

荷重伝達型十字溶接継手部における局部応力に関する基礎的研究

1070558 横田博之

1.はじめに

鋼橋の溶接部において止端部とルート部から疲労き裂が多く発生しており、疲労照査や補修・補強などのために疲労強度を評価する必要がある。本研究の対象部位である隅角部の疲労損傷の起点の多くは溶接ルート部であり、その原因は不溶着部を含む溶接欠陥や高い応力集中である。その隅角部近傍の応力分布は図-1 に示すように、橋脚の梁全体の曲げによる曲げ応力（フランジ厚と比較して横梁高さが非常に大きいため、フランジの板厚内でほぼ一様と考えられる）に加え、フランジ自体の局部的な面外曲げ応力が同時に作用する。一方、この溶接部の疲労挙動は、荷重伝達型十字溶接継手にモデル化して検討することができる。これまでの研究では、面内軸力のみが作用した場合を対象としたものが殆どで、面外曲げが同時に作用した場合の研究は殆どなく、本研究では、面内軸力と面外曲げが同時に作用した場合の面外曲げの影響も明らかにすることを目的にする。また、この溶接部では構造解析による疲労評価方法の Effective Notch Stress 法で疲労評価を行うことができることは知られているが、この応力は実測することができない。そのため荷重伝達型十字溶接継手部でも測定できる応力を用いて疲労強度を評価する方法が望まれている。測定できる局部応力で、荷重伝達型十字溶接継手部の疲労評価手法を確立することを目的として、本研究では測定できる局部応力（例えばホットスポット応力）と Effective Notch Stress 応力との関係性について検討した。

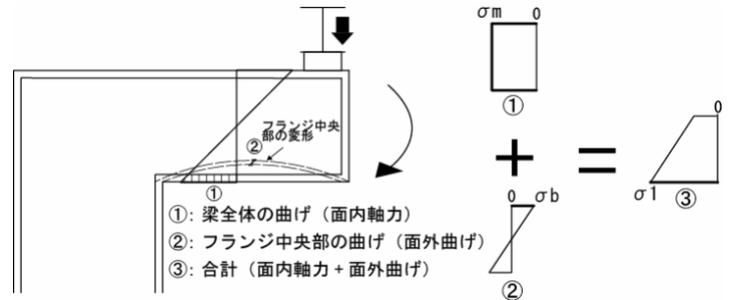


図 1 橋脚隅角部近傍のフランジの応力

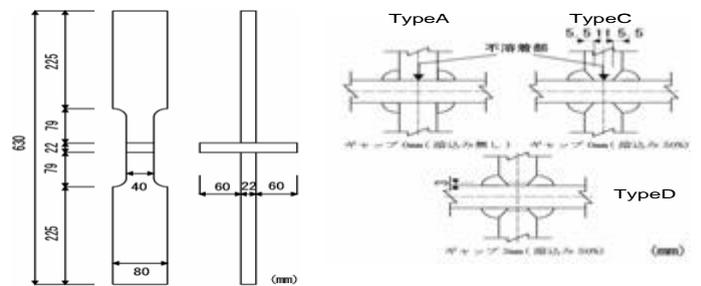


図 2 試験体の形状と寸法

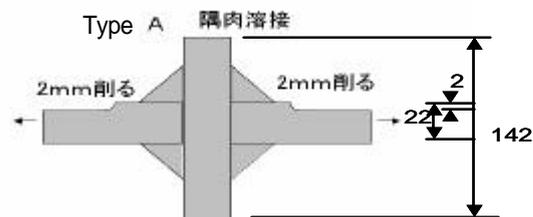


図 3 片面を 2mm 削った試験体

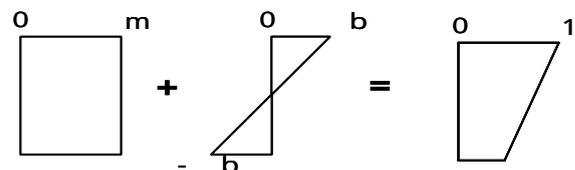


図 4 応力分布図

2.疲労試験

2.1 疲労試験概要

本研究で用いた荷重伝達型十字溶接継手試験体を図-2 に示す。供試鋼材は SM490 である。面内軸力のみ作用した試験を 9 体、面内軸力と面外曲げを同時に作用した試験を 4 体行った。疲労試験には M T S (加振能力 ± 250kN、± 250mm) の疲労

試験機を用い、最小荷重は全ての試験で 10kN とした。試験体に面外曲げを混入させる方法は図-3 に示すように試験体の片側表面を 2mm 削り偏心载荷を行った。2mm 削ることにより、引張応力に対し曲げ応力が 30% 程度試験体に導入される計算である。曲げ応力計算式は式 1 に、本報告における応力表記を図 4 に示す。

$$s_1 = s_m + \frac{M}{I} y$$

$$\text{面外曲げ混入率 (\%)} = \frac{(s_1 - s_m)}{s_m} \times 100$$

$$M = P \times \text{偏心距離} (= 1\text{mm})$$

$$I = b \times d^2 / 12$$

1 : 曲げ混入時の公称応力 M : 曲げモーメント
m : 公称面内応力 y : 中立軸からの距離

式 1 曲げ混入

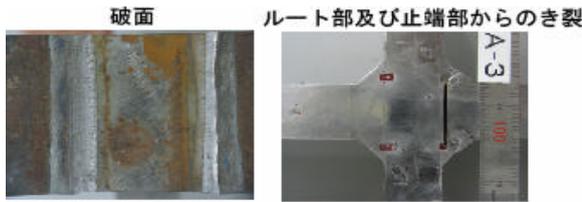


写真 1 試験結果の代表例

試験体	載荷荷重範囲(kN)	公称面内応力範囲(MPa)	のど断面応力範囲(MPa)	破断寿命 N(cycles)
A-2	88.0	100.0	155.6	132297
A-3	70.0	79.5	123.7	335512
A-4	50.0	56.8	88.4	1540789
C-1	114.4	130.0	130.5	660487
C-2	88.0	100.0	100.4	957485
C-3	70.0	79.5	79.8	2673128
D-1	88.0	100.0	124.5	259760
D-2	70.0	79.5	99.0	750431
D-3	50.0	56.8	70.7	3506475

表 1 疲労試験結果

2.2 疲労試験結果

破断した試験体の例を写真 1 に示す。全ての試験体でルート部から発生、進展したき裂により、破断する結果となった。また、試験体 A-3 と D-2 では止端部からもき裂が発生したため、それ以外の試験体では止端部にグラインダー処理を施し、止端部からのき裂発生を防止した。A-6 と D-6 は引張側から、A-5 と D-5 は圧縮側からそれぞれき裂が発生した。引張のみ載荷した試験条件と疲労寿命を表 1 に曲げを混入した試験結果を表 2 に示す。

3.種々の応力による整理

3.1 公称応力 (s_m 、 s_1) で整理した場合

各試験体の破断寿命 N を公称応力範囲で整理した S-N 線図を図 5 に示す。図中の実線は日本鋼構造協会 (JSSC) の疲労設計指針で示されている疲労強度等級である。また、それぞれの評価において、参考文献 [2] の疲労試験結果についても併せて示

試験体	載荷荷重範囲 (kN)	公称応力範囲 1 (MPa)	破断寿命 (cycles)
A-5	50.0	77.4	792500
A-6	60.0	86.8	728888
D-5	60.0	86.8	871340
D-6	70.0	101.2	1050000

表 2 疲労試験結果

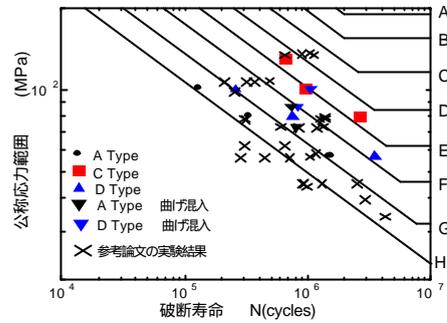


図 5 公称応力で整理した S-N 線図

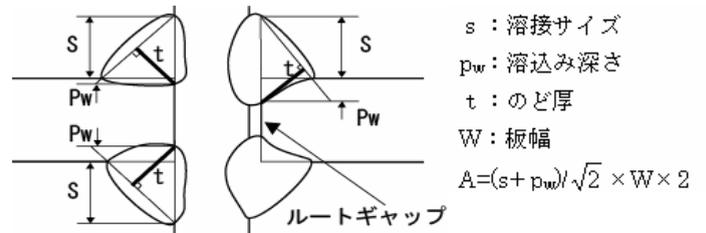


図 6 のど断面の計算方法

す。これらの試験体についても 3.3、3.4 節では FEM 解析を行った。引張のみ載荷試験体は s_m で、曲げ混入時の公称応力範囲は図-4 に示す方法で算出した s_1 の数値を使用した。TypeA は H 等級を満たす強度、TypeC は E 等級程度の強度、TypeD は G 等級程度の強度となった。公称応力で整理すると不溶着部が大きい程、また、ギャップが大きい程疲労強度が低下することが分かる。ばらつきが大きく公称応力で評価するのは難しい。

3.2 のど断面応力 (σ_t) で整理した場合

JSSC の疲労設計指針では、荷重伝達型十字溶接継手の疲労強度はのど断面応力で整理すると H 等級であるとされている。 s は溶込み深さを考慮して算出し、ギャップのある場合は図 6 に示す実のど断面の計算法^[3]を用いて算出した。各試験体の破断寿命 N を σ_t で整理した S-N 線図を図 7 に示す。3 種類の疲労強度は同程度となっており、疲労強度のばらつきが殆どなくなっていることが分かる。

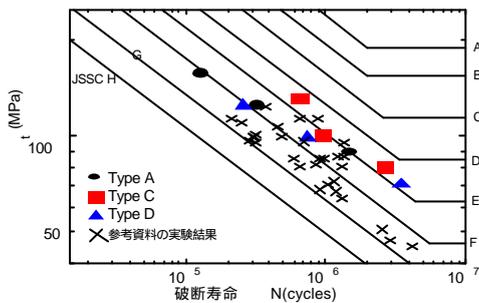


図7 のど断面応力 σ_t で整理した S-N 線図



図10 解析モデル

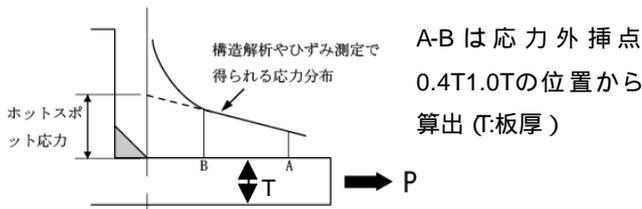


図8 ホットスポット応力の考え方

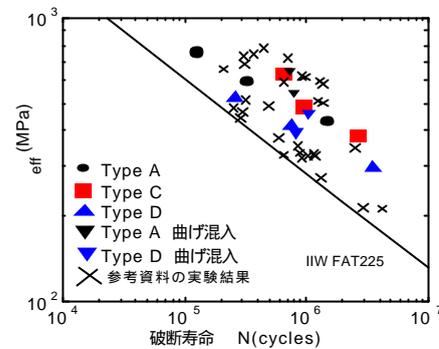


図11 σ_{eff} で整理した S-N 線図

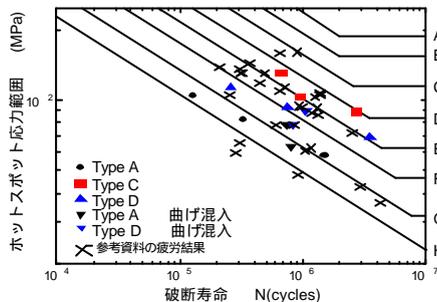


図9 ホットスポット応力で整理したS-N線図

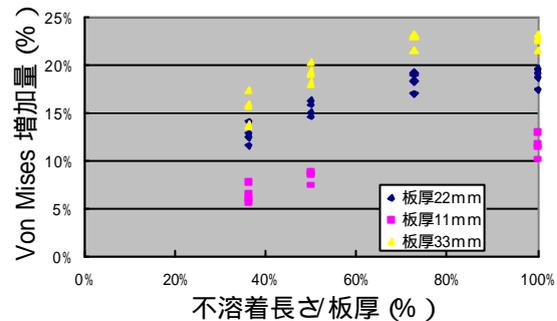


図12 曲げ量 100% 時の σ_{eff} の増加量

3.3 ホットスポット応力 (hot) で整理した場合

hot は IIV (国際溶接学会) が提案している応力外挿点 (0.4T/1.0T) で算出した。hot の考え方を図 8 に示す。応力外挿点位置のひずみデータから hot を算出した数値を使用。曲げ導入試験体では引張側の数値を使用し、hot で整理した S-N 線図を図 9 に示す。hot で整理すると不溶着部が大きい程、ギャップが大きい程疲労強度が低下することが分かる。ホットスポット応力で整理すると、バラつきが大きく、ホットスポット応力では、ルート部からのき裂は、疲労評価が難しいことが分かる。

3.4 エフェクティブノッチストレスで整理した場合

σ_{eff} は試験体の不溶着部先端に半径 1mm の仮想的な円形切欠きを開けたものをモデルとして FEM 解析を行い、円周上の Von Mises 応力の最大値として算出される。近年、 σ_{eff} は IIV など多く研究され始めており、 σ_{eff} で溶接部の疲労強度は IIV・FAT225 で整理できるといわれている。本研

究では FEM 解析を COSMOS/M を用いて行った。解析モデルを図 10 に示す。各試験体の破断寿命 N を σ_{eff} で整理した S-N 線図を図 11 に示す。 σ_{eff} で整理することによりばらつきが小さくなり、引張りのみも曲げ混入の試験体も IIV・FAT225 の疲労強度等級で整理できることが分かった。また、FEM 解析で算出された、 $\sigma_m / \sigma_b = 1$ (曲げ混入量 100%) の Von Mises 応力の増加率を図 12 に示す。板厚 22mm の場合、面外曲げ応力の影響は面内応力の 20% 程度の影響しかなく、試験体の曲げ混入率 30% の場合、6% (=20% × 30%) 程度の非常に影響が小さいものとなり、疲労強度や疲労き裂発生位置に大きな影響が見られなかったと考えられる。

4. 局部応力の関係性の評価

本研究の最大の目標は測定できる応力を用いた荷重伝達型十字溶接継手の疲労強度評価法の検討である (図 13)。これまでに σ_{eff} が求めることが

できれば、疲労強度が推測できることは分かった。次に測定できる応力と eff との関係性を調べる。FEM解析により引張を加えた場合の hot と eff を算出した。今回測定できる応力としてホットスポット応力を使用し、 hot と eff 応力との関係性を検討した。

の影響も考慮し疲労強度評価に適用できる。

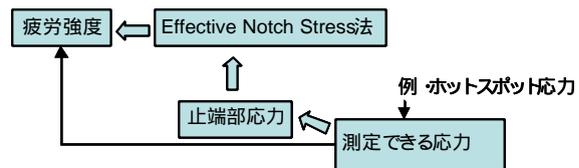


図 13 本研究のチャートと研究の目標

4.1 解析モデルの種類と概要

各試験体モデルは実験を行った試験体と同モデルで解析し、板厚 (11~33mm)・脚長 (6.5・13 mm)・gap (0~4.5mm)・不溶着長さ (4~33mm) を変化させた計 54体のモデルで解析を行った。

エフェクティブノッチストレス応力は不溶着部先端に半径 1mmの円を一つ設けたものの解析結果を使用することとし、ホットスポット応力算出法として様々な方法が存在するが、今回は 4mm10mm・4mm6mm・0.3T 法の 3つの方法で算出したデータを使用する。

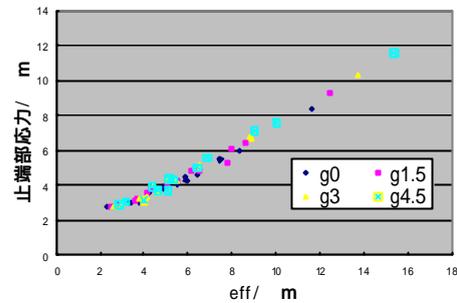


図 14 止端部応力と eff との関係図

4.2 溶接止端部応力と eff との関係性

hot は溶接止端部の応力を応力外挿点からの計算により求めるもので、溶接止端部の応力を代表している応力と言える。そこでまず、解析上得られる止端部応力と eff との関係性を図 14に示す。解析の止端部応力で見ると、板厚・脚長・gap・不溶着長さに関わらず 1本の線で引けることが分かった。

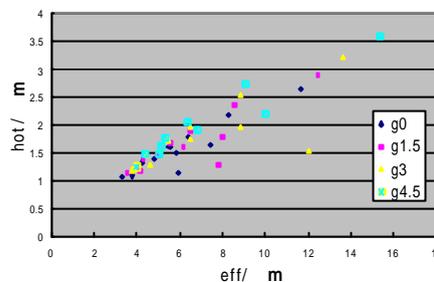


図 15 4mm6mmで算出した hot と eff との関係図

4.3 hot と eff との関係

止端部の応力は溶接部前面の鋼板表面の応力を測るホットスポット応力で定義できるとされているため、次に hot と eff との関係性を見る。

代表として 4mm6mmの hot と eff との関係図を図 15に示す。すべての算出方法において、先ほどのような 1本の線では表現ができない。しかし、板厚と gap 別で整理すると、不溶着長さに依存しない線が引けることが分かった。これは、今回使用した算出方法のホットスポット応力では止端部の応力を正確に表現できていないためではないかと思われる。

2) 試験体に面外曲げを混入しても、影響が非常に小さいものとなった。

局部応力との関係性

- 1) 解析の止端部応力と eff との関係は溶接部の形状や板厚の大きさ、不溶着部に依存しない。
- 2) 今回の hot の算出方法では、 eff との関係性が見つからない。これは、止端部の応力を正確に表現できていないためであると思われ、今後、止端部応力を代表する止端部前面の応力に関して検討していく。

5 結論

実験結果より

- 1) Effective Notch Stress 法で整理すると、曲げ

【参考文献】

- [1] 貝沼重信, 森猛, 一宮充: 荷重伝達型十字溶接継手の疲労破壊起点の評価方法の提案, 土木学会論文集
- [2] 貝沼重信, 川本恭朗, 高松大輔, 山田健太郎: 溶接姿勢とルートギャップが荷重伝達型十字溶接継手の疲労強度に及ぼす影響, 土木学会論文集
- [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