

厚板の溶接継手の曲げ疲労に対する破壊力学的考察

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）正会員 ○山田 健太郎

1. 概要

市販の振動モータを用いた板曲げ疲労試験機を使用することで、簡易に早く曲げ疲労試験を行うことができる¹⁾。これまで、板厚 12~19mm、幅 300mm の板曲げ疲労試験が数多く行われてきた。また、櫛の長いフィンガージョイントの曲げ疲労試験も行われている。着目部は、通常、両振りの応力が発生するが、プレローディングのシステムを用いることで、引張片振りや圧縮片振りの実験も可能である。

溶接継手の疲労試験では、溶接による残留応力が影響するが、引張疲労試験では引張片振りになるため、影響は小さい。しかし、例えば両振りの曲げ疲労試験では、残留応力が疲労試験結果に大きく影響する。そこで、12mm の板厚と、厚板 90mm のすみ肉溶接継手の残留応力を仮定して、破壊力学を用いた疲労き裂進展解析を行ってこの影響を考察した。

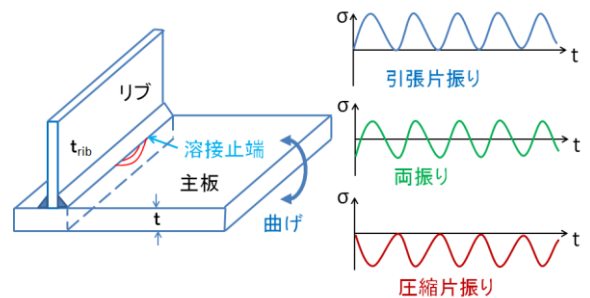


図-1 すみ肉溶接継手に作用する応力の種類

2. 破壊力学を用いた疲労き裂進展解析の仮定について

破壊力学を用いた疲労き裂進展解析は、初期き裂長 a_0 、最終き裂長 a_f を仮定して、疲労き裂進展速度を積分して、疲労き裂進展寿命 N_p を求める手法である²⁾。ここでは、すみ肉溶接の止端近傍の残留応力の仮定と、疲労き裂進展に寄与する応力範囲の定義について示す。

図-1 には、ここで仮定したすみ肉溶接継手の板厚方向の残留応力分布と応力集中の分布を示す。溶接継手の疲労き裂進展方向、すなわち板厚方向の残留応力については、必ずしも明確ではない。そこで、板厚の表面で最大値となり、板厚方向に直線分布すると仮定する。板厚 90mm では、引張残留応力は、最大値は SM520 の公称降伏点 325~355MPa の 1/3 程度、すなわち 100MPa とし、深さ 10mm で 0 になる分布を仮定した。板厚 12mm では、深さ 6mm で 0 とした。

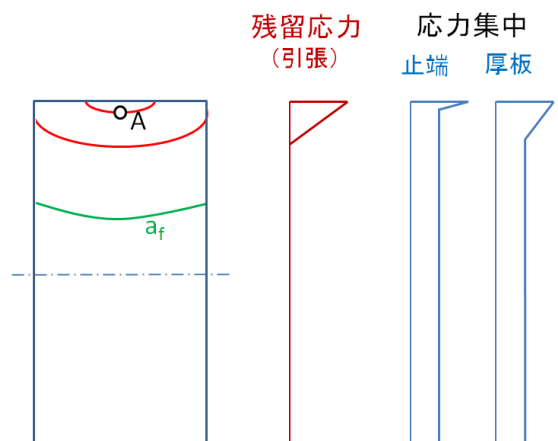


図-2 残留応力分布と応力集中の仮定

次に、疲労き裂進展に寄与する応力範囲は、疲労き裂の先端（図-2 の A 点）で、引張側にある応力範囲のみが疲労き裂を進展させると仮定した。例えば、母材で残留応力がない場合、両振りでは、応力範囲の 1/2 だけが疲労き裂進展に寄与することになる。また、着目点に引張残留応力が存在する場合、作用応力が圧縮応力であっても、引張残留応力により引張側になる分が疲労き裂進展に寄与すると考えた。

解析では、初期き裂 $a_0=0.2\text{mm}$ 、最終き裂 $a_f=t/3$ （ t は板厚）、き裂形状 $a/b=1/5$ （一定）、すみ肉溶接止端近傍の応力集中は、直線的に変化すると仮定した。板厚 12mm では、溶接止端の影響を、関数 $K_{t1}(x)$ で深さ 1mm まで影響すると考えた。板厚 90mm では、すみ肉溶接ののど厚も大きくなることから、その影響を $K_{t2}(x)$ として考慮した。疲労き裂進展では、応力範囲が $K_t(x)=K_{t1}(x)*K_{t2}(x)$ だけ大きくなると仮定した。

3. 曲げによる疲労き裂進展寿命について

3.1 両振りの曲げの場合

まず、用いた解析条件をチェックするために、 $a_f=9.6\text{mm}$ として、引張の繰返し荷重を受ける板厚 12mm のす

キーワード：溶接継手、厚板、すみ肉溶接、破壊力学、疲労き裂進展解析

連絡先 〒460-0003 名古屋市中区錦 1-8-11 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株） TEL052-212-4577

み肉溶接継手の N_p を解析した。結果を図-3に示すが、ほぼこの継手の設計 S-N 曲線である E 等級に近い値となった。次に、曲げによる N_p を求める。この場合、曲げでは中立軸に近い位置で曲げ応力が小さくなることを考慮して、 $a_f = t/3$ 、すなわち 3.6mm とした。まず、両振りの曲げで、溶接止端近傍に引張の残留応力がある場合とない場合を解析した。引張残留応力がない場合は、作用応力範囲の圧縮部は無視するので、応力範囲があたかも 1/2 になったような N_p となる。これに、引張残留応力を考慮すると、圧縮側の応力範囲が引張側になるので、残留応力なしの場合に比べて、短い N_p が得られた。

同様な計算を、 $t=90\text{mm}$ の場合で計算して、図-4に示す。残留応力のない場合を、板厚 12mm の結果と比べると、短い N_p が得られるが、これが板厚効果として知られている。引張残留応力を考慮した場合も、それが 10mm 程度の深さで 0 になると仮定しているので、両振りでは、比較的長い N_p が得られた。

3.2 圧縮片振りの曲げの場合

着目点の応力がすべて圧縮側であれば、通常、疲労き裂は進展しない。そこに、作用圧縮応力を上回る引張残留応力が存在すると、一部が引張側の応力範囲となり、疲労き裂が進展する。そのき裂は、一般に残留応力が小さい領域まで進展すると停留する。

最大値で 100MPa の引張残留応力を仮定した計算では、作用応力範囲 $\Delta\sigma = 40\text{MPa}$ で、500 万回で 4.5mm 程度進展して、その後進展が遅くなった。また、作用応力範囲が大きくなると、引張残留応力の影響を打ち消すことになり、進展量が小さくなる。例えば、 $\Delta\sigma = 80\text{MPa}$ では、 $a_0 = 0.2\text{mm}$ では疲労き裂進展のしきい値 ΔK_{th} 以下となり疲労き裂は進展しない。応力範囲が大きくなると、逆に疲労き裂が進展しなくなることに注目したい。

ちなみに、残留応力の最大値を 200MPa、影響深さを 20mm と仮定すると、 $\Delta\sigma = 40\text{MPa}$ 、1000 万回で、15mm 程度進展する。また、 $\Delta\sigma = 80\text{MPa}$ でも、100 万回程度の繰返し数でき裂が 8mm 程度進展して、その後進展が遅くなる。圧縮の繰返し荷重を受ける溶接継手では、残留応力と作用応力の組合せで結果が大きく異なることに注意が必要である。例えば、フィンガージョイントの疲労試験で、輪荷重相当の荷重を櫛の先端に載荷して、溶接部に圧縮の繰返し荷重を載荷することがある。腹板の溶接継手による引張残留応力がある場合、圧縮荷重でも疲労き裂が進展するが、圧縮荷重が大きいと逆に疲労き裂が進展しないことを示唆している。

4. まとめ

これまで、溶接継手は引張の片振りで疲労試験されてきた。板曲げ疲労試験機の開発により、簡便により早く曲げ疲労試験が可能になったが、試験体によっては注意が必要である。曲げの疲労試験では、作用荷重の着目部に発生する応力が、両振り、圧縮片振り、引張片振りになる場合がある。それに溶接による引張残留応力や、ピーニング、ICR 処理による圧縮残留応力が影響すると問題が複雑になる。破壊力学を用いた疲労き裂進展解析を用いると、種々の仮定を置くことで、事前にそれらの影響を考察できる。ここでは、できるだけ簡単な仮定のもとに、特に厚板の曲げ疲労試験に及ぼす残留応力の影響を考察した。

参考文献 1) 石川、他：ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果，土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 2, 2010. 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、2012。

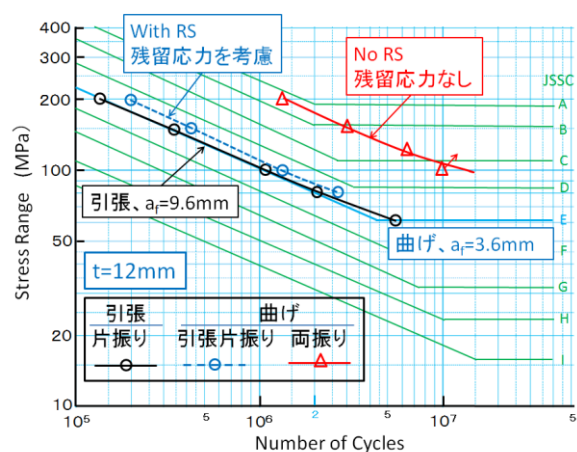


図-3 板厚 12mm の N_p の解析結果

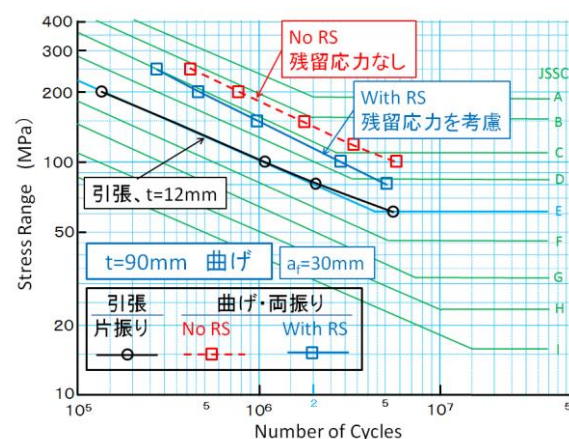


図-4 厚板 90mm の N_p の解析結果