

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

FATIGUE OF TENSILE PLATE WITH GUSSETS AND STOP HOLES AS CRACK ARREST

山田健太郎*・酒井吉永**・菊池洋一***

By Kentaro YAMADA, Yoshinaga SAKAI and Yoichi KIKUCHI

1. ま え が き

繰り返し荷重を受ける引張部材に付加物を溶接する場合、その付加物の端部を仕上げて応力集中を軽減させ、疲れ破損しないようにすることが多い¹⁾。わが国の鉄道橋では、これまでフランジにガセットを溶接する場合に端部を半径 r が 40 mm 以上に仕上げることが原則としており²⁾、疲労許容応力度も高くしている。ところが一般の鋼構造物では、製作コストとの兼ね合いでガセット端の仕上げを行わない場合も多い。たとえば、建物と一体で製作されるために建築学会の鋼構造設計規準³⁾に従って設計されるクレーン走行ばりや、JIS B 8821 に従って設計されるクレーンばりでは、溶接したままのガセットが使われている。使用条件が苛酷な製鉄所構内の天井走行クレーンの走行ばりのガセット端に疲れ亀裂が発生した例もあり、疲労に対して注意を要する構造様式の 1 つであろう。

橋梁では、引張フランジにガセットを直接溶接することを避ける。溶接する場合には、その端部の応力集中を除去する処置をする。わが国のこの種の継手の疲れ試験例は、他の継手形式に比べて少なく、またガセット端を仕上げたものが多い^{4),5)}。欧米では、仕上げないガセット継手を使用するため実験例も多く^{11),12)}、実験結果は設計示方書に反映されている^{13),14)}。これらの示方書では、付加物の応力方向の長さや溶接位置、仕上げの有無によって異なった設計 $S-N$ 線図が与えられている。一般に長さ 100 mm 以上のガセットがフランジ縁に溶接され端部が未仕上げの場合、設計 $S-N$ 線図群で最も低い疲れ強さが規定されている^{13),14)}。

本研究では、未仕上げのガセットの長さや取付方法を

変えた 4 種類の継手の疲れ試験を実施し、基本的な疲れ強さを求める。またガセットの端部では、溶接止端に生じる局所的な応力集中と、ガセットの及ぼす構造的な応力集中が重畳している点に注目して^{6),12)}、溶接止端だけを仕上げることによる疲れ寿命の向上効果を調べる。これは、軽便な疲れ強さ向上法で、仕上げに要する費用の節減および既設構造物の疲れ強さ改善を目的としたものである。さらに、疲れ亀裂が発生した試験片の寿命を延ばすために、発生した亀裂の先端に円孔（ストップホール）を明けて、その効果を検討する。この方法は、疲れ亀裂の応急的な処置方法として用いられるものであるが、その定量的な評価を試みる。

2. 疲れ試験の方法

(1) 試験体の製作

用いた 4 種類の試験体の形状と寸法を、Fig. 1 に示す。G 系列の 3 種類は、長さ L を 50, 100, 200 mm と変えた板厚 10 mm のガセットを、板厚 10 mm、幅 200 mm、長さ 900 mm の主板の両縁に溶接したもので、それぞれ G5, G1, G2 試験体とよぶ。ガセットは、ルートフェイス 1 mm で 45° の開先を取り突合せ溶接した後、裏面をガウジングして突合せ溶接して完全溶込みレ

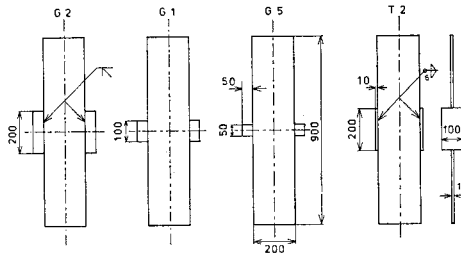


Fig. 1 Tensile Fatigue Test Specimens with Various Gusset Plates.

* 正会員 Ph.D. 名古屋大学助教授 工学部土木工学科

** 学生会員 名古屋大学大学院

*** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

Table 1 Chemical Composition and Mechanical Properties of SM 50 A Plates.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
SM 50 A-a	0.18	0.28	1.31	0.015	0.003	402	559	26
SM 50 A-b	0.16	0.31	1.33	0.018	0.007	431	549	27

a, b : Steels from different lots.

形突合せ溶接とした。裏溶接の際にガセット端でのまわし溶接を行った。T 2 試験体は、主板と直角に幅 100 mm、長さ 200 mm のガセットを脚長 6 mm で隅肉溶接したもので、ガセットの端部では、まわし隅肉溶接を行った。使用鋼材は、板厚 10 mm の普通構造用鋼 SM 50 A で、試験体は、2 回に分けて製作したため、鋼材は 2 種類用いた。この鋼材の化学成分と機械的性質を、Table 1 に示す。溶接は、低水素系溶接棒 (JIS D 5016) を用い、すべて手溶接で行った。試験体は、溶接後グリッドブラスト処理を行って表面を清浄にした。

溶接したままの試験体 (as-welded) は、各系列 6 体ずつ、合計 24 体について疲れ試験を行った。また各系列 4 体ずつ合計 16 体の試験片は、ガセットの端部の溶接止端部をグラインダー仕上げした。仕上げは、まず手動ディスクグラインダーで目標半径 $r=3$ mm になるように仕上げ、最終仕上げはペンシル形の小型グラインダーを用いて行った。

疲れ亀裂は、仕上げの有無にかかわらずガセット端から発生すると考えられるので、この部分をすべて歯科用印象材で型取りし、止端角 θ と止端半径 ρ を測定した⁷⁾。

(2) 試験方法

疲れ試験は、アムスラー型万能疲れ試験機 (容量 100 t) を用い、毎分 540 回の繰返し速度で実施した。応力比 R は、0.1 とした。試験体には、Fig. 2 に示すようにガセット端から 100 mm の位置に、4 枚のひずみゲージを貼って、偏心の除去と動的荷重の検定に用いた。またガセット端の溶接止端部とそこから約 8 mm 離れた主板上に、直径 0.1 mm ϕ または 0.04 mm ϕ のエナメル被覆銅線をひずみゲージ用接着剤で貼った。この銅線は直列に結線され、試験機のリリーススイッチに接続されており、疲れ亀裂が銅線を切断するとき試験機が自動的に止まる⁷⁾。なお、使用した銅線の直径によって疲れ亀裂検出の感度が異なるので、試験結果をまとめた Table 2, 3 に、止端部に使用した銅線の直径を示す。

疲れ試験では、疲れ亀裂発生寿命 N_c 、疲れ寿命 N_f とともに、疲れ亀裂先端に明けたストップホールの効果を調べた。そのため以下の手順で実験を行った。

(a) 試験体をセットし、偏心除去、静的・動的荷重の検定の後、疲れ試験を開始する (Photo 1)。

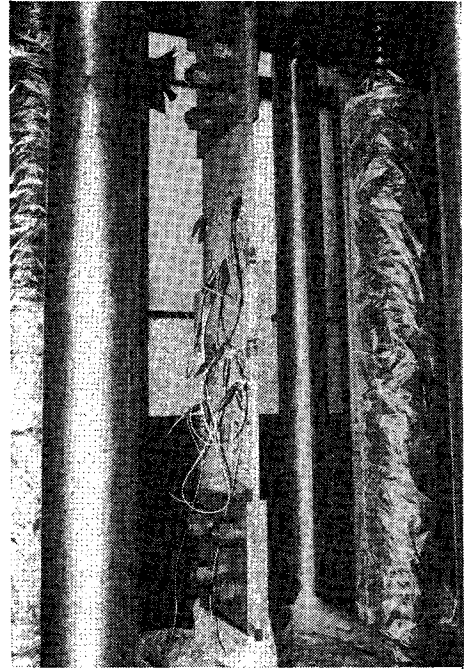


Photo 1 Fatigue Test Set-up.

(b) 溶接止端に亀裂が発生すると、その部分の銅線が切れ試験機が止まる。このときの繰返し数を、疲れ亀裂発生寿命 N_c と定義する。 N_c に相当する亀裂の形状を観察するため、応力範囲を 1/2 にして約 4 万回載荷し、ピーチマークを導入する。

(c) 試験を続行して、亀裂が約 10 mm になるとその部分の銅線が切れて再度試験機が止まる。このときの繰返し数を、疲れ寿命 N_f と仮定する。ただしピーチマーク導入に要した繰返し数は無視する。

(d) 次に、亀裂先端部に手持ちの電動ドリルで円孔 (ストップホール) を明ける。円孔は、ドリル (10 mm ϕ) とヘックソードドリル (20, 30 mm ϕ) を用い、円孔縁は、ペンシル形グラインダーで仕上げた (Photo 2 参照)。また、この円孔から発生する亀裂を感知するため、円孔縁から約 2 mm 離れた位置に銅線 (0.1 mm ϕ) を貼る。

(e) 試験を続行し、他のガセット端から亀裂が発生した場合は、b~d の処置を行う。円孔から亀裂が発生した場合は、それが 30 mm 以下なら第 2 の円孔を明ける。円孔から亀裂が発生するか、4 つのガセット端すべてから亀裂が発生した場合、試験を終了する。

3. 未仕上げの試験体の疲れ試験結果

(1) 疲れ亀裂の発生寿命 N_c

未仕上げの試験体 (as-welded) 24 体のうち、疲れ亀

裂は 51 か所発生した。この亀裂は、2 例を除いて、すべてガセット端の溶接止端部から発生した。例外的な 2 例では、疲れ亀裂は、溶接金属内の球形の欠陥（直径約 0.5 mm）を起点としていた。溶接止端部に貼った銅線（0.1 mmφ）が切れたときの繰返し数を疲れ亀裂発生寿命 N_c と定義し、最初に亀裂が発生した止端について、作用応力範囲 σ_r との関係を示す。なお、このうち G5 の 1 体は 453 万回で疲れ亀裂が発生せず、応力範囲をあげて再試験（Retested）

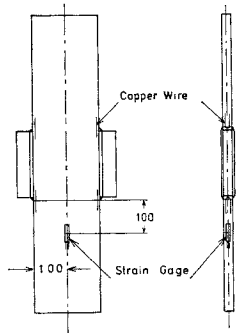


Fig. 2 Strain Gages and Copper Wires Glued to Fatigue Test Specimens.

したものである。図中の実線は、最小 2 乗法で求めた σ_r-N_c 線図である。使用した銅線（0.1 mmφ）は、文献 7）で用いた銅線（0.04 mmφ）より太く、疲れ亀裂に対する感受性も低い。Table 2 に示すように、この N_c に相当する亀裂の大きさは、ビーチマークより判読した結果、1.6~6.5 mm 程度であった。

疲れ亀裂発生寿命は、ガ

Table 2 Summary of Fatigue Test Results of As-Welded Gusset Specimens (First Cracking).

Specimen No.	Steel	Stress Range (MPa)	Crack Size at N_c (mm)	N_c ($\times 1000$ Cycle)	N_f ($\times 1000$ Cycle)
G501	a	98	—	—	778
G502	a	98	—	—	> 4531
G502R	a	137	2.9	922	1010
G503	a	137	3.3	224	281
G504	a	137	—	340	419
G505	a	172	—	—	235
G506	b	172	2.1	108	149
G101	a	98	1.9	358	660
G102	a	98	—	436	444
G103	a	137	1.6	131	219
G104	a	137	—	—	160
G105	a	78	2.5	1 287	1 319
G106	b	78	2.3	1 093	1 602
G201	a	98	1.4	122	280
G202	a	98	2.5	202	288
G203	a	98	4.0	222	241
G204	a	59	2.5	2 640	2 699
G205	a	78	2.9	399	641
G206	b	78	2.3	385	671
T201	a	98	1.8	64	130
T202	a	98	2.6	93	109
T203	a	59	3.8	846	1 071
T204	a	59	3.0	1 215	1 569
T205	a	78	2.5	168	294
T206	b	78	6.5	378	423

*1 R indicates that the specimen was retested.

*2 Copper wire of 0.1 mm diameter was attached to weld toe for all specimens.

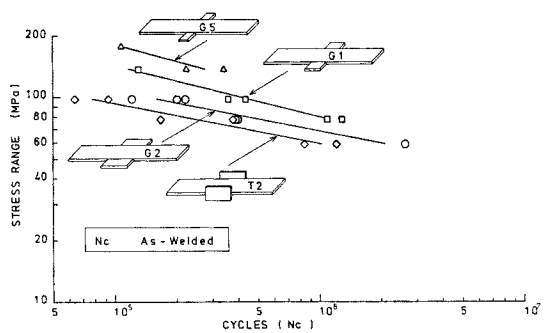


Fig. 3 Summary of Fatigue Crack Initiation Life of As-Welded Gusset Specimens.

セットの長さが長くなるに従って短くなり、T 系列が最も短い N_c を示した。たとえば、 $\sigma_r=98$ MPa で比較すると、それぞれ約 90 万回、40 万回、15 万回、8 万回となり、ガセットの長さや取付方法の違いによって N_c が影響される。

疲れ亀裂は、ほとんどガセット端の溶接止端部から発生している。この部分は、溶接止端形状とガセットの両方が応力集中に影響しており、応力状態を正確に把握するのは難しい。そこで、ガセットの長さや取付方法の違いが応力分布に及ぼす影響をみるために、ひずみゲージによる応力分布の測定を行った。ひずみゲージの貼付位置を Fig. 4 に、測定結果を測定値の板幅方向の平均ひずみで無次元化して Fig. 5 に示す。ガセット端では、第 1 回目の荷重載荷により、局部的に塑性変形が生じるが、Fig. 5 では第 2 回目以降の測定結果を用いており、疲れ試験で実際に作用するひずみ振幅に相当する。溶接止端から 2 mm 離れた主板の表面における応力集中係数 K_t は、T 系列で約 2.2、G 系列では、G2, G1, G5 とガセットの長さが短くなるに従って、約 1.7, 1.6, 1.4 のように小さくなってゆく。これは、主板からガセットへ流れる応力の大小によるもので、この応力集中の程度の差が、Fig. 2 に示す疲れ亀裂発生寿命の差となったものと思われる。なお、Fig. 5 に破線で示した応力分布は、G 系列について有限要素法によって数値解析した結果で、解析値は実験値の傾向をよく示している。隅肉溶接止端近傍の最小メッシュは、ひずみゲージの貼付状況に合わせて、2.5×2.5 mm であった。ただし、ガセット端近傍の応力集中係数を比較すると、解析値はいずれもひずみゲージによる測定値より大きい。止端部近傍では、ひずみゲージを貼付した板表面に比べて、まわし溶接の先端部がある板内部の応力集中が大きいことによるものと思われる。

ガセット端の溶接止端部近傍（深さ 1~2 mm まで）には、止端の形状に起因する局部的な応力集中が存在する。たとえば止端角 $\theta=45^\circ$ 、止端半径 $\rho=0$ mm のリブ

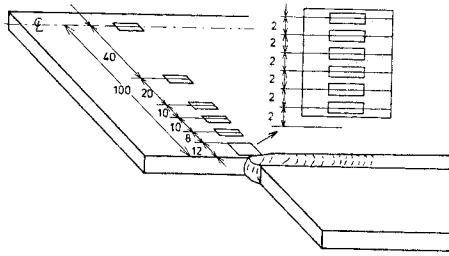


Fig. 4 Strain Gage Arrangement to Measure Stress Concentration at Gusset End.

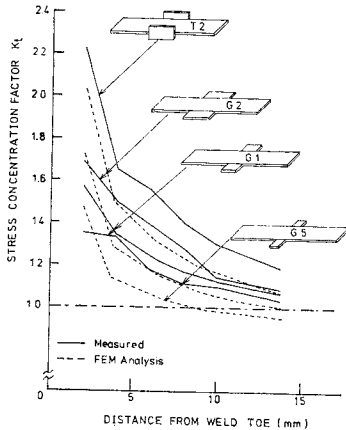


Fig. 5 Summary of Stress Concentration Factors in Main Plates Near Gusset End.

十字形隅肉溶接継手（主板およびリブの板厚 10 mm, 隅肉溶接の脚長 6 mm）の止端部では、約 2.7 の応力集中があり、深さ約 1 mm で 1.0 に近くなる¹⁰⁾。Fig. 5 に示す応力集中はこの局所的な応力を含めていないので、溶接止端部の応力集中係数は止端の形状に起因する応力集中と、止端の形状に起因する応力集中の積で表わされる。上記の止端形状の場合、G2 試験体の応力集中係数は約 1.7 であるから、両者の積は約 4.6 となり、ガセット端の溶接止端部の応力集中が大きいことがわかる。

実験に用いた試験体は、4 か所のガセット端から疲れ亀裂が発生する可能性がある。そこで、24 体の試験体の 96 か所のガセット端の溶接止端形状を 6 点ずつ測定したものを Fig. 6 に示す。止端半径 ρ と止端角 θ のばらつきはかなり大きく、平均値は $\bar{\rho}=0.75$ mm, $\bar{\theta}=55^\circ$, 標準偏差は $s_\rho=2.4$ mm, $s_\theta=10^\circ$ であった。各試験体で、最初に疲れ亀裂が発生した止端を調べると、一般に ρ の最も小さい止端であった。そこで、最初に亀裂の発生した止端のデータを Fig. 6 に●印で示し、このデータのばらつきを楕円で示す。この楕円は、軸を最初に亀裂の発生した止端の ρ と θ の標準偏差の 4 倍として描いたもので、 ρ の小さい所で亀裂が発生していることがわかる。最初に亀裂が発生したもので整理する

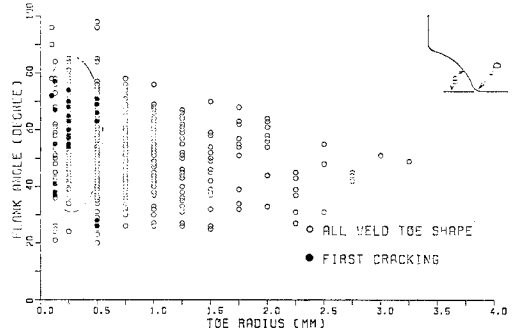


Fig. 6 Weld Toe Shapes Measured at As-Welded Gusset Ends.

と、 $\bar{\rho}=0.27$ mm, $\bar{\theta}=58^\circ$, $s_\rho=0.14$ mm, $s_\theta=13.8^\circ$ であった。

(2) 疲れ寿命 N_f

疲れ試験では、疲れ亀裂が進展し 10 mm 程度になった段階で試験を中断し、亀裂先端にストップホールを明けた。したがって、この段階までの繰返し数を疲れ寿命 N_f とし、Fig. 7 に σ_r-N_f 線図として示す。前述の σ_r-N_c 線図の場合と同様に、ガセットの長さや溶接取付方法の差によって寿命が異なり、G5, G1, G2, T2 の順に疲れ寿命が短くなる。 $\sigma_r=98$ MPa に相当する疲れ寿命で比較すると、それぞれ約 98 万回、60 万回、26 万回、12 万回となる。また、前述の N_c との比をとると、 $N_c/N_f \approx 0.92, 0.67, 0.58, 0.67$ となり、 N_c の割合が他の実験例^{9), 7), 10)} に比べて大きい。これは、0.1 mmφ の銅線が切断したときを N_c としており、その時点での疲れ亀裂が 1.6~6.5 mm 程度の比較的大きいものであったため、その亀裂が 10 mm 程度に進展する間の繰返し数（疲れ亀裂進展寿命）の割合が、短かったものと思われる。

実験では、亀裂が約 10 mm になったときの繰返し数を、便宜上 N_f とした。この亀裂がさらに進展して試験片を破断するまでの繰返し数は、破壊力学の手法

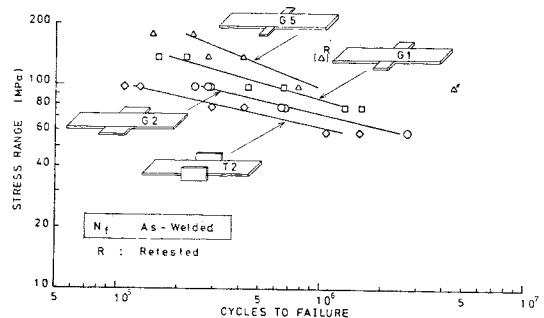


Fig. 7 Summary of Fatigue Life of As-Welded Gusset Specimens.

を用いて計算できる⁹⁾。たとえば、10 mm から 50 mm (板幅の 1/4) まで疲れ亀裂を進展させるのに必要な繰り返し数は、 $\sigma_r=98$ MPa が作用したとすると、G 系列のガセット長さ 50, 100, 200 mm では、それぞれ 36 万回, 22 万回, 17 万回程度である。前述の N_f との比では、それぞれ 0.37, 0.37, 0.65 となり、Fig. 7 に示した N_f は、試験片の破断までさらにこの程度の寿命を有する。

4. 仕上げた試験体の疲れ試験結果

(1) 疲れ亀裂の発生寿命 N_c

ガセット端の溶接止端だけをグラインダー仕上げした試験体 (Weld Toe Ground) は、合計 16 体疲れ試験を行い、24 個の溶接止端から疲れ亀裂が発生した。未仕上げの試験体に比べて疲れ亀裂の数が少ない。これはガセット端の応力集中が小さく、ストップホルルを明けてもストップホルル縁の応力集中が高いため、この部分から亀裂が発生したためである。仕上げた試験体の試験結果を、Table 3 に示し、 σ_r-N_c 線図を、Fig. 8 に示す。仕上げをした溶接止端部には、0.04 mm ϕ (11 体) と 0.1 mm ϕ (5 体) の 2 種類の銅線を貼った。それぞれ亀裂検出の感度が異なるので、Fig. 8 では記号を変えて示した。またピーチマークによって導入された N_c に相当する亀裂は、ストップホルルを明けたことにより失われたので、 σ_r-N_c 線図は銅線の感度を区別せず、系列別に全データを用いて定めた。このうち、 $\sigma_r=98$ MPa

Table 3 Summary of Fatigue Test Results of Gusset Specimens with Ground Weld Toes at Gusset Ends (First Cracking).

Specimen No.	Steel	Stress Range (MPa)	Crack Size at N_c (mm)	N_c ($\times 1000$ Cycle)	N_f ($\times 1000$ Cycle)	Diameter of Copper Wire (mm)
G511	b	172	2.5	328	396	0.1
G512	b	137	—	732	1014	0.04
G513	b	137	—	—	> 3760	0.04
G513R	b	172	—	214	335	0.04
G514	b	172	—	268	390	0.04
G111	b	137	2.0	278	365	0.1
G112	b	137	—	367	406	0.04
G113	b	98	—	424	669	0.04
G114	b	98	—	588	823	0.04
G211	b	98	—	614	777	0.1
G212	b	98	—	748	892	0.1
G213	b	78	—	763	1678	0.04
G214	b	78	—	—	> 3844	0.04
G214R	b	137	—	89	168	0.04
T211	b	98	3.5	168	250	0.1
T212	b	98	—	—	221	0.04
T213	b	78	—	4401	4548	0.04
T214	b	78	—	219	371	0.04

*1 R indicates that the specimen was retested.

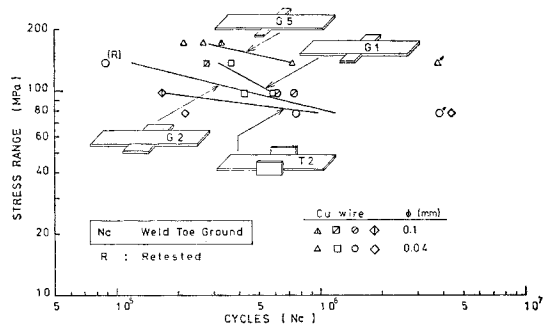


Fig. 8 Summary of Fatigue Crack Initiation Life of Gusset Specimens with Ground Weld Toes at Gusset Ends.

で実験した G1 の 2 体は、G2 より N_c が小さく、 σ_r-N_c 線図の傾きが他と異なっている。これは、溶接止端部を仕上げる際に、ガセット端の主板にまたがる余盛りの部分 (Fig. 9 参照) の仕上げが不十分であり、その部分から疲れ亀裂が発生したため、 N_c が小さくなったものである。

未仕上げの試験体の N_c に比べて、ガセット端の溶接止端を仕上げることによって、 N_c は向上する。たとえば、比較的データの多い G2 試験体と比較すると、 $\sigma_r=98$ MPa が作用する場合の N_c が 15 万回程度であったのが、仕上げにより、50 万回程度になっている。溶接止端部の局

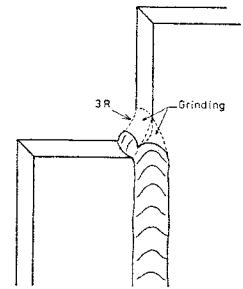


Fig. 9 Schematic View of Ground Weld Toe at Gusset End.

的な応力集中を仕上げによって除去することが、疲れ亀裂発生寿命を向上させるのに効果があることがわかる。

仕上げた溶接止端部の止端形状を測定した結果を、Fig. 10 に示す。止端形状の測定にあたって、止端近傍の局所的な凹凸を測定したこともあって、データのばらつきが大きい。この平均値は、 $\bar{\rho}=4.8$ mm、 $\bar{\theta}=60^\circ$ であ

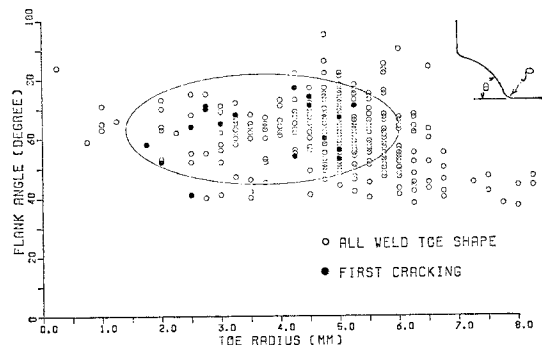


Fig. 10 Shape of Ground Weld Toes at Gusset Ends.

った。すなわち、半径 3 mm を目標にグラインダーで仕上げたが、それより大きな半径が得られていたことになる。また、大半のデータが $\rho > 2.5$ mm であり、初期の目標である 3 mm に近い値が得られている。最初に亀裂が発生した溶接止端の止端形状を・印で示すが、Fig. 6 の場合と異なり、必ずしも ρ の小さい所で最初に疲れ亀裂が発生しているわけではない。止端部を上げることにより、疲れ亀裂の発生源となる局所的な高い応力集中を除去したため、亀裂の発生位置が限定されず、ばらつきが大きくなったものと思われる。また G1 試験体の 2 体では、仕上げが不十分であったため N_c が短かったが、グラインダーマークが作用応力に直角であったため疲れ亀裂の発生源となった場合もあり¹⁵⁾、仕上げには注意が必要である。

(2) 疲れ寿命 N_f

仕上げた試験片の σ_r - N_f 線図を、Fig. 11 に示す。疲れ亀裂が発生した後、約 10 mm の大きさまで進展するのに要する繰返し数の N_f に占める割合は、仕上げた試験体の場合、Table 3 に示すように小さく、したがって σ_r - N_f 線図は、Fig. 8 とよく似た傾向を示している。ここで、G5 と G2 の各 1 体は、380 万回程度の繰返し数で疲れ亀裂が発生しなかったため、応力範囲を上げて再試験 (Retested) した。

溶接止端を上げることによる疲れ寿命の向上は、未仕上げの試験体の N_f に対する仕上げた試験体の N_f の比として表現できる。そこで、 $\sigma_r=98$ MPa に対する両者の N_f を Fig. 7 と Fig. 11 から求め、その比を計算して Table 4 に示す。G 系列のガセット長さ 50 mm のものは、仕上げた場合のデータがなく、 $\sigma_r=137$ MPa のデータと比較している。この表から、ガセット端の溶接止端部を、半径 $r \approx 3$ mm に上げることにより、疲れ寿命は、G1 を除くと 1.9~2.9 倍になることがわかる。また、 σ_r - N_f 線図を外挿して、未仕上げの

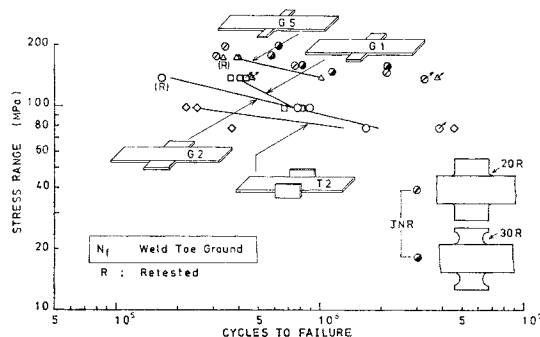


Fig. 11 Summary of Fatigue Life of Gusset Specimens with Ground Weld Toes at Gusset Ends.

Table 4 Comparison of Fatigue Life and Fatigue Strength of Gusset Specimens with As-Welded and with Ground Weld Toes at Gusset Ends.

Series	Stress Range (MPa)	Fatigue Life		N_{f2}/N_{f1}	Fatigue Strength at 10^6 Cycles		
		As-Welded $N_{f1} (\times 10^5)$	Ground $N_{f2} (\times 10^5)$		σ_1	σ_2	σ_2/σ_1
G5	137	420	1010	2.40	97	137	1.41
G1	98	600	740	1.23	85	84	0.99
G2	98	260	740	2.85	72	91	1.26
T2	98	120	230	1.92	62	81	1.31

試験体の 100 万回疲れ強さ σ_1 と比較すると、ガセット端の仕上げが不十分な試験体を含む G1 系列を除けば、仕上げた試験体の疲れ強さ σ_2 は 26~41% 向上する。

ガセットを溶接した引張部材の疲れ試験は、小松原らによって実施されており^{4),5)}、そのうちガセット端を $r=20$ mm と 30 mm に仕上げたものを、Fig. 11 に示す。主板の幅が 170 mm、ガセットの長さが 200 mm であるが、止端部を大きな曲率半径で仕上げているため、疲れ強さが大きく、いずれも本研究の G 系列でガセットの長さが 50 mm のものと同等かそれ以上の疲れ強さを示している。

5. ストップホールの効果の検討

(1) ストップホールからの亀裂の発生

ストップホールは、疲れ亀裂先端の高い応力集中を除去するために明けられるもので、円孔縁の応力集中係数の大小によってその効果が左右されると思われる。実験の手順の項で示したように、ガセット端に発生した亀裂が約 10 mm になった段階で、亀裂先端にストップホールを明け、疲れ試験を続行した。さらに、円孔縁から 2 mm 程度離れた位置に 0.1 mm ϕ の銅線を貼って、円孔縁からの亀裂の発生を確認した。ストップホール近傍の模式図と使用した記号を、Fig. 12 に示す。ストップホールから再び 2~8 mm の亀裂が発生するまでの繰返し数を N_{ch} とした。未仕上げの試験体には 10 mm ϕ 、仕上げた試験体では 10, 20, 30 mm ϕ の円孔を明けた (Photo 2)。

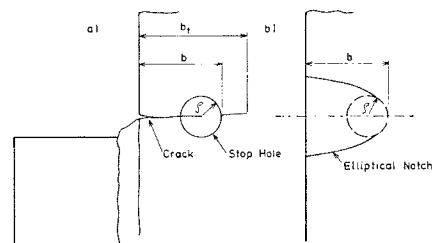


Fig. 12 Schematic View of Stop Hole at Fatigue Crack Tip.

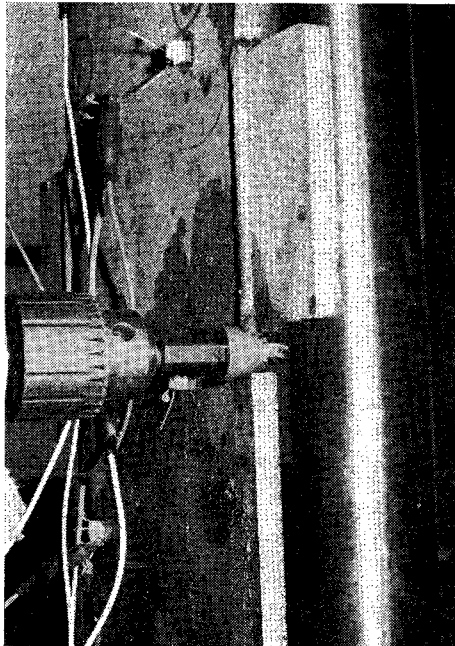


Photo 2 Stop Hole Drilled at Fatigue Crack Tip by Hecksaw-Drill.

ストップホールの応力集中係数を、Fig. 12 に示すモデルを用いて推定した。すなわち、a) に示す亀裂先端に明けたストップホールを、b) に示す楕円形の切欠きと考え、この切欠底の応力集中係数 α_1 を式 (1) で近似する⁹⁾。

$$\alpha_1 = 1 + 2\sqrt{b/\rho} \dots\dots\dots (1)$$

ガセット端より発生した疲れ亀裂先端に明けられたストップホールでは、さらにガセットの形状によって決まる応力集中係数 α_2 が重畳する。したがって、ストップホール先端での応力集中係数 α は、式 (2) によって推定できる。

$$\alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \dots\dots\dots (2)$$

この α_2 は、Fig. 5 に示す K_t の実測値または、有限要素法による解析値から求まる。本研究では、 $\alpha_2=1$ と仮定してデータを解析した。これはストップホール先端までの距離 b が 13 mm 以上であり、Fig. 5 に示すようにガセットの応力集中の影響が小さくなる領域であったためである。また、片側に切欠きがある場合に生じる偏心と断面欠損による応力の増加分は無視した。偏心の影響は、使用した疲れ試験機の上下端の拘束状況が不明であり、定量的な評価が難しいこと、また、断面欠損については、原断面について考察を加えたためである。したがってこの方法では、切欠底の応力を低く見積っており、実験結果を利用する場合には安全側の計算結果を与えることになる。

作用応力範囲に式 (2) を乗じて、切欠底での応力範

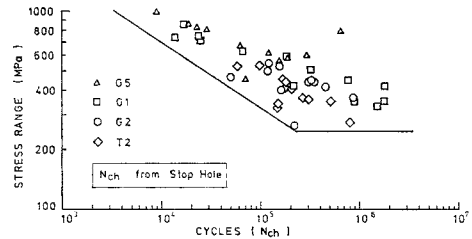


Fig. 13 Summary of Fatigue Crack Initiation Life versus Net Stress at Stop Holes.

囲を求め、これと切欠き底からの疲れ亀裂発生寿命 N_{ch} の関係を、 σ_r-N_{ch} 線図として Fig. 13 に示す。ガセット端の溶接止端部の仕上げの有無は、ストップホールの効果に影響を及ぼさないとと思われるので、ガセットの長さの違いだけを記号で区別した。図中の実線は、このデータの下限を示すもので、 σ_r-N_{ch} 線図の平均値より標準偏差の 2 倍だけ下側の線と、 $\sigma_r=250$ MPa を示す線を結んだものである。この図を用いると、疲れ亀裂の応急的処置のためのストップホールの効果を検討することができる。たとえば、 $\sigma_r=80$ MPa が作用する継手に、 $a \approx 10$ mm の亀裂が発生したとする。この亀裂を完全に除去するため、先端が 13 mm に至るストップホールを明けて、 $N_{ch} > 20$ 万回とするには、式 (1) より、

$$250 \text{ MPa} > 80 \alpha = 80(1 + 2\sqrt{13/\rho}) \dots\dots\dots (3)$$

より、 $\rho > 12$ mm のストップホールを明ける必要がある。このストップホールの半径と、材縁からストップホールまでの距離とがほぼ等しくなり、かなり大きな曲率半径をもったストップホールが必要となる。また、ストップホールと添接板の溶接、または高力ボルト摩擦接合による補強を組み合わせ、疲れ亀裂の補修・補強を実施することがある。この場合、添接板による補強は、ストップホール先端の応力範囲を減らす効果がある。たとえば、この試験体の断面積を 33% 増すような添接板を溶接して応力範囲を 80 MPa から 60 MPa に減少させたとしても、必要なストップホールの半径 ρ は $\rho > 5.2$ mm 程度となり、応力範囲を減少させることの効果が大きいことがわかる。

6. まとめ

ガセットの長さが疲れ強さに及ぼす影響を検討するため、長さおよび溶接取り付け方法の異なる 4 種類のガセット付引張試験体の疲れ試験を行った。ガセット端の溶接止端部を未仕上げ (as-welded) のもの 24 体と、半径 $r=3$ mm になるようにグラインダー仕上げしたもの 16 体を試験し、疲れ強さを比較した。また疲れ亀裂が比較的小さいとき (亀裂長 $a=12 \sim 35$ mm のとき)、亀裂

先端にストップホールを明けて、ストップホールの効果を検討した。結果をまとめると以下のようになる。

(1) 疲れ亀裂は応力集中の大きいガセット端の主板に発生し、主板を破断する方向に進展する。未仕上げの試験体では、ガセット端の溶接止端部から、仕上げた試験体では、仕上げた溶接部が主板に接する付近から疲れ亀裂が発生した。

(2) 溶接止端部に、直径 0.1 mm ϕ と 0.04 mm ϕ の銅線を貼付し、この銅線が疲れ亀裂によって切断された時点をも、疲れ亀裂発生寿命 N_c とした。このときの疲れ亀裂は、1.6~6.5 mm の大きさであった。

(3) 疲れ亀裂発生寿命は、ガセットの長さや取付方法に影響され、ガセットが長いほど、疲れ強さが低下する。これは、ひずみゲージによって測定した応力集中の差からも定性的に説明できる。

(4) ガセット端の溶接止端を $r=3$ mm 程度に仕上げることにより、疲れ亀裂発生寿命 N_c と疲れ寿命 N_f は向上する。たとえば、 $\sigma_r=98$ MPa に相当する N_f は、G1 を除くと 1.9~2.9 倍であった。なお、仕上げで不完全な部分が残るとそこから疲れ亀裂が発生し、疲れ寿命の向上が期待できないことがあるので注意する必要がある。

(5) ストップホールの効果を検討するために、ストップホール先端の応力集中係数 α から応力範囲 σ_r を求め、ストップホールから再び疲れ亀裂が発生したときの繰返し数 N_{ch} とから、 σ_r-N_{ch} 線図を求めた。この図より、疲れ亀裂の補修のためのストップホールの必要曲率半径を計算できる。

謝 辞：疲れ試験の実施にあたり、名古屋大学土木工学科の近藤俊行君（現・IHI）、井村孝弘君の協力を得た。また、日本鋼管株式会社技術研究所の田川健吾氏には貴重な助言を、日本国有鉄道構造物設計事務所の阿部英彦氏には文献をいただいた。疲れ試験体の製作は、ト

ピー工業豊橋製造所をお願いした。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 太田省三郎・工藤松一：すみ肉溶接継手の止端の研削およびワイヤーピーニングによる疲れ強さ向上（第1報），溶接学会誌，第49巻，第2号，pp. 28~34，昭和55年2月。
- 2) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，1983年5月。
- 3) 日本建築学会：鋼構造設計標準，1970年。
- 4) 小松原政次：溶接構造物の疲労強度（溶接でガセットを取付けた板の疲労強度），鉄道技術研究所，内部資料。
- 5) 小松原政治，ほか：ガセット板取付板の疲労試験，鉄道技術研究所，内部資料，1962年。
- 6) 山田健太郎，ほか：疲労亀裂の進展挙動に注目したガセット継手の疲労強度解析，土木学会論文報告集，第303号，pp. 31~41，1980年11月。
- 7) 田垣徳幸，ほか：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，第324号，1982年8月。
- 8) 近藤俊行・山田健太郎・菊池洋一：ガセットの長さが疲労強度におよぼす影響，土木学会第37回年次学術講演会概要集，I-84，1982年10月。
- 9) 西田正孝：応力集中，森北出版，pp. 552~560，1967年。
- 10) 山田健太郎・牧野時則・菊池洋一：横リブ十字すみ肉溶接止端部に発生する疲労亀裂の解析，土木学会論文報告集，第292号，1979年12月。
- 11) Fisher, J.W. et al.: Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments, NCHRP Report 147, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1974.
- 12) Yamada, K. and M.A. Hirt: Fatigue Life Estimation Using Fracture Mechanics, IABSE, Colloquium on Fatigue, Lausanne, Switzerland, pp. 361~368, 1982.
- 13) AASHTO: Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1977.
- 14) British Standard Institution: Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 10, Code of Practice for Fatigue, BS 5400, 1980.
- 15) Yamada, K. and P. Albrecht: Fatigue Behavior of Two Flange Details, Proc. of ASCE, Vol. 103, No. ST 4, April 1977.

(1983.5.26・受付)