

引張と曲げを受ける荷重伝達型十字継手の疲労挙動

Fatigue performance of load carrying cruciform welded joint under axial loading and out-of-plane bending

穴見健吾*, 横田博之**
Kengo Anami, Hiroyuki Yokota

*工博, 高知工科大学准教授, 工学部社会システム工学科 (〒780-8502 高知県香美市土佐山田町)

** 高知工科大学, 工学部社会システム工学科 (〒780-8502 高知県香美市土佐山田町)

This paper investigates fatigue performance of load carrying cruciform welded joint subjected to the combination of axial loading and out-of-plane bending. In the series of fatigue tests, applied out-of-plane bending stress is 20~25% of applied membrane stress. The results indicate that the influence of out-of-plane bending stress is small and it is also observed fatigue cracks from tip of incomplete penetration at compression side of out-of-plane bending leads fatigue failure. This paper also examines the effective notch stress approach for evaluating the fatigue test results obtained in this study. Then, simple method to evaluate the influence of out-of-plane bending stress is examined.

Key Words: :fatigue, load carrying cruciform weld, out-of-plane bending, effective notch stress

キーワード: 疲労, 荷重伝達型十字継手, 面外曲げ, エフェクティブノッチ応力

1. はじめに

近年, 鋼製橋脚隅角部における疲労損傷が多く報告されており, 疲労損傷原因の究明や, その補修, 補強対策に向けた様々な検討や, それらの実施が行われている(例えば文献¹⁻³⁾). それらの検討により, 疲労損傷の主原因は, 柱フランジと梁フランジ溶接部に残る不溶着部と, その近傍における高い応力振幅であることが指摘されている。また, 実橋脚における応力測定や, 実橋脚をモデル化した応力解析の結果より, 梁フランジには, フランジ厚と比較して梁高さが非常に大きいためフランジ板厚内でほぼ同様と考えられる, 梁全体の曲げによる曲げ応力に加えて, 隅角部近傍のフランジが局部的に面外に変形する挙動があることが報告されている¹⁾。そのため, 当該ディテールの疲労挙動を把握するためには, 不溶着部の影響, 及び面外曲げの影響を正しく評価する必要がある。

鋼製橋脚隅角部の溶接ディテールの疲労挙動は, 一般的に梁フランジ及びダイアフラムを主板, 柱フランジを中板とした荷重伝達型十字継手にモデル化して検討することが可能である。荷重伝達型十字溶接継手の疲労挙動, 特に不溶着部の大きさや主板と中板とのギャップの影響, 溶接ビードの大きさなどの幾何学的な形状パラメータの影響については, これまで多くの研究がなされている⁴⁻⁷⁾。しかし, これまでの研究は, 溶

接線に対して垂直で, 断面内で一様な面内応力を作用させた場合の検討が殆どであり, 面外曲げが作用した場合の疲労挙動に関する研究は殆ど無い。溶接継手部の疲労寿命の多くは, 疲労亀裂進展に費やされるために, 亀裂進展面における応力分布が大きく影響を及ぼす。一般的に付加物溶接継手の疲労現象に対しては, 溶接止端部から疲労亀裂が発生する場合, 面外曲げ応力の影響は面内応力の4/5として取扱われている⁸⁾。一方, 荷重伝達型十字溶接継手のように, 溶接ルート部から疲労亀裂が発生する場合, 面外曲げ応力の断面内での分布や, 不溶着部が板厚中央部に寄っていることから, 面外曲げ応力の影響は止端部亀裂の場合と比較して小さいものと考えられるが, その面外曲げ応力の影響度は明らかにされていない。

本研究では, 面内軸引張力と, 面外曲げが作用した場合の荷重伝達型十字溶接継手の疲労挙動について, 疲労試験及び FEM 解析を用いて検討した結果を報告する。

2. 疲労試験および疲労試験結果

2.1. 疲労試験体

図-1 に疲労試験体を示す。供試鋼材は SM490 である。溶込み率 R ($=$ 主板厚-不溶着部長さ/主板厚)及び

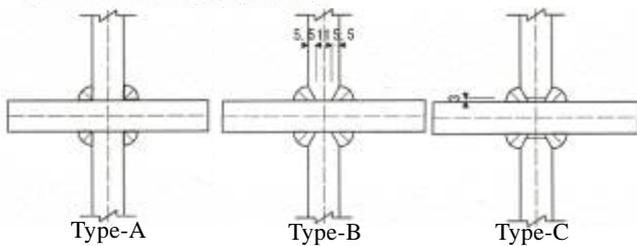
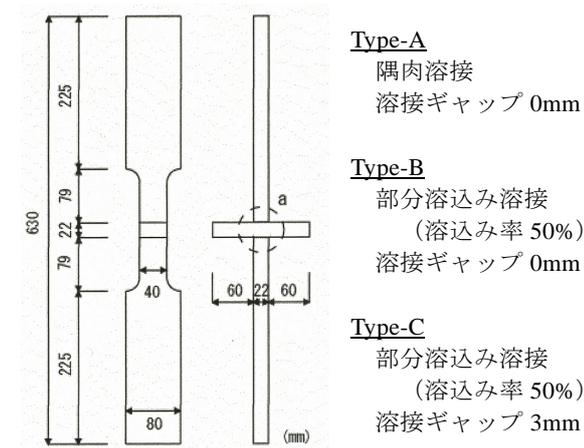


図-1 疲労試験体の形状

溶接ギャップ G をパラメータとして3種類の荷重伝達型十字溶接継手試験体(Type-A: $R=0\%$ $G=0\text{mm}$, Type-B: $R=50\%$ $G=0\text{mm}$, Type-C: $R=50\%$ $G=3\text{mm}$)を製作し, 疲労試験に用いた. 試験体製作は, 先ず板幅 1000mm を有する荷重伝達型十字継手を製作し, そこから試験体(各 Type で 10 体ずつ)を切り出し, 平行部(試験部)などを加工するといった手順で製作を行った. 溶接脚長の実測値は約 10~13mm (主板側及び中板側)であった. 荷重条件は, (a)面内一様引張荷重及び(b)面外曲げ応力と面内一様引張応力の組合せ応力が作用するように荷重した2種類であり, 荷重(b)では, 図-2に示すように, 試験体の両端の片側表面を 2mm 減厚し, 偏心荷重(偏心量 1mm)を施すことにより実現している. 本報告では, 図-3に示すように, 面内応力に対する面外曲げ応力の混入率を定義し, 溶接止端部から主板厚と同じ 22mm 離れた位置に貼付した歪みゲージの値で混入率の計測を行った. 計測された混入率は全ての試験体で約 20~25%である. この値は, 試験装置に与える影響や, 文献(1)に示される隅角部近傍の FEM 解析結果(文献から読取ると止端部から主板厚分離れた位置で混入率 20~30%程度)を参考とし決定した. より大きな混入率に関しては, 本研究では解析的に検討することとした. 図-4 に試験体 A-6 の疲労試験中に止端部から 22mm の位置に貼付した歪みゲージで計測した歪みの変化を示すが, 疲労亀裂が進展しても, 曲げ混入率は大きく変化していないことを確認している.

また, 図-5に示すように, A-3及びC-2試験体(曲げ混入率0)では, 溶接ルート部からの疲労亀裂以外に溶接止端部からの亀裂発生が認められたため, その後の

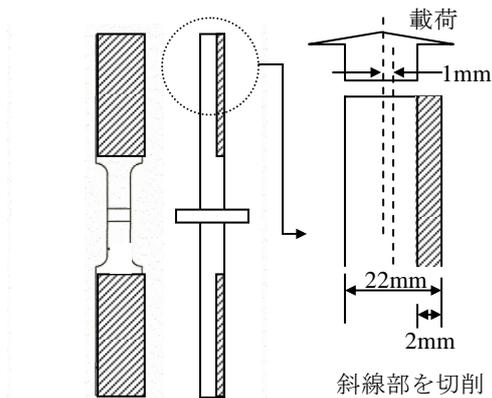


図-2 偏心荷重(曲げ混入)試験体

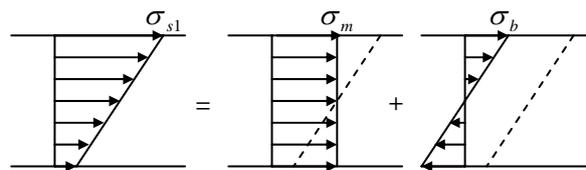


図-3 曲げ混入率

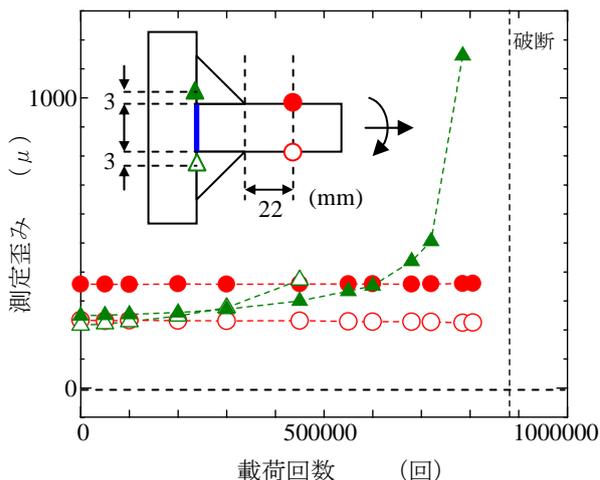


図-4 試験体 A-6 の計測ひずみの変化



図-5 ルート部および止端部の亀裂

試験体では, 溶接止端部をペンシル型のグラインダーにより処理を行い疲労亀裂の発生を防止した. 疲労試験は, 全ての試験で最小荷重を 10kN (公称応力 11.4MPa) と一定として行った.

表-1 試験条件及び試験結果

No.	$\Delta\sigma_m$ (*1)	曲げ混入率	N_f (*2)	疲労破壊 壊(*3)	止端 亀裂	IP (*4)	L (*5)	G (*6)	ENS/ $\Delta\sigma_m$ (最大 Mises 応力)	ENS/ $\Delta\sigma_m$ (最大主応力応力)
A-1	100.0	---	132,297	---	無	22.0	10	---	7.04	8.55
A-2	79.5	---	335,512	---	無	22.0	10	---	7.04	8.55
A-3	56.8	---	1,540,789	---	有	22.0	10	---	7.04	8.55
A-4	56.8	20.7	792,500	引張	無	21.1	10	---	6.96 (6.68)	8.44 (8.11)
A-5	68.2	21.5	728,888	圧縮	無	21.5	10.5	---	6.91 (6.64)	8.39 (8.05)
A-6	68.2	20.8	880,000	圧縮	無	21.6	10.5	---	6.94 (6.67)	8.43 (8.10)
A-7	79.5	22.3	457,600	引張	無	21.5	10.2	---	7.00 (6.71)	8.50 (8.14)
B-1	130.0	---	660,487	---	無	12.8	10.8	---	4.51	5.48
B-2	100.0	---	957,485	---	無	12.6	10.4	---	4.52	5.48
B-3	79.5	---	2,673,123	---	無	12.6	10.3	---	4.53	5.50
C-1	100.0	---	259,760	---	無	13.4	9.1	2.4	5.06	6.13
C-2	79.5	---	750,431	---	有	13.4	9.1	2.3	5.05	6.13
C-3	56.8	---	3,506,475	---	無	13.2	9.1	2.4	5.00	6.06
C-4	68.2	21.2	831,740	引張	無	14.1	9.5	2.4	5.49 (5.24)	6.65 (6.35)
C-5	79.5	20.7	1,050,000	圧縮	無	13.8	10.2	2.2	5.22 (5.01)	6.34 (6.08)
C-6	79.5	20.3	581,603	引張	無	12.5	9.5	2.2	4.91 (4.71)	5.96 (5.72)
C-7	90.0	24.5	620,000	圧縮	無	13.8	10.1	2.3	5.29 (5.03)	6.42 (6.11)
	MPa	%	回			mm	mm	mm	(*7)	(*8)

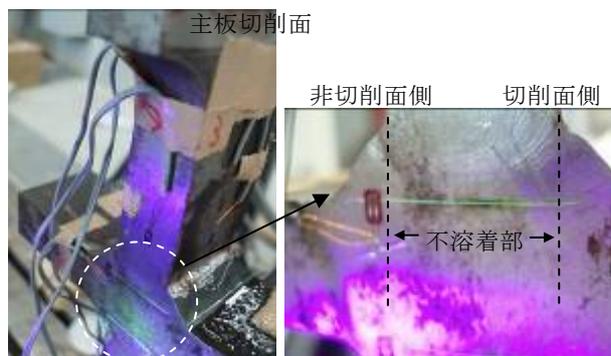
(*1) 公称面内応力範囲
(*2) 疲労寿命
(*3) 先行した疲労亀裂の発生点
亀裂発生点

(*4) (*5) (*6)はそれぞれ不溶着長さ、主
板側の溶接脚長、溶接ギャップの実測値
(*7) (*8)の曲げ混入試験体は、曲げ応力
の引張側の円孔に着目。但し、() 内は
引張のみ作用した時の値。

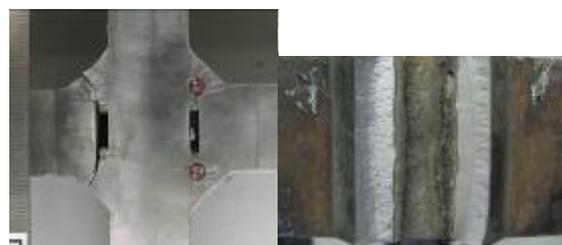
2.2. 疲労試験結果

試験条件、及び疲労試験結果を表-1にまとめて示す。
(同表には、溶接ビード形状の実測値及び次節で用いる
応力集中の解析結果も併せて示している)。止端部から
疲労亀裂が発生した試験体も含め、全ての試験体で
溶接ルート部からの疲労亀裂の進展により試験体は破
断した。表-1に示すように、面外曲げを混入した試験
体では、面外曲げ応力の引張側、圧縮側の疲労亀裂が
それぞれ先行した試験体があり、それらを分類して整
理する。圧縮側の不溶着部先端から先行して発生した
疲労亀裂の例、及び疲労破断面の例を図-6に示す。

図-7に主板の公称応力範囲で整理した疲労試験結果
を示す。(a)図は図-3に示す面内応力範囲 $\Delta\sigma_m$ 、(b)図
は引張側主板表面の応力範囲 $\Delta\sigma_{s1}$ を用いて整理して
いる。(a)図を見ると、不溶着部が長いType-Aが疲労強
度が最も低く、溶込み率の計画値が等しいType-Bと
Type-Cを比較すると、表-1に示すように若干不溶着部
が長く、溶接ギャップがあるType-Cが、疲労強度が低
い結果となっている。また、面外曲げを導入した試験
体では、面外曲げ応力の引張側の不溶着部から疲労亀
裂が発生した場合には、面内軸力のみ試験体より疲労
寿命が若干短く、圧縮側から疲労亀裂が先行した場
合には疲労寿命が若干長い傾向が見受けられるが、試
験体数が少ないこともあり、有意な差異が生じている
とは言えない。一方、(b)図を見ると、引張側の主板表



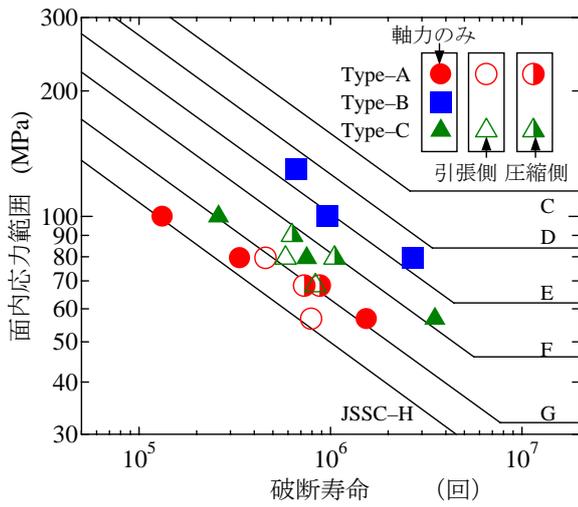
(a) 圧縮側不溶着部先端から発生した疲労亀裂 (A-6)



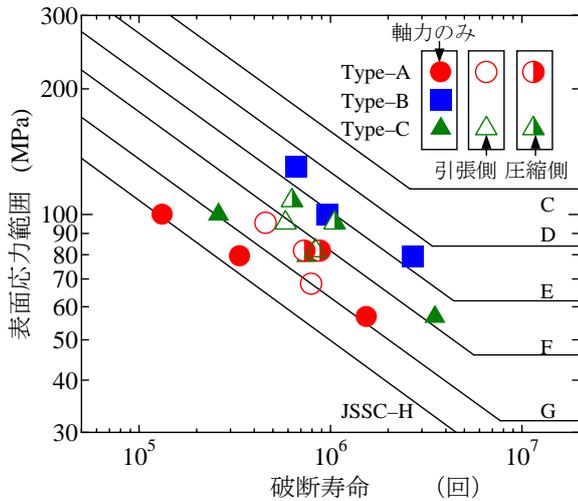
(b) 疲労破面例 (C-1)

図-6 疲労亀裂例

面応力で整理すると、試験体数は少ないが、面外曲げ
を導入した試験体は面内軸力のみ導入した試験体と比
較してS-N線図上で疲労強度の高い位置にプロットさ
れている。つまり、例えば測定した引張側表面応力
を用いて疲労強度を評価すると、過度に疲労寿命を安全
側に評価する可能性があると言える。



(a) 面内応力範囲で整理



(b) 表面応力範囲で整理

図-7 疲労試験結果

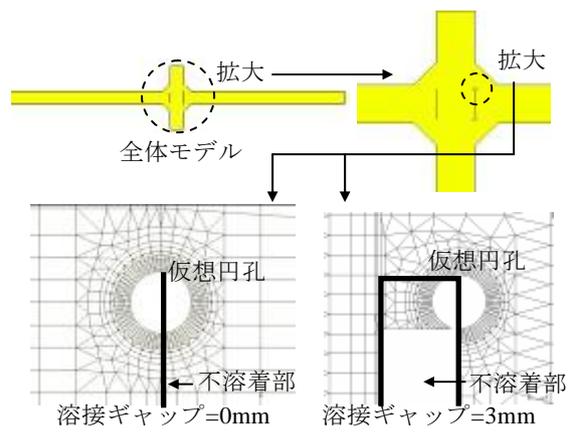


図-8 要素分割図

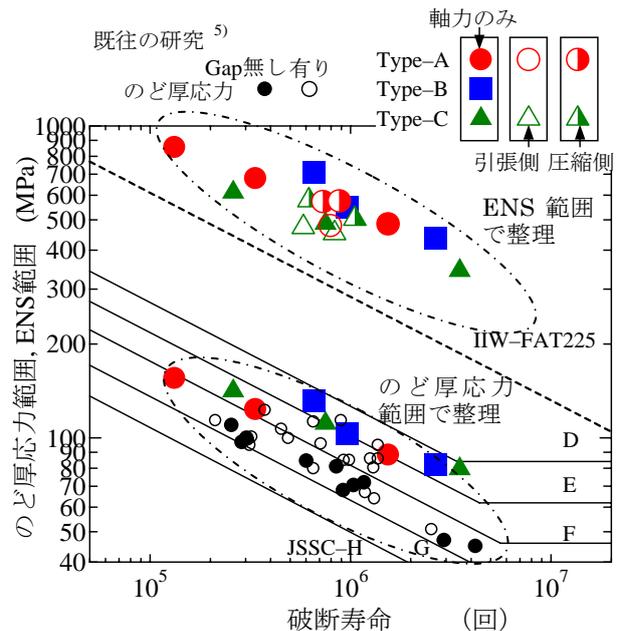


図-9 のど厚応力範囲, ENS範囲による疲労試験結果の整理

2.3. のど厚応力範囲及びエフェクティブノッチ 応力範囲による疲労試験結果の整理

一般的に、荷重伝達型十字溶接継手の疲労強度は、のど厚応力範囲で評価され、のど厚応力範囲で整理すれば日本鋼構造協会のJSSC-H等級（200万回疲労強度40MPa）で整理される⁸⁾。溶接ギャップのある継手に関しても、貝沼ら⁷⁾は実のど厚で整理すれば良いことを示している。しかしながら、面外曲げ応力が作用した場合の、のど厚応力を用いた疲労強度の評価手法はあまり検討されていない。

一方、近年、溶接継手部の局部応力を用いた疲労強度評価法の一つとして、溶接ルート部から疲労亀裂が発生する場合にも適用できる、エフェクティブノッチ応力法（以下ENS法と呼ぶ）が提案されており、その適用性について多くの研究がなされている。ENS法は、亀裂発生点に仮想的な円孔を設け、円孔周辺に発生する最大の応力範囲を用いて疲労強度評価を行うもので

ある。国際溶接協会(IIW)では、半径1mmの円孔を用いればIIW-FAT225（200万回疲労強度が225MPa）で疲労強度を整理できると提案している⁹⁾。また、三木らは半径0.5mmの円孔を用いた場合、IIW-FAT190で整理できるとしている¹⁰⁾。この円孔周辺に発生する応力範囲に関しては、最大のMises応力^(11,12)、及び最大の最大主応力^(13,14)を用いる手法が検討されている。本研究では、全ての解析ケースについてMises応力、主応力両方で整理を行っているが、例えば表-1に示すようにENSの値は、最大主応力で整理した方が大きくなるが、本研究で対象とする面外曲げ応力の影響度については殆ど変化が見られなかったことから、最大主応力を用いたENSで整理した結果を報告している。本研究では、汎用有限要素法コードMARCを用いて、図-8に示すような二次元解析モデル（平面ひずみ要素）を作成し、ENS法を用いて面外曲げの影響について検討を行った。溶接ギャップのある試験体Type-Cについては、仮想円孔の設け方は明確にされていないが、ここでは、ギャップ先端の鋭さを考慮して、円孔部をギャップ無しの

場合と同様に、図-8 に示すような仮想円孔を設けた。本研究で用いた仮想円孔の半径は 1mm であり、仮想円孔周辺の最小要素寸法は約 0.08mm である。最小要素寸法を約 1/4 (0.02mm) とした場合にも同様の検討を行っているが、以下に述べる面外曲げ応力の影響度は殆ど変化が見られず、十分小さな要素寸法であることを確認している。表-1 には、継手形状の実測値を用いて解析モデルを構築し、面外曲げ応力の混入率の実測値を用いて計算した (ENS/主板上公称応力) の値を示している。なお、面外曲げを混入した試験体に付されている括弧付の数値は、面内軸力のみを作用させた時の (ENS/主板上公称応力) の値である。

本研究では、面外曲げ混入時の面内一様応力と比較した、面外曲げ応力の疲労への影響度を、混入された面外曲げ応力による ENS の増分率 (式(1)) で定義した。

$$C = ENS_{comb} / ENS_{tens} - 1 \quad \dots (1)$$

ここで、 ENS_{comb} : 組合せ応力下での ENS

ENS_{tens} : 一様面内応力下での ENS

本研究で用いた Type-A 試験体, Type-C 試験体では、曲げ混入率が 20~25% 程度と小さく、それぞれ影響度 C は、4~5% と非常に小さな値であった。この小さな影響度のため、本疲労試験では、面外曲げの影響が大きく現れず、また試験体によっては面外曲げの圧縮側からの疲労亀裂が先行したものと考えられる。

図-9 に解析により求めた ENS 範囲で整理した疲労試験結果、及び、面内軸力のみを作用させた試験体のみであるが、実のど厚応力範囲で整理した疲労試験結果を併せて示す。ENS 範囲による評価に際しては、面外曲げを導入した試験体で、疲労亀裂が引張側、圧縮側の不溶着部先端から先行した試験体それぞれに対して、引張側と圧縮側の不溶着部先端に設けた仮想円孔から得られる ENS 範囲を用いて整理を行った。同図には、溶接形状も含めた試験体形状の情報が得られた荷重伝達型十字溶接継手の既往の疲労試験結果⁵⁾ (一軸引張疲労試験結果) について、実のど厚応力範囲を用いて整理を行った結果も併せて示している。ギャップ有りの場合の仮想円孔の導入については今後議論を必要があるが、ENS 範囲を用いることにより、不溶着部長さ、面外曲げの導入の有無によらず、S-N 線図上でほぼ一本の線で評価することができ、また、そのばらつき程度ものど厚応力範囲で整理した場合とほぼ同等であった。

3. 面外曲げ応力の影響度について

3.1. 面外曲げ応力の影響度と継手形状の関係

前節において、ENS 法を用いることにより、面外曲げ応力が混入した場合も含め、荷重伝達型十字溶接継

手の疲労強度を評価できる可能性があることを示した。本節では、ENS 法を用いて、面外曲げ応力の影響度 C と継手形状との関係について検討を行う。

図-10 に解析結果の一例として、一様面内引張及び面外曲げを作用させた時の仮想円孔周辺の主応力分布を示す (但し、引張载荷と面外曲げ载荷の結果で応力コンターの色彩が表す数値が異なる)。図中の星印が最

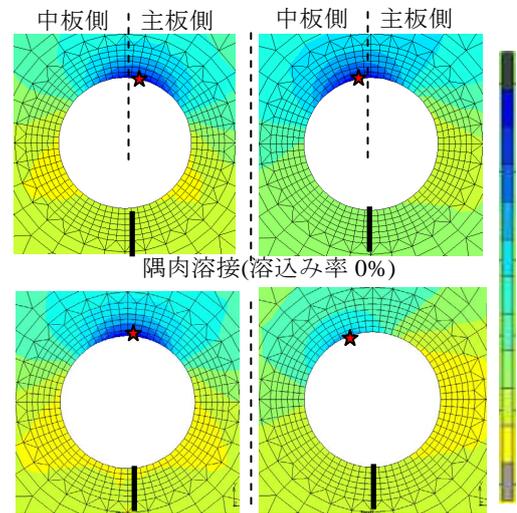


図-10 仮想円孔周辺の最大主応力分布

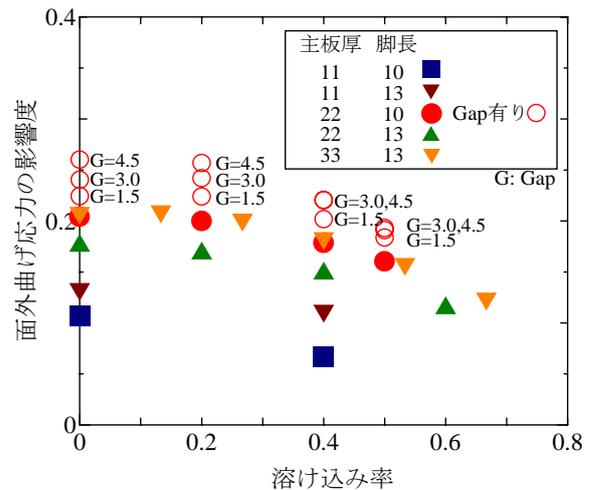


図-11 面外曲げ応力の影響度 C

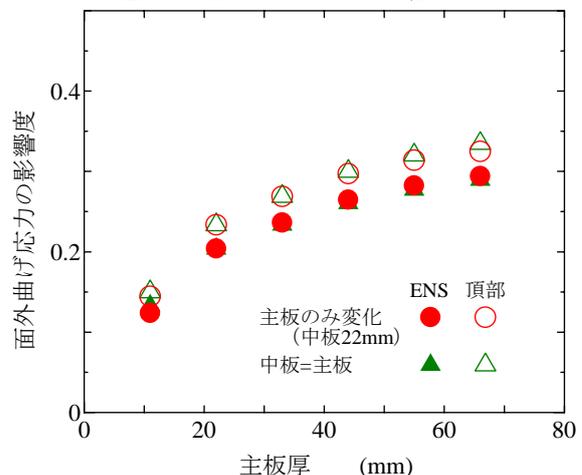


図-12 隅肉溶接の場合の面外曲げの影響度

大の主応力、すなわち ENS の発生点である。一様面内軸力のみを作用させた場合には、若干主板側ではあるが仮想円孔のほぼ頂部（不溶着部の反対側）に ENS の発生点が見られ、その位置は、若干であるが、不溶着部長さが増大するに伴い、主板側に移動する。逆に、面外の純曲げを作用させた時には ENS の発生位置が、若干中板側に移動しており、不溶着部が短いほどその傾向は顕著である。そこで、ここでは、面外曲げを混入させた組合せ応力下のモデルについては、同時に面内引張、及び面外曲げを作用させて解析した。

まず、本研究で用いた試験体形状を基本とし、溶接脚長(10mm と 13mm の場合について示す)、中板厚(22mm)を一定として、主板厚、不溶着部長さ、溶接ギャップ、溶接脚長をパラメータとした検討を行った。図-11 は横軸に溶込み率 R を、縦軸に影響度 C を取り整理した結果である。ここでは、面外曲げ応力の引張側の不溶着部先端に設けた仮想円孔に注目し、図-3 で定義された曲げ混入率が 100% の時の解析結果を示している。溶け込み率が低下するに伴い、影響度は大きくなっているが、これは、曲げ応力の分布形状（所謂、三角形分布）が主板厚中心から遠くなるほど大きくなるのが原因であると考えられる。また、主板厚の増大に伴い、また溶接脚長が低下するに伴い、影響度が大きくなっているが、これは、主板一般部の曲げ剛性に対して溶接部の曲げ剛性の増分、すなわち溶接ビードの曲げ剛性増大への寄与が低下することが原因であると考えられる。溶接ギャップの大きさの影響は溶込み率の大きさに依存するが、ギャップが大きいほど影響度 C は増大している。

溶込み率が小さいほど影響度 C が大きいことから、図-12 に、隅肉溶接を施した Type-A 試験体を基本とし、主板厚のみを変化させた場合、及び、主板厚と中板厚を同等に変化させていった場合の面外曲げの影響度 C の変化を示す。同図には、仮想円孔頂部の最大主応力の増分率も併せて示している。同図には示していないが、中板厚が増大するに伴い、ENS は若干低下する傾向が見られるが、図より中板厚の面外曲げ応力の影響度 C に及ぼす影響は非常に小さいことが分かる。また、仮想円孔頂部での面外曲げの最大主応力の増分率は、ENS の増分率 C よりも若干大きいことが分かる。

3.2. 面外曲げ応力の影響度の簡易推定

本節では、面外曲げ応力の影響度 C を簡易に推定することを試みる。影響度 C は、主板厚、溶接脚長、溶込み率、溶接ギャップといった継手形状に大きく影響されることを示した。また、引張载荷時、面外曲げ载荷時及び組合せ载荷時において、ENS の発生点が仮想円孔上で異なり、またそれぞれの発生点が継手形状により影響を受けることを示した。そこで、ここでは、

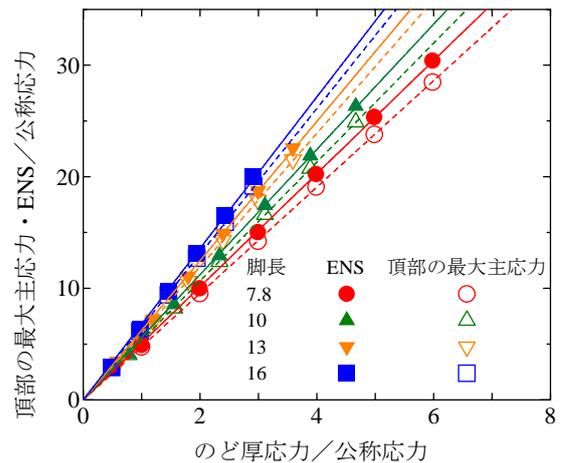


図-13 引張载荷時ののど厚応力と ENS 及び頂部の最大主応力の関係（主板厚=中板厚=11~66mm）

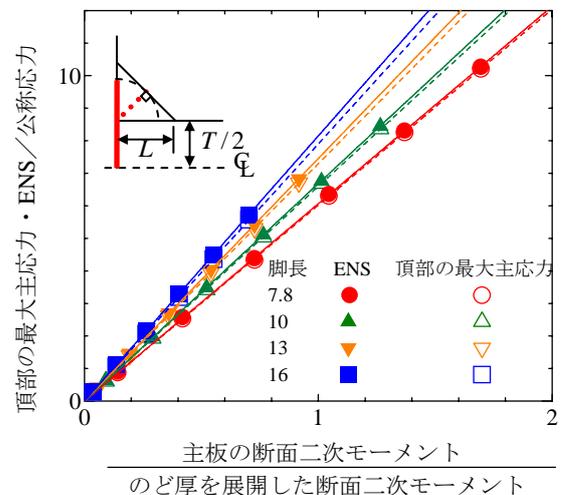


図-14 面外曲げ载荷時の断面二次モーメントの比と ENS 及び頂部の最大主応力の関係（主板厚=中板厚=11~66mm）

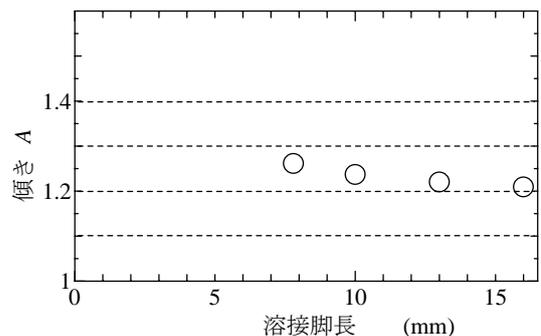


図-15 傾き $A(=A_B/A_T)$ の変化

図-12に示したように面外曲げ混入による頂部での最大主応力の増大量がENSの増大量 C よりも若干大きいことから、頂部での最大主応力の増大量で面外曲げの影響度 C を安全側に推定することを試みた。

まず、引張载荷時、及び面外曲げ载荷時のENS及び仮想円孔頂部の最大主応力の変化について、溶接ギャップが無い隅肉溶接（溶込み率0%）の場合を例に挙げ検討する。図-13に面内引張载荷時の、のど厚応力とENS及び仮想円孔頂部の最大主応力の関係を示す。縦

軸、横軸ともに主板の公称応力（主板の公称面内応力）で無次元化して示している。図中の破線はそれぞれの結果に対して原点を通るように直線回帰を行った結果を示したものである。のど厚応力と、ENS応力及び頂部の最大主応力の間に良い直線関係が認められる。破線の傾きは、要素寸法に影響を受けるものと考えられるが、溶接脚長が大きくなるほど傾きが大きくなる傾向が見受けられる。

同様に面外曲げのみを作用させた場合について検討を行う。面外曲げが作用した場合、溶接ビードの存在により、溶接ビードを含む断面では面外曲げ剛性が増大し、ルート部を含む断面での曲げ応力が非常に小さくなることを述べたが、ここでは、溶接ビードによる断面二次モーメントの変化に注目する。道路橋示方書¹¹⁾では、面外曲げを受ける隅肉溶接の場合には、図-14に示すように、のど厚を中板面に展開して断面二次モーメントを求めることを規定している。そこで、図-14では主板と隅肉溶接部の断面二次モーメントの比を横軸に、仮想円孔頂部の最大主応力を縦軸に取り、面外曲げが作用した場合の結果を整理した。図中の破線は図-13同様に、図の原点を通るように直線回帰を行ったものである。頂部の最大主応力と断面二次モーメントの変化の間には良い直線関係が認められ、その傾きは、溶接脚長が大きくなるほど大きくなる傾向が見られる。

図-13及び図-14に示された関係から、隅肉溶接の場合の仮想円孔頂部の最大主応力に対する面外曲げ応力の影響度を推定する。円孔頂部の応力は長手方向応力が卓越することを考えると、面外曲げによる頂部の最大主応力の増分は、引張载荷、面外曲げ载荷時のそれぞれの主応力 σ_{MT}, σ_{MB} を用いて、 σ_{MB}/σ_{MT} で与えられる。ここで、図-13、図-14より、それぞれ

$$\sigma_{MT} = A_T T / (\sqrt{2}L) \quad \dots (2)$$

$$\sigma_{MB} = A_B T^3 / ((T + \sqrt{2}L)^3 - T^3) \quad \dots (3)$$

ここで A_T, A_B は、図-13、図-14に示される直線の傾きであり、添字 T, B は引張、面外曲げを表している。図-15に $A = A_B / A_T$ とした時の、 A と溶接脚長の関係を示す。若干溶接脚長の増大に伴い、 A は低下する傾向が見られるが、本研究の検討範囲内ではその傾きの変化は非常に小さい。そこで本研究では、検討モデルの溶接脚長(4種)に対応する A の平均値 $A = 1.23$ を用いる。

図-16に、上述の推定式を用いて推定した頂部の最大主応力に対する面外曲げの影響度（図中実線）とFEM解析より求めた頂部の最大主応力及びENSに対する面外曲げの影響度の比較を示している。面外曲げの混入率は100%である。図中には、図-12に示した溶接脚長10mm, 13mm, 中板厚22mmと一定とし主板厚を変化させた時のENSに対する面外曲げの影響度も併せて示し

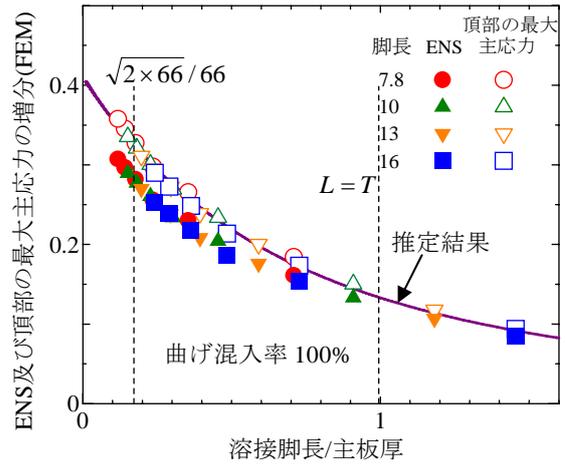


図-16 推定結果と FEM 解析結果の比較

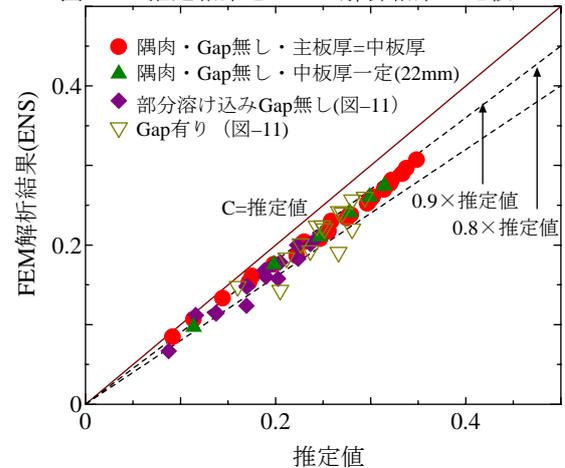


図-17 全ての解析モデルにおける FEM 解析結果と推定値の比較

ている。道路橋示方書では隅肉溶接のサイズ S を、主板厚、中板厚に対して薄い方の板厚を t_1 、厚い方の板厚を t_2 とした時に、 $t_1 > S$ かつ $S \geq \sqrt{2}t_2$ とすることを標準としているが、図中の破線は、それぞれ上式に対応した溶接脚長の主板厚に対する比を示している。但し、最小サイズに関しては、本解析の範囲内で最も溶接脚長/主板厚が小さい $\sqrt{2} \times 66 / 66$ の位置に破線を描いている。推定式とFEMより得られた頂部の最大主応力の増分は、良い一致を示している。ENSの増分、すなわち面外曲げの影響度 C は、推定値より若干小さい値となり安全側に推定している結果となっている。推定値との差異は主板厚に対して溶接脚長が小さくなるほど、大きくなる傾向が見られる。

なお、図-17に溶接ギャップおよび溶込みのあるモデルに対して推定式を適用した結果とFEM解析より求めた影響度 C の関係を示す。不溶着部の主板側の角部を含む断面を対象として、以下の式で求めている。

$$\sigma_{MT} = A_T T / (\sqrt{2}(L - G + (T - IP) / 2)) \quad (4)$$

$$\sigma_{MB} = A_B T^3 / ((IP + \sqrt{2}(L - G + (T - IP) / 2))^3 - IP^3) \times (IP / T) \quad (5)$$

なお、図中の(0.8×推定値)の破線は、図-14に示

す方法で曲げを評価し、不溶着部先端の応力を評価した場合とほぼ等しい。溶接ギャップや溶込みによりばらつきは大きい、推定値の約0.9倍程度にばらついており、概ね上式を用いて安全側に影響度 C を推定できることが分かる。

ただし、溶接脚長が小さく、溶込み率が大きい場合で特に溶接ギャップが大きいある場合には、式(4)、(5)で算出される曲げ影響度 C は、FEMより計算される値よりも小さくなる傾向にあり、この点については今後検討を続ける必要がある。また、今回解析で採用した面外曲げの混入率100%程度では、面外曲げの影響が小さく、ENSの発生点が組合せ載荷時と引張載荷時で大きく変化しておらず、曲げ混入率による面外曲げ応力の影響度(混入率100%に換算)の変化は小さかった。今後より大きな面外曲げの影響を検討する予定である。

4. まとめ

本研究をまとめると以下ようになる。

- (1) 面内応力に対して 20~25%程度の面外曲げ応力を混入させた試験体では、導入した面外曲げの引張側及び圧縮側の両方からの疲労亀裂発生が見られ、面外曲げ混入の明瞭な影響は観察されなかった。
- (2) 主板表面応力を用いて疲労強度を評価する場合、面内成分、面外曲げ成分を正しく評価することが必要である。
- (3) ENS法で整理した結果、面外曲げの影響は、主板厚の溶接サイズとの相対的な関係や、不溶着部長さ、溶接ギャップなどの溶接形状に影響を受ける。
また、溶接形状をパラメータとして、面外曲げ混入による頂部の最大主応力の増加率の簡易な推定式を提案し、推定式を利用して、ENS 応力の増加率で定義された面外曲げの影響度 C を安全側に推定できることを示した。
- (4) ENS の増分に注目して面外曲げの影響度を検討すると、本研究で検討した範囲内では、曲げ混入率が100%の場合、隅肉溶接で15~30%程度と、面外曲げの影響度は面内引張に比して非常に小さいものであった。

謝辞: 本研究を行うにあたり、(株)TTES 町田文孝氏、竹渕敏郎氏、には貴重な意見を頂き、また高知工科大学学生高尾亮次君には解析の一部を担当して頂いた。また試験体製作に際し、川田工業(株)の皆様にご協力頂いた。また本研究の一部は東京工業大学三木千寿教授を研究代表者とする科学研究費補助金基盤研究(S) (課題番号: 18106010) の研究課題として行った。ここに

記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 森河久, 下里哲弘, 三木千寿, 市川篤司: 箱断面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.177-183, 2002.
- 2) 三木千寿, 市川篤司, 坂本拓也, 田辺篤史, 時田英夫, 下里哲弘: 鋼製箱形断面ラーメン橋脚隅角部の疲労特性, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.361-371, 2002.
- 3) 三木千寿, 平林泰明, 時田英夫, 小西拓洋, 柳沼安俊: 鋼製橋脚隅角部の板組構成と疲労亀裂モード, 土木学会論文集, No.745/I-64, pp.105-119, 2003.
- 4) Frank, K.H. and Fisher, J.W.: Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Welded Joints, Proceeding of ASCE, ST9, pp.1727-1740, 1979
- 5) 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/I-29, pp.95-102, 1994.
- 6) 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, No. 668/I-54, pp.313-318, 2001.
- 7) 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, No.647/I-51, pp.435-445, 2000.
- 8) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993.
- 9) Hobbacher, A.: Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW document XIII-1965-03/XV-1127 -03, International Institute of Welding 2003.
- 10) 伊佐見和夫, 三木千寿, 小西拓洋, 佐々木靖彦, 佐々木栄一: エフェクティブノッチストレスによる溶接継手の疲労亀裂発生点と-の評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol.60, pp.415-416, 2005.
- 11) C. Morgenstern, C.M. Sonsino, A. Hobbacher and F. Sorbo: Fatigue Design of Aluminum Welded Joints by the Local Stress Concept with the Fictitious Notch Radius of $r_f=1\text{mm}$, IIW Doc. XIII-2009-04.
- 12) 菅沼久忠, 三木千寿: 鋼床版デッキプレートとトラブリブ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, 35-42, 2007.
- 13) Wolfgang Fricke: Round-Robin Study on Stress analysis from the Effective Notch Stress Approach, IIW Doc. XIII-2129-06/XV-1223-06, 2006.
- 14) Wolfgang Fricke and Adrian Kahl: Local Stress Analysis and Fatigue Assessment of Bracket Toes Based on Measured Weld Profile, IIW Doc. XIII-2166-07/XV-1253-07, 2007.
- 15) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説-共通編・鋼橋編, 2002.