

## ショットピーニングによる溶接継手部の疲労強度向上効果

## Effect of fatigue strength improvement of shot-peening on welded joints

木下 幸治\*      秋山 竜馬\*\*      ○山田 翔平\*\*\*      半田 充\*\*\*\*  
Koji KINOSHITA      Ryoma AKIYAMA      Shohei YAMADA      Mitsuru HANDA

**ABSTRACT** Shot-peening recently can be applied to actual bridges due to the development of new vacuuming techniques of shots that after peening in the construction site. This study investigates effect of fatigue strength improvement of shot-peening on welded joints. Bending fatigue tests using out-of-plane gusset joint specimens were carried out and three type specimens were compared: as-welded, shot-blasted, and shot-peened. The residual stress measurement shows that the shot-peening successfully introduces beneficial compressive residual stress to not only the surface but also some depth. Also, the shot-peening can improve the fatigue strength and its mechanism was identified as extension of crack initiation life and delay crack propagation life.

**Keywords** : ショットピーニング, 面外ガセット溶接継手, 板曲げ疲労試験  
*Shot-peening, Out-of-plane gusset joints, Bending fatigue test*

## 1. はじめに

ショットピーニングは、鋼材表面に無数のショット材を衝突させることにより表面に圧縮残留応力を導入させる処理である。直接的に溶接止端部を打撃するハンマーピーニングや超音波ピーニングに比べ、既に航空機関連の部品へ実用されているように、ショット材と投射方法等により品質確保が正確である点、並びに比較的広範囲の作業が容易である点は優位である。しかし、これまでに既設鋼橋への適用を想定した場合、投射材の飛散防止対策が大掛かりになることや、現場でのショット材の確保が困難であったことから、工場内での施工に留まり、現場でのショットピーニングの適用は見送られていた。

そこで著者らは、鋼橋の塗替塗装工事にショットピーニングを実施可能とする工法を開発し、既設鋼橋へのショットピーニングの処理を可能とした。この工法は塗替塗装時に行うブラストと同様の設備を使用し、特殊投射用ノズルと循環式ブラスト工法（ここでは、ヤマダインフラテクノス社製の循環式エコクリーンブラスト工法を使用）をベースにして、研掃材と剥離物を集積・分離し、再利用するブラスト機セパレートシ

ステムをショットピーニング用に交換して、ショットピーニングを実施可能とするものである。

本研究では、既設鋼橋への実施が可能になったショットピーニングの疲労強度向上効果を明らかにすることを目的とし、面外ガセット溶接継手部を用いた板曲げ疲労試験を実施した。

## 2. 試験体及び疲労試験

図-1に試験体寸法、並びに板曲げ疲労試験機を示す。本研究では山田ら<sup>1)</sup>により開発された板曲げ疲労試験機を用いて、応力比  $R=-1$  の両振りの板曲げ疲労試験を行った。面外ガセット溶接継手試験体には板厚 12mm の SM490A を用い、付加版を開先加工し溶接止端部側の付加版端部から 50mm 程度の範囲を CO<sub>2</sub> 半自動溶接により完全溶け込み溶接とし、残りの溶接区間はすみ肉溶接とした。

表-1に疲労試験体一覧を示す。A1~A3の溶接まま試験体（以下、溶接まま試験体）、B1~B3のショットブラスト処理を実施したショットブラスト試験体（以下、ショットブラスト試験体）、BP1~BP3のショットブラスト処理後にショットピーニング処理（写真-1 参考）を实

\*博士（工学）岐阜大学工学部社会基盤工学科（〒501-193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1）第2種会員

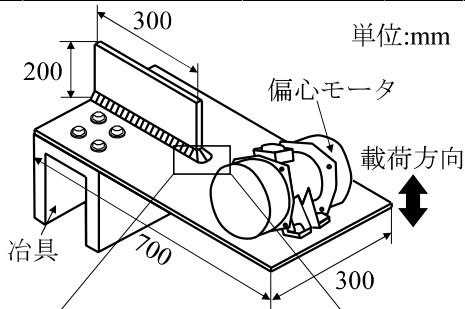
\*\*岐阜大学大学院博士前期課程 社会基盤工学専攻 2年（〒501-193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1）

\*\*\*ヤマダインフラテクノス株式会社（〒476-0002 愛知県東海市名和町石塚 12-5）

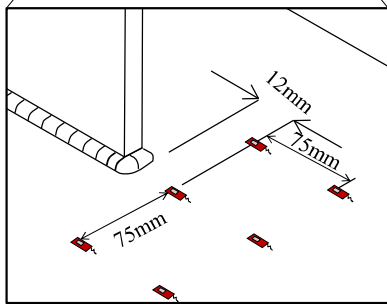
\*\*\*\*東洋精鋼株式会社（〒490-1412 愛知県弥富市馬ヶ地三丁目 195-1）

表-1 疲労試験体一覧と疲労試験結果

試験体名	止端処理	応力範囲 (MPa)	疲労試験結果(回数)				破壊起点	備考
			N <sub>toe</sub>	N <sub>b</sub>	N <sub>10</sub>	N <sub>20</sub>		
A1	溶接まま	80.0	21,400	126,100	199,000	257,800	止端	-
A2		等価応力範囲	80.00	80.00	72.76	63.52	止端	等価応力範囲で整理
A3		繰り返し回数	44,800	188,900	390,000	695,100	止端	等価応力範囲で整理
		繰り返し回数	43,500	299,500	692,400	1,127,300		
B1	ショットブラスト処理	79.0	-	384,800	473,300	619,100	止端	銅線検知不良のため、N <sub>toe</sub> 検知できず
B2		81.0	338,000	503,600	656,500	738,900	止端	-
B3		80.0	157,500	443,000	753,100	769,000	止端	-
BP1	ショットブラスト処理後に、ショットピーニング処理	79.0	1,000万回到達、120MPa程度に				止端	銅線検知不良のため、N <sub>toe</sub> 検知できず
BP2		120.0	-	876,300	934,500	998,900	止端	銅線検知不良のため、N <sub>toe</sub> 検知できず
		82.0	1,000万回到達、120MPa程度に					
BP3		120.0	-	300,300	336,400	363,800	止端	-
	83.0	1,000万回到達、120MPa程度に						
		119.0	134,100	282,300	327,500	371,400	止端	-



(a) 試験体寸法と試験機



(b) ひずみゲージ貼付位置

図-1 試験体寸法とひずみゲージ貼付位置



写真-1 ショットピーニング処理状況

表-2 ショットブラスト仕様

仕様	検査方法	
除錆度	ISO Sa2.5	目視 (拡大鏡)
研掃材	スチールグリッド 粒径: 0.8~1.0mm	材料検査・ ゲージ
エア圧力	0.6MPa以上	圧力計
投射時間	10~15s	ストップ ウォッチ
投射距離	30~40cm	ゲージ
噴射量	38kg/min以上	台秤
表面粗さ	80μm以下	粗さ測定機

表-3 ショットピーニング仕様

仕様	検査方法	
ノズル内径	8mm	ゲージ
研削材	RCW10PH 粒径: 0.8~1.0mm	材料検査・ ゲージ
エア圧力	0.6MPa以上	圧力計
カバレッジ	80%以上	目視 (拡大鏡)
投射時間	72s (36s×2回) ※50cm当たり	ストップ ウォッチ
投射距離	5~10cm	ゲージ
噴射量	38kg/min以上	台秤
アルメンアーク ホワイト	0.312mmA以上	アルメンゲー ジ
表面粗さ	80μm以下	粗さ測定機

施したショットピーニング試験体 (以下、ショットピーニング試験体) を製作した。既設鋼橋の塗替えを想定した場合、ショットブラスト実施後にショットピーニングを行う必要があるとともに、既往の研究<sup>2)</sup>で示されたようにショットブラスト処理の疲労強度向上効果との比較も必要となる。

表-2 にショットブラストの仕様、表-3 にショットピーニングの仕様を示す。研掃材及び除錆度は、鋼橋製作時の素地調整と同等とした。一方、投射距離、投

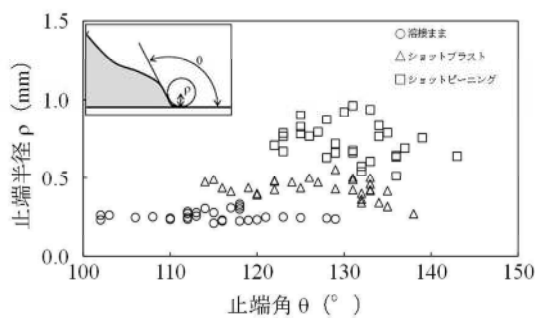


図-2 止端半径  $\rho$  と止端角  $\theta$  の関係

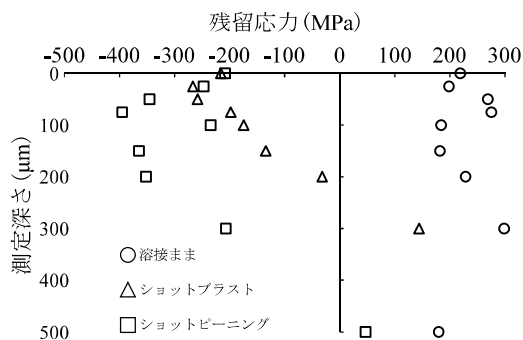


図-4 残留応力計測結果

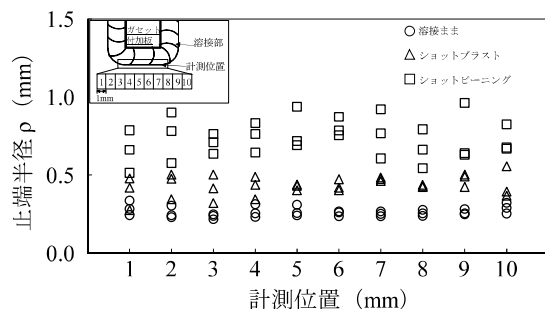


図-3 止端半径  $\rho$  の分布

射時間, ショット圧力, 投射ノズル径, 投射ノズル角度, ショットピーニング材粒径等は, 別途, 同型の試験体や小片の鋼板を用いたショットピーニング施工の予備試験に基づき, 導入残留応力が大きくなるよう試行錯誤的に決定している。

図-1 (a) に示す溶接止端から長手方向に 12mm の位置で試験中心から左右 75mm 離れた位置に貼付した公称応力計測位置で応力範囲 80MPa 程度の大きさを与えた。応力範囲 80MPa 程度で繰返し回数 1000 万回に至った場合, 応力範囲を 120MPa 程度に増加させて試験を継続した。また, 試験体にはき裂検知用の被覆銅線を貼付し, 銅線が切断された時点のき裂長さの繰返し回数を計測した。N<sub>6e</sub> は回し溶接部止端にき裂が発生し, 溶接止端部に貼付した銅線が漸線した段階, N<sub>6</sub> は回し溶接部からのき裂進展により回し溶接部端部の止端に貼付した銅線が切断し, き裂が母材に進展した段階, N<sub>10</sub> はき裂が溶接部止端から母材に 10mm 進展した段階, N<sub>20</sub> は回し溶接部からのき裂進展により回し溶接部端部の止端に貼付した銅線が断線しき裂が母材に 20mm 進展した段階とした。

### 3. 止端形状計測結果

図-2 に止端半径と止端角の関係を示す。止端形状の計測は, 各試験体の溶接止端部の方を歯科印像材により採取し, 1mm 程度の厚さにスライスしたものをマクロ機能付きデジタルカメラで撮影し, 画像上で拡大 (40 倍) し測定した。図より, ショットピーニング試験体の止端半径  $\rho$  の平均は 0.7mm 程度, 止端角  $\theta$  の平均は 130°程度であった。ショットブラスト試験体の止端半径  $\rho$  の平均は 0.4mm 程度, 止端角  $\theta$  の平均は 125°程度, 溶接まま試験体の止端半径  $\rho$  の平均は 0.2mm 程度, 止端角  $\theta$  の平均は 115°程度であった。次に, 図-3 に試験体回し溶接部前面の止端半径  $\rho$  の分布を示す。図-3 の分布図より, それぞれの試験体の止端半径  $\rho$  の最小値を比較すると, ショットピーニング試験体で 0.5mm, ショットブラスト試験体で 0.3mm, 溶接まま試験体で 0.2mm であった。ただし, ショットピーニング試験体では, 改善効果が大きい箇所と小さい箇所が確認できることから, 安定的な止端形状の改善が今後の課題として考えられる。以上より, ショットブラスト, その後のショットピーニングにより止端半径が段階的に改善することが認められた。

### 4. 残留応力計測結果

ショットピーニング, ショットブラストにより溶接部近傍に導入される残留応力を明らかにするために, 微小部 X 線応力測定装置 (Rigaku 製) を用いた残留応力測定を行った。この装置は測定物に X 線を照射し X 線回析の回析角から測定物の結晶格子面間隔を測定し, この変化がフックの法則に従うとして, 表層の応力を非接触で測定す

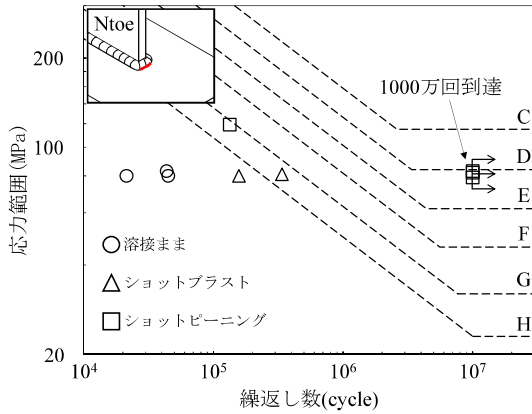


図-5  $N_{toe}$  の S-N 線図

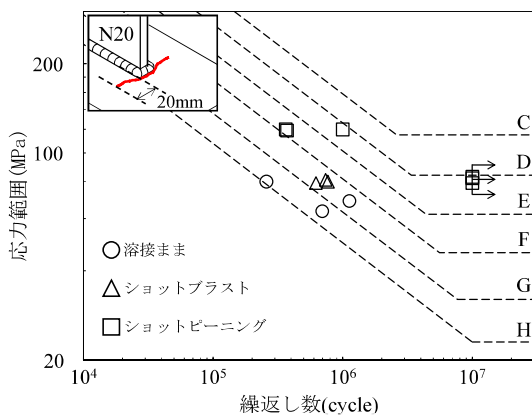


図-6  $N_{20}$  の S-N 線図

るものである<sup>3)</sup>。上記装置を用いて回し溶接部前面より 0.5mm 離れた溶接部近傍を電解研磨により表面から深さ 500 $\mu$ m まで残留応力を測定した。

図-4 に残留応力測定結果を示す。図中ではマイナス側が圧縮残留応力、プラス側が引張残留応力を示している。溶接まま試験体では、表面で 200MPa 程度、表面から 500 $\mu$ m の深さであっても 150MPa 程度の引張残留応力が測定された。ショットブラスト試験体では、表面で -200MPa 程度、50 $\mu$ m 程度の表層で最小の -280MPa 程度、200 $\mu$ m 程度の深さまで圧縮残留応力を保持していることがわかった。一方、ショットピーニング試験体ではショットブラストと同様に表面で -200MPa 程度ではあるが、100 $\mu$ m 程度の表層で最小の -400MPa 程度が測定され、かつ 500 $\mu$ m 程度の深さ付近まで圧縮残留応力を保持していることがわかった。

以上より、ショットブラスト後に実施したショットピーニングにより、表層の圧縮残留応力を増大させることが可能であること、また 500 $\mu$ m 程度

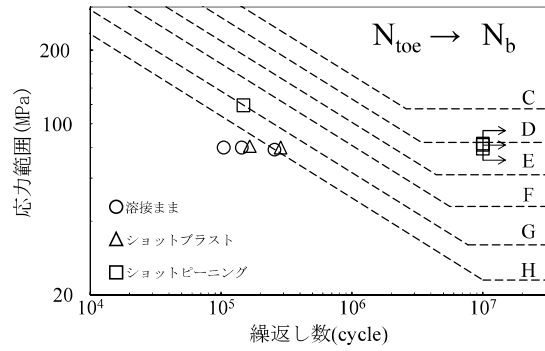


図-7  $N_{toe}$  から  $N_b$  で整理した S-N 線図

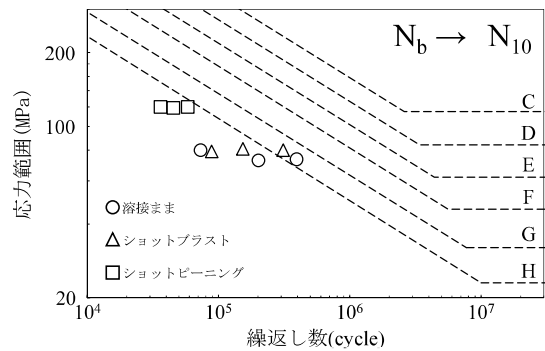


図-8  $N_b$  から  $N_{10}$  で整理した S-N 線図

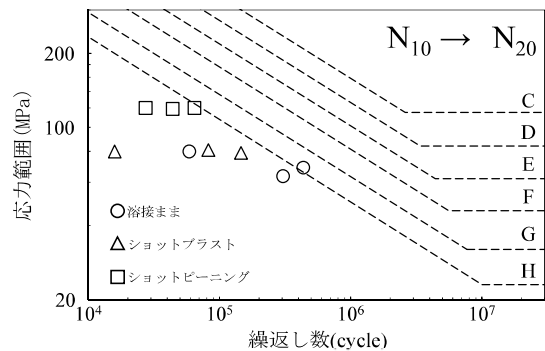


図-9  $N_{10}$  から  $N_{20}$  で整理した S-N 線図

の深さまで圧縮残留応力を導入可能であることがわかった。

## 5. 試験結果

表-1 に疲労試験結果、図-5 にき裂長さ  $N_{toe}$  における S-N 線図を示す。なお、ショットピーニング試験体 BP1, BP2 では、銅線検知不良のため  $N_{toe}$  が検知できていないため、グラフ上にプロットしていない。応力範囲 80MPa 程度で疲労試験を実施した溶接まま、ショットブラスト試験体においてき裂の発生を確認したが、ショットピーニング試

験体ではき裂の発生が認められず 1000 万回に到達した。このため、120MPa 程度に増加させ試験を継続した後、疲労き裂の発生を確認した。よって、ショットピーニングによる明確な疲労強度向上効果が確認され、特に、80MPa 程度以下ではき裂が生じないことがわかった。

図-6 にき裂長さ  $N_{20}$  における S-N 線図を示す。図-6 より、ショットピーニング試験体は、F 等級を示しており、溶接まま試験体と比べて 2 等級近く、ショットブラスト試験体と比べて 1 等級近く疲労強度向上が認められた。また、ショットブラスト試験体についても溶接まま試験体と比べて、1 等級近く疲労強度向上が認められた。以上より、ショットピーニングにより 2 等級近く疲労強度向上が可能であること、また、ショットブラスト実施後であっても 1 等級程度の疲労強度向上が可能であることが確認された。

次に、図-7 に  $N_{100}$  から  $N_b$  までの区間、図-8 に  $N_b$  から  $N_{10}$  までの区間、図-9 に  $N_{10}$  から  $N_{20}$  までの区間の繰り返し回数为整理した S-N 線図を示す。図-7 の  $N_{100}$  から  $N_b$  までの区間では、ショットピーニング試験体の  $N_{100}$  の取得データが 3 体中 1 体と少ないが、ショットブラスト試験体、並びに溶接まま試験体と比較して、疲労強度が明確に 1 等級程度高いことが確認された。なお、ショットブラスト試験体には溶接まま試験体との明確な差異は確認できなかった。一方、図-8 と図-9 からは、他の試験体との明確な差異は確認できなかった。

以上より、ショットピーニングによる疲労強度向上のメカニズムは、従来の圧縮残留応力導入工法<sup>24)</sup>と同様にき裂発生寿命の延命化、並びにき裂発生後の表層におけるき裂進展の遅延によるものと考えられる。ただし、今回検討したショットブラスト試験体において、き裂発生後の表層のき裂進展の遅延化が殆ど見られなかったことから、深さ方向への圧縮残留応力の重要性が確認できた。

## 6. 結論

[1] 疲労試験結果より、ショットピーニングによる 2 等級程度の高い疲労強度向上効果が確認できた。また、応力範囲 80MPa 程度では繰り返し回数 1000 万回であってもき裂の発生が認められなかった。さらに、ショットブラスト試験体と比べても 1 等級近く疲労強度向上が可能であった。

- [2] 各き裂長さまでの段階でき裂進展寿命の改善効果を検討した結果、ショットピーニングによりき裂発生寿命のみならず、 $N_{100}$  から  $N_b$  までの区間のき裂進展寿命も改善されたことが確認された。
- [3] 残留応力計測の結果、ショットブラスト後であってもショットピーニングにより表層の深さ方向に圧縮残留応力を導入可能である。
- [4] 以上より、ショットピーニングによる疲労強度向上メカニズムは、従来の圧縮残留応力導入工法<sup>24)</sup>と同様に、圧縮残留応力導入によるき裂発生寿命の延命化とき裂発生後の表層のき裂進展の遅延によるものと考えられる。なお、今回のショットピーニング導入工法では、80MPa 以下では、1000 万回まで疲労き裂発生が抑制可能と言える。

### <参考文献>

- 1) 山田健太郎, 小藺江朋堯, 小塩達也: 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, 2007.9.
- 2) 山田健太郎, 小塩達也, 鳥居詳, 白彬, 佐々木裕, 山田聡: 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, 土木学会構造工学論文集, vol.54, pp.522-529, 2008.3.
- 3) 小木曾勝彦, 佐々木勝成: X 線応力測定法について, ショットピーニング技法, 第 1 巻, 第 2 号, pp.16-23, 1989.11
- 4) 木下幸治, 今村明登, 渡邊吉弘, 半田充: 先端曲率半径が小さい Ultrasonic Needle Peening を施した面外ガセット溶接継手部の疲労強度, 鋼構造論文集, 第 21 巻, 第 83 号, pp.11-18, 2014.