

直線被害則による鋼部材片の疲れ寿命予測

STUDY ON THE ESTIMATION OF FATIGUE LIFE OF STEEL
MEMBERS BY LINEAR DAMAGE RULE

張 東 一*・三 木 千 寿**・西 村 俊 夫***

By Dong Il CHANG Chitoshi MIKI and Toshio NISHIMURA

1. 序 説

(1) 鋼構造物の疲れ寿命予測の必要性

鋼橋など変動外力を受ける鋼構造物には、使用年数の増加につれ構造の各部に疲れに起因する諸変状が生じてくるおそれがある。特に、近年は交通量の飛躍的増加や設計応力と作用応力の接近あるいは高強度鋼を使用した溶接構造の採用など、土木構造物にとっては疲れ破壊に対し厳しい条件になりつつあり、事実、鋼構造物の疲れ破壊あるいは疲れきれつ進展後、脆性破壊を生じた事例がわが国および諸外国で折々に報告されている^{1)・2)}。

数十年間にわたり使用される鋼橋に、また、疲れ現象にまだ知識が不十分であった時代に建設されたものに、疲れ変状が発生することはある程度やむを得ないが、これら構造物の安全を確保するためには検査を適切に実施して、変状を早期に発見し、その対策を速やかに構ることが必要である。しかし、多数の鋼構造物に対し、しかも各構造物は、多種多様な構造要素から構成され、また、常時車両が走行しているなど、この点検作業はかなり困難な場合が多い。したがって、検査を合理的に実施するためには変状発生のおそれがある箇所および時期に重点的に作業を行う必要がある。このため、各種構造部分に対し変状発生の時期を予測することが望まれるが、これら橋梁は過去長期にわたり使用し続けられ、その間、載荷条件は時代とともに変遷し、また、構造の各部は次第に老朽し、これらを考慮して疲れ寿命の予測を行うことは困難な問題である。

橋梁の維持管理などの必要から、わが国鋼鉄道橋で採

用されている疲れ被害の評価法は^{3)・4)}、定応力下での疲れ破断寿命に対する標準的応力繰返し数線図 ($S-N$ 線) を定め、この $S-N$ 線を使用し、過去ならびに現在の走行荷重による慣行計算応力と列車回数に基づき修正 Miner 則あるいは Corten-Dolan の方法を適用して疲れ被害 (基準荷重に対する換算繰返し数) を算定し、基準荷重による計算応力値との関係でその安全性を判定しようとするものである。この方法は鋼橋の疲れ被害を推定する一つの有力な試みであるが、なお若干の問題点を含み、そのおもなものは、i) 疲れ破断寿命を基準として疲れ被害則を適用していること。ii) 重連運転および電車専用区間を除き慣行計算応力が 1 列車 1 回作用するとしていることである。i) については近年の疲れ寿命に関する研究より破断寿命と被害則との関係を見直す必要があり、ii) については橋梁に作用する実際応力は慣行計算値を一般にかなり下回り、特に動的応力は複雑な性状を示し、また、変動応力が疲れ被害に及ぼす影響が無視されている。これらより、疲れ変状の発生時期には相当の予測誤差が生ずるおそれがあり、鋼構造物の安全性確保のうえから、より適切な寿命予測法の確立が望まれるところである。

(2) 疲れ寿命予測に関する従来の研究

応力を繰返しうける部材の寿命予測のための被害則としては、A. Palmgren, B.F. Langer, 西原⁵⁾, Miner⁶⁾ によって提唱された直線被害則が、その取り扱いが容易で実用的なことによりよく知られている。これは疲れ破壊は式 (1) のごとく累積繰返し数比が 1 になる場合に生ずるとするものである。

$$\sum n_i/N_i=1 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 N_i は疲れ限度以上の応力 (過大応力) に対する疲れ寿命、 n_i はその応力での繰返し数である。この被害則の成否を検討する多数の実験が行われた結果、この仮説は必ずしも成立しないことが報告され^{7)・8)}、各研

* 正会員 工碩 大韓民国 漢陽大学校副教授 工科大
学土木工学科

** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

究者によって種々の修正式が提案されてきた。このうち重要なのは、疲れ限度以下の応力（過小応力）が疲れ寿命に及ぼす影響の取り扱いで、過大応力下で発生した疲れきれつは過小応力によっても進展するから、寿命予測にこのことを反映する必要がある。Corten-Dolan⁹⁾ は定応力に対する $S-N$ 線を疲れ限度以下まで伸ばすとともに、その勾配を急にして適用することに帰する方法を発表し、勾配修正について論議を行っている¹⁰⁾。 $S-N$ 線を単に疲れ限度以下まで延長して適用するいわゆる修正 Miner 則¹¹⁾も使用され、また、延長部分のみ勾配を急にする川田らの提案¹²⁾もある。

以上に述べた諸研究ではきれつの発生寿命と進展寿命を必ずしも明確に区別していないが、疲れ寿命の予測精度を向上するため両者をわけて取り扱うことが考えられ、Grover¹³⁾ はそれぞれの寿命に対して直線被害則を適用し、Manson¹⁴⁾ らは Double Linear 則を適用し、これより求めた有効きれつ発生寿命に対して $S-N$ 線を作成し寿命推定を行っている。中沢ら¹⁵⁾ は S25C 砂時計型試験片の二段二重、三段三重回転曲げ実験から、きれつ発生寿命は直線被害則による予測値にほぼ一致するとの結果を示し、また、青木・国尾・中村ら^{16), 17)} も S15C, S40C 切欠き試験片の多段多重および応力振幅を正弦波状に変化させる回転曲げ実験より、西谷¹⁸⁾ らは浅い切欠きをもつ S20C 材の二段二重回転曲げ実験から同様の結論を導いている。

一方、疲れ被害則を適用して寿命計算を行う場合、作用応力の頻度解析法として伊藤¹⁹⁾ は振幅範囲計数法によるのが適当であるとし、また、Corten¹⁰⁾、Hofmeister²⁰⁾ の平均応力の影響を考慮して頻度分布を定めた研究もある。また、応力頻度曲線に基づくプログラム実験により疲れ寿命を求める研究も盛んに行われているが、河本²¹⁾ らは応力の頻度解析法、1 応力ブロックの繰返し数その他各種因子が実験結果に影響するとし、砂本ら²²⁾ はこれら影響の補正方法について述べている。また Naumann²³⁾、Illg²⁴⁾ らの応力順序についての研究、田中²⁵⁾ らのプログラム実験による寿命推定の是非に関する研究など各種試験条件下の成果が報告されているが、これらの場合の疲れ寿命はいずれもきれつ発生を対象としたものではない。

(3) 本研究の範囲

鋼橋などの鋼部材では軸方向またはこれに準ずる応力が支配的で、かつ構造物の自重などによる死荷重応力が最小応力として常時作用し、構造物上を車両が走行すれば活荷重応力などが加算されて最大応力に達する。また、鋼部材およびその連結部は断面構成上各種の切欠きをもつ

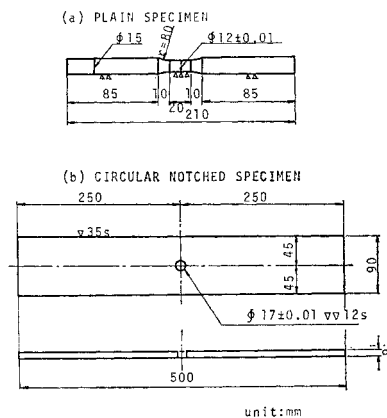
構造となっている。このような応力、構造条件に対し近年の疲れ寿命に関する研究は機械構造用炭素鋼の主として回転曲げ応力状態について行われており、使用試験片も円形断面の砂時計型あるいは環状切欠き系のものが多い。本研究ではこれらのことがらに留意し、鋼部材に多用される 40 キロ級構造用鋼材で製作した平滑試験片と切欠き試験片を選定し、前者には回転曲げ応力を、後者には最小応力をもつ軸応力を採用し、次の各項目につき主として実験的に究明を進めた。i) 定応力が作用する場合の疲れきれつ発生性状ならびにきれつ発生、破断寿命に対する $S-N$ 線。ii) 応力履歴の影響が最も顕著にあらわれると考えられる二段二重応力が作用する場合の寿命予測。iii) 変動応力下の寿命予測と寿命予測精度を補うためのプログラム応力実験。

これらについての検討より鋼部材の疲れ寿命予測は寿命基準を破断よりきれつ発生にとったほうが一般に精度のよくなることを明らかにしたものである。

2. 疲れ寿命実験の方法

(1) 使用試験片と試験装置

回転曲げ応力による疲れ実験には、図一1 (a) に示す円形断面の平滑試験片を使用した。本試験片は JIS 規格²⁶⁾による回転曲げ疲れ試験片 (1号) の平行部 (φ12 mm) 長さを 20 mm に短縮しているが、これはきれつ発生に対する監視範囲をせざるためである。試験片は



図一1 疲れ試験片の形状と寸法

表一 使用鋼材の化学成分と機械的性質

試験片	材質規格	化学 成分 (%)					機 械 的 性 質		
		C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm ²)	引張強 (kg/mm ²)	伸び (%)
平滑 切欠き	SS 41	0.16	0.22	0.49	0.011	0.022	30	45	33
	SM 41 A	0.19	0.02	0.73	0.011	0.016	30~32	42	32

表一に示す化学成分と機械的性質をもつ $\phi 19$ mm 圧延丸棒鋼から製作し、また材料の圧延時残留応力を除去し、かつ内外層を均質化するため焼なまし処理を行った。すなわち、試験片各部の直径を所定寸法に対し +1mm で一次加工し、これを電気炉中で 600°C に1時間保持したのち、炉中で徐冷した²⁷⁾。焼なまし後、試験片は所定寸法に切削ならびに研削加工を行ったが、機械加工による残留応力の再発を軽減するため1回削り代を極力減らし入念に仕上げた。さらに平行部は研磨し、特に最終仕上げは軸方向に研磨してき裂発生を容易にするようにした。

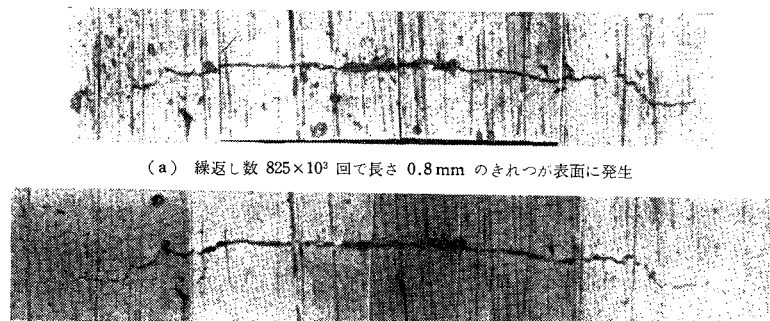
軸応力による疲れ実験には、図一(b)に示す平板型円孔切欠き試験片を使用した。切欠き試験片に各種型式のものを使用することは望ましいが、疲れに対する性状はある程度準ずるものと考え、また、基礎的実験でもあるので切欠き材を代表するものとして、リベットあるいはボルト構造に一般的に用いられる上記型式を採用した。試験片は表一に示す厚さ9mmの圧延鋼板から製作した。試験片中の残留応力がき裂発生にある程度影響することが考えられたが、応力集中の大きい切欠き材でもあり、鋼部材の実情にあわすこととして、本試験片については焼なまし処理を行わなかった。試験片表面の黒皮は微小き裂の発見に便なるよう、また、黒皮剝離などによる実験結果のばらつきを防ぐため、切欠き部付近の黒皮を研磨紙で除去した。

定応力振幅、二段二重およびプログラム応力による回転曲げ実験には小野式回転曲げ疲れ試験機(3000回/分)を使用し、作用応力の切換えは試験機の運転中に荷重用重錘を増減させることにより行った。また、(3), c)で述べる方形および三角二次波をもつ回転曲げ応力による実験には、本試験機の重錘載荷部にサーボ機構で駆動される変動荷重負荷装置²⁸⁾を取り付けたものを使用した。定応力および二段二重応力による軸引張実験には、電気油圧式万能型疲れ試験機(動的容量 ± 50 t, 荷重制御方式)を使用した。

(2) 疲れき裂の観測

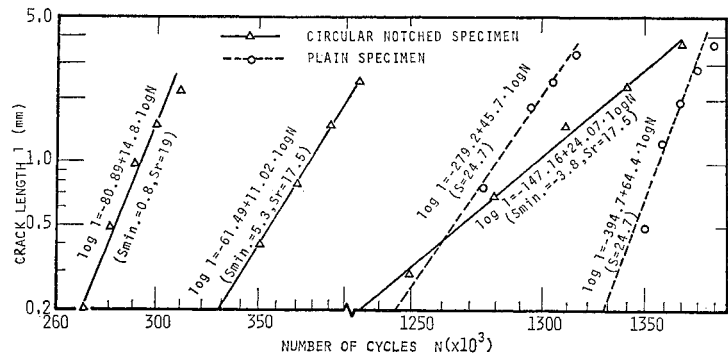
試験片のき裂発生に着目して疲れ寿命を考える場合、どの程度のき裂を基準とすべきかは議論

の存するところである。応力繰返しに伴い生ずるすべり帯中の微視的ポイドは、成長結合し、やがて微小き裂となり、これが伝播拡大してゆくのが疲れ損傷の過程であるが、結晶粒を貫通するすべり線発生時¹⁵⁾、き裂つ長さ0mm時^{16), 17)}、表面き裂つ長さ0.1mm時¹⁸⁾など、研究者によりいろいろの取り方が示されている。本研究では巨視的き裂つが試験片表面にあらわれるのを極力早期にとらえることとし、かつ、き裂の進展状態を測定して、これより所定寸法のき裂発生寿命を推定することとした。なお、微小き裂の測定には、切欠き試験片に対し顕微鏡による試験片表面の観測¹⁶⁾、所定回数繰返し後軸方向に試験片を切断し^{16), 29)}、あるいはき裂つを加熱着色した後その疲れ破面よりき裂つ深さを測定する¹⁷⁾などいろいろ試みられているが、本実験では従来あまり試みられていない平滑試験片の微小き裂測定も対象とするため、表面レプリカ法を採用することにした³⁰⁾。すなわち、試験片のうける繰返し数がき裂発生予想回数に近づいた時、寿命の長短に応じあらかじめ定めた繰返し数ごとに試験機の稼働を停止し、試験片に静荷重をかけたままの状態でき裂発生が予想される部分からレプリカを採取し、これを顕微鏡で拡大観察しき裂の有無を点検した。このようにして微小き裂の発見に努めるとともに、き裂発生をみたものは以後の進展状態を前



写真一 平滑試験片の疲れき裂
(a) 繰返し数 825×10^3 回で長さ 0.8 mm のき裂が表面に発生
(b) さらに 5×10^3 回後にこのき裂は長さ 1.0 mm に成長した
(二段二重回転曲げ応力, $S_1=27.1$ kg/mm², $n_1=68 \times 10^3$, $S_2=24.7$ kg/mm²)

写真一 平滑試験片の疲れき裂



図二 試験片表面のき裂つ長と繰返し数との関係

と同じ間隔で引続き測定した。

切欠き試験片では最初のきれつ発生が円孔中心を含み軸と直角断面付近の孔壁かつ板厚中間部に局限されるため上述の方法で目的が達成されたが、平滑試験片ではきれつ発生予想部分がかかなり広範囲にわたるため、最初のきれつ発見はルーベ（8倍）による試験片表面の入念な点検を併用せざるをえなかった。しかし、この方法でも作業の習熟に伴い、きれつ長 0.5 mm 程度のものの発見は可能であった。写真-1 はこのレプリカ法により転写されたきれつの顕微鏡写真の一例である。

かくして測定された疲れきれつは切欠き試験片で一般に長さ 0.5~1.0 mm 前後以上のもので、長さ 0.2~0.3 mm のきれつ測定は比較的応力のもので成功した。これは低応力時のきれつは微細な反面、進展速度が遅いの助けられている。いま、0.2~0.3 mm のきれつ長まで測定しえたものについて、試験片表面のきれつ長 l と繰返し数 N を両対数でプロットすると両者の関係は図-2のごとく、きれつ長 4 mm 程度までは線形とみなしても誤差はそれほど生じないことが確かめられた。また、同図には平滑試験片についての l と N との関係もあわせて示した。なお、Liu³¹⁾ はアルミ合金板についての実験結果から l のある範囲で $\log l$ と N が直線関係になると述べているが、両者の関係は試験片や作用応力の性質などにも影響されるものと考えられる。

本研究におけるきれつ発生寿命の検討には各実験から求めた l, N の関係を式 (2) で回帰解析し、係数 α, β を最小二乗法により決定し、それよりその前後の実測値が得られている $l=0.5$ mm に対応する寿命を算出しておもに使用した。

$$l = e^{\alpha} N^{\beta} \dots\dots\dots (2)$$

また、極力微小きれつを取り上げる必要があるものと考え、 $l=0.2$ mm 時の寿命も求めたが、この値はほとんど実測されておらず、また、微小きれつの進展過程が単純に式 (2) であわせないこと¹⁷⁾も考えられるので参考値として考慮することとした。

(3) 各実験の趣旨と設定応力

a) 定応力疲れ実験

本実験では定応力振幅回転曲げ応力および最小応力をもつ定応力範囲軸応力が作用する場合の疲れきれつの発生進展性状を調べ、また、きれつ発生および破断寿命に対しそれぞれ $S-N$ 線（以下基本 $S-N$ 線と称する）を設定することを目的とする。設定応力は回転曲げ応力実験では疲れ限度以上、降伏点以下の応力振幅とし、相隣る二応力

段階の比は 1.02 とした。軸応力実験では部分片振りおよび部分両振り応力状態とし、最小応力は純断面での呼び応力で 5.3, 0.8, -3.8, -8.4 kg/mm² の 4 種類とし、応力範囲は引張側に疲れ限度以上、16~28.2 kg/mm² とした。試験片の形状係数が 2.54³²⁾ より最大応力が呼び応力で約 13 kg/mm² をこえると孔壁の一部は降伏することになる。応力波形は正弦波、載荷速度は 600 回/分とした。

b) 二段二重応力疲れ実験

従来の直線被害則に関する研究では疲れ破断を基準にその寿命を考えるものが多かったが、きれつ発生以前と以後とでは試験片の応力性状が異なることに留意し、本実験では a) で得られた結果を用い直線被害則をきれつ発生および破断寿命について適用する場合の寿命予測の是非について検討した。設定応力は図-3 (a), (b) に示すごとく回転曲げ応力実験では 1.12 S_0 , 1.02 S_0 (S_0

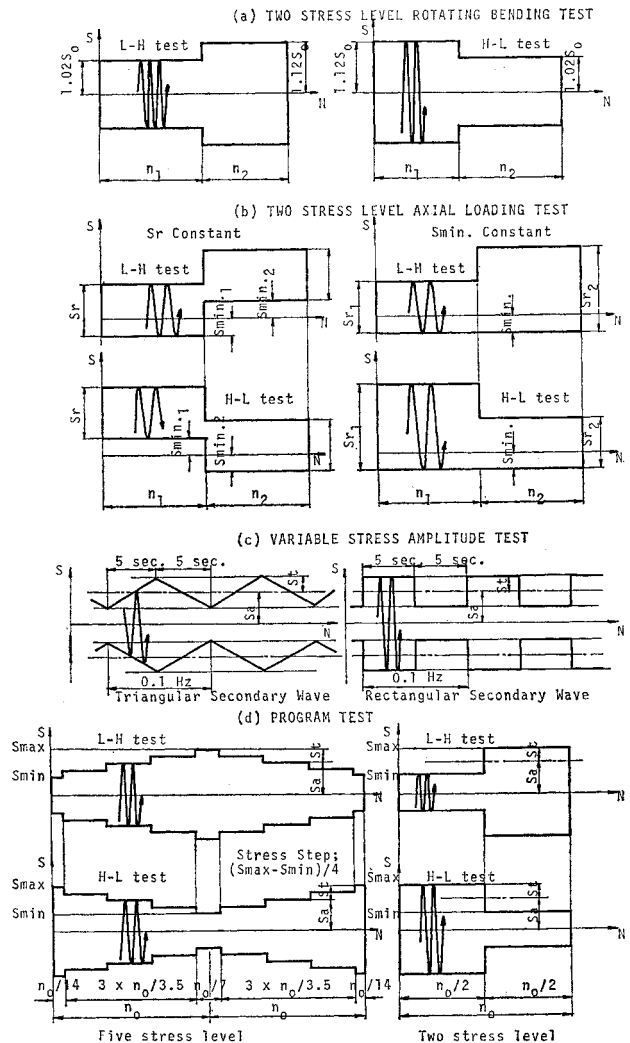


図-3 設定応力パターンの種類

は疲れ限度で 24.2 kg/mm^2 なる 高低二応力振幅とし、応力履歴の影響を求めめるため一次応力を低応力とする L-H 試験と二次応力を低応力とする H-L 試験を実施した。また、軸応力実験では一定応力範囲 S_r を使用するものと一定最小応力 S_{\min} を使用するものの 2 種類とし、両実験とも同じ応力状態の組み合わせで $S_{\min 1} < S_{\min 2}$ あるいは $S_{r 1} < S_{r 2}$ なる L-H 試験と、 $S_{\min 1} > S_{\min 2}$ あるいは $S_{r 1} > S_{r 2}$ なる H-L 試験を実施した。ここに、一次応力の繰返し数 n_1 は回転曲げ応力実験の場合、当該一次応力に対する 0.5 mm きれつ発生寿命の $40 \sim 90\%$ の範囲に、また、軸応力実験の場合同じく $25, 50, 75\%$ 付近に適宜選定した。

c) プログラム応力疲れ実験

二段二重応力が作用する場合の寿命予測は b) よりきれつ発生について考えればかなり精度よく行えることが明らかになったが、この成果をさらに複雑な変動応力 (図-3 (c) に示す方形および三角二次波をもつ回転曲げ応力が重複繰返されるもの) に適用した場合は条件により誤差が大きくなることが示された。この予測誤差を圧縮するための一方策として、本研究ではこの変動応力と応力頻度分布が同一となるようなプログラム応力を設定して疲れ実験を行い、変動応力の寿命を再現すべき応力ブロックの重複回数や疲れ寿命に及ぼす高低初応力の影響などについて検討した。

図-3 (c) に示す変動応力の二次波の振幅は $S_2=1.2, 2.4 \text{ kg/mm}^2$ の 2 種類とし、最大応力は材料の降伏点以下、最小応力は過大、過小応力領域とした。また、二次波の周波数は予備実験の結果など^{33), 17)} から、その大小が疲れ寿命に及ぼす影響はあまり認められないので 0.1 Hz の 1 種類のみとした。なお、このような変動応力は実際鋼部材に作用する応力とはかなり異なっているが、基礎的な検討でもあり、また、プログラム化の容易明かさなどの点から採用したものである。

プログラム応力は 図-3 (d) に示すごとく、方形二次波をもつ回転曲げ応力は二段多重系応力に、三角二次波をもつ回転曲げ応力は近似的に五段多重系応力にプロ

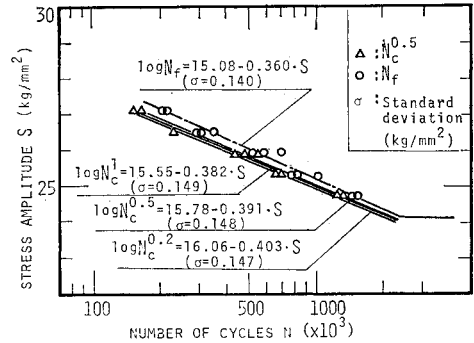


図-4 基本 $S-N_c$ 線および $S-N_f$ 線 (平滑試験片)

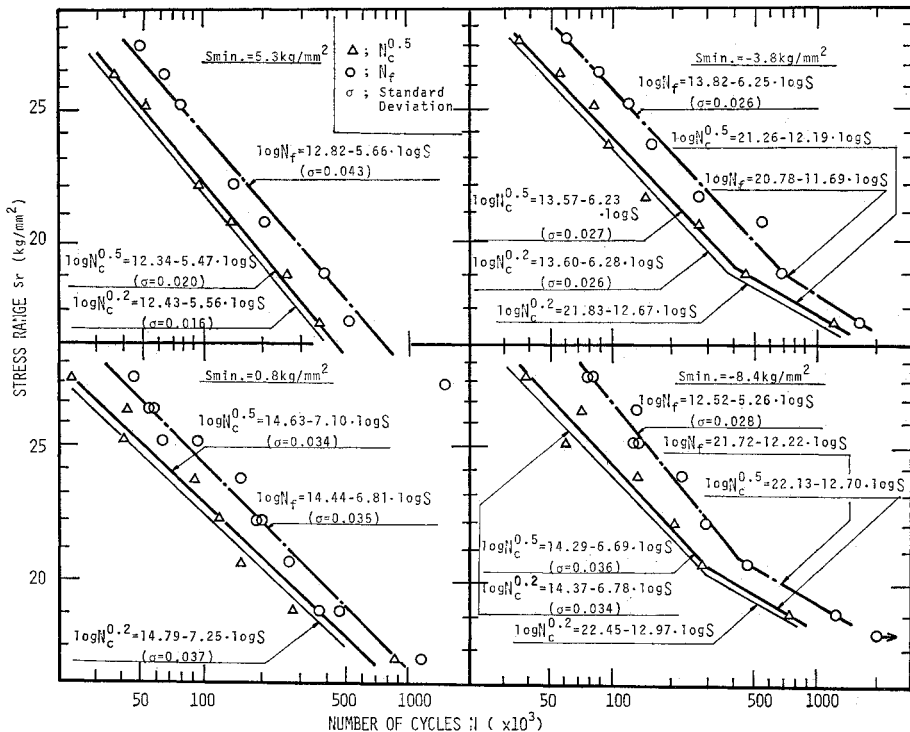


図-5 基本 $S-N_c$ 線および $S-N_f$ 線 (切欠き試験片)

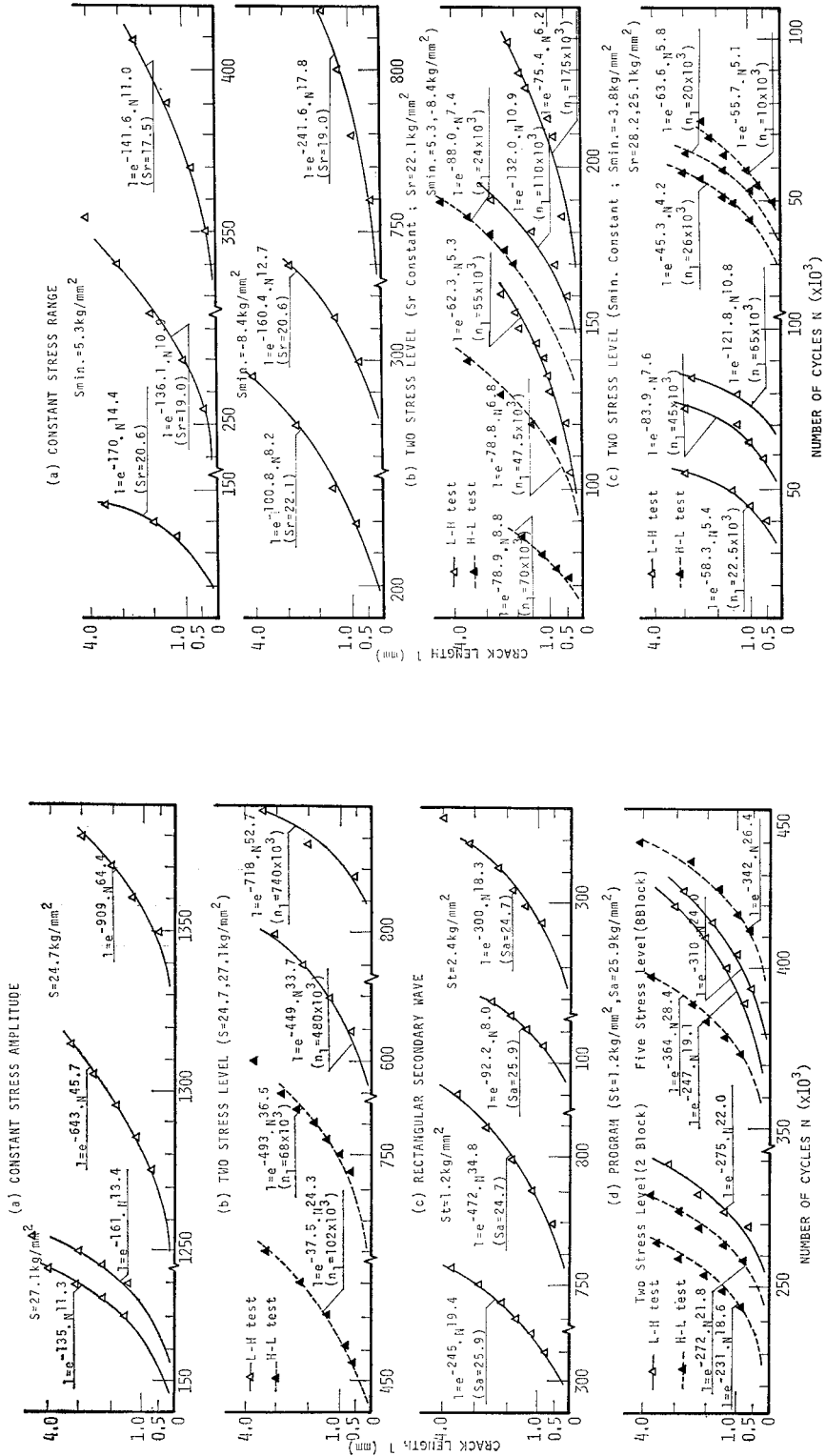


図-6 平滑試験片表面のきれつ長測定結果ときれつ進展曲線

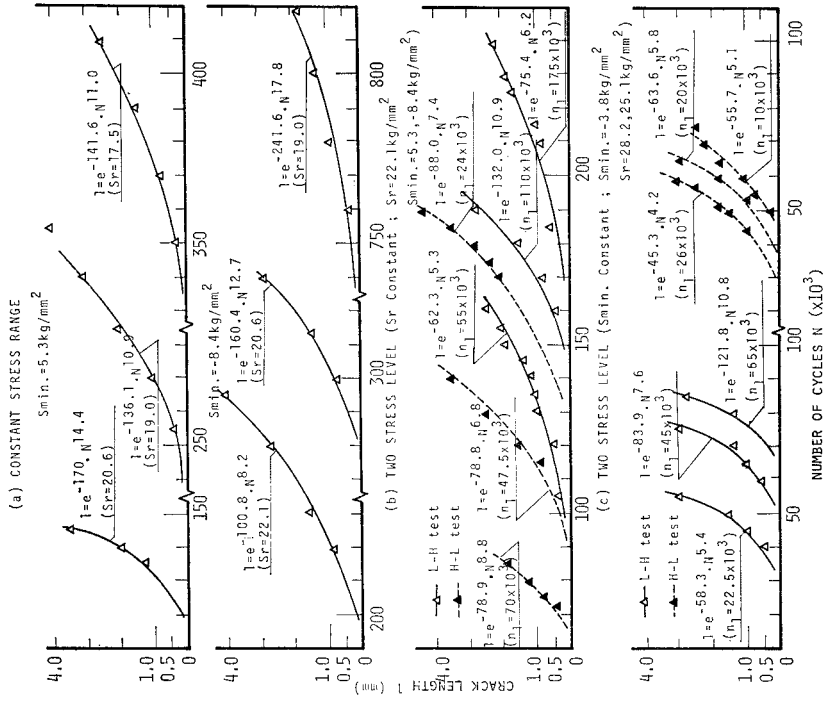


図-7 切欠き試験片孔壁のきれつ長測定結果ときれつ進展曲線

グラム化し、両プログラム応力とも $S_a=25.9 \text{ kg/mm}^2$, $S_t=1.2 \text{ kg/mm}^2$ と $S_a=24.7 \text{ kg/mm}^2$, $S_t=2.4 \text{ kg/mm}^2$ の2種類とした。1応力ブロックにおける一次波の繰返し数 n_0 は直線被害則で計算した対象変動応力下での 0.5 mm きれつ発生寿命概算値を 1, 2, 4 および 8 で除したものとした。なお、設定ブロック数で試験片が破壊しなかった場合は引続き同じプログラム応力を繰返すこととした。また、実験は S_{\min} から始まる L-H 試験と S_{\max} から始まる H-L 試験を行った。

3. 基本 $S-N$ 線の性状

(1) 疲れ寿命の測定と基本 $S-N$ 線の設定

図-4 は横軸に応力繰返し数 N を対数目盛で、縦軸に応力振幅 S を等間隔目盛でとり、定応力振幅回転曲げ応力による平滑試験片のきれつ発生寿命 N_c 、破断寿命 N_f をプロットし、これらに対し最小二乗法により $S-N_c$ 線および $S-N_f$ 線を求めたものである。また、図-5 は同様にして求めた定応力範囲軸応力による切欠き試験片の最小応力 S_{\min} ごとの $S-N$ 線であるが、縦軸には純断面あたりの呼び応力で示した応力範囲 S_r を対数目盛でとっている。この場合 N_c については 2.(2) より試験片表面のきれつ長が 0.2, 0.5 および 1.0 mm (軸応力の場合を除く) に到達したときのものとするため、図-6 (a), 7 (a) に一例を示すごとく、各実験ごとのきれつ長測定結果と式 (2) からきれつ進展曲線を定め、これより $N_c^{0.2}$, $N_c^{0.5}$ および N_c^1 を計算している。

図-4 で縦軸の S を等間隔目盛にとったのは対数目盛でとるより計算 $S-N$ 線の分散値が小さく直線性がよいからである。また、図-5 において $S_{\min}=-3.8, -8.4 \text{ kg/mm}^2$ の場合の $S-N$ 線は折線形としたが、これは試験片孔壁に貼付したひずみゲージ (ゲージ長 0.2 mm) により把握した繰返しひずみの性状が、 S_r の増大とともに $S-N$ 線の折点付近から弾性的なものから塑性的なものへ変化し始めることを考慮したものである。

(2) N_c と N_f の関係

図-4, 5 中に示した $S-N$ 線式より平滑試験片では $S-N_c$ 線は $S-N_f$ 線より緩勾配となり、また、 $S-N_c^1$, $S-N_c^{0.5}$, $S-N_c^{0.2}$ の順に勾配が緩になっている。また、切欠き試験片では、 $S-N_c$ 線は $S-N_f$ 線に比しやや緩勾配か、あるいは両者ほぼ平行となっている。しかし、 $S_{\min}=-3.8, -8.4 \text{ kg/mm}^2$ に対する折線形 $S-N$ 線の下側部分については平滑試験片の場合と同傾向で、すなわち、弾性的ひずみが繰返される場合はこのような性状を表わすものと考えられる。

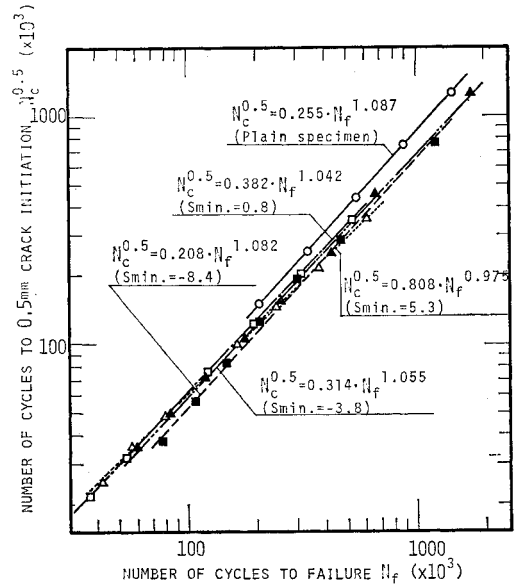


図-8 試験片の N_f と $N_c^{0.5}$ の関係

図-8 は横軸に N_f 、縦軸に $N_c^{0.5}$ をともに対数目盛でとり、平滑および切欠き試験片について基本 $S-N$ 線から求めた両者の関係を示したものである。 $N_c^{0.5}/N_f$ は平滑試験片および切欠き試験片で最大応力 S_{\max} が比較的低い場合 (約 17 kg/mm^2 程度以下) に寿命の増大とともに増加し、 S_{\max} がそれ以上ではあまり変わらない。かつ、その値は本実験範囲では平滑試験片で $0.74 \rightarrow 0.88$ (疲れ限度に近い場合) となり、この傾向は Schijve³⁴⁾ のアルミ合金板についての実験でも示されている。また、切欠き試験片では一般に 0.6 前後、 S_{\max} の低下とともに 0.7 程度の値となっている。Klima³⁵⁾ は環状V切欠き試験片の両振り軸応力実験からもっと微小なきれつはさらに早い時点から発生すると述べており、これらより切欠き試験片の N_c/N_f は切欠きの鋭さにもよるが平滑試験片の場合より相当小さいものとなる。

4. 二段二重応力に対する疲れ寿命予測

(1) 累積繰返し数比の性状

二段二重回転曲げ応力実験で求めたきれつ発生寿命 N_c 、破断寿命 N_f を表-2 に、また、軸応力による一定応力範囲、一定最小応力各実験で求めた N_c , N_f を表-3, 4 に示す。きれつ発生については、きれつ長 $0.2, 0.5$ および 1.0 mm (軸応力の場合を除く) に応対する寿命を考慮し、寿命推定に使用したきれつ進展曲線および各測点との関係の一例を 図-6 (b), 7 (b), (c) に

示す。

表一2~4 に示された 寿命測定値と基本 S-N 線の方

表一2 二段二重回転曲げ応力による疲れ寿命 (平滑試験片)

種別	S ₁ (kg/mm ²)	S ₂ (kg/mm ²)	n ₁ (10 ³)	疲れ寿命 (10 ³)			
				N _c ^{0.2}	N _c ^{0.5}	N _c ¹	N _f
L H 試験	24.7 (1.02 S ₀)	27.1 (1.12 S ₀)	480	588	604	617	685
			500	605	624	639	712
			640	699	722	741	818
			740	814	824	831	903
			850	887	911	930	1011
900	937	955	969	1041			
H L 試験	27.1 (1.12 S ₀)	24.7 (1.02 S ₀)	68	760	777	790	850
			102	482	498	511	598
			140	210	231	249	301

(注) H-L 試験各 n₁ ことの寿命測定値は、2 実験値の平均を示す。

程式とから、式 (3),(4) よりきれつ発生および破断寿命について累積繰返し数比を算定したものを 図一9 および 表一3, 4 の右側欄に示す。

$$\sum n/N_c = n_1/N_{c1} + n_2/N_{c2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\sum n/N_f = n_1/N_{f1} + n_2'/N_{f2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、n₁：一次応力の繰返し数

n₂, n_{2'}：一次応力を二次応力に切替えたのち、所定寸法のきれつ発生繰返し数および破断までの繰返し数

N_{c1}, N_{f1}：基本 S-N_c, S-N_f 線から求めた一次応力に対する所定寸法きれつ発生寿命および破断寿命

N_{c2}, N_{f2}：上と同様に二次応力に対するもの

図一9 は横軸に $\sum n/N$, 縦軸に n₁ をとり、表一2 に

表一3 二段二重軸応力 (一定応力範囲) による疲れ寿命と累積繰返し数比 (切欠き試験片)

S _r (kg/mm ²)	試験種別	S _{min 1} (kg/mm ²)	S _{min 2} (kg/mm ²)	n ₁ (10 ³)	疲れ寿命 (10 ³)			累積繰返し数比		
					N _c ^{0.2}	N _c ^{0.5}	N _f	$\sum n/N_c^{0.2}$	$\sum n/N_c^{0.5}$	$\sum n/N_f$
28.2	L-H	-8.4	0.8	30	31	36	63	0.96	1.04	1.28
	H-L	0.8	-8.4	15	24	28	53	1.07	1.02	0.89
26.6	L-H	-8.4	0.8	42.5	44	52	90	0.91	1.05	1.29
	H-L	0.8	-8.4	20	38	42	67	1.08	1.01	0.81
25.1	L-H	-8.4	0.8	25	54	65	134	1.02	1.00	1.53
				50	62	69	119	0.97	0.99	1.20
				60	60	65	118	1.08	1.13	1.21
	H-L	0.8	-8.4	15	45	51	99	0.76	0.75	0.75
				27.5	48	52	86	0.92	0.86	0.74
				40	46	51	77	1.01	0.96	0.75
22.1	L-H	-8.4	5.3	55	100	119	199	0.81	0.93	1.06
				110	150	163	244	1.07	1.11	1.18
				175	162	188	274	1.00	1.06	1.18
	H-L	5.3	-8.4	24	116	134	231	0.79	0.83	0.83
				47.5	93	106	191	0.78	0.80	0.76
				70	66	73	139	0.78	0.71	0.65

表一4 二段二重軸応力 (一定最小応力) による疲れ寿命と累積繰返し数比 (切欠き試験片)

S _{min} (kg/mm ²)	試験種別	S _{r1} (kg/mm ²)	S _{r2} (kg/mm ²)	n ₁ (10 ³)	疲れ寿命 (10 ³)			累積繰返し数比		
					N _c ^{0.2}	N _c ^{0.5}	N _f	$\sum n/N_c^{0.2}$	$\sum n/N_c^{0.5}$	$\sum n/N_f$
0.8	L-H	25.1	28.2	27.5	36	40	64	1.09	1.15	1.33
	H-L	28.2	25.1	15	29	36	64	1.12	1.11	1.01
-3.8	L-H	25.1	28.2	22.5	34	40	72	0.72	0.81	1.03
				45	53	60	94	0.96	0.99	1.21
				65	67	73	99	1.07	1.13	1.19
	H-L	28.2	25.1	10	44	52	95	0.85	0.87	0.88
				20	41	48	87	0.97	0.95	0.90
				26	31	39	74	0.96	0.92	0.84
-8.4	L-H	19.0	28.2	180	203	210	258	0.94	1.07	1.14
				380	399	405	452	1.09	1.13	1.24
				480	488	494	547	0.90	0.98	1.24
	H-L	28.2	19.0	15	377	435	655	0.95	0.92	0.72
				30	208	240	555	1.15	1.03	0.81
				33	156	170	489	1.16	1.01	0.79

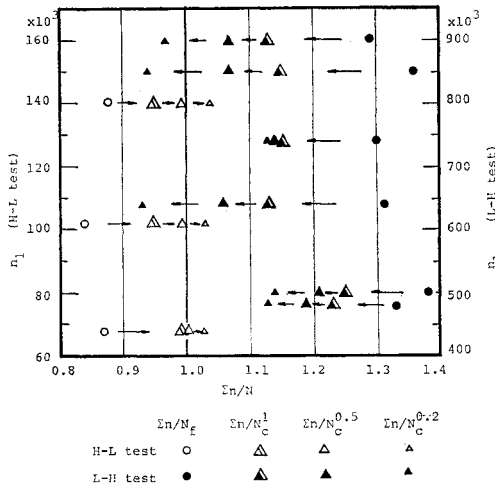


図-9 破断寿命およびき裂発生寿命についての累積繰返し数比 (二段二重回転曲げ応力)

示す各実験ごとの $\Sigma n/N_c$, $\Sigma n/N_f$ をプロットしたものである。 $\Sigma n/N_f$ は従来からよく知られるごとく⁸⁾, L-H 試験で $\Sigma n/N_f > 1$, H-L 試験で $\Sigma n/N_f < 1$ となっている。これに対し $\Sigma n/N_c$ は基準とするき裂つ長を 1.0, 0.5, 0.2 mm と小とするに従い, L-H 試験で $\Sigma n/N_f$ より 1 側へ順次小さくなり ($\Sigma n/N_c^{0.2}$ は 1 より小となるものもある), H-L 試験で $\Sigma n/N_f$ より 1 側へ順次大きくなる ($\Sigma n/N_c^{0.2}$ は 1 をわずかに超過した)。このように L-H, H-L 試験における $\Sigma n/N_c$ は基準き裂つ長を小にとるに従い 1 に対し両側から接近し

てゆく性状が明らかとなったが, このことは回転曲げ応力のみならず表-3, 4 に示すごとく軸応力が作用する場合の $\Sigma n/N$ についてもまったく同様である。また, 同表より破断寿命および 0.5, 0.2 mm き裂つ発生寿命ごとに求めた $\Sigma n/N$ を, 一次応力の繰返し数比 n_1/N_1 との関係で示したのが図-10 であるが, 実験値のばらつきもあり, 両者間にあまりはっきりした関係は認められなかった。いま, 基準き裂つ長の相違による $\Sigma n/N$ の増減傾向を求めるため, 各対象寿命ごとに $\Sigma n/N$ の単純平均と, その標準偏差を L-H, H-L 試験ごとにとってみる。 $\Sigma n/N$ の平均値は図中に示すごとく, L-H 試験では $\Sigma n/N_f \rightarrow \Sigma n/N_c^{0.5} \rightarrow \Sigma n/N_c^{0.2}$ の順序に減少し, H-L 試験ではこれと同じ順序に増加している。L-H, H-L 試験における各平均値が互いに一番接近しているのは, き裂つ長 0.2 mm に対するものでその値も 1 にごく近く, この場合は応力履歴の影響がほとんど認められなくなっている。標準偏差については L-H, H-L 試験とも一般に $\Sigma n/N_c^{0.5} \rightarrow \Sigma n/N_c^{0.2}$ の順序に増大し, 微小き裂つ測定に誤差がはしやすいことを示している。

0.2 mm あるいはそれ以下の微小き裂つを正確に測定することができれば標準偏差が減少し, き裂つ発生寿命を直線被害則によりかなり精度よく予測することが可能であると考えられる。なお, 0.5 mm き裂つを基準としても予測精度がそれほどおちることはなく, また, 少なくとも破断を基準とする寿命予測より優れていることは明らかであろう。

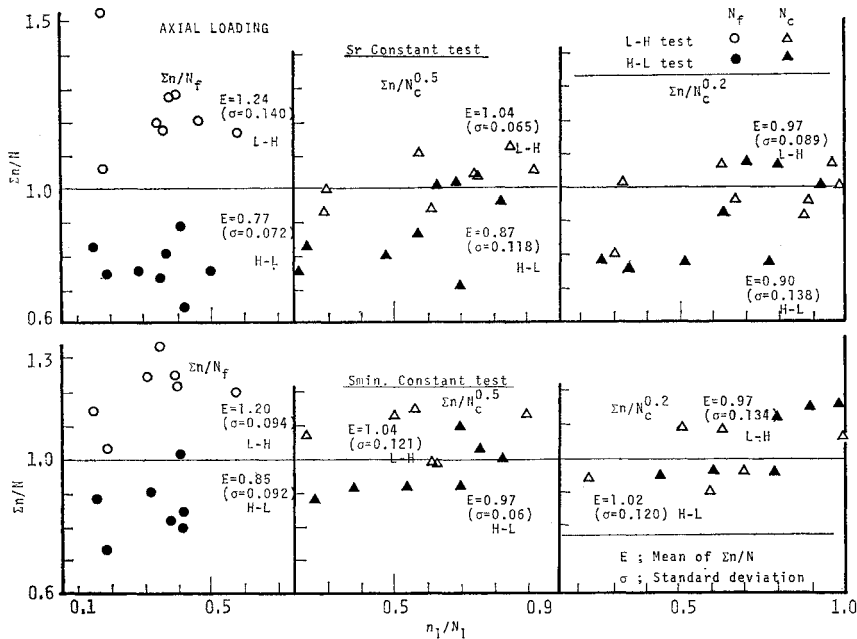


図-10 一次応力の繰返し数比と累積繰返し数比 (二段二重軸応力)

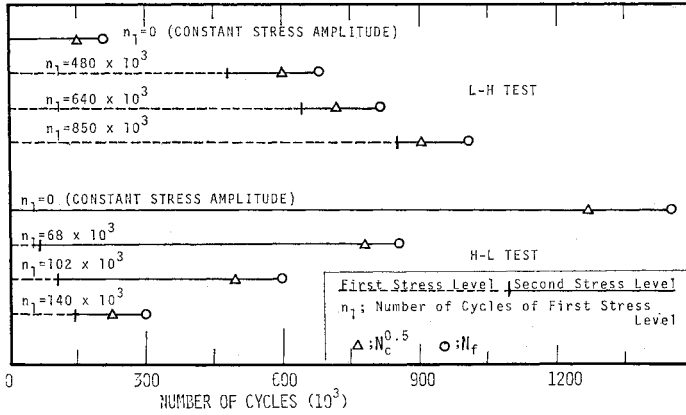


図-11 一次応力の繰返し数と疲れ寿命 (二段二重回転曲げ, $S=24.7, 27.1 \text{ kg/mm}^2$)

(2) 一次応力の繰返しと疲れ寿命

一次応力の繰返し数 n_1 が 0.5 mm きれつ発生寿命 $N_c^{0.5}$ および破断寿命 N_f に及ぼす影響を求めため、両者の関係の一例を 図-11 に示したが、回転曲げ応力と軸応力とにかかわらず、一般に以下の傾向を示している。すなわち、一次応力を二次応力に切換えてからきれつ長が 0.5 mm になるまでの繰返し数 $[N_c^{0.5} - n_1]$ は、一次応力の影響を受け、最初から二次応力のみによる場合 ($n_1=0$) の $N_c^{0.5}$ より減少し、かつ n_1 が大になるほど減少する程度が大きく、また、この傾向は H-L 試験で顕著で、このことは H 試験時材料の損傷が進めば L 試験でもそれが急進することを示している。また、 0.5 mm きれつが発生してから破断に至るまでのきれつ進展寿命 $[N_f - N_c^{0.5}]$ は、二次応力のみによる場合のきれつ進展寿命に比し、L-H 試験ではやや大きく、H-L 試験ではかなり小となっている。なお、 n_1 の多少によるきれつ進展寿命の相違はあまり認められず、すなわち、ひとたびきれつが発生すれば以後のきれつ進展寿命は n_1 の多少にはあまり影響されないものと考えられる。

これらの結果から、一次応力を二次応力に切換えてから破断までの繰返し数 $[N_f - n_1]$ と、二次応力のみによる場合の N_f との関係は、前者の方が小ではあるが n_1 の増加とともに H-L 試験では両者の差は急速に拡大

し、L-H 試験ではあまり差が生じていない。これより、 n_1/N_f は二次応力に対するものが L-H 試験では大きく、 n_1 の小なる場合は 1 に近いものがあり、また、H-L 試験では小さく、 n_1 の増大につれ急速に減少するなど、従来から知られる L-H 試験で $\sum n_1/N_f > 1$ 、H-L 試験で $\sum n_1/N_f < 1$ となる関係の主要因と考えられる(ただし、きれつ発生前に二次応力が作用)。これに対し n_1/N_c は二次応力に対するものが L-H 試験では破断寿命の場合に比し相当小さく、H-L 試験ではそれを下回る程度のものとなっている。

5. プログラム応力による疲れ寿命

(1) 二次波をもつ回転曲げ応力による疲れ寿命

a) 疲れ寿命の計算

図-3 (c) に示す方形および三角二次波をもつ回転曲げ応力が作用する場合、直線被割則が成立するとすれば、基本 S-N 線式と積算応力頻度分布曲線から後述のごとくその疲れ寿命を計算することができる。この場合、過小応力の取り扱いが問題となるが、疲れ寿命に影響を及ぼす応力として疲れ限度の 80% 以上のものを考慮することとすれば、本実験での最小応力はすべてこ

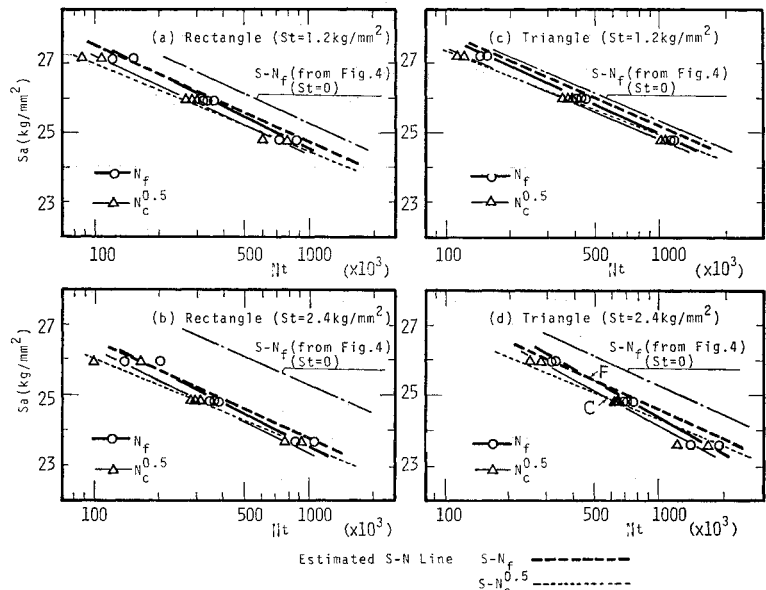


図-12 方形および三角二次波をもつ回転曲げ応力による疲れ寿命の計算値と実験値

れを上回るので、全作用応力に対し式(7)を適用することにする。

いま、積算応力頻度分布曲線(1周期)の応力振幅を S_n 、積算応力頻度数を n とすれば、

$$\text{方形二次波: } S_n = S_a \pm S_t, \quad (n = n_c/2 \text{ 時} \rightarrow -) \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{三角二次波: } S_n = S_a + S_t - 2 S_t n/n_c \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

S_a : 二次波の平均応力

S_t : 二次波の振幅

n_c : 1周期中に含まれる一次波の繰返し数

回転曲げ応力に対する基本 $S-N$ 線式を次式で表わす。

$$1/N = e^{AS_n + D} \dots\dots\dots (7)$$

A, D は $S-N$ 線の種別に応じ 図-4 より求められる。

対象応力下での疲れ寿命を N_t 、疲れ破壊までの二次波の重複数を Z とすれば、寿命算式は式(8)で与えられる。

$$N_t = Z \cdot n_c = n_c \int_0^{n_c} \frac{dn}{N} = n_c \int_0^{n_c} e^{AS_n + D} dn \dots\dots\dots (8)$$

すなわち、方形二次波をもつ回転曲げ応力に対しては、

$$N_t = \frac{2}{e^{AS_1 + D} + e^{AS_2 + D}} \dots\dots\dots (9)$$

三角二次波をもつ回転曲げ応力に対しては、

$$N_t = \frac{2 AS_t}{e^{AS_1 + D} - e^{AS_2 + D}} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

$$S_1 = S_a + S_t, \quad S_2 = S_a - S_t$$

図-12 に破線で示すものは式(9)、(10)より 0.5 mm きれつ発生および破断寿命について計算したもので、縦軸に S_a 、横軸に寿命 N_t (対数) をとっている。計算 $S-N$ 線は基本 $S-N$ 線に対し、いずれも平行かつその

下側に位置し、また、二次波の S_a, S_t が同じなら方形二次波の方が三角二次波より、同種二次波では S_a が同一の場合 S_t の増大とともに疲れ寿命は減少する。なお、この性状は **b)** で述べる実験で確認された。

b) 疲れ寿命の測定と累積繰返し数比

2.(3) で述べた方形および三角二次波をもつ回転曲げ応力実験で求めたきれつ発生寿命 N_c 、破断寿命 N_f を表-5 に示す。きれつ発生については、きれつ長 0.2, 0.5 および 1.0 mm に対応する寿命を考慮し、寿命推定に使用したきれつ進展曲線および各測点との関係の一例を図-6 (c) に示す。各実験で求めた $N_c^{0.5}, N_f$ を図-12 にプロットするとともに、これら実験値に対し最小二乗法で算定した実験 $S-N$ 線を同図に実線であわせ示した。実験 $S-N$ 線は計算 $S-N$ 線に比較的良好に接近しているが、一般に計算線より勾配がやや急となり (1/0.8~1/0.92 倍)、Corten-Dolan⁹⁾ の提案に近いものとなっている。また、実験線と計算線とは N_f に対するものが $S_a = 26 \sim 27 \text{ kg/mm}^2$ (これは最大応力で材料の降伏点に近い値となる) 以上で、 $N_c^{0.5}$ に対するものが $S_a = 25 \sim 26 \text{ kg/mm}^2$ 付近でほぼ同じ角度で交差する傾向が認められる。このことは同一応力状態で寿命実測値と計算値の比が、破断よりきれつ発生で一般に大きくなることを示している。

表-5 に示された寿命測定値から累積繰返し数比を算定したものを同表右側欄にあわせ示す。 $\Sigma n/N_c, \Sigma n/N_f$ は S_a の増大とともに大きくなり 1 をこえるものも認められる。各実験では $\Sigma n/N_c$ は $\Sigma n/N_f$ より常に大となり、これは 4.(1) で述べた二段二重応力下の $\Sigma n/N_c$ と $\Sigma n/N_f$ の関係とは異なる傾向を示している。図-12 (たとえば (d) 図からもうかがわれるごとく、C 点以下 ($\Sigma n/N_c \leq 1$) では $\Sigma n/N_c$ は $\Sigma n/N_f$ より 1 に接近はするが、 S_a の減少とともに 1 との差は拡大し、ま

表-5 方形および三角二次波をもつ回転曲げ応力による疲れ寿命と累積繰返し数比

応力系	S_t (kg/mm ²)	S_a (kg/mm ²)	疲 れ 寿 命 (10 ³)				累 積 繰 返 し 数 比			
			$N_c^{0.2}$	$N_c^{0.5}$	N_c^1	N_f	$\Sigma n/N_c^{0.2}$	$\Sigma n/N_c^{0.5}$	$\Sigma n/N_c^1$	$\Sigma n/N_f$
方 形 二 次 波	1.2	27.1	89	99	107	136	1.05	1.03	1.05	1.02
		25.9	270	285	295	339	1.06	1.03	1.04	0.95
		24.7	670	694	713	797	0.89	0.88	0.89	0.84
	2.4	25.9	124	133	140	170	1.30	1.24	1.24	1.14
24.7		290	302	312	361	1.05	0.99	0.99	0.90	
23.5		806	833	855	967	0.98	0.95	0.97	0.91	
三 角 二 次 波	1.2	27.1	109	118	125	154	0.94	0.91	0.92	0.88
		25.9	355	370	383	440	1.03	1.00	1.02	0.95
		24.7	1 037	1 059	1 076	1 151	1.02	1.00	1.02	0.93
	2.4	25.9	254	271	284	331	1.16	1.17	1.18	1.08
		24.7	657	671	682	747	1.06	1.02	1.02	0.91
		23.5	1 458	1 492	1 519	1 662	0.85	0.79	0.81	0.72

(注) 寿命測定値は $S_t = 1.2 \text{ kg/mm}^2, S_a = 25.9 \text{ kg/mm}^2$ および $S_t = 2.4 \text{ kg/mm}^2, S_a = 24.7 \text{ kg/mm}^2$ に対するもの (いずれもプログラム化対象応力) は 3 実験値の平均、その他は 2 実験値の平均を示す。

た、F 点以上 ($\sum n/N_f \geq 1$) では $\sum n/N_c$ は $\sum n/N_f$ よりさらに大となる。F, C 点間では S_a が C 点側に近いときは $\sum n/N_c$ が、F 点側に近いときは $\sum n/N_f$ がより 1 に接近することになる。

基準きれつ長と $\sum n/N_c$ との関係については表-5 に示す方形および三角二次波ごとの $\sum n/N$ の単純平均値(カッコ内は三角二次波)が $\sum n/N_c^{0.2}=1.06(1.01)$, $\sum n/N_c^{0.5}=1.02(0.98)$, $\sum n/N_c^1=1.03(1.00)$, $\sum n/N_f=0.96(0.91)$ となるごとく、きれつ長を小とするに従い $\sum n/N_c$ の微増傾向が認められる。

実際、鋼部材では平滑材で作用最大応力は材料の降伏点以下となるから $\sum n/N_f < 1$ となり、この条件下できれつ発生寿命を直線被害則で計算すれば破断寿命に対して行うより予測精度は一般によくするものと考えられる。ただし、この状態がより一般的である作用応力が過小応力領域に多い場合は、きれつ発生寿命について計算

しても予測誤差が大きくなるおそれがある。

(2) プログラム応力による疲れ寿命

a) 応力ブロック数と疲れ寿命

2.(3) で述べた二段多重系および五段多重系プログラム応力実験で求めたきれつ発生寿命 N_c , 破断寿命 N_f を表-6 に示す。きれつ発生については、きれつ長 0.2, 0.5 および 1.0 mm に対応する寿命を考慮し、寿命推定に使用したきれつ進展曲線および各測点との関係の一例を図-6 (d) に示す。なお、この実験においては作用応力の関係できれつが定常的に進展しない場合があり、実測値のない 0.2 mm きれつ発生寿命をきれつ進展曲線から外挿で求めることは、特に二段多重系応力で問題があり、今後補足を要するものと考えられる。

表-6 より 1 応力ブロックにおける一次波の繰返し数 n_0 と $N_c^{0.5}$, N_f との関係を図-13 に示す。各測点に

表-6 プログラム応力による疲れ寿命と累積繰返し数比

(a) 二段多重系										
応力 (kg/mm ²)	n_0 (10 ³)	試験種別	疲れ寿命 (10 ³)				累積繰返し数比			
			$N_c^{0.2}$	$N_c^{0.5}$	N_c^1	N_f	$\sum n/N_c^{0.2}$	$\sum n/N_c^{0.5}$	$\sum n/N_c^1$	$\sum n/N_f$
$S_a=25.9$ $S_f=1.2$	70 (4)	L-H	268	285	299	344	1.02	1.03	0.99	0.95
		H-L	273	290	303	355	1.09	1.09	1.12	0.99
	140 (2)	L-H	280	291	298	345	1.01	1.00	0.97	0.86
		H-L	235	246	255	302	1.06	1.02	0.95	0.88
	280 (1)	L-H	352	364	373	487	1.16	1.09	1.05	1.21
		H-L	210	231	249	300	1.04	0.99	0.95	0.88
$S_a=24.7$ $S_f=2.4$	37.5 (8)	L-H	286	302	315	366	1.07	1.02	1.03	0.90
		H-L	278	295	309	347	1.06	0.97	0.95	0.85
	75 (4)	L-H	293	310	324	373	0.97	0.97	0.94	0.91
		H-L	282	292	299	344	1.07	1.02	0.99	0.93
	150 (2)	L-H	333	348	360	429	1.07	1.00	0.94	1.02
		H-L	299	308	315	337	1.10	1.06	1.03	0.92

(b) 五段多重系										
応力 (kg/mm ²)	n_0 (10 ³)	試験種別	疲れ寿命 (10 ³)				累積繰返し数比			
			$N_c^{0.2}$	$N_c^{0.5}$	N_c^1	N_f	$\sum n/N_c^{0.2}$	$\sum n/N_c^{0.5}$	$\sum n/N_c^1$	$\sum n/N_f$
$S_a=25.9$ $S_f=1.2$	50 (8)	L-H	371	387	400	431	1.07	1.05	1.03	0.89
		H-L	361	372	381	416	1.01	1.00	0.99	0.88
	100 (4)	L-H	366	384	398	437	1.09	1.06	1.04	0.88
		H-L	356	374	388	437	0.94	0.95	0.97	0.92
	200 (2)	L-H	377	397	413	463	1.11	1.08	1.04	0.91
		H-L	371	381	389	423	0.96	0.96	0.95	0.94
$S_a=24.7$ $S_f=2.4$	90 (8)	L-H	680	706	727	790	1.08	1.05	1.03	0.90
		H-L	675	688	697	743	1.01	1.00	0.98	0.88
	180 (4)	L-H	672	702	726	816	1.09	1.05	1.03	0.87
		H-L	645	655	662	702	0.90	0.89	0.88	0.79
	360 (2)	L-H	714	740	760	848	1.10	1.05	1.03	0.85
		H-L	671	681	689	724	0.86	0.86	0.87	0.85

(注1) 二段多重系における寿命測定値は、 $n_0=37.5$ に対するもの(1実験値)を除き、すべて2実験値の平均を示す。

(注2) 五段多重系における寿命測定値は、 $n_0=50, 100, 200$ の H-L 試験に対するものは4実験値の平均、 $n_0=90, 180$ の H-L 試験に対するものは3実験値の平均、その他は2実験値の平均を示す。

(注3) n_0 欄の () 内数字は設定ブロック数である。

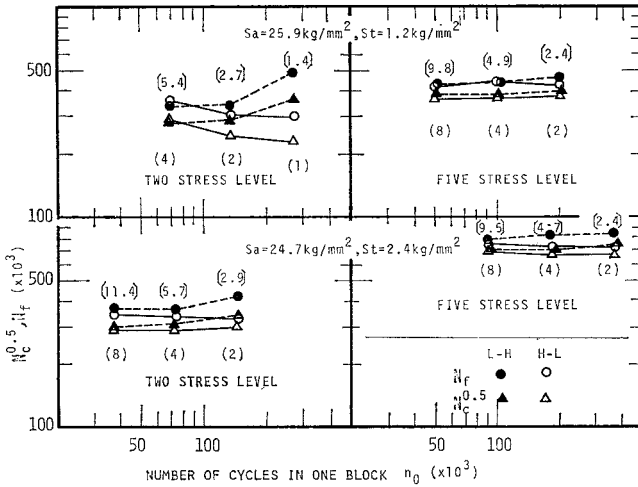


図-13 1 応力ブロックの繰返し数と疲れ寿命

表-7 プログラム応力下および対象変動応力下での $N_c^{0.5}, N_f$

応力系種別	S_t (kg/mm ²)	S_a (kg/mm ²)	0.5 mm きれつ発生寿命		$\frac{N_{ce}^{0.5}}{N_{ce}^{0.5}}$	破断寿命		N_{f0}/N_{fe}
			$N_{ce}^{0.5}$ (10 ³)	$N_{cf}^{0.5}$ (10 ³)		N_{f0} (10 ³)	N_{fe} (10 ³)	
二多 段重	1.2	25.9	288	271	1.06	350	332	1.05
	2.4	24.7	299	315	0.95	357	383	0.93
五多 段重	1.2	25.9	379	368	1.03	437	429	1.02
	2.4	24.7	697	647	1.08	767	741	1.03

付した()内添字は計算きれつ発生寿命に対し設定したブロック数であり、同じく[]内添字は計算破断寿命を n_0 で除した値である。作用応力が二段多重系と五段多重系とにかかわらず、同じ n_0 に対し $N_c^{0.5}, N_f$ も H-L 試験値は L-H 試験値より短寿命で、この傾向はブロック数の小なるものに大きい。ブロック数の増加とともに L-H, H-L 試験値は接近し、ブロック数が $N_c^{0.5}$ で 4~8, N_f では 5~9 程度になれば両者はほぼ一致し、疲れ寿命に及ぼす高低初応力の作用順序の影響が認められなくなる。

L-H, H-L 試験値があい準じてくる場合の 0.5 mm きれつ発生寿命 $N_{ce}^{0.5}$ および破断寿命 N_{f0} (いずれも L-H, H-L 試験値の平均) を表-7 に示すとともに、プログラム化の対象とした同じ S_a, S_t の方形および三角二次波をもつ回転曲げ応力による 0.5 mm きれつ発生および破断寿命実測値 $N_{ce}^{0.5}, N_{fe}$ を図-12 から求めあわせ示した。 $N_{ce}^{0.5}$ と $N_{cf}^{0.5}, N_{f0}$ と N_{fe} は比較的よい一致を示し、 $N_{ce}^{0.5}/N_{cf}^{0.5}=0.95\sim 1.08, N_{f0}/N_{fe}=0.93\sim 1.05$ と $\pm 8\%$ 以内の相違となっている。すなわち、L-H, H-L 試験値があい準じてくる場合のきれつ発生あるいは破断寿命は、対象変動応力下のそれとかなり接近したものとなる。これより変動応力に対する寿命予測に際し直線被害則による寿命計算に加え、必

要に応じ上述のごとき比較的簡単なプログラム応力実験を併用することにより精度のよい結果が得られるものと考えられる。

b) 累積繰返し数比の性状

表-6 に示された寿命測定値から $\sum n/N_c, \sum n/N_f$ を算定し同表右側欄にあわせ示す。 $\sum n/N_f$ は二段多重系の 1 ブロック・L-H 試験のみ、二段二重応力状態に準ずるため 1 より大となるが、その他は二段多重系と五段多重系とにかかわらず、また、L-H, H-L 試験とも 1 より小となり、これは過小応力もきれつ進展に寄与することを示すものと考えられる(1 例を除く)。また、 $\sum n/N_c$ は $\sum n/N_f < 1$ の場合、常にそれより値が大となっている。

なお、二段多重系応力で $S_a=25.9$ kg/mm², $S_t=1.2$ kg/mm², ブロック数 2, 4 の場合、 $\sum n/N_f$ の平均値 (L-H 試験で 0.91, H-L 試験で 0.94) をこれと同じ応力振幅をもつ二段二重応力下の $\sum n/N_f$ 平均値 (表-2 より計算し、L-H 試験で 1.33, H-L 試験で 0.86) と比較すると、より 1 に接近していることがわかり、また、同じ S_a, S_t の方形二次波をもつ回転

曲げ応力下の $\sum n/N_f$ も 0.95 なる値を示している。プログラム応力に対する寿命予測もきれつ発生寿命について行ったほうが一般に精度がよくなると考えられるが、このような応力変動下では破断寿命を Corten-Dolan⁹⁾ の考え方を適切に反映して計算することも一方策ではある。

6. 結 論

以上の検討結果よりおもな結論を述べれば次のとおりである。

(1) 本研究は従来からの疲れ破断寿命にかわり、主としてきれつ発生寿命に着目して、鋼部材の疲れ寿命予測などの問題を実験的に検討したものである。この場合のきれつ発生寿命は、試験片表面の巨視的きれつの進展曲線から求めたきれつ長 0.5 mm に対応するものを主体としている。

(2) 定応力が作用する場合、きれつ発生寿命 N_c に対する $S-N_c$ 線は破断寿命 N_f に対する $S-N_f$ 線に比し、一般に緩勾配となり(平行の場合もある)、また、 $S-N_c$ 線は基準きれつ長を小にとるに従い勾配が緩くなっていく。このため N_c/N_f は応力振幅あるいは応力範囲の低下とともに増大し、きれつ長 0.5 mm を基準と

する場合、平滑試験片（回転曲げ応力下）で 0.7~0.9、円孔切欠き試験片（軸応力下）で 0.6~0.7 程度の値となる。

(3) 二段二重応力が作用する場合、破断寿命についての累積繰返し数比は従来から L-H 試験で $\sum n/N_f > 1$, H-L 試験で $\sum n/N_f < 1$ となることが知られているが、これは二次応力に対する疲れ被害に及ぼす一次応力の履歴効果によるものである。きれつ発生寿命についての累積繰返し数比は基準きれつ長を小とするに従い、 $\sum n/N_f$ より L-H 試験では 1 側へ順次小さくなり、H-L 試験では 1 側へ順次大きくなり、結局 $\sum n/N_f$ に比しより 1 側へ接近したもとなる。したがって、きれつ発生寿命は直線被害則によりかなり精度よく予測することが可能であると考えられる。

(4) 二次波をもつ回転曲げ応力およびこれらを対象としたプログラム応力の場合を含み、作用応力が材料の降伏点以下の場合にはきれつ発生寿命を直線被害則で計算すれば、破断寿命に対して行うより予測精度は一般によくなくなる。なおこのような応力変動下では、破断寿命を Corten-Dolan の考え方を適切に反映して計算することも一方策である。

(5) 二次波をもつ回転曲げ応力下でのきれつ発生寿命は作用応力が材料の降伏点をこえる場合、あるいは過小応力領域に多い場合は予測誤差が大きくなるおそれがあり、これを補足するためプログラム応力実験を取り上げた。上述回転曲げ応力をそれぞれ二段多重系および五段多重系応力にプログラム化し、該応力の計算きれつ発生寿命を分割したものを 1 ブロックの繰返し数とした。その結果、ブロック数の増加につれ、きれつ発生および破断寿命の L-H, H-L 試験値は互いに接近し、両者があい準じてくるブロック数は、きれつ発生寿命に対し 4~8 となり、破断寿命に対するものはそれより若干多くなる。また、この場合のきれつ発生あるいは破断寿命は、対象変動応力の寿命実測値とかなりよく一致した。

(6) 以上を総括すれば鋼部材の疲れ寿命予測に際し、一般にきれつ発生寿命に対して直線被害則を適用すれば、従来の破断寿命に対して行うより精度のよい結果がえられ、また、予測精度を補うため実際作用応力に対するプログラム応力を設定し、疲れ実験を併用することが望ましいということになる。

謝 辞

本研究は東京工業大学工学部 中沢 一教授、吉田 裕助教授そのほかの方々のご教示とご助言をうけて進めたものである。また、実験や関係資料の整理には増田陳紀助手、鶴巻正行技官、荒井国太元技官そのほか研究室の方々から多大のご協力とご援助をうけた。ここに各位に対し深甚なる感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 西村俊夫・三木千寿：引張応力に起因する鋼橋梁の変状，土木学会誌，Vol. 61, No. 9, pp. 55~64, 1975-11.
- 2) 西村俊夫：ピン結合鉄道トラス橋の変状と その対策，鉄道技術研究報告，No. 483, 1965-7.
- 3) 日本国有鉄道施設局：建造物の保守並びに健全度診断法，建造物検査資料，pp. 39~42, 1963-5.
- 4) 土木学会：土木建造物の取替標準に関する研究（国鉄委託）報告書，pp. 166~173, 1974-3.
- 5) 日本材料学会編：金属の疲労，丸善，p. 301, 1964.
- 6) Miner, M.A.: Cumulative damage in fatigue, Jour. of Applied Mech., Vol. 12, pp. A 159~164, Sep., 1945.
- 7) Kommers, J.B.: The effect of overstressing and understressing in fatigue, Proc., ASTM, Vol. 45, 1945.
- 8) 日本材料試験協会疲労部門委員会：金属材料の重複繰返し応力に対する疲労強度に関する研究，材料試験，Vol. 8, No. 72, pp. 2~43, 1959-9.
- 9) Corten, H.T. and T.J. Dolan: Cumulative fatigue damage, Inter. Conf. on Fatigue of Metals, pp. 235~246, Sept., 1956.
- 10) Corten, H.T.: Application of cumulative fatigue damage theory to farm and construction equipment, SAE, Trans., Vol. 72, pp. 447~466, 1964.
- 11) 中村 宏・田中真一：機械の疲れ寿命算出法，養賢堂，p. 74, 1972.
- 12) 川田雄一・三沢啓志：疲労限度以下の応力が累積寿命に及ぼす影響，材料，Vol. 17, No. 173, pp. 41~45, 1968-2.
- 13) Grover, H.J.: An observation concerning the cycle ratio in cumulative damage, ASTM, STP, No. 274, pp. 120~124, 1960.
- 14) Manson, S.S., Freche, J.C. and C.R. Ensign: Application of a double linear damage rule to cumulative fatigue, NASA, TND-3839, Apr., 1967.
- 15) 中沢 一・小林英男：金属の疲れき裂の挙動 (8)，機械の研究，Vol. 20, No. 8, pp. 75~78, 1968-8.
- 16) 青木逸郎・国尾 武・中村 宏：実働応力と疲れ強さ (その 2)，日本機械学会論文集 (第 1 部)，Vol. 32, No. 244, pp. 1762~1768, 1966-12.
- 17) 萩原・初野・青木・中村・国尾：実働応力と疲れ強さ (その 6)，日本機械学会論文集 (第 1 部)，Vol. 34, No. 260, pp. 596~603, 1968-4.
- 18) 西谷弘信・吉川義久：浅い切欠きをもつ S 20 C 電解研摩材の二段重複応力による 疲れ被害，日本機械学会論文集 (第 1 部)，Vol. 34, No. 263, pp. 1190~1197, 1968-7.
- 19) 伊藤文人：実働荷重による 鉄道橋の疲労被害推定，鉄道技術研究報告，No. 676, 1969-4.
- 20) Hofmeister, W.F.: Application of the cumulative fatigue damage theory to practical problems, SAE, Trans., Vol. 68, pp. 274~281, 1960.
- 21) 河本 実・柴田俊忍・石川 浩：プログラム荷重による疲労強度に及ぼす応力順序の影響，材料，Vol. 17, No. 173, pp. 21~25, 1968-2.
- 22) 砂本大造・遠藤忠良：実働応力疲労に及ぼす負荷条件の影響と寿命推定，材料，Vol. 17, No. 173, pp. 46~52, 1968-2.
- 23) Naumann, E.C., Hardrath, H.F. and D.E. Guthrie: Axial-load fatigue tests of 2024-T 3 and 7075-T 6 aluminum-alloy sheet specimens under constant and variable amplitude loads, NASA, TND-212, Dec., 1959.
- 24) Illg, W.: Factors in evaluating fatigue life of struc-

- tural parts, NASA, TND-725, Apr., 1961.
- 25) 田中道七・古城敏幸：ランダム荷重とプログラム荷重による軟鋼切欠き材の強度，材料，Vol. 20, No. 216, pp. 12~17, 1971-9.
- 26) JIS Z 2274-1974：金属材料の回転曲げ疲れ試験方法.
- 27) 日本材料学会編：金属材料疲れ試験便覧，養賢堂，pp. 22~23, 1968.
- 28) 西村俊夫・丸山嘉高・荒井国太：正弦，三角および方形状変動荷重が作用する場合の軟鋼材の疲れ強さ，東工大土木工学研究報告，No. 9, pp. 109~114, 1970-12.
- 29) 中沢 一・小林英男：金属の疲れき裂の挙動(4)，機械の研究，Vol. 20, No. 4, pp. 63~68, 1968-4.
- 30) Iida, K. : Crack initiation life in low cycle fatigue, 1st. Inter. Symposium of Japan welding Society, pp. A 7.1~7.19, 1971.
- 31) Liu, H.W. : Crack propagation in thin metal sheet under repeated loading, Jour. of Basic Eng., Trans. of ASME, Mar., 1961.
- 32) 西田正孝：応力集中，森北出版，pp. 385~390, 1967.
- 33) 西村俊夫・張 東一・三木千寿：プログラム応力下における軟鋼材の疲れ寿命，東工大土木工学研究報告，No. 17, pp. 77~90, 1974-12.
- 34) Schijve, J. : Significance of fatigue cracks in micro-range and macro-range, ASTM, STP, No. 415, 1967.
- 35) Klima, S.T. : Ultrasonic detection and measurement of fatigue cracks in notched specimens, Experimental Mechanics, May, 1969.
- 36) 西原利夫・河本 実：腐食法による疲れ部分の検出，日本機械学会論文集，Vol. 5, No. 20, 1939.

(1977. 4. 21・受付)