

溶接部にき裂補修が施された十字溶接継手の疲労寿命と疲労強度評価法

瀧上工業株式会社 正会員 ○櫻井 勇太

岐阜大学 正会員 木下 幸治

1. 背景・目的

疲労き裂を補修する手法のひとつにストップホール法がある。ストップホール法は疲労き裂の先端にストップホール（以下、SH）と呼ばれる円孔を削孔することで、き裂進展の遅延および停留を期待できる手法である¹⁾。これまでに SH 法の補修効果および SH 法が施された継手の疲労強度評価法を明らかにするため、多くの研究報告がなされている。既往研究²⁾では、溶接止端部を起点とする疲労き裂に対して、溶接部にかかる SH を削孔した場合の疲労強度評価法および溶接止端部と SH の応力集中の重畳を解消する工夫が検討されている。検討の結果、エフェクティブノッチストレス法³⁾

（以下、ENS 法）による SH 近傍の局部応力を用いることで、森ら⁴⁾が提唱した SH の基準疲労強度曲線により疲労強度の下限值を評価可能であることが示されている。また、き裂先端を除去できる範囲内で SH 中心を溶接止端からずらすことで応力集中の重畳を解消可能であることを明らかにしている。一方、荷重伝達型十字溶接継手にみられる溶接ルート部を起点とするき裂に対しても溶接部にかかる SH が施されており、その疲労寿命および疲労強度評価法の確立が求められている。ところで、ENS 法による疲労強度評価では溶接ルート部の仮想円弧と SH が交差する複雑なモデルの作成が困難である。ENS 法と同様に局部応力に基づく疲労強度評価法に 1mm 法⁵⁾がある。1mm 法は、き裂起点からき裂進展方向に 1mm の位置の局部応力（以下、1mm 応力）を用いて疲労強度を評価する手法であり、ENS 法のような仮想円弧のモデルが不要なため、モデル作成が比較的容易であることから、ルート部と SH が交差する解析モデルの構築が可能と考えられる。加えて、1mm 法により、SH 法が施された溶接止端とルート部の疲労強度を統一的に評価可能と考えられる。

本概要では、溶接部に SH 法が施された溶接ルート部の疲労寿命を明らかにすることを目的に、荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労試験を実施した。さらに、溶接ルート部と止端部を起点とする疲労き裂に SH 法を施した十字溶接継手の疲労強度評価を目的に、1mm 法を用いた局部応力に基づく疲労強度評価を試みた。

2. 荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労試験

図-1 に本研究で疲労試験を実施した荷重伝達型十字すみ肉溶接継手試験体を示す。図-1 に示すように、SH を削孔していないものを Type1、ルート先端からのど厚方向に伸びるき裂を模した幅 2mm のスリットを施し、両端に直径 12mm の眼鏡型 SH を施したものを Type2 と

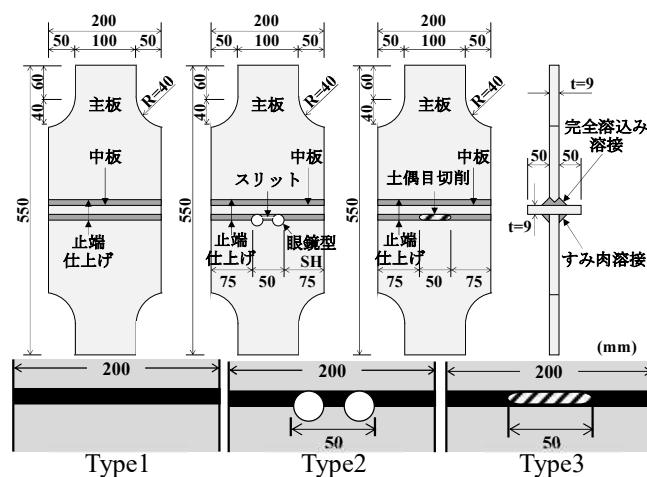


図-1 荷重伝達型十字すみ肉溶接継手試験体

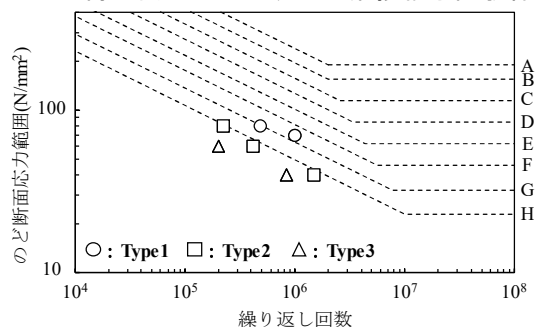


図-2 疲労試験結果(のど断面応力範囲で整理)

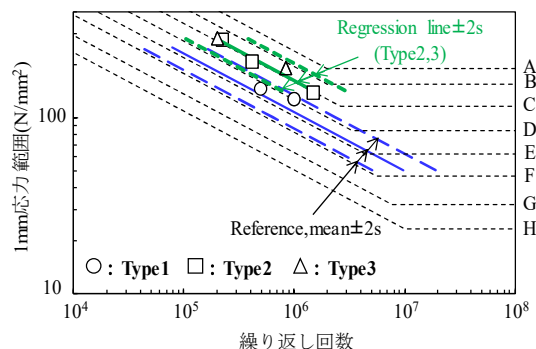


図-3 溶接ルート部の疲労強度評価結果

した。また、実際のき裂補修にて補修事例のある土偶目切削⁶⁾(土偶の目のように丸みを帯びた曲面形状でき裂先端の溶接ビードおよび母材を削り込み、き裂先端を除去するとともに溶接ルート部を露出させる補修方法)を溶接ビード中央の 50mm の範囲に施したものを Type3 とした。全ての試験体の使用鋼材は SM490A とし、主板および中板の板厚は 9mm、溶接脚長は 6mm とした。これらの試験体を用いて一軸引張疲労試験を実施した。疲労試験は応力比がほぼ 0 となるよう繰返し荷重（正弦波）を設定した。図-2 にのど断面応力範囲で整理し

キーワード ストップホール法、疲労寿命、疲労強度評価、1mm 法、局部応力、十字溶接継手

連絡先 〒475-0826 愛知県半田市神明町一丁目 1 番地 瀧上工業株式会社 TEL 0569-89-2103

た疲労試験結果を示す。図-2より、Type1はG等級近傍を示した。Type2は、Type1より1等級低いH等級近傍を示した。これは、有限要素解析より得られた溶接ルート部の局部応力より、Type2はType1に比べてSH近傍の局部応力が局所的に高いため、Type2の疲労強度がType1に比べて低い結果となったと考えられる。Type3は、Type2より1等級程度低い疲労寿命であった。これは、試験体破面のビーチマーク観察結果より、き裂起点がSH中心から溶接ルート方向に約8~14mm内部であったType2と異なり、Type3は土偶目切削部の表面に露出した溶接ルート部の先端からき裂が進展しているため、SHに比べて補修効果は低いと考えられる。

3. 1mm法に基づく溶接ルート部の疲労強度評価

疲労試験を実施した各試験体のモデルを用いて有限要素を実施し、疲労試験結果を溶接ルートの1mm応力で整理することで、1mm法に基づく疲労強度評価を試みた。図-3に有限要素解析より得られた溶接ルート部の応力集中位置から深さ1mmの位置の1mm応力で整理した疲労試験結果と1mm法における溶接ルートの基準疲労強度曲線 $\pm 2s$ （信頼度95%）範囲を示す。図-3より、Type1は基準疲労強度曲線 $\pm 2s$ 範囲内を示した。一方、SHおよび土偶目切削を施したType2,3は、基準疲労強度曲線の $+2s$ から1等級程度上側を示したが、疲労試験結果のばらつきが小さくなり、Type2,3の最小二乗法による回帰曲線がJSSC-C等級近傍を示した。これより、荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の溶接部にき裂補修が施された溶接ルート部の疲労強度は、応力集中位置から深さ1mmの位置の1mm応力を用いることで、1mm法の基準疲労強度曲線の $\pm 2s$ 範囲ではないが、JSSC-C等級疲労強度曲線により評価可能と考えられる。

4. 1mm法に基づく溶接止端部の疲労強度評価

図-4に既往研究²⁾で実施された荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手疲労試験体の内、本研究で対象としたき裂起点が溶接止端部であった試験体を示す。なお、試験体番号は既往研究²⁾と整合する番号である。図-4に示すように、SHを削孔していないものがType1、溶接止端にSH中心と止端のずれがそれぞれ1.5mmとなるようSHを削孔されたものがType2,3、眼鏡型SHを止端とのずれがそれぞれ1.5mmとなるように削孔されたものがType7,8である。SHと溶接止端部の応力集中の重畳は、溶接止端とSH中心のずれの小さいType2,7で生じるものである。図-5に公称応力範囲で整理した疲労試験結果を示す。各疲労試験体のモデルを用いて有限要素解析を実施し、疲労試験結果を溶接止端の1mm応力で整理することで、1mm法に基づく疲労強度評価を試みた。図-6に有限要素解析より得られた溶接止端部の応力集中位置から深さ1mmの位置の1mm応力で整理した疲労試験結果と1mm法における溶接止端の基準疲労強度曲線 $\pm 2s$ （信頼度95%）範囲を示す。図-6より、Type1は基準疲労強度曲線の $\pm 2s$ の範囲内を示した。一方、SHを削孔したType2,3,7,8は $+2s$ より上側を示した。このうち、溶接止端とSHの応力集中の重畳を

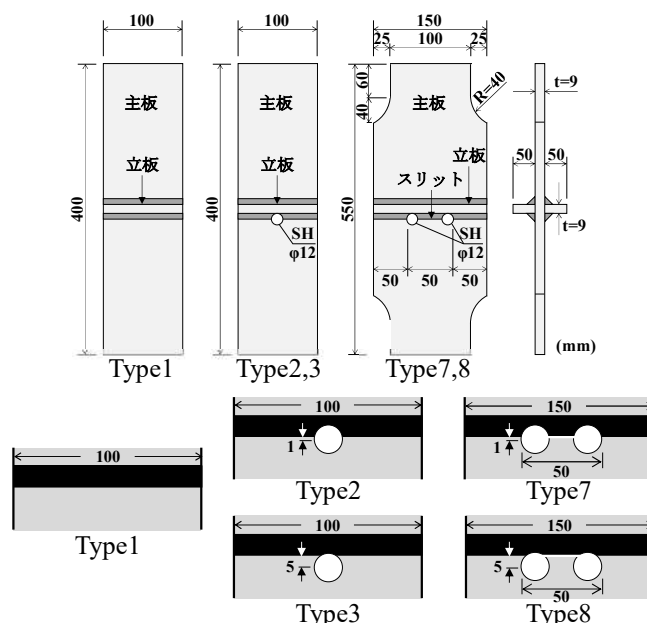


図-4 荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手試験体²⁾

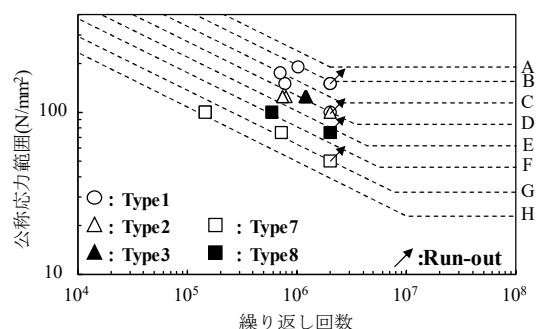


図-5 疲労試験結果(公称応力範囲で整理)²⁾

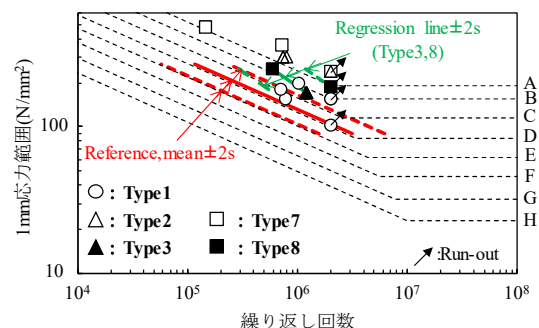


図-6 溶接止端部の疲労強度結果

解消したType3,8は、疲労試験結果のばらつきが小さくなり、最小二乗法による回帰曲線がB等級近傍を示した。これより、荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手の溶接部にSHが施された溶接止端部の疲労強度は、溶接止端とSHの応力集中が重畳する場合を除き、応力集中位置から深さ1mmの位置の1mm応力を用いることで、1mm法の基準疲労強度曲線の $\pm 2s$ 範囲ではないが、JSSC-B等級疲労強度曲線で評価可能と考えられる。

<参考文献>

- 1)日本道路協会:鋼橋の疲労,丸善,1997.2)
- 2)日本鋼構造協会:JSSCテクニカルレポート, No.115,2018. 3)Fricke, W.: Round-robin study on stress analysis for the effective notch stress approach, *Welding in the World*, Vol.51, pp.68-79, 2007. 4)森ら:ストップホール補修部材の疲労強度に対する鋼材静的強度の影響,鋼構造年次論文報告集,第10巻, pp.297-304,2002. 5)山田ら:すみ肉溶接止端近傍の応力に着目した付加物溶接継手の疲労強度解析,構造工学論文集, Vol.48A, pp.1047-1054,2002. 6)小林ら:鋼床版の疲労損傷と補修・補強の一例-鋼上部工補強工事 3-4-,宮地技報, No.27, pp.78-81,2014.