Improvement of Fatigue Strength for Rotating Bending by Cavitating Jet

正 祖山 均 (東北大)

○ 日下 卓也 (東北大)

正 坂 真澄 (東北大)

Hitoshi SOYAMA, Tohoku University, Aramaki aza Aoba01, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

Takuya KUSAKA, Tohoku University

Masumi SAKA, Tohoku University

Key Words: Fatigue Strength, Surface Modification, Cavitation, Jet

1. 緒 言

近年, キャビテーションを伴う高速水中水噴流^{(1)~(3)} (以下単にキャビテーション噴流と呼ぶ)を用いて, キャビテーション気泡の崩壊衝撃力により, 金属材料表面へ圧縮残留応力を導入する表面改質が提案されている^{(4)~(6)}。

材料表面に圧縮残留応力を導入することにより, 外力により材料に負荷される引張り応力の軽減が可能である。また金属材料が応力腐食割れをおこす要因に製造過程や劣化により生じる引張りの残留応力がある。キャビテーション噴流による金属材料表面への圧縮残留応力導入の利点としては次のような点が挙げられる。i) キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を活用するので比較的吐出し圧力のポンプで済むため, 低コストで加工が可能である⁽⁷⁾, ii) ショットピーニングのようにショットを用いないために深い凹面に対しても加工が可能である, iii) ショットによる粉塵を生じないために環境にも優しい。

祖山ら⁽⁸⁾は, SUP7製角材の4点曲げ疲労試験を行い, キャビテーション噴流による疲労強度向上を実証した。しかしながら, キャビテーション噴流で加工した試験片は, 全て角部から生じたき裂により疲労破壊したために, キャビテーション噴流により加工した面の疲労強度の評価が行えなかった。また十分な繰返し数を行っていないために, 疲労強度の向上を十分に評価できていなかった。

よって本報では, 機械材料の疲労強度向上へのキャビテーション噴流の有効利用を目的とし, 一般にはショットピーニングを施しばね材として利用されているシリコンマンガ鋼 SUP7を取り上げ, キャビテーション噴流によるピーニング効果を調べるために回転曲げ疲労試験を行った。

2. 実験装置および方法

Fig.1 に実験装置の概要を示す。実験には, 試験部が任意の速度 v で噴流軸と直交方向に回転しつつ移動可能な大型キャビテーション噴流装置を使用した。試料水はタンクに貯留し, これをプランジヤポンプ(最大吐出し圧力 30 MPa, 最大吐出し量 30ℓ/min)で加圧し, 供試ノズルを通して試験部内に設置した試験片に噴射した。供試ノズルには, スロート部直径が 1.9 mm, スロート部長さが 6.0 mm のシリンドリカルノズルを用いた。ノズル上流側圧力 p_1 および下流側圧力 p_2 を制御することにより, キャビテーション噴流の加工能力を制御した。キャビテーション噴流の支配パラメータであるキャビテーション係数 σ は, ノズル上流側圧力 p_1 , 下流側圧力 p_2 および試料水の飽和蒸気圧 p_v から, $p_1 \gg p_2 \gg p_v$ なので, 以下のように定義した。

$$\sigma = \frac{p_2 - p_v}{p_1 - p_2} \approx \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

キャビテーション噴流の条件は, p_1 が大なるほどキャビ

テーション噴流の加工能力は大となり, また $\Delta p = p_1 - p_2 =$ 一定の条件では $\sigma = 0.014$ 近傍において Δm が極大となる⁽⁹⁾ので, $\sigma = 0.014$, $p_1 = 30$ MPa, $p_2 = 0.42$ MPa とした。また, 加工条件における最適スタンドオフ距離 $s_{opt} = 45$ mm は A1050 を用いた壊食試験により, 質量損失 Δm が極大となる s から求めた。

キャビテーション噴流による表面改質は, 試験片を $v = 2.0$ mm/s でキャビテーション噴流内を移動させ, それを n 回回し試験片に圧縮残留応力を導入した。このときの加工時間 t_s は次式で定義した。

$$t_s = n/v \quad (2)$$

残留応力の測定には X 線回折式応力測定装置を用いた。X 線管は CrK α , コリメータ直径は 1mm, 回折面は α -Fe の (211) 面, 回折角 2θ は 156.1 deg. を使い, 各入射角 $\psi_0 = -20, -10, 0, 10, 20$ deg. において, 20 kV, 10 mA の X 線を照射し, 各条件において位置敏感型検出器 PSPC で 30 秒間測定した。回折角は半価幅法により決定し, $\sin^2\psi$ 法を用いて $2\theta - \sin^2\psi$ 線図から最小二乗法により残留応力を求めた。残留応力算定に用いた X 線応力定数は, 応力定数表より -317.9 MPa/deg とした。

Fig. 1 Cavitating jet apparatus

Fig. 2 Test piece

Table 1 Mechanical properties and heat treatment conditions of SUP7 steel

Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Hardness H _v	Heat treatment	
			Oil quenched K	Oil cooled K
1245	1392	567	1123	783

Fig.2には実験に使用した試験片形状(JIS Z2274, 2号試験片)の概略を示す。試験片にはシリコンマンガ鋼 SUP7 に熱処理を施したものを使用した。Table 1には試験片の機械的性質および熱処理の条件を示す。

回転曲げは回転曲げ試験機 FTO-10 (100Nm, 2900rpm) を用いて疲労試験を行った。

3. 実験結果

Fig.3には試験片をキャビテーション噴流にさらした時間と試験片長手方向の残留応力の関係を示す。キャビテーション噴流にさらすことにより、圧縮残留応力は-470MPaから-690MPaへと移行している。また加工時間が増大するに伴って、圧縮残留応力は増大するが、キャビテーション噴流に過剰にさらすことにより圧縮残留応力は低減し、やがて材料表面に損傷を生じるようになる⁽⁶⁾。よって本報では残留応力が圧縮へと移行し飽和した加工時間 $t_s = 15$ s/mm より 4mm/min を最適加工速度として以下の実験を行った。

Fig.4には回転曲げ疲労試験による応力振幅 σ_a と破断に至る回数 N の関係 ($S-N$ 線図) を示す。試験片の破断は全て最小肉厚部で試験片外周より発生した。キャビテーション噴流にさらしていない試験片は $\sigma_a = 820$ MPa において $N = 1.61 \times 10^6$ で破断したが、キャビテーション噴流で加工した試験片は $\sigma_a = 940$ MPa において $N > 1.14 \times 10^7$ においても破断していない。すなわちキャビテーション噴流による加工により、SUP7 の回転曲げ疲労強度が約 120 MPa 向上したといえる。また本実験では、未加工の試験片は $\sigma_a = 957$ MPa で $N = 1.83 \times 10^5$ で破断したのに対し、キャビテーション噴流により加工した試験片は $\sigma_a = 956$ MPa で $N = 7.13 \times 10^5$, 3.47×10^6 で破断した。すなわち疲労寿命が 4 倍以上延びた。よって前報⁽⁸⁾においては疲労限より大きな曲げ応力下ではキャビテーション噴流による加工の差が認められなかったが、本実験から疲労限より大きな曲げ応力を負荷した場合でも、キャビテーション噴流による加工においても、通常のショットピーニングと同様に、疲労寿命の向上が認められることがわかる。

4. 結 言

本報では機械材料の疲労強度向上へのキャビテーション噴流の有効利用を目的とし、シリコンマンガ鋼 SUP7 の残留応力の測定、および回転曲げ疲労試験を行った。その結果、キャビテーション噴流にさらすことにより、残留応力は 200MPa 程度圧縮側へ移行した。また回転曲げ疲労試験において、疲労限はキャビテーション噴流にさらすことにより、120MPa 程度向上した。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金 [基盤研究(B)(2)10555025, 国 11694118], および新エネルギー・

Fig. 3 Residual stress as a function of exposure time to cavitating jet

Fig. 4 $S-N$ diagram

産業技術総合開発機構 (NEDO) から中小企業総合事業団が受託して実施している中小企業創造基盤技術研究事業 [No.11-6] によったことを記す。また供試材料は三菱製鋼 (株) 千葉製作所より提供されたことを記し、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 祖山・ほか5名, 機論, 59-562, B(1993), 1919.
- (2) Soyama, H. et al., *Proc. Fluid Eng. Div. Summer Meeting, ASME, San Diego*, FED-236 (1996), 415.
- (3) Soyama, H. and Lichtarowicz, A., 噴流工学, 13-2 (1996), 9.
- (4) 祖山・ほか6名, 噴流工学, 13-1 (1996), 25.
- (5) 平野・ほか3名, 材料, 45-7 (1996), 740.
- (6) Soyama, H. et al., *Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng.*, 122-1(2000), 1.
- (7) 祖山, 噴流工学, 16-3(1999), 23.
- (8) 祖山, ほか2名, 機講論, 98-32, I, (1998), 605.
- (9) 祖山, 材料, 47-4(1998), 381.