

リブ十字すみ肉溶接継手の疲労強度に及ぼす 平均応力の影響

EFFECTS OF STRESS RATIOS ON THE FATIGUE STRENGTHS OF CRUCIFORM FILLET WELDED JOINTS

下川浩資*, 竹名興英**, 伊藤文夫***, 三木千寿****

By Hirosuke SHIMOKAWA, Koei TAKENA, Fumio ITOH and Chitoshi MIKI

The fatigue strength of transverse-fillet-welds in the attachment of diaphragms is a decisive factor in the design of box-section truss members. The fatigue strength of this joint in actual structures is influenced by the profile of the fillet-welds at the scallop and the residual stress created by the corner weld. In order to investigate these factors, specimens were fabricated as full-size model of cruciform fillet welded joints, and included scallops and longitudinal weld-beads. The size of the base plate was 45mm thick and 300mm wide. Fatigue tests were performed with an electro-hydraulic fatigue testing machine of a dynamic capacity of 4 MN. The tests were performed with stress ratios at 0, -1, -2 and -5.

1. まえがき

鋼構造部材の疲労強度に、平均応力が影響を及ぼすと考えられてきた。したがって、当時の国鉄の設計標準¹⁾および本州四国連絡橋の設計基準²⁾では、平均応力の影響はパラメーター $k (= \sigma_{min} / \sigma_{max})$ を用いて、考慮されていた。しかし、最近の研究では、大型の溶接構造部材の疲労強度には、平均応力はほとんど影響を及ぼさないという結果が報告されている^{3), 4)}。また、アメリカ⁵⁾およびイギリス⁶⁾の橋梁の設計基準の溶接継手に対する疲労評価方法は、応力範囲によって行うようになってきた。

岩黒島橋(中央径間420m、ダブルデッキで下路に鉄道4線、上路に高速道路4レーン)のような斜張橋のトラス部材では、図-1に示すように圧縮応力が引張応力より卓越する場合が多い。たとえ応力が圧縮領域で繰返されたとしても、溶接部材では、溶接による高い引張残留応力によって、しばしば疲労亀裂が発生する。例えば、縦方向溶接継手を用いた圧縮領域での繰返し荷重試験では、かなり大きな疲労亀裂が発生

-
- * 本州四国連絡橋公団 常任参与 (〒105 東京都港区虎の門4-3-20)
 - ** 国鉄・鉄道技術研究所 主任研究員 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)
 - *** 建設機械化研究所 (〒417 静岡県富士市大淵3154)
 - **** 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

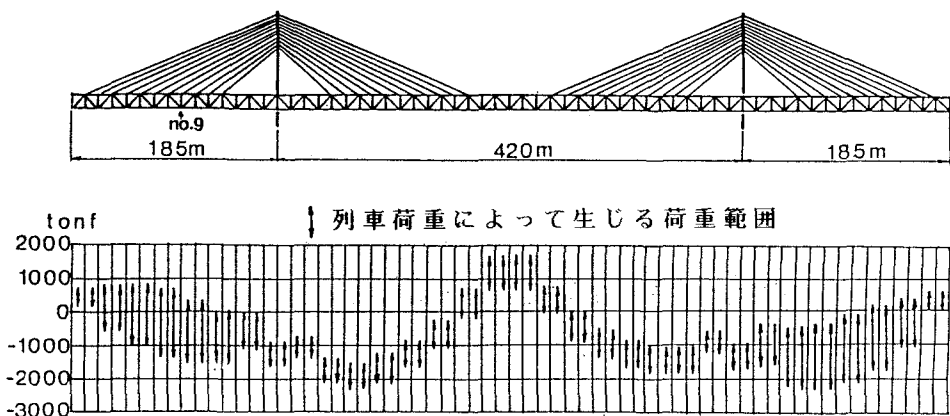


図-1 岩黒橋の下弦材の荷重範囲

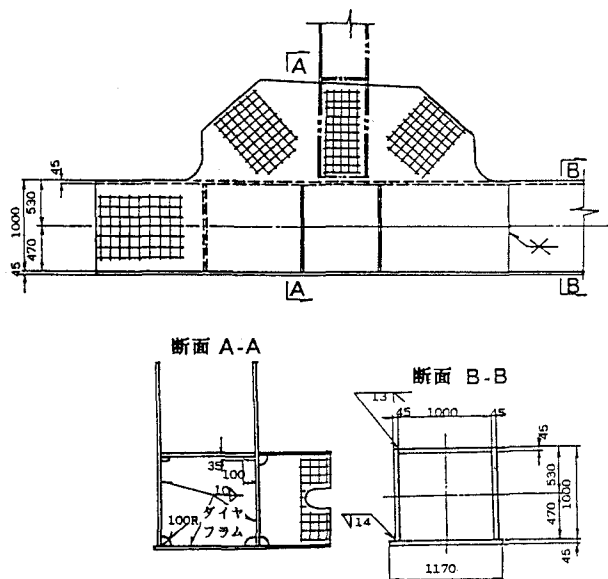


図-2 格点No9の下弦材の詳細図

している^{7)・8)}。また、ボックス断面の溶接桁の完全両振の曲げ疲労試験では、上下フランジでの疲労亀裂の発生数は差がなかったことが報告されている⁹⁾。

亀裂の進展とともに、残留応力の分布は変化し、その最大値は減少する。その結果、疲労亀裂の進展速度は低下することになる。また、圧縮力を受ける部材の耐荷力は、たとえ亀裂があっても低下しないし、供用期間中の保守検査によって検知することも可能である。したがって、圧縮応力が卓越する部材においては、引張応力が卓越する部材の許容応力範囲を用いることは、不経済な設計方法と考えられる。この研究は、圧縮応力が卓越する繰返し荷重を受ける部材の設計許容応力を再検討するための基礎データを得ることを目的としている。

ボックス断面トラス部材の疲労設計では、ボックス断面にダイヤフラムを取付けるための横方向すみ肉溶接継手が、その部材の断面積を決定する最も重要な継手である。この継手の疲労強度は、スカラップでまわし溶接したすみ肉溶接の止端形状および角溶接による引張残留応力の影響を受ける。本研究ではこの継手をモデル化した実構造物と同じ板厚で、スカラップおよび縦方向溶接ビードのあるリブ十字すみ肉溶接継手を用いて、疲労強度に及ぼす平均応力の影響を調べた。

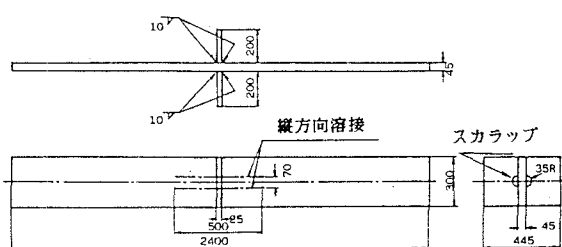
2. 試験体

試験体の形状および寸法を図-3に示す。板厚25mmの一对のリブを主材(板厚45mm、幅300mm

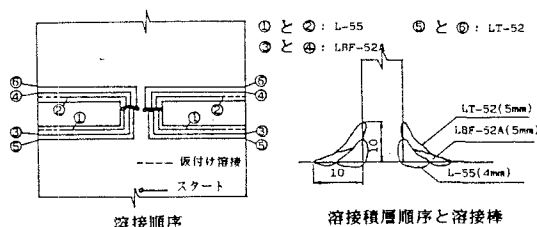
表－１ 使用鋼材の機械的性質と化学成分

	厚さ (mm)	σ_y (MPa)	σ_s (MPa)	伸び (%)	衝撃試験 (N-m)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	B	Ceq*	備考
						x100			x1000		x100					x1000		x100	
SM58Q	45	520	640	26	253(-5°C)	13	32	131	16	3	9	15		10		38	12	40	主材
SM41B	25	270	430	33	229(0°C)	14	21	87	18	6									リブ板

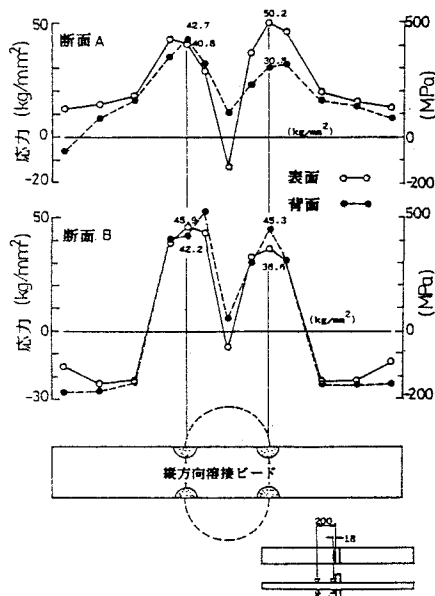
$$*Ceq=C+Mn/6+Si/24+Cr/5+V/14+Ni/40+Mo/4$$



図－３ 試験体の形状



図－４ 製作順序



図－５ 溶接残留応力の分布

m長さ2400mm)に溶接する。使用鋼材の機械的性質と化学成分は表－１に示す。主材およびリブ材の材質は、それぞれSM58およびSM41である。

スカラップ端の位置に縦方向溶接の残留応力を生じさせるために、主材のその位置に図－３に示すようにガウジングして2列の開先を作り、その上にサブマージアーク溶接をした。サブマージアーク溶接の余盛はグラインダーで削り、溶接ビードの表面は平坦にした。実際の部材の溶接施工状態を再現するために、断面が1m×1mの木の枠の中で溶接を行った。図－４に溶接要領を示す。溶接棒は、止端形状の滑らかな改良溶接棒LBF52を用い、すべての溶接はスカラップの内側よりスタートさせた。

３．溶接残留応力

溶接残留応力は、切断法により測定した。この残留応力測定用の試験体の縦方向溶接の長さは、疲労試験用のものより長い800mmとした。測定結果を図－５に示す。測定箇所は、図のようにAおよびB断面の2箇所、それぞれ、リブ板から18mmおよび200mm離れた位置である。B断面の残留応力は、主材にリブを取付けた溶接の影響がないと考えられる。その最大引張残留応力は、縦方向溶接ビードの位置に生じ、約440MPaで、最大圧縮残留応力は、試験体の両端で約250MPaある。

A断面の残留応力は、全延長でほぼ引張である。図－５に示すように、A断面では、引張応力と圧縮応力とはバランスがとれていないが、B断面では、引張と圧縮の応力はバランスがとれている。このことは、次

のように説明できる。A断面の残留応力は、縦方向溶接とリブを取付けたすみ肉溶接の2重の溶接の影響を受けている。そのため、表面において残留応力を測定した場合は、応力はバランスがとれていないが、板厚内部の応力を考慮すれば、残留応力はバランスがとれていると想定される。

4. 疲労試験方法

疲労試験は、動的能力4000kNの油圧サーボ制御方式の大型疲労試験機を用いて実施した。応力波形は正弦曲線で繰返し速度は5Hzである。過去の研究では、完全面振れの試験体と引張片振れの試験体の疲労強度は、ほとんど同じであるという報告³⁾があるので、本研究は、圧縮成分が支配的な応力条件の疲労挙動を調べることを目的とした。疲労試験の応力範囲は196MPaおよび147MPaで、それぞれに対して応力比Rは0、-1、-2および-5で疲労試験を行った。なお、この試験で、疲労亀裂の発生と進展を調べるために、一定繰返し回数ごとに最小応力を上昇させ、応力を半減させることによって、破面にビーチマークを残すようにした。

5. 疲労試験結果

(1) 疲労強度

表-2に試験結果を、図-6に応力範囲Srと破断寿命Nfの関係を示す。なお、破断寿命には、ビーチマーク破面を残すために応力範囲を半減した間の繰返し数は含まれていない。S-9試験体は、最初の荷重条件(S=147MPa, R=-5)では破断しなかったので、新たな荷重条件(Sr=176.4MPa, R=-5)で再試験して、破断させた。

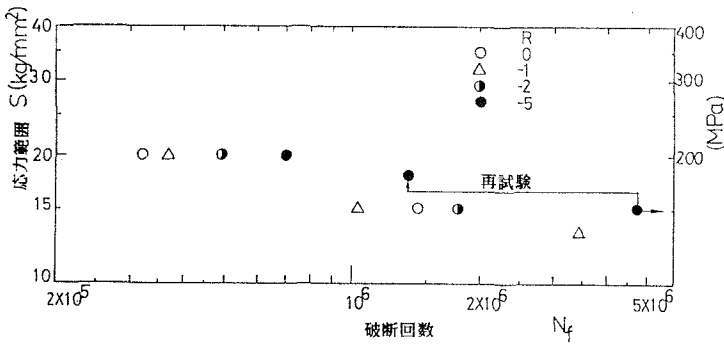


図-6 Sr-Nf図

表-2 疲労試験結果

試験体	Smax (MPa)	Smin (MPa)	Sr (MPa)	R	Nf x10 ³	応力プロット の数	ビーチマーク の数	最も内側のビーチ マークの繰返し回 数	最も内側のビーチ マークの大きさ(mm) 深さ(a) 幅(b)	
S-1	98	-98	196	-1	370	3	3	100 x 10 ³	0.8	4.9
S-2	65	-131	196	-2	495	4	4	100 x 10 ³	0.5	3.0
S-3	32	-164	196	-5	700	6	5	200 x 10 ³	0.45	1.0
S-4	196	0	196	0	321	2	2	100 x 10 ³	2.1	8.9
S-5	64	-64	127	-1	3480	11	6	1800 x 10 ³	1.0	3.5
S-6	74	-74	147	-1	1028	3	2	600 x 10 ³	4.2	10.9
S-7	49	-98	147	-2	1792	5	5	300 x 10 ³	0.38	1.3
S-8	148	1	147	0	1414	4	2	600 x 10 ³	2.8	8.3
S-9	25	-123	147	-5	>4700					
再試験	29	-147	176	-5	1361					

破断寿命は、Sr=147MPaでは、R=-1、0、-2および-5の順で、Sr=196MPaにおいては、R=0、-1、-2および-5の順で長い。しかし、応力比Rの違いによる破断寿命の差は、あまり大きくない。また、R=-5の試験体の最大応力は、Sr=196MPaの試験体で32.3MPa、Sr=176.4MPaの試験

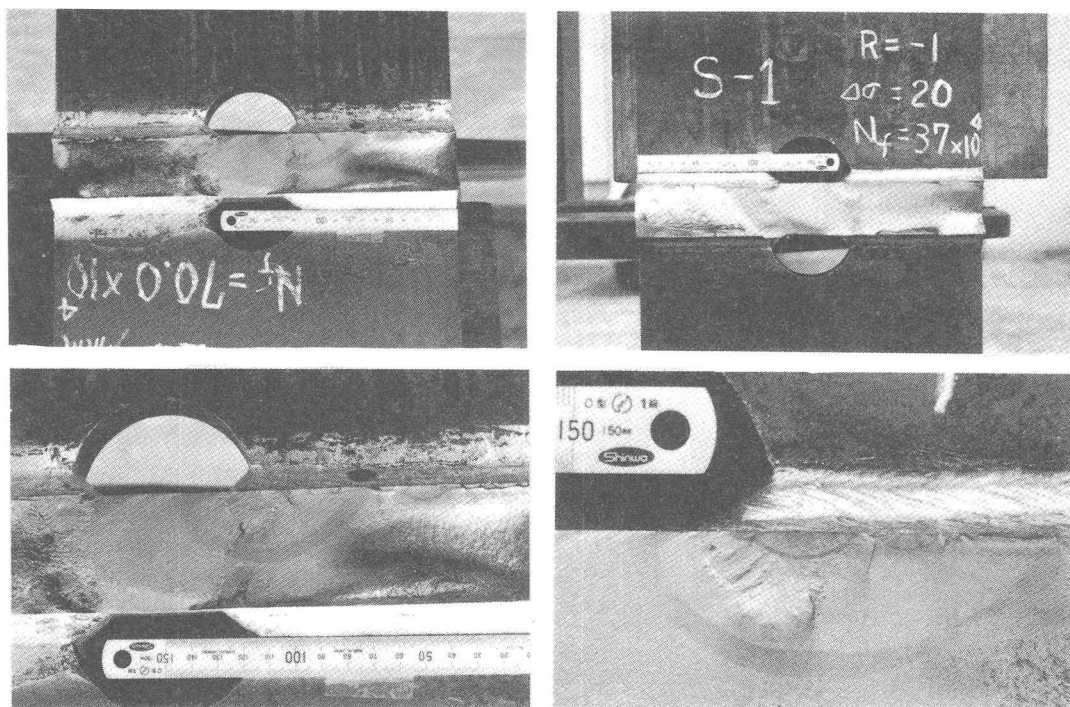


写真-1 疲労破面

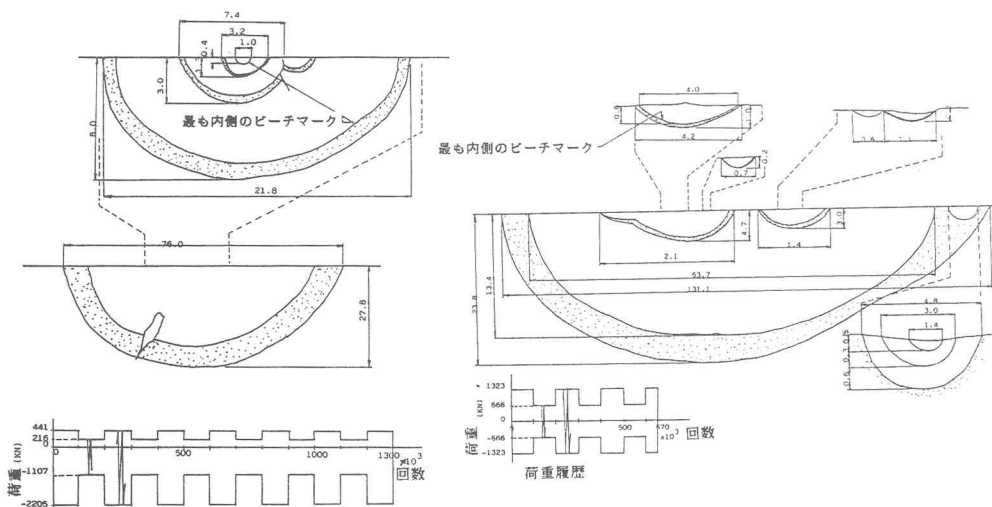


図-7 ビーチマークの観測結果

体で29.4MPaと非常に小さな値であったが疲労破断した。このような低い最大応力でも破断することは、予想し難いことである。

(2) 疲労亀裂の発生と進展

写真-1に破面の例を、図-7にビーチマークの観察結果を示す。S-9試験体を除く8つの試験体では、疲労亀裂はスカルップ端のすみ肉溶接の止端部より発生した。その亀裂の発生箇所は、まわし溶接の方向がまさにリブ板と平行な方向に移る位置である。この位置は、引張残留応力が大きい領域にある。図-8に、

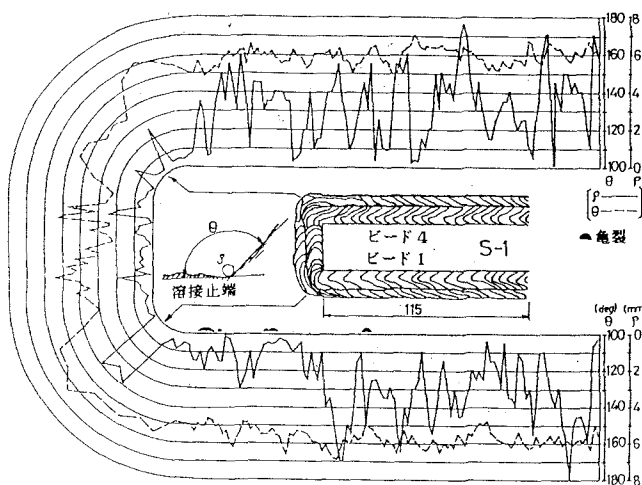


図-8 溶接止端部のフランク角と止端半径

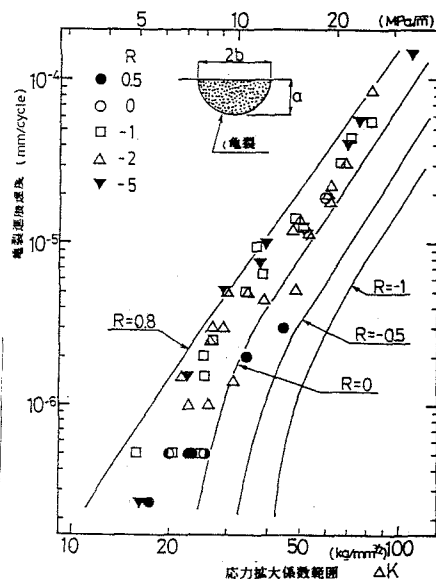


図-9 疲労亀裂進展速度

溶接の止端部のフランク角 θ と半径 ρ の測定結果を示す。このように、溶接ビードがリブ板と平行部分にくらべて、コーナーの溶接（スカラップ付近）の止端形状は悪いことが分る。また、ビーチマークの観察から、最初に小さな複数の亀裂が発生し、それが合体して単一の半楕円の亀裂に進展していくのが分る。この性状は、応力比の影響を受けていない。表-2に、全および半応力範囲によって構成する応力ブロックの数、ビーチマークの数および試験で最初に生じた最も内側のビーチマークの大きさを示す。表に示すように、S-1、S-2、S-4およびS-7試験体では、繰返し数のごく初期に、疲労亀裂が発生したことが分る。また、S-6およびS-8試験体では、ビーチマーク数と応力ブロック数が一致していないが、S-1およびS-2試験体等の最も内側のビーチマークに比較して、それらの最も内側のビーチマークの大きさが大きい事実を考慮すると、S-1試験体等と同様に、これらの試験体でも疲労亀裂が繰返し数の初期に発生していると想定される。しかしながら、S-9試験体は、 $S_r=147\text{MPa}$ では 4.7×10^6 回まで疲労亀裂が生じていない。応力比が下がり、かつ応力範囲が小さくなると、疲労亀裂の発生までに要する応力の繰返し数が全寿命に占める割合が大きくなっている。

図-9に、主材の表面から20～30mm以下のビーチマークを対象として、その間隔から計算した疲労亀裂進展速度（ da/dN ）と応力拡大係数範囲（ ΔK ）の関係を示す。この亀裂は深さ a 、幅 $2b$ の半楕円亀裂と仮定することができる。応力拡大係数範囲は、リブとすみ肉溶接部による応力集中の影響を考慮して、次式で求められる¹⁰⁾。

$$K = S_r \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F_g \cdot F_e \cdot F_s$$

ここで、 F_g は継手の形状とすみ肉溶接部の影響による応力勾配に対する補正係数で、 F_e は亀裂形状に対する補正係数で、 F_s は表面亀裂に対する補正である。これらの補正係数の算定には次式を用いた。

$$F_s = 1.12 - 0.12a/b$$

$$F_e = 1 / \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi} d\xi$$

$$k^2 = 1 - a^2/b^2$$

F_g は、応力分布を有限要素法を用いて計算し、重ね合わせの原理および亀裂内面に分布力を受ける場合の応力拡大係数の解を用いることにより求めた¹⁰⁾。図-10に、溶接止端から板厚方向に対する応力分布および F_g の解析結果を示す。図-9には、太田等¹¹⁾の求めたSM58の応力比 R に対する da/dN と

ΔK の関係曲線も併記した。この図のように試験結果のほとんどは、この $R=0$ の曲線の上にプロットされる。このことは、この試験で用いた溶接試験体では、亀裂進展速度は応力比に依存しなかったことを示しており、応力比が小さくなると疲労寿命の延伸は、亀裂発生回数の違いによるものと想定される。

6. 設計許容応力と平均応力の関係

今まで本州四国連絡橋公団で行ってきた各種の大型疲労試験の S_r-N_f 線の勾配は、約 $-1/3$ であった。したがって、本試験結果を繰返し数200万回の疲労強度に換算するために、 S_r-N_f 線の勾配として $-1/3$ を用いた。200万回に換算した疲労強度を、図-11に横軸に平均応力(S_m)、縦軸に応力振幅($S_a=1/2 \cdot S_r$)で表示した。

前面すみ肉溶接継手が設計基準の継手等級Cとなる条件は、溶接止端形状が滑らかとなる改良溶接棒を用いた場合である。図-11に、当初のC等級溶接継手の許容応力も示す。図のように R が -1 以下の領域で、試験結果はこの許容応力に対してあまり余裕がなく、特に、 $R=-1$ においては、許容応力以下である。したがって、当初の設計基準の許容応力は、 R がマイナスの領域で余裕があまり無いと考えられる。

図-11に、この研究の結果に基づいて提案するC等級許容応力を示す。この新しい許容応力は、 $R=0$ で当時の値と同じに設定した。図のように、試験結果は R の各値に対して、一定の余裕があるのが分る。新許容応力は、平均応力がプラスの領域では横軸に平行で、 $R=-\infty$ (片振れ圧縮)で $R \geq -1$ の許容応力の30%増しとし、その間を直線補間した。図のように R がマイナスの領域では、新しい許容応力は当時のより低くなっている。

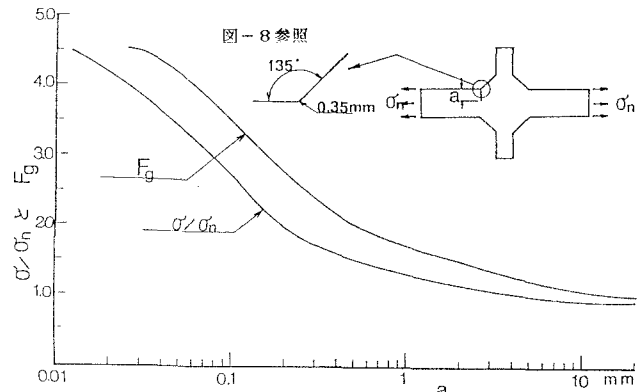


図-10 応力分布と F_g

7. 結論

この研究で得られた主な結果は下記の通りである。

- (1) スカラップおよび縦方向溶接のあるリブ十字溶接継手の疲労寿命は、応力比が小さくなるにしたがって長くなる。しかし、寿命の差は、あまり大きくない。
- (2) 9つの試験体のうち8つの

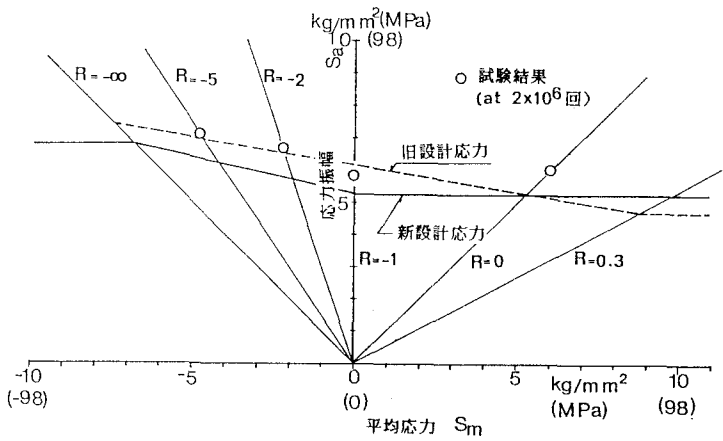


図-11 試験結果とC等級許容応力範囲

試験体で、疲労亀裂は、スカラップ 端の溶接止端形状が悪くなる部分から発生した。疲労亀裂はおたがいに接近して複数発生し、合体して半楕円亀裂として進展した。

(3) 亀裂が板厚の約半分以下では、亀裂進展速度に応力比の違いによる差がなかった。(1)で述べた疲労寿命が応力比が小さくなるにしたがって長くなる理由は、疲労亀裂の発生性状の違い、あるいは疲労亀裂が非常に小さいときの進展の違いによるものと考えられる。

(4) この研究に基づいて、本州四国連絡橋の設計許容応力範囲が改訂された。応力比 $R=0$ での許容応力範囲の値は、当初の設計基準の値と同じ値である。また、平均応力がプラスの領域で、一定とし、 $R=-\infty$ (片振れ圧縮)で、平均応力がプラスの場合の値の30%増しとした。2点間 ($R=-1$ と $R=-\infty$) の間の許容応力範囲は、上で述べたそれぞれの値 ($S_r=125.4\text{MPa}$ と 163.0MPa) の間を直線補間した。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道：建造物設計標準 (鋼とコンクリートとの合成鉄道橋) および解説、1974-3.
- 2) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説、1977-8.
- 3) Hirt,M.A., Yen,B.T. and Fisher,J.W. : Fatigue Strength of Rolled and Welded Steel Beams , Journal of the Structural Division, Proc. of ASCE, ST7, pp.1867~1911, 1971.7.
- 4) Olivier,R. and Ritter,W. : Catalogue of S-N Curves of Welded Joints in Structural Steels. Uniform Statistical Analysis of Fatigue Test Results, DVS Report, No.56, 1979.
- 5) AASHTO : Standard Specifications for Highway Bridges, 1977.
- 6) BS 5400, Part 10 : Steel, Concrete and Composite Bridges. Code of Practice for Fatigue.
- 7) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会・疲労分科会：本州四国連絡橋に関する調査研究報告書、別冊2・本州四国連絡橋の疲労設計、1974-3.
- 8) Takahasi,C. and Kawai,Y. : Fatigue Strengths of Longitudinal Welded Joints under Compressive Stresses, Private Letter.
- 9) Office for Research and Experiments of the International Union of Railways : D 130,Fatigue Phenomena in Welded Connections of Bridges and Cranes, 1974-4.
- 10) Zettlemoyer,N. and Fisher,J.W. : Stress Gradient and Crack Shape Effects on Stress Intensity at Welded Details, Welding Journal, 1978-8.
- 11) 太田昭彦、佐々木悦男、小菅通雄：疲労き裂伝ば速度におよぼす平均応力の影響、日本機械学会論文集、43巻、373号1977-9.
- 12) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書・別冊1・疲れに関する検討、1981-3.
- 13) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会：本州四国連絡橋に関する調査研究報告書、1982-3.
- 14) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会：本州四国連絡橋に関する調査研究報告書、1983-3.

(1986年10月17日受付)