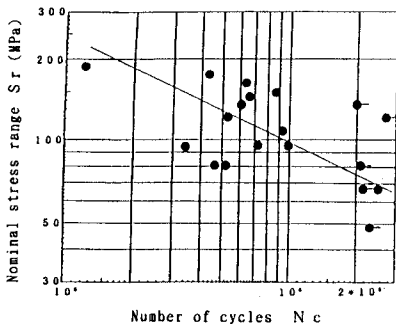


図-18 公称板厚による $S_r - N_c$ 関係

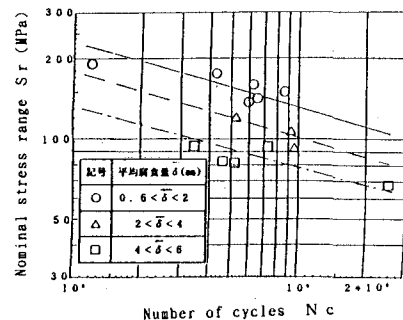


図-19 疲労亀裂周辺81点の腐食深さの平均値による $S_r - N_c$ 関係

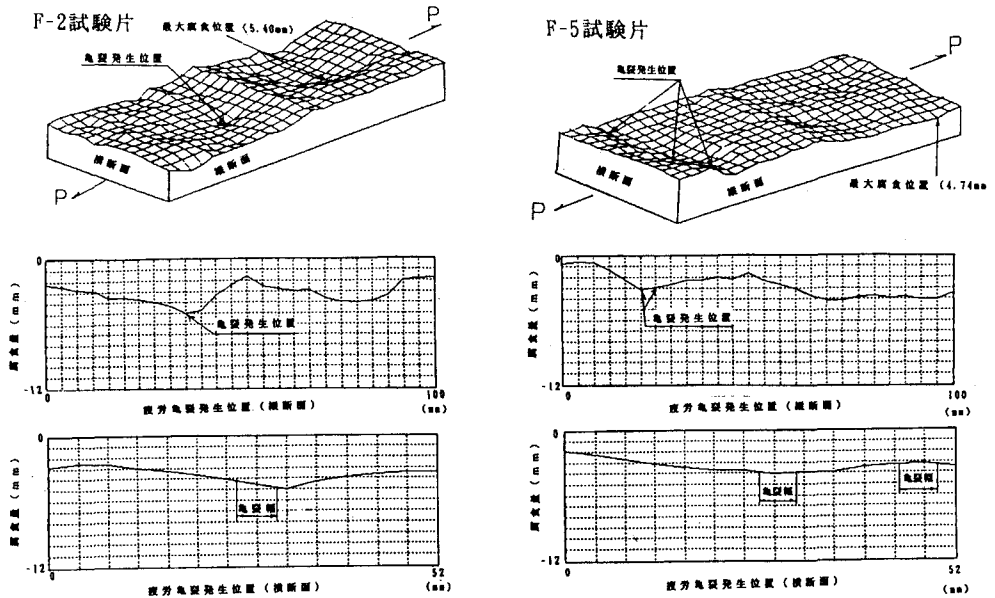


図-20 鋼板の表面形状および断面形状と疲労亀裂発生点

いることを示している。なお、これらの腐食領域の疲労強度は、阿部ら⁷⁾が実施した腐食が特に激しい縦桁下フランジの疲労強度に対応するものである。図-20は疲労試験に用いた腐食鋼板の表面形状、並びに疲労亀裂発生位置を例示したものである。同図より、疲

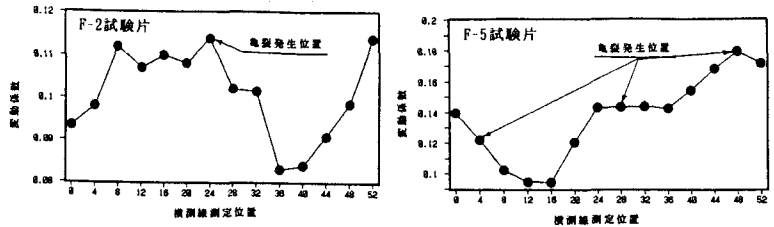


図-21 板厚変動係数と疲労亀裂発生点

労亀裂は静的引張試験の場合とは異なり、最大腐食位置あるいは最小断面で必ずしも生じず、主として鋼板表面の凹凸の激しい位置で生じている。図-21は各荷重軸方向横測線上の板厚変動係数を示したものである。同図より、疲労亀裂は変動係数の高い測定上で発生していることがわかる。この事実は、鋼板表面孔食部の応力集中の高い位置が疲労亀裂発生の起点となることを示すものである。また、試験片F-5のように複数の亀裂が発生した場合、最終的には変動係数の高い位置で発生した亀裂が優先的に進展し、他の亀裂はある程度進展した後停止する。

さて、腐食鋼板の有効板厚が $t_e = t_{avg} - \sigma$ にて評価し得るものとする、疲労試験に供した腐食鋼板の応力全振幅 S_e は次式で算定される。

$$S_e = \frac{P_r}{B(t_{avg} - \sigma)} = \frac{P_r}{A_{avg}(1-V)} = K \cdot S_{avg} \quad ; \quad K = \frac{1}{(1-V)} \quad (4)$$

ここで、 P_r : 荷重全振幅、 B : 板幅、 t_{avg} : 亀裂発生位置横測線の平均板厚、 V : 亀裂発生位置横測線の板厚変動係数である。

図-22は腐食鋼板の疲労亀裂発生位置における K を求め、縦軸に $S_e = K \cdot S_{avg}$ を取って $S_e - N_e$ 関係を再整理したものである。同図より、各鋼板の疲労データはほぼ1本の $S_e - N_e$ 曲線廻りに分布している。従って、 K は鋼板表面の凹凸状態に起因する見かけ上の応力集中率と考えることができる。同 $S_e - N_e$ 線から得られる 2×10^6 回疲労強度は 125MPa であり、腐食鋼板の切欠き係数は平均 2.0 となる。図-23は、図-19に示す各腐食領域での $S_e - N_e$ 関係に基づいて得られた 2×10^6 回疲労強度を縦軸に取り、横軸に平均腐食量と公称板厚との比 δ/t_e を取って図示したものである。

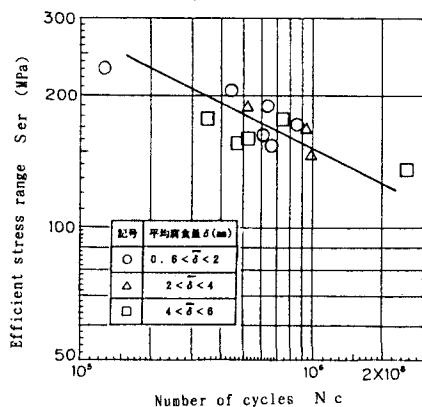


図-22 SerによるSr-Nc関係

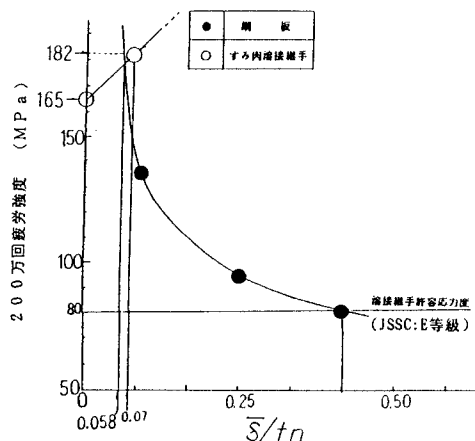


図-23 腐食部材の疲労強度と腐食量との関係

図中には別途実施して得たすみ肉溶接継手の疲労強度も併

記してある⁹⁾。同図より、 δ/t_n が約0.06以上になると疲労

破壊は溶接継手止端部から離れた継手母材で生ずるようである。従って、腐食環境の厳しい場所に設置された鋼構造物では、溶接継手のみならず継手母材の疲労亀裂発生に対しても注目しておく必要があるように思われる。

5. あとがき

本研究では腐食鋼板の力学性状を明らかにするために、腐食した鋼板の静的試験、及び疲労試験を実施した。圧縮を受ける腐食した鋼板の残存圧縮耐力実験からは、座屈崩壊形式は、局部座屈と全体座屈があり、標準偏差によってある程度両者の区別が可能であること、座屈耐力推定のための板厚に（平均板厚・標準偏差）を用いると座屈荷重をうまく推定できること、などがわかった。また、腐食した鋼板の圧縮耐力曲線を式（1）で提案できた。一方、腐食した鋼板の静的引張試験でも、有効板厚を（平均板厚・標準偏差）とすれば安全側の評価が可能となることなど、一定の成果が得られた。さらに疲労試験結果からは、平均腐食量と疲労強度の低下を定量的に把握できた。とくに、腐食鋼板の疲労亀裂の発生は荷重軸方向（横測線）の変動係数に大きく依存すること、腐食鋼板のS-N関係は作用応力Sを $S_{\sigma} = K \cdot S_{avg}$ として算定すれば腐食状態にかかわらずほぼ1本のS-N関係で整理し得ること、すみ肉溶接継手母材の δ/t_n が約0.06以上になると溶接止端部から離れた母材より疲労破壊が生ずることなど、多くの基礎資料を提供できたと思われる。

参 考 文 献

- 1) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、1993.4.
- 2) 松本勝、白井義朗、中村幾雄、白石成人：腐食鋼材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.
- 3) 村上茂之、西村宣男、亀井義典：腐食鋼板の頭か板厚算定に関する一考察、土木学会大48回年次学術講演会講演概要集I-36, pp.220-221, 1993.9.
- 4) 山田健太郎、左高茂樹：リブ十字隅肉溶接継手の塩水水中的の疲れ試験と寿命解析、土木学会論文集、No.398, PP.377-384, 1988.
- 5) 山田健太郎、村山 眞、近藤雅雅、菊池洋一：大気暴露された無塗装の耐候性鋼および普通鋼溶接継手の疲れ強さ、土木学会論文集、No.337, PP.67~74, 1983.
- 6) 日本工業規格、JIS G 3101、1976.
- 7) 阿部 英彦、稲葉紀昭：腐食鋼材の疲労強度、構造物設計資料NO.34、1973.
- 8) 栗林利樹、皆田 理、村中昭典、石丸 勝：長年の応力腐食を受けた溶接継手の疲労強度、土木学会中四国支部研究発表講演概要集、I-7、PP.7~8、平成5年.