キャビテーション壊食に及ぼすカソード防御効果*

劉 樹 軍^{*1}, 井小萩 利明^{*2}Effects of Cathodic Protection
on Cavitation Erosion in Vibratory Tests

Shujun LIU and Toshiaki IKOHAGI

In order to clarify the effects of cathodic protection on cavitation erosion, cavitation erosion tests are carried out using a vibratory erosion apparatus, and the cavitation aspects are photographed with a xenon flash lamp of 1 μ s exposure time. With increasing cathodic current, cavitation noises and mass losses (ML) of cavitation erosion markedly decrease when the number of tiny hydrogen bubbles on the specimen surface as well as in the test water increases, and the mass loss rate (MLR) is related to the square of sound pressure level (SPL²) of cavitation ultrasonic noise. The decreases in SPL and ML are due to marked absorption of cavitation energy by hydrogen bubbles produced on the specimen surface.

Key Words: Cavitation, Erosion, Cathodic Protection, Noise, Bubble, Vibratory Erosion Test

1. 緒 言

近年、流体機械・機器などの高速化および高性能化に伴い、しばしば機械に致命的な損傷を与える激しいキャビテーション壊食⁽¹⁾が問題となり、この激しい壊食の監視法や防止法の確立が急務となっている。

カソード防御については、キャビテーション壊食防止法の一つとして提案されて以来、種々議論がなされてきた。水中において生ずるキャビテーション壊食を防ぐために、カソードに電流を加えれば、必ず水素ガス気泡が発生する。この問題に対し、Plesset ら⁽²⁾は磁わい装置を用い、3%食塩水において0.1Aまでのカソード電流を加えて、さまざまな金属材料試験片について、壊食試験を行った。カソード電流の増加とともに、壊食による質量欠損が大幅に低下し、また、試験片をアノードとしても、同程度の防御効果が得られた。Leith ら⁽³⁾も、海水中に置かれた鋳鋼に対して、同様な傾向の結果を得ている。結果的には、このような防御効果はほとんど発生する水素ガスのクッション効果によると見てよいと考えられている。

る。さらに、遠藤ら⁽⁴⁾は、定カソード電位下における防食効果や過剰カソード電流による害悪作用についても考察している。

しかしながら、試験片の表面に発生する微細水素ガス気泡が、キャビテーション壊食に対して、どのようにクッション効果の役割を果たし得るのかと言うカソード防御機構についての研究はほとんどなく、不明の点が多く残されたままである。

よって、著者ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾はカソード防御機構の解明の第一歩として、キャビテーションノイズの側面から、試験片の表面に発生する水素ガス気泡の役割を明らかにすることを試みた。本研究では、さらに、キャビテーション壊食に及ぼすカソード電流の影響を明らかにするため間接式振動壊食試験を行い、種々のカソード電流について、壊食による質量欠損率とキャビテーションによるノイズおよび振動加速度の関係を検討するとともに、質量欠損および壊食面の様相にどのような大差が現れるかなどについて明らかにする。

2. 実験装置および方法

使用した間接式振動試験装置の概略を図1に示す。ASTM規格⁽⁷⁾に準じて、電わい式装置の加振周波数は19.5 kHz、直径15.9mmの円盤状振動子⁽⁸⁾(SUS304製)の

* 1995年3月14日 東北支部第30期総会・講演会において講演, 原稿受付 1995年10月31日。

^{*1} 正員, 東北大学大学院 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

^{*2} 正員, 東北大学流体科学研究所 (〒980-77 仙台市青葉区片平2-1-1)。

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

Fig. 2 Instrumentation of vibratory acceleration

両振幅は $50\ \mu\text{m}$ 、最大出力は $1.2\ \text{kW}$ のものを使用している。振動子に対向する静置試験片(純度99.9%のCu製)の直径は振動子と同じである。ところで、食塩水中に電流を流すと、アノード側に塩素ガスが発生する。周知のように、塩素ガスは毒性で、水に対して高い溶解性を持つので、本研究では、食塩水のかわりに、試験溶液として、蒸留水に3%(重量) Na_2SO_4 を十分一様に溶解させ、24時間静置したものを採用した。なお、キャビテーション核の一様性を期待して、水温は恒温装置により $22.0\ ^\circ\text{C} \pm 1.0\ ^\circ\text{C}$ に保っている。ビーカー内の静置試験片をカソードとし、アノードは4個の白金円盤(直径10mm、厚み0.5mm)で作られ、ビーカー中に対称に設置している。また、直流定電流電源から電極間に一定の電流を流すことができるよう制御されている。キャビテーションノイズの計測法は省略するが、詳細については文献(6)を参照されたい。

振動加速度の測定には、図2に示す位置に振動加速度計(上限周波数40kHz)を設置し、出力信号をデータレコーダに記録して、再生信号のパワースペクトラムおよび実効値をFFTアナライザ、データロガーにより解析した。

壊食試験に際し、一様組成を持つ単一部材から切断、加工された静置試験片は4000番の研磨テープにより仕上げてある。また、質量欠損は10分ごとに化学天秤(分解能0.1mg)により測定した。

一方、3% Na_2SO_4 溶液中における高速で絶えず変化しているキャビテーションの様相は、せん光時間 $1\ \mu\text{s}$ の

Fig. 3(a) ML versus t and I

Fig. 3(b) MLR versus t and I

Fig. 3(c) MLR_s versus I

クセノンフラッシュランプを用いて、瞬間写真により撮影した。なお、撮影の際、精密な遅延回路を用いて振動子の位相を正確にとらえている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

3. 実験結果

3.1 カソード電流と壊食による質量欠損 間接式振動試験における代表的な振動子と静置試験片の間隔2mmを選んで、壊食試験を行った。

3.1.1 質量欠損の経時変化 図3(a)には、種々のカソード電流Iについて、壊食による質量欠損(ML)の経時変化を示す。明らかにIの増加とともに、MLが著しく減少する。また、質量欠損率(MLR)の経時変化を示した図3(b)から、Iによって、MLRは著しく変化するが、MLRの曲線の傾向は同様で、試験開始直後のMLRがほとんど零で記号が一部重なる潜伏期、MLRが急速に増加す

Fig. 4(a) Erosion patterns on eroded specimen surfaces

Fig. 4(b) SEM photographs near the edge of eroded specimen surfaces

る増加期, MLR がほぼ一定になる定常期の各期間に区分できる. そして, I の増加とともに, 潜伏期の時間が長くなる. 例えば, $I=0$ A の場合で, 約 12 分, $I=1.0$ A の場合で, 約 30 分である. また, $I=1.0$ A の場合は, 最大の MLR がわずかに $0.05\text{mg}/\text{min}$ ($I=0$ A の場合の約 $1/13$) で, カソード防御効果が顕著に現れている. さらに, 種々のカソード電流に対して, 図 3(c) に示した定常期の質量欠損率 MLR_s (添字 s は定常期, 図中の添字 0 は $I=0$ A を表す) は, 電流 I が 0 から 0.5 A まで増加すると, 著しく減少し, さらに 1.0 A まで増加すると, MLR_s の減少割合が飽和

する傾向となることが分かる

3.1.2 壊食の様相 図 4(a) には, 種々の電流 I について, 静置試験片表面に生じた壊食の様相の経時変化を示す. 明らかに, 同じ経過時間においても, I によって, 壊食の様相に差異が見られる. 試験片表面の壊食が I の増加とともに著しく軽減し, 特に, 試験片の外周付近に存在するリング状の壊食こんが $I=1.0$ A の場合には, ほとんど消失している. 図 4(b) には, 試験時間 60 分後の外周付近の壊食面の走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す. 図中, 各電流に対する上段の写真は低倍率のもの, 下段は

Fig. 5 MLR_s versus SPL and ACC

Fig. 6 Power spectral density of vibratory acceleration

高倍率のものである。これらより、電流の増加とともに、試験片表面の同心円状加工こんに沿って生じた塑性変形条こんのクラックの個数はより少なくなり、加速期から定常期にかけて進行する結晶粒子群の脱落による壊食の発達大幅に抑制されることが分かる。特に、 $I=1.0A$ の場合は、質量欠損に寄与するクラックの発生がほとんど抑制され、塑性変形条こんに沿う局所脱落もまだ始まったばかりと言える。

3.2 質量欠損率とノイズおよび振動加速度との関係

壊食がキャビテーションによるノイズおよび振動加速度と密接な関係にあることは、現在では既によく知られている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。ここでは、種々の電流 I に対して、振動壊食試験における壊食とノイズおよび振動加速度がどのような関係にあるのかを調べてみよう。

3.2.1 質量欠損率とノイズの関係 図5には、前述の定常期の質量欠損率 MLR_s と音響エネルギー SPL^2 (壊食に係わる 50 ~ 100kHz の高周波側音圧レベルの実効値 SPL の2乗) の関係を示す。図中、これらの添字0は $I=0A$ の場合を表す。明らかに、 MLR_s と SPL^2 との間には線形関係があると考えられ、高周波ノイズによる壊食発達過程の監視の視点からも興味深い。

3.2.2 振動加速度 図6には、種々のカソード電流 $I=0, 0.5, 1.0A$ について、静置試験片の振動加速度のパワースペクトラムを示す。いずれの電流においても、加振

Fig. 7 Total gas content rate versus t and I

周波数とその倍周波数の近傍で卓越したスペクトルとなる。したがって、振動加速度が振動圧力場によく対応していることが分かる。しかしながら、電流の増加とともに、スペクトラム密度が減少しており、発生する水素ガス気泡がキャビテーション気泡の崩壊による衝撃力を抑制していると言える。すなわち、静置試験片に伝わる気泡崩壊エネルギーを吸収する効果があると考えられる。また、図5に示すように、 MLR_s と振動加速度の強さ ACC^2 (ACC は振動加速度の実効値) との間にも直線関係が見られるが、原点は通らない。これは、振動子からの加振力によるあるしきい値をこえると、衝撃力による振動加速度のみが壊食と直接係わることを示している。

3.3 キャビテーションの様相 図7には、van Slykeの方法⁽⁸⁾で測定した試験溶液中の全ガス含有度の経時変化を示す。同じ試験時間に対して、 I が大きいほど、全ガス含有度は高くなる。したがって、発生した水素ガスの一部が溶液中に残留していることを示唆しており、カソード防御機構を考える際に留意すべきことと思われる。

図8には、3% Na_2SO_4 溶液中で、間隔 5mm の静置試験片の表面に発生したキャビテーションの様相の瞬間写真を種々の振動子位相点および電流 I について対比している。いずれの位相点においても、電流が増加すると、試験片表面には非球状な気泡の個数が若干多くなり、その径も大きくなる。また、振動子と試験片間の溶液中の気泡の個数も顕著に増加している。言うまでもなく、これらの気泡数の増加は、電流の増加に伴う水素ガス発生量および全ガス含有量の増加に良く対応している。

圧力振動場で水素が発生すると、水素ガスがキャビテーション気泡中に拡散し、気泡中の非凝縮ガスの分圧が増加するため、気泡の崩壊速度あるいは圧力を減少させるであろう。また、振動子と試験片間に微細水素気泡が多くなると、試験片に伝わる衝撃圧も減衰する。したがって、カソード防御効果は、発生する水素ガス気泡がキャビテーション気泡の崩壊を直接的に弱める側面とキャビテーション気泡崩壊圧力の伝播を著しく減衰させる側面とからなると考えられる。

Fig. 8 Cavitation aspects on specimen surfaces

4. 結 言

文 献

キャビテーション壊食のカソード防御機構の解明を目的として、振動壊食試験を行い、壊食による質量欠損、質量欠損率とノイズの関係などを、種々のカソード電流に対して明らかにし、以下のような結果を得た。

(1) 電流の増加とともに、質量欠損及び質量欠損率が減少する。特に、本実験条件においては、電流 I が 0.5A までの範囲で、定常期の質量欠損率は急速に減少する。

(2) 種々のカソード電流に対して、質量欠損率と高周波側の音響エネルギーおよび振動加速度の強さの間には、ほぼ線形関係がある。

(3) カソード防御効果は、試験片表面に発生する水素ガスがキャビテーション気泡の崩壊を直接的に弱め、気泡崩壊圧力の伝播を減衰させると言う両面からなると考えられる。

- (1) 祖山・ほか 5 名, *Proc. 15th. IAHR Int. Sympo. on Cav. & Fluid Mach.*, Belgrad, (1990), H4.
- (2) Plesset, M. S., *Trans. ASME, Ser. D*, Vol. 82 (1960), 808.
- (3) Leith, W. C. & Thompson, A. L., *Trans. ASME, Ser. D*, Vol. 82(1960), 795.
- (4) 遠藤・駒井, 防食技術, 26 (1991), 133.
- (5) 劉ら, 東北支部第 30 期総会・講演会論文集, (1995), 5.
- (6) 劉・ほか 3 名, 機論, 61-590, B(1995), 3650.
- (7) ASTM Designation, G32-85 (1985), 187.
- (8) Ahmed, M・ほか 3 名, 機論, 55-514, B(1989), 1495.
- (9) 宮崎・ほか 2 名, 機論, 57-539, B(1991), 2174.
- (10) 菊地・ほか 5 名, 東北大学流体研報告, 4(1993), 73.
- (11) 安達・ほか 5 名, 機論, 60-576, B(1994), 2665.
- (12) 谷・ほか 2 名, ターボ機械, 22-8, (1994), 479.