

変動応力下の疲労寿命評価方法の検討

Fatigue Life Evaluation Procedure for Fillet Welded Joints
under Variable-Amplitude Stresses

森 猛*

By Takeshi Mori

Fatigue crack propagation analyses for fillet welded joints are performed under various types of variable-amplitude stresses which may approximately express the stresses 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 damage conception, a new procedure is proposed to predict the fatigue life under variable-amplitude stresses. Fatigue life estimated by the new procedure is compared with that predicted by previous procedures (Miner's law, modified Miner's law, Haibach's procedure, etc.) and with experimental results.

1. はじめに

橋梁や海洋構造物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、これらの構造物に作用する荷重は一定ではなく、様々な大ききで異なる位置に作用する。そのため、荷重により構造部材に生じる応力も一定振幅であることは稀であり、多くの場合複雑な波形となる。このような変動応力下での疲労強度あるいは疲労寿命の評価は通常以下の手順で行なわれている。

① 変動応力に対して rain-flow 法などの応力計数法を適用し、応力範囲の頻度分布を求める。

② ①で求めた応力範囲頻度分布および一定振幅応力試験より求めた応力範囲と疲労寿命の関係を基

に、Palmgren-Miner の方法などの線形累積被害則を利用して疲労強度あるいは疲労寿命を求める。線形累積被害則としては、数多くの方法が提案されているが、中でも Palmgren-Miner の方法、修正 Miner の方法、Haibach の方法がよく用いられてきた¹⁾。これらの方法では、一定振幅応力試験より得られる疲労限度以上の応力範囲の取扱いは同じであり、疲労限度以下の応力範囲の取扱いのみ異なる。各方法とも、実験結果との比較がなされ、その適否が検討されている。しかし、試験に用いられた変動応力は限られており、また試験で求められた寿命も 10^7 以下がほとんどである。そのため、どの方法が種々の変動応力下の疲労強度、特に長寿命域での疲労強度の評価に最も適しているか、また応力範囲の頻度分布の形状により疲労寿命がどのように変化するかについては一般的な結論は得られていないようである。

* 工博 法政大学講師 工学部土木工学科 (〒184 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

鋼構造物中で特に疲労が問題となる溶接継手部においては、疲労亀裂の進展によって疲労寿命の大半が占められることから、その寿命予測には破壊力学に基づいた疲労亀裂進展解析が有効とされており、この方法により種々の形式の溶接継手の疲労寿命が精度よく推定できることが多くの研究により確かめられている²⁾。また、変動応力下での寿命予測に対しても疲労亀裂進展解析が有効とされている³⁾。

本研究では、鋼構造物材で想定される応力範囲頻度分布下で疲労亀裂進展解析を行ない、疲労亀裂進展寿命に及ぼす応力範囲頻度分布形状の影響を明らかにするとともに、解析結果との比較により、これまでに提案されている疲労強度評価方法の適用性について検討する。また、疲労亀裂の成長とそれに寄与する応力範囲の限界値との関係を明らかにすることにより、新たに変動応力を受ける溶接継手の疲労強度評価方法を提案する。

2. 応力範囲頻度分布

応力範囲の頻度分布は、作用する荷重の大きさ、位置、頻度および着目部の断面力の影響線に支配される。そのため、応力範囲頻度分布は、構造物の種類や構造物材が限定され、またその使用状況が想定されれば、ある程度推定することが可能である。石油掘削用の海洋構造物を対象としたノルウェーの設計基準 DNV⁴⁾ やクレーン鋼構造物を対象とした西ドイツの設計基準 DIN-15018⁵⁾ では応力範囲頻度分布を基に疲労照査を行なう手法が示されている。また、橋梁の設計を対象とした英国の規準 BS5400⁶⁾ では、道路橋および鉄道橋での応力範囲頻度分布を求めるための標準的な荷重の分布が示されている。

DNVでは(1)式に示す Weibull 分布を用いて応力範囲の累積頻度分布を与えている。

$$Q(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{\max}) \exp[-(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{\max})^h \ln N_0] \quad (1)$$

N_0 : 想定する寿命での応力繰返し数あるいは変動応力の再現期間内での応力繰返し数

h : 累積頻度分布の形状を表すためのパラメータ

この分布では2つのパラメータ h 、 N_0 を用いており、これらのパラメータの値を変えることにより種々の応力範囲頻度分布を与えることが可能である。図1に(1)式で与えられる累積頻度分布を示す ($h=0.5 \sim 2.0$ 、 $N_0=10^4, 10^8$)。これらの内、 $h=2$ は応力範囲の頻度分布が Rayleigh 分布、 $h=1$ は頻度分布が指数分布であることを示している。 N_0 は分布の裾切りに対応する。図1の縦軸は着目する応力範囲と最大の応力範囲の比、横軸は超過確率である。

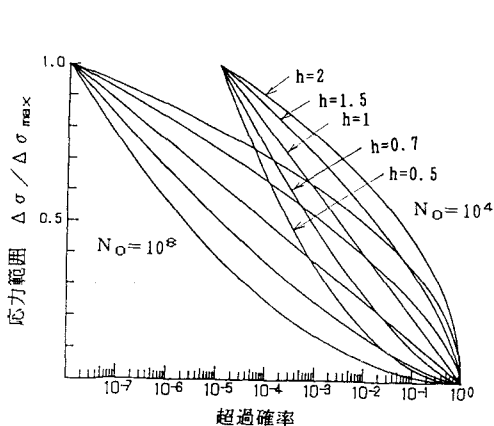


図1 累積応力範囲頻度分布 (Weibull分布)

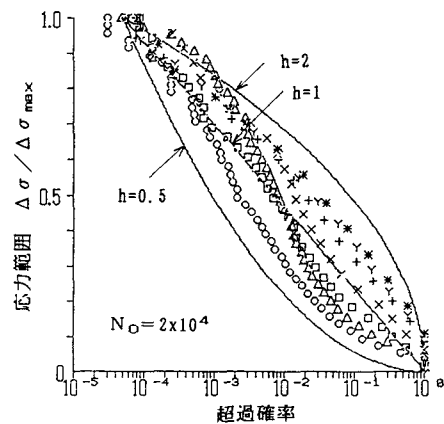


図2 実橋で測定された応力範囲頻度分布

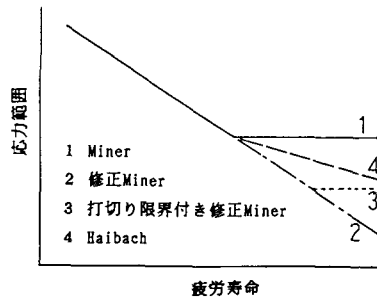


図3 疲労寿命評価方法

鋼橋での応力範囲頻度分布は、米国での実測結果をもとにほぼ Rayleigh 分布に従うとされていた。しかし、最近の我が国での実測結果⁷⁾および実交通のシミュレーションと影響線を用いた解析結果⁸⁾によれば Rayleigh 分布よりもさらに低応力範囲側に偏った分布になるとされている。図2は建設省により測定された応力範囲の累積頻度分布の例⁷⁾を示している。これらは、版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ィフナーに貼付したひずみゲージによる24時間の測定結果である。同図に示すように、測定結果は $h = 2$ および $h = 0.5$ の Weibull 分布の間にある。

3. 変動応力下での疲労寿命予測（これまでの方法）

(1) 線形累積被害則

変動応力の応力範囲成分を $\Delta \sigma_i$ ($i=1, 2, \dots$)、その頻度を n_i とおき、 $\Delta \sigma_i$ が単調に繰返されたとき（一定振幅応力）の寿命を N_i とする。 $\Delta \sigma_i$ が n_i 回繰返されたときの疲労損傷度を n_i/N_i とし、その合計 D が

$$D = \sum (n_i / N_i) = 1 \quad (2)$$

となった時に疲労破壊が生じると考える。このとき、 $\Delta \sigma_i$ が一定振幅応力試験より得られる疲労限度以下であれば $N_i = \infty$ とする（図3参照）。これが Palmgren-Miner の方法（以後、単に Miner の方法と呼ぶ）と呼ばれる変動応力下での疲労寿命予測方法である。

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と疲労亀裂が大きくなり、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すること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予測値を与えることになる。これを補正するために考え出されたのが修正 Miner の方法および Haibach の方法である。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 ∞ とするのではなく、図3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、 N_i を求め、それを(2)式に代入することにより疲労寿命を求める。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結果となる。そのため、変動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⁹⁾。最近、三木ら¹⁰⁾は疲労亀裂進展解析の結果に基づき打ち切り限界の値について検討している。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マイナーの方法と呼ぶ。

Haibach の方法では、疲労限度以上の領域での $\Delta \sigma - N$ 関係の傾きが $-1/m$ で与えられるとき、疲労限度以下の領域での $\Delta \sigma - N$ 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応力範囲の限界値 $\Delta \sigma_{wc}$ が、疲労損傷が大きくなるしたがって低下する、

$$\Delta \sigma_{WC} = \Delta \sigma_{WO} (1 - D)^{1/(m-1)} \quad (3)$$

$\Delta \sigma_{WO}$: 損傷を受けていない継手の疲労限度

D : 疲労損傷度

m : 疲労限度以上の領域での $\Delta \sigma - N$ 関係の傾き表す定数

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

$$D = \Sigma n_i / N_i \quad (4)$$

n_i : 応力繰返し数 (すべての応力範囲成分を含む)

N_i : 疲労寿命 (すべての応力範囲成分を含む)

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、証明されていない。Reppermund¹¹⁾ は、(4)式の仮定が不適切であるとして、(3)式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。また、飯田ら¹²⁾ は(3)式で示される疲労損傷の進行に伴う打ち切り限界の変化について検討している。本研究の第一の目的は、疲労亀裂進展解析を用いて(3)式で与えられるような疲労損傷度と打ち切り限界の関係を明らかにすることにある。

我が国の国鉄建造物設計標準では修正 Minerの方法、英国の橋梁設計標準 (BS5400) では Haibachの方法、欧州の鋼構造物疲労設計指針 (ECCS) では Haibach の方法に応力範囲の打ち切り限界を加えて変動応力下での疲労強度評価を行なうこととしている。また、日本鋼構造協会疲労設計指針(案)では三木らの検討に基づく打ち切り限界付き修正 Minerの方法が用いられている。

(2) 等価応力範囲

すべての応力範囲レベルに対して、応力範囲 $\Delta \sigma$ と疲労寿命 N の関係が

$$\Delta \sigma^m \cdot N = C \quad (C: \text{定数}) \quad (5)$$

で与えられるとすれば、疲労損傷度の和は、

$$\Sigma n_i / N_i = \Sigma \Delta \sigma_i^m \cdot n_i / C \quad (6)$$

となる。ある応力範囲 $\Delta \sigma_e$ を考え、それが Σn_i 回作用したときの疲労損傷度 ($\Delta \sigma_e^m \cdot \Sigma n_i / C$) が (2) 式と等しい場合に、 $\Delta \sigma_e$ は等価応力範囲と呼ばれている。

$$\Delta \sigma_e = (\Sigma \Delta \sigma_i^m \cdot n_i / \Sigma n_i)^{1/m} \quad (7)$$

すなわち、等価応力範囲 $\Delta \sigma_e$ は応力範囲の m 乗平均値の m 乗根として与えられる。したがって、修正マイナーの方法を用いる場合、 $\Delta \sigma_e - N$ 関係は疲労損傷を計算するための $\Delta \sigma_e - N$ 関係と一致する。同じ疲労損傷度を与えるという定義に従えば、Haibach の方法を用いる場合、等価応力範囲を(7)式から計算することはできないが、簡単のため、変動応力を代表するパラメータとして(7)式で定義する $\Delta \sigma_e$ が用いられることが多い。この場合、 $\Delta \sigma_e - N$ 関係は応力範囲頻度分布により変化する。また、Miner の方法、打ち切り限界付き修正マイナーの方法を用いる場合も同様である。この応力範囲頻度分布による推定寿命の変化の様子を調べることも本研究の目的である。

4. 疲労亀裂進展解析

(1) 解析条件

解析対象は図4に示す荷重非伝達型のリブ十字溶接継手である。主板の厚さは25mm、幅は500mm、リブ板の厚さは16mmである。また、すみ肉溶接のサイズは8mm、溶接止端の曲率半径0.5mm、開き角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であり、それを板幅中央に設置した。

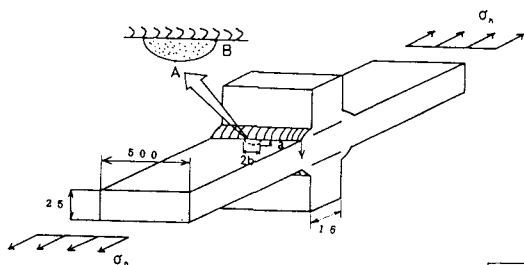


図4 疲労亀裂進展解析モデル

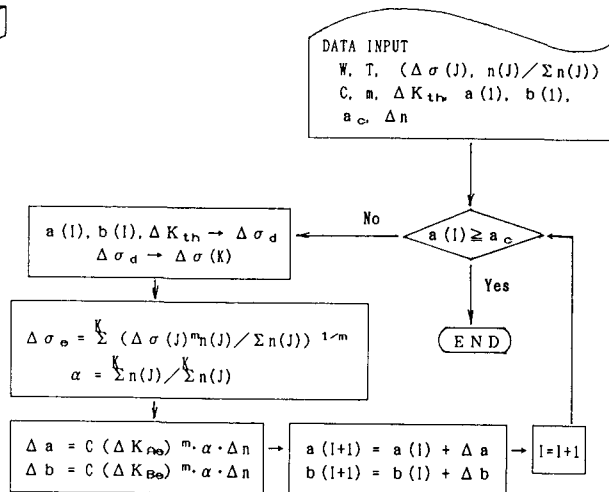


図5 疲労亀裂進展解析の手順

また、限界亀裂の深さは板厚の80%とした。疲労亀裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係は次式で表すこととした。

$$\begin{aligned} da/dN &= 5.4 \times 10^{-12} (\Delta K)^3 & \Delta K > \Delta K_{th} \\ da/dN &= 0 & \Delta K \leq \Delta K_{th} \end{aligned} \quad (8)$$

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

(8)式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¹³⁾。また、疲労亀裂進展に対する下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} (2MPa $\sqrt{\text{m}}$)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¹⁴⁾。

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4のA点)での応力拡大係数範囲 ΔK_A および幅方向前縁(図4のB点)での応力拡大係数 ΔK_B は次式より求めた。

$$\begin{aligned} \Delta K_A &= F_{eA} \cdot F_{sA} \cdot F_{tA} \cdot F_{gA} \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \\ \Delta K_B &= F_{eB} \cdot F_{tB} \cdot F_{gB} \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (9)$$

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

解析に用いた応力範囲の累積頻度分布は、(1)式に示す $h = 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0$ の2母数ワイブル分布である。また、 N_0 は $10^4, 2 \times 10^4, 5 \times 10^4, 10^5, 2 \times 10^5, 5 \times 10^5, 10^6, 10^8$ とした。したがって、ここで対象とした応力範囲の累積頻度分布は40種類である。

(2) 解析方法

疲労亀裂進展解析の流れを図5に示す。

- ① 初期亀裂、限界亀裂、疲労亀裂進展速度表示式、応力範囲の累積頻度分布の入力
- ② 下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} を基に与えられた亀裂に対応する限界応力範囲を求める。

- ③ 限界応力範囲以上の応力範囲の分布に基づき、等価応力範囲を求める。また、限界応力範囲以上の応力範囲が占める繰返し数の割合を求める。
- ④ 疲労亀裂進展表示式を用いて亀裂進展増分 (Δa , Δb) を計算する。
- ⑤ 進展後の亀裂を定義する。

(3) 解析結果

図6に解析結果を示す。図の縦軸は等価応力範囲、横軸は計算寿命である。なお、応力範囲の累積頻度分布が(1)式で与えられる場合、等価応力範囲 $\Delta \sigma_e$ は次式より算出することができる。

$$\Delta \sigma_e = \alpha \cdot \Delta \sigma_{\max} \quad (10)$$

$$\alpha = [\Gamma(m/h + 1)]^{1/m} / (\ln N_0)^{1/h}, \quad \Gamma: \text{ガンマ関数}$$

図6(a), (b)はそれぞれ $N_0 = 10^4$, 10^6 の結果、図6(c), (d), (e)は $h = 2, 1, 0.5$ の結果である。また、これらの図中には一定振幅応力下での応力範囲・疲労寿命関係の計算結果も示している。一定振幅応力下での $\Delta \sigma - N$ 関係は次式で与えられる。

$$\Delta \sigma^3 \cdot N = 2.148 \times 10^{12} \quad (\Delta \sigma > \Delta \sigma_{w0}) \quad (11)$$

$$N = \infty \quad (\Delta \sigma \leq \Delta \sigma_{w0})$$

$\Delta \sigma_{w0}$: 疲労限度 (51.8MPa)

等価応力範囲で整理した場合の変動応力下での疲労限度 $\Delta \sigma_{we}$ は、変動応力内の最大の応力範囲 $\Delta \sigma_{\max}$ が、一定振幅応力下での疲労限度 $\Delta \sigma_{w0}$ と等しくなるときであり、(10)式より、

$$\Delta \sigma_{we} = \alpha \cdot \Delta \sigma_{w0} \quad (12)$$

で与えられる。

等価応力範囲 $\Delta \sigma_e$ が一定振幅応力下での疲労限度 $\Delta \sigma_{w0}$ よりも大きい範囲では、いずれの変動応力においても、 $\Delta \sigma_e - N$ 関係は一定振幅応力下での $\Delta \sigma - N$ 関係とはほぼ一致している。図6(a), (b)に示すように、 $\Delta \sigma_e < \Delta \sigma_{w0}$ の領域では、 h の値のより $\Delta \sigma_e - N$ 関係がかなり異なっており、 h が小さいものほど $\Delta \sigma_e - N$ 関係の変化が緩やかで、短寿命側となっている。一方、 h を一定とし N_0 の影響をみた図6(c), (d), (e)では、 $\Delta \sigma_e < \Delta \sigma_{w0}$ の領域においても $\Delta \sigma_e - N$ 関係はほぼ一致しており、 N_0 の小さいものから順に(12)式で与えられる疲労限度に達している。

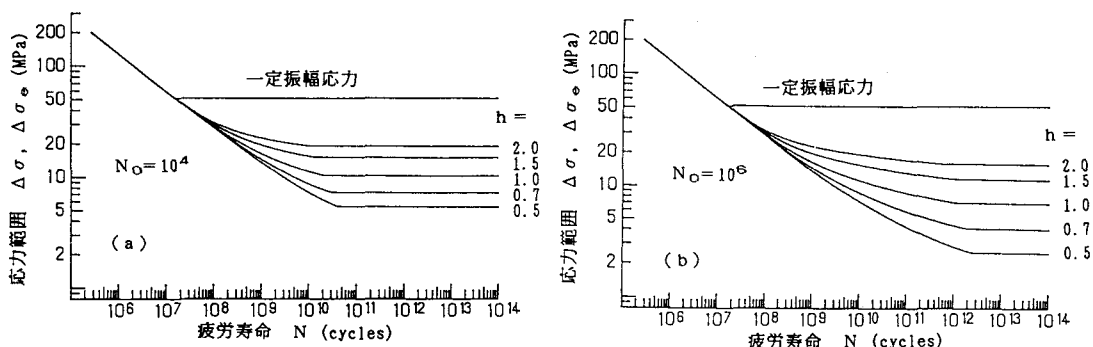


図6 疲労亀裂進展解析結果

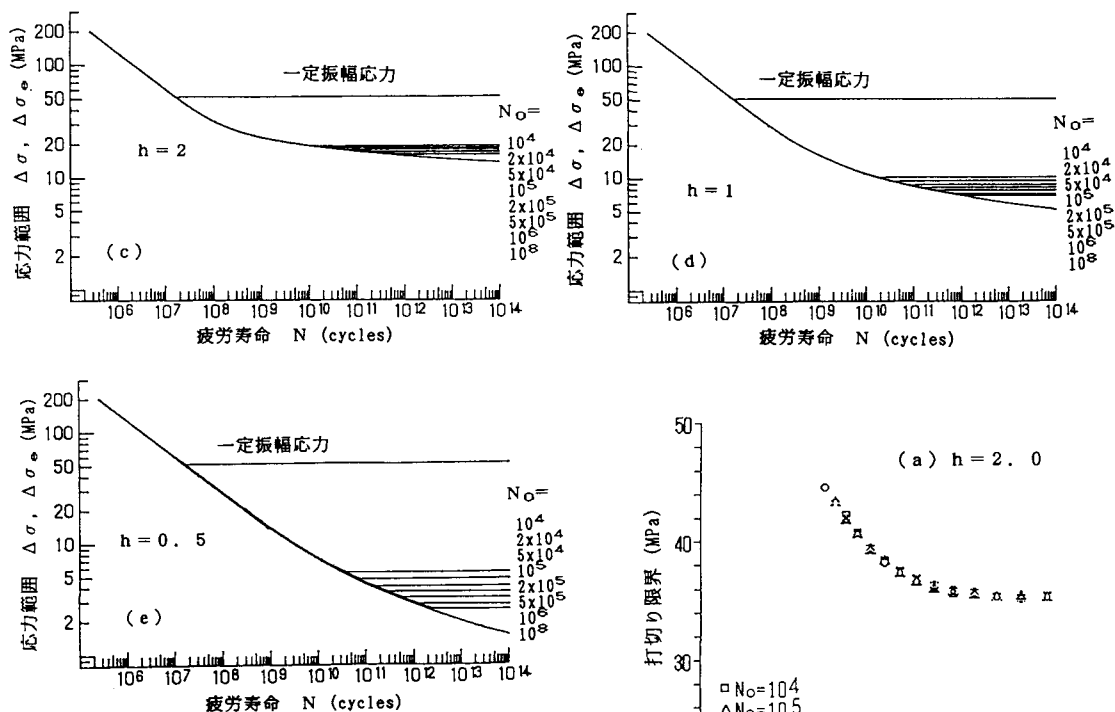


図6 疲労亀裂進展解析結果

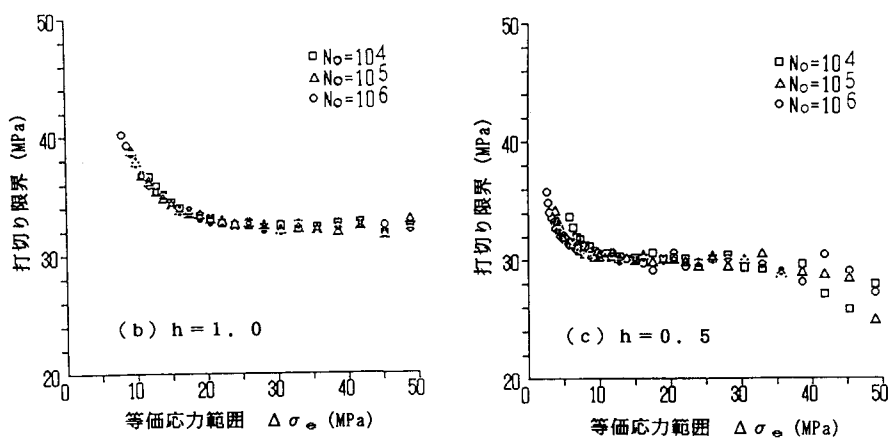


図7 応力範囲の打ち切り限界

(4) 応力範囲の打ち切り限界

三木らは、変動応力下での疲労亀裂進展解析結果に基づき、高応力範囲側から(3)式に従い疲労損傷度を計算し、それが1となる応力範囲レベルを求め、それを応力範囲の打ち切り限界とすることを提案している。図7(a), (b), (c)に $h = 0.5, 1.0, 2.0$ での応力範囲の打ち切り限界を示す。応力範囲打ち切り限界の N_0 の値による変化はほとんどないが、 h の影響を受け、低応力範囲側の応力頻度の高い $h = 0.5$ での打ち切り限界は $h = 2.0$ でのおよそ $2/3$ となっている。また、同じ応力範囲頻度分布であっても等価応力範囲の値により打ち切り限界はかなり変化している。なお、ECCSのように一定振幅応力疲労限度以下の領域での $\Delta\sigma - N$ 線の

傾きを緩やかにした場合の応力範囲の打ち切り限界はほぼ0であった。

5. 疲労強度評価方法の提案

(1) 疲労損傷の進行に伴う打ち切り限界の変化と疲労強度評価方法の提案

変動応力下においては、一定振幅応力下での疲労限度よりも低い応力範囲であっても、疲労亀裂が成長するにしたがって、言換えれば疲労損傷が進行するにしたがって疲労損傷に寄与するようになる。すなわち、図8に示すように疲労損傷が進行するにしたがって、疲労損傷に寄与する応力範囲の限界値（限界応力範囲 $\Delta\sigma_w$ ）は低下する。ここでは、この疲労損傷の進行に伴う応力範囲の打ち切り限界の変化を疲労亀裂進展解析から明らかにし、それを線形累積被害則に組込んだ変動応力下での疲労強度あるいは疲労寿命予測法を提案する。

図9は、疲労亀裂進展解析により求めた疲労損傷に寄与する応力範囲の限界値（限界応力範囲）と疲労損傷度Dの関係を示している。限界応力範囲 $\Delta\sigma_w$ は一定振幅応力下での疲労限度 $\Delta\sigma_{w0}$ で無次元化（ $\Delta\sigma_w / \Delta\sigma_{w0}$ ）しており、疲労損傷度Dは打ち切り限界以上の応力範囲に対して(2)式および(11)式を適用することにより求めている。図9(a)は応力範囲レベル（最大応力範囲 $\Delta\sigma_{max}$ ）、図9(b)、(c)は応力範囲頻度分布形状（Weibul分布のパラメータ h 、 N_0 ）の影響を示したものであるが、 $\Delta\sigma_w / \Delta\sigma_{w0}$ とDの関係はこれらの影響を受けず、ほぼ次式で表すことができる。

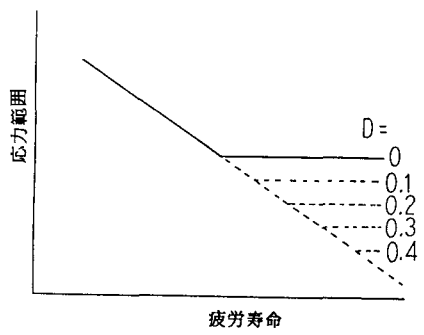
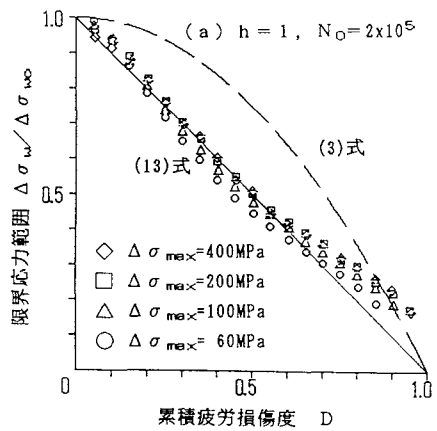


図8 疲労損傷に寄与する限界応力範囲の変化

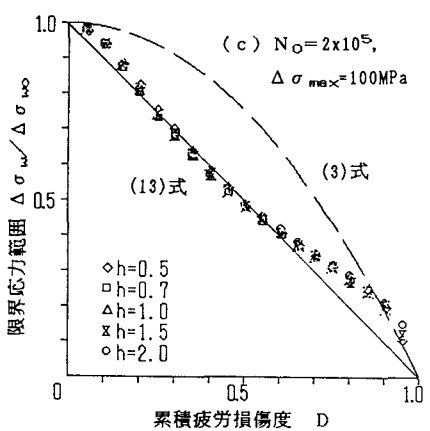
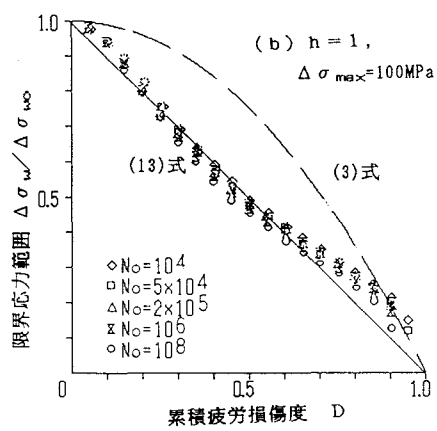


図9 限界応力範囲と疲労損傷度の関係

$$\Delta \sigma_w / \Delta \sigma_{w0} = 1 - D \quad (13)$$

図中の破線は (3) 式に示す Haibach および Reppermund の仮定にしたがって、 $\Delta \sigma_w / \Delta \sigma_{w0}$ と D の関係を示したものである。疲労亀裂進展解析結果との比較より Haibach および Reppermund が用いている仮定は危険側の予測を与えることがわかる。

(2) 疲労亀裂進展解析結果との比較

線形累積被害則に (13) 式に示す関係を考慮して計算した等価応力範囲 $\Delta \sigma_e$ と疲労寿命 N の関係および他の方法 (Minerの方法、修正Minerの方法、Haibachの方法、Reppermundの方法、打ち切り限界付き修正Minerの方法：図7より打ち切り限界を30MPaとした) により予測した $\Delta \sigma_e - N$ 関係を図10(a), (b), (c) に示す。当然のことではあるが、本研究で提案する疲労寿命予測方法は亀裂進展解析結果とほぼ一致している。それに対して Minerの方法ではかなり危険側の、また修正Minerの方法ではかなり安全側の予測値となっている。Haibachの方法と打ち切り限界付き修正Minerの方法では若干安全側の、Reppermundの方法では若干危険側の評価となっている。また、これらの方法による予測結果と亀裂進展解析結果との違いは応力範囲頻度分布により異なっている。

(3) 実験結果との比較

Albrechtら¹⁵⁾は、溶接方法を変えた2種類(ガスマージーク溶接、手溶接)の荷重非伝達型十字継手を用いて一定振幅応力および図11に示す応力範囲頻度分布を有する変動応力試験(ブロック载荷)を行なっている。継手主板の厚さは10mm、幅は26mmである。一定振幅応力試験では、(14), (15)式で示される $\Delta \sigma - N$ 関係が

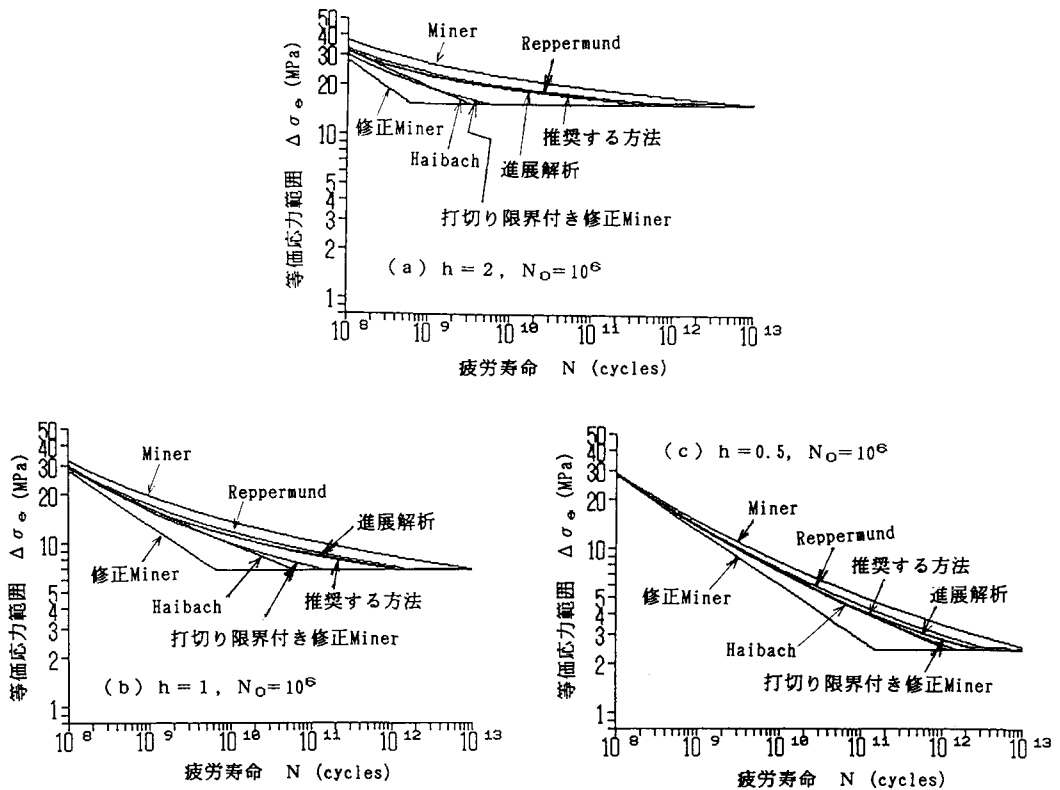


図10 各方法による疲労寿命予測結果

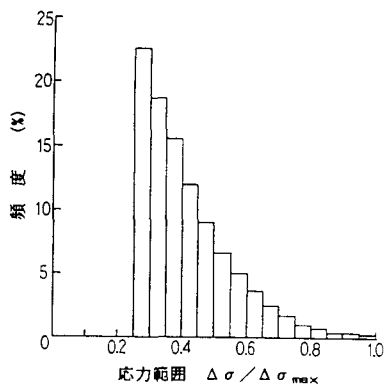


図11 試験に用いられた応力範囲頻度分布¹⁵⁾

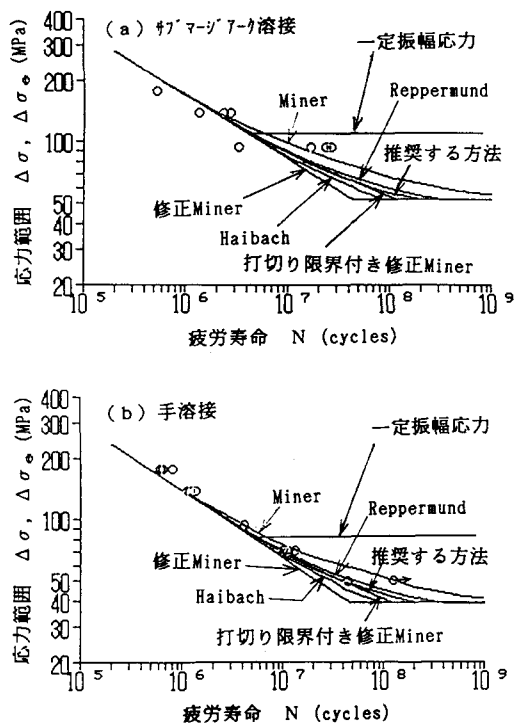


図12 変動応力疲労試験結果との比較

求められている。

$$\Delta \sigma^{3.23} \cdot N = 1.584 \times 10^{13} \quad (\text{ガスメタルアーク溶接}) \quad (14)$$

$$\Delta \sigma_{\infty} = 110 \text{ MPa}$$

$$\Delta \sigma^{3.04} \cdot N = 3.280 \times 10^{12} \quad (\text{手溶接}) \quad (15)$$

$$\Delta \sigma_{\infty} = 82 \text{ MPa}$$

図12(a), (b)に変動応力試験結果と各方法により予測した等価応力範囲 $\Delta \sigma_e$ と疲労寿命 N との関係を示す。なお、打ち切り限界付き修正 Miner の方法での応力範囲の打ち切り限界は、前章での結果を参考に疲労限度の58%とした。各方法での予測値に差が生じる低応力範囲領域での試験データは少ないものの、本研究で提案する方法による推定 $\Delta \sigma_e$ - N 関係は試験結果の傾向をよく表わしている。

6. まとめ

荷重非伝達型十字溶接継手を対象とした疲労亀裂進展解析に基づき、変動応力下の疲労寿命予測法について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 疲労亀裂進展解析より、疲労損傷に寄与する応力範囲の限界値（打ち切り限界）と疲労損傷度の関係が線形となることを示した。
- (2) (1)での関係を線形累積被害則に組込むことにより新しい変動応力下での疲労寿命予測法を提案した。
- (3) 提案する疲労寿命予測法は疲労亀裂進展解析結果とよく一致する。これに比べ、Minerの方法ではかなり危険側の、また修正Minerの方法ではかなり安全側の予測値を与える。また、Haibachの方法と打ち切り

限界付き修正Minerの方法では若干安全側の、Reppermundの方法では若干危険側の評価となる。

(4) 提案する疲労寿命予測法の適用性を実験結果との比較から確かめた。

本研究では、変動応力下での疲労強度を評価するための一つの考え方を示したが、本手法を一般化するには、板厚や溶接形状など継手の詳細を変えた解析や他の形式の継手に対する解析など、さらに多くの検討が必要と考えている。また、構造物に実際に生じるような変動荷重下の疲労試験データ、特に 10^7 回を超えるような長寿命域での疲労試験データが必要と考えている。

本研究は文部省科研費（奨励研究A）の補助を受けて行なったものである。

参考文献

- 1) 城野政弘：疲労強度学（西谷弘信 編）第5章、オーム社、1985.
- 2) 土木学会・破壊力学分会：土木工学における破壊力学の適用性、土木学会論文集、No. 380, pp. 13～26, 1987.
- 3) Miki, C., Murakoshi, J., Toyoda, Y. and Sakano, M. : Long Life Fatigue Behavior of Fillet Welded Joints under Computer Simulated Highway and Railroad Loading, Proc. of JSCE, No. 404, pp. 63～70, 1989.
- 4) Det Norske Veritas : Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units, Classification Notes, Note No. 30.2, 1984.
- 5) DIN 15018, Cranes · Steel Structures · Verification and Analyses, 1974.
- 6) BS5400, Part 10, Code of Practice for Fatigue, 1980.
- 7) 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、1986.
- 8) Miki, C., Goto, Y., Yoshida, K. and Mori, T. : Computer Simulation Studies on the Fatigue Load and Design of Highway Bridges, Proc. of JSCE, No. 356, 13～22, 1985.
- 9) 河本實：金属の疲れと設計、コロナ社、1977.
- 10) 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.
- 11) Reppermund, K. : Ein Konzept zur Berechnung der Zuverlässigkeit bei Ermüdungsbeanspruchung, Stahlbau, 1984
- 12) 飯田国広、Sungjo Hong : p分布荷重による累積疲労被害（第一報）、造船学会論文集、No. 148, pp. 268～273, 1980.
- 13) Okumura, T., Nishimura, T., Miki, C. and Hasegawa, K. : Fatigue Crack Growth in Structural Steel, Proc. of JSCE, No. 322, pp. 175～178, 1982.
- 14) Miki, C., Mori, T. and Tajima, J. : Effect of Stress Ratio and Tensile Residual Stress on near Threshold Fatigue Crack Growth, Proc. of JSCE, No. 386, pp. 383～392, 1986.
- 15) Albrecht, P. and Friedland, I. M. : Fatigue-Limit Effect on Variable-Amplitude Fatigue of Stiffeners, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST12, pp. 2657～2675, 1979.

(1990年10月12日受付)