参考資料

ウズ巻ポンプのスラリー特性試験

Slurry Characteristic Test of Centrifugal Pumps

栗田 賢一郎*

Ken-ichirō Kurita

1. 緒 言

粉体の大量輸送手段の一つとして、しばしばポンプによる水力輸送法が用いられる。また最近では加圧回分式汚過器において、回転形ウズ巻ポンプによる変速変圧汚過操作も多く行なわれるようになった。特に加圧汚過において往復形プランジャポンプによる定速定圧汚過のほかに、ウズ巻ポンプによる変圧汚過も行なわれるが、その理由として考えられるのは、たとえばウズ巻ポンプ

図1 実験装置

(上): 左から 3 PS 同期電動機, スリップリング, ウズ巻ポンプの順

(下): 左からストレインメータ, 電流計, 可変変圧器, 電圧計, 起動抵抗器, 界磁開閉器の順

は、圧力の上昇とともに吐出量がしだいに減少するという特性が、汚過器などの加圧汚過に適しているためである。しかしこの場合、羽根車の摩耗や、振動、騒音の増大、スケールアップの精度が劣るなどの欠点も多い。一般に粉体の水力輸送、もしくは加圧汚過操作においては、使用するウズ巻ポンプの特性が、スラリーの輸送特性、もしくは汚過特性そのものに大きな影響を与える。清水を用いた場合の特性は、Pfleiderer²⁾により理論的にも実験値とよく一致する揚程曲線がえられているが、

さまざまな粘性と固形分の粒度分布をもつ凝集性の異なるスラリーでは、その液体の性質を考慮して、十分な精度の揚程曲線を実験以外に前もって理論的に求めることはまだ困難が多い。したがってたとえば変速変圧汚過特性には、まだかなり不確定な要素の多いウズ巻ポンプの特性が大きな因子として関係してくる以上、そのスケールアップには、慎重な取扱いが必要である。ウズ巻ポンプのスケールアップ法は、いわゆる模形則 (das Modellgesetz)¹⁾ として知られている。この報告においては、まず水力機械の一つとしてのウズ巻ポンプの特性にこの模形則を適用して一連の実験を行ない、非沈降性および沈降性を著しく示す2種類のスラリーの、濃度を変えた場合の理論値と実験値とを比較して理論式の精度を確かめた。その結果かなり精度の良い結果がえられたので次に報告する。

2. 実 験

2.1 実験装置と実験方法

ポンプ特性試験には、原形用・模形用2種類のウズ巻ポンプを使用、かつ原形・模形間の幾何学的力学的相似性をつねに確保するようにした。すなわち吐出孔における各スラリーに対す

* 株式会社栗田機械製作所技術部(大阪府大阪市西区北堀川町3丁目61)
TEL. 06-541-3001~3005

図2 粉体の粒度分布

図3 粘土スラリーによる模形ウズ巻ポンプの吐出揚程曲線

るレイノルズ数をつねに原形・模形とも等しくなるようにしてポンプ運転条件を定めるとともに、羽根車ウズ室輪、ウズ形室内の形状および仕上げ精度を含む液流路を幾何学的に相似になるようにした。また回転数を負荷の変動に対して一定に保つために図1のように3PSの同期電動機を採用し、ポンプにこれを直結させた。この実験においては、スラリーに用いる粉体を非沈降性型と沈降性型とに分けて考え、これまでの多くの実験結果に基づき、非沈降性物質には淀川粘土、沈降性物質には石

図4 石こうスラリーによる模形ウズ巻ポンプの吐出揚程曲線

こうを使用した。その粒度分布は図2に示すとおりである。これら2種類の粉体をそれぞれ清水に懸濁させてかきまぜ、その濃度を0.05, 0.10, 0.15, 0.20に調整した。ポンプ回転数は1800[rpm]、またその回転数の変動は負荷時におけるストロボスコープの測定では±0.1%以下である。圧力測定には閉管水銀マンノメータを用い、流量測定には吐出スラリーを一定の容器に受けてその重量と密度を測定して行なった。また実験前後のスラリー温度もあわせ測定した。なおウズ巻ポンプの特性試験の方法は、JIS B 8301-1958「ウズ巻ポンプおよび軸流ポンプ試験方法」に従った。

2.2 実験結果

図3から図6の点綴は濃度別スラリーの吐出揚程を清水水頭に換算した実験値を示している。図3は非沈降性物質として淀川粘土を用いたスラリーに対する模形実験値であり、図4は沈降性物質として石こう($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$)を用いたスラリーに対する模形実験値である。また図5と図6の点綴はおのおののスラリーに対する原形ポンプでの試験値である。原形ポンプでは、吐出量が増大するにつれてその吐出揚程の実験値は理論値より低くなっているが、一般的には各スラリーの清水換算水頭は

図5 粘土スラリーによる原形ウズ巻ポンプの吐出揚程曲線

図6 石こうスラリーによる原形ウズ巻ポンプの吐出揚程曲線

理論水頭とよく一致している。

3. 理 論

粉体の水力輸送、もしくはスラリーの戸過器への圧入操作においては、ウズ巻ポンプの主として吐出圧だけが関係してくる。Pfleiderer²⁾によれば、羽根車の羽根数 z [-]のときの理論的にえられる揚程を H_{thx} とし、これから羽根車、ウズ室輪、ウズ形室の各部の摩擦損失 h_{rx} 、流れの方向が急変することによって生ずる衝撃損失を h_{sx} とすれば、揚程曲線 H [m]は

$$H = H_{thx} - \Sigma(h_{rx} + h_{sx}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

で計算することができる。

いまポンプの吐出圧を P [Kg/cm²]、吐出量を Q_0 [m³/sec]、スラリーの比重を ρ_s [-]、ポンプ回転数を n [rpm]とすれば

$$10P/\rho_s = H = k_1 n^2 - k_2 n Q_0 + k_3 Q_0^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで s [-]はスラリー濃度で、係数 k_1 、 k_2 、 k_3 はいずれも次式で求められる。

$$k_1 = \frac{\pi^2}{60^2 g} \left\{ \frac{D_2^2}{1+p} - \frac{\varphi}{2} D_1^2 - \frac{\varphi}{2} \frac{D_2^2}{D_4^2} \frac{1}{(1+p)^2} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$k_2 = \frac{1}{60g} \left\{ -\frac{\cot \beta_2}{b_2(1+p)} + \varphi \frac{D_2^2}{D_4^2} \times \frac{(1+p) \cot \alpha_3 + \cot \beta_2}{b_2(1+p)^2} + \frac{\varphi \cot \beta_1}{b_1} \frac{t_1}{t_1 - \sigma_1} \right\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$k_3 = \frac{(1-\eta_n)}{g} \frac{(1+p) \cot \alpha_3 + \cot \beta_2}{\pi^2 D_2^2 b_2^2} \times \cot \alpha_3 + \frac{\varphi}{2g} \left\{ \frac{(1+p) \cot \alpha_3 + \cot \beta_2}{(1+p) \pi D_4 b_2} \right\}^2 + \frac{\varphi}{2g} \left(\frac{\cot \beta_1}{\pi D_1 b_1} \right)^2 \left(\frac{t_1}{t_1 - \sigma_1} \right)^2 \quad \dots\dots\dots 5)$$

(3)、(4)、(5)式はPfleidererの式を若干変形したものであり、式中の g [m/sec²]はこの場合重力の加速度を示し、 p 、 φ 、 η_n は経験によって定まる定数である。その他の記号を説明すると

- D_1 [m] 羽根車入口円直径
- D_2 [m] 羽根車出口円直径
- b_1 [m] 入口みぞ幅、 b_2 [m] 出口みぞ幅

表1 ウズ巻ポンプの理論的揚程曲線の係数値 ($n=1800\text{rpm}$)

規 模	流 体	$k_1 n^2$	$k_2 n$	k_3
模 形	清 水	15.4296	808.4221	-3282403.763
	CaSO ₄ $s=0.05$	14.9950	785.6539	-3189958.758
	$s=0.10$	14.5603	762.8783	-3097483.969
	$s=0.15$	14.1258	740.1100	-3005038.691
	$s=0.20$	13.6912	717.3413	-2912591.961
	Clay $s=0.05$	15.0136	786.6247	-3193900.772
	$s=0.10$	14.5975	764.8270	-3105396.179
	$s=0.15$	14.1817	743.0350	-3106915.221
	$s=0.20$	13.7657	721.2452	-2912591.961
	原 形 清 水	19.5578	-67.0134	688259.035
	CaSO ₄ $s=0.05$	19.0070	-65.1260	668375.037
	$s=0.10$	18.4560	-63.2380	649484.793
	$s=0.15$	17.9052	-61.3507	630103.737
	$s=0.20$	17.3543	-59.4633	610716.377
原 形	Clay $s=0.05$	18.9758	-65.0192	667778.275
	$s=0.10$	18.3938	-63.0251	647298.017
	$s=0.15$	17.8119	-61.0311	626818.305
	$s=0.20$	17.2315	-59.0369	606336.862
模 形	H_{thx}	23.11043	-4091.9392	0
	h_{r1x}	0	0	498441.056
	h_{r2x}	0	0	1854706.887
	h_{s1x}	0.81445	-1132.3083	393555.641
	h_{s2x}	6.8664	-3768.053	516944.81
原 形	H_{thx}	32.31661	-3270.652	0
	h_{r1x}	0	0	123064.346
	h_{r2x}	0	0	448002.307
	h_{s1x}	1.3937	-739.641	98134.550
	h_{s2x}	0	0	19057.834
模 形	H_x	$4.762 \times 10^{-6} \times n^2$	$0.4491 \times n$	3282403.763
	原 形 H_x	$6.036 \times 10^{-6} \times n^2$	$-0.0373 \times n$	-659638.04

- β_1 [—] 羽根の入口角
 β_2 [—] 羽根の出口角
 b_4 [m] ウズ形室入口円みぞ幅
 l_2 [m] 吐出部長さ
 ρ_1 [m] 吐出部入口円直径
 ρ_2 [m] 吐出部出口円直径
 σ_1 [m] 入口円周方向羽根厚さ
 σ_2 [m] 出口円周方向羽根厚さ
 t_1 [m] 羽根車入口円周上の羽根間隔
 t_2 [m] 羽根車出口円周上の羽根間隔
 α_3 [—] ウズ形室入口円上の絶対速度と円周速度とのなす角

である。(3), (4), (5)式の k_1 , k_2 , k_3 の理論値を求めると表1のようになる。また図3から図6に示した H_{th} [m] は、羽根車の羽根数 z [—] のときの理論揚程, h_r

[m] は摩擦損失, h_s [m] は衝撃損失を示す。また添字 1 は羽根車入口を, 添字 2 は羽根車出口, 添字 3 はウズ形室入口, 添字 4 はウズ形室出口を示す。すなわち清水がポンプ内を流れる場合

- h_{s1x} …… 羽根車入口での衝撃損失 [m]
 h_{s2x} …… 羽根車出口での衝撃損失 [m]
 h_{r1x} …… 羽根車内の全摩擦損失 [m]
 h_{r2x} …… うず室輪内の全摩擦損失 [m]
 h_{r3x} …… うず形室内の全摩擦損失 [m]

などの水頭損失を伴うのである。

(3), (4), (5)式から

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= k_{11} - \varphi k_{12} \\ k_2 &= -k_{21} + \varphi k_{22} \\ k_3 &= k_{31} - \eta_h k_{32} + \varphi k_{33} - \varphi k_{34} \\ k_{ij} &> 0 \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

ここに, おおのこの式の右辺中, k_{ij} は前述のごとくポンプ各部の詳細は寸法およびポンプ各部をよぎる流れの速度三角形により定まる定数であり, φ , η_h は液体ごとに経験によって定まる定数となる。図3と図4に示すように, スラリー吐出揚程を各濃度とも清水水頭に換算すると同じ値になることは, (6)式中の液体ごとに経験によって定まってくる定数 φ , η_h が清水での値とあまり変化していないためである。そしてこのような場合吐出揚程曲線は, 清水での吐出揚程曲線に対して, ほぼスラリー比重にのみ比例して図7の

ように変化するだけと考えてよい。模形ポンプでは, 特性はこの傾向と一致しているが, 図5と図6に示すような大形の原形 (prototype) のポンプ特性では少し異なり, その吐出揚程は吐出量の増大につれて Pfeiderer の理論値よりかなり偏倚して低下している。これは, 吐出量 Q_0 の二乗に比例して増大する水頭損失が, 理論値より実際値の方がこの場合かなり大きいことを示している。この原因は, 筆者の研究³⁾によれば次のように説明することができる。図8に示すように, スラリーが羽根車の入口において半径方向に流入し始めると, 液体部分は液体自身の衝撃損失を伴いながらも, ほぼ羽根と同形の流路を形成すると考えられる。しかし固形微粒子群, すなわち液中の粉体は, 液体にたとえば水の分子群に比べて大きな運動量をもっているので, 粘性の影響を受けながらも液体の流路には直ちには沿いえず, 図10におけ

図7 濃度別揚程曲線(淀川粘土スラリー)

図9 羽根車内の有効通路面積

図8 羽根車内の流れ

る羽根車の回転方向に対して相対的に遅れた位置をたどりながら、羽根車内を進行するものと考えられる。この遅れた固形粒子群は当然図8において斜線を施したうず部に集てくることが考えられる。もっとも、この分離傾向は粉体の母液に対する沈降性の大小に関係があり、またこれは粉体の粒度分布、粉体の母液に対する凝集性と粉体の圧縮性などによって影響を受けるものと考えられるが、いまこれらを簡単化して図8の状態に近いものを考える。

ここで、さらに計算の便宜のために粉体は羽根の曲線と同型に図9のごとくに分離するものとし、また固形分は母液から完全に分離するものと考えて、この有効通路面積減少の割合を計算すると、(6)式中の k_3 の値を

$$\left. \begin{aligned} k_3 &= k_{31} - \eta_n k_{32} - \varphi k_{33} + q^{-3} \varphi k_{34} \\ q^{-3} &= \left(1 + \frac{\rho_s}{\rho} \cdot \frac{1-s}{s} \right)^{-3} \geq 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

図10 ウズ巻ポンプ内の固形粒子の分散状態

の補正を加える必要がある。ここで ρ_s [—] は粉体の比重、 ρ [—] は母液比重、 s [—] はスラリー濃度、 q [—] はスラリー固形分の容積濃度である。しかしながら、(7)式の修正はスラリー内の固形粒子がすべて完全に羽根車内で分離したと仮定しての近似的な補正であり、定量的には実験値に応じて q の値を定めなければならない。一般的傾向として、同一粉体についてのスラリーでは、濃度 s の増大につれて図11のごとく吐出揚程曲線は吐出量の増大とともに急激に低下する。

4. 結 言

スラリーの沈降現象に着目して、非沈降性粉体と沈降性粉体に分けて、ウズ巻ポンプの模形・原形特性試験を行なった。

$\rho_c = 1.25$

	液 体	スラリー密度	容積濃度 q
①	清 水	1.000 $[\frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}]$	1.00 $[-]$
②	$s=0.05[-]$	1.010	0.960 $[-]$
③	$s=0.20[-]$	1.042	0.834 $[-]$
④	$s=0.40[-]$	1.087	0.653 $[-]$
⑤	$s=0.60[-]$	1.136	0.455 $[-]$
⑥	$s=0.80[-]$	1.190	0.244 $[-]$

図11 有効通路の仮定に基づく吐出揚程曲線の変化

(1) 模形実験では、この研究で用いたスラリーでの実験値は、Pfleiderer の式から計算される理論値と終始良好な近似をうることができた。

(2) しかし、原形ポンプでの実験では、スラリーの沈降性に応じて差はあるがポンプ吐出量の増大とともにその吐出揚程が Pfleiderer 式より偏倚する傾向が認められた。また、この種の偏倚現象の原因、およびこうした現象の生じた場合の補正法について論じた。

したがって、土砂、微粉炭、セメント、その他の微

鉱、パルプ、コットレルダスト、転炉ダストなどの粉体の水力輸送、もしくはそれらのスラリーをウズ巻ポンプで汙過する場合、ポンプ規模の大小にかかわらず、最高効率点もしくは若干それ以下の吐出量でポンプを運転する方が、吐出圧特性の安定性を増すことが指摘できる。また、最高効率点以上の吐出量を使用する場合、吐出量の二乗 Q_0^2 に比例して増大する損失水頭を予め実験で知ることができれば、スラリーの非沈降性、沈降性にかかわらず、ポンプ特性を正確に制御することができ、水力輸送、もしくは加圧汙過操作でのポンプ圧力の理論的取扱いも可能となる。

引 用 文 献

- 1) 植松時雄：“水力学” p.212, 産業図書 (昭35)
- 2) Pfleiderer, C. : “Die Kreiselpumpen” S. 168, 402, Springer-Verlag (1961)

- 3) 栗田賢一郎：“渦巻ポンプの特性に関する理論的研究” p. 24, 大阪大学工学部卒業論文 (昭29)

<特許・実用新案公報>

- 実公昭41-22213 造粒機の回転胴
 22394 乾式サイクロン除塵装置
 22547 波型分級装置
 23977 高放射能試料破碎装置
 23985 ペンチューリースクラパー
 特公昭42- 5509 反撥型脱塵装置
 5511 回転式ガスならびに微粒子吸収機
 5627 上下相反方向の旋回気流の接触境界を利用する脱塵方法およびその装置

- 5633 湿式除塵装置
 6472 集塵効率測定装置
 6473 縮合集塵装置
 6475 電気炉排ガスの集塵方法およびその装置
 6479 集じん装置 (サイクロン)
 6970 粉体層の流動化法
 実公昭42- 4463 核成器