

腐食環境下のガセット継手の表面性状と疲労強度

SURFACE IRREGULARITY AND FATIGUE STRENGTH OF GUSSET JOINT UNDER VARIOUS CORROSIVE ENVIRONMENTS

西村 昭*・皆田 理**

By Akira NISHIMURA and Osamu MINATA

The fatigue behavior of gusset joints (plate with gusset welded on the surface) for steel structures under various environments are presented and discussed on the allowable fatigue strength at 2×10^6 stress cycles. Fatigue tests were performed on the specimens of three groups: exposed to air, immersed in 3% NaCl solution and alternately exposed to both. The test results obtained from exposure to air show that the fatigue strengths of corroded gusset joints were higher than those of the uncorroded ones. The fact may be explained by the effect of the increase of toe radii of fillet welds. Corrosion fatigue strengths at 2×10^6 stress cycles were lower than the fatigue strength of specimens exposed in air. As for the final group, the $S-N_f$ curve fell between the two curves obtained from the two tests.

Keywords: fatigue test, welded joint, surface roughness, corrosion

1. 緒 言

鋼構造物の腐食性状は、それぞれの設置環境、構造、ならびに部材および断面の形状などにより異なる。したがって、各種環境下における鋼部材の腐食傾向、ならびに腐食材の強度、ことに疲労強度を把握しておくことは、合理的設計、あるいは防食対策を講ずるうえで重要な意味をもつものである。一般に構造物の防食対策は、塗装による場合が多く、その塗装の劣化に大きな影響を与えるのは結露条件である。すなわち、自然条件下で鋼部材の結露時間、および降雨時間と乾燥時間との比率は、塗膜の劣化、ならびに鋼部材の腐食速度を左右する重要な要因となる。数年経過した鋼橋の腐食調査結果¹⁾によると、塗装膨れ、割れなどを伴う錆の発生が多くみられる。それらは、塗膜下の素地金属の腐食を伴うものであり、後に破壊して露出金属面の腐食の進行を速める原因となる。したがって、鋼橋の塗装面にこれらの現象が生じた時点で塗替えが実施されるならば、塗膜下の鋼材に与える自然環境の影響は少ないため、その腐食量は比較的小

さいものと推定される。一方、実構造物で多くみられるが、海塩粒子、亜硫酸ガスなどの影響を直接受ける海岸、海浜地域に立地する鋼橋の塗装の下地処理不足、また、雨水ドレンなど排水に対する無配慮の鋼橋などでは、新設、または塗替え後わずかな年月で塗装面の膨れ、割れなどを生じ、金属面が露出した状態で大気環境にさらされ、著しい錆が発生している。したがって、腐食環境下に置かれた鋼橋の使用期間中における安全性を評価する場合、前者のような比較的よく管理された鋼橋では、腐食が生じて金属素地への環境の影響が小さいため、腐食材の疲労性状を把握しておけばよいものと考えられる。鋼部材強度に対する腐食の影響については、国広²⁾による耐候性鋼、および普通鋼の母材、および突合せ溶接継手の2~4年大気暴露後の疲労試験、山田^{3,4)}によるリブ十字隅肉溶接継手、およびガセット継手の2~4年大気暴露後の疲労試験、また Albrecht ⁵⁾による2~8年大気暴露後のリブ十字隅肉溶接継手の疲労試験などがある。山田らの研究によると、ガセット継手の暴露後の疲労寿命は継手の腐食により、溶接止端半径が増大し、暴露前のものに比して同等、またはそれ以上となっている。これらの研究は主として鋼橋における耐候性鋼材の裸使用を目的として実施されたものであるが、普通鋼材を用いた母材、ならびに溶接継手の腐食後の挙動を知る

* 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町)

** 正会員 広島工業大学助教授 工学部土木工学科
(〒731-31 広島市佐伯区五日市町)

うで有効な資料となる。しかしながら、耐候性鋼材の場合、安定錆層の厚さは暴露期間5年で約60~200 μ m程度⁶⁾であり、その後、同鋼材の腐食反応は遮断されるものと考えられる。これに対して、普通鋼の場合、さらに腐食が進行するため、これを考慮した母材、ならびに継手の疲労挙動を把握しておくことが必要と考えられる。一方、塗装が劣化した場合には、降雨、結露などによる濡れと乾燥とを繰り返す環境変動下に置かれることとなる。このような環境条件下に置かれる鋼橋の安全性は、同様の腐食環境条件下での部材強度の劣化傾向を把握して評価する必要がある。

腐食環境下における鋼部材の疲労強度、すなわち、腐食疲労強度に関する研究は、鋼材に対して各種環境下で実施され、比較的多くの資料が得られている⁷⁾。これらの研究から一般にいえることは、腐食疲労強度は空中疲労強度に比して低下し、また、水溶液の種類、温度、あるいは繰り返し速度などの試験環境条件によって異なる。すなわち、腐食疲労強度は、清水より塩水、低温より高温、また高周波数より低周波数での試験条件でそれぞれ低下する。これらの傾向は、溶接継手の場合でも同様と考えられるが^{8)~10)}、土木構造物の場合、濡れと乾燥との環境変動下に置かれるのが一般的である。したがって、実環境に近い環境条件下での鋼構造部材の疲労強度を把握しておくことは、設計、ならびに維持、管理上から重要と考えられる。そこで、本研究では、腐食の影響を受けやすい海洋、海浜地域の鋼橋に用いられるガセット継手を取り上げ、40キロ鋼から80キロ鋼に至る4鋼種の無腐食継手、および腐食継手の空中疲労試験、および腐食疲労試験、ならびに乾燥と湿潤とを繰り返す環境変動疲労試験を実施し、3種類の疲労試験結果に基づき、環境変動下におけるガセット継手の疲労性状について検討を加え、鋼橋の維持、管理、および疲労設計のための基礎資料を得ようとするものである。

2. 試験の概要

(1) 供試体

ガセット継手（以下継手と略称）供試体の形状、寸法は、Fig.1に示すとおりである。主板には、SS41、SM50A、SMA50A、および80キロ級調質型高張力鋼（HT80）の4鋼種を用い、これに対してガセットには、鋼橋を対象として主板SS41にはSS41、他の3鋼種の主板にはSM50Aを用いた。継手の隅肉溶接は、全鋼種ともに手溶接で行った。また、すべての継手はサンドブラスト処理し、無塗装である。Table1、および2にそれぞれ使用鋼板の機械的性質、および化学成分を、Table3に各継手の溶接条件を示す。なお、繰り返し速度の影響をみるために作成されたHT80の継手は、製

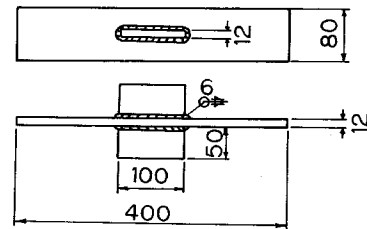


Fig.1 Test Specimen.

Table 1 Mechanical Properties of Steel Plates of Specimens.

Steel Type	Yield Point (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
SS41 (JIS G3101)	294	461	29
SM50A (JIS G3106)	412	568	25
SMA50A (JIS G3114)	392	539	28
HT80	774	833	25
HT80*	813	862	28

* used to test the effect of loading frequency.

Table 2 Chemical Compositions of Steel Plates of Specimens.

Steel Type	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Ti	Al
	×100	×1000	×100	×1000	×100	×1000	×1000	×1000	×1000	×1000	×1000	×1000	×1000
SS41	16	20	58	18	10	—	—	—	—	—	—	—	—
SM50A	15	34	132	20	7	—	—	—	—	—	—	—	—
SMA50A	13	31	85	16	3	31	20	57	—	—	—	—	—
HT80	14	26	98	13	7	6	17	72	25	4	9	3	47
HT80*	12	28	82	8	1	19	92	45	42	3	—	—	—

* used to test the effect of loading frequency.

Table 3 Welding Conditions.

Steel Type	Welding Rod	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm/min)	Preheating (°C)	
					Thick Welding	Welding
SS41	V55-78	235-240	32	30	—	—
SM50A	L55-5	210	27	14	—	—
SMA50A	CE252	270	32	30	—	—
HT80	L55-5	210	32	14	100-150	120-150

作者が異なるため、他の継手の溶接形状と多少差がある。腐食継手は、屋外に設置された腐食促進装置により、腐食液（NaCl 5%，酢酸 1%の水溶液）を30分間微噴霧と90分間休止を繰り返し、腐食液噴霧時間が250時間（約42日）になるまで継続して作成した。腐食液の微噴霧を断続的に行ったのは、密着性のよい錆層が形成されることを期待したものである。なお、腐食継手における溶接止端部周辺の平均板厚減少量（鋼板両面）は、0.3mm（HT80）~0.8mm（SS41）である。これは、SM50Aを用いた継手の板厚減少量が、塗装した同鋼種の平均腐食速度を0.013mm/year¹¹⁾として求めた50年間の板厚減少量に対応するときのもので、塗膜下鋼板素地から膨れ錆が生ずる時期に塗替えが行われることを想

定したものである。

(2) 疲労試験

疲労試験は、空中疲労、腐食疲労、および間欠腐食疲労の3種類である。空中疲労試験は4鋼種の腐食、および無腐食継手について行った。腐食疲労試験は、海洋構造物で比較的多く用いられるSM50A、SMA50A、およびHT80の3鋼種の継手について行った。このうち、SMA50A、およびHT80を用いた継手では、疲労強度に与える繰返し速度の影響をみるために、繰返し速度を2~3種類変化させて試験を実施した。また、HT80を用いた継手については、乾と湿との繰返し回数比 $N_D/N_W=0.7$ とする間欠腐食疲労試験を行った。ここでいう腐食疲労試験は、容積3400 ccの継手浸漬容器中に約17°Cの腐食液を循環させ、その中で継手に繰返し引張応力を与えるものである。使用した腐食液は試薬1級NaClを水道水で溶かした3%食塩水である。試験は、490 kNの電気油圧疲労試験機により、下限荷重9.8 kN (10.2 MPa) とする部分片振荷重で行った。繰返し速度は、空中疲労試験では、4鋼種の継手すべてについて10 Hz、腐食疲労試験では、SM50Aの継手に対して10 Hz、SMA50Aの継手に対して3.5 Hz、および10 Hz、また、HT80の継手では、1.5 Hz、3.5 Hz、および10 Hzである。なお、疲労試験に先立ち、別途準備した4鋼種の継手について溶接止端半径、残留応力、および鋼板表面形状などの測定を行い、継手部に対する腐食の影響を調査した。

3. 試験結果、および考察

(1) 腐食促進試験

Fig. 2は、腐食槽で腐食させた4鋼種の継手、および腐食測定用材片 (50×50×12 mm) についての、腐食時間と板厚平均減少量との関係を示したものである。ここで腐食による板厚減少量は、腐食槽から取り出した鋼材

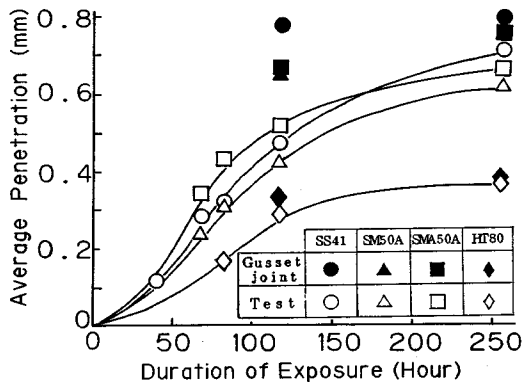


Fig. 2 Corrosion Rate Variation with Duration of Exposure to NaCl Solution.

の浮錆を水道水でできるだけ除去し、次に酸洗い溶液 (10%クエン酸アンモニウムにイビット0.3%を添加した溶液を約90°Cに熱したもの) に浸漬し、水中で水洗いして除錆後、マイクロメーターで測定したものである。図に示すように、各鋼種の腐食挙動は、暴露開始初期に急激に進展し、暴露100時間頃から鈍化し始める。この傾向は、大気暴露によって生ずる腐食進展曲線の時間軸を圧縮した形¹²⁾と大略一致する。腐食曲線がある時間から鈍化の傾向を示すのは、錆の発生により、素地金属に供給される酸素量の欠乏が大きな要因となる。した

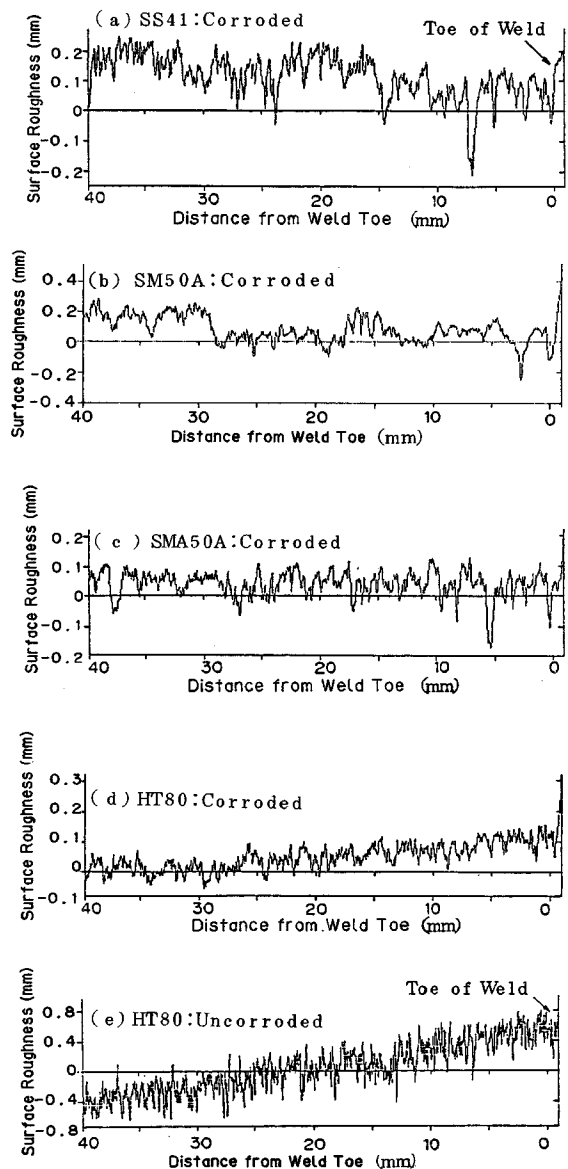


Fig. 3 Surface Roughness of Uncorroded and Corroded Specimens.

が、鋼板表面が腐食層で覆われていても、何らかの原因で腐食層が取り除かれ、金属素地が露出すると、腐食はさらに進展することとなる。

各鋼種の腐食による板厚減少量は、SS 41 が最も大きく、HT 80 が最も小さい。SS 41 の板厚減少量に注目すると、その大きさは腐食が停滞し始めるあたりで約 0.7 mm となる。50 キロ鋼では、SMA 50A の板厚減少量が比較的大きい。これは、本装置では SMA 材特有の緻密な錆が生じて、それが腐食液で洗い流されるため、実構造物においては特殊な使用条件で生ずるケースになるだろうと考えられる。なお、黒く塗りつぶした記号で示している継手の溶接止端部周辺での板厚減少量は、腐食測定用材片で得られた腐食進展曲線より上方にある。Fig. 3(a)~(e) は、回し溶接部先端から 40 mm の範囲の表面形状を、万能表面形状測定器を用い、触針送り速度 0.1 mm/s で測定して得たものである。このうち (e) は、腐食前の表面粗さの測定結果を HT 80 について例示したもので、他の鋼種についてもほぼ同様の結果が得られた。表面粗さの断面曲線を不規則波形と考えると、ごく低周波成分、すなわち、ピッチの大きい起伏は、各鋼種に特有の腐食によるうねり曲線に類するもので、Fig. 3 のように、SS 41、および SM 50A で顕著である。これに対して、SMA 50A、および HT 80 のうねりは小さく、全体的に平坦な腐食状態となることが明瞭に現われている。

次に、溶接施工が鋼板腐食に及ぼす影響をみるために、継手の荷重軸方向中心線上を Fig. 4 に示すような領域に分割して表面粗さの形状解析を行った。Fig. 5 は、4 鋼種の継手における各領域の表面粗さ曲線の振幅（以下粗さ振幅と略称）と周波数（Hz=10 cycle/mm）との関係を示したものである。まず、各鋼種における A₁、B₁ 領域に注目すると、SS 41 では B₁ 領域が A₁ 領域に比して振幅の大きい腐食を示す。これに対して、SM 50A の A₁ 領域の粗さ振幅は、低周波数域で B₁ 領域より大きくなる傾向を示す。しかしながら、同鋼種の A₁、B₁ 領域での粗さ振幅は、SS 41 のそれぞれの領域の粗さ振幅に比して小さい。また、 50×10^{-3} Hz から 10^{-2} Hz の範囲での両領域の粗さ振幅は、他の 3 鋼種の同周波数域と比較してほぼ同等と推定される。一般的に SS 41、および SM 50A の表面性状は、両鋼種の粗さ振幅に差はあるが、起伏の大きいものとなっている。SMA 50A、および HT 80 では、A₁、B₁ 領域にかかわらず粗さ振幅は小さく、高周波数領域に至る多くの波が混在した緻密な腐食表面

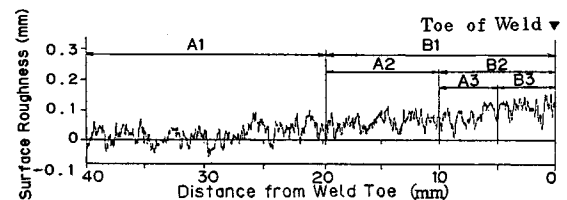


Fig. 4 Sub-division of the Range of Measurement on Surface Roughness.

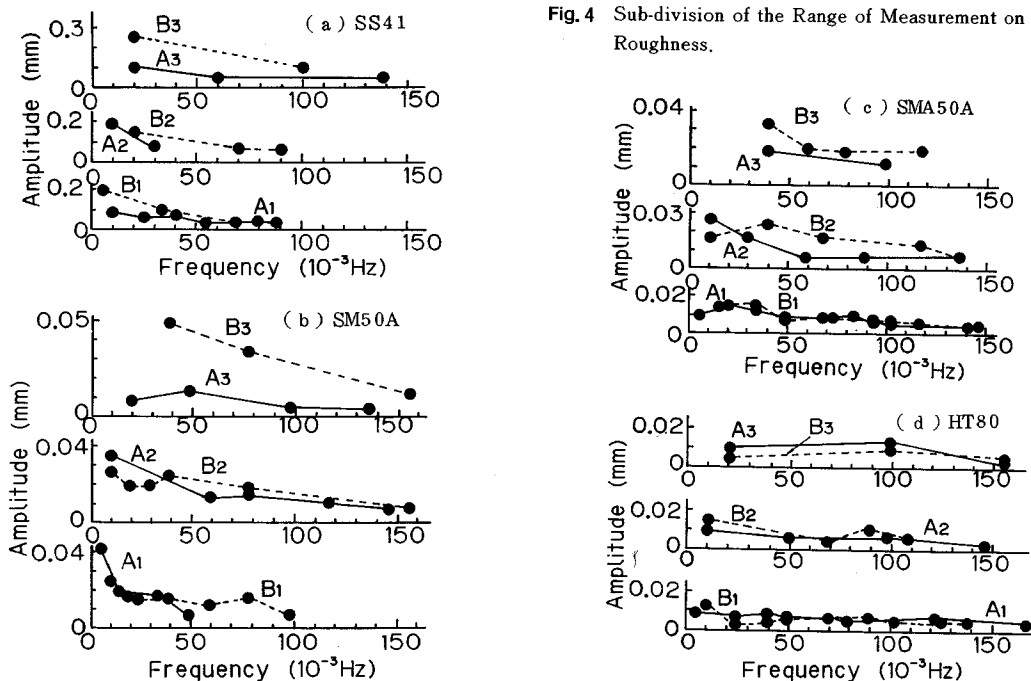


Fig. 5 Relations between Amplitude and Frequency of Surface Roughness for Various Range of Measurement of Gusset Joints.

状態を示している。測定範囲を狭くした B₂ 領域は、溶接によるアンダーカットが存在する場合があります、また、腐食促進因子が残留しやすい場所である。Fig. 5 にみられるように、SS 41, SMA 50 A, および SMA 50 A の B₂ 領域における粗さ振幅は A₂ 領域に比して大きく、この傾向は SS 41 に顕著なものとなる。たとえば、周波数 50×10^{-3} Hz における粗さ振幅は、SM 50 A, SMA 50 A, および HT 80 に対してそれぞれ約 4.7 倍, 8 倍, および 36 倍となる。HT 80 では B₂ 領域より A₂ 領域の粗さ振幅が大きくなるが、その差は小さく、大略 B₂ 領域と同等と考えられる。

以上の結果から、SS 41, SM 50 A, および SMA 50 A では、B 領域の腐食が増大する傾向を示し、溶接止端を含む B₂ 領域から離れるに従い腐食量が減少することが明らかとなった。溶接部周辺では、溶接止端部の残留応力による応力腐食、ならびに濃淡電池の形成などによって腐食が進行したものと推定される。また、この領域の腐食状態は深い孔食を伴うものとなる。したがって、腐食による鋼板表面の粗化は、溶接継手の場合、溶接止端部周辺の粗化が継手強度、ことに疲労強度に対して最も大きく影響を及ぼすものと予想される。

(2) 残留応力、および止端半径

Table 4 は、無腐食継手、および腐食継手における引張残留応力の最大値、および溶接止端半径（4 体の平均値）を 4 鋼種について示したものである。残留応力は、

継手の荷重軸直角方向に溶接止端に近接してストレインゲージを貼付し、継手を切断して応力を解放することによって求めた。また、溶接止端半径は、万能形状測定器により止端部を 100 倍に拡大して得たものである。

Table 4 から、残留応力は腐食によって低下の傾向を示すが、最大 12 % 程度と非常に小さく、また、溶接止端半径は腐食によって 1.6~2.3 倍、平均 2.1 倍程度に増大することがわかる。これについては、山田らによる応力集中率の算定結果³⁾によれば、無腐食継手に対して、腐食継手の応力集中率は約 26 % 程度緩和されることとなる。

(3) 疲労試験

a) 空中疲労試験

無腐食、および腐食継手の空中疲労試験結果より、各鋼種の継手ごとに S-N_r 線を描いたものが Fig. 6(a)~

Table 4 Residual Stress and Weld Toe Radius of Uncorroded and Corroded Specimens.

Steel Type	Residual Stress (MPa)		Weld Toe Radius (mm)	
	Uncorroded	Corroded	Uncorroded	Corroded
SS41	259	236 (0.89)	0.16	0.37 (2.3)
SM50A	249	233 (0.94)	0.26	0.41 (1.6)
SMA50A	221	225 (1.02)	0.25	0.52 (2.1)
HT80	253	226 (0.89)	0.29	0.68 (2.3)

Note: Figures in () show the ratio to uncorroded one.

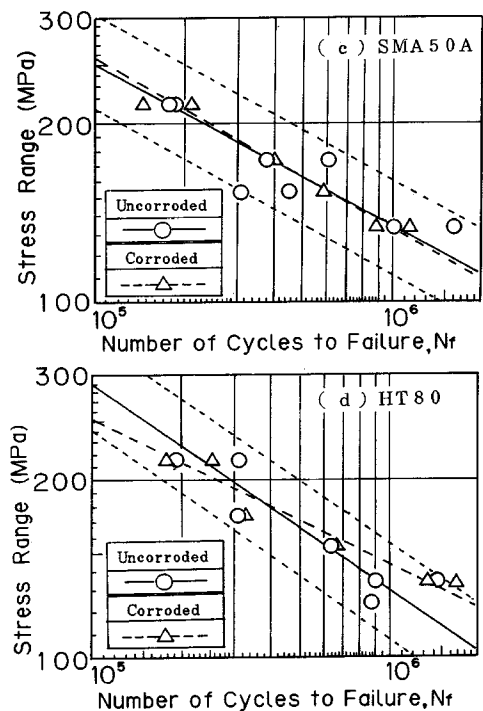
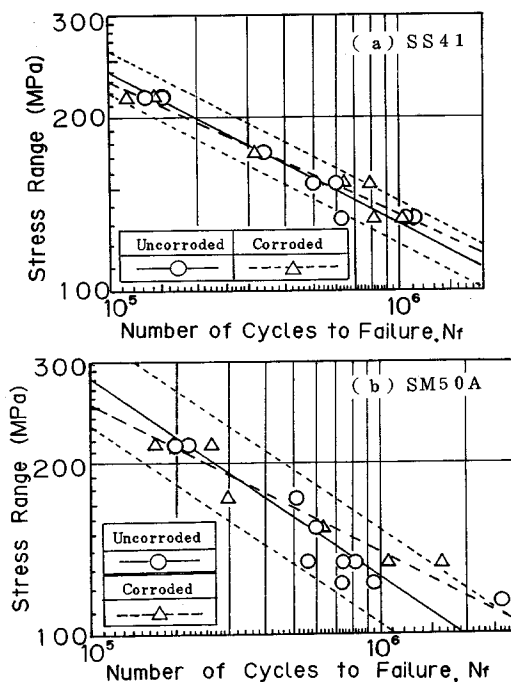


Fig. 6 S-N_r Relation of Gusset Joints.

Table 5 Fatigue Strengths of Gusset Joint Specimens with Uncorroded or Corroded Surface.

Steel Type	Specimen Surface	Fatigue Strength (MPa)	
		5×10 ⁵ Cycles	2×10 ⁶ Cycles
SS41	Uncorroded	156	109 (1.00)
	Corroded	159	115 (1.06)
SM50A	Uncorroded	161	99 (1.00)
	Corroded	163	117 (1.18)
SMA50A	Uncorroded	162	111 (1.00)
	Corroded	161	110 (0.99)
HT80	Uncorroded	165	102 (1.00)
	Corroded	170	121 (1.19)

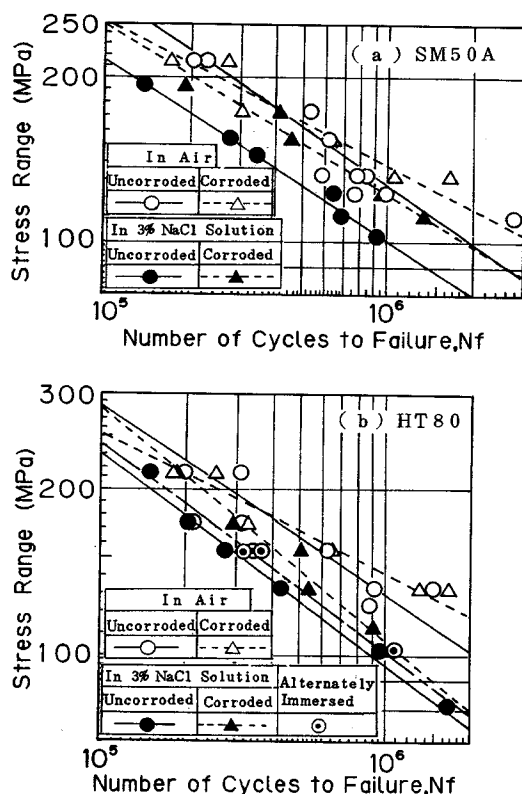
Note : Figures in () show the ratio to uncorroded one.

(d) である。図中の点線は無腐食継手の疲労寿命に対する 90 % 信頼区間を示すものである。Table 5 は、Fig. 6 から得られた 5×10^5 、および 2×10^6 回疲労強度を示す。Fig. 6 より、腐食継手の 2×10^6 回疲労強度（以下疲労強度と略称）は、各鋼種の継手とも無腐食継手に比して同等、またはそれ以上となることがわかる。この傾向は山田³⁾が指摘したように、腐食による溶接止端半径の増大に起因するものと考えられるが、本試験結果では、Table 4 に示す 4 鋼種の継手の溶接止端半径の上昇傾向と、Fig. 6 に示す 4 鋼種の継手の疲労強度上昇傾向とは必ずしも一致しなかった。また、継手の $S-N_f$ 線まわりのばらつき（標準偏差： $\sigma(\log N_f)$ ）は、鋼板 SS 41, SM 50 A, SMA 50 A, および HT 80 を用いた無腐食継手に対してそれぞれ 0.09, 0.14, 0.18, および 0.14, 腐食継手に対してそれぞれ 0.09, 0.13, 0.08, および 0.11 となり、無腐食継手のばらつきが腐食継手のそれに比して同等、または大きくなる傾向を示す。しかし、無腐食、ならびに腐食継手の $S-N_f$ 線の勾配、および分散に対する有意水準 5 % での検定結果では、各鋼種の継手とも有意な差はない。いま、腐食継手の破壊確率 95 % に対する 2×10^6 回疲労強度（下限疲労強度と略称）は、鋼板 SS 41, SM 50 A, SMA 50 A, および HT 80 を用いた継手に対してそれぞれ 107 MPa, 103 MPa, 101 MPa, および 110 MPa となる。これらの下限疲労強度は、鋼鉄道橋設計標準¹³⁾で規定された継手区分 D の基本疲労許容応力度 78 MPa（ただし、60 キロ鋼以下）を平均 35 % 上回るものである。

b) 腐食疲労試験

① 環境の影響

ガセット継手に対する腐食環境の影響を前項の空中疲労試験結果と比較するために、腐食疲労試験としては高すぎるが、繰返し速度 10 Hz で行った鋼板 SM 50 A, および HT 80 からなる無腐食、および腐食継手の腐食疲労試験結果を、空中疲労試験結果とともに Fig. 7 に示す。Fig. 7 から明らかなように、腐食疲労 $S-N_f$ 線は前腐食の有無にかかわらず空中疲労 $S-N_f$ 線より下方に位置す

**Fig. 7** $S-N_f$ Relations of Gusset Joints Tested in Various Exposed Conditions.**Table 6** Corrosion Fatigue Strengths at 2×10^6 Cycles for Uncorroded and Corroded Gusset Joints.

Steel	SM 50 A		HT 80	
	σ_D (MPa)	$r(\%)$	σ_D (MPa)	$r(\%)$ ※
Uncorroded	80	19	76	25
Corroded	99	15	81	33

※ Reduction ratio of Corrosion fatigue strength to fatigue strength tested in air for 2×10^6 cycles.

る。SM 50 A を用いた継手の $S-N_f$ 線の標準偏差 $\sigma(\log N_f)$ は、無腐食、および腐食継手でそれぞれ 0.04, および 0.08, HT 80 を用いた継手の場合、それぞれ 0.04, および 0.06 となる。Table 6 は、Fig. 7 に基づき、腐食環境下における無腐食、および腐食継手の疲労強度を示したものである。同表より、腐食環境下における継手疲労強度は、空中疲労強度に比して 15~33 % 低下すること。ことに HT 80 を用いた継手の場合、腐食環境の影響が顕著で、SM 50 A を用いた継手の疲労強度をも下回る。また、SMA 50 A の継手の腐食疲労に対する $S-N_f$ 線は、後述のように SM 50 A の場合と同等となる (Fig. 9)。Fig. 8 は腐食環境における疲労強度の低下傾向を把握するために、次式で示す疲労強度比 K_c と継手破断繰返し

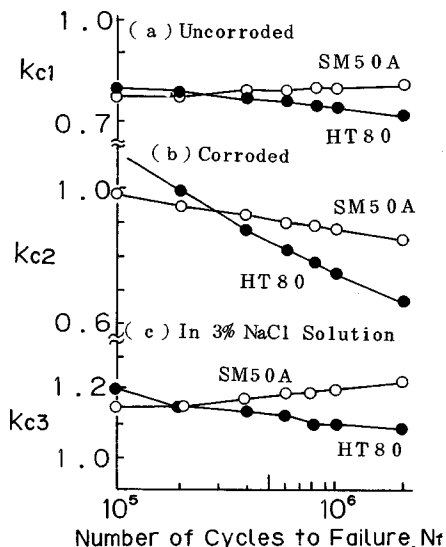


Fig. 8 Correlation between K_c 's Values and the Fatigue Life.

回数との関係を示したものである。

$$K_{c1} = \frac{\sigma(S:U)}{\sigma(A:U)}, \quad K_{c2} = \frac{\sigma(S:C)}{\sigma(A:C)}, \quad K_{c3} = \frac{\sigma(S:C)}{\sigma(S:U)} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma(\cdots)$ はいずれも破断繰返し回数 N_f に対する応力全振幅で、 $(\)$ 内の最初の記号 A と S はそれぞれ空中と塩水中とを表わし、第 2 の記号 C と U はそれぞれ腐食継手と無腐食継手を表わす。Fig. 8(a) より、無腐食継手においては、SM 50A、および HT 80 の両鋼種の継手ともに K_{c1} は繰返し回数にかかわらずほぼ一定値を保ち、腐食環境が疲労強度の低下要因となることを示している。また、図 (b) の腐食継手の場合、前腐食が継手疲労強度の低下要因となることを示している。ことに HT 80 を用いた継手で顕著で、腐食疲労強度は SM 50A の継手に比して約 18 % 低下する (Table 6)。この結果から、腐食疲労の場合、継手の腐食による表面不整が疲労強度に与える影響は、鋼板強度が高いほど大きいものと推定される。図 (c) は、腐食環境での継手疲労強度に与える溶接止端形状の影響をみたもので、腐食継手の時間強度は無腐食継手に比して高く、その上昇率は繰返し回数 2×10^6 回に対して、SM 50A で約 24 %、HT 80 で約 7 % となる (Table 6)。この上昇率は、空中疲労の場合 (Table 5) に比して SM 50A では高く、HT 80 では相当低いものとなる。すなわち、腐食疲労の場合、継手の溶接止端半径の増加は、SM 50A を用いた継手では疲労強度の上昇要因となるが、HT 80 の場合、その効果はほとんど認められない。腐食疲労試験を行った無腐食、ならびに腐食継手の溶接止端部を SEM で観察した結果、無腐食継手で多数の非常に鋭い疲労亀

裂が生ずるのに対して、腐食継手では亀裂の数は少なく、前腐食によって生じた腐食ピットをジグザグに伝播している。

② 繰返し速度の影響

金属材料の腐食疲労強度は、繰返し速度の影響のみならず、応力速度によっても影響を受ける¹⁴⁾。一般に、応力速度の影響は繰返し速度約 0.1 Hz 程度以下で顕著に現われるために、海洋構造物などでは、この影響を考慮することはきわめて重要と考えられる。一方、鋼橋の振動測定結果¹⁵⁾によれば、下限周波数は約 1.5 Hz 程度となっている。したがって、ここでは、ガセット継手の腐食疲労強度に対して、応力速度の影響より、繰返し速度の影響が大きいのとして検討を加える。すなわち、鋼板 SMA 50A 継手、および追加製作した HT 80 継手に、文献 15) に基づいて、上限繰返し速度 10 Hz、下限繰返し速度 1.5 Hz、およびそれらの中間の繰返し速度 3.5 Hz の 3 種類の繰返し速度で腐食疲労試験を実施した (ただし、鋼板 SMA 50A の継手では 3.5 Hz、および 10 Hz の 2 種類とする)。Fig. 9 は、両鋼種の継手の腐食疲労試験結果で、図 (b) の HT 80 の場合には空中疲労試験の結果も併記した。繰返し速度 3.5 Hz および 10 Hz における $S-N_f$ 線の標準偏差 $\sigma(\log N_f)$ は、SMA 50A の継手でそれぞれ 0.11、および 0.04、また、HT 80 の継手でそれぞれ 0.002、および 0.19、1.5 Hz の場合には 0.10 となる。なお、空中疲労の場合 0.15 となる。Table 7 は、Fig. 9 から求めた 10^6 、および 2×10^6 回疲労強度を示す。Fig. 9 のように、繰返し速度 3.5 Hz で

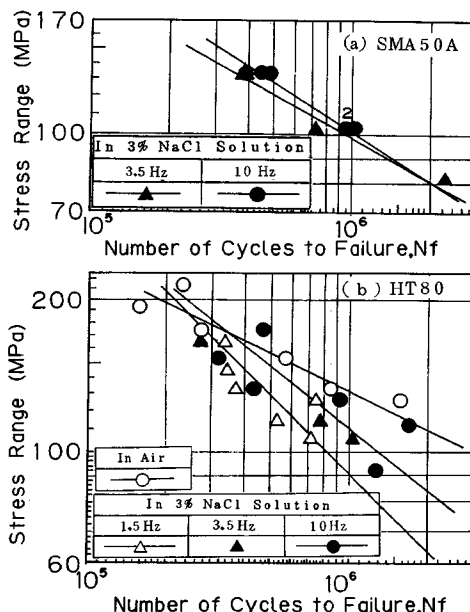


Fig. 9 $S-N_f$ Relations for Various Stress Frequencies.

Table 7 Corrosion Fatigue Strengths at 10^6 and 2×10^6 Cycles for Various Frequencies.

Frequency (Hz)	SMA50A		HT 80	
	Gusset Joint 10^6 Cycles C_D (MPa)	2×10^6 Cycles C_D (MPa)	Gusset Joint 10^6 Cycles C_D (MPa)	2×10^6 Cycles C_D (MPa)
1.5	—	—	91	63
3.5	99	82	109	86
10	102	81	(132)*	(110)*
			111	83

* Figures in () show the fatigue strength in air.

行った両鋼種の継手の試験データは少ないが、それらは繰返し速度 10 Hz での $S-N_f$ 線まわりにばらつく。一方、Table 7 のように、3.5 Hz で試験した両鋼種の継手の疲労強度は、10 Hz の継手の疲労強度に比してわずかに上昇する。これらの事実から、継手破断寿命のばらつきを考慮すると、両繰返し速度での疲労強度に有意差はないと考えられる。これに対して、繰返し速度 1.5 Hz で試験した継手 (HT 80) の 10^6 回疲労強度は、繰返し速度 10 Hz の継手の同時間疲労強度に比して約 18 % 低下する。また、 $S-N_f$ 線を延長して得られる 2×10^6 回疲労強度では約 24 % の低下となる。さらに、同表より空中疲労強度が繰返し速度の影響を受けないならば、繰返し速度 1.5 Hz で試験した継手の 10^6 回、および 2×10^6 回疲労強度は、10 Hz で試験した空中疲労による同時間疲労強度に比してそれぞれ約 31 %、および 43 % 程度低下することとなる。ガセット継手の腐食疲労強度が繰返し速度の減少に伴って低下する現象は、各種鋼材の腐食疲労試験結果に基づいて得られた腐食疲労強度と繰返し速度との関係に類似するものであり、鋼材の場合、この現象は電気化学的に説明されている¹⁶⁾。

c) 環境変動下における疲労試験

鋼橋に限らず鋼構造物の塗装劣化が著しく進展し、鋼部材に錆が発生した状態で供用された場合、それらの部分は、全天候下で海塩粒子、降下ばいじんなど腐食促進因子を含有する降水、または結露による濡れと乾燥との腐食環境変動のもとで繰返し応力を受ける。ここでは、ガセット継手を受ける環境変化を乾燥と湿潤とに単純化し、また、継手疲労強度が乾燥と湿潤との時間の絶対値にかかわらず、乾燥下 (Dry) での繰返し回数と湿潤環境下 (Wet) での繰返し回数との比 A (N_D/N_W) によって決定されるものと仮定し、 $A=0.7$ とする環境変動腐食疲労試験 (以下間欠疲労試験と略称) を実施した。使用した継手は無腐食、HT 80 鋼板のものである。間欠疲労試験によって得られた試験結果を Fig. 7 中に示してある。同図中には、マイナーの累積被害則を仮定し、次式で示す中村らの提案式¹⁷⁾により求めた推定 $S-N_f$ 線 (一点破線) も併記してある。

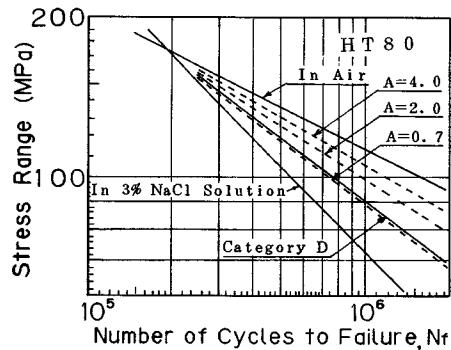


Fig. 10 Analyzed $S-N_f$ Relations for Alternately Immersed Fatigue Tests.

$$(AC_2\sigma^{\alpha_1} + C_1\sigma^{\alpha_2})N_f = (1+A)C_1C_2$$

$$\sigma^{\alpha_1}N_{f1} = C_1; \text{ Dry}$$

$$\sigma^{\alpha_2}N_{f2} = C_2; \text{ Wet}$$

$$A = N_D/N_W; N_D, N_W: \text{Dry, Wet での繰返し回数}$$

$$\dots\dots\dots (2)$$

ここで、 α_1 、および α_2 は、それぞれ 3.89、および 1.93、また C_1 、および C_2 はそれぞれ $10^{14.24}$ 、および $10^{9.77}$ である。Fig. 7 から、間欠疲労試験結果は、腐食疲労 $S-N_f$ 線と空中疲労 $S-N_f$ 線との間に位置し、推定 $S-N_f$ 線は試験結果にほぼ対応していることがわかる。わが国における全天候下での乾燥と濡れとの比率は、北陸地方が最小となり、単純に晴天日数と降雨日数との比で算定して約 0.7¹⁸⁾ となる。結露時間も併せて考慮するならば、構造物の設置場所、構造位置によっては、濡れ時間は乾燥時間に比して相当長くなるものと予想される。関東、および関西地域で実測された実環境における乾燥と濡れ (降雨時間と結露時間との合計) との比は、平均 4.0、最小 2.0 となっている¹⁹⁾。いま、腐食環境変動下に置かれた鋼橋ガセット継手の疲労破壊に対して、最も危険な状態を考慮して検討する。すなわち、空中疲労強度は繰返し速度の影響を受けないものとして、10 Hz で行った空中疲労 $S-N_f$ 線と 1.5 Hz で行った腐食疲労 $S-N_f$ 線との下限疲労強度線 (95 % 破壊確率線) から、 $A=0.7$ 、2.0、および 4.0 に対する間欠疲労推定線を文献 17) に基づいて求めると Fig. 10 のようになる。図中には参考のために AASHTO 疲労許容応力度線 (Category D²⁰⁾) も併記してある。図にみられるように、推定 $S-N_f$ 線の疲労強度が AASHTO 規準に対して、安全率 1.0 以上となるのはほぼ $A=0.7$ 以上の場合である。一方、鋼鉄道橋設計標準では、鋼板 HT 80 の仕上げしないガセット継手の疲労許容応力度は規定されていないが、40 キロ級から 60 キロ級鋼板のガセット継手の等級分類 D 等級と仮定すると、この継手が基本疲労許容応力度以上となるのはほぼ $A=2.0$ 以上の場合である。

以上、ここで示した結果は、鋼橋に用いられる塗装が著しく劣化し、ガセット継手の疲労強度が最も危険側となる場合に着目して検討を加えたものである。

4. 結 言

本研究では、各種強度の鋼板からなるガセット継手の空中疲労、腐食疲労、および間欠疲労試験などを実施し、ガセット継手の疲労強度に与える環境の影響を把握し、現行鋼橋設計標準と対比して検討を加えた。本研究で得られた主な結論を挙げると次のようである。

(1) 各種鋼板、ならびにガセット継手の腐食促進試験結果より、鋼板腐食はSS 41 が最も大きく、HT 80 が最も小さかった。腐食により、SS 41、およびSM 50 Aの鋼板表面が、うねりの大きい腐食状態を示すのに対して、SMA 50 A、およびHT 80 は比較的平坦な腐食状態となった。また、SS 41、SM 50 A、およびSMA 50 Aを使用したガセット継手では、溶接部周辺に深い孔食を生じた。

(2) 空中疲労の場合、腐食継手の疲労強度は無腐食継手に比して同等、または高くなる。これは腐食による溶接止端半径の増大に起因する。しかしながら、本研究で得られた結果では、有意水準5%で両継手の疲労寿命に有意差はなかった。

(3) 鋼板SS 41、SM 50 A、SMA 50 A、およびHT 80 からなる腐食継手の下限疲労強度の平均値は、現行疲労許容応力度を約35%上回った(空中疲労の場合)。

(4) 鋼板SM 50 A、およびHT 80 からなるガセット継手の腐食疲労強度(繰返し速度10 Hzの場合)は、空中疲労強度に比して低下、また、鋼板に生じた腐食が腐食疲労強度に与える影響は、鋼板強度が高い場合に大きくなる傾向を示した。

(5) 腐食疲労の場合、疲労強度の上昇要因である溶接止端半径増大の効果は、HT 80 を使用した継手より、SM 50 Aを使用した継手の方が大きかった。

(6) 繰返し速度1.5 Hz、3.5 Hz、および10 Hzで行った腐食疲労試験結果より、3.5 Hzと10 Hzとの腐食疲労強度に大差はない。また、1.5 Hzでの腐食疲労強度は前2者の場合に比して低下した。

(7) 繰返し速度10 Hzで行ったHT 80 無腐食継手の間欠疲労試験結果は、同繰返し速度での空中疲労 $S-N_f$ 線と腐食疲労 $S-N_f$ 線との間に位置した。また、実環境で実測された乾燥と濡れとの比 A に基づく環境変動下での下限疲労強度が、現行疲労許容応力度を上回るのは、AASHTO 標準(Category D)では $A=0.7$ 以上、鋼鉄道橋設計標準(D等級)では $A=2.0$ 以上と推定された(ただし、40キロ〜60キロ鋼に対する基本疲労許容応力度)。

最後に、本研究を進めるにあたり、三菱重工(株)、広島研究所の山崎恒博氏、ならびに広島工業大学土木工学科 村中昭典助手に多大なご協力をいただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本鋼構造協会技術委員会防錆防食小委員会鋼構造塗装研究班：道路鋼橋塗装劣化調査報告，JSSC，Vol.7，No.64，pp.17〜43，1971。
- 2) 国広哲夫・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，第29号，1972。
- 3) 山田健太郎・村山 真・近藤明雅・菊地洋一：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，土木学会論文報告集，第337号，pp.67〜74，1983。
- 4) 山田健太郎・馬場千尋・田垣徳幸・菊地洋一：耐候性鋼無塗装橋梁部材の疲れ強さ，土木学会論文報告集，第338号，pp.225〜228，1983。
- 5) 例えば，Albrecht, P. and Cheng, J.G. : Fatigue Tests of 8-yr. Weathered A588 Steel Weldment, Journal of Structural Engineering, Vol.109, 1983。
- 6) 岡田秀弥・細井祐三・湯川憲一・内藤浩光：耐候性鋼のさび層の構造，鉄と鋼，第5号，pp.355〜365，1969。
- 7) 遠藤吉郎・駒井謙治郎：金属の腐食疲労と強度設計，養賢堂，1982。
- 8) 西岡邦夫・平川賢爾：各種鋼材の長時間腐食疲労強度，日本材料学会疲労部門委員会研究討論資料，1977。
- 9) 坂野昌弘・横屋正幸・西村俊夫：耐候性鋼溶接継手の疲れ強さに及ぼす腐食環境の影響，土木学会第40回年次学術講演概要集第1部，pp.221〜222，1985。
- 10) Todoroki, R., Hanzawa, M., Ishiguro, T. and Yanagimoto, S. : Effects of Toe Profile Improvement on Corrosion Fatigue Properties of Weld Joints, IIW, DOC, No. XIII-875-78, 1978。
- 11) 森本隆也：本四連絡橋に関する鋼材の腐食試験，土木技術資料，Vol.16，No.11，pp.9〜15，1974。
- 12) 鋼材倶楽部：鋼材の腐食防食に関する資料，1973。
- 13) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，pp.71〜83，1983。
- 14) 文献7)，pp.107〜108。
- 15) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，pp.357〜358，1966。
- 16) 文献7)，pp.14〜21。
- 17) 中村 宏・岡崎章三：13%Cr-Mo 鋼の(腐食および応力)変動下における疲労強度，材料強度学会誌，Vol.12，No.2，p.57，1977。
- 18) 気象ハンドブック編集委員会：気象ハンドブック，pp.589〜590，朝倉書店，1984。
- 19) 日本鋼構造協会技術委員会耐久性分科会防錆防食小委員会耐候試験法研究班：JSSC 耐候促進試験法について(総合とりまとめ報告)，JSSC，Vol.10，No.107，pp.15〜37，1974。
- 20) AASHTO : Standard Specifications for Highway Bridges, Twelfth Edition, 1977。

(1986.7.24・受付)