

浚渫砂礫の混気圧送時における流動観察と 圧力損失に関する研究

Observation and Pressure Loss of Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flows
in Horizontal Pipes for Suction-Dredging on Gravel Beds

益山 忠¹・飯田 宏²・泉 信也³

Tadashi Masuyama, Hiroshi Iida and Shinya Izumi

¹正会員 工学博士 東海大学教授 海洋学部海洋資源学科 (〒424-0902 静岡県静岡市清水折戸三丁目 20-1)

²非会員 東亜建設工業株式会社 土木本部 機電部 (〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町 1-3)

³非会員 信幸建設株式会社 技術部 技術Ⅱ課 (〒102-0032 東京都千代田区岩本町二丁目 1-15)

The evaluation of the pressure loss under various conditions gives one of the great influences for the design of the hydraulic transportation system for dredging on gravel beds. The field monitoring was conducted to get the pressure loss of gas-liquid-solid three-phase flows for the new design approach with respect to the hydraulic transportation system for dredging on gravel beds. This paper describes the estimation method of pressure loss on the basis of Ryu's model of the flow. The proposed pressure loss estimation method in horizontal pipe flow is well corresponding with the pressure loss at actual operation with a diameter of 860mm.

Key Words: suction dredging, soil-and-sand delivery, pressure loss, gas-liquid three-phase flow, slug flow, horizontal pipes

1. はじめに

ポンプ浚渫船を用いた浚渫埋立工事は、高度経済成長を背景に、大型船舶が入港できる航路や泊地を掘削するとともに、浚渫土砂により大規模な臨海工業用地を造成できる方法として各地で盛んに行われてきた。しかし、社会環境や経済状況の変化により大規模な工事が減少している昨今では、ポンプ浚渫船への新規投資が難しくなっている。そのため、新規に計画される難工事に対して、既存設備の能力が不足する恐れがある場合には、汎用機械との併用により既存の浚渫船の能力を活かしながら、設備費の縮減をはかる必要がある。それゆえ、本研究は、既存のポンプ浚渫船の能力活用に資することを目的とし、スラリー輸送管路途中からの圧縮空気注入による搬送能力（搬送距離の延長等）の向上を調べるとともに輸送時の圧力損失の推定を試みたものである。すなわち、本研究は、実工事でのスラリー輸送管内の流動現象を調べるとともに、砂礫排送時の気液固三相流れによる圧力損失算定式の構築を試みたものである。

さて、浚渫に関連した混気圧送の解析法の例としては、浚渫軟泥をビンガム流体などの非ニュートン

流体とした気液二相流として解析する方法^{1), 2)}と浚渫土砂、搬送流体及び圧気による気液固三相流として解析する方法³⁾⁻⁹⁾とがある。本研究では砂礫を対象としているので粒子径が大きいことから気液固三相流による解析法が有効であると考えられる。また、劉ら⁹⁾の圧力損失の評価方法が参考になると考えられる。なお、劉ら⁹⁾が提案している流動モデルは、管下部には堆積層が存在し、液体スラッグの通過により粒子が浮遊し輸送され、かつ、気体スラッグが通過する際には管下部の粒子群は静止しているとするモデルである。一方、本研究が対象としている流速範囲では、気体スラッグが通過する際にも管下部の粒子群は摺動状態にて移動していることが、後述の流動観察によって確認された。それゆえ、気体スラッグ部における固体粒子の流動を評価し得るモデルを基に、圧力損失算定式を構築する必要があると考え、式の導出を試みた。

2. 砂礫質浚渫土混気圧送の圧力損失算定式

後述の流動観察から、図-1に示されるような固体粒子が連続的に移動する気液固三相流の流れは、摺動粒子を伴う気体スラッグ（以下、気体部と記す）と

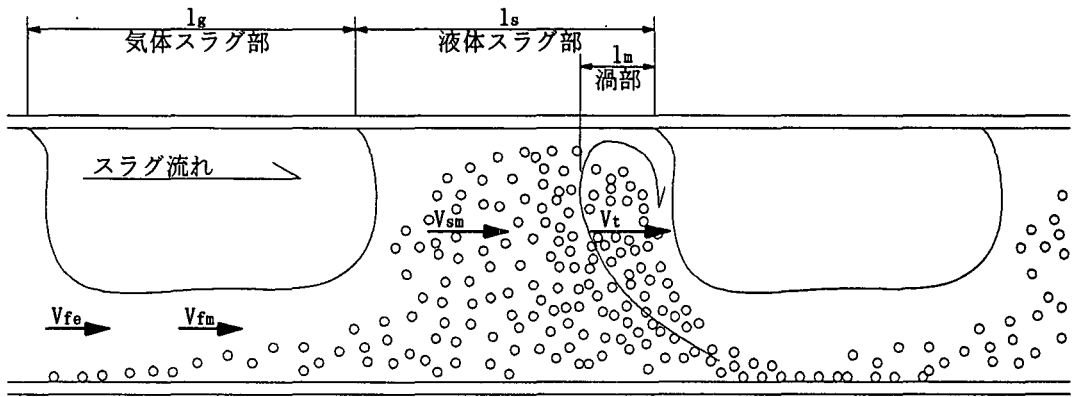


図-1 スラグ流モデル図

固液スラグ（以下、液体部と記す）とが交互に通過する流れである。この流れの圧力損失 ΔP は、液体部の圧力損失 ΔP_1 と気体部の圧力損失 ΔP_2 との和として与えられる¹⁰⁾。

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (1)$$

(1) 固液スラグの圧力損失

液体部の圧力損失の算定には、劉ら⁹⁾によって求められた式すなわち、式(2)を用いる。

$$\Delta P_1 = \frac{1}{l_s + l_g} \left[(\lambda_l + \lambda_f) \cdot (l_s - l_m) \cdot \frac{\rho_f \cdot V_{sm}^2}{2 \cdot D} + \rho_f (V_{sm} - V_{fm})^2 \right] \quad (2)$$

式(2)は気液二相流における Dukler ら¹¹⁾のスラグ流モデルを気液固三相流へ拡張して得られたものである。すなわち、右辺大括弧内第1項は固液部における搬送流体の圧力損失と粒子を輸送するために増加する付加圧力損失との和を表し、第2項は気体部により固液相が加速されるために生じた渦による圧力損失を表している。また、液体部の圧力損失を ΔP_1 [Pa/m]、摺動層を伴う固液二相流の管摩擦損失係数を λ_l [-]、搬送流体の管摩擦損失係数を λ_f [-]、混合渦の長さを l_m [m]、搬送流体の密度を ρ_f [kg/m³]、管内径を D [m]と表している。

(2) 気体スラグの圧力損失

気体部の固液二相が流動している場合には、劉ら⁹⁾の場合とは異なり、気体部の圧力損失は無視し得ないと考えられる。流動観察によれば、この気体部分の流動は、気体の流れと固液二相流との層状流に酷似している。このことから、層状流モデルによる圧力損失の推定を試みる。すなわち、層状流の圧力損失 ΔP_f [Pa/m]は式(3)に示される二相流摩擦損失増倍係数 ϕ_f^2 [-]との関係より求める。さらに、係数 ϕ_f^2 は、式(4)に示す Chisholm¹²⁾の式より、また、式(4)中の Lockhart-Martinelli¹³⁾のパラメータ X [-]は、乱流流れに適用される式(5)より算出する。

$$\Delta P_f = \phi_f^2 \cdot \Delta P_{f0} \quad (3)$$

$$\phi_f^2 = 1 + \frac{20}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (4)$$

$$X = \left(\frac{G_l}{G_g} \right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_l} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (5)$$

ここに、 G_l [kg/m²s]及び G_g [kg/m²s]は固液二相及び気体の質量速度を、 γ_l [-]及び γ_g [-]は固液二相及び気体の比重を表す。また、 μ_l [Ns/m²]及び μ_g [Ns/m²]は、固液二相及び気体の粘性係数である。

一方、式(3)中の圧力損失 ΔP_{f0} [Pa/m]は、気体部の下部を流れる固液二相流の見掛け速度 V_{gl} [m/sec]における固液二相流の圧力損失である。堆積層を伴う流れとなる場合を含めるため、Durand-Condolios¹⁴⁾の式を用いるとすれば、式(6)のように表される。

$$\Delta P_{f0} = \left[1 + 81 \cdot C_v \cdot \left(\frac{V_{gl}^2 \cdot \sqrt{C_D}}{g \cdot D \cdot (\gamma_s - 1)} \right)^{-1.5} \right] \cdot \frac{\lambda_f \cdot V_{gl}^2}{D \cdot 2} \cdot \rho_f \quad (6)$$

ここに、 C_D [-]、 C_v [-]及び γ_s [-]は、それぞれ粒子の抗力係数、真容積含泥率（吐出体積濃度）及び粒子の比重を表す。従って、気液固三相流における気体部が占める圧力損失は、式(7)より算出される。

$$\Delta P_2 = \frac{l_g}{l_s + l_g} \cdot \phi_f^2 \cdot \Delta P_{f0} \quad (7)$$

従って、気体部の固液二相流が流動している気液固三相流の圧力損失式として式(1)、(2)、(7)より次式を得る。

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

$$= \frac{1}{l_s + l_g} \left\{ \left[(\lambda_l + \lambda_f) \cdot (l_s - l_m) \cdot \frac{\rho_f \cdot V_{sm}^2}{2 \cdot D} + \rho_f (V_{sm} - V_{fm})^2 \right] + l_g \cdot \phi_f^2 \cdot \left[1 + 81 \cdot C_v \cdot \left(\frac{V_{gl}^2 \cdot \sqrt{C_D}}{g \cdot D \cdot (\gamma_s - 1)} \right)^{-1.5} \right] \cdot \frac{\lambda_f \cdot V_{gl}^2}{2 \cdot D} \cdot \rho_f \right\} \quad (8)$$

一方、式(8)中の λ_l 、 l_s 、 l_g 及び l_m については、次のように推算する。

液体部の固液二相流の管摩擦損失係数 λ_l は、劉ら⁹⁾と同様に Turian ら¹⁵⁾の式すなわち、次式より算出する。

$$\lambda_f = \lambda_f + 0.9857 \cdot C_v^{1.018} \cdot C_D^{-0.4213} \cdot \left[\frac{V_{sm}^2}{D \cdot g \cdot (\nu_s - 1)} \right]^{-1.354} \cdot \lambda_f^{0.046} \quad (9)$$

なお、搬送流体の管摩擦損失係数 λ_f は、滑面管の場合にはカルマン・ニコラッセの式¹⁶⁾より、また、粗面管の場合にはムーディ¹⁶⁾線図より求める。

固液スラグ長さ l_s は、次式¹⁰⁾により算出する。

$$l_s = V_i \cdot \left(\frac{1}{\nu_s} - t_g \right) \quad (10)$$

また、上式の液体部先端の局所速度 V_i は Dukler ら¹¹⁾による式(11)より算出する。さらに、気体スラグの通過時間 t_g [sec] 及びスラグの周波数 ν_s [1/sec] は、現時点では、スラグ流の画像解析などより実験的に求めた値を用いることとする。

$$V_i = (1+c) \cdot V_{sm} \quad (11)$$

式(11)に使われている係数 c も Dukler ら¹¹⁾により提案されている次式を用いて求める。

$$c = 0.021 \cdot \log R_{es} + 0.022 \quad (12)$$

なお、液体部のレイノルズ数 R_{es} は次式¹¹⁾より算出する。また、式中の ν_f は、搬送流体の動粘性係数を表す。

$$R_{es} = \frac{D \cdot V_{sm}}{\nu_f} \quad (13)$$

一方、気体スラグ長さ l_g は、次式¹¹⁾より算出する。

$$l_g = V_i \cdot t_g \quad (14)$$

さらに、混合渦の長さ l_m は Dukler らの式¹¹⁾、すなわち、次式より求める。

$$l_m = \frac{0.3 \cdot (\nu_{sm} - \nu_{fs})^2}{g} \quad (15)$$

また、上式中の固液スラグ部における平均速度 V_{sm} は次式に示す Dukler らの式¹¹⁾より算出する。

$$V_{sm} = 1.225 \cdot (V_{sl} + V_g) \quad (16)$$

なお、上式中の V_{sl} 及び V_g は、それぞれ固液スラグ

の見掛け速度（スラリー流速）及び気体スラグの見掛け速度を表す。

一方、式(10)中のスラグの周波数 ν_s は、劉ら⁹⁾と同様に、Gregory ら¹⁷⁾による式(17)を参考にして、実験より求めた実験式すなわち、式(18)を用い算出する。

$$\nu_s' = 0.0226 \left[\frac{V_{sl}}{g \cdot D} \cdot \left(\frac{19.75}{V_{sm}} + V_{sm} \right) \right]^{1.2} \quad (17)$$

$$\nu_s = 0.878 \left[\frac{V_{sl}}{g \cdot D} \cdot \left(\frac{19.75}{V_{sm}} + V_{sm} \right) \right]^{0.74} \quad (18)$$

気体部における流体の平均速度は、劉ら⁹⁾にならい、次式より求める。なお、気体部の固液体積率を α_{gl} とする。

$$V_{fm} = V_{sm} \cdot \left[1 - c \cdot \left(\frac{1 - \alpha_{gl}}{\alpha_{gl}} \right) \right] \quad (19)$$

3. 実験結果並びに考察

(1) 実験装置及び実験試料

本実験は、図-2 にその概略を示すモデル実験装置と北海道 T 港でのポンプ浚渫船「第三垂細垂丸」とによって行った。実験装置は、スクリュウ式粒子供給装置、水中サンドポンプ、電磁流量計、 γ 線密度計、供試管、コンプレッサなどからなっている。供試管は、実工事における陸上管の約 1/9 スケールを想定した内径 100mm の塩化ビニル管と流動観察用透明アクリル管であり、100m の直線区間を 2カ所有している。また、圧力計は、ポンプ出口から 8.4m の位置より約 30m 間隔にて 4 台、折り返しベンドからも 1m の位置より約 30m 間隔にて 4 台取り付けられている。さらに、空気注入孔はポンプ出口より 38.4m の所に、長さ 2m のアクリル管は測定区間内に設けてある。

浚渫船の吐出し口は、内径 860mm、長さ約 2000m の陸上管に接続されている。また、流動観察用透明アクリル管は陸上管路の吐出し口より約 200m 上流に設けた。空気注入孔はポンプ出口より約 960m の所に、また、圧力計は、空気注入孔より下流 54m の所から測定区間 750m として取り付けられている。

陸上実験の実験試料としては、比重 2.632、平均粒径 1.2mm の砂を用いた。一方、浚渫土の砂礫分は、比重 2.755、平均粒径 0.7mm であり、また、浚渫土には、150 μ m 以下のシルト分が 60% 含まれている。

(2) 実験方法

モデル実験装置では、管内流速及び砂礫含泥率が所要の値になるようにポンプ回転数並びに粒子供給装置のスクリュウ回転数を調整し、スラリーを管路

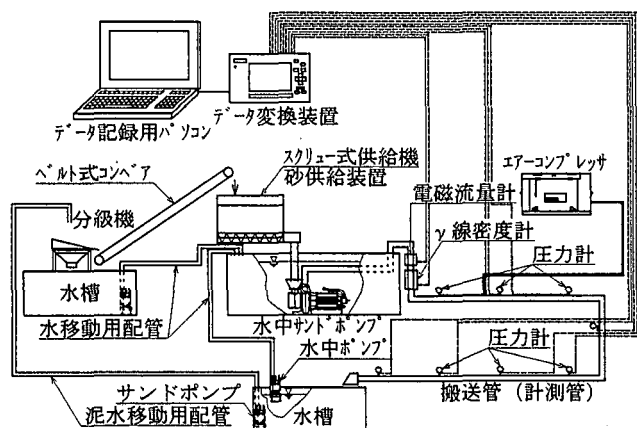


図-2 実験装置システム図

内に流送する。流れが安定した後、圧力損失を測定する。その後、この流れに所要の空気量を注入し、目視とビデオカメラとにより流動状態を調べると

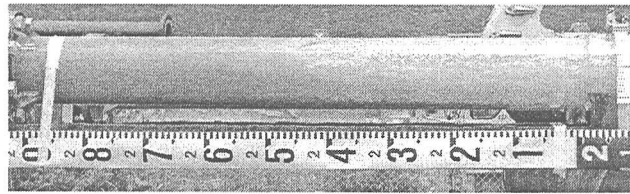


写真-1 固液スラグ後端部 配管φ100mm

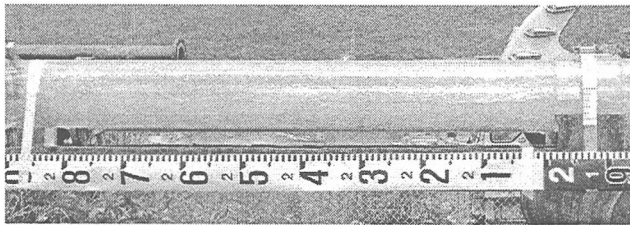


写真-2 気体スラグ部 配管φ100mm

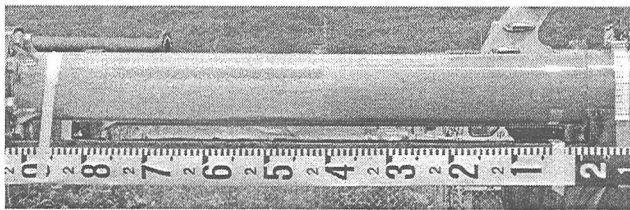


写真-3 固液スラグ先端部 配管φ100mm

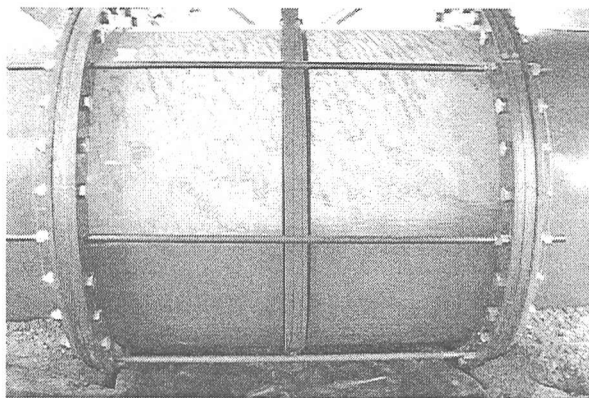


写真-4 気体部スラグ状況 (配管φ860mm)

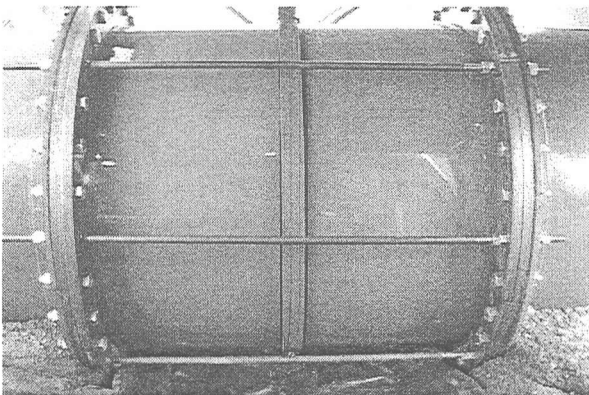


写真-5 固液部スラグ状況 (配管φ860mm)

実工事の実験では、所要の浚渫条件において施工されている状態にて、目視とカメラとにより流動状態を調べるとともに圧力損失を測定する。

(3) 実験結果

a) 流動観察： 写真-1, 2 及び 3 は、スラリー流量が $0.7\text{m}^3/\text{min}$ 、スラリー含泥率が 0.0187 であり、かつ空気注入量が $0.7\text{m}^3/\text{min}$ である場合のモデル実験装置における液体部後端、気体部及び液体部先端の流動状況を撮影した物である。これらの写真に示されるように、液体部では、砂分が渦部によって巻き上げられるため、堆積層が形成されておらず、また、気体部でも土砂を運ぶのに十分な流速があったため、堆積層は形成されていない。この気体部での流れは気液二相流の層状流及び波状流と酷似している。なお、このスラリー流量は、スラリーのみを流送した場合には、堆積層を形成する流量である。一方、写真-4 および写真-5 は実工事における観察例を示したものであり、それぞれ気体部及び液体部の通過状況を示す。モデル実験装置における観測結果と類似した現象が認められた。

b) 圧力損失測定結果： 図-3 は、モデル実験装置における真容積含泥率が 0.0187 と一定である場合のスラリー流量と圧力損失との関係並びにこの流れに $0.7\text{m}^3/\text{min}$ の空気を注入した場合のスラリー流量と圧力損失との関係を合わせ図示したものである。スラリーのみの場合並びに空気を注入した場合を、それぞれ記号▲並びに●にて示し、かつ、それぞれを多項近似曲線にて表した。同図に示されるように、スラリー流量が少ない範囲、すなわち、 $0.75\text{m}^3/\text{min}$ 以下においては、空気注入によりスラリーのみの場合より圧力損失が小さくなっている。また、図-4 は、砂供給量が $0.0131\text{m}^3/\text{min}$ であり、かつ、スラリー流量が $0.7\text{m}^3/\text{min}$ である場合の流れに空気を注入した場合の圧力損失を示したものである。すなわち、case3-1, case3-2, case3-3 及び case3-4 は、空気量が、

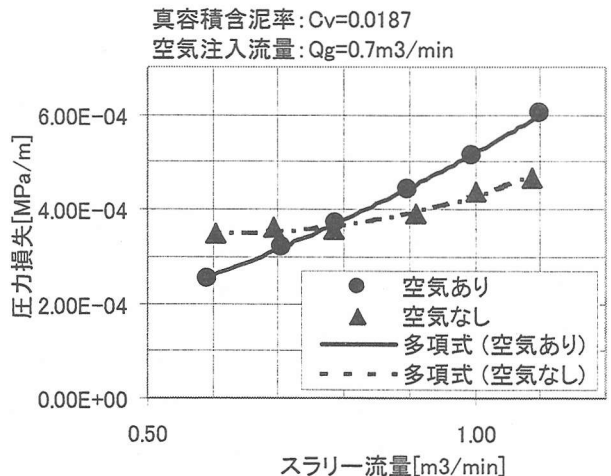


図-3 圧力損失とスラリー流量との関係

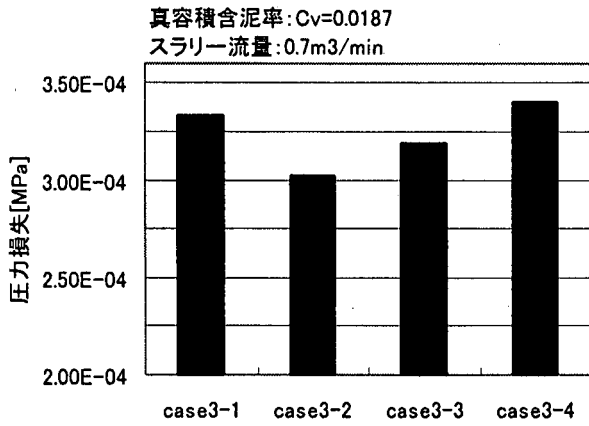


図-4 空気注入量による圧力損失の変化

それぞれ 0.0m³/min, 0.5m³/min, 0.7 m³/min 及び 1.2 m³/min である場合を表す。同図に示されるように、空気注入により圧力損失はスラリーのみの場合より小さくなるが、注入量の増加に伴い圧力損失も大きくなる。従って、ある注入流量以上になれば空気注入により圧力損失は、スラリーのみの場合より大きくなること分る。なお、空気注入により圧力損失の減少が認められるスラリー流量は、堆積限界速度¹⁸⁾以下の流量に対応していると推察される。すなわち、空気注入による攪拌混合による浮遊流れの摩擦抵抗が堆積流及び摺動流の抵抗よりも小さい場合に圧力損失の減少が認められる。

(4) 実験値と計算値比較及び考察

a) モデル実験結果との比較： 図-5 は、図-3 に示した圧力損失測定結果と式(8)による計算結果との比較を示したものである。なお、計算を行うには、気体部の固液体積率 α_{gl} 並びに気体スラグの通過時間 t_g を知る必要があるが、これらについては次のように与えた。すなわち、固液体積率 α_{gl} は、ビデオ画像の解析から値を求め、その平均値である $\alpha_{gl} = 0.386$ を用いた。また、気体スラグの通過時間 t_g は、ビデオ画像の解析により得られた値を多項式で表した式すなわち、次式より算出した。

$$t_g = 0.46V_{sl}^2 - 2.412V_{sl} + 3.4354 \quad (20)$$

但し、フルード数が約 1~2.5 の範囲であり、かつ、気体流量を一定にして求められたものである。従って、フルード数の範囲が異なる場合並びにスラリー流量と気体流量との割合が異なる場合には、実測値と比較検討する必要がある。

図-5 に示されるように、計算値は実測値より幾分小さい値を与えるが、その誤差は平均で 5% 程度である。このことから計算結果は、実験結果を概ね説明し得ると考える。

b) 実工事实験結果との比較： 図-6 は、実工事において計測された圧力損失とスラリー流量との関係並びに式(8)による計算結果との比較を示したも

のである。なお、平均スラリー含泥率は 0.0187 であり、かつ空気注入量は 185m³/min である。その他、計算に使用した粒子等の物性値を表-1 に示す。また、計算に際し、固液体積率 α_{gl} は、モデル実験装置のビデオ画像の解析から求められた値、すなわち、その平均値である $\alpha_{gl} = 0.386$ を用いた。さらに、気体スラグの通過時間 は式(20)より算出した。一方、搬送流体の管摩擦損失係数 λ_f の値としては、過去の実績値 0.013 と実工事における現場計測値である 0.018 を用いて算出した。さらに、摺動層を伴う固液二相流の管摩擦損失係数 λ_f は劉ら⁹⁾と同様に Turian ら¹⁵⁾の式すなわち、式(9)より算出した。

図-6 に示されるように、現場計測値による方が幾

表-1 計算式に使用した数値及び係数

管径 [m]	空気流量 [m ³ /min]	泥水の 比重 [kg/m ³]	真空積 含泥率 Cv	粒子の 抗力係数 Cd	砂の 真比重 γ_s	砂の 平均粒径 [mm] ds
D		ρ_f				
0.86	185	1057	0.0187	2.0	2.755	0.7

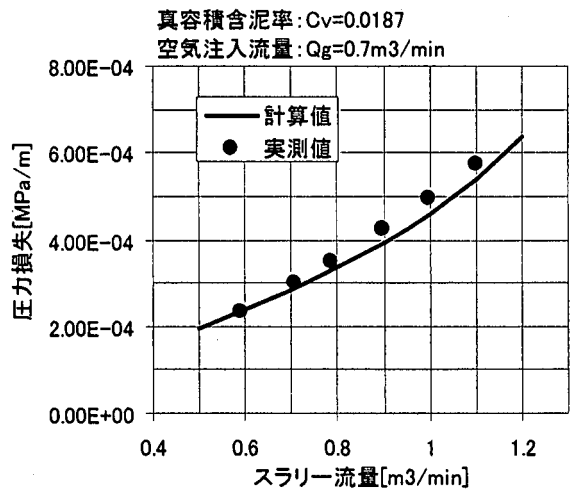


図-5 モデル実験における圧力損失の実測値と計算値との比較

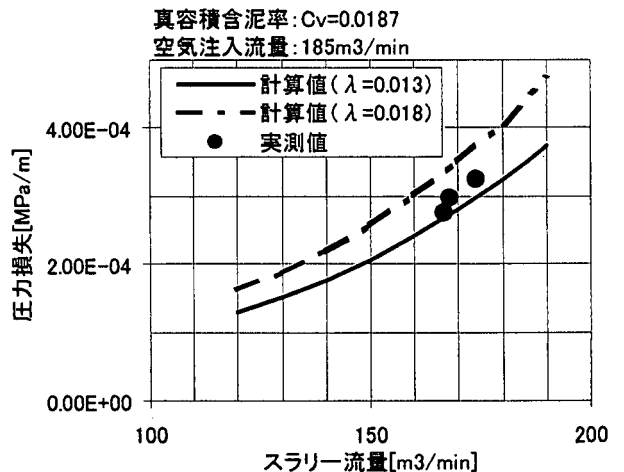


図-6 実工事における圧力損失の実測値と計算値との比較

分高めに推算されているが、概ね混気圧送の圧力損失の計測結果を説明していると考えられる。

一方、実工事の浚渫を行った担当者より、「空気混入により操作が非常に楽である」との言を得ることが出来た。これは、空気混入後の流れが摺動流となり安定していること意味しており、混気圧送工法の有用性の査証と考えられる。

4. おわりに

本研究では、ポンプ浚渫においてブースター効果を得るための補助的な装置すなわち、空気混入システムの開発を目差し、排砂管内の流動状態を観察するとともに実工事における管路抵抗の予測を試みた。

その結果、砂礫浚渫土混気圧送の圧力損失算定式として式(8)を求め得た。また、この式により、気体部の固液二相流が摺動流を呈する場合の気液固三相流の圧力損失を概ね推定し得ることが分った。空気注入により摺動流を呈す流れになれば流れが安定し、浚渫作業が容易になることが分った。また、このことは空気混入システムの有用性を示している。

以上、砂礫質浚渫土の混気圧送時における圧力損失の算定について述べたが、ポンプ浚渫船によって浚渫された土砂が、排砂管を通し土捨て場まで送られる過程の一連の現象が解明されたわけではない。それゆえ、ブースターポンプに変わる新たな設備として、空気混入システムを確立するには、空気の注入による圧送設備への影響をさらに検討し、明らかにする必要があると考える。

謝辞： 本論文の内容を公表することを許可して頂いた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

1) Nishikawa, Y., Hashimoto, B., Kataoka, I., Takei, M., Matsumae, Y. and Horii, K. : Proc. of Hydrotransport 12, pp.565-578, 1993.

- 2) 西川 豊, 橋本 文作, 片岡 勲, 武居 昌宏, 松田 祐二, 堀井清之: 混相流, Vol.7, No.1, pp.33-40, 1993.
- 3) Scott, D.S. and Rao, P.K. : Can.J.Chem.Eng., Vol.49, No.6, pp.302-309, 1971.
- 4) Noda, K., Kawashima, T., and Masuyama, T., : Proc. of Hydrotransport 1, ppD5-53-D5-64, 1972.
- 5) 都田 昌之, 島崎 孝二, 前田 四郎: 化学工学論文集, Vol.4, No.1, pp.56-62, 1978.
- 6) 高橋 弘, 劉 双科, 益山 忠, 松岡 功: 資源・素材学会誌, Vol.111, No.12, pp855-860, 1995.
- 7) 高橋 弘, 劉 双科, 益山 忠, 松岡 功: 資源・素材学会誌, Vol.112, No.7, pp.451-456, 1996.
- 8) 劉 双科, 高橋 弘: 水工学論文集, 第40巻, pp.825-830, 1996.
- 9) 劉 双科, 高橋 弘, 益山 忠, 徐 旭常: 第2回日中スラリー輸送技術シンポジウム論文集 Vol.2, 1998-10.
- 10) Nicholson M.K. Aziz K. and Gregory G.A. : Can.J.Chem.Eng., Vol.56, No.12, pp.653-663, 1978.
- 11) Dukler A.E. and Hubbard M.G., : Ind. Eng. Chem., Fundam., Vol.14, No.4, pp.337-347, 1975.
- 12) Chisholm, D., : "A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two-Phase Flow", Int.J.Heat Mass Transfer, 10, pp1767-1778, 1967.
- 13) Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C., : "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes", Chem.Eng.Progress, 45-1, pp39-48, 1949.
- 14) Durand R., Condolios E. : Deuxiemes de l'Hydraulique, Soc. Hyd. De France, Grenoble, 1952.
- 15) Turian, R.M. and Yuan, T : AIChE, J., Vol.23, No.3, pp.232-243, 1977
- 16) 機械学会編: 機械工学便覧, (機械学会 東京 1961), pp8-13-8-15.
- 17) Gregory, G.A. and Scott, D.S. : AIChE, J., Vol.15, No.6, pp.933-935, 1969.
- 18) スラリー輸送研究会編: スラリーカプセル輸送技術要覧, (開発問題研究所 東京 1984) pp.77-104.
- 19) 野田 佳六: 混相流の基礎理論と応用技術, (混相流シンポジウム実行委員会 1982), pp.129-141.