

変動振幅波形下におけるHFMI処理 による疲労強度改善効果の予測

判治 剛
名古屋大学

1 はじめに

道路や鉄道などの社会インフラを持続的に維持管理するためには予防保全技術を積極的に取り入れて、効率的かつ計画的に対策を講じることが重要である。本研究は、鋼構造物の劣化要因である溶接継手の疲労に対する予防保全技術に焦点を当てる。ここでは、既設構造物にも簡易に適用できる技術として、溶接部を90Hz程度以上の高速で局所的に打撃して圧縮残留応力を付与するHFMI (High Frequency Mechanical Impact) 処理¹⁾を対象とする。

HFMI処理により、溶接継手の疲労強度を大幅に改善できることは過去の広範な検討により明らかにされているが、これまでは一定振幅応力下での疲労試験がほとんどであり、実働下のような応力振幅が変動する場合の検討は数少ない。本稿では、鋼部材に対する予防保全対策として、HFMI処理をグラインダー処理と並ぶ技術にまで押し上げるべく、変動振幅波形下における疲労強度改善効果の予測法を構築するための基礎的検討の結果を報告する。

2 研究方法

試験体は面外ガセット溶接継手であり、その形状および寸法を図1に示す。供試鋼材はSM570TMC (降伏応力: 531N/mm²)である。板厚12mm, 幅200mmの主板上に、板厚12mm, 高さ100mmの付加板を直立させた状態でCO₂溶接により製作した。ルート破壊を防止するためにまわし溶接部周辺は完全溶込みとした。

本研究では、エア式ニードルピーニング機器の一種であるHiFIT¹⁾(写真1)を用いてHFMI処理を行った。こ

の機器の寸法は約200mm×300mmであり、背面のねじの回転角(0~960°)を調整することで、処理時の打撃強度を変更できる。また、打撃強度に応じてピンの振動数は300Hzから180Hzの間で変化する。処理は図2に示す範囲に行った。主板側止端部の処理のみでは付加板からの疲労き裂が懸念されたため、付加板側止端部にも処理を施した。ピンの径は3mm, 打撃強度は180°とし、処理長約138mmを3パスで処理を行った。

疲労試験には板曲げ振動疲労試験機²⁾を用いた。この試験機では、主板の自由端側に取り付けた起振機内の偏心おもりを回転させることによって、主板に繰返し曲げ荷重を導入できる。振幅が一定の公称応力の繰返しである一定振幅荷重と、振幅の大きさを段階的に変化させるブロック荷重を与えた疲労試験を行った。起振器内の偏心おもりの回転速度を変えることにより、与える公称応力振幅の大きさを変化させることができるため、一定振幅荷重ではおもりの回転速度を一定とし、ブロック荷重ではそれを試験中に自動的に変更する³⁾ことで、それぞれに対応する荷重波形を与えた。試験体に付与した荷重履歴を確認するために、主板表面には図1中に示すようにひずみゲージを貼り付け、载荷中のひずみ履歴をモニタリングした。また、ゲージから得られたひずみを用いて、溶接止端位置における公称応力を線形外挿して求めた。

ブロック荷重では5段階と8段階の応力範囲ブロックの繰返しである荷重波形を与えた。5段のブロック波形を図3(次ページ)に例示する。5つの応力範囲ブロックを組み合わせたグループを作り、それを繰り返すことで载荷を行った。応力ブロックの順序は図に示す4パターンとした。パターンAは応力範囲が最大のブロックから徐々に小さくする波形であり、パターンBはその逆である。

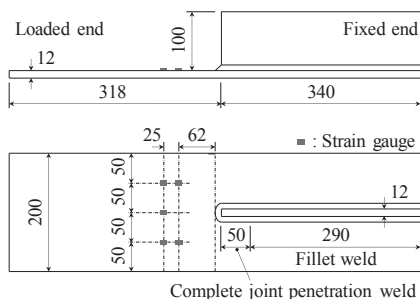


図1 試験体 (unit: mm)

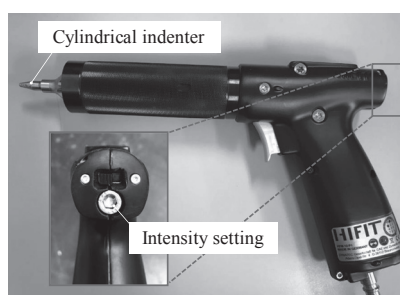


写真1 HFMI処理装置

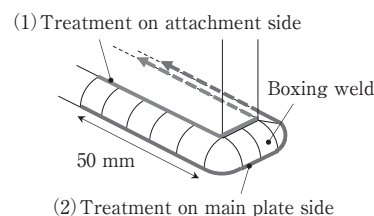


図2 HFMI処理

パターンCはパターンAとBを組み合わせた波形である。パターンDは応力範囲の大きさが急激に変化するように順序を入れ替えた波形である。いずれのパターンにおいても、応力範囲の最大値は約300N/mm²、そのブロックの応力比は0とし、試験中の平均応力は一定とした。

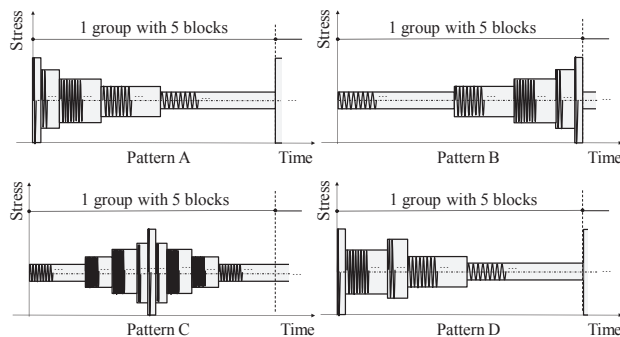


図3 ブロック波形パターン

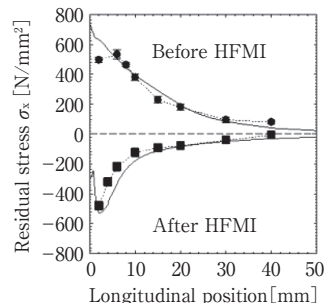


図4 長手方向の残留応力分布

表1 応力範囲ブロックの構成例

Order	5 blocks		8 blocks	
	Frequency [%]	Range [N/mm ²]	Frequency [%]	Range [N/mm ²]
1	57.5	118.7	41.1	95.3
2	27.3	159.2	25.5	107.1
3	11.1	212.6	16.7	143.4
4	3.0	276.0	8.3	181.5
5	1.0	316.8	4.7	220.0
6	-	-	2.1	251.2
7	-	-	1.0	281.6
8	-	-	0.5	317.0

表1にパターンBの5段および8段のブロック波形における応力振幅ブロックの構成例を示す。それぞれにおいて応力範囲の最大値とその回数が同じとなるようにし、構成ブロックの応力比が0~0.5の間でばらつくように応力範囲を設定した。1グループ内に含まれる繰返し回数は、5段ブロック波形では約10万回、8段ブロック波形では約20万回とした。

3 主な研究成果

X線回折式残留応力測定装置 (μ -X360) により、溶接止端近傍の長手方向の応力成分をHFMI処理前後で計測した。溶接止端から2mm離れた位置を基準として長手方向および幅方向の残留応力分布を求めた。その結果を図4に例示する。図中には、紙面の都合上省略するが、別途実施した有限要素解析により求めた応力分布も併記している。解析手法の詳細は文献⁴⁾を参照されたい。HFMI処理により処理部近傍に大きな圧縮残留応力が導入されており、また、解析により処理前後の残留応力分布を比較的良好に再現できていることがわかる。

疲労試験結果を図5に示す。疲労寿命は、き裂がまわし溶接部から主板上に10mm進展したときの繰返し数(N₁₀)とした。また、応力範囲が変動する場合は等価応力範囲を用いて整理した。その際、疲労強度曲線の傾きを表す定数mは文献⁵⁾を参考にして、溶接ままは3、HFMI処理した継手は7とした。図中には同試験機によって得られた過去の面外ガセット溶接継手の疲労試験結果⁵⁾も併せて示している。

一定振幅荷重下では、溶接ままの結果はおおむねF等級を下限として分布しているのに対し、本研究のHFMI処理継手ではB等級以上を示し、4等級の疲労強度の向上を確認できる。ブロック荷重の場合、5段と8段の結果はともに一定振幅荷重下の結果のばらつき内に分布しており、応力振幅が変動することによる影響はみられず、

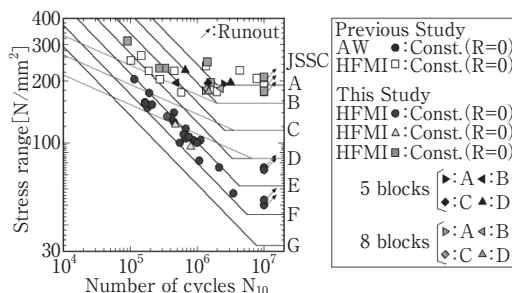


図5 疲労試験結果

また、本試験で与えた荷重ブロックの順序の影響も確認できない。これは、応力振幅が変動することの影響は振幅変化直後のみにみられ、その後は定常状態に収束すると思われるため、ブロック波形では変動振幅の影響が現れにくかったと考察される。

4 おわりに

2016年に発刊されたIIW Recommendations for the HFMI Treatment¹⁾では、HFMI処理により4~8等級程度の疲労強度の改善が図れるといわれている。これは、現在広く普及しているグラインダ処理による改善効果の2倍以上である。つまり、予防保全対策としてHFMI処理が実用化されれば、鋼橋のさらなる高疲労耐久化を実現できる。本研究ではブロック波形による検討にとどまったが、より実働下に近い波形であるランダム振幅波形下での検討は必須である。疲労試験だけでなく解析も援用し、溶接部の局所的な残留応力の変動をも考慮して予測法を構築することが重要であり、今後継続的に取り組みたい。

参考文献

- 1) Gary B. Marquis, Zuheir Barsoum : IIW Recommendations for the HFMI Treatment For Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, Springer, 2016.
- 2) 山田健太郎, 小園江朋亮, 小塩達也: 垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのみ肉溶接の曲げ疲労試験, 鋼構造論文集, Vol.14, No.55, pp.1-8, 2007.
- 3) 木下幸治, 阪野裕樹: 板曲げ疲労試験機を用いた変動振幅荷重制御システムの開発, 鋼構造年次論文報告集, Vol.26, pp.796-803, 2018.
- 4) 判治剛, 加納俊, 館石和雄, 清水優: 静的荷重作用下でHFMI処理された面外ガセット溶接継手の残留応力と疲労強度, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.591-602, 2022.
- 5) 日本鋼構造協会: 鋼橋の強靱化・長寿命化に向けた疲労対策技術資料, JSSCテクニカルレポート, No.120, 2020.