

特集：インフラ溶接構造物の疲労寿命延長技術

UIT による溶接部の疲労亀裂発生抑制技術

新日鐵住金株式会社
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
島貫 広志

1. はじめに

溶接鋼構造物において疲労亀裂の発生防止はインフラの安全性や長寿命化の観点から重要な命題である。溶接部の疲労亀裂は主に溶接止端部から発生するため、従来溶接止端部の応力集中を低下させることで対策が取られるケースが多かったが、近年ではピーニング処理の一種である UIT (超音波衝撃処理) により対策がとられるケースが増えている。本報では、UIT による疲労亀裂発生抑制技術について、その概要を紹介するとともに、その効果のメカニズムについて解説する。

2. 超音波衝撃処理

超音波衝撃処理 (Ultrasonic impact treatment : UIT*)^{1,2)}は、1980 年頃にロシアで開発された技術で、この処理装置の概要を図 1 に示す。また、装置の外観を写真 1 に示す。超音波衝撃は図 1 中の超音波振動するウェーブガイド先端と処理対象物 (ここでは溶接継手) の間に金属製のピン配置した時にピンに生じるランダムな衝撃振動であり、超音波衝撃処理 UIT はこの超音波衝撃を用いて処理対象を連続して打撃することで行われる。

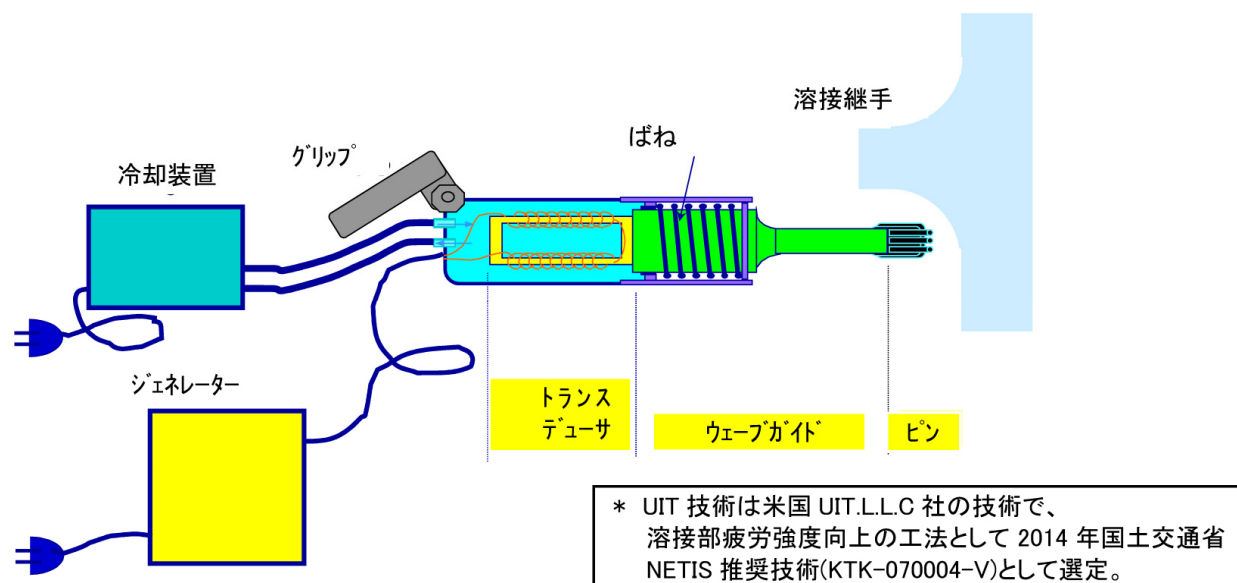


図 1 UIT 装置 (ESONIX[®] 27 UIS) の概要²⁾



写真1 装置一式

溶接部においては、図2に示す様に止端部にピンを配置し、止端線に沿って往復運動させることで、ピン先端の形状が止端部に転写され溝状の処置部が形成される。

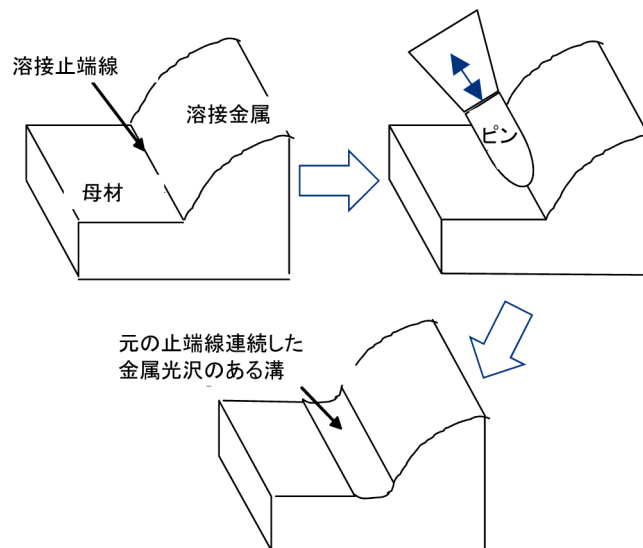
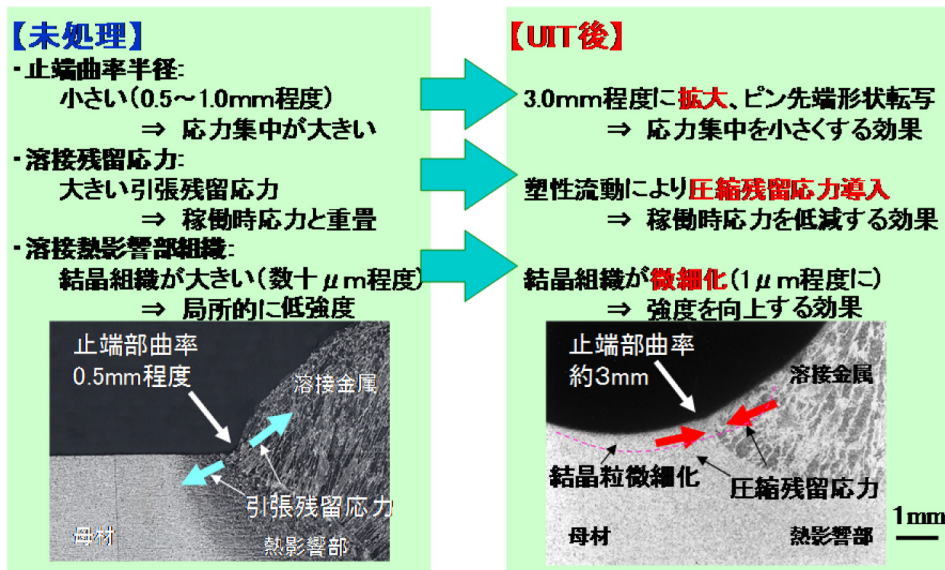


図2 UITによる止端処理要領²⁾

3. 疲労特性向上メカニズム

UITを施された溶接止端部の断面を溶接ままのものとは比べて図3に示す。溶接ままの溶接止端曲率半径は小さく、応力集中が大きいのが、UIT後はピンの先端半径程度の曲率半径となり、応力集中の低下が期待できる。また、打撃による塑性流動により成形するため、溶接ままでは引張であった残留応力が圧縮に反転する。



UITにより疲労亀裂発生を抑制 ⇒ 溶接部疲労信頼性向上

図3 UITによる疲労強度向上要因のまとめ²⁾

図4に、面外ガセット継手の溶接止端部から深さ方向の残留応力を、中性子回折法により調べた結果を基に残留応力の等高線を描画した例を示す³⁾。図から読み取ると、表面から1.5mm程度の深さまでが圧縮となっていることがわかる。

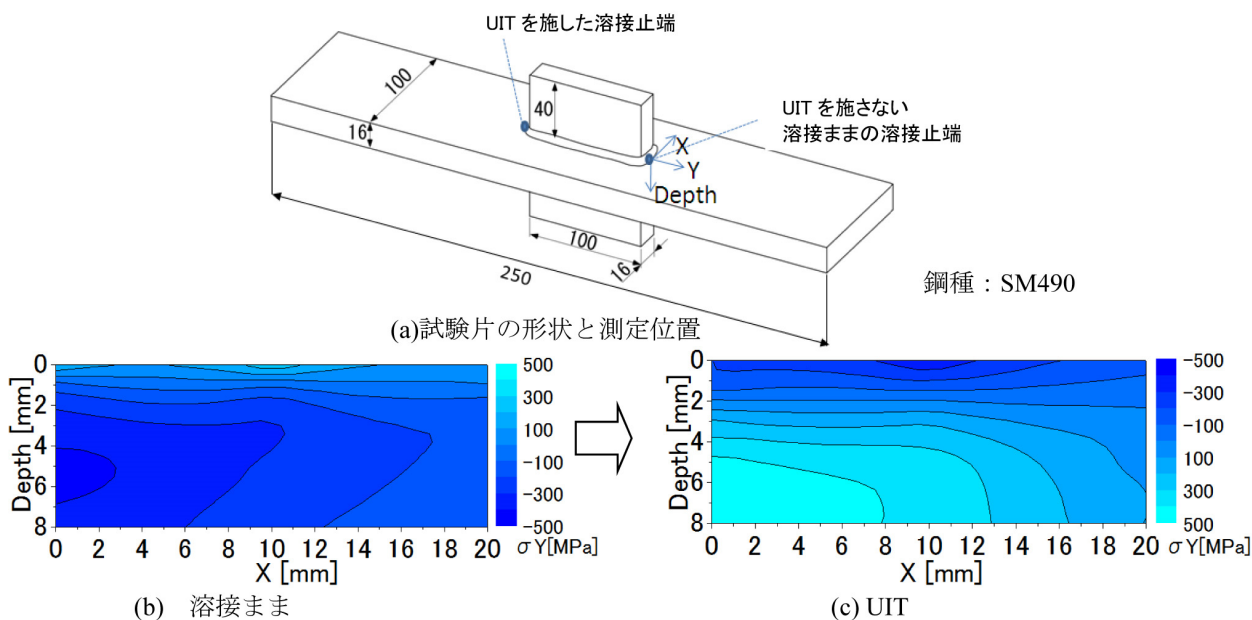


図4 中性子回折法による残留応力データを用いた溶接止端部板厚内部の応力分布(Y方向)解析結果³⁾

疲労亀裂発生特性と直接関係する UIT を施した止端表面の残留応力については、X 線回折法により計測された事例が多数ある^{例えば 4,5,6,7)}。図 5⁷⁾に UIT を施した面外ガセット継手止端部付近の表面の残留応力の測定結果の例を示す。UIT の場合、止端部付近においては圧縮残留応力が大きいですが、止端から離れるほど低下し、溶接ままの残留応力のレベルに漸近していく。

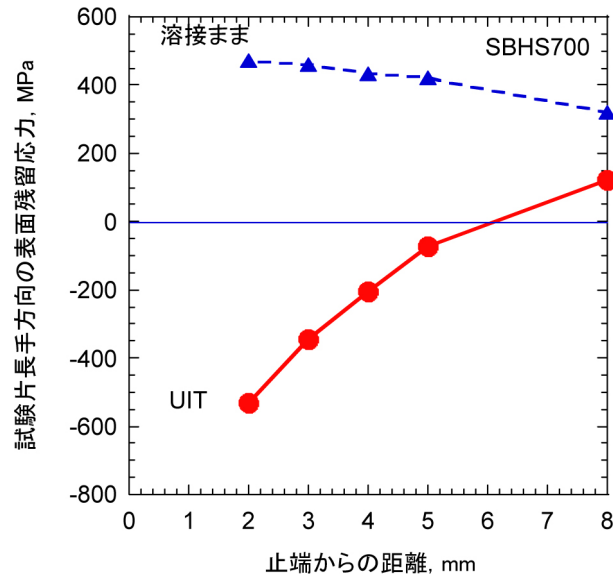


図 5 UIT 継手と溶接ままの継手の溶接止端部付近の残留応力分布⁷⁾

また、打撃を受けた表面部は図 6⁸⁾に示す様に結晶粒が判別しにくいほどの微細組織に変化し、硬さが上昇(図 7⁸⁾)する。

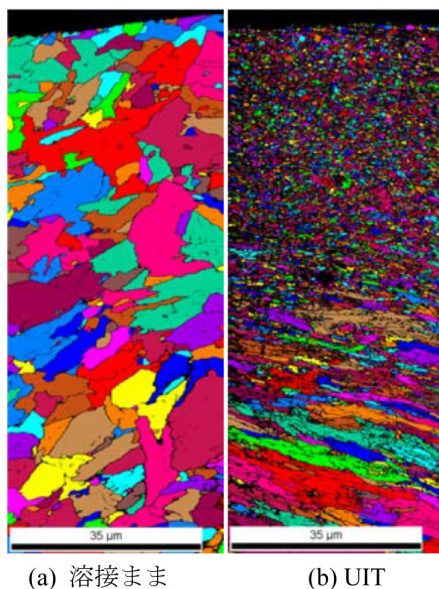


図 6 UIT による溶接止端部の結晶粒径の変化例⁸⁾

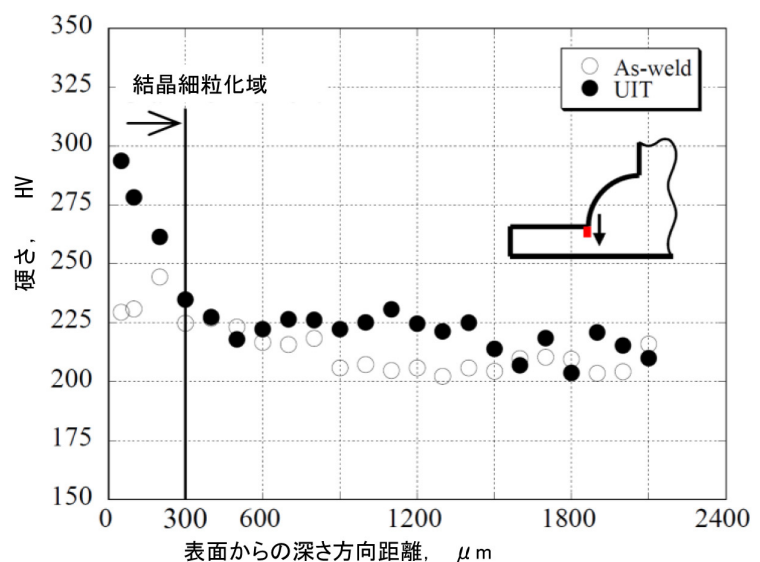


図 7 UIT による溶接止端部の硬さ変化の例⁸⁾

UITによる疲労特性向上のメカニズムを図8⁹⁾に示す。溶接止端部の局所的な応力状態で考えると、UITが施された止端部は相対的に応力集中が低下し、止端部の応力振幅が溶接ままだに比べ小さくなる。さらに、圧縮残留応力により局所的な平均応力が下げられるために、最大応力が低下し、塑性変形が起りにくくなり疲労亀裂は発生しにくくなると考えられる。

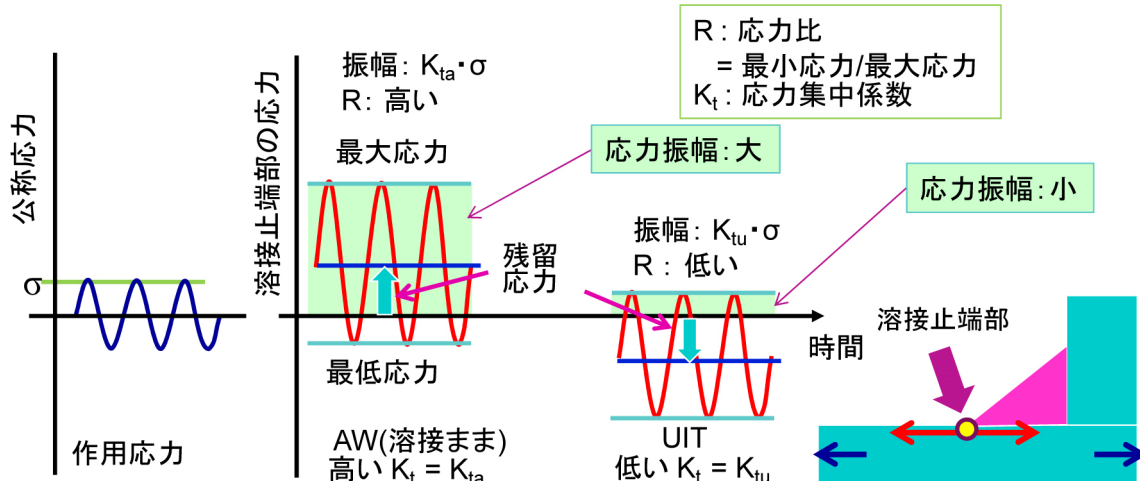


図8 UITによる疲労強度向上のメカニズム⁹⁾

なお、図5の結果から一般的に圧縮残留応力域の深さが浅いショットピーニング（深さ200 μ m程度以下）と比べ、UITでは深くまで圧縮応力が生じているため、腐食等で溶接止端部が多少減肉しても圧縮残留応力が残るため、処理効果の持続が期待できる。

また、UIT止端は繰返し負荷を受ける過程で残留応力が変化する。そこで、UITによる疲労寿命延長効果が確認できる負荷範囲で最大荷重や応力比を変化させ、繰返し負荷による止端残留応力の変化を確認した。図9に示す様に繰返し負荷の初期に止端圧縮残留応力は多少緩和されるものの、回数を重ねても圧縮を保ったまま安定して行く傾向が確認¹⁰⁾され、繰返し負荷後もUITにより導入した圧縮残留応力の大半が残り、疲労寿命延長に寄与しているものと考えられる。

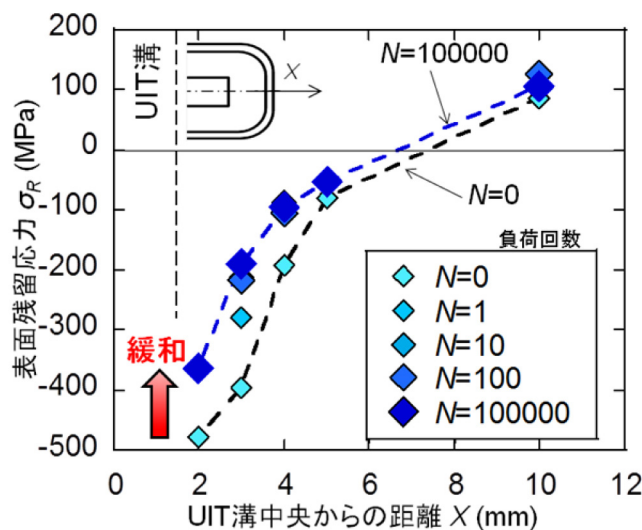


図9 UIT継手止端部の残留応力緩和に及ぼす繰返し負荷の影響

打撃した表層部の硬化組織は、鋼材の疲労強度の強度依存性から、効果の度合いは相対的に小さいものの、疲労強度向上に寄与していると考えられ、これらの組み合わせにより疲労亀裂の発生が効果的に防止されているものと考えられる。

4. 疲労強度向上の特徴

UIT による疲労強度向上は様々な試験片を用いて、さまざまな鋼材に対して確認されている。例えば図 10⁹⁾に示す S-N 線図から明らかに十字試験片では溶接ままに比べ大幅に疲労特性が改善していることがわかる。

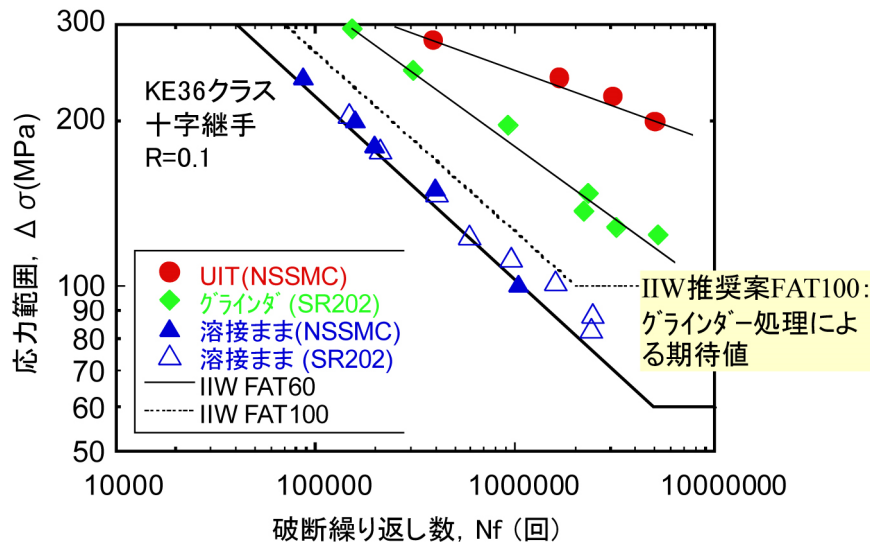


図 10 十字継手疲労試験による UIT 効果の例⁹⁾

一般的に溶接継手の S-N 線図は応力比や材料強度に鈍感で、各種設計指針などで継手形状ごとに S-N 線図が決まっているが、UIT 継手の S-N 線図の特徴として以下の点で通常の溶接ままの継手と異なることが実験や解析によって明らかになっている。^{6,9,11-17)}

- ① S-N 線図の形状：溶接継手の S-N 線図を直線近似した場合の傾きの係数は一般に 3 前後であるが、UIT では 5 前後で、傾きが小さい。また低応力範囲域で著しく疲労限は上昇するが、高応力範囲域では溶接ままと同程度となる。
- ② 応力比の影響：UIT 継手の S-N 線図は応力比によって変化が激しく、低応力比では①の傾向が明確に表れるが、高応力比となるほど S-N 線図が下方にシフトする。
- ③ 鋼材強度の影響：高強度鋼の方が疲労強度の改善効果が大きい。

上記の①については図 10 で示したように S-N 線図の勾配が異なっている。また、②については、図 11⁹⁾を用いて模式的に説明することができる。つまり溶接ままでは応力比が変わっても、溶接止端の応力比は高いままで維持されるため応力比に鈍感となり、UIT 継手では止端応力比が公称の応力比によって大きく変動することが原因である。

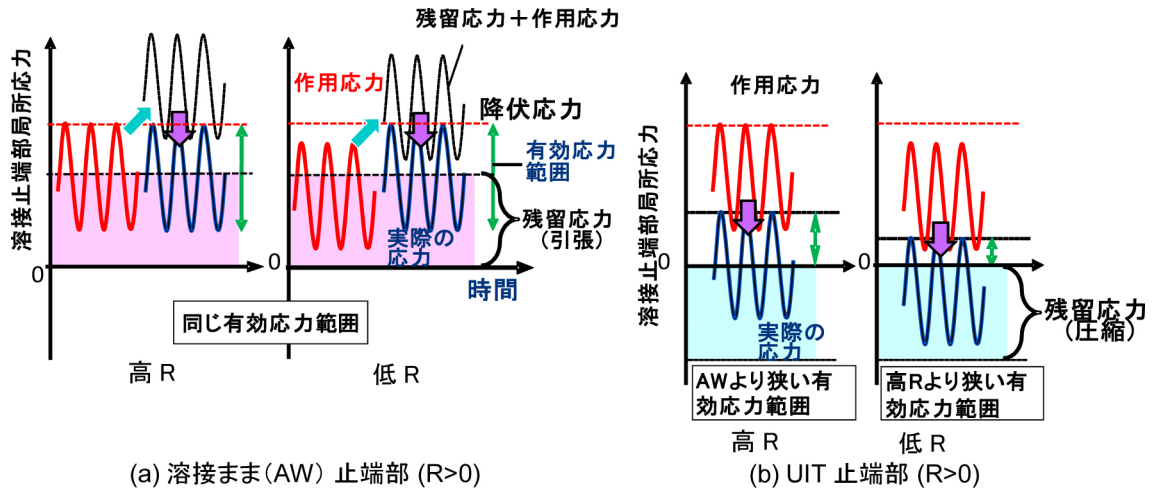


図 11 UIT 継手の疲労特性に及ぼす応力比の影響の模式図⁹⁾

また上記の③については、図 12 を用いて模式的に説明することができる。つまり素材としては高強度鋼の方が疲労強度が高いが、溶接ままでは最大応力が降伏応力となる応力振幅がそのまま付与されるため、高強度ほど大きな最大応力での疲労試験となるため、高強度鋼による疲労強度向上は期待しにくい。UIT 継手では高強度鋼の方が大きな圧縮残留応力を与えることができるため、疲労負荷時の平均応力がより低くなる。このため、相対的に有効応力範囲が狭くなり、疲労ダメージが少なくなることから、高強度鋼継手の方が公称応力での疲労強度が上がることになる。

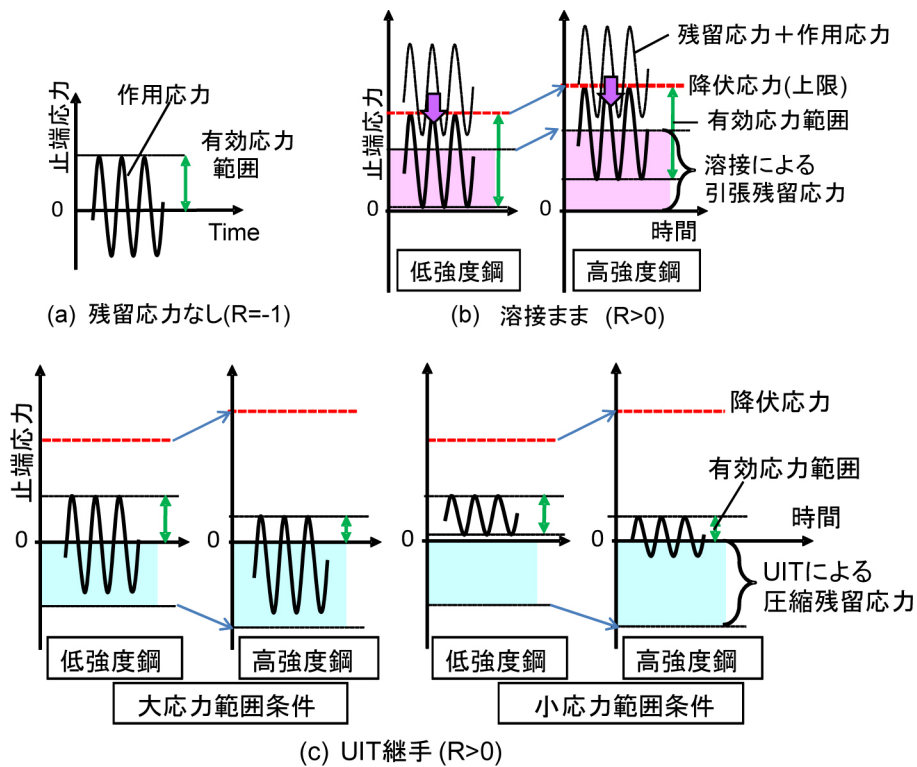


図 12 溶接止端部の応力の変動に及ぼす材料強度の影響

UIT 継手においては、これまで溶接まま継手では実質的な影響が小さいためあまり考慮していなかった因子の疲労特性に及ぼす影響が顕著に現れることがある。こうした S-N 線図変化の予想は、溶接部の疲労設計において重要であり、S-N 線図の推定方法や基準化が種々検討されている。

国際溶接学会 IIW の第 XIII 委員会では、超音波衝撃等の高周波振動によるピーニング処理に関して、これらの技術を HFMI (Hi-Frequency Mechanical Impact) と称し、その S-N 線図を規定しようとする動きがある¹⁸⁾。この S-N 線図の考え方は IIW の疲労等級 (FAT class) の考え方とリンクして、鋼材強度や、応力比の影響を考慮して段階的に線図を変更する方法で、公表されている疲労試験データを基にした統計処理により決定・提案されたものである。

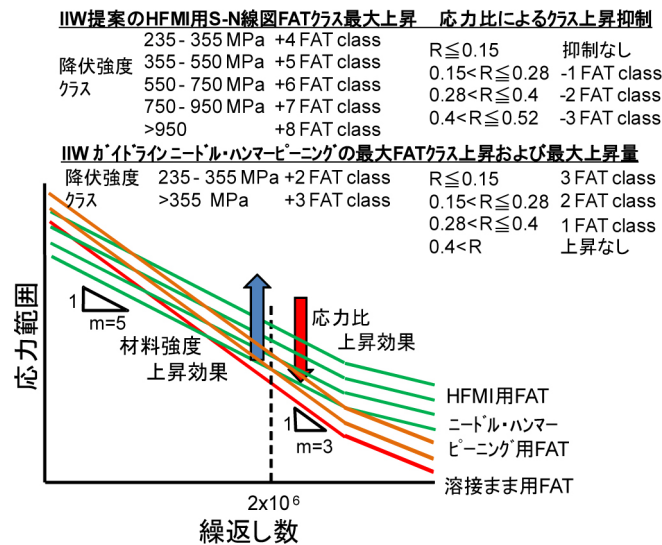


図 13 HFMI 用の S-N 線図の予測図⁹⁾

この方法は、図 13 に示す様に、鋼材の降伏応力の影響について、355MPa 未満は 4 段階、355MPa 以上 550MPa 未満は 5 段階、550MPa 以上 750MPa 未満は 6 段階、750MPa 以上 950MPa 未満は 7 段階、950MPa 以上は 8 段階、それぞれ IIW の疲労等級が向上するとされ、逆に、応力比については、0.1 以下は 0 段階、0.15 より大きく 0.28 未満は 1 段階、0.28 より大きく 0.4 未満は 2 段階、0.4 より大きく 0.52 未満は 3 段階、それぞれ疲労等級改善効果が減少するとされている。なお、0.52 より大きい範囲は公表試験データが不十分なため、個別試験により疲労強度改善効果を検証しなければならないとしている。

また、ハンマーピーニングやニードルピーニング等で期待される疲労強度改善効果¹⁹⁾は S-N 線図の傾きの係数は溶接ままと同じ $m=3$ であり、これと比較すると、HFMI の疲労強度改善効果は、S-N 線図の傾きの違いの影響の為に、特に長寿命領域において大きく向上するとされている。なお、上記の HFMI の疲労強度改善効果の数値については、現在まだ素案段階で、今後修正される可能性がある。

一方、著者らは UIT 部の残留応力が継手ごとに大きく異なっていたり、繰返し負荷の条件により変化することが処理継手寿命に影響を与えることに着目した独自の S-N 線図推定方法を提案^{15,16,20)}している。この方法は、局所領域に拡張された修正グッドマン線図を用いたもので、継手の止端の残留応力、鋼材強度、局所応力集中を考慮して、溶接ままの継手の S-N 線図に対しての相対的向上度を予想する方法であり、評価対象の残留応力や応力集中を詳細に求めることで疲労設計だけでなく、特殊な継手への効果や有効範囲を検討する上で有用な方法であると考えている。

5. UIT の活用のポイント

溶接部の UIT では、通常疲労対策として広く使われているグラインダーによる止端部形状の改善と異なり、溶接による引張残留応力の改善が疲労特性向上のカギとなっているため、処理後は導入した残留応力分布を崩れないように保つことが重要である。そのため、UIT 後の熱処理や塑性加工は避けなければならない。また、見逃しやすいのが角変形の影響であり、溶接角変形による予想外の曲げ負荷の重畳で、見かけ上疲労強度が低下することがあるので注意する必要がある、疲労特性向上効果が疲労等級で 1～2 等級低下する可能性も指摘されている²¹⁾。その他、HFMI 処理の処理品質（打撃の程度の目安やその確認方法等）や処理継手の取り扱い方については、IIW において S-N 線図と同様のガイドラインが検討されている²²⁾。

溶接構造物の溶接補修部への UIT 適用は極めて有効である。溶接補修部に適用した事例²²⁾では、新設構造物に UIT を施した場合と同等の疲労特性が得られた。溶接補修時に生じる引張残留応力はビード形状をグラインダー等で仕上げ応力集中を低減させても残留するため、補修部から再び亀裂が生じることがしばしばある。しかし、UIT では亀裂の生じやすい表面側の残留応力を圧縮にするため、残留応力を緩和するための溶接後熱処理（PWHT）の代用とすることも可能な場合がある。

6. おわりに

UIT による溶接止端部の打撃処理は、従来から行われているグラインダー等による形状改善による応力集中の緩和、つまり疲労亀裂発生部の応力振幅を小さくする疲労対策とは異なり、残留応力の改善による疲労亀裂発生部の平均応力や応力比の低減効果を用いて溶接継手部の疲労強度向上や疲労寿命を延長させる技術である。このため、効果が期待できる使用応力条件の範囲が異なっている。この点に留意して活用することで、UIT 技術は単に構造物の疲労に対する信頼性向上をさせるだけでなく、従来、疲労強度がボトルネックであった高強度鋼の溶接構造物の疲労強度を著しく改善し、従来にはない軽量構造物の実現の為のキー技術になることを期待している。

参考文献

- 1) Statnikov, E.S.: Comparison of Efficiency and Processibility of Post-Weld Deformation Methods for Increase in Fatigue Strength of Welded Joints. IIW Doc.XIII-1668-97, 1997
- 2) 野瀬哲郎：疲労強度向上向け超音波ピーニング法．溶接学会誌．77 (3), pp.210-213, 2008.
- 3) 鈴木環輝，今福宗行，大川鉄平，島貫広志，野瀬哲郎，鈴木裕士，盛合 敦：中性子回折法による超音波打撃処理した鋼材の残留応力測定 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集，p.56, 2010.
- 4) 森猛、島貫広志、田中睦人、宇佐美龍一：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, Vol.67, No.2, pp.421-429, 2011.
- 5) T. Okawa, H. Shimanuki1, Y. Funatsu, T. Nose1, Y. Sumi, Effect of preload and stress ratio on fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment, IIW Doc., XIII-2377-2011.
- 6) 島貫 広志,森 猛,大川 鉄平,田中 睦人:UIT による疲労強度改善効果に及ぼす鋼材強度の影響,溶接構造シンポジウム 2011 講演論文集, 2011.
- 7) H. Shimanuki, T. Mori, M. Tanaka et al.: Study of a Method for Estimating the Fatigue Strength of Welded Joints Improved by UIT, Doc. IIW, XIII- 2495-13, 2013.

- 8) 戸ヶ崎祐, 辻裕一, 本田尚, 山口篤志: UIT による面外ガセット溶接継手の疲労寿命向上, 溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集, 2009.
- 9) 島貫広志, 田中睦人: UIT による溶接構造物の疲労亀裂発生抑制技術の活用, 新日鐵住金技報, 第 400 号, 2014.
- 10) 島貫広志, 米澤隆行, 田中睦人, 森猛: UIT による溶接継手の疲労強度改善効果の推定方法の検討 その 3, 第 70 回土木学会年講 I-366, 2015
- 11) 森 猛, 島貫 広志, 田中 睦人: 面外ガセット溶接継手の UIT 疲労強度改善効果に対する鋼材静的強度の影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) , No.2, pp.210-220, 2014.
- 12) T. Okawa, H. Shimanuki¹, Y. Funatsu, T. Nose¹, Y. Sumi, Effect of preload and stress ratio on fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment, IIW Doc., XIII-2377-2011.
- 13) 島貫広志、大川鉄平、田中睦人: 超音波衝撃処理(UIT)継手の疲労強度に及ぼす応力比の影響, 第 65 回土木学会年講, I-100, pp.199-200, 2010.
- 14) 島貫広志、森猛、田中睦人: UIT による高張力鋼溶接継手の疲労強度改善効果と止端部残留応力の検討, 第 67 回土木学会年講, I-260, pp519-520, 2012.
- 15) 島貫広志、木下昌彦、森猛、田中睦人:UIT による溶接継手の疲労強度改善効果の推定方法の検討, 第 68 回土木学会年講 I-543, 2013.
- 16) H. Shimanuki, T. Mori, M. Tanaka et al: Study of a Method for Estimating the Fatigue Strength of Welded Joints Improved by UIT, Doc. IIW, XIII- 2495-13, 2013.
- 17) H. Shimanuki, T. Okawa: Effect of Stress Ratio on the Enhancement of Fatigue Strength in High Performance Steel Welded Joints by Ultrasonic Impact Treatment, International Journal of Steel Structures, 2013.
- 18) Gary B. Marquis, Eeva Mikkola, Halid Can Yildirim & Zuheir Barsoum: Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed fatigue assessment guidelines, Weld World, DOI 10.1007/s40194-013-0075-x, 2013.
- 19) Haagensen PJ, Maddox SJ: IIW recommendations on post weld fatigue life improvement of steel and aluminium structures. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 2013.
- 20) H. Shimanuki, T. Yonezawa, T. Mori, M. Tanaka et al: Estimation method of fatigue strength based on the residual stress for the welded joint improved by Ultrasonic Impact Treatment (UIT), Doc. IIW, XIII-2603-15, 2015.
- 21) 島貫広志、米澤隆行、森 猛、田中睦人: UIT による疲労強度改善効果に及ぼす鋼材強度の影響溶接構造シンポジウム 2014, 講演論文集, 2014.
- 22) Gary Marquis & Zuheir Barsoum: Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed procedures and quality assurance guidelines, Weld World, DOI 10.1007/s40194-013-0077-8, 2013.
- 23) 島貫広志, 野瀬哲郎: 大型溶接構造モデルの回し溶接部の疲労特性に及ぼす超音波衝撃処理の効果, 溶接構造シンポジウム 2009 講演論文集, 2009.

<略歴>

島貫 広志 (しまぬき ひろし)

1987年 東北大学 工学部 精密工学科 卒業

1989年 東北大学 大学院 工学研究科 精密工学専攻 修了

1989年 新日本製鐵株式会社 入社 鉄鋼研究所 厚板・条鋼研究センター配属

2000年 大阪大学 大学院 博士(工学) 学位取得

2012年 新日鐵住金株式会社 鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 主幹研究員

現在に至る