

溶接止端疲労特性を改善した応力非伝達型十字継手のルート疲労亀裂発生条件の検討

新日鐵住金 正会員 ○ 島貫 広志, 正会員 米澤 隆行 法政大学 フェロー会員 森 猛

1. 背景と目的

HFMI など各種溶接止端のピーニング処理は、圧縮残留応力を止端に導入することで、疲労亀裂の発生を抑制することが知られており、近年、溶接部の疲労対策として活用が進んでいる。しかし、溶接止端部の疲労強度が向上することで、相対的に溶接ルート部の疲労強度が低くなり、ルートを起点とする疲労破壊が生じることがある。著者らのグループは、これまで橋梁用高降伏点鋼である SBHS500 などを用いた荷重非伝達型十字継手に UIT を施した継手の疲労試験により、前述の止端からの破壊とルートからの破壊に分かれる現象を示し、また、ルート起点の疲労破壊は特に長寿命側で起こりやすい傾向があることを実験的に示し、原因について定性的な議論をしてきた¹⁾。そこで本報では止端部やルート部の応力集中を、より現実的な形状の FEM 解析によって比較し、残留応力の影響も考慮し、この現象の説明を試みた。

2. 使用鋼材と試験片形状

試験体は図 1 に示す荷重非伝達型十字継手である。材料は、板厚 12mm については SBHS500 (降伏強度(YS) 575N/mm², 引張強度(TS) 665N/mm²) である¹⁾。また、板厚 22mm 材については SM570TMC(YS 548N/mm², 引張 TS 644N/mm²)、板厚 50mm 材については EH47(YS 523N/mm², TS 615N/mm²) である²⁾。溶接は強度 590N/mm² 用のフラックスコアトワイヤ SF-60 を用いた FCAW で、溶接脚長が上下均等になるよう鋼板を 45° 傾けた下向き溶接とした。ルート破壊と脚長の関係を確認するために脚長を振った試験体を作製しており、狙いの溶接脚長は板厚 12mm の場合は L1, L2=5,10,13mm, 板厚 22mm の場合は 16mm, 板厚 50mm の場合は 16,21,25mm とした。なお、脚長の小さい L1, L2=5mm の試験片は水平下向き溶接とした。なお、UIT 継手では、試験片掴み部のチャック切れ防止のため、チャック部を幅広にした。

溶接後、試験片形状に切り出し加工後、溶接止端のみ、止端線が消失するまで UIT を施した。この時、止端部の凹み深さは 0.2~0.3mm を目標とした。UIT には、ESONIX[®]27 UIS 装置 (UIT は米国 PRS 社の技術)、打撃ピンには直径 3mm φ、先端曲率半径 3mm のものを用いた。

3. 疲労試験方法と試験結果

疲労試験は 500kN または 1000kN のサーボ疲労試験機を用いて、荷重制御により周波数 5~10Hz の正弦波で行われ、得られた結果を前報の結果^{1,2)}と合わせて図 2 に示す。なお、試験時の応力比 R は $R=0$ (板厚 12mm)または 0.05(板厚 22mm, 50mm)である。試験の結果、板厚 12mm の試験体では、UIT を施した脚長の小さい条件(L1, L2=5mm,10mm)で、前報¹⁾で述べたように UIT による疲労改善効果が顕著となる長寿命域でルート部を起点に疲労き裂が発生する傾向が強く、一方、脚長が長い(約 13mm)試験片では、止端 UIT 部を起点に疲労破壊した。また、板厚 22mm の試験片ではルート破壊がなく、板厚 50mm の試験体では、特に脚長の小さい(L1,L2=16mm)試験片において、溶接ルートから疲労破壊する結果が多数得られた。

4. 亀裂発生部の応力集中の比較

より実際の試験片形状に即して溶接ルート部や打撃溝部の FEM による詳細な弾性応力解析を行い、各試験体の応力集中の比較を行った。図 3 に示す四角形要素を用いた二次元弾性モデルを基に、各部の寸法を変化させ、応力集中に及ぼす板厚や打撃角度、打撃深さ、溶接金属の溶け込みの影響を調べた。解析コードは MARC2015 を使用し、解析条件は表 1 に解

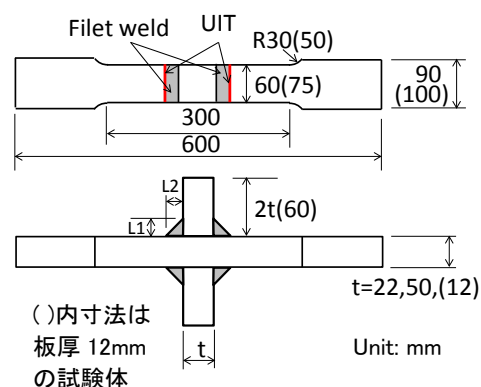


図 1 荷重非伝達型十字継手試験片形状

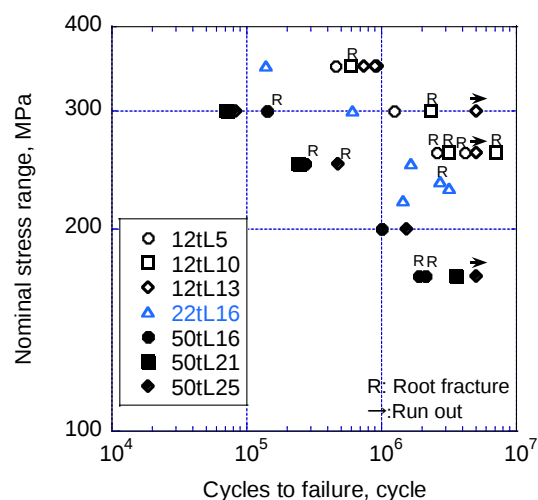


図 2 UIT を施した荷重非伝達型十字継手の疲労試験結果

キーワード 疲労強度, 超音波衝撃処理, 荷重非伝達十字継手, 板厚効果, 鋼材強度

連絡先 〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1 新日鐵住金(株)鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部

析結果と合わせて示す。UIT 溝部の応力集中中は、板厚の増大に伴い相対的に高まるが、打撃角度や打撃深さの多少の変動では大きな変化はない。ルートの応力集中については隅肉溶接による溶け込み不良(LF)が生じる可能性があるため、0.1~0.2mm の長さで0.1mm 幅の欠陥がモデル上部に向かって残留することを想定した。

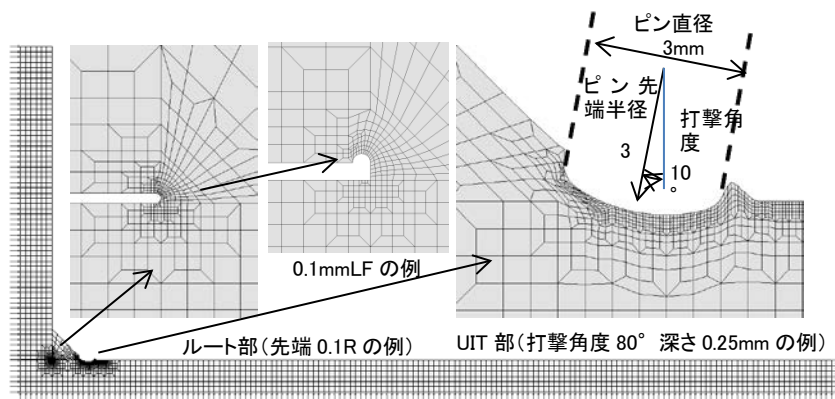


図3 FEM 解析モデル(二次元平面ひずみ要素)

脚長 L1 が 5mm の試験片は、実際の寸法に合わせ、解析

表1 UIT 処理による疲労強度向上に及ぼす溶接脚長や板厚の影響 * L1=6mm, L2=4mm, ** Lack of fusion

モデルでは脚長 L1,L2 を 6mm とした(一部は L2=4mm)。

No.	Steel thick.	leg length, L1 (mm)	UIT angle (°)	UIT depth (mm)	LF** (mm)	R	Kt toe	Kt root	Estimated Fatigue strength		Initiation (Experiment)	
									$\Delta\sigma_{\text{toe}}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{\text{root}}$ (MPa)		
12tL6sha	SBHS500 12mm	6	80	0.2	0	0	1.99	1.5	240	≒	237	Root&toe
12tL6			80	0.25	0	0	2.01	1.51	242	≒	238	
12tL6D			70	0.25	0	0	2.26	1.44	213	≒	248	
12tL6LF			80	0.25	0.1	0	2.01	2.61	240	≫	137	
12tL64		6-(4)*	80	0.25	0	0	1.98	1.49	243	≒	240	(Root)
12tL10			80	0.25	0	0	2.14	1.07	225	≪	334	
12tL10LF1		10	80	0.25	0.1	0	2.15	2.03	224	>	176	Root&toe
12tL10LF2			80	0.25	0.2	0	2.12	2.53	227	≫	141	
12tL13			13	80	0.25	0	0	2.21	0.94	219	≪	382
22tL17	SM570 22mm	17	80	0.25	0	0.05	2.7	1.18	168	≪	287	Toe
50tL10	EH47 50mm	10	80	0.25	0	0.05	3.29	3.04	132	>	106	-
50tL17		17	80	0.25	0	0.05	3.25	1.97	133	<	165	Root&toe
50tL25		25	80	0.25	0	0.05	3.33	1.43	127	≪	225	Toe

4. UIT 溶接止端部とルート部の疲労強度の比較

上記 FEM 解析で得られた UIT 止端部とルート部の局所応力、また、残留応力については文献³⁾を参考に、修正グッドマン線図を亀裂発生部へ局所的に用いることで、UIT 止端部とルート部の疲労強度を推定し、比較した。材料の疲労限(R=-1)については供試鋼材の TS の 1/2 として、推定を行った。また、図4には疲労強度に対する余裕度(推定疲労強度から公称応力振幅を減じた値)と公称応力範囲の関係の例を示した。図4(a)は低応力範囲側でルート部が UIT 部より余裕度が低く、(b)は LF によりその傾向が強まり、脚長の大きい図4(c)では UIT 止端の方が低くなった。表1の右欄に示したように、実験では疲労亀裂発生位置がルート側や止端側へと変化した^{1,2)}が、この傾向が大凡疲労強度に対する余裕度の変化の傾向と対応した。

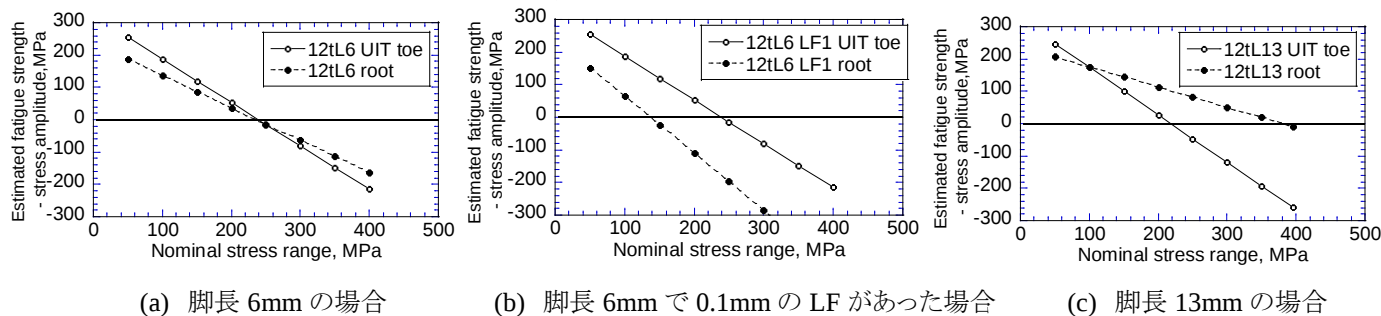


図4 疲労強度に対する余裕度に及ぼす公称応力範囲の影響

図5に脚長と応力集中係数、LF の関係を示した。LF は微小であっても応力集中を大きく上昇させるため、止端破壊とルート破壊の反転につながることを示唆され、UIT 継手でのルート破壊を確実に防止するためには十分な脚長の確保が必要であることが示された。本検討ではルートの残留応力については無視したが、その値により上記判定結果は変わりうる。ただし、ルート先端は比較的鋭く、負荷により容易に塑性化するため残留応力が解放されやすく、ルートの残留応力の影響は限定的と考えられる。

参考文献: 米澤ら: 第 73 回 JSCE 年講, I -280, 2018. 2) 島貫ら: 第 73 回 JSCE 年講, I -260, 2018. 3) 島貫ら: 第 70 回 JSCE 年講, I-366, 2015.

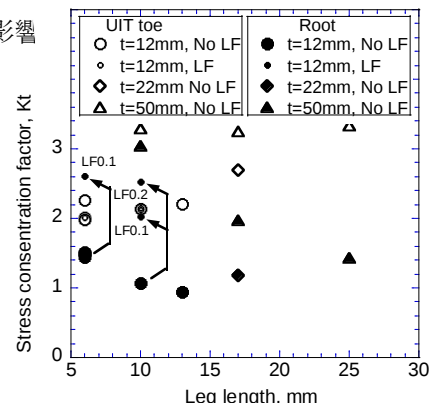


図5 UIT 継手の亀裂発生部の応力集中係数に及ぼす脚長と板厚、LF の影響