

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

三木千壽¹・穴見健吾²・樋口嘉剛³

¹フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 工博 東京工業大学大学院助手 理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1・現LEHIGH大学博士研究員)

³正会員 工修 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1・現株式会社大林組)

低温相変態溶接棒を用いた面外付加物継手の疲労強度向上法として、付加溶接を提案し、面外ガセット継手を用いてその効果を疲労試験により、代表的な止端部処理法であるTIG処理、ハンマーピーニング処理と比較検討を行った。また、低温相変態溶接棒を用いることによる主目的である溶接部への圧縮残留応力の導入効果、および付加溶接による応力集中の低減効果を実験および解析により検討した。

Key Words : low temperature transformation welding electrode, fatigue strength improvement, additional welding, compressive residual stress, stress concentration

1. はじめに

溶接冷却過程中、溶接部は冷却収縮をするが、ある温度において、変態を生じ結晶格子の変化に伴い体積が膨張する。この相変態は通常の溶接棒では500℃程度以上で生じ、その後の冷却収縮を周囲が拘束するために溶接部には引張残留応力が生じる。この引張残留応力は溶接部の疲労強度の発生・進展挙動に大きな悪影響を及ぼすことが知られている。逆に言えば溶接継手部の疲労強度を向上させるためには、この溶接継手部の残留応力を圧縮側まで低減させることが有効であり、この一つの手法として、溶接冷却中の変態温度を下げた溶接棒を用い、その変態膨張を利用して圧縮残留応力を導入する低温相変態溶接棒の利用が近年注目されている。

冷却過程中的変態温度を下げることにより圧縮残留応力を導入するというコンセプトは古くからあるが^{1),2)}、近年の溶接棒の製作技術の格段の進歩に伴い適切な相変態温度を持つ溶接棒の製作が可能となった。図-1に溶接中の温度変化を与えたときの冷却過程における溶接部の熱収縮の概念図を示すが、図中の冷却過程時における M_s 点(変態開始温度)と M_f 点(変態終了温度)が溶接終了時に存在する残留応力に大きく影響を及ぼすため、適当な温度を選定する必要がある。例えば日本鉄鋼協会³⁾では、溶接継手部の疲労強度向上を目的として-50℃以下の M_s 点を持つ溶接棒を用いているが、疲労強度の向上は

得られていない。これは、溶接終了までに相変態が充分生じていない為であると考えられる。村田ら⁴⁾は、種々の変態温度を持つ溶接棒を用いて実験的、解析的な検討を行い200~300℃程度の変態開始温度を持つ溶接棒が圧縮残留応力の導入のために最も適当であることを示している。

近年、疲労強度向上を目的としてこのような溶接棒を用いる研究がなされている。太田らはHT780材を用いて面外ガセット継手試験体に M_s 点180℃の溶接棒(10%Ni-10%Cr)を用いて溶接を行った結果疲労強度が2倍向上したことを示している⁵⁾。久保らはFEM解析を用いて低温相変態溶接棒を用いた溶接による圧縮残留応力の生成過程を観察するとともに、リブ十字継手、面外ガセット継手に対しての疲労強度向上効果を実験的に検討している⁶⁾。町田らは

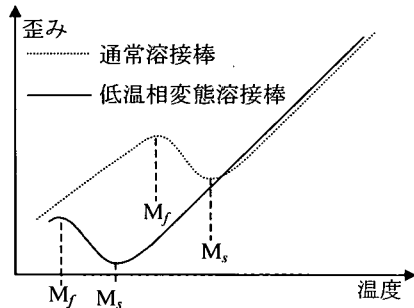


図-1 溶接冷却過程中的の歪み変化の概念図

表-1 試作した低温相変態溶接棒の性質

	機械的性質 [MPa, %]			化学成分 [重量%]							変態温度[°C] (冷却過程)	
	降伏 強度	引張 強度	伸び	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	M _s	M _f
C13N	495	1051	7.0	0.024	0.15	0.19	0.023	0.006	8.9	12.98	250	50
C15N	614	1117	7.7	0.029	0.15	0.19	0.022	0.007	7.07	15.66	250	50
N19	808	852	18.0	0.055	0.17	0.25	0.007	0.004	10.2	----	400	300

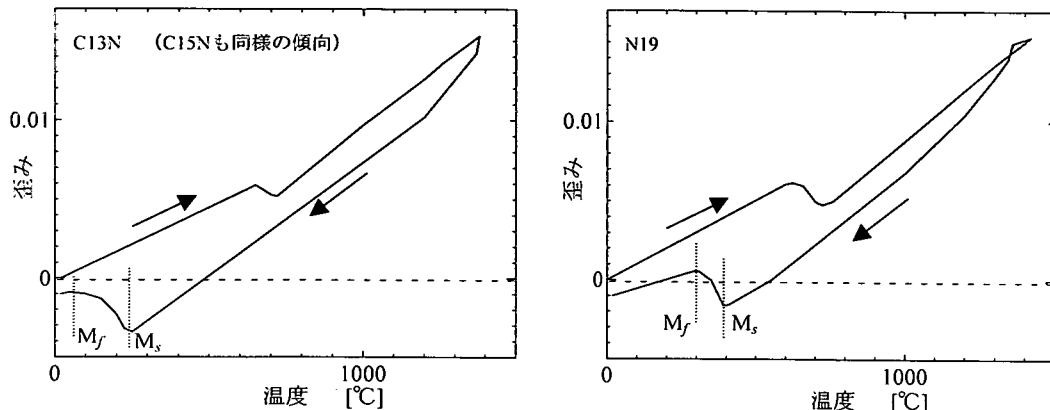


図-2 試作した低温相変態溶接棒の熱膨張・収縮曲線

SM490材を用いた面外ガセット継手試験体をM_s点250°CとM_f点360°Cの2種類の低温相変態溶接棒を用いて製作し疲労試験を行った結果、止端部形状は改善されないが疲労強度は改善され、特にM_s点の低い溶接材料の方が疲労強度が大きく改善されたことを示している⁷⁾。また以上の様な面外付加物継手だけでなく、太田らは箱断面角溶接に対して低温相変態溶接棒を用いた結果、疲労強度が1.3倍向上したことを示している⁸⁾。

一方、溶接継手部の疲労強度向上法としては、十分な効果が得られることは勿論、施工が簡易かつ低コストであること、更には橋梁などの既存構造物中の溶接継手にも適用が可能であることが望まれる。そこで本研究では、面外ガセット継手を対象として、付加溶接を試み、その疲労強度向上効果を代表的な溶接後処理であるハンマーピーニング処理、TIG処理⁹⁾と比較しその適用性を検討した。

2. 使用溶接棒および試験体

(1) 低温相変態溶接棒

冷却過程におけるマルテンサイト変態温度は材料固有の値であり、含有する化学成分に大きく影響を受ける。Cool¹⁰⁾は化学組成から変態温度を推定する式を提案している。冷却過程における変態温度を低下させるためには、高温時に生じるオーステナイト相をより安定化させる必要がある、そのための合金元素としてNi、Mnなどが有効である。一方、この高温時のオーステナイト相が安定すぎると変態が冷却過程終了時まで生じないため、常温に戻るまでに変態が生じるように、Cr、Si、Moなどを含有

させる必要がある。変態温度はこれらの合金元素に対して非常に感度が高い。そのため、本研究では、化学成分の異なる3種類の低変態温度溶接棒を試作し、その適用性について検討を行った。試作した溶接棒(C15N、C13N、N19)の機械的性質、化学成分、M_f/M_s点を表-1に示す。また、図-2には、各溶接棒の温度と体積変化の関係を示す。各溶接棒の冷却過程中的変態温度(M_s/M_f)は、C15N、C13Nでは約(250/50°C)、N19では約(400/300°C)である。C13NとC15Nについては化学成分を変えて同等の効果(低変態温度)を目指したものであり、N19は低価格化を狙って、Crを除いたものである。

(2) 試験体

本研究では図-3に示す面外ガセット継手試験体および多くのウェブガセットを含む桁試験体を用いて検討を行った。本研究は鋼橋の合理化のための高強度鋼の適用性、特に使用鋼材の高強度化に伴いクリティカルとなる疲労強度に関する研究の一環として行ったものであり、本研究で疲労強度向上効果の比較検討に用いた著者らの行った研究(文献9))と同じ使用鋼材である引張強度、降伏強度とも900MPaをこえる高強度鋼を用いた。これは降伏強度を800MPa以上として試作した構造用鋼材であり、米国における橋梁用高性能鋼HPS100Wに対応する橋梁用鋼材である。この鋼材の機械的性質および化学成分を表-2に示す。表-3に本溶接の使用溶接棒およびその溶接条件を示す。

面外ガセット継手の場合、疲労亀裂発生位置は殆どの場合、主板側の溶接止端部もしくは溶接ルート部であり、また廻し溶接部に限定される。ここでは溶接止端部の疲労強度の向上を目的とし、作業性、

表-2 母材(900MPa級鋼材)の性質

機械的性質 [MPa, %]			化学成分 [重量%]								
降伏強度	引張強度	伸び	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
967	970	23	0.06	0.30	1.39	0.006	0.001	0.97	0.98	0.35	0.29

表-3 使用溶接棒及び溶接条件

(a) 本溶接用溶接棒の機械的性質

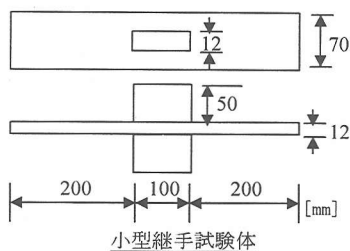
	降伏強度	引張強度	伸び
YM-80C	760MPa	860MPa	23%

(b) 本溶接の溶接条件

電流	電圧	速度
300A	29V	30cm/分

(c) 付加溶接の溶接条件

電流	電圧	速度	予熱	溶接姿勢
170-180A	18-20V	38cm/分	なし	下向き



小型継手試験体

桁試験体

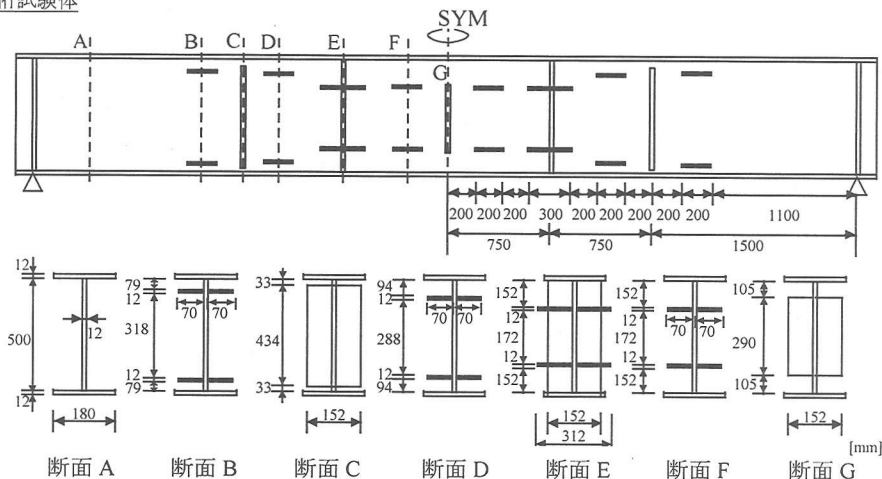
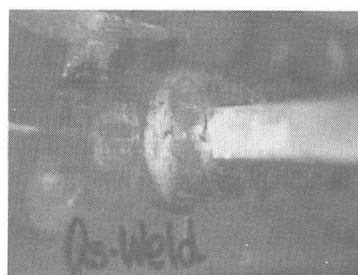
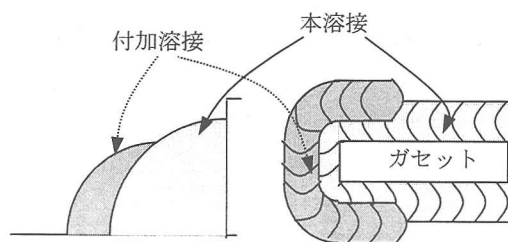


図-3 小型継手試験体と桁試験体



溶接まま試験体

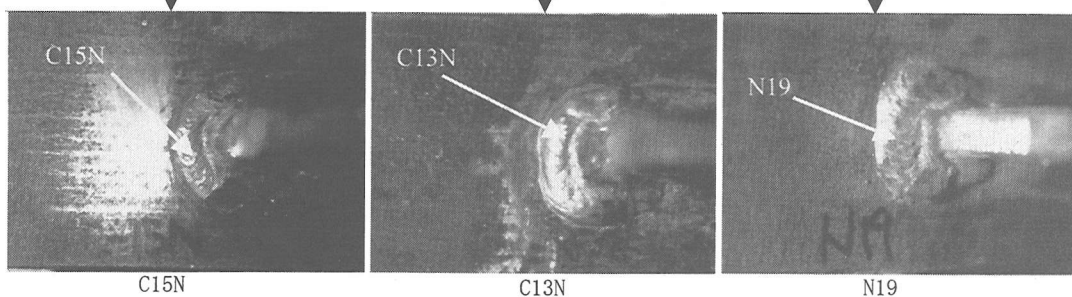


図-4 付加溶接位置と付加溶接ビード近傍

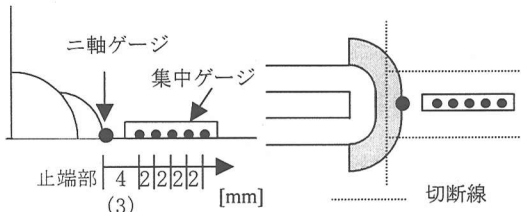


図-5 ゲージ貼付位置及び切断位置

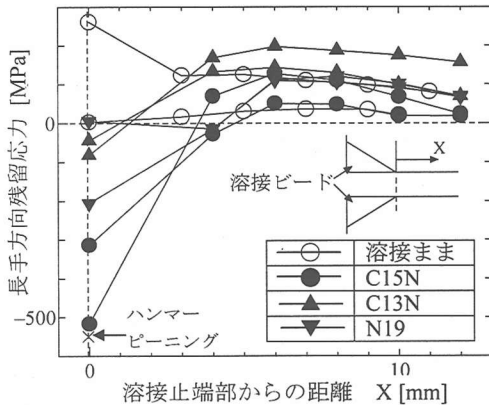


図-6 残留応力の測定結果

コスト面を考慮し、更には既設溶接構造物に適用可能な手法として、試作した低温相変態溶接棒を用いた付加溶接を廻し溶接部にのみ施すという手法を検討した。製作した付加溶接試験体の溶接部を図-4に示す。本研究では付加溶接時に予熱処理を行っていない。低温割れの主要原因の一つは溶接冷却時における熱収縮の拘束であるが、本研究で用いたような低温相変態溶接棒は低温で相変態膨張するために溶接割れが生じ難いことを村田¹¹⁾は示している。本研究で行った付加溶接でも溶接割れなどの溶接欠陥の発生は見られなかった。

本研究では、小型継手試験体を用いて応力集中、残留応力について実験的、解析的に検討し疲労試験を行うことによりその効果を検討し、更に桁試験体を用いて実構造物への適用性を検討した。また、著者らが検討を行った溶接止端部処理の代表的な手法であるハンマーピーニング、TIG処理の効果⁹⁾と比較検討を行った。

3. 圧縮残留応力の導入

低温相変態溶接棒を用いた付加溶接による圧縮残留応力の導入効果について、小型継手試験体を対象として実験及び解析的に検討を行った。

(1) 切断法による測定

図-5に切断法による残留応力測定における歪ゲージ貼付位置を示す。歪みゲージは試験体の表裏両面に貼付した。本溶接止端部、付加溶接止端部は、歪ゲージ寸法だけグラインダーで処理した後に歪ゲ

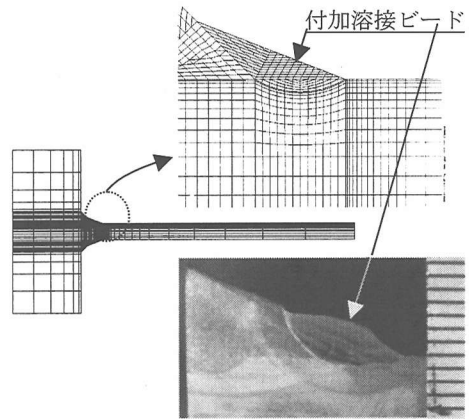


図-7 FEMモデル(C15N)

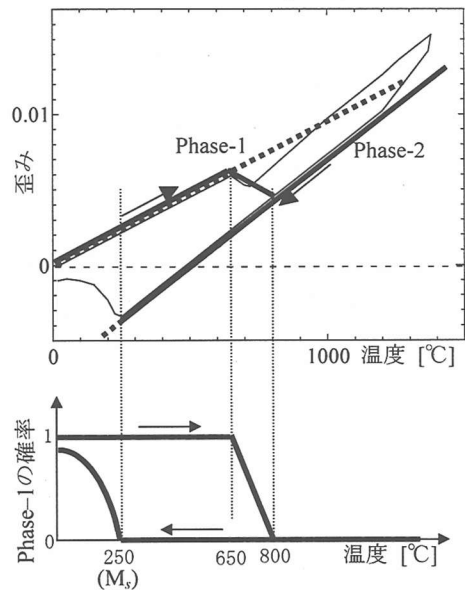
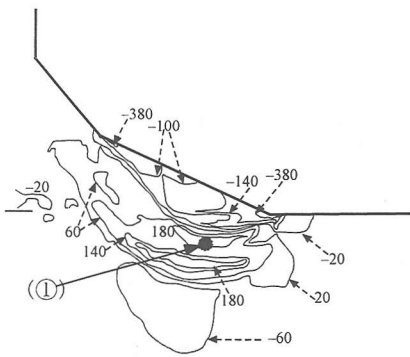


図-8 解析への相変態のモデル化

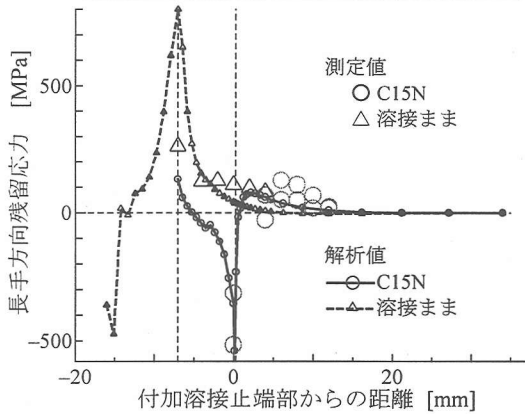
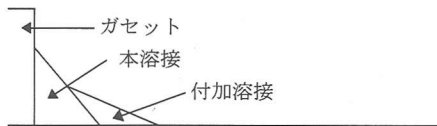
ジを貼付した。測定結果を図-6に示す。溶接まま試験体では本溶接止端部を、付加溶接試験体では付加溶接止端部を図のX軸の原点として作図している。溶接止端部から2~3mm程度離れたら、各付加溶接試験体及び溶接まま試験体で殆ど差異が見られていないが、溶接止端部に近づくにつれて、溶接まま試験体では引張残留応力が大きくなっていく傾向が見られるのに対し、付加溶接試験体では、圧縮側に残留応力が低下している。特に、変態温度の低いC15Nを用いた試験体では非常に大きな圧縮残留応力が測定されていることが分かる。

(2) FEM解析

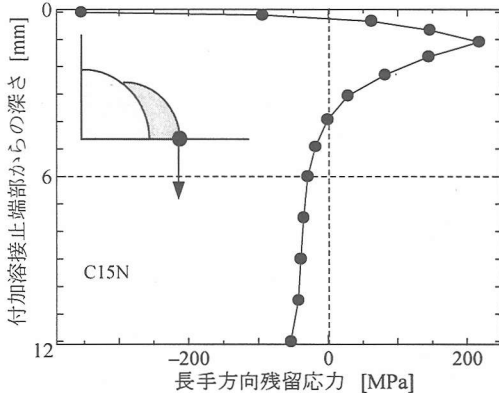
切断法により最も大きな圧縮残留応力が測定されたC15Nを対象として、FEM解析(汎用FEMソフトSYSWELD)により、圧縮残留応力の生成過程及び圧縮残留応力の発生領域などについての検討を行っ



(a) 長手方向残留応力分布 (FEM)



(b) 表面の長手方向残留応力分布



(c) 付加溶接止端部を含む断面での長手方向残留応力の板厚方向分布

図-9 付加溶接後の長手方向残留応力分布

た。本解析では図-7の要素分割図に示すように二次元解析を行っている。また、溶接金属、母材の物性

表-4 残留応力解析に用いた主な仮定

解析 Code	SYSWELD (二次元解析)
溶接	母材片側溶接のみ 熱源移動考慮せず、溶接ビードを 1500℃まで加熱後自然冷却 (加熱手法は溶接まま試験体の残留応力分布が測定結果と良く一致するように決定した)。
相変態	考慮した相は 2 相のみで、温度-歪み変化以外の物性は Phase-1,2 で同等とした。
降伏点 弾性係数 (仮定)	

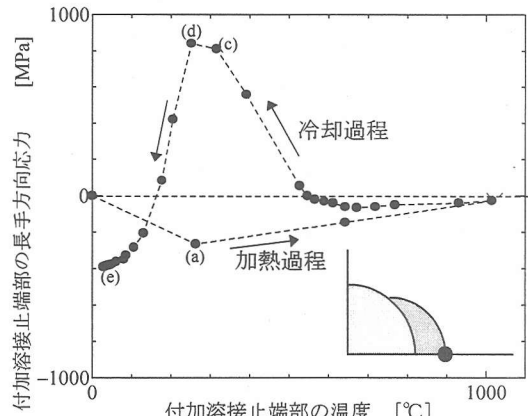


図-10 付加溶接止端部の長手方向応力の変化

の温度依存性については多くの仮定を用いているが、その概略を表-4に示す。C15Nの熱膨張・収縮曲線は図-2を図-8に示すようにPhase-1、-2 (それぞれの温度-熱ひずみ曲線を図中太点線で示す) からなる二相モデル (図中太実線) に簡略化し、相変態については同図に示すように、各有限要素内のPhase-1の占有確率の変化で与えている。また、母材 (900MPa級鋼材) の変態温度は百合岡らの資料¹²⁾ から HT780 鋼材のデータを参照して $(M_s/M_f) = (500/250^\circ\text{C})$ とした。

図-9に長手方向残留応力の表面分布及び止端部を含む板厚方向分布を示す。図-9(b)に示すように解析結果は測定結果と傾向的に良く一致していると言える。圧縮残留応力の導入される領域は、表面方向にも板厚方向にも非常に狭く、付加溶接止端部極近傍であることが分かる。しかしながら、疲労強度向上の観点で言えば、この極狭い領域の圧縮残留応力が大きな効果を及ぼすと考えられる。溶接金属および

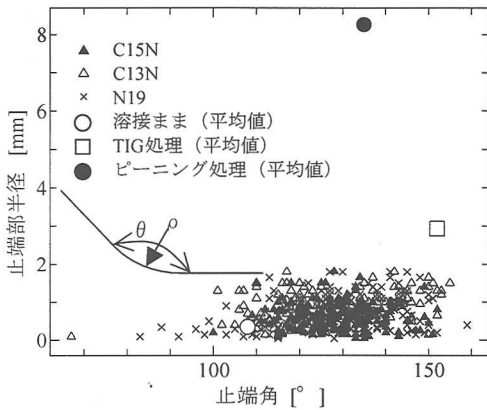


図-11 止端部形状測定結果

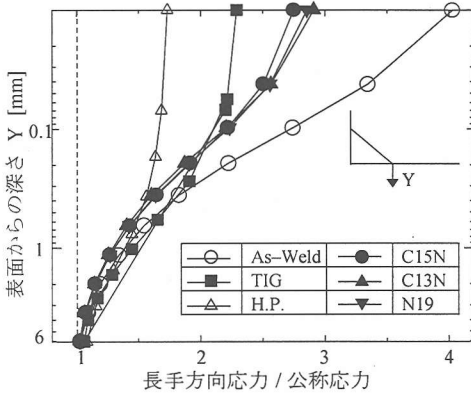


図-12 長手方向応力の板厚方向分布

(ρ, θ)	(L_1, L_2)			
	(10, 9)	(13, 9)	(16, 9)	(18, 9)
(0.87, 127)	—	—	C15N	—
(0.35, 108)	溶接まま	—	—	—

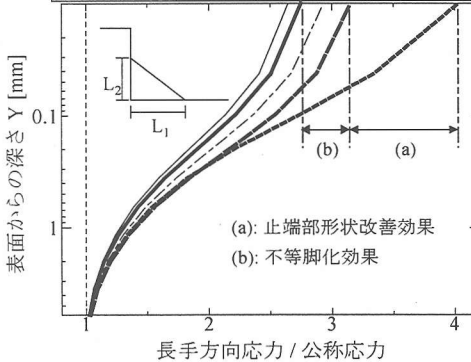


図-13 不等脚化の止端部応力への影響

び溶融部と母材の境界部にその境界線に沿い高い引張残留応力が生じているが(図-9(a)中①部)、これは加熱過程での最高到達温度とPhase-1からPhase-2への相変態温度との関係、及び境界部(ボンド部)での物性の急激な変化に依存するものであり、

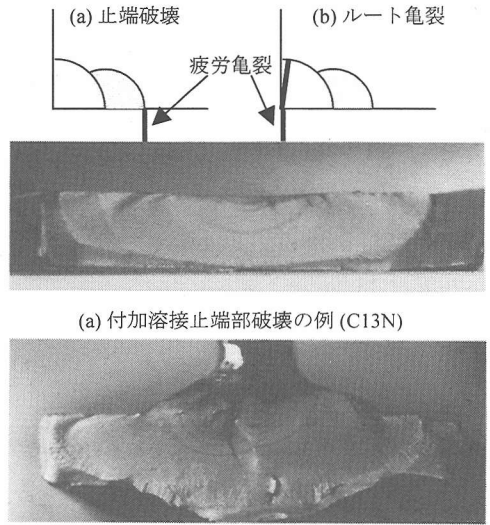


図-14 小型試験体の疲労亀裂の例

実際には希釈の影響もあり物性はより滑らかに変化するものと考えられるため境界部の引張残留応力も小さなものとなると考えられる。

図-10に溶接冷却過程時の付加溶接止端部の長手方向応力の変化と温度(0°C~1000°Cまでの変化のみを表示)の関係を示す。温度低下に伴う、冷却収縮及び降伏点・弾性係数の復活に伴い引張残留応力が增大するが、相変態の始まる250°Cより変態膨張に伴い引張残留応力が低下し、溶接終了時には圧縮残留応力になっていることが分かる。

4. 溶接止端部の応力集中

溶接止端部の疲労強度の支配因子としては、残留応力だけでなく応力集中の影響も挙げられる。図-4に示したように、付加溶接ビード形状は一見良好なものではなく止端部は非常に切立った状態にあることが分かる。図-11に印象材を用いて止端部レプリカを採取し、止端部半径 ρ 、止端部角 θ を測定した結果を示す。溶接まま試験体と比較して止端部形状は若干改善されているが、大きな差異は見られておらず、TIG処理、ハンマーピーニング処理の止端部改善効果の方が明らかに大きいことが分かる。

一方、付加溶接を行うことにより、溶接ビードが不等脚となり、巨視的に滑らかな形状となるために、応力集中低下の効果が期待できる。ここでは、図-11の止端部形状測定結果及び溶接脚長の測定結果を取り込んだ、3次元弾性FEM解析(汎用FEMソフトCOSMOS/M)により、溶接止端部の応力集中の解析を行った。解析結果を図-12に示す。溶接まま試験体止端部の応力集中と比較してTIG処理、ハンマーピーニング処理の低減効果よりも小さいが、付加溶接により応力集中が低減されていることが分かる。

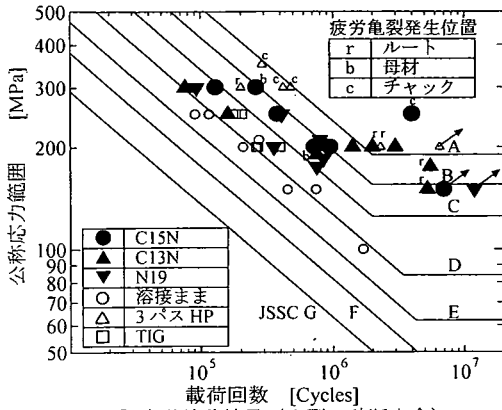


図-15 疲労試験結果 (小型: 破断寿命)

この応力集中の低減効果が止端部形状改善効果及び不等脚化のどちらの効果から得られているかの検討を行った。結果を図-13に示す(同図に脚長, 止端部形状の解析条件を示す)。主板側の溶接脚長が大きくなるに伴い, 応力集中は低減されているが, その効果は小さくなく, 本付加溶接試験体においては, 不等脚化の応力集中低減効果は止端部形状改善(平均値)の効果よりも小さい効果であった。

5. 疲労強度向上効果

疲労試験は小型継手試験体では繰返し引張载荷, 桁試験体では4点曲げ疲労試験で共に応力比はば0の条件で行った。

(1) 小型継手試験体の疲労試験結果

発生した疲労亀裂の例を図-14に示す。疲労亀裂は溶接まま試験体では全て溶接止端部から発生したが, 付加溶接試験体では, 付加溶接止端部もしくは本溶接ルート部が殆どで, 他の試験体は試験機の挿み部内(チャック内)破壊もしくは母板破壊であった。

疲労試験結果を図-15のS-N線図に示す。横軸の载荷回数には試験体が破断するまでの繰返し回数である。疲労強度向上効果はJSSCの疲労強度等級分類で0~3等級程度と変動が大きい, 付加溶接を施した3種類の試験体ともにほぼ同様の傾向を示しており, 作用応力範囲が小さくなるほどその効果が大きく現れていることが分かる。これは圧縮残留応力の導入を目的とした止端部処理を施した場合の一般的な傾向であると言える。3種類の付加溶接試験体の中では, 最も大きな圧縮残留応力が測定されたC15Nが最も大きな効果が見られた。比較対象としたハンマーピーニング処理(処理前にグラインダー処理を施している)と比較すると, その効果は低いが, TIG処理よりも明らかに大きな効果が得られている。

図-16に, 疲労試験結果を付加溶接止端部から破断した試験体のみについて, 亀裂発生寿命と亀裂進

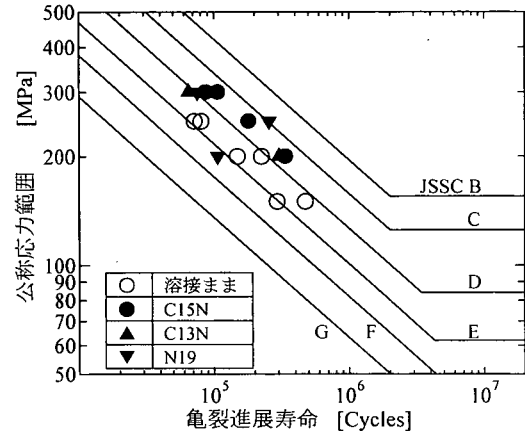
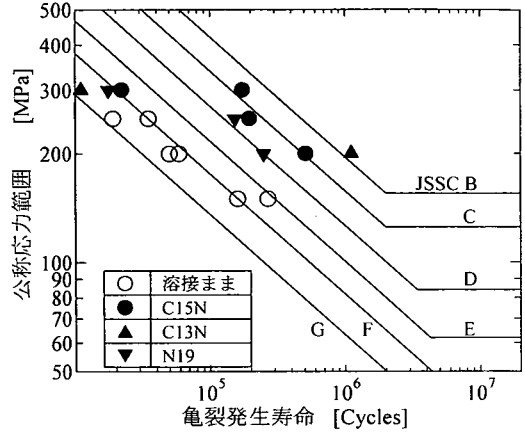


図-16 疲労亀裂発生寿命と進展寿命

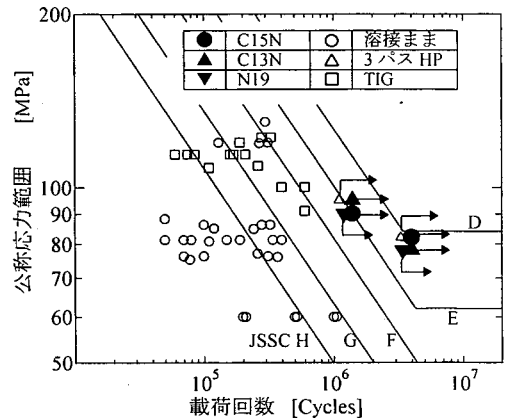


図-17 疲労試験結果 (桁: 亀裂長さ10mm)

展寿命で整理した結果を示す。本研究では亀裂発生寿命を亀裂深さが1mmとなった時の载荷回数と定義し, 破断面のピーチマークから観察を行った。亀裂進展寿命は, 破断寿命から亀裂発生寿命を差引いた载荷回数と定義した。データ数は少ないが, 亀裂発生寿命では, 特に応力範囲の小さいときの向上効果が大きいものに対して, 亀裂進展寿命では, 向上効果

は殆ど見られておらず、また破断寿命で整理した場合に見られたような作用応力範囲依存性は見られていないことが分かる。これらの結果は、低温相変態溶接棒を用いた付加溶接により、亀裂進展面には極表面近傍にのみ高い圧縮残留応力が導入されるという結果と一致した傾向であると言える。

(2) 桁試験体の疲労試験結果

図-17に桁試験体の疲労試験結果を示す。横軸は表面亀裂長さが約10mmとなったときの載荷回数である。溶接まま継手部では疲労強度が非常に低く多くのデータがH等級 (JSSC) を下回るものであった。桁試験体の疲労強度が継手試験体の疲労強度より著しく低い原因は、ガセット長さの差異などに起因する応力集中の差異、及びS-N線図横軸の定義の差異が主な原因と考えられる。3種類の低温相変態溶接棒を用いた付加溶接を施した継手及びハンマーピーニング処理を施した継手では疲労亀裂の発生が認められず、E等級を満足する結果が得られ、桁試験体においても大きな疲労強度の向上効果が得られた。桁試験体の疲労試験は、溶接まま及びTIG処理を施したウェブガセットからの疲労亀裂、もしくはウェブフランジ首溶接部からの疲労亀裂がフランジを切断した時に終了した。

6. 結論

本研究より以下の結論が得られた。

- 1) 低温相変態溶接棒を用いた付加溶接による圧縮残留応力の導入効果が実験的、解析的に確認できた。またその圧縮残留応力導入による疲労強度向上効果は、付加溶接止端部から疲労亀裂が発生する場合を考えた場合には、付加溶接止端部表層極近傍のみに現れる。
- 2) 付加溶接によって生じる不等脚化により応力集中が低減されるが、大きな効果は期待できない。
- 3) 低温相変態溶接棒を用いた付加溶接を施すことにより、疲労強度に大きな向上が見られた。その効果は TIG 処理よりも大きく、ハンマーピーニング処理 (事前にグラインダー処理) よりも小さい。また、この効果は大型桁試験体でも確認された。
- 4) 疲労強度向上効果は小型継手試験体では大きく応力範囲依存性が見られ、本研究の疲労試験で低力応力範囲では JSSC の疲労強度等級で 3 等級程度の向上効果が得られたが、作用応力範囲が大きくなると向上効果が小さくなる傾向が見られた。

謝辞：本研究を行うに際し、対象溶接棒の開発及び研究上貴重なご意見を頂きました新日本製鉄(株)大北茂氏、箱谷正氏、本間宏二氏に感謝致します。また試験体製作などご助力頂きました㈱サクラダ南邦明氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 溶接残留応力・溶接変形におよぼす相変態の影響, 溶接学会誌, Vol.47, No.7, pp.46-52, 1976.
- 2) 上田幸雄, 金裕哲, 陳楚, 唐逸民: 相変態の力学的取扱いと拘束応力・拘束ひずみの解析的計算法, 溶接学会論文集, Vol.2, No.1, pp.89-97, 1984.
- 3) 日本鉄鋼協会: 溶接用鋼の疲労強度向上に関する基礎検討, 1995.
- 4) 村田博隆, 加藤昇, 田村博: 相変態が溶接残留尾応力におよぼす影響—変態超塑性による応力緩和(第5報)—, 溶接学会論文集, Vol.11, No.4, pp.545-550, 1993.
- 5) Ohta, A., Wanabe, O., Matsuoka, K., Siga, T., Nishijim, S., Maeda, Y., Suzuki, N. and Kubo, T.: Fatigue Strength Improvement by Using Newly Developed Low Transformation Temperature Welding Material, *Welding in the World*, Vol.43, pp.38-42, 1999.
- 6) 久保高宏, 森影康, 天野虔一, 太田昭彦, 毛利雅志, 町田文孝: 低変態温度溶接材料を用いた溶接継手の疲労強度向上, 第139回日本鉄鋼協会春季講演大会厚板部会「橋梁高性能鋼の現状と今後の課題」, pp.9-12, 2000.
- 7) 藤田敏明, 吉家賢吾, 町田文孝, 湯田誠, 久保高宏: 非調質鋼面外ガセット部の低変態温度溶接材料による疲労強度向上の検討, 土木学会第54回年次学術講演会, pp.54-55, 1999.
- 8) 太田昭彦, 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断面部材の疲労強度向上, 溶接学会論文集, Vol.18, No.4, pp.628-633, 2000.
- 9) 穴見健吾, 三木千寿, 山本晴人, 樋口嘉剛: 高強度鋼の疲労強度と疲労強度向上法, 土木学会論文集, Vol.675, pp.251-260, 2001.4.
- 10) Cool, T.: Prediction of Martensite Start Temperature of Power Plant Steels, *Material Science and Technology*, Vol.12, 1996.
- 11) 村田博隆, 加藤昇, 田村博, 飯山孝志: 相変態が応力集中部の応力緩和特性におよぼす影響—変態超塑性による応力緩和(第6報)—, 溶接学会論文集, Vol.11, No.4, pp.550-555, 1993.
- 12) 百合岡信孝, 大北茂: 鉄鋼材料の溶接, 産報出版, 1998.

(2001.10.17 受付)

FATIGUE STRENGTH IMPROVEMENT BY ADDITIONAL WELDING WITH LOW TEMPERATURE TRANSFORMATION WELDING MATERIAL

Chitoshi MIKI, Kengo ANAMI and Yoshitake HIGUCHI

The present study examines experimentally and analytically the fatigue strength improvement of out-of-plane gusset welded joint by additional welding using low temperature transformation welding materials. The measurement and FEM analysis indicate that high compressive residual stress can be introduced only in the vicinity of the additional weld toe. The stress concentration can be reduced because the weld bead becomes to have un-equal leg length but the reduction is not large. By this method, fatigue strength can be largely improved, 0 to 3 JSSC classes or more but the effectiveness depends on the applied stress ranges. This fatigue strength improvement is also obtained for the web-gusset joints of the large-scale girder specimens.