

横桁フランジが交差する主桁ウェブ溶接部の疲労強度に対する2軸荷重の影響

平山繁幸¹・森猛²

¹学生員 工修 法政大学大学院工学研究科建設工学専攻 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)

E-mail:i02r9502@k.hosei.ac.jp

²正会員 工博 法政大学工学部土木工学科教授 (同上)

横桁フランジが交差する主桁ウェブ溶接部の疲労強度は、面外ガセット試験体の1軸疲労試験によって求められている。しかし、この部分は主桁ウェブ応力に加えて横桁フランジ応力も作用する2軸応力状態となることが多い。本研究では、横桁フランジが交差する主桁ウェブ溶接部の疲労強度に対する2軸荷重の影響を明らかにする目的で、純粋な2軸応力状態を実現する疲労試験システムを構築し、モデル試験体の疲労試験を行った。その際、主桁の応力範囲は $100\text{N}/\text{mm}^2$ とし、横桁の応力範囲を $0\sim 150\text{N}/\text{mm}^2$ とした。2軸応力状態で疲労寿命は大幅に減少した。これは横桁に作用する応力によって主桁ウェブの応力が増加することと、応力の2軸性に原因がある。このことを応力測定試験と有限要素応力解析から確かめた。

Key Words : fatigue strength, welded joint between main and lateral girders, bi-axial loading

1. はじめに

鋼橋の様々な箇所数多くの疲労損傷事例が報告されている。その代表的な例として、横桁や対傾構などの横つなぎ材と主桁の交差部近傍に生じた疲労亀裂が挙げられる(図-1参照)。このような疲労亀裂の発生の多くは2次応力に原因があり、これらの亀裂の進展が直ちに橋梁全体の崩壊を招くことはない。しかし、横桁フランジを主桁ウェブに取り付けた廻し溶接部の主桁ウェブ側溶接止端部に生じた疲労亀裂は、主桁に生じる1次応力によって発生した可能性もあり、その亀裂が進展すれば落橋に至る可能性も高い、非常に危険な損傷である。この部分の疲労強度は、面外ガセット継手にモデル化した試験体の1軸疲労試験により求めるのが通常である。その結果に基づき、例えば日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」²⁾(以後、JSSC指針と呼ぶ)では強度等級Gの継手と規定されている。しかし、主桁・横桁交差部は、主桁ウェブ応力に加えて横桁フランジ応力が作用する2軸応力状態となることが多い。したがって、鋼橋の疲労に対する安全性を確保するためには、そのような2軸荷重下の疲労強度を明らかにする必要がある。

鋼1断面多主桁橋の主桁ウェブ・横桁フランジ交差部の応力性状については、既にいくつかの検討がなされている。例えば、鈴木ら³⁾は格子解析の結果から、多主

桁橋の中桁では横桁フランジに生じる応力の変動幅が主桁ウェブに生じる応力の変動幅と同程度となることを示している。また、筆者ら⁴⁾は、実橋梁を対象とした立体有限要素解析を行い、T荷重を戴荷した時の横桁下フランジ応力は主桁ウェブ応力の $-0.3\sim 1.5$ 倍の範囲にあることを示した。

2軸荷重下における溶接継手の疲労性状についても既に高橋ら⁵⁾によって検討されている。しかし、そこでは面内方向で2軸荷重を受ける場合を対象にしており、本研究で対象としている主桁・横桁交差部のように面外方

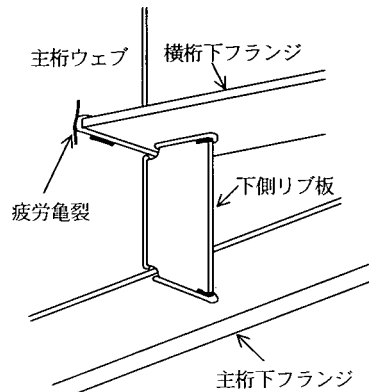


図-1 疲労損傷の例¹⁾

表-1 SM490Yの機械的性質と化学成分

機械的性質			化学成分 (%)						
降伏点	引張強さ	伸び	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
415N/mm ²	540N/mm ²	23%	0.15	0.21	1.43	0.022	0.006	0.01	0.01

向（主桁ウェブ板厚方向）から2軸荷重を受ける場合について検討された例はない。さらに、このような2軸荷重下における溶接継手の疲労強度に関する研究が少ない理由の一つに、実用可能な2軸疲労試験システムの構築が困難であったことが挙げられる。

本研究では、まず偏心による曲げ応力が生じない純粋な2軸応力場を実現するための疲労試験システムを構築する。さらに、この試験システムを利用して、主桁ウェブと横桁フランジの交差部を模擬した試験体の疲労試験と応力測定試験、有限要素応力解析を行い、横桁フランジが交差する主桁ウェブ溶接部の疲労強度に対する2軸荷重の影響について検討する。

2. 試験体

(1) 試験体の製作

試験体の形状と寸法を図-2に示す。使用鋼材は板厚9mmのSM490Yである。この鋼材の機械的性質と化学成分を表-1に示す。試験体は主桁ウェブと横桁フランジの交差部を模擬したもので、以下の手順で製作した。まず、主桁ウェブ中央にガス切断で矩形の穴（120×9mm）を設け、横桁フランジを差し込む。主桁ウェブ片面と横桁フランジを組立て溶接した後、主桁ウェブ表面からウェブ板厚の2/3程度までガウジングし、そこに2層の溶接を施した。その後、ウェブ裏面にも同様のガウジングと溶接を施した。溶接は炭酸ガスアーク溶接法を用いて水平姿勢で行った。溶接時の電圧は33V、電流は250A、溶接速度は40cm/minである。なお、現在では、横桁ウェブが主桁ウェブを貫通する構造詳細が用いられることは少ない。しかし、非貫通の構造では、横桁フランジの日違いが生じやすい。その影響を避けるために、ここでは横桁フランジが貫通する構造とした。

(2) 溶接部の形状

疲労試験を実施する前に、すべての試験体について主桁ウェブと横桁フランジの廻し溶接部の脚長ならびに溶接止端部の曲率半径と開き角を測定した。脚長はノギスを用いて測定した。主桁ウェブ側の脚長は平均で11.9mm、横桁フランジ側の脚長は平均で8.2mmであった。曲率半径と開き角の測定は、溶接部の錆や汚れを取り除いた後、歯科用印象材（親水性ビニールシリコン印象材）を用いて型取りを行い、採取した型を2.0mm程度の厚さでスライスして4つの試料を採取し、それを20倍拡大投影機で

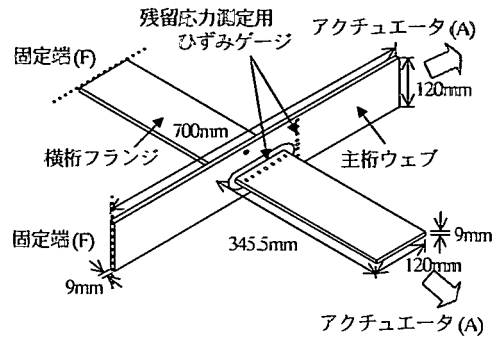


図-2 試験体の形状と寸法

観察することにより行った。サンプル数は合計で168である。主桁ウェブ側の溶接止端部の曲率半径の平均値は0.9mm、標準偏差は0.2mm、開き角の平均値は136度、標準偏差は6度であった。横桁フランジ側溶接止端部の曲率半径の平均値は2.2mm、標準偏差は0.8mm、開き角の平均値は129度、標準偏差は8度であった。

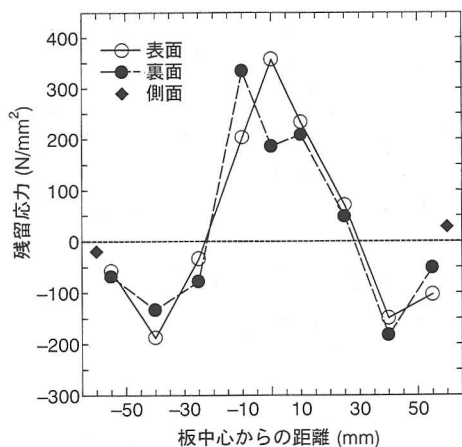
(3) 残留応力の測定

主桁ウェブ表面と横桁フランジ表面にひずみゲージを貼付し、その回りを切断することによって解放されるひずみから試験体板幅方向に沿う残留応力の分布を測定した。ひずみゲージの貼付位置は、それぞれ、横桁フランジ端部から17mm（溶接止端より約5mm）、主桁ウェブ表面から13mm（溶接止端より約5mm）離れている（図-2参照）。なお、ひずみゲージは板の表裏面に加えて側面にも貼付している。図-3(a)は主桁ウェブ、図-3(b)は横桁フランジの残留応力測定結果を示している。主桁ウェブ側溶接止端近傍には最大で360N/mm²程度の引張残留応力が生じている。供試鋼材の降伏応力は415N/mm²である（表-1参照）ので、降伏応力の約90%に相当する残留応力が生じていることになる。また、横桁フランジ側溶接止端近傍には降伏応力と同程度の高い圧縮残留応力が生じている。

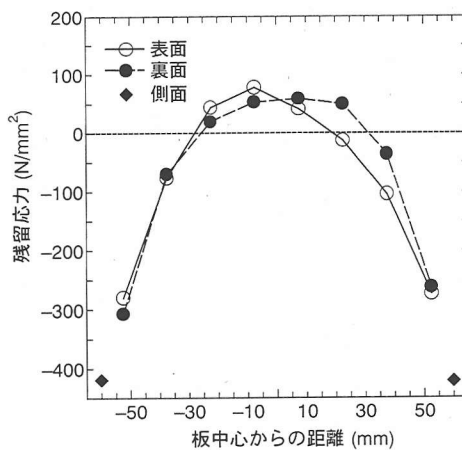
3. 2軸疲労試験システムの構築

(1) 2軸疲労試験システムの概要

2軸疲労試験装置を写真-1に示す。この試験装置は、4m×4m程度の台座の上に2つの独立した試験フレームを設置したものである。2つのフレームにはそれぞれ1つのアクチュエータが設置されており、試験体を2つの



(a) 主桁側



(b) 横桁側

図-3 残留応力測定結果

フレームに取り付けることで2軸荷重疲労試験を可能としている。しかし、このままで荷重を加えると試験体中心のずれによって試験体に曲げ応力が発生する。この曲げ応力を取り除き、純粋な2軸応力状態で疲労試験を行うために、試験フレームと台座の間にガイドレール型のベアリングを設置した。

(2) 慣性力の影響

試験装置にはベアリングを設置しているため、繰返し荷重に伴い試験フレームが動く。そのため、繰返し速度を高くした場合にフレームの慣性力により予期せぬひずみが試験体に生じる恐れがある。この慣性力の影響を調べる目的で、繰返し速度によって試験体に生じるひずみの大きさや波形がどのように変化するかを調べた。その際、主桁ウェブ側と横桁フランジ側にそれぞれ同位相の片振り引張応力(下限応力 4.6N/mm^2 、応力範囲 100N/mm^2)を与えた。繰返し速度は $0.1\text{Hz} \sim 5.75\text{Hz}$ とした。ひずみゲージは主桁ウェブ板幅中央表裏面、横桁フランジ端から 50mm 離れた位置、4箇所に貼付した。サンプリング周波数は、1波形あたりの測定点数が50点以上となるように $10 \sim 500\text{Hz}$ とした。図-4に測定したひずみ波形の例を示す。繰返し速度が 0.1Hz の場合、ひずみ波形は荷重入力波形と同様に乱れないサインカーブとなっている。 2.5Hz では波形が多少乱れているもののほぼサインカーブを描いている。しかし、 5.75Hz では波形の乱れが大きく、ひずみの変動範囲も大きくなっている。

図-5は、図中に示す4箇所での測定したひずみ範囲と繰返し速度の関係を示している。なお、図中の()内の番号は裏面のゲージ番号を表している。繰返し速度が遅い領域でのひずみ範囲は繰返し速度によらずほぼ一定となっている。しかし、 3.0Hz を超えると、ひずみ範囲の繰返し速度による変化が大きくなる傾向が認められる。

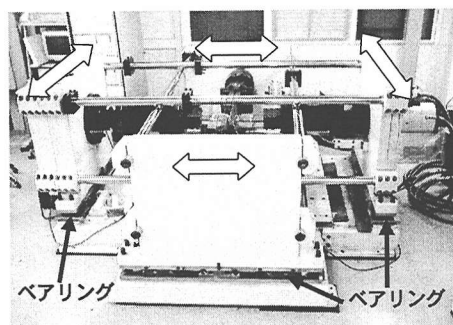


写真-1 2軸疲労試験装置

5.75Hz でひずみ範囲の変化は特に大きくなっている。

4. 疲労試験

(1) 試験方法

疲労試験は、先に述べた疲労試験システム(動的能力 $\pm 200\text{kN}$)を利用して、試験体の主桁ウェブと横桁フランジに同位相の繰返し引張荷重(下限応力 4.6N/mm^2)を与えて行った。この試験では、主桁ウェブ側の応力範囲を 100N/mm^2 として、横桁フランジ側の応力範囲を $0, 50, 100, 150\text{N/mm}^2$ とした4つの条件で行った。以後、横桁フランジ応力範囲と主桁ウェブ応力範囲の比を2軸応力比と呼ぶ。したがって、ここでは2軸応力比 $0, 0.5, 1.0, 1.5$ の条件で疲労試験を行ったことになる。疲労試験に用いた試験体の数は、いずれの2軸応力比とも6体としている。繰返し速度は3章で得た結果を参考に $1.25 \sim 2.5\text{Hz}$ とした。ただし、2軸応力比 0 (1軸応力状態) の場合には、フレームを台座に固定した状態で繰返し速度を $3.5 \sim 8.0\text{Hz}$ とした。試験体を試験装置に設

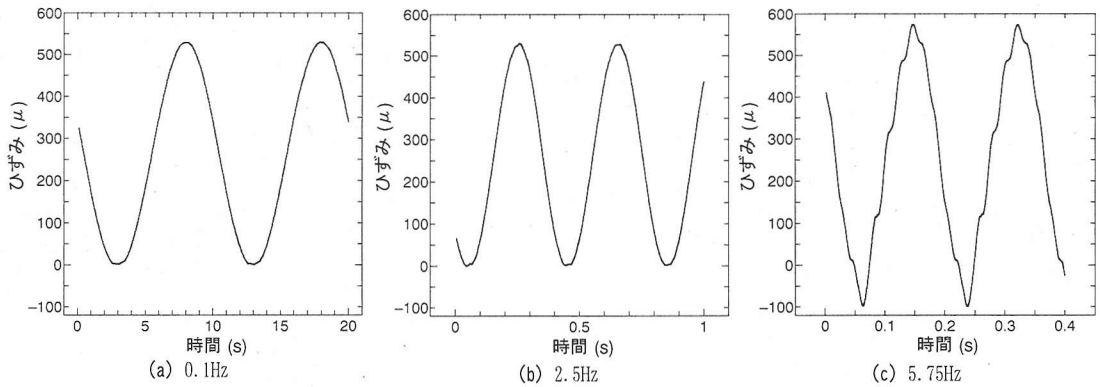


図-4 ひずみ波形

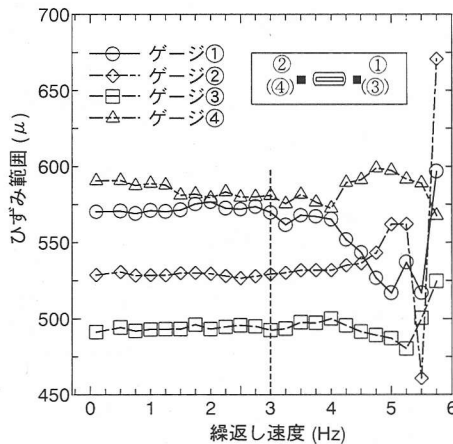


図-5 ひずみ範囲と繰返し速度の関係

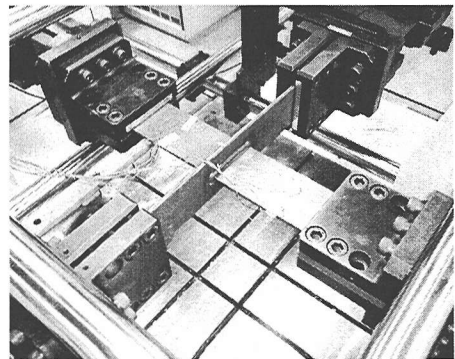


写真-2 試験体の設置状況

置した状況を写真-2に示す。

先述のように各2軸応力比で6体の疲労試験を行ったが、その内1体については、疲労亀裂の発生・進展状況を調べる目的で、ピーチマーク試験を行った。この試験では、応力繰返し数10万回ごとに下限応力を上昇させて応力範囲を半減した。応力範囲半減時の応力繰返し数も10万回とした。

(2) 疲労試験結果

疲労破壊は、いずれの試験体、2軸応力比においても、主桁ウェブ側溶接止端部から発生した疲労亀裂の進展により生じた。2軸応力比1.0あるいは1.5の場合には、横桁フランジ側溶接止端も疲労亀裂の起点となる可能性が高いと考えられるが、この部分に疲労亀裂の発生は認められなかった。これは、疲労破壊の起点となった廻し溶接部の主桁ウェブ側止端近傍が高い引張残留応力場となっていたのに対し、横桁フランジ側止端近傍には高い圧縮残留応力が生じていたことに原因があると考えられる。

疲労破壊の起点となった主桁ウェブ側溶接止端は4箇所あるが、その内どの溶接止端が破壊起点となったかを破断した試験体の破面観察により調べた。さらに、未破

断側の主桁ウェブ断面についても溶接止端部での疲労亀裂の有無を目視と磁粉探傷法により調べた。その結果、疲労試験に用いた計24体の試験体のうち6体に疲労亀裂(3体が貫通亀裂、残り3体が表面亀裂)の存在が確認された。疲労亀裂発生位置の調査結果を表-2に示す。()内の数字は磁粉探傷法により未破断側の主桁ウェブ側溶接止端に疲労亀裂の存在が確認された試験体の数である。また、表中で*を付した箇所の試験体のうち1体は、F-AとF-F(表-2の説明図を参照)の2箇所から疲労亀裂が発生し、それらが合体して貫通亀裂となり、破断に至った。表-2に示すように4つの止端すべてが疲労破壊起点となっており、起点が特定の位置に偏るような傾向は見られなかった。ベアリングが十分に機能せず、主桁ウェブあるいは横桁フランジのアクチュエータ側と固定端側で力のアンバランスが生じ、それによって主桁ウェブや横桁フランジに曲げ応力が発生したとすれば、A-Aで最も高い応力が生じ、そこが疲労破壊の起点になりやすいものと考えられる。しかし、2軸応力状態でA-Aが破壊起点となった試験体の数が他の位置に比べて特に多いということはない。

疲労試験結果を表-3に、疲労試験から得られた疲労

表-2 疲労亀裂発生位置

2軸応力比	亀裂発生位置			
	A-A	A-F	F-A	F-F
0	1	- (2)	4	1(1)
0.5	1(1)	2	1(1)	2
1.0	2	-	3*	2*
1.5	1(1)	-	3	2

* F-AとF-Fの2箇所から亀裂が発生
()内は磁粉探傷法により亀裂を検出

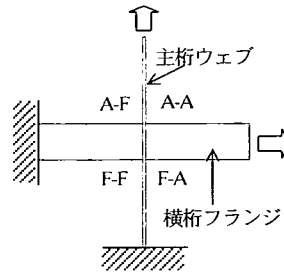


表-3 疲労試験結果

2軸応力比	破壊起点*	疲労寿命 (万回)	2軸応力比	破壊起点*	疲労寿命 (万回)
0	A-A	327.3	1.0	F-A	154.7
0	A-F	138.0	1.0	F-A	85.6
0	A-F	115.4	1.0	F-A, F-F	75.9
0	F-F	119.5	1.0	F-F	77.5
0	A-F	89.8	1.0	A-A	78.9
0	A-F	102.7	1.0	A-A	83.4
0.5	A-F	93.6	1.5	F-A	47.5
0.5	A-F	101.0	1.5	F-A	61.2
0.5	F-A	61.3	1.5	F-A	65.9
0.5	F-F	100.0	1.5	F-F	67.3
0.5	F-F	106.5	1.5	F-F	71.8
0.5	A-A	85.6	1.5	F-F	72.8

* 表2の図を参照

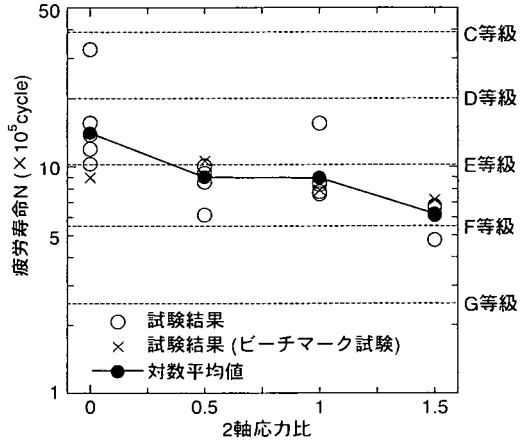


図-6 疲労寿命と2軸応力比の関係

寿命と2軸応力比の関係を図-6に示す。図中で×を付したマークはビーチマーク試験を行った試験体の疲労寿命を示している。なお、応力範囲を半減したときの応力繰返し数は疲労寿命に含めていない。各2軸応力比とも疲労寿命のばらつきが大きいものの、2軸応力比が高くなるにしたがって疲労寿命が減少する傾向が認められる。例えば、2軸応力比が0のときの疲労寿命の対数平均値は140万回程度であるのに対し、1.5では約60万回と、疲労寿命は半分以下となっている。図中の横に引いた破線は、JSSC指針で示されている疲労設計曲線（応力範囲 $\Delta\sigma$ -疲労寿命 N 関係： $\Delta\sigma^3 \cdot N = C_0$ ）から計算した強度等級C~Gの応力範囲 $100N/mm^2$ に対する疲労寿命である。なお、 C_0 は強度等級ごとに与えられている定数である。1章でも述べたように、面外ガセット継手の強度等級はG等級とされているが、ここで得られた疲労試験結果は全てG等級を満たしている。強度等級は、2軸応力比を0から1.0とすることでほぼ1等級、1.5とすることでさらに低下している。

(3) 疲労亀裂の発生・進展性状

ビーチマーク試験を行った試験体の破面を写真-3に示す。疲労亀裂は、いずれの2軸応力比においても溶接止端から発生し、その形状は半楕円形となっている。これらの破面に残されたビーチマークを、デジタルマイクロスコープを用いて150倍に拡大した状態で観察した。

その結果を図-7と図-8に示す。なお、溶接止端から複数の亀裂が生じた試験体もあったが、これらの図ではその時点で最も大きい、主たる疲労亀裂について整理した結果を示している。図-7は亀裂深さと応力繰返し数の関係を示している。図-6で示したように、ビーチマーク試験を行った試験体では、その疲労寿命に顕著な2軸応力比の影響が認められないためか、亀裂発生寿命や進展寿命にも規則的な2軸応力比の影響は認められない。

図-8は、亀裂のアスペクト比（亀裂深さ a /亀裂の表面での幅の半分 b ）と亀裂深さの関係を示したものである。亀裂のアスペクト比は、亀裂深さが1mm以下であれば1ついているが、1mmを超えるとばらつきは小さくなり、2軸応力比によらず亀裂深さに対して一定の関係になる傾向が認められる。したがって、ここで得られた結果からは、亀裂のアスペクト比に対する2軸応力比の影響はないといえる。

5. 応力性状

(1) 応力測定試験

a) 測定方法

疲労試験で疲労破壊の起点となった主桁ウェブ側溶接止端近傍の応力が横桁フランジに作用する応力によってどのように変化するかを調べる目的で、試験体にある4

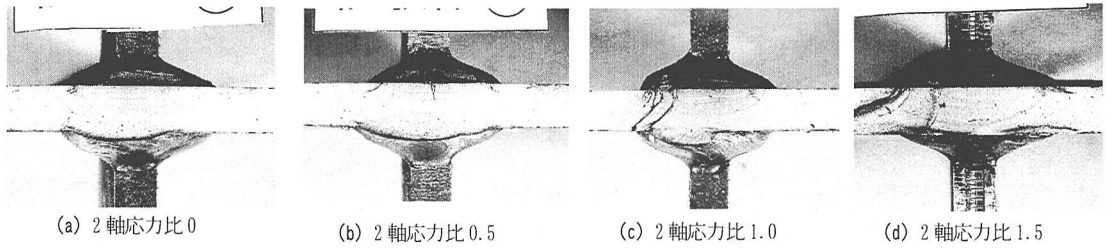


写真-3 ビーチマーク試験より得られた破断面

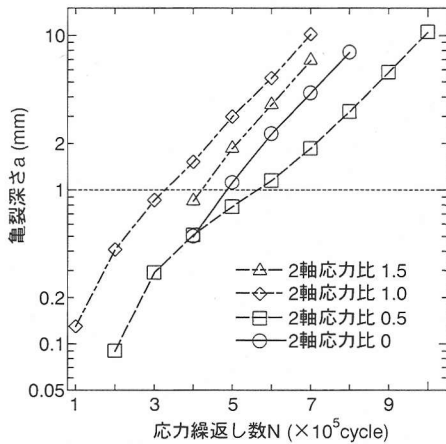


図-7 亀裂深さと応力繰返し数の関係

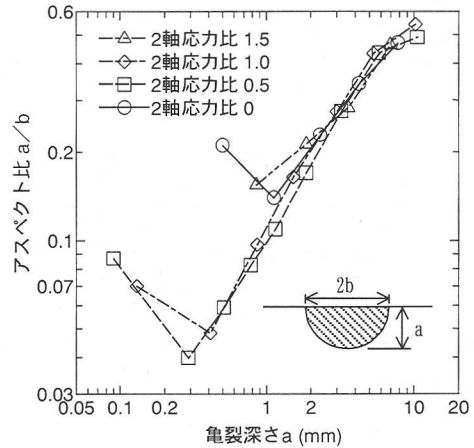


図-8 アスペクト比と亀裂深さの関係

筒所の廻し溶接部近傍の主桁ウェブ表面に5連のひずみゲージ(ゲージ長1mm, ゲージ間隔2mm)を貼付した。止端に最も近いゲージの位置は、横桁フランジ端から16mm(溶接止端から約3mm)離れている。さらに、別の試験体の主桁ウェブには、主桁ウェブ側溶接止端近傍の主応力の大きさとその方向に横桁フランジ応力がどのような影響を与えるかを調べる目的で、3軸のひずみゲージを貼付した。ゲージレングスは5mmであり、貼付位置は主桁ウェブ側溶接止端から7mm離れている。これらの試験では、主桁ウェブの応力を $100\text{N}/\text{mm}^2$ で一定とし、横桁フランジの応力を0, 25, 50, 75, 100, 125, 150 N/mm^2 (2軸応力比0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5)とした条件でひずみ測定を行った。

b) 測定結果

5連ゲージを用いたひずみ測定試験から得られた主桁ウェブ側溶接止端近傍の応力分布を図-9に示す。応力は測定したひずみに鋼のヤング率($2.06 \times 10^5 \text{N}/\text{mm}^2$)を乗じることにより求めている。図の縦軸は試験から得られた応力を公称応力($100\text{N}/\text{mm}^2$)で無次元化したものである。なお、ここに示す無次元応力は溶接止端近傍4箇所での平均値である。無次元応力は2軸応力比が高くなるにしたがって増加している。例えば、止端部に最も近い位置では、2軸応力比が0のとき無次元応力は1.45であるのに対し、1.5になると1.57に増加している。ま

た、各2軸応力比の応力集中係数の変化は小さく、ほぼ平行となっている。

3軸ゲージを用いたひずみ測定より得られた結果から主応力の大きさとその方向を求めた。図-10は公称応力($100\text{N}/\text{mm}^2$)で無次元化した主応力と2軸応力比の関係をアクチュエータ側と固定端側に分けて示している。なお、この図に示す主応力は表裏面での平均値を示している。アクチュエータ側と固定端側で主応力の大きさはほぼ一致している。また、無次元化した主応力は、2軸応力比が高くなるにしたがって大きくなっている。例えば、2軸応力比が0の場合、無次元化した主応力は、アクチュエータ側で1.33、固定端側で1.34であるのに対し、1.5の場合は、アクチュエータ側、固定端側ともに1.43となっている。主応力の方向は、2軸応力比による変化は認められず、いずれの位置(4箇所)においても主桁ウェブ長手方向に対して3.5度以下となっており、公称応力の作用方向とほぼ一致していた。したがって、横桁フランジに作用する応力は、主桁ウェブ側溶接止端近傍の主応力の大きさには影響を及ぼすものの、その方向には影響しないと言える。

(2) 応力解析

a) 解析対象及び方法

横桁フランジ応力によって主桁ウェブの応力分布がど

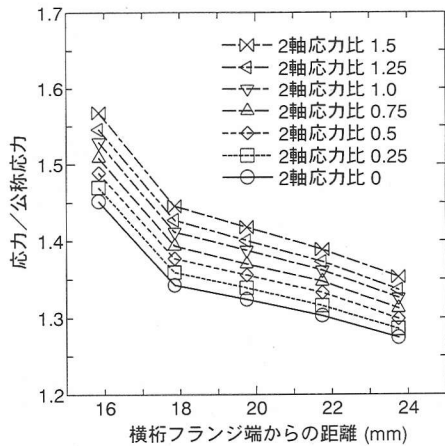


図-9 主桁ウェブ溶接止端近傍の応力分布

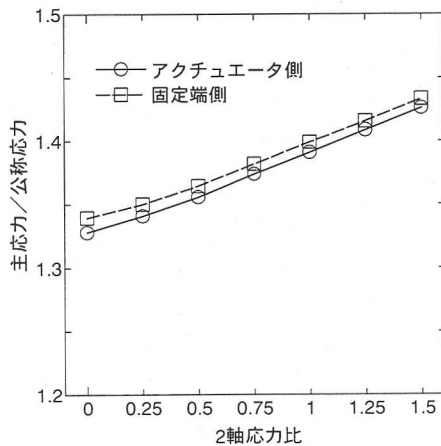


図-10 主応力と2軸応力比の関係

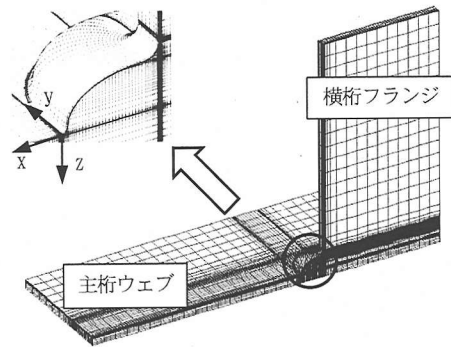


図-11 要素分割図

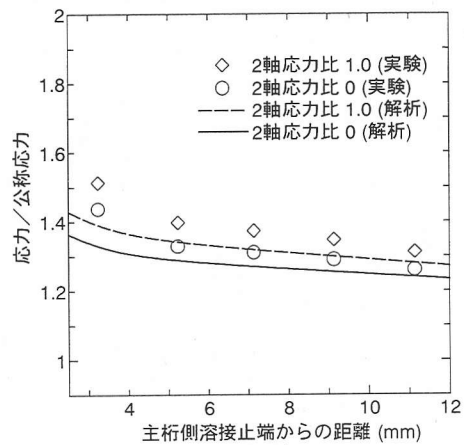


図-12 実験結果と解析結果の比較

のように変化するかを調べる目的で、汎用有限要素解析プログラム CADEM を用いて三次元有限要素応力解析を行った。解析対象は疲労試験と応力測定試験に用いたモデル試験体である。解析は、試験体の対称性を考慮し 1/8 モデルに対して行った。用いた要素は 8 節点固体要素である。溶接形状は 2 章で示した測定結果を基に、主桁ウェブ側の脚長を 12mm、曲率半径を 0.9mm、横桁フランジ側の脚長を 8mm、曲率半径を 2.2mm とした。要素分割図を図-11 に示す。図中には座標軸の定義も示している。溶接止端近傍の要素寸法は 0.05mm とした。荷重は、主桁ウェブと横桁フランジの端部に分布力を作用させることにより与えた。荷重条件は、主桁ウェブ側の応力を $100\text{N}/\text{mm}^2$ として、横桁フランジ側の応力を $-100, -50, 0, 50, 100, 150\text{N}/\text{mm}^2$ (2軸応力比 $-1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0, 1.5$) とした 6 通りである。

b) 応力測定試験結果との比較

解析から求めた主応力の大きさとその方向を実験結果とともに表-4 に示す。なお、実験より得られた主応力

の大きさと方向は溶接止端 4 箇所測定された値の平均値である。解析結果は、実験から得られた主応力よりも若干低いものの、2軸応力比が高くなるにしたがって主応力の大きさも増加するという傾向は一致している。主応力の方向は、両者とも主桁ウェブ長手方向に対してほぼ 0 度となっている。

図-12 は、主桁ウェブ中央長手方向に沿う応力 σ_x の分布について、実験結果と解析結果を比較したものである。主応力と同様に実験結果の方が大きくなっているが、分布形状は解析結果と測定結果でほぼ一致している。応力の大きさが異なる原因としては、試験体と解析モデルの曲率半径・開き角の違い、試験体表裏面での溶接脚長の違いなどが考えられるが、詳細は現在のところ不明である。

c) 解析結果

図-13(a) に主桁ウェブ中央で求めたウェブ長手方向に沿う応力 σ_x の分布を示す。図の縦軸は解析より得られた応力を公称応力で除した無次元応力、横軸は溶接止端

表-4 実験と解析から得られた主応力の大きさと方向

2軸 応力比	解析結果		測定結果	
	大きさ(N/mm ²)	方向(度)	大きさ(N/mm ²)	方向(度)
0	127.2	0.0	133.4	0.7
0.5	129.6	0.0	136.0	0.8
1	132.1	0.0	139.5	0.7
1.5	134.5	0.0	143.0	0.8

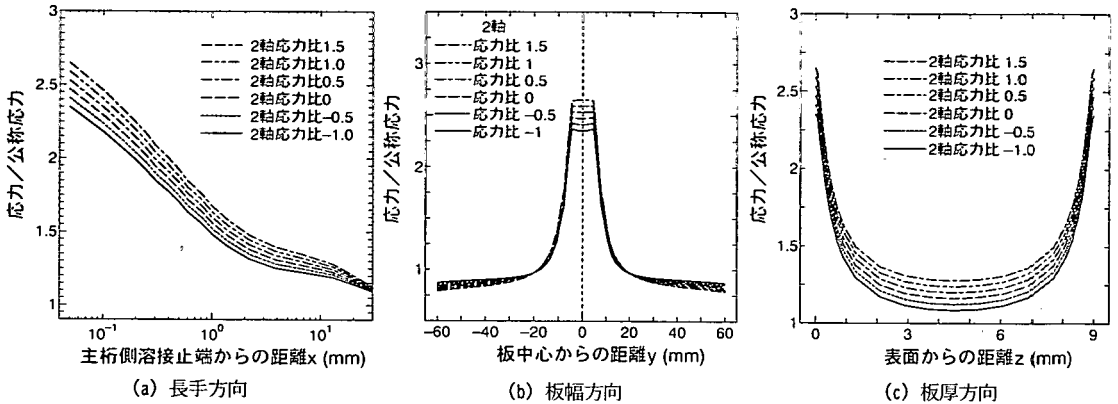
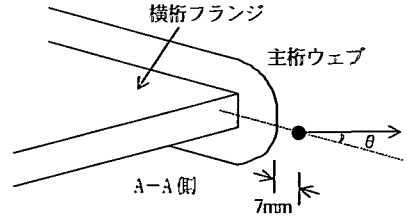


図-13 主桁ウェブ側溶接止端近傍の応力分布

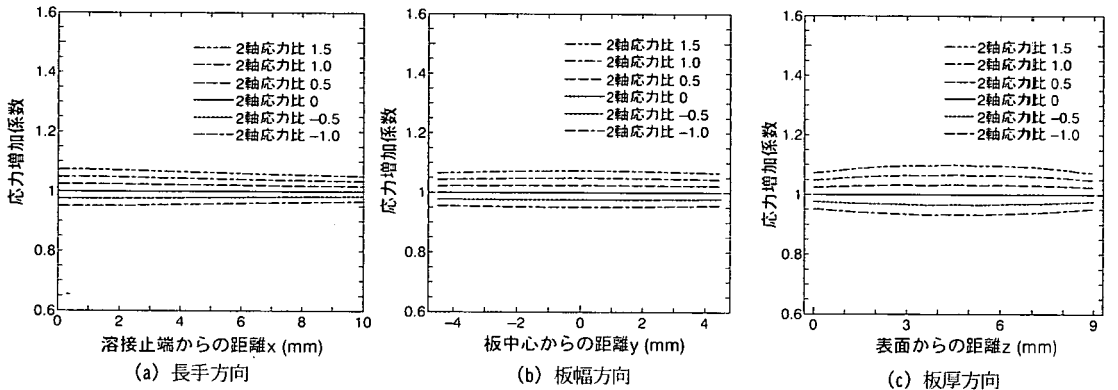


図-14 応力増加係数の分布

からの距離である。無次元応力は2軸応力比が高くなるにしたがって大きくなっている。また、溶接止端から離れるにしたがって小さくなっている。

図-13(b)に板幅方向に沿う応力 σ_y の分布を示す。応力は、溶接止端部付近で最も大きく、そこから離れるにしたがって徐々に減少していき、板端付近では公称応力より小さい値となっている。

図-13(c)は溶接止端位置での主桁ウェブ板厚方向に沿う応力 σ_z の分布を示したものである。板表面で最も高い応力が生じており、板厚中心に近づくにしたがって減少しているが、板厚中心でも公称応力より大きい値となっている。

長手方向及び板幅方向では溶接止端近傍で、また板厚方向では板表面だけでなく板厚中心部でも、各2軸応力

比の応力分布はほぼ平行となっている。

6. 疲労強度に対する2軸荷重の影響

図-14(a)~(c)は、長手方向、板幅方向、板厚方向で2軸応力比により主桁ウェブ長手方向応力 σ_x がどの程度変化するかを示している。これらの図に示す応力増加係数とは、各2軸応力比で求めた応力を2軸応力比0の応力で除したものである。長手方向、板幅方向では、各2軸応力比の応力増加係数は、溶接止端近傍でほぼ同様であり、かつ平行である。また、板厚方向では板厚全体にわたってほぼ同様で平行となっている。すなわち、2軸荷重の影響により溶接止端近傍の応力場全体がほぼ一様

表-5 応力増加係数の算出結果

2軸応力比	IIW ⁶⁾		仁瓶 ⁷⁾	山田ら ⁸⁾
	2点法	3点法	0.3t法	止端から深さ1mm
-1	0.950	0.948	0.954	0.945
-0.5	0.975	0.974	0.977	0.972
0	1	1	1	1
0.5	1.025	1.026	1.023	1.028
1	1.050	1.052	1.047	1.056
1.5	1.076	1.078	1.070	1.083

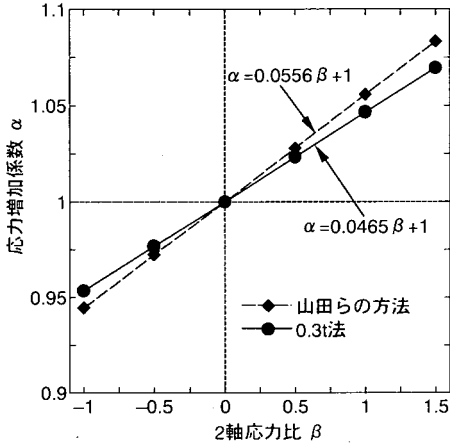


図-15 応力増加係数と2軸応力比の関係

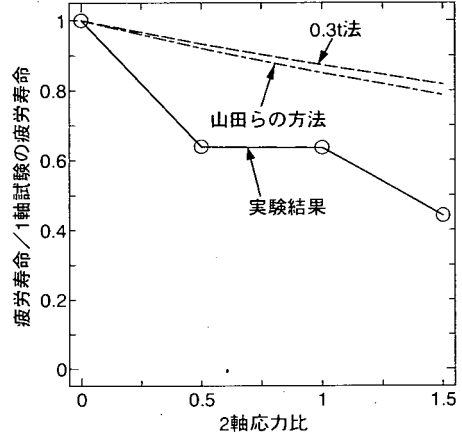


図-16 2軸荷重による疲労寿命の減少率

に変化している。面外ガセット溶接継手の疲労寿命の大半が、数 mm 程度の大きさの疲労亀裂が形成されるまでに費やされる寿命で占められることを考えれば、2 軸応力の影響は 1 軸応力状態の公称応力に応力増加係数を乗じることにより模擬できると言える。応力増加係数は算出する位置で若干異なるが、ここではホットスポット応力の概念^{9),10)}や山田らの方法⁸⁾を用いて算出した。その結果を表-5 に示す。IIW の 2 点法とは溶接止端から板厚の 0.4 倍、1.0 倍離れた位置の応力を用いて溶接止端のホットスポット応力を求める方法、3 点法は板厚の 0.4 倍、0.9 倍、1.4 倍離れた位置の応力を用いて 2 次曲線近似し溶接止端のホットスポット応力を求める方法である。0.3t 法は溶接止端から板厚の 0.3 倍離れた位置の応力をホットスポット応力とする方法である。また、山田らの方法は溶接止端から深さ 1mm の位置の応力を疲労寿命評価応力とする方法である。各方法から算出した応力増加係数に顕著な差は認められない。2 軸応力比に伴う応力増加係数の変化が最も小さかった 0.3t 法¹⁰⁾と最も大きかった山田らの方法より求めた応力増加係数と 2 軸応力比の関係を図-15 に示す。いずれの場合も、応力増加係数と 2 軸応力比は線形関係にあり、図中の式で表わすことができる。

疲労試験から得られた疲労寿命の 2 軸応力比による変化と、ここで得られた応力増加係数から JSSC 指針に示されている疲労設計曲線を利用して推定した疲労寿命の

変化を比較した。応力増加係数を用いて推定した疲労寿命の変化は、疲労設計曲線の傾きが $1/3$ であることを利用して求めた。その結果を図-16 に示す。図の縦軸は各 2 軸応力比の疲労寿命を 2 軸応力比 0 の疲労寿命で無次元化している。なお、図中には、図-15 と同様に 0.3t 法と山田らによる方法から求めた応力増加係数による疲労寿命の変化を示している。計算した疲労寿命の変化と疲労試験結果は大きく異なっている。例えば、2 軸応力比が 1.5 の場合、計算した疲労寿命の減少率は、0.3t 法で 18%、山田らによる方法で 21%であるのに対し、疲労試験で得られた疲労寿命の減少率は 56%である。このように、応力増加係数を用いて 2 軸荷重の影響を 1 軸状態の応力で整理することを試みたが、これだけでは 2 軸荷重の影響を表現することはできなかった。このことは、主桁ウェブの長手方向だけではなく、板厚方向応力の影響、すなわち応力の 2 軸性により疲労強度が低下していることを意味しているとも考えられる。

7. まとめ

本研究では、横桁フランジが交差する主桁ウェブ溶接部の疲労強度に対する 2 軸荷重の影響を明らかにすることを目的として、純粋な 2 軸応力状態を実現する疲労試験システムを構築し、主桁・横桁交差部を模擬した試験

体を用いて疲労試験を行った。その際、主桁ウェブの応力範囲を $100\text{N}/\text{mm}^2$ とし、横桁フランジの応力範囲を 0, 50, 100, $150\text{N}/\text{mm}^2$ (2軸応力比 0, 0.5, 1.0, 1.5) とした。さらに、2軸荷重下の応力性状を調べる目的で応力測定試験と有限要素応力解析を行った。本研究で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 全ての試験体において疲労破壊の起点は主桁ウェブ側溶接止端部であった。試験体の疲労破壊起点は、廻し溶接部の主桁ウェブ側止端と横桁フランジ側止端の2箇所が考えられるが、横桁フランジ側溶接止端部に疲労亀裂の発生は認められなかった。これは、主桁ウェブ側で引張残留応力場、横桁フランジ側で圧縮残留応力場となるためと考えられる。
- (2) 2軸応力比が高いほど、すなわち、横桁フランジの応力範囲が大きいほど疲労寿命は減少した。2軸応力比 0 と比べて 2軸応力比 1.0 での疲労強度は、JSSC 指針で規定されている強度等級の 1ランク程度低下した。
- (3) 2軸荷重によって疲労強度が低下する原因は、横桁フランジに作用する応力によって主桁ウェブ側溶接止端近傍の応力が増大することと、応力の2軸性にあると考えられる。

謝辞：(株)東京鐵骨橋梁技術研究所・田中副所長には、試験体を製作していただくとともに、疲労試験システムの構築に協力いただいた。ここに記して、感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋁橋の疲労、丸善、1997.5.
- 2) 日本鋁構造協会編：鋁構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1993.4.
- 3) 鈴木博之、関惟忠、西岡敬治、岩崎雅紀、羽子岡爾朗：鋁桁橋の主桁-横桁取合い部の疲労に関する解析的検討、構造工学論文集、Vol.42A, pp.919-926, 1996.3.
- 4) 秋本伸介、平山繁幸、森猛：鋁I断面合成桁橋梁の主桁・横桁交差部の応力性状、第57回年次学術講演会講演概要集、1-659, pp.1317-1318, 2002.9.
- 5) 高橋一比古、高田篤志、秋山繁、牛嶋通雄、前中浩：2軸繰り返し荷重下における角回し溶接継手の疲労挙動、日本造船学会論文集、第184号, pp.321-327, 1995.
- 6) 国際溶接協会(溶接疲労強度研究委員会訳)：溶接構造の疲労設計、溶接学会、pp.13-17, 1999.4.
- 7) 仁瓶寛太：ホットスポット応力算出法の問題点と改善策、溶接学会全国大会講演概要、第63集, pp.F-44-F-50, 1998.9.
- 8) 山田健太郎、肖志剛、金仁泰、館石和雄：すみ肉溶接止端近傍の応力に着目した付加物溶接継手の疲労強度解析、構造工学論文集、Vol.48A, pp.1047-1054, 2002.3.

(2002.12.6 受付)

INFLUENCE OF BI-AXIAL LOADING ON FATIGUE STRENGTH OF WELDED JOINT BETWEEN MAIN GIRDER WEB AND LATERAL GIRDER FLANGE

Shigeyuki HIRAYAMA and Takeshi MORI

Bi-axial stress usually exists in welded joint between main girder web and lateral girder flange. For the purpose of examining influence of bi-axial loading on the fatigue strength, a test set-up has been developed to conduct fatigue tests under bi-axial loading. Fatigue tests have been carried out under the condition that stress range on the web was set at $100\text{N}/\text{mm}^2$ and stress range on the flange was 0, 50, 100 or $150\text{N}/\text{mm}^2$. The fatigue life under bi-axial loading was drastically decreasing compared with the fatigue life under single axial loading. This fact was derived from stress increment due to bi-axial stress and stress bi-axiality itself, which was confirmed by stress measurement tests and stress analyses.