

キャビテーション・ショットレス・ピーニング による歯車の疲労強度向上

東北大学 ○祖山 均

東北大学[院] Dan Odhiambo Macodiyo

1 緒 言

キャビテーションは、ポンプやバルブ、スクリーなどの流体機械に致命的な損傷をもたらす害悪である。しかしながら、キャビテーション噴流により、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を制御して強化することにより、ショット・ピーニング(以下ではSPと記す)と同様に、機械材料を高強度化する表面改質に有効利用できる^{1)~10)}。キャビテーションによるピーニングは、ショットなし(ショットレス)でピーニングできるので、キャビテーション・ショットレス・ピーニング(以下ではCSPと記す)と呼ばれている^{7~10)}。

最近 Soyama により水を満たした水槽を用いることなく、大気中に直接的にキャビテーション噴流を形成する空中キャビテーション噴流によるピーニング効果が実証され¹¹⁾、CSPの応用の飛躍的展開が期待されている。

これまでにCSPで処理した試験片がSPで処理した試験片よりも疲労強度が向上する事実が祖山らにより報告されている^{8), 9), 12)}。しかしながら、回転曲げ疲労試験による疲労強度がCSPの方がSPよりも向上する場合においても、試験片表面近傍に導入される圧縮残留応力の深さはCSPの方がSPよりも浅いことが報告され¹²⁾、実機での効果が危惧されている。したがって、回転曲げ疲労試験片ではなく、歯車などの実際の機械部品を用いたCSPによる疲労強度向上の実証が必要とされている。

よって本報では、CSPによる歯車の疲労強度向上を実証するために、まず回転曲げ疲労試験で予備実験を行い、次にCSPで加工した歯車の疲労試験を行った。CSPによる効果をSPによる効果と比較するために、回転曲げ疲労試験ならびに歯車の疲労試験ともに、SPで処理した場合についても疲労試験を行った。

2 緒 言

実験には、水中キャビテーション噴流によるCSP試験装置を使用した。CSPによる処理条件をTable 1に示す。噴射圧力 $p_1 = 30$ MPaの場合をCSP 30Mと呼び、50 MPaの場合をCSP 50Mと

Table 1 CSP conditions

Symbol	CSP 30M	CSP 50M
Injection pressure p_1 MPa	30	50
Tank pressure p_2 MPa	0.42	0.29
Nozzle diameter d mm	1.9	1.2
Standoff distance s mm	45	80
Arc height H_N mm (at 18 s/mm)	0.115	0.390
(Calculated arc height H_A mm)	(0.048)	(0.129)

Table 2 Shot peening conditions

Symbol	SP1	SP2	SP3
Shot diameter d_s mm	0.6	0.1	0.3
Arc height H_A mm	0.55	0.33	0.20

呼ぶことにする。またSPの処理条件をTable 2に示し、それぞれSP1, SP2, SP3と呼ぶことにする。

CSPによる回転曲げ疲労試験片の処理は、1回転あたり2 mmで噴流軸に垂直に移動するように回転させながら、試験片を任意の加工速度 v で n 回移動させて行った。単位長さあたりの加工時間 t は次式で定義した。

$$t = \frac{n}{v} \quad (1)$$

Fig. 1には、回転曲げ疲労試験片の試験部の形状を示す。疲労試験片の材質には、浸炭したクロムモリブデン鋼(JIS SCM420)を用いた。供試材の硬さは、 $H_{RC} = 60$ であった。なおSPの粗さの増大による切欠効果を避けるために、SP後に試験片表面を研磨して回転曲げ疲労試験に供した。

Fig. 2には、歯車の疲労試験時の負荷の概略を示す。実験に使用した歯車は、外径78 mm、歯底円直径68 mm、歯幅11 mm、歯数32枚とした。歯車の材質は、JIS SCM420よりもニッケルが多いJIS SNCM420相当材を使用した。なお歯車は真空浸炭処理後に歯研をした後に、CSP, SPでそれぞれ処理を行った。

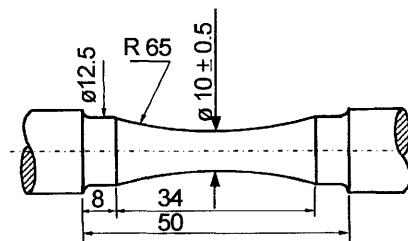


Fig. 1 Geometry of specimen for rotating bending fatigue test

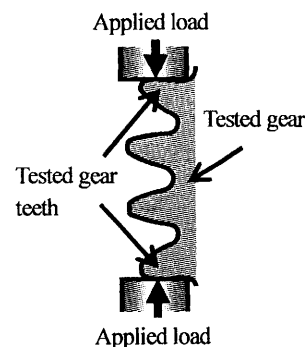


Fig. 2 Schematic diagram of fatigue test of gear teeth

3 実験結果

Fig. 3には、回転曲げ疲労試験の結果を示す。なおCSP 30MとCSP 50Mの単位長さあたりの処理時間は20 s/mmとした。Littleの方法¹³⁾によれば、 10^7 回における疲労強度は、CSP 30MとCSP 50Mはそれぞれ937 MPaと903 MPaであった。この結果から、小口径のノズルを用いて高い噴射圧力のキャビテーション噴流で処理するよりも、大口径のノズルを用いて比

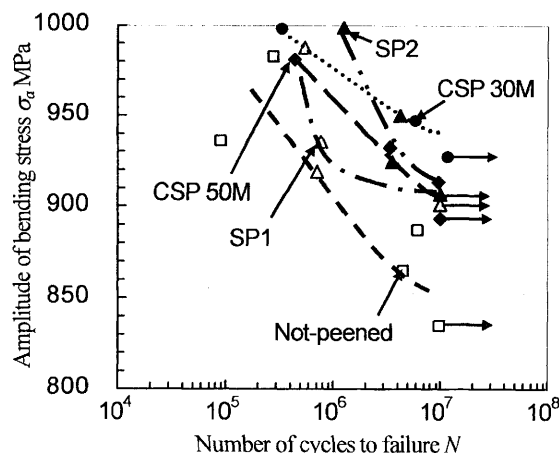


Fig. 3 S-N curve of rotating bending fatigue test

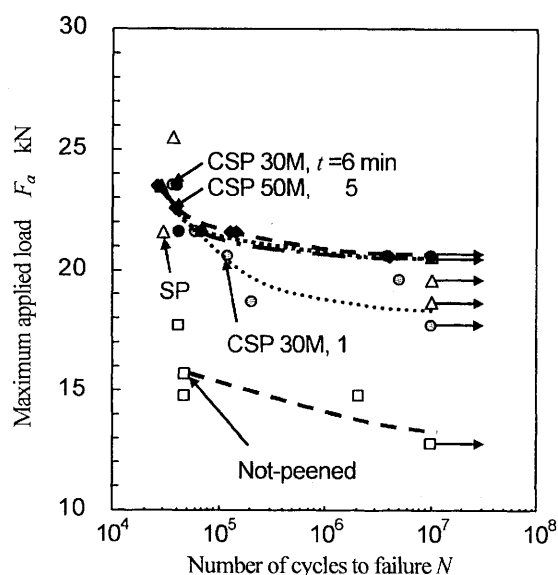


Fig. 4 S-N curve of fatigue test of gear teeth

較的噴射圧力が低いキャビテーション噴流で処理したほうが疲労強度を向上できる可能性を示唆している。なお未処理材は 849 MPa であったので、CSP 30M と CSP 50M によりそれぞれ 88 MPa, 54 MPa 疲労強度が向上した。なお SP1 は 910 MPa, SP2 は 915 MPa であったので、CSP 30M で処理した試験片が最も疲労強度が向上した。

CSP による疲労強度向上の要因を探るために、回転曲げ試験片の最表面の残留応力を計測した結果、CSP 30M は -840 MPa, SP1 は同じく -840 MPa, SP2 は -1,090 MPa であった。また試験片の表面粗さは、前述したように切欠効果を避けるために SP 後に試験片表面を研磨したので、SP1 と SP2 は 0.08 μm であり、CSP 30M は 0.11 μm と同程度であった。なお Table 1, 2 に示したように、CSP 30M のアークハイトは SP1 と SP2 の 1/11 から 1/6 程度であった。したがって、CSP 30M の疲労強度向上は、CSP による圧縮残留応力導入が一因と考えられ、CSP と SP のように異なる処理による疲労強度を比較する場合には、アークハイトや残留応力などの間接的な値では

比較できず、疲労試験を行う必要があることが明示された。

Fig. 4 には、歯車を疲労試験に供した結果を示す。CSP 30M の処理時間は 1 分間と 6 分間とし、CSP 50M の処理時間は 5 分間とした。Little の方法¹³⁾による 10^7 回における疲労強度は、未処理の場合は 13 kN, CSP 30M で 1 分間処理した場合は 18 kN, 6 分間処理した場合は 21 kN であった。CSP 30M で 1 分間処理した場合には、6 分間で処理した場合より多少疲労強度が小さいが、6 分間処理することにより 50 MPa で処理した場合とほぼ同様な疲労強度向上の効果を得た。なお SP3 の場合は 21 kN であった。すなわち、CSP により SP と同程度に歯車の疲労強度を向上できることが明らかになった。

4 結 言

キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を、ショット・ピーニング SP のごとく、機械部品の疲労強度向上に有効利用するキャビテーション・ショットレス・ピーニング CSP を取り上げて、CSP により実際に歯車の疲労強度を向上できることを歯車の疲労試験により実証した。得たる結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) CSP で処理することにより歯車疲労強度は、未処理材に比べて 60% 以上向上した。なお SP による疲労強度も CSP と同程度の 21 kN であった。
- (2) 異なる処理法による疲労強度の比較においては、残留応力やアークハイトのような間接的な値では比較できず、疲労試験を行う必要があることが明らかになった。
- (3) 回転曲げ疲労試験の結果より、小口径高噴射圧力のキャビテーション噴流よりも大口径低噴射圧力の方が CSP に適している可能性が示唆された。

なお本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金[基盤研究(B)(2)14350049] によったことを記す。

参考文献

- 1) 祖山均, 山内由章, 井小萩利明, 大場利三郎, 佐藤一教, 進藤丈典, 大島亮一郎, 噴流工学, **13-1**, 25 (1996).
- 2) 平野克彦, 榎本邦夫, 林英策, 黒沢孝一, 材料, **45**, 740 (1996).
- 3) H. Soyama and M. Asahara, J. Mater. Sci. Lett., **18**, 1953 (1999).
- 4) H. Soyama, J.D. Park and M. Saka, Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng., **122**, 83 (2000).
- 5) H. Soyama, JSME Int. J., **43A**, 173 (2000).
- 6) H. Soyama, T. Kusaka and M. Saka, J. Mater. Sci. Lett., **20**, 1263 (2001).
- 7) H. Soyama, K. Saito and M. Saka, J. Eng. Mater. Technol., Trans. ASME, **124**, 135 (2002).
- 8) 祖山均, 佐々木圭, 斎藤建一, 坂真澄, 自動車技術会論文集, **34**, 101 (2003).
- 9) D. Odhiambo and H. Soyama, Int. J. Fatigue, **25**, 1217 (2003).
- 10) H. Soyama, K. Sasaki, D. Odhiambo and M. Saka, JSME Inter. J., **46A**, 398 (2003).
- 11) H. Soyama, J. Eng. Mater. Technol., Trans. ASME, **126**, 123 (2004).
- 12) 祖山均, D.O. Macodiyo, 坂真澄, 日本材料学会第 52 期学術講演会講演論文集, 332 (2003).
- 13) R.E. Little, Probabilistic Aspects of Fatigue, ASTM STP **511**, 29 (1972).