

# 変動振幅荷重を受ける鋼部材の 疲労寿命評価方法の提案

森 猛<sup>1</sup>・林 暢彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 法政大学助教授 工学部土木工学科 (〒184 東京都小金井市梶野町3-7-2)

<sup>2</sup> 正会員 工修 (株)宮地鐵工所 先行技術研究室 (研究当時: 法政大学大学院)

疲労損傷が進行するにしたがってそれに寄与する応力範囲の限界値も低下することを考慮した変動振幅応力下の疲労寿命評価方法を提案している。この限界値の変化について検討するために、いくつかの代表的な形式の溶接継手を対象として、様々な応力範囲頻度分布形状の変動振幅応力下で疲労亀裂進展解析を行なっている。そして、限界値の変化は継手の一定振幅応力下の疲労強度に依存することを示している。さらに、提案方法による寿命推定値を、従来の方法による寿命推定値、疲労亀裂進展解析結果および Melhem らの実験結果と比較している。

**Key Words :** variable amplitude stress, linear damage law, threshold stress range, crack propagation analysis, steel structure, fatigue life

## 1. はじめに

繰り返し荷重を受ける橋梁などの鋼構造物の疲労照査に不可欠な構造部材や継手部の疲労強度あるいは疲労寿命は、一定振幅応力試験により求められることが多い。しかし、構造物に作用する荷重の大きさは様々であり、載荷位置も変化する。そのため、各構造部材に生じる応力が一定振幅で繰り返されることは稀であり、一般には複雑に変動する。このような変動振幅応力下の疲労寿命は、構造部材に作用する応力変動をそのままの、あるいは模擬した波形で疲労試験を行なうことにより求めることも考えられるが、構造物あるいは構造部材を限定したとしても応力変動のパターンは無数にあるため、このようなアプローチは非常に困難である。そのため、一般には一定振幅応力試験で求めた応力範囲・疲労寿命関係を利用して変動振幅応力下の疲労寿命を評価することが行なわれる。また、そのための方法が数多く提案されており<sup>1)</sup>、それらの内のいくつかは鋼構造物を対象とした疲労設計基準類で用いられている。例えば、1974年に発表された日本鋼構造協会疲労設計指針(案)<sup>2)</sup>では修正 Miner の方法、英国の橋梁設計標準(BS5400)<sup>3)</sup>では Haibach の方法が採用されており、欧州鋼構造連合の疲労設計指針<sup>4)</sup>では Haibach の方法に応力範囲の打ち切り限界を加味して

疲労寿命評価を行なうこととしている。また、最近改定された日本鋼構造協会疲労設計指針<sup>5)</sup>では応力範囲の打ち切り限界を考慮した修正 Miner の方法が用いられている。これらの方法はいずれも次章で示す線形累積被害則に基づくものである。

変動振幅応力下の疲労寿命評価に関する研究は最近でも数多く行なわれているが、前述の線形累積被害則に基づく各種評価方法の適用性を継手モデル試験体や大型の桁試験体の疲労試験を通して検討したもの<sup>6)</sup>や疲労亀裂進展解析による寿命予測結果を実験結果と比較したもの<sup>7)</sup>が多い。また、新しい評価方法としては、Gurney による Area 法<sup>8)</sup>が挙げられるが、これも経験式にすぎず、物理的根拠に乏しい。

著者の一人は、疲労損傷の進行を疲労亀裂の進展としてとらえ、種々の変動振幅応力下において疲労亀裂進展解析を行なうことにより、変動振幅応力下の疲労寿命評価方法について検討した<sup>9)</sup>。そして、変動振幅応力下において疲労損傷に寄与する応力範囲の限界値(限界応力範囲)は疲労損傷の進行(疲労損傷度)にともなって低下することを明らかにするとともに、限界応力範囲と疲労損傷度の関係を線形累積被害則に組み込んだ疲労寿命評価方法を提案した。しかし、そこでは板厚25mmで標準的な溶接形状の荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手のみを対象と

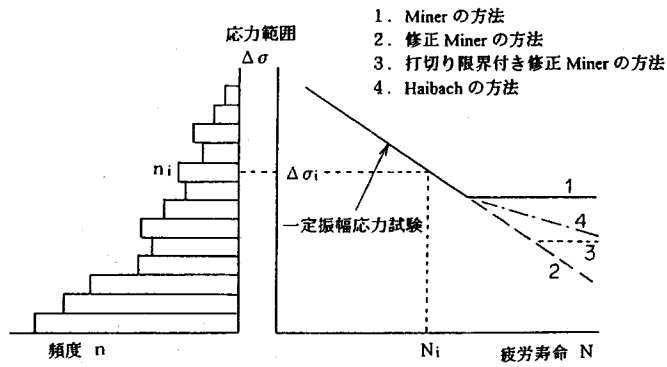


図-1 線形累積被害則

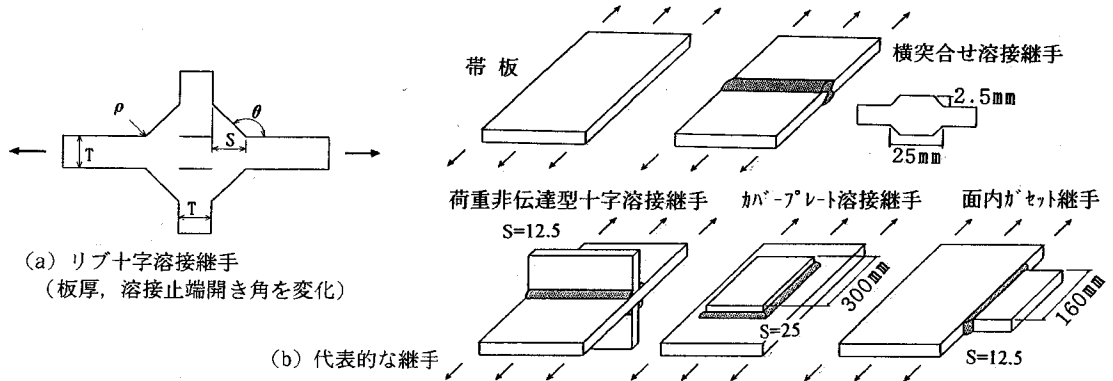


図-2 解析対象

していた。

本研究では、種々の板厚、溶接止端形状の十字すみ肉溶接継手およびいくつかの代表的な形式の継手を対象とした疲労亀裂進展解析を行なうことにより、限界応力範囲と疲労損傷度の関係を整理するためのパラメータについて検討し、様々な継手に適用可能な限界応力範囲・疲労損傷度関係およびその関係を利用した変動振幅応力下の疲労寿命評価方法を提案する。さらに、ここで提案する方法の有効性を確認するため、疲労亀裂進展解析結果および Melhem らによる実験結果<sup>10)</sup>を通して、提案方法による寿命推定値をこれまでの方法による寿命推定値と比較する。

## 2. 従来の疲労寿命評価方法

これまでも変動振幅応力下の疲労寿命評価を目的とした様々な方法が提案されてきたが、その多くは以下に示す線形累積被害則に基づくものである。

変動振幅応力にレインフロー法などの応力計数法を適用することにより求めた応力範囲頻度分布を構成する応力範囲成分を $\Delta\sigma_i$  ( $i=1,2,\dots$ )、その頻度

(繰り返し数)を $n_i$ とおき、 $\Delta\sigma_i$ が一定振幅で繰り返されたときの疲労寿命を $N_i$ とする。ただし、 $\Delta\sigma_i$ が一定振幅応力下の疲労限度以下であれば、 $N_i = \infty$ である。 $\Delta\sigma_i$ が $n_i$ 回繰り返された時の疲労損傷度 $D_i$ を $(n_i/N_i)$ と定義し、損傷度の合計 $D$ が


$$D = \sum D_i = \sum (n_i/N_i) = 1 \quad (1)$$

となったときに疲労破壊が生じるとする。これが線形累積被害則あるいは Palmgren-Miner の方法<sup>11)</sup>(以後、Miner の方法と呼ぶ)と呼ばれる変動振幅応力下の疲労寿命評価方法である(図-1参照)。

しかし、疲労損傷度が大きくなれば、疲労限度以下の応力範囲成分によっても疲労損傷は進行する。このことは、疲労損傷が進行するにしたがって疲労亀裂は大きくなり、疲労限度以下の小さい応力範囲まで疲労亀裂の進展に寄与ようになることから明らかである。したがって、Miner の方法では危険側の評価を与えることになる。橋梁などの構造物における応力範囲頻度分布の大半はこの疲労限度以下の応力範囲成分によって占められることが多く、そのような応力範囲成分の取り扱いが特に問題となっている。このような疲労限度以下の $\Delta\sigma_i$ の影響

表-1 板厚を変化させたモデル

モデル	板厚	応力集中係数	200万回疲労強度	指数 c
A T	9 mm	2.48	178.0 MPa	1.23
B T	16 mm	2.82	105.0 MPa	1.15
C T	25 mm	3.25	95.7 MPa	1.06
D T	35 mm	3.61	89.3 MPa	1.00
E T	45 mm	3.98	84.8 MPa	0.94
F T	75 mm	4.61	75.9 MPa	0.87

を考慮する方法に修正 Miner の方法や Haibach の方法がある<sup>11)</sup>。修正 Miner の方法では、疲労限度以下の $\Delta\sigma_i$ に対する $N_i$ を $\infty$ とするのではなく、-1に示すように疲労限度以上の $\Delta\sigma-N$ 関係を疲労限度以下の応力範囲に対してもそのままの傾きで延ばして $N_i$ を求め、それを式(1)に代入することにより疲労寿命を計算する。しかし、修正 Miner の方法のように疲労限度以下の応力範囲成分を疲労限度以上の応力範囲成分と同様に扱うと一般に安全側すぎるの評価となる。そのため、変動振幅応力下においても疲労損傷に寄与しない応力範囲の限界値（以後、打ち切り限界と呼ぶ）を設定することもある<sup>12), 13)</sup>。ここでは、このような疲労寿命の評価方法を打ち切り限界付き修正 Miner の方法と呼ぶ。なお、打ち切り限界付き修正 Miner の方法を採用している日本鋼構造協会疲労設計指針では、応力範囲の打ち切り限界を一定振幅応力下の疲労限度の46%としている。

Haibach の方法では、疲労限度以上の $\Delta\sigma-N$ 関係の傾きが $-1/m$ で与えられるとき、疲労限度以下の $\Delta\sigma-N$ 関係の傾きを $-1/(2m-1)$ と緩やかにし、 $\Delta\sigma_i$ に対する $N_i$ を求める。この方法では、疲労損傷に寄与する限界応力範囲 $\Delta\sigma_w$ が疲労損傷度が大きくなるにしたがって式(2)の関係で低下する、

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_{w0} (1 - D)^{1/(m-1)} \quad (2)$$

$\Delta\sigma_{w0}$ : 一定振幅応力に対する疲労限度  
(損傷を受けていない継手の疲労限度)  
D: 疲労損傷度

また、疲労損傷度は、すべての応力範囲の繰返し数に比例する、

$$D = \sum n_i / N_i \quad (3)$$

といった仮定に基づいている。しかし、これらの仮定の妥当性については、明らかとされていない。Reppermundは、式(3)の仮定が不適切であるとして、式(2)の仮定のみで疲労寿命を求めるための手法を示している<sup>14)</sup>。また、飯田らは切欠き材の変動振幅応力疲労試験を対象に、式(2)の指数について検討

表-2 溶接止端開き角を変化させたモデル

モデル	止端角	応力集中係数	200万回疲労強度	指数 c
F150	150°	2.42	96.6 MPa	1.24
F135	135°	2.76	90.3 MPa	1.17
F120	120°	3.17	84.7 MPa	1.11
F100	100°	3.26	81.4 MPa	1.08

表-3 継手の形式を変化させたモデル

モデル	応力集中係数	200万回疲労強度	指数 c
帯板	1.00	178.0 MPa	2.06
横突合わせ溶接継手	2.32	116.9 MPa	1.45
荷重非伝達溶接継手	3.02	86.0 MPa	1.12
かプレート溶接継手	3.86	76.3 MPa	1.02
面内がわら溶接継手	10.95	47.6 MPa	0.68

している<sup>15)</sup>。


著者の一人は、板厚25mmの標準的な形状の荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手を対象として疲労亀裂進展解析を行ない、式(2)の疲労損傷度と限界応力範囲の関係について検討し、その関係を次式で近似できることを示した<sup>9)</sup>。

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_{w0} (1 - D) \quad (4)$$

そして、この関係を線形累積被害則に組込んだ疲労寿命評価方法を提案するとともに、その有効性を疲労試験結果との比較から示した。しかし、疲労損傷の進行、すなわち疲労亀裂の進展を支配する応力拡大係数が応力分布の影響を強く受け、応力分布が継手の形状や形式により変化することを考慮すれば、継手の形式や溶接部の形状によって限界応力範囲と疲労損傷度の関係も変化するものと考えられる。

### 3. 疲労亀裂進展解析

#### (1) 解析対象

継手の板厚、溶接止端の開き角、継手の形式を変化させた3シリーズのモデルを対象とする。継手の板厚を変化させたシリーズのモデルでは、-2(a)に示す荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手の主板の厚さを表-1に示すように9~75mmと変化させている。その際、付加板の厚さは主板の厚さと同じとしている。板幅は板厚の3倍、溶接サイズは板厚の1/2である。また、溶接止端の曲率半径 $\rho$ は0.5mm、開き角 $\theta$ は135度としている。初期亀裂は、深さ0.1mm、表面での長さ0.4mmの半楕円形の表面亀裂とし、その位置は板幅方向中央とした。限界亀裂寸法は板厚の80%とした。

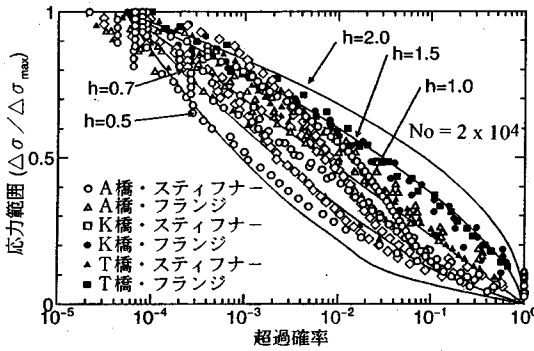


図-3 道路橋の応力範囲累積頻度分布

溶接止端開き角を変化させたシリーズのモデルでは、図-2(a)に示す荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手の止端曲率半径  $\rho$  を0.5mmで一定として、止端開き角  $\theta$  を表-2に示すように100~150度と変化させている。主板の厚さ、付加板の厚さとも16mmであり、板幅は110mm、溶接サイズは6mmとしている。初期亀裂および限界亀裂寸法は板厚を変化させたモデルと同じである。

継手の形式を変化させたシリーズでは、図-2(b)に示すように、帯板、横突合せ溶接継手、荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手、カバープレート溶接継手、面内ガセット溶接継手、すなわち疲労強度の異なる5種類の継手モデルを対象としている。これらの継手の疲労強度等級は日本鋼構造協会疲労設計指針<sup>5)</sup>で、それぞれB, D, E, G, Hと規定されている。いずれの継手においても、板厚は25mm、板幅は320mmとした。また、溶接止端の開き角は135度、止端の曲率半径は0.5mmである。溶接サイズは、荷重非伝達型十字溶接すみ肉溶接継手で12.5mm、カバープレート溶接継手で20mm、面内ガセット継手で12.5mmとしている。

面内ガセット溶接継手では、深さ0.1mm、表面での長さ0.4mmの半楕円形の表面亀裂を初期亀裂として板厚中央に、その他の継手では同じ寸法・形状の初期亀裂を板幅方向中央に設置した。限界亀裂寸法は、荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手では板厚の80%とし、他の継手では板幅の80%とした。

## (2) 応力範囲頻度分布

ここでは、海洋構造物の疲労設計を行なう際にノルウェーの基準<sup>16)</sup>で用いられている式(5)に示す2母数 Weibul 分布を応力範囲累積頻度分布として用いる。

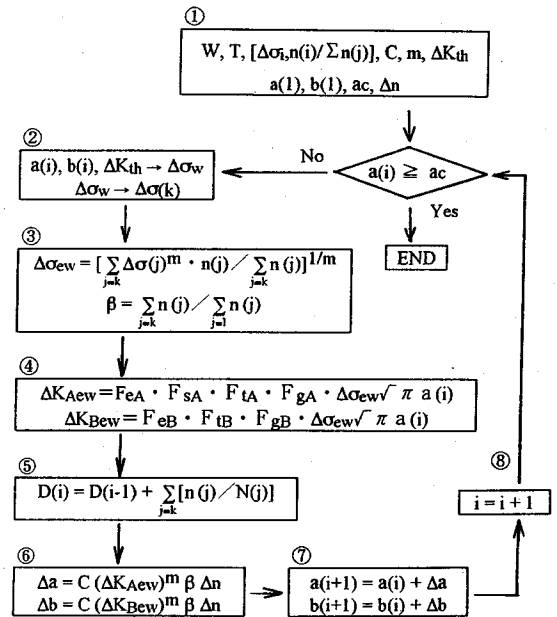


図-4 疲労亀裂進展解析の手順

$$Q(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{\max}) = \exp[-(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{\max})^h \cdot \ln(N_0)] \quad (5)$$

$Q(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{\max})$ : 累積分布関数

$h$ : 累積分布の形状を表すためのパラメータ

$N_0$ : 総応力繰返し数

$\Delta\sigma_{\max}$ : 最大応力範囲

この分布における2つのパラメータ  $h$ ,  $N_0$ の値は、 $h=0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0$ ,  $N_0=10^4, 2 \times 10^4, 5 \times 10^4, 10^5, 2 \times 10^5, 5 \times 10^5, 10^6, 10^8$ とした。このように、ここでは計40種類の応力範囲頻度分布を対象としている。

図-3に建設省で測定された応力範囲累積頻度分布を示す<sup>17)</sup>。これらは、板桁形式の多主桁橋のほぼ支間中央の主桁下フランジおよび横桁あるいは対傾構を取り付けた垂直ステイフナーに貼付したひずみゲージを用いて24時間連続の応力測定により求められたものである。応力測定による応力範囲累積頻度分布は、 $h=2$ と $h=0.5$ の Weibul 分布の間にある。なお、図中のマークは測定橋梁および測定位置によって変えている。

## (3) 解析方法

疲労亀裂進展解析の流れを図-4に示す。

- ① 継手寸法 ( $W, T$ ), 初期亀裂 [ $a(1), b(1)$ ], 限界亀裂 ( $a_c$ ), 疲労亀裂進展速度表示式の定数 ( $C, m, \Delta K_{th}$ ), 応力範囲の相対頻度分布 [ $\Delta\sigma(j), n(j)/\Sigma n(j)$ ]を設定する。

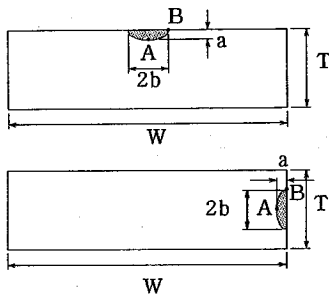


図-5 疲労亀裂の定義

- ② 下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th}$ を基に、与えられた亀裂に対応する限界応力範囲 $\Delta\sigma_w$ を求める。
- ③  $\Delta\sigma_w$ 以上の応力範囲の分布に基づき、等価応力範囲 $\Delta\sigma_{ew}$ を求める。また、限界応力範囲以上の応力範囲の頻度が全応力範囲の頻度に占める割合 $\beta$ を求める。
- ④ 等価応力範囲 $\Delta\sigma_{ew}$ をもとに等価応力拡大係数範囲( $\Delta K_{Aew}$ ,  $\Delta K_{Bew}$ )を求める。
- ⑤ 疲労損傷度 D を計算する。
- ⑥ 疲労亀裂進展速度表示式を用いて亀裂進展増分 ( $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ) を計算する。
- ⑦ 進展後の亀裂を定義する。
- ⑧ 以上の手順を疲労亀裂が限界寸法に達するまで繰り返す。

疲労亀裂進展速度 $da/dN$ の表示式は、応力拡大係数範囲 $\Delta K$ の関数として次式で表すこととした。

$$\begin{aligned} da/dN &= 5.4 \times 10^{-12} (\Delta K)^3 & \Delta K > \Delta K_{th} \\ da/dN &= 0 & \Delta K \leq \Delta K_{th} \end{aligned} \quad (6)$$

$da/dN : m/cycle, \Delta K : MPa\sqrt{m}$   
 $\Delta K_{th} = 2MPa\sqrt{m}$

式(6)は数多くの構造用鋼材およびそれを母材とした溶接継手での疲労亀裂進展試験結果を統計解析することにより得られた関係である<sup>18)</sup>。また、疲労亀裂進展に対する下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th}$  ( $2MPa\sqrt{m}$ ) は高い溶接引張残留応力場を疲労亀裂が進展する場合の疲労亀裂進展試験結果に基づいて設定した<sup>19)</sup>。

溶接止端部に仮定した半楕円形の表面亀裂の深さ方向前縁(図-5のA点)での応力拡大係数範囲 $\Delta K_A$ および幅方向前縁(図-5のB点)での応力拡大係数範囲 $\Delta K_B$ は次式より求めた。

$$\begin{aligned} \Delta K_A &= F_{eA} \cdot F_{sA} \cdot F_{tA} \cdot F_{gA} \cdot \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \\ \Delta K_B &= F_{eB} \cdot F_{tB} \cdot F_{gB} \cdot \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (7)$$

$F_{eA}, F_{eB}$ : 亀裂形状に対する補正係数  
 $F_{sA}$ : 表面亀裂に対する補正係数

$F_{tA}, F_{tB}$ : 継手の板厚・板幅が有限であることに対する補正係数

$F_{gA}, F_{gB}$ : 継手に生じる応力集中に対する補正係数

なお、各補正係数の算出方法については文献<sup>20)</sup>を参照されたい。

限界応力範囲以上の応力範囲頻度分布に対する等価応力範囲 $\Delta\sigma_{ew}$ は次式より求めた。

$$\Delta\sigma_{ew} = (\sum \Delta\sigma_i^3 \cdot n_i / \sum n_i)^{1/3} \quad (8)$$

ただし、限界応力範囲よりも小さい $\Delta\sigma_i$ に対応する $n_i$ は0とする。

#### 4. 限界応力範囲と疲労損傷度の関係

##### (1) 応力範囲頻度分布形状の影響

図-6(a)に横突合せ溶接継手、図-6(b)にカバープレート溶接継手を対象とした疲労亀裂進展解析により求めた限界応力範囲と疲労損傷度の関係を示す。図の縦軸は限界応力範囲 $\Delta\sigma_w$ を一定振幅応力下の疲労限度 $\Delta\sigma_{wo}$ で無次元化している。ここでは、それぞれ10種類の形状の応力範囲頻度分布に対する解析結果を示しているが、いずれの継手においても、応力範囲頻度分布の形状によらず限界応力範囲と疲労損傷度の関係はほぼ同じとなっている。このことは、他の継手あるいは他の応力範囲頻度分布に対しても同じであった。

図-6に示す結果は、 $\Delta\sigma_{max}$ を一定振幅応力下の疲労限度 $\Delta\sigma_{wo}$ の4倍としたときの解析結果であるが、 $\Delta\sigma_{max}$ を変化させても、限界応力範囲・疲労損傷度関係はほぼ同じであった。

##### (2) 板厚の影響

荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手の板厚を9mmから75mmと変化させたモデルに対して有限要素応力解析より求めた応力集中係数および一定振幅応力下の疲労亀裂進展解析より求めた200万回疲労強度を表-1に示す。有限要素応力解析には2次元ひずみ一定要素を用い、その最小要素寸法は0.025mmとした。この条件は他のシリーズのモデルに対しても同じである。板厚が増すにしたがって応力集中係数が高くなり、疲労強度は低下している。

図-7は変動振幅応力下の疲労亀裂進展解析より求めた限界応力範囲と疲労損傷度の関係である。限界応力範囲と疲労損傷度の関係は板が厚くなるにしたがって、すなわち疲労強度が低くなるにしたがって下に凸な形状となっている。

マーク	Weibull分布の $h, N_0$	マーク	Weibull分布の $h, N_0$
○	$h=0.5, N_0=5 \times 10^4$	●	$h=0.5, N_0=5 \times 10^5$
△	$h=0.7, N_0=10^4$	▲	$h=0.7, N_0=10^8$
□	$h=1.0, N_0=10^8$	■	$h=1.0, N_0=2 \times 10^5$
▽	$h=1.5, N_0=2 \times 10^4$	▼	$h=1.5, N_0=10^5$
◇	$h=2.0, N_0=10^6$	◆	$h=2.0, N_0=5 \times 10^4$

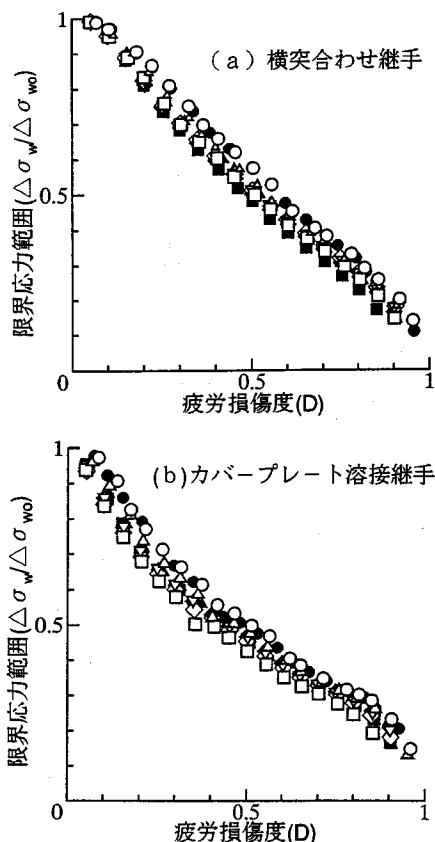


図-6 限界応力範囲・疲労損傷度関係に対する応力範囲頻度分布形状の影響

### (3) 溶接止端開き角の影響

溶接止端の開き角 $\theta$ を変化させたモデルに対して得られた応力集中係数および200万回疲労強度を表-2に示す。開き角 $\theta$ が小さいものほど応力集中係数は高く、疲労強度は低くなっている。図-8に限界応力範囲と疲労損傷度の関係を示す。板厚を変化させた場合と同様に、200万回疲労強度が低くなるにしたがって限界応力範囲と疲労損傷度の関係は下に凸となる傾向が認められる。

### (4) 継手形式の影響

図-2(b)に示す各継手について得られた応力集中係数と一定振幅応力下の200万回疲労強度を表-3に、変動振幅応力下の疲労亀裂進展解析より求めた限界

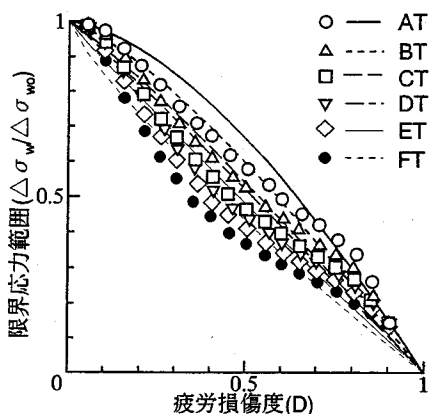


図-7 限界応力範囲・疲労損傷度関係に対する板厚の影響

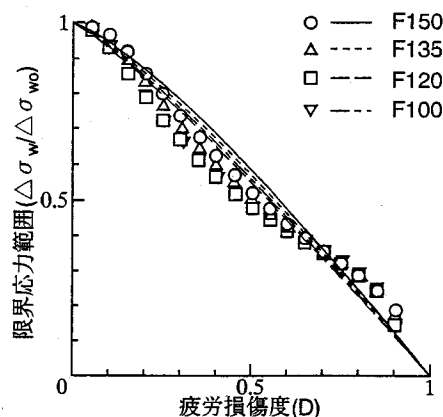


図-8 限界応力範囲・疲労損傷度関係に対する溶接止端開き角の影響

応力範囲と疲労損傷度の関係を図-9に示す。先の2つのシリーズと同様に、200万回疲労強度が低くなるにしたがって限界応力範囲と疲労損傷度の関係は下に凸な形状となっている。

### (5) 初期亀裂寸法の影響

前項までは、初期亀裂の深さを0.1mmとした疲労亀裂進展解析の結果に基づき検討してきた。ここでは、初期亀裂の深さを0.05mmおよび0.2mmとした場合についても同様の解析を行ない、初期亀裂寸法により限界応力・疲労損傷度関係がどのように変化するかについて検討する。なお、初期亀裂の表面での長さは、いずれの場合も深さの4倍としている。

図-10(a),(b)に、横突合せ溶接継手、カバープレート溶接継手における限界応力範囲 $(\Delta\sigma_w / \Delta\sigma_{w0})$ と疲労損傷度 $D$ の関係を示す。初期亀裂が小さくなるにしたがって、 $\Delta\sigma_w / \Delta\sigma_{w0} - D$ 関係は下に凸な関

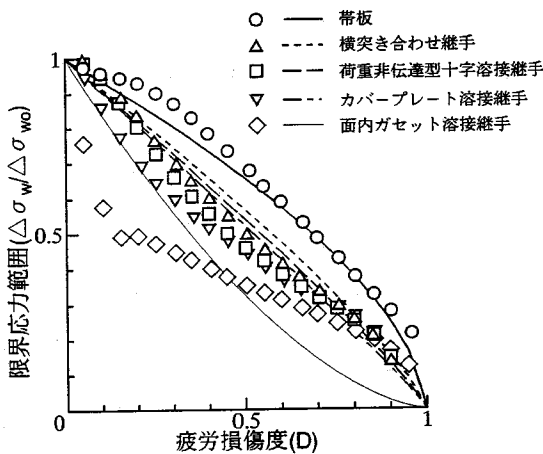


図-9 限界応力範囲・疲労損傷度関係に対する継手形式の影響

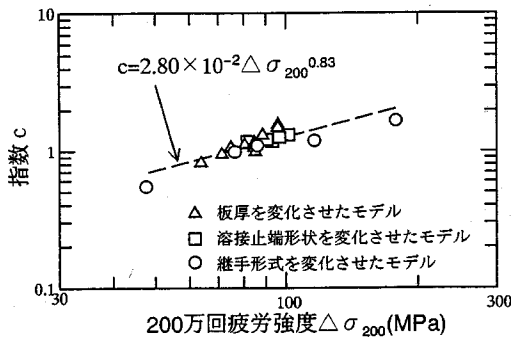


図-11 指数 c と 200 万回疲労強度の関係

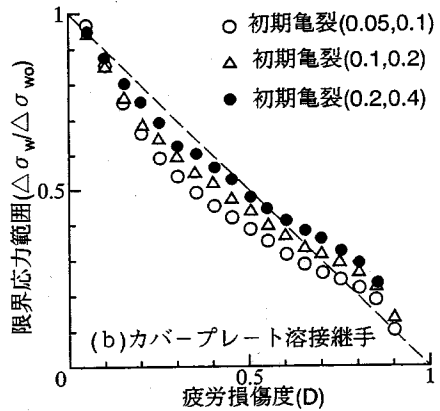
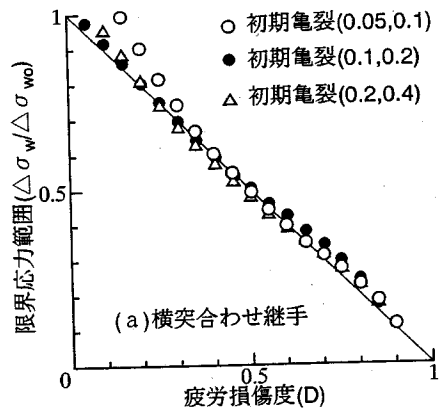


図-10 限界応力範囲・疲労損傷度関係に対する初期亀裂寸法の影響

係となっている。また、この傾向は応力集中係数の高いカバープレート溶接継手の方が顕著である。このような初期亀裂寸法の影響は、2章で述べたように亀裂が進展する断面の応力分布の相違によって生じたものと考えられ、初期亀裂が小さいほど亀裂が初期に進展する領域で応力の変化が急となり、 $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_{w0}-D$ 関係は下に凸な関係となっている。これは、応力集中係数が高くなるほど下に凸な関係になるという4.(2)~4.(4)節の結果とも一致する。

以上のように $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_{w0}-D$ 関係は初期亀裂寸法によっても変化するが、初期亀裂寸法が同じであれば、4.(2)~4.(4)節で示した傾向は同じであった。以後の検討においては初期亀裂深さを0.1mmとした解析結果に基づき検討を進める。

#### (6) 限界応力範囲と疲労損傷度の関係の関数表示

図-7, 8, 9に示す限界応力範囲と疲労損傷度の関係を次式で近似することとした。

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_{w0} (1 - D^c) \quad (9)$$

ここで、指数  $c$  は限界応力範囲と疲労損傷度の関係を表わすパラメータであり、 $c = 1$  とすれば線形関係、 $c < 1$  で下に凸、 $c > 1$  で上に凸な関係となる。各モデルに対して  $c$  の値を最小2乗法により求めた結果を表-1, 2, 3の右欄に、またその値を式(9)に代入して求めた関係を図-7, 8, 9に曲線で示す。図-7, 8, 9では、1つの応力範囲頻度分布に対する結果のみを示しているが、最小2乗法はすべての応力範囲頻度分布(40種類)およびそれぞれ分布について5~15程度の最大応力範囲 $\Delta\sigma_{max}$ で得られた $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_{w0}-D$ データを用いて行なっている。

4.(2)~4.(4)節で示したように、200万回疲労強度が低くなるにしたがって、限界応力範囲と疲労損傷度の関係が下に凸な関係、すなわち指数  $c$  の値が小さくなる傾向が認められた。図-11に指数  $c$  と200万回疲労強度 $\Delta\sigma_{200}$ の関係を示す。 $c$  と $\Delta\sigma_{200}$ は両対数

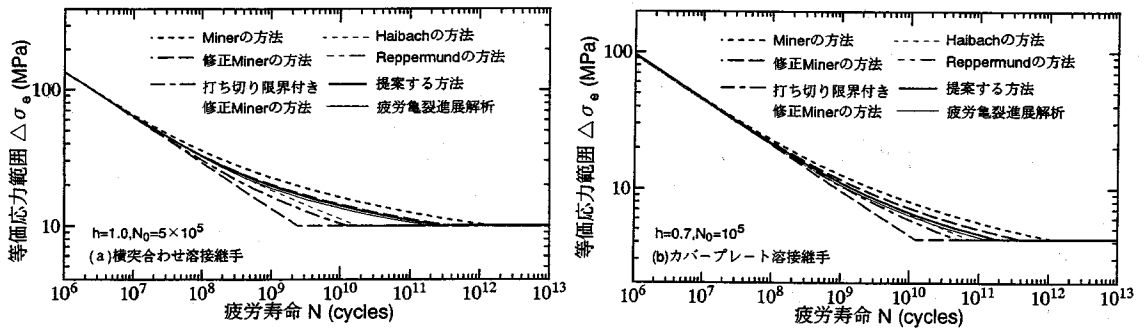


図-12 等価応力範囲と疲労寿命の関係

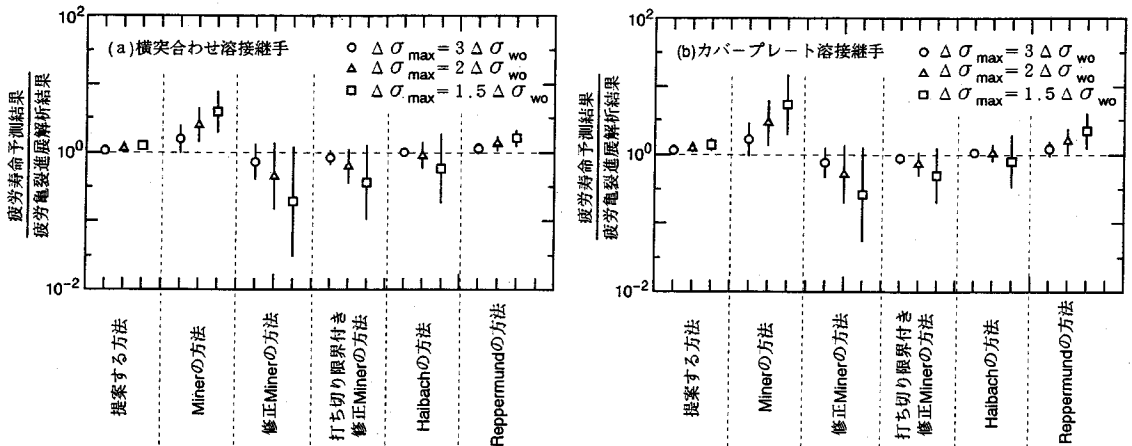


図-13 各方法による寿命推定値の比較

紙上でほぼ直線関係にあり、これを最小2乗法を用いて直線回帰すれば、次式が得られる。

$$c = 2.80 \times 10^{-2} \Delta\sigma_{200}^{0.83} \quad (10)$$

図中の破線は式(10)で示される関係を示したものである。

## 5. 疲労寿命評価方法の提案と他の方法との比較

### (1) 提案する疲労寿命評価方法

本研究では、以下の手順で変動振幅応力下の疲労寿命評価を行なうことを提案する。

- ① 対象とする継手の一定振幅応力試験より応力範囲 $\Delta\sigma$ ・疲労寿命 $N$ 関係、200万回疲労強度 $\Delta\sigma_{200}$ と疲労限度 $\Delta\sigma_{wo}$ を求める。
- ② 求めた $\Delta\sigma_{200}$ を式(10)に代入し、指数 $c$ を求める。
- ③ ①で求めた $\Delta\sigma_{wo}$ と②で求めた指数 $c$ を(9)式に代入し、限界応力範囲 $\Delta\sigma_w$ と疲労損傷度 $D$ の関係を求める。

- ④ 式(9)から求められる $\Delta\sigma_w$ 以上の応力範囲成分 $\Delta\sigma_i$ とその相対頻度 $\gamma_i$ および①から求められる $\Delta\sigma_i$ のみが一定振幅で繰り返されたときの疲労寿命 $N_i$ から疲労損傷度 $D$ を求める。

$$D = \sum (\gamma_i / N_i)$$

(ただし、 $\Delta\sigma_i \leq \Delta\sigma_w$  のとき、 $N_i = \infty$ )

- ⑤ ④を $D$ が1に達するまで繰り返す。

なお、このような計算を行なうと、疲労寿命と等しいだけの繰返し計算が必要となる。計算を簡略化するためには、相対頻度 $\gamma_i$ にある繰返し数 $\Delta n$ を乗じることが考えられるが、 $\Delta n$ は全寿命の1/100以下となるように設定することが望ましい。

### (2) 他の方法との比較 (疲労亀裂進展解析結果)

図-12(a), (b)に横突合せ溶接継手、カバープレート溶接継手を対象とした疲労亀裂進展解析より求めた等価応力範囲 $\Delta\sigma_e$  (すべての応力範囲成分を対象に計算したもの)と疲労寿命 $N$ の関係を、前項で提案した方法および2章で紹介した既存の方法で推定した $\Delta\sigma_e$ - $N$ 関係と比較した結果を示す。これらの



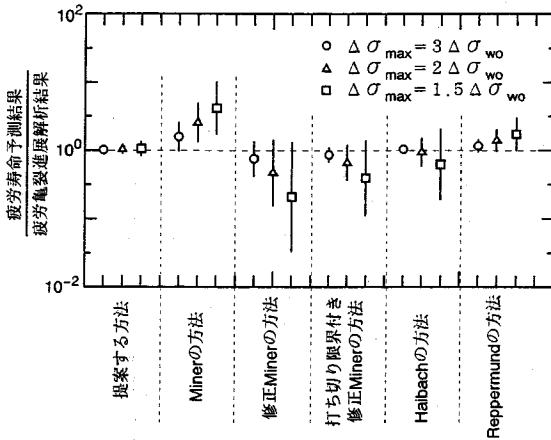


図-14 各手法による寿命推定値の比較 (全モデル)

計算に用いた応力範囲頻度分布は、横突合せ溶接継手で Weibul 分布のパラメータを  $h=1.0$ ,  $N_0=5 \times 10^5$ , カバープレート溶接継手で  $h=0.7$ ,  $N_0=2 \times 10^5$  とすることにより与えている。横突合せ溶接継手、カバープレート溶接継手とも、等価応力範囲が比較的大きい領域では、いずれの方法とも疲労寿命予測値は疲労亀裂進展解析結果とよく一致している。しかし、等価応力範囲が低くなると、Minerの方法ではかなり長寿命側、また修正Minerの方法では短寿命側すぎる寿命予測となっている。また、Haibachの方法、Reppermundの方法では若干長寿命側の予測となっている。打ち切り限界付き修正Minerの方法では、横突合せ溶接継手に対して長寿命側、カバープレート溶接継手に対して若干短寿命側の予測となっている。それらに比べて、本研究で提案する方法の寿命予測値は、すべての等価応力範囲レベルで疲労亀裂進展解析結果とよく一致している。

低い等価応力範囲応力レベルでの各方法による寿命予測値の相違を明らかにするために、応力範囲頻度分布の最大応力範囲  $\Delta\sigma_{max}$  が一定振幅応力下での疲労限度の1.5倍、2倍、3倍となる条件で3.2節に示したすべての応力範囲頻度分布 (40種類) に対して疲労寿命を予測した結果を図-13(a), (b)に示す。図(a)は横突合せ溶接継手、図(b)はカバープレート溶接継手に対する結果を示している。図の縦軸は、それぞれの方法で予測した寿命を疲労亀裂進展解析から求めた寿命で無次元化している。図中のマークは無次元化した寿命の平均値、縦線は無次元化した寿命の平均  $\pm 2$  標準偏差の範囲を示している。提案する方法による無次元化寿命は、いずれの継手においてもほぼ1であり、寿命予測値は疲労亀裂進展解析結果とよく一致している。また、そのばらつきも

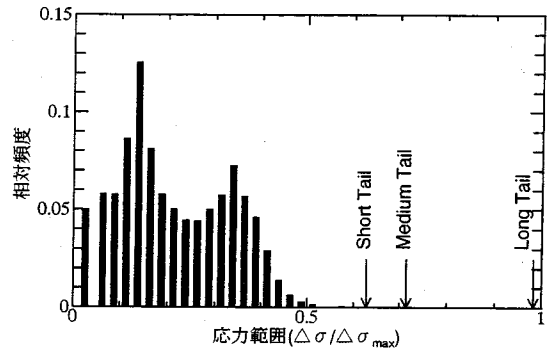


図-15 Melhem らの実験で用いられた応力範囲頻度分布

非常に小さい。それに比べて、Minerの方法ではかなり長寿命側の予測となっており、平均で3~10倍程度の予測結果となっている。また、修正Minerの方法、打ち切り限界付き修正Minerの方法、Haibachの方法、Reppermundの方法を用いても、無次元化した寿命の平均値が1から離れることも多く、また予測寿命のばらつきも大きい。以上の傾向は、 $\Delta\sigma_{max}$  が小さいほど、顕著となっている。

図-14は、すべての継手モデル (14種類)、すべての応力範囲分布 (40種類) に対する解析結果に対して図-13と同様の整理を行なった結果を示している。したがって、1つのマークおよび縦線は  $14 \times 40 = 560$  の解析結果に基づくものである。図-13に示した結果と同様に、提案方法による無次元化寿命の平均はほぼ1であり、そのばらつきも他の予測方法による無次元化寿命に比べて小さい。

### (3) 他の方法との比較 (実験結果)

Melhem ら<sup>7)</sup>は荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手 (主板厚 9.5mm, 付加板厚 9.5mm, 板幅 50.8mm) を用いて、一定振幅応力ならびに変動振幅応力下で疲労試験を行なっている。ここで用いられた変動振幅応力は、米国でのトラックの重量分布に基づき、それらがスパン30mの単純桁橋を通過するとき生じるスパン中央での曲げモーメント変動による応力を模擬したものである。その変動振幅応力の応力範囲頻度分布を図-15に示す。図の横軸は、個々の応力範囲を最大応力範囲で無次元化したものである。さらに、この応力範囲頻度分布は、Long Tail 分布、Medium Tail 分布、Short Tail 分布の3つに分けられている。Long Tail 分布、Medium Tail 分布、Short Tail 分布は、それぞれ 95tf, 68tf, 45tf 以上の重量のトラックは走行しないとして求められたものである。図-15中の矢印は、それぞれの分布での応力範

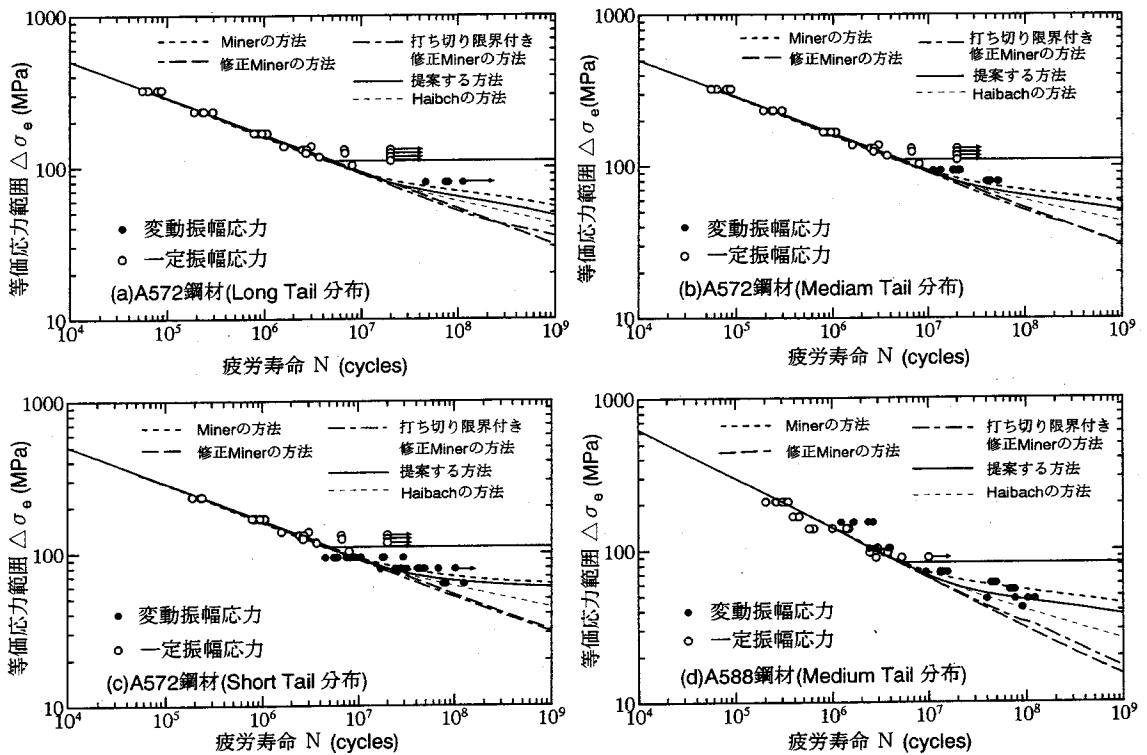


図-16 各手法による寿命推定値と Melhem らによる実験結果との比較

围の最大値を示している。なお、供試鋼材としては、A572鋼、A588鋼の2種類が用いられており、A572鋼を母材とした継手については3つの応力範囲頻度分布のすべて、A588鋼を母材とした継手についてはMedium Tail分布のみで疲労試験が行なわれている。

図-16(a), (b), (c), (d)に Melhem らによる実験結果と、それに対して5.(1)節で提案した方法および2章で紹介した既存の方法によって推定した、等価応力範囲 $\Delta\sigma_e$  (すべての応力範囲を含む)と疲労寿命の関係を示す。いずれの実験においても変動振幅応力下の $\Delta\sigma_e$ - $N$ 関係が $10^7$ オーダーまで求められており、これまでに行なわれている変動振幅応力試験の中ではかなり長寿命域でのデータが示されている。この領域までは、各方法により推定した $\Delta\sigma_e$ - $N$ 関係に顕著な差はないものの、図(a)に示すA572鋼材・Long Tail分布、図(b)に示すA572鋼材・Medium Tail分布では、一般に長寿命側の推定になるとされているMinerの方法による推定結果が実験結果に最も近く、次いで本研究で提案する方法による推定結果が近い。また、図(c)に示すA572鋼材・Short Tail分布および図(d)に示すA588鋼材・Medium Tail分布では、提案する方法による推定結

果が実験結果の傾向を最もよく表わしている。また、修正Minerの方法、打ち切り限界付き修正Minerの方法、Haibachの方法では短寿命側の予測となっている。なお、これらの図ではReppermundによる推定結果を除いているが、その推定結果は本研究で提案する方法による推定結果とほぼ同じであった。

## 6. 結論

様々な応力範囲頻度分布形状を有する変動振幅応力下で、鋼構造物に用いられる代表的な継手を対象とした疲労亀裂進展解析を行なうことにより、疲労損傷度の進行にともなう限界応力範囲(疲労損傷に寄与する応力範囲の限界値)の変化について検討し、その結果に基づいて変動振幅応力を受ける鋼部材の疲労寿命評価方法を提案した。

ここで得られた結果を要約すると以下のようである。

- (1) 限界応力範囲と疲労損傷度の関係は、継手内の応力分布に強い影響を受けるため、継手の板厚、溶接止端の形状、継手の形式により変化する。

- (2) 各継手の疲労損傷度と限界応力範囲の関係は、200万回疲労強度との相関が高く、次式で表わすことができる。

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_{w0} (1 - D^c)$$

$$c = 2.80 \times 10^{-2} \Delta\sigma_{200}^{0.83}$$

$\Delta\sigma_w$  : 限界応力範囲

$\Delta\sigma_{w0}$  : 一定振幅応力下の疲労限度

D : 線形累積被害則に基づく疲労損傷度

$\Delta\sigma_{200}$  : 継手の200万回疲労強度

- (3) 結論(2)の式を線形累積被害則に組込んだ変動振幅応力下の疲労寿命評価方法を提案した。提案する方法の有効性を、本方法による寿命推定値を疲労亀裂進展解析結果と Melhem らによる実験結果と比較することにより確かめた。

#### 参考文献

- 1) 例えば、城野政弘：変動荷重下の疲労強度（西谷弘信編、疲労強度学、第5章）、オーム社、1985。
- 2) 日本鋼構造協会疲労委員会：日本鋼構造協会疲労設計指針・同解説(案)、JSSC、Vol.10、No.101、pp.22-34、1974。
- 3) BS5400, Part 10, *Code of Practice for Fatigue*, 1980。
- 4) ECCS : *Recommendations for Fatigue Design of Steel Structures*, 1985。
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1989。
- 6) 例えば、Miki,C., Toyoda,Y., Mori,T. and Enokido,N. : Fatigue of Large-Scale Welded Girders under Simulated Highway Loading, *Proc. of JSCE*, No.422, pp.165-173, 1990。
- 7) 例えば、Yamada,K. and Cheng,X. : Fatigue Life Analysis on Welded Joints under Various Spectrum Loadings, *Journal of Structural Engineering*, Vol.39A,

- pp.947-957, 1993。
- 8) Gurner,T.R. : Fatigue Test on fillet welded joints in steel under simulated wide band type loading, *Welding Institute Members Report 365/1988*, The Welding Institute Technology, pp.1-44, 1988。
  - 9) 森猛：変動振幅応力下の疲労寿命評価方法の検討、構造工学論文集 Vol.37A, pp.1199-1209, 1991。
  - 10) Melhem,H.G. and Klippstein,K.H. : A study on Variable Amplitude Load Fatigue (work-in-Progress), *Research Report No.ST-6*, Department of Civil Engineering, University of Pittsburgh, 1990。
  - 11) 伊藤文人：実働荷重による疲労寿命設計（岡本舜三編、鋼構造の研究、第五章）、技報堂出版、pp.159-165, 1987。
  - 12) 河本實：金属の疲れと設計、コロナ社、1977。
  - 13) 三木千寿、坂野昌弘：疲労亀裂進展解析による疲労設計曲線の検討、構造工学論文集、Vol.36A, pp.409-416, 1990。
  - 14) Reppermund,K. : Ein Konzept zur Berechnung der Zuverlässigkeit bei Ermüdungsbeanspruchung, *Stahlbau*, 4/1986, pp.104-112, 1984。
  - 15) 飯田国広、洪性作：p分布荷重による累積疲労被害（第二報）、造船学会論文集、第152号、pp.372-380, 1982。
  - 16) Det Norske Veritas : *Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units*, Classification Note No.30.2, 1984。
  - 17) 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、1990。
  - 18) Okumura,T., Nishimura,T., Miki,C. and Hasegawa,K. : Fatigue Crack Growth in Structural Steel, *Proc. of JSCE*, No.322, pp.175-178, 1982。
  - 19) Miki,C., Mori,T., and Tajima,I. : Effect of Stress Ratio and Tensile Residual Stress on near Threshold Fatigue Crack Growth, *Proc. of JSCE*, No.386, pp.383-392, 1986。
  - 20) 三木千寿：疲労モデル（日本鋼構造協会編、公共構造物の信頼性評価、5.2節）、JSSCレポート、No.13, pp.89-109, 1989。

(1995.4.14 受付)

## PROPOSAL OF FATIGUE LIFE EVALUATION METHOD FOR STEEL STRUCTURAL DETAILS UNDER VARIABLE AMPLITUDE STRESSES

Takeshi MORI and Nobuhiko HAYASHI

Fatigue crack propagation analyses for typical steel structural details are performed under various types of variable amplitude stresses which may approximately express the stress spectrum in various steel structures. On the basis of the analytical results, the relationship between threshold stress range to give the fatigue damage and the degree of fatigue damage is verified. By combining the relationship with the linear cumulative damage conception, a new procedure is proposed to predict the fatigue life under variable-amplitude stresses. Fatigue life estimated by the proposed procedure is compared with that predicted by previous procedures such as Miner's law, modified Miner's law, Haibach's procedure and so on, and with experimental results by Melhem et al.