

変動荷重によるリブ十字溶接継手の長寿命疲労試験

Fatigue Tests of Non-Load Carrying Cruciform Joint under Variable Amplitude Loading

近藤明雅*, 山田健太郎**

Akimasa KONDO and Kentaro YAMADA

* 工博 名城大学助教授 理工学部土木工学科 (〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501)

** Ph.D. 名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

Fatigue tests were carried out on non-load carrying fillet welded specimens under constant amplitude (CA) loading and variable amplitude (VA) loading in the long life region. In the CA fatigue tests stress cycles were applied with a constant minimum stress σ_{min} and with two levels of constant maximum stress σ_{max} . The test results showed that at the same applied stress range level the fatigue life with a constant σ_{min} was longer than that with the constant σ_{max} . In the VA fatigue tests Beta distribution was used to express two kinds of stress range spectrum, in which the equivalent stress range $\Delta\sigma_{eq}$ were either in the lower stress range side or in the higher stress range side. When the $\Delta\sigma_{eq}$ was used to plot the data on S-N curve, the fatigue limit under VA loading was lower than that of CA loading. Moreover, the fatigue life under VA stress with the $\Delta\sigma_{eq}$ in the lower stress range side was longer than that in the higher side.

Key Words : fatigue test, variable amplitude loading, cruciform joint, long fatigue life

1. まえがき

鋼構造物のなかでも、橋梁、船舶、航空機およびクレーンガーダー等の構造物は、多数回の繰り返し荷重を受ける。このため、これらの構造物の耐久性には、疲労設計が不可欠となる。

このため、第2次世界大戦後の溶接構造物の小形あるいは大形の疲労試験結果^{1), 2)}を反映して、S-N線図にもとづく疲労設計指針等が制定あるいは改定されてきた。たとえば、英国ではBS5400 Part 10(1980)³⁾、欧州鋼構造協会連合ではECCS 疲労設計指針(1985)⁴⁾、わが国ではJSSC 鋼構造物の疲労設計指針(1993)⁵⁾がそれにあたる。このような指針類は、最新のデータを採用し、破壊力学による検証も加味しており、強度等級分類についてはかなり充実したものになってきている。さらには、国際的な情報交換もあって、設計 S-N 線図の形や強度等級分類の考え方が、各指針で比較的似てきており、共通示方書の作成の機運もある。

しかしながら、これらの指針類で最も議論になっている部分が、変動荷重による疲労強度の評価方法であり、特に長寿命領域での取り扱いが必ずしも明確になっていない。たとえば、道路橋では、死荷重に比して活荷重が小さいという特徴から、実橋にお

ける応力範囲の測定結果は、一般に極端に低応力範囲側に偏った変動応力となる⁶⁾。また、輪荷重を直接支持する床版、床組などの橋梁部材では、特に交通量の多い路線で、繰り返し数が膨大となる。このような、低応力範囲、長寿命領域における疲労挙動を検討、解明するための疲労試験^{7)~10)}は、多大な時間と費用が必要となるため、実験データの蓄積が少ない。前述したように、疲労設計指針においても、この領域での疲労照査方法が必ずしも明確ではなく、実働荷重による低応力範囲領域の疲労試験データの蓄積が望まれている。

本研究では、実働荷重が作用した場合の疲労寿命評価法・設計法を確立するうえで重要となる長寿命領域での変動荷重疲労試験を行ったものである。ここでは、リブ十字すみ肉溶接継手を用いて、下限応力一定および上限応力一定の一定振幅荷重疲労試験、および分布形の異なる2種類の変動振幅荷重疲労試験を行って、両者の試験結果の比較、検討を行った。

2. 疲労試験

2.1 疲労試験体

リブ十字すみ肉溶接継手試験体の形状・寸法を図1に示す。用いた鋼材はJIS G 3106 SM520Bで、

表 1 使用鋼材 (SM520B) の化学成分

C (%)						
C	Si	Mn	P	S	V	C _{eq} *
0.16	0.34	1.32	0.14	0.06	0.04	0.40

* 炭素当量

表 2 使用鋼材の機械的性質 (ミルシート値)

降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
402	539	24

表 3 溶接条件

溶接棒	L-55 (4 mm φ)
電流 (A)	140 ~ 150
電圧 (V)	25
溶接速度 (cm/min)	8 ~ 9

降伏点 σ_y は、402MPa であった。ガス切断された鋼板を所定の寸法に機械加工した後、リブプレートをしみ肉まわし溶接した。このとき、溶接工によるばらつきを取り除くため、継手の溶接は 1 人の溶接工が全て手溶接で行った。溶接止端部は、非仕上げとした。鋼材の化学成分を表 1 に、機械的性質を表 2 に示す。また、試験体の溶接条件を表 3 に示す。なお、試験体の板幅が 100mm のものを C 試験体、70mm のものを CS 試験体とした。

2.2 疲労試験方法

(1) 一定振幅荷重疲労試験

疲労試験は、載荷容量 294kN の電気制御式疲労試験機を用いて約 10Hz の繰り返し速度で行った。疲労試験では、試験体の表と裏に貼った 4 枚のひずみゲージが示す振幅の差が 5 % 程度以下となるように、偏心量をおさえて試験した。

疲労試験は、下限応力 σ_{min} を一定とし、応力範囲を変えるケースと、上限応力 σ_{max} を一定として応力範囲を変えるケースとに分け、次の 3 系列の試験を行った。

- (a) 下限応力一定試験 $\sigma_{min} \approx 20\text{MPa}$
- (b) 上限応力一定試験 $\sigma_{max} \approx 260\text{MPa} (\approx 0.65 \sigma_y)$
- (c) 上限応力一定試験 $\sigma_{max} \approx 370\text{MPa} (\approx 0.92 \sigma_y)$

ここで、上限応力 σ_{max} を降伏応力 σ_y に近い値とした C シリーズは、実構造物では溶接残留応力の存在により、作用応力と溶接残留応力の合計、すなわち上限応力が、降伏点に達する場合もあること

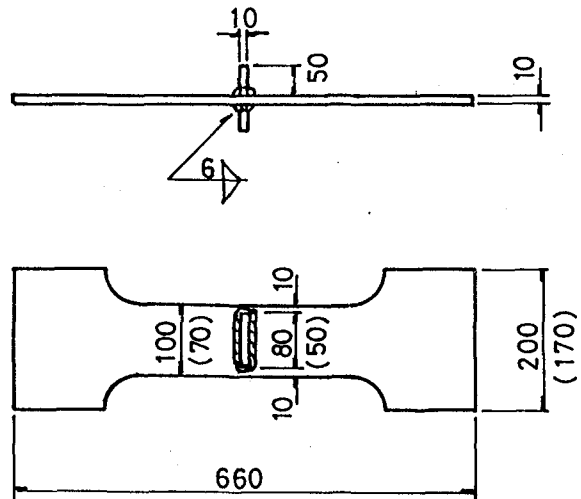


図 1 リブ十字すみ肉溶接継手試験体

を考慮して疲労強度の確認のため試験した。上限応力が $\sigma_{max} \approx 260\text{MPa}$ の B シリーズは、A シリーズと C シリーズの中間的なものであり、上限応力を許容引張応力程度とした。

(2) 変動振幅荷重疲労試験

実働荷重による疲労試験には、構造物で実測されたデータを直接利用する方法と実測データをモデル化して使用する方法がある。本研究では、後者の方法のうち、実測データの統計的解析により確率モデルに置き換えることを想定して、確率分布に従う変動振幅荷重による疲労試験を次のような手順で行った。

1) パーソナルコンピュータを用いて、一様乱数を発生させ、これを変動振幅荷重 (変動応力範囲) の確率分布に従う乱数に変換する。

2) 変換された乱数 1 個が、乱数の大きさに比例した振幅荷重となるような 1 正弦波を作成する。これを所定の数、すなわち本研究では 1000 波の正弦波を発生させた。

3) パーソナルコンピュータで作成した変動荷重データを、AD 変換してデジタル動ひずみ測定器のメモリーに収録する。本研究では、後述するように、所有の試験機が、変動荷重についてはクローズドループになっておらず、このデジタル動ひずみ測定器のメモリーとその出力端子を用いて試験機に波形を与えた。

4) 動ひずみ測定器に収録されたデータを DA 変換して、電気制御式疲労試験機に入力する。

(3) 変動振幅荷重

本研究ではベータ分布の確率分布に従う振幅荷重

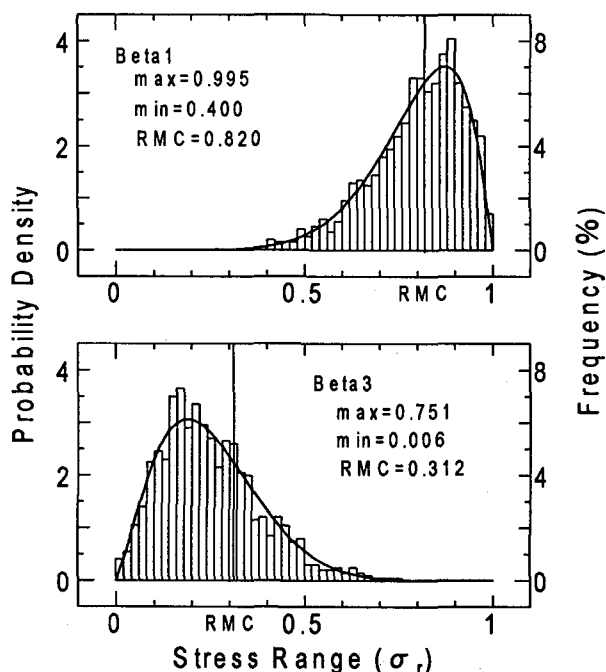


図2 変動振幅荷重の頻度分布

を用いた。ベータ分布の確率密度関数 $f(x)$ を次式で示す。

$$f(x) = \frac{1}{B(q,r)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}} \quad (a \leq x \leq b) \quad (1)$$

ここに、

$$B(q,r) = \int_a^b (x-a)^{q-1}(b-x)^{r-1} dx \quad (2)$$

図2に実験に用いた2種類のベータ分布の確率密度と上記の方法で作成した変動振幅荷重の頻度分布を示す。実線は、確率密度を示す。Beta1は、振幅荷重が高応力範囲側に偏った確率密度であり、式(1)、(2)において $q=8.0$, $r=2.0$ とした場合のものである。また、Beta3は $q=2.5$, $r=7.5$ とした場合の確率密度であり、振幅荷重が低応力範囲側に偏っている。いずれの場合も、式(1)、(2)で $a=0$, $b=1$ とした。

ヒストグラムは、1000波の正弦波の変動振幅荷重（変動応力範囲）の頻度分布であり、区間0から1までを50等分して示した。図中に1000の変動応力範囲のうちの最大値、最小値および後述の式(4)で得られる3乗平均値 RMC を示す。高応力範囲側に偏った Beta1 の3乗平均値は $RMC=0.820$ 、低応力範囲側に偏った Beta3 は $RMC=0.312$ である。

(4) 変動振幅荷重の確認

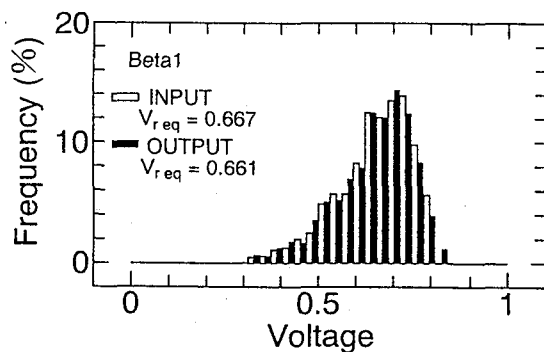


図3 入力荷重の検定(Beta1)

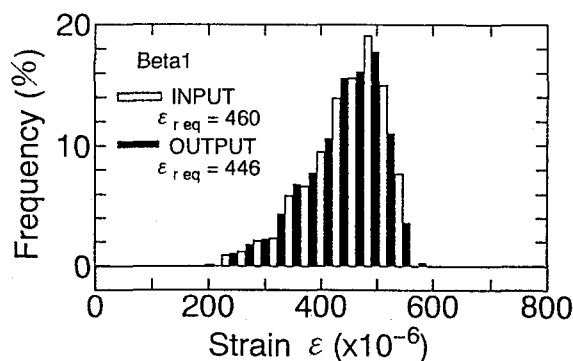


図4 ひずみの検定(Beta1)

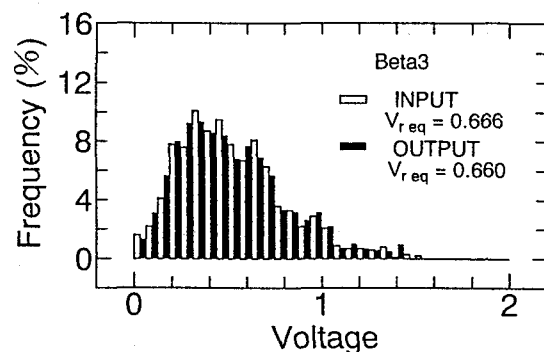


図5 入力荷重の検定(Beta3)

疲労試験中の変動振幅荷重値の検定は、以下に示す2つの方法で行った。まず、図3にベータ分布(Beta1)に従う乱数データから変換した荷重データ（インプットデータ）と試験機のロードセルからのフィードバックデータのヒストグラムの比較を示す。これらのデータは、ヒストグラムレコーダを用いて、レインフロー法により収録した。図中、INPUTは入力荷重データ、OUTPUTはフィードバックデータを示す。横軸に示すボルト値は、入力電圧1ボルトが、用いた試験機で147kNの荷重に相当する。これを、荷重の3乗平均値と比較すると、入力データが $V_{req}=0.667(V)$ 、フィードバックデ

ータが $V_{r,eq}=0.661(V)$ であり誤差は約 1 %である。

また、図 4 に入力荷重データから試験体の断面積を用いて計算したひずみ値と、試験体に貼付したひずみゲージにより計測されたフィードバックデータとの比較を示す。ひずみの 3 乗平均値で比較すると、入力データが $\varepsilon_{r,eq}=460 \times 10^{-6}$ 、ひずみゲージのフィードバックデータが $\varepsilon_{r,eq}=446 \times 10^{-6}$ であり約 3 %の誤差であった。図 5 に示す振幅荷重が低応力範囲側に偏っている Beta3 の荷重データでは、入力データは $V_{r,eq}=0.666$ 、フィードバックデータは $V_{r,eq}=0.660$ であり、このケースにおいても誤差は 1 %程度であった。これらの結果、本研究の変動振幅荷重疲労試験の精度は、本研究の目的に十分合うことが確認できた。

3. 一定振幅荷重による疲労試験

3.1 疲労試験結果のまとめ

一定振幅荷重疲労試験では、下限応力 $\sigma_{min} \approx 20MPa$ とした A シリーズで 12 体、上限応力 $\sigma_{max} \approx 260MPa$ とした B シリーズで 8 体、 $\sigma_{max} \approx 370MPa$ とした C シリーズで 5 体の合計 25 体試験を行った。疲労試験結果を、表 4 に示す。 σ_r は作用応力範囲、 N_f は試験体が疲労破断したときの繰返し回数である。>印のデータは、その繰返し数で破断しなかったことを示す。各試験体系列ごとに、破断した試験体の繰返し数と作用応力範囲を用いて、最小 2 乗法により、次式に示す 50%破壊確率 S- N_f 線図の係数 B1, B2 を計算し、200 万回疲労強度と標準偏差 S を求めて表 5 に示す。

$$\text{Log } N_f = B1 - B2 \times \text{Log } \sigma_r \tag{3}$$

リブ十字すみ肉溶接継手の S- N_f 線図を図 6 に示す。図中の○と●印は下限応力 σ_{min} を約 20MPa とした A シリーズ、△と▽印は上限応力 σ_{max} を約 260MPa とした B シリーズ、および◇印は σ_{max} を 370MPa とした C シリーズの疲労試験結果である。図中の破線は、それぞれのシリーズの 50 %破壊確率線を示す。○と△印は板幅が 100mm、●と▽印は板幅が 70mm の結果であるが、板幅の違いによる疲労寿命の差は小さく、板幅の違いによる影響はほ

表 4 リブ十字溶接継手一定振幅疲労試験結果

σ_r (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)	応力比 R	繰返し数 $N_f (\times 10^3)$	備考
(a) A-Series $\sigma_{min} \approx 20 MPa$					
181	200	19	0.095	492	C
	200	19	0.095	545	C
	200	19	0.095	514	CS
143	162	19	0.117	1,386	C
	162	19	0.117	1,286	C
120	138	18	0.130	2,487	C
	138	18	0.130	4,530	C
	139	19	0.137	2,784	CS
100	119	19	0.160	8,876	CS
	119	19	0.160	7,529	CS
95	114	19	0.166	>22,941	CS
	114	19	0.166	>17,761	CS
(b) B-Series $\sigma_{max} \approx 260 MPa$					
181	259	78	0.301	443	C
	259	78	0.301	351	C
	258	77	0.300	507	CS
143	259	116	0.448	907	C
	259	116	0.448	740	C
120	258	138	0.535	2,510	C
	258	138	0.535	1,159	C
	258	138	0.535	1,508	CS
(c) C-Series $\sigma_{max} = 370 MPa$					
181	370	189	0.511	273	CS
	370	189	0.511	275	CS
143	370	227	0.614	544	CS
120	370	250	0.676	1,076	CS
	370	250	0.676	960	CS

注) > : 未破断
備考欄の C は母材幅 100mm、
CS は母材幅 70mm を示す。

表 5 50%破壊確率 S- N_f 線および 200 万回疲労強度の比較

Series	破断試験体数	S- N_f 線			200 万回疲労強度(MPa)
		B1	B2	S	
A-Series	10	16.11	4.608	0.0784	134
B-Series	8	12.93	3.236	0.1147	112
C-Series	5	12.61	3.180	0.0243	97

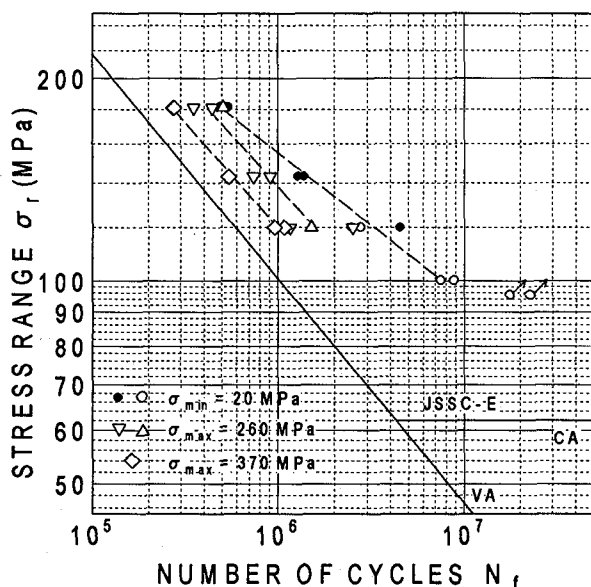


図6 一定振幅荷重疲労試験結果

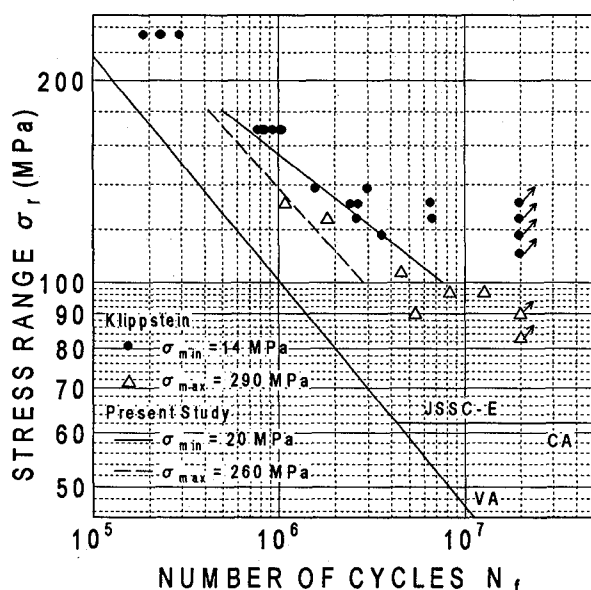


図7 Klippstein et al. の結果との比較

とんだないと思われる。

50%破壊確率に相当する S-N_f 線図から計算した 200 万回疲労強度は、A シリーズで 134MPa、B シリーズで 112MPa、C シリーズで 97MPa となった。すなわち、上限応力 σ_{max} を 260MPa とした B シリーズは、疲労強度が A シリーズより約 16%低い結果となった。また、 σ_{max} が 370MPa の C シリーズは A シリーズより約 28%低い結果となった。S-N_f 線図の傾き B2 は、A、B、C シリーズの順に、それぞれ 4.61、3.23 および 3.18 であり、S-N_f 線図の勾配 (=1/B2) は、作用応力範囲の上限が高くなるほど急になっている。

下限応力 σ_{min} を約 20MPa とした A シリーズでは、 $\sigma_r=100$ MPa で試験した 2 体が 887 万回と 752 万回

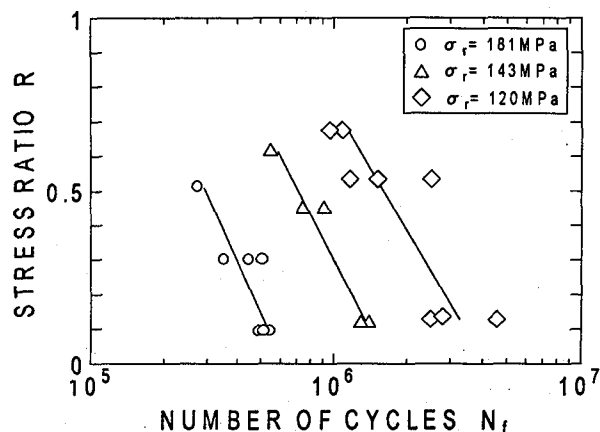


図8 応力比と破断繰返し数との関係

で破断しており、 $\sigma_r=95$ MPa で試験した 2 体は 2294 万回と 1776 万回で未破断であった。このことから、A シリーズの一定振幅荷重の疲労限は、95 ~ 100MPa 程度であると思われる。また、B,C シリーズでは、120MPa を下回る応力範囲で疲労試験を行っておらず、疲労限が求められていないが、前述のように、B,C シリーズの 200 万回疲労強度が A シリーズのそれより低下していることから、B,C シリーズの疲労限は A シリーズより低くなると思われる。

3.2 他の実験値および JSSC との比較

図 7 に Pittsburgh 大学で行われたリブ十字溶接継手の疲労試験結果¹⁰⁾との比較を示す。疲労試験体の母材の板厚と板幅は、それぞれ 3/8in.(9.5mm)、2.5in.(63.5mm)であり、使用鋼材は ASTM A572 (JIS SM490 相当) 鋼である。●印は $\sigma_{min}=14$ MPa、△印は $\sigma_{max}=290$ MPa とした場合の結果である。上限応力 σ_{max} を 290MPa とした場合の疲労寿命は、下限応力 σ_{min} が 14MPa の場合より小さい。前節の実験結果を 2 本の 50%破壊確率線で示したが、前節の実験結果は、Pittsburgh 大学の実験結果の下限界付近に位置している。

図中、実線は JSSC 鋼構造物の疲労設計指針に示されているリブ十字溶接継手の設計 S-N 線図 JSSC-E であるが、すべての実験データはこの JSSC-E より高い疲労強度となっている。

応力比 $R(=\sigma_{min}/\sigma_{max})$ と破断繰返し数 N_f の関係を図 8 に示す。3 レベルの作用応力範囲 σ_r のいずれの場合においても、応力比が大きくなるに従い破断繰返し数は減少する。応力比 $R=0.1$ のときの破断繰返し数は、応力範囲が、 $\sigma_r=120, 143, 181$ MPa の場合に $N_f=344, 140, 53$ 万回であるのに対し、 $R=0.5$ では $N_f=159, 71, 30$ 万回であり、破断繰返し数はおよそ 50%に減少する。

4. 変動振幅荷重による疲労試験

4.1 疲労試験結果のまとめ

変動振幅荷重疲労試験では、8 体の試験体に高応力範囲側 (Beta1) に偏った頻度分布の荷重を載荷し、14 体には低応力範囲側 (Beta3) に偏った荷重を載荷した。Beta1 分布の試験体では、下限応力をすべて $\sigma_{min}=20\text{MPa}$ 一定とした。Beta3 分布の試験体では、10 体を $\sigma_{min}=20\text{MPa}$ 一定とし、4 体を上限応力 $\sigma_{max}=260\text{MPa}$ 一定として疲労試験を行った。

疲労試験結果を、表 6 に示す。 $\sigma_{r.e.q}$ は、等価応力範囲を示し、式(4)により、すべての応力範囲とその繰返し数を 3 乗平均して求めた。一定振幅荷重疲労試験の 50%破壊確率 S-N_r 線の勾配は、A シリーズで 4.61、B シリーズで 3.23 であるが、JSSC 鋼構造物の疲労設計指針⁶⁾において、直応力が作用する溶接継手の設計 S-N 線図の勾配が 3 であるため、ここでは 3 乗平均による等価応力範囲を用いてデータの比較を行った。また、>印は、その繰返し数で未破断であることを示す。

$$\sigma_{r.e.q} = \left(\frac{\sum n_i \sigma_{r,i}^3}{\sum n_i} \right)^{1/3} \quad (4)$$

下限応力を $\sigma_{min}=20\text{MPa}$ とした場合について、変動振幅荷重試験結果の比較を図 9 に示す。図中、○と●印は、一定振幅荷重試験の結果である。また、縦軸の応力範囲には、等価応力範囲を用いた。等価応力範囲でプロットした場合、Beta1 と Beta3 の頻度分布による疲労試験結果は、ともに一定荷重試験結果の延長線上より、少し短寿命側の位置にある。

高応力範囲側に偏った Beta1 の頻度分布による疲労試験では、 $\sigma_{r.e.q}=95\text{MPa}$ で試験した 3 体のうち 2 体が、603 万回と 742 万回で破断し、1 体は 4000 万回を越えても破断しなかった。また、 $\sigma_{r.e.q}=90$ と 85MPa で試験した 2 体の試験体は、3100 万回を越えても破断しなかった、したがって、Beta1 分布の変動振幅荷重の 3000 万回程度の繰返し数における疲労限は、およそ 95MPa と思われる。これは、一定振幅荷重の場合の疲労限である 95 ~ 100 MPa とほぼ同程度の値である。

荷重頻度分布が高応力範囲側に偏った場合の 3000 万回程度の繰返し数における疲労限は、一定振幅荷重の疲労限と似た値になることが認められた。しかしながら、変動振幅荷重が作用している場合、作用応力範囲の最大値が、一定振幅荷重の疲労限より大きいときには、疲労き裂が発生・進展することが予想される。すなわち、前述の $\sigma_{r.e.q}=95,90,85\text{MPa}$ で試験した 3 体の未破断試験体に対して、さらに長期間の疲労試験を行えば疲労破断することも考えられる。仮に、この荷重頻度分布が無限に繰返さ

表 6 リブ十字溶接継手の変動振幅荷重疲労試験結果

$\sigma_{r.e.q}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)	繰返し数 $N_f (\times 10^{-3})$	備考
---------------------------	-------------------------	-------------------------	--------------------------------	----

(a) Beta1 分布 $\sigma_{min} \approx 20 \text{ MPa}$

120	166	20	1,621	CS
110	154	20	2,870	CS
110	154	20	2,752	CS
95	135	20	6,027	CS
95	135	20	7,422	CS
95	134	19	> 40,480	C
90	129	20	> 31,300	CS
85	123	20	> 31,790	CS

(b) Beta3 分布 $\sigma_{min} \approx 20 \text{ MPa}$

120	316	27	1,705	CS
108	288	27	3,240	CS
95	247	19	2,872	C
93	244	19	3,776	C
82	217	19	6,453	C
80	213	20	15,569	CS
75	201	20	12,790	CS
70	188	19	20,396	C
70	189	20	24,269	CS
65	177	20	46,629	CS

(c) Beta3 分布 $\sigma_{max} \approx 260 \text{ MPa}$

95	260	32	2,493	C
79	256	65	2,347	C
71	260	89	5,401	C
52	258	134	21,781	C

注) > : 未破断
備考欄の C は母材幅 100mm、
CS は母材幅 70mm を示す。

れると、Beta1 分布の中の一定応力振幅の疲労限を越える応力範囲の繰返し数が多くなり、破断に至る。 $\sigma_{r,max}$ は、 $\sigma_{r.e.q}$ の 1.21 倍であることから、 $\sigma_{r.e.q}$ が一定応力振幅の疲労限に近いとすると、 $\sigma_{r.e.q} \approx 80\text{MPa}$ 程度が $\sigma_{r.e.q}$ で表したときの疲労限となる。ただし、疲労試験によってこの疲労限を確認することは多大な時間を必要とするため難しい。

低応力範囲側に偏った Beta3 の分布による変動振幅荷重を載荷した試験体は、10 体すべて破断した。 $\sigma_{r.e.q}=70\text{MPa}$ で試験した 2 体は、2040 万回と 2426 万回で破断し、65MPa で試験した 1 体は、4663 万回で破断していることから、Beta3 分布の疲労限は、65MPa を下回る。Beta1 分布の場合と同様に、無

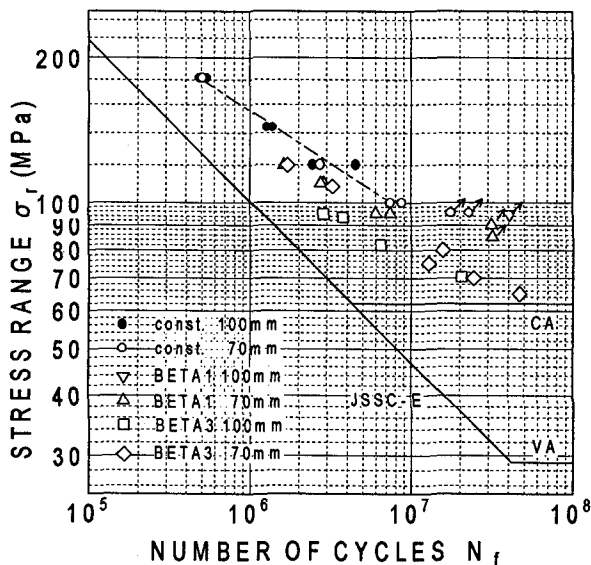


図9 変動振幅疲労試験の結果

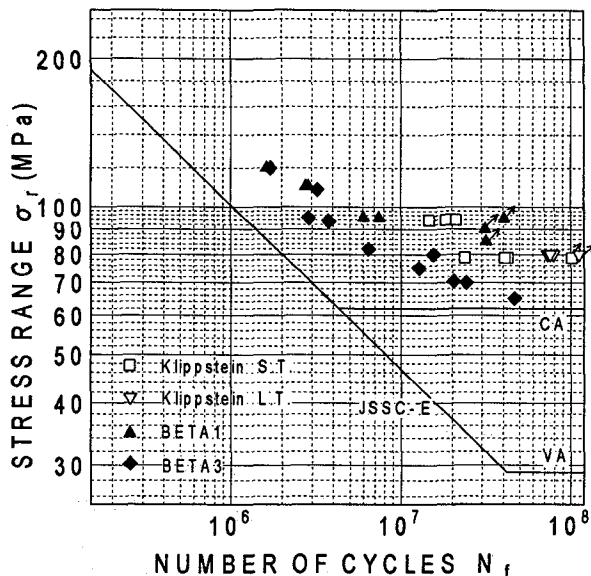


図10 Klippstein et al. の結果との比較

限大の繰返し数に対する理論上の疲労限を求めると、Beta3 分布の応力範囲の最大値は、 $\sigma_{r, max} \approx 2.41 \sigma_{r, eq}$ であることから、およそ 40MPa となる。

4.2 他の実験値との比較

Pittsburg 大学で行われた変動振幅荷重による疲労試験結果¹⁰⁾との比較を図10に示す。実験に用いられた変動応力範囲(図11)は、米国の道路橋で実測された応力頻度に基づいて求められたものである。応力頻度分布が低応力範囲側に偏った頻度分布であるが、上限の1.0近くまで広く分布している頻度分布(Long-Tail)と、0.625で打ち切りとなっている頻度分布(Short-Tail)の2種類が使用された。3乗平均値は、それぞれ0.269と0.268である。両者の

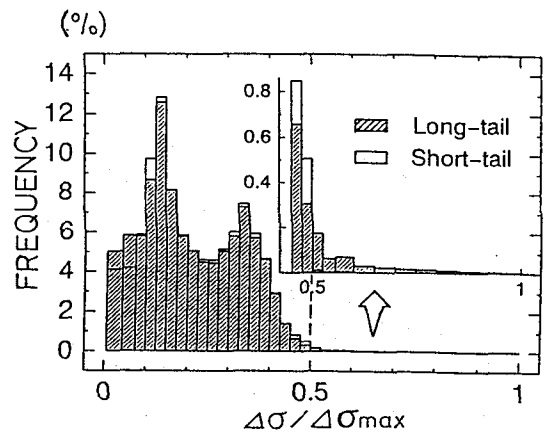


図11 Klippstein et al. の荷重頻度分布

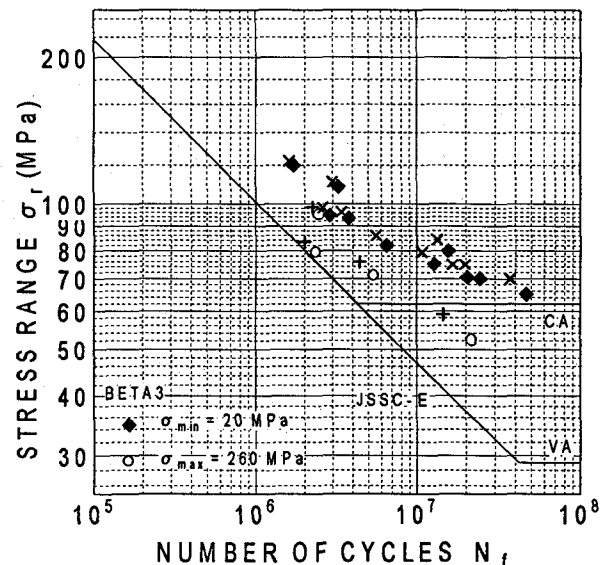


図12 $\sigma_{max} = 260\text{MPa}$ の結果との比較

試験結果を比較すると、3乗平均値がほぼ等しいにもかかわらず、Long-Tail 分布の結果が、Short-Tail 分布の結果より長寿命側にある。これは、比較的小さい応力範囲の繰返し荷重が作用している場合に、その途中で極端に大きな応力範囲の荷重(過荷重)が作用すると、その直後には疲労き裂進展速度が遅くなるという遅延現象のためであり、途中で作用する過荷重が大きいほど遅延効果が高くなる^{15), 16)}ことによるものと考えられる。応力範囲の最大値は、Long-Tail 分布では $\sigma_{r, max} \approx 3.62 \sigma_{r, eq}$ であり、Short-Tail 分布では $\sigma_{r, max} \approx 2.33 \sigma_{r, eq}$ である。

▲と◆印は、前節の実験結果を示すが、いずれのデータも Pittsburg 大学の結果より短寿命の位置にプロットされる。この原因の一つに、一定振幅荷重疲労試験結果(図7)において述べたように、本研究の一定振幅荷重試験結果が、Pittsburg 大学の試験結果の下限界付近にあることがあげられる。また、実験に使用している変動振幅荷重の頻度分布が異なる

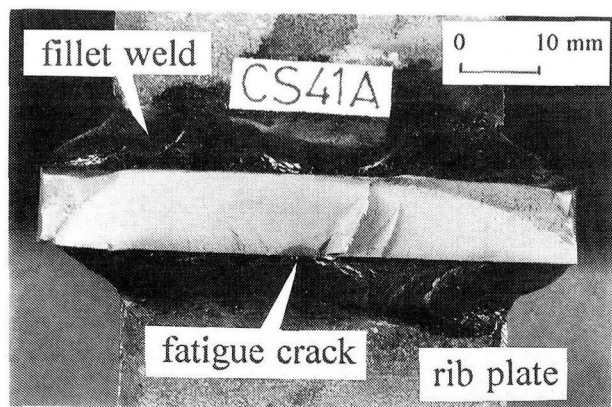


写真 1 破面にマークされた疲労き裂（単体き裂）

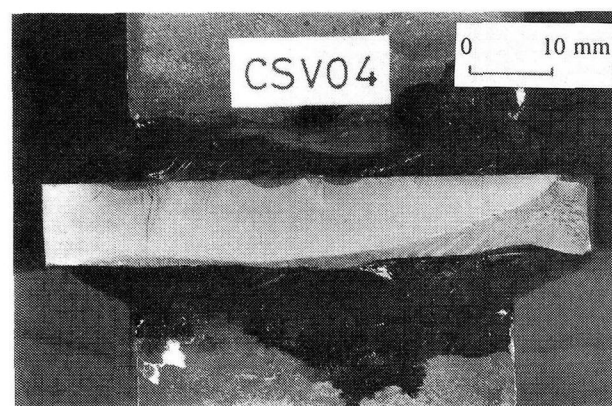


写真 2 破面にマークされた疲労き裂（複数き裂）

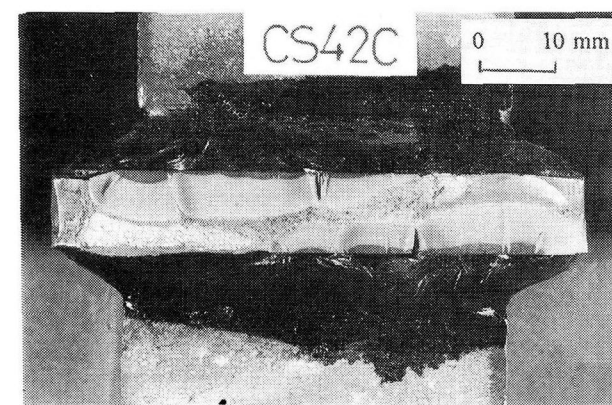


写真 3 破面にマークされた疲労き裂（合体したき裂）

ため、種々の大きさの作用応力の相互干渉効果の違いも考えられる。

低応力範囲側に偏った Beta3 分布の変動振幅荷重試験で、下限応力を $\sigma_{min}=20\text{MPa}$ 一定および上限応力を $\sigma_{max}=260\text{MPa}$ 一定として行った試験結果の比較を図 12 に示す。◆印は $\sigma_{min}=20\text{MPa}$ の結果を示し、○印は $\sigma_{max}=260\text{MPa}$ の結果を示す。一定振

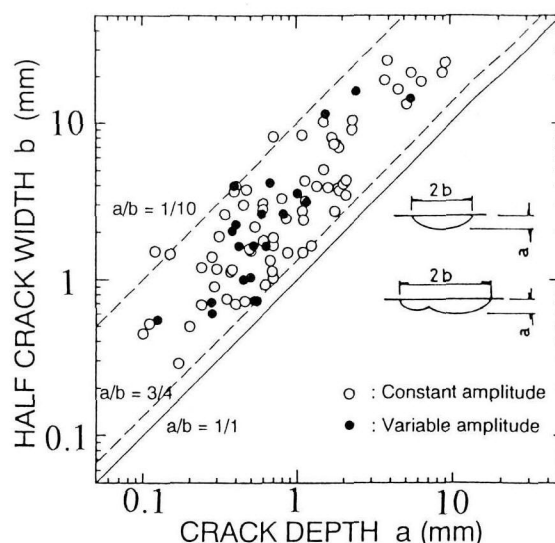


図 13 マークされた疲労き裂の形状比

幅荷重試験結果と同様に、作用応力範囲が同じであれば $\sigma_{max}=260\text{MPa}$ としたときの疲労寿命は減少する。×と+印は、JSSC 疲労設計指針に規定されている等価応力範囲の算定方法に従って求めた等価応力範囲と繰返し数を示すものであり、リブ十字溶接継手の設計 S-N 線に相当する JSSC-E の変動振幅応力範囲に対する打ち切り限界 $\sigma_r=29\text{MPa}$ 以下の応力範囲の繰返し数を除いて計算したものである。◆と○印の位置より左上にプロットされるが、 $\sigma_{max}=260\text{MPa}$ 一定として試験を行った 4 体の試験結果は、JSSC-E より高い疲労強度となっている。

5. 疲労破面の観察

溶接止端部に発生する疲労き裂の形状およびき裂の進展状況を把握するために、疲労試験の途中で適当な繰返し数の時期に、浸透性のよい塗料を溶接止端部に塗布し、それまでに生じていたであろう疲労き裂をマークするダイチェック試験を行った。また、一定振幅荷重試験においては、ピーチマーク試験も併用した。

試験体が破断した後、破断面にマークされた疲労き裂の形状と寸法を測定し、疲労き裂発生個所を確認した。マークされた疲労き裂の測定には、測定精度が $1/100\text{ mm}$ の読取り顕微鏡を用いて、き裂深さ a およびき裂幅 $2b$ を測定した。

リブ十字溶接継手では、溶接止端部に沿って複数個の半楕円状き裂が発生し、この半楕円状き裂が単独にあるいは複数個のき裂が合体して進展し疲労破断に至る。

写真 1 は、破面の中央に単独の半楕円状き裂がマークされた例である。写真 2 は、複数個の疲労き裂がマークされた場合のものであり、写真 3 は、複数個の半楕円状き裂が合体し、溶接止端部に沿って広が

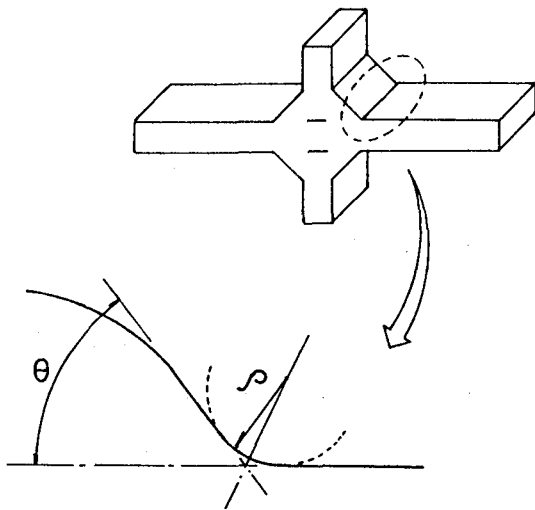


図 14 溶接止端形状

った場合のものである。このような疲労き裂発生・進展状況のパターンと疲労試験パラメータ、すなわち作用応力範囲の大小、下限応力（上限応力）の大小、および一定振幅荷重と変動振幅荷重との違い、との関連を調査したが、本研究の実験データからは、両者の間に明確な関連性は認められなかった。

マークされた半楕円状疲労き裂のき裂深さ a とき裂半幅 b の形状比 a/b を図 13 に示す。○印が一定振幅荷重試験、●印が変動振幅荷重試験においてマークされたき裂の形状である。両者のき裂形状は、同様な傾向を示しており、そのき裂形状比 a/b は、ほぼ $1/10 \sim 3/4$ の範囲内にある。

6. すみ肉溶接止端形状の測定

すみ肉溶接継手では、図 14 に示す溶接止端形状が疲労寿命に影響する^{11)~13)}。止端半径 ρ が小さいほど、また止端角 θ が大きいほど溶接止端の応力集中率が高くなり、疲労き裂の発生・進展が早くなり、疲労寿命が短くなる。一般に、この応力集中には、 θ に比して ρ のおよぼす影響が大きく、その他、試験体母材の板厚、すみ肉溶接の脚長、リブ板厚が影響する¹⁴⁾。本研究に用いたリブ十字溶接継手の止端形状を測定し、止端半径 ρ と止端角 θ がどの程度の範囲に分布しているかを調査した。

まず、すみ肉溶接止端部をシリコン印象材で型取りし、それを 1mm 程度の薄片に分割した。この薄片を拡大投影機で 10 倍に拡大してトレースし、止端半径 ρ と止端角 θ を測定した^{11)~13)}。

試験体の板幅方向の止端角 θ および止端半径 ρ の分布とダイチェックによりマークされた疲労き裂位置との関係の例を図 15 に示す。 θ 、 ρ の値は、溶接ビードに沿って変化しており、マークされた疲労き裂位置の近傍での止端半径 ρ の値が小さいことがわかる。しかし、マークされた疲労き裂の右側に、

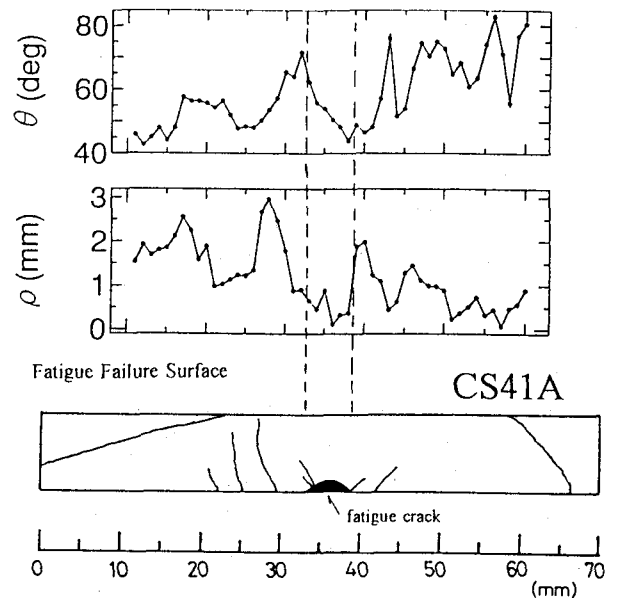


図 15 マークされた疲労き裂位置と溶接止端形状との関係

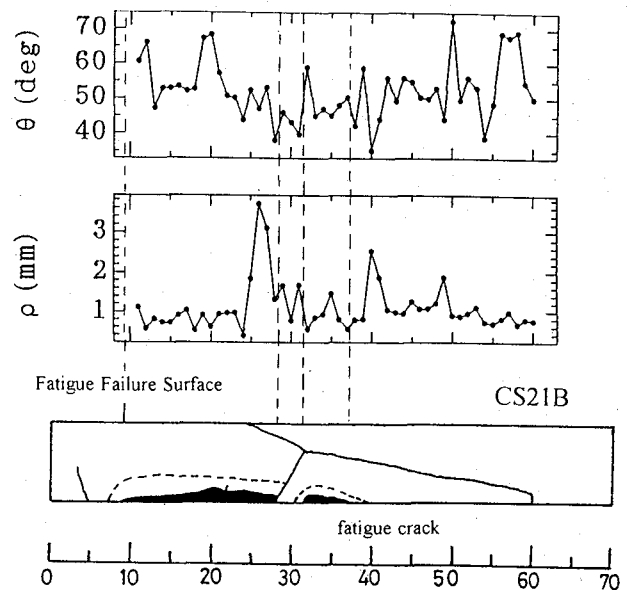


図 16 マークされた疲労き裂位置と溶接止端形状との関係

き裂位置の ρ と同等で、 θ の値がき裂位置より大きい箇所が存在するが、疲労き裂はマークされていない。図 15 の θ 、 ρ の分布は、約 1mm 厚の薄片に分割した型の止端部の測定結果であるが、溶接ビード止端は、荷重の作用方向にも凹凸をなしている。すなわち、同じ θ 、 ρ を有する場合には、作用荷重方向に凸の箇所において、凹の箇所より大きな応力集中率となる。したがって、試験体溶接止端の応力集中率の分布は、厳密にはこの凹凸の影響を加味したものとなるが、図 15 にはこの影響が反映されてい

ない。右側部分の応力集中の高い箇所では、ダイチェックの時に、ダイチェックではマークできない微小なき裂が存在しているか、あるいはさらに多くの繰り返し応力の作用後にき裂が発生するものと思われる。

図 16 に疲労き裂が溶接止端に沿って拡がった例を示す。疲労破面左側の疲労き裂がマークされた位置では、止端半径 ρ の小さい箇所が連なっている。このような場合には、同時期に複数の疲労き裂が発生することになり、き裂が進展・合体して溶接止端に沿って拡がる。

以上のように、疲労き裂は溶接止端の応力集中率の高い箇所から順次発生する。この応力集中率の高い箇所が点在する場合には、前章の写真 1 のような疲労き裂がマークされ、同等の応力集中率を有する箇所が複数個あって、その間隔が狭くなるにすぎない写真 2、写真 3 のようになるものと思われる。

データ数 1120 の止端角と止端半径の頻度分布と、 θ, ρ の分布が正規分布および対数正規分布に従うと仮定した場合の確率分布を図 17 に示す。 χ^2 検定により仮定した分布の妥当性を評価した。適合度に関する χ^2 検定は、分布の妥当性を絶対評価できるような情報を与えるものではないが、相対的な適合度を求める場合には有効である。相対的な適合度は、止端角 θ の場合には正規分布が適しており、止端半径 ρ では対数正規分布が適している。 θ が正規分布に従うと仮定すれば、平均値が 55.3° であり、95%信頼区間の下限値と上限値はそれぞれ 32.7° 、 77.9° となる。止端半径 ρ が対数正規分布に従うものとするれば、平均値が 0.67mm となり、95%信頼区間の下限値と上限値はそれぞれ 0.14mm 、 3.1mm となる。

7. まとめ

リブ十字すみ肉溶接継手を用いて、一定振幅荷重疲労試験および 2 種類の変動振幅荷重疲労試験を行い、疲労寿命を比較した。試験体 25 体を下限応力一定と上限応力一定の一定振幅荷重で試験し、22 体を分布形の異なる 2 種類の変動振幅荷重で試験した。得られた結果を要約すると次の通りである。

(1) 一定振幅荷重による疲労試験結果から、200 万回疲労強度は下限応力 $\sigma_{min}=20\text{MPa}$ の場合に 134MPa 、上限応力 $\sigma_{max}=260\text{MPa}$ の場合に 112MPa 、 $\sigma_{max}=370\text{MPa}$ の場合に 97MPa となった。 $\sigma_{min}=20\text{MPa}$ と比べて、 $\sigma_{max}=260\text{MPa}$ の場合は、疲労強度が約 16 % 低く、 $\sigma_{max}=370\text{MPa}$ の場合には約 27 % 低い。しかしながら、すべての実験結果は、非仕上げのリブ十字溶接継手の設計 S-N 線図 JSSC-E より高い疲労強度となっている。

(2) 下限応力 $\sigma_{min}=20\text{MPa}$ 一定の場合、一定振

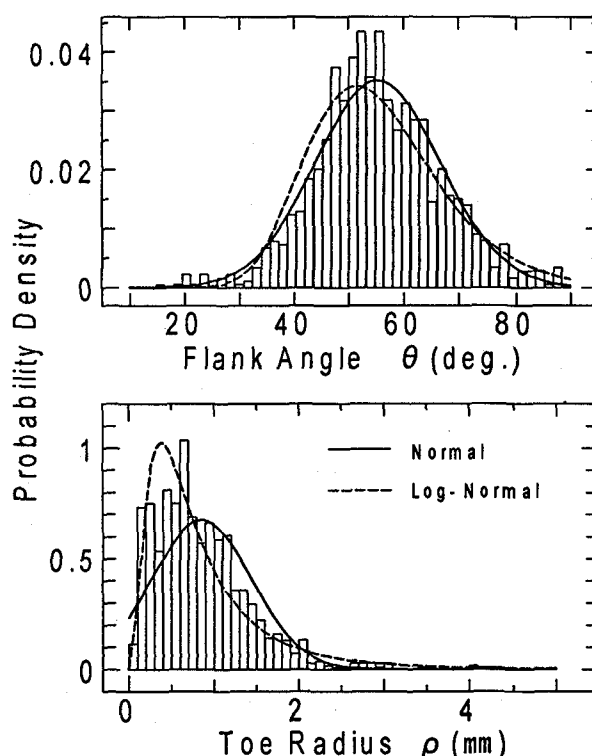


図 17 止端角 θ と止端半径 ρ の確率分布

幅荷重試験の疲労限は $95 \sim 100\text{MPa}$ となった。

(3) 変動振幅荷重による疲労試験結果を等価応力範囲 (3 乗平均値) で整理した場合、一定振幅荷重疲労試験結果の 50 %破壊確率線の延長より若干下回る強度が得られた。また、高応力範囲側に偏った頻度分布 (Beta1) による変動振幅荷重試験の 3000 万回程度の繰り返し数における疲労限はおよそ 95MPa であり、一定振幅荷重の場合とほぼ同程度の疲労限が得られた。

(4) 低応力範囲側に偏った頻度分布 (Beta3) の変動振幅荷重を載荷した 10 体の試験体は、すべて疲労破断した。 $\sigma_{max}=65\text{MPa}$ で試験した 1 体は、繰り返し数 4662 万回で破断しており、疲労限は 65MPa を下回る。

(5) 変動振幅荷重下においても、上限応力 $\sigma_{max}=260\text{MPa}$ 一定とした場合に、一定振幅荷重の場合と同様に疲労寿命が低下するが、実験結果はすべて設計 S-N 線図 JSSC-E を満足した。

(6) 一定荷重振幅試験と変動振幅荷重試験においてマークされた半楕円き裂の形状比 a/b は、 $1/10 \sim 3/4$ の範囲にある。

(7) リブ十字溶接継手の止端形状の頻度分布に適合する確率分布として正規分布と対数正規分布の 2 つを仮定すると、止端角 θ は正規分布、止端半径 ρ は対数正規分布が適している。

謝辞

本研究は、平成4年度から継続して名古屋高速道路公社から依頼された研究の一部をまとめたものである。平成5年度には、名城大学学術研究助成費を使用した。本研究を進めるにあたり、当時学生であった程小華（現建設省土木研究所）、奥原祐治（現鉄道建設公団）、石原孝治（現日本技術開発）、上見正人（現オリエンタルコンサルタンツ）、田中義晴（現愛知工業高等学校）、深見智宏（現トピー工業）、植木治雄（現名古屋高速道路公社）、児玉栄治（現愛知県道路公社）の諸氏には実験で多大な協力をいただいた。また、試験体の製作にあたっては、トピー工業（株）豊橋製造所の青木尚夫氏と酒井吉永氏に多大な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Hirt, M.A., Yen, B.T. and Fisher, J.W. : Fatigue Strength of Rolled and Welded Steel Beams, ASCE, ST7, 1971.7
- 2) Fisher, J.W., Albrecht, P.A., Yen, B.T., Klingerman, D. J. and McNamee, B.M. : Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments, NCHRP Report 147, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1974
- 3) British Standards Institution : Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 10, BS5400, 1980
- 4) European Convention for Constructional Steelwork : Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures, 1985
- 5) 日本鋼構造協会 : 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993年4月, 技報堂出版
- 6) 山田健太郎, 重富寿 : 長寿命域での低荷重振幅疲労試験結果, 構造工学論文集, Vol.35A, 1989年3月
- 7) Abtahi, A., Albrecht, P. and Irwin, G. R. : Fatigue of Periodically Overloaded Stiffener Detail, Proc. of ASCE, Journal of the Structural Division, Vol. 102, No. ST11, Nov., 1976
- 8) Albrecht, P. and Yamada, K. : Simulation of Service Fatigue Loads for Short-Span Highway Bridges, Service Fatigue Loads Monitoring, Simulation, and Analysis, ASTM, STP 671, 1979
- 9) Agerskov, H. and Pedersen, N. T. : Fatigue Life of Offshore Steel Structures under Stochastic Loading, Proc. of ASCE, Journal of the Structural Engineering, Vol. 118, No. 8, 1992
- 10) Melhem, H.G. and Klippstein, K.H. : A Study on Variable Amplitude Load Fatigue: Work-in Progress, Research Report No. ST-6, Department of Civil Engineering, University of Pittsburgh, 1990.1
- 11) 田垣徳幸, 近藤明雅, 山田健太郎, 菊池洋一 : 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. 8
- 12) 山田健太郎, 村山眞, 近藤明雅, 菊池洋一 : 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, No. 337, 1983.9
- 13) 近藤明雅, 山田健太郎, 菊池洋一 : 10年間大気暴露した耐候性鋼と普通鋼溶接継手の疲労挙動, 土木学会論文集, No. 489 / I -27, 1994.4
- 14) 近藤明雅, 塚本勝巳 : 荷重非伝達十字溶接継手止端部の応力集中係数の算定式, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, 1993.9
- 15) 三ツ木幸子, 大野貴史, 山田健太郎 : 過荷重を受けた応力集中のある部材の疲れ特性, 土木学会論文集, No. 368 / I -5, 1986.4
- 16) Cheng X., Okuhara Y., Yamada K. and Kondo A. : Fatigue Crack Growth Rate Measurement of Structural Steel under Overload Conditions, Proc. of JSCE, Structural Eng. / Earthquake Eng. , No. 489 / I -27, 1994.4

(1996年9月6日受付)