

未溶着を含む荷重伝達型十字溶接継手の低サイクル疲労強度と破壊起点

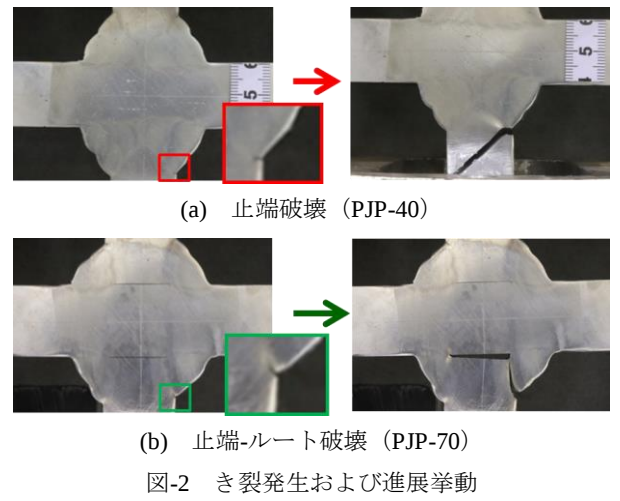
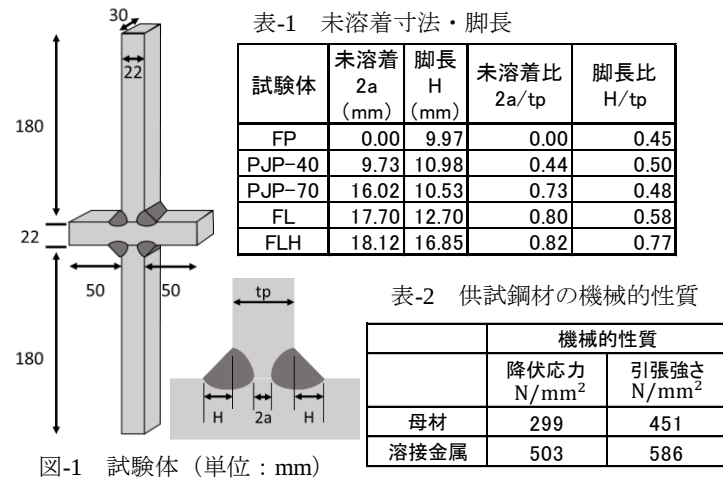
名古屋大学 学生会員 ○大橋優子 正会員 判治剛 フェロー会員 館石和雄 正会員 清水優

1. 研究の背景・目的 完全溶込み溶接が求められる鋼製橋脚の隅角部や落橋防止装置の溶接継手部に未溶着が内在していることが明らかになった^{1,2)}。これらの継手部では地震時に過大荷重が繰り返される可能性があり、低サイクル疲労き裂の発生が危惧される。本研究では未溶着を含む荷重伝達型十字溶接継手を対象に、低サイクル疲労試験と Effective notch 概念を導入した有限要素解析により、き裂発生点や疲労強度について検討した。

2. 試験体 過去の研究³⁾を参考に、未溶着を含む荷重伝達型十字溶接継手を用いて実験を行った。試験体の詳細を図-1、表-1 に示す。主板および付加板には板厚 22mm の SM400A を、溶接材料には NSSW YM-26 を用いた。溶接の溶込み量と脚長を変化させ、未溶着比（未溶着寸法 2a／主板厚 tp）と溶接脚長比（溶接脚長 H／主板厚 tp）の異なる試験体を製作した。今回は、完全溶込み溶接（FP）、未溶着比の異なる部分溶込み溶接（未溶着比 40％：PJP-40、70％：PJP-70）、脚長比の異なるすみ肉溶接（脚長比 40％：FL、70％：FLH）の計 5 種類の継手を用意した。母材および溶接部から切り出した丸棒試験体による引張試験結果を表-2 にまとめる。今回の試験体は 68％硬質継手であった。これらの十字継手に対する引張試験を行った結果、すべて母材部で破断し、引張強度の観点からは試験体間での差はほとんどなかった。また、溶接止端半径は 0.6 ～ 1.2 mm 程度の範囲に分布しており、試験体間での分布傾向に顕著な違いはみられなかった。

3. 低サイクル疲労試験 未溶着部をまたぐようにパイ型変位計を両側面に設置し、その変動範囲の平均値が一定になるよう制御して疲労試験を行った。変位の最小値はゼロとした。各サイクルの最大変位時に試験体側面を撮影し、き裂の発生および進展を観察した。き裂発生および進展挙動の例を図-2 に示す。どの試験体も溶接止端からき裂が発生した。FP、PJP-40、FLH では、き裂が主板の板厚方向に進展し、破断に至った（止端破壊とよぶ）。一方、PJP-70 と FL では、き裂は HAZ と溶接金属の境界あたりを進展し、溶接ルートとつながり破断に至った（止端－ルート破壊とよぶ）。き裂長と繰返し数の関係を図-3 に示す。破壊形態により破断するまでの繰返し数は異なっており、止端破壊のほうが止端－ルート破壊よりも破断までに多くの回数を要した。

試験体側面において 0.5mm のき裂を確認したときの繰返し数をき裂発生寿命とし、疲労試験の結果を整理したものを図-4 に示す。縦軸は公称ひずみ範囲であり、変位範囲を変位計の標点間距離で除したものである。図中には過去に行われた実験³⁾でルート破壊した硬質継手の結果を加えている。破壊形態によってき裂発生寿命に差がみられ、止端破壊する場合はルート破壊する場合より寿命が長い。また同じ止端破壊であれば、未溶着の有無によらず、き裂発生寿命はほぼ同程度である。



キーワード 低サイクル疲労、未溶着、溶接継手、Effective notch ひずみ

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 TEL：052-789-4620

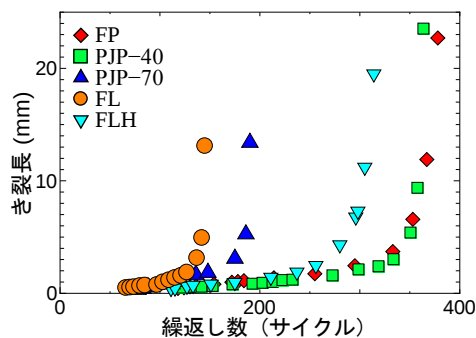


図-3 き裂長—繰返し数

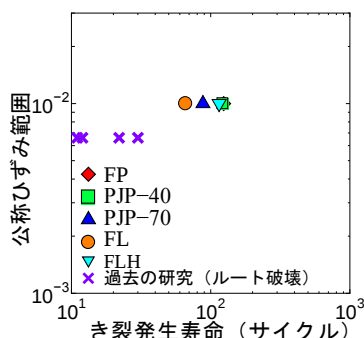


図-4 公称ひずみ範囲—き裂発生寿命

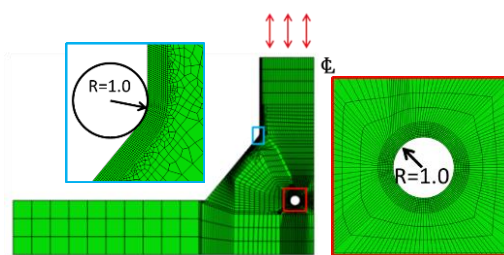


図-5 解析モデル・境界条件

4. Effective notch ひずみによる低サイクル疲労評価

未溶着比や脚長比による破壊形態の変化について検討するために、弾塑性有限要素解析により、き裂発生点になりうる溶接止端と溶接ルートの局所的なひずみ場を明らかにし、局部ひずみによる評価を試みた。ここでは、高サイクル疲労の分野で提案されている Effective notch⁴⁾を止端部とルートに導入して解析を行った。

4. 1. 解析方法

解析モデルと境界条件を図-5 に示す。解析には Abaqus6.14-3 を用い、平面ひずみ状態を仮定した 2 次元解析とした。試験体の対称性を考慮し 1/4 モデルで解析を行った。溶接止端とルート (FP は止端のみ) に曲率半径 1mm の円弧 (Effective notch)⁴⁾を導入した。Effective notch 周りの要素サイズは 0.05mm で統一した。母材、溶接金属、HAZ を分けて要素分割し、それぞれ別々の材料構成則を適用した。母材と溶接金属には引張試験により得られた応力—ひずみ関係を設定し、HAZ には母材の 20% 増しの構成則を仮定した。弾性係数は 200kN/mm²、ポアソン比は 0.3 とした。硬化則には混合硬化則を用いた。繰返し変位を与えて解析を行い、Effective notch に沿った要素の Effective notch ひずみ範囲⁵⁾ (ENS とよぶ) を求めた。

4. 2. ひずみ分布

解析モデルに 5.5 サイクルの繰返し変位を与えたときの Effective notch 付近の相当塑性ひずみ分布を図-6 に示す。止端破壊の場合は止端から主板にかけて、止端—ルート破壊の場合は止端からルートにかけて高い塑性ひずみが生じており、き裂進展経路とおおむね一致している。

4. 3. ENS と破壊形式の関係

溶接ルートと止端における ENS を求め、その比 (ルート/止端, ENS 比とよぶ) とき裂発生寿命の関係を図-7 に示す。図中には図-4 に示す試験結果を載せている。図より、ENS 比の大きさによって破壊形式が異なり、ENS 比が 1 より大幅に小さい場合には止端破壊が、1 付近 (0.9 ~ 1.1) の場合には止端—ルート破壊が、それ以上の場合にはルート破壊が生じる傾向が確認できる。

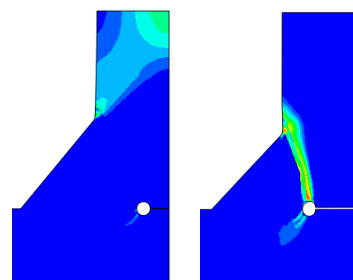


図-6 ひずみ分布

5. まとめ

本研究では、未溶着を含む荷重伝達型十字溶接継手を対象に、未溶着や溶接脚長の大きさが低サイクル疲労強度や破壊形式に与える影響を検討した。その結果、未溶着比が小さい場合には完全溶込み溶接と同様に止端破壊が生じ、き裂発生寿命もほぼ同程度であること、溶接ルートと止端における Effective notch ひずみ範囲の比を用いることで、未溶着を含む十字継手の破壊起点を評価できる可能性が示された。

謝辞

本研究の一部は、日本溶接協会「平成 29 年度 次世代を担う研究者助成事業」によるものである。試験体の製作にあたり、川田工業 津山忠久氏、MK エンジニアリング 竹渕敏郎氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して深謝します。

参考文献

1) 三木・平林：土木学会論文集 A, Vol.63, No.3, pp.518-532, 2007. 2) 落橋防止装置等の溶接不良に関する有識者委員会：中間報告書, 2015. 3) 判治ら：溶接学会論文集, Vol.29, No.3, pp.162-173, 2011. 4) Fricke, W.: IIW, XIII-2240-08/XV-1289-08, 2008. 5) Saiprasertkit, K. et.al.: Int. J. of Fatigue, Vol.40, pp.120-128, 2012.

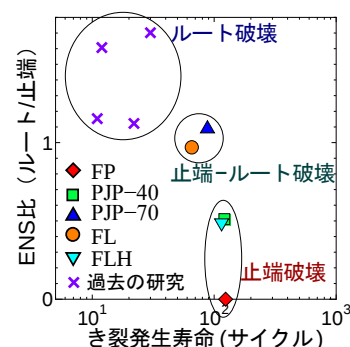


図-7 ENS 比—き裂発生寿命