

新鉄鋼材料による長寿命構造物の開発

Development of long-life structures using new steel materials

名古屋大学大学院工学研究科 准教授 判治 剛

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究の背景と目的

2021年10月に和歌山県の六十谷水管橋が崩落し、市民生活に大打撃を与えている。この事故により、あらためて持続可能な社会インフラの実現の重要性が浮き彫りとなった。本研究は、鋼橋の劣化要因の一つである疲労に着目し、予防保全的に鋼部材を高疲労耐久化することによる、人的・財政的制約に左右されにくい持続的橋梁維持管理に資する長寿命構造物を開発することを目的とする。

鋼構造部材の疲労を支配する主な因子は、溶接部の局所的な応力集中と引張残留応力である。本研究は、新しい鉄鋼材料の適用と溶接のデジタル制御化によりそれらを解消し、長寿命構造部材の実現を目指す、つまり、これまでの疲労強度改善方法とは異なるアプローチとして、製作方法や材料に工夫を加えることによる長寿命化の可能性を探るものである。

具体的には、溶接部近傍の引張残留応力を低減できる低変態温度溶接材料（LTT溶材）¹⁾と近年、船舶分野で新たに開発された、一度の溶接で大脚長および良好なビード形状が得られるといわれる溶接材料（形状改良材）²⁾を用い、それらによる疲労強度の向上効果を明らかにした。また、残留応力計測と製作過程を再現した熱弾塑性解析により、溶接材料の違いによる残留応力分布の影響を考察した。

2. 疲労試験

試験体は鋼橋の代表的な継手としてT継手とした。その形状および寸法を図-1に示す。供試鋼材はSM490YBである。溶接材料にはLTT溶材（JIS Z3313 T780T1-0CA-G）と形状改良材（JIS 3313 T49J0T1-0CA-U）、比較のために一般的な溶材（普通溶材、JIS Z3313 T49J0T1-0CA-G）を用いた。試験体は、大板の状態で大板溶接、本溶接を行い、組立溶接部を削除することで製作した。1パス目のすみ肉溶接を行った後、溶接線中央の主板下面の温度が50℃以下になったことを確認して、2パス目のすみ肉溶接を行った。溶接は水平姿勢で行い、ロボットによるCO₂自動溶接を採用した。疲労試験に先立ち、レプリカ法による溶接部の形状計測と、X線回折式残留応力計測装置による溶接止端近傍の残留応力計測を行った。

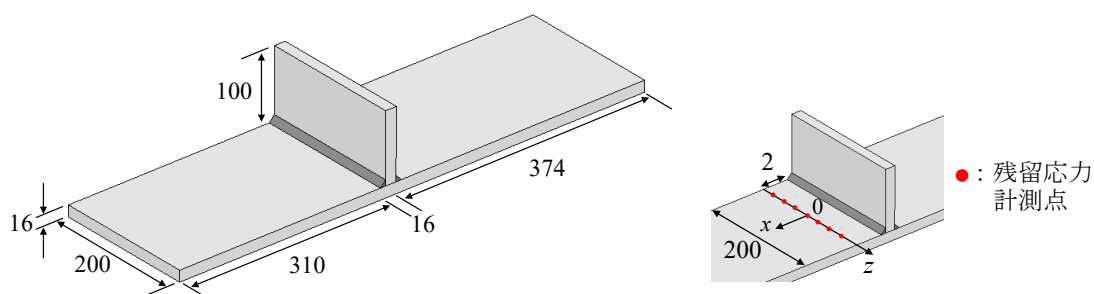


図-1 試験体（単位：mm）

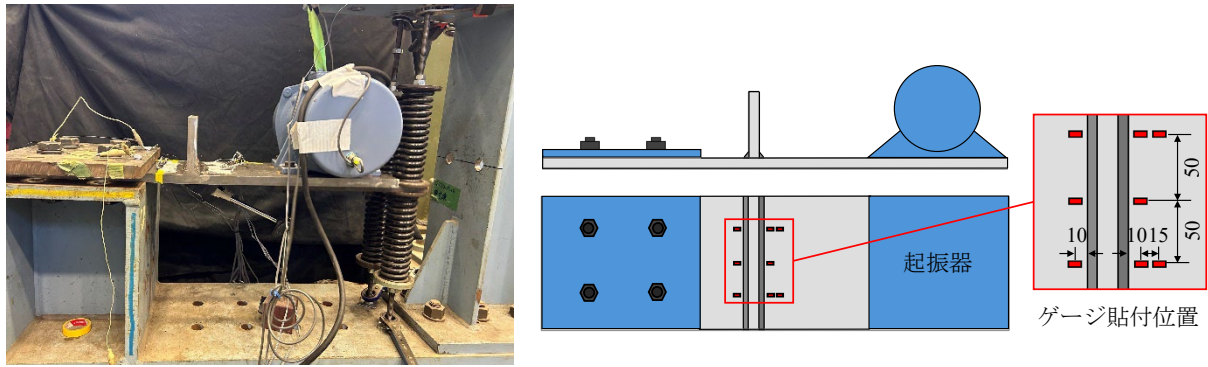


図-2 疲労試験の様子（単位：mm）

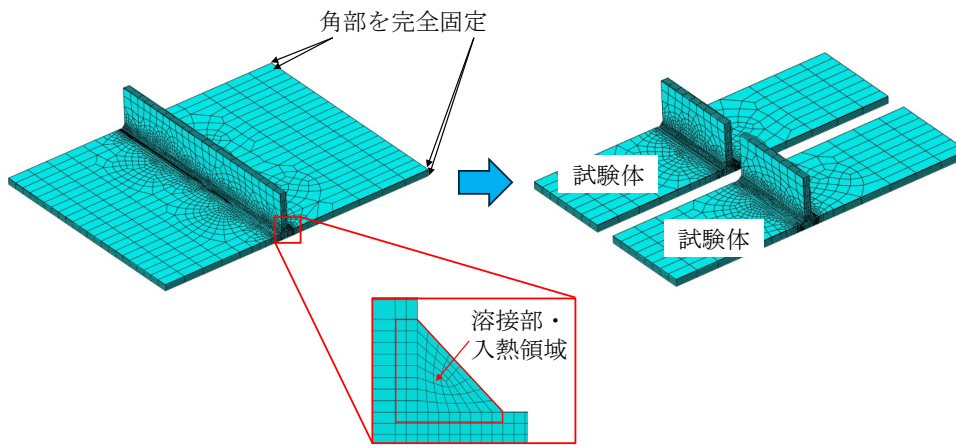


図-3 解析概要

疲労試験には板曲げ振動疲労試験機³⁾を用いた。試験状況を図-2に示す。溶接止端における応力比は0とし、試験中、定期的にビーチマーク载荷を行った。1000万回载荷後に未破断の場合は応力範囲を上げて再度繰返し载荷を与え、試験体が破断するまでこれを継続した。

3. 有限要素解析

汎用有限要素解析ソフトウェア ABAQUS Ver6.14 を用いた熱弾塑性解析を行い、溶接により生じる試験体の残留応力分布を求めた。解析モデル、境界条件を図-3に示す。解析では、切断部を含む全体をモデル化し、境界条件は溶接時の試験体の拘束を再現した。溶接形状計測結果や断面マクロ写真を基に、溶接部のサイズや溶込み量を決定し、溶接部に入熱を与えた。材料特性には温度依存性を与えている⁴⁾。LTT 溶材の相変態は線膨張係数に温度依存性を与えることで再現し、LTT 溶材の変態点測定結果を基に決定したもの⁵⁾を用いた。解析手順は次の通りである。組立溶接のみを含む状態を初期状態とした解析モデルに対し、1パス目のすべての溶接部を出現させて入熱し、パス間温度まで冷却した。次に、2パス目も同様に出現・入熱し、室温まで冷却した後、切断部の要素を消去して製作過程を再現した。

（実験調査によって得られた新しい知見）

4. 計測結果

溶接部の断面マクロ写真を図-4に、溶接形状計測結果を図-5に示す。形状改良材と普通溶材で溶接形状に大差はないが、LTT 溶材では、他の溶材と比較して、止端半径が小さく、止端角が大きいことがわかる。一方、溶接性の悪い LTT 溶材でもロボット溶接を用いることにより、安定的に溶接ができ、溶接形状のばらつきは他の溶材と同程度である。

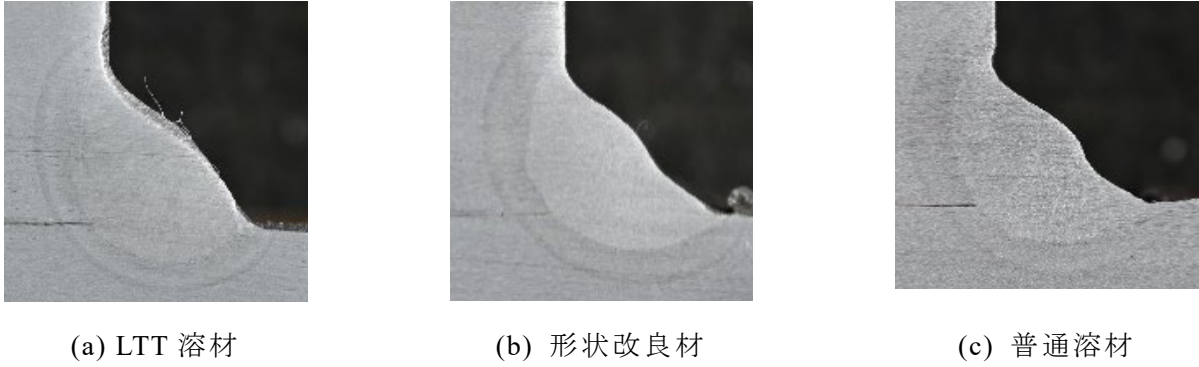


図-4 各試験体の溶接部のマクロ写真

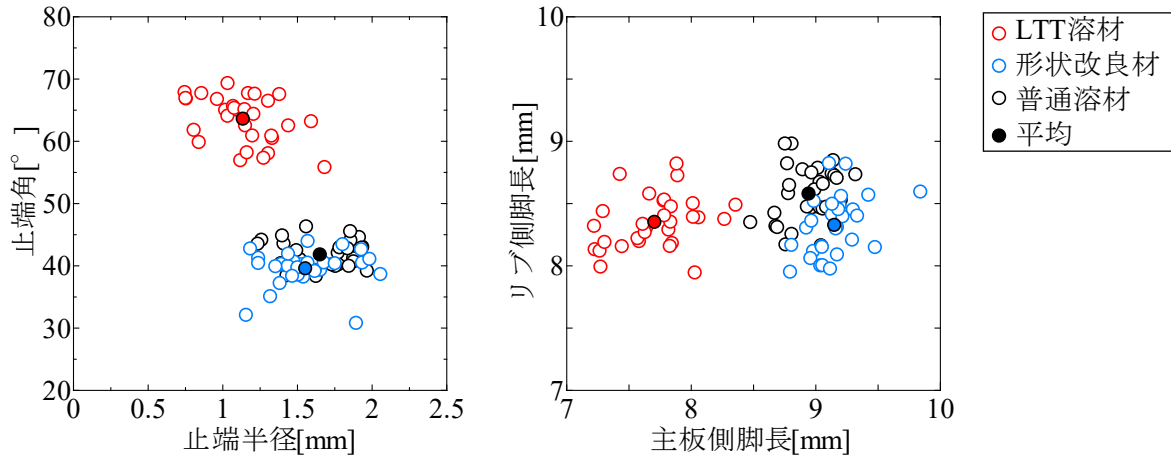


図-5 溶接形状計測結果

残留応力計測点は図-1に示す溶接止端から2 mm位置で幅方向に25 mm間隔とし、溶接線直交方向の残留応力を計測した。各点で複数回計測し、その平均とばらつきを求めた。計測結果を図-6に示す。なお、1パス目と2パス目で大きな差はみられなかったため、き裂が発生した溶接線(1パス目)のみを示している。形状改良材や普通溶材と比較してLTT溶材による引張残留応力の低減効果が確認できる。

5. 疲労試験結果

疲労試験により得られた破面の例を図-7に示す。これより、T継手の疲労き裂は半楕円型であり、複数の小さな半楕円き裂が繰返し载荷とともに成長・結合し、一つの半楕円型のき裂となることがわかる。破面からき裂深さ a とき裂長さ $2b$ を Auto CADにより計測した結果を図-8に示す。図中には、過去に提案された板曲げを受けるT継手のすみ肉溶接止端における疲労き裂形状比の推定式⁷⁾をあわせて示している。いずれの鋼材も推定式を上限として分布していることがわかる。この推定式は普通溶材を対象としているものであるが、LTT溶材にも適用できること、つまり、LTT溶材による残留応力がき裂進展形状に与える影響はほとんどないことがわかる。

試験体が破断した繰返し数を疲労寿命と定義し、疲労試験結果を整理した結果を図-9に示す。縦軸は溶接止端部の公称応力範囲であり、主板表面に貼付したひずみゲージの値から線形内挿して求めた。なお、板曲げの影響を考慮して4/5倍している。図中には、本研究の結果に加えて、普通溶材で製作した板厚の異なるT継手(12 mm, 19 mm)に対し、同様の方法で行われた既往研究の結果^{7),8)}も示している。普通溶材の結果がJSSC疲労設計曲線のD~E

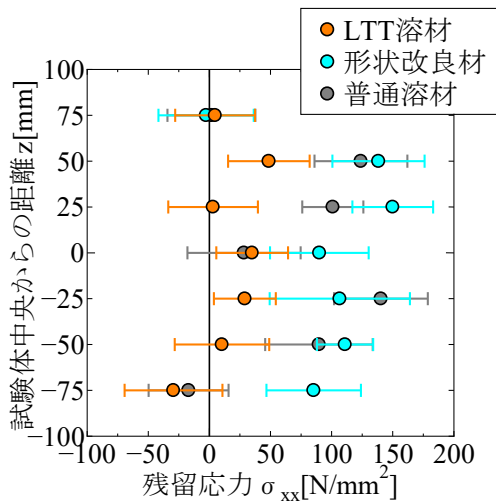


図-6 残留応力計測結果

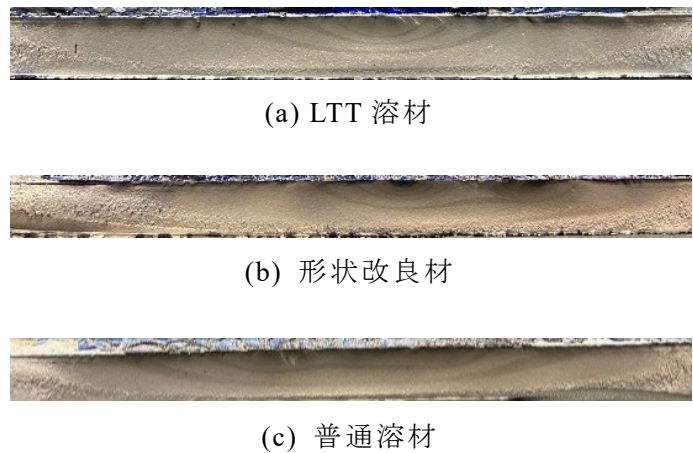


図-7 疲労破面の例

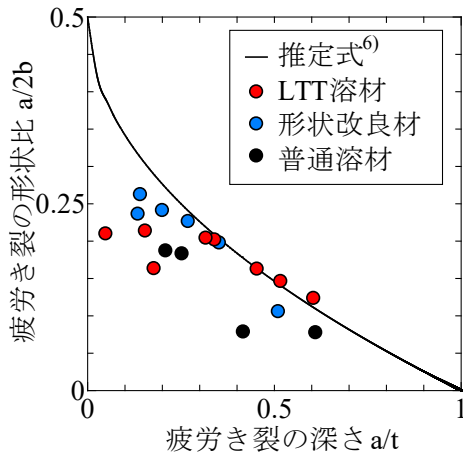


図-8 き裂形状比

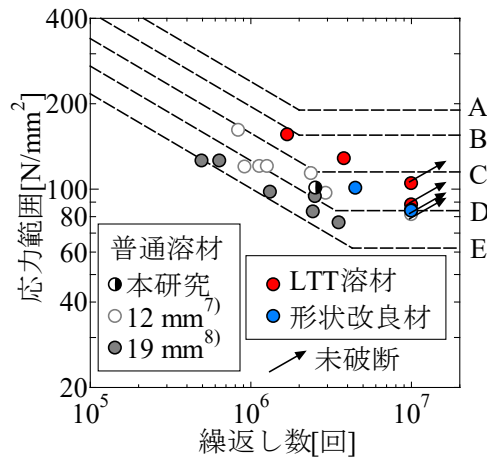


図-9 疲労試験結果

等級付近に分布しているのに対し、LTT 溶材の結果は C 等級付近に分布している。一般に、板厚が大きいほど、また止端半径が小さいほど、溶接止端部の応力集中係数が大きくなることを考慮すると、LTT 溶材により溶接止端の残留応力が低減したことにより T 継手の疲労強度が向上したと考えられる。これは、図-6 に示すように、LTT 溶材により溶接止端近傍で引張残留応力が低減されたことによるものと予想される。また、形状改良材の結果は普通溶材のそれとほぼ同じ領域に分布しており、形状改良材による疲労強度の向上はあまりみられない。この結果は、溶接形状計測結果や残留応力計測結果において普通溶材と形状改良材でほとんど差がなかったことが主な理由であると考えられる。

6. 解析結果

2 パス目の溶接部における溶接止端から 2 mm 位置での幅方向残留応力分布を図-10 に示す。図中には計測結果も併記している。普通溶材の残留応力の分布傾向は両者でおおむね一致している。LTT 溶材では計測値と解析値で若干の差がみられるものの、LTT 溶材による引張残留応力の低減傾向は確認できる。き裂が発生した止端位置における幅方向の残留応力分布を図-11 に示す。図より、普通溶材の場合は引張の残留応力が生じているが、LTT 溶材により、引張残留応力を圧縮域近くまで低減できていることがわかる。

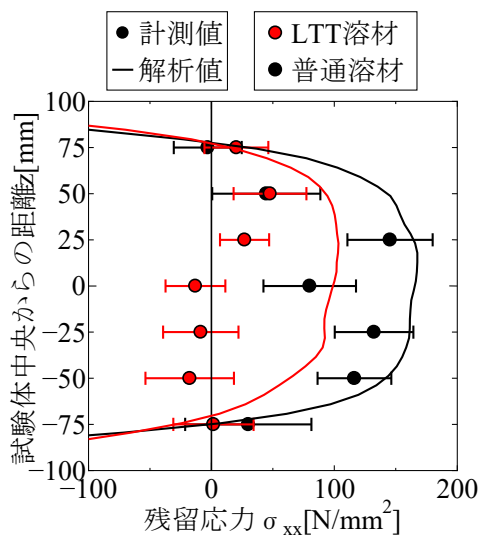


図-10 2 mm 位置の残留応力分布の比較

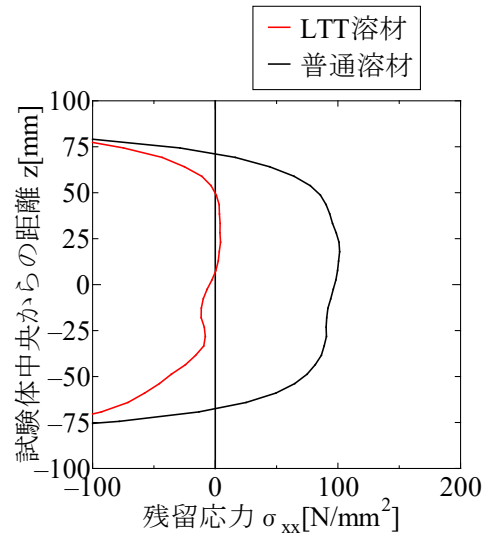


図-11 止端位置の残留応力分布

7. 研究成果のまとめ

本研究では、鋼橋の製作工程ではあまり使用実績のない新たな溶接材料を用いた T 継手を対象とし、その疲労強度と残留応力を実験的・解析的に検討した。以下に得られた主な成果を示す。なお、紙面の制約上、上記では割愛した成果も含めている。

- 溶接材料毎の最適な溶接条件選定のため、溶接条件をパラメータとして溶接施工試験を行い、溶接条件による溶接形状の変化を確認した。その結果、大脚長および良好なビード外観が得られる溶接材料（形状改良材）による溶接形状は、鋼橋で一般的に使用される普通溶材のそれとほとんど同程度であった。一方で、低変態温度溶接材料（LTT 溶材）の溶接形状は、それらの溶接材料と比較して、止端半径が小さく、止端角が大きい傾向であった。
- ロボット溶接を用いることにより、溶接性のよくない LTT 溶材でも安定的に溶接ができ、溶接形状のばらつきは他の溶材と同程度であった。
- 溶接により導入される残留応力を確認するために残留応力計測を行った。その結果、LTT 溶材による溶接止端近傍の引張残留応力低減効果を確認した。
- 溶接材料によるき裂形状や疲労強度への影響を検討するために板曲げ疲労試験とともにビーチマーク試験を行った。その結果、LTT 溶材によるき裂形状は普通溶材において得られた過去の知見と同様であることを示した。また、LTT 溶材を用いることで T 継手の疲労強度は向上することを示した。
- 溶接により生じる試験体の残留応力分布を求めるために熱弾塑性解析を行った。T 継手において、1 パス目の溶接と 2 パス目の溶接はそれぞれ独立したものとして考えることができ、試験体製作時の切断による残留応力分布への影響は小さいことを示した。また、LTT 溶材を用いることで溶接止端部における引張残留応力を圧縮域近くまで低減できることを明らかにした。
- 各溶接材料を用いた T 継手の応力集中係数を弾性解析により求めた。その結果、LTT 溶材の応力集中係数がほかの溶材のそれよりも高いことを示した。また、応力集中係数は試験体板幅中央から幅方向に向かって小さくなり、疲労き裂が板幅中央付近から発生しやすいことを確認した。

(発表論文)

- ・ 浅野景太, 判治剛, 舘石和雄, 清水優, 小谷祐樹, 竹渕敏郎: 異なる溶接材料を用いた T 形すみ肉溶接継手の疲労強度と残留応力, 第 79 回土木学会年次学術講演会 (投稿済)
- ・ 日本鋼構造協会, 第 32 回鋼構造年次論文報告集 (投稿準備中)

(参考文献)

- 1) 宮田, 溶接学会誌, 85, 2, pp.207-211, 2016.
- 2) 澤村, 神戸製鋼所溶接事業部門技術センター 溶接開発部技術レポート, 54, pp.1-6, 2014.
- 3) 山田ら, 構造工学論文集, 54A, pp.675-684, 2008.
- 4) 金ら, 溶接学会論文集, 23, 3, pp.431-435, 2005.
- 5) 判治ら, 構造工学論文集, 66A, pp.607-616, 2020.
- 6) 森ら, 構造工学論文集, 41A, pp.829-838, 1995.
- 7) 白ら, 構造工学論文集, 54A, pp.530-537, 2008.
- 8) Biehn Baik et.al., Journal of Structural Engineering, 55A, pp.871-879, 2009.