土砂摩耗と壊食の複合損傷に関する基礎的研究*

(第1報, 水中噴流による実験)

佐藤譲之良^{*1}, 宇佐美賢一^{*1}, 岡村 共由^{*1}

Basic Study of Coupled Damage Caused by Silt Abrasion and Cavitation Erosion (1st Report, Experiments with Submerged Water Jets)

Jyoshiro SATOH, Kenichi USAMI, and Tomoyoshi OKAMURA

Damage due to the coupled action of cavitation erosion and silt abrasion was experimentally studied using submerged jets in which artificial silts (Al_2O_3) were included. It was shown that the magnitude of the acoustic emission energy, impact pressure and material damage rate caused by the cavitating jet impingement were greater than those caused by the noncavitating one. Good correlations between the above three erosion intensity parameters were also confirmed. SEM photographs of damaged surfaces showed that the edge of the abrasion trace was partially broken into pieces by cavitation. The material surface was smoother and the abrasion pattern was changed compared to that of pure abrasion.

Key Words: Fluid Machinery, Hydraulic Turbine, Jet, Wear, Cavitation

1. 緒 言

中国, インドを主とする多数の水力発電所において, 河川水に含まれる土砂による水車性能の低下⁽¹⁾, および材料の損傷が重要な問題となっている。従来, 摩耗の研究は数多くなされているが, 実機水車において経験される, 土砂による摩耗とキャビテーション壊食が, 干渉し合いつつ共存する複合損傷についての研究⁽²⁾は少ない。一方, キャビテーションを伴う噴流については, 多くの研究^{(3),(4)}がなされており, 著者らも複合損傷の研究の第1段階として, キャビテーションを伴う, 水中噴流のエロージョン作用強さを求めるため, 土砂を含まない水道水(以下清水)を用いた実験を行い, 損傷作用強さを, アコースティックエミッション(以下AE)エネルギー, 感圧紙で得られる衝突圧で評価し, アルミニウムのエロージョン速度との関係を検討した⁽⁵⁾。本研究では同実験装置で, さらに人工土砂(Al_2O_3 粉末)を加えた土砂含有水(以下土砂水)を用い, 摩耗と複合損傷による材料の侵食量を比較し, 複合損傷により, 侵食量がいかに変化するかを調べるこ

とにした。同時に試験片への衝突距離, 土砂濃度, 土砂粒径の影響も確認した。

2. 実験装置と実験方法

2.1 水中噴流実験装置 実験装置を図1に示す。真空ポンプに接続された圧力タンク, 試験槽, 循環ポンプおよび熱交換機から構成される。試験槽は水で満たされ, 内部に噴流ノズルと試験片が取付けられる。ノズル径2.1 mm, 最大噴流速度40 m/s, 衝突角度30°~90°可変である。噴流のキャビテーション発生状態は, 試験槽内の圧力および噴流速度を変えることにより調節した。

2.2 土砂水の噴流による損傷作用強さの測定 噴流の強さは次の3種類の方法で評価した。すなわちAEエネルギー, 噴流の衝突圧および試験片の侵食量である。AEエネルギーおよび衝突圧の測定法は既報⁽⁵⁾にゆずり, 侵食量はまず所定時間試験した試験片をアセトン溶液で超音波洗浄し, 十分に乾燥したあとで秤量し, 試験前後の重量差から減量(mg)を求め, その値を試験時間および密度で除した体積減量(cm^3/h)で評価した。また侵食部の損傷形態を調べるため, 代表的な試験片の侵食面を走査形電子顕微鏡(以下SEMという)により観察した。

* 平成元年6月14日「キャビテーションに関するシンポジウム(第6回)」において講演, 原稿受付「平成元年8月3日」。

^{*1} 正員, (株)日立製作所(〒317 日立市幸町3-11-7)。

2.3 供試材および試験条件 供試材および試験条件を表1に示す。河川水に含まれる土砂は、主成分が石英と長石であるが、河川により異なり、また実験のために同一組成の土砂を長期間にわたり確保することは難しい。したがって河川土砂の代わりに人工土砂(Al_2O_3 粉末)を用いて実験を行った。なお粒径測定は光透過法⁽⁶⁾により行い、50%平均粒径で表示した。代表的な平均粒径 8, 17, 39 μm を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 水中噴流のキャビテーション発生状況の観察 キャビテーション発生状況の肉眼観察は土砂水では困難なので、清水で実施した。キャビテーションの発生状況は、せん光時間 $1\mu\text{s}$ のストロボ撮影で観察した。図2に噴流速度 40 m/s、衝突角度 45° において、キャビテーション係数 σ を変化させたときのキャビテーション発生状況写真を示す。キャビテーション係数 σ は次式で表される。

$$\sigma = (P - P_v) / (\rho V^2 / 2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに P : 試験槽の静圧, P_v : 水の飽和蒸気圧, ρ : 水の密度, V : 噴流速度 (V =流量計の読み/ノズル断面積)。試験片はノズルから 10 mm 離れた位置に設置

表 1 供試材および試験条件

Material	SUS304, Aluminum	
	Silt Use	Al_2O_3
	Silt Concentration (g/l)	0, 10, 30, 50
	Silt Granule Size (μm)	8, 17, 39
	Jet Velocity (m/s)	30, 40
	Attack Angle (deg)	45, 90
	Nozzle Dia. (mm)	2.1
	Stand off Distance (mm)	5, 10, 15, 20
	Test Period (h)	0.5, 4

図 1 水中噴流実験装置

した。水中噴流で観察されたキャビテーションは、乱流のせん断層内に生じる渦状キャビテーション⁽⁴⁾⁽⁷⁾と考えられる。噴流速度 40 m/s において、キャビテーション初生時の σ は 0.5 であることが測定された。

3.2 AE エネルギーによるキャビテーション強さの測定 清水および土砂水の噴流が、試験片に衝突するとき発生する AE エネルギーの測定結果を図3に示す。キャビテーション係数 σ の減少に伴い AE エネルギーは単調に増加し、極大値を持ちその後減少する。また AE エネルギーが零近くなる初生キャビテーション係数 σ は、清水、土砂水ともに 0.50~0.55 の範囲であることが明らかとなった。本実験装置によって土砂摩耗のみを評価するためには、噴流速度 40 m/s では σ を 0.6 以上とすべきことがわかる。また AE エネルギーが最大となるのは、 $\sigma=0.10\sim0.20$ の範囲であり、この範囲では清水に比べ土砂水の AE エネルギーが約 1.3 倍大きいことが明らかになった。複合

図 2 キャビテーション発生状況写真

図 3 キャビテーション係数と AE エネルギーの関係

損傷を評価するには、 $\sigma=0.10\sim0.20$ の範囲で試験するのが効果的である。

3.3 感圧紙により測定した噴流の衝突圧 図4に感圧紙に生じた代表的な衝突圧のパターンを示す。清水、土砂水ともに、噴流の中心部の圧力は、周辺の圧力に比べ非常に低いことがわかる。これは、図2に示されるキャビテーションの発生パターンと一致し、噴流の内部では、キャビティの数は少ないものと考えられる。衝突圧が最大の領域は、清水では噴流の衝突円の上流側(左側)に位置し、ここでは噴流と試験片の間にキャビティが閉じ込められていると考えられる。衝突圧の最大値は、次式で表される噴流衝突の水撃作用による衝突圧 P の $0.55\sim0.65$ 倍である。

$$P = \rho \cdot C \cdot V \cdot \cos 45^\circ \dots \dots \dots (2)$$

ここで ρ : 水の密度, C : 水の音速, V : 噴流速度であり、おのおの 1022 kg/m^3 (30 g/L 土砂水), 1480 , 40 m/s のとき, $P=42.6 \text{ MPa}$ である。測定圧力が式(2)で求まる圧力より低い原因は、 μs という極めて短い負荷時間の衝突圧に対して、感圧紙の感度が低いためと考えられる。また土砂水の場合、清水よりも衝突圧が高く下流側(右側)で顕著であり、最大衝突圧を比較すると清水の 1.17 倍 (AE エネルギー換算 1.37

図4 感圧紙試験結果

図5 キャビテーション係数 σ と侵食量および侵食深さ

倍) となる。このことは AE エネルギーの測定結果と傾向的に一致する。

3.4 複合損傷に及ぼすキャビテーション係数の影響 σ を $0.60\sim0.12$ に変えた場合の侵食量を図5に示す。 σ が 0.2 以上の領域では侵食量に差は認められないが、 0.2 以下では増加することがわかる。先に示した図3, 4から明らかなように、この領域の AE エネルギー、衝突圧は土砂水の場合が大きいことと関連して、土砂摩耗とキャビテーション壊食が相乗した複合損傷により、侵食量が増大したものと考えられる。また既報⁽⁵⁾に述べたように、清水時のキャビテーション単独によるアルミニウム試験片の噴流速度 40 m/s 、衝突角度 45° , $\sigma=0.2$ における試験片表面粗さの増加速度 (MDPR) は $4 \times 10^{-4} \mu\text{m/s}$ ($=1.4 \mu\text{m/h}$) であり極めて小さい。すなわち清水中のキャビテーション壊食が小さい場合でも、土砂が存在すると複合壊食に及ぼす影響は大きいことがわかる。

3.5 衝突距離と侵食量の関係 アルミニウム試験片による衝突距離と侵食量の関係を図6に示す。 $\sigma=0.6$ では衝突距離 10 mm 付近で最大の侵食量を示す。一方 $\sigma=0.12$ の場合、ノズルに近いほど侵食量は大きくなっている。つまり土砂水で $\sigma=0.12$ における噴流のせん断層内に生ずる渦状キャビテーションが、ノズル近傍で大きく損傷に影響を与えていることを意味し、一方 $\sigma=0.6$ で、衝突距離 10 mm は、噴流のコアが消滅する位置と考えられ⁽⁴⁾、損傷量が大きくなっていると考えられる。またこの試験条件において、衝突距離 10 mm では摩耗と複合損傷の差は小さく、 5 mm では複合損傷への影響が大きいことがわかる。

3.6 土砂濃度の影響 試験後の侵食面の外観写真を図7に示す。試験片の中央部の黒くみえるこん跡は、清水または土砂水が試験片に衝突することによ

図6 衝突距離と侵食量の関係

て生じた損傷である。清水による試験片面は $\sigma=0.6$ のときは侵食は認められないが、 $\sigma=0.12$ になるとキャビテーションによりわずかに変色するものの、この試験時間(4h)では侵食孔は生じない。しかし土砂水では侵食孔が広くなり、土砂濃度が大きくなるに従い深くなる。

土砂濃度と侵食量の関係を図8に示す。 $\sigma=0.6$ (摩耗)において、侵食量は土砂濃度が0~30 g/Lまでは増加が著しいが、30 g/L以上ではその傾向が緩やかになる。 $\sigma=0.12$ (複合損傷)においても同一傾向である。粉体における摩耗試験においても同様の結果が示されている⁽⁸⁾。濃度が増えると、砂粒の相互干渉が大きくなり、衝突エネルギーが低下すると考えられる。

一方 $\sigma=0.6$ と 0.12 の侵食量を比較すると、 $\sigma=0.12$ の侵食量が多くなっており、30 g/L 土砂水で約1.3倍キャビテーションにより加速されていることがわかる。すなわち侵食量も AE エネルギーおよび衝突圧の増加と同様の結果を示した。図9に侵食部(ノズル中

心真下)の SEM 観察写真例を示す。写真からわかるように、摩耗こん跡は噴流方向に沿った土砂による掘起しタイプの摩耗である。しかし土砂濃度が大きくなると、摩耗こん跡は平滑化される傾向があり、濃度によって粒子の衝突機構が異なるものと考えられる。

3.7 土砂粒径の影響 土砂粒径と侵食量の関係を図10に示す。 $\sigma=0.6$ および $\sigma=0.12$ における侵食量は、ともに土砂粒径が大きくなると増加している。しかしその増加傾向は粒径が $8\mu\text{m}$ から $17\mu\text{m}$ までは直線的に増加するが、 $17\mu\text{m}$ から $39\mu\text{m}$ 間は緩やかな増加曲線を示す。この結果は山下が七三黄銅を用いて検討した結果⁽⁹⁾と同様である。摩耗に対し複合損傷の侵食量は、各粒径において1.3~1.4倍であり、土砂濃度の影響で得られた加速傾向と同様である。

図11に侵食部(ノズル中心直下)の SEM 写真を示す。まず $\sigma=0.6$ (摩耗)の侵食部は、粒径が大きくなる

Test Material: SUS304 Direction of Jet $\rightarrow$
Attack Angle: 45deg, Silt Granule Size: $8\mu\text{m}$
Stand off Distance: 10mm, Test Period: 4h

図7 侵食面の外観写真

図8 土砂濃度と侵食量の関係

図9 土砂濃度を変えたときの侵食の SEM

図10 土砂平均粒径と侵食量

図 11 土砂粒径を変えたときの侵食部の SEM

に従い、掘起しタイプの切削摩耗こんが大きくなる。
 ・方粒径が $8\mu\text{m}$ の場合、 $\sigma=0.12$ (複合損傷) の侵食面は、 $\sigma=0.6$ (摩耗) と比べて顕著な差はみとめられないが、粒径が大きくなると、摩耗こんのウェッジ部がキャビテーションによる壊食をうけ、局部的に細片化している状態が観察される。また摩耗こんはより平滑化された傾向がみとめられ、摩耗時のみの場合とは損傷パターンが変化していることが明らかになった。

4. 結 言

水中噴流実験装置により、土砂摩耗と複合損傷の実験を行い下記の結論を得た。

(1) キャビテーション発生時 ($\sigma=0.10\sim0.20$)、清水に比べ土砂水の衝突噴流の AE エネルギーは、本実験範囲では約 1.3 倍に増加し、複合損傷作用強さも同等に増加していると考えられる。

(2) キャビテーション発生時、感圧紙で得られた噴流の衝突圧は、噴流の中心では周辺より低く、キャビテーションの発生パターンと一致している。且つ清水に比べ、土砂水の衝突圧は高い値を示す。本試験範囲において清水時の 1.17 倍 (AE エネルギー換算 1.37 倍) である。

(3) 土砂水でキャビテーションが存在するとき、清水の場合より侵食量は増加し、複合損傷作用により加速されることを確認した。

(4) 土砂濃度が増加すると、侵食量は増加し、ある量以上で増加傾向が緩やかになる。本試験範囲にお

いて、土砂濃度 $10\sim30\text{ g/L}$ の範囲では、複合損傷による侵食量は摩耗のみの場合に比べ 1.2~1.4 倍である。

(5) 土砂粒径を変えると、摩耗、複合損傷とも、ある粒径まで直線的に侵食量は増大するが、そのあとは緩やかな増加曲線となる。本試験範囲では複合損傷による侵食量は摩耗のみの場合に比べ 1.3~1.4 倍である。

(6) 複合損傷においては、摩耗こんのウェッジ部がキャビテーションによる壊食をうけ、摩耗のみの場合とは損傷パターンが変化していることが明らかになった。

本研究を行うにあたり、有益なご助言を賜った、東北大学流体科学研究所 大場教授、伊藤助手、東北大学工学部 加藤教授、堀切川助手ならびに実験に協力いただいた(株)日立製作所 佐藤、高安、戸嶋研究員に深謝する。

文 献

- (1) Takagi, T., ほか 2 名, Hydraulic Performance of a Francis-Turbine for Sediment-Laden Flow, *Hitachi Rev.*, 37-2(1988), 115-120.
- (2) Lin Yen-Sheng, Damage of Hydraulic Turbines Operating in Silt-Laden River, *Proceedings LAHR Symp.*, (1988), 683-693, TRONDHEIM.
- (3) Lichtarowicz, A., Erosion Testing with Cavitating Jet, *Proc. Fluids Eng. Conf. Cavit. Eros. Fluids Syst.*, ASME, (1980), 153-161.
- (4) 山崎, 水中噴流まわりのキャビテーション 茨城大学工学部研究集報, 23(1975), 51-58.

- (5) Okamura, T., ほか3名, Erosion Intensity of Submerged Cavitating Jets, *Proc. 9th Int. Symp. Jet Cut. Technol.*, (1988-9), 37-48.
- (6) Sato, J., ほか5名, River Water Use in Silt Erosion Tests and Its Effects on Test Results, *Proc. Int. Symp. large Hydraul. Mach. Assoc. Equip.*, (1989-5), 558-568.
- (7) Knapp, R. T., ほか2名, *Cavitation*, (1970), 232-237, McGraw-Hill Book Co.
- (8) 橋本, 粉粒体における摩耗 (アブレーション) (1974), 75, 産業技術センター.
- (9) 山下, 砂粒混在の流水による金属材料の摩耗に及ぼす砂粒の影響について, 機論, **23**-133(1952), 652-658.
-