

板曲げを受ける面外ガセット溶接継手の疲労寿命予測に用いるき裂進展解析に関する研究

岐阜大学大学院 学生会員 ○荒川慎平

岐阜大学 正会員 木下幸治

1. はじめに

鋼床版のデッキプレートと垂直補剛材の溶接部に発生する疲労き裂のように、板曲げを受けて溶接部に発生する疲労き裂は徐々に曲がりながら進展する。従来溶接継手の疲労寿命は破壊力学に基づくき裂進展解析により予測されるが、き裂の進展経路を直線と仮定するため、上述したようなき裂の寿命予測は検討の余地がある。

本研究では板曲げを受ける面外ガセット溶接継手を対象に疲労試験並びにき裂進展解析を行い、き裂の進展特性を把握した上で、従来の解析の改善方法について検討する。

2. 疲労試験方法

本研究では山田ら¹⁾が開発した板曲げ振動疲労試験機を用い、面外ガセット溶接継手試験体の疲労試験を実施した。試験体の形状および寸法を図-1に示す。試験体にはSM490Aを用いた。主板、付加板には板厚12mmの鋼板をそれぞれ用い、それらをCO₂半自動溶接によりすみ肉溶接で接合した。ガセット端ではすみ肉溶接を回し溶接した。試験体数は2体とした。山田ら²⁾の研究において公称応力範囲は溶接止端から長手方向に12mm、試験体の中心から板幅方向に75mm離れた位置に貼付したひずみゲージより求めた応力範囲を用いている。本研究もこの位置に貼付したひずみゲージより求めた応力範囲を公称応力範囲とした。試験体の応力範囲は80MPaとした。また、き裂の進展挙動を把握するために、一定の繰り返し回数ごとに応力範囲を半減させるビーチマーク試験を行った。

3. 疲労試験結果

図-2(a), (b)に疲労試験終了後の試験体A, Bの破断状況を示す。図中に示す黒線は破断面に残されたビーチマークであり、数字はその時の繰り返し回数(単位:万回)を示す。また、カッコ内の数字は深さ方向のき裂長さを a 、幅方向のき裂長さを $2b$ とした時のき裂形状比 a/b である。ビーチマークの観察結果より、試験体の回し溶接止端部から発生した1つ(図-2(a)の矢印A)、もしくは複数のき裂が合体し(図-2(b)の矢印B)、1つの半楕円型のき裂となって進展した。試験体表面ではき裂は止端部に沿ってガセットに回り込むように進展し、その後、止端部から離れて板幅方向へ進展した。また、試験体内部ではき裂は板厚方向に徐々に試験体の固定側に曲がりながら進展した。なお、今回の疲労試験ではき裂の表面長さが80mm程度になると試験体下面からき裂が発生したため、その時点で試験を終了した。

4. き裂進展解析の方法

従来の解析が実際のき裂進展をどの程度再現しているかを把握するために、試験体Bの実験結果と従来のき裂進展解析結果の比較を行った。本研究で用いた疲労き裂進展解析プログラムは鋼構造物の疲労設計指針・同解説²⁾に従い作成した。本解析では疲労き裂はガセットの回し溶接部前面の止端部から発生し、半楕円形状に進展すると仮定した。初期き裂深さ a_0 は0.1mmと仮定した。初期き裂形状比 a_0/b_0 はき裂発生段階のビーチマークより0.16と仮定した。き裂進展速度と応力拡大係数範囲 ΔK の関係は次式で示される修正Paris則を用いた。

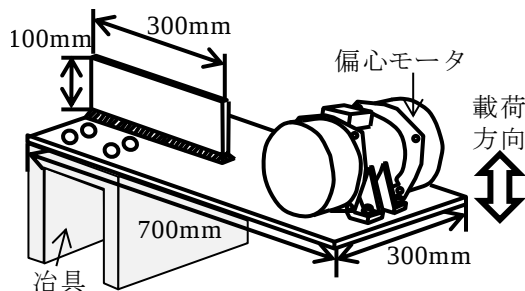
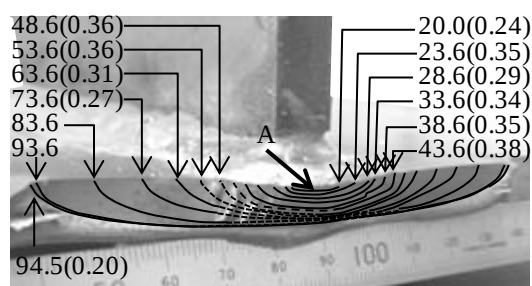
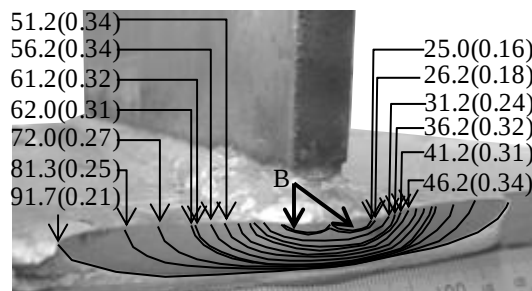


図-1 試験体の形状および寸法



(a) 試験体 A



(b) 試験体 B

図-2 試験体破断状況

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_A - \Delta K_{th})^m \quad (1)$$

ここで、 da/dN はき裂進展速度、 C および m は材料定数、 ΔK_{th} は下限応力拡大係数範囲である。材料定数 C 、 m および ΔK_{th} は文献 2) に示されている平均設計曲線を用いた。本研究ではき裂の進展方向における ΔK の算出方法には式(2)、式(3)を用いた。

$$\Delta K = F_e \cdot F_s \cdot F_t \cdot F_g \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$\Delta K = (\Delta \sigma_t + H \cdot \Delta \sigma_b) \cdot F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{b}, \frac{b}{w}, \phi\right) \sqrt{\pi a / Q} \cdot F_g \quad (3)$$

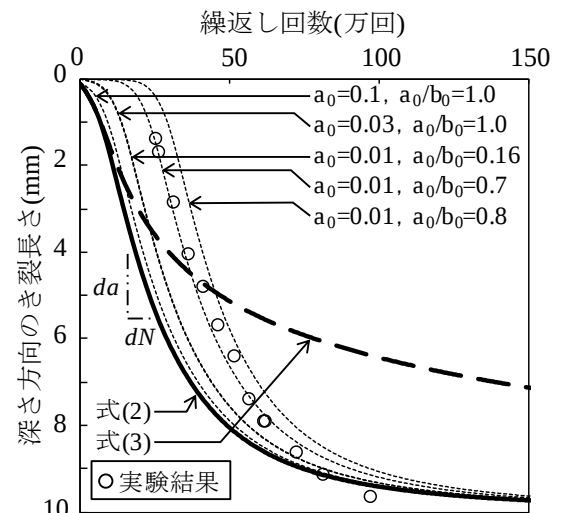
ここで、 F_e 、 F_s 、 F_t 、 F_g 、 H 、 F 、 Q は補正係数、 $\Delta \sigma_t$ は軸方向応力範囲、 $\Delta \sigma_b$ は曲げ応力範囲である。式(2)は一般的な溶接継手の応力拡大係数を算出する式であり、式(3)は鋼板表面から発生するき裂の応力拡大係数を算出する簡便式である。式(2)の F_e 、 F_s 、 F_t と式(3)の H 、 F 、 Q は文献 2) を参考に決めた。また、両式の F_g は FEM 解析によりき裂が無い場合のき裂面に作用する応力分布をき裂面に作用させたときの応力拡大係数範囲から求めた。 ΔK は深さ方向と板幅方向別々に求め、それぞれの方向の疲労き裂進展を求めた。限界き裂長は回し溶接部から板幅方向に 20mm 進展した時と仮定した。

5. き裂進展解析結果

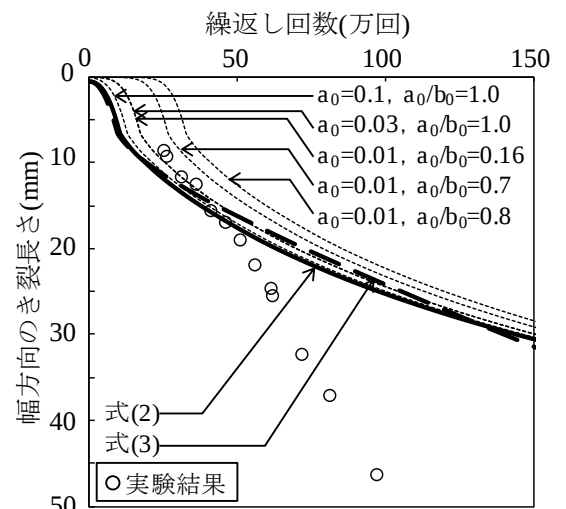
解析結果を図-3 に示す。図-3(a) は深さ方向のき裂長さと繰返し回数の関係、図-3(b) は幅方向のき裂長さと繰返し回数の関係を示し、図中の実線は式(2)、破線は式(3)の解析結果であり、図中のプロットは試験体 B の実験結果である。図-3(a) より、式(2)、式(3)ともにき裂長 1.0mm 以下では実験結果よりもき裂進展が速くなっている。また、式(2)ではき裂長さ 1.5mm 程度から 7.5mm 程度までは図中の傾きで示されるき裂進展速度 da/dN が実験結果と同程度となった。一方、式(3)ではき裂長さが 1.5mm 程度からき裂進展が遅くなり、実験結果のき裂進展速度よりも小さくなった。図-3(b) より、式(2)、(3)ともにき裂深さ方向と同様に初期の段階のき裂進展が速いことがわかる。また、き裂長さがガセット幅を超える 7mm 程度からき裂進展が遅くなった。以上のように、深さ方向に関しては式(2)、(3)ともに 1.0mm 以下の初期のき裂進展に改善の余地があるが、き裂長さ 1.5mm 以上のき裂進展予測では式(3)よりも式(2)の方が良い予測を与える。一方、幅方向に関しては式(2)、(3)ともに初期のき裂進展に限らずき裂進展予測に改善の余地がある。

上記検討を踏まえ、本研究では式(2)における初期のき裂進展予測の改善を試みた。式(2)では初期のき裂進展に初期のき裂深さと形状比が大きな影響を与えることから、初期き裂深さ a_0 を 0.01~0.1mm、初期き裂形状比 a_0/b_0 を 0.1~1.0 の範囲で変えたパラメトリック解析(5 ケース)を行った。図-3 にパラメトリック解析の結果を点線で示す。図-3(a) に示すように、初期のき裂進展は a_0 が小さくなるほどに、また、 a_0/b_0 が大きくなるほど遅くなった。 $a_0=0.01$ 、 $a_0/b_0=0.7$ の時、き裂長さ 8mm 程度までのき裂進展を良く再現できることがわかった。しかし、図-3(b) に示すように $a_0=0.01$ 、 $a_0/b_0=0.7$ の時、幅方向のき裂進展は初期のき裂進展が実験結果よりも遅いことがわかる。また、き裂長さが 7mm 程度以上になるとき裂進展が遅くなった。幅方向のき裂進展は初期のき裂進展およびき裂進展予測にさらなる検討が必要であるといえる。

- <参考文献> 1) 山田ら：面外ガセット溶接継手の曲げ疲労強度に及ぼすショットブラストの影響，構造工学論文集，Vol.54，2008.3.
2) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993.



(a) 深さ方向のき裂長さと繰返し回数の関係



(b) 幅方向のき裂長さと繰返し回数の関係

図-3 き裂進展解析結果