

変動荷重を受けるガセット溶接継手の疲労寿命

名城大学 正会員 近藤明雅

名城大学 加藤 俊

名城大学 川上隆也

1. まえがき

多くの鋼構造物の中において、橋梁、航空機、船舶およびクレーンガーダーなどの構造物は、多数回の繰返し荷重を受けるため、その耐久性には疲労設計が必要不可欠である。また道路橋においては、死荷重に対して活荷重が小さいという特徴から、極端に低応力側に偏った変動応力が生じていることが知られている。

本研究では、低応力範囲、長寿命領域における疲労挙動に着目し、面内ガセット溶接継手を用いて、一定振幅荷重疲労試験および変動振幅荷重疲労試験を行い、両者の試験結果の比較、検討を行ったものである。

2. 疲労試験体

ガセット溶接継手試験体の寸法を図1に示す。板幅 100mm の GL 試験体と板幅 70mm の GS 試験体の2種類の試験体を使用した。鋼板を所定の寸法に機械加工した後、ガセットプレートを完全溶け込みレ型開先溶接により、主板の側面に取り付けた。溶接止端部は、非仕上げとした。鋼材は JIS G 3106 SM520B で、降伏点 σ_y は 420MPa である。

3. 疲労試験

(a)一定振幅荷重疲労試験 疲労試験は、載荷容量 294kN の電気制御式疲労試験機を用いて下限応力 $\sigma_{\min} = 20\text{MPa}$ 、約 10Hz の繰返し速度で試験を行った。荷重の偏心により試験体に不均一な応力が作用して試験結果に誤差が生じることを防ぐため、試験体の表裏に貼った4枚のひずみゲージが示す値の差が5%以下となるように試験を行った。

(b)変動振幅荷重疲労試験 変動振幅荷重疲労試験は、実働荷重の実測データを統計的解析により確率モデルに置き換えることを想定して、確率分布に従う変動振幅荷重を用いて行った。本研究では、図2に示すベータ分布の確率分布に従い、低応力範囲側に偏った振幅荷重を用いた。図中、実線はベータ分布の確率密度を示し、ヒストグラムは実験に用いた変動振幅荷重の頻度分布を示す。

ヒストグラムは、1000 波の正弦波の振幅荷重(変動応力範囲)の頻度分布であり、区間 0 から 1 までを 50 等分して示した。図中に 1000 の変動応力範囲のうち最大値、最小値および3乗平均値 RMC を示す。

5. 疲労試験結果

図3、4に疲労試験結果を示す。縦軸は一定振幅で応力範囲、変動振幅では等価応力範囲を示す。等価応力範囲は、すべての応力範囲とその繰返し回数を3乗平均して求めた。図中、●印は一定振幅荷重疲労試験、○印は変動振幅荷重疲労試験の結果である。破断繰返し回数 N_f は疲労き裂が試験体の板幅の 1/2 に到達したときの繰返し回数とした。

図3は板幅 100mm の GL 試験体の、疲労試験結果を示す。一定振幅荷重疲労試験では8体のうち7体が疲労破断した。 $\sigma_r = 60\text{MPa}$ で試験した3体のうち2体は繰返し回数が 549 万回と 514 万回で破断し、1体は 1614 万回を越えても破断しなかった。これより疲労限は 60MPa 程度と思われる。

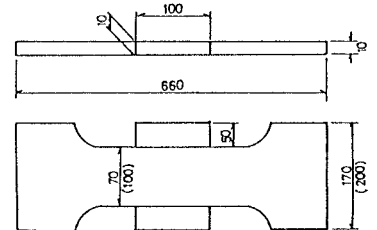


図1 ガセット溶接継手試験体

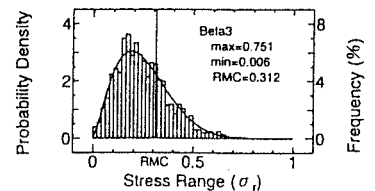


図2 変動振幅荷重の頻度分布

変動振幅荷重疲労試験では、4体の試験体すべてが疲労破断した。破断データは一定振幅荷重疲労試験結果の50%破壊確率線の延長線上にプロットされる。 $\sigma_r = 35\text{MPa}$ で試験した1体は6860万回で破断しており、等価応力範囲で示した疲労限は35MPaより下回ると思われる。

図4に板幅70mmのGS試験体の疲労試験結果を示す。一定振幅荷重疲労試験では $\sigma_r = 80\text{MPa}$ で試験した3体のうち1体は393万回で破断し、2体はそれぞれ1429万回、1549万回を越えても破断しなかった。50%破壊確率線による200万回疲労強度で比較すると、GS試験体は91MPa、GL試験体は79.5MPaであり、GS試験体が約14%高い。

変動振幅荷重疲労試験では、13体の試験体のうち10体が疲労破断し、3体が未破断であった。GL試験体に比して実験データのばらつきは大きい、一定振幅疲労試験結果の50%破壊確率線およびその延長線付近にプロットされる。 $\sigma_r = 60\text{MPa}$ で試験した3体のうち2体はそれぞれ321万回、522万回で破断し、1体は3085万回を越えても破断しなかった。また、 $\sigma_r = 50\text{MPa}$ で試験した1体は2254万回で破断している。 $\sigma_r = 55\text{MPa}$ 、 $\sigma_r = 45\text{MPa}$ で試験した試験体のそれぞれの結果は2907万回、3830万回で未破断であった。

JSSC-Hは、日本鋼構造協会の疲労設計指針における設計S-N線図であり、ガセット溶接継手の溶接止端非仕上げの場合の強度等級である。GL試験体、GS試験体のすべての実験データは、このJSSC-Hより高い疲労強度となっている。

6. 疲労き裂進展解析

初期き裂として半楕円亀裂を仮定し、半楕円亀裂の幅が板幅(10mm)になるまで半楕円き裂の進展解析を行い、その後は貫通き裂の進展解析で N_p を求めた。解析には次式を用いた。

$$da/dn = C(\Delta K^m - \Delta K_a^m)$$

ここで、 C, m は材料定数で、科学技術庁金属材料研究所で求められた値($C=9.69 \times 10^{-12}, m=2.9, \Delta K_a=2.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)を用いた場合と、JSSCの疲労設計指針で定めている最安全設計曲線の値($C=2.7 \times 10^{-11}, m=2.75, \Delta K_a=2.0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)を用いた場合について解析を行った。また、応力拡大係数 ΔK は、 $\Delta K = F_s \cdot F_e \cdot F_t \cdot F_g \cdot \sigma_r \cdot \sqrt{\pi a}$ で求めた。 a はき裂深さ、 σ_r は応力範囲、 F_s, F_e, F_t, F_g はそれぞれ表面き裂、き裂形状、有限板厚(板幅)、応力集中に対する補正係数である。解析では、初期き裂深さ $a_0=0.05\text{mm}$ 、限界き裂深さ $a=b/2$ 、き裂形状比 $a/b=1/2$ とし、止端形状は、止端半径 $\rho=0.2\text{mm}$ 、止端角 $\theta=45^\circ$ とした。金材研の材料定数を用いた解析結果は、GL, GS試験体とも疲労試験結果の下限界付近に位置している。200万回疲労強度は、GL試験体は64MPa、GS試験体は65MPaであり、ほぼ同じであった。

7. まとめ

- (1) すべての実験結果は非仕上げガセット溶接継手の設計S-N線図JSSC-Hより高い疲労強度となっている。
- (2) 一定振幅荷重による疲労試験結果から、200万回疲労強度はGL試験体では91MPa、GS試験体では79.5MPaとなった。
- (3) 低応力範囲側に偏った変動振幅荷重を載荷した場合の疲労限は一定振幅荷重試験の疲労限を下回ると思われる。

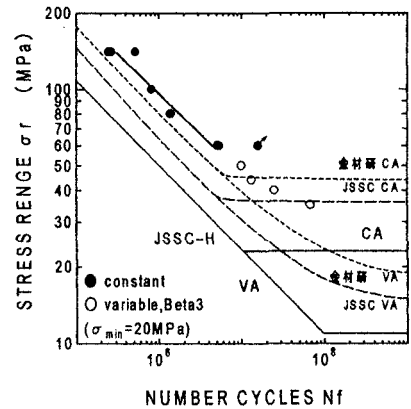


図3 GL試験体(b=100mm)の疲労試験結果

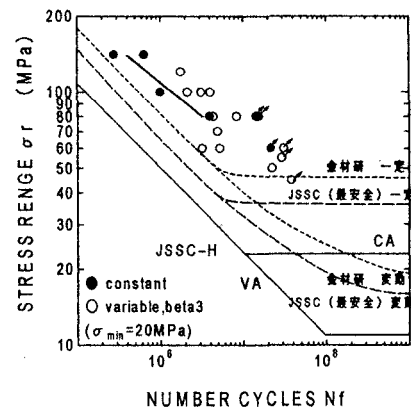


図4 GL試験体(b=70mm)の疲労試験結果