第Ⅰ部門　　金属組織の微細化による溶接ルートき裂の抑制に関する基礎的検討

大阪大学大学院工学研究科　学生会員　○中瀬　陽香，正会員　廣畑　幹人
大阪大学接合科学研究所　非会員　Abhishek Sharma，森貞　好昭，椋田　宗明，藤井　英俊

1.　研究背景および目的

鋼橋などの鋼構造物の溶接継手においては，幾何学的形状に起因する応力集中や溶接による引張残留応力によって疲労き裂が発生・進展する．特に鋼床版の U リブのような構造では，表面の止端き裂だけでなく内部から発生するルートき裂が存在するが，内側からの補修が物理的に困難であるため，溶接ビード表面からのアプローチによりルート部からのき裂進展を抑制する技術の確立が急務となっている．近年，摩擦攪拌プロセス（Friction Stir Processing, FSP）[1] などを応用した金属組織の改質により，突合せ溶接継手やすみ肉溶接継手の止端部における疲労寿命の延伸効果が報告されている [2, 3]．既往の研究では，金属組織を微細化させることで，き裂進展抵抗が増加し疲労強度が向上することが報告されている [4]．本研究では，金属組織の微細化により，未溶着部から進展する溶接ルートき裂を抑制できるかを検証するため，一連の実験を実施した．本検討における金属組織の微細化手法として，溶接ビード表面からの FSP を用いた．

2.　実験供試体

本研究で使用した実験供試体の形状および寸法を図-1 に示す．母材には SM400B（降伏点：379N/mm^2，引張強さ：445N/mm^2）を使用した．溶接は 60° の V 形の溝に 1 パスで行い，裏面まで貫通させず未溶着部を残した．溶接部の表側から FSP ツールを挿入し，表面から深さ 3mm の位置まで改質層を形成した（図-2）．これにより，未溶着部先端（ルート部）から進展するき裂の抑制を試みた．使用したツールは超硬合金製で，直径 2.8mm，回転数 250rpm，進行速度 100mm/min，荷重 2600kg である．

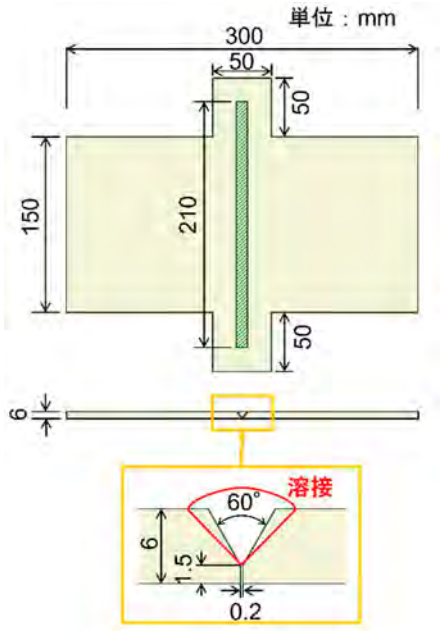


図-1　実験供試体


図-2　FSP の適用

3.　実験結果

3.1　ビッカース硬さ試験

溶接ままの供試体（AW 供試体）と FSP を施した供試体（FSP 供試体）の断面に対し，ビッカース硬さ試験を実施した．AW 供試体の硬さ分布を図-3 に，FSP 供試体の硬さ分布を図-4 に示す．

図-3 より，AW 供試体では熱影響部から溶接金属部にかけて硬化が顕著であり，最高硬さは約 210 Hv に達していることが確認された．一方で，図-4 に示す FSP 供試体の FSP 部の硬さは約 160～170 Hv 程度であり，母材（約 150 Hv）とほぼ同じ硬さに均一化された．

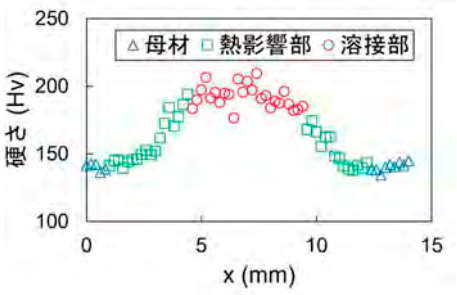


図-3　硬さ分布（AW）

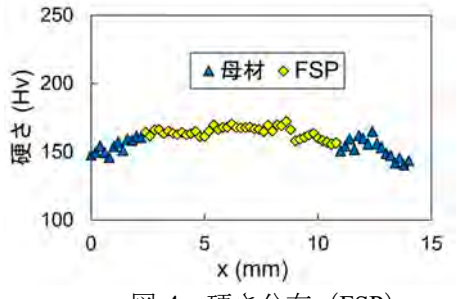


図-4　硬さ分布（FSP）

Haruka NAKASE, Mikihito HIROHATA, Abhishek SHARMA, Yoshiaki MORISADA, Muneaki MUKUDA, and Hidetoshi FUJII
h-nakase@civil.eng.osaka-u.ac.jp

3.2 金属組織観察

光学顕微鏡（400 倍）により撮影した金属組織写真を図-5 に示す．FSP の適用により，金属組織が微細化した傾向が確認された．さらに，金属組織の微細化を定量的に評価するため，JIS G 0551 に基づき結晶粒度番号 G を算出した．

結晶粒度評価において，結晶粒の数をカウントした評価図について，溶接部を図-6 に，FSP 部を図-7 に示す．算出された結晶粒度番号は，溶接部の G=5.9 に対し，FSP 部は G=6.8 となり，FSP の適用により約 0.9 向上したことが確認された．この向上幅は明確な組織の微細化を示している [5]．

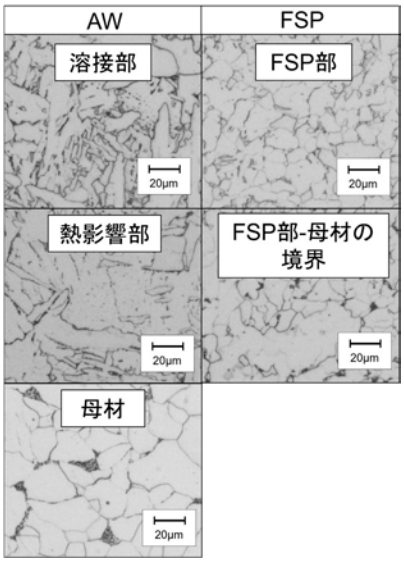


図-5　金属組織観察結果

3.3　4 点曲げ疲労実験

AW 供試体および FSP 供試体をそれぞれ溶接線直交方向に切断し，幅 40mm の短冊状の疲労実験用供試体を作製した．周波数 5 Hz，繰返し曲げ荷重の公称応力範囲を 80 N/mm²とし，応力比 0.1 および 0.3 の 2 条件について，供試体が破断するまで載荷を継続した．

図-8 より，応力比 0.1 および 0.3 のいずれの条件においても，FSP 供試体は AW 供試体と比較して明確な疲労寿命の延伸が確認された．

3.1 節の硬さ試験結果の通り，FSP 部に顕著な硬化は認められないことから，疲労寿命が向上した主要因は金属組織の微細化であると考えられる．結晶粒が微細化すると，未溶着部先端から進展するルートき裂の伝播経路が粒界に沿って複雑に偏向しやすくなる．このき裂の蛇行によってき裂進展抵抗が増加し，進展速度が遅延したことが，疲労寿命の大幅な延伸に寄与したと推察される．

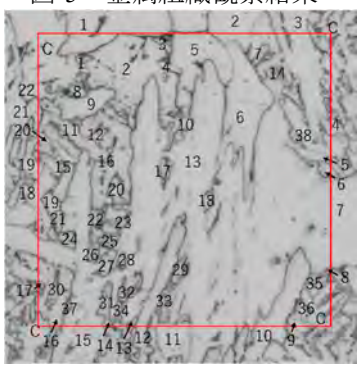


図-6　結晶粒度評価図（溶接部）

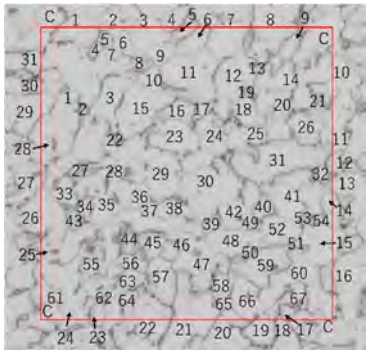


図-7　結晶粒度評価図（FSP 部）

4.　まとめ

(1) 溶接ビードの表面から FSP を施した．結晶粒度評価の結果，結晶粒度番号は溶接部の G=5.9 から FSP 部では G=6.8 に向上し，定量的な金属組織の微細化が確認された．

(2) 4 点曲げ疲労実験では，応力比 0.1 および 0.3 の双方で FSP 供試体の疲労寿命が大幅に延伸した．FSP 部に顕著な硬化が認められないことから，金属組織の微細化によってルートき裂の伝播経路が粒界に沿って複雑に偏向・蛇行し，き裂進展抵抗が増加したことが，ルートき裂進展の遅延および疲労寿命延伸の主要因であると考えられる．

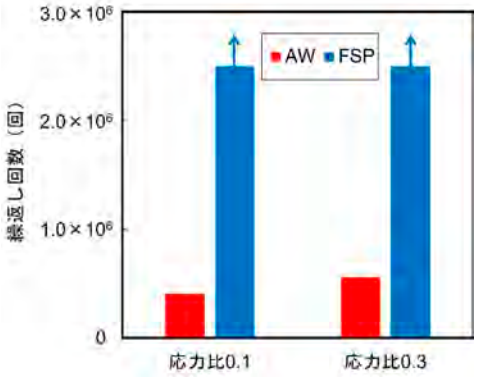


図-8　疲労実験結果

参考文献

1) W. M, Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. T. Smith, C. J. Dawes: PCT/GB92/02203, December 6, 1991.

2) F. Jiang, Y. Tang, M. Hirohata. Y. Morisada, M. Mukuda, H. Fujii: Optimized Tilted Friction Stir Processing for fatigue improvement of steel butt-welded joints, International Journal of Fatigue, 203, 109317, 2025.10.

3) Y. Tang, F. Jiang, M. Hirohata, H. Nakase, Y. Morisada, M. Mukuda, H. Fujii: Fatigue life improvement of fillet welded joints by friction stir processing, 10.1007/s40194-026-02445-8, Welding in the World, 2026.4.

4) 沢井達明，松岡三郎，津崎兼彰：超微細粒低炭素鋼の疲労特性，鉄と鋼，第 89 巻 6 号，2003.

5) 神谷尚秀，田中優樹，井上圭介，石倉亮平：Nb 添加肌焼鋼の オーステナイト 生成挙動におよぼす前組織と加熱昇温速度の影 響，電気製鋼，第 88 巻 2 号，2017.10.