

超音波ピーニングを用いた疲労強度向上についての検討

STUDY ON IMPROVEMENT OF THE FATIGUE STRENGTH OF WELDED JOINTS BY ULTRASONIC IMPACT TREATMENT

中本啓介¹⁾，林 裕也¹⁾，岡 修²⁾
Keisuke Nakamoto, Yuya Hayashi, Osamu Oka

近年，橋梁を構成する溶接継手に圧縮残留応力を導入して疲労強度を向上させる超音波ピーニング技術（以下，UIT）が着目されている．UIT とは，溶接部を打撃により塑性変形させ，止端形状を改善するとともに圧縮残留応力を導入することで，疲労強度の向上を図るものである．従来のグラインダー仕上げと比較して，簡便かつ高速で処理ができ，作業性がよいことが特徴としてあげられる．しかし，作用荷重，適用部位の条件によっては，効果が小さくなることが報告されている．そのため，適用部位の応力範囲などの条件を明確にすることが重要となる．そこで，本論では UIT 処理を新設橋梁に導入するための検討として疲労強度向上効果が発揮される応力範囲に着目した試験について報告する．

キーワード：残留応力，疲労設計，応力比，超音波衝撃処理

1. はじめに

鋼道路橋では過積載，重量車輛の増加で，橋梁を構成する溶接継手に疲労損傷が生じており，既設橋の予防保全，新設橋の疲労耐久性の向上が求められている．鋼材強度を向上させれば，溶接継手部には引張残留応力，応力集中などの問題が顕著となる．そこで長寿命化のため，合理的に疲労耐久性を向上させる方法が必要となっている．溶接継手部の疲労強度を向上させる方法としては，溶接止端部のグラインダー仕上げや圧縮残留応力を導入するピーニングなどの技術があり日本国内では各種の技術開発が行われ新設，既設橋梁に採用されてきている．

ピーニングの技術として超音波衝撃処理¹⁾（以下，UIT）が着目されている．UIT はグラインダー仕上げや TIG 溶接に比べ，処理が高速で技能や経験を有しない人でも施工が可能でグラインダー仕上げのように金属切り粉が飛散することなく作業環境にもよく，さらに疲労寿命の向上が期待されることによる．しかし，作用荷重，適用部位の条件によっては，効果が小さくなることが報告されている^{2),3)}．そのため，適用部位の応力範囲などの条件を明確にすることが重要となる．そこで，本検討では UIT 処理を新設橋梁に導入するための検討として面外ガセット継手を対象に疲労強度向

上効果が発揮される応力範囲に着目した試験について報告する．

2. UIT による止端部処理法

UIT とは，超音波振動を利用した衝撃力を用いて，図-1 に示すように，溶接止端線に沿って金属製のピンをスライドさせながら止端部を連続的に打撃し，直径 3mm 程度の金属ピンの先端形状に準じる曲率を持つような滑らかな形状に，かつ，溶接止端線が見えない程度にまで塑性変形させる処理である．通常“溶接のまま”では，溶接止端部にアンダーカットが存在し，かつ引張残留応力が生じている．UIT では，その溶接止端部を図-2 に示すように変化させることにより溶接継手止端の形状を滑らかにして応力集中を低下させ，

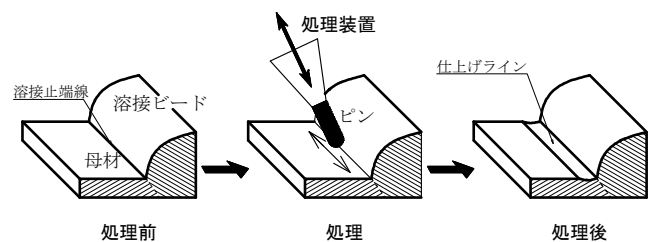


図-1 UIT による処理手順

1) 橋梁営業本部 橋梁技術研究室
2) 製造本部 和歌山工場 生産技術課

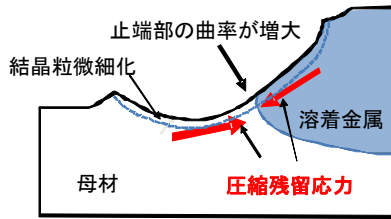


図-2 溶接仕端部の応力状況



写真-1 UIT 装置

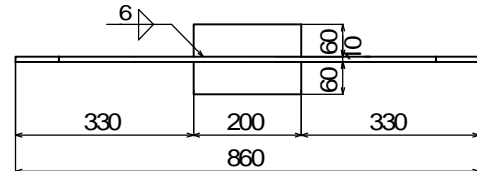
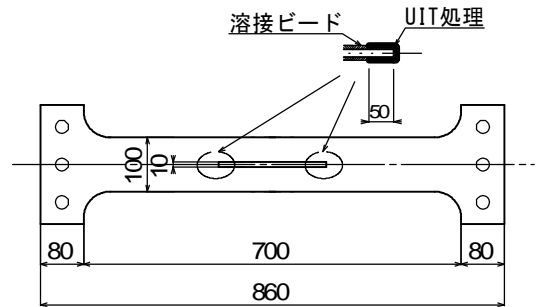
処理部位の近くに圧縮残留応力を発生させる。これらが外力によって溶接止端部に作用する局所的な平均応力と応力振幅を著しく低下させ、疲労強度を大幅に改善させる。写真-1には、本試験で使用したUIT装置 (ESONIX® UIS 27) を示す。装置は、工場内、架設現場での作業性を考慮しコンパクト化が図られている。

3. 性能確認試験

UITによる疲労強度向上効果を検証するために、図-3に示す面外ガセット形式の継手を対象に疲労試験を実施した。供した鋼材は、板厚10mmとし材質はJIS G3106 SM490YA材 (引張強度 520N/mm²)、SM570材 (引張強度 618N/mm²) の2種類とした。

鋼材の化学成分を表-1に示す。製作は、ガス切断した鋼板を所定の寸法に加工した。溶接は、フラックスコアードワイヤ (T49J0T1-1CA-U) を用いてCO₂溶接により行った。各試験体の溶接脚長は1箇所の継手で7.3~8.0mmであった。試験体は、着目する溶接止端線の仕上げを溶接のまま (以下、AW) とUIT処理した2種類とした。UIT処理は、新設橋梁を想定し予荷重を考慮しない試験体製作時に施した。写真-2には処理別の止端部形状を示す。疲労試験は、1300kNの油圧サーボ試験機を用いて軸引張荷重で実施した。試験時の繰返し荷重は、鋼材の作用応力度が許容応力度⁴⁾

(SM490Y: 210N/mm², SM570: 255N/mm²) を上限値とする片振りの一定振幅荷重で行った。応力比Rは固定し最大応力を変化させた試験を13種類実施した。応



Unit: mm

図-3 試験体形状

表-1 鋼材の化学成分

	Yield Point	Tensile Strength	Elongation
SM570	568N/mm ²	618N/mm ²	32%
SM490YA	418N/mm ²	520N/mm ²	26%

C	Si	Mn	P	S
0.1	0.22	1.56	0.011	0.002
0.16	0.23	1.11	0.017	0.003

(Chemical Composition %)

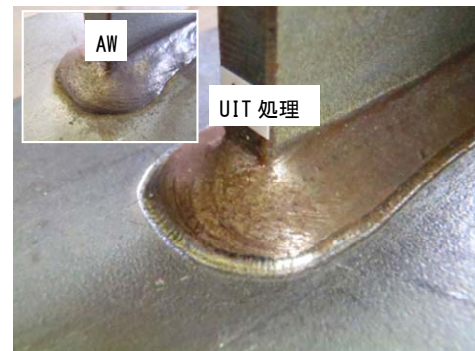


写真-2 処理別の仕端形状

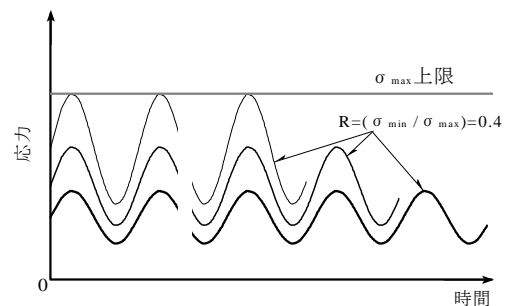


図-4 荷重要領

力比Rは、活荷重振幅を再現して0.4とし、最大応力を変化させて荷重した。疲労試験での応力波形は、図-4に示すように正弦波とし荷重速度は6~9Hzとした。

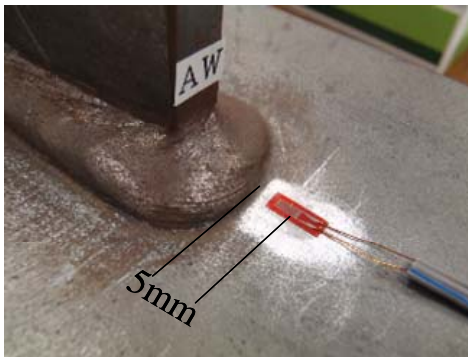


写真-3 ひずみ計測位置

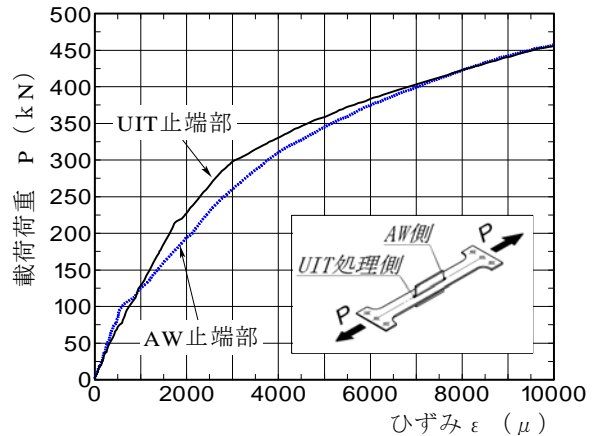


図-5 止端部近傍の荷重-ひずみ関係

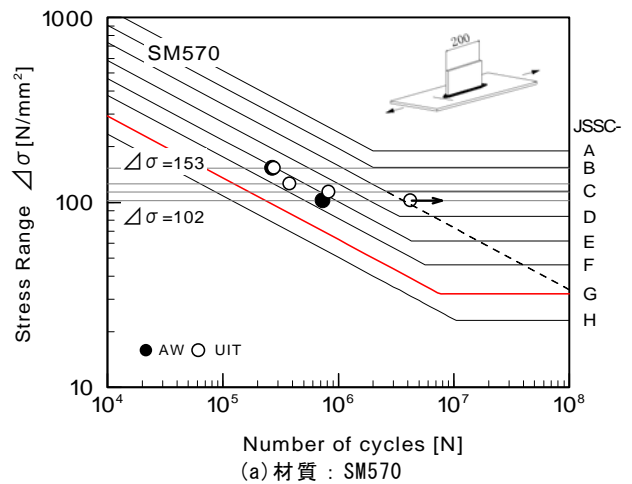
4. 試験結果

4.1 静的荷重による止端部ひずみの確認

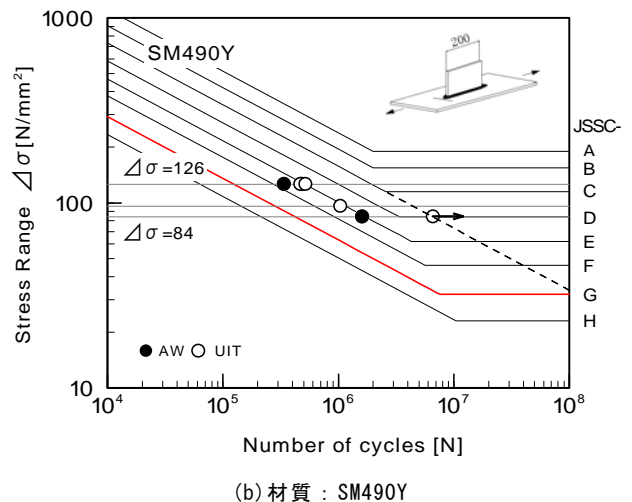
疲労試験に先立ち同じ形状、材質の試験体を用いて静的荷重により止端部近傍のひずみ性状を確認した。試験体は片側の両面ガセット止端部を AW、残りの片側両面ガセット止端部については UIT 処理を施し、鋼材の作用応力度が降伏点に到達するまで単調荷重した。ひずみは、写真-3 に示すように止端部より 5mm 離れた箇所に一軸ひずみゲージを貼り付け確認した。代表的な結果として、材質を SM570 とする試験体止端部近傍の荷重-ひずみ関係を図-5 に示す。UIT 処理側でのひずみ履歴は 210kN 程度、AW 側では 110kN 程度まで直線性を保持し、その後、荷重増加に伴い勾配が変化し塑性変形が進展した。ガセット端における応力集中部のひずみであること、試験体数によるばらつきを考慮すると定量的な評価は困難であるが UIT と AW のひずみ履歴の差より UIT により圧縮残留応力が導入されていることが間接的に確認できる。止端部におけるひずみが塑性変形しない範囲内の応力振幅であれば UIT により導入された圧縮残留応力により、疲労強度が向上するものとする。最大応力の大きさにより UIT 処理の疲労強度向上効果は文献2)で示されるように異なると推測できる。

4.2 疲労試験による UIT の効果

疲労試験による繰返し荷重回数を、JSSC の疲労強度曲線⁴⁾をもとに強度等級について整理した結果を図-6、表-2 に示す。疲労破壊した試験体は、何れも止端部から破壊した。UIT 処理した試験体の結果は、両材質ともに最大応力を鋼材の許容応力度とした応力範囲では、AW の結果と強度等級は変わらない結果となった。前節で示したように UIT 処理により継手部に導入される圧縮残留応力と応力集中による塑性変形が疲労強度に関係しており、高い応力負荷により UIT によって導入



(a) 材質 : SM570



(b) 材質 : SM490Y

図-6 疲労試験結果

された圧縮残留応力が減少したためと考える。つぎに、最大応力を変化させ各材質の許容応力度の 70%程度まで応力範囲を低減したケースでは AW の F 等級の荷重回数の結果に対し UIT 処理した試験体では D 等級以上となり 2 ランク強度が向上する結果となった。また、材質により疲労強度が向上する応力範囲に差があるこ

表-2 疲労試験結果と強度等級

材質	処理	試験体No.	応力範囲 $\Delta\sigma$ N/mm ²	最大応力 σ_{max} N/mm ²	载荷回数 (万回)	JSSCに よる等級	回数に よる等級	破壊箇所
SM570	AW	1	153	255	26.8	G	F	止端部
		2	102	170	73.2	G	F	止端部
	UIT	1	153	255	27.7	—	F	止端部
		2	126	210	37.8	—	F	止端部
		3	114	190	82.8	—	E	止端部
		4	102	170	420.3	—	over D	None
SM490YA	AW	1	126	210	48.4	G	F	止端部
		2	126	210	34.0	G	F	止端部
		3	84	140	161.0	G	F	止端部
	UIT	1	126	210	47.1	—	F	止端部
		2	126	210	52.0	—	F	止端部
		3	96	160	104.3	—	F	止端部
		4	84	140	660.0	—	over D	None

とより UIT の効果は材料強度の影響を受けることが分かる。UIT を効果的に適用するためには対象とする構造についての応力状態、使用する材料強度の把握が重要であると考えられる。

5. おわりに

新設橋梁に UIT を適用するための検討として面外ガセット継手を対象にした疲労試験結果について示した。UIT は処理時の荷重レベルの影響や実構造物で想定される高い応力比での疲労強度など適用部位の特性を十分に考慮した上で採用することが望まれる。なお、本稿では示していないが、同様な試験条件で十字継手形式についても検討している³⁾。この場合は、UIT の効果はグラインダー仕上げと同等程度の結果を確認している。

UIT の適用性については、研究が進められており²⁾、今後有効な条件がより明確になってくると考えられ、施工性の簡易さにより使用範囲は広がっていくものと考えられる。

あとがき

本稿で示した検討結果は、新日鐵住金株式会社との共同研究で実施した内容の一部⁵⁾を引用しました。原稿執筆にあたり関係者各位には便宜を図っていただきました。また、試験実施にあたっては長岡技術科学大学実務訓練生の 大谷拓也 君には多大な作業を行っていただきました。ここに記して謝辞といたします。

参考文献

- 1) 例えば、野瀬：溶接学会誌，第 77 回，第 3 号，pp.4-7，2008.
- 2) 森，島貫，田中，宇佐：UIT を施した面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する施工時応力レベルと応力比の影響，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol67，No.2，pp.421-429，2011.
- 3) K.Nakamoto,K.Kazuo,H.Shimanuki: Development of the fatigue durability improvement technology of a welding part, On development of bridge and road construction technology in VIETNAM,pp478-486.2012.
- 4) (社) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012.
- 5) 中本，林，岡，島貫：超音波ピーニングを用いた面外ガセット継手の疲労強度向上についての検討，第 68 回年次学術講演会講演概要集,pp.1087-1088，2013.