

論文・報告

付加溶接と止端グラインダー処理を 組み合わせた疲労強度改善手法の開発

Development of Fatigue Strength Improvement Method Applying the Combined with the Additional Weld and Toe Grinding

小谷 祐樹 *1
KOTANI Yuki

津山 忠久 *2
TSUYAMA Tadahisa

溶接止端部は応力集中を要因とする疲労き裂が生じやすく、応力集中の軽減には止端仕上げが有効である。本研究は、新たな止端仕上げ手法として普通溶接材料を用いた形状を制御した付加溶接と止端グラインダー処理の組み合わせ手法に関して、溶接形状の改善が疲労強度に及ぼす影響について検討した。組み合わせ手法によって止端半径はより大きくなる傾向を示し、面外ガセット溶接継手の疲労強度は付加溶接のみの継手に比べて向上することが確認された。一方で、付加溶接の狙い位置がすみ肉止端部から離れ過ぎるとすみ肉溶接と付加溶接の境界部に凹みが生じ、この部位を起点に疲労き裂が生じやすくなることが確認された。さらに、付加溶接形状の実測データを基に構築した有限要素モデルを用いた弾性解析により溶接止端部と境界部の応力集中係数を算出し、各部位の応力集中の大小とその差異がき裂の発生寿命と発生位置に影響することを確認した。

キーワード：付加溶接、止端グラインダー処理、止端形状、境界部形状、応力集中

1. はじめに

我が国で供用中の鋼橋の高齢化に伴い疲労き裂が多数報告されており、道路橋の累積大型車交通量が多くなるにつれて発生割合が高くなる傾向にある。疲労き裂が生じる代表的な部位として鋼床版構造では、Uリブと横リブのスリット部の廻し溶接部、デッキプレートと垂直補剛材間の廻し溶接部、デッキプレートとUリブの縦溶接部の比率が高く、その他の構造では、主桁ウェブとガセットプレートの廻し溶接部、支点上ソールプレートと主桁フランジ間などが挙げられる¹⁾。いずれもき裂が進展すると主桁破断や路面陥没など致命的な状態に至る可能性のある損傷であるため、新設の鋼橋製作においても疲労設計がすすめられている。日本鋼構造協会(JSSC)の定める疲労設計指針では、例えば面外ガセット溶接継手では、疲労等級が止端仕上げによってG等級からF等級に1等級向上すると示されており^{2,3)}、その手段としてグラインダー処理^{4,5)}が推奨されている。一方で止端仕上げには様々な種類があり、打撃ツールを用いたピーニング⁶⁾や低変態温度(LTT)溶接材料を使った付加溶接^{7,8)}なども、疲労き裂の発生要因の一つである溶接止端部に生じている引張残留応力の低減効果が報告されていることから、工事入札時の技術提案として施工側が独自に採用する場合がある。しかし、疲労設計指針でも止端仕上げはグラインダー仕上げを前提に示されているため、ピーニ

ングや付加溶接などは専用のツールや材料が必要となり準備手間や材料コストの増加が懸念される。そこで本研究では、特殊な溶接材料を使用しない付加溶接法に着目し、止端形状の改善を試みた。本提案手法は材料コストの抑制に加え、付加溶接前に材料の交換が不要で通常の溶接と連続施工が可能になることが大きなメリットとなる。既報⁹⁻¹¹⁾にて、面外ガセット溶接継手を対象に、付加溶接によって止端半径を大きくかつフランク角を小さく形成でき、グラインダー仕上げと同等の疲労強度が得られることを明らかにし、付加溶接の狙い位置に応じて変化する付加溶接形状が疲労寿命に大きく影響することを示した。一方で継手の疲労性能の更なる向上を図る上ではその他の止端処理技術との組み合わせ¹²⁾が効果的と考え、溶接部の仕上げ作業に標準的に使用しているグラインダーツールを付加溶接と組み合わせた手法を適用し、組み合わせ技術による溶接形状変化が疲労強度へ及ぼす効果について検証した結果を報告する。

2. 疲労試験体

(1) 試験体形状

試験体の形状と寸法を図1に示す。板厚12mmの主板と2枚のガセットプレートで構成され、全周をすみ肉溶接で接合した面外ガセット溶接継手構造である。鋼材は溶接構造用圧延鋼材JIS G 3106 SM490YA、溶接材料はワイヤ径1.2mmのフラックス入りワイヤJIS Z 3313

*1 川田工業㈱橋梁事業部生産統括部生産開発室

*2 川田工業㈱橋梁事業部生産統括部生産開発室 室長

T49J0T1-0CA-UH5 を使用した。

処理を組み合わせたときは、付加溶接ビードの主板側止端部に同様の処理を施した。

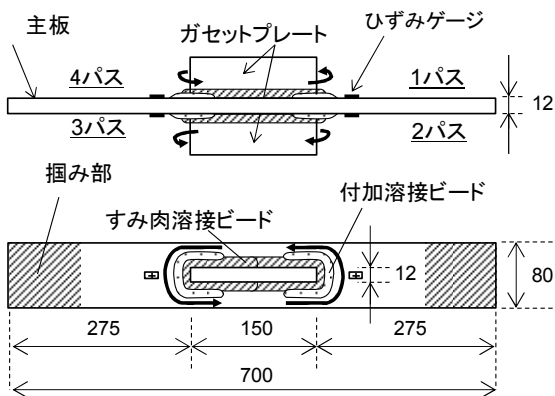


図 1 試験体形状

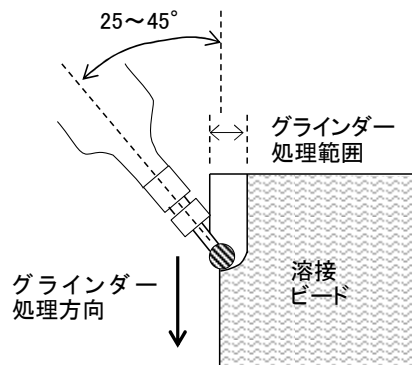
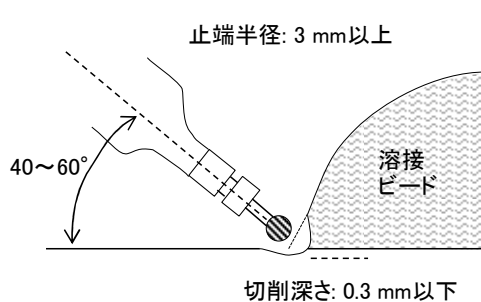


図 2 グラインダー処理の施工要領と形状の許容値

(2) すみ肉溶接と付加溶接の条件

すみ肉溶接と付加溶接の条件を表 1 に示す。付加溶接は、扁平なビード形状が得られるように予め溶接条件を調整し、すみ肉溶接よりも低入熱な溶接条件とした。溶接はいずれも溶接形状のバラツキを抑えるためロボットによる CO₂ ガスシールドアーク溶接を行い、すみ肉溶接は脚長 6 mm とし、半周の廻し溶接を図 1 に示す順序で合計 4 回行き全周の廻し溶接部を形成した。付加溶接の狙い位置はすみ肉溶接の主板側止端部を基準に 0 mm, 2 mm および 4 mm の計 3 条件で付加溶接形状の変化を図った。

表 1 溶接条件

溶接方法	電流 (A)	電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	入熱量 (J/mm)
すみ肉溶接	270	30.5	400	1,236
付加溶接	205	25.5	450	697

(3) グラインダー処理条件

グラインダー処理の施工要領と形状の許容値を図 2 に示す^{13,14)}。超硬バーを装着したバークライナーを主板側の止端部に押し当て、切削傷方向が荷重の作用方向と直角にならないように進行方向に対してツールを傾けて切削した。目標の止端半径は 3 mm 以上、母材への削り込み深さはアンダーカット許容値と同等の 0.3 mm 以下とし、可能な限り母材切削を避けつつ止端ラインが完全に除去されるまで切削を行った。最終的な形状は、曲率半径 3 mm を有する専用ゲージを切削部に押し当て、目視確認にて形状管理した。付加溶接に止端グラインダー

(4) 止端処理条件

本検討の止端処理条件一覧を表 2 に示す。すみ肉溶接のまま止端未処理 AW, すみ肉溶接後に止端グラインダー処理した AWG, 付加溶接を施した B シリーズ, 付加溶接と付加溶接部の止端グラインダー処理を組み合わせた BG シリーズとした。付加溶接の狙い位置に応じて、B シリーズは B0, B2 および B4, BG シリーズは B0G, B2G および B4G とそれぞれ称した。表中にはグラインダー処理または付加溶接の有無を○と×で表記し、付加溶接を施工した場合の狙い位置を 0, 2 および 4 mm でそれぞれ表記した。

表 2 止端処理条件

試験体名	グラインダー仕上げの有無	付加溶接の有無	付加溶接狙い位置	
AW	×	×	-	
AWG	○	×	-	
B シリーズ	B0	×	○	0 mm
	B2	×	○	2 mm
	B4	×	○	4 mm
BG シリーズ	B0G	○	○	0 mm
	B2G	○	○	2 mm
	B4G	○	○	4 mm

3. 溶接形状計測

(1) 溶接形状パラメータ

溶接形状を比較するために図3に示す形状パラメータを定義した。廻し溶接部溶接止端部のパラメータとして止端半径 ρ とフランク角 θ を、BG シリーズに限りすみ肉溶接ビードと付加溶接ビードが重なる境界部の形状パラメータとして曲率半径 r と深さ d をそれぞれ定義した。

(2) 計測方法

溶接形状計測には3D スキャナを使用し、廻し溶接部の断面形状を取得した。BG シリーズの断面形状プロファイルの一例を図4に示す。廻し溶接部1箇所あたり9断面すなわち試験体1体あたり36断面分の形状を取得し、各断面に対して図3に示した形状パラメータを計測して止端処理条件ごとに計測値を平均値で整理した。

(3) 計測結果

計測結果を図5に示す。図5(a)に止端半径とフランク角を、図5(b)に境界部の曲率半径と深さを示し、図中には既報⁹⁾¹¹⁾のAW, AWG およびBシリーズの結果も併記した。図5(a)より、BGシリーズは付加溶接の主板側止端部にグラインダー処理を施しているため、止端半径は概ね3mmを満足し、フランク角はBシリーズと同様BGシリーズもまた付加溶接の狙い位置がすみ肉止端部から離れるほど小さくなる傾向を示し、止端形状が滑ら

かに変化することが確認された。一方で境界部形状については図5(b)より、特に境界部深さは狙い位置が止端部から離れるほど大きくなる傾向を示し、狙い位置が4mmの場合(B4G)に境界部の曲率半径は最も小さく、境界部深さは最も大きくなることが確認された。すなわち、付加溶接の狙い位置が離れるにつれて止端部の形状は滑らかになるが、境界部には段差が生じやすく応力集中部になり得ることが示唆された。

4. 疲労試験

(1) 試験条件

疲労試験には30ton 油圧サーボ式試験機を使用した。試験は図1の斜線部に示す位置をチャッキングし、一軸方向の引張り荷重を繰り返し繰り返し繰り返し行っていった。ひずみゲージの貼り付け位置は、図1に示すように各すみ肉溶接または付加溶接の廻し溶接部主板側止端部中央から5mm離れた主板表面上とし、载荷回数5000回ごとに動的ひずみ計測を行った。試験条件は、公称応力範囲 $\Delta\sigma=200, 225, 250$ MPa, 応力比0.05, 载荷繰り返し速度5 Hz とした。試験中に計測したひずみ範囲が初期値に対して5%低下したときの繰り返し回数をき裂発生寿命 N_c , 試験体が全断面で完全に破断したときの繰り返し回数を疲労寿命 N_f とそれぞれ定義した。

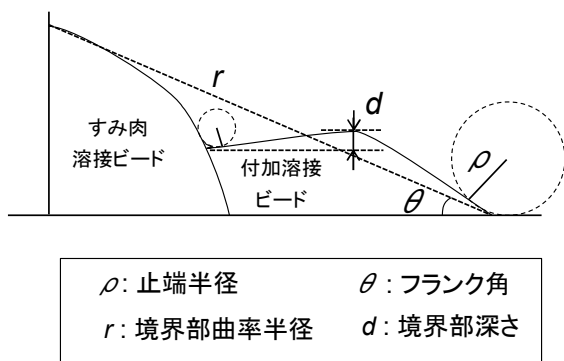


図3 溶接形状パラメータ

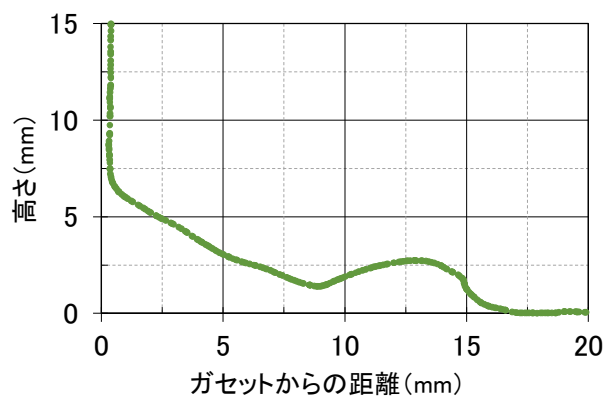
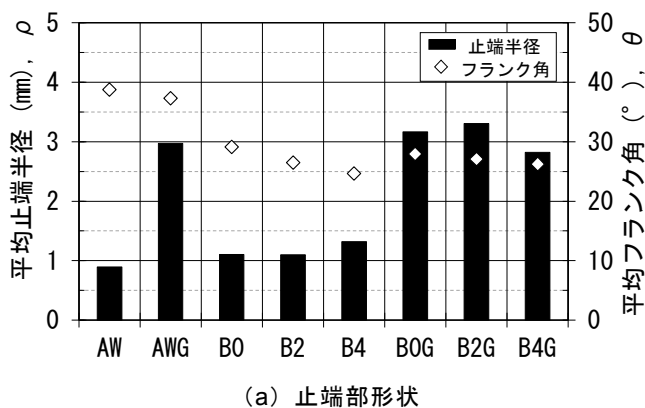
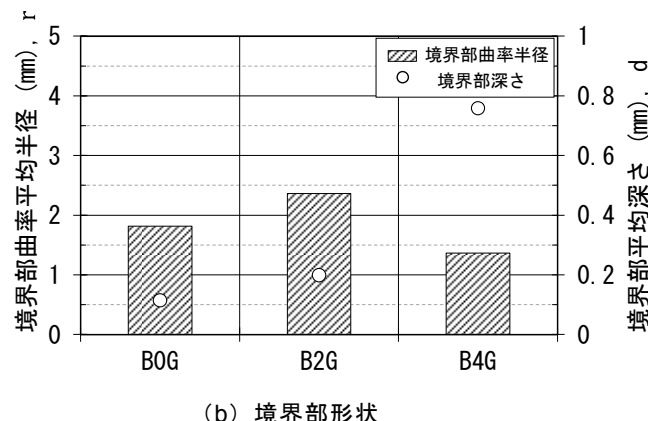


図4 断面形状プロファイル



(a) 止端部形状



(b) 境界部形状

図5 形状計測結果

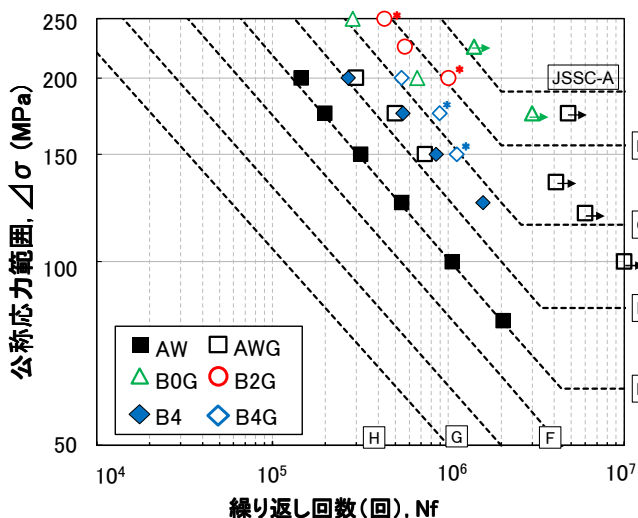
(2) 試験結果

疲労試験結果を疲労寿命 N_f とき裂発生寿命 N_c でそれぞれ整理したものを図6に示す。横軸は繰返し回数、縦軸は公称応力範囲を示し、疲労強度等級ごとのJSSC疲労設計曲線を点線で示す。なお、図中のプロットのうち*印を付加したものは境界部破断を、矢印を付加したものは未破断の結果を示し、AW, AWGおよびBシリーズの試験結果は既報⁹⁻¹¹⁾を引用した。図6(a)より、付加溶接と止端グラインダー処理を組み合わせたBGシリーズでは他条件に比べて疲労寿命は延伸し、 $\Delta\sigma=200$ MPaで6.9倍、 $\Delta\sigma=175$ MPaで12.6倍(250万回打切り)に延伸することが明らかとなった。JSSCの疲労等級はB, C等級を示し、AWのE等級に対して2等級以上、BシリーズのD, E等級に対して1等級以上向上することが確認された(疲労寿命 N_f の大小関係: $B2G > B0G > B4G > B4 > AWG > B2 > B0 > AW$)。ここで、BシリーズとBGシリーズにおける狙い位置と疲労寿命の関連性に注目すると、既報⁹⁻¹¹⁾ではBシリーズにおいて付加溶接の狙い位置が離れるにつれて疲労寿命が延伸すること($B4 > B2 > B0$)が確認されたが、BGシリーズでの N_f の大小関係は $B2G > B0G > B4G$ となり狙い位置と疲労寿命が一樣の大小関係を示さなかった。すなわち、組み合わせ手法においても疲労寿命を最大限に延伸できる狙い位置が存在し、付加溶接形状を適正に制御する必要があることが示された。また図6(b)より、 $\Delta\sigma=200$ MPaにおけるき裂発生寿命 N_c は、止端部破断したB4よりも境界部破断した場合き裂発生位置とひずみゲージの距離が離れているため実際に境界部のひずみ範囲が5%低下する繰返し数は計測値よりも低い可能性があると考えられるが、境界

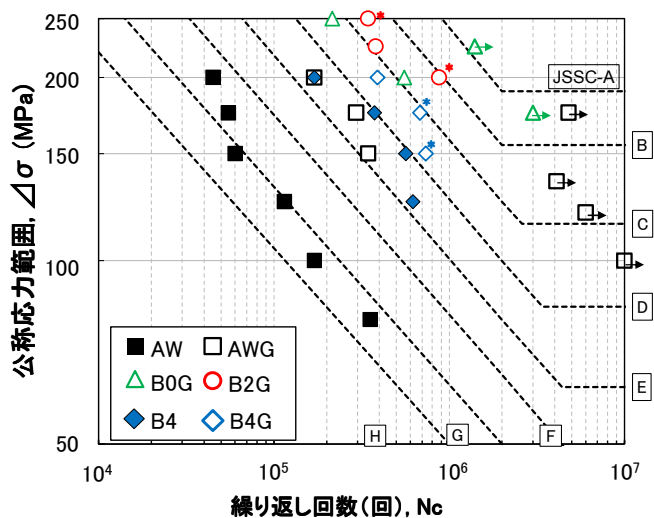
部の形状を曲率半径が大きい、かつ深さが小さい形状に形成することで継手の疲労性能を大きく向上できると考えられる。続いて、疲労試験結果を最小二乗法により直線回帰した近似線から求めた条件ごとの200万回疲労強度を表3に示す。AWとB4の比較から付加溶接により疲労強度は約1.5倍に増加していることが確認できる。一方でBGシリーズのうちB0GとB2Gの疲労強度はそれぞれ148.9と166.3 MPaとなり、AWの79.9 MPaに比べて約2倍に疲労強度が増加することが確認された。よって、今回適用した付加溶接を0~2 mmの狙い位置で制御しつつ、かつ止端グラインダー処理を組み合わせることで形成される溶接形状は疲労強度を2等級以上向上可能な形状であったといえる。また、B2Gの様に付加溶接形状を適正に管理し作り込むことで疲労等級を3等級以上向上できる可能性が示唆された。

表3 200万回疲労強度

試験体名	200万回疲労強度 (MPa)	AWに対する比率	
AW	79.9	-	
AWG	110.4	1.4	
Bシリーズ	B0	116.1	1.5
	B2	98.7	1.2
	B4	119.2	1.5
BGシリーズ	B0G	148.9	1.9
	B2G	166.3	2.1
	B4G	123.3	1.5



(a) 疲労寿命



(b) き裂発生寿命

図6 疲労試験結果

5. 有限要素解析による止端部と境界部の応力集中の検証

実験検証において、付加溶接、付加溶接と止端グラインダー処理の組み合わせ手法により廻し溶接部の形状を改善し、疲労強度が向上することを示した。しかし、き裂の発生位置が止端部または境界部の2パターン存在し、これは形状改善による応力集中の変化が影響していると考えられるため有限要素解析を用いて応力集中の詳細な検討を行った。

(1) 解析モデル

解析には汎用の有限要素解析ソフト ABAQUS を使用し、有限要素 (FE) モデルは対称性を考慮した図 7 に示す 1/8 モデルとした。FE モデルは疲労試験を行った全ての試験体種を対象とし、実測した止端部形状のうち疲労特性上最も厳しくなる条件を適用し、0.05 mm のメッシュサイズで構築した。FE モデルに適用した各部位の形状パラメータを表 4 に示す。

(2) 解析結果

図 7 に示す FE モデルを使って弾性解析を実施して得

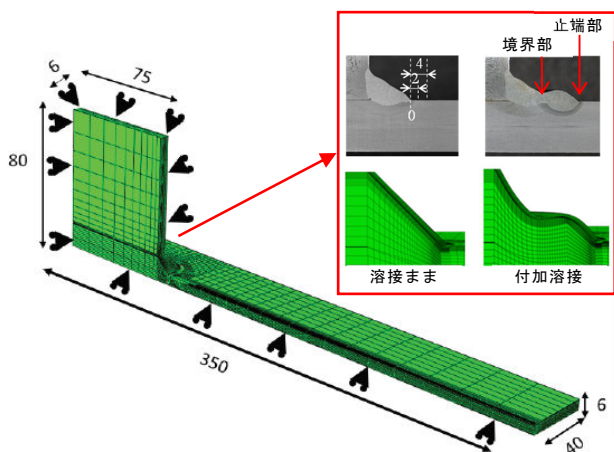


図 7 FE モデル

られた AW, B4, B2G および B4G の溶接止端部と境界部の最大主応力分布を図 8 に、応力集中係数 K_t の一覧を表 4 に示す。なお、応力集中係数 K_t は公称応力範囲に対する最大主応力範囲の比率とした。図 8(c), (d) の止

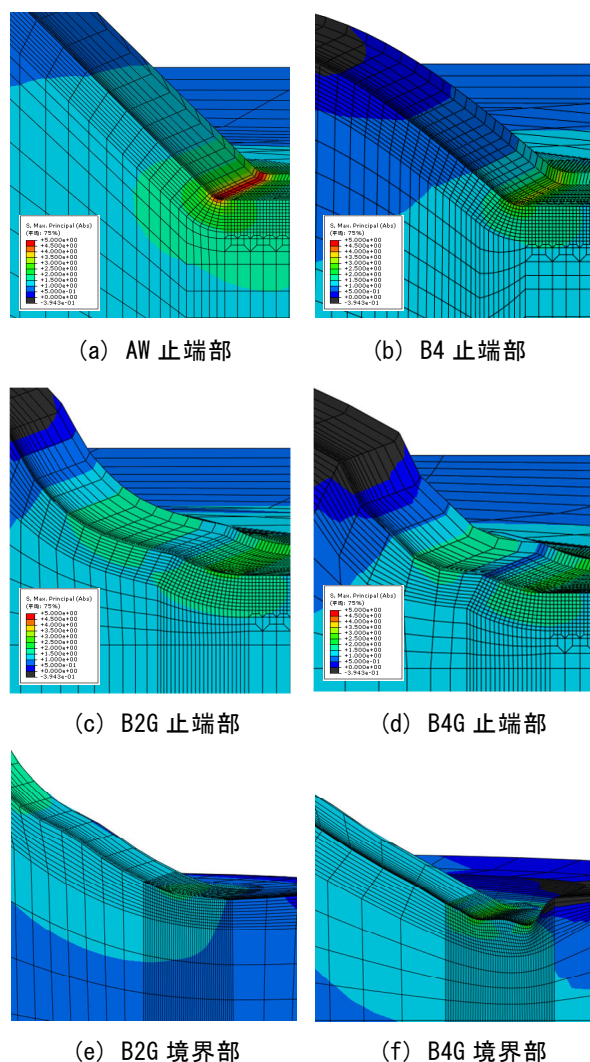


図 8 止端部と境界部の最大主応力分布

表 4 形状パラメータと応力集中係数 K_t

試験体名	形状パラメータ				応力集中係数 K_t		
	止端半径 ρ (mm)	フランク角 θ (°)	境界部曲率半径 r (mm)	境界部深さ d (mm)	止端部	境界部	
AW	0.34	45.14	-	-	4.73	-	
AWG	1.51	42.58	-	-	3.02	-	
B シリーズ	B0	0.53	33.23	-	-	3.68	-
	B2	0.53	30.50	-	-	3.37	-
	B4	0.53	27.85	-	-	3.08	-
BG シリーズ	B0G	2.15	27.90	1.82	0.11	2.19	1.95
	B2G	2.08	27.06	2.36	0.20	2.15	1.64
	B4G	1.70	26.23	1.36	0.76	2.06	2.77

端部形状に段差が生じているのは、グラインダー処理によってわずかに母材が削れていることを FE モデルに反映しているためである。なお、全て止端部破断となった AW, AWG および B シリーズについては境界部の K_t の算出は行っていない。図 8(a), (b) より, AW と B4 では止端部に大きな応力が生じているが, AW に対して B4 は止端部の応力が軽減されていることが確認できる。また図 8(c)~(f) より, B2G と B4G では止端部と境界部に同程度の応力が生じており, 実験結果で示したようにき裂の起点が止端部または境界部どちらにもなり得ることを示しているが, 両部位の K_t は低値を示すことからき裂が発生しにくくなったと考えられる。すなわち, 止端部と境界部の K_t の大小とその差異がき裂の発生寿命と発生位置に影響したと考えられる。

6. まとめ

本検討では, 通常のスミ肉溶接と同じ溶接材料を用いて形状を制御した付加溶接と止端グラインダー処理を組み合わせた手法による形状改善効果と疲労強度に及ぼす影響について, 面外ガセット溶接継手を対象に検証し, 得られた結果を以下に示す。

- ① 200 万回疲労強度が, 最大で 2.1 倍に向上し, JSSC の疲労等級は 3 等級向上することが確認された。
- ② 組み合わせ手法において, 疲労寿命を最大限に延伸できる溶接形状が存在することが確認された。本検討においては狙い位置を 2 mm に制御し, かつ止端グラインダー処理を組み合わせることで疲労寿命は $\Delta\sigma=200$ MPa で 6.9 倍, $\Delta\sigma=175$ MPa で 12.6 倍 (250 万回打切り) 向上した。
- ③ 付加溶接の狙い位置がスミ肉溶接止端部から離れるとスミ肉溶接と付加溶接の境界部が凹みやすく, この境界部からき裂が発生する可能性があることが確認された。
- ④ 有限要素解析で算出した溶接止端部の K_t と実験結果の疲労寿命の大小関係は一致し, 付加溶接形状制御による形状の適正化に伴い止端部と境界部いずれもの K_t が低値に抑えられることで疲労強度が向上することが確認された。

7. おわりに

本研究にあたり, 各種計測と有限要素解析の実施に際し多大な御協力を頂きました大阪大学の堤准教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人 土木学会：鋼構造シリーズ 19 鋼床版の疲労, 2010.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 2017.

- 3) 社団法人 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 2012.
- 4) 森, 猪俣, 平山：グラインダー仕上げ方法が面外ガセット溶接継手の疲労強度に及ぼす影響, 鋼構造論文集, 第 11 巻, 第 42 号, pp.55-62, 2004.
- 5) 内田, 森, 佐々木：止端仕上げの削り込み深さが面外ガセット溶接継手の疲労強度に及ぼす影響, 鋼構造論文集, 第 23 巻, 第 89 号, pp.51-58, 2016.
- 6) Tsutsumi, Nagao, Fincato, Ishikawa, Matsumoto: Numerical and Experimental Study on Fatigue Life Extension of U-rib Steel Structure by Hammer Peening, 溶接学会論文集, 第 35 巻, 第 2 号, pp. 169s-172s, 2017.
- 7) 宮田, 鈴木：溶接継手疲労強度改善溶接法と溶接材料, 神戸製鋼技報, Vol.65, No.1, pp.16-20, 2015.
- 8) 齋藤, 穴見, 池原, 澁谷, 小野：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, 2017.3.
- 9) Kotani, Tsuyama, Tsutsumi, Buerlihan: Experimental Study for the Effect of Additional Weld on Fatigue Strength in Out-of-Plane Gusset Welded Joints, 溶接学会論文集, 第 38 巻, 第 2 号, pp.139s-143s, 2020.
- 10) Tsutsumi, Buerlihan, Fincato, Kotani, Tsuyama: Numerical Study for the Effect of Shape of Additional Weld on Fatigue Strength in Out-of-Plane Gusset Welded Joint, 溶接学会論文集, 第 38 巻, 第 2 号, pp.163s-167s, 2020.
- 11) 小谷, 津山：面外ガセット溶接継手の疲労強度に与える付加溶接の効果, 川田技報, Vol.40, 2021.
- 12) 小谷, 津山, Buerlihan, 堤：付加溶接形状の制御と止端グラインダー仕上げの併用による面外ガセット溶接継手の疲労強度向上効果, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.497-508, 2021.3.
- 13) 日本道路協会：鋼道路橋施工便覧, 2015.
- 14) Hobbacher: RECOMMENDATIONS FOR FATIGUE DESIGN OF WELDED JOINTS AND COMPONENTS, IIW document IIW-1823-07/XIII-215r4-07/XV-1254r4-07, 2008.