

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420481

研究課題名(和文) ルート破壊に着目した溶接継手の疲労強度評価に関する研究

研究課題名(英文) Fatigue strength evaluation for root failure in welded joints

研究代表者

館石 和雄 (Tateishi, Kazuo)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80227107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：すみ肉溶接継手のルート破壊に対しては、のど断面応力を用いた疲労照査法が示されているが、実際にはのど断面応力が定義できない場合も多い。本研究では、これに代わる手法として、有限要素解析で求めた未溶着部の開口変位を用いる方法について検討した。解析結果に基づき、1mmの要素を配置して解析を行い、未溶着部先端から1mmの位置での変位に着目することを提案した。き裂進展解析および過去に行われた疲労試験の結果をその変位で整理した結果、変位と疲労強度には高い相関があり、のど断面応力による方法と同等の精度で疲労強度を推定できることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Fatigue strength for root failure in fillet weld joints is conventionally estimated with nominal stress in weld throat. This idea is applicable only when the nominal throat stress is clearly obtained. This paper presents a new fatigue strength evaluation method for root failure, based on displacement at unfused zone around weld root. An advantage of the use of the displacement, instead of stresses, is low sensitivity to finite element mesh in FEA. We propose a method to use the displacement at the spot 1mm away from the root on unfused zone surface, obtained by FEA with 1mm size elements, as a parameter for fatigue strength evaluation. The results of analytical and experimental verification on load-carrying cruciform joints, butt joints and out-of-plane gusset joints demonstrate that the displacement based method can evaluate the fatigue strength of root failure with the accuracy equivalent to that of throat stress method.

研究分野：鋼構造学

キーワード：疲労 溶接継手 ルート破壊

## 1. 研究開始当初の背景

鋼橋の耐久性を支配する一つの劣化形態として疲労がある。疲労に対してはこれまでも膨大な研究成果が積み重ねられ、それらの成果は日本鋼構造協会の疲労設計指針などにまとめられてきた。鋼橋の実務設計のレベルにおいても既に疲労設計は浸透してきている。鉄道橋では古くから疲労設計が義務づけられており、道路橋においても平成14年の道路橋示方書の改訂から疲労を考慮すべきであるとされ、平成24年の改訂において、これまで指針として示されていた疲労設計が、一部ではあるものの、示方書の本文に掲載されるようになった。

このように疲労設計の普及は進んできてはいるが、実際の鋼橋の疲労損傷事例は、現在の疲労設計の範疇を超えたディテールや応力場に生じていることも多い。その一例が、本申請で取り上げる溶接継手のルート部からの疲労損傷である。鋼橋において疲労き裂が生じるのはほとんどが溶接継手であるが、溶接継手の疲労き裂には、止端を起点として生じるものと、ルートから生じるものがある。このうちルートき裂は、溶接内部から発生・進展するき裂であることから、検知が難しく、それが表面に現れたときにはかなりの長さになっている場合も多い。また、ルートき裂の原因(起点)を取り除くためには溶接ビードをはつりとるなどの大がかりな作業が必要になる。

現在の疲労設計指針では、ルート破壊に対する規定は、荷重伝達型十字溶接継手に対するものが示されているのみである。また、この規定も、十字継手の主板が面内の引張/圧縮力を受ける場合のデータに基づくものであり、他の载荷モードに対する適用性は不明である。一方、実橋に生じるルートき裂は、鋼床版の縦リブとデッキプレートとの溶接部、プレートガーダーの垂直補剛材上端溶接部、下フランジとソールプレートの溶接部など多種の継手に生じている。これらの事例に共通しているのは、継手形状が単純な十字継手ではないことと、程度の差はあるが板の面外曲げの影響を受けていることである。これらはいずれも典型的な疲労損傷であるにもかかわらず、現在の疲労設計には、これらの継手に対する照査方法は示されていない。ルートき裂の発生を防止するためには、まずその現象を詳細に解明した上で、適切な照査手法を開発し、疲労設計へ反映させていく必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、面内力を受ける荷重伝達型十字溶接継手を除く溶接継手に生じるルート破壊を対象として、疲労強度の解明とその評価手法を明らかにすることを目的とする。特に、実際のき裂が面外曲げの影響を受けてい

ると考えられることから、それに着目した検討を行う。

疲労強度の解明においては、ルート部近傍の残留応力特性と局部応力の発生性状を解析的、実験的に明らかにした上で、疲労試験により疲労強度を求め、局部応力性状との関係について考察する。疲労強度の評価手法の開発においては、ルート部の局部応力と相関が高い力学的指標とその発生位置を見だし、それをを用いた評価手法の適用性について検討を行う。

## 3. 研究の方法

縦リブ溶接継手、十字溶接継手を対象に、疲労試験を行い、それぞれの疲労強度を明らかにする。疲労試験は、通常の面内力を載荷して行うものに加え、面外曲げを載荷することによっても実施する。面外曲げを載荷する疲労試験機には、名古屋大学で開発された振動式疲労試験機を用いる。疲労試験に際しては、溶接ビード上、止端部周辺など、ゲージが設置可能な位置でのひずみを計測し、解析結果の妥当性の検証に用いる。

一方で、縦リブ溶接継手、十字溶接継手を対象に、溶接ビードまでを忠実にとりいれた有限要素解析モデルを構築し、引張载荷時および面外曲げ载荷時の局部応力などについて解析的に明らかにする。解析においては、溶接脚長、ルートギャップ、溶込み量などを様々に変化させる。溶接ビード上や溶接止端近傍の主板の応力分布と、ルート部の局部応力との相関についても整理する。

上記の実験および解析結果により、疲労照査を行うための適切な力学指標を明らかにするとともに、その精度や適用限界などについて明らかにする。

## 4. 研究成果

実験および解析の結果、継手の形状を限定し、かつ、面内応力と面外曲げ応力の比率が明らかとなれば、溶接ビード上の応力から溶接のど断面の応力を推定可能であることがわかったが、応力基準では汎用的な手法の開発には至らなかった。そこで、種々検討の結果、未溶着部の開口変位に着目することにした。以下では、ルート破壊に対する疲労照査手法として、未溶着部の変位を用いることを試みた成果について述べる。過去の疲労試験結果を、有限要素解析から得られる未溶着部の変位で整理することで、その妥当性を検討した。

### (1) 未溶着部の変位の解析

十字すみ肉溶接継手を対象として、ルート周辺の要素サイズ、板厚、脚長、溶込み量、ルートギャップ、载荷パターンをパラメータとして有限要素解析を行い、未溶着部の変位を求めた。未溶着部の変位として、ここでは次式で算出される変位  $d$  に着目する。

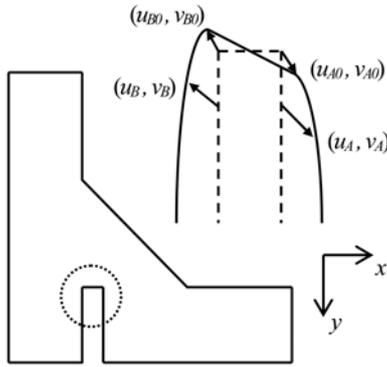


図 1. 変位の定義

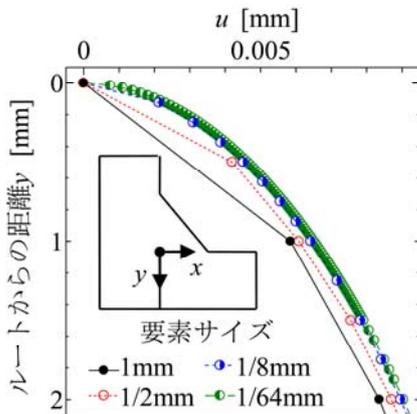


図 2. 未溶着部の開口変位

$$d = \sqrt{u^2 + 3v^2}$$

$$u = \left| (u_B - u_{B0}) - (u_A - u_{A0}) \right|$$

$$v = \left| (v_B - v_{B0}) - (v_A - v_{A0}) \right|$$

各記号の意味は図 1 に示す通りであり、 $u$  は未溶着部先端の弾性変形を除いた開口変位、 $v$  はせん断変位である。これは Mode I と Mode II の混合モード条件下での応力拡大係数の考え方を参考に定めた変位である。荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労試験結果によれば、ルートき裂は荷重に直角な方向に進むとは限らず、ある角度をもって溶接ビード内を斜めに進展する場合がある。これは、溶接ビード内の主応力方向が必ずしも荷重方向と直角ではないためである。よって、開口変位のみでは、斜めに進展するルートき裂に関する適切な指標とはならない可能性があるため、上記の変位に着目した。

未溶着部の変位の解析結果の例を図 2 に示す。変位は要素サイズが小さくなるほどある値に収束する。すべての解析結果を観察した結果、要素サイズを 1mm として解析を行った場合の、ルートから 1mm 位置での変位は、継手寸法や荷重モードによらず収束値の 0.9 程度であった。そこで、この変位を疲労強度評価のための指標とする。

## (2) リガメント長の影響

実験および解析を行った結果、前節に示す

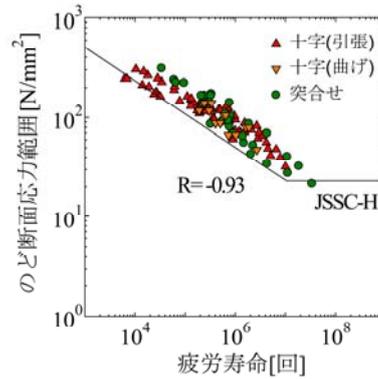


図 3. のど断面応力による整理

開口変位では、疲労強度を精度よく推定することはできなかった。特に、面内応力を受ける場合と面外曲げ応力を受ける場合の結果が大きく異なり、荷重モードによる影響を吸収できないことが明らかとなった。そこで、以下のような破壊力学的考察により、その影響を補正することとした。

溶接止端から発生するき裂の疲労寿命は、き裂が短いうちに費やされる寿命がほとんどを占めるため、板厚やリガメント長が全体の疲労寿命に与える影響は小さい。それに対して、ルートき裂の場合、未溶着部が初期き裂となり、き裂が長い状態から進展を開始することになるため、板厚が疲労寿命に大きく影響する。この点を考慮するために、以下のような補正を行うこととした。

帯板の中央に未溶着部（き裂）が存在する場合の応力拡大係数範囲は次のように表される。

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec(\pi a / t)}$$

ここで、 $a$  はき裂の半長、 $t$  は板厚である。これを用いると、き裂進展速度と応力拡大係数範囲との関係により、疲労寿命は以下のようになる。

$$N = \frac{(\xi_i \sec \xi_i)^{3/2}}{C(\Delta K_i)^3} \frac{t}{\pi} \int_{\xi_i}^{\xi_c} \left( \frac{1}{\xi \sec \xi} \right)^{3/2} d\xi$$

ここで、 $\Delta K_i$  は初期き裂に対する応力拡大係数範囲、 $\xi = \pi a / t$ 、 $\xi_i = \pi a_i / t$ 、 $\xi_c = \pi a_c / t$ 、 $a_i$  は初期き裂長、 $a_c$  は限界き裂長である。き裂長が板厚の半分以上の領域では、上式の被積分関数が 2 次関数で近似できることなどを使うと、次式が得られる。

$$(\Delta K_i / b^{1/3})^3 N = C'$$

ここで、 $b$  はリガメント長である。すなわち、応力拡大係数を  $b^{1/3}$  で除すことで、板厚の影響を考慮することができる。応力拡大係数と変位とは比例関係にあることから、本研究では変位を  $b^{1/3}$  で除した値  $d/b^{1/3}$  を用いて、疲労試験結果を整理することとした。

## (3) 疲労試験結果による検証

本研究で実施した疲労試験結果に加え、過去に行われた荷重伝達型十字継手、横突合せ継手、面外ガセット継手に対する疲労試験の

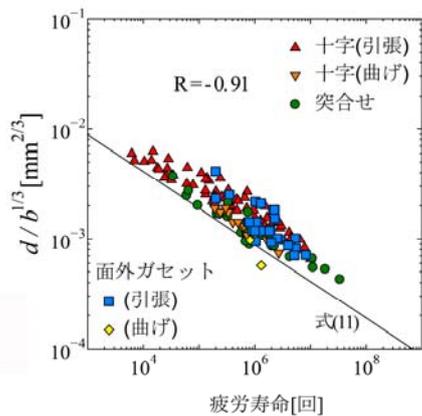


図 4.  $d/b^{1/3}$  による整理

うち、ルートき裂によって破壊した試験結果<sup>1)~13)</sup>を収集し、提案手法の適用性について検討した。個々の試験体ごとに解析モデルを作成し、疲労試験と同じ境界条件を設定して解析することで、未溶着部の変位を求めた。試験体の寸法は、文献から得られる中で最も正確だと思われるもの（例えば計測結果の平均値）を用いているが、ルートギャップについて文献中に記載がない場合は 0mm とした。また、溶込み量について記載が無く、すみ肉溶接とわかる試験体については溶込み量を 0mm とした。

公称のど断面応力が定義できる荷重伝達型十字継手と横突合せ継手について、公称のど断面応力によって疲労強度を整理した結果を図 3 に示す。疲労試験結果は H 等級を下限とする位置に分布している。

次に、 $d/b^{1/3}$  で疲労試験結果を整理した結果を図 5 に示す。面外ガセット継手のように、公称のど断面応力が定められない継手も含め、 $d/b^{1/3}$  で整理することによって、ほとんどの結果が狭いばらつきの範囲内に収まり、全データから得られる相関係数は、のど断面応力によって整理した場合と同等となった。

以上より、要素サイズ 1mm の解析モデルから得られる、ルートから 1mm 位置の変位を除いた値を用いることで、ルートき裂を対象とした溶接継手の疲労寿命が、これまでと同等の精度で予測できることが明らかとなった。

#### (4) 結論

未溶着部の変位を用いて、すみ肉溶接継手のルート破壊に対する疲労強度を評価する方法について検討し、以下の結論を得た。

- 1) ルート部周辺の要素サイズを 1mm とした解析モデルから得られる、ルートから 1mm 離れた未溶着部の相対変位は、継手寸法や荷重方法によらず、微細要素を用いた解析モデルから得られる値の 0.9 倍程度の値となった。この結果より、ルート部周辺の要素サイズを 1mm とした解析モデルから得られる、ルートから 1mm 離れた未溶着部の相対変位を、疲労

照査に用いるパラメータとして提案した。

- 2) 荷重伝達型十字溶接継手および横突合せ溶接継手を対象としたき裂進展解析結果より、未溶着部の開口変位に、リガメント長の影響を考慮したパラメータを組み合わせることで、疲労寿命を精度よく推定できることを示した。
- 3) 荷重伝達型十字継手と横突合せ継手に対する疲労試験により求められた疲労寿命を、2)と同じ手法で整理した結果、引張荷重の場合と曲げ荷重の場合で疲労強度が異なる結果となった。未溶着部の開口変位とせん断変位とから算出される合成変位に、リガメント長の影響を考慮したパラメータを組み合わせることで、荷重方法による差はなくなり、のど断面応力で整理した場合と同程度の相関が得られた。
- 4) 面外ガセット継手に生じるルート破壊に対しても、3)の手法を適用できることが明らかとなった。

#### 参考文献

- ① 金属材料技術研究所：溶接構造用圧延鋼 SM50B 十字溶接継手の疲れ特性データシート（試験片寸法の効果）、疲れデータシート No.18,1980.
- ② 森猛，一宮充：荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労破壊起点の検討，溶接学会論文集，Vol. 17, No. 1, pp.94-101,1999.
- ③ 森猛，貝沼重信：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, pp.95-102,1994.
- ④ 森猛，内田大介，福岡哲二，明見正雄：板曲げを受ける十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価法の提案，土木学会論文集 A，Vol. 66, No. 3, pp. 568-575,2010.
- ⑤ 木下幸治，荒川慎平，盛高志：軟質溶接継手を適用した荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労強度，鋼構造論文集，Vol. 18, No. 69, pp.33-40,2011.
- ⑥ 永井欣一，岩田光正，康聖原，新井誠：軟質十字すみ肉溶接継手の片振り引張疲労強度について，日本造船学会論文集，No. 148, pp.261-267,1980.
- ⑦ 穴見健吾，横田博之：引張と曲げを受ける荷重伝達十字継手の疲労挙動，構造工学論文集，Vol. 54A, pp.695-702,2008.
- ⑧ 森猛，藤野大地，南邦明，谷口哲志：余盛と未溶着を有する横突合せ溶接継手の疲労強度評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.70, No.1, pp.118-128, 2014.
- ⑨ 金仁泰，新海英昌，山田健太郎，近藤明雅：斜め連続未溶着部をもつ突合せ溶接継手の疲労挙動，土木学会論文集，No. 703/I-59, pp.211-219, 2002.
- ⑩ 森猛，猪股俊哉，平山繁幸：グラインダ

一仕上げ方法が面外ガセット溶接継手の疲労強度に及ぼす影響, 鋼構造論文集, Vol. 11, No. 42, pp.55-62, 2004.

- ⑪ 谷口哲憲, 森猛, 遠藤健太: 面外ガセット溶接継手ルート破壊の疲労強度評価法の検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, I-481, pp. 961-962, 2014
- ⑫ 三木千寿, 穴見健吾, 樋口嘉剛: 低温相変態溶接棒を用いた付加溶接による疲労強度向上の試み, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.311-319, 2002.
- ⑬ 下川浩資, 竹名興英, 伊藤文夫, 三木千尋: 800MPa 級鋼材の大型ガセット継手の疲労強度, 構造工学論文集, Vol. 33A, pp. 429 - 437, 1987.

#### 5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① すみ肉溶接継手のルートき裂に対する変位基準の疲労強度評価法: 舘石 和雄, 早田 直広, 判治 剛, 清水 優, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.3, pp.315-326, 2015.9. (査読有)
- ② Displacement based fatigue strength evaluation for root failure in fillet weld joints: Kazuo Tateishi, Naohiro Soda, Takeshi Hanji, Masaru Shimizu, Proceedings of the ISSS, pp.169-170, 2015.11. (査読有)
- ③ 前面すみ肉溶接で接合された重ね継手の面外曲げ荷重下での疲労強度: 舘石和雄, 崔誠珉, 判治剛, 内田大介, 浅野浩一, 小林潔, 鋼構造論文集, Vol. 21, No. 81, pp.47-53, 2014. (査読有)

[学会発表] (計 2 件)

- ① ルート破壊を対象とした未溶着部の変位による疲労強度評価法: 舘石和雄, 早田直広, 判治剛, 清水優, 第 70 回土木学会年次学術講演会(岡山大学), 2015.9.17
- ② 荷重伝達型十字継手におけるのど断面応力の推定に関する研究: 古崎智大, 舘石和雄, 判治剛, 清水 優, 第 71 回土木学会年次学術講演会(東北大学), 2016(発表予定).

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

舘石 和雄 (TATEISHI, Kazuo)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 80227107