

【論 文】

疲労亀裂発生寿命におよぼす 溶接残留応力の影響

Influence of Welding Residual Stresses on Fatigue Crack Initiation Life

高 田 嘉 秀 *
Yoshihide TAKADA

【要旨】 一般に鋼構造物の疲労寿命 N_f は疲労亀裂の発生に要する荷重繰返し数 N_c と、発生した亀裂が進展して破壊に至るまでの荷重繰返し数 N_p との和 ($N_f = N_c + N_p$) として表わされる。このように区別する理由は、 N_c と N_p における力学的メカニズムの相違、あるいは種々な鋼構造物の設計思想の相違によるためである。

本文は、疲労寿命に影響をおよぼす因子の一つとして溶接引張残留応力を取り上げ、その大きさが亀裂発生寿命 N_c と亀裂伝播寿命 N_p にどの程度の影響をおよぼすものか実験的に把握したものである。

実験は引張残留応力の異なる4種の試験片を用意し、3点曲げ疲労試験機にて行った。 N_c と N_p はクラックゲージにて測定した。特に N_c は予想される亀裂発生点に対して0.1 mm以内の位置にクラックゲージを貼り付けて測定した。

本実験より以下の結果が得られた。

- (1) 亀裂発生寿命 N_c は溶接引張残留応力が小さくなるほど増加する。
- (2) 溶接引張残留応力が亀裂伝播寿命 N_p におよぼす影響は亀裂発生寿命 N_c に比べてかなり小さい。
- (3) 破断寿命 N_f のバラツキは亀裂発生寿命 N_c に起因し、亀裂伝播寿命 N_p のバラツキは小さい。このことは溶接引張残留応力に無関係である。

1. はじめに

一般に鋼構造物が疲労破壊に達する過程は次の連続した3つの段階に区別できる¹⁾

第1段階；局所的な塑性ひずみの累積

第2段階；微視亀裂の発生

第3段階；亀裂の安定成長から破断まで

これらの段階のうち第1段階では構造物の安全性を直接損うものではないが、第2段階から第3段階においては構造物の崩壊を非常に招き易い状態となり、工学的に構造物の安全性を評価する上で重要な段階となる。また、これらの段階に区別する理由は、亀裂の発生まで（第1段階）は塑性ひずみや転位などの荷重効果の累積によるものであるが、一旦、亀裂が発生する（第2段階、第3段階）と亀裂の発生に寄与しない小さな荷重であっても亀裂の成長を促進することもあり、明らかに力学的メカニズムの相違が認められるためである。したがって、破壊に至るまでの荷重繰返し数 N_f （破断寿命；以下 N_f ）は、便宜上、亀裂発生までの荷重繰返し数 N_c （亀裂発生寿命；以下 N_c ）と亀裂が伝播して破断に至るまでの荷重繰返し数 N_p （亀裂伝播寿命；以下 N_p ）に区別されて、 $N_f = N_c + N_p$ として定義できる。

これらの段階を踏まえた設計思想として Safe Life Design^{2),3),4)} の立場と Fail Safe Design の立場がある。

Safe Life Design の立場とは使用限界を亀裂の発生

までとし、何らかの方法で亀裂の発生が確認された場合、その部材を除外しようとする考え方であり、機械部品のような小型構造物などに適用可能とされている。一方、Fail Safe Design の立場とは亀裂の発生した状態でも構造物全体の大破壊に至るまでの安全性が確保されるならば亀裂伝播期間中に補修、補強を施す、あるいは一定期間だけ使用し、使用限界とみなされた後除外する考え方である。この考え方は航空機、造船など使用条件が一定している大型構造物などに適用可能とされ、実際に航空機の設計には損傷許容設計として取り入れられている。また、压力容器のように亀裂が生じて液体が漏れることで大破壊を避けることが可能とされている構造物においては Leak Before Failure という考え方もある^{3),5)}。この考え方も広義の Fail Safe Design の立場とみなせる。

しかしながら、半永久的に使用状態が続き、公共性を有する橋梁構造物では基本的な条件が異なるためにか、これらの立場が明確にはされていない。現状では、主要部材は Safe Life Design、二次部材は Fail Safe Design に相当すると思われる。

いずれにしても、これらの設計思想を決定するためには N_c と N_p が重要な判断基準となる。

また、溶接継手部の疲労寿命に影響をおよぼす因子の一つとして溶接残留応力がある。この溶接残留応力は製作上避けられないものであり、その影響を把握しておく

ことは重要である。溶接残留応力に着目した研究として西村ら⁶⁾、星野ら⁷⁾の研究がある。彼らは溶接引張残留応力を除去することで疲労寿命が向上することを実験的に確認している。しかしながら、単に破壊寿命、あるいは疲労限に対するものとしており、 N_c と N_p に区別されたものではない。また、溶接残留応力の大きさを具体的に述べたものでもない。

このような研究報告の多い中で特に注目される研究として堀川ら⁸⁾の研究がある。彼らは溶接引張残留応力を段階的に変化させたHT80材を用い、亀裂伝播速度に対するそれらの影響を比較している。その結果、引張残留応力が $5\text{ kg/mm}^2 \sim 40\text{ kg/mm}^2$ では亀裂伝播速度に差異はないが素材(引張残留応力がほぼ 0 kg/mm^2)に比べて明らかに速くなることを確認している。このことは溶接引張残留応力の大きさが N_p にそれ程影響をおよぼしていないことを示している。しかしながら、 N_c については述べられていない。また、筆者が調査した限りこの種の研究論文はほとんどみられなかった。このことは、亀裂発生点の検視が困難なこと、破壊力学は亀裂の伝播過程には有効であるが亀裂の発生には全く無力であることなどが原因と思われる。

そこで、本研究では溶接引張残留応力を段階的に変化させた試験片を用意し、溶接引張残留応力が N_c と N_p にどの程度の影響をおよぼすものか実験的に把握し、今後の疲労研究への基礎的資料を提供するものとした。

2. 実験方法

2-1 供試材

供試材は一般構造用圧延鋼材SS41であり、ミルシートによる機械的性質と化学成分を表-1に示す。

表-1 機械的性質および化学成分

Material	Yield Stress (kg/mm^2)	Tensile Strength (kg/mm^2)	Elongation (%)
SS41	29	45	32

Chemical Composition (%)				
C	Si	Mn	P	S
0.12	0.23	0.99	0.013	0.006

2-2 試験片

2-2-1 試験片の種類

試験片の種類は溶接引張残留応力の異なる下記の4種類とした。また、実験手順を模式図によって図-1に示す。

- 溶接後、SRなしの試験片(As Weld)
- 溶接後、 380°C でSRした試験片(380 SR)
- 溶接後、 500°C でSRした試験片(500 SR)
- 溶接後、 620°C でSRした試験片(620 SR)

※SR: Stress Relief Annealing (応力除去焼なまし法)

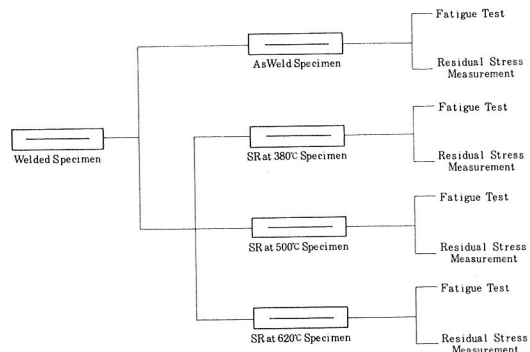


図-1 実験手順

2-2-2 試験片の製作

試験片の寸法は疲労試験機的能力などを考えて図-2のように決定した。

溶接はマイクロワイヤーサブマージアーク溶接法(日鉄溶接工業製, MISA溶接機)でBead-on-Plateにて行った。溶接条件を表-2に示す。

また、応力集中源としてすべての試験片に 1.5 mm 径の中央貫通の丸孔を設けた。これは本州四国連絡橋公団のブローホールの許容寸法に準じたものである。

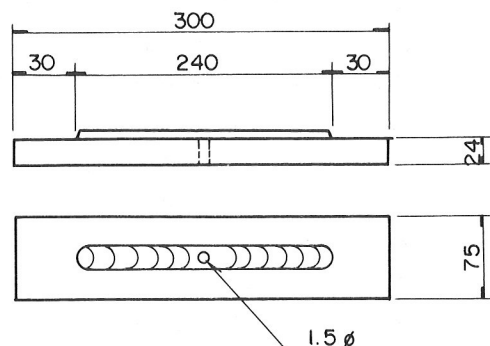


図-2 試験片形状

表一 2 溶接条件

Wire	Y-CS50, 1.6 dia
Flux	NF16
Current	270 (A)
Voltage	30 (V)
Speed	52 (cm/min)
Heat Input	9300 (J/cm)

2-2-3 溶接残留応力の低減

残留応力の低減は応力除去焼なまし法 (SR) によって行った。本方法は試験片全体を電気炉 (エレマー炉) に入れ、鋼の機械的性質が変わらない A_1 変態点以下の適当な温度に加熱保持して残留応力を除去する方法である。

また、試験片全体の温度を一様に所要の加熱保持温度に上昇させるための昇温時間を 15 時間、所要の加熱保持温度の保持時間を 1 時間とし、その後、炉冷することとした。温度管理は試験片表面に取付けた C-A 熱電対を使用し、炉中の温度が 100°C になってから試験片を炉外へ取り出した。

保持温度については 380°C 、 500°C 、 620°C の 3 種類とし、次節 2-3 で述べる方法で 3 種類の残留応力状態であることを確認した。

尚、残留応力の低減は 1.5ϕ の丸孔のない状態でを行い、残留応力の低減終了後 (残留応力測定前) に 1.5ϕ の丸孔を設けた。

2-3 溶接残留応力の測定

溶接残留応力は溶接線方向に着目して、ひずみゲージ (ゲージ長 2mm) を貼り付け、切断法にて機械的に解放することで測定した。測定位置は亀裂発生～伝播線に沿うことが望ましいが図-3 に示すように切断線 (亀裂発生～伝播線) に対して交互な位置で測定した。本測定は、ひずみゲージの大きさにより亀裂発生点での測定が困難であること、丸孔による影響は各試験片において一様であり、各試験片の亀裂発生点での残留応力は一般部の残留応力に準じた大きさになること、疲労寿命の評価は残留応力の定性値にて行うことなどに基づいたものである。

残留応力の測定結果を図-4 に示す。

図-4 よりビード上での残留応力は As Weld, 380SR, 500SR では引張側を示し、その値は各々、 45kg/mm^2 、 23kg/mm^2 、 10kg/mm^2 程度である。溶接に用いたワイヤーの破断強度が 50kg/mm^2 であることから As Weld での

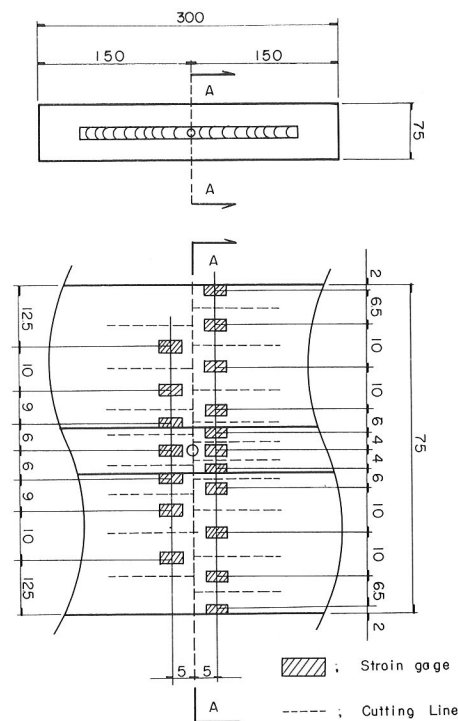


図-3 残留応力の測定

引張残留応力 45kg/mm^2 は妥当な値と思われる。

また、 620SR では残留応力は完全に除去されていると推定されるのにビード上で 2.5kg/mm^2 の圧縮応力が測定されているのは測定誤差によるものと考える。

以上より、2-2-3 の方法で 4 種類の段階的な残留応力を有する試験片を製作することが可能であることを確認できた。

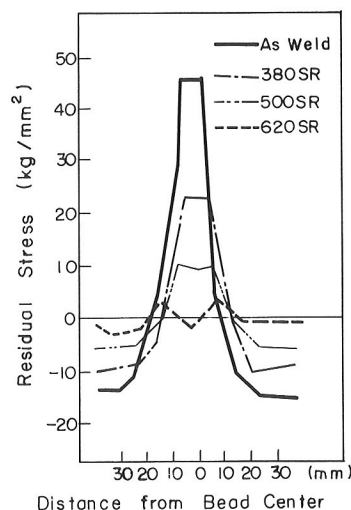


図-4 各試験片の残留応力分布

2-4 疲労試験

疲労試験は3点曲げ負荷による荷重制御片振条件で行った。使用した試験機は島津サーボペット Lab 5 ($P_{max}=5\text{ ton}$, $\delta a=1.0\text{ mm}$)であり、支持スパンは250mmとした(写真-1 参照)。

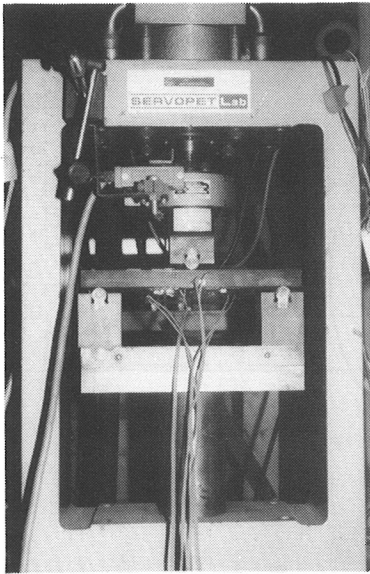


写真-1 疲労試験機

また、応力振幅は完全片振りで応力比 0.1, 载荷速度

は 20Hz とし、载荷点は支間中央となる丸孔の位置に常に一致させた。

3. 疲労寿命の測定方法

疲労寿命はマクロ的(工学的)に亀裂発生寿命 N_c と亀裂伝播寿命 N_p に区別して測定した。これらの寿命の定義を実務的な立場から考えた場合、肉眼にて確認された時点がそれぞれの寿命となる。しかしながら、肉眼に頼る場合、実験上での不都合やデータの不均一性などが生じ、得られた結果を定量的に把握できないことになる。したがって、本研究ではクラックゲージを用いて N_c, N_p, N_f を測定することとした。図-5 にクラックゲージの貼り付け状態と疲労寿命の測定システムを示す。 N_c は丸孔縁(予測される亀裂発生位置)に対して 0.1 mm 以内の位置に貼り付けたクラックゲージが発生した亀裂により切断された時点とした。同様に N_f も試験片縁(最終破断位置)にクラックゲージを貼り付けて測定した。このように測定された N_c, N_f から $N_p (N_f - N_c)$ を求めた。

また、亀裂は試験片内部より発生することもあるのであらかじめ、二段多重応力範囲試験を用いて亀裂発生点を確認しておいた。その一例を写真-2 に示す。写真-2 のピーチマーク(条痕)でわかるように亀裂発生位置は応力集中源の丸孔表面縁と推察され、発生した亀裂は楕円状に幅方向と深さ方向に伝播していることがわかる。

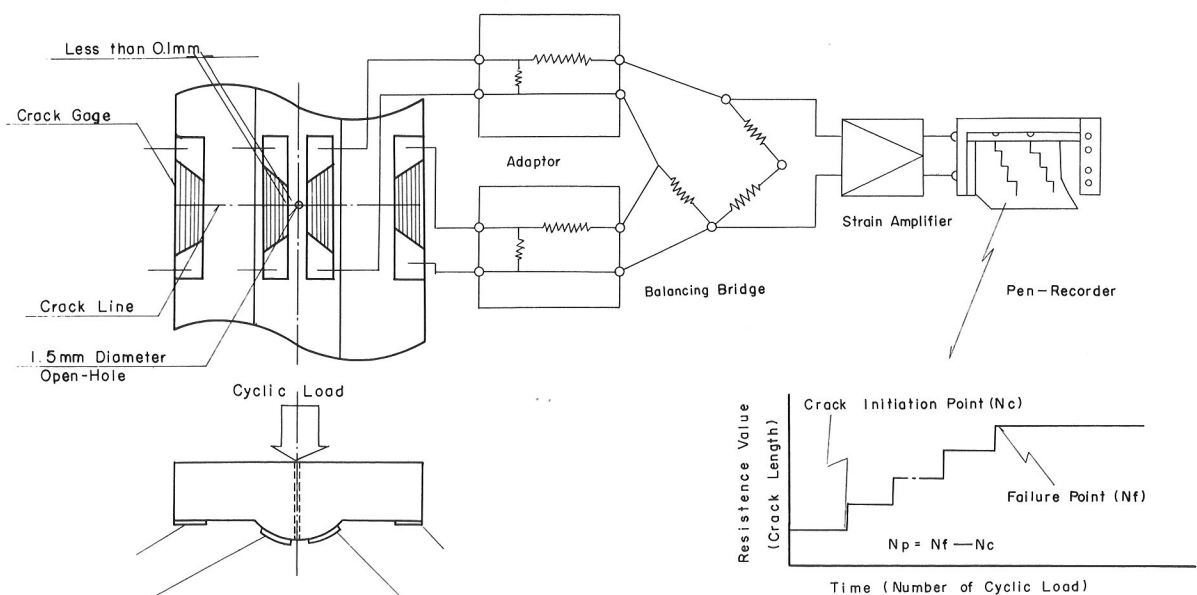


図-5 疲労寿命 (N_c, N_p, N_f) の測定

4. 実験結果および考察

図-6に亀裂発生寿命 N_c と亀裂伝播寿命 N_p および破断寿命 N_f の関係を示し、図-7に亀裂発生寿命 N_c と亀裂伝播寿命 N_p の関係を示す。

図-6では対数表示をしているため N_f, N_p, N_c の比較が困難となるので $N_f(N_c+N_p)$ のとなり $N_p(N_f-N_c)$ を再掲した。本図から N_f は引張残留応力が小さくなるほど増加していることがわかる。特に作用応力範囲が小さくなるほどその傾向は顕著である。具体的にみ

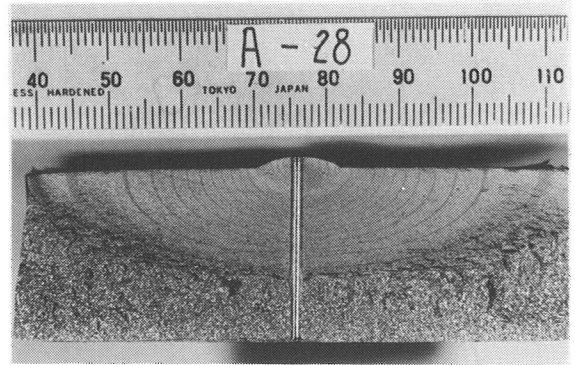


写真-2 ビーチマーク

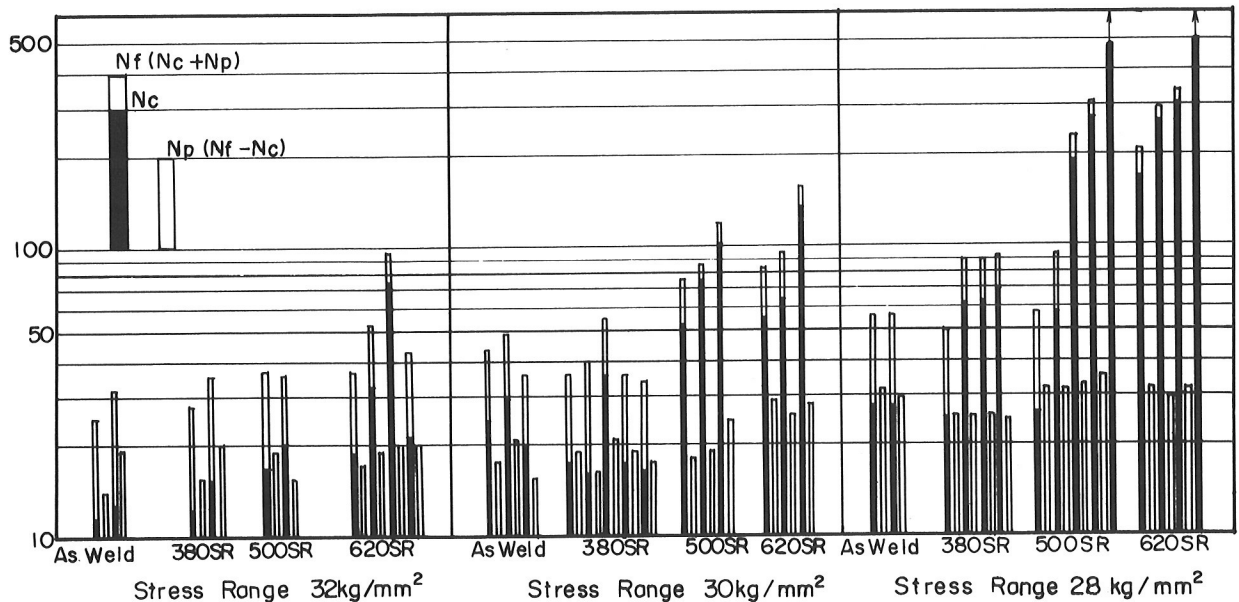


図-6 亀裂発生寿命 N_c と亀裂伝播寿命 N_p および破断寿命 N_f の関係

ると作用応力範囲 32 kg/mm^2 ではAs Weldで $N_f=20$ 万～30万回、620SRで $N_f=40$ 万～100万回であるが作用応力範囲 28 kg/mm^2 ではAs Weldで $N_f=30\sim60$ 万回、620SRで $N_f=200\sim350$ 万回となっている。

次に N_f を N_c と N_p に区別してみる。

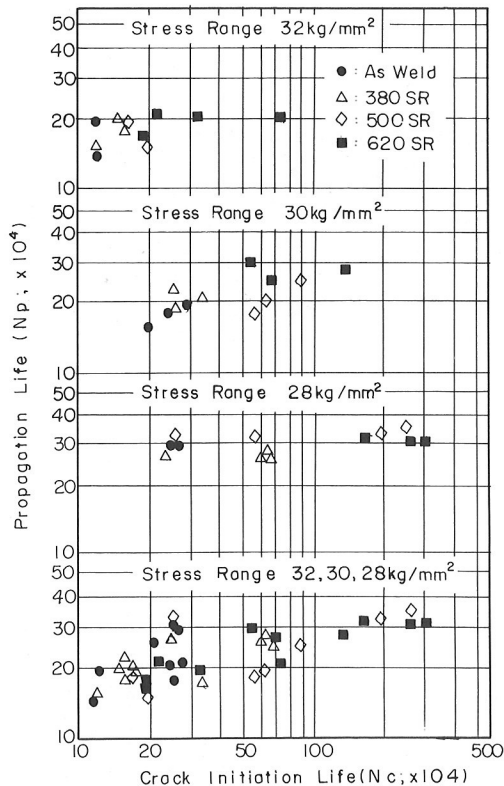
図-6より N_c は N_f とともに引張残留応力が小さくなるほど増加していることがわかる。また、その傾向は作用応力範囲が小さくなるほど顕著となり N_f と同様な傾向を示している。

一方、 N_p は N_c ほど引張残留応力と作用応力範囲の影響を受けていないことがわかる。このことをわかり易く

示したのが図-7である。本図より N_c は作用応力範囲と引張残留応力の低下とともに段階的に増加しているが、 N_p は15万～30万回程度であり、それらの影響を N_c ほど受けていないことがわかる。

以上より、破断寿命 N_f は引張残留応力の低下とともに増加するがその増加量は亀裂の発生までに費やされ、亀裂の伝播過程にはそれ程影響をおよぼさないことが推察される。

尚、図-6ではすべての作用応力範囲において各試験片とも N_f にバラツキがみられる。しかしながら、 N_p のバラツキは小さい。したがって、 N_f のバラツキは、 N_c の

図一七 亀裂発生寿命 N_c と亀裂伝播寿命 N_p の関係

バラツキに起因していることがわかる。また、このことは引張残留応力の増減に無関係ですべての試験片について言えることでもある。

5. ま と め

本研究は破断寿命 N_f を亀裂発生寿命 N_c と亀裂伝播寿命 N_p に区別し、特に亀裂発生寿命 N_c に着目することで溶接引張残留応力のこれらにおよぼす影響を実験的に検討したものである。

亀裂発生寿命 N_c はクラックゲージを予測される亀裂発生位置に対して 0.1mm 以内に貼り付け、その抵抗線が発生した亀裂により切断されることで検出した。

以下に得られた結果を記す。

- 1) 亀裂発生寿命 N_c は溶接引張残留応力が小さくなるほど増加する。特に、疲労限近くの作用応力において顕著であり、作用応力が大きくなると溶接引張残留応力の影響は小さくなる。
- 2) 溶接引張残留応力が亀裂伝播寿命 N_p におよぼす影響は亀裂発生寿命 N_c に比べてかなり小さい。

- 3) 破断寿命 N_f のバラツキは亀裂発生寿命 N_c に起因し、亀裂伝播寿命 N_p のバラツキは小さい。このことは溶接引張残留応力に無関係である。

謝 辞

本研究は大阪大学溶接工学研究所において受託研究員として実施したものである。

堀川浩甫助教授には研究の計画、実施、結果の検討など、研究の全般にわたり終始御指導を賜わった。

また、鈴木博之教官、中辻義弘技官には研究、実験、その他多方面にわたり御援助と御助言を賜わった。

これらの方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) S. コサンダ：金属疲労の解析と応用，現代工学社，1981．
- 2) 河本 実：金属疲労の研究について，材料，第 25 巻，第 276 号，1976．
- 3) 矢田敏夫：引張・曲げ疲労を受ける部材の安全性評価に関する一考察，日本造船学会論文集，第 135 号，1974．
- 4) 城野政弘：疲労強度の破壊力学的評価，日本機械学会関西支部第 95 回教材，1981．
- 5) 岡村弘之：線形破壊力学入門，培風館，1981
- 6) 西村俊夫他：縦ビード完全溶接継手の疲れ寿命におよぼす残留応力の影響，土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集，1975．
- 7) 星野次郎他：大型軸の曲げ疲れ強さにおよぼす溶接欠陥の影響，日本機械学会論文集，第 29 巻，第 197 号，1963．
- 8) K. Horikawa, S. Fukuda, S. Watari, Y. Kishimoto：Residual Stresses in Welded Members Subjected to Cyclic Loading, IABSE Colloquium, Lausanne, 1982．