

長寿命域での低荷重振幅疲れ試験結果

Constant Amplitude Fatigue Tests in the Long Life Region and

Fracture Mechanics Analysis

山田健太郎¹⁾, 重富 寿²⁾

Kentaro YAMADA and Hisashi SHIGETOMI

ABSTRACT

Fatigue strength evaluation of welded details in long life region, for example over five million cycles, is essential for fatigue design of bridge components, because the stress range measured in actual bridges in service are often in this range. Constant amplitude fatigue tests are carried out on 200 mm long gussets welded to tensile plates and tensile flange of beams and on 200 mm long cover plates in the low stress range region. The test results on 200 mm long gussets are compared with fatigue crack propagation life computed using fracture mechanics technique and the Monte Carlo simulation. The analytical results are generally in good agreement with the test results in the finite life region. However, the predicted fatigue limit using a threshold value of stress intensity factor range is lower than the runout level of test data.

1. はじめに

わが国の道路橋示方書では、鋼床版、吊材等を除いて一般に疲労を考慮しない¹⁾。しかしながら、近年設計当時予想しなかった自動車荷重や交通量の増大により、各所で疲労損傷が報告されており、道路橋に対する疲労の検討が急務となっている。道路橋の場合には、低応力側に極端に偏った頻度分布の変動応力が生じていることが実橋における測定結果から知られている²⁾。そのため低応力範囲、すなわち長寿命域における溶接継手の疲れ挙動の評価が重要になってくる。

従来行われてきた溶接継手の疲労試験では200万回疲れ強さ、あるいはそれに近い繰返し数が基準とされており、それ以上の長寿命域のデータは比較的少ない。それは試験時間が指数的に長くなり、膨大な時間とコストがかかるからである。そこで本研究では、長寿命域に注目してガセット付引張試験体2体、及びガセットとカバープレートが溶接された曲げ試験体2体について、定振幅応力下で疲れ試験を行った。さらにモンテカルロシミュレーションを用いた疲れ亀裂進展寿命解析をガセット継手について行い、試験結果と併せて設計S-N線図の定振幅疲れ限度について考察を行った。

1) 正会員 Ph.D. 名古屋大学工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

2) 正会員 工修 山口県 (〒753 山口市滝町1-1)

2. 溶接継手の長寿命域における疲れ試験

2.1 試験体

試験体は、Fig.1に示すように引張試験体G2L系2体と曲げ試験体PG2L系2体の、合計4体である。両系とも材質はSM50Aで、その化学成分及び機械的性質をTable 1に示す。これらは、過去に行った試験体^{3), 6)}と同一時期に製作したものであり過去の実験値との比較が可能である。G2L系は10×200×900mmの母材の面内に10×50×200mmのガセットを対称に2ヶ所溶接した。PG2L系は、支間1.4m、桁高250mm、上フランジ160×16mm、下フランジ160×10mm、腹板224×9mmで、G2L系と同寸法のガセットが4ヶ所引張りフランジに面内に溶接されている。さらに引張りフランジの中央に10×80×200mmの板（便宜上カバープレートと呼ぶ）が溶接されている。ガセットは、いずれもレ型開先突合せ溶接で取り付けられ、カバープレートは脚長6mmのまわしすみ肉溶接で取り付けられている。なお、溶接止端部はすべて非仕上げとした。

2.2 疲れ試験方法

疲れ試験はアムスラー型万能試験機（容量100t）を使用し、G 2 L系の場合には上方からの引張り、P G 2 L系の場合には下方からの3点曲げで試験を行った。繰返し速度は約4 Hzとした。疲れ試験に先立ち、全ての試験体に4枚の歪ゲージをFig.2に示す位置に貼り偏心のチェック、荷重のチェックを行った。また亀裂が発生したときと、亀裂が最終亀裂に達したときに試験機が自動的に停止するように、銅線（0.04mmφ）をFig.2に示す位置に貼った。

荷重の大きさは、あらかじめデータベースで検索して長寿命域のデータが得られるように決めた。初期亀裂は銅線が切れて試験機がストップした時とし、そのときの繰返し数をNcとした。また最終亀裂は、ガセ

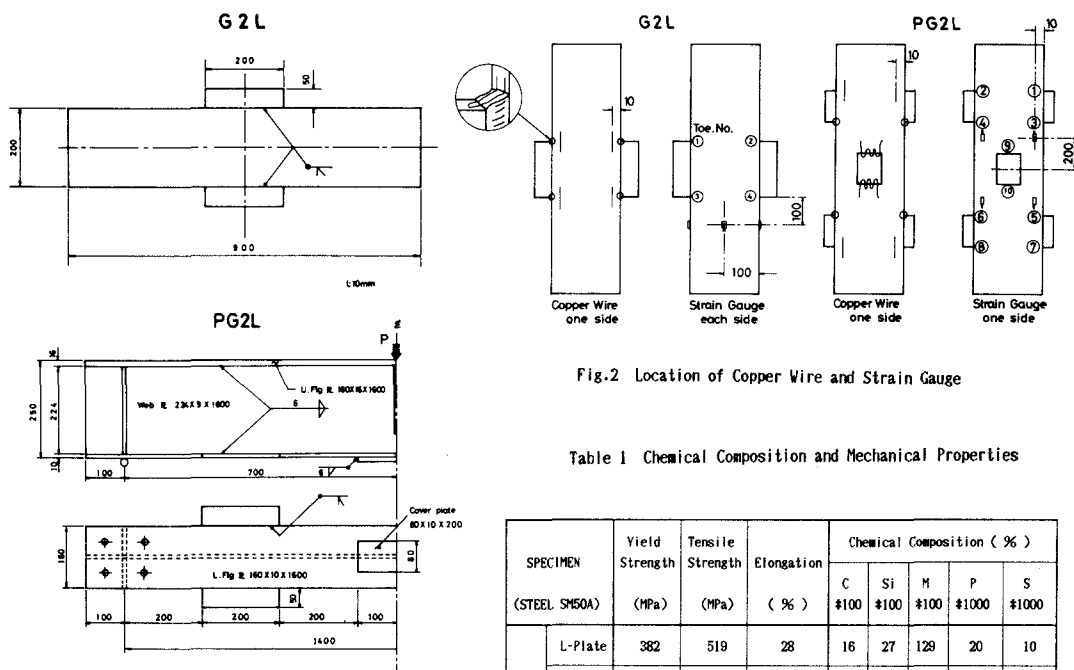


Fig.2 Location of Copper Wire and Strain Gauge

Table 1. Chemical Composition and Mechanical Properties

SPECIMEN (STEEL SM450A)		Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Chemical Composition (%)				
					C #100	Si #100	Mn #100	P #1000	S #1000
PG2L	L-Plate	382	519	28	16	27	129	20	10
	Web	382	529	27	16	26	132	19	6
	U-plate	382	519	29	14	30	140	20	4
G2L		402	559	26	18	28	131	15	3

ット継手については止端部から10mmのところに貼った銅線が切れたときとし、カバープレート溶接については目視で亀裂長が50mmに達したときとした。ただしカバープレート溶接については、ルート部から亀裂が発生した場合にはフランジに亀裂が達したと思われる時とし、その時の繰返し数をNfとした。ガセット継手については亀裂が最終亀裂に達すると亀裂の先端に直径約10mmのストップホールを明けて亀裂の進展を止めた。これは、1つの試験体から多くのデータを得るのと、ストップホールの効果についてのデータを得るためである。また、このストップホールから発生する亀裂を感知するために円孔縁から約1mm離れた位置に銅線（0.04mmφ）を貼った。初期亀裂や最終亀裂については、亀裂形状を見るために、荷重の上限はそのままに振幅を1/2にして約40万回载荷してピーチマークを付けた。ただし、Nc及びNfの値には、ピーチマークに要した繰返し数を除いた。さらに、適当な時期に亀裂にインクを染み込ませて、ピーチマーク以上に亀裂形状をマークすることを試みた。疲れ試験はストップホールから亀裂が発生するか、試験体が破断するか、繰返し数が2000万回を超えるかした場合終了した。

2.3 疲れ亀裂の発生、進展挙動

疲れ試験結果をTable 2,3に示す。ここでPG2L1供試体は2000万回を超えても亀裂が発生しなかったために、荷重を1.5倍にして再試験を行った。PG2L2供試体は、カバープレートからの亀裂が3000万回を超えても試験体の破断に至らなかったために、荷重を1.5倍にして载荷を行った。ガセット継手は、すべて溶接止端部から発生した亀裂によって寿命が決まった。またカバープレート溶接は、いずれもルート部から亀裂が発生しており、フランジに亀裂が達したと思われる時を最終亀裂とした。

Table 2 Fatigue Test Result of 200mm long Gusset

Specimen No.	Toe No.	Stress Range (MPa)	Nc ($\times 10^3$ cycles)	Crack Size at Nc (mm)	Nf ($\times 10^3$ cycles)	Crack Size at Nf (mm)
G2L1	2	49.0	3,094	0.5	4,002	12.0
G2L2	2	49.0	1,071	1.0	—	—
	4	49.0	1,071	1.5	2,817	11.5
PG2L1	5	39.2	> 20,503	—	—	—
PG2L1(R)	5	58.8	634	2.4	1,285	9.4
	3	58.8	1,285	1.6	2,711	19.8
PG2L2	3	39.2	> 28,822	—	—	—
PG2L2(R)	3	58.8	1,048	1.4	—	—
	4	58.8	1,266	—	—	—

(R): Retested
> : run out

1MPa=9.8kg/mm²

Table 3 Fatigue Test Result of 200mm long Cover Plate

Specimen No.	Toe No.	Stress Range (MPa)	Nc ($\times 10^3$ cycles)	Crack Size at Nc (mm)	Nf ($\times 10^3$ cycles)	Crack Size at Nf (mm)
PG2L1	5	59.0	> 20,503	—	—	—
PG2L1(R)	10	88.2	1,771	—	2,204	95.0
PG2L2	10	58.6	14,153	—	27,633	75.6
	9	58.6	16,785	4.0	—	—

(R): Retested
> : run out

1MPa=9.8kg/mm²

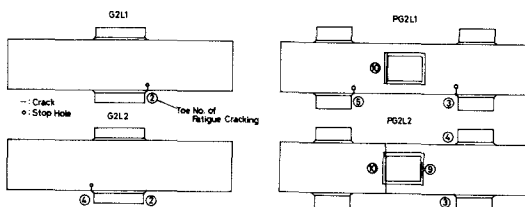


Fig.3 Location of Fatigue Cracking

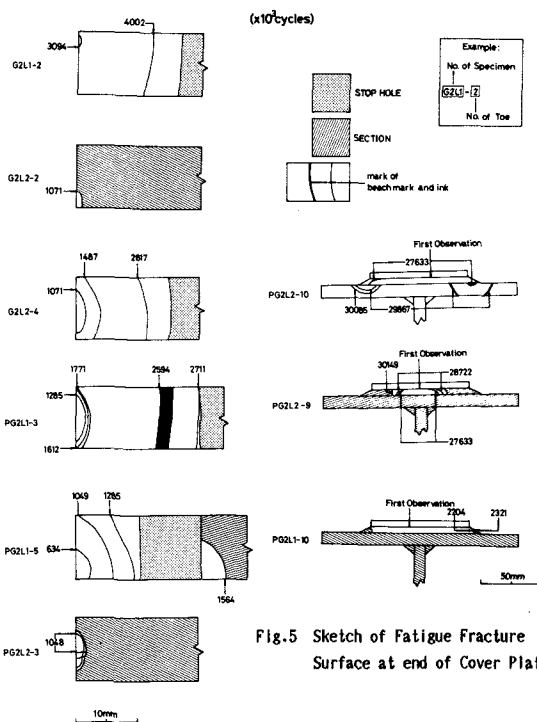


Fig.4 Sketch of Fatigue Fracture Surface at end of Gusset

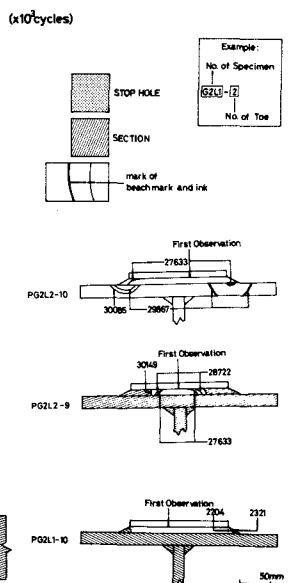


Fig.5 Sketch of Fatigue Fracture Surface at end of Cover Plate

(1)破断面の状況

疲れ試験時の亀裂の進展中の形状を見るために、ビーチマークや、インクを亀裂に浸み込ませ、破面に痕跡を残す方法がよくとられる。今回の試験ではビーチマークの他に、黒、赤、黄色、の3色のインクをこの順番に浸み込ませて、破面に3つの痕跡を残すことを試みた。

各試験体の亀裂の発生した場所をFig.3に、ビーチマークとインクの痕跡から判断した破面のスケッチを、Fig.4,5に示す。図の斜線部分は亀裂形状の観察のために切断した部分である。インクによる亀裂の形状は、ビーチマークや試験中に目視で測定した亀裂長とうまく対応しており、この方法が有効であることが実証された。しかしながら試験機からの油漏れや、ストップホールを明けたり破面観察のために供試体を切る際に使用する油によって、インクが流されて亀裂形状が読めない破断面もあり、今後は油を使用しない試験体の切断やストップホールの開口、あるいはインクの固定方法を考える必要があると思われる。

ガセット継手の破面観察によれば、最初の銅線が切断されたときの初期亀裂長は0.5~2.4mmとなった。山田ら³⁾が0.1mmφの銅線を初期亀裂発生感知に用いた試験結果によると、初期亀裂長は1.6~6.5mmとなっており、銅線を細くすることにより、亀裂の感度が良くなることが確かめられた。また、初期亀裂の形状は、G2L2-4に代表される楕円クラック、PG2L1-5に代表される4分楕円コーナークラックの2種類がみられ、その長径と短径の比の平均値は約2:1となった。

カバープレート溶接は、すべてカバープレート端のすみ肉溶接のルート部から亀裂が発生した。これは、板厚10mmのカバープレートを取り付ける隅肉溶接の脚長が6mmと小さく、この隅肉溶接の有効のど厚が過小であったことがその理由であったと考えられる。亀裂がすみ肉溶接表面に達すると、カバープレート端のすみ肉溶接部分を横断した後、フランジに亀裂が進展する様子がみられた。試験終了後、破面観察まで約1ヶ月試験体を放置したため、すみ肉溶接部分の破断面の錆がひどく、初期亀裂形状や、ルート部のビーチマークの観察が困難であった。

2.4 疲れ亀裂発生寿命と疲れ寿命

(1)疲れ試験結果

ガセット継手の試験結果をFig.6に示す。曲げ試験体は2体とも $\sigma_r = 39 \text{ MPa}$ でいずれも2000万回以上で亀裂が発生せず、荷重を1.5倍にしたところ、4ヶ所から亀裂が発生した。そのうち2ヶ所の亀裂は進展しなかった。また、今回の試験結果よりも高応力下で行われた過去の試験結果³⁾⁶⁾を基に、最小2乗法を用いて平均値 $\pm 2s$ (s :標準偏差)に相当するS-N線図を求め、図中に直線で示した。これによると今回の試験で破断したものは再試験したものを含めて、過去の実験値の上限値、下限値内に収まる結果となった。

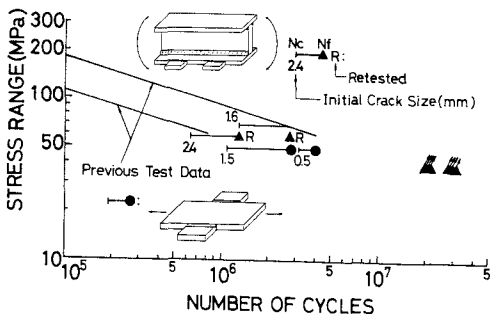


Fig.6 Present Fatigue Test Result of 200mm long Gusset in Long Life Region

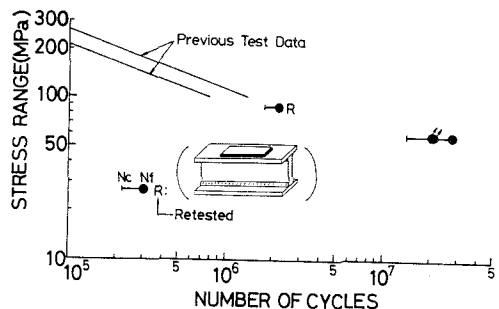


Fig.7 Present Fatigue Test Result of 200mm Long Cover Plate in Long Life Region

カバースプレートの溶接の結果は、Fig.7に示す。応力範囲 σ_r は、フランジの公称応力範囲を用いてプロットした。亀裂は、 $\sigma_r=58.6\text{MPa}$ で2ヶ所発生したが、そのうち一方は試験体が破断するまでに最終亀裂まで進展しなかった。また再試験時に $\sigma_r=88.2\text{MPa}$ で亀裂が発生した。カバースプレート溶接についてはすべてルート部から発生した亀裂が表面に表れた時を便宜上初期亀裂としたため、初期亀裂の形状は得られなかった。実際にルート部に亀裂の発生したのは、 N_c の値以前であったと思われる。

(2) 疲れ寿命 N_f

これまでの試験³⁾も含めてガセット継手についてのS-N線図をFig.8に示す。設計基準と比較するため、S-N線図の下限值(平均値-2s)を求め、さらに $\sigma_r=39.2\text{MPa}$ で試験したガセット部4ヶ所から亀裂が発生しなかったことから、この応力を便宜上疲れ限度として、S-N線図を求めた。これによると 4×10^6 回付近が定振幅疲れ限度における繰返し数となった。ヨーロッパ鋼構造協会連合(ECCS)疲労設計指針⁵⁾では、疲れ試験結果の下限值(平均値-2s)を別個に決められた設計S-N線図に当てはめて設計S-N線図を決めている。これによるとこのタイプのガセット継手では200万回疲れ強さを45MPa、 5×10^6 回における疲れ強さ33MPaを定振幅疲れ限度としている。これと比較すると試験結果のS-N線図の下限值と高応力下ではほぼ一致しているが、定振幅疲れ限度は20%程度高い値となった。

カバースプレート溶接のS-N線図をFig.9に示す。ガセット継手の場合と同様に過去の実測値もプロットし、試験結果と併せて最小2乗法を用いて上限値及び下限値を求めた。また、 $\sigma_r=59.0\text{MPa}$ で試験したもののから亀裂が発生しなかったことから考えて、この値を便宜上疲れ限度とした。これによると定振幅疲れ限度における繰返し数は 7×10^6 回付近となった。2700万回付近で破断したデータから考えると未破断となったデータもさらに载荷を続ければ亀裂が発生した可能性があり、定振幅疲れ限度はもう少し低い値であると思われる。

3. モンテカルロシミュレーションを用いた疲れ寿命解析

長寿命域の疲れ試験は、膨大な時間とコストを必要とするため、多くのデータを得ることは期待できない。したがって、長寿命域においては破壊力学の手法も加えて総合的に検討する必要がある。永津ら⁷⁾は、すでに初期亀裂の大きさと形状、溶接止端形状、ブローホールの大きさなどの解析の初期値を実測値に基づいてモンテカルロシミュレーションを用いて与え、破壊力学による疲れ亀裂進展寿命解析を行った。対象としたのは、リブ十字すみ肉溶接継手とI型断面溶接桁であり、疲れ亀裂進展寿命に及ぼすパラメータのばらつきに関する考察を行っている。本研究では今回の試験で用いたガセット継手に関して、同様のシミュレーションを行い、試験結果及びECCSの設計S-N線図と比較検討を行った。

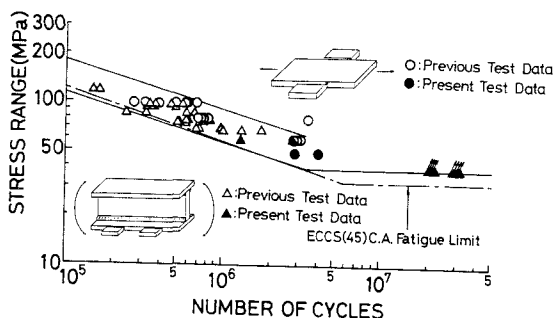


Fig.8 Summary of Fatigue Test Result of 200mm long Gusset

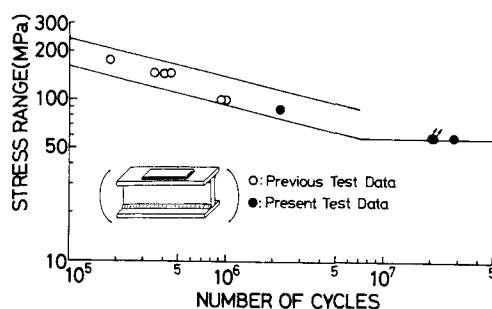


Fig.9 Summary of Fatigue Test Result of 200mm long Cover Plate

3.1 解析方法

疲れ寿命 N_f は亀裂発生寿命 N_c と疲れ亀裂進展寿命 N_p の和として定義できるが、溶接継手で高応力側の疲労強度の場合には、比較的早い時期に初期亀裂が発生するため $N_f \approx N_p$ と仮定することができる。今回実験を行った低応力長寿命側では定性的に N_c の割合が大きくなり、 $N_f \approx N_p$ とすると寿命を短く評価することになるが、設計上安全な寿命予測を与えることになる。この N_p は亀裂が初期亀裂 a_0 から最終亀裂 a_f まで進展するのに必要な繰返し数として破壊力学の手法を用いて以下の式で求めることができる。

$$N_p = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)} da \quad (1)$$

ここで、 C, m : 材料定数

ΔK : 応力拡大係数範囲

ΔK_{th} : 応力拡大係数範囲のしきい値

ΔK は亀裂先端の応力状態を表す特性値である応力拡大係数 K の範囲であり、 ΔK_{th} は ΔK がそれ以下であれば亀裂が進展しない値である。 ΔK に関しては一般に

$$\Delta K = \sigma_r \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (2)$$

ここで、 σ_r : 応力範囲

a : 亀裂長さ

F : 補正係数

また補正係数 F は次式のように分割して考えることができる。

$$F = F_s \cdot F_e \cdot F_t \cdot F_g \quad (3)$$

ここで、 F_s : 自由表面補正係数

F_e : 亀裂形状補正係数

F_t : 有限板厚板幅補正係数

F_g : 幾何学形状補正係数

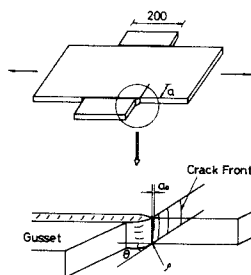


Fig.10 Analytical Model of Crack emanating from Gusset End

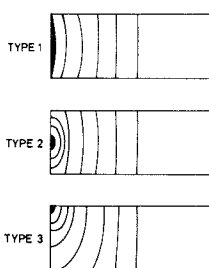


Fig.11 Three Models of Fatigue Crack Shapes

Table 4 Correction Factor for a Crack emanating from Gusset End

	F_s	F_e	F_t	F_g
エッジクラック	1.12	1.0	1.0	$F_{g1} \times F_{g2}$
槽円クラック	$1.12 - 0.12a/b$	$1/E_k$	1.0	$F_{g1} \times F_{g2}$
4分槽円コーナークラック	1.38	$1/E_k$	1.0	$F_{g1} \times F_{g2}$

ガセット継手の場合は試験結果からも明かではあるが、Fig.10に示すように溶接止端部から亀裂が発生し、主板の軸方向に進展する。過去の破面の観察³⁾によるとFig.11に示す3つのタイプの破面が見られた。すなわち、亀裂が端部から発生進展するエッジクラック(TYPE1)、板の中央部から発生する楕円クラック(TYPE2)、板のコーナーから発生する4分楕円コーナークラック(TYPE3)が見られた。シミュレーションでは、全シミュレーションのうちこれらのタイプのき裂が1箇所に1タイプずつ発生するとし、それらの割合がほぼ同数発生すると仮定した。これらの亀裂に対する補正係数Fの内容をTable 4に示す。ここでE kは亀裂形状a/bに対する関数 $k^2 = 1 - (a/b)^2$ に関する第2種完全楕円積分であり、F g₁とF g₂はそれぞれ溶接止端の局所的な影響とガセット付加による影響を表す補正係数である⁴⁾。

今回の解析では楕円クラック、4分楕円コーナークラックに対してはa/bの値を1/2で一定としたため、E kの値は1.211となり一定である。F g₁は止端角や止端半径等の微小な形状による応力集中を考慮し、F g₂はガセット継手による応力集中を考慮した補正係数である。これらの分布式については、今回の試験で用いた供試体の止端形状の測定結果を用いた。疲れ亀裂進展式の材料定数は、科学技術庁金属材料技術研究所(N R I M)により求められたSM50B材の溶接継手一般に対する平均値、 $C = 9.69 \times 10^{-9}$ 、 $m = 2.9$ 、 $\Delta K_{th} = 2.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を用いた。また補正係数Fに関しては、TYPE2とTYPE3の亀裂形状は、亀裂が板厚まで進展すると以後はTYPE1の亀裂形状になるとして補正係数Fの値を計算した。シミュレーション回数は、各応力範囲レベルで1000回とした。

3.2 解析結果と考察

Fig.12にシミュレーションの結果をヒストグラム及び上限値、下限値の値で示す。高応力下では上限値及び下限値をそれぞれ平均値 $\pm 2 \times s$ で示すことができるが、低応力下では右に大きく裾を引く形になるため、1000回のシミュレーション回数で、25番目に小さい繰返し数を下限値、25番目に大きい繰返し数を上限値として示した。

計算結果の下限値を見ると 5×10^6 回より低い繰返し数の領域では実験値及びE C C Sの設計S-N線図の値をうまく表現できている。一方 5×10^6 回より高いサイクルの領域では $\Delta K_{th} = 2.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の値を用いて計算した定振幅疲れ限度は、実験結果あるいはE C C Sの設計S-N線図より小さくなっている。これは、解析で用いた初期亀裂で全体の1/3がエッジクラックとなることを仮定したこと、応力集中の影響をF g₁とF g₂の積で評価したこと、N cを考慮していないことなど、低応力長寿命側で条件が厳しかったためと思われる。しかしながら、長寿命域でさらに数多くの実験を積み重ねると今回の実験値を下回るデータも出てくることが考えられるため定振幅疲労限の設定には注意が必要であると思われる。

4. まとめ

溶接継手の低応力範囲が作用している場合の疲れ挙動すなわち長寿命域のデータは比較的少なく、この部分の疲れ強さを評価するのが困難となっている。そこでガセット継手とカバープレート溶接について定振幅応力下で疲れ試験を行い、長寿命域における疲れ挙動について考察を行った。またモンテカルロシミュレーションを用いた疲れ寿命解析をガセット継手について行い、実験結果と併せて検討を行った。以下に得られた主な結果を示す。

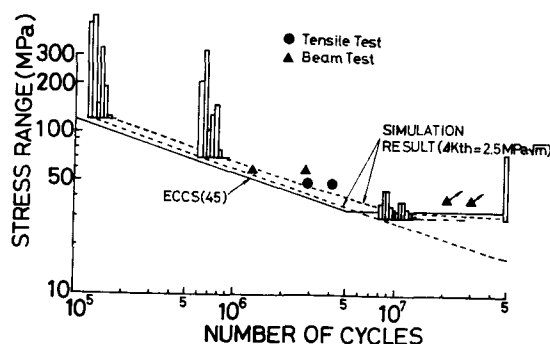


Fig.12 Analytical Results of Crack Propagation Life

(1)実験結果から、長さ200mmのガセットの定振幅疲れ限度は、疲労亀裂が発生しなかったデータから推定して約40MPaとなり、ECCSで指定されるものより20%程度高くなった。長さ200mmのカバープレートは約59MPaであった。カバープレート端ではルート亀裂の確認が難しく、より低い定振幅疲れ限度となることも考えられる。また、カバープレートの長さが大きくなると疲れ強さが低下するため、実際のカバープレートではより低い疲れ限度となる。

(2)0.04mmφの銅線を貼付し、この銅線が切れた時を疲れ亀裂発生寿命としたが、ガセット継手の場合この時の亀裂長は0.5～2.4mmの大きさであった。また3色のインクを用いることによって、亀裂形状を破断面にうまく残せた。

(3)ガセット継手について3つの初期亀裂形状及び止端形状の分布に従う初期値をモンテカルロシミュレーションで与え、疲れ亀裂進展寿命解析を行った。その結果、 5×10^6 回より低い繰返し数では、実測値の傾向をよく表すことができた。また、定振幅疲れ限度では、計算結果が低い値を示し、今回の実測値より低い定振幅疲れ限度になる可能性を示唆している。

謝辞

本研究は、文部省科学研究費（一般C）の補助を受けて行ったことを付記する。また本研究をまとめるにあたり、名古屋大学土木工学科篠田泰蔵氏に大変お世話になったことを付記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編），1980年2月。
- 2) 建設省土木研究所，既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究，土木研究所資料第2420号
- 3) 山田ほか：ガセットを溶接した引張部材の疲れ強さとストップホールの効果，土木学会論文報告集第341号，1984年1月，pp.129～136。
- 4) 山田・M.A.HIRT：破壊力学を応用したパラメトリックな疲労寿命解析，土木学会論文報告集，第319号，1982年3月，pp.55～64。
- 5) ヨーロッパ鋼構造協会連合（ECCS），TC-6：鋼構造物の疲労設計指針，日本鋼構造協会。
- 6) 諸戸・山田：カバープレートの疲れ強さと疲れ許容応力度，構造工学論文集，Vol.33A(1987年3月) pp.403～410。
- 7) 永津ほか：破壊力学による溶接継手の疲れ寿命のばらつきの評価，構造工学論文集，Vol.34A（1988年3月），pp.451～458。
- 8) 三ツ木ほか：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，第368号／Ⅰ-5，1986年4月，pp.293～300。

（1988年10月12日 受付）