

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420490

研究課題名(和文)低温相変態溶接棒を用いた溶接継手部の疲労強度向上の試み

研究課題名(英文) Fatigue Strength Improvement of Welded Joint by Application of Low Temperature Transformation Weld Material

研究代表者

穴見 健吾 (ANAMI, KENGO)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：30272678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：溶接継手部の疲労強度向上を目的として、溶接時に圧縮残留応力を導入できる低温相変態溶接棒(LTT)の適用性の新たな適用性の検討を行った。

(1)LTTを本溶接として用いた時のルート部の疲労特性について実験的に検討し、ルート部から主板にき裂が進展する場合には大きな効果が得られるが、ビードに進展する場合には効果が得られなかった。その結果を変態膨張時の残留応力発生メカニズムから説明を行った。

(2)付加板溶接継手の付加板側回し溶接止端部に対して、LTTを用いた付加溶接により大きな疲労強度向上効果が得られた。また、主板・付加板側両止端部に同時に付加溶接しても向上効果に大きな変化がないことを示した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research project is to examine new application of low temperature transformation welding material (LTT) for improving fatigue strength of weld joints

(1)The fatigue behavior of weld root of fillet weld made with conventional weld material and LTT was experimentally compared. While significant fatigue strength improvement was observed in the case where crack propagated into main plate, no improvement was observed in case where crack propagated into weld bead. In this study, this difference of fatigue strength improvement was discussed by FEM focusing the welding residual stress.

(2) The application of additional welding with LTT for the boxing weld toe of attachment side was examined and large fatigue strength improvement was obtained. In addition, it was revealed that the influence of additional welding at attachment side weld toe following to the additional welding at base plate side did not affect the fatigue strength improvement at weld toe of base plate side.

研究分野：土木鋼構造

キーワード：疲労強度向上 溶接継手 低温相変態溶接棒 圧縮残留応力

### 1. 研究開始当初の背景

近年、鋼橋梁において多くの疲労き裂が溶接継手部に発生しており、疲労損傷対策が火急の課題となっている。これらの溶接継手部に発生する疲労き裂には、溶接止端部（主板側・付加板側）および溶接ルート部から発生するき裂がある。疲労損傷対策の一つとして、溶接継手部の疲労強度を向上させることが挙げられる。溶接継手部の疲労強度を向上させる手法は従来数多く提案されている。それらの手法は止端部応力集中を低減させる、もしくは溶接により生じる引張残留応力を圧縮残留応力に転化させる手法に大別でき、実橋梁に適用されている手法もある。しかし、これらの手法の中には、溶接ルート部の疲労強度に着目した手法はない。また手法によっては付加物側こば面の回し溶接部への施工が難しいなどの問題もある。本研究では低温相変態溶接棒を用いて圧縮残留応力の導入する疲労強度向上手法の適用性の拡大を目指しているが、2つの溶接止端部および溶接ルート部の疲労強度を向上させ、溶接継手部からの疲労損傷の発生を防止できる手法の確立が望まれている。

### 2. 研究の目的

溶接継手部の疲労強度向上の検討や疲労損傷の溶接補修の可能性の検討の一つとして、低温相変態溶接棒の活用を検討する。従来、低温相変態溶接棒の疲労強度向上手法としての活用に関する研究は、主板側溶接止端部に着目した検討が殆どであり、その中でも、低温相変態溶接棒を用いて付加物溶接継手の主板止端部へ付加溶接を行い、その付加溶接止端部へ圧縮残留応力を導入するという手法の検討が殆どである。本研究では、低温相変態溶接棒の新たな適用性を開発することを目指し、鋼橋において疲労損傷が多く報告されている溶接継手形式の中で、疲労強度向上手法が明確となっていない継手ディテールに注目し、低温相変態溶接棒の溶接ルート部の疲労強度向上への適用性の検討、および付加物溶接継手の付加物側溶接止端部側の疲労強度向上への適用性の検討を行うことを主目的として研究を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では低温相変態溶接棒の新たな適用性を開発することを目指した検討を行うことを目的としている。溶接ルート部の疲労強度向上への適用性の検討では、ルート部から溶接ビードへき裂が進展する場合と主板へき裂が進展する場合の2つのケースを検討することを目的として、片面すみ肉T字溶接継手試験体を低温相変態溶接棒を本溶接として用い製作し疲労試験を行う。また、低温相変態溶接棒を本溶接として用いた場合の溶接金属の機械的性質を実験的に検討する。更に、溶接ルート部の溶接残留応力の発生メカニズムを有限要素解析により検討を行い、

低温相変態溶接棒のルート部の疲労強度向上への適用性の検討を行う。

付加物溶接継手の付加物側溶接止端部への低温相変態溶接棒の適用性の検討では、先ずこれまで検討がされていない、付加物側回し溶接止端部への付加溶接としての適用性を、十字溶接継手試験体を用いた疲労試験により検討する。次に、主板側回し溶接止端部および付加物側回し溶接止端部の両方から疲労き裂が発生する可能性のある溶接ディテールを想定し、主板側・付加物側両止端部に付加溶接をした場合の効果、面外ガセット溶接継手を用いた疲労試験により検討する。また、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効果に与える付加溶接条件の影響を付加溶接溶込み量に注目し、溶接施工試験、マクロ試験、熱弾塑性有限要素解析を用いて検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 溶接ルート部への適用性の検討

低温相変態溶接棒を用いた溶接ルート部への疲労強度への適用性を検討するために、低温相変態溶接棒および普通溶接棒を本溶接として用いた片面すみ肉T字溶接継手試験体を製作し、疲労試験により比較検討を行った。溶接ルート部から疲労き裂が主板側に進展するケースを模擬する試験では主板に曲げを与える4点曲げ疲労試験を、疲労き裂がビード側に進展するケースを模擬する試験では主板を固定し付加物（リブ）を面外に曲げる片持ち梁式疲労試験を行った。両ケースとも応力比は概ね0で行っている。疲労試験結果では、主板に疲労き裂が進展するケースでは、低温相変態溶接棒を用いることにより、疲労強度が少なくとも1~2等級程度向上することが分かった。一方では、ビードに疲労き裂が進展するケースでは、むしろ低温相変態溶接棒を用いた試験体の疲労強度が普通溶接材料を用いた試験体よりも小さい結果となった。この原因を調査することを目的として溶接ルート部近傍の溶接残留応力の発生メカニズムについて有限要素解析にて検討を行った。低温相変態溶接棒による圧縮残留応力の発生は普通溶接材料よりも低温で生じる溶接冷却時の変態膨張によるものであるため、ここでは先ず弾性解析により試験体のすみ肉溶接部に溶接ギャップを設け、溶接ビード部を温度膨張させた解析モデルを用い検討を行った。その結果、溶接ビード部の膨張により溶接ギャップ部が変形するが、主板側の不溶着部先端は股閉じのように、付加板側の不溶着部先端は股開きのように変形し、それぞれの位置に圧縮、引張の残留応力が生じること、またその変形は非常に局所的な変形であり、付加板反対側に溶接ビードがある場合（両面すみ肉溶接）においても同様の変形が生じることを示した。この残留応力の発生機構が、ルートから主板に進展するき裂に対して低温相変態溶接棒を用いるこ

とにより大きな効果が得られ、溶接ビードに進展するき裂に対しては逆の効果となる主要因と考えられる。また、普通溶接材料と低温相変態溶接棒を用いた荷重伝達型十字すみ肉溶接継手試験体の引張試験、およびすみ肉溶接部を模した溶接を施した部分溶け込み突合せ溶接継手(90度開先)から抜き出したシャルピー試験体(5mmU字ノッチ)を用いた衝撃試験により低温相変態溶接棒を用いた溶接ビードの機械的性質の調査を行った結果、伸び性能および吸収エネルギーともに普通溶接材料よりも小さい結果となった。

#### (2) 付加物側溶接止端部への適用性の検討

低温相変態溶接棒を用いた付加溶接工法の適用性の拡大として、付加物側溶接止端部への適用性の検討を行うため、回し溶接を有する完全溶け込み溶接により荷重伝達型十字溶接試験体を製作し、引張疲労試験を行った。応力比は概ね0としている。試験体は、疲労き裂の発生位置を主板こば面に限定するために、中板を挟んだ両側の主板の幅に差異を与えており、低温相変態溶接棒の付加溶接は、主板こば面から30mmの範囲で行っている。溶接まま試験体では全て主板こば面の回し溶接止端部から疲労き裂が発生していたが、低温相変態溶接棒による付加溶接をした試験体では、同様に付加溶接の回し溶接止端部以外にも、付加溶接端部位置などからも疲労き裂の発生が見られた。図-1に疲労試験結果を示すが、低温相変態溶接棒を用いて付加溶接を行うことにより、疲労強度が日本鋼構造協会の疲労強度等級で2~3等級程度以上向上することを示した。

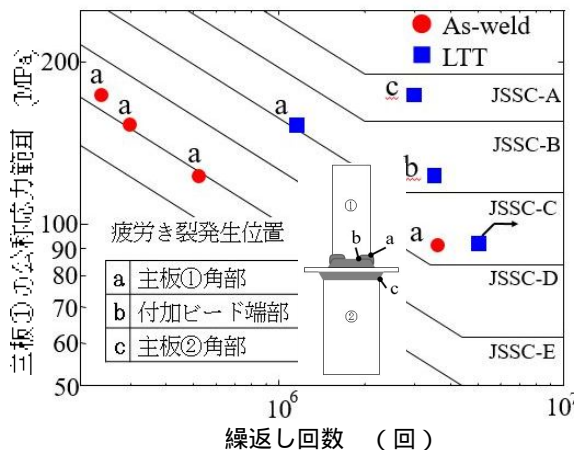


図-1 付加板側こば面への付加溶接の適用性

また試験体こば面にひずみゲージを貼付し、切断法により溶接残留応力を測定した結果、回し溶接近傍で、溶接まま試験体では引張、低温相変態溶接棒を用いた付加溶接試験体では圧縮残留応力が測定されており、この導入された圧縮残留応力が疲労強度向上の主要因であることを示した。

#### (3) 主板・付加板両止端部へ同時に低温相変態溶接棒を用いた付加溶接を適用する検討

前項の検討により、付加物側回し溶接止端部においても低温相変態溶接棒を用いた付加溶接により疲労強度向上が見られることを示した。しかし、実橋梁においては例えば鋼床版垂直補剛材上端部のように、同一ディテールであっても主板側(デッキ側)止端部および付加板側(補剛材側)止端部の両方から疲労き裂が発生する可能性があるようなディテールが存在する。そこで、ここでは主板・付加板両止端部へ同時に低温相変態溶接棒を用いて付加溶接を適用した時の疲労強度向上効果の検討を行った。試験体は面外ガセット溶接継手試験体とし、溶接まま試験体(M-AS試験体)、主板側回し溶接部に低温相変態溶接棒を用いて付加溶接を施した試験体(M-ML試験体)、低温相変態溶接棒を用いて主板側、付加板側の順に付加溶接した試験体(M-BL試験体)を製作した。疲労試験は板曲げ疲労試験機を用い、応力比は概ね0として試験を行った。また本検討の主目的は主板側付加溶接時に回し溶接部に導入された圧縮残留応力が、付加板側回し溶接時の熱影響により変化するかを検討することであり、M-BL試験体においては、付加板側付加溶接時に主板側付加溶接止端部の温度変化を、熱電対を設置して測定している。測定結果は最高で105程度であった。疲労き裂は溶接まま試験体では回し溶接止端部、M-ML、M-BL試験体では1体を除くすべての試験体で主板側付加溶接の回し溶接止端部から疲労き裂が発生した。疲労試験結果を見ると、M-ML試験体、M-BL試験体ともに大きな疲労強度の差異は見られておらず、主板側、付加板側溶接部同時に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を得ることができることを示した。しかし、本検討では、試験体の本溶接を部分溶け込みで製作した試験体と完全溶け込み溶接で製作した試験体との間に付加溶接による疲労強度向上効果に大きな差異が見られ、後者の試験体ではほとんど疲労強度向上効果が得られなかった。この原因については次項で付加溶接条件と併せて検討を行った。

#### (4) 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効果に及ぼす溶け込みの影響の検討

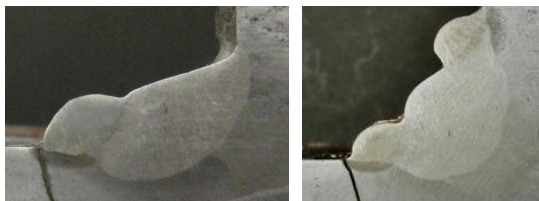
前項で示したように、回し溶接部の本溶接を部分溶け込み溶接で行った試験体については、低温相変態溶接棒を用いた付加溶接により疲労強度が向上したが、完全溶け込み溶接を施した試験体に対しては向上効果がほとんど見受けられなかった。マクロ試験により付加溶接部の溶け込みを確認した結果、図-2に示すように、部分溶け込み溶接により製作されていたが、完全溶け込み溶接の場合には主板への溶け込みが非常に薄い(小さい)結果であった。本研究では、この疲労強度向上効果の差異の原因が、付加溶接の主板への溶け込みの差異に影響されていると考え、

- ・付加溶接の入熱量
- ・付加溶接の狙い位置

をパラメータとして検討を行った。付加溶接の狙い位置は、本溶接が完全溶込み溶接の場合、本溶接ビードが盛り上がった形状となり、本溶接止端部を狙い位置とした場合、本溶接ビード側を大きく溶融させることになり、主板側への溶込みが小さくなるものと考え、本溶接止端部から 1mm 離れた位置を狙い位置とした付加溶接を試みた。施工試験で溶込みを確認し、前項と同様の完全溶込み溶接継手試験体に対してパラメトリックな溶接条件で付加溶接を行い、疲労試験を行った。試験体は以下のとおりである。

- Series-1：部分溶込み溶接・狙い位置止端部 200A-20V
- Series-2：完全溶込み溶接・狙い位置止端部 160A-16V
- Series-3：完全溶込み溶接・260A-28V  
狙い位置止端部+1mm
- Series-4：完全溶込み・200A-20V  
狙い位置止端部+1mm

図-3 に疲労試験結果を溶込み率と 200 万回疲労強度で整理した結果を示す。溶接まま試験体(M-AS 試験体)については全ての試験体の疲労試験結果の平均値から、M-ML 試験体および M-BL 試験体については各試験体の疲労試験結果から S-N 線図上で傾きを 3 と仮定して 200 万回疲労強度を求めている。その結果、低温相変態溶接棒による付加溶接による疲労強度向上効果はばらつきがあるものの、疲労強度向上効果は本研究で定義した溶込み率  $< (\text{主板の溶込み}) / (\text{主板の溶込み} + \text{付加溶接ビード面積}) >$  と概ね線形関係にあることを示した。ただし、従来、溶込みが増加すると、希釈により低温相変態溶接棒による圧縮残留応力の導入効果が小さくなるとも言われており、この点については、付加溶接条件と併せて、今後さらに検討をする必要がある。



(a)部分溶込み溶接 (b)完全溶込み溶接

図-2 付加溶接の溶込み状況の差異

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)  
〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 7 件)

Fumiya SAITO, Kengo ANAMI, Ikumi IKEHARA, Fatigue Strength Improvement by Additional Welding by Low Temperature Transformation Welding Material, 14th

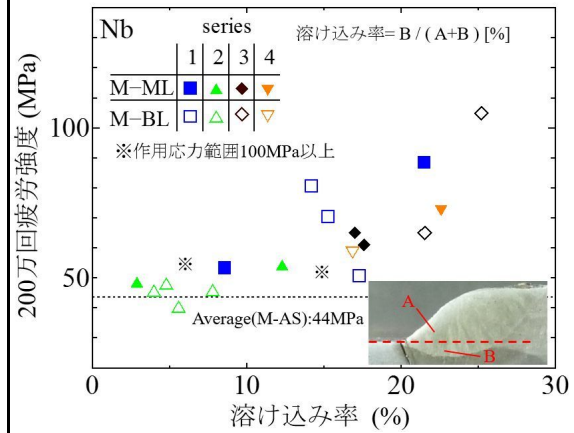


図-3 溶込み率と 200 万回疲労強度の関係

East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-14), 2016

斉藤文弥, 池原育実, 穴見健吾, 澁谷敦, 低温相変態溶接棒を用いた疲労強度向上効果に対する主板への溶け込みの影響, 第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2016

斉藤文弥, 池原育美, 穴見健吾, 澁谷敦, 小野秀一, 主板・付加板両止端部への低温相変態溶接棒の適用性, 平成 27 年度土木学会年次学術講演会, 2015

斉藤文弥, 穴見健吾, 小野秀一, 澁谷敦, 低温相変態溶接棒を用いた付加ビード工法による疲労強度向上, 第 42 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2015

池原育実, 穴見健吾, 斉藤文弥, 澁谷敦, 低温相変態溶接棒の主板及び付加板両止端部への適用第 42 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2015

矢野雄士, 佐藤嘉宏, 穴見健吾, 低温相変態溶接棒を用いたすみ肉溶接継手の機械的性質, 第 41 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2014

佐藤嘉宏, 穴見健吾, 低温相変態溶接棒を用いた溶接継手の疲労強度向上, 第 41 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2014

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

穴見 健吾 (ANAMI, Kengo)  
芝浦工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 3 0 2 7 2 6 7 8