

低変態温度溶接材料を用いた片面すみ肉溶接ルート部の疲労強度

Fatigue strength of weld root in transverse attachment joints with single-sided weld using low transformation temperature welding consumable

判治剛†, 加納俊*, 館石和雄**, 清水優***, 津山忠久****, 竹渕敏郎*****

Takeshi Hanji, Suguru Kano, Kazuo Tateishi, Masaru Shimizu, Tadahisa Tsuyama, Toshio Takebuchi

†博(工), 名古屋大学大学院准教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

*名古屋大学大学院, 工学研究科土木工学専攻博士前期課程 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**博(工), 名古屋大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

***博(工), 名古屋大学大学院助教, 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

****博(工), 川田工業株式会社 (〒764-8520 香川県仲多度郡多度津町西港町 17)

*****MK エンジニアリング株式会社 (〒154-0012 東京都世田谷区駒沢 2-16-1)

This study investigated the applicability of low transformation temperature (LTT) welding consumables to improve fatigue strength against weld root failure. Transverse attachment joints formed by single-sided welding were fabricated using an LTT welding consumable and conventional welding consumable. Fatigue tests with out-of-plane bending loads revealed that higher fatigue strength and fatigue limit can be achieved in the joint with an LTT consumable compared with a conventional one. In addition, residual stresses around the weld bead were clarified by X-ray diffraction measurements and finite element analyses. The results indicated that the LTT consumable can reduce tensile residual stress around the weld and also introduce compressive residual stress to the weld root.

Key Words: low transformation temperature welding consumable, fatigue strength, residual stress, weld root crack

キーワード: 低変態温度溶接材料, 疲労強度, 残留応力, ルートき裂

1. はじめに

溶接継手に対する代表的な疲労強度向上手法には、溶接部の形状を滑らかにして応力集中を低減する方法と、溶接部の溶接残留応力を制御し、引張残留応力を低減する、もしくは圧縮残留応力を導入する方法がある¹⁾。これらの効果は多くの研究により実証されているものの、溶接完了後に追加の処理工程を要するものがほとんどであり、対象とする溶接線が広範囲にわたる場合など、必ずしも効率的な方法とはいえない。

一方、溶接材料を改良することにより、溶接完了後に圧縮残留応力を導入できる溶材が開発されている²⁾。これは、低変態温度溶接材料(以下、LTT溶材)と呼ばれ、通常の溶接材料(以下、普通溶材)と比較して、Ni, Cr, Mn等の元素が多く添加されており、冷却時に比較的低

温で相変態が生じる溶接材料である。

既往の研究²⁻¹⁰⁾では、主に止端破壊する溶接継手を対象に、LTT溶材を用いることにより溶接部周辺の引張残留応力を低減でき、疲労強度が向上することが示されている。またルート破壊に対しては、初層にLTT溶材を、それ以降の溶接に普通溶材を用いることを想定した解析的検討¹¹⁾はみられるものの、その疲労強度向上効果を実際に明らかにした研究はほとんどない。

これまでLTT溶材は、その溶接性の観点から、部材組立のための本溶接として用いられることはほとんどなく、普通溶材での溶接の上に付加的に溶接する、いわゆる付加溶接としての使用が一般的であった。近年、LTT溶材の省合金化が進められており、低炭素鋼に近い成分系のLTT溶材が開発され、溶接性の改善が図られている¹²⁾。海外ではLTT溶材の本溶接への試用もみられ、突合せ継手や面外ガセット継手の止端破壊に対して疲労強度の向上が確認されている¹³⁻¹⁶⁾。

† 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: hanji@civil.nagoya-u.ac.jp

表-1 鋼材の機械的性質と化学成分

(a) 機械的性質

Materials		Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)
Steel plates No. 1	Main plate	319	439	31
	Rib plate	289	441	27
Steel plates No. 2	Main plate	328	468	28
	Rib plate	353	459	28
Welding consumable	LTT	760	811	20
	Conventional	478	572	26

(b) 化学成分 (%)

Materials		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
Steel plates No. 1	Main plate	0.17	0.09	0.60	0.014	0.004	-	-	-	-	-
	Rib plate	0.16	0.02	0.52	0.016	0.006	-	-	-	-	-
Steel plates No. 2	Main plate	0.14	0.18	0.77	0.015	0.003	-	-	-	-	-
	Rib plate	0.09	0.21	0.97	0.015	0.003	-	-	-	-	-
Welding consumable	LTT	0.03	0.42	4.6	0.008	0.007	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
	Conventional	0.03	0.47	1.53	0.009	0.008	0.01	0.01	0.02	<0.01	0.01

このような LTT 溶材の溶接性の改善を背景に、本研究では LTT 溶材のみで部材組立を行い、ルート破壊に対する疲労強度の向上を試みる。ここでは、溶接ルートから発生する疲労き裂の中でも、鋼床版のデッキプレートと閉断面リブの溶接ルートに発生し、デッキプレートを貫通する方向に進展する疲労き裂に着目する。このき裂に対しては、残留応力制御の観点からの疲労対策^{17, 18)}が検討されているが、いずれも後処理の工程が必要となり、実床版レベルでの適用は容易ではない。

本研究では、LTT 溶材を用いて鋼床版の一部を模擬した片面すみ肉溶接継手を製作し、疲労試験によりその疲労強度を明らかにした。さらに、溶接部近傍の残留応力計測と熱弾塑性解析により、LTT 溶材によって導入される溶接部周辺の残留応力について検討した。

2. 疲労試験体

2.1 形状および製作方法

試験体の形状および寸法を図-1 に示す。試験体は既往の研究^{19, 20)}を参考にし、鋼床版のデッキプレートを模した板厚 12 mm、幅 300 mm の主板に、板厚 6 mm、幅 300 mm のリブを 77°の角度で溶接した継手である。道路橋示方書²¹⁾では、閉断面リブとデッキプレートの縦方向溶接継手は、必要など厚を確保するとともに、リブ板厚の 75%以上の溶込み量を確保することが規定されている。この基準を満足し、かつ片面からのすみ肉溶接により試験体間で一定のど厚および溶込み量が確保できるように、今回はリブに開先を設けて製作した。

使用した鋼材および溶接材料のミルシートによる機械

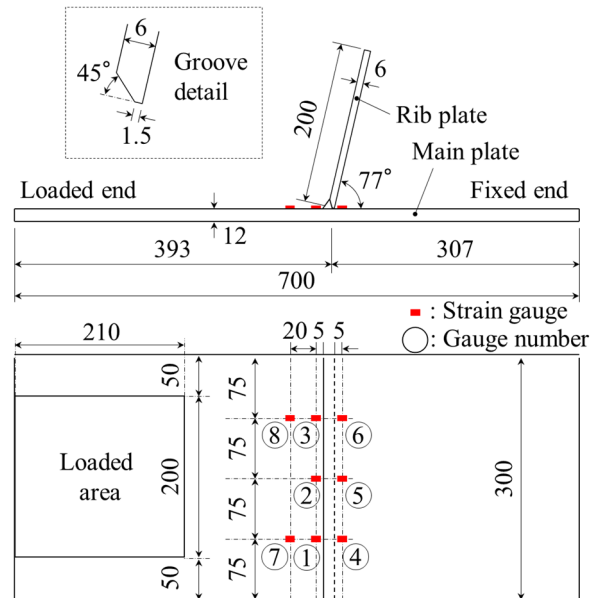


図-1 試験体 (単位: mm)

的性質と化学成分を表-1 に示す。鋼材には JIS G3106 SM400A を用いた。また、溶接材料には LTT 溶材 (型番: JIS Z3313 T780T1-OCA-G) と、比較のために普通溶材 (型番: JIS Z3313 T49J0T1-OCA-U) を用いた。どちらもフラックス入りワイヤであり、LTT 溶材は径 1.2 mm、普通溶材は径 1.4 mm である。今回用いた LTT 溶材には変態点を下げるために Mn が多く添加されている。なお、主板とリブともに 2 種類の鋼材を用いたが、これは試験体の製作時期が異なるためであり、いずれの試験体も製作方法は同じである。

表-2 溶接条件

Welding consumable	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (J/mm)	Preheating (°C)
LTT	250	28	370	1,135	57~70
Conventional	280~285	26.5~27	400	1,113~1,134	None

表-3 溶接形状計測結果

Specimen		Leg length		Toe radius ρ (mm)	Toe angle θ (°)	Weld penetration	
		Main plate L_M (mm)	Rib plate L_R (mm)			Depth p (mm)	Ratio p/t_r
LTT	No.1	3.87 (0.26)	7.44 (0.26)	0.65 (0.23)	67.5 (3.21)	4.82 (0.18)	0.80 (0.03)
	No.2	3.78 (0.20)	7.02 (0.19)	0.63 (0.15)	63.3 (3.26)	4.88 (0.19)	0.81 (0.03)
Conventional	No.1	3.88 (0.30)	7.16 (0.26)	0.62 (0.22)	67.7 (3.56)	4.94 (0.18)	0.82 (0.03)
	No.2	3.64 (0.24)	7.02 (0.29)	0.58 (0.18)	67.7 (3.30)	4.86 (0.11)	0.81 (0.02)

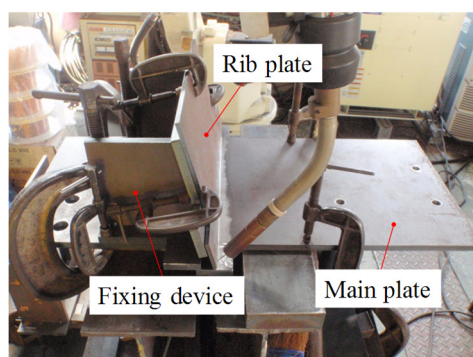
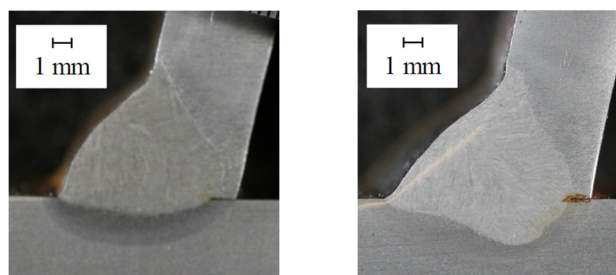


図-2 試験体製作状況



(a) LTT 試験体

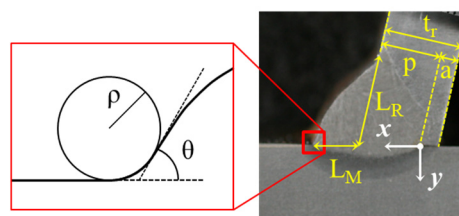
(b) 普通溶材試験体

図-3 断面マクロ写真

試験体製作時の状況を図-2に、溶接条件を表-2に示す。溶接にはCO₂自動溶接を用い、始末端にエンドタブを設けて1パスにて溶接した。溶接後はエンドタブの約10 mmを残してガス切断によって除去し、残りはグラインダーで平滑に仕上げている。LTT溶材と普通溶材を使用した溶接部の断面マクロ写真を図-3に示す。製作完了から48時間後に超音波探傷試験によって検査を行い、すべての試験体の溶接部に割れ等の欠陥は発生していないことを確認している。

予備実験の結果、普通溶材を用いた試験体では、溶接ルートと溶接止端の両方から疲労き裂が発生し、それぞれが互いの進展性状に影響し合う可能性があったため、き裂発生点を溶接ルートに限定する目的で普通溶材の止端部はグラインダーにより仕上げることにした。止端仕上げは、曲率半径が3 mm程度、削込み深さが0.5 mm以下となるように注意しながら実施した。なお、LTT溶材を用いた試験体には止端仕上げは施さず、溶接ままの状態で行った。

ここでは、LTT溶材を用いて製作した試験体をLTT試験体、普通溶材を用いた試験体を普通溶材試験体と称し、表-1中に示す鋼板の種類によって区別する場合には、名称中に鋼材番号の1または2を付けて呼ぶこととする。



- L_M : Weld leg length on main plate
- L_R : Weld leg length on rib plate
- ρ : Toe radius
- θ : Toe angle
- p : Weld penetration depth
- a : Weld root size
- t_r : Rib thickness

図-4 溶接形状の定義

なお試験体数は、LTT-1試験体が5体、それ以外が3体ずつである。

2.2 溶接形状計測

LTT溶材と普通溶材の溶接部の形状を比較するために溶接形状計測を行った。計測項目は、図-4に示す主板側の脚長 (L_M)、リブ側の脚長 (L_R)、止端半径 (ρ)、止

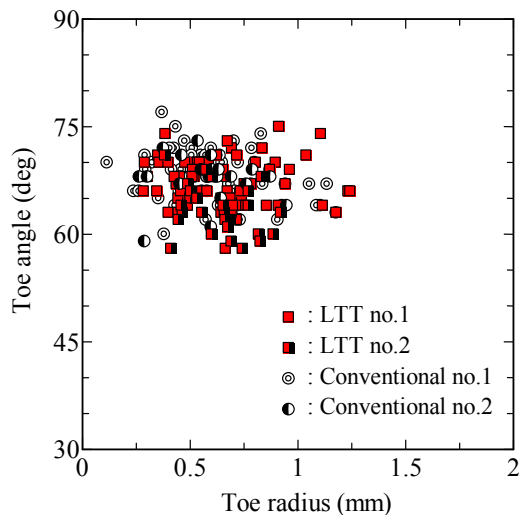


図-5 止端半径と止端角の分布

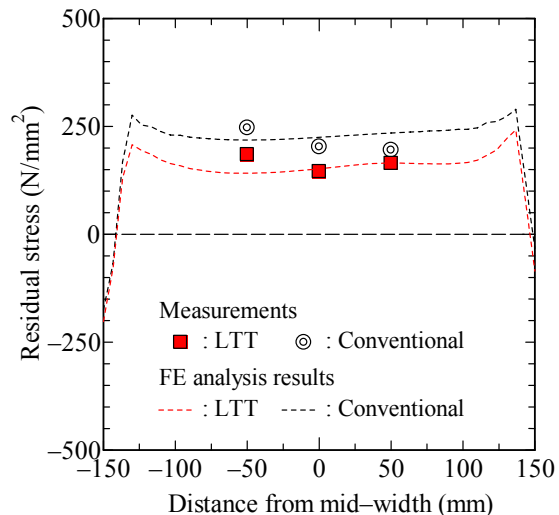


図-6 残留応力計測結果

端角 (θ), 溶込み深さ (p) の5項目である。なお、普通溶材の形状計測は止端仕上げ前に行った。

溶込み深さ以外の各項目はレプリカ法により計測した。具体的には、歯科用印象材により溶接部を型取りし、それを薄くスライスしたものを画像として取り込み、画像上で各項目を求めた。サンプル数は1つの試験体につき約10個であり、実験に用いたすべての試験体において計測を行った。溶込み深さ (p) は、試験体の破断面から未溶着部の寸法 (a) を測定し、その値とリップ厚から逆算して求めた ($p = t_r - a$)。

計測結果の平均値を表-3に示す。また、止端半径と止端角の分布を図-5に示す。表中の括弧内の値は標準偏差である。LTT溶材と普通溶材で溶接部の形状や溶込み深さに大きな差がなく、平均値で見ると、脚長は0.1~0.4mm程度、止端半径は0.1mm程度、止端角は4°程度、溶込み深さは0.1mm程度の差であった。よって、溶接材料に関わらず同様の溶接形状を有する試験体を製作できているといえる。

2.3 残留応力計測

X線回折式残留応力測定システム (iXRD, PROTO Manufacturing) を用いて基板における溶接止端近傍の残留応力を計測した。計測に用いたコリメーターの径は1mmである。計測点は溶接止端から2mm離れた位置の幅方向の3箇所とし、応力成分は溶接線に直交する方向とした。計測位置には表面処理として電解研磨を施しており、その研磨深さは0.1~0.2mm程度であった。

図-6に計測結果を示す。計測点ごとに3回計測し、その平均値を示している。また図中には、後述する熱弾塑性解析により得られた板幅方向の残留応力分布を破線で併記している。止端から2mm位置では両者の差は大きくないが、LTT溶材の残留応力は普通溶材のそれと比較して30~60 N/mm²程度小さいことがわかる。

3. 疲労試験

3.1 試験方法

繰返し载荷には板曲げ振動疲労試験機²⁾を用いた。試験機の模式図を図-7に示す。基板の片側をボルトによって支持台に固定し、その反対側を起振器で振動させることにより、溶接部に繰返し曲げ応力を導入することができる。また、起振器の近くに取り付けた鉛直ばねで基板を押し下げることにより予荷重を与えた状態での繰返し载荷も可能である。今回は溶接ルートの応力比がゼロとなるように予荷重を与えて実験を行った。

図-1に示すように、基板表面の8箇所にはひずみゲージを貼り付け、試験中の公称応力範囲の確認や疲労き裂の発生、進展状況の把握に用いた。溶接ルートにおける公称応力範囲は、図-1中のNo.1,4,7およびNo.3,6,8のひずみゲージの値からルート位置に線形内挿して求めた。試験中、1万回载荷するごとに動的ひずみ計測を行った。载荷は試験体が破断するまで繰り返したが、1,000万回载荷してもき裂が確認されない場合には、応力範囲を高くして载荷を継続した。

一部の試験体では、後述する繰返し数に達したときのき裂長とき裂深さを確認するために、ビーチマークの導入を試みた。ビーチマーク試験は、公称応力範囲を半分にして60万回载荷することにより行った。

3.2 疲労寿命の定義

本研究では、溶接部近傍に貼付したひずみゲージによる応力範囲が5%変化したときの繰返し数を N_5 、試験体が破断したときの繰返し数を N_f 、 N_5 から N_f までに要する繰返し数を N_p として、それぞれを用いて疲労試験結果を整理した。

疲労試験中に計測した応力範囲の変化の例を図-8に示す。縦軸は、試験中に定期的に計測した応力範囲 ($\Delta\sigma_i$)

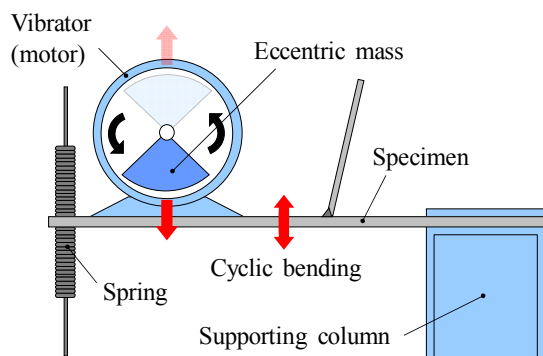


図-7 疲労試験システムの模式図

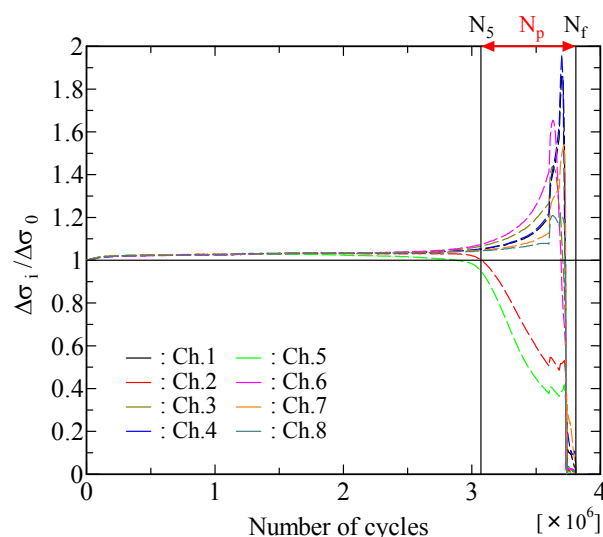


図-8 試験中の応力範囲の変化の例



(a) LTT 試験体



(b) 普通溶材試験体

図-9 破断面の例

と試験開始時の応力範囲 ($\Delta\sigma_0$) の比である。幅中央のルート近傍に貼付したひずみゲージ (Ch.5) の値が最初に減少し始め、その後、まわりのゲージの値も変化していることから、幅中央付近からき裂が発生し、板幅方向に進展したと予想される。

3.3 き裂発生および進展状況

過去の実験^{19,20}と同様に、すべての試験体で溶接ルートからき裂が発生し、主板を貫通する方向に進展した。破断面の例を図-9に示す。各断面の上側が主板のルート位置であり、き裂は下方に向かって進展している。同図(b)の試験体では N_5 の時点でピーチマークが残っており、そのときのき裂長さは約 130.1 mm、き裂深さは約 2.58 mm (主板厚の約 21%) であった。過去の実験¹⁹では、 N_5 の段階でのき裂深さは主板厚の約 15% であることが示されており、今回の結果はおおむね同程度であるといえる。

3.4 疲労寿命

公称応力範囲で整理した疲労試験結果を図-10から図-12および付表-1にまとめる。図-10には、普通溶材を用いて同様の試験方法により得られた過去の疲労試

験結果^{19,20}もあわせて載せている。また、未破断の試験体には矢印を付記している。なお表-1に示すように、用いた鋼材によって試験体名称を区別してまとめている。

N_5 、 N_f のいずれにおいても、LTT試験体の試験結果は普通溶材試験体のそれよりも上方に位置している。 N_5 でみると、普通溶材試験体の結果は日本鋼構造協会 (JSSC) の疲労強度等級²³のE等級を下限として分布しているのに対して、LTT試験体の結果はC~B等級付近に位置している。また、未破断の領域をみてみても、LTT試験体の疲労限は普通溶材のそれより高くなっているといえる。 N_p においても、ばらつきはあるが、LTT試験体は普通溶材試験体と同等以上の疲労強度を有している。

N_f を基準として、LTT試験体と普通溶材試験体の200万回疲労強度を比較した。ここで200万回疲労強度とは、疲労試験結果を最小二乗法により直線で回帰し、その回帰線から求めた200万回時の応力範囲である。ここでは、直線の傾きを表す係数 m を3に固定した場合と、係数を固定しなかった場合の疲労強度を求めた。LTTおよび普通溶材試験体の200万回疲労強度は、係数 m を3とした場合、それぞれ 177.2 N/mm²、131.9 N/mm²であり、傾きを固定しない場合、それぞれ 165.3 N/mm²、141.2 N/mm²であった。このことから、LTT溶材により少なくとも2

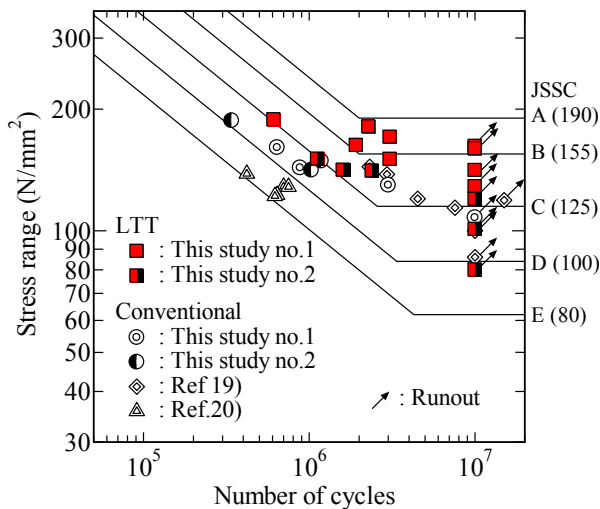


図-10 N_5 による疲労試験結果の整理

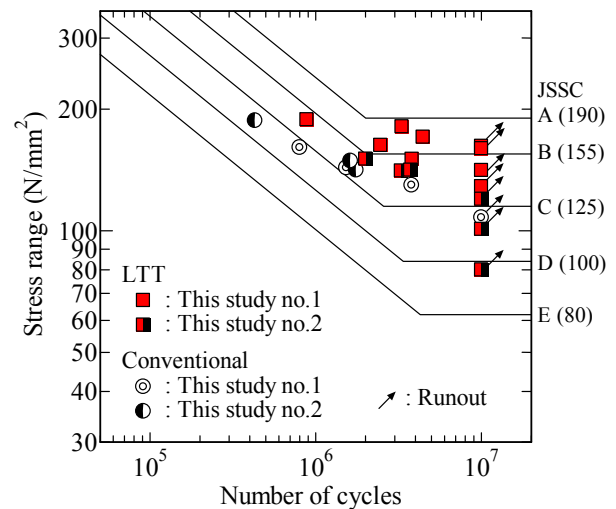


図-11 N_f による疲労試験結果の整理

割程度の疲労強度の向上が期待できると考えられる。

以上より、LTT 溶材を本溶接に用いることにより、普通溶材の場合に比べて継手の疲労強度を向上できること、さらに疲労限についても、LTT 試験体のほうが普通溶材試験体よりも高くなることが明らかになった。

4. 熱弾塑性解析

4.1 解析方法

汎用有限要素解析コード ABAQUS Ver.6.14 を用いて熱弾塑性解析を行い、LTT 溶材と普通溶材のそれぞれによって導入される残留応力分布を明らかにした。

解析モデルを図-13 に示す。要素にはソリッド要素を用い、モデルの幅は試験体と同じ 300 mm である。板幅方向の要素分割は 45 分割とし、要素寸法は単位時間あたりの溶接長さに合わせた。溶接部周辺の断面内の要素寸法は 0.85 mm 程度とし、できるだけ均一になるよう分割した。境界条件として、図-2 に示す製作時の拘束状態と同じように主板とリブに変位の拘束を与えた。

解析は次の手順で行った。まず、解析モデルから溶接部を消去して、溶接前の主板とリブのみの状態とした。次に、単位時間あたりの溶接長に合わせた溶接部の要素集合を 1 つずつに出現させ、そのたびに出現させた要素集合に 1 秒間入熱した。入熱領域は図-3 に示した断面マクロ写真を基に設定した。すべての溶接の完了後、室温まで冷却した。入熱条件は試験体の溶接条件を基に設定し²⁴⁾、後述する温度履歴の比較により入熱効率を決定した。具体的には、入熱効率は 70% とし、入熱は 21200 mJ/mm² の物体熱流束として与えた。本解析では、温度は後退差分法によって積分し、非線形の連成方程式の解は Newton 法により計算している。なお、予熱温度は溶接に比べて低く、予熱が残留応力に与える影響は小さいと考えられるため、ここでは予熱は考慮していない。

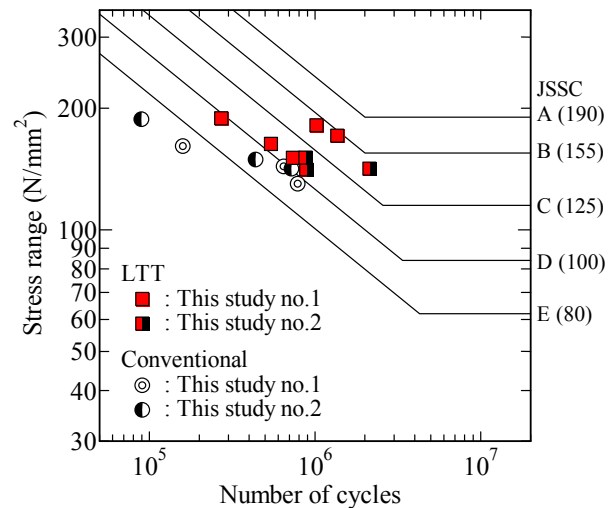


図-12 N_p による疲労試験結果の整理

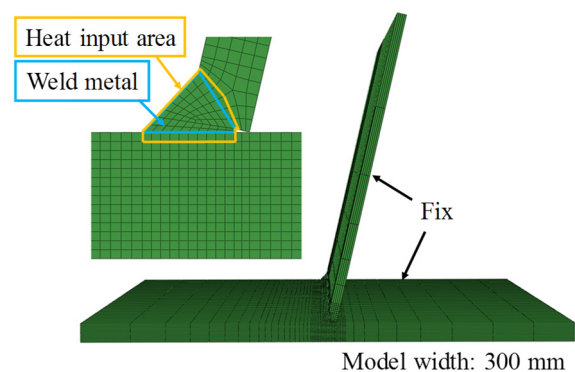
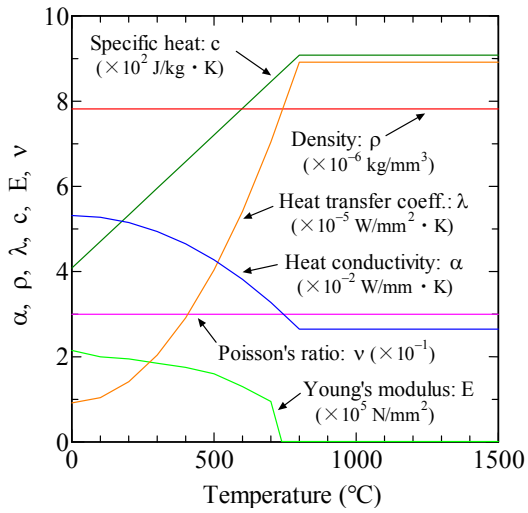


図-13 有限要素モデル

4.2 材料特性の設定

材料特性には、過去の研究^{25,26)}を参考に、図-14 に示すような温度依存性を与えた。LTT 溶材については、変態点測定結果を基に線膨張係数にも温度依存性を考慮し、



(a) 物理定数と弾性係数，ポアソン比

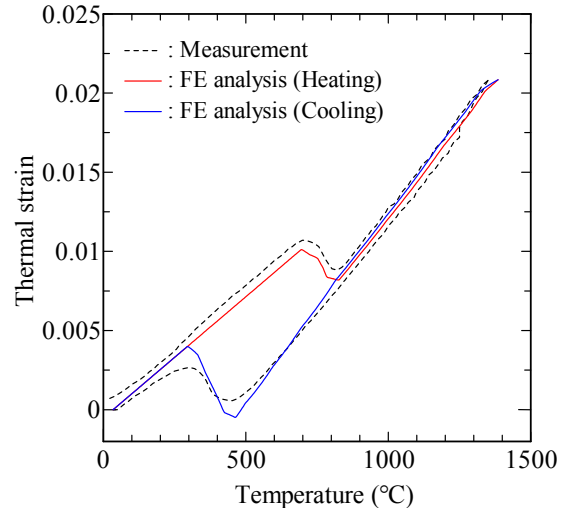
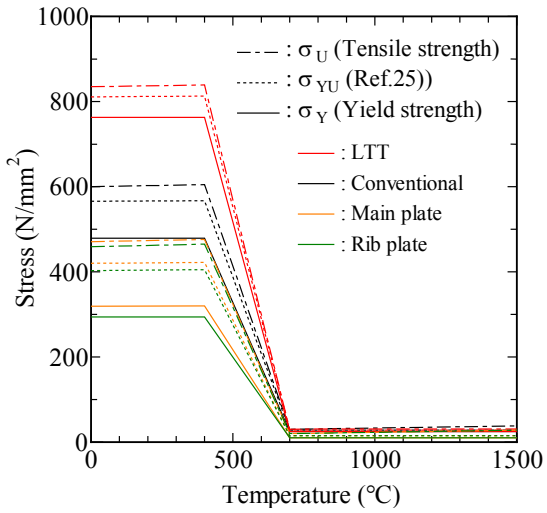
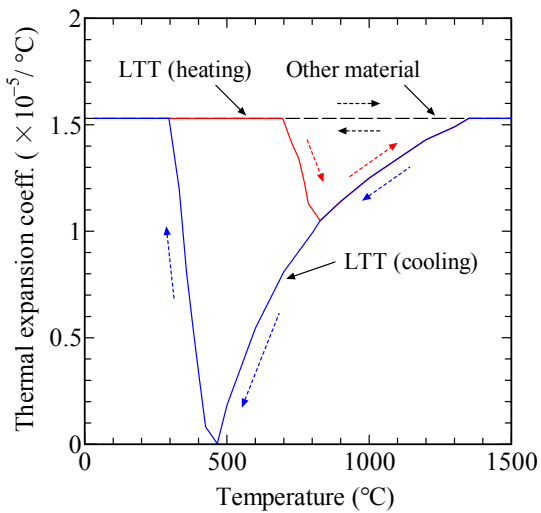


図-15 LTT 溶材の相変態挙動の比較



(b) 降伏応力と引張強度



(c) 線膨張係数

図-14 材料特性の温度依存性

加熱冷却時の相変態を再現した。LTT 溶材に設定した線膨張係数を図-14(c)に示している。ABAQUS のユーザーサブルーチン機能を用いて，加熱過程と冷却過程で異なる線膨張係数を与えた。その他の材料の線膨張係数は一定とした。なお，LTT 溶材の線膨張係数以外の材料特性については，実測値を基に設定している研究²⁷⁾もみられるものの，今回の LTT 溶材に対する測定は実施していないため，ここでは普通溶材の材料特性を参考に設定している。

LTT 溶材の変態点測定試験を解析によって模擬し，設定した材料特性の妥当性を確認した。その結果を図-15 に示す。実測値と解析結果の相変態挙動は比較的よく一致しており，解析により LTT 溶材の相変態を再現できているといえる。

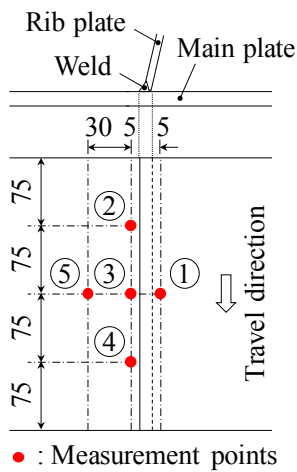
4.3 実測値との比較

試験体製作時に計測した温度履歴と解析結果の比較を図-16 に示す。計測点は図中に示す 5 箇所とした。実測値と解析値で温度履歴はほぼ一致していることがわかる。

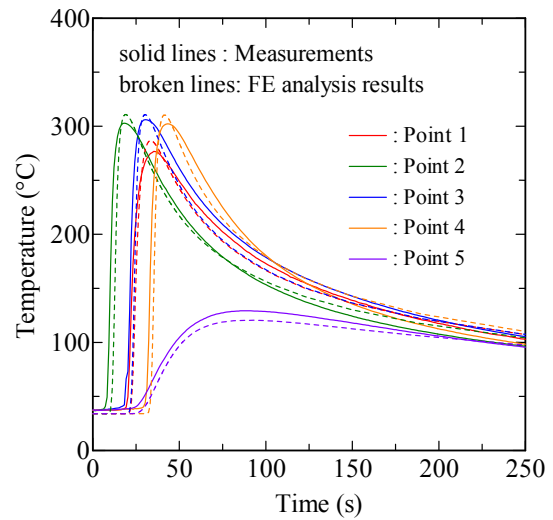
残留応力分布についても，LTT 溶材と普通溶材のそれぞれを模擬したモデルの結果と計測結果を比較した。ここで，着目した応力成分は溶接線直交方向である。溶接止端から 2 mm 離れた位置における板幅方向の残留応力分布を図-6 中に点線で示している。熱源を移動して入熱しているため，板幅中央を中心に幅方向に非対称な残留応力分布となっていることがわかる。また，解析結果は実測値の分布傾向を比較的よく再現できている。以上より，本解析手法の妥当性が示されたといえる。

4.4 残留応力分布

LTT 溶材と普通溶材のモデルにおける溶接部周辺の残留応力分布を比較した。図-17 に幅方向中央の断面における残留応力分布を示す。溶接ルートを原点として図-

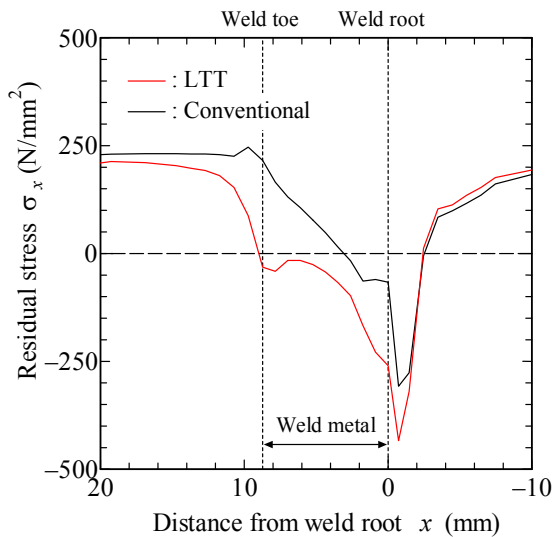


(a) 測定位置 (単位: mm)

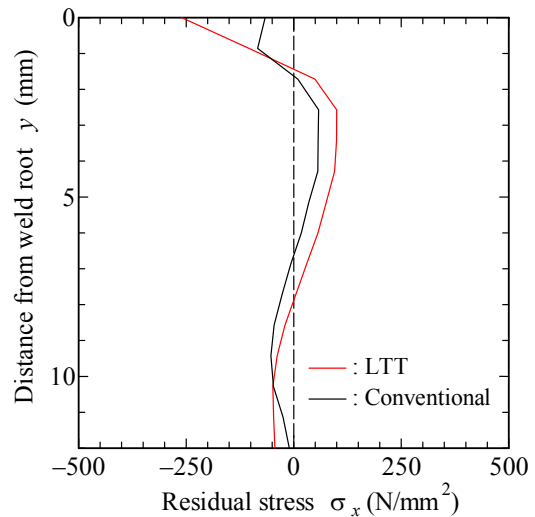


(b) 実測値と解析値の比較

図-16 温度履歴



(a) 長手方向



(b) 板厚方向

図-17 残留応力分布の比較

4中に示すように x - y 座標軸をとり、 x 軸に沿った長手方向の分布を図-17(a)に、 y 軸に沿った板厚方向の分布を図-17(b)に示している。応力は x 軸方向の成分である。

実際の鋼床版を対象とした過去の検討²⁸⁾では、溶接ルート近傍に引張残留応力が生じることが示されており、今回の普通溶材の解析結果と傾向が異なる。これは試験体製作時のリブの拘束状態の違いによるものであるが、溶材間の相対比較は本解析でも可能であると考えられる。

溶接部から離れると、溶材の違いによる残留応力の差は小さくなるが、溶接部近傍ではLTT溶材の残留応力は普通溶材のそれに比べて、溶接止端では 250 N/mm^2 程度、溶接ルートでは 200 N/mm^2 程度、それぞれ圧縮側にシフトしていることがわかる。よって、LTT溶材を本溶接に用いることにより溶接部近傍の局所的な残留応力を圧縮

側にシフトできると考えらえる。またこの結果は、疲労試験においてLTT試験体の疲労強度が向上したと整合している。

5. まとめ

本研究では、LTT溶材を用いて製作した片面すみ肉溶接継手を対象に、疲労試験および熱弾塑性解析により、その疲労強度と残留応力分布を検討した。得られた成果を以下に示す。

- ・LTT溶材と普通溶材のそれぞれを用いて製作した試験体において、溶接形状にはほとんど差がみられなかった。また、LTT溶材で懸念されていた溶接割れも生じ

なかった。

- LTT 溶材を用いた試験体は普通溶材のものと比較して、高い疲労強度と疲労限を有することが明らかになった。
- LTT 溶材を模擬した熱弾塑性解析により、普通溶材の場合に比べて、LTT 溶材を用いることで溶接止端と溶接ルートの残留応力を圧縮側にシフトできることが示された。

LTT 溶材を実用化するにあたっては、溶接線が交差する箇所への適用可能性や、実構造物を想定した拘束下での溶接性などの確認が必要であり、今後の課題である。

付録

各試験体における公称応力範囲と N_5 , N_f , N_p の関係を次頁の付表-1 にまとめる。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼橋の疲労対策技術，鋼構造シリーズ 22，丸善，2013。
- 2) 太田明彦，渡辺修，松岡一祥，志賀千晃，西島敏，前田芳夫，鈴木直之，久保高宏：低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の疲労強度向上，溶接学会論文集，Vol.18，No.1，pp.141-145，2000。
- 3) 太田明彦，前田芳夫，Nguyen,T.N.，鈴木直之：低変態温度溶接材料を用いた箱型断面溶接部材の疲労強度向上，溶接学会論文集，Vol.18，No.4，pp.628-633，2000。
- 4) 太田明彦，渡辺修，松岡一祥，前田芳夫，鈴木直之，久保高宏：低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の疲労強度向上—溶接後熱処理による3倍化—，溶接学会論文集，Vol.19，No.2，pp.373-376，2001。
- 5) 三木千壽，穴見健吾，樋口嘉剛：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の試み，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.311-319，2002。
- 6) 鈴木直之，太田明彦，前田芳夫：低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の補修による疲労強度向上，溶接学会論文集，Vol.21，No.1，pp.62-67，2003。
- 7) 富永知徳，三木千壽，高橋健，糟谷正，森影康：低温変態溶接材料を用いた既設鋼橋の疲労強度向上工法の研究，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.355-367，2004。
- 8) 富永知徳，三木千壽，糟谷正，松岡和巳：低温変態溶材の変態温度，鋼材強度，および作用外力が残留応力に及ぼす影響，土木学会論文集 A，Vol.66，No.4，pp.653-662，2010。
- 9) 館石和雄，細見直史，糟谷正，安藤隆一，一宮充，戸塚康仁，米山徹，富永知徳：低温変態溶材の新設橋への適用性に関する検討（第2報），土木学会第69回年次学術講演会，I-460，pp.919-920，2014。
- 10) 齋藤史弥，穴見健吾，池原育実，澁谷敦，小野秀一：低温相変態溶接棒を用いた付加物側回し溶接部の疲労強度向上，構造工学論文集，Vol.63A，pp.681-689，2017。
- 11) 早田直広，館石和雄，判治剛：低温変態溶接材料を用いた溶接継手の残留応力に関する研究，土木学会第68回年次学術講演会，I-554，pp.1107-1108，2013。
- 12) 宮田実，鈴木励一：溶接継手疲労強度改善溶接施工法と溶接材料，神戸製鋼技報，Vol.65，No.1，pp.16-20，2015。
- 13) Lixing, H., Dongpo, W., Wenxian, W. and Yufeng, Z.: Ultrasonic peening and low transformation temperature electrodes used for improving the fatigue strength of welded joints, *Welding in the World*, Vol.48, No.3-4, pp.34-39, 2004.
- 14) Barsoum, Z. and Gustafsson, M.: Fatigue of high strength steel joints welded with low temperature transformation consumables, *Engineering Failure Analysis*, Vol.16, pp.2186-2194, 2009.
- 15) Bhattia, A.A., Barsoum, Z., van der Mee, V., Kromm, A. and Kannengiesser, T.: Fatigue strength improvement of welded structures using new low transformation temperature filler materials, *Procedia Engineering*, Vol.66, pp.192-201, 2013.
- 16) Harati, E., Karlsson, L., Svensson, L.E. and Dalaei, K.: Applicability of low transformation temperature welding consumables to increase fatigue strength of welded high strength steels, *International Journal of Fatigue*, Vol.97, pp.39-47, 2017.
- 17) 森猛，山本一貴，内田大介，林暢彦：デッキプレート進展き裂を対象とした鋼床版疲労耐久性に対する残留応力除去焼鈍の効果，鋼構造論文集，Vol.22，No.5，pp.101-109，2015。
- 18) 松本理佐，ロッケンバッハ浄，石川敏之，服部篤史，河野広隆：鋼床版デッキプレート・Uリブ・横リブ交差部の疲労強度向上工法，構造工学論文集，Vol.63A，pp.668-680，2017。
- 19) 山田健太郎，Samol, Y.: Uリブすみ肉溶接継手のルートき裂を対象とした板曲げ疲労試験，構造工学論文集，Vol.54A，pp.675-684，2008。
- 20) 服部雅史，牧田通，館石和雄，判治剛，清水優，八木尚人：鋼床版Uリブ・デッキプレート溶接部の内在き裂に対するフェーズドアレイ超音波探傷法の測定精度，土木学会論文集 A1，Vol.74，No.3，pp.516-530，2018。
- 21) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II 鋼橋・鋼部材編，丸善，2017。
- 22) 山田健太郎，小藺江朋亮，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。
- 23) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012年改定版，技報堂出版，2012。
- 24) 溶接学会，日本溶接協会：溶接・接合技術総論，産報出版，2019。

付表-1 疲労試験結果一覧

Specimens		Stress range (N/mm ²)	N _s (× 10 ³ cycles)	N _r (× 10 ³ cycles)	N _p (× 10 ³ cycles)	Notes
LTT-1	L1-1	128.7	-	> 10,000	-	Runout
	L1-1R	150.4	3,070	3,810	740	Retest of L1-1 with increased stress range
	L1-2	141.2	-	> 10,000	-	Runout
	L1-2R	159.8	-	> 10,000	-	Retest of L1-2 with increased stress range
	L1-2R2	181.1	2,280	3,307	1,027	Retest of L1-2R with increased stress range
	L1-3	162.0	-	> 10,000	-	Runout
	L1-3R	170.7	3,070	4,438	1,368	Retest of L1-3 with increased stress range
	L1-4	162.8	1,920	2,465	545	
LTT-2	L1-5	188.5	610	883	273	
	L2-1	80.1	-	> 10,000	-	Runout
	L2-1R	100.9	-	> 10,000	-	Retest of L2-1 with increased stress range
	L2-1R2	119.8	-	> 10,000	-	Retest of L2-1R with increased stress range
	L2-1R3	140.8	2,390	3,280	890	Retest of L2-1R2 with increased stress range
	L2-2	141.4	1,600	3,740	2,140	
Conventional-1	L2-3	150.6	1,120	2,000	880	
	C1-1	107.9	-	>10,000	-	Runout
	C1-1R	129.8	3,000	3,790	790	Retest of C1-1 with increased stress range
	C1-2	143.3	880	1,530	650	
Conventional-2	C1-3	160.8	640	800	160	
	C2-1	141.4	1,030	1,754	724	
	C2-2	149.0	1,180	1,620	440	
	C2-3	187.4	340	430	90	

25)金裕哲, 李在翼, 猪瀬幸太郎: すみ肉溶接で生じる面外変形の高精度予測, 溶接学会論文集, Vol.23, No.3, pp.431-435, 2005.

26)廣畑幹人, 伊藤義人: トラフリブ溶接部の残留応力緩和に対する簡易熱源による熱処理の適用性検討, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.1168-1179, 2016.

27)山本純司, 平岡和雄, 望月正人: 低変態温度溶接材料を用いた圧縮残留応力導入の為の溶接施工手順の提

案, 溶接学会論文集, Vol.34, No.4, pp.260-266, 2016.

28)井口進, 貝沼重信, 内田大介, 城大樹: 製作時のプレス矯正が鋼床版のデッキプレートと U リブ溶接部の応力性状に及ぼす影響, 鋼構造論文集, Vol.19, No.73, pp.1-8, 2012.

(2019年9月20日受付)

(2020年2月1日受理)