

腐食した鋼材の材料特性と残存耐荷力評価法

藤井 堅（広島大学工学部第四類）

1. まえがき

鋼橋の維持管理において最重要因子は、腐食と疲労であろう。

鋼橋の疲労については、発生メカニズム、補修・補強法等が精力的に調査研究され、疲労設計指針¹⁾なども整備されている。

ところが、鋼道路橋の架替え理由において、上部構造の損傷が原因とされた橋梁の約50%²⁾以上を占める腐食損傷については、残存強度を判定するための基礎資料は極めて少ない。鋼材の防食については塗装をはじめとして種々の対策が講じられているが、管理が不十分な場合や腐食環境が厳しい場合には、腐食にともなう減肉や孔食等表面形状の変化による強度および剛性低下が起こる^{3~7)}。これらは、腐食によって生じた鋼板表面不整による応力集中に起因すると考えられるが、腐食鋼板の力学的挙動に対する表面不整の影響については未だ不明な点が多い。したがって、鋼構造物の健全度評価の観点からこの点を明確にしておく必要がある。

そこで本研究では、長年供用された鋼構造物から採取した腐食鋼板の静的引張試験、圧縮試験ならびに疲労試験を実施し、試験片レベルでの表面形状と力学特性との関係、残存強度評価のための有効板厚について検討する。

腐食損傷を有する構造物の残存強度評価のためには、構造物設計の現状が部材設計を基本とする現状を考慮すると、部材に注目した残存耐力を精度良く推定するための等価板厚を与えるのが望ましいと考えられる。このような意味では、本研究のような試験片レベルでの検討だけではいづらく不十分といえなくもない。しかしこの種の研究は、腐食部材の種々の応力状態における支配的な表面形状の把握、あるいは解析シミュレーションによる部材の残存耐力評価法の妥当性検討のためには、最も基本的かつ重要な課題といえる。

2. 腐食鋼材試験片

2.1 試験片の採取

試験片は15年間供用後撤去されたフェリー渡橋および40年間供用後撤去されたダム洪水吐ゲート（ラジアルゲート）より採取した。フェリー渡橋は、吊り上げ形式の2主桁鋼床版橋で、陸側支承付近の橋梁裏面に配置された横桁、デッキのリップなどの部材が激しく腐食していた。

静的引張試験に用いた試験片は、渡橋の陸側支承付近のデッキプレート、縦リップおよび陸側第1横桁から採取した。なお、縦リップにはバルブプレート、デッキプレートは縞付き鋼板が使用されている。また、洪水吐ゲートからは、スキンプレートおよび横げた腹板（ウェブプレート）からいづれも水流直角方向に切り出して引張試験片とした。

疲労試験については、渡橋の陸側支承付近のデッキプレートから14本の試験片を切り出した。

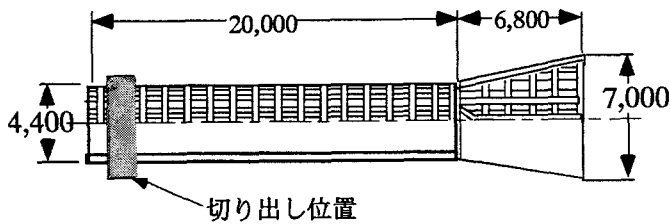
静的引張試験および疲労試験に用いた試験片を採取した部材について、渡橋のデッキプレートの通路側、洪水吐ゲート横桁ウェブプレートの下面とスキンプレートの下流側は腐食していない。したがってこれらの試験片は、片面のみ腐食した状態にある。

一方、圧縮試験片は、渡橋の陸側の横桁（ウェブ、下フランジ）とその周辺の鋼床版の縦リップの残留応力の影響が小さいと思われる場所から切り出した。なお、当初の公称板厚は、縦リップ9.5mm、横桁ウェブ9mm、横桁下フランジ12mm、である。圧縮試験片は、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。

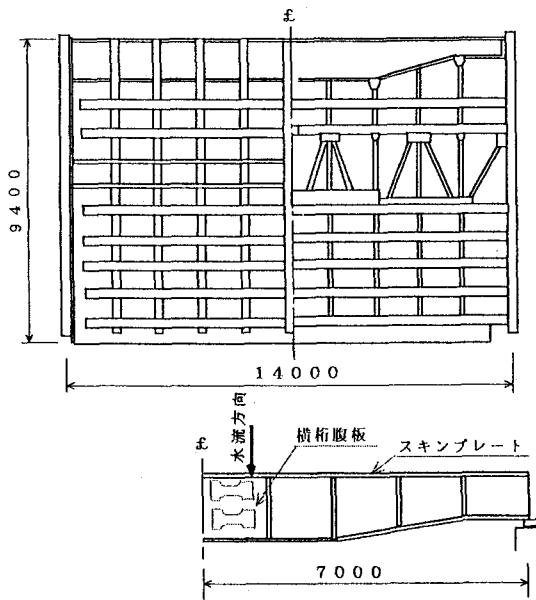
図-1にフェリー渡橋および洪水吐ゲートの概略図と試験片の切り出し位置を示す。

2.2 材料特性

腐食鋼板の試験に先立ち、腐食材の両面を平滑仕上げして引張試験を行った。試験片は、JIS1号である。結果を表-1に示す。これより、本研究で用いた鋼板（洪水吐ゲート）の鋼種は40キロ鋼に相当するものと推定される。なお、フェリー渡橋の鋼種はSS400である。



(a) フェリー渡橋



(b) ダム洪水吐ゲート

図 - 1 フェリー渡橋, ダム洪水吐ゲートの概略図と試験片採取位置

表 - 1 平滑鋼板の機械的性質

採取部材		降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)
フェリー渡橋	縦リブ	273.6	409.2	
	横桁ウェブ	277.5	410.3	
	横桁フランジ	259.7	406.5	
	デッキプレート	253.2	397.2	30.2
洪水吐ゲート	スキンプレート	283.4	429.0	26.6
	ウェブプレート	273.4	393.5	31.4

3. 引張強度特性

渡橋より採取した試験片は、4mm 間隔で引いた9本の横測線 (荷重軸方向) と51本の縦測線 (荷重軸直角方向) との交点, 計459点の板厚を、また、同様に洪水吐ゲートより採取した試験片については、2mm 間隔で引いた横測線19本、縦測線101本の交点, 計1919点の板厚をマイクロメータで測定した。図-2 に試験片の形状

と板厚測定箇所を示す。

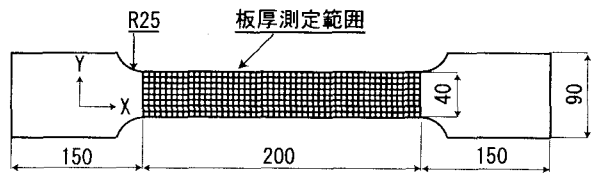


図 - 2 試験片の形状, 寸法および板厚測定箇所

3.1 有効板厚

表-2 に腐食鋼板の板厚測定結果および静的引張試験結果を示す。表中、平均板厚、最小板厚、変動係数、および腐食速度は破断部における値が記入してある。また、有効板厚 t_e は次式によって求めた⁶⁾。

$$t_e = \frac{P_y}{B \cdot \sigma_y}, \quad A_e = t_e \cdot B \quad (1)$$

ここで P_y , σ_y , B , および A_e はそれぞれ腐食鋼板の降伏荷重, 両面平滑材の降伏点, 板幅, 及び有効板厚より算出した有効断面積である。図-3 は有効板厚と板厚変動係数 V との関係を示したものである。同図より有効板厚は鋼板表面の凹凸状態を示す板厚変動係数 V の増大とともに減少する傾向が認められる。

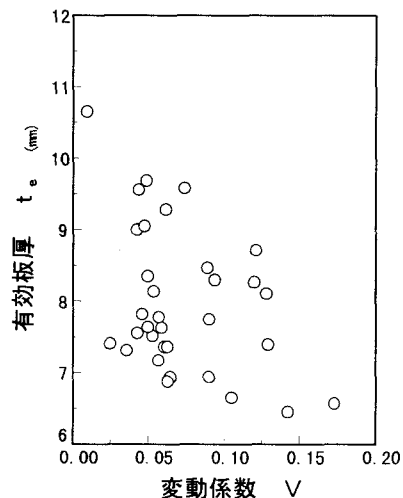


図 - 3 有効板厚と変動係数の関係

表-2 に示す有効板厚 t_e は、試験結果 P_y を用いて式(1)から算出している。しかし、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が要求される。図-4 および 5 は式(1)によって得られた有効板厚と破断面最小板厚、および破断面平均板厚との関係をデッキプレート、およびウェブプレートについて示したものである。図-4

表 - 2 腐食鋼板の静的引張試験結果, 及び破断面板厚緒量

試験片	降伏荷重 Py (kN)	引張荷重 PB (kN)	降伏比 Py/PB	伸び δ (%)	平均板厚 t _{ave} (mm)	最小板厚 t _{min} (mm)	変動係数 V	有効板厚 t _e (mm)	腐食速度 α (mm/year)
D-1	112.7	179.5	0.6279	27.5	10.94	10.76	0.009	10.65	0.071
D-2	80.6	129.7	0.6214	14.0	7.45	6.32	0.090	7.74	0.304
D-3	103.7	154.9	0.6695	20.5	8.57	7.74	0.049	9.68	0.229
D-4	105.6	180.7	0.5844	17.0	10.01	8.74	0.074	9.58	0.133
D-5	90.6	150.8	0.6008	11.5	8.46	6.71	0.121	8.71	0.237
平均値	98.6	159.1	0.621	18.1	9.09	8.05	0.069	9.27	0.195
W-1	101.5	156.8	0.6473	16.25	9.15	8.09	0.062	9.28	0.071
W-2	98.3	159.5	0.6163	20.75	9.40	8.80	0.043	8.99	0.065
W-3	92.6	145.6	0.636	15.25	8.63	7.76	0.089	8.46	0.084
W-4	99.0	158.3	0.6254	18.5	9.11	8.47	0.048	9.05	0.072
W-5	104.6	167.8	0.6234	21.25	9.61	8.76	0.044	9.56	0.059
W-6	90.7	144.5	0.6277	13.5	8.08	7.07	0.094	8.29	0.098
W-7	90.3	148.2	0.6093	13.5	8.33	6.69	0.120	8.26	0.091
W-8	75.8	129.3	0.5862	13.5	7.28	6.03	0.065	6.93	0.118
W-9	75.9	127.5	0.5953	12.5	7.48	6.27	0.090	6.94	0.113
W-10	75.2	125.8	0.5978	12.0	7.09	6.34	0.063	6.87	0.122
W-11	80.9	130.5	0.620	10.5	7.48	5.99	0.129	7.39	0.133
W-12	71.8	114.9	0.6249	8.5	7.15	5.79	0.173	6.56	0.121
W-13	72.8	109.4	0.6654	12.5	7.10	5.45	0.105	6.65	0.122
W-14	70.6	109.8	0.643	12.5	7.18	5.91	0.142	6.45	0.120
平均値	85.7	137.7	0.623	14.4	8.08	6.96	0.090	7.83	0.098
S-1	83.4	123.0	0.678	20.3	7.18	6.45	0.061	7.36	0.071
S-2	81.3	130.5	0.623	15.25	7.49	6.57	0.057	7.17	0.063
S-3	85.1	134.9	0.6308	22.75	7.75	7.03	0.053	7.51	0.057
S-4	86.3	129.5	0.6664	18.25	8.03	7.15	0.059	7.62	0.050
S-5	85.6	128.9	0.6641	14.25	7.91	7.43	0.043	7.55	0.053
S-6	83.4	130.0	0.6415	15.75	7.77	6.77	0.063	7.36	0.056
S-7	94.6	148.0	0.6392	15.0	7.63	6.72	0.050	8.35	0.060
S-8	92.1	145.1	0.6347	15.25	7.72	7.20	0.054	8.13	0.057
S-9	90.7	138.8	0.6535	14.3	7.23	5.67	0.128	8.10	0.070
S-10	83.8	128.8	0.6506	17.25	7.90	7.29	0.025	7.40	0.053
S-11	82.8	129.0	0.6419	19.3	7.70	7.26	0.036	7.31	0.058
S-12	88.6	138.8	0.6383	17.25	7.63	7.02	0.046	7.82	0.060
S-13	88.0	139.8	0.6295	16.75	7.62	6.91	0.057	7.77	0.060
S-14	86.5	138.3	0.6255	18.5	7.51	7.14	0.050	7.64	0.063
平均値	86.6	134.5	0.644	17.2	7.65	6.90	0.056	7.65	0.059

D:デッキプレート, W:ウェブプレート, S:スキンプレート

より, 最小板厚と有効板厚の間にはある程度の相関があるが, ばらつきが大きく, また, 最小板厚を適用すると, 過度に安全側に評価することがわかる. これに対して, 図-5 に示すように, 平均板厚 t_{av} と有効板厚 t_e との間には, 腐食量の大小にかかわらず, 良い相関を有している. したがって, 有効板厚は平均板厚とするのがよいと判断できる. ただし, 安全性の面からは, 実際にはほぼ下限値となる $t_{av} - 0.7s$ の板厚を用いるのがよいと思われる. ここに, s は標準偏差である.

上記の平均板厚 t_{av} および標準偏差 s は, 引張

応力が作用する方向と直交方向の測線に沿う断面で測定された板厚の平均値および標準偏差であることに注意しておく必要がある. したがって, 腐食した桁の引張フランジの有効板厚を推定する場合を例にとって, 上述のことをまとめれば次のようになる.

- (1) 桁軸と直交する測線を描いてその測線上の点の板厚を測定し, その断面における測定結果の平均板厚と標準偏差を求める.
- (2) 上記(1)の操作を桁軸に沿っていくつかの断面について行う.

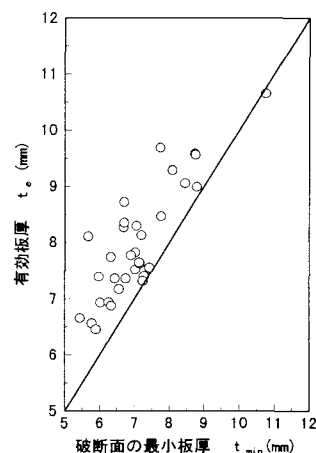


図 - 4 有効板厚と最小板厚との関係

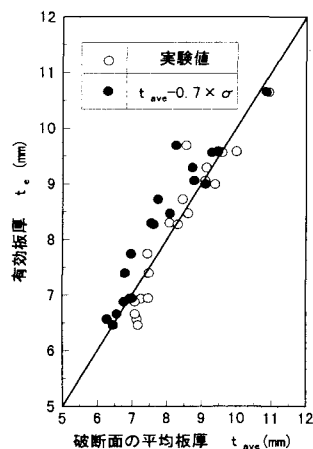


図 - 5 有効板厚と平均板厚との関係

(3)(2)で得られた各断面の平均板厚および標準偏差のうち、最小の平均板厚を与える断面を求める。本文では、この断面で最初に降伏荷重に達すると仮定している。そして、得られた平均板厚（あるいは $t_{av}-0.7s$ ）にフランジ幅と平滑材の試験で得られた降伏応力（あるいは公称降伏応力） s_y を掛けたものがフランジの引張耐力の推定値となる。

なお、実構造物における板厚測定には従来から行われているマイクロメータ、超音波厚さ計等に加え、近年、レーザ変位測定による板厚測定システム¹³⁾なども開発されつつあるが、実構造腐食部材の板厚測定については今後さらに簡易的、かつ精度の高い測定技術の開発が必要と考えられる。

3.2 強度特性

図-6 は試験片の表面形状、静的破壊位置、及び荷重軸方向(X軸)における板厚変動の一例を示したものである。図に示すように、鋼板表面の凹

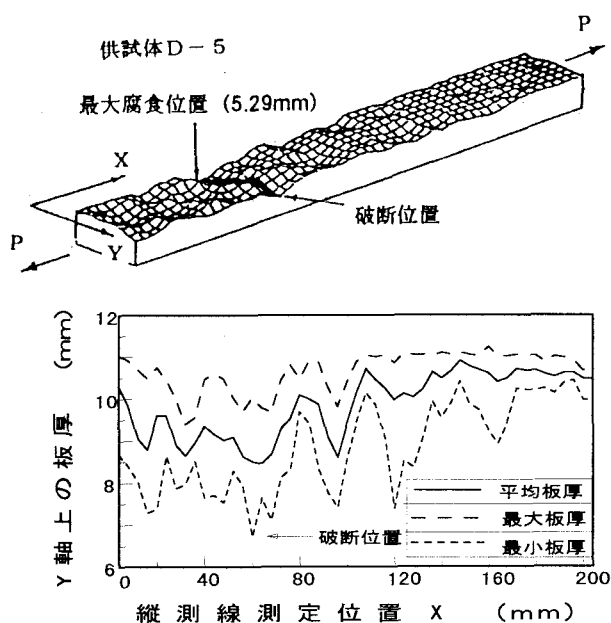


図-6 腐食鋼板の表面形状と破断位置

凸が激しく、また平均板厚の小さい試験片では荷重軸直角方向に破壊せず斜め方向に破壊を生ずる傾向が見られた。鋼板表面の凹凸が小さく、また平均板厚の大きい試験片では荷重軸直角方向に破断する。静的破壊位置は、ほぼ最大腐食位置で生じ、破壊位置の平均断面積（荷重軸直角方向断面における平均板厚×試験片の幅）は他の平均断面積に比して最小となる。従って、本試験で用い

たような試験片の場合には板厚測定結果に基づいて静的破壊位置が予測できる。

図-7 に破断面の変動係数と降伏点および引張強さとの関係を示す。これらの図で、両面平滑材のデータは変動係数=0として記入した。ここで、破断面が複数の縦測線を横断している試験片の場合にはそれらの変動係数の最大値を使用した。

腐食試験片の降伏点および引張強さは、変動係数の増加とともに平滑材の強度を下回り、同時に JIS 保証強度¹⁴⁾ よりも低くなるのが、図-7 からわかる。これは、全面腐食による平均板厚の減少と鋼板表面の凹凸状態が激しくなることに起因する鋼板表面の局部的応力集中によるといえる。

図-8 には伸び（標点間距離 200mm）と変動係数との関係を示す。なお、図-8 の変動係数は標点間距離内の全測点に対する値である。図から、腐食鋼板の伸びは、変動係数が5%以上になると JIS 規格¹⁴⁾（伸び $\geq 18\%$ ）を大きく下回るのがわかる。また、腐食鋼板の最大荷重時での標点

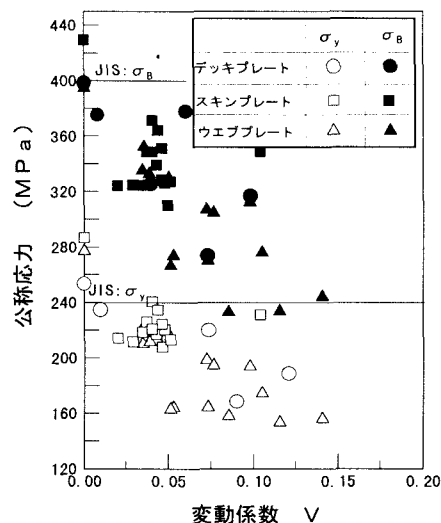


図-7 静的強度と変動係数との関係

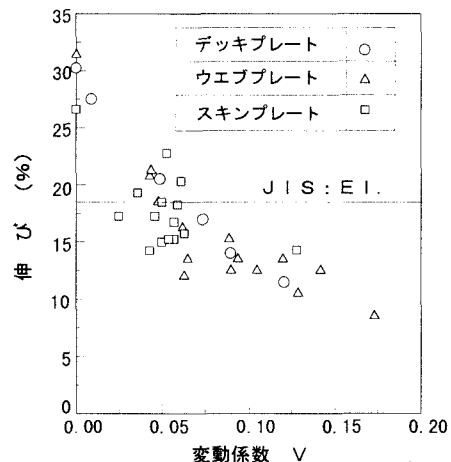


図-8 伸びと変動係数との関係

間の伸び δ と両面平滑材の降伏荷重時での標点間の伸び δ_y との比 δ/δ_y と変動係数との関係を示せば図-9 を得る。腐食鋼板の塑性変形能力は鋼板の表面形状を表す変動係数の上昇に伴って低下するが、これは、鋼板の表面形状不整が大きくなると局部的にひずみ集中を生じた孔食部でくびれを起し破壊に至るためである。この傾向は両側 notch を有する平滑鋼板の塑性変形能力と応力集中率との関係に類似している。したがって、変動係数は鋼板表面の見かけ上の応力集中率とみなすこともできよう。図-9 から塑性変形能力 δ/δ_y と変動係数 V との関係は次式によって近似できる。

$$\delta/\delta_y = \frac{1}{(0.03 + 0.7V)} \quad (2)$$

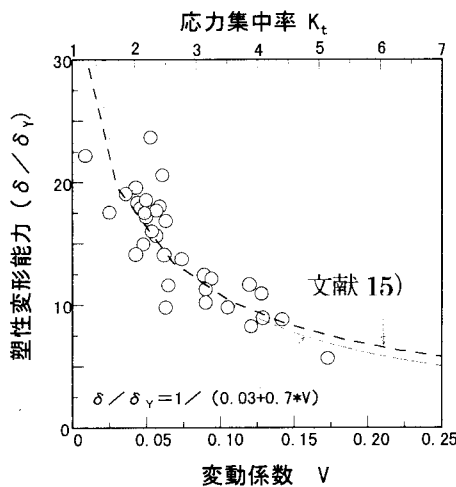


図 - 9 塑性変形能力と変動係数の関係

4. 腐食鋼板の表面性状と疲労強度

疲労試験片は、渡橋の陸側付近のデッキプレートより橋軸直角方法に採取した。板厚測定位置は、4mm ピッチで引いた 14 本の横測線（荷重軸方向）と 26 本の縦測線（荷重軸直角方向）との交点計 364 点である。図-10 に疲労試験に用いた試験片を示す。

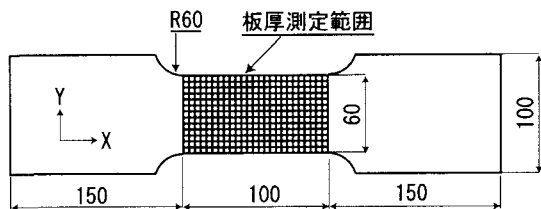


図 - 10 試験片の形状、寸法

疲労試験は繰返し速度 10Hz とする完全片振り

引張試験とした。

4.1 疲労特性

疲労試験片の表面形状、疲労亀裂発生位置の例を、図-11 に示す。静的引張試験では最大腐食位置あるいは最小断面位置で破断しているのに対して、疲労亀裂は必ずしもこの位置で生じるわけではなく、荷重軸方向における表面形状変化の激しい領域で生じる傾向にある。

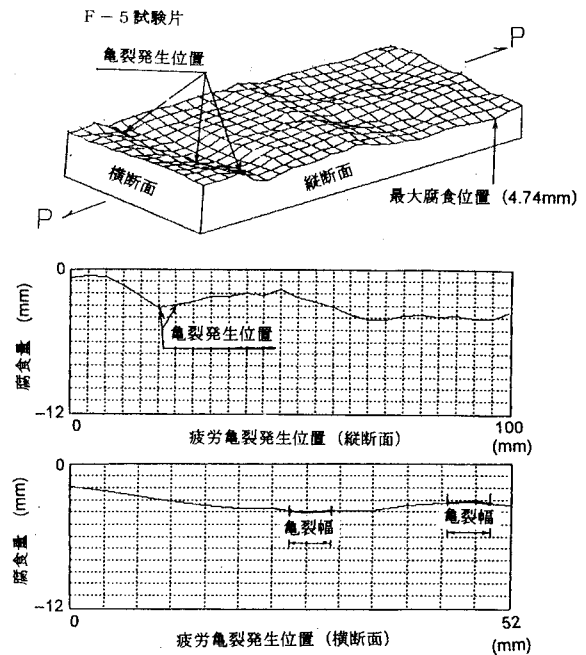


図 - 11 表面形状と疲労亀裂発生位置

この傾向を明確にするために各横断面における 14 箇所の板厚変動係数の荷重軸方向の変化を図-12 に示す。図には疲労亀裂発生位置もあわせて示した。図より、疲労亀裂は周辺の変動係数よりもそれが高くなる測線上で発生していることがわかる。これは、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。ま

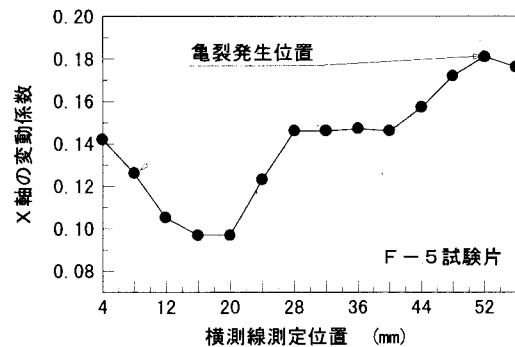


図 - 12 板厚変動係数と疲労亀裂発生位置

た、図-11 のように同一鋼板面内に複数の亀裂が発生する場合、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。

腐食によって生じた表面不整が疲労寿命におよぼす影響を見るために、各試験片の平均板厚から算定した応力範囲 S_{mr} を縦軸にとり、横軸には疲労亀裂が最大 5 mm 進展したときの繰返し回数 N_c をとって、横測線の変動係数領域ごとに分類して $S-N$ 曲線を描くと、図-13 のようになる。図から、変動係数領域ごとに分類した疲労データは比較的よい直線関係を有している。すなわち、 $0 < V \leq 0.10$, $0.10 < V \leq 0.15$, および $0.15 < V \leq 0.21$ の各領域での 2×10^6 回疲労強度は、平滑材の疲労強度 (=250 MPa) に対し、それぞれ 46%, 51%, および 58% 程度低下する。この低下は、腐食による平均板厚減少と表面不整に起因する応力集中に起因する。そして、腐食による鋼板表面の凹凸が疲労寿命に対して極めて高い切欠き感受性を有していることが図-13 からわかる。なお、変動係数 V が、 $0.15 < V \leq 0.21$ における 2×10^6 回疲労強度は $JSSC$ 指針で規定している強度等級 D に対応する。

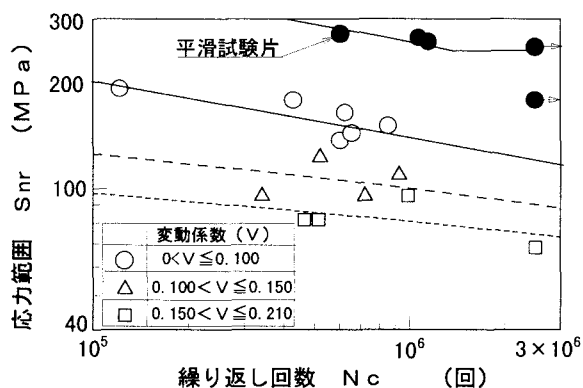


図-13 $S_{mr} - N_c$ 関係

一般に、切欠きがあると応力集中のため疲労強度は低下する。この低下の程度は次式に示す疲労強度減少係数 K_f によって表される。

$$K_f = \frac{\text{切欠きがない場合の } N_i \text{ における疲労強度}}{\text{切欠きがある場合の } N_i \text{ における疲労強度}} \quad (3)$$

ここに、 N_i は任意の繰返し回数である。図-13 に示す変動係数領域に対して 2×10^6 回における K_f は、それぞれ 1.84, 2.06, 2.40 となる。また、切欠きの鋭さは切欠きによる理論弾性応力集中係数 (形状係数) K_t によって表される。破断寿命 N_f を基準とした場合、 K_t の小さい範囲では $K_f \approx K_t$, K_t が大きくなると K_f は K_t にあまり依

存しなくなり、疲労強度は一定値に漸近する¹⁶⁾。しかし、飯田ら¹⁶⁾はこの概念が、破断寿命 N_f に対して正しく、肉眼亀裂発生寿命 N_c レベルでは正しくないことを示し、一連の試験研究に基づいて $K_t - K_f$ 関係として次式を提案した。

$$K_f = 1 + (K_t - 1) / \left\{ 1 + mE(S_{mr})^{(1-n)/n} \right\} \quad (4)$$

ここで、 S_{mr} は同一寿命における平滑材の時間強度 (公称応力範囲)、 m と n とは平滑材の $\epsilon = (\sigma/E) + (\sigma)^{1/n}$ における定数である。文献 16) によれば、本試験結果での K_f の上限値 ($K_f = 2.40$) 程度では N_f および N_c 基準で K_t と K_f とはほぼ同等といえる。従って、ここでは、 $K_t - K_f$ 関係を N_c 基準に準じて以下に検討を加える。

図-14 は上記 3 領域に分類した変動係数 V に対して最小二乗法によって求めた $S_{mr} - N_c$ 曲線を各領域におけるすべての実験点に適用し、それぞれの実験点に対応する 2×10^6 回疲労強度から K_t を求め、 V と K_t との関係を示したものである。図中の破線は K_t 曲線の $K_t \pm \sigma$ (σ : 標準偏差) を示す。なお、式(4)における m , および n は別途実施した繰返し応力-ひずみ試験より、それぞれ $m = 1.54 \times 10^{-13}$, および $n = 0.173$ を用い

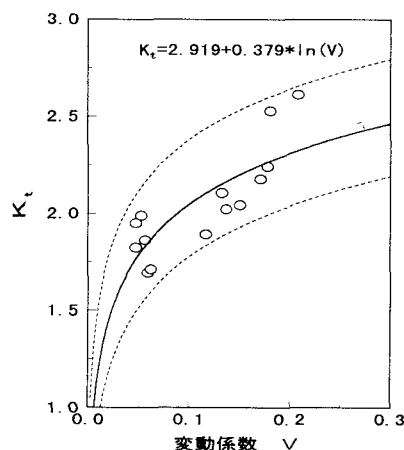


図-14 V と K_t との関係

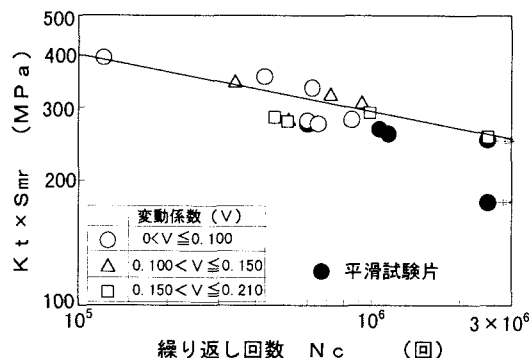


図-15 $K_t \times S_{mr} - N_c$ 関係

た。

図-15 は図-13 に示した個々の $S_{mr}-N_c$ 関係を、図-14 に示す K_t-V 関係で補正して描いた $S-N$ 関係である。これは、腐食によって表面形状不整を生じた鋼板面の局部応力を基準とした $S-N$ 曲線ともいえる。図-15 に示すように各腐食鋼板の疲労データはほぼ一本の $S-N$ 曲線付近に分布しているといえる。腐食鋼板の疲労寿命は鋼板表面の凹凸状態、すなわち、板厚変動係数を求めることによって、図-15 から推定できる。

5. 座屈強度特性

5.1 実験概要

圧縮試験片は、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を用いて作成した。これらの鋼種はSS400である。試験片は、幅3cmの短冊状の矩形板で、長さを変化させて、36本作成した。座屈を支配するパラメータは、板厚の他に、中立面からの偏心量がある。ここでは、試験片の一方の表面に5mm間隔の格子状

表-3 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。

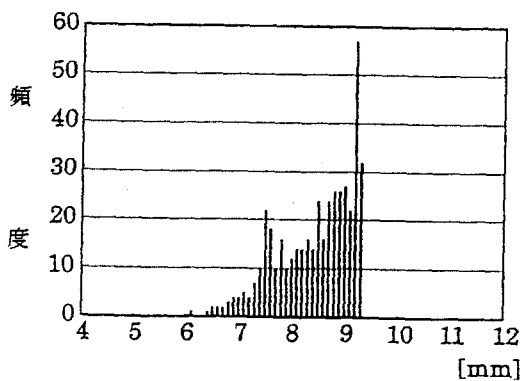


図-16 板厚のヒストグラム (CR-450-2)

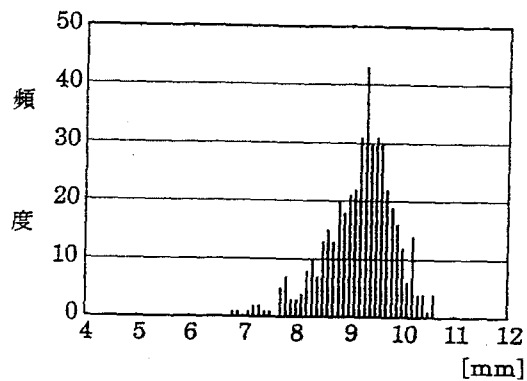


図-17 板厚のヒストグラム (CF-450-1)

のメッシュをけがき、その格子点の板厚と偏心量を測定した。今回の実験では、中立面（圧縮試験における軸線）を適当に設定して板の中央面との距離を求め偏心量とした。したがって、片面腐食などによる実際の偏心量を示すものではない。測定結果を試験結果とともに表-3 に示す。表中、平均板厚と標準偏差は、全測定点の板厚測定結果に対する値である。

測定された板厚のヒストグラムの代表例を図-16, 17 に示す。図-16 の試験片は元の板厚 9.5mm で、最大 3mm 程度の減肉がある。全体的にみれば腐食は少ないが、局所的な腐食がみられる。図-17 では、腐食は激しく表面にかなりの凹凸がある。

また、偏心量は、表-3 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。

実験は、試験片の中立面と載荷面が一致するように注意して試験機に据え付けた。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。写真-1~2 に載荷状態の状況を示す。

座屈モードについては、試験片全体が正弦半波形（全体座屈；写真1参照）と試験片の一部が折れ曲がる写真-2 のようなたわみ形（局部座屈）の2種類が現われた。表-3 で、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、試験片の局部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場合は全体座屈が現われる。また、表-3 からわかるように、測定板厚の標準偏差と座屈崩壊形式を比較すると、いくつかの例外はあるが、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。

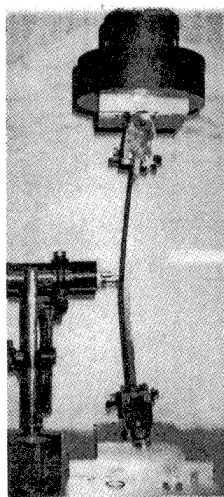


写真-1 全体座屈崩壊

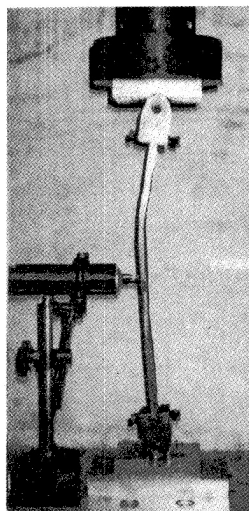


写真-2 局部座屈崩壊

5.2 有効板厚と座屈耐荷力曲線

表-3 に示す座屈強度試験結果と座屈理論解と比較する。ここに l は表-3 に示す有効座屈長、 E は弾性係数で、 I は断面 2 次モーメント ($=bt^3/12$, b : 板幅=3cm, t : 評価基準板厚) である。いま、評価基準板厚に平均板厚 t_{av} を適用すると、例えば弾性座屈する長い試験片 CR-350-3 の場合、実験値 P と弾性座屈荷重 P_{cr} の比 $PP_{cr}=0.92$ ($P_{cr}=20.84kN$, $P=19.19kN$) 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。そこで、板厚の標準偏差 σ_t を考慮した $t_{av}-\sigma_t$ を評価板厚として採用すると、安全側の評価が可能になる。したがって、残存圧縮強度評価においては、有効板厚として $t_{av}-\sigma_t$ 程度を用いるのがよいと考えられる。

等価板厚に $t_{av}-\sigma_t$ を適用して、細長比パラメータを横軸に、縦軸に圧縮強度 σ_u 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-18 のようになる。図では、全体座屈崩壊を○で、局部座屈崩壊を●で示した。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である。

実験結果を基に求めた回帰曲線を破線で図-18 にあわせて示す。さらに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。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \left(\frac{0.628}{\lambda} \right)^{1.04} - 0.083 \quad (5)$$

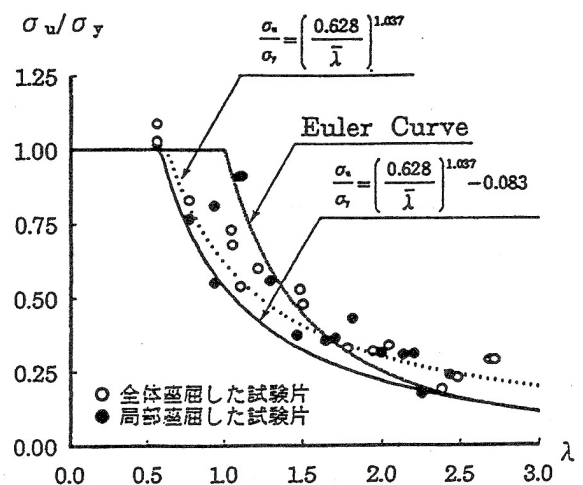


図-18 耐荷力曲線

5.3 偏心量の影響

表-3 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 $t_{av} = \sigma_t$ 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 を求め、曲げと軸力を受ける強度相関を示せば図-19 を得る。ここで P_u の計算には *ECCS b* 曲線によった。図-19 から、本実験の偏心量は小さく、ほとんどの場合偏心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量で、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とは異なる。この影響は、今後十分に検討すべき課題であるといえよう。

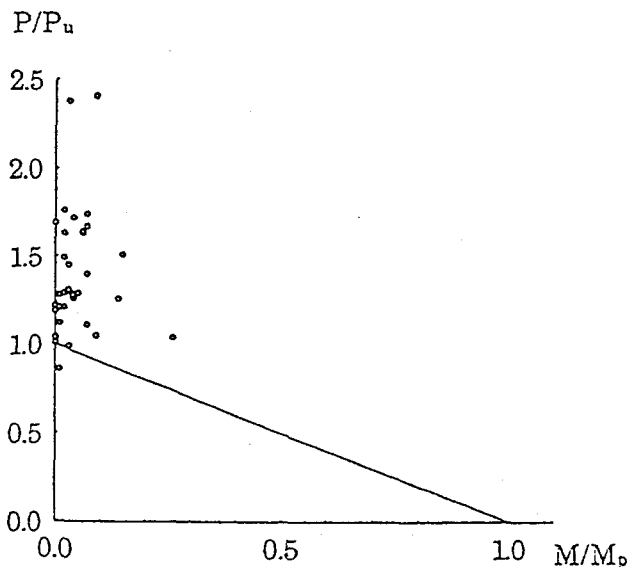


図-19 曲げと圧縮の強度相関

6. あとがき

腐食鋼板の表面形状、ならびに力学性状を明らかにするために、供用下で腐食した鋼板の静的引張試験、座屈試験および疲労試験を実施した。得られた主な知見を挙げると次のようである。

まず、静的引張強度特性については、

- (1) 静的引張試験結果より、腐食鋼板の降伏点、引張強さ、及び伸びは板厚変動係数の上昇とともに低下する。
- (2) 鋼板の塑性変形能力 δ/δ_y は腐食によって低下する。腐食鋼板の塑性変形能力 δ/δ_y は板厚変動係数 V を用いて、次式により算定することができる。

$$\delta/\delta_y = 1 / (0.03 + 0.7V)$$
- (3) 応力評価に対する有効板厚は（平均板厚

$-0.7 \times \sigma$ ）として算定すれば安全側の評価が可能となる。

疲労特性については、

- (4) 腐食鋼板の疲労亀裂の発生は荷重軸方向（横測線）の板厚変動係数の高い領域で発生する。また、複数の亀裂が発生した場合、板厚変動係数の高い位置で発生した亀裂が優先的に進展する。
- (5) 腐食鋼板の $S-N$ 関係は鋼板面の板厚変動係数 V から推定した K_f を用い、応力範囲 $S = K_f \times S_{m,r}$ として算定すれば腐食状態にかかわらずほぼ 1 本の $S-N$ 関係で整理できる。

座屈強度については、

- (6) 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。板厚の標準偏差が概ね 0.7 以上の場合には局部座屈、0.7 以下の場合全体座屈となる。
- (7) 有効板厚として（平均板厚・標準偏差）を用い圧縮耐荷力曲線式 (5) を提案した。

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。
- 2) 建設省土木研究所：設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究，土木研究所資料第 2420 号，昭和 61 年 11 月。
- 3) 国広哲男，井上啓一，福田孝男：耐候性鋼材の大気暴露調査，土木研究所資料，No.729，1972。
- 4) 阿部英彦，稲葉紀昭，江口保平：腐食鋼板の疲労強度，国鉄構造物設計資料，No.34，pp.4~6，1973。
- 5) 小川一義，猿木勝司，浅野高司，鈴木憲一：塩水腐食した熱間圧延鋼板の疲労強度低下要因の検討，材料，Vol.34，No.385，pp.1215~1216，1985。
- 6) 松本勝，白井義朗，中村幾雄，白石成人：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。
- 7) 岡 実，北田博重，渡辺富雄：腐食材の静的強度に関する実験的考察，日本造船学会論文集，第 167 号，pp.229~236，1990。
- 8) 伊藤 叡，佐藤 栄次，村田 朋美：極値解析による港湾鋼構造物の腐食量の推定，腐食防食討論会予稿集，pp.113~116，1981。

- 9) 日本材料学会：疲労設計便覧, pp.241~243, 1995.
- 10) 阪神高速道路公団：防錆橋梁追跡調査報告書、1984.
- 11) 日本鋼構造協会：公共構造物の信頼性評価—構造物の信頼性評価技術開発特別委員会報告一, pp.42~50, 1985.
- 12) K.Fujii, M.Satoh, O.Minata, H.Ohmura, A.Muranak : A Proposal on Effective Thickness for Evaluation of Buckling Strength of Corroded Steel Plate , Proceeding of the Fifth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Vol.3, pp.2105~2110, 1995.
- 13) 生賀裕志, 池田 誠, 松岡 敬, 東森 充：腐食を受けた構造用鋼材の表面形状認識システムおよび有効板厚評価, 土木学会第52回年次学術講演会, VI-274, pp.548~549, 平成9年9月.
- 14) 日本工業規格, J I S G 3 1 0 1, 1976.
- 15) 森脇良一, 林 健治：切欠き材の塑性変形能力について, 鋼構造論文集, 第2巻, 第8号, pp.1~12, 1995.
- 16) 飯田 國広, 高 充宝：ヒステリシスエネルギーに基づいた疲労強度減少係数の一考察, 日本造船学会論文集, 第134号, pp.341~350, 1973.
- 17) 村上茂之, 西村宣男, 亀井義典：腐食鋼板の等価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.
- 18) 村中昭典, 皆田理, 藤井堅：腐食鋼板の表面性状と残存耐荷力, 構造工学論文集, Vol.44A, PP.1063-1071, 1998.