

主応力方向が変化するウェブガセット溶接継手部の疲労強度評価

Fatigue Strength Evaluation for Web Gusset Welded Joints under Direction of Principal Stress Moving

平山 繁幸*, 森 猛**, 望月 建志***

Shigeyuki HIRAYAMA, Takeshi MORI, Takeshi MOCHIDUKI

*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)

**工博, 法政大学教授, 工学部都市環境デザイン工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

***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)

When a vehicle passes over the web gusset welded joints at main girder web connected with lateral girder flange, sign of shear stress turns over and direction of principal stress changes. In this study, in order to examine influence of the directional variation of principal stress on fatigue strength of the joints, fatigue tests have been performed under bi-axial stress condition with a phase difference of π . Furthermore, stress measurement tests and stress analyses have been also carried out. Fatigue life in case of a phase difference of π was short compared with fatigue life under uni-axial stress condition. Influence of the directional variation can be evaluated using principal stress range which is the difference between the maximum principal stress and minimum stress in the direction of the maximum stress at objective point.

Keywords : fatigue strength, direction of principal stress, bi-axial fatigue test

キーワード : 疲労強度, 主応力方向, 2軸疲労試験

1. はじめに

鋼橋梁部材の疲労強度は, 溶接継手部をモデル化した試験体の 1 軸疲労試験により検討されるのが一般的である. 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」¹⁾では, 単純な直応力を受ける 1 軸の繰返し荷重下で得られた疲労試験結果を基に, 代表的な溶接継手の疲労強度等級を定めている.

鋼橋においてこれまでに疲労損傷事例が報告されている箇所は, 単純な直応力やせん断応力よりもむしろ直応力とせん断応力が同時に作用する組合せ応力や多軸応力場であることが多い. その代表的な例に, 横桁を取り付けるために主桁ウェブに設けられた面外ガセット溶接継手がある. この部分は, 主桁ウェブの面内曲げによる直応力やせん断応力に加えて, 横桁の荷重分配作用による面外方向の応力も作用する複雑な応力場となっている.

組合せ応力や多軸応力下の溶接継手の疲労性状については, 既にいくつかの検討がなされている. 高橋ら^{2)~4)}は面内 2 軸荷重下における溶接継手部の疲労挙動について検討し, 2 軸荷重下の溶接継手の疲労寿命は 2 軸荷重の影響を含んだ応力範囲を用いて 1 軸荷重下の疲労寿命から推定できることを示した. また, 著者ら⁵⁾は主桁ウェブ溶接部の疲労強度に対する面外 2 軸荷重の影響について検討し, 2 軸荷重により疲労強度が低下すること, その原因は横桁フランジ応力による主桁ウェブ溶接部の応力の増加と応力の 2 軸性それ自身にあることを示して

いる. 山田ら^{6)~12)}は作用応力方向に対して斜めの溶接線を有する継手の疲労試験を行い, 組合せ応力下の溶接継手の疲労強度評価法を提示している.

以上のような応力性状の特徴に加えて, 主桁ウェブガセット溶接継手においては, 荷重の位置によってせん断応力の方向が反転することから, 主応力方向が変化するという特徴もある. 一般に, 疲労亀裂は最大主応力の作用方向と直角に発生・進展することは知られているが^{13), 14)}, 主応力方向の変化が亀裂の発生・進展性状にどのような影響を与えるか, またその際の疲労強度評価方法については未だ明らかとはなっていない.

本研究では, 横桁フランジが取り付けられた主桁ウェブ溶接部の疲労強度に対する主応力方向の変化の影響を明らかにする, またその際の疲労強度の評価方法について検討する目的で, 付加板を 45 度方向に取り付けた面外ガセット溶接継手試験体を用いて 2 軸疲労試験を行うとともに, 応力測定試験と有限要素応力解析を行った. なお, 主桁ウェブ溶接部で主応力方向が変化する応力状態は, 2 軸疲労試験機に取り付けられた 2 本のアクチュエータの荷重入力波形に位相差をつけることにより再現している.

2. 主応力方向が変化する応力場

車両が橋上を走行することにより, 着目部の主応力方向が変化することは既に述べた通りである. ここでは,

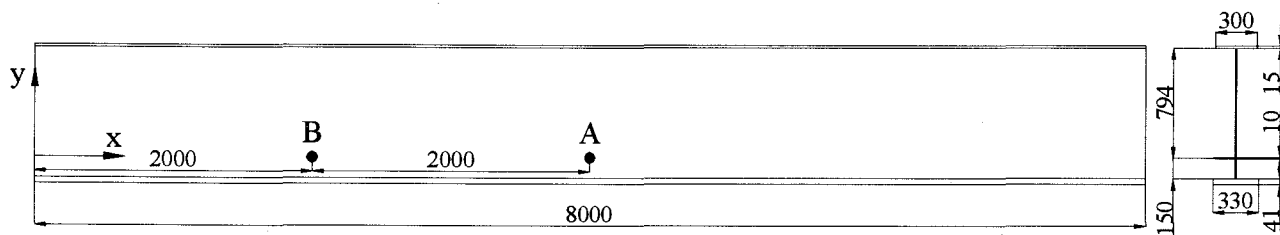


図-1 計算モデル

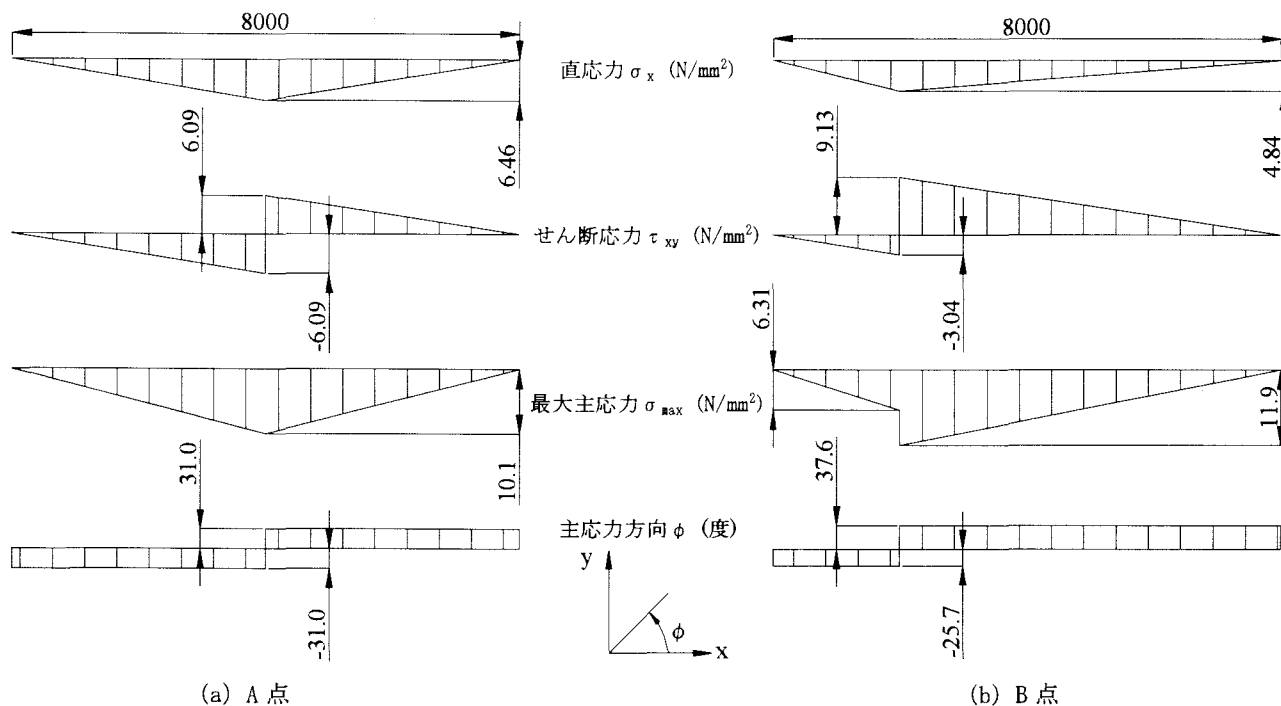


図-2 荷重の移動による主応力方向の変化

図-1 に示す単純桁を対象として、荷重の移動により主応力の大きさと方向がどのように変化するかを示す。荷重は 100kN とし、桁の断面は図-1 に示すとおりであり、支間は 8m、そして着目位置は支間中央 (A 点) と 1/4 点 (B 点) である。図-2 に、梁理論より計算した曲げ応力 (x 方向の直応力 σ_x) とせん断応力 τ_{xy} 、そしてモールの応力円を用いて求めた最大主応力の大きさと方向の荷重位置に伴う変化を示す。

A 点では、荷重通過前後で直応力とせん断応力の比の絶対値が等しいため、最大主応力は左右対称に変化している。一方、B 点では、荷重の通過前後でせん断応力の向きだけではなく、その大きさも変化するため、最大主応力が荷重通過前後で急変している。

荷重が着目点を含む断面に達するまでは、荷重位置によらずせん断応力と曲げ応力の比は一定となるため、主応力の方向も一定となる。しかし、荷重が着目断面を過ぎるとせん断応力が反転するため、主応力方向は A 点では -31 度から 31 度、B 点では -26 度から 38 度へと変化している。また、着目位置によって主応力方向の変化量は異なるものの、荷重が着目位置直上を通過することにより主応力方向が交番する様子は同じである。

3. 試験体

3.1 試験体形状

応力測定試験および疲労試験に用いる試験体の形状と寸法を図-3 に示す。試験体は、十字形の主板上に付加板を 45 度方向に取り付けた面外ガセット溶接継手試験体である。なお、主板コーナー部からの疲労亀裂の発生を防止する目的で、その位置にフィレットを設けている。

フィレット半径が小さい場合には高い応力集中が生じ、そこが疲労破壊起点となる恐れがあることから、ガセット板のない主板を対象とした有限要素応力解析を行うことによりフィレット半径 R について検討した。解析対象は、長さ 500mm、厚さ 9mm のフィレットを設けた十字形の鋼板である。解析は、モデルの対称性を考慮して 1/8 モデルで行った。解析モデルのフィレット半径は 50, 100, 200mm の 3 種類としている。要素分割図の例 ($R=50\text{mm}$) を図-4 に示す。主板中央付近の要素寸法は 2mm である。なお、ヤング率は $2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3 とした。

1 軸載荷 (y 方向、図-4 参照) 時の主板中央の板幅方向 x に沿う鉛直方向応力 σ_y の分布を図-5 (a) に示す。

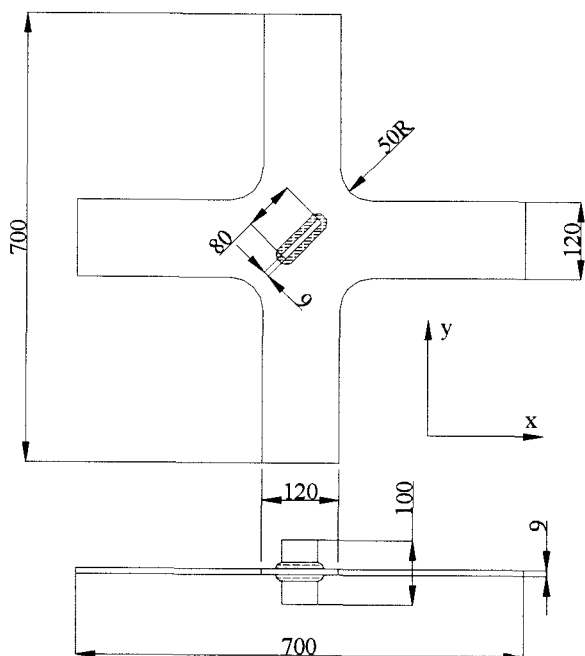


図-3 試験体の形状と寸法

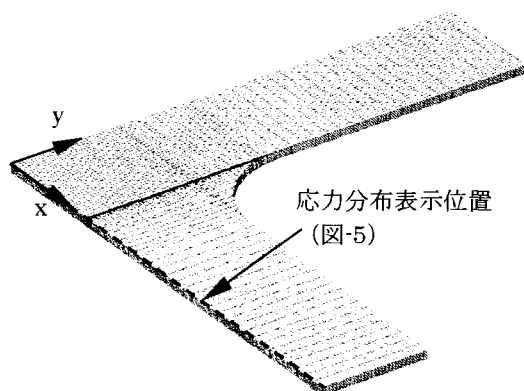
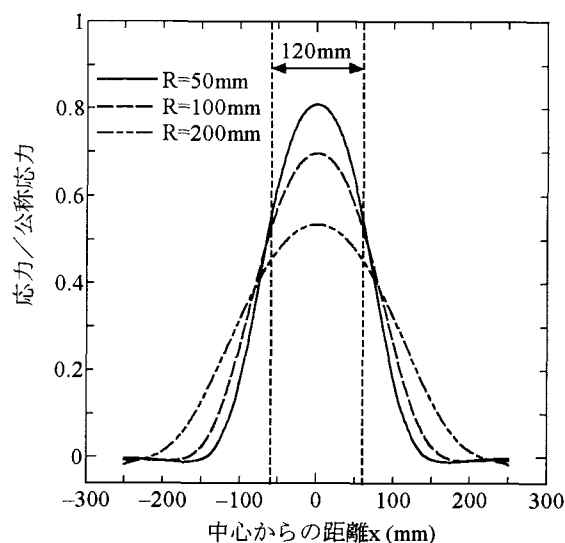


図-4 要素分割図 (R=50mm)

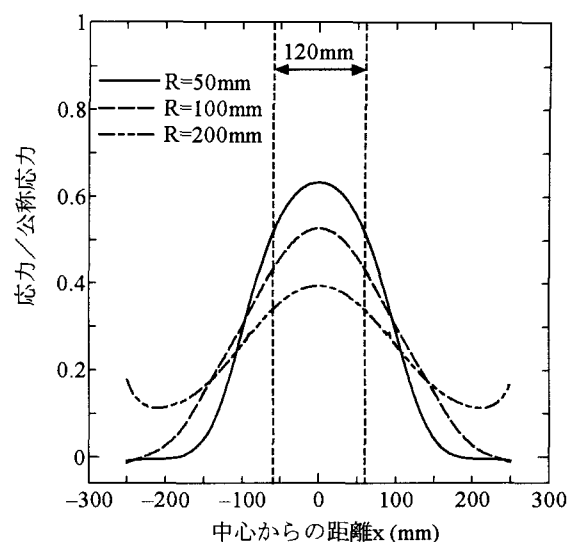
図の縦軸は、解析より得られた応力を公称応力（ y 方向の板端部に与えた応力）で除した無次元応力である。フィレット半径が大きくなるにしたがって、板幅中央での応力は小さくなっている。フィレット先端での応力集中係数は、 $R=50\text{mm}$ で 1.52, $R=100\text{mm}$ で 1.32, $R=200\text{mm}$ で 1.04 であった。

図-5 (b) は、2 軸載荷（ x 方向と y 方向）時の主板中央板幅方向に沿う鉛直方向応力 σ_y の分布である。2 方向から載荷することにより、1 方向載荷に比べて応力が小さくなっている。例えば、 $R=50\text{mm}$ の場合、1 軸応力状態で 0.81 であった板幅中央の無次元応力は 0.63 まで減少している。また、フィレット部の応力集中係数は、 $R=50\text{mm}$ で 1.45, $R=100\text{mm}$ で 1.25, $R=200\text{mm}$ で 1.04 であった。

以上のように、フィレット半径 R が大きいほど、フィレット部の応力集中係数は減少している。しかし、 R を大きくすると主板中央の応力が小さくなること、 R が 50mm であっても応力集中係数は 1.5 程度であり、この値



(a) 1 軸載荷



(b) 2 軸載荷

図-5 平板モデルの応力分布

は溶接止端部の応力集中係数よりも小さいと予想されることから、フィレット半径 R は 50mm とした。

3.2 試験体の製作

供試鋼材は板厚 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。この鋼材から十字形の主板と矩形のガセット板を切り出した後、主板中央にガス切断で矩形の孔 ($80\text{mm} \times 9\text{mm}$) を設けてガセット板を挿し込んだ。これらの板間の接合は以下の手順で行った。主板片面とガセット板を仮付け溶接した後、主板表面（仮付け溶接していない面）から板厚の $2/3$ 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、裏面も表面と同様にガウジングし溶接した。溶接は CO_2 溶接法を用いて下向き姿勢で行った。溶接時の電圧は 33V 、電流は 250A 、速度は 40cm/min である。なお、貫通型の試験体としたのは、ガセット板の目違いを防止するためである。

表-1 SM490Y の機械的性質と化学成分

機械的性質		
降伏点	引張強さ	伸び
449N/mm ²	538N/mm ²	23%

化学成分 (%)						
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
0.15	0.19	1.31	0.011	0.004	0.01	0.01

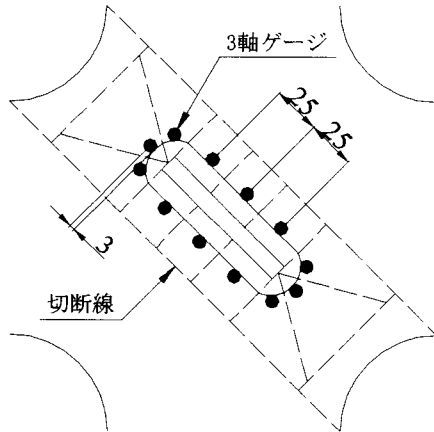


図-6 残留応力測定用ひずみゲージ貼付位置

3.3 溶接部形状

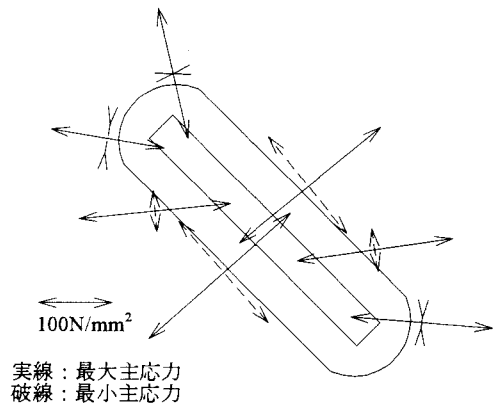
廻し溶接部と一般溶接部の形状を溶接脚長と止端部の曲率半径・開き角で代表することとし、疲労試験を実施する前にそれらを測定した。測定は歯科用印象材で採取した型を約2mmの厚さにスライスし、それらを10倍の拡大投影機で観察することにより行った。測定数は廻し溶接部で176、一般溶接部で144である。

廻し溶接部の脚長の平均値は、主板側で10.0mm、ガセット側で7.0mm、一般溶接部の脚長の平均値は、主板側で9.7mm、ガセット側で7.5mmであった。廻し溶接部の曲率半径の平均値は、主板側で1.30mm、ガセット側で2.35mm、一般溶接部の曲率半径の平均値は、主板側で1.60mm、ガセット側で2.75mmであった。廻し溶接部の開き角の平均値は、主板側で145度、ガセット側で137度、一般溶接部の開き角の平均値は、主板側で135度、ガセット側で128度であった。

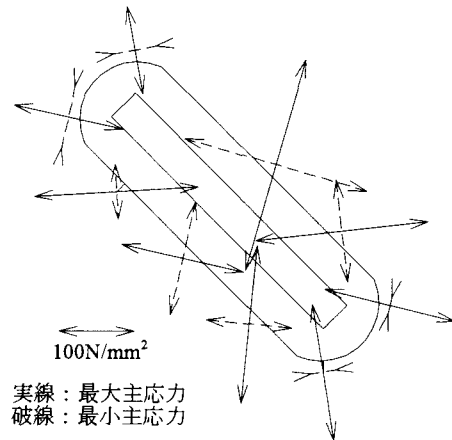
3.4 溶接残留応力の測定

溶接部近傍に3軸のひずみゲージ（ゲージ長：1mm）を貼付し、試験体を切断することによって解放されるひずみから残留応力を測定した。ゲージは溶接止端から3mm離れた位置に貼付している。ひずみゲージの貼付位置と試験体の切断位置を図-6に示す。

解放ひずみの測定結果より求めた残留応力の主応力（残留主応力）の大きさと方向を図-7に示す。廻し溶接部の残留最大主応力は平均で150N/mm²程度、一般溶接部中央の残留最大主応力は平均で250N/mm²程度であった。また、廻し溶接部の残留最小主応力はすべて圧縮であるのに対し、一般溶接部の残留最小主応力はすべて引張と



(a) 表面



(b) 裏面

図-7 残留応力測定結果

なっている。なお、この傾向は本研究で用いた試験体に対して得られたものであり、一般的なウェブガセットにおいても同様な傾向が得られるかは不明である。

4. 応力測定試験

4.1 試験方法

2軸疲労試験機の2つアクチュエータに位相差 π を与えて載荷した時の溶接止端部近傍の主応力の大きさと方向の変化を調べる目的で、3軸のひずみゲージ（ゲージ長：1mm）を用いて応力測定試験を行った。ひずみゲージの貼付位置を図-8に示す。ひずみゲージの貼付は溶接止端から3mm離れた位置に行った。8箇所のゲージ貼付位置には図-8に示すようにA～Hの記号をつけている。

この試験では静的載荷と動的載荷を行っている。静的載荷では、x方向応力 S_x を120N/mm²でy方向応力 S_y を0、 S_y を120N/mm²で S_x を0、そして S_x と S_y を120N/mm²とした3つの条件で行った。動的載荷では、位相差 π で S_x と S_y の最大応力を120N/mm²、最小応力を0としている。繰返し速度は1.5Hzである。

4.2 測定結果

図-9 (a), (b)に1軸載荷時の主応力図を示す。なお、ここに示している主応力の大きさと方向は試験体表裏面

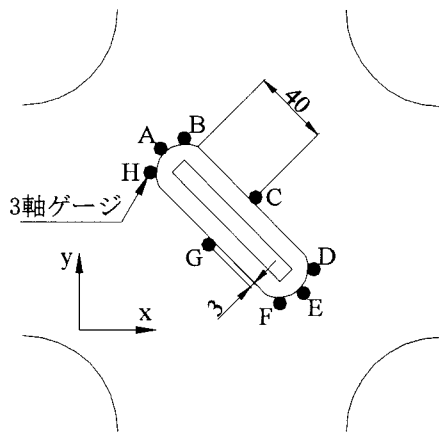
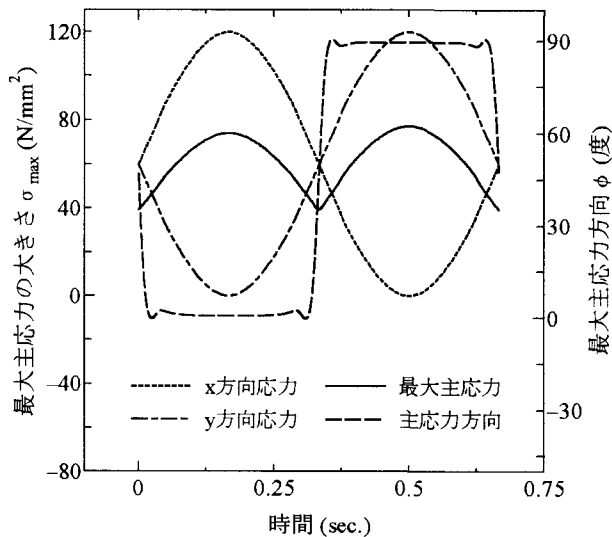
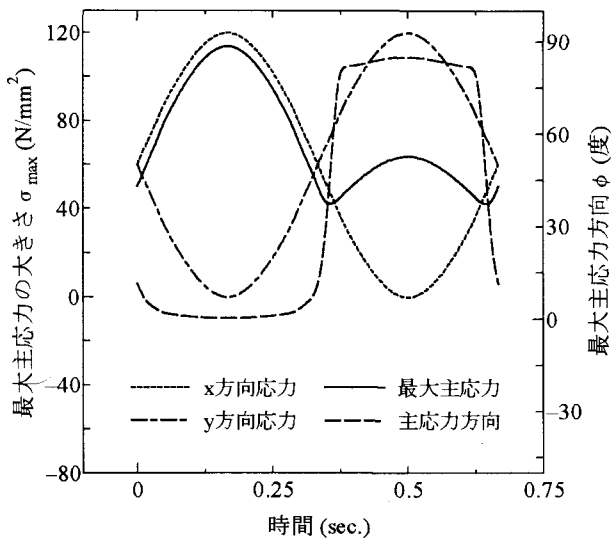


図-8 応力測定用ひずみゲージ貼付位置



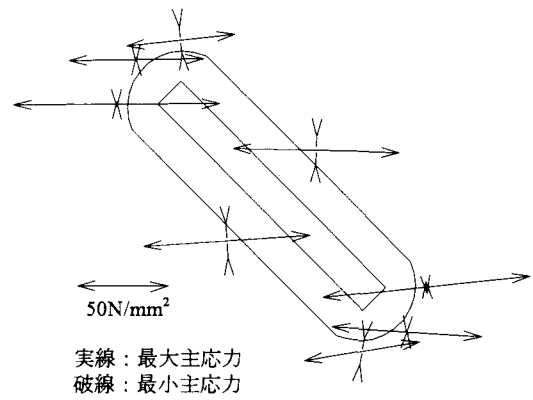
(a) A 点



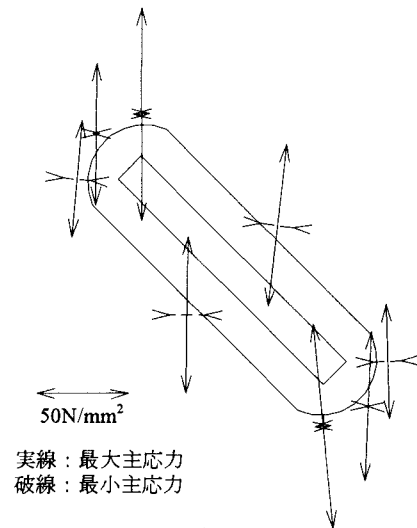
(b) H 点

図-10 主応力の大きさと方向の変化

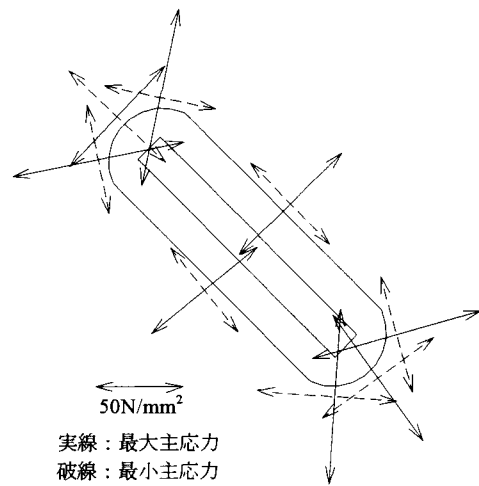
の平均値である。当然のことではあるが、最大主応力の方向はすべて荷重の載荷方向となっている。最大主応力は廻し溶接部の測定点 B, D, F, H で大きく、その値は 115N/mm^2 程度となっている。位相差 π を与えた状態では、



(a) $S_x = 120\text{N/mm}^2$



(b) $S_y = 120\text{N/mm}^2$

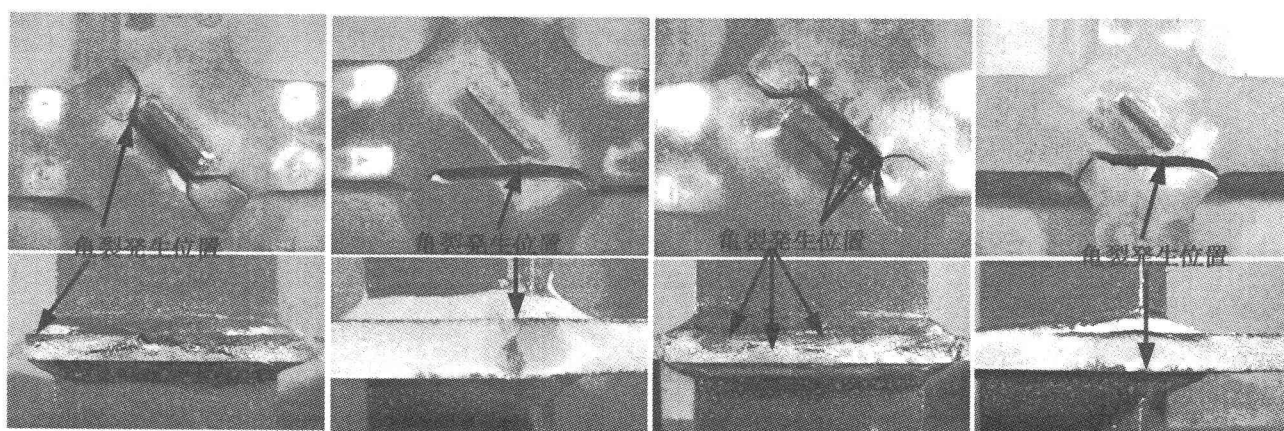


(c) $S_x = S_y = 120\text{N/mm}^2$

図-9 応力測定試験結果

図-9 (a), (b) に示す 2 つの応力状態が交互に生じることになる。

2 軸載荷時 ($S_x = S_y = 120\text{N/mm}^2$) の主応力图を図-9 (c) に示す。A 点を除く測定点の最大主応力は、廻し溶接部、一般溶接部によらずほぼ溶接ビードに対して垂直となっているような傾向が認められる。また、廻し溶接部中央



(a) 位相差 $\pi-1$ (b) 位相差 $\pi-2$ (c) 位相差 0 (d) 1 軸
写真-1 疲労亀裂の発生・進展状況

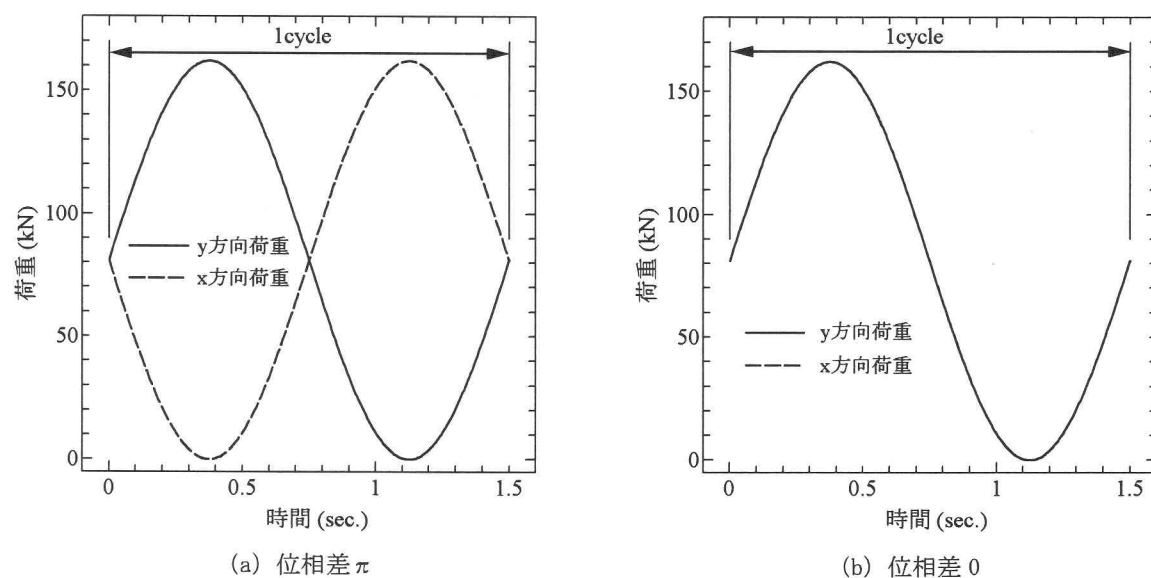


図-11 荷重入力波形

の主応力方向はほぼ 45 度となっている。なお、A 点と E 点では、最大主応力と最小主応力の大きさがほぼ同じとなっている。廻し溶接部 B, D, F, H 点の最大主応力は 100N/mm^2 程度と、1 軸戴荷時の値 (115N/mm^2) に比べて小さくなっており、他の測定点の最大主応力 (約 80N/mm^2) に近い値となっている。また、すべての測定点で最小主応力は引張となり、その値は 70N/mm^2 程度である。

動的試験でのひずみ測定結果から求めた廻し溶接部中央 A 点と廻し溶接端部 H 点の主応力の大きさや方向の変化を図-10 に示す。いずれの点でも、位相差 π とすることにより、主応力の方向が約 90 度変化していることがわかる。

5. 疲労試験

5.1 試験方法

疲労試験は、動的能力 $\pm 200\text{kN}$ の 2 軸疲労試験機に設置されている 2 本のアクチュエータに位相差 π を与えた繰返し引張荷重下で行った。比較のために、位相差 0 の

2 軸疲労試験と 1 軸疲労試験も行った。繰返し荷重は、下限荷重を 5kN (下限応力: 4.6N/mm^2) とし、上限荷重を応力範囲 (戴荷荷重を $120\text{mm} \times 9\text{mm}$ で除した値) が 150N/mm^2 となるように設定した。位相差 π と 0 における荷重入力波形を図-11 に示す。疲労試験に供した試験体数は、位相差 π で 6 体、位相差 0 で 5 体、1 軸で 3 体である。

疲労試験で使用した 2 軸疲労試験機の試験フレームと台座の間にはベアリングが設置されているため、繰返し速度の増加に伴い試験体に生じるひずみの大きさが変化する可能性がある。そのため、既報⁵⁾での検討結果を参考に繰返し速度は 1.5Hz とした。ただし、1 軸疲労試験では $5 \sim 6\text{Hz}$ とした。

5.2 疲労亀裂の発生・進展性状

写真-1 (a), (b) に位相差 π で疲労試験を行った試験体で観察された疲労亀裂発生位置と進展経路の例を示す。破壊形態は 2 パターンあった。1 つのパターンは、廻し溶接部から発生した亀裂が、進展直後に 2 方向に分かれ

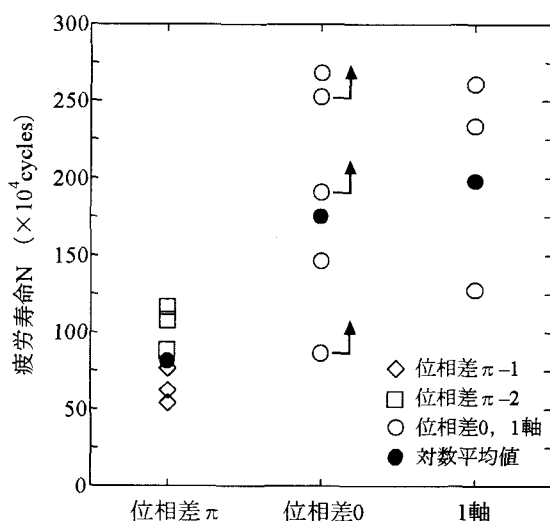


図-12 疲労試験結果

一方の亀裂がそのまま進展して破断に至るものである（写真-1 (a)）。もう1つのパターンは、1つ目と同じ廻し溶接部から発生した亀裂が一方の荷重の戴荷方向と直角に進展し、破断に至るものである（写真-1 (b)）。これらの亀裂発生位置は、図-9に示した最大主応力の値が最大となった箇所（B、D、F、H点）とほぼ一致している。なお、6体の試験体の内、パターン1の破壊形態が見られたものが3体、パターン2の破壊形態が見られたものが3体であった。

B、D、F、H点に生じる最大主応力はほぼ同じであることから、未破断側の廻し溶接部にも亀裂が発生する可能性がある。そこで、未破断の溶接止端部を磁粉探傷試験により検査し、亀裂の有無を調べた。その結果、6体すべての試験体で未破断の廻し溶接部で疲労亀裂が検出された。

位相差0で疲労試験を行った5体の試験体のうち3体はチャック部から破断した。チャック部で破壊が生じた場合には、その時点で試験を終了した。写真-1 (c)は、溶接止端部から破断した試験体の亀裂発生位置と破面を示している。疲労亀裂は廻し溶接端部から発生し、一般溶接部中央付近で発生した亀裂と合体して破断に至っている。

写真-1 (d)に、1軸の疲労試験で得られた試験体の破断位置と破面を示す。疲労亀裂は、通常の面外ガセット溶接継手試験体と同様に、荷重の戴荷方向と直角に発生し、直線的に進展した後破断に至っている。

5.3 疲労試験結果

疲労試験結果を図-12に示す。なお、疲労寿命は試験体が破断するまでの繰返し数と定義する。位相差 π の疲労試験結果は破壊起点に応じてマークを変えている。写真-1 (a)の破壊形態を示した試験体の疲労寿命は写真-1 (b)の破壊形態を示した試験体の疲労寿命よりも短いものの、顕著な差は認められなかった。各試験条件での疲労寿命の平均値は、位相差 π で約81万回、位相差0で

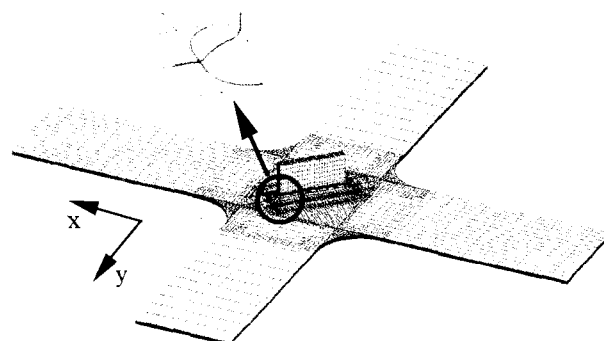


図-13 要素分割図

175万回以上、1軸で約198万回である。なお、位相差0の疲労寿命の平均値が175万回以上と記したのは、チャック部から破断した試験体の疲労寿命も含めているためである。1軸疲労試験で得られた疲労寿命と比較すると、位相差 π の疲労寿命は1軸の約0.41倍、位相差0の疲労寿命は1軸の0.88倍以上（チャック部から破断した試験体を除いた場合1.00倍）である。このように、位相差 π での疲労寿命は、最大主応力の大きさが同じとなる1軸の疲労寿命よりも短い。このことは、主応力の方向が変化することによって疲労寿命が減少することを意味している。

6. 応力解析

6.1 解析方法

破壊起点となった溶接止端部近傍の応力性状を詳細に調べる目的で、8節点固体要素を用いた3次元有限要素応力解析を行った。解析対象は疲労試験に用いた面外ガセット溶接継手試験体である。解析では、試験体の対称性（試験体上下）を考慮して1/2モデルを用いた。溶接部は、3章の測定結果を基に、主板側の脚長を10mm、曲率半径を1.3mm、開き角を145度、ガセット側の脚長を7mm、曲率半径を2.4mm、開き角を137度と設定することによりモデル化した。着目点である溶接止端部近傍の要素寸法は0.05mmである。要素分割図を図-13に示す。

主板コーナー部には、疲労亀裂の発生を防止する目的で半径50mmのフィレットが設けられている。そのため、主板端部に与えた応力の20%以上がフィレットを介して側方に流れ、また溶接止端形状に起因する応力集中により、試験体の公称応力を求めることは困難である。そこで、解析結果の整理においては3章で示したガセット板を取り付けていない主板のみのモデル（平板モデル）を対象とした解析で得られた応力を基準とした。

6.2 応力測定試験結果との比較

解析条件の妥当性を確認する目的で、ひずみゲージの貼付位置に相当する節点の最大主応力の大きさと方向を求め、2軸荷重戴荷時（ $S_x = S_y = 120 \text{ N/mm}^2$ ）の応力測定試験結果と比較した。その結果を図-14に示す。なお、こ

表-2 最大主応力と主応力範囲 ($S_x, S_y=150\text{N/mm}^2$)

	最大主応力 $\sigma_{\max}$ (N/mm^2)	主応力範囲 $\Delta \sigma_p$ (N/mm^2)
位相差 π	236.0	280.8
位相差0	193.0	193.0
1軸	236.0	236.0

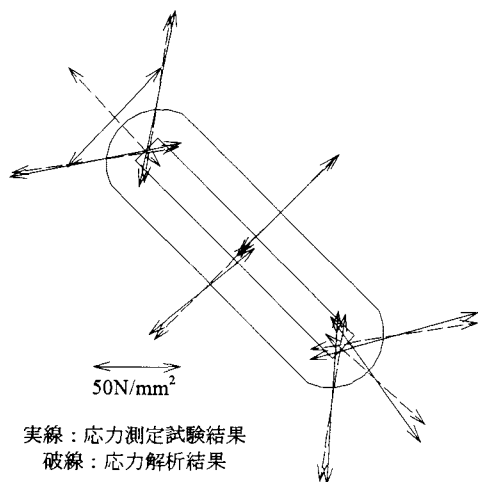


図-14 実験結果と解析結果の比較

ここで示す実験値は試験体表裏面の平均値である。上部の廻し溶接部中央では、解析から得られた最大主応力が実験結果と直交している。これは、先述のようにこの部分の最大主応力と最小主応力がほぼ等しいためであり、主応力の大きさはほぼ一致している。他の点での解析結果は、主応力の大きさ・方向とも実験結果とよく一致している。

6.3 解析結果

廻し溶接部中央からもう一方の廻し溶接部中央までの溶接止端に沿う（図-15 中の図参照）最大主応力の分布を図-15 に示す。図の縦軸は、試験体モデルより得られた最大主応力を平板モデルで得られた最大主応力で除すことにより求めた無次元応力である。図中の①と⑥は廻し溶接部中央、③と④は廻し溶接端部、②と⑤は廻し溶接部中央と端部の中央を示している。1 軸応力状態での無次元応力は②と⑤で最大 (1.97) となっている。なお、先述のように位相差 π の応力分布は、2 つの 1 軸状態 ($S_x=150\text{N/mm}^2$, $S_y=150\text{N/mm}^2$) の応力分布をそれぞれの大きさを考慮して重ね合わせるにより求められ、最大の無次元応力の値とそれが生じる位置は 1 軸状態のものと一致する。位相差 0 の場合の無次元応力は③、④付近で最大 (1.96) となっている。さらに、一般溶接部中央付近にも高い応力集中 (1.78) が生じている。これらの高い応力集中発生位置は、5 章で示した疲労亀裂の発生位置と対応している。

図-16 は座標軸 s に沿う最大主応力の分布を示してい

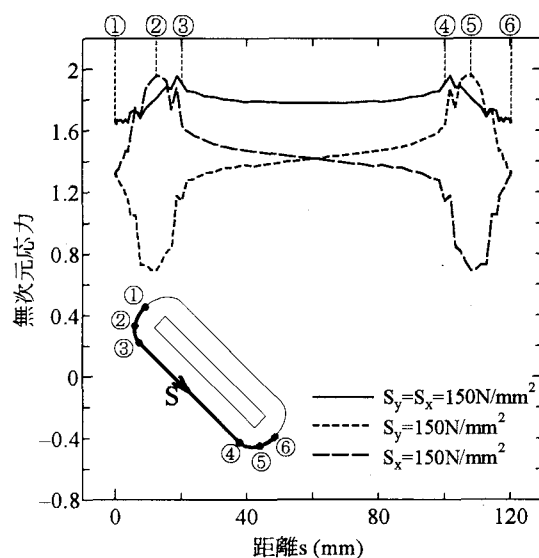


図-15 無次元応力の分布

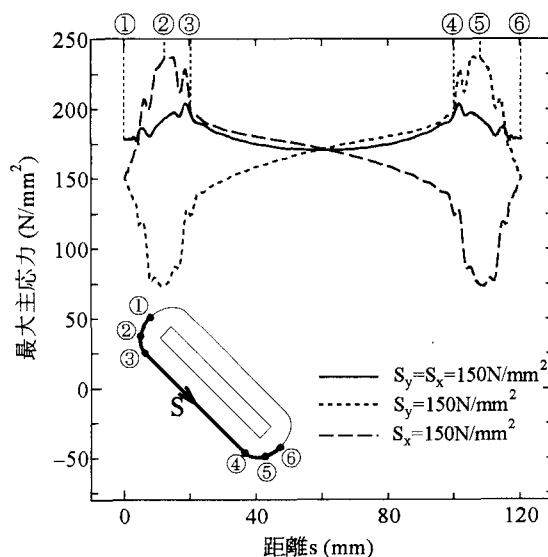


図-16 最大主応力分布

る。1 軸応力戴荷時および 2 軸応力戴荷時において最大主応力が最大となる位置は、図-15 に示した応力集中の高い位置と一致している。

7. 主析ウェブ溶接部の疲労強度評価

疲労試験では、主応力方向が変化することにより疲労寿命は半減した。したがって、単に最大主応力を用いて疲労寿命あるいは疲労強度を評価することはできない。ここでは、主応力方向変化の影響を評価するためのパラメータとして、亀裂発生位置での主応力範囲 $\Delta \sigma_p$ を考えた。主応力範囲 $\Delta \sigma_p$ とは最大主応力と最大主応力方向の最小応力との差である。各試験条件で求めた最大主応力と主応力範囲を表-2 に示す。なお、これらの値は、 S_x, S_y を 150N/mm^2 として前節で示した応力解析から求めたものであり、応力集中を含んでいる。主応力範囲 $\Delta \sigma_p$ は、位相差 π で 280.8 N/mm^2 、1 軸で 236.0N/mm^2 となってい

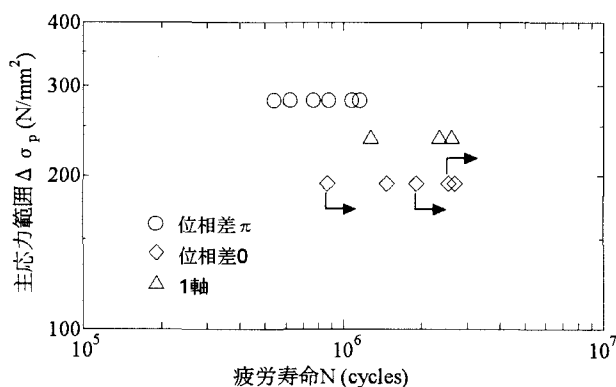


図-17 主応力範囲で整理した疲労試験結果

る。主応力範囲で整理した疲労試験結果を図-17に示す。疲労寿命が応力範囲の3乗に反比例するとすれば、位相差 π での疲労寿命は1軸の0.59倍となる。これは、実験より得られた寿命比0.41とほぼ対応する。位相差0での主応力範囲は 193.0N/mm^2 であり、同様に1軸との寿命比を計算すると1.83となる。実験から得られた寿命比は0.88以上であった。位相差0で疲労試験を行った5体のうち3体はチャック部で破壊していることを考慮すれば、妥当な結果とも考えられる。

この主応力範囲の概念を主桁ウェブに取り付けられたガセット溶接部の疲労強度評価に適用することを考えた。図-18は、曲げ応力を基準として、最大主応力 $\sigma_{\max}$ 、最大主応力方向の最小応力 $\sigma_{\min}$ 、主応力範囲 $\Delta\sigma_p$ とせん断応力 τ と曲げ応力 σ の比 τ/σ との関係を示したものである。なお、最大主応力方向の最小応力 $\sigma_{\min}$ は、モールの応力円を用いて求めた。 $\tau/\sigma \leq 0.87$ の領域では、 $\sigma_{\min}$ が正の値を有している。そのため、除荷状態を考慮すればこの領域での主応力範囲は最大主応力と一致する。 $\tau/\sigma > 0.87$ の領域では、 $\sigma_{\min}$ が負の値を持つため、主応力範囲は最大主応力よりも大きくなっている。例えば、 $\tau/\sigma = 1.5$ での主応力範囲は曲げ応力 σ の3倍、また最大主応力の1.5倍となっている。したがって、せん断応力が卓越するような部位については、主応力方向の変化により疲労寿命が大きく低下するものと考えられる。しかし、本研究で対象としている桁橋の支間中央に位置するウェブガセット溶接部について、市販の設計ソフトを用いて計算した曲げ応力とせん断応力の比 τ/σ は、支間20m程度でも0.7程度であった。したがって、従来から提案されている^{13), 14)}ように、通常の桁橋の支間中央のウェブガセット溶接継手部については評価応力として最大主応力を用いればよいと考えられる。

日本道路協会の「鋼道路橋の疲労設計指針」¹⁵⁾では、主桁ウェブとフランジの溶接線の交差を避けるためにウェブに設けられるスカラップ溶接部の疲労強度等級をせん断応力 τ と曲げ応力 σ の比により変えている。具体的には、 $\tau/\sigma < 0.4$ でG等級(200万回疲労強度 50N/mm^2)、 $\tau/\sigma \geq 0.4$ でH等級(40N/mm^2)としている。これはせん断によりスカラップ部のフランジに板曲げ応力が生じることを考慮したものである。ここでは、主応力方向の

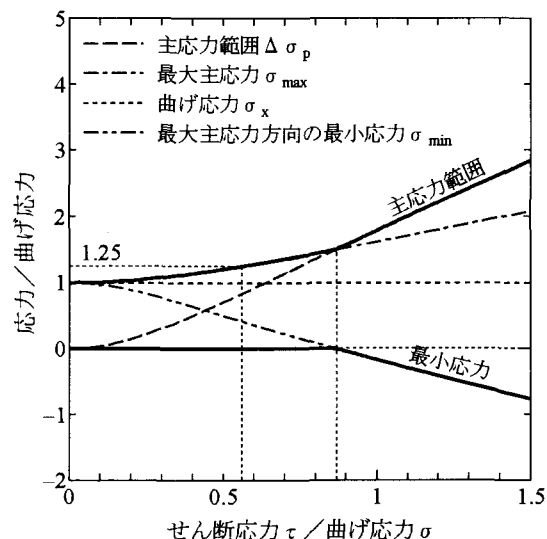


図-18 主応力範囲と τ/σ の関係

変化により主応力範囲が増加することを考慮し、スカラップ部と同様に疲労強度等級を変えることを考えた。「鋼道路橋の疲労設計指針」では、ウェブガセット部の疲労強度等級をG等級(200万回疲労強度 50N/mm^2)と定められている。これより1ランク低いH等級(40N/mm^2)を採用することは、応力範囲が1.25倍になることに対応する。 τ/σ が0.56程度となったときに主応力範囲は曲げ応力の1.25倍となっている。このことから、主桁ウェブに取り付けられたガセット溶接部の疲労強度等級を、スカラップ溶接部と同様に $\tau/\sigma < 0.4$ でG等級、 $\tau/\sigma \geq 0.4$ でH等級とすることを提案する。

ただし、ここでの提案は、主応力方向により疲労亀裂の発生位置が変化するが、その位置での応力集中係数は等しいとの仮定に基づいたものである。

8. まとめ

本研究では、主桁ウェブに取り付けられた面外ガセット溶接継手部の疲労強度に対する主応力方向変動の影響を明らかにする、またその際の疲労強度評価について検討する目的で、付加板を45度方向に取り付けた面外ガセット溶接継手試験体を用いた疲労試験と応力測定試験、有限要素応力解析を行った。本研究の主な成果は以下の通りである。

- (1) 2軸疲労試験機に設置されている2本のアクチュエータの荷重波形に位相差を与えることにより、主応力方向が変化する応力場を再現した。
- (2) 主応力方向変化の影響は、亀裂発生位置での最大主応力とその方向の最小応力の差(主応力範囲)で整理できることを示した。
- (3) 主桁ウェブに取り付けられたガセット溶接部の疲

労強度等級を、せん断応力 τ と曲げ応力 σ の比 τ/σ によって変えることを提案した。具体的には、「鋼道路橋の疲労設計指針」で定められているスカルップ溶接部と同様に、 $\tau/\sigma < 0.4$ でG等級、 $\tau/\sigma \geq 0.4$ でH等級とすることを提案した。

謝辞：試験体の製作については、(株)東京鐵骨橋梁技術研究所の田中雅人副所長にお世話になった。ここに記して、深謝致します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂，1993.
- 2) 高橋一比古，高田篤志，秋山繁，牛嶋通雄，前中浩：2軸繰返し荷重下における角廻し溶接の疲労挙動，日本造船学会論文集，第184号，pp.321-327，1998.
- 3) I. Takahashi, M. Ushijima, A. Takada, S. Akiyama and H. Maenaka: Fatigue behaviour of a box-welded joint under biaxial cyclic loads, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 22 (10), pp.869-877, 1999.
- 4) 高橋一比古，高田篤志，秋山繁，牛嶋通雄，前中浩：2軸繰返し荷重下における角廻し溶接の疲労挙動（第2報），日本造船学会論文集，第188号，pp.559-607，2000.
- 5) 平山繁幸，森猛：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，土木学会論文集，No.745/I-65，pp.121-130，2003.
- 6) 山田健太郎，金仁泰，伊藤健一：作用応力に斜めの荷重非伝達型リブ十字すみ肉溶接継手の疲労挙動，土木学会論文集，No.682/I-62，pp.383-390，2001.
- 7) 山田健太郎，加藤秀一郎，岡部篤紀，金仁泰，小塩達也：作用応力に斜めに溶接された面外ガセット継手の疲労試験，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1039-1045，2001.
- 8) 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.
- 9) 山田聡，高松大輔，山田健太郎，池田博之：波形鋼板ウェブの現場突合せ溶接継手の疲労強度，土木学会論文集，No.724/I-62，pp.115-126，2003.
- 10) 金仁泰，山田健太郎：モードⅠとモードⅢの組合せ応力下における内部貫通亀裂の疲労寿命の推定，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1029-1038，2001.
- 11) 金仁泰：組合せ応力下における溶接継手の疲労き裂進展寿命解析法，鋼構造論文集，第9巻，第36号，pp.9-18，2002.
- 12) 金仁泰，山田健太郎：組合せ応力下における溶接継手の疲労寿命評価，土木学会論文集，No.745/I-65，pp.65-75，2003.
- 13) 坂野昌弘，宝角正明，下良利成，三上市蔵：主桁－横桁接合部ウェブガセット溶接継手の長期疲労強度，鋼構造論文集，第5巻，第18号，pp.31-40，1998.
- 14) 町田文孝，三木千壽，吉岡昭彦：主桁ウェブ貫通型横桁取り合い部の疲労特性，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.349-357，1999.
- 15) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2003.

(2004年9月17日受付)