

変動荷重を受けた溶接継手の長寿命域の耐久性評価

○名古屋大学

姫野 潤子

名古屋大学 正会員 山田健太郎

1. はじめに

道路橋では、一般に、死荷重に対する活荷重の割合が小さかったため、従来から疲労設計は行われていないが、実際に道路橋で応力範囲を測定してみると、極端に低応力側に偏った変動応力となることが知られている。しかし、1000万回以上の長寿命域での疲労試験を行うには、膨大な時間やコストなどを必要とするので疲労試験の結果から長寿命域での疲労設計曲線を設定するのはほとんど不可能である。

そこで、本研究では破壊力学の手法を用いて疲労き裂進展解析を行い、変動荷重を受ける溶接継手の長寿命域での疲労寿命を求めて、その解析結果と過去の試験結果とを比較・検討し、長寿命域での疲労寿命評価・設計法を提案する。

2. 破壊力学の手法によるき裂進展解析

疲労き裂進展速度式として、科学技術庁金属技術研究所（N R I M）によって提案された次式を用いた。

$$da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (\Delta K \geq \Delta K_{th}) \quad (1)$$

$$da/dN = 0 \quad (\Delta K < \Delta K_{th}) \quad (2)$$

材料定数は、 $C=9.69 \times 10^{-9}$ 、 $m=2.9$ 、 $\Delta K_{th}=2.5 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$ である。この式（1）を解くために疲労き裂進展解析プログラム VARFAT を使用した。

また、本研究では、各種要因のばらつきが疲れ寿命に及ぼす影響を評価するためにモンテカルロ・シミュレーションを用いた疲労き裂進展解析も行っている。ばらつきの要因となる初期条件（初期き裂長 a_0 、き裂形状 a/b 、溶接止端角 θ 、止端半径 ρ ）の実測値を測定し、モンテカルロ法を用いてその実測値の確率分布に従うように初期条件にばらつきを与える。ここでは、対数正規分布に従う初期値を1000個発生させ、1000個の組み合わせに対してそれぞれ疲労き裂進展解析を行っている。

3. 解析モデルおよび初期条件

解析モデルは、図1に示すような荷重非伝達型リブ十字溶接継手である。使用された鋼材は、ASTM A572 と ASTM A588で、それぞれわが国の SM490 鋼材と SMA490 鋼材に相当する。ASTM A588材は疲労試験が行われる前に4年間大気暴露されている。

ばらつきを考慮しない場合の初期条件：一般に、リブ十字型すみ肉溶接継手の場合、き裂は溶接止端部から半楕円き裂が発生するので、そのように仮定する。また、 $a_0=0.116\text{mm}$ 、 $a/b=1/2$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\rho=0$ と仮定している。

ばらつきを考慮した場合の初期条件：モンテカルロ法を用いて式（3）で表される対数正規分布に従うように初期条件を与える。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot A x} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x + B}{A} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

解析に用いた変動応力範囲分布を表1に示す。Albrechtらの実験では、1つの分布に対し197ブロックに分割しているが、本研究では解析を簡単にするため、21ブロックに縮小した。

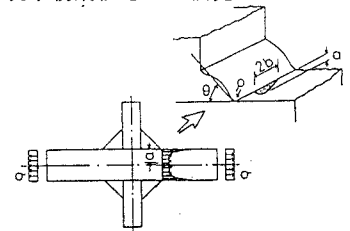


図1 解析モデル

表1 変動応力範囲分布

変動応力 範囲(MPa)	回数	変動応力 範囲(MPa)	回数
440.6	10	191.3	600
429.9	20	167.1	600
406.3	100	147.8	600
392.7	30	133.3	600
361.7	600	122.1	600
332.2	600	111.2	600
310.4	600	98.4	600
292.1	600	82.1	600
271.1	600	57.1	600
246.3	600	35.0	600
218.7	600		

4. 解析結果

図2～5に、初期条件のばらつきを考慮せずにき裂進展解析を行ったときの結果（黒丸）とシミュレーションによる結果、およびAlbrechtらがメリーランド大学で行った実験の結果（白四角）を示す。本解析に用いた変動応力範囲と繰り返し数は表1のとおりである。1000個のシミュレーション結果のうち、上から25番目と下から25番目の結果をそれぞれ上・下限値としている。

初期条件のばらつきを考慮しない場合、定振幅疲労試験の解析結果と変動振幅疲労試験（変動応力を等価応力にしている）の解析結果は約500万回付近まではJSSCのE等級とほぼ一致している。また、いずれの場合も、実験結果の方が解析値よりも長寿命側にある。これは、解析ではき裂発生寿命を考えていないためと思われる。さらに、A588材の場合、4年間大気暴露されている間に止端半径が大きくなったためと思われる。

モンテカルロ・シミュレーションを行った場合、定振幅疲労試験と変動振幅疲労試験のいずれの場合もシミュレーションの結果の下限値はややJSSCのE等級を下回ったが、疲労限は高くなった。実験結果は解析結果のばらつきより長寿命側にあるが、上限値を解析結果の最大値とすると、ほとんどばらつき内におさまる。

5. まとめ

破壊力学の手法を用いた疲労き裂進展解析による疲労寿命は、500万回付近まではJSSCのE等級とほぼ一致するが、疲労限は定振幅試験の場合はやや低下し、変動振幅試験の場合は高くなった。また、等価応力を用いる方法やシミュレーション解析の下限値を設計曲線とすると、いずれも安全側になる。今後は、500万回まではJSSCを用いてよいが、それ以上では、本研究での解析方法でさらに詳細な解析を行い、数少ない実験データと比較・検討して、最適な設計曲線を提案する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 永津省吾、山田健太郎、三ツ木幸子：破壊力学による溶接継手の疲れ寿命のばらつきの評価、構造工学論文集、Vol. 34A、1988年3月
- 2) Albrecht, P et al.: long-life variable-amplitude fatigue strength of welded steel bridge details, Report No. FHWA-RD-94-108, september 1994

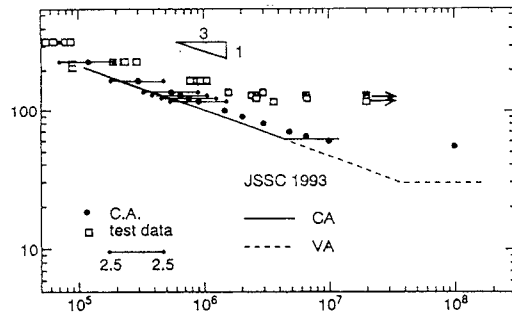


図2 定振幅疲労試験(A572)

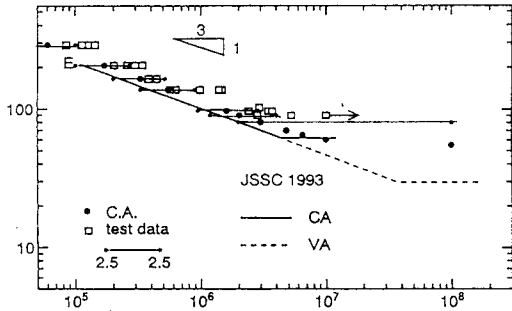


図3 定振幅疲労試験(A588)

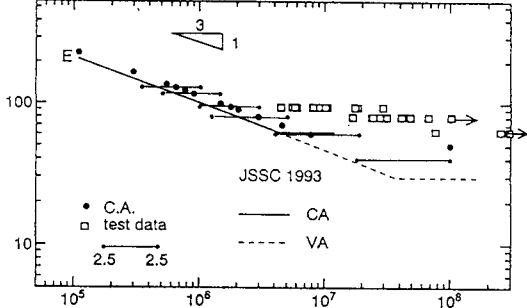


図4 変動振幅疲労試験(A572)

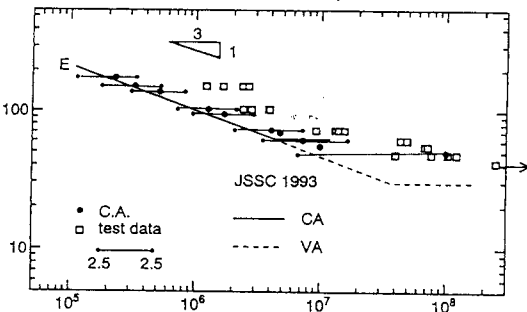


図5 変動振幅疲労試験(A588)