

混気ジェットポンプに関する研究

—— 水・泥土の圧送能力について ——

松尾 龍之 西林 清茂

Study on Water Jet Pump with Mixed Air

—— Pumpability with Water and Mud ——

Tatsuyuki Matsuo Kiyoshige Nishibayashi

Abstract

A water jet pump with mixed air is an equipment which sucks in and conveys other fluids by using the fluid energy of spurting water mixed with air at high speed (driving water). This pump is quite suitable as a conveying equipment for excavated soil and sludge which include various obstructive materials because its structure is quite simple and it does not have mechanically moving parts. The theory of the jet pump using pure water (with air not included) has been known for a long time and many studies of pumpability have been made. On the other hand, only a few years have passed since the "water jet pump with mixed air" was designed, and the theory of this pump has not yet been explained. Therefore, the pumpability and conveying capability were tested for this pump concerning water and several kinds of mud, and the pumpability and friction in the tube were investigated by comparing with jet energy and pump energy of sucked fluid.

概 要

混気ジェットポンプは、高速で噴射する混気ジェット水（駆動水）の流体エネルギーを利用して他の流動体を吸込み、圧送する装置である。このポンプには、機械的運動部がなく、構造が極めて簡単であることから、障害物を含むことが多い掘削土やヘドロの搬送装置として適している。空気を混入しないジェットポンプの揚水理論は、古くから知られており、ポンプ性能に関する多くの研究がなされているが、空気を含む混気ジェットポンプについては、この方式が考慮されてから日が浅く、まだ理論的に解明されていない。そこで、混気ジェットポンプを用いて、水や各種泥土を対象とした搬送実験を行い、ジェット噴射エネルギー、吸入流動体の圧送エネルギーを比較することによってポンプ性能、管内摩擦抵抗の算定手法を実験的に検討した。

1. はじめに

混気ジェットポンプは、管内に空気を含んだジェット水を噴射させ、その際に噴射ノズル周辺に発生する真空圧を利用して流動体を吸込み、ジェット流で圧送する装置である。このポンプの基本原理は、古くから知られているジェットポンプと同じであるが、ジェットノズル近くから空気を負圧吸引して混気ジェット流とし、大きな流体エネルギーを利用できるようにしたのが特徴である。ポンプ内部には、従来のポンプのように羽根車や弁機構がないため、建設工事における掘削土やヘドロなど種々の夾雑物や障害物が含まれることが多い土砂の吸引、圧送装置とし期待できる。しかし、混気ジェットポンプシステムが実用化されてからまだ日が浅く、ポンプ能力に関する資料はほとんど見当たらない。

この報告は、混気ジェットポンプを建設工事に適用するに際して重要となるポンプ能力、管摩擦抵抗について実験的に検討したものである。

2. ポンプの構造

混気ジェットポンプの構造は、図-1のように極めて簡

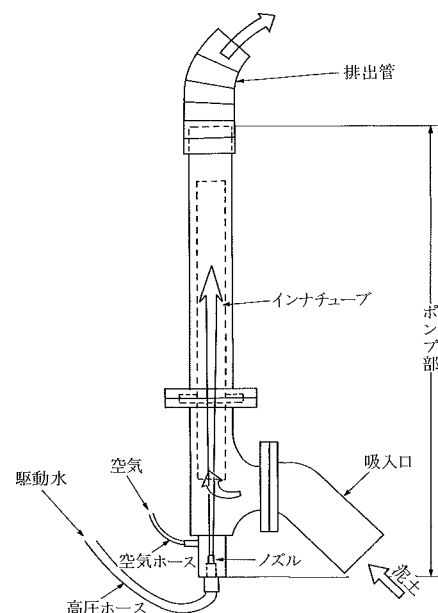


図-1 ポンプの構造

単で、駆動水を高速噴出するノズル部、吸入口がある真空発生部およびジェット流を正確に案内するインナチューブから構成されている。空気導入口は、ノズル近くに設けられており、発生する負圧を利用して大気を自吸する。

3. ポンプ内流体の流れ

混気ジェットポンプの流体の流れは、模式的に示すと図-2のようになる。

ポンプの吸込み能力は、流体のベルヌーイの方程式を参考にすると、噴射ジェット水の流速 V_j とインナチューブ内混合流体の流速 V_i で求めることができ、次のような項目がポンプ能力に影響するものと考えられる。

- ① 駆動水の流量 Q_j
- ② ノズル径 D_j
- ③ ノズル断面積 A_j
- ④ インナチューブ内混合流体の流量 Q_i
- ⑤ インナチューブ径 D_i
- ⑥ インナチューブ断面積 A_i

4. ポンプ圧送実験

混気ジェットポンプの能力を算定するに際しては、上記影響因子の相互関係を求める必要があるため、水や各種の泥土を対象とした能力試験を図-3に示す方法で実施した。

実験に使用した混気ジェットポンプは、写真-1であるが、その仕様を表-1に、また用いた $\phi 3.5$ mm~ $\phi 5.0$ mm の4種類のノズル径における駆動水の吐出量、吐出圧の関係を表-2に示す。

圧送対象試料は、水(単位体積重量 1.00 g/cm³、絶対粘度 3 cp) およびベントナイトとフライアッシュを各種配合比で混合した泥土(含水比 $160\sim 360\%$ 、単位体積重量 $1.15\sim 1.29$ g/cm³、絶対粘度 $200\sim 5,000$ cp) である。

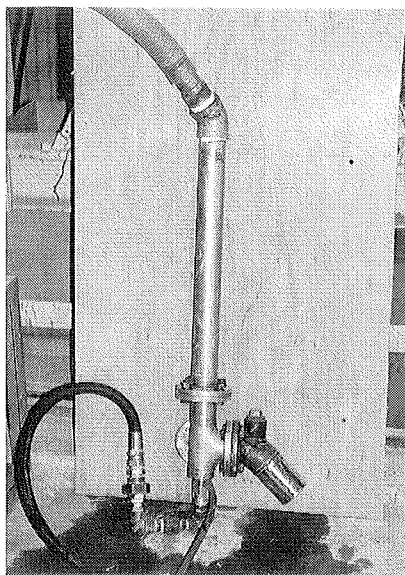


写真-1 実験に使用した混気ジェットポンプ

4.1 ポンプの最大吸入量 $Q_{(max)}$

図-4は、水を圧送対象とした時のジェット噴射エネルギー E_j と $Q_{(max)}$ の関係を求めたものである。 $Q_{(max)}$ は、 $E_j^{1/3}$ の値が大きくなるに従って直線的に増加するが、ある値を超えると一定となる。一定となる $Q_{(max)}$ は、インナチューブ径で決まり、各径によって飽和吸入量 Q_c が存在する。その時の流速は、おおむね 11 m/s であった。

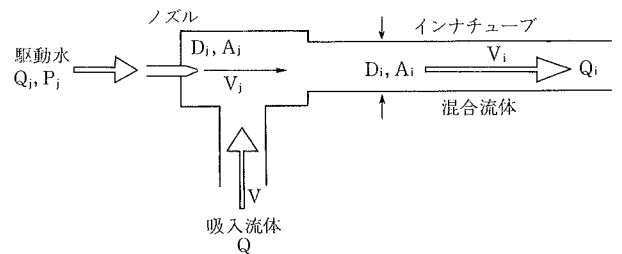


図-2 ポンプ内流体流れの模式図

表-1 混気ジェットポンプの仕様

項目	単位	仕様
ポンプ口径	mm	$\phi 50$
インナチューブ径	mm	$\phi 30, \phi 39, \phi 50$
ノズル径	mm	$\phi 3.5, \phi 4.0, \phi 4.5, \phi 5.0$
駆動用高圧ホース径	mm	$\phi 25$ (耐圧 210 kgf/cm ²)
空気導入ホース径	mm	$\phi 6.5$ (エアーホース)
排出ホース径	mm	$\phi 50, \phi 75, \phi 100$

表-2 各ノズルの吐出圧、吐出量の関係 (ℓ/min)

吐出圧 (kgf/cm ²)	ノズル径 (mm)			
	3.5	4.0	4.5	5.0
50	57.1	74.8	94.4	116
75	70.0	91.7	116	143
100	80.8	106	134	165
125	90.5	119	150	184
150	100	131	166	199

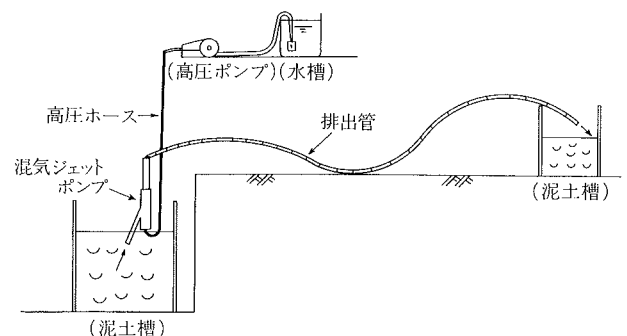


図-3 ポンプ圧送実験概要

従って、 Q_c の値は、

$$Q_c = 6.6 \times 10^5 A_i \quad (\ell/\text{min}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

で求めることができる。

また、 $E_j^{1/3}$ と $Q_{(\max)}$ が一次関係範囲の比例常数 α は、図-5に示すように、ノズルとインナチューブの断面積比 (A_j/A_i) に関係しており、片対数グラフで直線になることから、

$$\alpha = a \log(A_j/A_i) + b \quad \dots\dots\dots(2)$$

の式より得られる。

よって、一次関係範囲の最大吸入量 $Q_{(\max)}$ は、ノズル断面積 A_j とインナチューブ断面積 A_i を知ることでよって

$$Q_{(\max)} = \alpha E_j^{1/3} \quad (\ell/\text{min}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

の関係式より算定することができる。

4.2 ポンプの最大揚程 $H_{(\max)}$

図-6は、インナチューブ径 D_i と $H_{(\max)}$ の関係をノズル径 D_j 別にまとめたものである。 $H_{(\max)}$ は、ノズル径が同じであればインナチューブ径が小さいほど、また同じインナチューブ径であればノズル径が大きくなるに従って増加する傾向があり、ノズル、インナチューブの大きさが最大揚程に関与している。

いま、噴射エネルギー E_j と最大揚程時 ($Q=0$) の圧送エネルギー E_1 の比をエネルギー効率 ρ (E_1/E_j) とすると、 ρ と A_j/A_i の関係は、図-7にみられるように一次関係になり、

$$\rho = c(A_j/A_i) \quad \dots\dots\dots(4)$$

の式より得られる。

従って、ポンプの最大揚程 $H_{(\max)}$ は、

$$H_{(\max)} = \rho E_j / \gamma_w Q_j \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

γ_w : 駆動水の単位体積重量

で算定することができる。

4.3 泥土圧送時の管摩擦抵抗

混気ジェットポンプで吸込み、圧送される泥土は、ジ

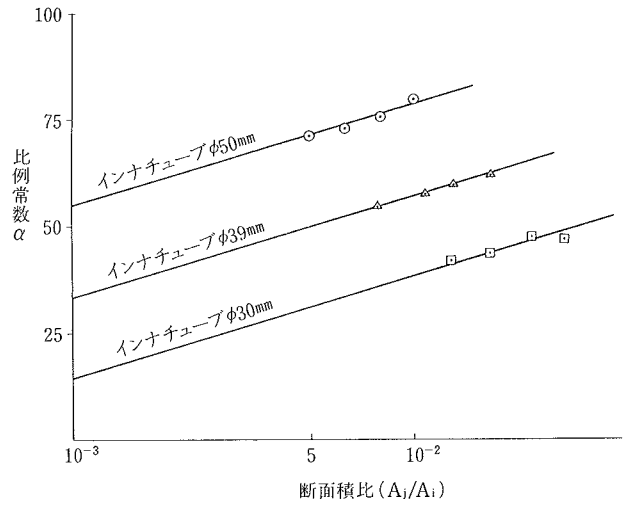


図-5 ノズル/インナチューブ断面積比と比例常数

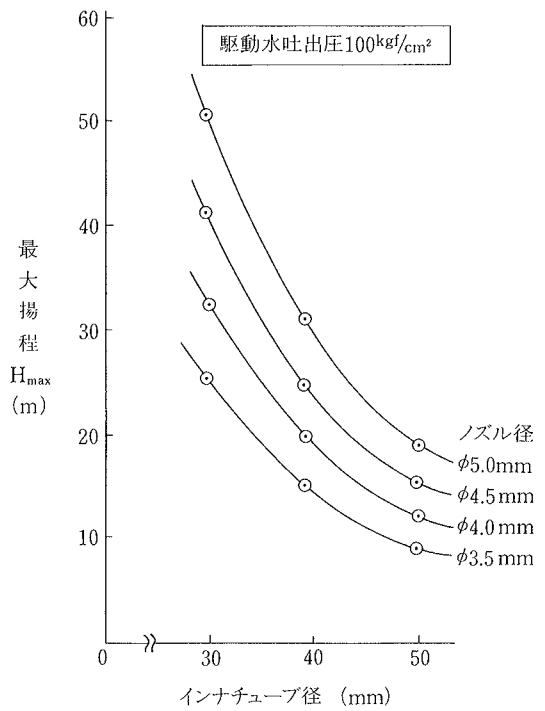


図-6 インナチューブ径と最大揚程の関係

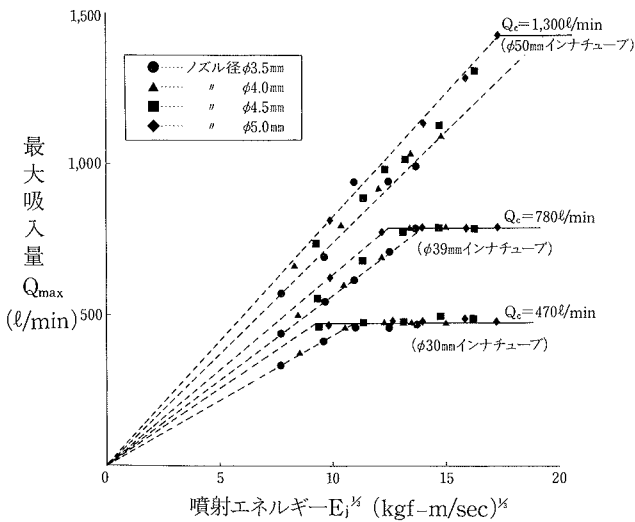


図-4 噴射エネルギーと最大吸入量の関係

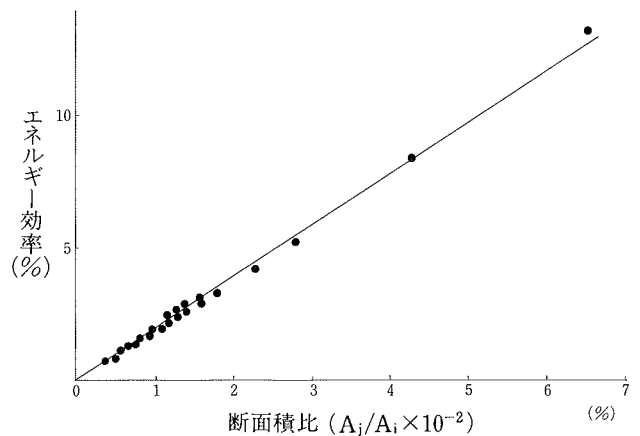


図-7 ノズル/インナチューブ断面積比とエネルギー効率

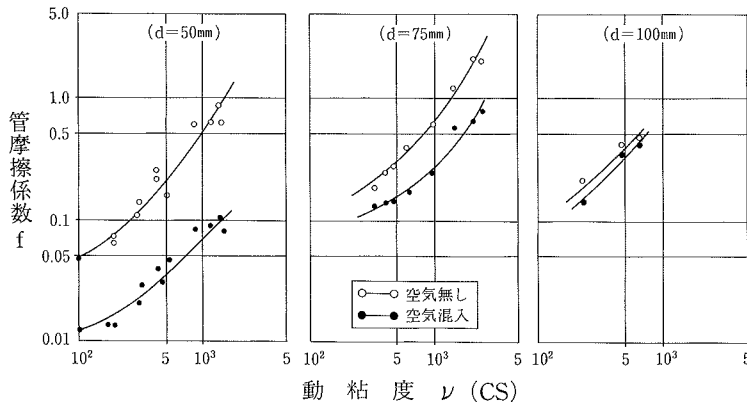


図-8 圧送泥土の動粘度と管摩擦係数の関係

ジェット水との混合流体となって排出管内を流れる。この混合流体をニュートン流体と考えると、流れによって生じる損失水頭 h_f は、次式で表される。

$$h_f = f(l/d)(v^2/2g) \quad \dots\dots\dots(6)$$

- f : 管摩擦係数
- l : 排出管長 (m)
- d : 排出管径 (m)
- v : 排出管内流速 (m/s)
- g : 重力加速度 (m/s²)

f の値は、空気が混入しない場合、層流の範囲で、

$$f = (64/\nu d) \cdot \nu \quad \dots\dots\dots(7)$$

(ハーゲン・ポアズイユの法則)

ν : 動粘度

で算定でき、動粘度に比例し、流速、管径に反比例する。

泥土の圧送実験では、 $d=50$ mm, 75 mm, 100 mm の3種類の排出管を使用し、混気状態での見掛け管摩擦係数 f_s を実験的に調査した。

図-8は、空気を混入しない(7)式で求めた f の値と実験で得られた泥土圧送量から逆算した混気状態での見掛け管摩擦係数 f_s を各排出管径ごとに示したものである。ポンプ口径と同径である $d=50$ mm 管では、空気混入による摩擦低減効果が大き、 f_s の値は f の1/5程度に低減している。しかし、ポンプ口径の2倍である $d=100$ mm 管では、空気混入による低減効果はほとんど見られず、 $f \approx f_s$ となっている。

図-9は、動粘度と流速の $\nu/\nu^{0.25}$ と f_s の関係を求めたものである。各排出管とも多少ばらつきがあるが、ほぼ直線に近似でき、 f_s の値も、動粘度、流速、管径の3つのパラメータから成っていることが推察される。

これらの圧送実験から、圧送流体の中に空気を導入し混気状態にすることは、確かに管摩擦係数を小さくする効果が認められたが、混気ジェットポンプの最適吸引空気量は、ポンプ口径によって決まる要素が強く、空気導入による摩擦低減効果を高めるためには、ポンプ口径と排出管径の組合せが重要である。

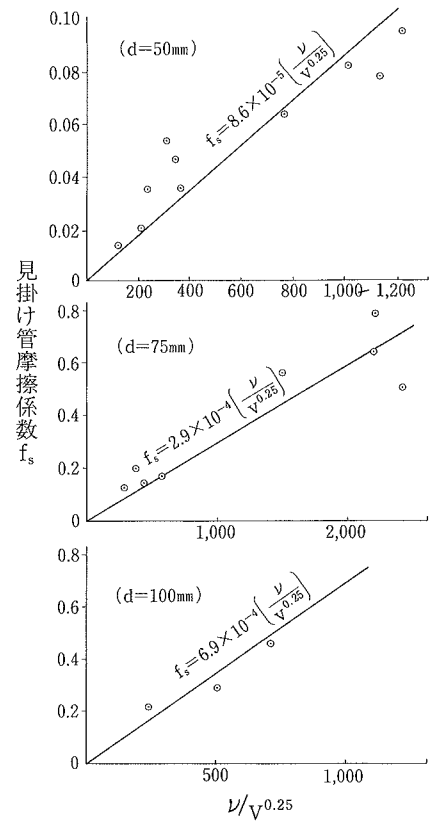


図-9 動粘度、流速と見掛け管摩擦の関係

5. まとめ

- ① ポンプの最大吸入量は、使用しているインナチューブの飽和吸入量以下の場合、ジェット噴射エネルギー E_j の1/3乗に比例する。
- ② 比例常数は、 A_j/A_1 から求めることができる。
- ③ 最大吸入量は、使用しているインナチューブ径によって決まる飽和吸入量 Q_c に収束する。
- ④ Q_c は、インナチューブ断面積に限界流速 11 m/s を掛けることによって求めることができる。
- ⑤ ポンプの最大揚程は、噴射エネルギー E_j に比例する。
- ⑥ 比例常数は、この場合も A_j/A_1 に関係する。
- ⑦ 圧送時の管摩擦係数は、適切な空気量を混入することによって大幅に低減する。

6. あとがき

以上、水と泥土を用いた混気ジェットポンプの圧送実験によってポンプ能力(最大吸入量、最大揚程)、管摩擦係数に対する影響因子を把握し、それらの関係を求めるグラフを得ることができた。

しかし、今回の実験で使用した混気ジェットポンプは口径 50 mm の一種類であり、また、混入空気量によってポンプ能力、管摩擦係数が変化するため、今後は、これらの点に留意して実験を進め、当試験で得られた実験式の精度を高めてゆきたいと考えている。