

変動振幅荷重を受ける面内ガセット溶接継手の低応力範囲における疲労強度

名城大学 学生会員 ○平子浩士 名城大学 内野裕貴
 名城大学 中塚慎仁 名城大学 正会員 近藤明雅

1. まえがき

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ターなどの構造物は、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形状・寸法を図1, 2に示す。板幅 70mm の GS 試験体と板幅 100mm の GL 試験体および板幅 200mm の GLL 試験体の 3 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（図3）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 GS、GL 試験体が JIS G 3106 SM520B、GLL 試験体が JIS G 3106 SM490A で降伏点 σ_y はそれぞれ 402MPa、426MPa である。

3. 疲労試験

(a) 一定振幅荷重疲労試験 載荷容量 294kN の電気制御式疲労試験機を用いて下限応力 $\sigma_{\min} = 10\text{MPa}$ 、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 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 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3に示すデ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、1000 波の正弦波の変動振幅荷重（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 の変動応力のうち最大値、最小値および等価応力範囲（3 乗平均値 RMC）を示す。

4. 疲労試験結果

一定振幅荷重疲労試験では、GS 試験体で 8 体、GL 試験体で 10 体、GLL 試験体で 8 体の合計 26 体試験を行った。疲労試験結果を図4, 5, 6に○印で示す。矢印のついているものは未破断の試験体である。未破断の試験体より疲労限は GS 試験体では 80MPa、GL 試験体では 60MPa 程度だと思われる。 $\sigma_r = 23\text{MPa}$ の 1 体は、27594 万回で未破断であり、疲労限は 23MPa 程度と思われる。試験体の板幅が広がるほど疲労限は低下するが、すべての実験結果は非仕上げの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。

変動振幅荷重疲労試験では、縦軸は等価応力範囲を用いた。GS 試験体 17 体、GL 試験体 5 体、GLL 試験体 4 体の合計 26 体の試験を行った。疲労試験結果を図4, 5, 6に▲印で示す。GS 試験体では $\sigma_{\text{RMC}} = 45\text{MPa}$ で未破断の試験体があるが、変動振幅荷重が作用している場合、作用応力範囲の最大

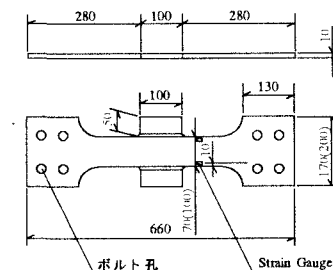


図1 ガセット溶接継手試験体 (GS, GL)

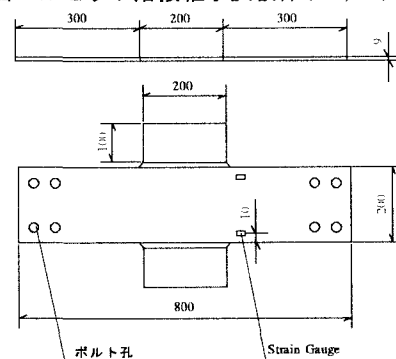


図2 ガセット溶接継手試験体 (GLL)

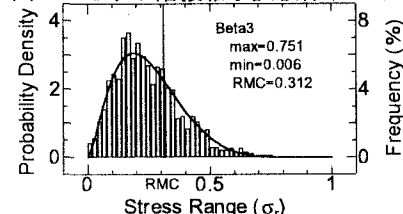


図3 変動振幅荷重の頻度分布

値が一定振幅荷重の疲労限より大きいときは、疲労き裂が発生・進展することが予想される。前述の $\sigma_{req} = 45\text{MPa}$ で試験した未破断試験体に対して、さらに長期間の疲労試験を行えば、疲労破断することも考えられる。よって、無限大の繰返し数に対し未破断となる等価応力範囲は、 $\sigma_{req} \approx 33\text{MPa}$ 程度となる。GL試験体、GLL試験体で無限大の繰返し数に対し未破断となる等価応力範囲を求めると、GL試験体でおよそ25MPa、GLL試験体でおよそ10MPaとなる。GS、GL、GLL各試験体の実験値は一定振幅荷重試験の実験値の延長線上にプロットされる結果となった。

5. 疲労き裂進展解析

初期き裂として半楕円き裂を仮定し、半楕円き裂の幅が板厚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_f を求めた。解析には次式を用いた。

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

ここで、 C, m は材料定数で、JSSCの疲労設計指針で定めている平均設計曲線の値 ($C=1.5 \times 10^{-11}$, $m=2.75$, $\Delta K_{th} = 2.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) を用いた場合と、最安全設計曲線の値 ($C=2.7 \times 10^{-11}$, $m=2.75$, $\Delta K_{th} = 2.0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) 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 $a_i = 0.05\text{mm}$ 、限界き裂深さ $a_f = b/2$ (b =板幅)とした。試験体の止端形状は止端角 45° 止端半径 0.2mm とした。

6. 実験値と解析の比較

疲労き裂進展解析結果より得た設計曲線と疲労試験結果の実験値を図4、5、6に示す。GS試験体については、実験値にばらつきはあるが平均設計曲線が下限界を示す結果となった。GL試験体もGS試験体と同様、平均設計曲線が下限界を示す結果となった。GLL試験体は前者の2種類とは異なり、実験値が平均設計曲線と最安全設計曲線の間にプロットされ、最安全設計曲線が下限界を示す結果となった。

7. 試験体の止端形状

試験体の止端形状を測定して、95%信頼区間を求め比較したものを図7に示す。GS試験体では止端形状が解析に用いた値よりも緩やかなため実験値の疲労寿命が長くなり、GS試験体よりもGL試験体、GL試験体よりもGLL試験体の方が止端半径が大きくなり止端角は小さくなるため、実験値の結果が低くなったと思われる。

8. まとめ

- (1)一定振幅荷重疲労試験結果から、200万回疲労強度はGS試験体の91.0MPaに比べてGL試験体は17%、GLL試験体は44%低い結果となった。
- (2)低応力範囲側に偏った変動振幅荷重疲労試験結果は、一定振幅荷重試験結果の実験値の延長線上にプロットされる結果となった。
- (3)止端角 45° 、止端半径 0.2mm で疲労き裂進展解析を行った場合、GS、GL試験体では平均設計曲線が下限界を示すのに対し、GLL試験体では最安全設計曲線が下限値を示す結果となった。
- (4)解析に用いた止端形状と実験で使用した試験体の止端形状が異なるため解析値と実験結果に差が現れたと思われる。

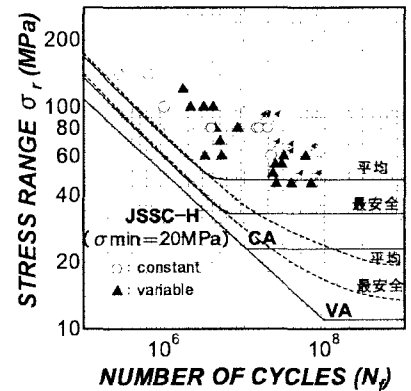


図4 GS試験体実験および解析結果

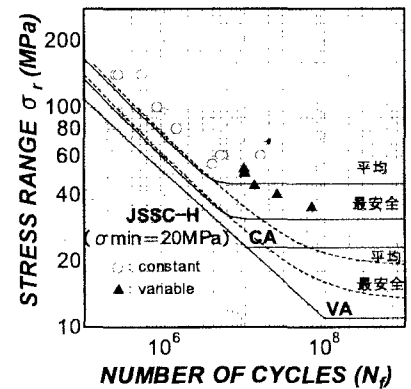


図5 GL試験体実験および解析結果

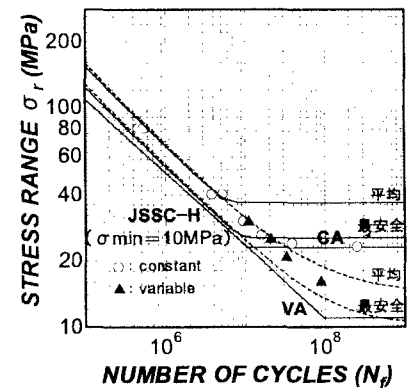


図6 GLL試験体実験および解析結果

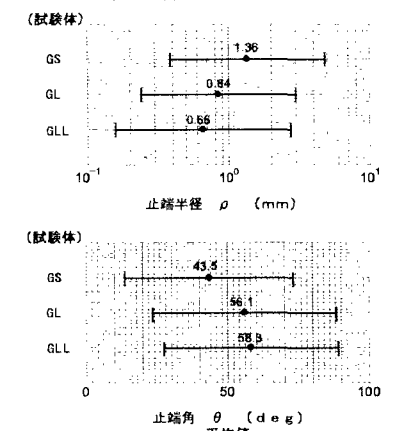


図7 試験体の止端形状の比較