

溶接継手の長寿命疲労特性評価

本 田 尚^{*1} 佐々木 哲也^{*1} 山 際 謙 太^{*1} 山 口 篤 志^{*1}

溶接継手の疲労強度は、200万回応力繰返し数（200万回強度）で評価されるため、疲労試験の多くは200万回で打ち切れ、長寿命側のデータに乏しい。そこで、溶接継手の中で最も疲労強度が劣る面外ガセット溶接継手について、1000万回疲労強度を調査するとともに、溶接止端部の残留応力、応力集中係数を評価することで、面外ガセット溶接継手の長寿命疲労特性を調査した。また、母材の疲労強度が引張り強さに比例するのに対し、溶接継手の疲労強度は溶接形状に大きく依存し、母材の引張り強さに比例しない。そこで、溶接部に超音波衝撃処理を施すことで、溶接継手の疲労強度改善を試みた。

キーワード：溶接継手，疲労強度，残留応力，応力集中，超音波衝撃処理。

1 はじめに

圧力容器やクレーンなど大型の産業機器には溶接が多用されているが、溶接部は形状の変化や引張残留応力によって疲労き裂の起点となることが多く、破壊事故の原因となっている¹⁾。溶接継手の疲労強度は、200万回応力繰返し数（200万回強度）で評価されるため、疲労試験の多くは200万回で打ち切れ、それより長寿命側のデータに乏しい²⁾。しかし、天井クレーンや道路橋など大型の溶接鋼構造物では、十数年を超える長期間の使用で、溶接部に疲労損傷が多数発見されており^{3) 4)}、このため200万回を超える応力繰返し数での疲労強度評価が求められている。そこで、溶接継手の中で最も疲労強度が劣る面外ガセット溶接継手について、1000万回疲労強度を調査するとともに、溶接止端部の残留応力、応力集中係数を評価することで、面外ガセット溶接継手の長寿命疲労特性を調査した。

また、母材の疲労強度が引張り強さに比例するのに対し、溶接継手の疲労強度は溶接形状に大きく依存し、必ずしも母材の強度に比例しない²⁾。特に、伸縮式のブームを採用する移動式クレーンでは、ブームが長尺化する傾向にあり、軽量化のために最近では引張強さが1000MPa以上の高張力鋼が使用されている。伸縮式のブームの多くは、薄板を溶接したボックス構造をしており、補強用リブや補器類等を取り付けるためのステーが溶接される。このため、高張力鋼の使用によってブームの許容応力が大きくなると、溶接部から疲労破壊する危険性が高くなる。そこで、溶接継手の疲労強度向上を目的として、溶接部に表面改質の一種である超音波衝撃処理（Ultrasonic Impact treatment：以下UIT）を適用し、溶接止端部の応力集中係数および残留応力を評価することで、UITが溶接継手の疲労強度に及ぼす影響を調査した。

2 試験体および試験方法

供試材には板厚12mmのSM490A、SM570Q、WEL-TEN590およびWEL-TEN950を使用した。表1に供試材の機械的性質を示す。溶接試験体は、炭酸ガス半自

動アーク溶接により、図1に示す面外ガセット溶接試験体を作製した。寸法効果を調査するために、SM490AとWEL-TEN590については、図1の寸法を1/2にした試験体を作製した。疲労試験は、統計的疲労試験方法である14S-N試験法（JSME S 002-1994）に基づき⁵⁾、200kN、500kNおよび1500kN容量電気サーボ油圧試験機を用いて、応力比 $R = 0.1$ 、繰返し速度 $f = 4 \sim 9\text{Hz}$ 、室温大気中にて破断するまで行った。写真1に使用した500kN試験機の外観を、写真2に面外ガセット溶接試験体の試験機への取付状態を示す。繰返し数が1000万回に達した場合は、その時点で試験を打ち切った。なお、疲労試験の際は、溶接止端から5mmの位置にひずみゲージを貼付し、疲労き裂の発生を検出した。疲労き裂の発生は、疲労試験開始直後よりひずみ振幅が5%低下した時点の繰返し数と定義した⁶⁾。

表1 使用した材料の機械的性質

供試材	降伏強さ MPa	引張強さ MPa	伸び%
SM490A	377	528	27
SM570Q	514	608	34
WEL-TEN590	556	635	28
WEL-TEN950	996	1016	20

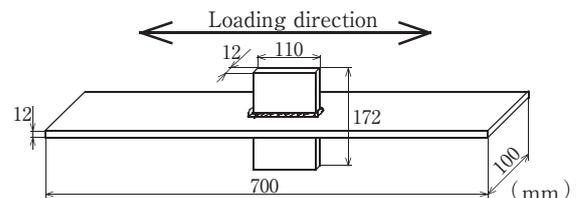


図1 面外ガセット溶接試験体の形状

*1 機械システム安全研究グループ。



写真1 500kN容量電気サーボ油圧試験機



写真2 面外ガセット溶接試験体の取付状態

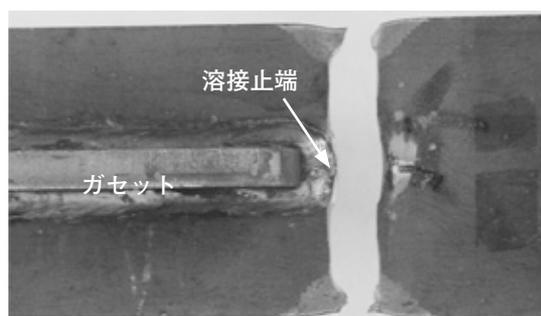


写真3 疲労破壊した面外ガセット溶接継手試験体

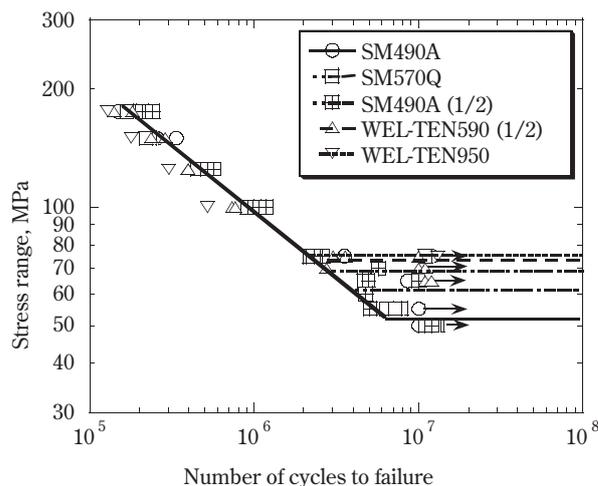


図2 面外ガセット溶接継手の疲労試験結果

試験片も200万回を超えて破断しており、溶接継手の疲労強度を評価するには、200万回では不十分であることが分かる。また、*S-N* 曲線の傾斜部は材料および試験片寸法によらずほぼ一致しているが、1000万回疲労強度は、若干であるが母材の引張り強度に比例して高くなり、また試験片寸法が小さいほど高くなっている。

図3に溶接止端部に貼付したひずみ振幅の変化を示す。なお、縦軸は初期のひずみ振幅で無次元化している。ひずみ振幅が5%低下する時点なき裂発生寿命とすると⁶⁾、材料によるき裂発生寿命の違いは見られず、また破断寿命に占めるき裂発生寿命の割合は、30%程度と非常に小さい。これは後述するが、溶接止端部の応力集中係数が非常に大きいためである。また、き裂発生後の応力繰返し数である、き裂進展寿命にも大きな違いは見られない。このため、面外ガセット溶接継手の疲労寿命に、材料による違いは現れなかったものである。

3 実験および解析結果

1) 疲労試験結果

疲労破壊した溶接試験体を写真3に示す。試験体は材料によらず、全てガセットの溶接部根元（溶接止端部）から破断した。図2に疲労試験結果を示す。溶接試験片の疲労強度は通常200万回強度で評価され、200万回で疲労試験を打ち切るが、このグラフを見ると、いずれの

2) 溶接残留応力評価

X線応力測定装置を用いて、溶接止端を中心とする表面長手方向の残留応力分布を測定した。測定は $\sin 2\theta$ 法、X線波長 $\text{CrK}\alpha$ 、回折角 156.08° 、照射面積 4mm^2 で行った。図4に測定結果を示すが、溶接残留応力はいずれの材料でも溶接止端で最大となり、SM490Aでは最大200MPa程度の引張り残留応力、SM570Qでは約400MPaと

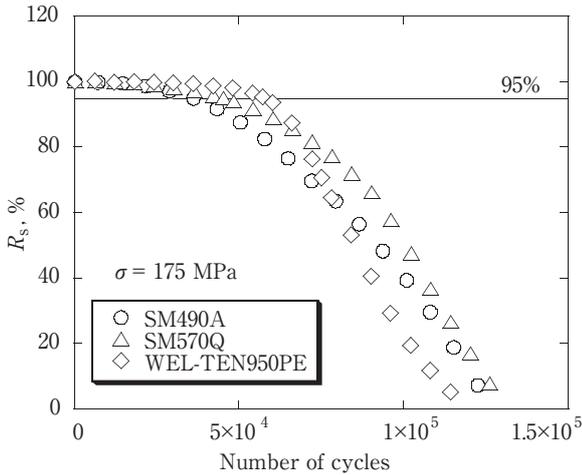


図3 ひずみゲージ出力の変化

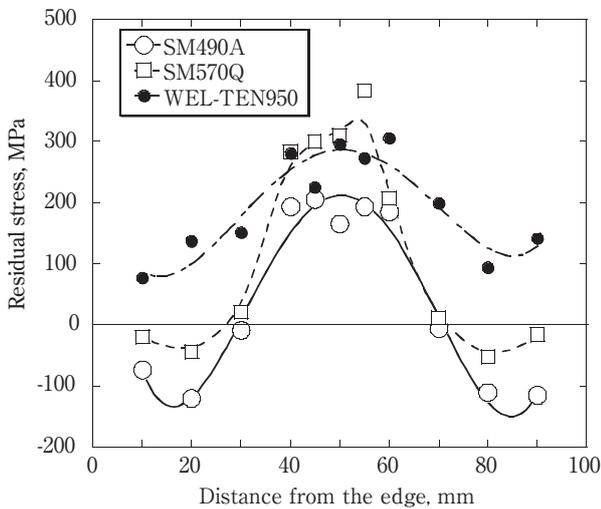


図4 溶接部の残留応力分布

SM490Aの2倍の引張り残留応力が発生している。しかし、最も高強度であるWEL-TEN950の残留応力は、最大値はSM570Qと同等であった。残留応力は内力であり、引張り残留応力と圧縮残留応力は釣り合っているはずであるが、WEL-TEN950の場合、すべて引張り残留応力となっている。このため、板厚方向に圧縮残留応力が分布していると考えられる。

3) 溶接部の応力集中係数評価

溶接止端部の応力集中係数 K_t を評価するため、有限要素解析 (FEM) コードMARCを用いて3次元有限要素弾性応力解析を行った。 K_t は以下の式で定義され、応力集中部の応力が平滑部より何倍高いかを表す指標である。

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \quad (1)$$

ここで σ_{\max} は応力の最大値、 σ_0 は最小断面の公称応力である。

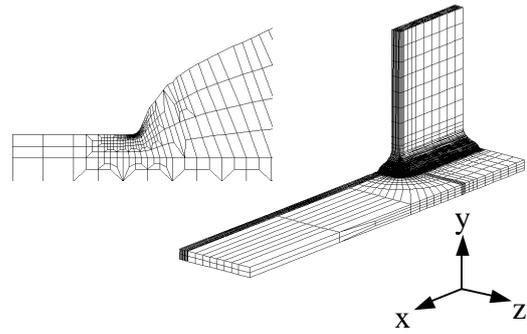


図5 面外ガセット溶接継手のFEMモデル

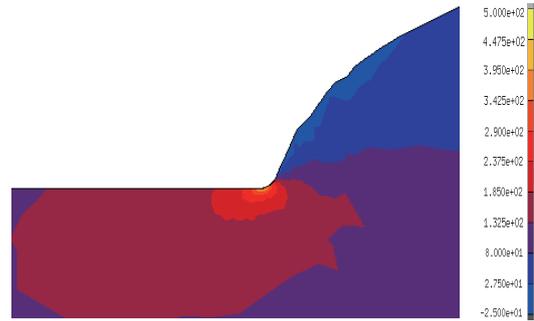


図6 FEMによるX方向の応力解析例

表2 FEMで解析した溶接止端部の応力集中係数

Specimen No.	1	2	3	4	5
K_t	4.33	4.42	5.43	4.60	4.81

溶接止端部の K_t を計算するために、5体の試験体についてシリコンゴムで溶接部のレプリカを採取し、形状を測定した。溶接部の大まかな形状は、レプリカを拡大投影機で10倍に拡大して測定した。溶接止端については詳細な形状データを得るためにレーザー顕微鏡を用い、分解能を0.01 μm として測定した。形状測定結果をもとに図5に示すような1/8モデルを作成し、応力解析を行った。解析モデルは8節点固体要素を用いて、要素数約60,000、節点数約66,000に分割し、ヤング率 E とポアソン比 ν はそれぞれ $E = 206\text{GPa}$ 、 $\nu = 0.3$ とした。図6に解析結果の一例として、X方向の応力コンター図を示すが、溶接止端部の応力が周囲より高くなっているのが分かる。図中、右端のスケールは、応力値 (単位はMPa) である。表2に解析結果から求めた K_t を示す。 K_t は4.3~5.4と非常に大きな値であり、前述したようにき裂発生寿命が著しく小さくなる原因となっている。

4 超音波衝撃処理による溶接継手の疲労強度改善

1) 超音波衝撃処理

本研究で使用した鋼材の引張り強さと疲労限度の関

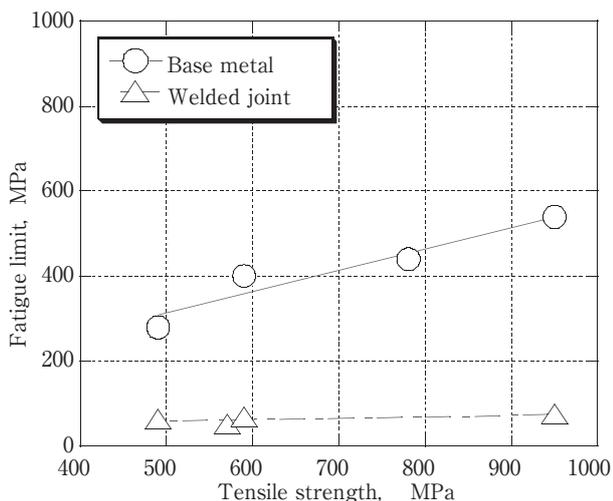


図7 引張り強さと疲労限度の関係

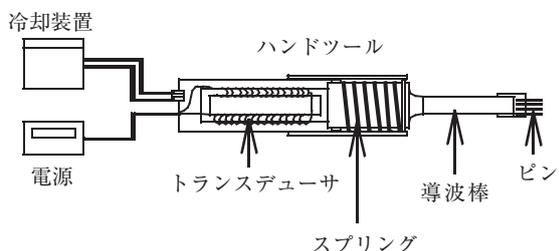


図8 UIT装置の概略図

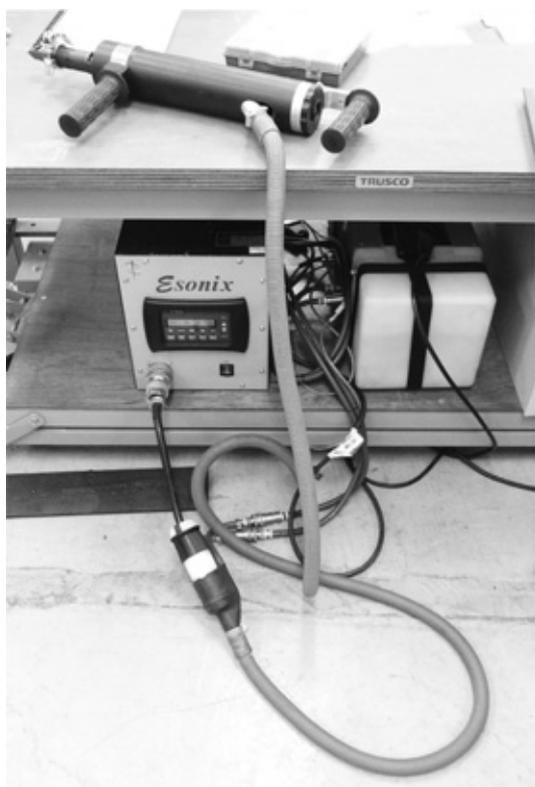


写真4 実験に使用したUIT装置

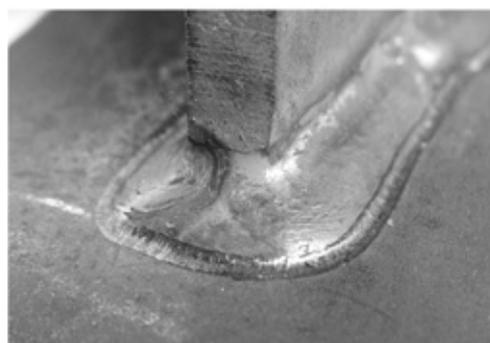
係を図7に示す。なお、参考までに併せて母材の疲労限度を示す。母材の疲労限度が引張り強さに比例するのに対し、溶接継手の疲労限度は鋼材の種類にほとんど



写真5 面外ガセット溶接継手のUIT処理



(a) UIT処理前



(b) UIT処理後

写真6 UIT処理による溶接止端部の変化

依存しない。このため、高強度な材料を使用しても、その強度を有効に利用することができない。そこで、疲労の起点となる溶接止端部に、金属の表面処理法であるショットピーニングやハンマーピーニングと同様の効果が報告されている超音波衝撃処理 (Ultrasonic Impact Treatment: 以下UIT) を施し、溶接継手の疲労強度改善を試みた。UITは、図8に示すハンドツール内で発生した超音波によって、先端のピンを高速に振動させ、その衝撃力で金属材料表面を硬化させる方法である。この方法は、小さな鋼球を空気圧で衝突させるショットピーニングに比べ施工が容易であり、既存の構造物への適用が期待されている。また反動が小さいため、ハンマーピーニングに比べ施工者への身体的負担が小さいという特徴を有している。

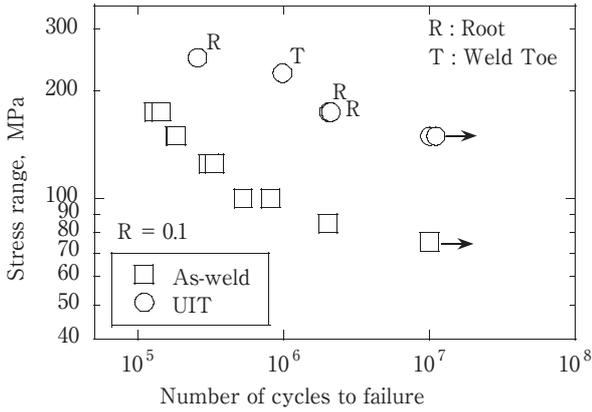


図9 UIT 処理した溶接継手の疲労試験結果

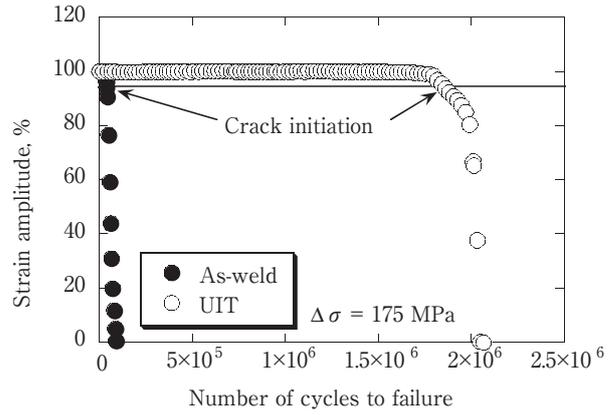
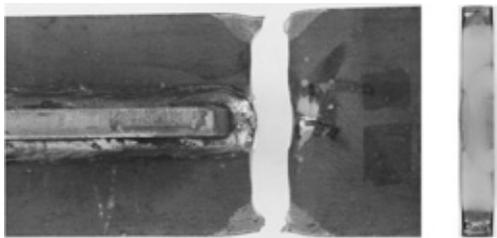
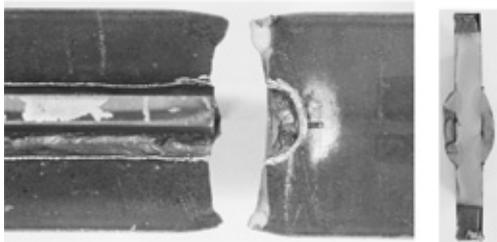


図10 UIT 処理によるき裂発生寿命の変化



(a) 溶接まま試験体



(b) UIT 処理試験体

写真7 溶接ままおよびUIT 処理試験体の破断箇所

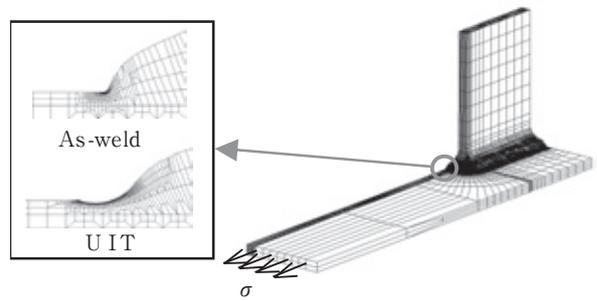


図11 UIT 処理した溶接継手のFEM モデル

表3 UIT 処理による応力集中係数の変化

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
As-weld	3.21	3.27	3.43	3.32	3.28
UIT	2.43	2.65	2.20	2.74	2.71

本研究に使用したUIT装置は、Applied Ultrasonic社製 Esonix™ 27 UISであり、超音波の共振周波数は27kHz、打撃ピンの半径及びピン先端の曲率半径は1.5mm、ピンの振幅は約30μmである。写真4に使用したUIT装置を、写真5にUIT処理の様子を示す。また、写真6にUIT処理前と処理後の溶接止端部を示す。写真6(b)のように、UIT処理によって溶接止端部にピン先端の形状が転写される。

2) UITによる疲労強度の変化

UIT処理は、今回使用した材料で最も高強度なWEL-TEN950溶接継手に施した。図9に疲労試験結果を示すが、溶接止端にUITを施すことで、全ての応力範囲において疲労寿命は増加し、特に疲労限近傍では約15倍増加している。また、疲労限度は溶接まま試験体（以下AW試験体）が75MPaに対し、UIT処理した試験片（以下UIT試験体）は、150MPaと2倍に増大している。なお、写真7に破断箇所を示すが、AW試験体がすべて溶接止

端から破断したのに対し、UIT試験体は4体のうち、3体が未溶着ルート部から破断している。

図10に一例として、 $\Delta\sigma = 175$ MPaにおける溶接止端のひずみ振幅と繰返し数の関係を示す。UIT試験体のき裂発生寿命はAW試験体の約20倍に増大している。これは、AW試験体が溶接止端から破断するのに対し、UIT試験体はルート部から破壊することに関係している。

3) 応力集中係数の評価

溶接止端部の応力集中係数 K_t を評価するため、有限要素法(FEM)により三次元弾性応力解析を行った。AW試験体とUIT試験体の溶接部をそれぞれ5ヶ所ずつシリコンゴムで型取り、拡大投影機で10倍に拡大して形状を測定した。溶接止端については、分解能0.01μmの3Dレーザー顕微鏡を用いて、より詳細に形状を計測した。

測定結果をもとに、試験体の対称性を考慮し、1/8FEモデルを8節点固体要素を用いて、要素数約60,000、節

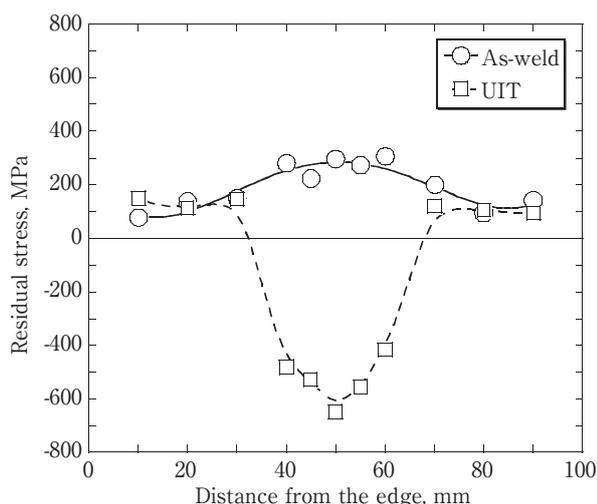


図 12 UIT 処理による残留応力の変化

点数約 66,000 に分割した。図 11 に作製した FE モデルの一例を示す。なお、ヤング率 $E = 206 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。表 3 に応力解析結果から求めた K_t を示す。AW 試験体の K_t は約 3.3 に対し、UIT 試験体は約 2.6 と UIT によって K_t は 20% 程度低減している。

4) 残留応力の評価

X 線応力測定法により、AW 試験体と UIT 試験体の溶接止端における荷重方向の残留応力分布を測定した。測定は並傾法の ψ_0 一定法で、X 線には $\text{CrK}\alpha$ を用い、半価幅中点法で回折角 θ を決定した。図 12 に残留応力測定結果を示す。AW 試験体の溶接止端は 300MPa 以上の引張残留応力であるが、UIT 試験体の溶接止端は -600MPa 以下の圧縮残留応力となっており、UIT によって、引張強さに相当する約 1000MPa もの圧縮残留応力が導入されたことになる。UIT によって溶接継手の疲労限度が 2 倍に増大した原因は、残留応力の影響が大きいと考えられる。

5 結 論

溶接継手の疲労強度は、200 万回強度で評価されるため、長寿命側のデータに乏しい。そこで、溶接継手中で最も疲労強度が劣る面外ガセット溶接継手について、1000 万回疲労強度を調査するとともに、溶接止端部の残留応力、応力集中係数を評価することで、面外ガセット溶接継手の長寿命疲労特性を調査した。また、溶接継手の疲労強度は溶接形状に大きく依存し、母材の引張り強さに比例しない。そこで、溶接部に超音波衝撃処理を施し、溶接継手の疲労強度改善を試みた。得られた結果は以下のとおりである。

1) 溶接試験体はいずれも 200 万回以上の荷重繰返し数で破断しており、溶接継手の疲労強度を評価するには、200 万回疲労強度では不十分である。

2) 溶接試験体の $S-N$ 曲線を求めたところ、傾斜部は材料と試験片寸法に依存しないが、疲労限度は若干引張り強度に比例し、試験片寸法に反比例した。

3) X 線残留応力測定法で溶接残留応力を計測したところ、残留応力は溶接止端部で最大引張り応力となり、高強度材料の方が応力値が大きい。

4) 溶接止端部の応力集中係数を有限要素法による 3 次元弾性応力解析結果から評価したところ、4.3 ~ 5.4 と非常に大きな値であった。

5) UIT 処理した溶接試験体は、溶接ままの試験体に比べ、疲労寿命は 10 倍程度増大し、疲労強度は約 2 倍に改善された。

6) 溶接まま試験体は溶接止端から疲労き裂が発生し破断したが、UIT 処理した試験体は未溶着のルート部から疲労き裂が発生し破断した。

7) FEM による 3 次元弾性応力解析により、UIT 処理後の溶接止端の応力集中係数を評価したところ、UIT によって、応力集中係数は溶接ままより約 20% 低減した。

8) X 線応力測定法により、UIT 処理後の残留応力を調査したところ、溶接ままでは 300MPa の引張り残留応力が、UIT を適用することによって -600MPa 以上の圧縮残留応力となった。

謝 辞

本研究は東京電機大学大学院理工学研究科知能機械工学専攻修士課程（平成 22 年 3 月修了）の戸ヶ崎祐君の協力により実施された。また、試験材料の一部は、株式会社タダノより提供を受けた。UIT 処理は新日本製鐵株式会社鉄鋼研究所で施工した。ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、鋼橋の疲労と破壊 —ケーススタディー—, John W. Fisher, 建設図書; 1987.
- 2) 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, [社]日本鋼構造協会 編, 技報堂出版; 1993.
- 3) 破壊事故 —失敗知識の活用—, 小林英男, 共立出版; 2007.
- 4) 三木千寿・坂野昌弘・館石和雄・福岡良典, 鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析, 土木学会論文集, No.392; 1988: 403-4410.
- 5) JSMS002-1994 統計的疲労試験方法 (改訂版), 社団法人日本機械学会, 春恒社; 1994.
- 6) 町田進・的場正明・吉成仁志・林忠宏・牧野寛之, ブロック荷重を受ける溶接構造の疲労寿命推定法に関する一考察, 日本造船学会論文集 No.172; 1992: 579-587.

(平成 22 年 9 月 24 日受理)