

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04233

研究課題名（和文）ホットスポット型疲労評価における合理的応力算出法の探究

研究課題名（英文）Research on rational stress calculation method for structural hot-spot stress based fatigue evaluation

研究代表者

判治 剛（Hanji, Takeshi）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80452209

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：溶接継手の疲労強度評価法としてホットスポット応力法に着目し、その精緻化が本研究の目的である。まず、板側面の溶接止端から生じる疲労き裂に対する適用性に関して、IIW-3点法（4-8-12mm法）を用いた場合、試験結果のばらつきは大きい。JSSC-E等級にて安全側の評価が可能であることを示した。また、面外曲げの影響については、参照点での板表裏面の応力から膜応力成分と曲げ応力成分を求め、それぞれでホットスポット応力を算出し、ホットスポット応力の膜応力成分、曲げ応力成分とした。このうちの曲げ応力成分の補正を行うことで、曲げ混入によるホットスポット応力範囲のばらつきを抑えることができる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ホットスポット応力自体は古くからある概念ではあるが、その算出法における板厚や面外曲げの影響、板側面からの疲労き裂に対する適用性などが明確になれば、ホットスポット応力法の精緻化につながり、さらには、設計基準類の改訂・整備のための貴重な資料となる。ホットスポット応力法がより使いやすいものとなり、公称応力法とならば疲労評価法として普及すれば、設計および維持管理段階で実挙動に基づく合理的な疲労評価が可能となる。本研究により、上記課題に対する一定の知見を示すことができ、得られた成果は社会的・学術的にみて貴重なものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the hot spot stress method as a fatigue strength evaluation method for welded joints. First, regarding its applicability to fatigue cracks originating from a weld toe on plate edge, it was shown that although there is considerable scatter in the test results when using the IIW-3 point method (4-8-12 mm method), a safe-side evaluation is possible with JSSC-E class. Additionally, concerning the effect of out-of-plane bending, we determined the membrane stress component and the bending stress component from the stresses on the front and back surfaces of the plate at the reference points, and calculated separately the membrane and bending stress components of the hot spot stress. By correcting the bending stress component with the JSSC method, we demonstrated the possibility of reducing the scatter in the hot spot stress range caused by the inclusion of bending.

研究分野：鋼構造学

キーワード：ホットスポット応力 溶接継手 疲労強度評価 維持管理

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

鋼橋の劣化要因の一つは疲労であり、それを適切に評価し、耐疲労性を確保することにより、100年橋梁の実現が可能となる。鋼橋に生じる疲労き裂は、設計では想定されない、橋梁システムとしての立体的挙動に起因する、いわゆる二次応力によるものがほとんどである。このような継手部に対しては公称応力を明確に定義することが難しく、従来の方法である公称応力に基づく疲労照査を適用できない場合が多い。

公称応力の算出が難しい場合、ホットスポット応力を用いた方法が有効である。ホットスポット応力は、溶接継手による構造的な応力集中を考慮した溶接止端位置の応力として定義される。図1のように、一般に、溶接止端から離れた位置（参照点）の板表面での応力から、止端位置まで外挿して求める。ホットスポット応力法では、橋梁の立体的挙動の影響なども直接とりこむことができるため、合理的な疲労照査が可能となる。つまり、新設から既設橋までを考えると、ホットスポット応力法は強力な評価法となりうる。

ホットスポット応力法は日本鋼構造協会（JSSC）の疲労設計指針¹⁾などにも記載されている手法ではあるが、より一層の高度化・精緻化のためには、例えば以下の点を明確にすることが必要であると考えられる。

- ① 板側面の溶接止端から生じる疲労き裂（Type b）は多く、Type b に対しては、止端位置から 4, 8, 12 mm 位置が参照点に推奨されているが、その妥当性を検証できるだけの十分な知見がない。
- ② 実際の鋼部材から生じる疲労き裂のほとんどは、軸方向力に加えて、局所的な板曲げによる面外曲げ応力に起因しているが、軸方向力と面外曲げが作用する継手に対する算出法は十分に検討されていない。

2. 研究の目的

本研究は、ホットスポット応力法という既設橋の疲労評価に有効な技術を、より合理的かつ実用的なものに発展させるべく、上記課題を解明することを目的とする。

3. 板側面の溶接止端から生じる疲労き裂に対するホットスポット応力法

本章では、板側面の溶接止端における疲労き裂（Type b）に対するホットスポット応力法を対象とし、Type b に分類される継手のうち、過去の検討事例がほとんどない継手に対する疲労試験を行い、その疲労強度を明らかにした。さらに、Type b の継手として代表的な面内ガセット溶接継手の過去の実験結果を再整理するとともに、本研究の成果も含めて、Type b に対するホットスポット応力法について考察を加えた。

3.1 試験体

疲労試験体の形状を図2に示す。試験体は、幅と板厚の異なる付加板を T 形鋼のフランジに溶接した形状とした。この試験体では、長手方向に载荷した際に構造的応力集中が付加板側面の溶接止端部で最大となるため、Type b のき裂の発生が想定される。上下非対称の形状としているのはき裂発生点を上側に限定するためである。事前解析により、付加板の幅や板厚により溶接止端の応力集中が変化することが確認されたため、ここでは付加板幅を 80, 120, 160 mm の 3 種類、付加板厚を 6, 12, 25 mm の 3 種類とし、それらの組合せとして 6 種類の試験体を用いた。

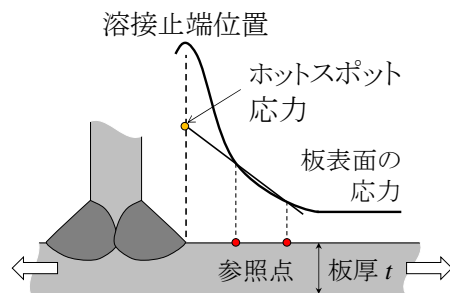
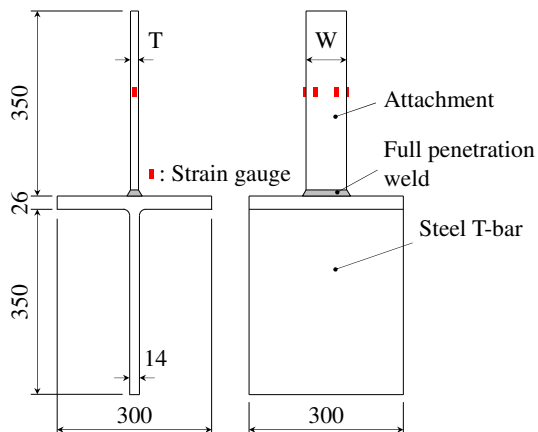


図1 ホットスポット応力の模式図



Specimen name	W (mm)	T (mm)
W80T6	80	6
W80T12	80	12
W80T25	80	25
W120T12	120	12
W160T6	160	6
W160T12	160	12

図2 試験体の形状と寸法（単位：mm）

3.2 疲労試験

疲労試験には油圧サーボ型疲労試験機を用い、図3に示すように試験体を設置し、長手方向に一定振幅の繰返し荷重を与えた。応力比は0.05とし、荷重速度は応力範囲に応じて1.4 Hzから6.0 Hzとした。図2に示すように、付加板にはひずみゲージを貼付し、それらの値から付加板内の応力分布を確認した。また、まわし溶接部には極細のエナメル被覆の銅線を貼り付け、その断線によりき裂発生を検知した。き裂発生後、いくつかの試験体では、進展挙動を記録するためのピーチマーク荷重も付与した。500万回荷重してもき裂発生が確認されない場合は未破断として取り扱った。

き裂発生および進展状況の例を図4に示す。疲労き裂は板側面の溶接止端部に発生し、それが板側面および角部を回り込むように進展して破断に至った。このことから、本研究で用いた試験体は、当初の想定通り Type b のき裂により破断する継手であるといえる。



図3 疲労試験状況

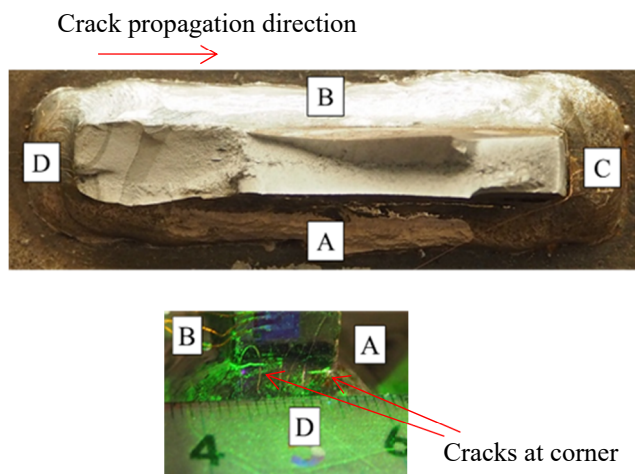


図4 疲労き裂の発生・進展状況

疲労試験で得られた疲労寿命を公称応力範囲で整理したものを図5に示す。疲労寿命は試験体が破断分離したときの繰返し数とし、公称応力範囲は与えた荷重範囲を断面積で除して求めた。図中には、国際溶接学会 (IIW) の疲労設計指針²⁾に示されている疲労強度等級もあわせて示している。ここで、FATの後に付記された数値は200万回時の疲労強度 (応力範囲) を表している。なお、未破断の試験体は矢印を付けて区別している。

実験結果から付加板の幅や板厚の影響は顕著にはみられない。これは、付加板寸法により溶接止端部の応力集中の大きさは変化するものの、その程度が疲労強度等級を変えるほどのものではなかったと推察できる。本研究で用いた継手形状に対する疲労強度はユーロコード³⁾において示されており、Category 71が設定されている。つまり、200万回疲労強度は71 N/mm²であり、IIWの疲労強度等級ではFAT71に相当する。今回の疲労試験結果の下限はFAT80あたりに位置しており、ユーロコードの規定を十分に満足しているといえる。

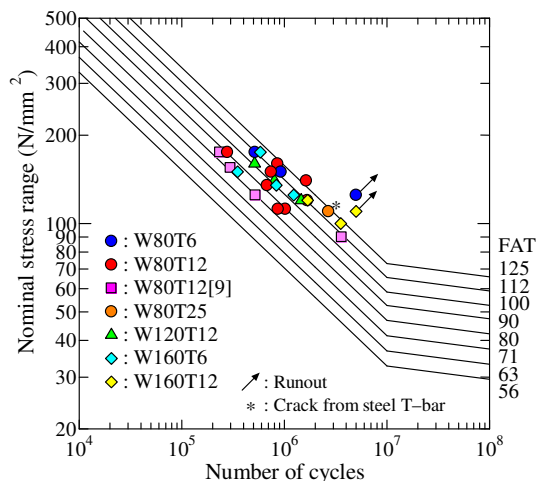


図5 疲労試験結果 (公称応力)

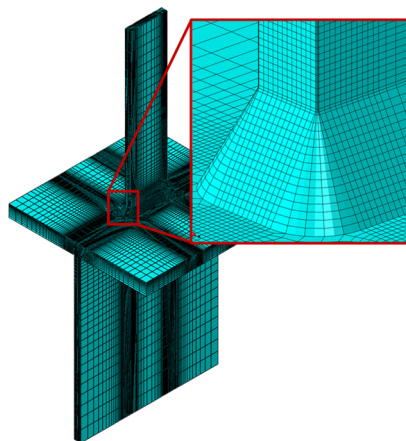


図6 有限要素モデル

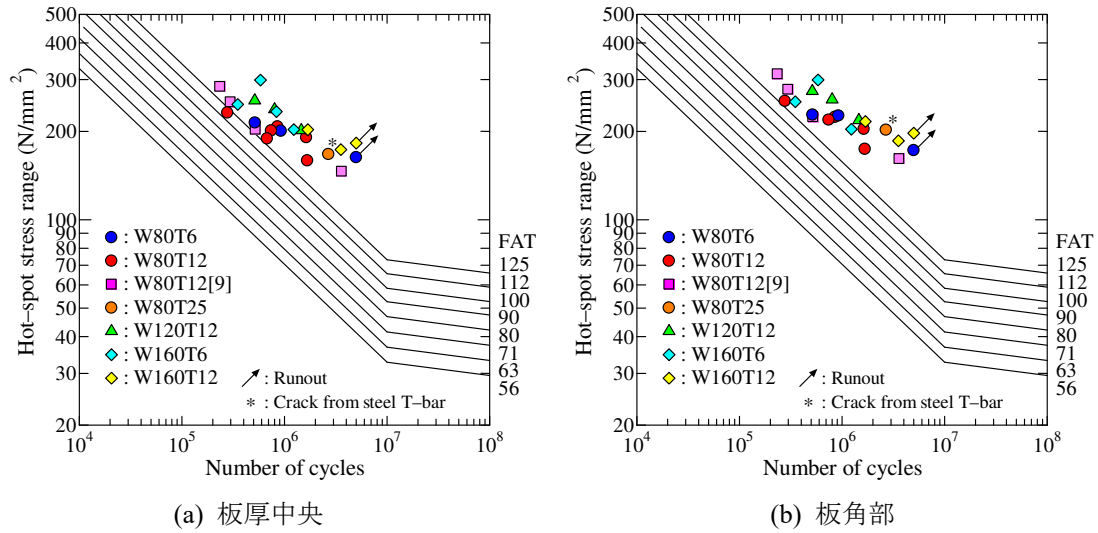


図7 ホットスポット応力による疲労試験結果の整理

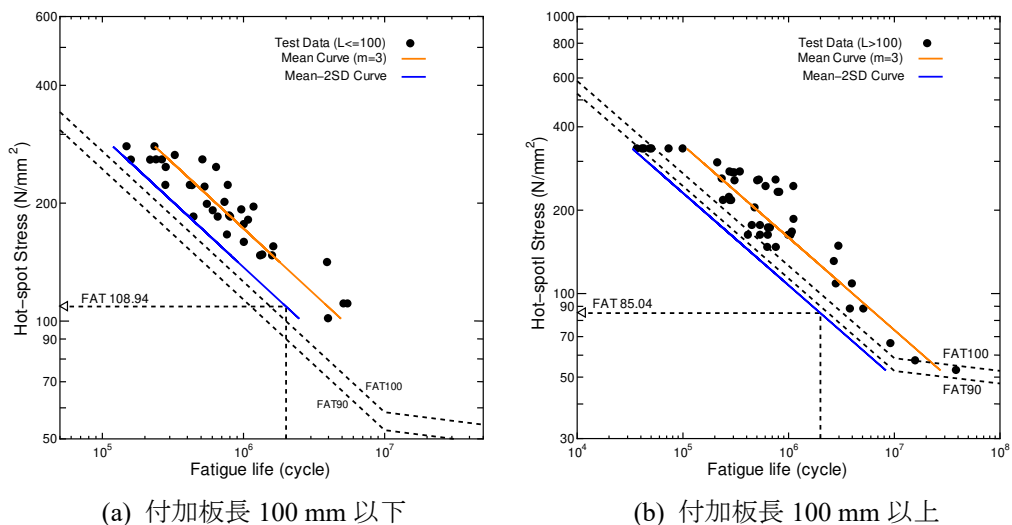
3.3 ホットスポット応力範囲による疲労試験結果の整理

図5に示した疲労試験結果をホットスポット応力範囲により再整理した。ホットスポット応力範囲は有限要素解析により求めた。解析モデルの例を図6に示す。各試験体において計測した溶接形状を再現するとともに、付加板における応力分布が実測値と同様の傾向となるよう、付加板上端に与える荷重を調節した。止端周辺の要素寸法は1mmとした。参照点には4, 8, 12mmの3点法を用いることとし、疲労破壊に対して支配的なき裂が生じた止端側の値を採用した。ホットスポット応力は、付加板の板厚中央または板角部に沿った長手方向の応力分布から求めた。

ホットスポット応力範囲で結果を整理すると、試験結果はFAT125の上方に分布していることがわかる。IIW Designer's Guide⁴⁾によると、Type b に対する疲労強度等級はFAT100またはFAT90が推奨されている。これは、面内ガセット溶接継手に対して設定されたものであり、ガセット長さが100mmより短い場合はFAT100を、100mmを超える場合はFAT90を用いることとしている。今回の結果は、例えばFAT100と設定しても、疲労強度曲線とは若干の乖離がみられる。これは、溶接部に導入された残留応力や、試験体の止端半径が比較的大きかったことなど、局部的な残留応力や止端形状の影響を受けたためであると推察される。

3.4 Type b の疲労き裂に対するホットスポット応力法に関する考察

国内外の面内ガセット溶接継手に対する過去の疲労試験結果を再整理し、Type b のき裂に対する疲労強度等級について考察を加えた。過去の実験⁵⁻¹⁰⁾のうち、溶接したままの継手を対象とし、止端処理などが施されている試験体は除外して結果を再整理した。過去の疲労試験を有限要素解析により再現し、各試験体に対して4-8-12mm法によりホットスポット応力範囲を求め、それと疲労寿命の関係性を求めた。



(a) 付加板長 100 mm 以下

(b) 付加板長 100 mm 以上

図8 ホットスポット応力による過去の実験結果の再整理

結果を図8にまとめる。ガセット長さによる疲労強度等級の違いもみられ、100 mm 以下の場合の200万回疲労強度は約109 N/mm²、100 mm 以上の場合は約85 N/mm²であった。前節の図7の結果も踏まえて考えると、IIW 4-8-12 mm 法により評価する場合、結果は広範囲に分布することになり、今後のさらなる検討が望まれるが、FAT90 または JSSC-E 等級（200万回疲労強度80 N/mm²）により安全側の疲労照査は可能である。

4. 研究成果

本研究により得られた主な成果を以下にまとめる。

[Type b き裂に対するホットスポット応力法]

- 1) 面内ガセット溶接継手に対して過去の広範な実験により得られた疲労寿命データを、IIW の3点法（4-8-12 mm 法）によるホットスポット応力範囲で再整理した。その結果、IIW で示されている疲労強度曲線（ガセット長100 mm 以下の場合にはFAT100、100 mm を超える場合はFAT90）を満足することが示された。
- 2) 付加板を突合せ溶接した荷重伝達型 T 継手に対して、付加板厚を6, 12, 25 mm と変化させて疲労試験を行った。疲労試験より得られた各継手の疲労寿命を公称応力で整理したところ、今回の試験体寸法の範囲内ではFAT71で評価できることを示した。
- 3) 有限要素解析により2)の試験体におけるホットスポット応力範囲（IIW-3点法）を求め、それにより疲労試験結果を再整理した。き裂発生点である付加板の角部で求めたホットスポット応力範囲ではFAT100を満足することを示した。

[軸力と面外曲げが作用する場合のホットスポット応力法]

- 1) 面外ガセット溶接継手を対象とし、膜応力に対する曲げ応力の比である曲げ混入率をパラメータとして疲労き裂進展解析を実施した。公称応力範囲を用いた場合、曲げ応力成分を4/5倍して疲労強度評価を行う方法の妥当性を確認した。
- 2) 軸力と面外曲げの組合せ作用下では、参照点での板表裏面の応力から膜応力成分と曲げ応力成分を求め、それぞれでホットスポット応力を算出し、ホットスポット応力の膜応力成分、曲げ応力成分とした。このうちの曲げ応力成分の補正を行うことで、曲げ混入によるホットスポット応力範囲のばらつきを抑えることができる可能性を示した。
- 3) 板表裏面での応力集中の度合いが異なる場合でも、ホットスポット応力の膜応力成分と膜応力成分を分離して考えることができる可能性を示した。

<参考文献>

- 1) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012。
- 2) A. F. Hobbacher: Recommendations for fatigue design of welded joints and components, second edition, 2016.
- 3) A. Nussbaumer, L. Borges and L. Davaine: Fatigue design of steel and composite structures, second edition: Eurocode 3: Design of steel structures part 1-9 – Fatigue / Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, 2018.
- 4) E. Niemi, W. Fricke and S. J. Maddox: Structural hot-spot stress approach to fatigue analysis of welded components, designer's guide, second edition, 2018.
- 5) 山田健太郎，酒井吉永，菊池洋一：ガセットを溶接した引張部材の疲れ強さとストップホールの効果，土木学会論文報告集，No.341，pp.129-136，1984。
- 6) 山田健太郎，重富寿：溶接継手の長寿命域での疲れ試験と破壊力学による解析，土木学会論文集，No.404，pp.45-52，1989。
- 7) M. Wagner: Fatigue strength of structural member with in-plane notches, IIW, pp.1730-1798, 1998.
- 8) S. Han, B. Shin: Use of hot spot stress for estimating the fatigue strength of welded components. Steel Research, 71(11), 466-473, 2000.
- 9) 平子浩士，近藤明雅：面内ガセット溶接継手の長寿命疲労試験，第56回土木学会年次学術講演会講演概要集，第1部門，pp.310-311，2001。
- 10) M. H. Kim, S. W. Kang: Testing and analysis of fatigue behaviour in edge details: A comparative study using hot spot and structural stresses. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 222(12), pp.2351-2363, 2008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hanji Takeshi, Tateishi Kazuo, Rabsei Nima, Shimizu Masaru	4. 巻 68
2. 論文標題 Structural hot-spot stress approach for toe cracking from plate edge of load-carrying welded attachment	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Welding in the World	6. 最初と最後の頁 1201 ~ 1209
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40194-024-01724-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hanji Takeshi, Tateishi Kazuo, Rabsei Nima, Shimizu Masaru
2. 発表標題 Structural hot-spot stress approach for toe cracking from plate edge of load-carrying welded attachment
3. 学会等名 The 76th Annual Assembly of IIW（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------