

# 過荷重を受けた応力集中のある部材の疲れ特性

## FATIGUE BEHAVIOR OF PREOVERLOADED NOTCHED AND GUSSETTED SPECIMENS

三ツ木幸子\*・大野 貴史\*\*・山田健太郎\*\*\*

By Yukiko MITSUGI, Takashi OHNO and Kentaro YAMADA

Fatigue tests were carried out on nine center notched specimens and six gusset attached specimens after an overload was applied. Fatigue life of these specimens were always longer than the average fatigue life of no overloaded specimens. Stress distribution near the notch or the gusset end revealed that there existed a point where the effective stress in tension became lower due to the compressive residual stress induced by the preoverloading. This stress can be related with the threshold stress intensity factor range and the improvement of the fatigue life due to preoverloading was partly explained. Fatigue crack propagation life was also computed using the effective stress range concept.

### 1. ま え が き

一般に不利と考えられる過大荷重によって、疲れ特性が改善されることがあるのはよく知られている。この過荷重による疲れ特性の改善効果は、一概にとらえることはできず、過荷重の大きさ、過荷重の載荷時期、回数などによっても変わる。

これまで、破壊力学的な観点から過荷重の疲れ亀裂進展特性に及ぼす影響を扱った研究は多い。これは、過荷重による亀裂先端の塑性域の拡大により、亀裂の開閉口現象が変わることからある程度説明できることがわかっている<sup>1)</sup>。一方、構造的な応力集中部のある部材に過荷重を与えた場合の疲れ特性の変化を取り扱ったものは比較的少ない。この種の研究には、たとえば、Albrechtらの研究<sup>2)</sup>、増山らの研究<sup>3)</sup>がある。前者は、道路橋の過載荷車両の問題を扱ったものである。後者は、過荷重として、約2%のひずみを与えており、地震などによる過荷重を想定している。

本研究では、応力集中のある中央切欠き部材およびガ

セット付加継手部材に、疲れ試験における上限荷重より大きい荷重、すなわち過荷重を与え、過荷重を付加しなかった場合に対して疲れ特性がどのように変化するかを亀裂の発生および進展の両面から検討した。さらに、有効応力範囲を定義し、既知の応力集中係数を用いて弾塑性解析をし、亀裂を生じる断面の応力分布ならびにこの有効応力範囲を求めた。また、この結果得られた応力分布の形をタイプ分けし、実験値の定量的把握を試みた。さらに、この実験結果を、有効応力範囲を用いた亀裂進展解析によって、どの程度把握できるかを検討した。

### 2. 疲 れ 試 験

#### (1) 試験方法

本実験では、Fig.1に示す中央切欠き部材およびガセット付加継手部材を使用した。いずれも切欠き底やガセット端に構造的な応力集中部をもっている。これらの主板の寸法は、厚さ10mm、幅200mm、長さ900mmである。これらの試験体については過荷重がない場合の基本S-Nデータが求められている<sup>4),5)</sup>。また、鋼材の化学成分と機械的性質をミルシートに従ってTable1に示す。

中央切欠き部材(N系)：中央切欠き部材は、5mmφの円孔切欠き部材(N5タイプ)および5mmφ×10

\* 学生会員 名古屋大学大学院博士課程後期在学中  
(〒464 名古屋市千種区不老町)

\*\* 学生会員 名古屋大学大学院博士課程前期在学中(同上)

\*\*\* 正会員 Ph.D. 名古屋大学助教授 工学部土木工学科  
(同上)

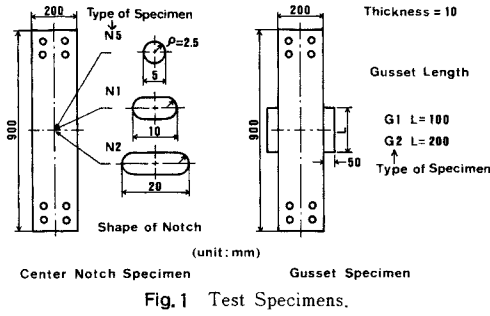


Fig. 1 Test Specimens.

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

Series	Steel	C	Si	Mn	P	S	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
N	SMS50A	0.17	0.25	1.27	0.022	0.008	372	519	26
G	SMS50A	0.16	0.31	1.33	0.018	0.007	431	549	27

mm (N1タイプ), 5 mm φ × 20 mm (N2タイプ)の2種類の長円孔の切欠き部材で, 合計3種類の切欠き形状を対象とした。

ガセット付加継手部材 (G系): ガセットの長さが, 100 mm (G1タイプ), 200 mm (G2タイプ)の2種類のガセット付加継手部材を対象とした。ガセットの幅および厚さは, それぞれ 50 mm, 10 mm である。ガセッ

トの溶接は, ルートフェイス 1 mm で 45° の開先を取り, 突き合わせ溶接した後, 裏面をガウジングして溶接し, 完全溶け込みレ形突き合わせ溶接とした。ガセットの端部は回し溶接とし, 溶接止端は仕上げていない。溶接には低水素系溶接棒 (JIS D 5016) を用い, すべて手溶接で行った。

N 系列については, 試験体タイプ N5 を 3 体, N2 を 5 体, N1 を 1 体, G 系列については, G1, G2 を各 3 体ずつ, 合計 15 体の実験を行った。ここで, 試験体は Fig. 2 に示すように, 試験体のタイプ (N2, G2 など) に, 固有の番号 1, 2, … を付してよぶこととする。

各試験体には, 亀裂発生予想点近傍とそれから 10 mm 離れた位置に 0.04 mm φ の被覆銅線を貼り, 亀裂が発生進展してこの銅線を切ると試験機が止まるようにした。

実験は, まず試験体に過荷重を静的载荷した後, 疲れ試験を行った。過荷重の大きさは, 原則として疲れ試験に用いる応力範囲を, 疲れを考慮しない場合に対して定められた許容応力度以下にしたときに, 疲れ寿命が伸びると推定される領域に設定した。疲れ試験の繰り返し速度は 540 回/分とし, 試験機はアムスラー型万能試験機 (容量 100 t) を使用し, 下限荷重は 3 t とした。試験中, 亀裂の発生, 進展挙動を把握するため, 銅線切断時, 場

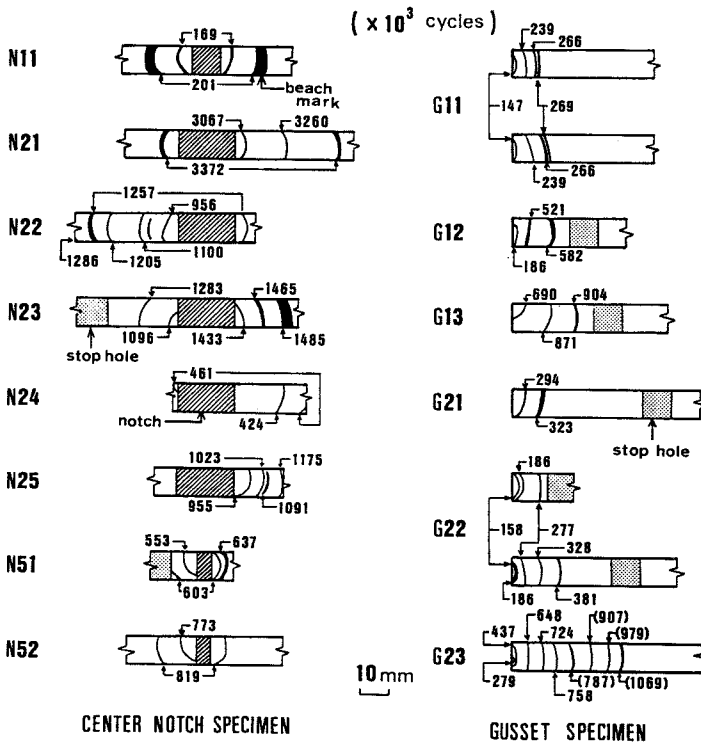


Fig. 2 Fatigue Fracture Surfaces.

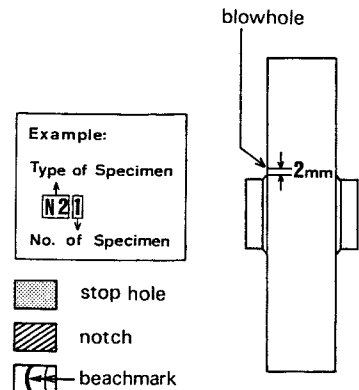


Fig. 3 Position of Blowhole.

合によっては適当な繰返し数でピーチマーク試験を行った。一定回数（原則として約300万回）以上経過しても、亀裂の発生が確認されない場合には、応力範囲 $\sigma_r$ を大きくして実験を継続した。

(2) 疲れ亀裂の発生と進展

試験体 N 53, G 13 を除いて、すべての試験体は、N 系では孔縁部（ノッチの底部）、G 系では溶接止端部から亀裂が発生した。N 53 は、チャック部の表面に損傷があったため、その部分から亀裂が発生し、破断した。また、G 13 は 2 回応力範囲を上げたが、Fig. 3 に示すがセット端の溶接のブローホールを起点として、亀裂が発生した。

各試験体の破断面を Fig. 2 に示す。図中の数字はピーチマークをつけ始めたときまでの繰返し数である。G 23 については、ストップホールを開けずにそのまま添接板を当て実験を継続したので、添接板を付けた後の繰返し数にはかっこを付けて区別した。なお、本報告で示す繰返し数にはピーチマークをつけるのに要した繰返し数は考慮していない。

亀裂発生点近傍に貼った銅線が切断されたときピーチマーク試験を行ったが、破面にピーチマークの発見できないものがあった。たとえば、G 13 の $\sigma_r=108$  MPa, 206.5 万回、G 21 の $\sigma_r=98$  MPa, 302.1 万回、G 23 の $\sigma_r=78$  MPa, 69.3 万回でピーチマーク試験を行ったが、これに対応するピーチマークが破面観察では確認されなかった。このことより、このピーチマーク試験を行った時点では亀裂が発生していないことが推測される。これに対し、過荷重を付加しなかった場合の過去の実験では、上述の G 13 に対応する G 1 タイプ、 $\sigma_r=108$  MPa で 40 万回、G 21 に対応する G 2 タイプ、 $\sigma_r=98$  MPa で 30 万回、G 23 に対応する G 2 タイプ、 $\sigma_r=78$  MPa で 75 万回のときに亀裂はすでに発生し約 10 mm 程度に成長している<sup>4)</sup>。よって、亀裂発生寿命がのびたと考えてよいであろう。

(3) 疲労限と疲れ寿命  $N_f$

過荷重を付加した場合の実験結果を、Table 2 に示す。ここで、 $\sigma_{ol}$  は過荷重による応力を、 $\sigma_r$  は応力範囲を示す。疲労寿命  $N_f$  は亀裂発生予想部から 10 mm の位置に貼った銅線（0.04 mm  $\phi$ ）が切断されたときの繰返し数で、このときの亀裂長を  $a_f$  とする。応力範囲を上げて継続実験した場合には、そのときの繰返し数を  $N_f$  の欄に記載し、前に > の記号を付けた。

疲れ試験結果を各タイプ別に S- $N_f$  線図にして Fig. 4 a)~d) に示す。矢印を付けたシンボルはすべて、その応力範囲と繰返し数では、予想部から亀裂が発生しなかったことを示す。これらは、N 53 を除いて、応力範囲を大きくして実験を継続した。各データに添えた番号

Table 2 Fatigue Test Results.

Designation of Specimen	Overload Stress	Stress Range	Cycles to Failure	Final Crack	Improved Rate	Standard Deviation
	$\sigma_{ol}$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$N_f$ ( $\times 10^4$ )	$a_f$ (mm)	I	2s
N11	221	176	201	13.8	0.03	0.17
N21	137	98	>2980		>0.44	
N22	127	98	1100	17.8	0.65	
N23	132	98	>5300	13.9	0.02	0.23
N24	152	118	1283	13.5	0.20	
*N25	221	113	1091	15.0	0.04	
N51	212	176	600	16.0	0.01	
N52	255	176	>2910		>0.70	0.14
N53	230	196	820	14.0	0.33	
		176	>2154		>0.57	
G11	245	137	270	11.5	0.17	
G12	294	137	582	13.5	0.51	
*G13	245	98	>2971		>0.69	0.18
		108	>2928		>0.84	
		118	871	14.0	0.45	
G21	294	98	>3021		>1.06	
		137	323	10.0	0.74	
*G22	147	98	277	9.2	0.02	0.09
G23	186	78	>3400		>0.67	
		88	724	11.0	0.23	

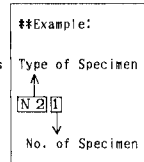
\*N25:  $\sigma_r$  increased during the fatigue test.

\*N53: Crack initiated from the defect on the surface.

\*G13: Crack initiated from the notch which was 2mm from the weld toe.

\*G22: Copper wire was put on 2mm inside from normal position(about  $\pm 10$ mm) about  $N_f$ .

>: crack was not found at the Number



は、Table 2 に示した試験体番号に対応する。

比較のため、過荷重を付加しない場合の過去の実験結果を白抜き印で示す<sup>4),5)</sup>。さらにこれらのデータの 50 % 破壊確率線（破線）および 95 % 信頼区間（実線）を示した。これら過去の実験結果については、破断しなかった場合に応力範囲を上げて継続実験したデータには R を付け区別した。

Fig. 4 a)~d) に示されるように、過荷重を付加したすべてのデータが付加しなかった場合の平均値よりも右側にあり、過荷重によって寿命が低下することはなかった。改善の程度はさまざまであるが、Table 2 と対照すると、95 % 信頼区間に入ってしまうデータは過荷重を付加する度合いが比較的小さいことがわかる。また、破断しなかったデータを見ると疲労限が上がっていることがわかる。

(4) 改善傾向

ここでは、過荷重による疲れ寿命の増加の程度を示すため、改善度 I を次式のように定義し、Table 2 に示した。

$$I = \log N_{o1} - \log N = \log(N_{o1}/N) \dots \dots \dots (1)$$

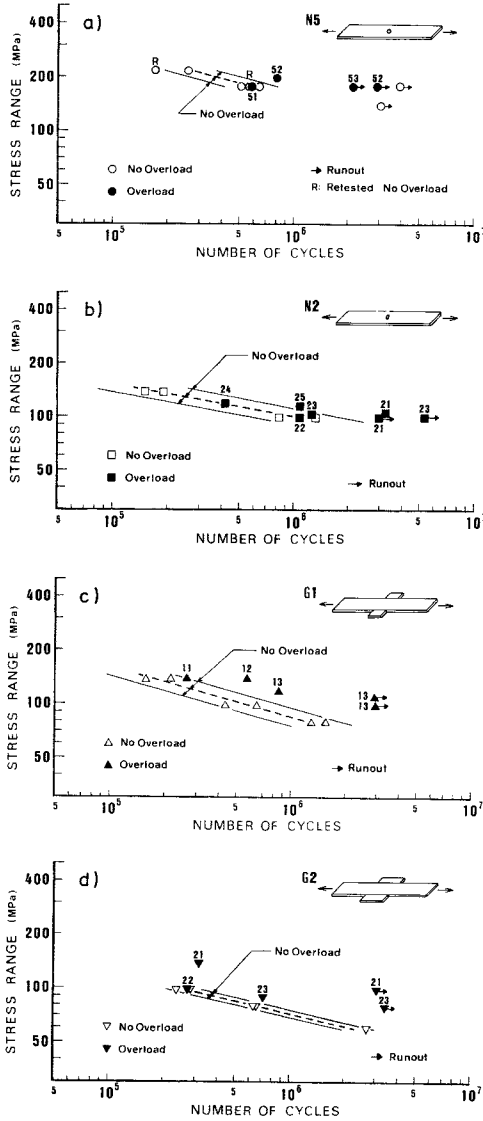


Fig.4 Fatigue Test Results of Overloaded Specimens Compared with No Overloaded Specimens.

ここで、 $N_{ol}$ ：過荷重を付加した場合の寿命

$N$ ：過荷重を付加しない場合の寿命

これは、両対数  $S-N$  線図上で、過荷重を受けた場合の  $S-N$  プロットが、過荷重を受けなかった場合の  $S-N$  線図よりどの程度右側になるかを示した係数である。改善度をこのように定義すると、各タイプ別に求まる標準偏差  $s$  により、たとえば今回のように  $2s$  と比較して、98% 破壊確率線以上に改善されたという形で評価ができ便利である。改善度が過荷重を受けない場合のデータのばらつきを超えた場合、すなわち  $I > 2s$  の場合を改善効果ありと仮定すると、Table 2 に示されるよ

うに 15 体中 9 体は寿命が改善された。また、 $I < 0$  になるものではなく、すべて、過荷重を受けないものの寿命の平均値を超えた寿命を示している。すなわち、本実験の過荷重と荷重範囲の組合せでは、疲れ特性が改善され、寿命が低下することはなかった。また、改善度の程度は、過荷重  $\sigma_{ol}$  を付加する程度が小さいと改善効果はほとんど現われないが、過荷重を増大するにつれて改善効果が現われ始め、その程度は増す傾向にある。ことにいくつかのケースで、過荷重を一定にして応力範囲を変化させて過荷重の割合を小さくした場合、疲労限の改善段階から寿命が有限回数のびる改善段階、あるいは、ほとんど改善されない段階へと移ることが示されている。本実験の範囲では、切欠き部材で改善された場合、寿命はそのほとんどが 300 万回以上となり、疲労限が上がる傾向がみられた。一方、ガセット付継手部材では、寿命が有限回数のびる場合と 300 万回以上となる場合とがあり、亀裂進展寿命と疲労限双方の改善傾向が観察された。

### 3. 応力分布による改善効果の検討

#### (1) 疲れ特性の改善メカニズムと応力分布タイプ

応力集中部のある部材で過荷重により疲れ特性が改善されるメカニズムを、円孔を例にとって説明する。本実験のように応力集中のある部材の疲れ試験では、Fig. 5 の①に示すように繰り返し荷重の上限値載荷時に亀裂発生部では降伏が生じる。除荷時には、②で示すように降伏した部分に圧縮の残留応力が付加され、疲れ試験中はほぼこの状態が繰り返される。簡単のためここでは  $\sigma_{min} = 0$  とする。これに対し、最初に過荷重を載荷すると、Fig. 6 ①に示すように応力集中部ではより広い範囲で降伏が生じ、除荷した際に②のようにほぼこの降伏した部分に圧縮残留応力が付加される。その後、繰り返し荷重が載荷されたとき、亀裂発生部近傍の引張応力は低減される。疲れ亀裂の発生および進展は、亀裂を発生させかつ開口させるこの領域の引張応力の大きさに支配されると仮定すると、この引張応力の低減により疲れ特性は改善されることになる。以下の解析では、応力範囲のうち引張応力の部分 (Fig. 5 と Fig. 6 の陰影部) を有効応力範囲  $\sigma_{r,eff}$  とし、この部分のみが亀裂の発生および進展に寄与するものとした。なお、圧縮残留応力が付加され、かつ、 $\sigma_{r,eff} > 0$  となる部分では、 $\sigma_{r,eff}$  は、上限荷重載荷時の応力分布に一致する。

Fig. 5 と Fig. 6 では応力分布状態によって通常の疲れ試験を A と C の 2 タイプに、過荷重を付加した場合の疲れ試験を A, B, C の 3 タイプに分けた。Fig. 5 の (a) および Fig. 6 の (a) では除荷の際に圧縮側で降伏を起こしていないが、Fig. 5 の (b) および Fig. 6 の (b) と (c) では起こしている。Fig. 5 の (b) および

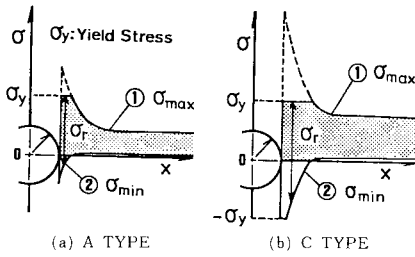


Fig. 5 Stress Distribution Near the Notch for Fatigue Test.

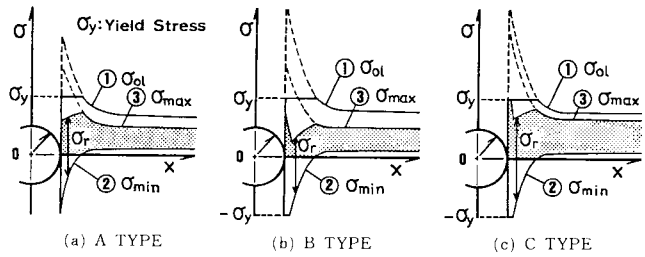


Fig. 6 Stress Distribution Near the Notch During Fatigue Test After Preoverloading.

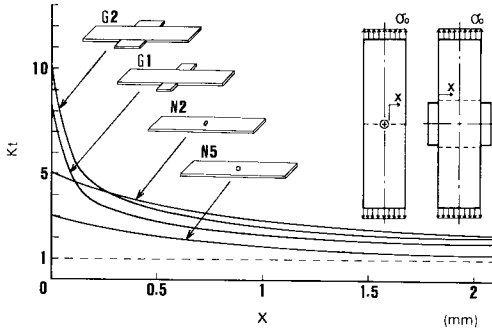


Fig. 7 Stress Concentration for Each Specimen.

Fig. 6 の (c) は、再び引張側で降伏を起こすタイプで、最大応力集中部では繰り返し载荷ごとに圧縮側と引張側で交互に降伏を繰り返す。

(2) 疲れ試験中の応力分布の解析

ここでは、過荷重によって圧縮残留応力が付加された後、繰り返し荷重が载荷されたときの応力分布を求める。この応力分布から (1) で定義した有効応力範囲  $\sigma_{r,eff}$  を計算し、この分布を用いて実験値を検討するとともに、この有効応力範囲を用いて破壊力学を用いたパラメトリックな亀裂進展寿命解析を行う。

簡略化のため、材料は完全弾塑性と仮定し、弾性範囲では各点の応力  $\sigma$  は応力集中係数  $K_t$  と平均応力  $\sigma_0$  を用いて  $\sigma = K_t \times \sigma_0$  で表わせるとする。また、除荷の際には、再び弾性変形をし、圧縮の領域で塑性が起こるまで弾性変形を続ける。溶接残留応力は初期応力として、载荷の際の  $\sigma = K_t \times \sigma_0$  によって求めた  $\sigma$  に重ね合わせて考慮する。

本解析に使用した応力集中の分布は、円孔切欠き部材では、1 個の円孔をもつ無限板に無限遠において対象断面の垂直方向に一樣引張応力  $\sigma_0$  を受ける場合の応力集中の分布を求める式 (2) を用いた<sup>9)</sup>。

$$K_t = [2 + (\rho/r)^2 + 3(\rho/r)^4] / 2 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\rho$  : 円孔半径、 $r$  : 円孔の中心からの距離。  
本研究では、有限板を対象としているのでその影響が考えられるが、200 mm の幅に対して、円孔が 5 mm  $\phi$  で

あり、その影響は小さいものとして上式をそのまま用いた。

また、長円孔切欠き部材の応力集中の分布は、楕円に関する石田の導いた式<sup>7)</sup>を長円孔に換算して用いた。

ガセット継手部材の応力集中は、ガセット端の溶接止端部の局所的な応力集中<sup>8)</sup>とガセットの形状に起因する応力集中<sup>4)</sup>の 2 つの成分で構成されていると仮定した。以上の方法で得られた応力集中係数  $K_t$  の分布を Fig. 7 に示す。

(3) 解析結果

a) 有効応力範囲  $\sigma_{r,eff}$  の分布図と Point Stress

過荷重と応力範囲の組合せから計算される有効応力範囲  $\sigma_{r,eff}$  の分布図を各試験体について求め、その代表的なものについて、Fig. 8 (a), (b) と Fig. 9 に示す。また、Albrecht らの実験で用いられたリブ十字形隅肉溶接継手に対して同様の解析を行った結果を Fig. 8 (c) に示す。この際、応力分布は Table 1 に示した降伏応力  $\sigma_y$  で無次元化されている。また、Fig. 8 の図はすべて亀裂が発生した応力範囲に対するものである。

この結果をみると、過荷重を受けた試験体では、応力集中部およびそれより少し離れた位置に、 $\sigma_{r,eff}$  が小さくなる場所が現われる。すなわち、ノッチ底あるいはガセット溶接止端部に形成される最大応力集中点 (板の表面) か、この最大応力集中点より 0.1~0.7 mm 内側 (板の内部) に入った点に極小応力点が形成される。この極小となる応力をそれぞれの応力分布タイプに対する Point Stress,  $\sigma_p$  と定義する。ただし、上限荷重を载荷したときの応力分布が負になる領域では上述の有効応力範囲は 0 (ゼロ) となるので、この領域では上限荷重を载荷したときの負の応力分布 (Fig. 9 の破線) において極小となる応力を Point Stress,  $\sigma_p$  と定義する。

Fig. 8 (a) では、N 25 以外は孔縁に  $\sigma_p$  が現われ、その値は 0.8  $\sigma_y$  ( $\sigma_y$  : 降伏応力) 程度である。N 25 の  $\sigma_p$  の位置は孔縁より 0.5 mm 程度内側で、その値は 0.2  $\sigma_y$  程度になる。また、Fig. 8 (b) では、G 21, G 22, G 23 の  $\sigma_p$  は、それぞれ 0.05  $\sigma_y$ , 0.55  $\sigma_y$ , 0.10  $\sigma_y$  程度となっている。

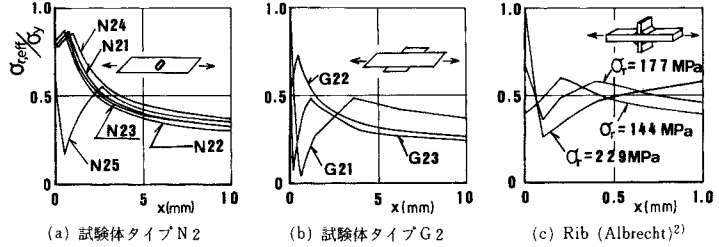
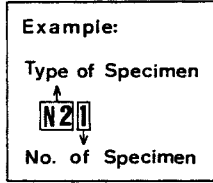


Fig.8 Example of Effective Stress Distribution for All Specimen.

$\sigma_{r,eff}$ : Effective Stress Range  
 $\sigma_y$ : Yield Stress

Fig. 9 は、300 万回で亀裂が発生せず応力範囲を大きくして継続実験をした試験体 N 21 および G 21 について、各応力レベルに対する有効応力範囲  $\sigma_{r,eff}$  の分布図を描いたもので、応力範囲を大きくしても応力分布のタイプは変化しない。応力範囲を大きくすると、水平の矢印で示した  $\sigma_p$  の大きさは、N 21 で①0.7  $\sigma_y$  から②0.8  $\sigma_y$  へ、G 21 で①-0.2  $\sigma_y$  から②0.05  $\sigma_y$  へ  $\sigma_r$  の増大とともに大きくなっている。

b) Point Stress と改善効果の関係

改善効果の現われる限界値を把握するため、すべての試験体の Point Stress,  $\sigma_p$  の値を降伏応力  $\sigma_y$  で除して無次元化し、この値を縦軸にとって Fig. 10 に示した。横軸には試験体タイプを示す。各試験体で、孔縁やガセット端の最大応力集中点に  $\sigma_p$  が現われる場合 (Fig. 6 の A タイプ) を Fig. 10 a) に、それより少し内側に  $\sigma_p$  が現われる場合 (Fig. 6 の B, C タイプ) を Fig. 10 b) に示す。

実験結果と比較するため、原則として、約 300 万回で破断しなかったデータを○に矢印を付し、 $I > 2 s$  に改善されたデータを○で、改善効果が明確に現われなかったデータ ( $I < 2 s$ ) を●で示した。この図より、Fig. 10 a) では、 $\sigma_p < 0.7 \sigma_y$  の場合に改善効果が現われ、Fig. 10 b) では、 $\sigma_p$  を 0.25  $\sigma_y$  より小さくすると改善効果が明確に現われ、 $\sigma_p$  を負にすると寿命が 300 万回以上となることがわかった。

同様にして計算した、Albrecht らの行ったり十字形隅肉溶接継手の結果<sup>2)</sup>、Fig. 8 (c) では応力範囲が最も小さい  $\sigma_r = 144 \text{ MPa}$  のとき、隅肉溶接止端で  $\sigma_p \approx 0.4 \sigma_y$  になり、寿命は 1 000 万回以上に改善されている。また、それ以外の 2 つのケースでは、応力範囲の大きいケース ( $\sigma_r = 229 \text{ MPa}$ ) の方が、 $\sigma_p$  が小さくなり、改善度が大きくなっている。Albrecht らの結果 (Rib) も Fig. 10 に加えたが、改善効果の現われる場合の  $\sigma_p$  の限界について、今回の実験と同様の結果となった。

ここで、A タイプについて初期亀裂  $a_0 = 0.2 \text{ mm}$ 、応力範囲  $\sigma_r = 0.7 \sigma_y$  として応力拡大係数範囲  $\Delta K$  を計算する。この部分の応力は、すでに実応力に換算されているので  $\Delta K$  は次式で概算できる。

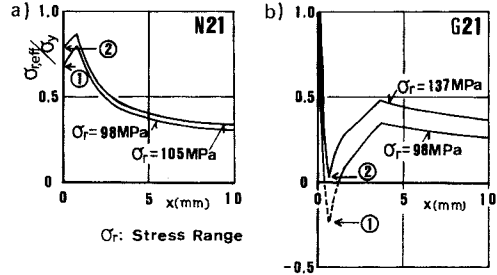


Fig.9 Example of Effective Stress Distributions.

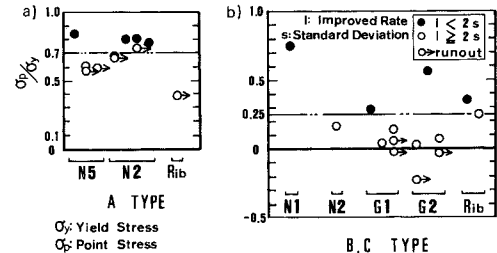


Fig. 10 Relation between Point Stress and Improvement Rates for Each Specimens.

$$\Delta K = 1.12 \sigma_r \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (3)$$

$\Delta K$  はガセットで  $8.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、切欠き部材で  $7.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となった。これはほぼ母材の限界応力拡大係数範囲  $\Delta K_{th}$  (約  $6 \sim 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ )<sup>1)</sup> に近い値となっている。一方、B と C タイプでは、0.1~0.7 mm の位置に Point Stress が現われる。そこで、 $a_0 = 0.7 \text{ mm}$ 、応力範囲  $\sigma_r = 0.25 \sigma_y$  として、応力拡大係数範囲  $\Delta K$  を計算するとガセット部材では  $5.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、切欠き部材では  $4.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となり、 $\Delta K$  が  $\Delta K_{th}$  よりかなり小さくなることがわかった。このことから、A タイプでは、応力集中部近傍の応力低減により亀裂が発生しないか、あるいは不可避な微小初期亀裂を考えた場合の応力拡大係数範囲  $\Delta K$  が限界応力拡大係数範囲  $\Delta K_{th}$  よりも小さく亀裂が進展しないことにより疲労限の改善がなされることが考えられる。一方、B, C タイプの Fig. 10 b) の矢印付きおよび矢印なしの白抜きデータのデータでは、最大応力集中部で亀裂が発生し、矢印なしの白抜きのデータの

分布する  $0 < \sigma_p < 0.25 \sigma_y$  では亀裂の進展が遅延され、矢印付きデータの分布する  $\sigma_p < 0$  では停留するものと考えられる。

N2タイプではAタイプの応力分布で改善されたものが多く、この場合、過荷重を少し大きくしただけで、ほとんど改善されない状態から寿命が300万回以上に改善される状態に移る傾向がある。これは、Aタイプの改善は、ある条件を境に疲れ亀裂が発生するかしないかに分かれることに対応する。これに対しガセットタイプでは、実験を行ったケースのほとんどがB、Cの応力分布となる。この場合、亀裂進展の遅延および停留現象によって改善効果が生じたことが考えられ、実験結果もこれに対応して、過荷重の大きさに応じて徐々に改善効果に変化している。

#### 4. 亀裂進展解析

##### (1) 解析方法

過荷重を付加した場合について、ここで定義した有効応力範囲を用いて亀裂進展解析を行い、本解析でどの程度、実験値を評価できるか検討した。

応力拡大係数範囲  $\Delta K$  の計算には、次式を用いた<sup>9)</sup>。

$$\Delta K = F_s \times F_e \times F_w \times F_g \times \sigma_r \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $a$ ：亀裂長さ

$F_s$ ：自由表面の補正係数

$F_e$ ：亀裂形状の補正係数

$F_w$ ：板厚(板幅)の補正係数

$F_g$ ：応力集中の補正係数

$F_g$  は、亀裂のない場合の応力分布を用いて、亀裂のある状態の亀裂先端の応力状態を考慮するための補正係数であるが、ここでは塑性により変化した応力分布も考慮した。

疲れ亀裂進展速度  $da/dN$  (mm/cycle) は、応力拡大係数範囲の関数として、次式で表現されるものとする。

$$da/dN = 48 \times 10^{-10} (\Delta K)^3 \dots\dots\dots (5)$$

解析では、初期亀裂長さ  $a_0$  を  $0.2 \text{ mm}^{10)}$ 、最終亀裂長さ  $a_f$  を  $10 \text{ mm}$  と仮定した。また、亀裂形状として、寿命が一番短くなる edge crack を仮定した。実験を行ったすべての試験体(過荷重条件)に対しパラメトリックな亀裂進展解析をし、 $S-N_p$  線図を求めた。

##### (2) 解析結果

前述したように、切欠きタイプの実験では、ほとんどの試験ケースで亀裂進展寿命が改善されるほど過荷重が付加されておらず、唯一 N25 がそのタイプの傾向を示しているにすぎない。よって、亀裂進展寿命が改善されるガセットについての結果のみ、Fig. 11 a), b) に、試験体のタイプごとに  $S-N_p$  線図 ( $N_p$ ：亀裂進展寿命) を描き、過荷重を付加した本実験結果とともに示す。こ

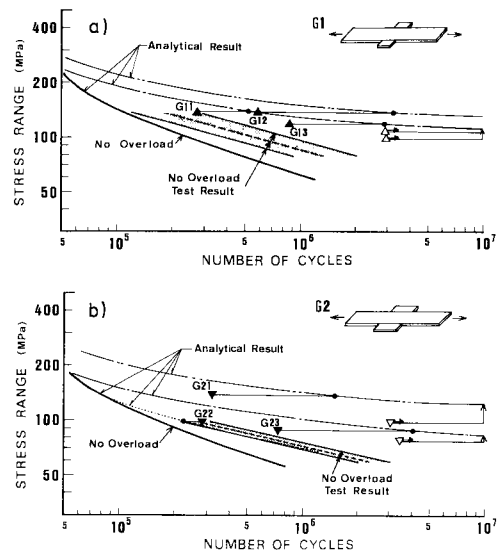


Fig. 11 Comparison between Analytical Fatigue Crack Propagation Life and Test Results.

の際、各過荷重に対する  $S-N$  線図の左端を結ぶ曲線が過荷重を付加しなかった場合の  $\sigma_{r,eff}$  を用いた場合の  $S-N_p$  線図を与える。比較のため、過荷重を付加しなかった場合の実験結果も示した。

Fig. 11 a), b) では解析値と実験値を水平線で結んだが、これにより、G22を除いてすべての試験体で、進展寿命の解析値は実験値に対し過大な寿命を与えていることがわかる。一方、G22では解析値が実験値より小さくなっているが、これは他の試験体に比べ過荷重の割合が小さく、過荷重の影響がほとんど現われなかったものである。このことから、本解析は進展寿命の解析において、過荷重による寿命の伸びを過大に評価していることが推測される。また、各試験体に対し描いた  $S-N_p$  線図は、過荷重を大きくすると右上に移動する。すなわち、過荷重を大きくすると寿命はのび、疲労限は上がる傾向にあることを示している。したがって、本解析により“過荷重  $\sigma_{ol}$  を付加する割合が小さいと改善効果はほとんど現われぬが、過荷重を増大するにつれて改善効果が現われ始め、その割合も増す傾向がある”という実験結果の傾向を把握することはできる。しかし、絶対的な値については、解析値が実験値をかなり上回る傾向にある。

#### 5. 結 論

構造的に応力集中のある中央切欠き部材およびガセット付加継手部材に、過荷重を与えて実験的に過荷重の疲れ特性に与える影響を把握した。また、有効応力範囲  $\sigma_{r,eff}$  を定義し、繰り返し载荷中の応力分布および亀裂進展解析を行って、過荷重による疲れ特性の変化を検討

した。

(1) 本実験で使用した単軸引張の過荷重の範囲 ( $\sigma_{ol} < 0.67 \sigma_y$ ) および応力範囲では、過荷重によって疲労寿命が長くなることはあっても、短くなることはなかった。

(2) 改善効果は、比較的小さい過荷重 (たとえば  $\sigma_{ol}/\sigma_y=1.1$ ) ではほとんど現われない。ある値以上の過荷重を与えると改善効果が現われ始め、過荷重が大きくなればなるほど改善効果は大きくなる傾向がある。

(3) ガセット部材について、ピーチマーク試験に対応するピーチマークが観察されなかったことから、過荷重により亀裂発生寿命がのびることが確認された。

(4) 応力集中をもつ部材に過荷重を与えた場合に疲れ寿命がのびる理由として、繰り返し載荷時の応力分布を計算した結果、次の2つが考えられた。

a) 過荷重により圧縮残留応力が付加され、繰り返し荷重が載荷される際に最大応力集中点の引張応力が低減されることによるもの。

b) 最大応力集中点近傍に引張応力が極小を示す位置が発生し、これが亀裂進展を遅延または停留させることによるもの。

(5) a) の場合、最大応力集中点の応力  $\sigma_o$  を  $\sigma_o < 0.7 \sigma_y$  とすると寿命は300万回以上となった。b) の場合は、圧縮側で再降伏し、最大応力集中点の近くに形成される極小応力  $\sigma_o$  を  $0.25 \sigma_y$  より小さくすると改善効果が明確に現われた。

(6) 切欠きタイプ、ことにN2ではa)の効果が改善されたものが多い。この場合、ほとんど改善されない状態から、過荷重を少し大きくしただけで、寿命が300万回以上に改善される状態に移る傾向があった。

(7) 繰り返し載荷の応力範囲の引張側のみを有効と

した有効応力範囲  $\sigma_{reft}$  を定義し、これを用いて過荷重を考慮した場合の亀裂進展解析を行った。亀裂進展寿命解析は、過荷重載荷の場合実験値と比べ、過大な寿命を与えた。しかし、過荷重の度合いが大きくなると改善効果が大きくなるという傾向はつかめた。

#### 参 考 文 献

- 1) 西島 敏・太田昭彦・二瓶正俊：溶接継手の疲労特性，日本機械学会誌，第87巻，第790号，pp.1035～1041，Sept.，1984.
- 2) Abtahi, A., Albrecht, P. and Irwin, G. R. : Fatigue of Periodically Overloaded Stiffener Detail, Proc. of ASCE, Vol.102, No.ST11, pp.2103～2119, 1976.
- 3) 増山琢也・長谷川彰夫・後藤芳顕・松浦 聖：塑性履歴を受けた2, 3の鋼構造要素の疲労寿命，土木学会第39回年次学術講演会概要集，I-130, pp.259～260, 1984.
- 4) 山田健太郎・酒井吉永・菊池洋一：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，土木学会論文報告書，第341号，pp.129～136, 1984.
- 5) 岡本裕二：疲労き裂の補修・補強後の疲労強度に関する実験的研究，名古屋大学工学部土木工学科卒業論文，1984.
- 6) 西田正孝：応力集中，森北出版，p.217, 1973.
- 7) Ishida, M. : On the Tension of a Semiinfinite Plate with an Elliptic Hole, 徳島大学工学部研究報告，第5巻，第1号，pp.75～94, 1955.
- 8) 山田健太郎・牧野時則・菊池洋一：横リブ十字隅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，pp.1～12, 1979.
- 9) Albrecht, P. and Yamada, K. : Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, Proc. of ASCE, Vol.103, No.ST 2, pp.377～389, Feb., 1977.
- 10) 山田健太郎，Hirt, M. A. : 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，pp.55～64, 1982.

(1985. 8. 21・受付)