

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

FATIGUE STRENGTH OF TWO- AND FOUR-YEAR WEATHERED WELDMENTS OF WEATHERING STEELS AND STRUCTURAL STEEL

山田健太郎*・村山 眞**・近藤明雅***・菊池洋一****

By Kentaro YAMADA, Makoto MURAYAMA, Akimasa KONDO
and Yoichi KIKUCHI

1. ま え が き

鋼橋の維持管理のコストに占める塗装費の割合の増加から、耐候性鋼の無塗装使用が検討されている。本研究は、その一環として、耐候性鋼および普通鋼（50 キロ鋼）溶接継手を、無塗装で大気暴露したときの疲れ強さの経年変化を、実験的に検討したものである。実験には、SM 50 と SMA 50 鋼で製作したリブ十字形隅肉溶接継手とガセット溶接継手を用い、2年間および4年間大気暴露後に疲れ試験を実施して、無暴露材の疲れ強さと比較した。

鋼構造物の長期にわたる安全性・信頼性を確保するためには、鋼材の腐食に対する対策が必要である。このため、塗装、金属溶着、金属溶射などの異種材料による鋼材の保護法が採られている。近年欧米を中心に使用されるようになった耐候性鋼は、これとは違って、鋼材自身の形成するち密なさびで鋼材表面を保護する性質をもつ。このため、塗装が不要になることから、わが国でも建築物や橋梁の使用実績が上がってきている¹⁾。

耐候性鋼を構造物に使用する際、安定さびとよばれるち密なさび層の形成が不可欠である²⁾。この安定さび形成のため、使用環境の制限や、最適な構造形式の選定などの研究が行われており³⁾、今後は実橋を長期間モニターする形でのデータの蓄積がなされてゆくと思われる^{2)~4),10)}。

耐候性鋼を無塗装使用した場合、安定さびが形成されるまでの期間に、必ずさびが発生する。このさびが、静

的耐荷力および疲れ強さに及ぼす影響を検討しておかなくてはならない⁶⁾。このうち、静的耐荷力については、鋼材表面のさびによる断面欠損が、構造部材として使用される板厚に比べて微小であることから、その影響を無視しても差し支えない。文献 6) の実験でも、暴露前、暴露2年後、暴露4年後の降伏点、引張強さ、伸び、絞りともに、大気暴露の影響はみられない。ちなみに、このときの腐食の著しいのは普通鋼で、その腐食減量は、 175 mg/cm^2 であり、板厚に換算すると、平均で0.2 mm程度である。

疲れ強さに及ぼす影響は、さびが孔食 (pit hole) や表面粗さの増大につながるため、平滑材で顕著に現われる。前述の文献 6) の研究では、耐候性鋼と普通鋼、50 キロ鋼と 60 キロ鋼、母材と仕上げた突合せ溶接継手の要因を組み合わせた8種類の試験片について、800本以上の疲れ試験を実施した。この結果、材料や継手形式によらず、2年間および4年間の大気暴露後の200万回疲れ強さは、暴露前の70~80%に低下することがわかった。4年間ほど大気暴露すれば、耐候性鋼では一般に安定さびが形成されることを考え合わせると、平滑材の大気暴露による疲れ強さの低下は、この程度で落ち着くと考えられる。実構造物では、疲れが問題になるのは、溶接止端のように応力集中のある部分である。大気暴露による孔食や表面粗さの増大が、このような溶接継手の疲れ強さに与える影響についての実験例は比較的少ない。Albrecht らは、ASTM A 588 鋼を用いたリブ十字形隅肉溶接継手と付加物溶接継手による疲れ試験を行って、大気暴露による疲れ挙動の変化を追跡した^{17)~19)}。この研究では、4年間の大気暴露によって、寿命の平均で21%低下した例もあり、耐候性鋼を用いた構造物の疲れに対する注意をうながしている。ただし、データのばらつきを考慮した場合は、寿命に有意差はみられな

* 正会員 Ph.D. 名古屋大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 東京都(前・名大大学院)

*** 正会員 名城大学講師 理工学部土木工学科

**** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

い¹⁹⁾。

2. 疲れ試験の概要

(1) 疲れ試験片の製作と大気暴露

試験片の形状を、Fig. 1 に示す。使用鋼材は、耐候性鋼 SMA 50 と、比較のための普通鋼 SM 50 で、それぞれ JIS G 3114 と G 3106 の規格に相当する。この鋼材の化学成分と機械的性質を、それぞれ Table 1 と Table 2 に示す。リブ十字形隅肉溶接継手は、所定の鋼板から、10×600×2 000 mm の主板と、10×60×2 000 mm の補剛板 2 枚をガス切断し、3 枚の板を十字形になるように仮付け溶接した後、手溶接した。次に、バンドソーを用いて、幅 80 mm に切断して、所定の試験片寸

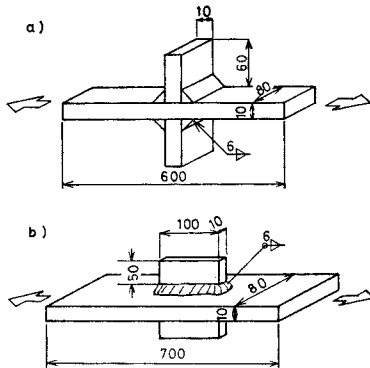


Fig. 1 Fatigue test specimens : a) Non-load carrying fillet welded specimen (stiffener specimen); and b) tensile specimen with longitudinal attachments (gusset specimen).

Table 1 Chemical composition of structural steels.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V
SMA 50 A*	0.14	0.23	1.14	0.023	0.01	0.27	0.42	0.03
SMA 50 A	0.17	0.25	1.04	0.018	0.009	0.28	0.44	0.03
SM 50 A	0.18	0.32	1.30	0.015	0.011			

* Steel used for pilot tests.

Table 2 Mechanical properties of steels.

Steel	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
SMA 50 A*	402	549	22
SMA 50 A	421	578	18
SM 50 A	372	549	23

* Steel used for pilot tests.

Table 3 Chemical composition of manual arc welding electrodes.

Steel	JIS	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
SMA 50	D 5026	0.05	0.11	1.39	0.019	0.013	0.58	0.24	0.26
SM 50	D 5016	0.07	0.64	0.89	0.010	0.009			

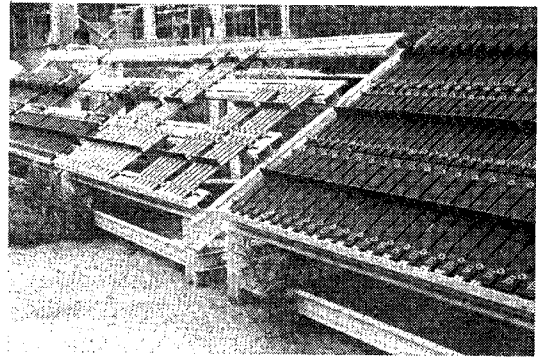


Photo 1 Weathering racks and fatigue test specimens.

法とした。また、ガセット継手は、所定の鋼板から 10×86×700 mm の板をシャー切断した後、その切断縁を 3 mm ずつ機械仕上げして主板とした。これに、10×50×100 mm の板を仮付け溶接した。本溶接は、ガセットの中央部から出発して、全周にわたってアークを止めずに行った。また、溶接は、1 人の溶接工が手溶接ですべて実施し、溶接工の違いによる差が生じないように配慮した。また、試験片は、すべてサンドブラスト処理を施して表面を清浄にした。溶接棒は、耐候性鋼 SMA 50 には、JIS D 5026 相当の鉄粉低水素系溶接棒を、構造用鋼には、JIS D 5016 相当の低水素系溶接棒を用いた。使用した溶接棒の化学成分を Table 3 に示す。

試験片の暴露は、埋立地に建設された鉄構工場内に架台を設置し、特製の碼子を介して、南向き 30° の角度で実施した (Photo 1)。暴露地点は、海岸地帯と工場地帯の両因子を含む環境であるが、海岸から約 1 km 離れており、化学薬品や亜硫酸ガスの影響は少ないと考えられる。大気暴露は、昭和 52 年 9 月に開始し、2 年暴露材は、約 20 か月間暴露した後、昭和 54 年 5 月に架台からはずして、室内での疲れ試験を行った。また、4 年暴露材は、昭和 56 年 6 月まで約 45 か月間、大気暴露した。

(2) 疲れ試験

疲れ試験は、アムスラー型万能疲れ試験機 (容量 980 kN) を用いて、応力比 0.1~0.3 の定荷重振幅で行った。荷重繰り返し速度は、毎分 540 回である。溶接変形を生じた試験片は、580 mm のスパンの中央で、0.5 mm 以下の変形になるようにプレスで矯正した。また、試験片ごとにひずみゲージを 2 枚または 4 枚貼付し、偏心除去と動的荷重の校正を行った。

作用応力範囲 σ_r は、比較を容易にするため、127, 147, 177, 245 MPa の 4 レベルとし、そのうち 3 レベルで 3 本ずつ繰り返し試験するのを原則とし

た。また、無暴露材については、SMA 50 (板厚 9 mm) を用いた予備試験を実施した。これは、試験片の製作条件や疲れ試験条件を決めるために行ったもので、これ以降の試験も同じ条件で行った。したがって、このデータも無暴露材のデータとして取り扱った。

無暴露材の疲れ試験は、昭和 52 年に実施した。以後ほぼ 2 年ごとに、2 年暴露材と 4 年暴露材を疲れ試験した。なお、疲れ試験片は、無作為に抽出して実験した。

3. 疲れ試験結果と考察

リブ十字形隅肉溶接継手とガセット継手の疲れ試験結果を、それぞれ **Table 4** と **Table 5** に示す。表の > 印のついたものは、その繰り返し数で破断しなかったことを示す。また、かっこ内には、その応力レベルで試験された試験片の対数平均値を示す。この計算には、破断しなかったものについても、そのときまでの繰り返し数を考慮した。また各試験系列ごとの $S-N_f$ 線図を、破断までの繰り返し数を用いて計算し、**Table 6** に示す。 $S-N_f$ 線図は、次式のように仮定した。

$$\log N_f = B1 + B2 \log \sigma_r \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 N_f は、試験片が破断するまでの繰り返し数、 σ_r は、応力範囲 (MPa) である。**Table 6** には、標準偏差 s と、相関係数 r も示す。

(1) リブ十字形隅肉溶接継手の結果⁹⁾

この継手では、隅肉溶接止端に発生した疲れ亀裂が進展して、破断した。試験片幅が 80 mm あるので、溶接止端に沿って、複数個の半楕円形亀裂が発生した。亀裂形状は、半楕円形のままで進展する場合と、複数個の亀裂が合体しながら進展する場合があって、ばらつきが大きい。この疲れ亀裂の発生・進展挙動については、2 年暴露材と 4 年暴露材は、無暴露材に比較して、顕著な差はみられなかった。また、SMA 50 と SM 50 の鋼種の違いによる差もみられなかった。

疲れ試験の結果を、 $S-N_f$ 線図として **Fig. 2** ~ **4** に示す。まず、比較の基本となる無暴露材の結果では、予備試験材 (SMA 50*)、SMA 50 および SM 50 の鋼種の違いによる寿命の差はみられず、ほぼ等しい疲れ寿命を示す。 $\sigma_r = 127$ MPa で試験した 2 本と、 $\sigma_r = 147$ MPa で試験した 8 本のうちの 3 本は、 5×10^8 回以上の繰り返し数でも破断しなかった。隅肉溶接止端形状のばらつきが、疲れ限度に影響すると思われるので、疲れ限度の決定に

Table 4 Fatigue test results of stiffener specimens.

(MPa)	Non-weathered			2-year		4-year	
	SMA 50*	SMA 50	SM 50	SMA 50	SM 50	SMA 50	SM 50
245	172	242	268	379	379	740	482
	216	217	170	318	634	233	368
	307	274	219	267	440	578	392
	(225)	(242)	(215)	(318)	(473)	(464)	(411)
177	565	774	660	955	631	1 733	974
	821	432	826	1 859	> 2 212	> 4 468	1 694
	741	822	608	1 034	720	652	> 4 746
	(700)	(650)	(692)	(1 227)	(> 1 002)	1 506	1 386
147	2 117	2 160	> 5 479	> 3 250	> 3 470	> 4 751	> 4 490
		1 820	1 172	> 3 030	1 790	> 4 707	> 4 513
		> 5 027	1 717	2 738	> 3 619	> 3 931	> 4 675
		> 5 340	(> 3 205)	(> 2 226)	(> 2 999)	(> 2 820)	
127	> 10 011						
	> 5 236						

Fatigue life in kilocycles.
* Steel used for pilot tests.

Table 5 Fatigue test results of gusset specimens.

(MPa)	Non-weathered			2-year		4-year	
	SMA 50*	SMA 50	SM 50	SMA 50	SMA 50	SM 50	
245	123	135	144	195	177	150	
	109	130	137	168	166	248	
	158	154	151	154	213	130	
	(128)	(139)	139	(172)	(184)	(169)	
177	359	323	422	360	668	415	
	373	314	709	377	327	532	
	321	372	356	348	357	631	
	(350)	297	(474)	(361)	(427)	(518)	
147				2 370	662		
				705	915		
				1 100	> 4 477		
				(1 225)	(> 1 395)		
127	1 040	1 322	958	> 2 990	1 624	1 086	
	1 005	> 5 333	787	1 179		968	
	720	1 028	777	1 056		623	
	1 310	> 5 340	(837)	(> 1 550)		(868)	

Fatigue life in kilocycles.
* Steel used for pilot tests.

Table 6 Summary of fatigue test results.

	Stiffener Specimens			Gusset Specimens		
	0-year	2-year	4-year	0-year	2-year	4-year
No. of specimens	28	18	20	31	12	19
Run-out data	5	5	8	2	2	1
B1	14.495 5	13.165 5	13.495 3	12.268 1	12.287 5	11.550 7
-B2	3.832 2	3.176 5	3.291 9	2.982 8	2.962 2	2.631 2
s	0.099 7	0.144 4	0.165 6	0.084 2	0.077 8	0.118 4
r	-0.960 6	-0.891 9	-0.819 7	-0.972 3	-0.973 9	-0.932 7

は、多数のデータが必要であるが、上記の実験結果から、この試験片の $5 \times 10^6 \sim 10^7$ 回相当の疲れ限度 σ_{rD} を、127 MPa 程度とみなす。同図に、金属材料技術研究所で行われた SM 50 (板厚 9 mm) の実験結果も示す⁹⁾。本実験とほぼ等しい疲れ寿命を示すことがわかる。ただし、疲れ限度については、 $\sigma_r=100$ MPa でも破断しているの、それ以下の疲れ限度をもつと思われる。

Fig. 2 では、無暴露材で破断した 23 本の試験片の平均 $S-N_f$ 線図と、2 s だけ左右にシフトしたデータのばらつきを示す $S-N$ 線図も示す。データの 95% 信頼区間を示すもので、以下の比較に用いる。

Fig. 3 と **Fig. 4** に示す 2 年暴露材と 4 年暴露材の疲れ寿命は、ほぼ等しい傾向を示す。両者とも無暴露材と同等かそれ以上の寿命を示している。また、 $\sigma_r=245$ MPa と 177 MPa のデータのばらつきが大きく、疲れ

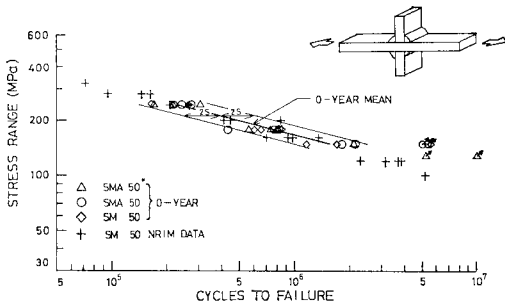


Fig. 2 Fatigue strength of non-weathered stiffener specimens.

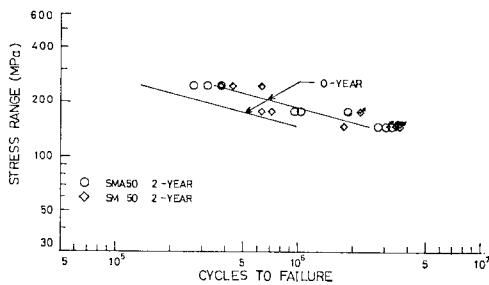


Fig. 3 Fatigue strength of two-year weathered stiffener specimens.

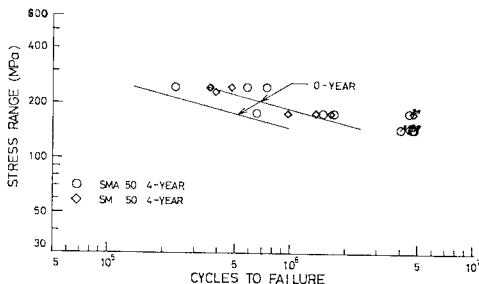


Fig. 4 Fatigue strength of four-year weathered stiffener specimens.

寿命に影響を及ぼす止端形状が、暴露によって変化したことを示唆している。 $\sigma_r=147$ MPa では、2 年暴露材が 6 本中 4 本、4 年暴露材が 6 本すべて破断しなかった。さらに、 $\sigma_r=177$ MPa で試験した 2 年暴露材で 1 本、4 年暴露材で 2 本破断しなかったものがあり、疲れ限度が無暴露材より高くなっていることが推定される。

(2) ガセット継手の結果¹⁰⁾

疲れ亀裂は、すべてガセット端のまわし溶接の止端から発生し、半楕円の形状を保ちながら板厚方向に進展した。亀裂が深さ約 1 mm 以下では、1 個の亀裂が観察される場合と、複数個の亀裂が観察される場合があった。亀裂が大きくなると、複数個の亀裂は合体しながら進展し、1 個の半楕円形亀裂になる。ガセット試験片でも、暴露材の疲れ亀裂発生と進展挙動は、無暴露材のそれと差がなく、大気暴露による影響はみられない。また、鋼材の差の影響もみられなかった。

疲れ試験の結果を、 $S-N_f$ 線図として、**Fig. 5~7** に示す。無暴露材では、予備試験材 (SMA 50*)、SMA 50、SM 50 の疲れ寿命に有意な差はみられない。 $\sigma_r=127$ MPa で試験した 8 本のうち、2 本が 5×10^6 回以上の繰り返し数で破断しなかったが、他の 6 本が 1.3×10^6 回以下で破断しているの、疲れ限度は、127 MPa を下回るものと思われる。**Fig. 5** の平均 $S-N_f$ 線図および信頼区間は、破断した 29 本のデータから求めたもの

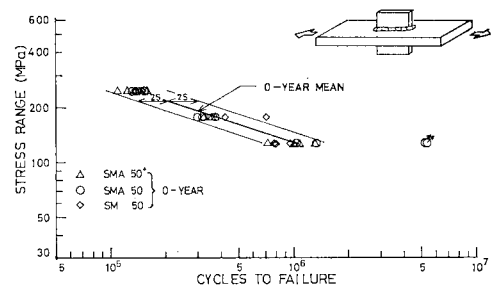


Fig. 5 Fatigue strength of non-weathered gusset specimens.

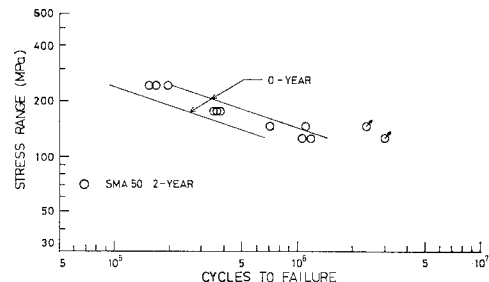


Fig. 6 Fatigue strength of two-year weathered gusset specimens.

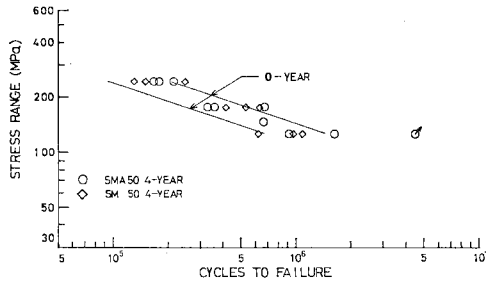


Fig. 7. Fatigue strength of four-year weathered gusset specimens.

で、比較の基準となる無暴露材の疲れ寿命の平均とばらつきを示すものである。

Fig. 6 では、2本暴露材の疲れ寿命を、無暴露材と比較している。いずれのデータも、無暴露材の寿命のばらつきの下限より長い寿命を示している。また、Fig. 7 には4年暴露材の疲れ寿命を示す。 $\sigma_r=127\text{ MPa}$ で試験された1本が、無暴露材の寿命の下限値より少し短い寿命を示したほかは、すべて無暴露材の下限値より長い寿命を示しているのがわかる。したがって、ガセット継手においても、大気暴露による疲れ寿命の低下はみられなかった。

(3) 疲れ亀裂発生寿命

リブ十字形隅肉溶接継手とガセット継手の疲れ亀裂進展挙動については、すでに文献 8) と 10) で、破壊力学の手法を用いて解析した。この解析では、おもに応力集中のばらつきと、亀裂の形状変化の影響を検討した。また、亀裂形状にかかわらず、初期亀裂長さを、 $a_0=0.2\text{ mm}$ と仮定した。本実験で示した2年暴露材と4年暴露材の疲れ亀裂の進展挙動(亀裂形状)は無暴露材のそれと変わらなかったこと、亀裂は母材中を進展することから、疲れ亀裂進展寿命には差がないと推定できる。したがって、本実験で示した大気暴露による疲れ寿命の差は、おもに疲れ亀裂発生寿命の差と考えられる。ここで、疲れ亀裂発生寿命は、亀裂が $a_0=0.2\text{ mm}$ になるまでの寿命と定義する¹⁰⁾。この疲れ亀裂発生寿命は、表面粗さや溶接止端形状に影響されるといわれており¹¹⁾、これらの大気暴露による経年変化を調査する必要がある。次節にその一例を示す。

4. 表面粗さと溶接止端形状の変化の測定

(1) 平滑部の外観と表面粗さ

大気暴露により、試験片表面にはさび層が発生する。肉眼検査によると暴露材は、SMA 50 と SM 50 ともに、褐色のあばた状のさびで覆われており、両鋼種と

も暴露した際の下面の方が上面より粗い。また、上面のさびの方がち密である。これは、ほこりなどが雨によって洗い流されるため、上面の方が安定なさびの発生の条件がよかったと考えられる^{1),7)}。

平滑部のさび層の厚さ

と腐食による鋼材表面の凹凸は、Fig. 8 に示すように定義できる。これを、研削盤を用いて表面から約 0.05 mm ずつ削り、その間の表面の変化を観察する方法で測定した。さび層の厚さ h_1 は、0.1~0.2 mm 程度で、4年暴露材の下面が他より 50% 程度大きい。SM 50 と SMA 50 の差は、みられなかった。このさび層は、応力の分担をしないと思われるので、平滑材の大気暴露後の疲れ挙動には、鋼材表面の凹凸およびその鋭さが影響するものと思われる。本研究では、Fig. 8 に示す凹凸の深さ h_2 を測定したが、これは、JIS B 0601「表面粗さ」¹⁶⁾ に定義されている最大高さに相当する。今回の測定法では、さび層を除去して地金が露出してから、さびによるピットがすべて消滅するまでの厚さである。この結果、無暴露材の h_2 が、サンドブラスト処理によって最大 0.1 mm (100 S) 程度であるのに比べて、暴露材では、0.2~0.3 mm (200~300 S) 程度に増加していた。これも、鋼材の差や上下面の差の影響がみられず、ほぼ同じ傾向を示した。

平滑材が大気暴露された場合、Fig. 9 に示すような過程を経て、疲れ強さに影響するものと思われる。まず平滑材の表面が腐食するが、この腐食は一様でなく、腐食孔が発生する。この腐食孔が応力集中を生じ、疲れ亀裂の発生源となる。このため、疲れ強さは無暴露材と比べて低下する。土木研究所の報告にある母材および仕上げた突合せ溶接継手が、70~80% に低下するのは、このメカニズムが作用したと思われる。

(2) 隅肉溶接止端形状の変化

大気暴露による隅肉溶接止端形状の変化を把握するため、予備のリブ十字形隅肉溶接継手の溶接止端形状を測

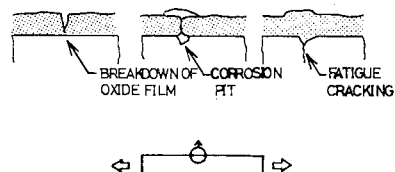


Fig. 9 Effect of weathering on surface roughness of smooth specimens.

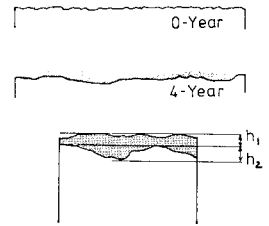


Fig. 8 Model of rust thickness h_1 and depth of surface roughness h_2 .

定した。まず、さびを化学的に除去した隅肉溶接止端部を、シリコンコンパウンドで型取りし、それを 0.5 mm 程度の薄片に切断した。各試験体から 50 個の薄片を切り出し、20 倍に拡大してトレースし、止端角 θ と止端半径 ρ を測定した。SMA 50 について、代表的な止端形状を **Photo 2** および **Fig. 10** に示す。無暴露材に比べて 2 年および 4 年暴露の ρ が大きいことがわかる。隅肉溶接止端部の応力集中は、一般に ρ に敏感であり¹²⁾、 θ のいかにかわからず、 ρ の小さい所で疲れ亀裂が発生すると思われる¹¹⁾。そこで、各試験片で測定した 50 個の ρ が対数正規分布すると仮定して、平均値および 95% 信頼区間を求めると、**Fig. 11** の

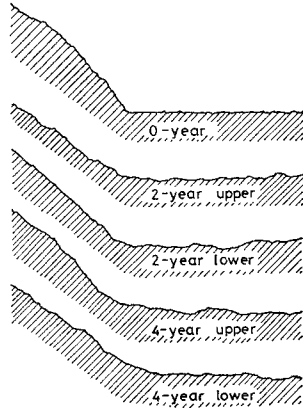


Fig. 10 Typical fillet weld toe profiles of non-weathered, two-year weathered and four-year weathered stiffener specimens.

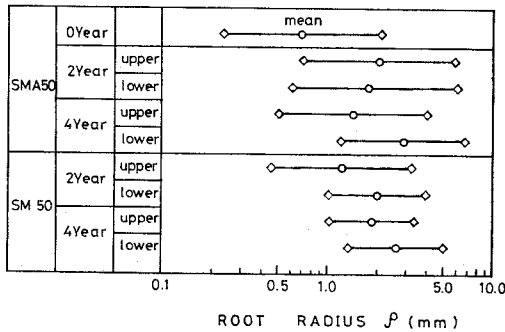


Fig. 11 Results of measurement of root radii ρ at the fillet weld toes.

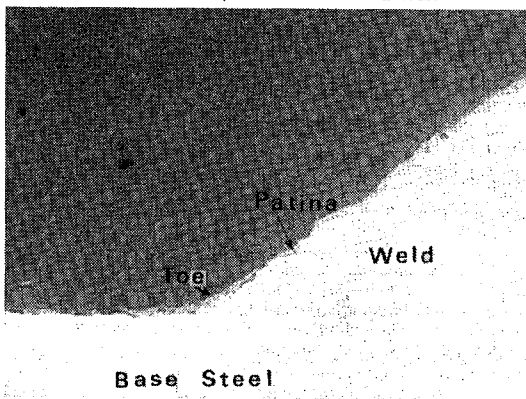


Photo 2 Typical fillet weld toe of 4-year weathered fillet welded specimen.

ようになる。無暴露材については、SMA 50 で代表しているが、その ρ の下限界値 0.23 mm に対し、暴露材はいずれも ρ が大きくなっていることがわかる。たとえば、SM 50 の上面で 0.46 mm、SMA 50 の上面で 0.51 mm であり、一部は 1 mm を超えるものもある。

止端角 θ を 45° と仮定して、 ρ の分布の下限界値を Haywood・西田の式¹³⁾に代入して応力集中係数 K_t を求め、**Table 7** に示す。無暴露材の $K_t=3.4$ に比べて、暴露材では、 $K_t < 2.5$ であり、大気暴露によって止端形状が変化し、応力集中係数が緩和されたことを示している。暴露材の疲れ試験の結果、無暴露材と同等かそれ以上の疲れ寿命が得られたのは、この止端における応力集中係数の緩和が大きく影響しているものと思われる。

溶接継手では、**Fig. 12** に示すように、腐食孔が、a) 溶接止端部に生じる場合、b) それ以外の場所に生じる

Table 7 Stress concentration factor at the fillet weld toes of stiffener specimens.

Steel	Exposure Time	Minimum Root Radii (mm)	Stress Concentration Factor
SMA 50	none	0.23	3.4
SMA 50	2-year (up)	0.72	2.1
	2-year (down)	0.61	2.3
	4-year (up)	0.51	2.4
	4-year (down)	1.22	1.8
SM 50	2-year (up)	0.46	2.5
	2-year (down)	1.01	1.9
	4-year (up)	1.04	1.9
	4-year (down)	1.36	1.8

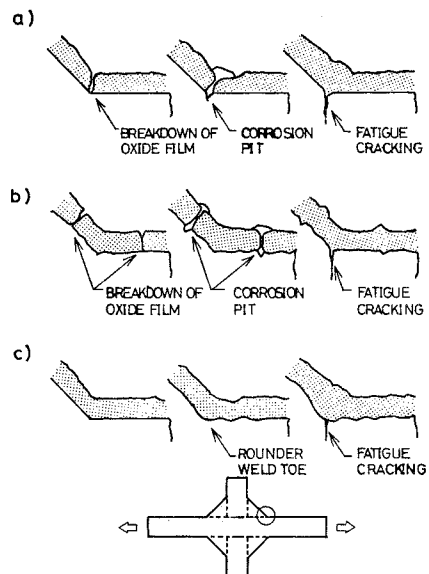


Fig. 12 Possible change of fillet weld toe profiles due to weathering.

場合、および c) 腐食によって止端形状が改善される場合、が考えられる。疲れ亀裂の発生に影響を与える溶接止端半径 ρ に注目すると、a) では、止端に発生する腐食孔の形状によって、 ρ が大きくなって疲れ強さを向上させる場合と、 ρ が小さくなってより大きな応力集中を生じ、疲れ強さが低下する場合、とがある。b) では、 ρ に変化はなく、疲れ強さは同じであり、c) では、 ρ が大きくなるので、疲れ強さは向上する。大気暴露後の ρ の測定結果をみると、一般に ρ は大きくなっており、上記の a) の前者か、c) のような状況が生じたものと思われる。

これまでの議論は、すべて 4 年間程度の大気暴露による疲れ強さと止端形状の変化について行ったものである。橋梁部材のように長期間使用されるものについては、より長期にわたる暴露材を用いた実験が必要であると思われる。また、本研究で用いた試験片は、南向き 30° の傾斜で、雨水がほこりなどを流し去るという、比較的耐候性鋼の安定さびの形成されやすい条件で暴露された。この条件では、普通鋼 (SM 50) と耐候性鋼 (SMA 50) の差はみられない。耐候性鋼では、一般にこの程度の暴露期間であれば安定さびが形成されるので^{1),2)}、これ以降は、疲れ強さが変化しないと考えられる。ただし、安定さびが形成されないような条件であれば、本実験の結果と異なることも予想されるので、注意する必要がある¹⁵⁾。

5. ま と め

耐候性鋼 (SMA 50) と普通鋼 (SM 50) の溶接継手を、2 年間および 4 年間大気暴露した後、疲れ試験を実施し、疲れ挙動および溶接止端形状の経年変化を追跡した。用いた試験片は、リブ十字形隅肉溶接継手とガセット溶接継手で、それぞれ 66 本と 62 本の疲れ試験を実施した。結論を要約すると次のようになる。

(1) 無暴露材では、2 種類の SMA 50 と SM 50 の溶接継手の疲れ挙動に有意差はみられない。

(2) リブ十字形隅肉溶接継手では、2 年間および 4 年間大気暴露した後の疲れ寿命は、無暴露材と同等かそれ以上であり、疲れ寿命の低下はみられなかった。また、暴露材の疲れ寿命のばらつきは、無暴露材のそれより大きい。

(3) また、 3×10^6 回以上の繰り返し数で破断しなかった試験片の数から推定して、4 年間大気暴露によって $3 \times 10^6 \sim 10^7$ 回に相当する疲れ限度の向上がみられた。

(4) ガセット溶接継手においても、リブ十字形隅肉溶接継手と同様に、大気暴露による疲れ寿命は、無暴露材と同等かそれ以上であり、疲れ寿命の低下はみられな

かった。また、データのばらつきも大きくなった。

(5) 平滑部の鋼材表面の凹凸は、大気暴露前は最大で約 0.1 mm (100 S) であったのが、4 年間の大気暴露によって 0.2~0.3 mm (200~300 S) になった。SMA 50 と SM 50 との差、および暴露上面と下面の差はみられなかった。

(6) 溶接止端部の止端半径 ρ の測定を行った結果、暴露前の ρ の下限値が 0.23 mm であったのが、2 年間または 4 年間の大気暴露後の ρ は、0.46~1.36 mm であった。この結果、疲れ亀裂発生寿命が大きくなり、大気暴露しても疲れ寿命が低下しない結果になったものと思われる。

(7) 今回の実験では、屋外で南向き 30° の傾斜で最高 4 年間大気暴露された試験片を用いた。これは、耐候性鋼の安定さび形成には、好条件といわれている。今後、安定さびの形成に時間がかかる場合や、長期間暴露された試験片による実験データの積み重ねが必要であると思われる。

謝 辞：本研究は、昭和 52 年から 5 年間にわたって継続されたもので、牧野時則 (現愛知県)、馬場千尋 (現横河橋梁)、玉田伸一 (現名古屋市)、田垣徳幸 (現新日鉄)、渡辺博喜 (現愛知県)、三輪友夫 (現名古屋市)、進藤博之 (現静岡県)、山田兼裕 (名大大学院)、稲垣秀高 (現愛知県) には実験と解析に協力していただいた。また、飯田字郎氏 (名古屋高速道路公社)、大場健二氏 (元新日鉄)、桑辺行正氏 (新日鉄)、青木尚夫・永井憲一氏 (トピー工業) には、研究遂行に種々協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。なお、実験の一部は、名古屋高速道路公社と新日本製鉄株式会社の受託研究として行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 日本鋼構造協会技術委員会防錆防食委員会：鋼構造物と耐候性鋼, JSSC, Vol. 17, No. 178, pp. 5~62, 1981 年 1 月。
- 2) 土木学会鋼構造委員会鋼材規格小委員会：耐候性鋼を用いた無塗装橋梁に関する調査研究, 土木学会誌, 第 65 巻 4 月号, pp. 51~62, 1980 年。
- 3) 日本橋梁建設協会：耐候性橋梁データブック, JASBC 技術資料 No. 3。
- 4) 阪神高速道路公団：防錆橋梁研究委員会報告書, 昭和 55 年 11 月。
- 5) 阿部英彦・田中 勇：無塗装鉄道橋梁の設計と製作, 橋梁と基礎, 82-3, pp. 14~21, 1982 年 3 月。
- 6) 国広哲男・井上啓一・福田孝男：耐候性鋼材の大気曝露調査, 土木研究所資料第 729 号, 昭和 47 年 2 月。
- 7) 玉田明宏, ほか：耐候性鋼材使用のメンテナンスフリー橋梁 (上), 同 (下), 橋梁と基礎, 78-2, 1978 年 2 月, 同, 78-3, 1978 年 3 月。
- 8) 山田健太郎・牧野時則・菊池洋一：横リブ十字形隅肉溶接止端部に発生する疲労亀裂の解析, 土木学会論文報告集, 第 292 号, pp. 1~12, 1979 年 12 月。

- 9) 金属材料技術研究所疲れデータシート：溶接構造用圧延鋼 SM 50 B リブ十字すみ肉溶接継手の疲れ特性データシート，試験片寸法の効果，NRIM Fatigue Data Sheet No. 13，金属材料技術研究所，1978年。
- 10) 山田健太郎，ほか：疲労亀裂の進展挙動に注目したガセット継手の疲労強度解析，土木学会論文報告集，第303号，pp. 31~41，1980年11月。
- 11) 田垣徳幸，ほか：溶接継手の疲労寿命に与える隅肉溶接止端形状の影響，土木学会論文報告集，No. 324，1982年8月。
- 12) 西田正孝：応力集中，森北出版，p. 50，1967年。
- 13) 鎌倉将英，ほか：SM 50 B リブ十字すみ肉溶接継手の疲れ特性におよぼす寸法効果，溶接学会誌，第48巻，第12号，pp. 46~50，1979年12月。
- 14) 田中 勇・田村勝司・大槻正幸：無塗装橋梁の設計と製作，構造物設計資料，No. 64，1982。
- 15) 阿部英彦・稲葉紀昭・江口保平：腐食鋼材の疲労強度，構造物設計資料，No. 34，1973-6。
- 16) 日本工業規格：表面粗さ，JIS B 0601-1976。
- 17) Albrecht, P. and I.M. Friedland: Fatigue Tests of 3-Year Weathered A 588 Steel Weldment, Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers, Proc. of ASCE, Vol. 106, No. ST 5, May, 1980.
- 18) Friedland, I.M., P. Albrecht and G.R. Irwin: Fatigue of Two-Year Weathered A 588 Stiffeners and Attachments, Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers, Proc. of ASCE, Vol. 108, No. ST 1, Jan. 1982.
- 19) Albrecht, P.: Fatigue Behavior of 4-Year Weathered A 588 Steel Specimens with Stiffeners and Attachments, Final Report, FHWA/MD-81/02, University of Maryland, 1981 (to be published).

(1982.12.13・受付)