

第 I 部門 突合せ溶接継手の曲げ疲労性能に及ぼす形状因子の分離評価

| | |
|--------------|--------|
| 大阪大学大学院工学研究科 | ○野田 雄也 |
| 大阪大学大学院工学研究科 | 小川 太希 |
| 株式会社小松製作所 | 濱田 柔久 |
| 株式会社小松製作所 | 松尾 祐希 |
| 株式会社小松製作所 | 田中 宏徳 |
| 大阪大学大学院工学研究科 | 堤 成一郎 |

1. 緒言

金属疲労は機械・構造物の損傷原因の約 8 割を占め、特に溶接部は応力集中により疲労破壊の起点となりやすい。また、応力集中係数（以下 K_t ）と疲労寿命には強い相関があり、 K_t の簡易推定式が複数提案されている。しかし、式に入力される形状パラメータは従来、目視により評価していたため、個人差が大きく、多大な労力と時間を要することが課題であった。

そこで著者ら¹⁾²⁾は、余盛形状全体を滑らかに接続される 3 種類の関数で自動かつ一意に同定することにより、各形状パラメータを矛盾なく高速に評価可能な手法を提案するとともに、突合せ溶接継手の引張疲労条件下で疲労性能支配因子の明確化が行われた。しかし、本手法の曲げ疲労条件への適用性は明らかにされていない。また、曲げ疲労条件での K_t 推定に及ぼす目違いや角変形の影響も十分解明されていない。

そこで本研究では、突合せ溶接継手の曲げ疲労性能評価手法を確立することを目的とし、突合せ継手の多断面の形状分析により得られる K_t および目違い・角変形の影響係数（以下 K_m ）が疲労性能に及ぼす影響に関して分析を行う。

2. 評価対象継手および疲労試験結果

研究の評価対象継手は SS400 鋼板を用いて突合せ継手を作製した。目違いを 4 段階(0,1,2,3mm)、ルートギャップを 2 段階(2,3mm)に変化させ、計 15 体の試験片を製作し、4 点曲げ疲労試験を実施した。試験結果の公称応力範囲に基づき作成した S-N 曲線を Fig. 1 に示す。試験結果のばらつきを示す標準偏差は 0.267 であり、同一荷重条件下で約 5 倍の疲労寿命差が生じることを確認した。

3. 自動多断面形状分析と疲労性能評価

15 体の試験片に対し 3D スキャナを用いて形状を計測した。3D 点群データから約 0.5mm 間隔で 2 次元断面データを出力し、取得した断面に対し自動多断面形状分析を実施した。フィッティングした関数形状と実形状データが高精度で一致することを確認した。

本研究では、Lawrence らが提案した曲げ疲労条件下の K_t 簡易推定式を採用し、止端半径、フランク角、板厚から K_t を算出した。曲げ条件の K_m として、Xing ら³⁾の式を採用し曲げ疲労試験における試験片形状の影響を近似的に確認する。

(1) 破断開始位置の予測

各試験片の 4 箇所止端において全断面の K_t 値の中央値を算出し、最大値を示す止端から破断が開始すると仮定した結果、予測精度は 12/15 と高いことが示された。また同様に、 $K_t \cdot K_m$ についても評価を行い、目違いが大きな試験片に関して精度が向上した。

(2) 局所応力範囲・修正応力範囲による疲労性能評価

公称応力範囲に K_t を乗じて算出した局所応力範囲による S-N 曲線を Fig. 2 に、局所応力範囲に K_m を乗じて算出した修正応力範囲による S-N 曲線を Fig. 3 に示す。それぞれの標準偏差を Table 1 にまとめて示す。これより、試験結果の S-N 曲線に対してばらつきが抑制された。これにより、余盛と試験片の形状が疲労性能に大きな影響を与えることが示された。ただし、TP-7-1,8-1 に関しては形状分析による目違い角変形の計算が困難な試験片であったため標準偏差に関しては別途比較した。

Yuya NODA, Taiki OGAWA, Norihisa HAMADA, Yuki MATSUO, Hironori TANAKA and Seiichiro TSUTSUMI

y.noda@civil.eng.osaka-u.ac.jp

Table 1 Standard deviation for S-N curves for various stress ranges

| Evaluated stress range | Standard deviation 15 pieces | Standard deviation 13 pieces |
|--|------------------------------|------------------------------|
| Nominal stress range ($\Delta\sigma'$) | 0.267 (m=3) | 0.278 (m=3) |
| Local stress range ($\Delta\sigma_{Kt}=\Delta\sigma' \times Kt$) | 0.194 (m=5.07) | 0.193 (m=5.87) |
| Modified stress range ($\Delta\sigma_{Kt \cdot Km} = \Delta\sigma' \times Kt \times Km$) | - | 0.161 (m=4.66) |

Table 2 Correlation coefficient (R) between lifetime factor (V_N) and geometry parameters (and Kt, Km)

| R | Weld geometry parameters | | | | | | Kt (Lawrence) | Km (Xing) | Kt×Km |
|---|--------------------------|------|----------|--------|----------|-------|------------------|--------------|-------|
| | α | W | δ | ρ | θ | e | | | |
| | -0.23 | 0.54 | 0.10 | 0.57 | -0.71 | -0.67 | -0.56 | -0.70 | -0.74 |

(3) 局所応力範囲・修正応力範囲による疲労性能評価

公称応力範囲に Kt を乗じて算出した局所応力範囲による S-N 曲線を Fig. 2 に、局所応力範囲に Km を乗じて算出した修正応力範囲による S-N 曲線を Fig.3 に示す。それぞれの標準偏差を Table 1 にまとめて示す。これより、試験結果の S-N 曲線に対してばらつきが抑制された。これにより、余盛と試験片の形状が疲労性能に大きな影響を与えることが示された。ただし、TP-7-1,8-1 に関しては形状分析による目違い角変形の計算が困難な試験片であるため標準偏差は別途比較した。

4. 疲労性能に対する形状パラメータの影響評価

疲労性能に対する各形状パラメータの影響を明らかにするため、平均疲労寿命に対する個々の継手の寿命比率 V_n を定義した。各形状パラメータとの相関分析の結果を Table 2 に示す。疲労性能は止端半径と強い正の相関を持ち、フランク角と強い負の相関を持つことが確認された。以上より、形状パラメータが疲労性能に与える影響を分離して評価可能であることを示した。

5. 結言

以下に、検討した疲労性能評価手法とそれらの結果から得られた知見をまとめる。
 破断開始位置の予測精度は 12/15 と高く、余盛形状、試験片形状を考慮した Kt 、 $Kt \cdot Km$ の中央値と破断開始位置の相関が示された。
 また、局所応力範囲による評価では、曲げ条件下でも局所形状を考慮することで S-N 曲線のばらつきが抑制されることを示した。
 さらに、修正応力範囲による評価では、S-N 曲線のばらつきがさらに抑制され、目違い・角変形が曲げ疲労性能に大きく影響することを確認した。
 疲労性能は止端半径と強い正の相関、フランク角および目違いと強い負の相関を持つことを明らかにし、提案手法により各パラメータの影響を分離して評価可能であることを実証した。

参考文献

- 堤 成一郎, 小川 太希: 溶接継手の形状パラメータおよび応力集中係数の自動評価システムの開発, 土木学会論文集, Vol.80, No.5, 23-15033, 2024.
- 小川 太希, Luo Pengjun, 堤 成一郎: 溶接継手の多断面形状分析に基づく疲労性能支配因子評価技術の確立, 土木学会論文集, Vol.81, No.15, 24-15025, 2025.
- Xing, S., Dong, P.: An analytical SCF solution method for joint misalignments and application in fatigue test data interpretation, Marine Structures, Vol.50, pp.143-161, 2016.

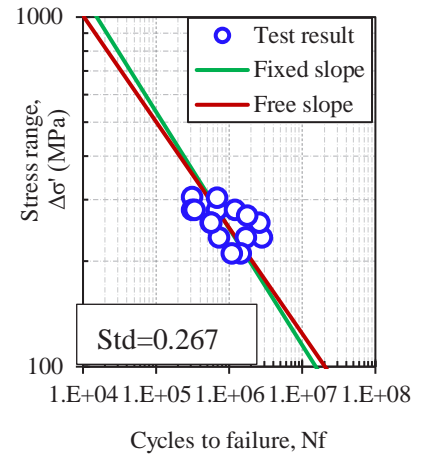


Fig. 1 S-N curve ($\Delta\sigma'$)

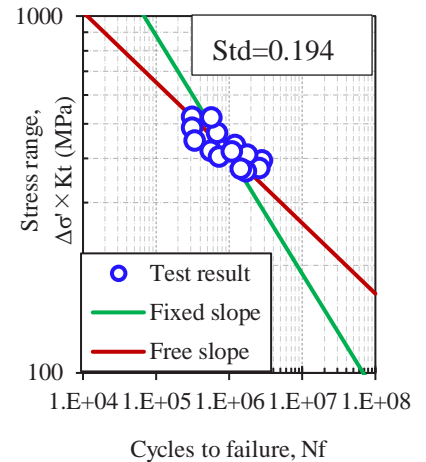


Fig. 2 S-N curve ($\Delta\sigma_{Kt}$)

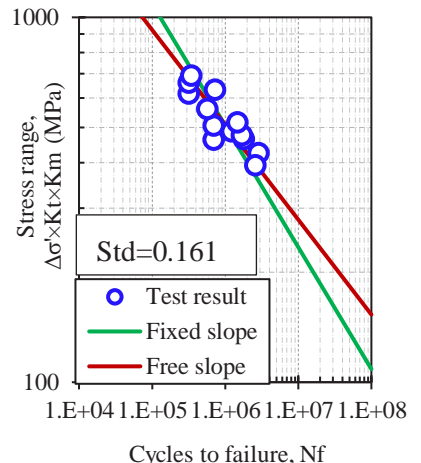


Fig. 3 S-N curve ($\Delta\sigma_{Kt \cdot Km}$)