

# 有効応力集中係数を考慮した修正ENS法の提案

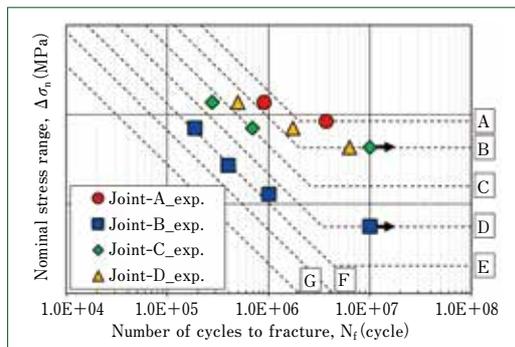
—裏当て金付き突合せ溶接継手への適用—

Proposal of Modified ENS Method Considering Effective Stress Concentration Factor  
—Application to Butt Weld Joints with Backing Plate—

●柴田 誉\* 佐藤 啓介\* 堀川 秀信\*\* 堤 成一郎\*\*\*  
Homare SHIBATA Keisuke SATOH Hidenobu HORIKAWA Seiichiro TSUTSUMI



油圧ショベル(SH200-7)  
Hydraulic excavator (SH200-7)



疲労試験結果  
Fatigue test results



疲労試験片  
Fatigue test specimen

溶接継手の疲労性能評価手法として、有効切欠き応力法(ENS法)が知られているが、過度に安全側の評価となる可能性があるうえ、角変形に関する明確な記述はない。一方、近年提案された有効応力集中係数は、引張側の応力範囲に基づいて定義され、一部の継手形式に対して疲労性能との相関の高さが示されている。本研究では、裏当て金付き突合せ溶接継手を対象として疲労試験を実施するとともに、有効応力集中係数を考慮した修正ENS法の提案を行う。はじめに、疲労寿命評価に用いる応力範囲においては、角変形を考慮した有効応力集中係数に基づく評価結果の予測精度が最も高いことを確認した。次に、有効応力集中係数の算出式を用いて修正S-N線図を提案した。提案手法により4種の継手に対して統一的高精度な寿命評価が可能であることを示した。

Effective notch stress method is well known as a general method to predict fatigue life from stress of both in welded toe and root. But it has probability to give safer side evaluation, and no description for angular distortion in the guideline. On the other hand, the effective stress concentration factor was proposed in recent years. It's defined on the stress range of the tensile side and shows high correlation with fatigue property of some types of welded joints. In this research, fatigue experiment to butt welded joint with backing plate has been conducted, and modified ENS method considering the effective stress concentration factor is proposed. Within the stress range in this research, the predicted result based on the effective stress concentration factor considering angular distortion is the most accurate to experiment results. And modified S-N diagram is proposed with using calculation method for effective stress concentration factor. It is possible for proposed method to evaluate fatigue life accurately for four types of welded joints.

## 1 まえがき

機械・構造物の老朽化問題が議論されるようになって久しく、以来疲労照査の導入が各所<sup>(1)</sup>で進められている。疲労問題は破壊事例のおよそ8割を占める<sup>(2)</sup>と言われる深刻な問題であり、特に溶接継手部において顕著である。

本研究において検討対象とする裏当て金付き突合せ溶接継手は、建設機械アタッチメントをはじめとする箱型構造物の

溶接時に多用される溶接継手形式である。この継手には、母材と裏当て金の間に高い応力集中部となる溶接ルート部が残存し、設計時には溶接止端部と合わせ双方からの疲労照査が必要となる。このような溶接止端部と溶接ルート部の両者を起点とする疲労問題の性能評価手法として国際溶接学会(IIW)が推奨する有効切欠き応力(ENS: Effective Notch Stress)法<sup>(3)</sup>が広く知られており、これまで多くの研究<sup>(4)(5)</sup>が行われている。ENS法では、溶接止端部や溶接ルート部の

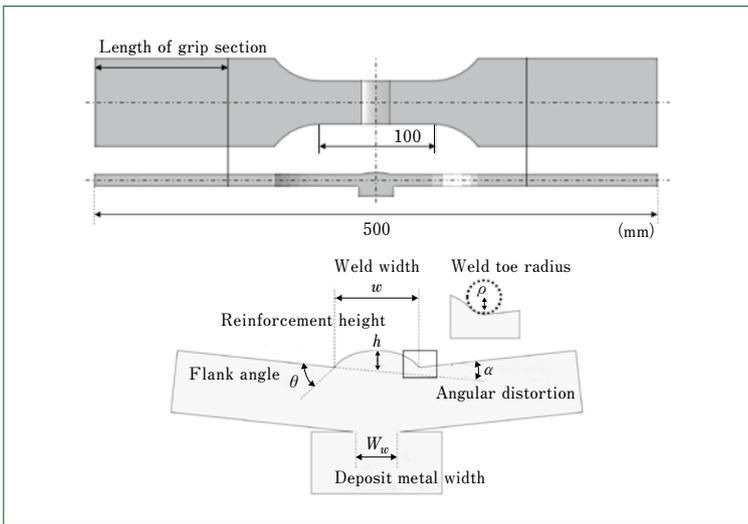


図1 疲労試験体形状および形状パラメータ定義  
Fatigue specimen geometry and geometry parameter definition

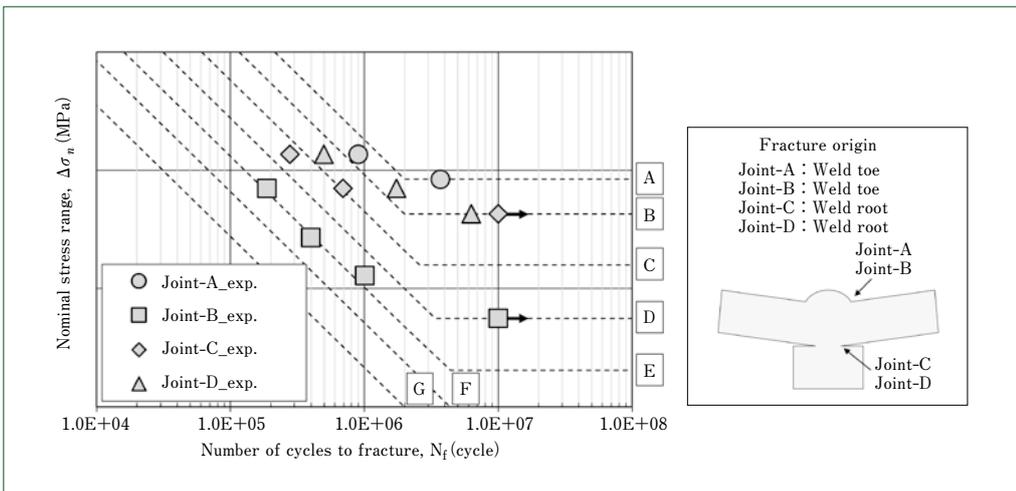


図2 疲労試験結果  
Fatigue test results

局所的な形状のバラツキや塑性変形の影響を勘案し、半径 1 mmの仮想円弧を設けたモデルの弾性解析による局所応力範囲を疲労に対する駆動力として算出する。そして、その値をIIWの規定する200万回疲労強度が225 MPaとなるMaster S-N線図(FAT225)と比較することによって疲労性能を評価する。しかし、この手法は、あくまでも安全設計を主目的とした評価方法であることから、疲労性能の高い継手においては過度に安全側の評価を与える可能性が懸念される。さらに、疲労寿命に大きな影響を与える溶接角変形に関する具体的な記述も見当たらない。

一方、疲労破壊起点部の局所応力範囲と疲労寿命は相関が高いことが知られており、特に角変形を有する継手においては、疲労試験における治具拘束後の局所応力範囲である有効局所応力範囲との高い相関が示されている<sup>(6)</sup>。さらに、活荷重に応じて変化する有効局所応力範囲を用いて応力集中を定義する有効応力集中係数 $\Delta K_t$ が提案されており、著者らも本継手形式の溶接止端部および溶接ルート部における有効応力集中係数 $\Delta K_t$ を評価可能な簡易予測式の開発を進めている。

そこで本研究では、溶接継手の高精度かつ簡易な疲労性能

予測手法の提案を目的として、まず裏当て金付き突合せ溶接継手を対象とした疲労試験を実施するとともに、従来ENS法では、その考慮の要否に関して明確な規定がない角変形の影響に関して考察する。次に、従来ENS法に対して有効応力集中係数 $\Delta K_t$ の概念を組み合わせた修正ENS法を提案し、疲労試験との照査により、その予測精度に関して検証を行う。

## 2 疲労試験

### 2.1 疲労試験体

母材にSM490A、裏当て金にSS400、溶接金属にJIS Z3312のYGW15材を使用して製作した疲労試験体形状を図1に示す。疲労試験体の種類はJoint-AからJoint-Dまでの4種類であり、それぞれ異なる溶接条件のもとで製作した。製作後、形状計測装置(Keyence VL Series)を使用して、図1中の定義に従い、形状パラメータを計測した。

### 2.2 疲労試験結果

疲労試験は、油圧サーボ疲労試験機を使用して実施した(応力比:  $R=0/0.1$ , 試験速度: 10Hz)。

図2に、疲労試験結果を示す。なお、試験結果は疲労試験

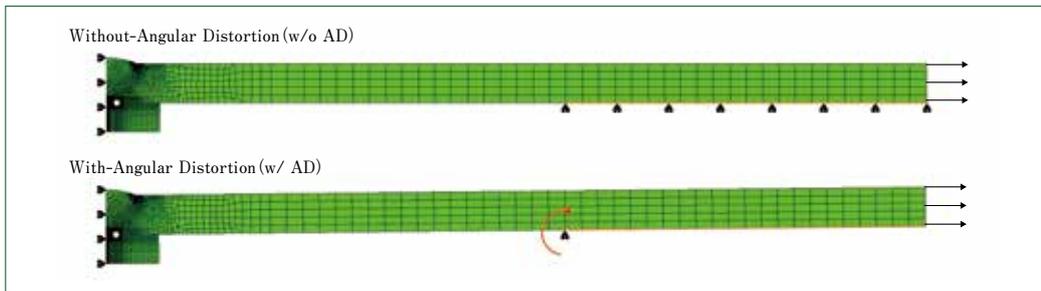


図3 解析モデルおよび解析条件(Joint-A)  
FE models and Analysis conditions (Joint-A)

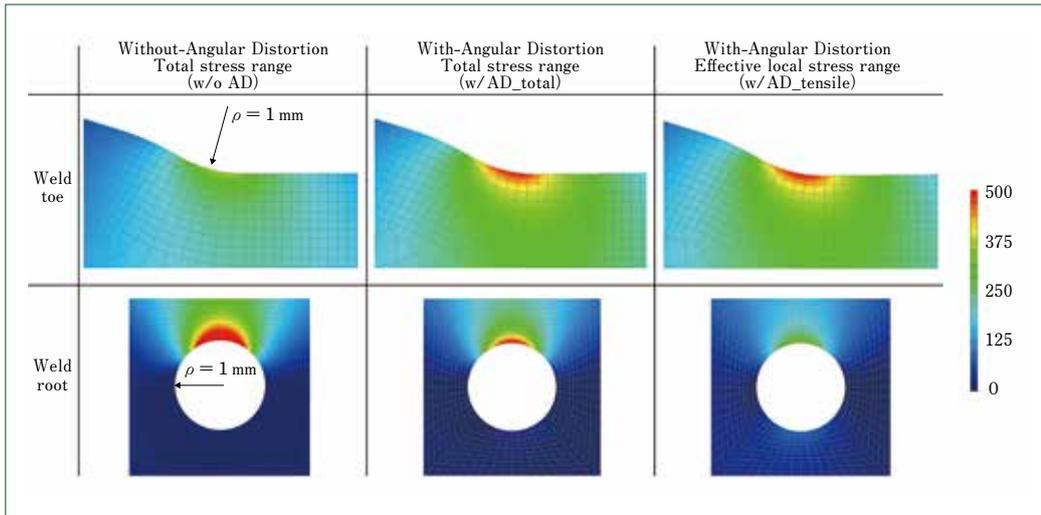


図4 疲労寿命評価に使用する局所応力範囲分布(Joint-A)  
Local stress range distributions for fatigue life evaluation (Joint-A)

体が完全に破断した繰返し数を破断寿命として定義している。黒破線で示したJSSCによるA等級からG等級までの疲労強度等級<sup>7)</sup>に注目すると、本継手形式はF等級と設定されており、全試験結果はこれを満足している。また、既往の実験結果と同様にE等級からB等級程度まで幅広く存在し、試験体ごとの差が大きいたことが確認された。疲労き裂発生起点は、破断面観察によりJoint-AおよびBが溶接止端部、Joint-CおよびDが溶接ルート部であった。

### 3 Master S-N線図基準の従来ENS法による疲労寿命評価

本章では、2章の疲労試験結果に対して、従来法であるMaster S-N線図基準のENS法による疲労寿命評価を行う。また、疲労寿命に対する角変形の影響および局所応力範囲取得方法に関する考察を行う。

#### 3.1 角変形(AD: Angular Distortion)を設定しない解析モデルに対する適用

はじめに、角変形を設定しない解析モデルの疲労寿命評価結果について述べる。

2章に示した角変形量以外の形状計測結果を参考に作成した解析モデルの一例(Joint-A)および境界条件を図3上段に示す(要素数 2914, 節点数 6212)。解析モデルには、IIWによる指針に倣い、溶接止端部および溶接ルート部に半径1 mmの仮想円弧を設定した。ただし、溶接止端半径が1 mm

以上の良好な形状の溶接継手は、溶接止端部の形状として実測止端半径を採用する。要素タイプは六面体1次要素であり、節点の奥行き方向変位を拘束することにより、平面ひずみ状態を再現した。なお、最小要素サイズは仮想円弧周辺において $0.1 \times 0.1 \times 1$  mm程度とした。

解析により得られた局所応力範囲の分布を図4の左列に角変形なし/全応力範囲(w/o AD)として示す。応力は節点平均値で出力した仮想円周方向の応力である。溶接止端部に比べ溶接ルート部の局所応力範囲が大きく、溶接ルート部から破断する結果となった。この傾向はJoint-BからJoint-Dの検討結果においても同様であり、検討の範囲ではすべて溶接ルート部から疲労破断が予測される。しかし、これは疲労試験における疲労き裂発生起点と一致していない。また、図5にMaster S-N線図を用いて評価したJoint-Aの疲労寿命評価結果を示すが、w/o ADは疲労試験結果と比べて非常に短寿命という予測結果となることが確認できる。

これらのことから、角変形を考慮しない従来ENS法による疲労寿命評価結果は実現象を反映できず、過度に安全側の評価結果を与える場合があることが示された。

#### 3.2 ADを設定した解析モデルに対する適用

次に、角変形を設定したモデルに対する検討結果について述べる。

疲労寿命評価に使用した解析モデルおよび境界条件は図3下段の通りである。すべての形状パラメータは2章の形状計

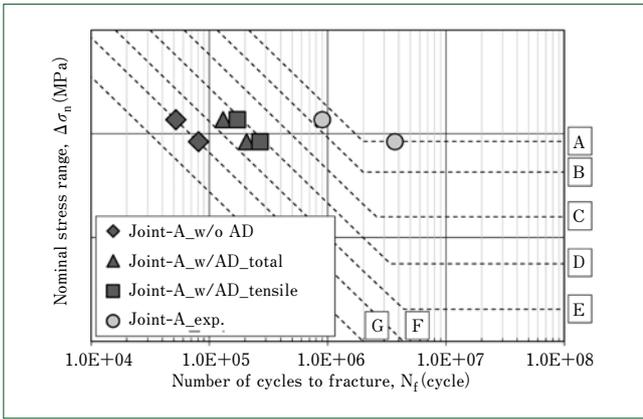


図5 各種応力範囲による疲労寿命予測結果 (Joint-A)  
Fatigue life evaluations by various stress ranges (Joint-A)

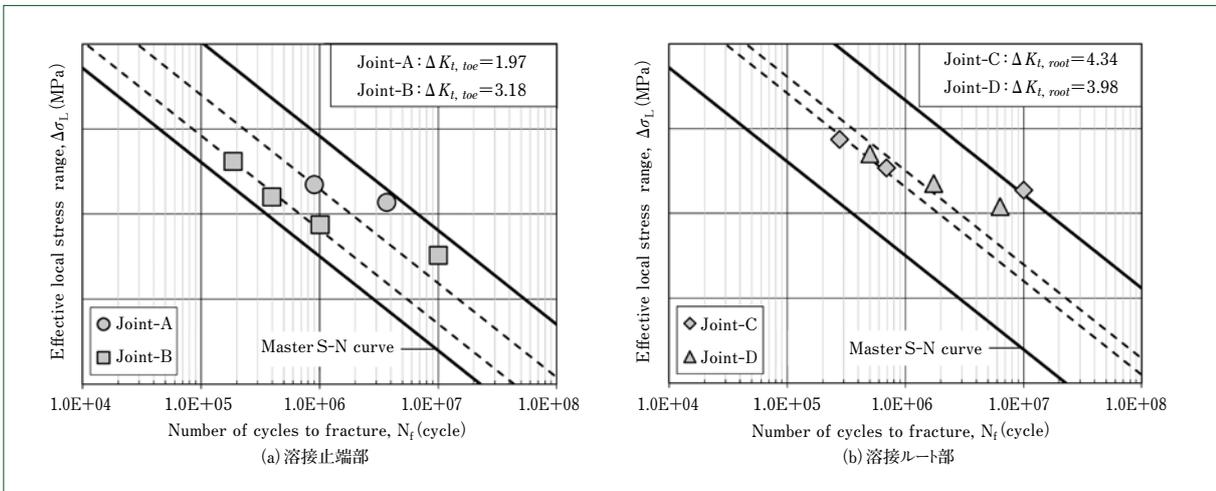


図6 有効局所応力範囲と破断寿命の関係  
Relationship between effective local stress range and fracture life

測結果を参考にしている。応力解析は、疲労試験の荷重載荷状態を再現すべく、治具拘束を模擬した強制変形を保持したまま疲労荷重の载荷を行った。疲労寿命評価に使用する応力範囲は、通常用いられる角変形あり/全応力範囲(w/AD\_total)のほかに、治具拘束後の引張側局所応力範囲である角変形あり/有効局所応力範囲(w/AD\_tensile)も採用し、応力範囲取得方法に関する検討を行った。

応力解析で得られた局所応力範囲分布を図4の中央および右列に示す。w/AD\_totalの最大値は溶接ルート部、w/AD\_tensileの最大値は溶接止端部であった。後者は疲労試験(Joint-A)における疲労き裂発生起点と一致し、全継手において一致する結果を得た。また、図5に示すMaster S-N線図を用いた疲労寿命評価結果についても、w/AD\_tensileが最も実験結果に近づいており、ENS法を用いた疲労寿命評価において解析モデルに角変形を考慮し、有効局所応力範囲を使用することの有用性が示された。一方、疲労試験結果に対するw/AD\_tensileの寿命予測結果の割合は1/5程度であり、過度に安全側といえる評価結果であった。この傾向はその他継手についても同様であり、統一的に高精度な疲労寿命評価が可能であるとは言い難い。

これらのことにより、Master S-N線図基準のENS法による疲労寿命評価結果において、解析モデルに角変形を考慮し、

有効局所応力範囲を使用することの有用性が示されたものの、疲労寿命の評価は過度に安全側となった。より高精度な評価手法の確立が望まれる。

#### 4 有効応力集中係数 $\Delta K_t$ の簡易予測式

一般に疲労問題は応力集中部において顕著となることから、溶接継手の応力集中係数簡易予測式に関する研究<sup>8)</sup>が多く行われている。しかし、角変形を有する継手の場合は、治具拘束によって溶接止端部や溶接ルート部を中心に応力が分布することから、その定量評価や取り扱いが難しい。

他方、既往研究<sup>6)</sup>において治具拘束の影響を除外した有効応力集中係数  $\Delta K_t$  が提案されており、疲労性能との高い相関が示されている。ここに、有効応力集中係数  $\Delta K_t$  の定義は式(1)とし、疲労試験における治具拘束後の引張側局所応力範囲である有効局所応力範囲と公称応力範囲の比として与える。

$$\Delta K_t = \frac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma_n} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta\sigma_L$ ：有効局所応力範囲、 $\Delta\sigma_n$ ：公称応力範囲  
これにより、著者らも裏当て金付き突合せ溶接継手の溶接止端部および溶接ルート部における簡易予測式の開発・改善を進めており、それぞれ式(2)、(3)に示す。

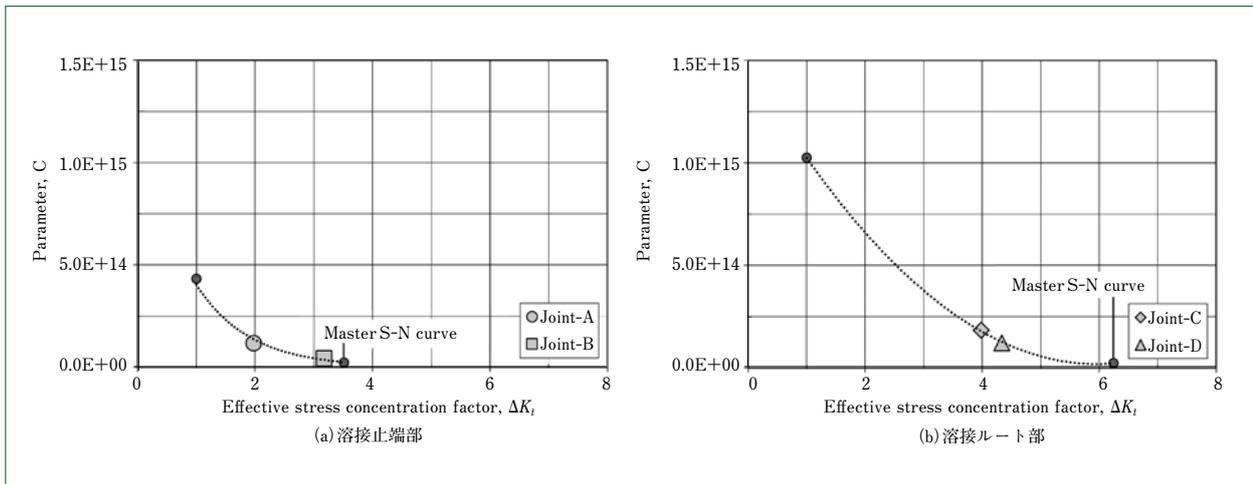


図7 有効応力集中係数 $\Delta K_t$ とパラメータCの関係  
Relationship between effective stress concentration factor  $\Delta K_t$  and Parameter C

$$\Delta K_{t, toe} = (1.0 + A1 \cdot \alpha) \cdot (1.0 + A2 \cdot F(h/t) \cdot F(w/t) \cdot F(\theta) \cdot \sqrt{t/\rho}) \dots (2)$$

ここで、 $F(h/t) = 1.0 - \exp(A3 \cdot (h/t)^{A4})$

$$F(w/t) = 1.0 - \exp(A5 \cdot (w/t)^{A6})$$

$$F(\theta) = \frac{1 - \exp(A7 \cdot (\rho/t)^{A8}) \cdot \theta}{1 - \exp(A7 \cdot (\rho/t)^{A8}) \cdot \frac{\pi}{2}}$$

$$\Delta K_{t, root} = \frac{\Delta \sigma_L}{\Delta \sigma_n} \dots (3)$$

$$\Delta \sigma_L = \begin{cases} \sigma_s \cdot (\sigma_{n, max} - \sigma_0) & (\sigma_0 < \sigma_{n, max}) \\ 0 & (\sigma_0 > \sigma_{n, max}) \end{cases}$$

ここで、 $\sigma_0 = f_{\sigma_0}(\alpha) \cdot f_{\sigma_0}(Ww/t) \cdot f_{\sigma_0}(h/t)$

$$f_{\sigma_0}(\alpha) = B1 \cdot \alpha \quad f_{\sigma_0}(Ww/t) = 1 + B2 \cdot (Ww/t)$$

$$f_{\sigma_0}(h/t) = B3 \cdot \left(1 - \frac{h/t}{B4 + h/t}\right)$$

$$\sigma_s = f_{\sigma_s}(\alpha) \cdot f_{\sigma_s}(h/t) \cdot f_{\sigma_s}(Ww/t)$$

$$f_{\sigma_s}(\alpha) = C1 - C2 \cdot \alpha$$

$$f_{\sigma_s}(Ww/t) = C3 + (C4 - C3) \cdot \frac{(Ww/t)^{C5}}{C6^{C5} + (Ww/t)^{C5}}$$

$$f_{\sigma_s}(h/t) = C7 + (C8 - C7) \cdot \frac{(h/t)^{C9}}{C10^{C9} + (h/t)^{C9}}$$

## 5 修正ENS法の提案

2～4章を踏まえて、修正ENS法の提案を行う。まず、5.1で4章の有効応力集中係数 $\Delta K_t$ を用いた修正S-N線図の提案を行う。その後、5.2において3章に述べた有効局所応力範囲と提案する修正S-N線図を組み合わせた疲労寿命評価を行い、これを修正ENS法として提案する。

### 5.1 疲労寿命評価に使用する修正S-N線図の提案

図6は、溶接止端部および溶接ルート部における有効局所応力範囲と実験における破断寿命の関係であり、図中の破線は、疲労限界付近以外のデータを使用した各継手に対する回帰線である。図中の実線はIIW基準のS-N線図であり、各継手の有効応力集中係数 $\Delta K_t$ は $\Delta \sigma_n = 180\text{MPa}$ 載荷時の値である。この結果より、各継手のデータはいずれもMaster S-N線図よりも上方に位置し、有効応力集中係数 $\Delta K_t$ が小さいほど乖離が大きいことが分かる。つまり、有効応力集中係数 $\Delta K_t$ が小さい継手は疲労寿命が長くなる傾向にある。

そこで本研究では、提案するS-N線図の一般式を式(4)のように設定し、有効応力集中係数 $\Delta K_t$ の大小と対応した修正S-N線図の提案を行う。なお、一般に疲労性能の高い継手はS-N線図の傾きが小さくなる傾向があるが、本研究では疲労試験データ数を考慮して傾きは $m = 3$ (一定)とし、パラメータCが支配する上下平行移動のみの修正を対象とする。

$$N = \frac{C}{\Delta \sigma_L^m} \dots (4)$$

図7に、溶接止端部および溶接ルート部における有効応力集中係数 $\Delta K_t$ とパラメータCの関係を示す。なお、各継手のパラメータCの値は疲労限界付近のデータを除いた平均値である。これらの点群と各継手の有効応力集中係数 $\Delta K_t$ を近似した関数が図中の点線であり、それぞれの関数形は式(5)および式(6)のように表現される。

溶接止端部

$$C = f(\Delta K_{t, toe}) = 1.22 \times 10^{15} \exp(-1.10 \Delta K_{t, toe}) \dots (5)$$

溶接ルート部

$$C = g(\Delta K_{t, root}) = 4.08 \times 10^{13} \Delta K_{t, root}^2 - 4.86 \times 10^{14} \Delta K_{t, root} + 1.47 \times 10^{15} \dots (6)$$

### 5.2 修正ENS法による疲労寿命評価結果

3章に述べた有効局所応力範囲と5.1で提案した修正S-N線図を用いた修正ENS法による疲労寿命評価結果を図8に

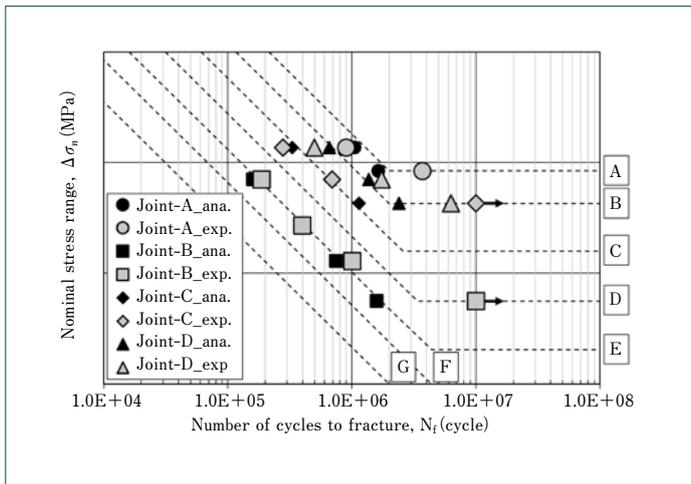


図8 修正ENS法による疲労寿命評価結果  
Fatigue life evaluation by modified ENS method

示す。灰色が実験結果、黒色が解析結果を示すが、疲労限付近を除けば解析結果は実験を統一的に精度良く再現できていることが見て取れ、本研究で提案する修正ENS法の有用性が示された。

溶接継手の形状パラメータを計測することにより、有効応力集中係数  $\Delta K_t$  が算出され、疲労寿命を精度良く再現することができる一連のシステムを提案した。本研究は、裏当て金付き突合せ溶接継手に対する検討であったが、両側/片側すみ肉溶接継手や重ね継手など、ほかの継手形式に対しても、同様の手順を踏むことにより高精度な疲労寿命評価システムの確立が可能である。また、このシステムを利用して、完成品の溶接継手形状を測定することにより高精度な疲労寿命を得ることができ、ENS法による数値解析で低疲労寿命と判断される箇所に対する現実的な疲労寿命評価が可能となる。

## 6 むすび

本研究では、裏当て金付き突合せ溶接継手を対象として疲労試験を実施し、従来ENS法の修正評価手法として修正ENS法の提案を行った。その結果、4種の溶接継手に対し、統一的に高精度な疲労寿命評価結果が可能であることを確認した。

得られた知見を次に示す。

- (1) 従来ENS法による疲労寿命評価において、角変形を設定しないモデルを用いた評価では疲労試験におけるき裂発生起点と解析の局所応力範囲最大位置は異なると予測されたが、角変形考慮/有効局所応力範囲で評価することにより全継手において一致し、その局所応力範囲取得手法の重要性が示された。
- (2) 提案する局所応力範囲取得手法および修正S-N線図を組み合わせた修正ENS法の疲労寿命評価により、全継手の疲労試験結果を高精度で予測することができた。

今後は、有効応力集中係数簡易予測式における検討モデル数や検証用の疲労試験体数を増やすことにより、より確度の高い汎用的な評価式の開発が期待される。

### (参考文献)

- (1) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説(Ⅱ鋼橋・鋼部材編), 丸善株式会社, 2017.
- (2) 日本材料学会, 疲労設計便覧, 株式会社養賢堂, 1995.
- (3) Hobbacher, A. F., Recommendations for fatigue design of welded joints and components Second edition, IIW Doc. IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13.
- (4) 森猛, 明見正雄, 十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価に対する有効切欠き応力概念の適用性, 土木学会論文集A, 65, 1, 188-195, 2009.
- (5) 森猛, 鈴木俊光, 大前暢, 村上貴紀, 射越潤一, 有効切欠き応力概念を用いた止端仕上げ面外ガセット溶接継手のルート疲労破壊防止法の検討, 鋼構造論文集, 21, 83, 43-52, 2014.
- (6) Ottersböck, M.J., Leitner, M., Stoschka, M., Impact of angular distortion on the fatigue performance of high-strength steel T-joints in as-welded and high frequency mechanical impact-treated condition, Metals 2018, 8, 302.
- (7) 社団法人日本鋼構造協会, 鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例-[2012年改訂版], 技報堂出版株式会社, 2012.
- (8) Wang, Y., Luo, Y., Tsutsumi, S., Parametric formula for stress concentration factor of fillet weld joints with spline bead profile, Materials 2020, 13, 4639.