

## 面外ガセット溶接継手の曲げ疲労強度に及ぼすショットブラストの影響

Influence of shot blasting on fatigue strength of out-of-plane gusseted specimens under bending

山田健太郎\*, 小塩達也\*\*, 鳥居 詳\*\*\*, 白 彬\*\*\*\*, 佐々木 裕\*\*\*\*\*, 山田 聡\*\*\*\*\*  
Kentaro Yamada, Tatsuya Ojio, Akira Torii, Biehn Baik, Yu Sasaki and Satoshi Yamada

\*Ph.D., 名古屋大学教授, 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*工博, 名城大学助教 (講師), 理工学部環境創造学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

\*\*\* (前) 名古屋大学, 工学部社会環境工学科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*\*名古屋大学, 環境学研究科都市環境学専攻博士課程後期課程 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*\*\*名古屋大学, 環境学研究科都市環境学専攻博士課程前期課程 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*\*\*工博, トピー工業 (株), 技術研究所 (〒441-8510 愛知県豊橋市明海町 1)

Shot blasting is usually used for surface preparation for paint of steel members. The method is also used to improve fatigue strength of machine components such as gears or shafts. Fatigue tests were carried out on out-of-plane gusseted specimens in bending. The specimens were tested with or without the shot blasting. Surface residual stress was measured by X-ray diffraction analysis at surface of flat portion as well as weld toe of the shot-blasted specimens. It was found that residual stress at the weld toe, which is normally high in tension, was decreased or turned into compression due to the shot-blasting. The test results showed that the fatigue life of the shot-blasted specimens was longer, when the tests was carried out in stress ratio,  $R = -1$ .

*Key Words: fatigue, shot blasting, residual stress, out-of-plane gusset,*

キーワード: 疲労, ショットブラスト, 残留応力, 面外ガセット継手

## 1. はじめに

すみ肉溶接止端部から発生する疲労き裂に対する疲労強度向上法として, 例えば①溶接止端のグラインダー仕上げ, ②ピーニング処理, ③UIT 処理(超音波衝撃処理), ④特殊な溶接棒の使用, ⑤TIG ドレッシング, などが提案され, 一部は実務でも使われている<sup>1,2,3)</sup>. 疲労強度向上のメカニズムは, 例えば, ①, ②, ⑤は, 溶接止端の形状改善による応力集中の緩和を利用するもので, ②, ③は, それに加えて溶接止端部へ圧縮残留応力を導入する効果を利用する. また, ④は, 低温域に変態点のある特殊溶接棒で圧縮残留応力を導入するものである<sup>4)</sup>. いずれの方法も疲労き裂の発生が懸念される部位への局部的な加工であり, 大幅な構造改変を必要としないという利点がある. しかしながら, 既設橋梁への施工に際し, 施工費用に対する効果の保証, 供用によって既に生じているかもしれない微小なき裂への効果の有無など, 今後検討すべき課題も多い.

歯車や回転軸といった機械類の母材表面の疲労強度を向上させる方法に, ショットピーニングという手法が採用されることがある. これは, 小さな鋼球を高速で被施

工体に衝突させ, 表面に塑性変形を生じさせることで圧縮残留応力を付加するものである. この方法は, 鋼橋塗装時の素地調整に用いられるショットブラストと同様の作業である. 鋼橋の場合, 疲労で問題になる溶接止端部にはショット材が到達するかどうか不明で, ショットブラストが溶接止端部の疲労強度に対してどのような効果があるのかは明らかにされてこなかった.

本研究では, 鋼床版のデッキプレートにすみ肉溶接された垂直補剛材の疲労き裂を検討するために, 面外ガセット溶接継手を用いた板曲げ疲労試験を行った. この実験では, 最初, 疲労試験体の表面処理のために塗装の素地調整で用いられるショットブラスト処理を行なって, 応力比  $R = -1$  の両振りの板曲げ疲労試験を行った. その結果, 疲労き裂の発生, 進展挙動が溶接のまま (通常高い引張残留応力が存在する) の場合と大きく異なった結果が得られた. そこで, 板曲げ疲労試験機を改造して, 応力比を  $R > 0$  の片振りに変える実験を行い, 溶接止端近傍の残留応力や表面残留応力が疲労挙動に与える影響を検討した. さらに, ショットブラストによる板表面と溶接止端の残留応力を, X線回折法によって測定して, その影響を考察したので報告する.

## 2. 疲労試験の方法

### 2.1 疲労試験体の概要

本研究で用いた面外ガセット溶接継手の疲労試験体を図-1に示す。これは、鋼床版のデッキプレートとを想定した板厚12mm、幅300mmの鋼板に、箱桁ウェブの垂直補剛材を想定した12mmの鋼板をすみ肉溶接で接合したものである<sup>12)</sup>。材料はSM490Aであり、溶接はCO2半自動溶接を用いた。溶接脚長は6mmで、ガセット端では、すみ肉溶接を回し溶接した。図-2に実構造と試験体の曲げ変形の概念図を示す。輪荷重により鋼床版デッキプレートが下方にたわみ、ウェブおよび垂直補剛材を固定端として板曲げ変形が生じる。試験体は図中左の固定端部がウェブ位置に相当している。用いた疲労試験体の疲労き裂の発生・進展状況は、実際に鋼床版箱桁橋で生じた垂直補剛材上端の疲労き裂の状況をよく再現できていることが確認されている<sup>12)</sup>。

試験体は、2回に分けて製作した。最初の試験体には、溶接施工後、ショットブラスト処理を行なった。ショットブラスト処理の仕様を表-1に示す。使用したブラスト機は、搬送台車で製品をブラスト室内に送り込み往復させるライン式で、鋼橋の部分品の素地調整に実際に使用するものと同じ形式である。研掃材(ショット材)および

び除錆度(JIS Z 0313-1998に規定される素地調整用ブラスト処理の基準)について、鋼橋製作時の素地調整とほぼ同じになるように設定し、処理を行った。

2回目の試験体では、試験体の製作後、ショットブラスト処理は行なわなかった。ショットブラストの有無による表面の違いを図-3に示す。ショットブラストにより黒皮が除去され、母材部分に凹凸が生じている。一方で、ショット材の径が1.7φであることから、溶接止端部には届かず、疲労強度に影響がある溶接止端部の形状改善には至っていないものと考えられる。

疲労試験を行った試験体は、ショットブラストありの試験体が12体で、そのうち3体を両振りの繰返し荷重で載荷し、残りの9体は片振りの繰返し荷重で試験を行った。ショットブラストなしの試験体は、6体すべてを両振り繰返し荷重で試験を行った。

表-1 ショットブラスト処理の仕様

ブラスト機	新東工業 SNT40ZA2(ライン式)
除錆度	SIS Sa2 <sup>1/2</sup>
研掃材	スチールショット, JIS-170(φ1.7) 高度HV 平均ショット410
ラインスピード	6m/分

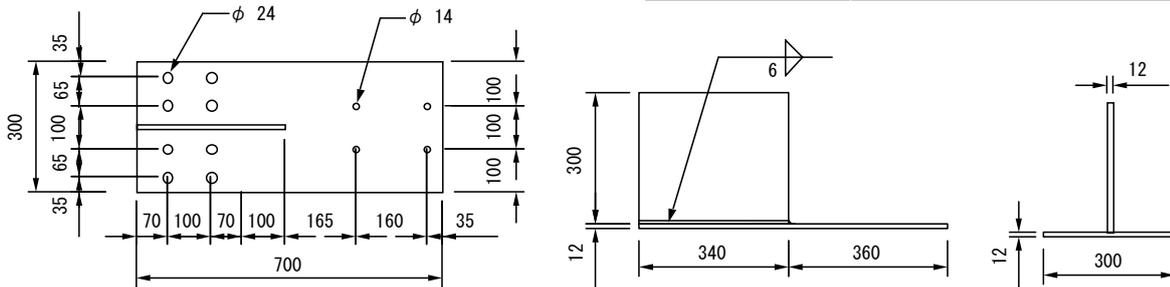


図-1 疲労試験体 (単位: mm)

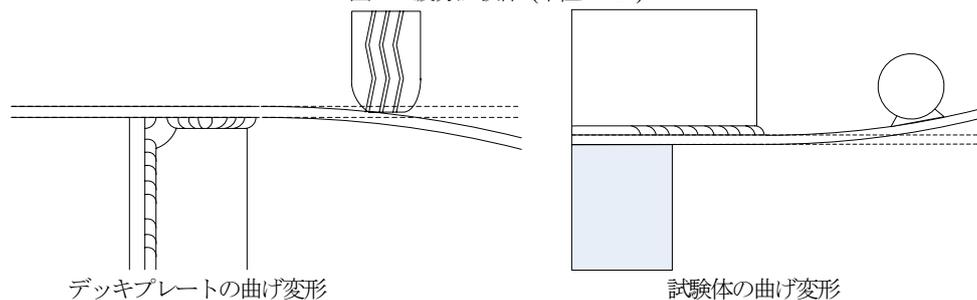


図-2 実際の構造ディテールと試験体の変形



ショットブラストなし(黒皮)



ショットブラストあり

図-3 ショットブラストの有無による回し溶接部表面の比較

## 2.2. 板曲げ振動疲労試験機

本研究では、板曲げ振動疲労試験機を用いて疲労試験を行った<sup>12,14)</sup>。この試験機の概要を図-4に示す。偏心錘をモーターで回転する市販の加振器により試験体に曲げ振動を生じさせることで、比較的高速で安価に板曲げ疲労試験を行うことができる。加振器による試験体の曲げ振動により载荷するため、応力比  $R$  (最大荷重と最小荷重の比) が  $R = -1$  (両振り) となる。

この試験機は、製作当初は溶接により比較的大きな引張残留応力が存在する試験体を対象にして製作された。その後、従来の疲労試験で一般に行われる引張側のみでの载荷、すなわち  $R > 0$  (片振り) が可能なように、試験体に対してコイルばねで予荷重を与え、平均応力を移動させることにより、着目点における繰返し応力が引張側の繰返し応力 (片振り荷重) にできるように改造した。

## 2.3 応力の評価位置、疲労き裂の検出方法

疲労試験体には、図-5に示す位置にひずみゲージおよびき裂検出用の銅線を貼った。まわし溶接止端から12mmの位置を基準に、中央と幅方向に75mm離れた両側にひずみゲージ (ゲージ長1mm) を3枚貼付してひずみを計測した。なお、応力範囲は、幅方向75mmの位置での応力から求めた。なお、本論文では用いていないが、応力集中の確認のため、止端から5mmの位置にもひずみゲージを貼付した。

き裂検出用の銅線には、ポリイミド樹脂被覆銅線 (0.04mmφ) を使い、貼付位置を、①面外ガセットのまわし溶接部止端部、②すみ肉溶接止端の側面、③すみ肉溶接止端より10mm、および20mmの位置とした。それぞれの位置の銅線が疲労き裂により切断された時に疲労試験機が停止するようにした。なお、試験体のき裂進展の段階を载荷開始から、それぞれの位置の銅線が切断されたときの繰返し数を用いて、次のように定義した。

- N<sub>toe</sub> : まわし溶接部止端にき裂が発生した状態
- N<sub>b</sub> : まわし溶接部から母材へき裂が進展し始める状態
- N<sub>10</sub> : 長手方向溶接止端から10mmの位置にき裂が到達した状態、以下、N<sub>20</sub> などとする。

図-6にそれぞれの段階における疲労き裂の様子を示す。

## 2.4 疲労試験の手順

疲労試験は次の手順で行なうこととした。

### 1) 目標荷重の設定

試運転を行い、試験体のひずみを測定し、目標のひずみ量となる振動数とおもりの偏心量を設定する。試験体への過荷重を防止するため、振動数・偏心量とも小さい値から始め、適切な振動数および偏心量を求める。

### 2) ひずみのモニタリング

本試験では、载荷中のひずみ波形を動ひずみ測定

器で記録した。測定器の波形メモリを節約するため、インターバルタイマを用いて2秒間のひずみ波形を一定間隔 (10分~15分間隔) で記録した。

### 3) 破断回数のチェックと試験結果の整理

試験機の断線検出回路に接続した銅線が切れたときの破断回数を記録した。

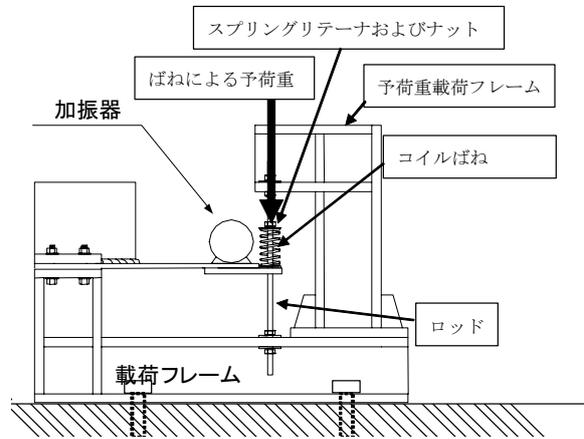


図-4 曲げ振動疲労試験機の概要

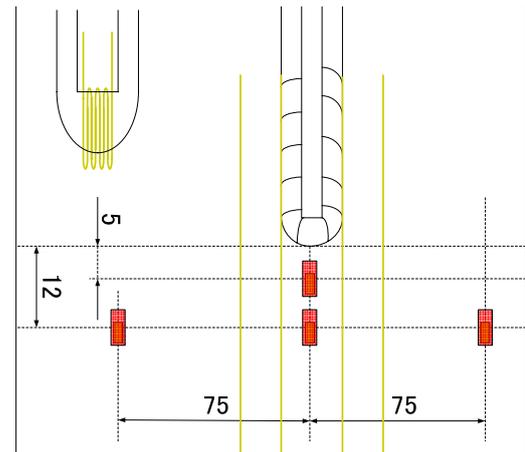


図-5 ひずみゲージおよび被覆銅線の貼付位置

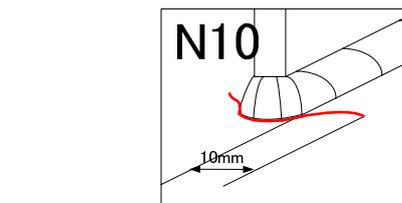
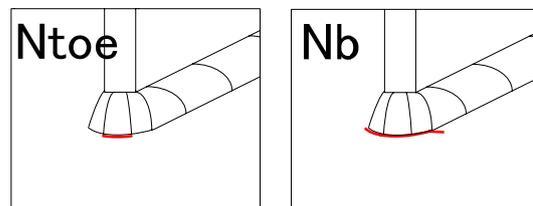


図-6 疲労き裂の進展段階による寿命の定義



図-7 代表的な疲労破面の例

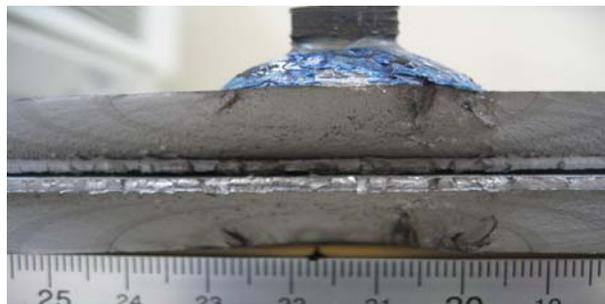


図-8 代表的な疲労破面の例

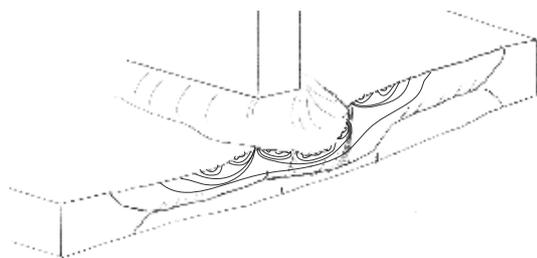


図-9 疲労破面と疲労き裂進展の模式図<sup>15)</sup>

### 3. 疲労き裂の発生と進展挙動

面外ガセット溶接継手の板曲げ疲労試験を行うと、疲労き裂は、ガセットの回しすみ肉溶接の止端部に発生する。止端に貼った銅線が切れるのでそのときの繰返し数を  $N_{toe}$  とした。そのとき、ダイマーキングした試験体の破面観察をすると、回しすみ肉溶接止端に沿って複数個の疲労き裂が発生していることが多い。

その疲労き裂は合体しながら、溶接止端に沿ってガセット部の左右に回りこむように進展する。ある程度すみ肉溶接に沿って進展した疲労き裂は、試験体の幅方向、すなわち止端から離れて進展し始める。このときの繰返し数を  $N_b$  とした。疲労き裂は、その後さらに大きくなり、左右の止端のどちらかのき裂が 10mm の位置の銅線を切ったときの繰返し数を  $N_{10}$  とした。この継手では、このまま載荷すると、このき裂が約 30mm 程度に進展したときに板厚を貫通するき裂となることが多いことが、過去の実験から分かっている<sup>15)</sup>。

図-7、8に、今回の疲労試験と同じ試験体で得られた疲労破面の例と、図-9にそれらを模式的に示した図を示す。すみ肉溶接止端にいくつか発生した疲労き裂が、止端に沿って回り込むように幅方向に進展していること

が分かる。また、板厚方向の進展では、溶接止端から板に垂直方向に進展したき裂がすぐに方向を変えて溶接に潜りこむように、すなわち写真の奥の方向に進展していることがわかる。この段階の疲労き裂進展は、比較的ゆっくりで、そのため、板を貫通することなく、板厚内にとどまる。また、すみ肉溶接を回り込んだき裂とは別に、溶接止端から離れるき裂も観察される。このき裂が 30mm 程度進展したときに、板の反対側の表面から発生した疲労き裂と合体して貫通き裂になった。

なお、今回の疲労試験では、溶接止端から離れて進展した疲労き裂が 10mm になったとき、疲労試験を終了した。そのため、板を貫通するような疲労き裂はみられなかった。

## 4. 疲労試験の結果

### 4.1 疲労き裂の発生寿命、 $N_{toe}$ での比較

この実験では、面外ガセット溶接継手の回し溶接止端に貼った銅線が切れたときの繰返し数を  $N_{toe}$  とした。図-10に  $N_{toe}$  で整理した疲労試験結果の S-N 線図を示す。また、面外ガセット溶接継手と同等の疲労き裂発生・進展挙動を示す垂直補剛材上端部を模した試験体の試験結果<sup>15)</sup>も示す。なお、shot-blasted with pre-loading とあるもの以外は両振り荷重による試験結果である。説明の便宜上、JSSC の疲労強度等級を示す S-N 線図も合わせて示した。

まず、両振り ( $R=-1$ ) で試験した結果では、溶接のまま (as-welded) の試験体 4 体は、ばらつきが大きい、日本鋼構造協会の疲労設計指針 (以下、JSSC) の G~H 等級あたりにデータがばらつく。これは過去の実験値ともほぼ同じであることが分かる。これに比べて、ショットブラスト試験体 (shot-blasted) の 1 体 (1) で示すは、他の試験体と同じような繰返し数で  $N_{toe}$  が得られたが、他の 2 体は  $N_{toe}$  が発現するのがかなり遅い。なお、このうち (1)、(2) の 2 体は、その後 1000 万回以上の繰返し載荷で疲労き裂の進展が見られず、応力範囲を上げて疲労試験を続行した。このことから、as-welded 試験体に比べて、ショットブラスト試験体の両振りのときの  $N_{toe}$  が長かったことが分かる。

ショットブラストが疲労強度向上におよぼす影響としては、①溶接止端部の形状改善による応力集中の緩和、②塑性変形による引張残留応力の低減や圧縮残留応力の付加、が考えられる。本研究でのショットブラスト処理は、黒皮の除去のためのものであり、止端形状の改善は見られない。

ショットブラスト試験体で、コイルばねを用いて予荷重を与えて片振り ( $R>0$ ) にした試験体 9 体については、両振り荷重の場合と異なり、as-welded 試験体と同様な繰返し数で  $N_{toe}$  が観測された。この段階で、疲労き裂が発生する溶接止端部に存在する高い引張残留応力が、ショ

ットブラスト処理により表面だけが小さくなるか、圧縮残留応力となっていることが予想された。

#### 4.2 すみ肉溶接から離れ始めた繰返し数 Nb での比較

図-11には、溶接止端に発生した疲労き裂が止端に沿って進展し、その後すみ肉溶接から離れて進展し始めるときの繰返し数 Nb を S-N 線図上で比較した。Nb に相当する繰返し数は、過去の実験では注目しておらず、比較は今回の実験のみである。

まず、as-welded 試験体と片振り (R>0) で载荷したショットブラスト試験体を比較する。応力範囲が低い as-welded 試験体の方が少し長い寿命を示しているが、ショットブラスト試験体の延長上に as-welded 試験体のデータがあることがわかる。

これに比べて、両振り (R=-1) で試験したショットブラスト試験体は、応力範囲を上げて疲労試験した試験体 (1), (2) の結果も含めて、明らかに疲労強度が高いことが分かる。

#### 4.3 止端から離れて 10mm 進展した N10 での比較

図-12には、疲労き裂が溶接止端から離れて 10mm 進展したときの繰返し数 N10 で整理した S-N 線図を示す。

まず、過去の実験も含めて、R=-1 で実験した as-welded 試験体と、ショットブラスト試験体で R>0 で実験した試験体は、S-N 線図上でほぼ同じ疲労強度、あるいは S-N 線図の延長上にプロットされていることが分かる。なお、図中に赤線で示したのは、これらの実験値から最小二乗法で求めた平均と平均±2s (s: 標準偏差) に相当する S-N 線図である。これまでと同様、ショットブラスト試験体で R=-1 で試験したものは、前述の S-N 線図と比べて長寿命側にあることが分かる。

#### 4.4 Ntoe を基準とした疲労き裂進展寿命の比較

ショットブラストの疲労き裂の発生・進展に及ぼす影響を、いくつかの疲労き裂進展の段階で再整理してみた。

まず、すみ肉溶接止端に疲労き裂が発生したときの状況は図-10に示した。

つぎに、疲労き裂が止端に発生して銅線が切れた Ntoe から、その疲労き裂が回し溶接を進展する疲労き裂進展寿命、すなわち Ntoe から Nb にいたる繰返し数を比較したのが図-13である。ショットブラストありの両振り荷重による試験体のうち、(1), (2)については、応力範囲が 60MPa, 80MPa を作用させたが、Ntoe 以降のき裂進展が見られなかったため、応力範囲を 160MPa に変更して試験を続行した結果である。ショットブラストを行った両振りの試験体 3 体の Ntoe - Nb 間のき裂進展寿命は、JSSC-D~E 等級付近にある。一方、ショットブラストありの片振り荷重による試験、および as-welded の両振り荷重による試験は、共に JSSC-G~H 等級付近にあり、ショットブラストあり、両振り荷重の試験結果とは疲労強

度等級にして 2 等級程度の強度の違いが確認できる。

同様に、Ntoe から N10 への疲労き裂進展寿命を図-14に示す。図-13と同様にショットブラストあり、両振り荷重の試験体は、その他の試験体とくらべて疲労進展寿命が長いことが分かる。

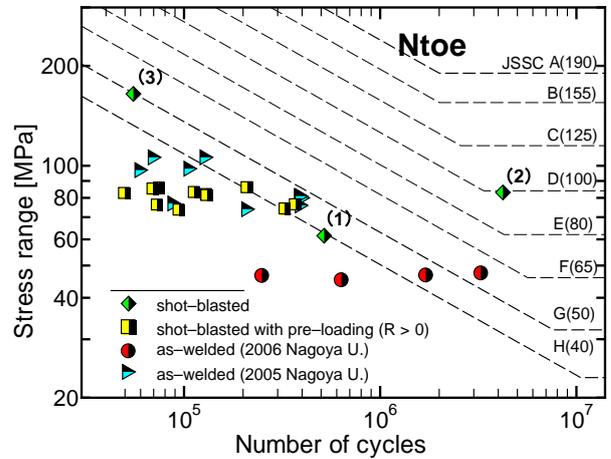


図-10 止端き裂発生時 (Ntoe) で整理した疲労寿命

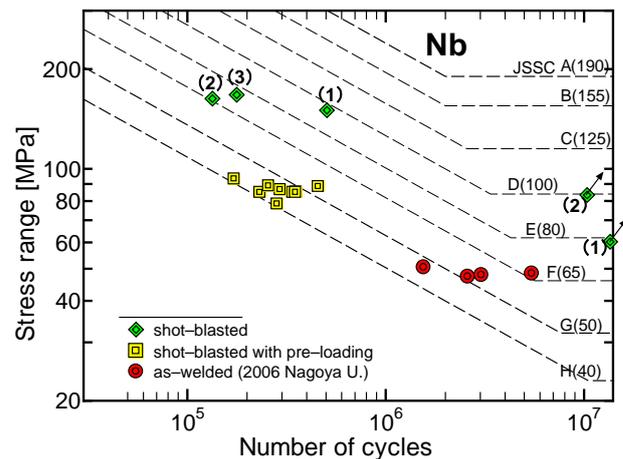


図-11 止端から離れる時 (Nb) で整理した疲労寿命

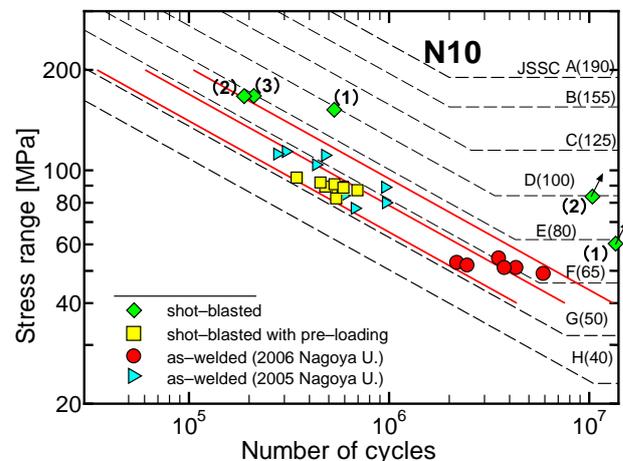


図-12 き裂が 10mm 進展した N10 で整理した疲労寿命

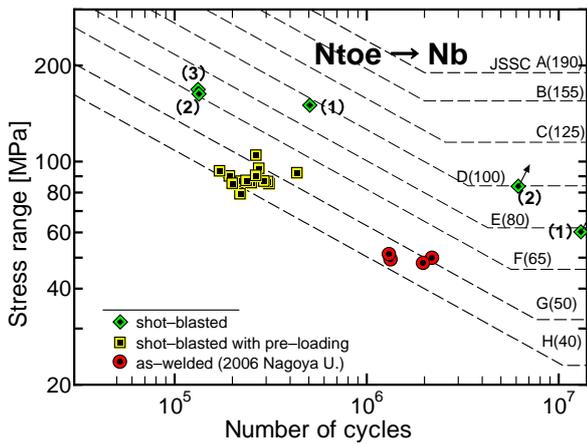


図-13 Ntoe-Nb 間の疲労き裂進展寿命

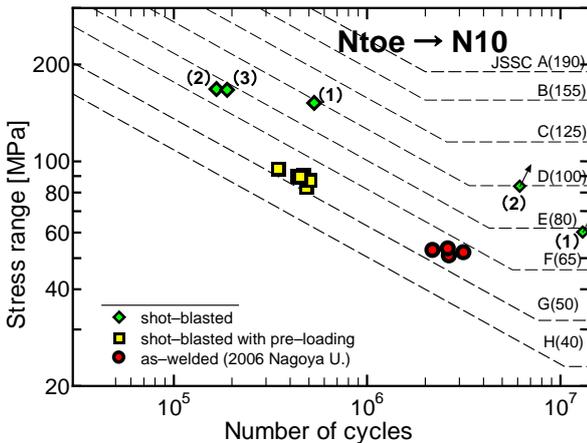


図-14 Ntoe-N10 間の疲労き裂進展寿命

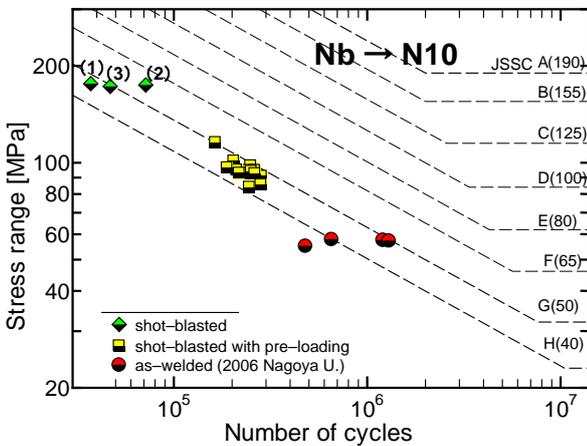


図-15 Nb-N10 間の疲労き裂進展寿命

#### 4.5 Nb から N10 までのき裂進展寿命の比較

疲労き裂がすみ肉溶接止端から離れて母材部分を進展しはじめる Nb から、母材部を 10mm 進展する N10 の間の進展寿命を比較してみる。

図-15 に Nb-N10 間の進展寿命を示す。4.4 での比較と異なり、3 種類の試験条件の間に大きな差は見られず、ショットブラストあり、両振り荷重の結果が若干高い疲労き裂進展強度を示すとどまっている。以上から、ショットブラストの影響が疲労き裂の発生・進展に顕著に

影響するのは、荷重開始から Nb まで、すなわち、き裂発生寿命およびまわし溶接部止端を進展する間であると考えられる。

### 5. X 線回折法による残留応力の測定

#### 5.1 残留応力の測定方法

これまでの疲労試験結果によると、すみ肉溶接の回し溶接止端付近の高い引張残留応力が、ショットブラスト処理により、小さくなるか圧縮になっていることが予想された。これを裏付けるため、X 線回折法による残留応力の測定を行った。

X 線回折法は、被測定体に X 線を入射し、入射 X 線に対する回折 X 線の角度の変化から、鋼材表面の応力を計測するものである。表-2 に測定条件を示す。本測定装置は、照射面積が標準で 4mm×4mm (マスキングによる制御) であり、照射した面積内での平均値が測定される。

今回のショットブラストでは、ショット材が 1.7mmφ の鋼球であり溶接止端には届きにくく、ショットブラストにより与えられる圧縮残留応力は必ずしも母材部と溶接止端部で一致しないと考えられた。さらに、溶接によって溶接止端部に生じる引張残留応力との関係についても調査する必要性が考えられた。そこで、測定対象を①ショットブラスト処理された供試体の母材部、②ショットブラスト処理された供試体の溶接止端付近について残留応力測定を行なった。

母材部は、供試体の母材表裏面をそれぞれ 6 点測定し、平均値を求めた。また、溶接止端付近については、図-16 に示す位置で測定を行った。ガセット部のまわし溶接部の溶接止端付近の 7 点で測定を行った。

#### 5.2 測定結果

残留応力の測定結果を図-17 に示す。母材部の値は 6 点の平均値を示した。また、計測器から出力される信頼限界も合わせて示す。

測定は、2 回に分けて行なった。最初に母材部を測定したが、その結果は平均で -240MPa の圧縮応力が計測された。ショットブラスト処理により、母材表面にかなり大きい圧縮残留応力が発生していることが明らかになった。2 回目は、図-16 に示すように、溶接止端から 40mm 離れた位置から止端近傍に近づく方向で、7 点測定した。その結果、溶接止端に最も近い 1mm の位置での残留応力が約 -40MPa の圧縮であり、溶接止端から離れるに従って圧縮残留応力が大きくなり、40mm 離れた位置では -216MPa となった。この種の継手では、溶接止端付近では、溶接による高い引張残留応力が計測される。この試験体では、表面の残留応力が、ショットブラストによる塑性変形により、圧縮側の値となったものと考えられる。

表-2 X線回折法による残留応力の測定条件

使用機器	株式会社リガク社製 X線応力測定装置 MSF-2M コンピュータ制御方式
管電圧	30KV, 管電流 :10mA
入射方式	平傾法, $\phi$ 一定法(溶接部:側傾法)
$\phi 0$	20~45° (切断後:10~45°, 溶接部:0~24°)
照射面積	標準: 4mm×4mm 止端から1mm: 1mm×4mm (供試体軸方向×直角方向) ※ マスキングによる制御
回折決定	半幅中点法
材料定数	弾性定数: 222000 MPa, ポアソン比: 0.27

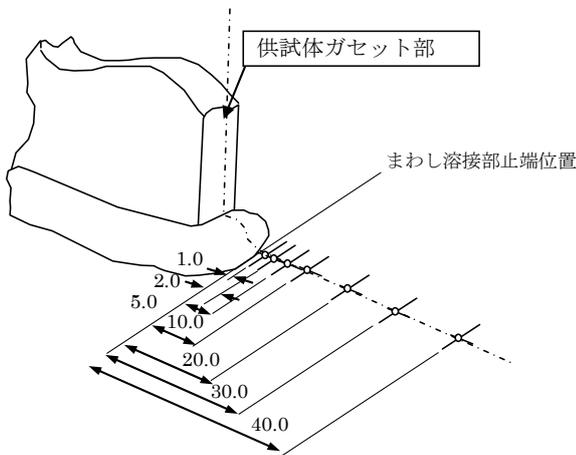


図-16 残留応力の測定位置および測定方法

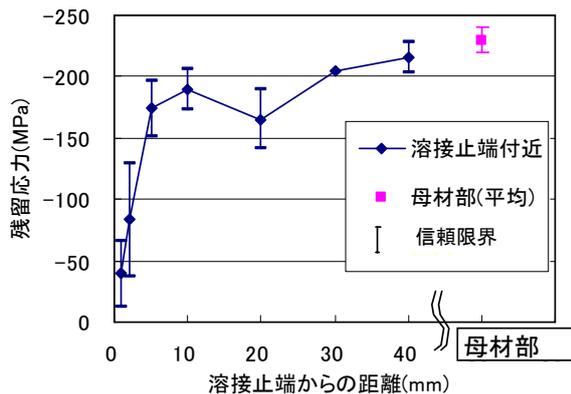


図-17 X線回折法による残留応力の測定結果

### 5.3 残留応力を考慮した S-N 線図

以上から, ショットブラストにより止端付近に圧縮残留応力が付加され, これにより両振り载荷の際には見かけ上疲労強度が向上することが明らかになった. そこで, 圧縮残留応力の付加を考慮した, 両振り荷重の試験結果の S-N 線図を描くことを試みる. ここでは簡易な仮定と

して, 残留応力を 0 とした. つまり圧縮側の応力変動を無視し, 引張側のみが疲労寿命に寄与すると考え, 応力範囲を 1/2 とした. このように残留応力を考慮した S-N 線図を図-18 に示す.

両振り載荷時の圧縮応力側の応力範囲を無視した場合, N10 における疲労強度は, JSSC-G~H 等級となり, 平均疲労強度曲線が F 等級付近となるその他の試験結果よりも低くなった. X 線応力測定の結果を考慮し, もし残留応力が圧縮域にあるとして有効な応力範囲を算定すれば, 設計上は危険側になる.

したがって, 今回のような仕様のショットブラストによる疲労強度向上の効果を期待するのであれば, 溶接後, ショットブラスト後の止端位置での残留応力の状態と, その溶接継手の評価応力との関係についてさらに整理する必要があると考えられる.

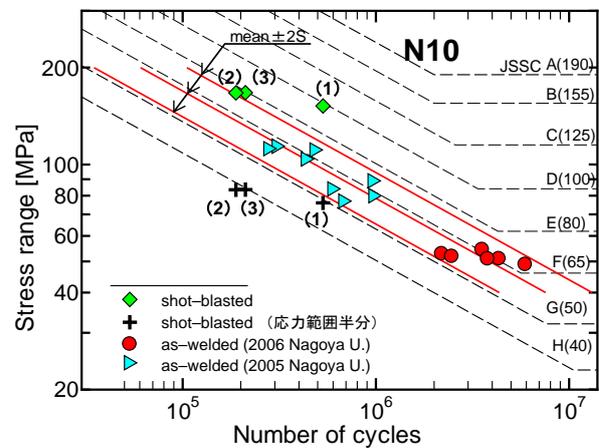


図-18 残留応力を考慮した S-N 線図

## 6. まとめ

本研究では, 塗装の素地調整に用いられるショットブラストを行った面外ガセット試験体に対して板曲げ疲労試験を行い, ショットブラストの有無による疲労強度の違いを, 疲労き裂の進展の各段階について検証した. 疲労試験は, 最初応力比  $R=-1$  (両振り) で行い, その後, 予荷重を与えるシステムを導入して,  $R>0$  (片振り) で試験した. また, X 線回折法による残留応力の測定から, ショットブラストが疲労強度に与える影響を残留応力の観点から検証した. 以下に本研究で得られた知見を述べる. なお, 以下に示す継手の強度等級は, S-N 線図上の比較のために用いていることを付記する.

- 1) ショットブラストを行わない試験体の疲労強度は, 圧縮域も含む両振りの応力範囲で整理したところ, まわし溶接止端中央部から長手方向に 12mm 位置, 幅方向に 75mm 離れた評価位置において, 両振り荷重下では JSSC-G 等級以下の繰返し数で疲労き裂が発生 (Ntoe) した. 疲労き裂が止端から離れて 10mm 程度進展する N10 では, JSSC-G から E 等級の範囲で

あった。これは、荷重範囲が異なる過去の同種の疲労試験結果とほぼ一致している。

- 2) ショットブラストを行った試験体に対して両振りの疲労試験を行い、圧縮域も含む両振りの応力範囲で整理したところ、ショットブラストを行わない試験体よりも疲労強度が高い結果が得られた。たとえば、応力範囲を 60MPa, 80MPa とした 2 体については、同じ応力範囲でのき裂の進展が見られず、応力範囲をそれぞれ 150MPa と 160MPa に変更して载荷を継続したところ、き裂の進展が確認された。応力範囲を 160MPa とした試験体では、N<sub>toe</sub> で JSSC-G, N10 で JSSC-E 等級程度の繰返し数となった。
- 3) ショットブラストありの試験体に予荷重を与え、最小応力を 40MPa, 最大応力を 120MPa (応力範囲 80MPa) とし片振り载荷をおこなったところ、ショットブラストなしの両振り载荷の疲労強度とほぼ一致した。このことから、両振り試験で見られた疲労強度の向上は、ショットブラストによってすみ肉溶接止端まわりの表面の引張残留応力が開放されるか、圧縮残留応力が付加されているためであると考えられる。
- 4) X 線回折法を用いてショットブラスト試験体の平滑部表面の残留応力を測定した結果、-240MPa 程度の圧縮残留応力が発生していることがわかった。また、ガセット端の回し溶接近傍の表面残留応力を測定した結果、母材部で-200MPa, 止端付近で-40MPa 程度の圧縮残留応力が測定された。ショット材が届きにくい止端付近においても、ある程度のショットブラストによる圧縮残留応力の付加効果があると考えられた。
- 5) 鋼構造物の製作では、塗装前の素地調整でショットブラストが行われることが多い。これによって発生する圧縮残留応力が、両振りの板曲げのような場合にある程度の疲労強度の改善効果があることがわかった。この結果がすぐに、疲労設計に反映されるものではないが、今後の研究につながるものと思われる。

## 謝 辞

本研究は、鋼床版のデッキプレートに溶接された垂直補剛材上端の疲労き裂の発生、進展挙動とその対策工法を検討する疲労試験の一部として行ったものである。愛知県道路部、およびパシフィックコンサルタンツ中部支社には、この研究を通じていろいろお世話になった。ここに記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 例えば, Almar-Naess, A.: Fatigue Handbook-Offshore Steel Structures, Tapir, 1985.
- 2) 例えば, Maddox, S. J.: Fatigue Strength of Welded

Structures, Second Edition, Abington Publishing, 1991.

- 3) 例えば, Anami, K. Miki, C. Tani, H. and Yamamoto, H.: Improving fatigue strength of welded joints by hammer peening and TIG-dressing, J. of Struct. Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.17, pp. 57-68, 2000.
- 4) 例えば, 三木千壽, 穴見健吾, 樋口嘉: 低温相変態溶接棒を用いた付加溶接による疲労強度向上の試み, 土木学会論文集 I, 710 巻, I-60 号, pp.311-319, 2002 年.
- 5) 永崎央輔: 鋼床版垂直補剛材の溶接部疲労損傷に対する補修方法の提案, 東京鐵骨橋梁, 技術報, No.51, 2005
- 6) 日本道路協会: 鋼橋の疲労, 1997
- 7) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, 2002
- 9) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993
- 10) 鋼構造委員会 鋼床版の疲労小委員会: 鋼床版の疲労, 土木学会論文集, No.410/I-12, pp.25-36, 1989
- 11) 二村大輔, 坂野昌弘, 他: 鋼床版デッキプレートと主桁垂直補剛材上端の溶接部の疲労損傷対策, 土木学会第 61 回年次学術講演会概要集, pp.1069-1070, 2006.
- 12) Yamada, K., Ya, S., Baik, B., Torii, A., Ojio, T., and Yamada, S.: Development of a new fatigue testing machine and some fatigue tests for plate bending, IIW Document XIII-2161-07, International Institute of Welding, 2007.
- 13) 土木学会鋼構造委員会: 鋼床版の疲労損傷とその対策, 第 10 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, 2007 年 8 月, 土木学会.
- 14) Yamada, K. : Some new approaches to fatigue of steel bridges, Steel Structures 6, pp. 319-326, 2006.
- 15) 山田健太郎, 小藺江朋堯, 小塩達也 (2007): 垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験, 鋼構造論文集, 第 14 巻第 55 号, pp.1-8, 2007 年 9 月.

(2007 年 9 月 18 日受付)