

法政大学 正 員 森 猛

法政大学 学生員 ○若園 賢吾、前田 育彦

1. はじめに 本研究では、リブ十字溶接継手および面内ガセット溶接継手を対象とし、鋼構造部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、その結果に基づき変動応力下での疲労強度評価方法を提案する。

2. 疲労強度評価方法 変動応力下での疲労強度の評価は、変動応力に含まれる応力範囲の頻度分布を求め、それと基準となる応力範囲 $\Delta\sigma$ -疲労寿命 N 関係（通常一定振幅応力試験より求められる）を基に線形累積被害則を利用して行なわれるのが通常である。線形累積被害則としては、Minerの方法、修正Minerの方法、Haibachの方法がよく用いられてきた。Minerの方法では、図1に示すように、一定振幅応力試験により求められた $\Delta\sigma$ - N 関係をそのまま基準 $\Delta\sigma$ - N 関係として用いる。すなわち、一定振幅応力下での疲労限度以下の応力範囲成分は疲労損傷に寄与しないとしている。しかし、変動応力下においては、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2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。修正Minerの方法、Haibachの方法では、疲労限度以下の応力範囲成分の疲労損傷に寄与を考慮し、図1に示すような基準 $\Delta\sigma$ - N 関係を用いることとしている。しかし、これらの方法の物理的根拠は乏しい。

ここでは、図2に示すような疲労損傷の進行に伴う限界応力範囲 $\Delta\sigma_w$ 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評価方法を提案する。

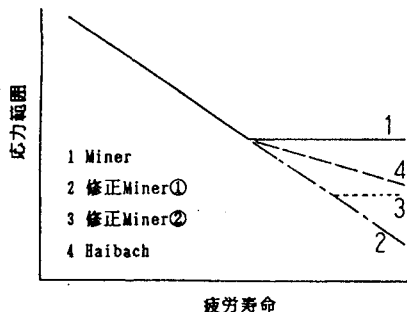


図1 疲労強度評価方法

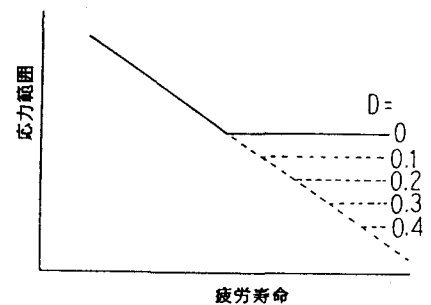


図2 疲労損傷に寄与する限界応力範囲の変化

3. 解析対象および解析方法 解析対象は図3に示す荷重非伝達型のリブ十字溶接継手と面内ガセット溶接継手である。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、それを板幅および板厚中央に設置した。また、限界亀裂の深さは板厚の80%および板幅の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。

$$da/dN = 5.4 \times 10^{-12} (\Delta K)^3 \quad (\Delta K > \Delta K_{th}) \quad da/dN = 0 \quad (\Delta K \leq \Delta K_{th}) \quad (1)$$

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

解析に用いた応力範囲の累積頻度分布は、次式に示す2母数Weibull分布であり、2つのパラメータ h （累積頻度分布の形状を表すためのパラメータ）、 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）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。

$$Q(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{max}) \exp[-(\Delta\sigma/\Delta\sigma_{max})^h \ln N_0] \quad (2)$$

ここでは、 $h=0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0$ 、 $N_0=10^4, 2 \times 10^4, 5 \times 10^4, 10^5, 2 \times 10^5, 5 \times 10^5, 10^6, 10^8$ とした計40種類の応力範囲の累積頻度分布を対象とした。

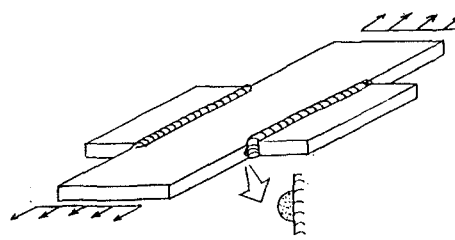
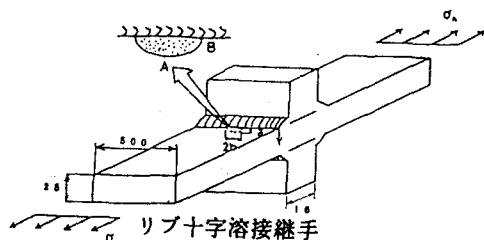


図3 疲労亀裂進展解析モデル

面内ガセット溶接継手

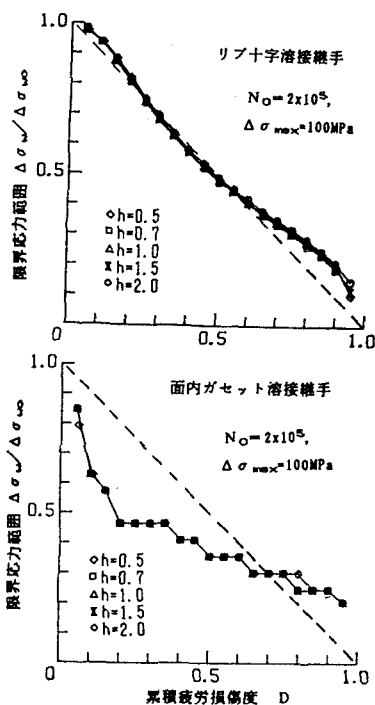


図4 限界応力範囲と疲労損傷度の関係

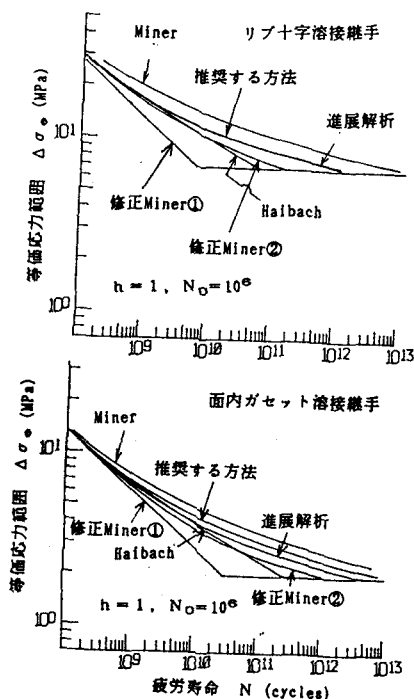


図5 各方法による疲労寿命予測結果

4. 解析結果 図4に疲労亀裂進展解析により求めた限界応力範囲 $\Delta\sigma_w$ と疲労損傷度 D の関係の例を示す。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求めている。 $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_{w0}$ と D の関係の応力範囲頻度分布形状による変化はほとんど認められない。また、ガセット継手は十字継手に比べて $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_{w0}-D$ 関係が若干下に凸となっているが、この関係は概ね次式で表すことができる。

$$\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_{w0} = 1 - D \quad (3)$$

線形累積被害則に(2)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①、Haibachの方法、修正Minerの方法②)により予測した $\Delta\sigma_e-N$ 関係の例を図5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①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②では若干安全側の評価となっている。なお、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おり、ここで提案する方法による予測結果は応力範囲頻度分布によらず亀裂進展解析結果と良く一致した。