

耐候性鋼無塗装橋梁部材の疲れ強さ

FATIGUE STRENGTH OF A WEATHERED WEATHERING
STEEL BRIDGE WELDMENT

山田健太郎*・馬場千尋**・田垣徳幸***・菊池洋一****

By Kentaro YAMADA, Chihiro BABA, Noriyuki TAGAKI
and Yoichi KIKUCHI

1. まえがき

耐候性鋼を用いた無塗装橋梁が製作・架設されるようになってきた。これは、安定さびとよばれる緻密なさびによって鋼材表面を保護して、塗装費の軽減をねらったもので、安定さびの形成が、この無塗装橋梁の成否の鍵となっている。また、鋼材の表面は、安定さびの形成により一度さびるので、この状態での静的強度および疲れ強さを検討しておく必要がある¹⁾。

これまでの研究によると、耐候性鋼が無塗装の状態で大気暴露された後に示す疲れ強さは、平滑材の場合と、応力集中のある溶接継手の場合で異なる。前者では、大気暴露による表面粗さの増加によって、疲れ強さは、暴露前のその70~80%にまで低下する²⁾。後者は、リブ十字形隅肉溶接継手とガセット継手の実験結果によると、疲れ亀裂が発生する隅肉溶接止端の形状が大気暴露によって変化するため、暴露前の疲れ強さと同等かそれ以上になる³⁾。これらは、いずれも試験片を、南向き30°傾斜した架台に放置し、4年間程度の大气暴露の後に疲れ試験を実施した結果である⁴⁾。

実際の橋梁の溶接継手の疲れ強さを把握するには、実物試験をすればよい。現実には、耐候性鋼無塗装橋梁の歴史が浅いこともあって、試験片の入手自体が困難であり、実施は難しい。ところが、橋梁の架替時に使用された仮橋⁵⁾の一部分が入手できたので、これを用いて疲れ試験を実施した。疲れ試験は、リブ十字形隅肉溶接継手で行ったので、同種の実験結果²⁾と比較できる。また、これらの実験結果およびメリーランド大学で実施された

同種の疲れ試験結果^{10),11)}と、各種の疲れ設計 $S-N$ 線図とを比較検討する。

2. 疲れ試験の概要

疲れ試験片は、東京都計画街路放射31号線が隅田川を渡る新大橋の架替事業⁶⁾に使用された転用可能な仮橋の一部から切り出した。この橋は、新大橋の建設の際のう回路として昭和48年2月に着工し、49年5月に竣工した後、約4年間使用された実績をもつ、耐候性鋼を用いた無塗装橋梁である。新大橋が完成した後に撤去され、1年半ほど東京都第6建設所足立西工区の資材置場に仮置き (Photo 1) された後、永久橋として使用するため切断された。仮橋は、3径間連続鋼桁形式 (44+60+44m) で6本主桁で構成され、桁は最大8mの長さで、互換性もち、種々の支間に対応できるように設計されている。仮置場では、桁は分割されて並べられており、下フランジ、水平補剛材などの水平な部材近くのウェブは、他と比べて腐食が多いようであるが、試験片を切り出した垂直補剛材近辺のウェブは、耐候性鋼の暴露

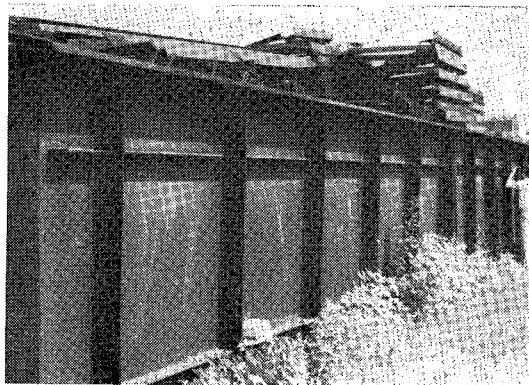


Photo 1

* 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 横河橋梁製作所 (前・名大大学院)

*** 正会員 工修 新日本製鉄 (株) (前・名大大学院)

**** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

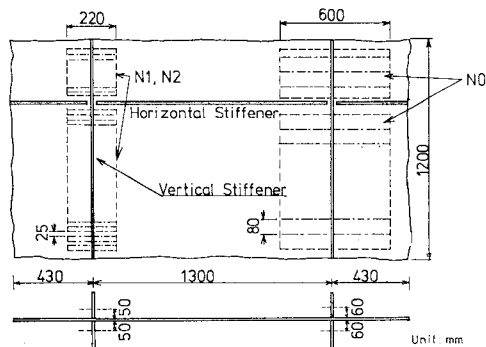


Fig. 1 Schematic view of a part of a plate girder where fatigue test specimens are cut out.

試験片と類似のさびを呈していた。入手したのは、長さ約 2m で、SMA41 の垂直補剛材 2 本を含む SMA50A のウェブで、Fig. 1 に示すように、2 種類のリブ十字形隅肉溶接継手を切り出した。まず、ガス切断により、垂直補剛材を含むリブ付の板を切り出し、バンドソーで幅 80mm (N0 試験片) と幅 25mm (N1 と N2 試験片) に分割した。N1 の一部と N2 すべては、疲れ亀裂の発見を容易にするために、クエン酸 2 アンモンとチオ尿素を 20 : 1 に混合したものの 3% 水溶液で 30 分間煮沸してさびを除去した後、疲れ試験を実施した。N1 と N2 の差は、試験時期が異なることによる。

3. 疲れ試験結果

疲れ試験の結果を、Table 1 に示す。また、N0 (幅 80mm) の $S-N_f$ 線図を、Fig. 2 に示す。疲れ試験は、文献 2) と比較するため、応力範囲 $\sigma_r = 147, 177, 245$ MPa で各 3~4 本、合計 10 本行った。 $\sigma_r = 147$ と 177 MPa で試験した各 1 本が、390 万回以上の繰り返し数で破断しなかった。図には、同様な試験片形状で実験した SMA50 と SM50 の無暴露材 28 本 (うち 23 本破断) の破断寿命の 95% 信頼区間と、4 年間暴露材のデータ 20 個²⁾を示して、本実験結果と比較する。図に示されるように、実橋から切り出された試験片の疲れ寿命の傾向は、4 年暴露材のそれと類似し、いずれも無暴露材と同等かそれ以上の寿命を示している。また、寿命のばらつきも、無暴露材の約 2 倍になっており、大気暴露によって隅肉溶接止端形状が影響されたと推定された 4 年暴露材と同様の傾向を示している²⁾。

N1 と N2 (幅 25mm) の $S-N_f$ 線図を、Fig. 3 に示す。図には、上述の N0 のデータと、SMA50 と SM50 材のデータの信頼区間を示し比較する。N1 と N2 は、試験時期が異なることによる違いであるが、疲れ寿命のばらつきが N2 の方が大きいこと以外に、疲れ寿命

Table 1 Fatigue test results of stiffener specimens cut out from a weathered actual bridge.

Specimen No.	Stress Range (MPa)	Min. Stress (MPa)	N. of Cycles to Failure ($\times 1000$)
N0 Series ($W=80$ mm)			
N011	245.	37.	336.
N012	245.	37.	364.
N013	245.	37.	274.
N021	177.	37.	2 493.
N022	177.	37.	>5 210.
N023	177.	37.	1 387.
N0X2	177.	37.	1 558.
N031	147.	37.	2 315.
N032	147.	37.	>3 943.
N033	147.	37.	1 110.
N1 Series ($W=25$ mm)			
N111 (R)*	245.	27.	973.
N112 (R)	245.	27.	599.
N113 (R)	245.	27.	415.
N1X1 (R)	177.	20.	>3 270.
N1X2 (R)	177.	20.	>2 970.
N1X3 (R)	177.	20.	>3 682.
N121	177.	20.	>3 601.
N122	177.	20.	1 127.
N123	177.	20.	2 390.
N131	245.	27.	459.
N132	245.	27.	400.
N133	245.	27.	529.
N2 Series ($W=25$ mm)			
N211 (R)	206.	23.	356.
N212 (R)	206.	23.	>4 688.
N213 (R)	206.	23.	>2 860.
N221 (R)	226.	25.	799.
N222 (R)	226.	25.	1 005.
N223 (R)	226.	25.	715.
N231 (R)	265.	29.	797.
N232 (R)	265.	29.	365.
N233 (R)	265.	29.	169.

* (R) indicates that the patina is removed before fatigue test.

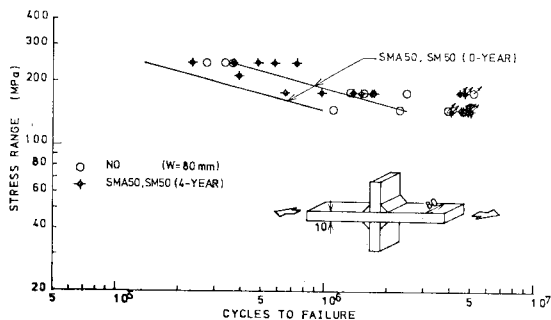


Fig. 2 Fatigue test results of stiffener specimens of 80 mm wide cut out from weathered actual bridge.

には、有意な差はみられない。また、さびを除去した試験片については、記号を変えて示してあるが、さびを除去したことによる疲れ寿命の差もみられない。N0 の場合と同様に、データのばらつきが大きく、比較に用いた SMA50 と SM50 のデータのばらつきの約 2 倍となっている。寿命は、N0 と同様、無暴露材と同等かそれ以上になっている。

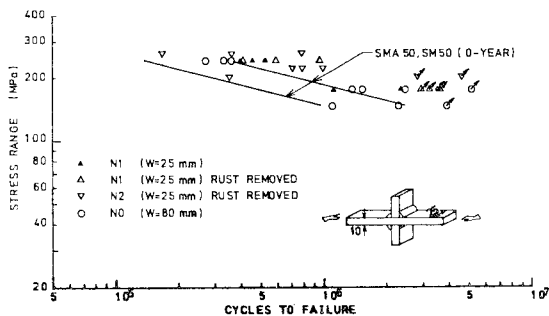


Fig. 3 Fatigue test results of stiffener specimens of 25 mm wide cut out from weathered actual bridge.

疲れ試験データを、 $\log N_f = B + m \log \sigma_r$ の式で直線回帰して、200 万回に相当する疲れ強さの平均値と、標準偏差の 2 倍だけ短寿命側へシフトした下限に相当する疲れ強さを計算して比較する。N0 では、平均 200 万回疲れ強さは、153 MPa で、下限は、120 MPa である。比較に用いた SMA50 と SM50 の無暴露材では、それぞれ 138 MPa と 122 MPa であったので、平均値では、11% 程度の向上がみられるが、下限値ではほとんど変わらない。N1 と N2 を合わせたデータで同様の比較を行うと、平均 200 万回疲れ強さが 158 MPa、下限値が 119 MPa であり、平均値の上昇はみられるものの、下限値では、疲れ強さが約 2% 低下した結果になっている。

疲れ亀裂の発生に影響する隅肉溶接止端形状のうちで、止端半径 ρ は、大気暴露によって大きくなる傾向にあることが、実験的に確かめられている³⁾。これは、一般に、疲れ亀裂発生寿命の増加につながる。ところが、疲れ亀裂が発生するのは、 ρ の小さい所であり³⁾、多少とも ρ の小さい部分が存在すると、疲れ寿命の向上は期待できなくなる。大気暴露によって ρ が一樣に大きくなったとは考えられず、 ρ のばらつきが大きくなって、これが疲れ寿命のばらつきを大きくしたものと思われる。また、疲れ寿命の平均値は、大気暴露によって大きくなっているが、下限値を比較するとほとんど変わらないのも、この理由によるものと思われる。

4. 設計 S-N 線図との比較

耐候性鋼および普通鋼 (SM50 と SMA50) で製作されたリブ十字形隅肉溶接継手の疲れ試験結果を、Fig. 4 に示し、橋梁の疲れに対する設計 S-N 線図と比較する。図には、金属材料技術研究所で実験された板、厚 9 mm、板幅 25, 50, 100 mm のデータも示してある⁴⁾。ここでは、本州四国連絡橋の鋼上部工の規定⁵⁾および日本国有鉄道の鋼鉄道橋設計標準 (改訂案)⁶⁾と比較する。両者

は、基本的には同じで、多数の疲れ試験結果を参考にして 200 万回疲れ強さの下限に相当する基本疲労許容応力度 σ_0 と、S-N 線図の傾きを与えている。リブ十字形隅肉溶接継手は、C ランクに属し、 $\sigma_0 = 105 \text{ MPa}$ 、傾きが、 $m = 4$ である。これを、Fig. 4 に一点鎖線で示す。こ

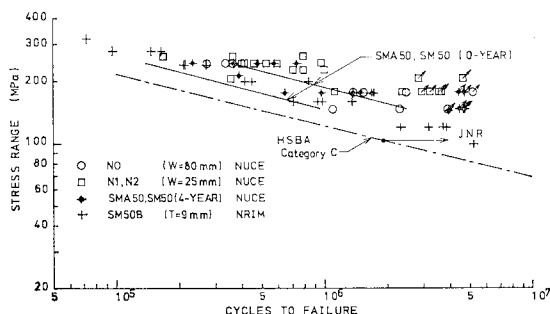


Fig. 4 Comparison of fatigue life of weathered and non-weathered stiffener specimens with design S-N diagram of Honshu-Shikoku bridges.

の設計 S-N 線図と比較して、耐候性鋼無塗装の実橋から切り出された試験片を含め、すべてのデータは、設計 S-N 線図と比較して長寿命側にあり、設計の規準値を満足していることがわかる。前述したように、N0, N1 と N2, SMA50 と SM50 の無暴露材の 200 万回疲れ強さの下限値は、119~122 MPa であり、 $\sigma_0 = 105 \text{ MPa}$ と比較して、さらに 13~16% の余裕を残していることになる。

耐候性鋼溶接継手の暴露後の疲れ強さについては、ASTM A588 鋼を用いた Albrecht らの研究がある^{10), 11)}。材質や暴露条件が異なるが、参考のために、その S-N 線図を引用して、本実験の結果および設計 S-N 線図と比較する。板厚 9.5 mm、板幅 25 mm のリブ十字形隅肉溶接継手で行われた試験は、大別して 2 つのロットに分けられる。Fig. 5 は、自動溶接で製作された試験片

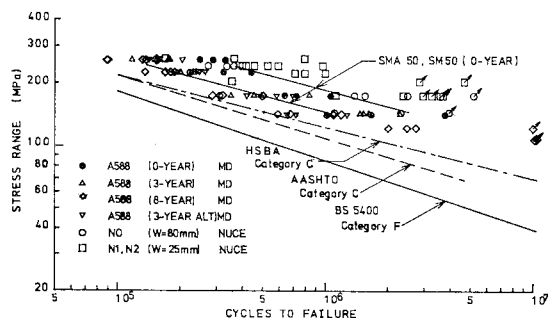


Fig. 5 Comparison of fatigue life of 3-year and 8-year weathered A588 stiffener specimens with present test results and with various design S-N diagrams.

の暴露前、3年暴露後、8年暴露後の疲れ試験結果、および3年暴露後に予想寿命の1/8ずつ载荷と暴露を半年ごとに繰り返した試験結果を示す¹⁰⁾。この試験結果から、平均200万回疲れ強さを計算すると注1)、それぞれ $\sigma_r=137, 133, 119, 108$ となり、疲れ強さの低下がみられる。データのばらつきを考慮した200万回疲れ強さの下限値では、 $\sigma_r=109, 116, 101, 92$ MPaとなる。特に载荷と暴露を繰り返した試験片の200万回疲れ強さの下限値の低下が著しい。ただし、これは、 $S-N$ 線図を延長して求めた値である。Fig. 5に示すように、すべてのデータは、本四公団の規準より長寿命側の寿命を示している。

同様に、Fig. 6に、別のロットの試験片で、暴露前、2年暴露後、および4年暴露後に疲れ試験を行った結果を示す¹¹⁾。各試験シリーズの疲れ寿命のばらつきは比較的小さく、SMA50とSM50の無暴露材の寿命の下限近くにばらついている。200万回疲れ強さの下限値を計算すると、無暴露材、2年暴露材、4年暴露材でそれぞれ $\sigma_r=90, 88, 84$ MPaとなり、4年間の大気暴露によって、約7%の疲れ強さの低下がみられる。Fig. 6には

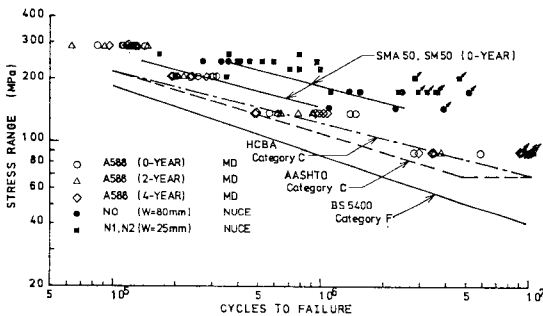


Fig. 6 Comparison of fatigue life of 2-year and 4-year weathered A588 stiffener specimens with present test results and with various design $S-N$ diagrams.

示してないが、文献11)では、2年間または4年間にわたって半年ごとに暴露と载荷を繰り返したもののデータも示されている。これによると、2年間と4年間で200万回疲れ強さの下限値が、それぞれ $\sigma_r=98, 93$ MPaと疲れ強さが向上した結果になる。本四公団の規準⁷⁾と比較すると、 $\sigma_r=90$ MPaで実験された試験片が、 3×10^6

回程度で破断しており、規準値以下になっている。ちなみに、AASHTOの規準では、この継手はCにランクされ、Fig. 5とFig. 6に示すように、データはすべて規準値を満足している⁹⁾。

5. ま と め

耐候性鋼溶接継手が大気暴露後に示す疲れ寿命を検討するため、無塗装で5年間ほど経過した実橋から採取したリブ十字形隅肉溶接継手の疲れ試験を実施し、これまでの研究成果と比較した。この結果、これまでの実験結果と同様に、実橋から採取した試験片においても、大気暴露による疲れ寿命の低下はみられず、データのばらつきも大きくなることがわかった。また、橋梁の疲れ設計 $S-N$ 線図と比べて、無暴露材、暴露材ともに疲れ寿命は長寿命側になっており、設計の基準値を満足していることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 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，第729号，昭和47年2月。
- 2) 山田健太郎，ほか：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，No. 337，1983年9月。
- 3) 東京都建設局第5建設事務所橋梁建設課：新大橋架替事業の計画，道路，Vol. 404，pp. 18~24，1974年10月。
- 4) 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SM50B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。
- 5) 田垣徳幸，ほか：溶接継手の疲労寿命に与える隅肉溶接末端形状の影響，土木学会論文報告集，No. 324，1982年8月。
- 6) 日本国有鉄道：鋼鉄道橋設計標準改訂案，昭和57年10月。
- 7) Matsuzaki, Y., H. Shimokawa and K. Murakami: Fatigue Design of the Honshu-Shikoku Bridges in Japan, Proceedings of IABSE Colloquium, Lausanne, pp. 497~502, 1982.
- 8) AASHTO: Standard Specifications for Highway Bridges, Twelfth Edition, 1977.
- 9) British Standard Institution: Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 10, Code of Practice for Fatigue, BS5400, 1980.
- 10) Albrecht, P. and J. G. Cheng: Fatigue of 8-year Weathered Automatically Welded A588 Steel Stiffeners, Report of Dept. of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, Md., June, 1982.
- 11) Albrecht, P.: Fatigue Behavior of 4-Year Weathered A588 Steel Specimens with Stiffeners and Attachments, Final Report, FHWA/MD-81/02, University of Maryland, College Park, Md., 1981. (to be published) (1983.1.24・受付)

注1) 文献10)では、一部の試験データを直線回帰式の計算で除外しているが、ここではすべてのデータを用いた。