

母材打撃ピーニングによる溶接継手疲労強度向上策と機械化施工法の開発

Method of Improving Fatigue Strength by Peening on Base Metal and Development of Mechanized System

中野 隆 NAKANO Takashi JFE エンジニアリング 橋梁事業部 建設部技術室
中西 克佳 NAKANISHI Katsuyoshi JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (課長)
森影 康 MORIKAGE Yasushi JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (課長)

要旨

鋼構造物の疲労強度を改善する手法として、ハンマーピーニングがある。一般的には溶接止端部を直接打撃する手法が用いられるが、今回新たに開発したピーニングは溶接止端近傍の母材に打撃を加える。平坦な母材に打撃を加えるため、溶接部の品質に影響することなく、安定した疲労強度向上効果が得られる。FEM (有限要素法) 解析により打撃痕の窪みの断面積と疲労強度に相関関係があることを確認し、疲労強度向上に必要な打撃痕形状のしきい値を明確化した。また、さらなる適用性拡大のため機械化施工法を開発し、処理の高速化を実現した。

Abstract:

Hammer peening is used for improving fatigue strength of welded joint. In general peening method impacts are introduced on the weld toe, however, in this new method impacts are introduced on the base material near the weld toe. Since impacts are introduced on the flat base metal, this method does not affect the quality of the weld and stable fatigue strength can be achieved. Through finite element (FE)-analysis, the correlation between the area of depression and the fatigue strength was confirmed, and the threshold level required for improving fatigue strength was defined. Also in order to expand applicability, faster treatment method by using mechanized system was developed.

1. はじめに

高度経済成長期に整備した社会資本の老朽化が急速に進み、深刻な問題となっている。国土交通省は 2012 年 12 月に発生した中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故などを受け、2013 年を「社会資本メンテナンス元年」と位置付け¹⁾、インフラの老朽化対策を推進している。

鋼製橋梁においては、溶接継手の疲労強度が構造物の寿命を決定付ける重要な要素の 1 つであり、さまざまな長寿命化手法が提案されている。疲労き裂発生を抑制する手法として、溶接止端部に打撃を加えて圧縮残留応力を与えることで疲労強度を向上させるハンマーピーニングがある (以下、HP)。近年、HP の課題である反動と騒音を低減できる超音波振動を用いた UIT²⁾ をはじめとする超音波ピーニングも実用化されているが、ピーニング処理によって生じる巻込みと呼ばれる傷による疲労強度低下に注意が必要であり、ピーニング処理の前にグラインダー処理を行なうことが推奨されている³⁾。

今回開発した母材打撃ピーニングでは、従来の溶接止端

部に打撃を加える手法ではなく、溶接止端近傍の母材に打撃を加える (図 1)。山田ら⁴⁾が開発した疲労き裂を補修する ICR 処理 (Impact Crack Closure Retrofit Treatment) を応用し、汎用のエアツール (写真 1) で母材を打撃することで、疲労き裂の起点となる溶接止端近傍に圧縮残留応力を導入し、疲労強度を向上させる。従来手法で課題であった巻込みをほとんど起こさないため、ピーニング処理前に溶接ビードを全線にわたってグラインダー処理を施す必要がないという利点がある。

従来の HP では、疲労強度向上効果をピーニング処理後の仕上がり状態により確認することは困難であった。溶接止端部には凹凸が存在するため、打撃前の溶接止端の初期形状と打撃痕形状の差を計測し、差分を検出することは極めて煩雑となる。一方、本手法では平坦な母材に打撃を加えるため、施工後の打撃痕形状を計測するだけでよく、比較的容易である。よって、疲労強度向上を確認する手法としては打撃深さにより管理するのがよいと考えられる。

本手法の疲労強度向上効果は溶接継手の疲労試験により確認した。圧縮残留応力の導入メカニズムを FEM (有限要素法) 解析により検証し、疲労強度向上に必要な打撃痕のしきい値を明確化した。また、本手法のさらなる適用性拡大

2014 年 1 月 10 日受付

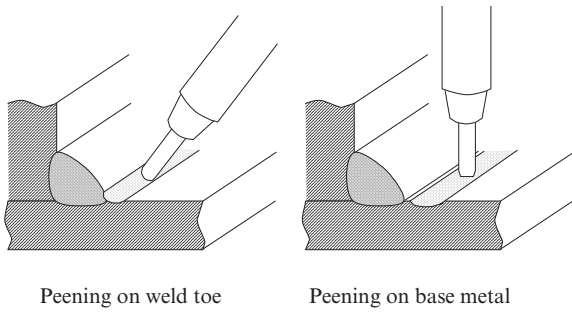


図1 母材打撃 HP (ハンマーピーニング) の概念図
Fig. 1 Hammer peening on base metal

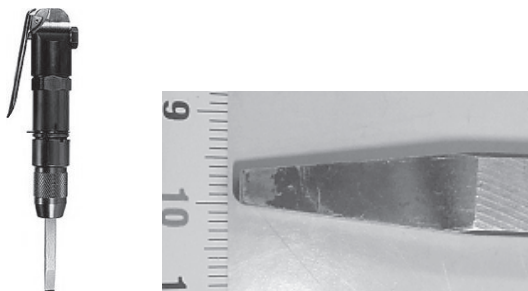


写真1 ピーニングに用いるエアツール
Photo 1 Air tool for hammer peening

のため機械化手法を開発し、打撃痕形状による品質管理手法を検討した。

2. 疲労強度向上効果

溶接継手の疲労試験を行ない、母材打撃ピーニングによる疲労強度向上効果を確認した。

2.1 疲労試験方法

試験体の寸法・諸元を、図2に示す。使用鋼材は、母材、ガセットともに上降伏点 419 MPa, 引張強度 556 MPa, 伸び率 22.6% の SM490Y 鋼材である。板厚は母材とガセットのいずれも 12 mm を使用し、下向きすみ肉溶接で接合した。溶接材料はフラックス入りワイヤ (JIS Z 3313 YFW-C50DM) の MXZ200 (1.2φ) を用い、溶接条件は 100% CO₂, 電流 240 A, 電圧 30 V, 速度 40 CPM (入熱量 10.8 kJ/cm), 溶接脚長は 6 mm とした。試験体への HP 施工には、写真1に示したエアツール (振動数 90 Hz 程度, 空気圧 0.63 MPa) を用いた。エアツール先端部は平坦面 3 mm × 3 mm の端部に半径 0.5 mm の丸みを付けた削り出し加工を施している。エアツール先端部を、溶接止端部近傍の母材へ垂直に押し当てながら打撃を行なった。作業は常温にて行なった。母材・溶接金属の欠陥であるアンダーカットの扱いとなるのを避けるため、打撃痕の深さは 0.5 mm 未満となるように施工を行なった。エアツール先端部を平坦としたの

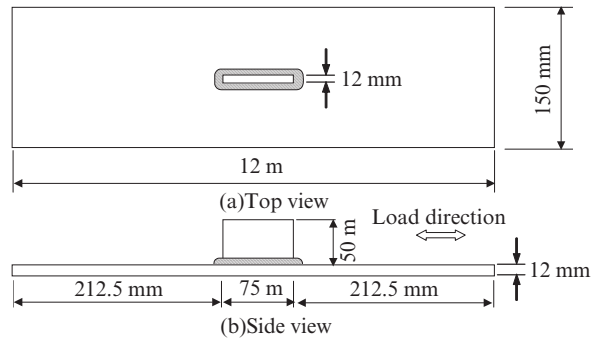


図2 疲労試験体の寸法・諸元
Fig. 2 Specimen for fatigue test

は、平坦である方が溶接止端部への圧縮残留応力の導入効率が高いためである⁵⁾。

疲労試験は、応力比を 0 とし、載荷公称応力範囲 100 MPa に対し HP 施工回数 0 回 (溶接まま), ならびに載荷公称応力範囲 150 MPa, 200 MPa, および 250 MPa の 3 ケースに対し HP 施工回数を 0~4 回とした計 16 ケースを実施した。ここでの HP 施工回数の変動は、圧縮残留応力導入量の変動を意味しており、本実験においては圧縮残留応力の導入量と疲労強度との関係を明確化することを意図している。

2.2 疲労試験結果と考察

図3に疲労試験結果を示す。横軸は荷重の繰り返し回数、縦軸は応力範囲として両対数軸にプロットしたものである。疲労強度の目安として日本鋼構造協会 (JSSC) の疲労強度等級⁶⁾の A~E 等級の疲労強度曲線を併せて示している。図3中の矢印は、予定した繰り返し回数を載荷しても疲労き裂が発生せず、そこで試験を打ち切った試験体を示す。

同図中では、HP 処理回数とそれに対する窪み面積を併記

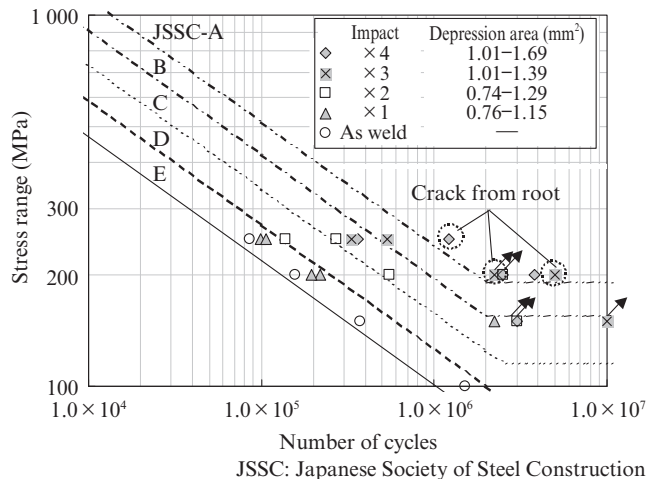


図3 疲労試験結果
Fig. 3 Fatigue test result

して示している。HP 処理回数が 3 回以上となると、窪み面積は 1 mm^2 以上で安定し、高い疲労強度向上効果が得られている。溶接ままの試験体の疲労強度の下限値が E 等級程度となったことから、窪み面積 1 mm^2 以上の HP 施工で疲労強度等級は 2 等級向上し、C 等級以上となっている。これは、たとえば応力範囲を 200 MPa で一定としたときに、E 等級では約 13 万回で疲労き裂が発生するのにに対し、HP 施工を行なうことで約 49 万回まで長寿命化するという意味する。

疲労試験前に、レーザー変位計によりハンマー打撃痕の形状を測定した。また、X 線回折法により HP 施工後の残留応力を計測した。図 4 には打撃痕の窪み面積と残留応力との関係を、図 5 には窪み面積と載荷公称応力範囲 250 MPa で疲労試験を実施した際の破断回数との関係を、それぞれ示す。

図 4 より、窪み面積の増加に伴い、圧縮残留応力の導入量が増加していることが分かる。また、図 5 より、窪み面積の増加に伴い、破断に要する載荷回数が増えていることが

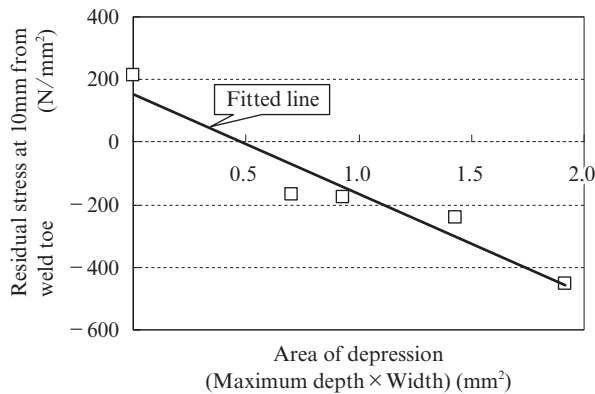


図 4 打撃痕の窪み面積と残留応力の関係

Fig. 4 Relationship between depression area and residual stress

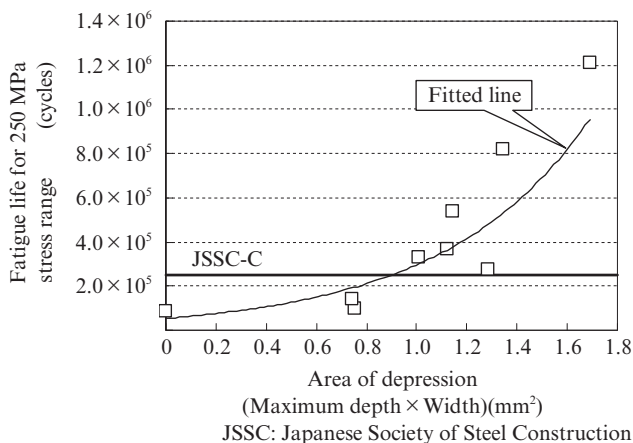


図 5 打撃痕の窪み面積と 250 MPa 破断回数の関係

Fig. 5 Relationship between depression area and fatigue life

分かる。窪み面積 1 mm^2 以上となると、C 等級以上の疲労強度が得られていることが分かる。

これらのことから、導入残留応力は HP により形成された打撃痕の窪み面積で管理でき、かつ導入圧縮残留応力量すなわち窪み面積が大きいほど疲労強度が向上すると言える。また、図 3 で述べたように SM490Y 材において疲労強度等級 2 等級向上の C 等級を達成させるためには、ハンマー打撃痕の窪み面積が 1 mm^2 以上必要と考えられる。

3. 圧縮残留応力の導入メカニズム

FEM 解析を行ない、母材打撃 HP の圧縮残留応力導入メカニズムを検証した。

3.1 有限要素解析手法

2 章で疲労試験を実施した試験体形状を 3 次元ソリッド要素でモデル化し、境界条件を 1/4 モデルとなるように設定した (図 6)。ソルバーは ABAQUS を用い、溶接止端近傍におけるピーニング処理後の残留応力を求めた。先端ピンの端と溶接止端の距離は 0 mm とした。

ピーニング処理前には、溶接金属の熱収縮による溶接止端近傍の引張残留応力を模擬するため、溶接金属に 1500°C の昇温 - 冷却による熱ひずみを与えた。HP による打撃痕の形成を模擬するため、実験で用いたエアツールの先端形状と同形状のピンを、母材表層から 0.2 mm 静的に押し込んだ後に引抜くことでピーニングを再現した。押し込 - 引抜後の打撃痕の深さは 0.198 mm であった。

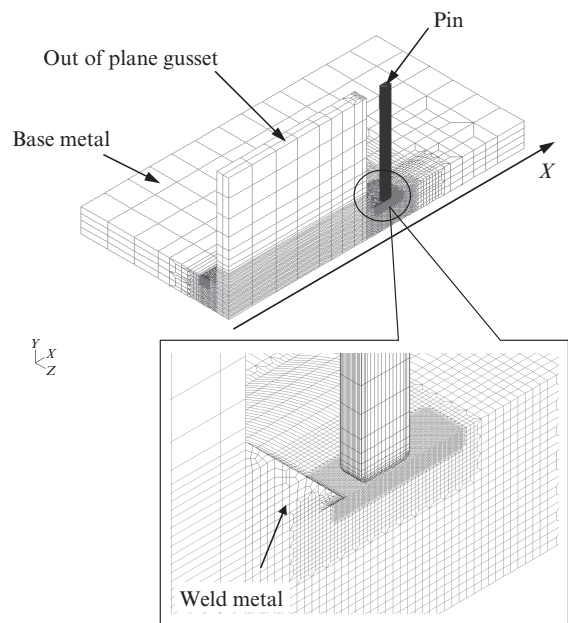


図 6 有限要素解析モデル

Fig. 6 Model for finite element (FE)-analysis

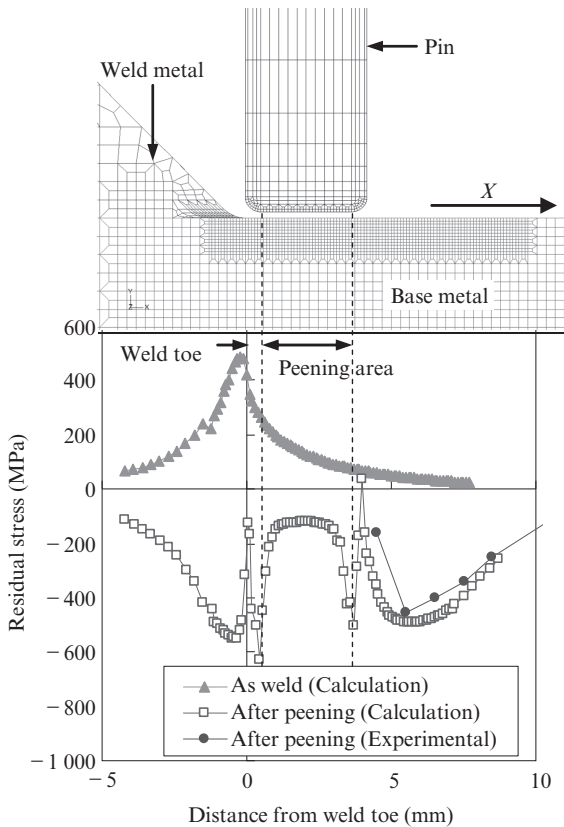


図7 HP 前後の溶接止端付近残留応力分布
Fig. 7 Residual stress distribution around weld toe

3.2 解析結果と考察

3次元 FEA によるピーニング処理前後における溶接止端付近の残留応力分布計算結果を図7に示す。ピーニング処理前は溶接止端近傍において溶接金属の熱収縮による引張残留応力が導入されていたが、ピーニング処理後の溶接止端近傍から打撃痕の範囲においてはほぼ圧縮側に転じている。溶接止端部では、ピーニング処理前には約 400 MPa の引張応力であったが、ピーニング処理後に約 330 MPa の圧縮応力を示している。

また、同図には打撃痕近傍における X 線を用いた残留応力測定結果を併せてプロットしている。溶接止端から打撃痕にかけては残留応力測定が困難なため、打撃痕より母材側において比較を行なった。3次元 FEA による計算結果は、実測による残留応力分布とよい一致を示していることが分かる。実験および FEA の結果より、圧縮残留応力のピークは、打撃痕より 1 mm 程度離れた位置に存在していることが分かった。

4. 機械化施工法の開発

母材打撃ピーニングのさらなる適用範囲拡大のため、機械化施工法を開発した。

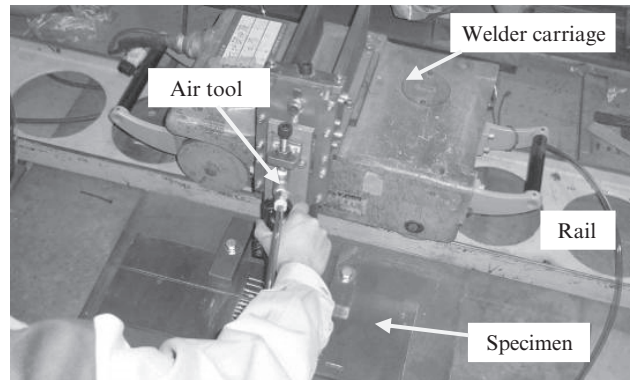


写真2 自動走行装置試作品
Photo 2 Mechanized system (Prototype model)

4.1 開発の背景と自動走行装置の試作

従来のエアツールを用いた HP では、手動で行なう際に振動によるぶれを抑えるために、母材面に強く押しつける必要があった。そのため、処理速度が 10~20 cm/min 程度と遅く、効率的な施工ができないことが課題であった。また、使用機器が振動工具扱いとなるため、1日あたりの作業者の施工時間も制限を受ける。実構造物への適用にあたっては、施工延長が長い場合に人力によらず機械化施工されることが望まれる。そこで、写真2に示すような溶接台車を利用した自動走行装置を試作した。

自動走行装置は、レール上を一定速度で走行する溶接台車にエアツールを取り付けたものである。台車は走行速度を 0~120 cm/min の範囲で調整可能なものとした。

4.2 圧縮残留応力の導入効果

自動走行装置を用いた際の圧縮残留応力導入効果を確認した。台車を 60 cm/min の速度で走らせながら、平板に鉛

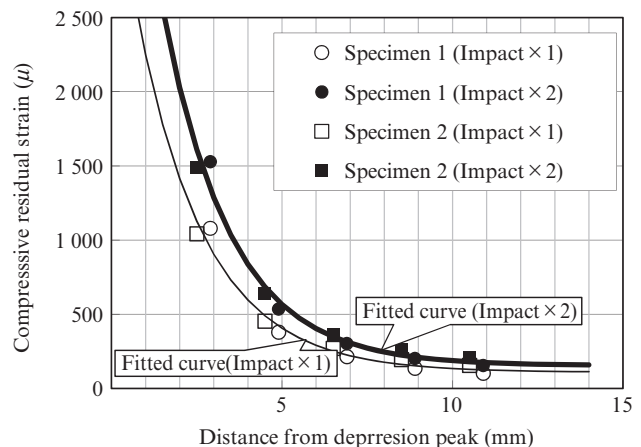


図8 打撃回数と圧縮残留ひずみ
Fig. 8 Compressive residual strain for number of impacts

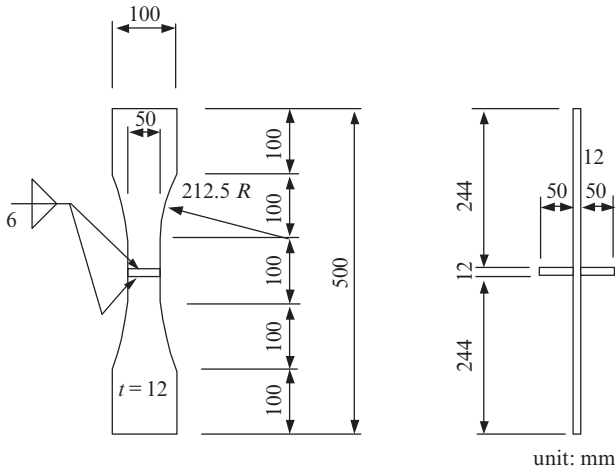


図9 疲労試験体の寸法・諸元
Fig. 9 Specimen for fatigue test

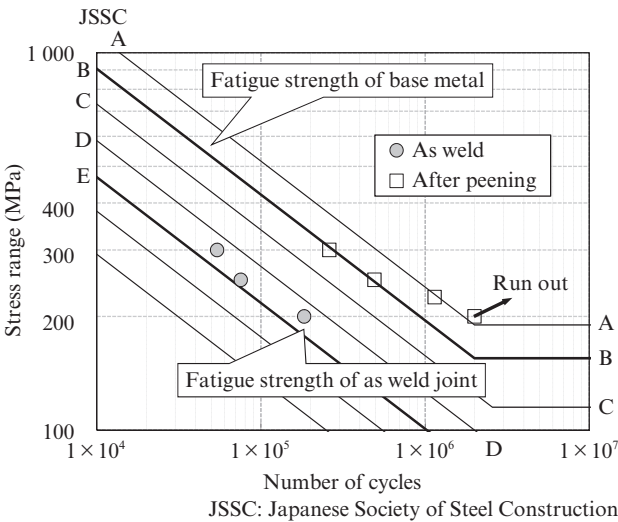


図10 疲労試験結果
Fig. 10 Fatigue test result

直にピーニング処理を施した。2つの試験体に対して、ピーニング処理を1回行ったものと、2回行ったものをそれぞれ比較した。

図8は打撃回数と圧縮残留ひずみの関係を示す。ここに、横軸は打撃痕の窪みからの距離、縦軸は導入された圧縮残留ひずみとしている。打撃回数が増えれば溶接部に生じる圧縮残留ひずみは増加し、また打撃痕に近いほど増加量が大きくなる事が分かる。1回のピーニング処理でも圧縮残留応力は導入されるが、施工時に処理面が若干波打つこともあるため、安定した効果を得るためには最低でも2回（1往復）の処理が必要と考えられる。

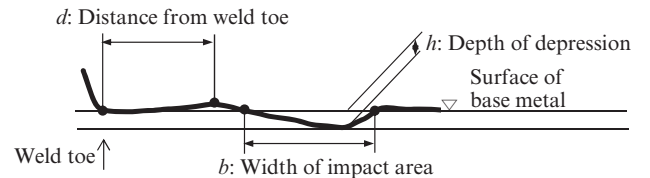
4.3 疲労試験

機械化施工時にも安定した疲労強度向上効果が得られる

表1 疲労試験体の打撃痕形状

Table 1 Local shape of fatigue test specimen after peening

Specimen number	Stress range (MPa)	Number of cycles ($\times 10^3$)	d max. (mm)	h min. (mm)	b min. (mm)	$h \times b$ min. (mm^2)
1	300	260	2.55	0.24	2.45	0.70
2	250	490	2.55	0.25	2.44	0.70
3	225	1 140	2.95	0.22	2.06	0.52
4	200	Run out	2.80	0.24	2.20	0.64



ことを、疲労試験により確認した。疲労試験体は、図9に示すような荷重非伝達型十字溶接継手とし、4体の疲労試験を行なった。材質はSM490YAとし、すみ肉溶接の条件は、脚長6mm、溶接材料MXZ200(1.2φ)、電流240A、電圧30V、速度約35~40cm/minとした。疲労試験は、最大引張荷重200kNの疲労試験機を使用し、振動数8Hzとして実施した。荷重振幅は引張の片振りとし、引張応力の最低値が5MPaとなるように荷重を設定した。試験体には、走行速度90cm/min、溶接止端と打撃痕の離れの目標を2.5mmとし、施工回数2回の自動走行の施工条件で母材にHP処理を行なった。

疲労試験結果を図10に示す。溶接ままと比較すると、HP処理を行なった試験体では、応力範囲が250~300MPaのときにJSSCの疲労等級で2等級、応力範囲が200MPa未満のときに4等級の疲労強度向上が認められる。

4.4 打撃痕の管理値

4.3節の試験体の打撃痕形状計測を、疲労試験に先立ちレーザー変位計により行なった。ここで、使用したレーザー変位計の性能は、ピッチ50μm、高さ分解能1μm、計測誤差20μmである。

表1には、疲労試験体の打撃痕形状をまとめた。ここで、打撃深さ h は、鋼板表面と打撃痕の最深部の高さとした。打撃幅 b は、打撃痕が鋼板表面の線を横断する長さとした。溶接止端からの離れ d は、溶接止端と止端側の頂点の長さとした。

各試験体の深さ h の最小値は0.22mm~0.25mmであった。その最大値である0.25mmを深さの目安とすることで、今回と同程度の疲労強度向上効果が得られるものと推察される。

離れ d は2.5mmを目標値として施工を行なったが、それに対して各試験体の離れ d の最大値は、2.55~2.95mmで

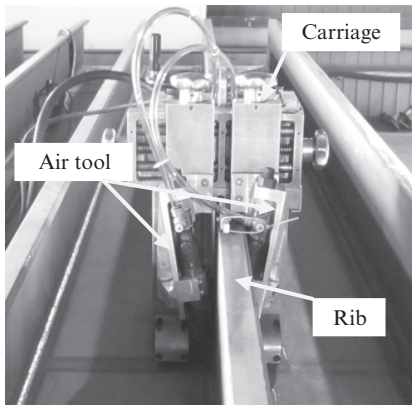


写真3 自動走行装置（板リブ用）

Photo 3 Mechanized system for longitudinal rib

あった。疲労強度向上効果を得るためにはなるべく溶接ビードに近づけて施工する必要があるが、実施工での溶接ビードにはうねりがあり溶接の繋ぎ部を除いても2 mm程度は凹凸が生じると考えられる。溶接の繋ぎ部等の大きなはみ出し箇所は事前にグラインダーで削ることとすれば、離れ2.5 mmを目標値として管理しても、自動走行装置による施工は可能と考えられる。

4.5 実構造物への適用拡大

実構造物における更なる効率的施工のため、エアツールを2機搭載した自動走行装置を開発した（写真3）。板リブの両側の溶接線を同時にHP処理することで、片側から施工するよりも反力のバランスが取りやすく、安定して長い延長を施工することが可能である。なお、表1中に示したハンマー打撃痕が傾斜している理由は、写真3に示したように、エアツールを若干傾けて施工していることによる。

5. おわりに

溶接継手の疲労強度を向上する新たなピーニング手法を開発した。溶接止端近傍の母材に打撃を加えることで、疲労強度は溶接ままの試験体に比べて日本鋼構造協会（JSSC）の疲労強度等級で2等級以上向上させることが可能である。FEM解析によって、溶接止端部に強い圧縮残留応力を導入できることを確認し、疲労強度を向上するために必要な打撃痕形状のしきい値を明確化した。また、より効率的な施工を実現するために自走式台車を用いた機械化施工手法を開発した。

本手法については、さらなる解析・実験による裏づけを加えることで、より実用的な管理手法が確立できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ. http://www.mlit.go.jp/page/kanbo01_hy_002952.html.
- 2) 野瀬哲郎, 島貫広志, 中島清孝, 鈴木環輝. UITによる継手疲労強度向上機構. 溶接構造シンポジウム講演論文集. 2006, p. 219-222.
- 3) 田井政行, 三木千壽, 鈴木哲悟. ハンマーピーニング処理による面外ガセットの溶接止端部の疲労強度改善. 土木学会論文集A1. 2011, vol. 67, no. 2, p. 396-409.
- 4) 山田健太郎, 石川敏之, 柿市拓巳. 疲労き裂を閉口させて寿命を向上させる試み. 土木学会論文集A. 2009, vol. 65, no. 4, p. 961-966.
- 5) 加藤健三. 金属塑性加工学. 丸善. 1971, p. 74-76.
- 6) 日本鋼構造協会. 鋼構造物の疲労設計指針・同解説. 2012.



中野 隆



中西 克佳



森影 康