

平成22年6月2日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760308

研究課題名（和文） 局部応力を用いた溶接ルート部の疲労強度評価法に関する研究

研究課題名（英文） A Study on Evaluation for Fatigue Strength at Weld Root using Local Stress

研究代表者

穴見 健吾 (ANAMI KENGO)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：30272678

研究成果の概要（和文）：近年社会的問題となっている鋼橋溶接継手の疲労損傷に対して、効率的な維持管理を行うためには疲労強度を正確に評価することが必要である。本研究では局部応力を用いた溶接ルート部の疲労強度評価法に関して検討を行った。成果として継手形状、応力性状をパラメータとして、既往の疲労強度評価法の性質を比較検討し明らかにするとともに、実橋梁の維持管理に適用するための主板実測応力を用いた評価法について既往の評価法、および疲労試験結果と比較検討を行った。

研究成果の概要（英文）：Recently, fatigue problem at weld joints in steel bridge structure has been a big issue. For the effective and efficient maintenance of steel bridge structures, it is very essential to evaluate the fatigue strength properly. In this study, local stress approach for evaluating fatigue strength at weld root of load carrying cruciform weld joint was examined. As a result of this study, (1) characteristics/accuracy of existing fatigue strength evaluation methods were evaluated focusing the influences of joint geometry and stress condition, and (2) considering the application for real bridge structures, fatigue strength evaluation using stress measured on the surface of base plate was examined.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学（鋼構造）

科研費の分科・細目：土木工学・（構造工学・地震工学・維持管理工学）

キーワード：鋼構造

1. 研究開始当初の背景

近年、鋼橋梁、特にその溶接部に疲労損傷が多く発生している。これらの損傷部位の多くは、二次応力、二次変形が卓越する疲労強

度評価の困難な部位であることが多く、疲労設計に一般的に用いられる公称応力ベースの疲労強度評価法を直接適用することは困難な場合が多い。そのため、例えば実橋梁の

効果的かつ効率的な維持管理を行うために、疲労損傷の可能性がある継手部位、もしくは疲労損傷を受けた部位の補修・補強後の疲労強度を精度良く評価するためには、亀裂発生点近傍の応力（局部応力）を用いた疲労強度評価法の適用が有効であると考えられる。

溶接継手の疲労損傷の発生個所は、溶接止端部もしくは溶接ルート部であるケースが多い。局部応力を用いた溶接止端部の疲労強度評価方法としては、古くからホットスポット応力の適用が提案・研究されており、実構造物の疲労設計・照査にも用いられている。また、溶接止端部は継手表面に存在するため、その近傍での応力分布も容易に測定できるために、ホットスポット応力を実測値より求めることも可能である。一方、溶接ルート部の疲労強度評価は一般的にはのど断面公称応力を用いて行われる。また亀裂進展解析などの適用も検討されており、実際の疲労亀裂進展を良く表現できることが示されている。一方、局部応力を用いた疲労強度評価法として、Effective Notch Stress法が近年提案され、国内外で積極的に研究が行われている。しかしながら、これらの手法は応力計算（解析）ベースの手法であり、それらの計算のためには、作用応力および継手形状を正確に把握することが必要となり、必ずしも容易な手法ではない。また、溶接ルート部は溶接継手内部に存在するものであり、亀裂発生点近傍の応力を実測することも非常に困難を伴う。近年の設計法では疲労の危険性のある部位に用いられる荷重伝達型の継手では完全溶込み溶接が用いられることとされているが、既存の実橋梁においては部分溶込みや隅肉溶接などが用いられているケースもあり、これらの継手部位の疲労強度評価を行い、永く橋梁を維持・運用していくためにも、局部応力を用いた溶接ルート部の疲労強度評価法の確立が望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、溶接継手部、特に溶接ルート部から疲労亀裂が発生する可能性のある代表的な溶接継手である荷重伝達型十字溶接継手を主対象とし、局部応力を用いた疲労強度評価法について検討することである。荷重伝達型十字溶接継手ルート部の疲労強度には継手の種々形状が大きく影響されることが知られているが、作用応力性状によっては疲労強度評価という観点では未だ未解明な点も多い継手である。本研究では先ず、これらの継手形状、作用応力性状をパラメータとして、現在提案されている各種疲労強度評価手法を比較検討し、それらの手法の適用性について検討することを目的としている。また、研究背景にも示したように、既存の橋梁構造物の疲労損傷発生個所の挙動は複雑

であり、また溶接ルート部の不溶着部の実長さなど疲労強度に与える種々形状パラメータも正確に把握することは容易ではない場合も考えられる。そのため、解析的なアプローチで疲労強度評価を行うことが困難である場合も考えられ、本研究では実測可能な応力を用いて疲労強度評価を行う手法を確立することを目指して、溶接前面の主板表面応力の疲労強度評価への適用性を検討することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究は主に以下の2段階で行った。

(1)荷重伝達型十字溶接継手の疲労強度には主板厚、溶接脚長、不溶着部、溶接ギャップなど種々の継手形状が影響することが知られている。公称応力ベースの疲労設計手法では、概ねこれらの継手形状の影響を考慮できるようになっているが、面内引張のみが作用した場合にのみ対応しており、面外曲げが作用するなど複雑な応力性状の場合にはどのように評価できるのか明確ではない。本研究では、これらの継手形状の影響、作用応力の影響を検討するとともに、既往の疲労強度評価方法（公称応力ベースであるのど断面応力範囲を用いる手法、亀裂進展解析、局部応力評価手法であるEffective Notch Stress法）の特徴（差異）や適用性について、継手形状、作用応力性状をパラメータとして検討を行った。

(2)本研究では、荷重伝達型十字溶接継手を主対象として、実測できる応力を用いた疲労強度評価手法を検討することを目的としている。ここでは①で調査した各種疲労強度評価法と、溶接前面の主板表面応力との関係性を比較検討することにより、主板表面応力の疲労強度評価への適用可能性について検討した。特に、継手形状をパラメータに解析的な検討を行っているが、橋梁現場にて必ずしも疲労強度に影響を及ぼすすべての形状パラメータが実測できるとは限らないため、ここでは、実測できる形状パラメータを考慮に入れて継手形状をグループ分けするなど検討を行っている。評価結果を用いて既往の疲労試験結果を整理するとともに、疲労試験（現在実施中）を行い、提案した疲労強度評価法の適用性について検討を行った。

4. 研究成果

ここでは、前章で述べた(1)(2)についてその主な検討成果について述べる。

(1)継手形状をパラメータとして、のど厚応力範囲、亀裂進展解析、Effective Notch Stress(以下ENS)法を用いて荷重伝達型十字継手の疲労強度を評価した。図-1は、すみ肉溶接の場合を例にとり、面内軸方向引張載荷の場合の比較結果を示している。基準モデルはT22L10

(主板厚 $T=22\text{mm}$ 、脚長 $L=10\text{mm}$) とし、各モデルの各指標値を基準モデルの指標で無次元化して示している。若干進展解析結果が他指標と比較して継手形状の変化に敏感であるが、各指標値の継手形状変化による変化率の傾向は概ね等しいと言える。

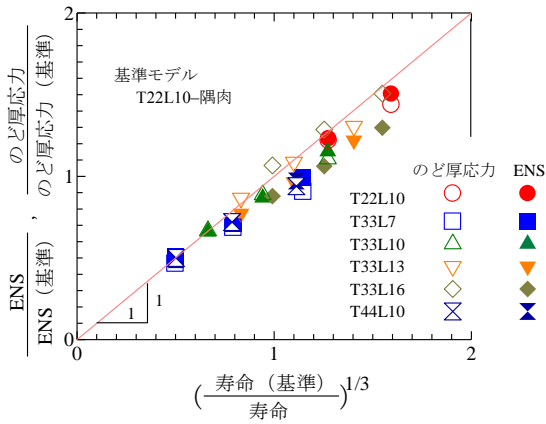


図-1 形状変化に伴う各指標値の変化 (引張)

しかし、各指標に良い相関がみられるデータと差異が見られるデータを個別に検討した結果を図-2 に示す。図中の三角印は 0mm から 1mm ずつ亀裂が進展するのに要した寿命、丸印はある亀裂長さまで進展するのに要した寿命を用いて、形状変化の疲労強度への影響の一例を示したものである。図中には

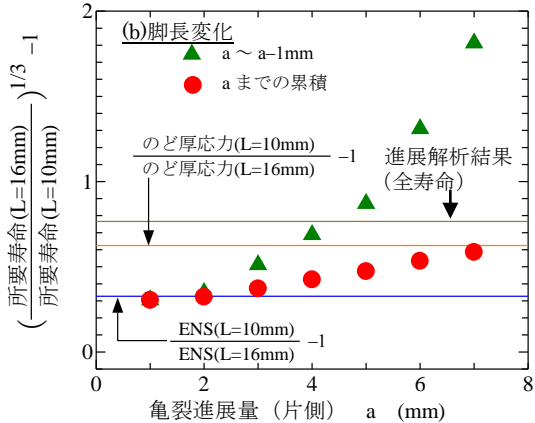
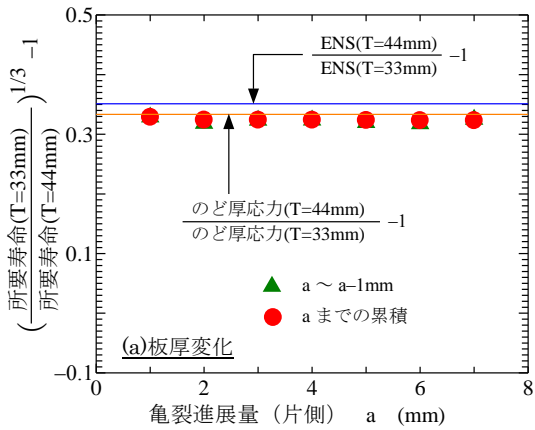


図-2 亀裂進展過程における形状変化の影響

のど厚応力、ENS の変化および進展解析により得られた疲労寿命の変化を用いて計算した疲労強度比も示している。図(a)は、主板厚 T のみを変化させた場合の一例であるが、各指標の主板厚の変化に伴う変化率はほぼ等しく、また進展解析から求めた亀裂長さの各ステップでの主板厚変化の影響はほとんど変化していない。一方、図(b)は、脚長 L のみを変化させたものであるが、各指標の変化率は大きく異なる。特に亀裂が短い領域での亀裂進展解析と ENS の変化率はほぼ等しいが、亀裂長さが大きくなるほど、進展解析から求めた亀裂長さの各ステップでの脚長変化の影響は大きく変化し、ENS の変化率と大きく異なる結果となっている。

同様に、すみ肉溶接を例にとり、面外曲げが面内軸方向引張と同時に作用した場合の面外曲げの影響度について ENS 法と進展解析結果を比較した結果を示している。面外曲げの影響は面内引張と比較して非常に小さい (図中に示すすみ肉モデルの例では 20%程度) が、ENS 法で評価した場合の方が面外曲げの影響を大きく見積もっていることが分かる。図-2 同様に面内引張のみが作用する場合と面外曲げが 100%混入された場合の亀裂進展過程における面外曲げの影響の変化を調査した結果が図-4 である。明らかに亀裂進

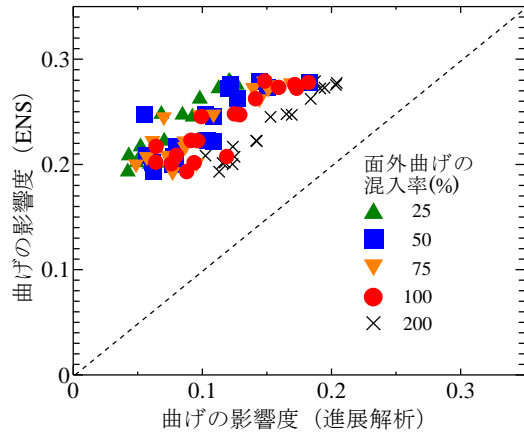


図-3 形状変化に伴う各指標値の変化 (面外曲げ)

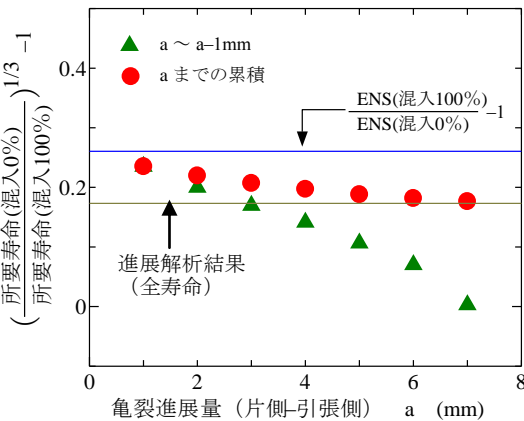


図-4 亀裂進展過程における面外曲げの影響

展初期は進展解析と ENS 法で求めた影響度はほぼ同等であるが、亀裂が進展するに伴い、大きく変化し、ENS から求めた面外曲げの影響度と大きく異なる結果となっている。

このように局部応力を用いた疲労強度評価手法である ENS 法は、不溶着部からの亀裂発生初期では進展解析結果と良い一致を示すが、例えば脚長が異なり亀裂進展に伴うリガメントが異なる、また作用応力が異なる場合など亀裂進展経路（状況）が異なる場合には進展解析結果とは異なる可能性がある。従って、局部応力を用いた ENS 法を適用して疲労強度を推定する場合、大まかに継手の疲労強度を把握する目的では適用可能であると考えられるが、継手形状の影響、作用応力場の影響などを個別に ENS を指標として議論する場合には注意が必要であると言える。

以上の成果は、2009 年度の土木学会年次学術講演会にて公表しているが、更に ENS 法の適用性、適用方法について検討する必要があると考えている。

(2)前節(1)で検討した既往の評価手法は公称応力ベースもしくは解析ベースであるが、継手形状および作用応力を正確にシミュレートすることは困難な場合も多く、実測応力を用いてルート部の疲労強度を評価できる手法が望まれる。本研究では実測応力として主板表面応力を用いた。具体的には、荷重伝達型十字溶接継手について、主板厚、溶接脚長、溶込み深さをパラメータとして有限要素解析を行い、のど断面応力による評価法、亀裂進展解析、ENS 法それぞれによる疲労強度評価結果と溶接部前面の任意の位置（止端部からの位置については種々の設定手法を検討）の応力との相関について検討を行っている。主板厚 T 、溶接脚長 L 、不溶着長さ IP 、溶接ギャップ G など疲労強度に影響を及ぼす継手形状が変化すると溶接止端部前面の応力が変化する（疲労強度が低下する方向に継手形状が変化すると止端部前面の応力は大きくなる傾向にある）という本研究で行った FEM 解析により得られた傾向を利用しているが、形状変化に伴う応力変化領域は、変化する形状パラメータにより異なるため、各継手形状に関して検討範囲（ $T:11\sim66\text{mm}$ 、 $L:7.8\sim16\text{mm}$ 、 $IP:0.4T\sim1.0T\text{mm}$ ）を設定してパラメトリックに検討を行った。

図-5 はすみ肉溶接を対象として、ある基準モデルに対する各モデルの主板表面応力、およびのど断面応力の比を、主板表面応力の採取位置をパラメータとして整理した結果である。主板厚、溶接脚長の変化に伴う止端部応力の変化はのど断面応力の変化とほぼ 1:1 の関係にあるが、止端部から離れるに従い継手形状変化に伴う主板表面応力の変化は非常に鈍くなっていることが分かる。従って、疲労強度評価を行うためには、ある程度溶接

止端部に近い位置で応力を測定する必要があるが、溶接止端部では応力測定が不可能であること、止端部の微視的な形状の影響が大きいことなどの理由で指標として採用できない。そこで本研究では止端部から 3mm 位置の応力を用いてどの程度、疲労強度を評価できるかについてまずは検討を行った。

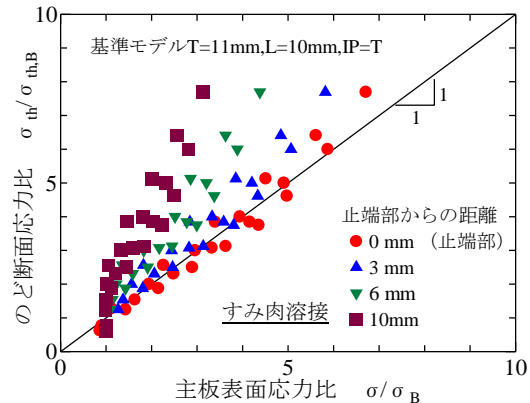


図-5 主板表面応力比とのど断面応力比の関係

検討した結果を、主板表面応力比(3mm)とのど断面応力比との間にある程度の相関が見られたが、不溶着部長さ（主板厚で無次元化）の差異により若干異なる傾向が見られ、特に疲労問題が生じやすい溶込み率の小さい場合に良い相関が得られることが分かった。そこで不溶着部長さごとにグループ分けを行い、それぞれのグループ内で基準モデルを設定し図-5 に示す同様の方法で整理した主板表面応力比(3mm)とのど断面応力比の関係を図-6 に示す。道路橋示方書に示されるすみ肉溶接サイズの規定を満たす形状を丸印、満たさない形状を三角印で示しているが、規定を満たす形状については主板表面応力比とのど断面応力比に概ね 1:1 の関係が見られる。すなわち、不溶着部長さが測定可能であれば、不溶着部長さ毎にグループ分けを行い疲労強度を評価した方が、より精度の良い疲労強度評価が可能であることを示唆していると言える。

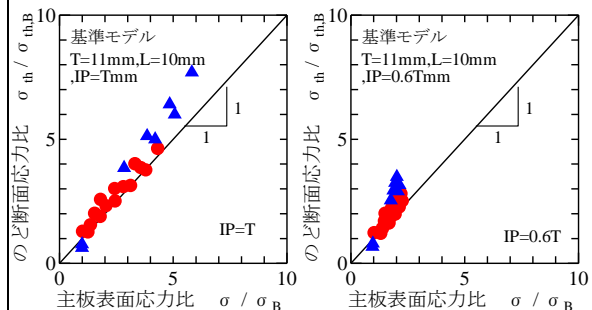


図-6 不溶着部長さ毎に分類した主板表面応力比(3mm)とのど断面応力比の関係

これらの結果をもとに、既往の公表されている荷重伝達型十字溶接継手の疲労試験結

果（継手形状の詳細が得られたもののみ）を
 主板表面応力で整理し、主板表面応力の疲労
 強度評価への適用性について検討した結果
 を図-7 に示す。ここでは ENS、のど断面応力、
 主板表面応力については疲労試験結果の疲
 労寿命と応力解析結果から 200 万回疲労強
 度に相当する応力値を求めて整理を行って
 おり、進展解析(IIW と JSSC の基準を準用)
 では解析結果から 200 万回疲労強度に相
 当する主板公称応力を用いて整理を行って
 いる。なお ENS については研究代表者の
 疲労試験結果についてのみ求めている。デ
 ータの殆どはすみ肉溶接の結果であるが、
 止端部から 0mm（止端部）、および 3mm
 位置の主板表面応力を用いて整理した結
 果は、のど断面応力、進展解析、ENS とい
 った既往の疲労強度評価指標を用いた場
 合とばらつきの範囲に大きな差異が殆ど
 見られないことが分かる。

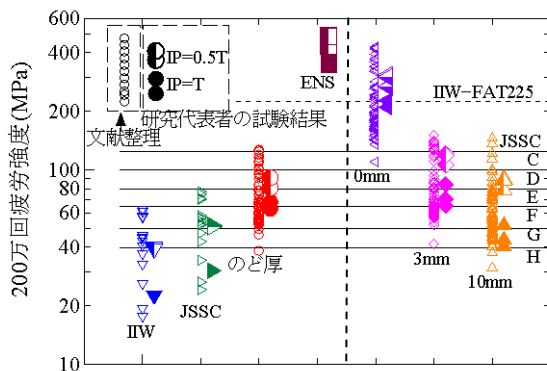


図-7 既往の疲労試験結果の整理

ばらつきの範囲に殆ど差異が見られない
 結果は、疲労強度評価ができる可能性を示唆
 しているが、個々のデータを精査すると、整
 理手法で疲労強度が逆転しているデータも
 見られる。従って、(1)で検討した ENS と同
 様に、大まかに疲労強度を推定する方法とし
 ては測定した主板表面応力を活用すること
 ができる可能性があると言える。

これらの成果は 2010 年度の土木学会年次
 学術講演会にて公表する予定である。なお、
 現在、より主板表面応力の疲労強度評価への
 適用性を検討するために、実験的な検討を開
 始しているが、継手形状によるグループ分け
 について更に検討を行うとともに、疲労強度
 推定のための疲労強度の設定などについて
 検討を行っていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

穴見健吾、松岡慧、き裂進展解析を用いた
 荷重伝達型十字溶接継手に対する面外曲
 げの影響評価、土木学会第 64 回年次学術
 講演会概要集、査読無し、2009、319-320

〔学会発表〕(計 0 件)
 〔図書〕(計 0 件)
 〔産業財産権〕
 ○出願状況 (計 0 件)
 ○取得状況 (計 0 件)
 〔その他〕
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

穴見 健吾 (ANAMI KENGO)

芝浦工業大学 工学部 准教授

研究者番号：30272678

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者