

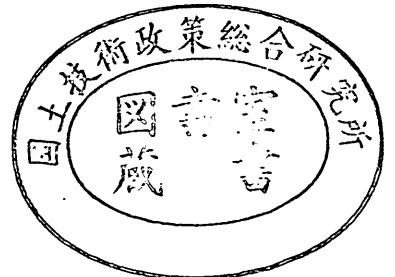
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 30 NO. 2(1) JUNE 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第30巻 第2号 (Vol. 30, No. 2) 1991年6月 (June, 1991)

目 次 (CONTENTS)

1. Investigation of Cross-shore Sediment Transport Rates and Flow Parameters
in the Surf Zone using Field Data Yoshiaki KURIYAMA 13
(現地データによる砕波帯内の岸沖漂砂量と流速特性の検討
..... 栗山 善昭)
2. 避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動に関する検討
..... 平石 哲也・本城 智 59
(Characteristics of the motion and tension of a ferry moored in a storm
..... Tetsuya HIRAISHI and Satoshi HONJO)
3. 離散渦法による構造物周りの流れシミュレーション
..... 細川 恭史・古川 恵太 155
(Modeling of Discrete Vortices Induced by an Inclined Flat Plate
Yasushi HOSOKAWA and Keita FURUKAWA)
4. プラスティックボードドレーンで改良された不均一地盤の沈下特性
..... 田中 洋行・太田 一己・丸山 隆英 211
(Performance of Vertical Drains for Soft and Ununiform Soils
..... Hiroyuki TANAKA, Kazumi OHTA and Takahide MARUYAMA)
5. 杭の横抵抗における捨石層の評価
..... 高橋 邦夫・壹岐 幸史 229
(Lateral Resistance of a Pile in Rubble Mound
..... Kunio TAKAHASHI and Yukifumi IKKI)
6. サンドドレーンの効果に関する有限要素解析
..... 小林 正樹 275
(Finite Element Analysis of the Effectiveness of Sand Drains
..... Masaki KOBAYASHI)
7. 接円式深層混合処理地盤の挙動
..... 北誥 昌樹・中村 健・寺師 昌明 305
(Reliability of Clay Ground Improved by the Group Column Type DMM with
High Replacement)
..... Masaki KITAZUME, Takeshi NAKAMURA and Masaaki TERASHI)

8. 斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗	寺師 昌明・北誥 昌樹	327
(Influence of a slope on the Lateral Resistance of a Long Pile	Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)	
9. 液状化による矢板岸壁の変形の数値解析	井合 進・亀岡 知弘	349
(Analysis of Deformation in Sheet Pile Quaywall due to Liquefaction	Susumu IAI and Tomohiro KAMEOKA)	
10. 盛土の地震被災事例に基づく円形すべり安定解析手法の検討	上部 達生・長田 信	381
(Circular Arc Analysis of Earthquake Damage of Embankments on Saturated Sand Layers	Tatsuo UWABE and Makoto OSADA)	
11. ねじりを受ける長大ケーソンの力学特性	清宮 理・山田 昌郎	445
(Mechanical Properties of Long Caisson Subjected to Torsion	Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA)	
12. 歩行式水中調査ロボットの開発		
— (第2報) 軽量防水型実験機の設計 —	朝倉 修・秋園 純一・岩崎 峯夫・根本 孝志	483
(Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection	— (Second Report) Design of the Light-weight Type Aquatic Walking Robot —	
Osamu ASAKURA, Jun-ichi AKIZONO, Mineo IWASAKI	and Takashi NEMOTO)	
13. 水平管における空気混入軟泥の流動特性	岡山 義邦・鮎貝 基和・鈴木 誠・福本 裕哉	533
(Fluidity Characteristics of Muddy Slurry with Compressed Air in	Horizontal Pipe	
Yoshikuni OKAYAMA, Motokazu AYUGAI, Makoto SUZUKI	and Hiroya FUKUMOTO)	

水平管における空気混入軟泥の流動特性

岡 山 義 邦*
鮎 貝 基 和**
鈴 木 誠**
福 本 裕 哉**

要 旨

最近の港湾工事においては、通常の浚渫ポンプでの排送が難しいような流動性の低い高濃度の軟泥輸送に対して、空気を混入した状態で輸送する実験的試みが数多く見られる。圧縮空気のみで圧送する場合もあり、またスクリーポンプあるいは浚渫ポンプ等と組み合わせて用いている例もある。

多くの場合、浚渫土砂の処分地の容量をできるだけ小さくしたいというのが、この種の試みを多くしている大きな理由である。さらに、埋め立て地あるいは土砂処分地における排水処分量が減少することは、沈澱池としての能力を低く設計できることになり経済効果も高くなってくる。

しかしながら、現在各地で試行されている空気混入スラリ輸送システムの設計は、過去の実績あるいは経験に依存する面が多々あり、経済性を評価するためにも適切な流送設計の手法の確立が求められている状況にあるといえる。また、高濃度軟泥という側面のみから見ると、従来コンクリート等の輸送に利用されてきたスクリーポンプやピストンポンプといった容積型の高圧ポンプを空気混入なしで用いるケースも十分競合的である。これらを施工条件に沿って、適切に比較検討するためにも軟泥スラリ単独の水平管における流動特性ならびに空気を混入した場合の軟泥の流動特性の変化を明らかにしておく必要がある。

このような背景のもとに、微粒子を含んだ軟泥を水平管内に流動させ、これに圧縮空気を混入したときの流動特性を室内実験によって調べてみた。

使用した土砂は、採石場より排出される微粒子分の多い、50%平均粒径0.008mm、粒子比重2.65のシルト混じり粘土である。この土砂から軟泥スラリを調整し、これをべき法則に従う擬塑性流体と考えてその管内流動特性をまず明らかにした。そして、これをベースにして圧縮空気を混入した場合の流動特性、特に圧力損失の算定について検討した。

この結果、Metzner-Reedのレイノルズ数を用いてべき法則モデルに対して計算した固液スラリの流動特性と、空気を混入した場合の水平分離モデルを組み合わせることによって、空気混入スラリの流動抵抗を推定し得ることがわかった。特に、高濃度スラリ流動時の空気混入による圧力損失低下の傾向もこの方法で十分説明できる。

この他、水平管におけるボイド率、気液混合スラグの各部流速等について実測データによる検討を行っている。

キーワード：非ニュートン流体，空気混入スラリ，気固液三相流，水平管スラリ輸送，浚渫埋立

* 機械技術部 浚渫埋立研究室長
** 機械技術部 浚渫埋立研究室

Fluidity Characteristics of Muddy Slurry with Compressed Air in Horizontal Pipe

Yoshikuni OKAYAMA*
Motokazu AYUGAI**
Makoto SUZUKI**
Hiroya FUKUMOTO**

Synopsis

In recent activities on port and harbor construction works, many trials on the transportation of dredged soft mud thorough horizontal pipeline by using compressed air injection. Some of them are the transport system with only compressed air and there also exist the combination system assisted with screw pumps or dredge pumps. Such fine materials with high concentration are usually considered as insufficient materials for normal hydraulic transportation with dredge pump alone due to its heavy fluidity resistance.

The main reason for such experimental activities is to achieve the minimum volume of soil disposal area, and which finally leads to minimize the amount of excess water to be treated and should totally bring economic benefits on port and harbor constructions.

However, as far as the designing of such transportation system with compressed air is concerned, it is eager to demand to establish suitable design methods because that present situations are almost based upon the experiences in actual activities. Therefore, at present, it is not easy to compare the air system with the transport system without air by piston pump or by screw pump alone from economic view points.

With these backgrounds, the room experiments with horizontal pipeline were preformed, in which soft mud with fine particles were flowed by dredge pump and compressed air was injected to the flowing slurry in the pipe. First of all, the fluidity characteristics of soft mud slurry was grasped by the way based on the analysis using power-law model for pseudoplastic non-Newtonian fluid. Then, the fluidity characteristics of soft mud slurry with air mainly including pressure losses for three phase flow was investigated under the consideration of the flow characteristics without air.

According to the results, it is clarified that the flow characteristics of pseudoplastic fluid used here are analyzed by the deformed Reynolds' number derived from Metzner and Reed, and then the pressure loss for soft mud slurry with air can be estimated by horizontal separation model for three phase flow combining the flow characteristics of the mud slurry without air. Especially these methods can explain satisfactorily the reduction of pressor loss for the soft mud slurry with air in case of high solid concentration.

Further, in this study, void ratio and absolute velocities of horizontal pipe flow-with air are also discussed with actually measured data.

Key Words : Non-Newtonian Fluid, Slurry with Compressed Air, Gas-Liquid-Solid Three Phase Flow, Horizontal Hydraulic Transport, Dredging and Reclamation

* Chief of Dredging and Reclamation Laboratory, Machinery Division.
** Member of Dredging and Reclamation Laboratory, Machinery Division

目 次

要 旨	533
1. ま え が き	537
2. 実験装置と実験の方法	537
2. 1 流動実験装置と使用土砂	537
2. 2 実験の方法	539
3. 固液スラリの流動特性	540
3. 1 軟泥の管内流動抵抗の特徴	540
3. 2 レオロジーパラメータ n, K	541
3. 3 管内流動抵抗の推定手法	543
4. 空気混入時の流動特性	544
4. 1 水平管における平均ボイド率	544
4. 2 空気を含んだ流れの各部流速	546
4. 3 空気混入時の水平管における圧力損失	548
4. 4 水平分離モデルと圧力損失の推定	550
5. 結 論	555
6. あとがき	556
参 考 文 献	556
主要記号一覧表	557

1. まえがき

空気を混入したスラリー輸送は、従来からエアリフト浚渫工法、シールド工法における気泡土ポンプ圧送、風力ずり輸送などの名前で呼ばれ、陸上や海上の土木工事を中心として利用されてきている。風力輸送は管内の空気流中にずりを混入した、どちらかといえばエアシュートの利用形態に近いものである⁽¹⁾が、ずりの含水比が増加すれば管路内の流動状況は空気を混入したスラリー輸送と同じようなものとなる。エアリフトは空気を含んだスラリーのエアリフト効果を利用した、大水深における垂直輸送に専ら使用されている^{(2),(3)}。

気泡土圧送は、特殊な方法で発泡させた気泡を輸送スラリーに圧入し、スラリーの流動抵抗を減少させる目的で行われる。元来は気泡を混入することによってスラリーの流動性を高め、掘進部における閉塞防止、あるいは掘進装置の抵抗減少を目的に開発されたものである^{(4),(5)}。

また、シルシポンプやウーザポンプ等のニューマポンプを利用した浚渫工事⁽⁶⁾において見られる管路輸送もやはり空気混入スラリー輸送といえる。しかしながら、浚渫すべき海底を出来るだけ乱さない、濁りを発生させないということを目的として開発されてきたために、土砂とともに吸引される海水量は比較的多い。このため、管内を流動する空気混入スラリーの濃度は一般に低い場合が多い。

一方、最近の港湾工事においては、通常の浚渫ポンプでの排送が難しいような流動性の低い高濃度の軟泥輸送に対して、空気を混入した状態で輸送する実験的試みが数多く見られる。圧縮空気のみで圧送する場合もあり、またスクリーポンプあるいは浚渫ポンプ等と組み合わせ用いている例もある。

多くの場合、浚渫土砂の処分地の容量をできるだけ小さくしたいというのが、この種の試みを多くしている大きな理由である。さらに、埋め立て地あるいは土砂処分地における排水処分量が減少することは、沈澱池としての能力を低く設計できることになり経済効果も高くなってくる。

スラリー輸送そのものの技術から考えると、このような空気混入スラリー輸送は高濃度を前提としているために、固液スラリー自体非ニュートン流体としての挙動が支配的であるという特徴がある。従来、このような気固液三相流れの研究は、化学工業あるいは食品工業分野でレオロジー流体を対象として行われてきた^{(7),(8)}が、これらの成果を浚渫工事に使用される土質、流送条件、流送規模等に適用できるほど豊富な結果が得られているわけでは

ない。

したがって、現在各地で試行されている空気混入スラリー輸送システムの設計は、過去の実績あるいは経験に依存する面が多々あり、経済性を評価するためにも適切な流送設計の手法の確立が求められている状況にあるといえる。

高濃度軟泥という側面のみから見ると、従来コンクリート等の輸送に利用されてきたスクリーポンプやピストンポンプといった容積型の高圧ポンプを空気混入なしで用いるケースも十分競争的である。これらを施工条件に沿って、適切に比較検討するためにも軟泥スラリー単独の水平管における流動特性ならびに空気を混入した場合の軟泥の流動特性の変化を明らかにしておく必要がある。

ここでは、軟泥スラリーをべき法則に従う擬塑性流体と考えると、その管内流動特性を明らかにし、これをベースにして圧縮空気を混入した場合の流動特性、特に圧力損失の算定について検討している。

2. 実験装置と実験の方法

2.1 流動実験装置と使用土砂

スラリータンクで一定濃度に調整された固液スラリーは、スラリーポンプを経て固液スラリー計測部そして空気混合部へと送られる。その後アクリル水平管よりなる気固液三相流計測部を通過したのち管出口に達する。空気を含んだスラリーは管出口すなわちタンク入口で大気解放され、気相を分離したのち再びタンク内に回収される。このようなループより構成される流動実験装置全体の概略を図-1に示す。

本実験装置の主体であるスラリー流送配管は全長が約20mであり、計測部以外のパイプは鋼管(SGP80A, 100A)を使用している。圧力損失計測部分は内径82mm、長さ4mのアクリル管であり、空気吹き込み部前方と空気吹き込み部の後方の2カ所に使用されている。すなわち、空気を混入した状態でも、同一輸送条件下における空気を含まない固液スラリーの流動状態が観察ならびに計測できるようになっている。

スラリータンク内にはスラリー攪拌用ミキサがあり、実験中均一なスラリー混合状態を保持するように常に低速で回転させられている。スラリータンク出口の直後に設けられているスラリーポンプは、可変速タイプであり、ダイヤル操作により任意の回転数(0~1400rpm)に設定することができ、これによってスラリーの管内流速を適宜変更することができる。この管内流速はスラリーポンプ直後の電磁流量計で計測される。

固液二相流計測部のあとに逆止弁付き空気ノズルがあ

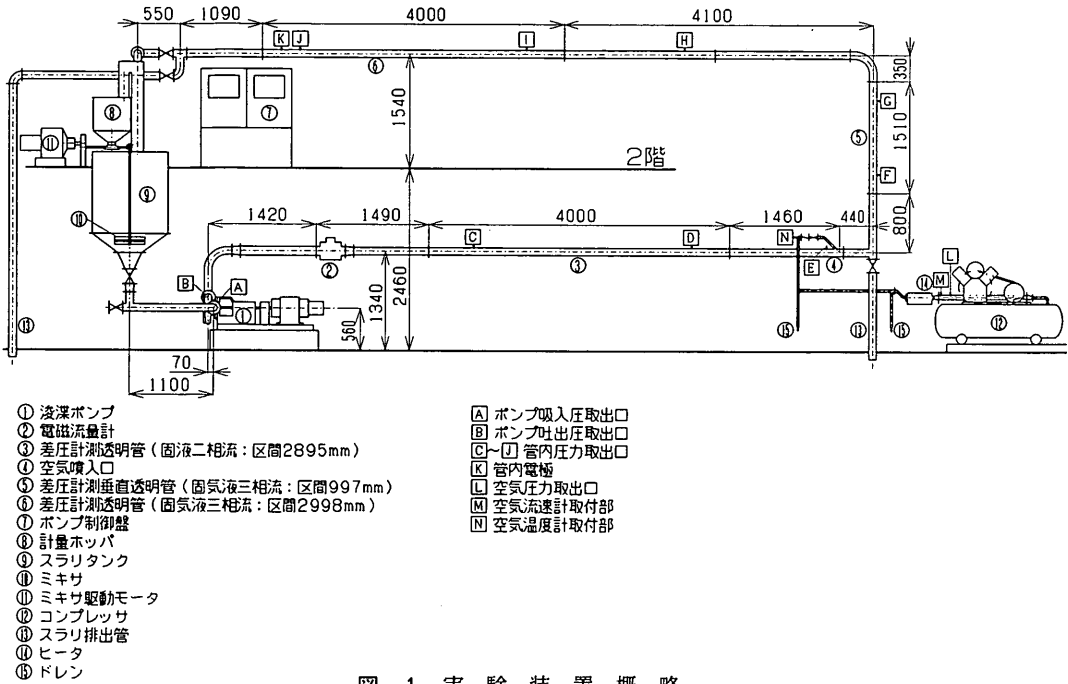


図-1 実験装置概略

り、ここからコンプレッサにより加圧された空気をパイプライン内に混入することができる。混入空気量はコンプレッサ近くに設けた空気流速センサ、圧力センサ、温度センサからの情報と空気吹き込み部の管内スラリ圧力から計算して求められる。すなわち、本報告において使用する空気流量ならびに空気流速は、全て管内平均圧力

における値となっている。

実験に使用した土砂は、採石場より排出される微粒子分の多い、50%平均粒径0.008mm、粒子比重2.65のシルト混じり粘土である。供試土砂の粒径加積曲線を図-2に示す。

写真-1～写真-4に流動実験装置全体、スラリポ

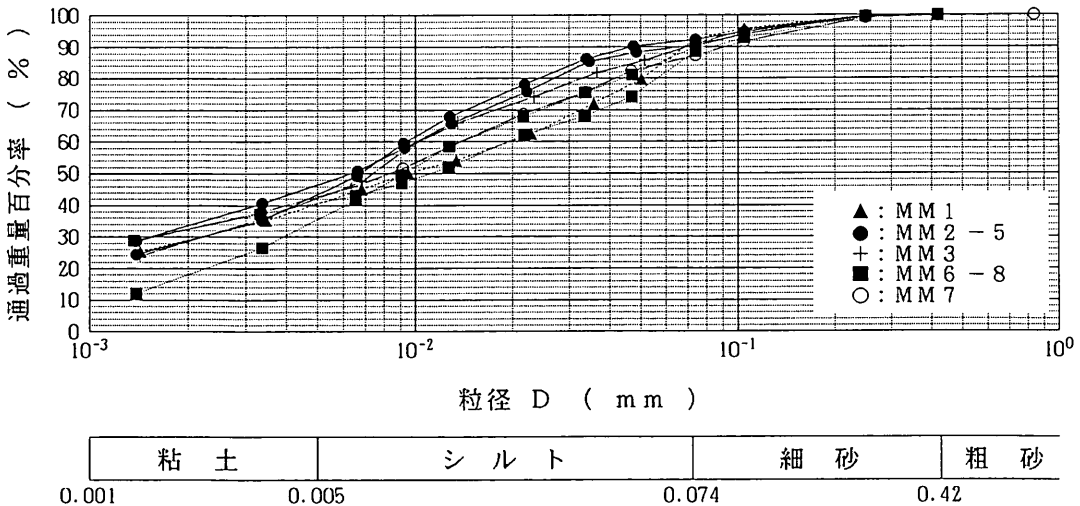


図-2 供試土砂の粒径分布

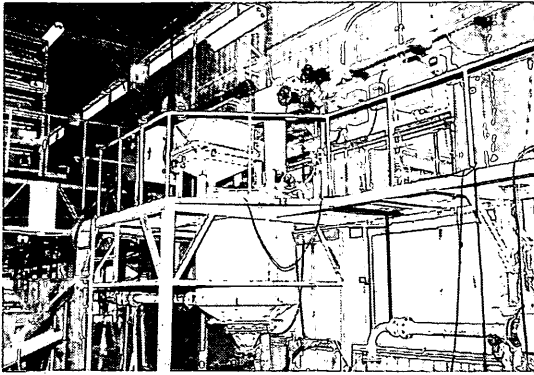


写真-1 流動実験装置全体

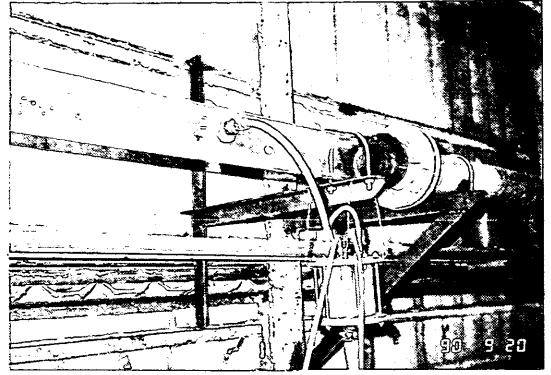


写真-3 計測管部

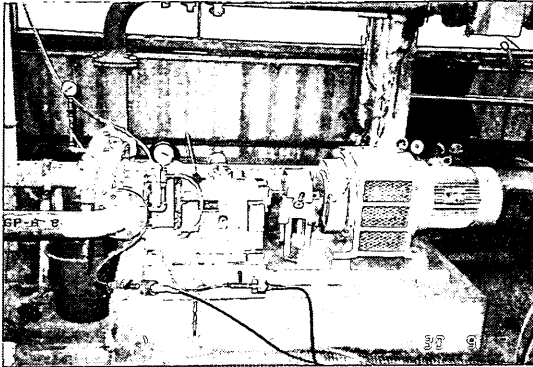


写真-2 スラリポンプ周辺

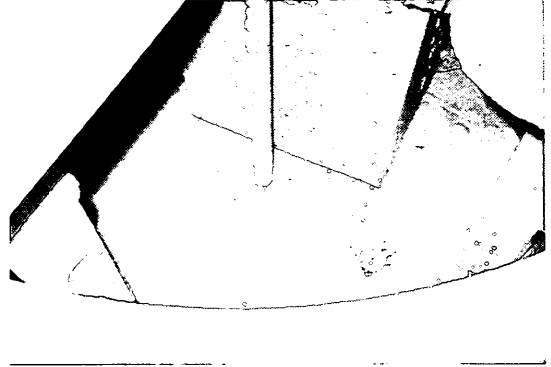


写真-4 スラリタンク内部状況

ンプ周辺、計測管部ならびにスラリタンク内部状況を示す。

2.2 実験の方法

空気を含んだ微粒子スラリ流送実験において最も注意すべき点は、圧力変換器の導管および変換器内への気泡ならびに微粒子スラリの混入である。これを防止するために、出来るだけ短いインターバルで清水流送試験を行い導管および変換器内を清水で満たしておくことを保証してやる必要がある。今回の実験では、導管等への空気や泥水の混入が確認された場合、即座に清水状態に戻しセンサ類をチェックし直す等の注意を払った。しかしながら、結果的に上に述べた理由でデータ自体をカットしなければならないケースも少なくなかった。

スラリ流送実験を行う場合には、目標スラリ濃度に見合った清水を循環させ、この状態でスラリタンクに軟泥を目標濃度まで投入していった。目標濃度は一定容量の容器に泥水をサンプリングしこの重量を計算重量に近づけるといふ簡便な方法で行っている。この後スラリの混合状態が安定したことを確認してから実験を開始した。

本実験においては、まずポンプ回転数を変えることにより空気を含まないスラリに対する流速（スラリ基準流速）を設定し、空気無しを含め8段階の空気を吹き込んで、それぞれの流動状態における圧力損失等を計測した。バルブ操作による8段階の空気流速は52.9mm径の空气管相当でそれぞれ0.0、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、6.0m/sである。

ひとつのスラリ基準流速に対する一連の空気混入実験が終わると、次のスラリ基準流速にセットした。ある濃度のスラリについて4種類の基準流速（ $\phi 82\text{mm}$ 相当で0.5、1.0、1.5、2.0m/s）で実験を行っている。

空気を含まない清水あるいは固液スラリが、定常流送されている場合、スラリタンク内の液面レベルは一定に保たれている。しかしながら、これに空気を混入するとパイプラインにおいて空気の占める割合に応じてタンク内の液面レベルは上昇し、仮に注入空気量が一定であれば、タンク液面レベルも新たな位置で安定する。本実験ではこのことを利用して、タンク内の液面レベルを測定することによって管内平均ボイド率を求めている。

また、ひとつの試みとして、空気混入時の空気スラグ、液スラグ等の絶対速度を、管内に入れたプラスチック球の動きをビデオカメラで撮影することによって求めてみた。具体的には、直径9.5mm、比重1.15のアクリル製小球の管内での挙動をビデオカメラで追い、解析した。もちろん、この方法では清水の場合しか球の運動を解析出来ないのはいうまでもないが、空気スラグ周辺の各部流速に対する理論検討をチェックする上では非常に有用であった。

本実験における計測項目および計測方法を表-1に示す。

3. 固液スラリの流動特性

3.1 軟泥の管内流動抵抗の特徴

図-3は、本実験の計測区間で使用しているアクリル管に清水を流した場合の流動抵抗であり、流速に対し単位長さ当たりの圧力損失で示されている。この圧力損失

表-1 計測項目および計測の方法

計測項目	使用計測器及び計測法
ポンプ吸入圧 及び吐出圧	圧力変換器による連続記録
ポンプ回転数	非接触型回転計による目測
清水及びスラリー流量	電磁流量計による連続記録
スラリー流送管内差圧	差圧変換器による連続記録
スラリー流送管内圧力	圧力変換器による連続記録
空気圧力	圧力変換器による連続記録
空気流速	流速計による連続記録
空気温度	温度計を目測
平均ガイド率	スラリタンクのスラリー液面レベルをスケール目測
平均濃度	流送スラリのサンプリング(重量測定)
管内流動状況 (各部流速測定)	連続写真及びビデオカメラによって撮影

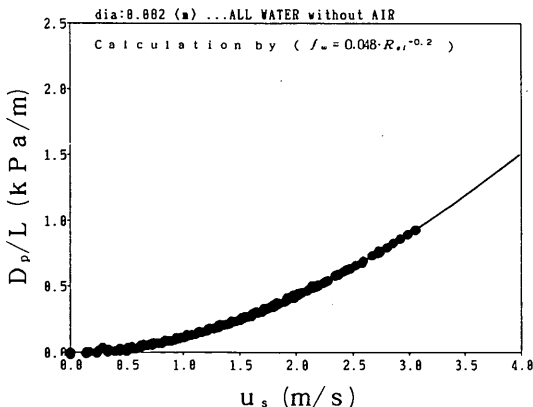


図-3 清水に対する圧力損失

D_p/L は Darcy-Weisbach の式

$$D_p/L = \frac{4f_w \cdot \rho_w \cdot u_s^2}{(2 \cdot D)} \quad (1)$$

で計算される。ここで、

- f_w : Fanning の摩擦損失係数
- ρ_w : 清水の密度
- u_s : 流速
- D : 管径

である。管摩擦損失係数 f_w は Blasius の式等から求めることが多いが、ここでは図-3のデータに適合する実験式を式(2)のように決定した。

$$f_w = 0.048 \cdot Re_i^{-0.2} \quad (2)$$

ここで、 μ_w を清水の粘性係数とすれば

$$Re_i = \frac{\rho_w \cdot D \cdot u_s}{\mu_w}$$

である。

これは、Blasius の式とは傾向的に若干異なり、Knudsen and Katz⁽⁹⁾ の式にきわめて近い。

一方、軟泥が流動した場合に単位長さ当たりの圧力損失がどのように変化するかを示したのが図-4である。これは、スラリー比重量1202 (kgf/m³) に対するデータであり、清水流動ライン(式(1))もあわせて示されている。

図-3および図-4を比較していえることは、清水の場合本実験の全ての範囲が乱流ゾーンであるのに比して、軟泥の場合かなりの流速まで層流部分が続いているということである。このため、層流部分での軟泥スラリーに対

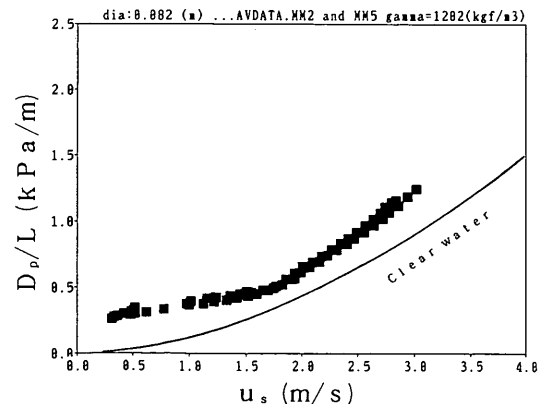


図-4 軟泥スラリーに対する圧力損失(ケース MM2-5)

水平管における空気混入軟泥の流動特性

する圧力損失の増加傾向が清水に比べ非常にフラットであるという特徴がある。また、図-4では、はっきりした層流から乱流ゾーンへの遷移も認められる。

したがって、このようなスラリー流動時に空気を混入したときの流動特性を把握するには、まず軟泥スラリー単独の流動特性を推定する必要がある。

ここでは、以下に述べるような方法で軟泥スラリー流動時の圧力損失を、層流から乱流への遷移領域まで含めて検討することとする。

3.2 レオロジーパラメータ n, K

べき法則流体は、せん断応力が速度勾配に直線比例しないという特徴を持つ。すなわち、流動曲線は次に示すようにべき乗であらわされるために、べき法則流体あるいは Power-Law 流体と称されている。また、この指数 n が 1 より小さいものが擬塑性流体といわれる。

$$\tau = K \cdot \left(-\frac{du}{dr} \right)^n \quad (3)$$

ここで、 τ はせん断応力、 u は速度、 r は管中心から外へ向かう距離である。式(3)の速度勾配から、これを管壁で流体が滑らないという条件で積分処理すれば、管内の流速分布を

$$u = \left(\frac{n \cdot r_0}{n+1} \right) \cdot \left(\frac{\tau_0}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right\} \quad (4)$$

と表すことができる。ここで、 τ_0 は管壁 r_0 におけるせん断応力を示している。

いま、管内平均流速を u_s とすると、式(4)を再度積分することによって平均流速を用いた関係式を得ることができる。すなわち、

$$\tau_0 = K \cdot \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \cdot \left(\frac{8u_s}{D} \right)^n \quad (5)$$

式(5)における $\left(\frac{8u_s}{D} \right)$ をずり速度、あるいはせん断速度と称する。

管内流動データから求めた壁面せん断応力 τ_0 とせん断速度を対数座標にプロットし、この結果が層流部分においてはほぼ直線であれば、

$$\tau_0 = K' \cdot \left(\frac{8u_s}{D} \right)^{n'} \quad (6)$$

u_s : スラリー流速 D : 管径

における K', n' が決まる。図-5～図-9 が実験デー

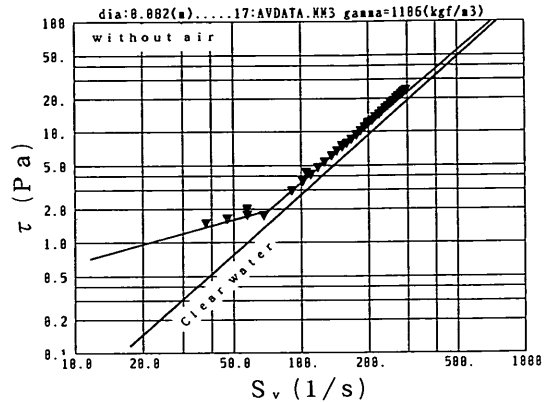


図-5 せん断速度 S_v とせん断応力 τ の関係 (ケース MM3)

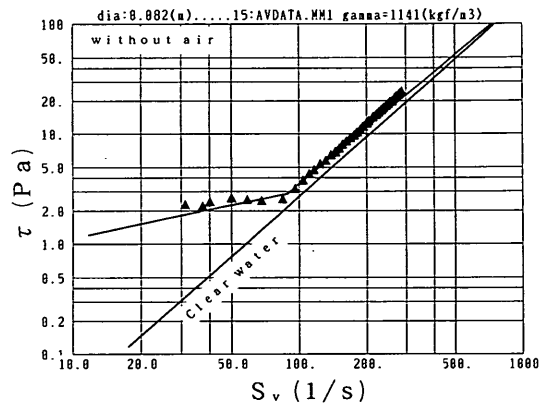


図-6 せん断速度 S_v とせん断応力 τ の関係 (ケース MM1)

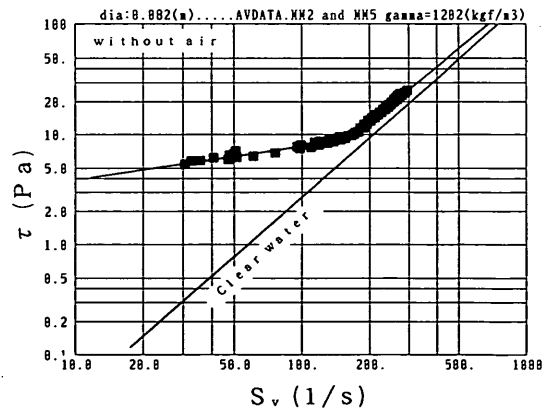


図-7 せん断速度 S_v とせん断応力 τ の関係 (ケース MM2-5)

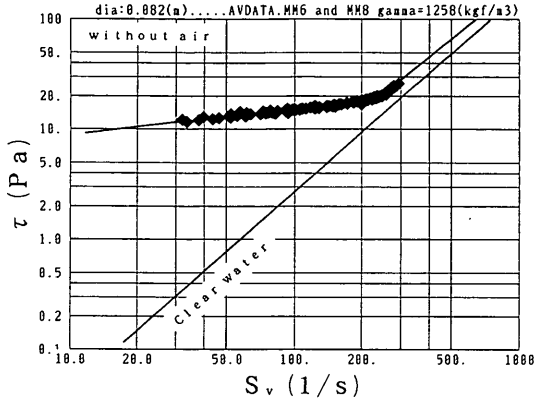


図-8 せん断速度 S_v とせん断応力 τ の関係 (ケース MM6-8)

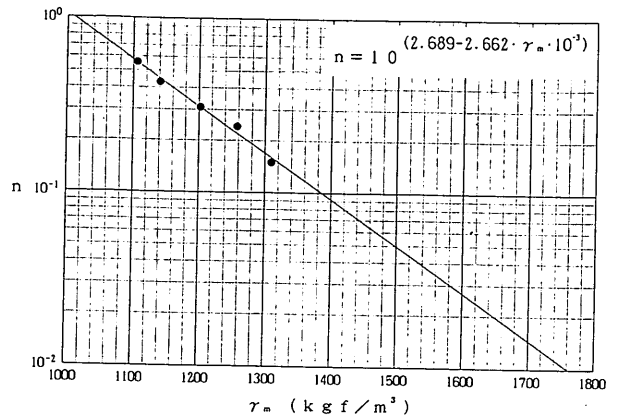


図-10 スラリー比重 τ_m とレオロジー指数 n の関係

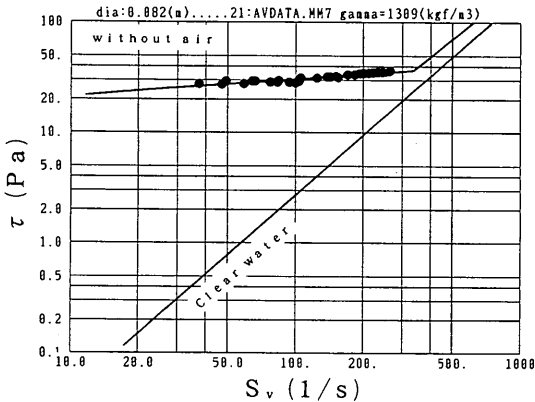


図-9 せん断速度 S_v とせん断応力 τ の関係 (ケース MM7)

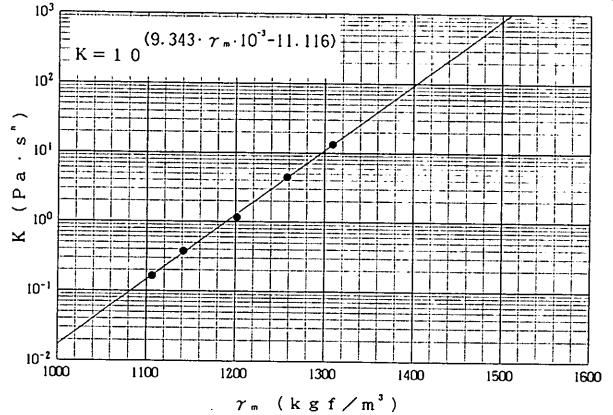


図-11 スラリー比重 τ_m とコンシステンシー係数 K の関係

表-2 軟泥スラリーの物性一覧

ケース	γ_m (kgf/m^3)	n	K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)	臨界 Re/m^* 数
MM3	1106	0.56	0.1646	2463
MM1	1141	0.43	0.3753	2630
MM2-5	1202	0.31	1.660	2933
MM6-8	1258	0.24	4.485	3318
MM7	1309	0.15	13.27	

タからせん断応力を求め、これとせん断速度を両対数グラフにプロットした結果である。なお、図中、横座標 S_v はせん断速度 ($\frac{8u_*'}{D}$) を意味する。

すなわち、式(5)および式(6)から擬塑性流体のべき法則モデルに対するレオロジーパラメータを次のように決定することができる。

$$n = n'$$

$$K = K' \cdot \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \quad (7)$$

表-2には、固液スラリーの平均比重量とともに、流動データから求めた n (レオロジー指数) と K (コンシステンシー係数) が実験ケース毎に示されている。

また、このようにして得られた n と K をスラリー比重量に対してプロットしてみると、図-10 および図-11 に示すようにレオロジーパラメータがスラリー比重と強い相関を持っていることがわかる。この相関式は

$$n = 10^{(2.689 - 2.662 \cdot \gamma_m \cdot 10^{-3})} \quad (8)$$

$$K = 10^{(9.343 \cdot \gamma_m \cdot 10^{-3} - 11.116)} \quad (9)$$

でそれぞれ表すことができる。それぞれの相関式は、もちろん今回使用した土質にのみ適合する式であって一般性があるものではない。しかしながら、現地泥の濃度調整等を行いながら輸送条件を決定するような場合、何らかの方法でこのような式を得ておくことによって、任意のスラリー比重に対するレオロジーパラメータを決定でき

ることになる。

3.3 管内流動抵抗の推定手法

管内流動時の固液スラリの単位長さ当たり圧力損失は、式(1)と同様に

$$D_p/L = \frac{4f \cdot \rho_f \cdot u_s^2}{2 \cdot D} \quad (10)$$

で求められる。ここで、 f はFanningの摩擦損失係数、 ρ_f はスラリー密度である。Metzner-Reedのレイノルズ数⁽¹⁰⁾を

$$R_{eMR} = \frac{\rho_f \cdot D^2 \cdot u_s^{(2-n)}}{K} \cdot 8 \cdot \left(\frac{n}{6n+2}\right)^n \quad (11)$$

とすれば層流部分に対して

$$f = \frac{16}{R_{eMR}} \quad (12)$$

で摩擦損失係数が得られる。すなわち、式(11)のようにレオロジーパラメータを用いた変形レイノルズ数を選定すれば、層流部分については通常のニュートン流体と同じく式(12)の形で摩擦損失係数が得られることになる。

式(12)から f を求め、圧力損失を算出することは式(5)の関係が層流に対して確立されたものであるから、層流部分については適用できる。逆に言えば、層流から外れて乱流へ移行する部分について、層流範囲で決定したレオロジーパラメータが有効かどうかについてはなんら保証はないということになる。しかしながら、ここでは乱流への遷移点を含め、遷移ゾーンにおいても同じレオロジーパラメータを使用して統一的に取り扱っている。

層流から乱流への遷移に関しては、益山らが示した⁽¹¹⁾ 臨界レイノルズ数、すなわち、

$$R_{eMRC} = \frac{2240 \cdot (2n+1) \cdot (3n+2)}{(3n+2)^2} \quad (13)$$

と実験データから図式的に決定した遷移点を比較してみた。表-2には、実験データにおける遷移点より得られた臨界レイノルズ数 R_{eMRC} が示されており、これと式(13)とを比較したのが図-12である。両者の一致性はかなり良いといえる。この結果は、式(14)に示す Ryan and Jhonson⁽¹²⁾の遷移開始点における摩擦損失係数から求めた臨界レイノルズ数とも比較されているが、特にレオロジー指数 n が小さい部分では式(13)に比べ式(14)は逆の傾向を示していることがわかる。

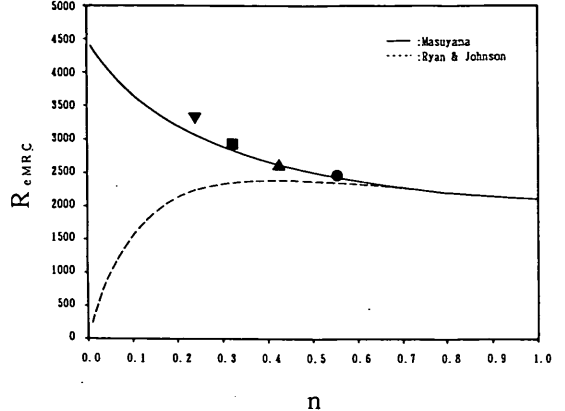


図-12 レオロジー指数 n と臨界レイノルズ数 R_{eMRC} の関係

$$R_{eMRC} = \frac{16 \times 404}{\phi(n)}$$

$$\phi(n) = \frac{(3n+1)^2}{n} \cdot \left(\frac{1}{n+2}\right)^{\frac{n+2}{n+1}} \quad (14)$$

ここでは、式(13)を使って層流からの遷移点を計算することとした。

層流から外れた乱流部分については実験データから得られた送水時の摩擦損失係数に関する実験式(2)におけるべき数を考慮し、摩擦損失係数を

$$f = f_c \cdot \left(\frac{R_{eMR}}{R_{eMRC}}\right)^{-0.2} \quad (15)$$

で計算している。ここで、 f_c は式(13)から求めた臨界レイノルズ数における式(12)の値である。すなわち、乱流部分における摩擦損失係数は臨界レイノルズ数において f_c 値をとり、それ以後は送水時の摩擦損失係数と同じべき数で変化していくと考えている。

以上によって決定された管摩擦損失係数 f を、層流部分および層流から乱流へ移行する部分にわたって実験データから導かれた値と比較したのが図-13～図-17である。乱流への遷移ゾーンにおいてもほぼ満足すべき結果となっているといえよう。ただし、レイノルズ数がこれ以上大きくなる範囲では当然 f は清水に対するラインへ近づいていくわけであり、さらに大きいレイノルズ数範囲を対象とする場合は Kembrowski ら⁽¹³⁾の提案しているような関数をあらためて検討する必要がある。

このようにして求められた管摩擦損失係数を用いて式(10)から計算した固液スラリーに対する単位長さ当たりの圧力損失を実験データと比較したのが図-18～図-22で

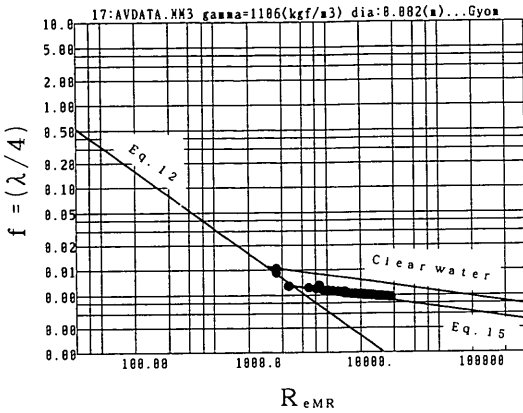


図-13 R_{eMR} と f の関係(ケース MM3 $n=0.56$)

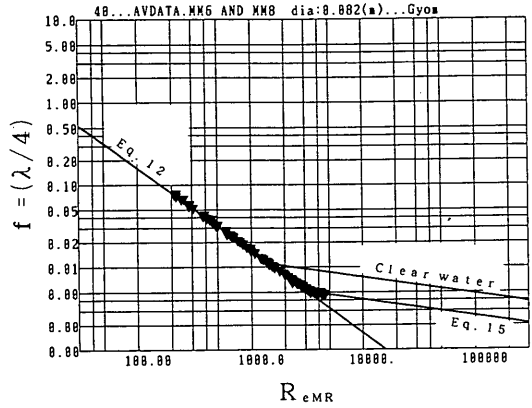


図-16 R_{eMR} と f の関係(ケース MM6-8 $n=0.24$)

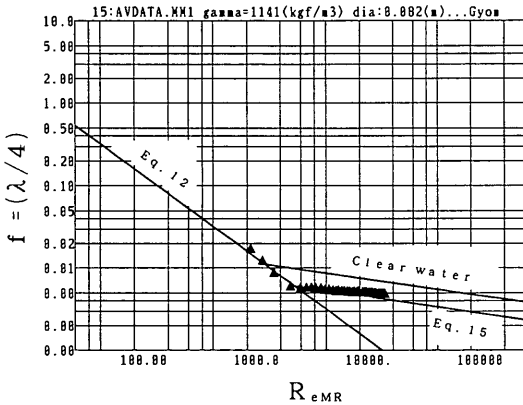


図-14 R_{eMR} と f の関係(ケース MM1 $n=0.43$)

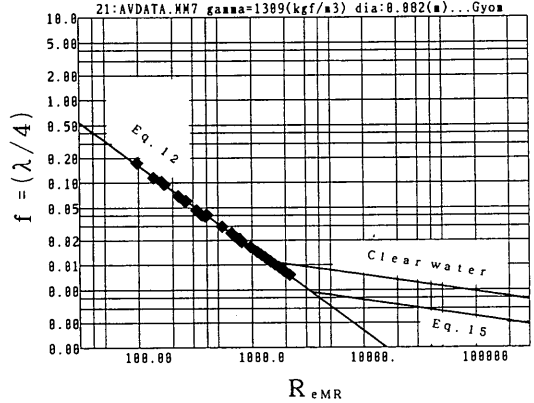


図-17 R_{eMR} と f の関係(ケース MM7 $n=0.15$)

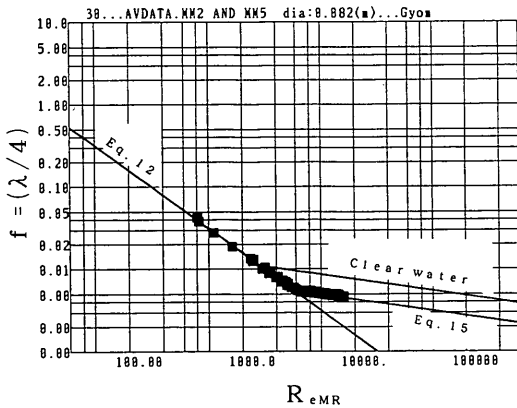


図-15 R_{eMR} と f の関係(ケース MM2-5 $n=0.31$)

ある。また、図-23には全ての実験ケースについて全データを同時に示している。

4. 空気混入時の水平管流動特性

4.1 水平管における平均ボイド率

一般的に、管内を流動している空気を含んだ流れは各相が同一速度で流れているとは限らない。したがって、水平管のある部分における気相の占める割合、すなわちボイド率 α は空気流量比 X_v とは異なった値を示すのが普通である。ここで、 X_v は

$$X_v = \frac{Q_a}{Q_a + Q_s} \quad (16)$$

で定義される。 Q_a は空気量であり、これを管断面積 A で除した値をみかけ空気流速といい、

水平管における空気混入軟泥の流動特性

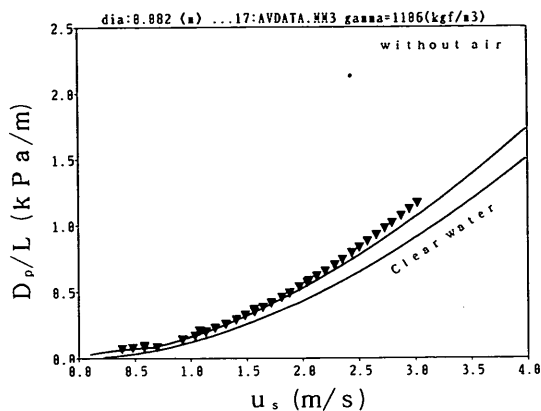


図-18 単位長さ当りの圧力損失 D_p/L (ケース MM 3)

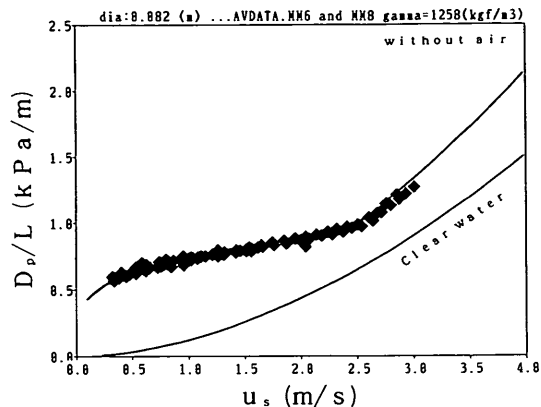


図-21 単位長さ当りの圧力損失 D_p/L (ケース MM 6-8)

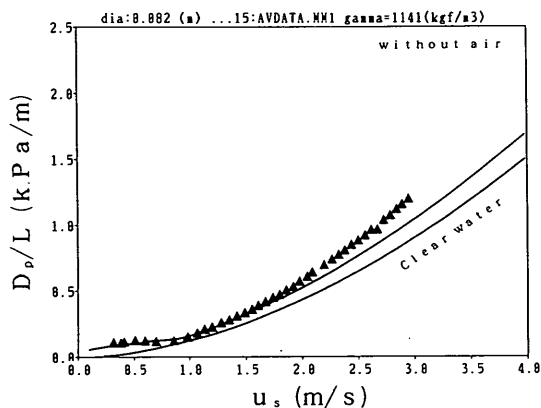


図-19 単位長さ当りの圧力損失 D_p/L (ケース MM 1)

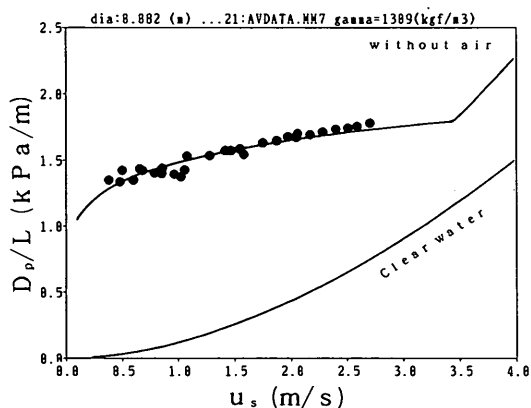


図-22 単位長さ当りの圧力損失 D_p/L (ケース MM 7)

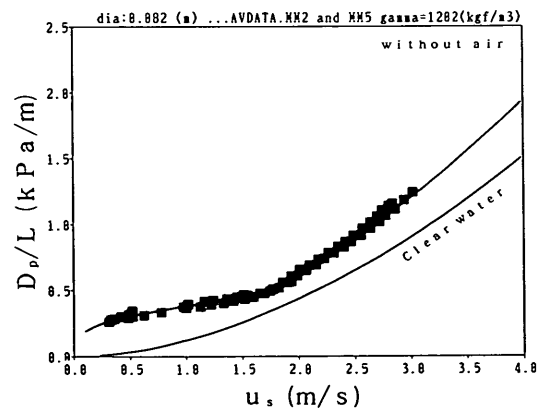


図-20 単位長さ当りの圧力損失 D_p/L (ケース MM 2-5)

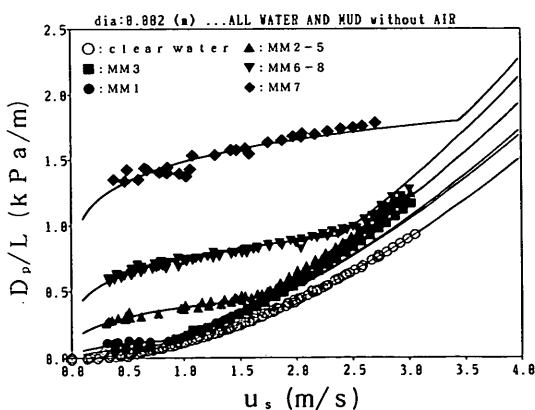


図-23 単位長さ当りの圧力損失 D_p/L (全ケース)

$$u_a = \frac{Q_a}{A} \quad (17)$$

で示される。同様に、 Q_s は液あるいは固液スラリの流量であり、このみかけ流速は

$$u_s = \frac{Q_s}{A} \quad (18)$$

で表される。したがって、 X_v をそれぞれのみかけ流速で表すと

$$X_v = \frac{u_a}{u_a + u_s} \quad (19)$$

となる。

通常、ボイド率の実測は非常に困難な作業であり、したがって過去に得られたボイド率の推定に関する数少ない成果を利用する場合が殆どである。しかしながら、ボイド率は空気を含んだ流れを解析する上においてかなり重要なパラメータであるだけに、ボイド率推定の誤差が結果に与える影響は非常に大きい。

そこで、本研究においては実験方法の項で述べた方法で平均的なボイド率を実測し、この値を利用して従来のボイド率推定式を補正するやりかたを採用した。

井上ら⁽¹⁴⁾は、気液各相に対する相対速度比を次元解析し、最終的に各相流量比ならびに密度比による影響を含んだ次式を得た。

$$s = 1 + B_k \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{0.46} \cdot \left(\frac{u_a}{u_s}\right)^{0.75} \quad (20)$$

ここで、 $s = \frac{\left(\frac{u_a}{\alpha}\right)}{\left(\frac{u_s}{1-\alpha}\right)}$

ρ_f, ρ_a : 液および空気の密度

である。また、式中の B_k は実験データに式(20)が一致するように0.025を選んでいる。式(20)において式(19)を利用して、空気流量比 X_v を導入し、さらにボイド率 α でとりまとめると、

$$\alpha = \frac{1}{1 + B_k \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{0.46} \cdot \left(\frac{1+X_v}{X_v}\right)^{0.25} + \frac{1+X_v}{X_v}} \quad (21)$$

となる。

ここでは、流量比ならびに密度比によるボイド率への

影響は式(20)のままとし、実測ボイド率ならびにそのときの空気流量比に関するデータと式(21)とを比較することによって本実験に適合する B_k を決定した。式(21)と実測データの比較を図-24ならびに図-25に示すが、両図から分かるように気液を中心とした乱流流れと層流部分の軟泥スラリとではかなり異なった値をとることがわかる。乱流では井上らの元式に近い0.026をとるが、層流については0.045となっており、流速分布がかなり異なっていることを示唆している。なお、空気混入軟泥の乱流部分については図-26に示すように、データ数は少ないが図-24と同じような傾向にあると考えられる。

4.2 空気を含んだ流れの各部流速

水平管における空気を含んだ流れは図-27のように模式的に示すことができる。いま、空気スラグ上で移動する軸を ξ 軸とし、この ξ 軸上から周囲の液体の連続を考える⁽¹⁵⁾、

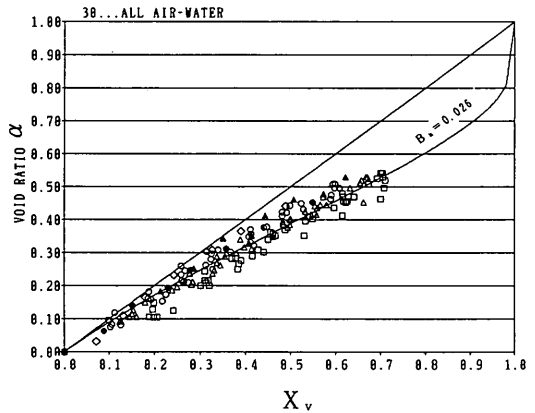


図-24 X_v と α の関係(空気-水 乱流)

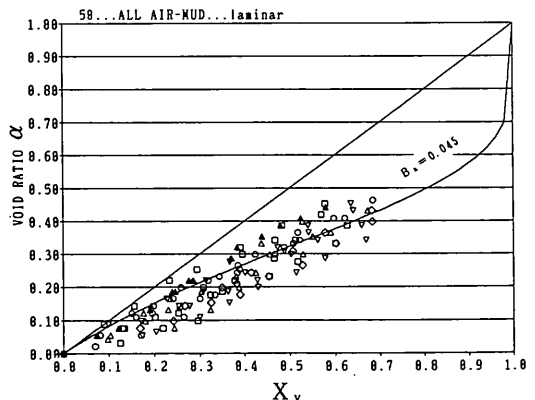


図-25 X_v と α の関係(空気-軟泥スラリ 層流)

水平管における空気混入軟泥の流動特性

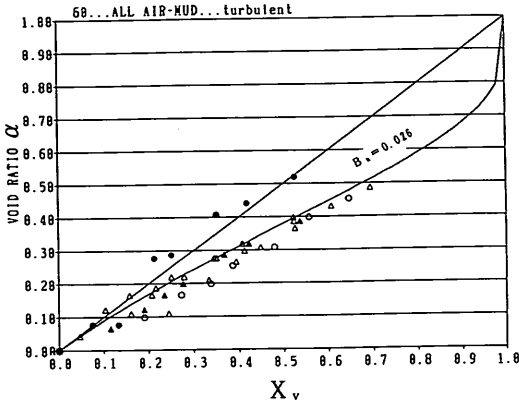


図-26 X_v と α の関係 (空気-軟泥スラリー 乱流)

$$A \cdot (V_w - V_a) = A \cdot (1 - \alpha_r) \cdot (V_f - V_a) \quad (22)$$

となり、これを整理して

$$V_f = \frac{V_w - \alpha_r \cdot V_a}{1 - \alpha_r} \quad (23)$$

が得られる。ここで、 α_r は管中心から半径方向に考えたボイド率である。

また、管の長手方向のボイド率を α とすれば

$$\alpha = \frac{\alpha_r \cdot l_a}{l_s}$$

という関係がある。

単位時間に供給される空気量 Q_a は

$$Q_a = \frac{A \cdot \alpha_r \cdot V_a \cdot l_a}{l_s} \quad (24)$$

であるから、式24および式23から空気スラグの絶対速度 V_a は

$$V_a = \frac{u_a}{\alpha} \quad (25)$$

で与えられる。

一方、単位時間に流れる液体の量 Q_l は

$$Q_l = \frac{A \cdot V_w \cdot l_w}{l_s} + \frac{A \cdot (1 - \alpha_r) \cdot V_f \cdot l_a}{l_s} \quad (26)$$

で表される。この式から、式23および式24を用いて V_f ならびに α_r を消去すれば

$$Q_l = A \cdot V_w - A \cdot \alpha \cdot V_a \quad (27)$$

となり、これに式25を代入すれば液スラグ部の絶対流速 V_w はボイド率に無関係に

$$V_w = u_a + u_s \quad (28)$$

となる。

このようにして得られる各部流速を、空気を含んだ清水流れに着色プラスチック球を入れ、この速度をビデオ解析する事によって得た実測値と比較してみた。

図-28 は、空気スラグ部の絶対速度を各相のみかけ流速の和に対してプロットしたものである。一般に、空気相速度は次に示すNicklinの式を用いることが多い。

$$V_a = 1.2 \cdot (u_a + u_s) \quad (29)$$

しかしながら、図-28 をみると、空気量が多くなると式29から外れてくるデータが多いことがわかる。これは、空気量が多くなってきた時、実際はボイド率が大きく低下するにもかかわらず式29では、低下割合を一定としているためであると考えられる。

一方、式28はこのようなボイド率の変化を反映したものであるため、傾向的に良くデータと一致しているといえる。ただし、 $u_a + u_s$ を横軸にとっているために実験データにおける u_s の最大値と最小値に対して計算している。

図-29 は、液スラグ部における液体の絶対速度をプロットしたものである。式28とよく一致しているといえるが、部分的にかなり低い値を示すデータも見られる。これは、ビデオ解析時に空気スラグの下に入り込んだプラスチック球の速度も混入しているためと考えられる。

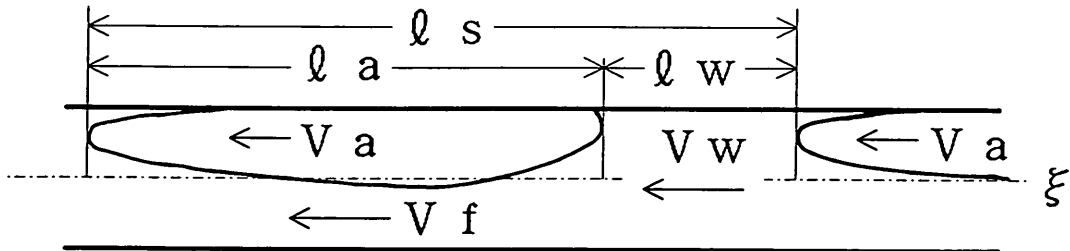


図-27 水平管における空気流動模式図

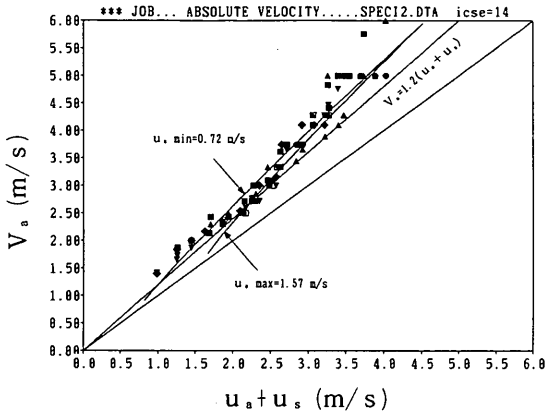


図-28 $u_a + u_s$ と V_a の関係

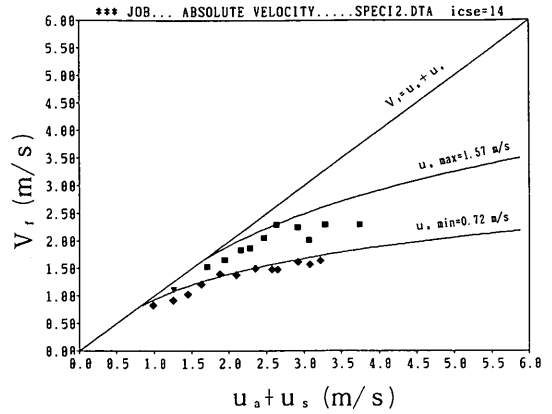


図-30 $u_a + u_s$ と V_r の関係

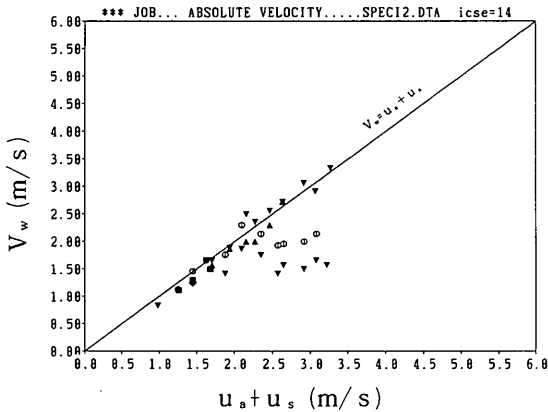


図-29 $u_a + u_s$ と V_w の関係

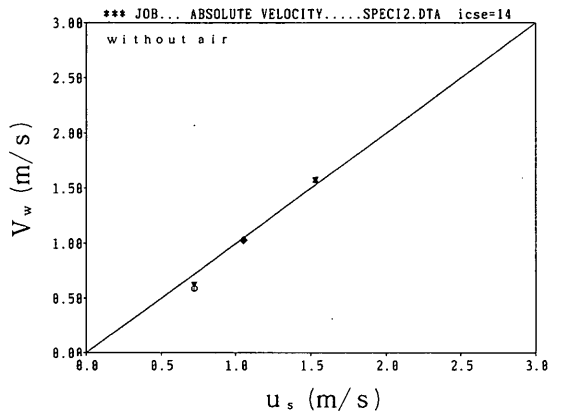


図-31 u_s と V_w の関係 (空気無しの場合)

たとえば、図-30 は完全にプラスチック球が空気スラグの下に存在する場合のみのデータであるが、 V_w よりはかなり小さい値を示している。

この速度は理論的に、式(23)で与えられる。図中の計算式は、管半径方向のボイド率を管長手方向のボイド率に等しいと仮定したときのものであり、 u_s が最大、最小の場合について計算している。式(23)と実験データは非常に良く一致しているといえる。

なお、図-31 は、このようなプラスチック球の動きを解析する手法がどの程度妥当であるかを、空気を含まない清水状態で確認したものである。電磁流量計で得られた平均流速にほぼ等しい結果を与え得るということがわかる。

4.3 空気混入時の水平管における圧力損失

図-32 は清水が流動している場合に空気を混入していったときの圧力損失の変化を示す例である。清水の場合は空気を混入することによって圧力損失が例外なく増

加していることがわかる。

次に軟泥スラリに空気を混入していった時の、単位長さ当たりの圧力損失がどう変わるかを濃度毎に示したのが図-33～図-36である。

ここに示すデータには、空気量がゼロであるデータ(図-32～図-36中の u_{s0})も含まれており、これらのデータは当然ながら第3章で得られた非ニュートン流体の圧力損失式に一致している。このときのスラリ流速を基準状態とし、徐々に空気量を増加させて圧力損失を測定している。したがって、ポンプを中心に考えると空気を混入する量によって系全体の抵抗が変動していることになる。特に、本実験装置には3m近い垂直管部があり、この部分のエアリフト効果がスラリ流速の小さい場合に大きく影響してくる⁽¹⁶⁾。

図-37～図-40 は、軟泥スラリ流動時にポンプ特性カーブ上の運転点が空気を入れていくにつれてどのようにシフトするかを示したものである。基準スラリ流速の

水平管における空気混入軟泥の流動特性

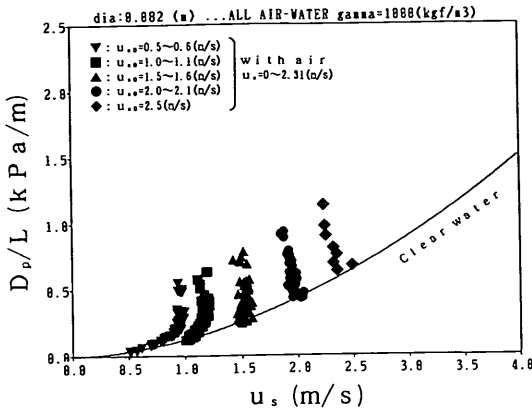


図-32 清水に対する空気混入時の単位長さ当りの圧力損失

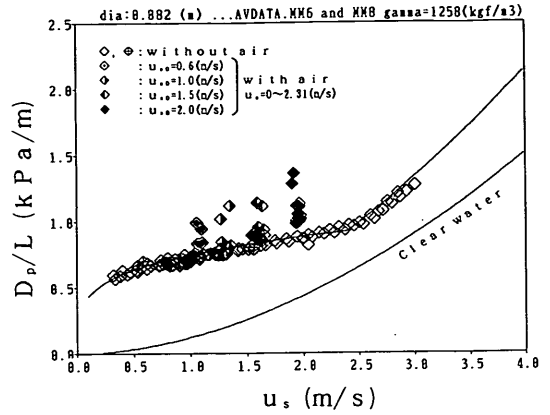


図-35 空気混入時の単位長さ当りの圧力損失(ケース MM6-8)

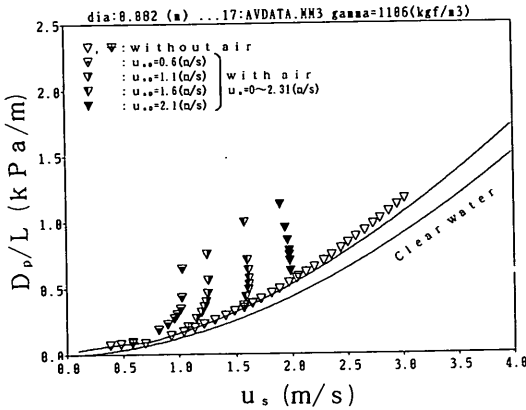


図-33 空気混入時の単位長さ当りの圧力損失(ケース MM3)

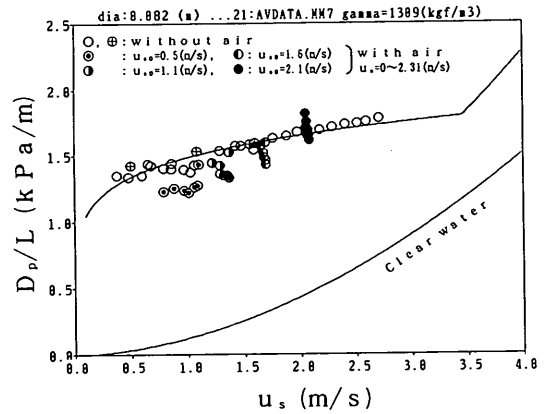


図-36 空気混入時の単位長さ当りの圧力損失(ケース MM7)

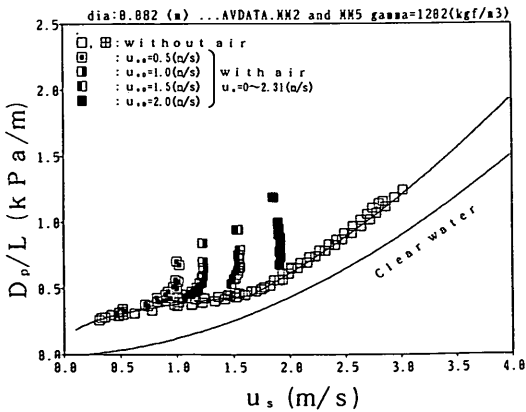


図-34 空気混入時の単位長さ当りの圧力損失(ケース MM2-5)

小さい場合には、空気を増やすにつれてスラリー流速が大きくなる方向、すなわち系全体の抵抗が小さい方へ運転点がシフトしてくる。あるところまで空気量を増加させると今度は逆にスラリー流速を小さくする方、すなわち抵抗が増加する方向にシフトしてくる傾向が見られる。一方、基準状態のスラリー流速が高い場合には、はじめからスラリー流速は小さくなる方へシフトしている。図-32～図-36の圧力損失データにおいて、スラリー流速が変動しているのはこのような理由に基づいている。

このように、スラリー流速が実験装置固有の理由によって変化しているために、空気混入時の圧力損失の変化を検討する場合、厳密には基準データとではなく、変化したスラリー流速に対する空気を含まない軟泥スラリーの圧力損失値(たとえば、3章の計算値)と比較しなければならない。

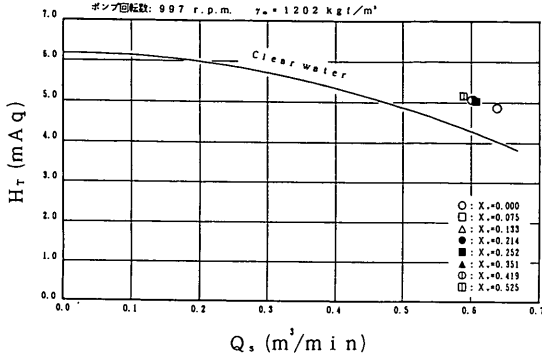


図-37 Q-Hカーブ (基準流速 $u_{s0} = 2.0\text{m/s}$)

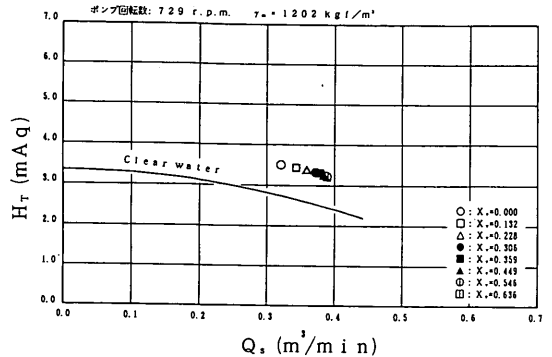


図-39 Q-Hカーブ (基準流速 $u_{s0} = 1.0\text{m/s}$)

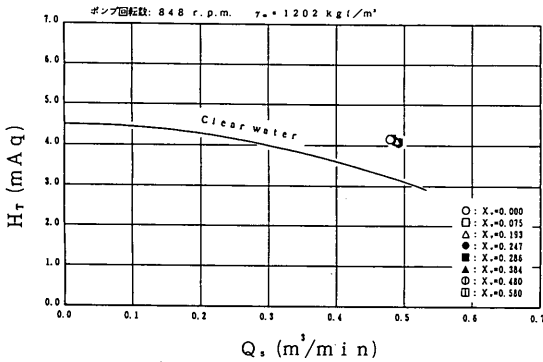


図-38 Q-Hカーブ (基準流速 $u_{s0} = 1.5\text{m/s}$)

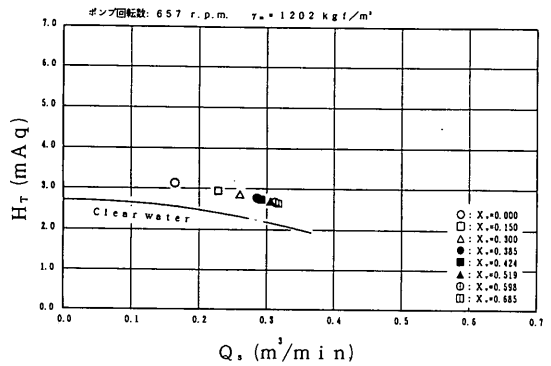


図-40 Q-Hカーブ (基準流速 $u_{s0} = 0.6\text{m/s}$)

以上のような前提のもとに、軟泥スラリの単位長さ当たり圧力損失に対する空気混入の影響を調べると、スラリー濃度が低い場合には殆ど清水の場合と変わらない結果となっている。しかしながら、濃度が高い場合には空気を混入することによって圧力損失が低下し得る場合があり、濃度が高いほどその傾向が顕著であることがわかる。

4.4 水平分離モデルと圧力損失の推定

空気混合比が高く、かつ沈降しにくい軟泥を含んだ気固液3相流の水平流れにおいては、固液相と気体相は水平に分離したモデルを考える方が現実的である。

すなわち、図-27において、空気スラグがかなり発達したと考えるわけである。このとき、各部の流速はどのようになるかを4.2の結果から計算して示したのが図-41である。空気量が増加するにつれて V_l の値は減少し、空気相流速 V_a も液スラグ流速 V_w に比べさほど大きくなることはないということがわかる。現実的に考えると、空気相の流動損失は液スラグ部よりはるかに小さいために、全体の平均流速を液スラグ中の液体速度 V_w であると考え、固液、気体どちらも V_w で動いているとしても圧力損失の推定に大きな誤差をもたらすことはな

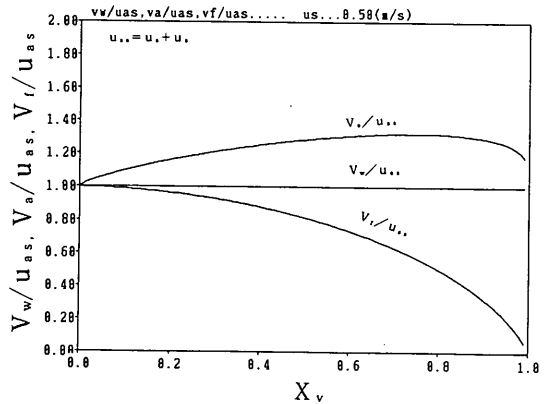


図-41 X_v に対する V_w, V_a, V_l の変化

いと思われる。

すなわち、全体の圧力損失は固液相、気体相それぞれが流速 V_w で流動していると考えたときの単独の損失を、考えている部分のボイド率 α で按分したものと考えて良い。これを式で表すと

$$D_p/L = d_{ps} \cdot (1 - \alpha) + d_{pa} \cdot \alpha \quad (3)$$

水平管における空気混入軟泥の流動特性

となる。ここで、 $d_{p,s}$ は固液相が V_w で流動しているときの単位長さ当たり圧力損失であり、3章に示す方法で計算する。

また、 $d_{p,a}$ は空気相が速度 V_w で単独に流動しているときの単位長さ当たり圧力損失である。摩擦損失係数として、ここでは式(2)の清水流送時の管摩擦損失係数から計算する。なお、 V_w は式(2)に示すように、固液相が単独で流れたと仮定したみかけ流速 u_s と気体相が単独で流れたと仮定したときのみかけ流速 u_a の和で定義される。

ボイド率は4.1で触れたように空気流量比 X_v と実測ボイド率との相関から井上らの式の係数を若干変更して用いている。係数 B_s は、層流に対し0.045、乱流に対し0.026である。

以上の方法で、固液スラリの流動特性が明かな場合に、空気を混入していった時の流動抵抗が計算出来ることに

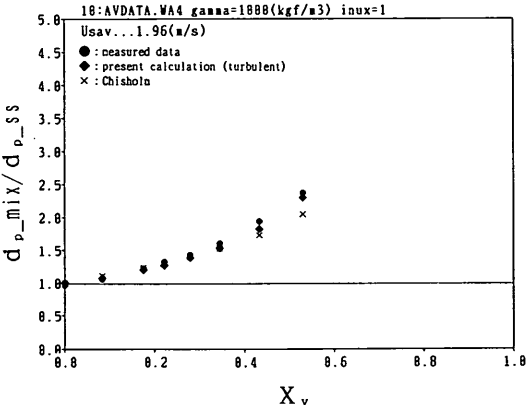


図-42 清水に対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{s0} = 2.0\text{m/s}$)

なる。図-42～図-54は、空気混合比が増加したときの圧力損失の変化を計算値と実験値で比較したものである。

上述したように、実験データ個々の固液スラリー流速すなわち u_s は一定ではないために、計算値もそれぞれの u_s に合わせて行われている。また、図中の表示は、単位長さ当たりの圧力損失ではなく、そのときの u_s を持つ空気を含まない軟泥スラリーの単位長さ当たりの圧力損失との比で表されている。

清水から濃度の高い部分まで、式(3)は実際の変化にかなり近い計算結果を示しているということがいえる。特に、濃度の高い部分における圧力損失比が1より低下する場合の変化傾向も比較的忠実に反映しているといえ、水平分離モデルを使用した今回の方法で、空気混入軟泥の水平管における流動特性をかなりよく説明することが出来ると考えられる。

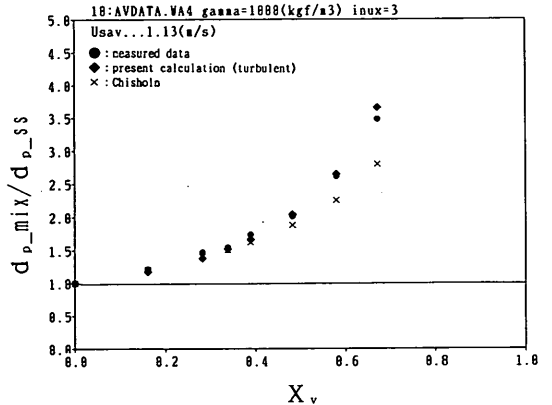


図-44 清水に対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{s0} = 1.1\text{m/s}$)

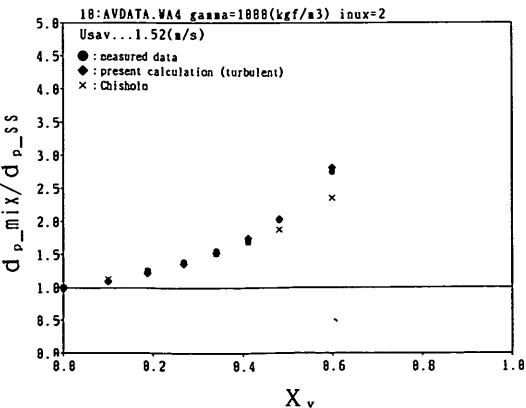


図-43 清水に対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{s0} = 1.5\text{m/s}$)

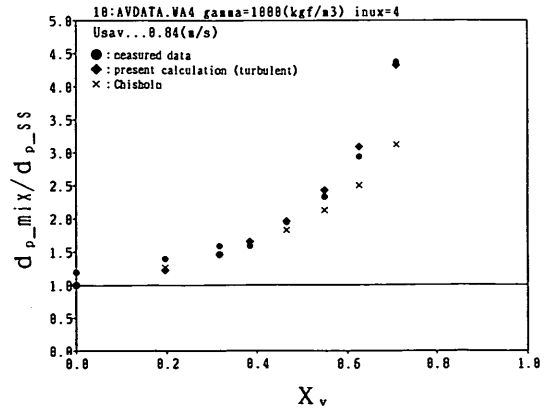


図-45 清水に対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{s0} = 0.6\text{m/s}$)

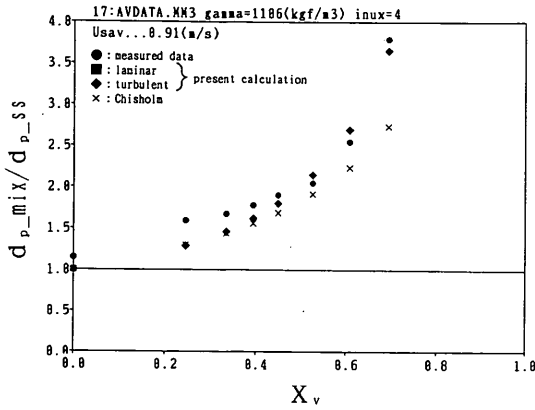


図-46 軟泥スラリーに対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{s,0} = 0.6\text{m/s}$ ケース MM 3)

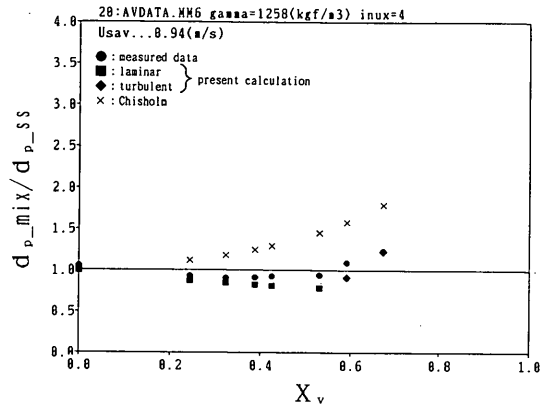


図-49 軟泥スラリーに対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{s,0} = 0.6\text{m/s}$ ケース MM 6)

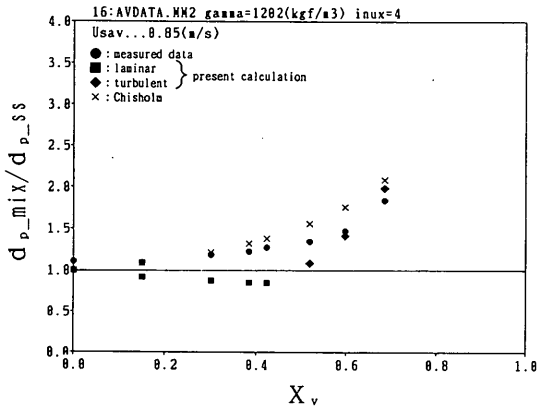


図-47 軟泥スラリーに対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{s,0} = 0.5\text{m/s}$ ケース MM 2)

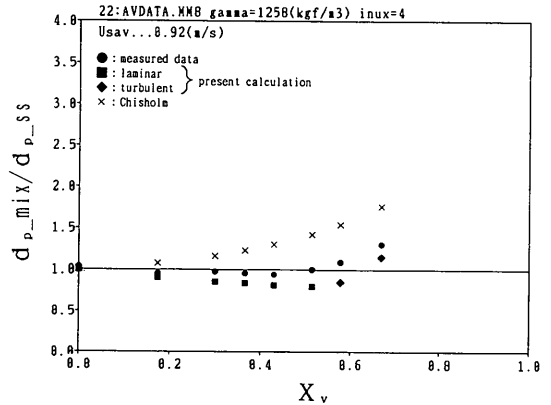


図-50 軟泥スラリーに対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{s,0} = 0.5\text{m/s}$ ケース MM 8)

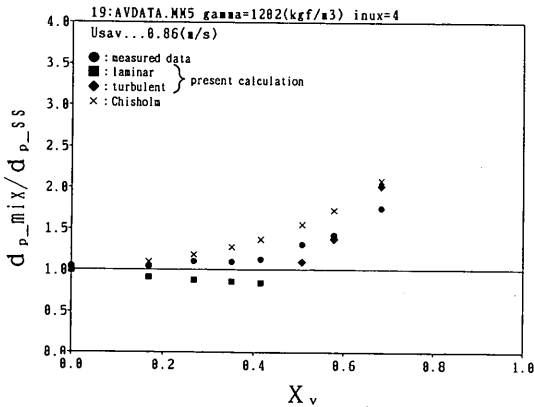


図-48 軟泥スラリーに対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{s,0} = 0.5\text{m/s}$ ケース MM 5)

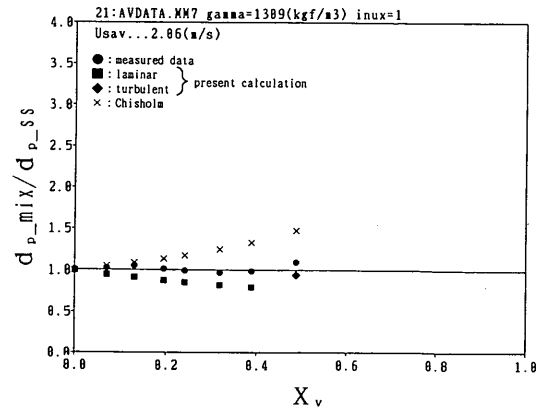


図-51 軟泥スラリーに対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{s,0} = 2.1\text{m/s}$ ケース MM 7)

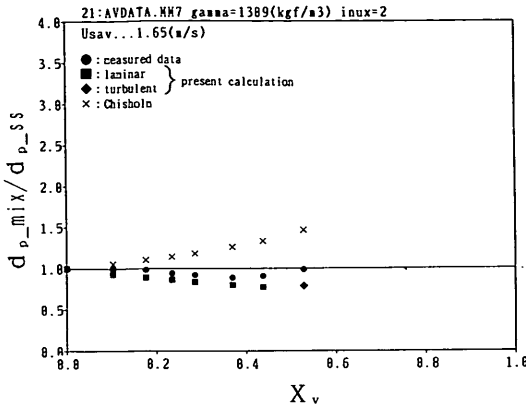


図-52 軟泥スラリに対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{0,0} = 1.6\text{m/s}$ ケース MM7)

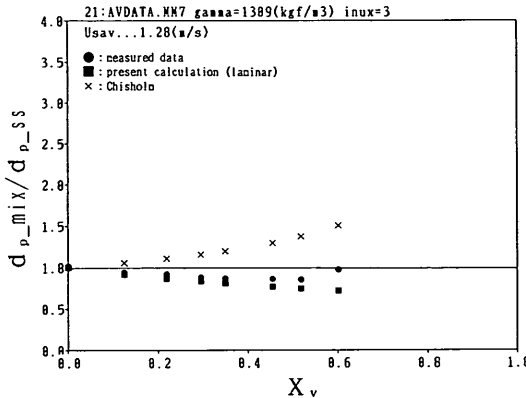


図-53 軟泥スラリに対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{0,0} = 1.1\text{m/s}$ ケース MM7)

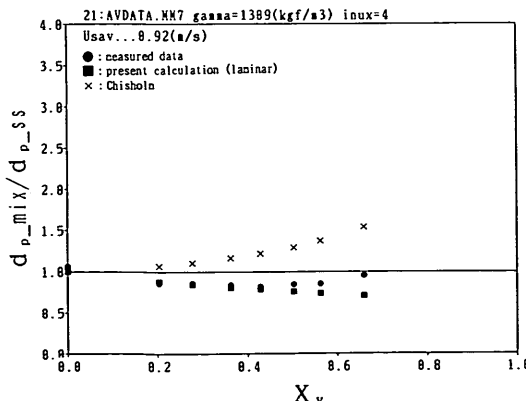


図-54 軟泥スラリに対する圧力損失比の比較 (基準流速 $u_{0,0} = 0.5\text{m/s}$ ケース MM7)

このような手法とは別に、Lockhart-Martinelli のパラメータを利用して空気を混入していったときの流動抵抗を推定する場合がある。これは、Lockhart-Martinelli のパラメータ X ならびに ϕ_l を使用して、液相、気相がそれぞれ単独で流動したと仮定した場合のそれぞれの圧力損失から全体の圧力損失を求めるのによく利用されている⁽⁹⁾。また、一定の条件下では液相のかわりに固液スラリ相を代用することも可能である⁽¹⁰⁾。Lockhart-Martinelli のパラメータ X ならびに ϕ_l は

$$X = \left(\frac{d_{p,ss}}{d_{p,as}} \right)^{1/2}$$

$$\phi_l = \left(\frac{D_p/L}{d_{p,ss}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

である⁽¹¹⁾。

ここで、

$d_{p,ss}$: 搬送スラリのみ流れたと仮定したときの圧力損失

$d_{p,as}$: 空気のみ流れたと仮定したときの圧力損失

と定義している。これらのパラメータ X ならびに ϕ_l の間に、Chisholm は次のような関係式を得ている。

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

$$C = 20 \quad (t-t \text{系}) \quad (3)$$

これから、ある X について ϕ_l が得られ、式(3)から空気混合流れの単位長さ当たり圧力損失が求められる。ここでは、 $d_{p,ss}$ の計算に第3章の方法を用い、実験データと比較してみた。

図-55 に示すように、空気-水系では実験値と比較的良好一致を見せるが、図-56 の例からわかるように高濃度軟泥に空気を混入したときの圧力損失の低下傾向まではフォローし得ないことがわかる。これを単位長さ当たりの圧力損失の比に換算した結果が、図-42~図-54 に併記してある。低濃度スラリに対しては、一致性は良いが高濃度になってくると傾向的に不一致の度合いが大きくなっていくということがわかる。

4.5 高濃度スラリに対する空気混入効果

圧力損失に関する実験データの傾向から、水平管においては清水あるいは低濃度スラリに空気を混入した場合、空気を混入することは流動抵抗を増加させることにつな

がるけれども、濃度が高くなってくるとそれ自身の流動抵抗よりも小さい抵抗で流動させられる場合があるということがわかった。

この仕組みを説明したのが図-57ならびに図-58である。これらは、清水および比重量1309 (kgf/m³) の固液スラリーが流速1.55m/sで管内を流動しているときに、空気混入量に応じて速度、摩擦損失係数等の諸量が空気を含まない場合に比べてどのように変化するかを示したものである。中で使用されている記号は以下のとおりである。

d_{p_mix}/d_{p_ss} : 空気を含まないスラリーの圧損に対するボイド率で按分した空気混入スラリーの圧損の比

f_2/f_1 : 空気を含まないスラリーの f に対する速度の増大した空気混入スラリーの f の比

d_{p_s}/d_{p_ss} : 空気を含まないスラリーの圧損に対する速度の増大した空気混入スラリーの圧損の比

1. - void : 空気混入による圧損の按分割合

$(u_s + u_a)/u_s$: 空気混入による空気を含んだ部分のスラリー速度の増加

基本的に、空気を混入すると気相、固液相各部の流速は増大する ($(u_s + u_a)/u_s$ 参照)。一方で、レイノルズ数は増加するから、 f_2/f_1 に示されるように摩擦損失係数は低下する。清水の場合は殆ど乱流ゾーンであるからこの低下割合も小さく、結果的に流速増大に伴う液スラグによる圧力損失は非常に大きくなり (d_{p_s}/d_{p_ss})、空気が混入することによる液スラグの壁面との接触割合の低下 ((1-ボイド率) と考えて良い) で圧力損失を

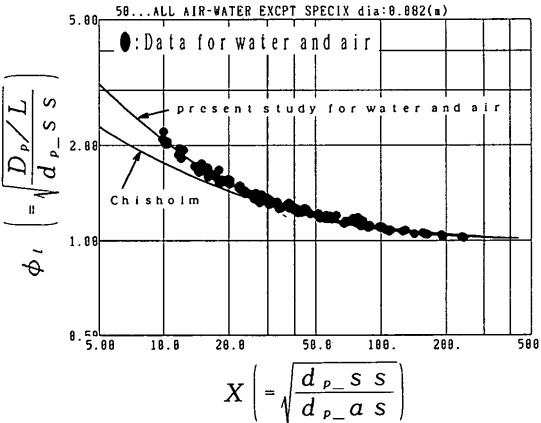


図-55 ϕ_i と X の関係 (水-空気)

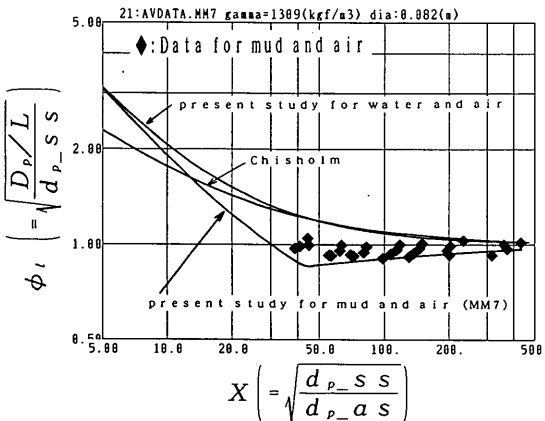


図-56 ϕ_i と X の関係 (軟泥スラリー-空気 ケース MM7)

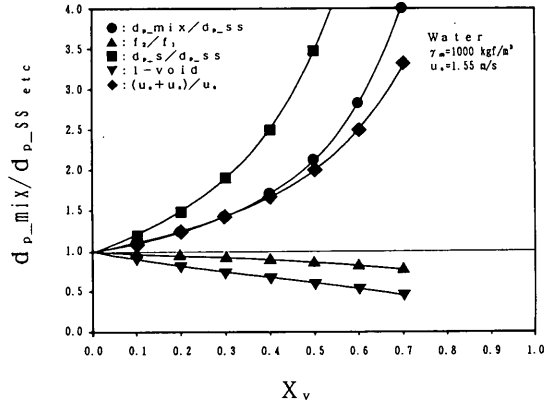


図-57 X_v に対する圧力損失比等諸量の変化 (水-空気)

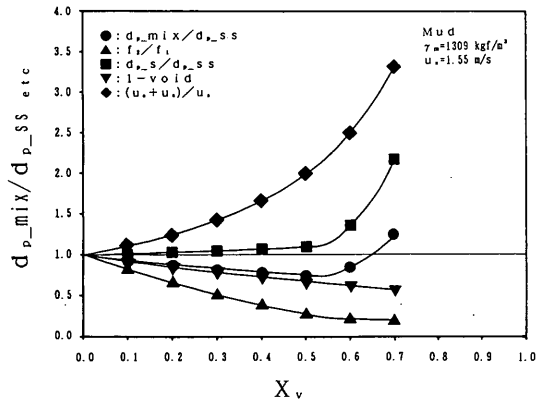


図-58 X_v に対する圧力損失比等諸量の変化 (軟泥スラリー-空気 ケース MM7)

相殺するには及ばないことになる。結果的に、 $d_{p,mix}/d_{p,ss}$ に見られるように空気混合スラリの圧力損失は空気を含まない場合 ($d_{p,ss}$) に比べてかなり高くなる。

一方、高濃度スラリの場合には、層流部分が多いためこの範囲での摩擦損失係数の低下が大きく、流速増大に伴う液スラグによる圧力損失はそれほど大きくなるならない (図-58 $d_{p,s}/d_{p,ss}$ 参照)。したがって、空気が混入することによる液スラグの壁面との接触割合の低下が清水の場合と同じであっても、空気混合スラリの圧力損失は空気を含まないときに比べて小さくなることも可能となってくる。

この低下傾向は、図-58 の f_2/f_1 の変化からわかるように、空気を混入したときの固液スラグ速度の範囲が層流から外れる点まで続く。すなわち、レイノルズ数が臨界レイノルズ数に達した点が圧力損失比の最も低い点となっており、これ以後圧力損失は再び増加してくる。

以上の内容は、実際に空気混入軟泥の流送条件を検討する場合非常に有用な情報である。たとえば、一定量の固液スラリを輸送したい場合に、固液スラリの濃度調整ならびに空気吹き込み量に関する最適な条件を検討することが可能となってくる。つまり、ある状態のスラリに空気を混入したときそれによって増加する流速が臨界点にくるように空気量を調整することで最適運転点が得られるはずである。図-59 は、このような方法でスラリ流速 (空気を含まない状態) 0.4m/s の水平管流動スラリの最適空気吹き込み量がどこにあるかを、スラリ濃度に対して計算したものである。

たとえば、スラリ比重を1.3になるように濃度調整した場合、最適運転状態での空気混合比は約85%であり、そのとき単位長さ当たりの圧力損失はスラリが単独に流れるときの約60%となるということがわかる。

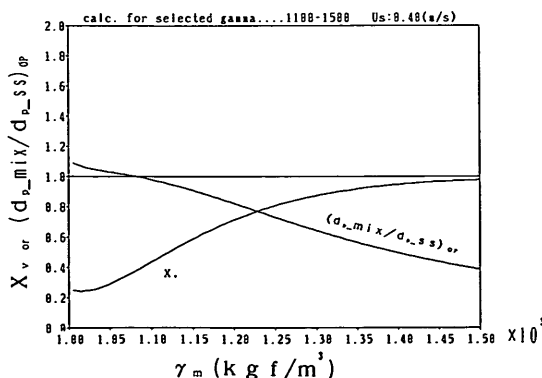


図-59 スラリ比重量に対する最適運転点の変化

5. 結論

空気混入軟泥の水平管における流動実験を行い、固液スラリそのものの流動特性をはじめとして、この流れをベースとした空気混入時の流動特性について種々の知見を得ることができた。これをとりまとめると、以下のようになる。

5. 1 固液スラリ自体の管内流動は、ここで採用したべき法則モデルに対して Metzner-Reed のレイノルズ数を用いて解析する事で十分説明できる。特に、層流から外れてくる、臨界レイノルズ数もレオロジー指数 n と強い相関があり、Ryan-Jhonson の関係よりも益山らの示す関係に近いといえる。
5. 2 流れが層流から外れる遷移領域における摩擦損失係数を清水流動時の摩擦損失係数 (式(2)) を参考にして求めている。今回の実験領域では、ほぼ実験データとの一致性は良好であったが、さらに高い流速範囲においてどのように変化してゆくかについては、今後 Kembrowski らの関数に近い形を十分検討する必要がある。
5. 3 本実験で得られたレオロジー指数 n とコンシステンシー係数 K は、スラリ比重量 (濃度) に対し式(8)、式(9)で表すことができた。この関係式は土質が変われば異なるものとなると考えるほうが当然であるが、言い替えると、現地浚渫土による簡単な室内流動テストから、現地の流送条件に合ったパラメータを得ることが可能であるといえるであろう。
5. 4 空気を混入した場合の管内平均ボイド率は、ホップのレベル変化から実測することが出来た。層流部分の方が乱流部よりも空気流量比 X_v に対する低下割合が大きかった。これは、層流と乱流における流速分布の差に起因すると考えられる。実測ボイド率との相関から得た井上らの式(1)における係数 B_0 は、層流に対し 0.045、乱流に対し 0.026 であった。
5. 5 空気を混入した場合の圧力損失は、清水や濃度の低い軟泥スラリでは単独で流動している場合に比べ例外なく高くなる。しかしながら、スラリ濃度が高くなってくると、ある流速範囲で単独流動状態よりかなり低い圧力損失を示すようになる。このような空気を混入した流動特性は、本稿で示した水平分離モデルを用いてかなりよく説明することができる。

5. 6 5. 5 に示した方法によると、圧力損失最低点は空気混入スラリの平均速度が層流から外れる臨界点で生じる。このことから、空気量一定の場合のスラリの最適調整方法、あるいは一定濃度スラリーに対する最適混入空気量が得られる。

6. あとがき

本研究成は室内流動試験データのみを検討解析したものである。したがって不十分な点は多いけれども、空気混入スラリー輸送システムを設計する上で貴重な基礎データとして活用され得ると考えている。しかしながら、空気を含んだ管内流れにおいてさらに重要な問題は、管径によるフローパターンの違いをどのように評価するかといった点に代表されるようなサイズエフェクトの問題である。すなわち、より適切な流送条件の設計を実用規模段階で可能とするためには流送規模、土質条件等の異なる現地データとの比較がどうしても必要である。今後とも、実機規模で得られたデータを収集し、今回得られた手法をこれらに適用し、妥当性を確認していくことが必要であると考えられる。

(1991年3月31日受付)

参 考 文 献

1. 栗原和夫, 施工研究 "土砂風送" によるずり出し, 土木施工, 21巻4号, pp.26-35, 1980. 4
2. 岡山義邦, 八木得次, エアリフト工法について, 昭和52年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 205-235, 1977. 12
3. 宇佐美毅, 斉藤隆之, 北原良哉, エアリフトポンプによる固体粒子の輸送特性 (第2報), 日本鉱業会誌, Vol.98 No.1127, pp.29-34, 1982. 1
4. 斉藤他, 土圧型シールドにおける気泡混入により流動性を高める推進実験, 大林組研究所報, No.21, pp.105-109, 1980
5. 斉藤他, 気泡シールド工法における掘削土の連続輸送に関する基礎実験, 大林組研究所報, No.27, pp.107-111, 1983
6. 藤井邦和, 大津不二夫, ウーザポンプ船による有機性堆積土の除去, 港湾技術要報 No.100 (第12回有害底質の処理処分に関する日米専門家会議議事録 運輸省港湾局), 1987. 3
7. R.P.CHHABRA et al., Co-current Flow of Air and Shear Thinning Suspensions in Pipes of Large Diameter, *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol.61, pp.56-61, Jan. 1983.
8. R.P.CHHABRA et al., Isothermal Two-Phase Flow of Air and Aqueous Polymer Solutions in A Smooth Horizontal Pipe, *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol.62, pp.22-32, Jan.1984.
9. G.W. GOVIER and K. AZIZ, The Flow of Complex Mixtures in Pipes, *Van Nostrand Reinhold Company*, NY, 1972
10. A.B. Metzner and J.C. Reed, Flow of Non-Newtonian Fluids-Correlation of the Laminar, Transition, and Turbulent-Flow Regions, *A. I.Ch.E. Journal*, Vol.1 No.4, pp.434-440, December 1955.
11. 益山忠, 川島俊夫, 非ニュートン流体の下限臨界レイノルズ数について, 日本機械学会論文集(第2部), 43巻373号, pp.3320-3326, 昭和52年9月
12. N.W. Ryan and M.M. Johnson, Transition from Laminar to Turbulent Flow in Pipes, *A.I.Ch.E. Journal*, Vol.5 No.4, pp.433-435, December 1959.
13. Z. Kemblowski and J. Kolodziejski, Flow resistance of non-Newtonian fluids in transition and turbulent flow, *International Chemical Engineering*, Vol.13 No.2, pp.265-279, April 1973.
14. 井上晃, 青木成文, 管内二相流の圧力損失に関する基礎的研究 (第4報), 日本機械学会論文集 (第2部), 36巻288号, pp.1366-1373, 昭和45年8月
15. 世古口他, 伝熱工学の進展 (Vol.1), 養賢堂, 1973
16. 岡山他, 垂直管土砂輸送における空気混入の影響, 港湾技研資料, No.656, pp.1-38, 1989
17. R.W. Lockhart and R.C. Martinelli, Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two Component Flow in Pipes, *Chemical Engineering Progress*, Vol.45 No.1, pp.39-48, Jan.1949.

主要記号一覧

A	: 管断面積
D	: 管径
D_p/L	: 単位長さ当たりの圧力損失
d_{p-a}	: 気体相が絶対速度 V_w で流動したときの単位長さ当たりの圧力損失
d_{p-as}	: 空気のみ流れたと仮定したときの単位長さ当たり圧力損失
d_{p-mix}	: ボイド率で按分した空気混入スラリの圧損
d_{p-s}	: 固液相が絶対速度 V_w で単独で流動したときの単位長さ当たりの圧力損失
d_{p-ss}	: 搬送スラリのみ流れたと仮定したときの単位長さ当たり圧力損失
f	: Fanning の管摩擦損失係数
f_c	: 臨界レイノルズ数における摩擦損失係数
f_w	: Fanning の清水流送時の摩擦損失係数
K	: コンシステンシー係数
l_a	: 空気スラッグの管長手方向の長さ
l_w	: 液スラッグの管長手方向の長さ
l_s	: $l_a + l_w$
n	: レオロジー指数
Q_a	: 単位時間当たり空気流量
Q_s	: 液あるいは固液スラリの単位時間当たり流量
r	: 管中心から外へ向かう距離
r_o	: 管の半径
Re_t	: レイノルズ数
Re_{MR}	: Metzner-Reed のレイノルズ数
Re_{MRC}	: 臨界レイノルズ数
S_v	: せん断速度
u	: 管内流速
u_a	: 空気みかけ流速
u_s	: 液あるいは固液スラリのみかけ流速
u_{s0}	: スラリ基準流速
V_a	: 空気スラッグ部の絶対速度
V_f	: 空気スラッグ下方の液の絶対速度
V_w	: 液スラッグ部の絶対速度
X	: Lockhart-Martinelli のパラメータ
X_v	: 空気流量比
α	: ボイド率
α_r	: 管中心から半径方向にみたボイド率
γ_m	: スラリ比重量
μ_w	: 清水の粘性係数
ρ_a	: 空気の密度
ρ_f	: 液またはスラリの密度
ρ_w	: 清水の密度
τ	: せん断応力
τ_o	: 管壁 r_o におけるせん断応力
ϕ_l	: Lockhart-Martinelli のパラメータ