

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760423

研究課題名（和文） 圧縮残留応力を導入して疲労強度が向上した継手に対する圧縮のオーバーロードの影響

研究課題名（英文） Effect of compression overload on fatigue strength of welded joint improved by compression residual stress

研究代表者

石川 敏之（ISHIKAWA TOSHIYUKI）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：00423202

研究成果の概要（和文）：溶接止端からの疲労き裂の発生を防止する方法として、溶接止端に圧縮残留応力を導入する方法がある。しかし、圧縮の残留応力を導入した後、大きな圧縮の荷重（オーバーロード）が作用した場合、疲労強度向上効果が失われる場合がある。本研究では、圧縮の残留応力が導入された、いくつかの溶接継手に対して、圧縮のオーバーロードを作用させ、その後、板曲げ疲労試験を実施し、圧縮残留応力を導入して疲労強度が向上した溶接継手に対する圧縮のオーバーロードの影響を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：For improving the fatigue strength of welded joints, introducing the residual stress at weld toe by peening is often used. If a compression overload is subjected after peening, however, the residual compressive stress at weld toe will shift the tensile stress region. Therefore, the improved fatigue strength by residual compression stress at weld toe will be reduced after the compression overloaded. In this research, the effect of compression overload on fatigue strength improved by residual compression stress was clarified by the plate bending type of fatigue tests.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：溶接継手、疲労強度、圧縮残留応力、圧縮のオーバーロード

## 1. 研究開始当初の背景

溶接止端から疲労き裂の発生を防止し疲労強度を向上させる方法として、溶接止端をピーニングして圧縮残留応力を導入する方法がある。この方法では、溶接止端部の平均応力を圧縮側にシフトさせることによって疲労強度を向上させている。しかし、圧縮残留応力を導入した後、大きな圧縮の荷重（圧縮のオーバーロード：通常の作用応力よりも大きな応力）が作用した場合、溶接止端部が局部的に圧縮降伏し、オーバーロードが除荷された後、溶接止端の平均応力が再び引張側にシフトして、疲労強度の向上効果がなくなる場

合がある。圧縮のオーバーロードに関する研究としては、母材が降伏に達するような大きな圧縮の荷重に対する検討は行われているが、それよりも小さいが、通常作用する荷重よりも大きな範囲の圧縮のオーバーロードに関する研究はあまり行われていない。

## 2. 研究の目的

鋼道路橋では、鋼床版や鋼製橋脚において、多数の疲労き裂が発生していることが報告されており、大きな問題となっている。疲労き裂の発生を防止する方法として、グラインダーや TIG 処理による溶接止端の改善やピ

ピーニングによる圧縮残留応力の導入などが挙げられる。グラインダー処理は、疲労強度向上法としてよく利用されているが、ピーニングを利用するケースはまだ少ない。これは、ピーニングを施した後、持続的な引張応力が作用した状態で繰返し応力が作用すると疲労強度向上効果が失われる場合があること、およびピーニングを施した後に、溶接止端に大きな圧縮応力が一度でも作用するとピーニングの効果が失われる場合があることが原因として挙げられる。前者は主に死荷重による持続荷重であるので、既に供用している鋼構造物に対するピーニングの効果は高いと考えられる。しかし後者として、過積載車や衝撃を受けた際に、ピーニングされた溶接止端に圧縮のオーバーロードが作用される場合が考えられ、ピーニングの効果が失われる可能性がある。

溶接止端をピーニングした後に溶接止端に大きな圧縮応力が作用した場合にピーニングの効果が失われるメカニズムを図-1を用いて説明する。溶接したまま(As-welded)の状態の止端近傍の母材をピーニングすることにより、溶接止端に圧縮残留応力が導入される(図-1の点 I)。圧縮残留応力導入後、圧縮のオーバーロードが作用することによって、溶接止端部が局部的に圧縮降伏し、圧縮ひずみが増大する(図-1の点 II)。その後、オーバーロードが除荷されると、圧縮応力と圧縮ひずみが線形に低下し、溶接止端の応力集中の影響も受けて残留応力が引張側にシフト(図-1の点 III)するため、作用したオーバーロードの大きさによっては、引張降伏応力が残される場合(図-1の点 IV)がある。圧縮のオーバーロードによって、溶接止端に再び引張応力が残されると、疲労強度の向上効果が低下あるいは完全に失われる。ただし、図-1に示したように、圧縮のオーバーロードが除荷された後に、溶接止端に残される応力は、導入された圧縮残留応力や、作用する圧縮のオーバーロードの大きさによって異

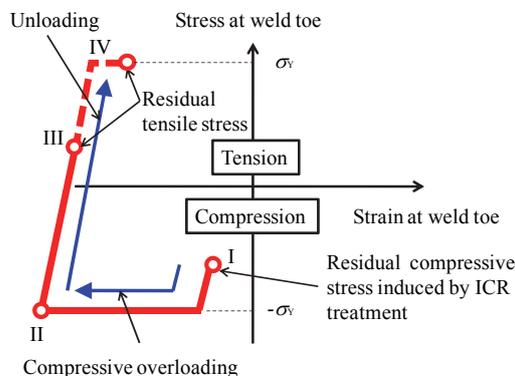


図-1 圧縮のオーバーロードによって溶接止端に引張残留応力が生じるメカニズム

なる。一般に、ピーニング後、鋼材の降伏に達するような圧縮のオーバーロードが作用した場合、ピーニングの効果が失われることが知られているが、過積載車や衝撃による影響は、鋼材の降伏に達するような応力にならないと考えられる。しかし、これまでに圧縮のオーバーロードの大きさが、ピーニングによる疲労強度向上効果に与える影響に関する研究はほとんどない。

そこで本研究では、いくつかの溶接継手を対象として、圧縮のオーバーロードがピーニングによる疲労強度向上効果に与える影響を、板曲げ疲労試験を行い明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、ピーニングとして疲労き裂の近傍を叩いてき裂表面を閉口させる ICR 処理工法 (Impact crack closer retrofit treatment)<sup>1), 2)</sup>を用いた。この工法を溶接したままの状態に用いる場合、図-2に示すように溶接止端近傍の母材を叩くので、溶接止端の形状を変化せずに圧縮の残留応力を導入している。ICR 処理は、汎用のエアーツール(フラックスチップ)に、先端が 4×5mm 程度の角に丸みを帯びるように加工したタガネをセットして、0.5~0.6MPa の空気圧を保持して、90Hz で溶接止端近傍の母材を叩いて行った。ICR 処理後の試験体の表面の一例を図-3に示す。

本研究で対象とした溶接継手は、図-4に示す面外ガセット溶接継手、荷重非伝達型リブすみ肉溶接継手およびカバープレートと

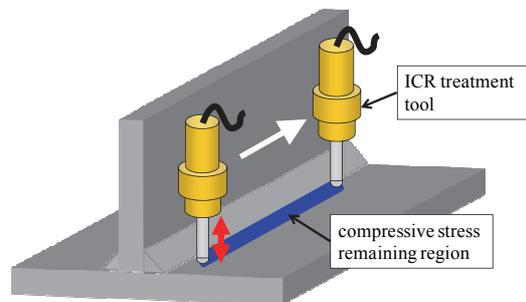


図-2 ICR 処理の位置



図-3 ICR 処理後の溶接止端近傍の様子

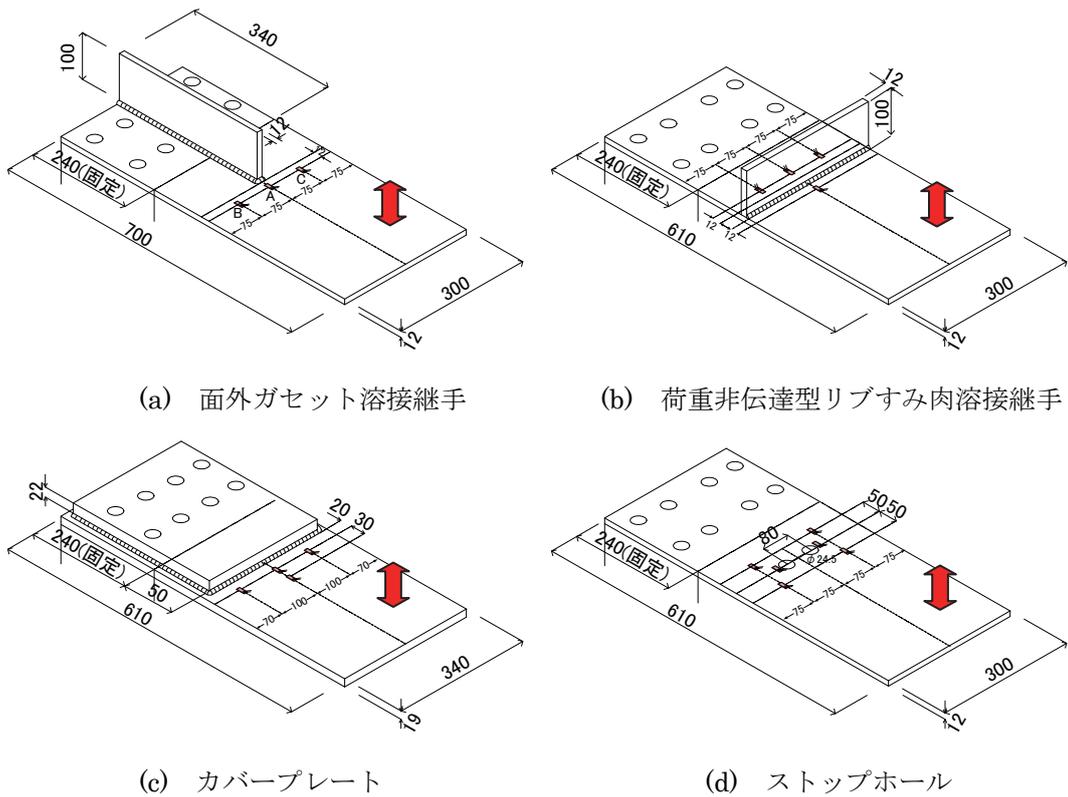


図-4 試験体一覧

した。また、ICR 処理によって疲労き裂を閉口させて疲労寿命を向上させる場合も同様に、圧縮のオーバーロードによる影響を受ける。したがって、面外ガゼット溶接継手試験体で発生した疲労き裂への ICR 処理した試験体および図-4(d)のストップホール間のき裂を ICR 処理した試験体に対しても、圧縮のオーバーロードが疲労寿命向上効果に与える影響を確認した。

試験体を図-5 に示すように片持ち状態にセットし、ICR 処理を行った後、自由端側の下側から油圧ジャッキを用いて荷重を載荷し、各試験体に貼付けたひずみゲージから計算される着目位置での公称圧縮応力が所定の値に達したのを確認してから荷重を除荷した。

本研究では、板曲げ振動疲労試験機<sup>3)</sup>を用いて疲労試験を行った。疲労試験は、図-6 に示すように、片持ち状態になるようにセットされた試験体の自由端側に振動疲労試験機を固定し、振動疲労試験機のモータを回転させて、溶接止端に繰返し板曲げを与えた。応力比を  $R = 0$  で疲労試験を行う場合は、試験体の自由端側をバネで押し下げた状態で疲労試験を行った。

疲労試験を行っている間、試験体のひずみを、15~20 分間隔で 2 秒程度(サンプリング速度 2kHz)計測しその値を用いて応力範囲を確認した。

面外ガゼット試験体に対しては、文献 3)

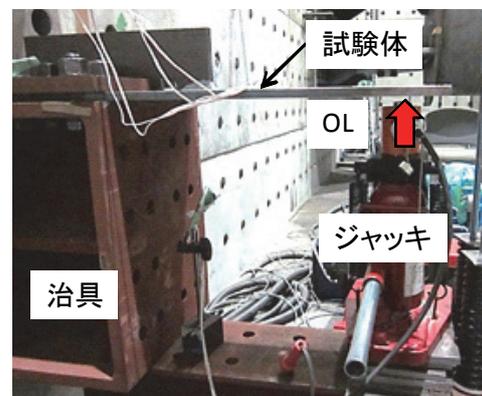


図-5 過荷重の導入の例



図-6 板曲げ疲労試験の状況

と同様に溶接止端から試験体の長さ方向に12mm, 幅方向に75mm離れた位置の計測ひずみから求まる応力範囲を公称応力範囲と定義し, その値から計算される等価応力範囲を用いて疲労試験結果を整理した. 面外ガセット溶接継手試験体の疲労試験では, 応力比を  $R=1$  とした.

荷重非伝達型リブすみ肉溶接継手試験体, カバプレート試験体およびストップホール試験体では, 計測ひずみの値を外挿あるいは内挿して, き裂が発生した位置の公称応力範囲を算出し疲労試験結果を整理した. これらの試験体の疲労試験では, 応力比を  $R=0$  とした.

#### 4. 研究成果

##### (1) 面外ガセット溶接継手試験体

面外ガセット溶接継手試験体の疲労試験結果を図-7に示す. 図中の試験体 AW は溶接したままの試験体の疲労試験結果, 試験体 P はピーニングを行った試験体の疲労試験結果, 試験体 OL はピーニングを行った後, 圧縮のオーバーロードを与えた試験体の疲労試験結果を示している. 試験体 OL の後の数値は圧縮のオーバーロードを与えた際に, 疲労試験結果を整理する位置に生じた圧縮応力の値を示している. 疲労強度は, 図-8に示すように溶接止端から発生した疲労き裂が溶接部から離れて10mm進展した段階  $N_{10}$  とした. 図には, 文献2)の疲労強度も含まれている. 図-9からわかるように, ピーニングの後に圧縮のオーバーロードを一度作用させた場合, オーバーロードの大きさに応じてピーニングによる疲労強度向上効果が低下している. 特に, -300MPa 以上となる圧縮のオーバーロードが作用した場合, ピーニングの効果が完全に失われる. しかし, -190MPa 以下となる圧縮のオーバーロードが作用した場合, ピーニングによる疲労強度向上効果の多くが残されている.

面外ガセット溶接継手試験体に対して, 疲労き裂が  $N_{10}$  に達した後, ICR 処理(図-8に示す I~IV の順序)により疲労き裂を閉口した場合に対して, 圧縮の過荷重が ICR 処理に与える影響に対する疲労試験結果を図-9に示す. 図では, き裂が止端から離れて30mmに達した段階  $N_{30}$  を疲労強度としている. 図の横軸は, 試験体 AW に対して  $N_{30}$  に達した時の繰返し回数を示し, ICR 処理でき裂を閉口させた試験体では, ICR 処理後から  $N_{30}$  に達した時の後の繰返し回数を示している.

図からわかるように, 応力範囲100MPa程度に対して, ICR 処理によりき裂閉口した後, -200MPa となる圧縮のオーバーロードを作用させても,  $N_{10}$ +ICR 処理同様に疲労き裂が発生しなかった. しかし, -350MPa となる圧縮のオーバーロードを作用させた場合, AW

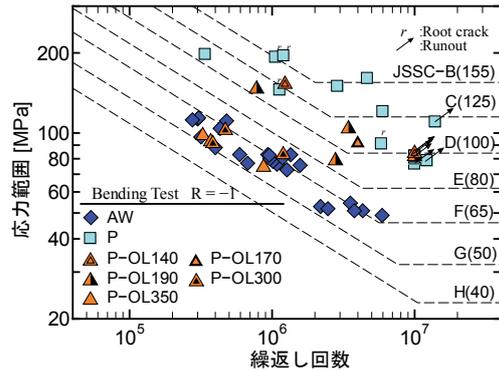


図-7 面外ガセット溶接継手試験体の疲労試験結果

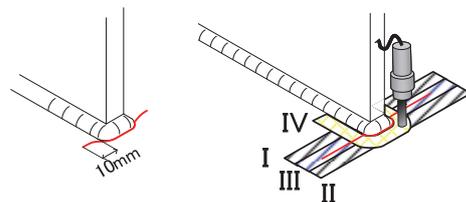


図-8  $N_{10}$  の疲労き裂と ICR 処理順序

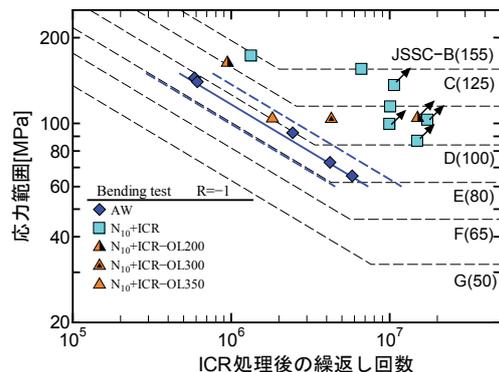


図-9 面外ガセット溶接継手試験体のき裂閉口後の疲労試験結果

の疲労強度と同等まで ICR 処理に効果が低下した. ただし, その場合でも, ICR 処理後から AW の疲労強度と同等の疲労寿命を有している. ICR 処理の効果が完全に消失したわけではない.

##### (2) 荷重非伝達型リブすみ肉溶接継手試験体

荷重非伝達型リブすみ肉溶接継手試験体の疲労試験結果を図-10に示す. 溶接止端から発生した疲労き裂が進展し, 母材側面に達した段階の繰返し回数を疲労強度としている. 図には同じ寸法で疲労試験が行われている文献4)のデータも示されている. この図からわかるように, -220MPa となる圧縮のオーバーロードが作用した場合, ピーニングによる疲労強度向上効果が持続していた. しかし,

-290MPa 以上となる圧縮のオーバーロードが作用した場合、ピーニングによる疲労強度向上効果の大部分が消失し、溶接したままの疲労強度に近づく。

### (3)カバープレート試験体

カバープレート試験体の疲労試験結果を図-11に示す。図には同じ寸法で疲労試験が行われている文献 5)のデータも示されている。この図から、カバープレート試験体では、ピーニング後に、降伏応力となる圧縮のオーバーロードが作用した場合でも、疲労強度等級 B に相当する高い疲労強度が持続していることがわかる。

### (4)ストップホール試験体

ストップホール試験体では、き裂を模擬するために、ストップホール間にレーザーで貫通切込みを設けている。本試験では、ICR 処理により貫通切込みの両表面を閉口した。ICR 処理により閉口したき裂の断面を図-12に示す。この図からわかるように、幅 0.7mm 程度の貫通切込みが設けられていても、試験体の両表面を ICR 処理することにより、母材の両表面から 1.5mm 程度閉口していることがわかる。

ストップホール試験体の疲労試験結果を図-13に示す。ストップホール縁から 1mm 疲労き裂が進展した時の繰返し回数を疲労寿命としている。この図から、ストップホールの間の貫通切込みを ICR 処理によって閉口した場合、ストップホールの疲労寿命が、ICR 処理されていない通常のストップホールと比べて延命されていることがわかる。一方、ストップホール間の貫通切込みを ICR 処理した後、-300MPa 以上となる圧縮のオーバーロードが作用した場合の疲労寿命は、ストップホールをみの場合の疲労寿命以下まで低下した。しかし、-200MPa となる圧縮のオーバーロードが作用した場合は、ストップホールの疲労寿命よりも高いため、ICR 処理によるストップホールの疲労寿命向上効果が残されていることがわかる。

### (5)まとめ

本研究では、面外ガセット溶接継手試験体、荷重非伝達型リブすみ肉溶接継手試験体、カバープレート試験体およびストップホール試験体を対象として、圧縮のオーバーロードがピーニングによる疲労強度向上効果に与える影響を板曲げ疲労試験を行い調べた。主な結論を以下に示す。

- 1) ピーニング処理後に圧縮のオーバーロードが作用した場合、ピーニングによる疲労強度向上効果が減少する。ただし、疲労強度向上効果の減少量は、継手形式により異なる。また、対象とした継手形式に対して、-200MPa 程度以下となる圧縮のオーバーロードが作用しても、ピーニングによる疲労強度向上効果の多くが残

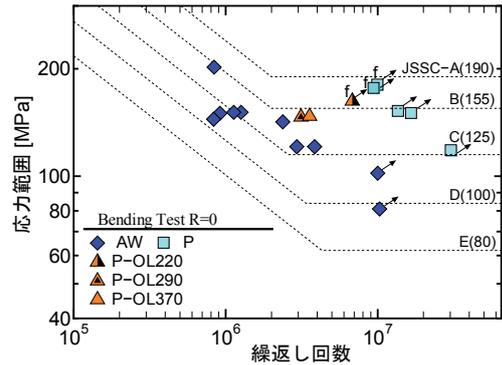


図-10 荷重非伝達型リブすみ肉溶接継手試験体の疲労試験結果

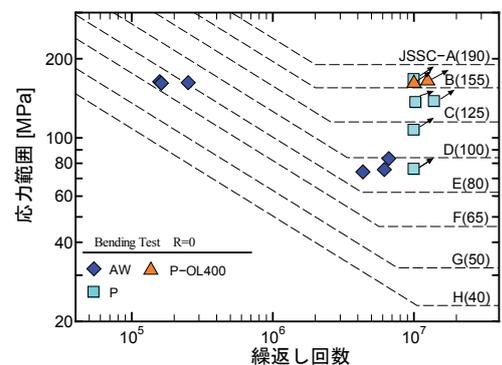


図-11 カバープレート試験体の疲労試験結果



図-12 ICR 処理した切込みの断面

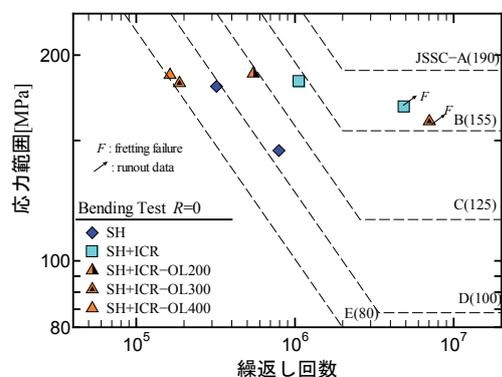


図-13 ストップホール試験体の疲労試験結果

されていた。

- 2) ICR 処理によって疲労き裂を閉口した後に、圧縮のオーバーロードが作用した場合も同様に、圧縮のオーバーロードの大きさに応じて、き裂閉口による疲労寿命向上効果が減少した。面外ガセット溶接継手試験体から発生したき裂をICR処理して閉口した場合とストップホール間の貫通切込みをICR処理して閉口した場合に対して、 $-200\text{MPa}$ 程度以下となる圧縮のオーバーロードが作用しても、ICR処理による疲労寿命向上効果が完全に消失しなかった。

#### 【参考文献】

- 1) 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, Vol.65, No.4, pp.961-965, 2009.
- 2) 石川敏之, 山田健太郎, 柿市拓巳, 李蒼: ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.264-272, 2010.
- 3) 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, Vol.14, No.55, pp.1-8, 2007.
- 4) 溝上善昭, 酒井修平, 山内誉史, 荒木健二, 上原正太郎: 簡易なエアーツールを用いたピーニング工法の重ねプレートすみ肉溶接部の疲労試験, 土木学会第 67 回次学術講演会概要集, I-264, pp.527-528, 2012.
- 5) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎: すみ肉溶接継手の溶接止端に発生した疲労き裂の ICR 処理による補修・補強, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.665-672, 2013.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- ① Ishikawa, T., Shimizu, M., Tomo, H., Kawano, H. and Yamada, K., Effect of Compression Overload on Fatigue Strength Improved by ICR Treatment, International Journal of Steel Structures, 査読有, Vol.13, No.1, pp.175-181, 2013.  
<http://link.springer.com/article/10.1007/s13296-013-1016-7>
- ② 石川敏之, 松本理佐, 服部篤史, 河野広隆, 山田健太郎: き裂表面閉口によるストップホール縁の応力集中の低減, 材料, 査読有, 第 62 巻, 第 1 号, pp.33-38, 2013.  
DOI : 10.2472/jsms.62.33
- ③ 石川敏之, 清水 優, 軻 一, 河野広隆, 山田健太郎: ICR 処理による疲労強度向

上効果に圧縮の過荷重が与える影響, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 19 巻, pp.345-350, 2011.

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① 松本理佐, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆, 山田健太郎: き裂表面閉口によるストップホールの疲労強度の向上効果, 平成 25 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-46, 2013.
- ② 栗津裕太, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆: ピーニング処理による肉溶接継手の疲労強度向上効果に圧縮の過荷重が与える影響, 平成 25 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-45, 2013.
- ③ Matsumoto, R., Ishikawa, T., Hattori, A. and Kawano, H.: Reduction of stress concentration at edge of stop hole by closing crack surface, The twenty-fifth KCCNN Symposium on Civil Engineering, Busan, Korea, pp.147-150, 2012.
- ④ 松本理佐, 石川敏之, 河野広隆, 服部篤史: き裂閉口によるストップホールの応力集中低減工法に関する研究, 平成 24 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-25, 2012.
- ⑤ 松本理佐, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆, 山田健太郎: ICR 処理によるストップホールの応力集中低減工法に関する研究, 土木学会第 67 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 第 67 巻, I-121, pp.241-242, 2012.
- ⑥ Ishikawa, T., Shimizu, M., Tomo, H., Kawano, H. and Yamada, K.: Effect of Compression Overload on Fatigue Strength Improved by ICR Treatment, The 6th International Symposium on Steel Structures, November 3-5, 2011, Seoul, Korea, pp.339-344, 2011.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

石川 敏之 (ISHIKAWA TSOHIYUKI)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 00423202