

## 溶接継手・部材の疲労強度の簡便推定法に関する研究

Study of Numerical Evaluation Method for Fatigue Strength of Welded Joints and Members

トピー工業株式会社

林 健治

Kenji HAYASHI

Member

In terms of maintenance, repair and reinforcement of existing welded steel structures, it is required to evaluate the fatigue strength of welded joints and structural members with weld defects. Fatigue design guidelines specify that the fatigue strength of welded joints should be confirmed by fatigue tests reflecting the actual situation. However, it is difficult to carry out such fatigue tests in most instances. This paper proposes that the simple method to evaluate the fatigue strength of welded joints and structural members with weld defects and fatigue cracks, using the ratio between the stress intensity factor in the stress-strain field with a micro-crack of the joint that the fatigue strength is already known and that of the joint that fatigue strength is unknown, and the validity of this method is verified.

**Keywords:** Fatigue Strength, Evaluation Method, Stress Intensity Factor, Welded Joint, Structural Member

## 1. 緒言

最近、鋼製橋脚隅角部や鋼床版などの鋼構造物の溶接部において、溶接欠陥を起点とした疲労き裂が多数検出されており、そのき裂の進展性の評価や補修・補強対策が重要な課題となっている<sup>[1]</sup>。既設鋼構造物の補修・補強を実施する上で、対象となる溶接継手や構造部材の疲労強度を把握することは不可欠であり、鋼道路橋の疲労設計指針<sup>[2]</sup>に規定されている継手の疲労強度等級に基づき、疲労強度が設定される。しかし、既に疲労損傷を有する継手の等級は規定されていないため、等級を決定することは困難である。特に、溶接欠陥や疲労き裂を溶接補修により完全に除去できない場合、同指針では、荷重条件等を適切に評価した疲労試験により疲労強度を確認するものとしているが、試験の実施は、通常、容易でない。

鋼構造物の疲労設計指針・同解説<sup>[3]</sup>では、継手の疲労強度評価の補助的手法として、破壊力学の手法を用いた疲労き裂進展解析法に基づく評価法を推奨している。疲労試験を行うよりは容易であるが、煩雑な数値解析が必要となる場合があり、実用的な観点から、より簡便な手法の提案が望まれている。これに対し、国

際溶接協会 (IIW) では、上述の疲労強度等級を用いた公称応力ベースの評価法の他に、溶接継手のような複雑な応力状態となる継手や部材に対して、ホットスポット応力 (HSS) や有効切欠き応力 (ENS) のような局部応力ベースの評価法を推奨している<sup>[4]</sup>。

HSS や ENS は、鋭い切欠きやき裂の先端近傍に見られる応力の特異性を取り除き、局部応力として構造的な応力集中のみを取り扱い、疲労強度を評価しようとするものであり、前者は溶接止端から発生する疲労き裂に対して、後者は溶接止端やルート部から発生する疲労き裂に対して、その有効性が検証されている<sup>[4]</sup>。

HSS や ENS と同様に、局部応力ベースの評価法の一つであるが、応力特異性に着目した方法として、応力特異場パラメータ (SSP) 法が提案されている<sup>[5]</sup>。同法は、溶接止端から発生する疲労き裂を対象に、平滑材の疲労強度とき裂材の下限界応力拡大係数範囲を用いて、溶接止端近傍の応力値から継手の疲労強度を予測するものであり、鋼材強度や板厚の影響を考慮することができる。

局部応力ベースの評価法である HSS 法、SSP 法、ENS 法や後述の 1mm 法<sup>[6]</sup>は、局部応力から構造的な応力集中のみを取り出したものであり、いずれの方法も、基準となる溶接継手の疲労強度を用いて、当該する継手の疲労強度が算出される。これらの方法は、現状では、疲労き裂進展解析法と比較して、簡便ではあるが、適用可能な継手形式が限定され、また、一部、その定義に曖昧さを有し、溶接残留応力の影響、荷重

## ◆連絡先：林 健治

愛知県豊橋市明海町 1 番地  
トピー工業(株) 研究開発センター  
E-mail: k-hayashi@topy.co.jp

履歴の影響や表面性状・改質の影響等を考慮することが容易でないなど、実用面から問題点も多い。

公称応力ベース及び局部応力ベースの疲労強度評価法では、以上のように、溶接残留応力や荷重履歴の影響を考慮することは容易でない。このような影響を考慮する方法<sup>7)</sup>として、負荷過程において、き裂先端で再降伏が生じ始める荷重 (RPG 荷重) を用いた方法が提案されており、同手法 (RPG 法) の積極的な展開が図られている。RPG 法と疲労き裂進展解析法<sup>8)</sup>は、最も信頼できる、換言すれば、構造物が疲労損傷のリスクを回避できる方法であると言うことができるが、例えば、疲労き裂進展解析法では、き裂進展に伴うき裂先端周辺の応力を再評価する必要があり、通常、有限要素法 (FEM) などを用いた数値解析を数十から数百回実施しなければならないため、実用上、より簡便な手法の提案が望まれている。

以上のような背景を考慮して、本研究では、溶接欠陥や疲労き裂などの損傷を有する継手や新規の構造形式を採用した場合の継手の疲労強度を簡便に推定する方法、すなわち、破壊力学の手法に基づく停留き裂の応力拡大係数と疲労設計指針<sup>9)</sup>における強度等級を利用し、2回の FEM 等の数値解析により算定する方法を提案<sup>10)</sup>するものであり、疲労強度評価法の選択肢を拡げることを目指したものである。具体的には、強度等級が規定されている継手を参照して、この疲労強度が既知の継手の停留き裂の応力拡大係数と、疲労強度が未知の継手の停留き裂の応力拡大係数を有限要素法を用いた数値解析により算出し、その相対比から未知の継手の疲労強度を算出するものである。

本研究では、疲労強度評価法の現状を整理し、2、3の数値解析と疲労試験を通して、本簡便推定法の妥当性・有効性を検証する。

## 2. 疲労強度評価の現状

溶接継手や構造部材の疲労強度評価法に関する研究は、破壊力学の手法を用いた疲労き裂進展解析法<sup>8)</sup>を除き、対象とする部位の応力に着目した応力集中係数に基づく研究が比較的多い。

周知のように、疲労強度減少係数は、応力集中係数がほぼ2までは鋼種に関係なく一対一対応するので、継手の応力集中係数を評価することにより、母材の疲労強度から継手の疲労強度を推定・評価することがで

きる。しかし、2を超えると、鋼種によっては両係数の間に対応関係が成立しないため、応力集中係数から継手の疲労強度を推定することには問題がある。但し、溶接継手については、2を超えても、対応するの見方<sup>11)</sup>もあり、鋼道路橋の疲労設計指針<sup>12)</sup>では、この考えに基づき、疲労強度等級が設定されている。

実構造物の溶接継手に発生する疲労き裂は、公称応力を評価することができない複雑な構造や二次的な応力が卓越し複雑な応力が作用する部位に生じることがほとんどである。そのため、溶接継手では、Fig.1 に示すように、溶接止端部の局部的な二次・非線形応力、あるいは、ひずみの集中を扱うことを避け、構造的要因のみによる応力集中を考慮した局部応力ベースのホットスポット応力 (HSS) による疲労強度評価法が推奨されている<sup>13,14)</sup>。ここで、Fig.1 では、継手の板厚を  $t$  とすると、溶接止端部から  $0.4t$ 、 $1.0t$  の位置の2点の作用応力  $\sigma_A$  と  $\sigma_B$  を用いて、HSS ( $\sigma$ ) は、 $\sigma = 1.67\sigma_A - 0.67\sigma_B$  で与えられる。

HSS を用いれば、付加物溶接継手の疲労強度は JSSC-E 等級<sup>15)</sup>、80MPa で整理できることが示されており、1本の設計  $S-N$  線図により、疲労設計を実施することが可能となるので、煩雑な継手等級を設定する必要がない利点がある。しかし、HSS を求める参照点として、溶接止端部から1点、2点及び3点を用いて算定する方法が種々提案されており、一意的に決定されない曖昧な部分がある<sup>16)</sup>。また、その適用は、疲労き裂が溶接止端部から発生する場合に限定され、内部き裂や溶接欠陥から発生した疲労き裂には適用できない。さらに、特定の参照点を用いて HSS を評価しているため、その分布の影響を受ける溶接残留応力や、マクロな応力を取り扱っているため、ミクロな部位の応力が問題となる表面性状の影響等を考慮することは容易ではなく、汎用性や実用性に問題がある。

上記の方法に対して、国際溶接協会 (IIW) の疲労設計指針<sup>14)</sup>には、局部応力ベースの有効切欠き応力 (ENS) による疲労強度評価の考え方も示されている。ENS は、Fig.2 に示すように、溶接止端部あるいは溶接ルート部の局部的な形状を考慮して、弾性計算から求められるき裂発生源における応力であり、有効切欠き底半径として  $r=1\text{mm}$  を用いて、実際の溶接の形状と等価なものに置換している。前述の IIW では、ENS の疲労強度等級 (FAT) を 225、すなわち、200 万回基本許容応力範囲を  $225\text{N/mm}^2$  とし、この値を基準<sup>14)</sup>

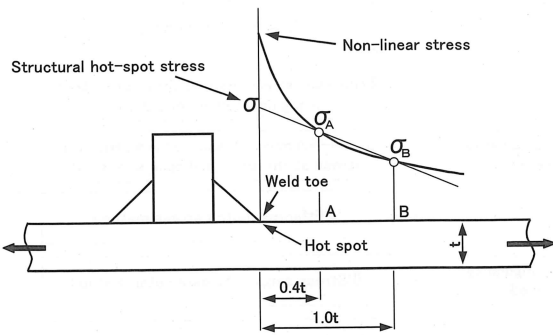


Fig. 1 Definition of structural hot-spot stress

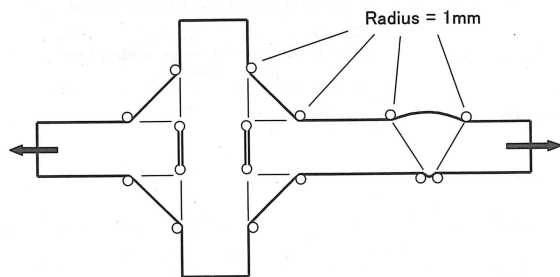


Fig. 2 Evaluation models of effective notch stress

としている。

ENS 法は、疲労き裂が溶接止端部あるいはルート部から発生すると予想される継手に適用でき、HSS 法よりも汎用性が高い。しかし、HSS 法に関する研究は数多くなされ、局部応力ベースの HSS 法による疲労設計指針の策定まで実施されようとしているが、ENS 法に関する研究は、海外では数多く見受けられるものの、国内では少なく、最近漸く鋼床版のデッキプレートとトラフリブ間の縦方向溶接部の疲労に対して適用された事例<sup>9)</sup>が報告されたばかりであり、今後の展開が注目されている。

ENS 法のような局部応力に基づく手法は早くから研究され、局所ひずみに注目した実験的なアプローチが示されている<sup>10)</sup>。そこでは、溶接止端部を半径 1mm 程度に加工して、ひずみゲージによりその部位のひずみ振幅を計測し、各種の溶接継手の疲労試験結果から、1 本の  $S-N$  線図により、それらの実験データが整理できることを明らかにしている。ENS 法は、その適用が溶接継手の止端破壊やルート破壊に限定されるため、複雑な構造の溶接継手や構造部材への適用には問題があると考えられるが、比較的簡便であることから、有力な方法の一つと考えられている。

HSS 法や ENS 法と同様に、溶接止端部の応力の特異性を除き、構造的応力集中に基づく溶接継手の疲労

強度評価法に 1mm 法<sup>6)</sup>がある。同法は、溶接止端部から発生するき裂が板厚方向に進展することに着目して溶接止端から 1mm の深さの点における応力集中係数を  $K_{t,global}$  と定義し、HSS 法と同様な疲労強度の推定が試みられている。その基本疲労強度には、板厚 10mm、脚長 6mm の荷重非伝達リブ十字形すみ肉溶接継手の疲労試験結果から JSSC-D 等級<sup>11)</sup>に相当する 100MPa が用いられている。具体的には、対象とする溶接継手の  $K_{t,global}$  を求め、リブ十字形すみ肉溶接継手の実験データの  $S-N$  線図を  $K_{t,global}$  だけ、上下させて疲労強度を算出するものである。HSS 法と同様に、1 本の  $S-N$  線図により疲労強度を評価することができ、比較的簡便ではあるが、板厚方向の応力分布を求める必要があり、解析の事例によっては煩雑な数値解析が必要となる場合がある。

以上の HSS 法、ENS 法及び 1mm 法のような溶接止端部の応力特異性を除いた局部応力ベースの疲労強度評価法に対し、逆に応力特異性に着目した、応力特異場パラメータ (SSP) を用いた方法が提案<sup>12)</sup>され、その妥当性が検証されている。SSP 法では、1)溶接止端部から板厚方向の距離  $r$  が板厚 1/10 程度までの領域では応力の特異性が認められ、特異性指数  $\lambda$  により応力分布が規定される、という解析結果と 2)平滑材の疲労強度  $\Delta\sigma_f$  とき裂材の下限界応力拡大係数範囲  $\Delta K_{th}$  を用いて、 $r = r_c = (\Delta K_{th} / \Delta\sigma_f)^2 / (2\pi)$  により距離  $r$  を算定した結果、を利用して、溶接継手の疲労強度を評価している。ここで、1mm 法では、 $r = 1$  における値を参照しているのに対して、SSP 法では、 $r = r_c$  における応力を参照し、その値を疲労強度としている。取り扱う位置は異なるものの、SSP 法と 1mm 法は、類似する手法であると言える。

以上のような局部応力ベースの疲労強度評価法は、比較的簡便な方法であるが、溶接止端部あるいはルート部から発生する疲労き裂を対象にしており、その部位に溶接欠陥や疲労き裂を有する場合、その取り扱いが容易でない。より一般的には、破壊力学の手法に基づく継手の疲労強度評価法を用いる必要がある<sup>13)</sup>。RPG 法は、さらに、平均応力、溶接残留応力及び荷重履歴の影響を考慮することができる方法<sup>14)</sup>であり、負荷過程において、き裂先端で再降伏が生じ始める RPG 荷重 (Re-tensile Plastic zone Generating load) から最大荷重に至る荷重の変動幅に対応した応力拡大係数の変動幅  $\Delta K_{RPG}$  とき裂伝播速度との関係を用いたもの

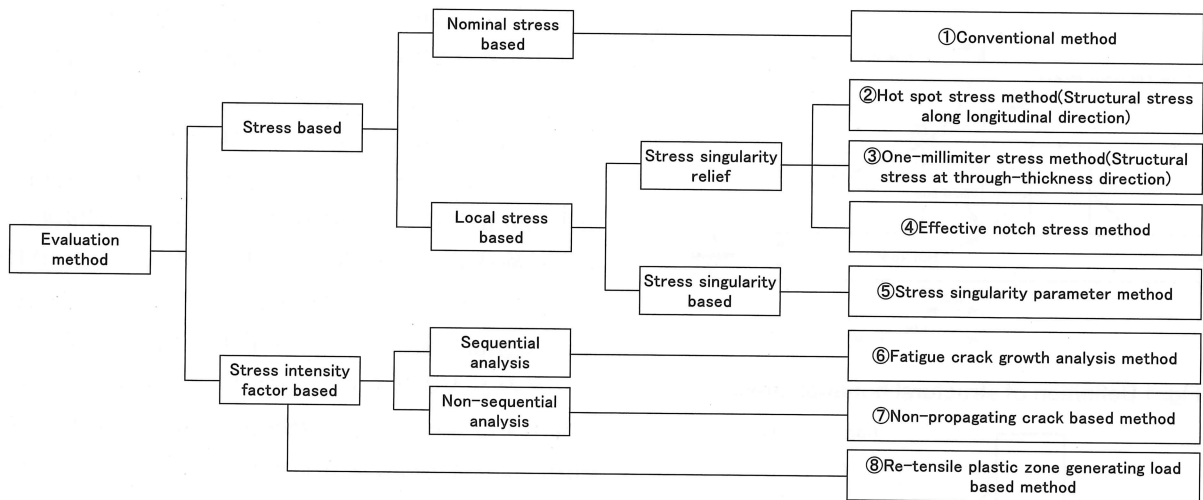


Fig.3 Classification of fatigue strength evaluation methods

である。従来の破壊力学の手法に基づく評価法と同様に煩雑な解析を必要とし、実用面から、その適用が必ずしも容易でない。

以上の溶接継手及び構造部材に対する疲労強度評価法を便宜的に分類したのが Fig.3 である。①継手等級に基づく通常の方法、②HSS法、③1mm法、④ENS法、⑤SSP法、⑥疲労き裂進展解析法、⑧RPG法と、次章で提案する⑦停留き裂に基づく方法(NPC法)の8つを取り上げ、応力基準、応力拡大係数基準、公称応力基準、局部応力基準、構造的応力基準、応力特異性基準及び逐次解析等を参考に整理・分類した。

現在、①の方法で疲労強度を算定できない場合、疲労試験による実測に代わる代替法として、疲労設計指針<sup>[3]</sup>では⑥の方法が提案され、IIW<sup>[4]</sup>では②と④の方法を推奨している。③、⑤、⑦と⑧については、一部では種々の検討が行われているが、実用化までには更なる検討が必要である。いずれにしても、⑥に代わる方法として、②～⑤、⑦、⑧の方法が提案され、②と④については推奨されているが、対象とする溶接継手が限定され、実構造の複雑な形状の溶接継手に対して適用できないなど、画一的な方法として認識されるまでには至っていない。現状では、一長一短があり、提案に留まっているもの、実用化までには至っていないものなど、様々である。

次章で提案する⑦NPC法は、一方では評価法の選択肢を拡げること、他方では画一的な方法の可能性を検討することを目指したものである。特に、現

状では、②と④の推奨法で取り扱うことができない内部き裂や溶接欠陥から発生した疲労き裂に対して有効な方法を、また、溶接残留応力や表面性状の影響を考慮できる方法を提案することが主な狙いである。

### 3. 疲労強度簡便推定法

#### 3.1 疲労強度の定義と簡便推定法

Frankら<sup>[11]</sup>や森ら<sup>[12]</sup>は、荷重伝達型十字すみ肉溶接継手を対象とし、破壊力学に基づく疲労き裂進展解析法<sup>[9]</sup>を用いて、継手の疲労強度を推定する簡便法を提案している。継手の疲労強度を推定する上で最も合理的な方法を提案するものであるが、対象を限定しており、種々の継手や損傷を有する構造部材の疲労強度推定法として展開できない。

村上<sup>[13]</sup>は、疲労強度に及ぼす微小欠陥の形状と寸法の影響を検討し、疲労強度がき裂伝播停留限界であることを考慮して微小き裂・欠陥や停留き裂を含む部材の疲労強度を下限界応力拡大係数範囲  $\Delta K_{th}$  により予測できることを明らかにした。本研究では、潜在微小き裂・停留き裂に対して  $\Delta K_{th}$  を与える応力振幅あるいは全振幅  $\Delta \sigma$  を疲労限度と定義する。

次いで、寺崎ら<sup>[14],[15]</sup>は、村上の研究成果を活用し、1結晶粒程度の停留き裂長さ 0.1mm を導入して、実溶接継手の疲労試験を実施し、溶接継手の疲労強度を停留き裂部の応力拡大係数  $K$  により推定できる可能性を示した。

本研究では、寺崎ら<sup>[14],[15]</sup>の方法を簡素化し、全て



の溶接継手に対して、また、き裂などの損傷を有する構造部材に対しても一律に適用することが可能な停留き裂の応力拡大係数  $K$  に基づく新たな方法 (NPC 法) の展開を試みた<sup>10)</sup>。すなわち、溶接欠陥や疲労き裂等の損傷を有する部材の疲労強度  $\sigma_f$  を簡便に推定する方法として、疲労設計指針<sup>12)</sup> に基づき疲労強度等級  $\sigma_{f0}$  が判明している継手の着目部位に、仮想的に導入した微小き裂、ここでは停留き裂を表し、その長さを  $0.1\text{mm}$  とした場合の応力拡大係数  $K_0$  と、対象とする疲労強度が未知の継手の着目部位に仮想的に導入した停留き裂  $0.1\text{mm}$  に対応した応力拡大係数  $K$  を FEM に基づく数値解析により算出し、その相対比から未知の継手の疲労強度  $\sigma_f$  を算出する、破壊力学に基づく方法を提案する。ここに、

$$\sigma_f \cdot K = \sigma_{f0} \cdot K_0 = \text{一定} \quad (1)$$

が成立するものとし、FEM 等の数値解析により  $K$  と  $K_0$  を算出することによって、未知の継手の  $\sigma_f$  を推定することができる。ここで、 $K$  は、溶接欠陥の形状、継手の形状や応力状態に拘わらず算定できるので、式(1)は全ての継手や部材に対して適用でき、また、 $K$  は溶接残留応力の影響<sup>16)</sup> や継手の表面性状の影響も考慮することができる。なお、表面性状については後述する。

つぎに、混合モード下では、開口型の応力拡大係数  $K$  を  $K_1$ 、面内せん断型の  $K$  を  $K_2$ 、面外せん断型の  $K$  を  $K_3$  とすると、エネルギー解放率と  $K$  との関係から、平面ひずみに対して、混合モードの  $K$  は次式で与えられる。

$$K^2 = K_1^2 + K_2^2 + K_3^2 / (1 - \nu) \quad (2)$$

ここに、 $\nu$  はポアソン比を表す。

前述の停留き裂に対応する、疲労強度が未知と既知の継手の応力拡大係数  $K$  と  $K_0$  の算出には、FEM と破壊力学の手法 (応力法、変位法、接続外挿法、特異要素法、仮想き裂進展法、経路独立  $J$  積分法等) の適用が不可欠であるが、式(1)から明らかなように比較的簡便に継手の疲労強度  $\sigma_f$  を算出することができる。また、式(2)を用いて、容易に混合モードへの拡張を計ることができる。なお、 $K$  と  $K_0$  の算出す

るために、FEM による数値解析を 2 回実施する必要があるが、2. で述べた疲労き裂進展解析法<sup>6)</sup> と比較して、非常に簡便に  $\sigma_f$  を評価できると言える。

なお、式(1)は、村上<sup>13)</sup> と寺崎ら<sup>14), 15)</sup> の研究成果を基に、次のような関係から類推した仮説・仮定であり、その妥当性は、数値解析や疲労試験等を通して、検証する必要があることは言うまでもない。

- 1) 応力拡大係数  $K$  が大きくなると、き裂を進展させる力が増大し、き裂が進展しやすくなる。その結果、余寿命もしくは疲労強度  $\sigma_f$  は低下する。
- 2) 停留き裂の  $K$  と  $\sigma_f$  は密接に関連する。また、 $K$  は、強度評価のパラメータになり得る<sup>3)</sup>。
- 3) き裂の安定成長域では、き裂伝播速度と応力拡大係数範囲  $\Delta K$  の間に対応関係<sup>3)</sup> が成立する。この関係式を数値積分することにより疲労き裂進展寿命が求められ、特定の繰返し数に対する  $\sigma_f$  が算定されるが、積分経路、すなわち、き裂進展方向が一定の方向に限定され、 $\Delta K$  が一意的に決定される場合、 $\Delta K$  と  $\sigma_f$  は密接に関連する。
- 4) 停留き裂長さは、疲労設計指針<sup>12)</sup> で対象としている溶接構造用圧延鋼材 SM400、SM490、SM490Y、SM520、SM570 等では、過去の研究結果によれば、 $0.1\text{mm}$  前後であり、その大きさは結晶粒の大きさにほぼ対応する。
- 5)  $K$  は、2) でも述べたように、き裂を進展させる力である。溶接欠陥、き裂、ストップホールなどの円孔等から新たにき裂が進展する場合、新たに生成されたき裂のみを進展させる力を評価する必要がある。
- 6) 停留き裂に対する応力範囲  $\Delta \sigma$  は、ほぼ  $\sigma_f$  に等しく、 $\Delta K$  と密接に関連する。

### 3.2 NPC 法の妥当性の解析的検証

本 NPC 法の妥当性を検証するために、森ら<sup>12)</sup> の解析モデルを参照して、荷重伝達型十字溶接継手が引張荷重を受ける場合について FEM 解析を実施した。継手の形状・寸法を Fig.4 に示す。ここで、試験体の長さは  $99\text{mm}$ 、高さは  $54\text{mm}$  であり、板厚は  $9\text{mm}$ 、すみ肉溶接のサイズは荷重方向及び荷重直角方向共に  $9\text{mm}$  であり、未溶着部の長さも  $9\text{mm}$  である。荷重は矢印  $\rightarrow$  の向きに作用させることとした。

解析モデルは対称性を考慮して、Fig.5 に示すように、Fig.4 の右上  $1/4$  を要素分割した。同図には、Fig.4



継手の種類として表面粗さの最大高さが  $100\mu\text{m}$  以下の黒皮付き帯板に対応し、その強度等級  $\Delta\sigma_f$  は  $155\text{MPa}$  である。E等級は、破壊モードが止端破壊となる止端仕上げをした部分溶込みすみ肉溶接継手に対応し、 $\Delta\sigma_f$  は  $80\text{MPa}$  である。H等級は、破壊モードがのど断面のルート破壊となる、部分溶込みすみ肉溶接継手に対応し、 $\Delta\sigma_f$  は  $40\text{MPa}$  である。

以上のように、**a)**、**b)**、**c)**の部位の強度等級をそれぞれB等級、E等級、H等級としたが、一般に、継手の疲労強度は、表面粗さの影響を受けるため、その評価により1ランク等級が変わることも考えられる。また、例えば、**a)**を基準にすることは事例によっては適切とはいえない場合も予想される。強度等級は、あくまでも強度のレベル差を与えるものであり、それに基づき疲労設計<sup>12)</sup>が実施され、余寿命等が評価されることを勘案すると、継手や部材の疲労強度評価法に要求される精度(要求性能)は、そのレベル差、相対差、あるいは近似値を与えることができれば、現状では、実用上十分であると判断することができる。

以下では、**a)**~**c)**のいずれか1つを既知として、他の部位の疲労強度を推定することを通して、本NPC法の妥当性を解析的に検討する。いま、**a)**~**c)**の応力拡大係数をそれぞれ  $K_a$ 、 $K_b$ 、 $K_c$ 、対応する疲労強度を  $\sigma_a$ 、 $\sigma_b$ 、 $\sigma_c$  とし、 $K_a$  と  $\sigma_a$  を基準として、データ整理し、式(1)を適用した結果を纏めると以下のとおりである。

E等級  $80\text{MPa}$  :  $K_b/K_a=2.21$   $\therefore \sigma_b=70\text{MPa}$   
 H等級  $40\text{MPa}$  :  $K_c/K_a=3.44$   $\therefore \sigma_c=45\text{MPa}$   
 (混合モード)  $K_c/K_a=3.47$   $\therefore \sigma_c=45\text{MPa}$

したがって、**a)**をB等級とした場合、若干の誤差はあるものの、**b)**はE等級、**c)**はH等級と見なせる。何れも、ほぼ予想通りの結果を示し、本NPC法の有効性を示唆するものである。止端破壊の事例<sup>13)</sup>について、別途、すみ肉溶接を想定した場合 ( $K_{b2}$ 、 $\sigma_{b2}$ ) を検討した。

F等級  $65\text{MPa}$  :  $K_{b2}/K_a=2.44$   $\therefore \sigma_{b2}=64\text{MPa}$

この場合も、ほぼ予想通りの結果を与える。

推定結果の精度については、直接的に評価するこ

とは難しいが、**a)**をB等級としてその相対比から判断すると、**b)**は $-12\%$ 、**c)**は $12\%$ であり、上記のすみ肉溶接を想定した場合については $-2\%$ である。直応力を受ける継手の疲労強度等級<sup>14)</sup>には、A~H、H'があり、その強度等級はそれぞれ  $190, 155, 125, 100, 80, 65, 50, 40, 30\text{MPa}$  となり、上位の等級と1段下位の等級では、凡そ $20\%$ ほどの差異を有する。このことから判断すると、本NPC法は、実用上は問題なく、十分な精度を有していると判断することができる。

さらに、本NPC法による疲労強度の推定結果に大きな影響を与えると予想される因子に停留き裂長さ ( $C_n$ ) がある。本論文では、 $C_n=0.1\text{mm}$  =一定、として取り扱ったが、最近の鋼材の高性能化や熱処理技術の進展を受け、結晶粒径が大きく変化していることから、 $C_n$ の影響を検討する必要があるものと思われる。

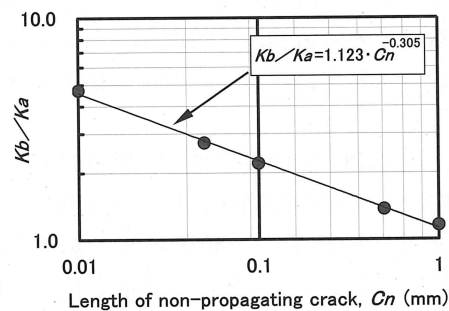


Fig.7 Influence of non-propagating crack length on  $K_b/K_a$

前述までの結果から明らかなように、停留き裂長さが  $0.1\text{mm}$  の場合、ほぼ妥当な結果を与え、村上<sup>13)</sup>や寺崎ら<sup>14),15)</sup>が提唱し、種々の検討を行った結果とほぼ対応する。逆に、 $0.1\text{mm}$  以外では、応力拡大係数  $K$  の相対比  $K_b/K_a$  は長さに依存することも考えられる。そこで、 $C_n$  をパラメータとして  $C_n=1\text{mm}$ 、 $0.5\text{mm}$ 、 $0.1\text{mm}$ 、 $0.05\text{mm}$ 、 $0.01\text{mm}$  の5ケースについて、 $K_b/K_a$  を算定した。その結果を Fig.7 に示す。ここに、●印が算定したデータを表す。

図から明らかなように、 $K_b/K_a$  は  $C_n$  に依存し、 $C_n$  が小さくなると、 $K_b/K_a$  の値は増加する。また、両者の間には、両対数グラフ上でほぼ線形関係にある。寺崎ら<sup>14),15)</sup>の研究に基づき  $C_n$  を  $0.1\text{mm}$  とし、 $K_b/K_a$  を算出し、対象とする溶接継手の疲労

強度を算定したが、従来の構造用鋼材から集成された溶接継手や構造部材の疲労強度等級を設定する上<sup>[3]</sup>では、**3.1**で述べたように、問題ないと考えられる。しかし、最近の高性能鋼材で集成された溶接継手や表面改質・熱処理により微細化した組織を有する溶接継手では、 $C_n$ を小さくとり、解析を実施すべきと考えられる。また、逆に、このことが表面改質等を考慮できる可能性を示唆するものである。これらは、今後の検討課題としたい。

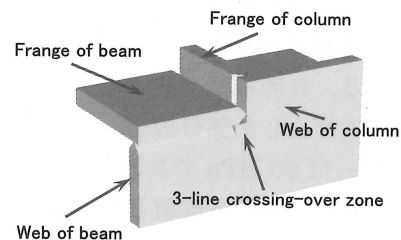
なお、本 NPC 法は、破壊力学の手法に基づき、応力拡大係数  $K$  を用いた評価を行っており、**2.**で述べた⑥疲労き裂進展解析法や⑧RPG 法と同様に、溶接残留応力の影響を  $K$  の中に陽に取り込むことができる。その詳細は文献<sup>[16]</sup>に譲る。

### 3.3 NPC 法の妥当性の実験的検証

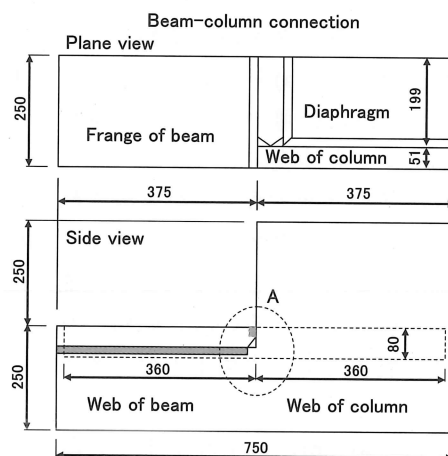
既に述べたように、使用実績がなく疲労耐久性が明らかでない継手、溶接欠陥や疲労き裂等の疲労損傷を有する継手の疲労強度・等級を評価する場合、実橋での応力状態を再現できる疲労試験を実施することが望ましい<sup>[3]</sup>。

そこで、本 NPC 法の妥当性を実験的に検証するため三角柱状の空洞の欠陥を含む、疲労強度・等級が未知である溶接継手の一軸引張疲労試験とその FEM 解析を実施した。対象とするモデルは、**Fig.8**に示すように、溶接欠陥を起点とした疲労き裂が多数検出され、その補修・補強が重要な課題となっている鋼製橋脚隅角部をモデル化したものであり、具体的には、隅角部の溶接線 3 線交差部、いわゆる、デルタゾーン<sup>[1]</sup>を含む溶接施工試験体から切り出した三角柱状の欠陥のある引張試験体である。

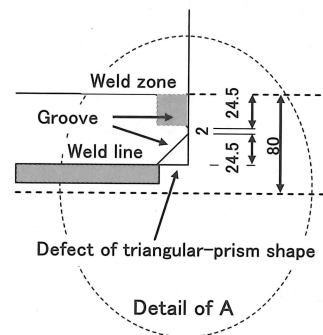
**Fig.8** の溶接施工試験体の寸法は、**Fig.8(b)**に示すように、長さ 750mm、幅 250mm、高さ 500mm であり、その溶接条件は次のとおりである。開先形状は、**Fig.8(c)**に示すように、開先角度を  $35^\circ$ 、ルートフェイスを 2mm とし、 $\phi 1.2\text{mm}$  の溶接ワイヤーを用いて予熱温度  $75^\circ\text{C}$  で溶接を行った。溶接順序は、鋼製橋脚隅角部に対して実際に溶接施工された順序を想定し、**Fig.8 (a), (b)**のように、1) 柱のウェブとフランジ、2) 柱のダイアフラム、3) 梁のフランジ、4) 梁のウェブとフランジとした。なお、着目部に三角柱状の溶接欠陥ができるように、三角柱状のセラミックスを開先端部に挿入して作業を実施した。



(a) Test specimen for procedure examination



(b) Model specimens for beam-column connection



(c) Detail of A

**Fig.8** Specimens for procedure examination and fatigue tests

**Fig.8 (b)**の破線に示すように、板幅 80mm、板厚 51mm の平板状引張試験体を切り出し、その中央に底辺とは異なる一辺 19mm、他辺 24.5mm の三角柱状の板厚貫通溶接欠陥が残存するように機械加工により成形した。ここで、試験体の長手方向が直角三角形の一辺 19mm に平行するように配置し、また、三角形の鋭角部先端に高さ 0.2mm、幅 2mm のスリットを設けた。このような継手の疲労強度等級<sup>[2],[3]</sup>

Table 1 Fatigue test results of welded joints

Specimen	No.	Stress range $\Delta\sigma$ (MPa)	Number of cycles $N_f (\times 10^4)$	$r$	Location of breaking
Type A	1	100	36	1.29	Root zone
	2	60	230	1.43	Root zone
	3	50	428	1.45	Root zone
	4	60	1,000	—	Non-breaking
Type B	5	80	33	1.00	Slit
	6	50	141	1.01	Slit

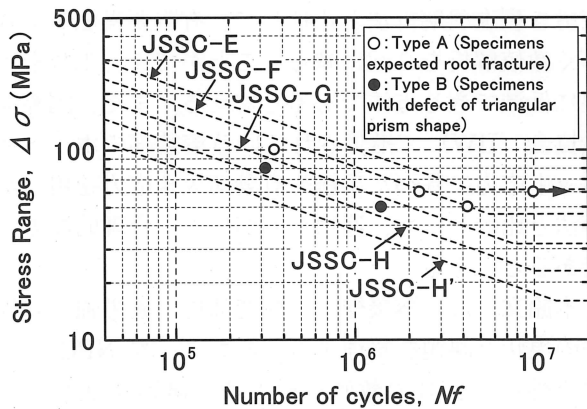


Fig.9 S-N curve (Fatigue strength diagram)

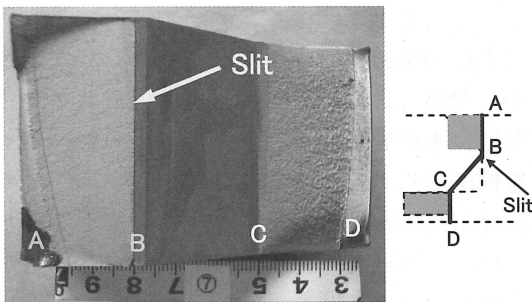


Fig.10 Fatigue fracture of welded joint

は規定されていないので、本 NPC 法の妥当性を検証する上で有効であると判断した。

試験体の供試材に SM570 材を用いた。その機械的性質は、降伏点 640N/mm<sup>2</sup>、引張強度 706N/mm<sup>2</sup>、伸び 26%、衝撃値 278J である。上記の試験体の他に比較のため、ルート破壊となる継手試験体、すなわち、ルートフェイス部の溶接欠陥の幅を 9mm とし、梁フランジ板厚 51mm の中央部に配置した試験体を作製し、疲労試験を行った。疲労試験は、油圧サーボ式 1 MN の引張疲労試験機を用いて、応力比  $R=0.1$  の一軸引張状態で繰返し速度 10Hz とし実施した。

疲労試験結果を Table 1、Fig.9 に示す。ここで、継手試験体はルート部からき裂が発生し、破断した。

また、三角形の鋭角部先端にスリットが設けられた試験体はスリットからき裂が発生し、破断した。破面の一例を Fig.10 に示す。ここに、A~D と Slit の位置は Fig.8 (c)に対応する。応力集中の高い Slit 先端の B から A に向かって疲労き裂が発生・進展し、A の周辺の一部と C-D 面が脆性・延性破壊し、破断した。

Fig.9 には、疲労設計指針<sup>[3]</sup>における JSSC-E、JSSC-F、JSSC-G、JSSC-H 及び、JSSC-H'等級を示す設計曲線が併記されているが、既に述べたように、それぞれ強度等級は 80、65、50、40、30MPa に対応する。Fig.9 より、ルート部から破断した継手試験体の疲労強度は JSSC-G 等級、50 MPa であり、スリットが設けられた継手の疲労強度は JSSC-H 等級、40 MPa と見なすことができる。

Table 1 のパラメータ  $r$  は、疲労試験結果と後述の FEM 解析結果を比較するため導入したものであり、以下のようにして算出される。

一般に、応力範囲  $\Delta\sigma$  と破断繰返し数  $N_f$  の間には次式が成立する<sup>[2],[3]</sup>。

$$\Delta\sigma^m \cdot N_f = \text{一定} \quad (3)$$

ここに、 $m$  は疲労設計曲線の傾きを表す係数であり、直応力を受ける継手では  $m=3$  となる。

いま、Table 1 の三角柱状欠陥を有する継手の中、番号 5 の試験体の  $\Delta\sigma$  と  $N_f$  を基準 (それぞれの値を  $\Delta\sigma_5$  と  $N_{f5}$  とする) にして、他の試験体 (番号  $i$  とする) の破断繰返し数  $N_{fi}$  に対応する疲労強度  $\Delta\sigma_{fi}$  を求め、この  $\Delta\sigma_{fi}$  に対する  $\Delta\sigma_i$  の比を  $r$  とする。すなわち、

$$\Delta\sigma_{fi} = (N_{f5}/N_{fi})^{1/m} \cdot \Delta\sigma_5 \quad (4)$$

$$r = \Delta\sigma_i / \Delta\sigma_{fi} \quad (5)$$

上式から明らかなように、 $r$  は継手の疲労強度比を表し、式(1)における  $K_b/K_a$  に対応する。

Table 1 の番号 5 の試験体は、基準であるから  $r=1.00$  である。また、番号 6 の試験体では、 $r=1.01$  であり、番号 5 の試験体の結果と良好に対応している。番号 1~3 の試験体の  $r$  は 1.29~1.45 であり、若干のばらつきはあるが、ほぼ一定の値を与える。

つぎに、3.2 と同様に平面ひずみ状態を仮定して



FEM による応力解析を実施し、き裂の発生方向に停留き裂を 0.1mm 進展させた場合について、改良型接続外挿法<sup>[7]</sup>により、 $K$ 値の算定を行った。ここで、別途、仮想き裂進展法により算定した $K$ 値と比較したが、良好に一致したことを付記する。

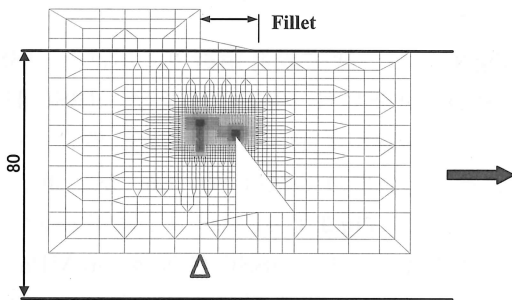


Fig.11 Mesh surrounding a triangular prism shape defect

Fig.11 に三角柱状欠陥周辺の要素分割を示す。矢印→は荷重の作用方向を表す。△印から上のラインがルートフェイスであり、ルート部周辺の要素分割も示されているが、三角柱状欠陥からのき裂の解析では、ルートフェイスは二重節点で剛結として取り扱った。また、ルート部からのき裂の解析では、三角柱状欠陥はないものとして解析を行った。なお、Fig.11 には、実構造物のすみ肉溶接を想定した場合のメッシュも併記されているが、ここでも、三角柱状欠陥からのき裂の解析では、ルート部が剛結されているものとして解析を行い、境界条件を満足するように配慮した。その詳細は省略するが、以下とほぼ同様な結果が得られた。

ルート破壊 (Type A) の $K$ を $K_a$ 、三角柱状欠陥 (Type B) からのき裂に対する $K$ を $K_b$ とすると、任意の荷重に対する両者の比 $K_b/K_a=7.8/5.6=1.39$  ( $=r$ となる) であり、疲労試験結果の $r=1.29\sim 1.45$ に近い値を示す。ここに、誤差は $-9.3\%\sim 4.3\%$ である。したがって、解析結果は疲労試験結果と良好に対応し、本 NPC 法は過去に事例のない未知の溶接欠陥を有する継手に対しても、その疲労強度を簡便に、しかも、比較的良好な推定結果を与えると言える。

#### 4. 結言

本論文では、溶接継手や構造部材の疲労強度を、長さ 0.1mm の停留き裂に対する応力拡大係数を用いて、疲労強度等級が規定されている、既知の継手の疲労強度から比較的簡便に推定することができる方法 (NPC 法) を提案した。本 NPC 法は、従来の疲労き裂進展解析法と比較して、有限要素法等に基づく数値解析を 2 回に減らすことができ、工数を大幅に低減できる方法であると言える。また、国際溶接協会 (IIW) で推奨されている溶接部のホットスポット応力に基づく手法や有効切欠き応力を用いた手法と比較しても、適用範囲が広く、合理的な方法であると言える。

本論文では、溶接継手や構造部材の疲労強度評価法の現状と課題を整理するとともに、本 NPC 法の妥当性を 2、3 の数値解析と疲労試験を通して確認・検証した。本論文の結果から、本 NPC 法は、疲労損傷を有する継手の疲労強度等級を評価する手法として、実用上問題なく、手法の選択肢を拡げる上で大きな効果を期待することができると言える。

しかしながら、本研究で示した解析結果や疲労試験結果は、事例も少なく、本 NPC 法の妥当性・信頼性を検証する上で、十分とは言えない。この意味で端を発したばかりである。今後も継続して他の方法との比較・検証を行い、本 NPC 法の妥当性の確認や信憑性の確立を計りたい。

## 参考文献

- [1] 例えば、下里哲弘、“首都高速道路の若返り作戦” JSSC、No.50、2003、pp.1-10.
- [2] 日本道路協会、“鋼道路橋の疲労設計指針”、2002、pp.9-24.
- [3] 日本鋼構造協会、“鋼構造物の疲労設計指針・同解説”、1993、pp.51-56、pp.249-259、pp.281-291.
- [4] A.Hobbacher、“Recommendations for fatigue design of welded joints and components”、IIW document XIII-1965-03/XV-1127-03、2005、pp.26-37.
- [5] 中村ほか、“応力特異場パラメータによる溶接部の疲労強度解析”、溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集、2006、pp.227-232.
- [6] 山田ほか、“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”、土木学会構造工学論文集、Vol.48A、2002、pp.1047-1054.
- [7] 豊貞雅宏、“新しい概念による疲労寿命評価の概要と開発の現状”、溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集、2006、pp.211-218.
- [8] 林健治、“鋼橋の補修・補強に対する新たな試み” 日本保全学会第 2 回学術講演会要旨集、2005、pp.245-250.
- [9] 菅沼ほか、“鋼床版デッキプレートとトラフリップ間の縦方向溶接部の疲労に対する EFFECTIVE NOTCH STRESS による評価”、土木学会論文集 A、Vol.63、No.1、2007、pp.35-42.
- [10] K.Koibuchi and H.Ono、“Local strain approach to fatigue life prediction of welded structures”、Int. Conf. Mech. Behav. and Mater.、Vol.2nd、1976、pp.611-615.
- [11] K.H.Frank and J.W.Fisher、“Fatigue strength of fillet welded cruciform joints”、J. of the Struct. Div.、Proc. of the ASCE、Vol.105、ST9、1979、pp.1727-1740.
- [12] 森、貝沼、“荷重伝達型十字すみ肉溶接継手・ルート破壊の疲労強度評価方法の提案”、土木学会論文集、No.501、1994、pp.95-102.
- [13] 村上敬宜、“金属疲労・微小欠陥と介在物の影響”、養賢堂、1993、pp.33-72.
- [14] 寺崎ほか、“レーザー溶接された重ね継手の疲労強度について”、溶接学会論文集、Vol.19、No.3、2001、pp.507-512.
- [15] 寺崎ほか、“溶込み不足つき角継手の疲労強度について”、溶接学会論文集、Vol.19、No.3、2001、pp.564-569.
- [16] 福岡ほか、“溶接継手の疲労寿命評価システムの開発”、三井造船技報、No.191、2007、pp.31-37.
- [17] 藤崎ほか、“応力拡大係数の外挿決定法の改善” 材料、Vol.45、No.10、1996、pp.1083-1089.
- [18] 例えば、岡村弘之編：総合材料強度学講座 3・強度解析学(I)、1985、pp.152-182.

(平成 20 年 2 月 28 日)