

長距離管路内における液相スラグの 流動特性に関する研究

STUDY ON FLUIDITY CHARACTERISTICS OF WATER SLUG FLOW CAUSED
BY COMPRESSED AIR IN LONG HORIZONTAL PIPELINE

小川元¹・田崎道宏²・落合実³・遠藤茂勝⁴

Hajime OGAWA, Michihiro TAZAKI, Minoru OCHIAI and Shigekatsu ENDO

¹正会員 日本大学大学院生産工学研究科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

²学生会員 日本大学大学院生産工学研究科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

³正会員 工修 日本大学講師 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

⁴フェロー会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

Recently, the long-distance mud transport pipeline systems using a compressed air are utilizing in the field of marine construction works and coastal zone developments. This system is very useful for high density mud transport. However, previous studies of air-liquid two-phase flow have mainly focused on the flow deformation phenomena in short-distance pipeline. The purpose of this study was to clarify the mechanism of mud transporting pipeline system using a compressed air in the experimentally. This papers describe about moving velocity, pressure gradient, pressure fluctuations and passage period of slug flow in long pipeline. As the result of experiment, it was to clarify that the rate of increase on slug velocity is remarkable at the end of pipeline and it was shown that the passage period of slug flow in long pipeline was controlled by quantity of liquid.

Key Words : Slug flow, two-phase flow, slurry transport with compressed air

1. はじめに

浚渫土砂のように含水比の高い泥土の輸送や埋め立て地の造成に関わる土砂輸送,あるいは貯水池等に堆積した泥砂の搬出,輸送などには空気と土砂をパイプ内に連続的に供給することによって発生するスラグ流を応用した輸送方式が,実用に向けて実施工に利用されるようになってきた。しかし,泥土の物理的特性が,それぞれの地点で異なるため,スラグ発生時の土砂の閉塞を恐れて大量の圧縮空気を用いているためスラグ流の速度が毎秒10.0m以上にも達し,管路終端における排出速度も極めて速く爆音を発するなど,減勢の工夫が必要となり効率的な輸送状態とは言えない。

これらの事は,実用的なスラグ流輸送に関する研究^{1)~9)}が少ない上現象解明がまだ十分でないためであり,所要動力の算定や圧力損失の推算等,この輸送システムの実用化に向けての基本的課題が残されている。従って著者らは,空気輸送に関する基本的な機構を調べる目的で水と空気を用い,可視化に重点を置いたスラグ流に関する研究^{9)~11)}を重ねてきた。

安定したスラグ流を規則的に発生させ,いかに遠方まで送るかについては工学的に大きな課題である。

これまでに行った2,3の現地施工時における計測の結果と,水・空気を用いた室内での可視化実験の検討の結果,スラグ流の発生状況や管路内での圧力損失の傾向などスラグ流の流動状態が室内実験の結果と定性的にきわめて良い一致を示していることから,現地の技術的な課題を目標に比較的短い50.0m程度の距離の実験から順に管路延長を延ばして,空気流量や水流量の比率を変化させ輸送距離が長くなる事によるスラグ流の現象の変化に注目して検討を行った。

本報では管径 $\phi=3.80\text{cm}$, 管路延長 $L=600.0\text{m}$ の長い管路における実験結果をもとに,管路内におけるスラグ流の速度変化,通過周期のバラツキ,及び管内の圧力変動等について検討しようとするもので,管路延長が長くなる事により生ずると考えられるスラグの崩壊,消滅およびそれに伴うスラグの合体や通過周期の変動などから,長距離管路輸送における管路内空気の圧縮性の効果と圧力損失および輸送効率等の課題について検討した。

2. 実験内容及び実験装置

スラグ流に関する可視化実験として水と空気を用いて、これまでに管径3.80cm、延長50.0mと150.0mの透明パイプを用いた実験から、スラグの発生、成長、流動、崩壊の過程およびスラグ流速に関係する空気流量の効果やスラグの流動過程における速度変動と圧力降下等について検討した。しかし、パイプの総延長が管路内の現象を著しく支配することや、実用的な観点から長距離輸送を想定して、パイプ延長を600.0mとし、30ケースの実験条件について管内各地点でのスラグ流の速度、管内圧力、スラグの通過周期等を計測し、相互の関連について検討することを目的とした。

実験装置の概略は図-1に示したとおりである。総延長 $L=600.0\text{m}$ に対して途中の50.0(3ch)、100.0(1ch)、150.0(5ch)、250.0(4ch)、300.0(2ch)、400.0(6ch)、550.0m(7ch)の合計7地点に圧力計を設け管内の圧力変動を測定した。また、管内のスラグ流の通過周期については、55.0、185.0、335.0、435.0、570.0mの5地点で測定した。さらにスラグ流の速度については周期測定を行った上記の各地点より下流に10.0m区間を設定し、スラグ流の通過時間を測定してスラグ流の速度を算出した。

実験では、水は室内地下タンクよりポンプによって、また空気は屋外に設置されている大型のコンプレッサーより供給されるようになっている。これらは、それぞれの流量計で流量検定した後、長さ1.0mの塩化ビニール製のパイプ内に同時に連続的に供給される。このことにより、塩化ビニールパイプからビニールパイプに接続された直後の部分でスラグが発生し、それに伴うスラグ流が管内を流動してパイプ内を水が輸送される。

実験条件は表-1(a),(b)に示したように空気流量を60.0、80.0、100.0、120.0、140.0(ℓ/min)の5通りに対して、それぞれの供給水流量を8.0、12.0、16.0、18.0、20.0、22.0(ℓ/min)の6通りとし、水流量 Q_w 、空気流量 Q_{ma} の比 $Q_w/Q_{ma}=0.057\sim0.367$ の合計30通りの条件で実験を行った。

3. 実験結果および考察

(1) 空気流量とスラグ流速について

延長600.0m間における管路内を流動するスラグ流の速度変動を調べるため、横軸に空気流量 Q_{ma} 、また縦軸にスラグ流の速度 V_s をとり、供給水量 Q_w を変化させた時の測定区間(55~65m、185~195m、570~580m)別の速度の結果を示したものが図-2である。

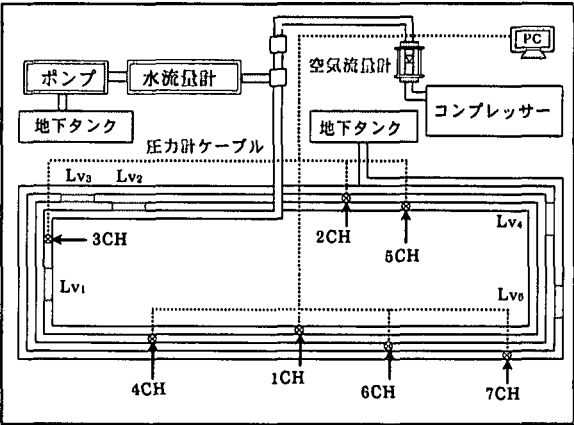


図-1 実験装置概略図

表-1(a) 実験条件 (水・空気流量比)

空気量 (ℓ/min) 水量 (ℓ/min)	60.0	80.0	100.0	120.0	140.0
8.0	0.13	0.10	0.08	0.07	0.06
12.0	0.20	0.15	0.12	0.10	0.09
16.0	0.27	0.20	0.16	0.13	0.11
18.0	0.30	0.23	0.18	0.15	0.13
20.0	0.33	0.25	0.20	0.17	0.14
22.0	0.37	0.28	0.22	0.18	0.16

表-1(b) 実験条件 (測定諸元)

計測地点及び記号		
圧力測定 (P)	スラグ周期 (T)	スラグ速度 (V)
$P_1=\text{CH3}(50.0\text{m})$	$T_{s1}(L_{T1}=55.0\text{m})$	$V_{s1}(L_{V1}=55.0\sim65.0\text{m})$
$P_2=\text{CH1}(100.0\text{m})$	- - -	- - -
$P_3=\text{CH5}(150.0\text{m})$	$T_{s2}(L_{T2}=185.0\text{m})$	$V_{s2}(L_{V2}=185.0\sim195.0\text{m})$
$P_4=\text{CH4}(250.0\text{m})$	- - -	- - -
$P_5=\text{CH2}(300.0\text{m})$	$T_{s3}(L_{T3}=335.0\text{m})$	$V_{s3}(L_{V3}=335.0\sim345.0\text{m})$
$P_6=\text{CH6}(400.0\text{m})$	$T_{s4}(L_{T4}=435.0\text{m})$	$V_{s4}(L_{V4}=435.0\sim445.0\text{m})$
$P_7=\text{CH7}(550.0\text{m})$	$T_{s5}(L_{T5}=570.0\text{m})$	$V_{s5}(L_{V5}=570.0\sim580.0\text{m})$

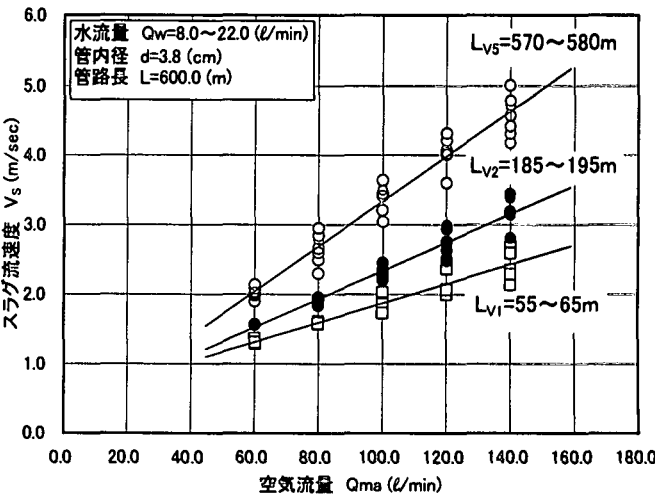


図-2 空気量とスラグ流速の関係

これらの結果によれば、管路内のどの区間でも空気流量が増加するとスラグ流速が増大することがわかる。図中の□印および●印で表される比較的供給点に近い所では、水流量によるスラグ流速はあまり変化していないが○印で示した570m以上の出口付近になると、スラグ流速は、水流量によって変動する事が認められる。これは出口が大気中に開放されているため管内のスラグ流の不安定性が管路内の圧力変動の乱れを引き起こし速度の変化に影響が現れているものと考えられる。

(2) 水流量とスラグ流速について

水流量がスラグ流速にどのような影響を与えるかについて調べたものが図-3で、横軸に供給水流量 Q_w をとり縦軸にスラグ流速 V_s をとって示したものである。空気流量 Q_{ma} をパラメーターにとって示したが、水流量の多少に関わらずスラグ流速はほぼ一定で水流量に支配されないことがわかる。

(3) スラグ流速の増加率について

管路内におけるスラグ流速の水供給地点からの距離 L に対する増加の割合を示したものが図-4 (a) (b)である。速度は水流量にあまり支配されないことから水流量を一定 $Q_w=20.0$ (ℓ/min) とし、横軸に距離 L 、縦軸にはスラグ流発生直後の $L_{v1}=55.0\sim65.0$ m で測定した速度 V_{s1} に対する各地点のスラグ流速 V_s との比 V_s/V_{s1} を示し、空気流量を5通り変化させたときの結果をまとめたのが図-4 (a) である。いずれの空気流量の場合も最初の200.0mまでは空気流量の変化に対してスラグ流速の変化は少ないが、スラグ流速は距離に対して増加することがわかる。特に200.0m以降になると、スラグ流速が急激に増加の傾向を示し、この傾向は空気流量が多くなるほど顕著になる。しかし図-4 (b) に示したように $Q_w=8.0$ (ℓ/min) としたときでは、地点の経過とともに管内のスラグ流速は増加するが、 $Q_w=20.0$ (ℓ/min) の場合と比較して、空気流量の変化に対する速度増加の割合は少ない。すなわち空気流量が一方向的に多くても輸送される水量が少ないため空気の圧縮性の効果が生じないためと考えられる。

(4) 空気流量とスラグ流通過周期について

管路内で発生するスラグ流は、水、空気が混合状態で供給された後、水と空気が次第に分離し、供給地点に近いところで発生して管内を流動する。管路端部までの流動状態は、必ずしも一様ではなくスラグの消滅、吸収、合体、再発生を伴いかなり複雑な様相を呈する。ここで述べるスラグ流周期とは、これらの流動状態を含んだスラグの通過周期を示すもの

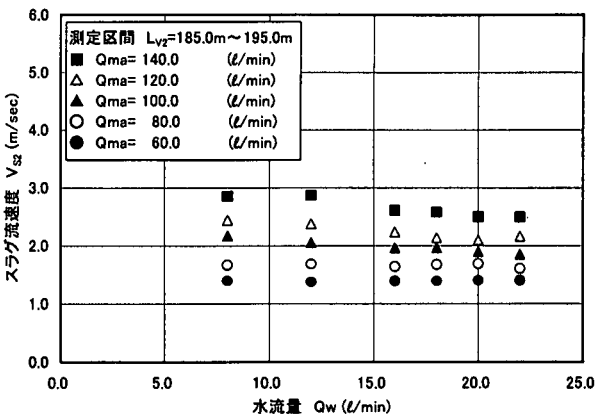


図-3 水流量とスラグ流速

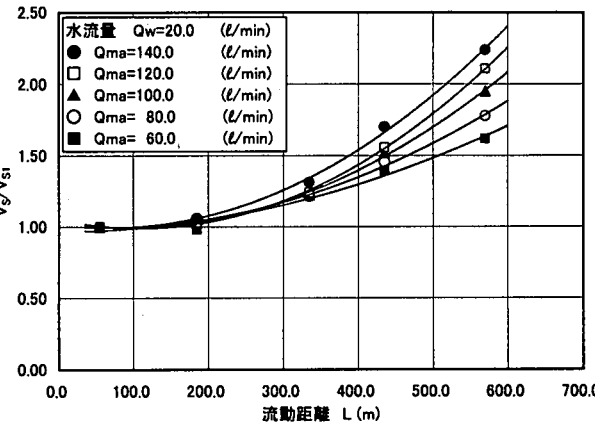


図-4 (a) 距離に対する速度変化

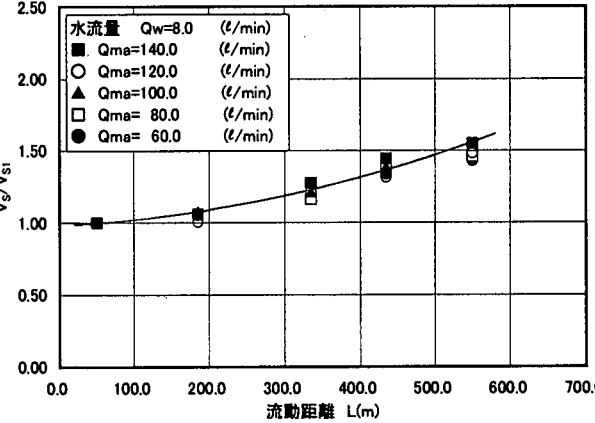


図-4 (b) 距離に対する速度変化

である。

水流量を $Q_w=22.0$ (ℓ/min) とした場合について、横軸に空気流量 Q_{ma} を、縦軸に1/10最大周期 $T_{1/10}$ を示したものが図-5である。図には各測定地点の周期をまとめて示したが、ここで示した1/10最大周期とは、周期データを降べき順に並べたときの上位1/10のデータを平均したものである。これは、先に述べたようにスラグ流は流動過程で消滅や再発生を繰り返しているのでそのまとめ方が難しいが、この様な表示をすると比較的系統立ってまとめることができるので採用した。

図に示される様に $Q_{ma}=40.0$ (ℓ/min) と 60.0 (ℓ/min) を除けば空気流量の変化に対してどの地点でも比較

的まとまった周期となっている。空気流量 $Q_{ma}=40.0$ (ℓ/min) の場合では、空気流量に対して水流量が多くスラグ流の発生条件となる水位までの上昇時間が早くなるために周期が短くなるものと考えられる。また $Q_{ma}=60.0$ (ℓ/min) の場合では、空気流量と水流量のバランスが不安定となるためそれより空気流量が多くなるとほぼ規則正しいスラグ流の発生となり、その影響が管路の遠方にまで伝わるものと推定される。

(5) 水流量とスラグ流通過周期について

スラグ流の通過周期について、前項では空気流量との関係を述べたが、次に水流量との関係について述べる。空気流量を $Q_{ma}=60.0$ (ℓ/min) とした場合に、横軸に水流量 Q_w を、縦軸にスラグ流通過周期のうち1/10最大周期 $T_{1/10}$ を示したものが図－6で5地点で測定した結果をまとめて示してある。

これらの結果によれば、1/10最大周期 $T_{1/10}$ は水流量の増加に伴い減少していくことがわかる。そしてこの傾向はすべての地点で同じである。このことは、管内の水位が管径の70%以上となるときにスラグ流が発生することからも裏付けられ、スラグ流の発生条件である70%以上の水位に至る時間間隔が水流量の増加により早くなるため、全体の傾向としてその結果がすべての地点にも反映されるためと考えられる。

(6) 管路内の圧力特性について

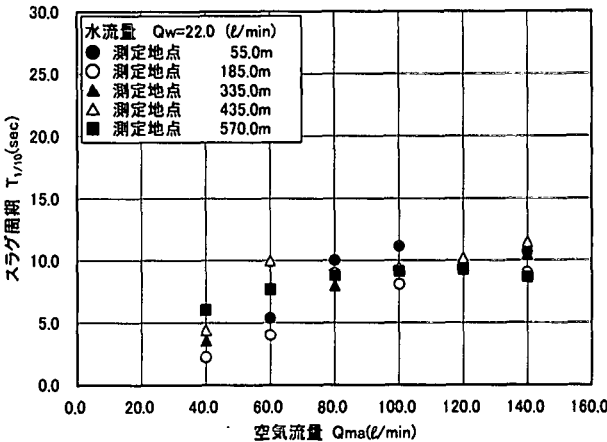
次に管路内の圧力変動について距離的变化を確認したものが図－7である。横軸に水・空気供給地点からの距離 L 、縦軸に1/10最大圧力 $P_{1/10}$ を示したもので、空気流量 $Q_{ma}=100.0$ (ℓ/min) としたときに水流量 Q_w を変化させた結果を示した。

ここで示した1/10最大圧力 $P_{1/10}$ とは、 $T_{1/10}$ 周期と同様な考えで用いたもので圧力データを降べき順に並べたときの上位1/10のデータを平均したものである。これはスラグ流が通過する時の管路内圧力値に近い値を示している。

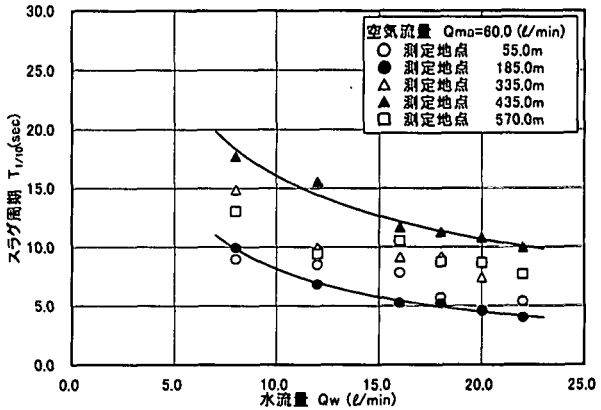
これらの結果から、管路内の圧力は末端に行く程低下し、大気圧近くの圧力になる。この傾向は空気流量が一定の場合供給水流量が多い程供給直後の圧力が高くなるため低減の割合は著しい。

同様に図－8は水流量を一定とした時の空気流量の変化に対する管内圧力の低減傾向を示したもので空気流量が多くなると供給直後の管内圧力は上がり、圧力低下が著しいことがわかる。

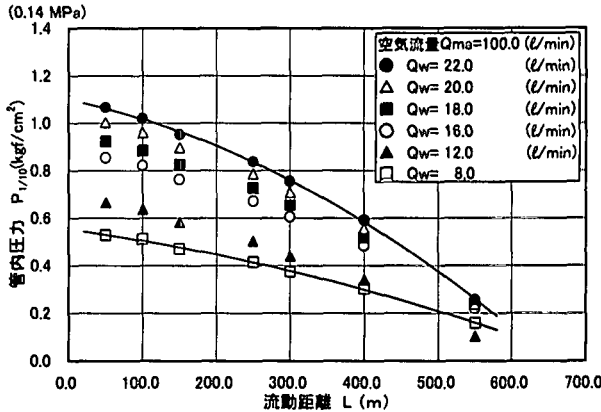
これらの図から水・空気流量の増加の割合と管路内圧力の増加の割合はほぼ同じような傾向となっていることがわかる。



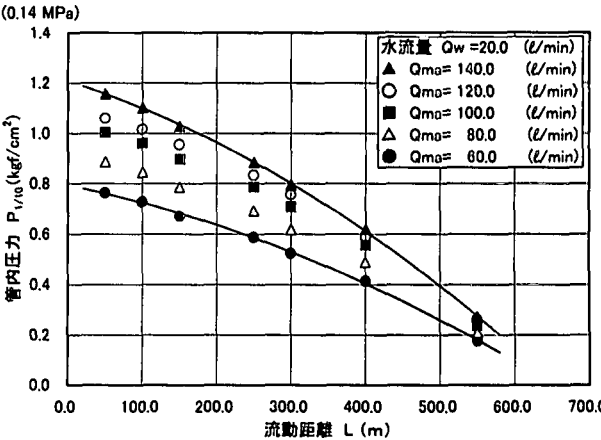
図－5 空気流量とスラグ周期



図－6 水流量とスラグ周期



図－7 管内の距離的圧力変化



図－8 管内の距離的圧力変化

(7) 水流量および空気流量と管内圧力の関係

水流量を $Q_w=22.0(\text{L/min})$ と一定とした場合に、横軸に1/10最大圧力 $P_{1/10}$ 、縦軸にスラグ流速 V_s をとって示したもので、各地点の圧力を空気流量の変化に対してまとめたものが図-9である。各地点の管内圧力とスラグ流の速度の関係を検討すると、空気および水の供給地点からの距離によって様相が異なる。すなわち供給点から近い地点は、空気流量の変化により管内圧力の差が大きくなるが速度差は少ないのに対して、遠い地点で出口に近づくに従い空気流量の変化により管内圧力の差が少なくなりスラグ流速の差が著しくなる。

このように管路の延長が長くなると空気の圧縮性の効果と空気混入による管壁面での粘性摩擦損失の低減により、スラグ流の速度は加速されるものと考えられる。

(8) 管路内圧力とスラグ流速について

管路内の流動距離に対するスラグ流の速度増加の様子は図-4(a)(b)に示したとおりであるが、次に管路内の圧力と速度の関係について示す。スラグ流速についてはスラグ流発生直後の $L=50.0\text{m}$ のスラグ流速を用いて各地点のスラグ流速を無次元化し、また管路内圧力についても $L=50.0\text{m}$ 地点での管路内圧力1/10最大圧力 $P_{1/10}$ で各地点の測定圧力を無次元化したものをそれぞれ縦軸にとり、管路の圧力測定地点までの距離 L を管路の内径 d で無次元化したものを横軸にとって圧力の変化とスラグ流の速度の関係を示したものが図-10である。図に示されるように管路内の無次元化した圧力降下の割合は、空気流量の多少にかかわらずスラグ流発生直後の管路内圧力に対する圧力降下の割合はほぼ一定であることがわかる。また管路の端部ではほぼ大気圧近くまで低下していることがわかる。一方スラグ流速は、水流量が多いため空気流量の影響を受けて空気流量が多いほどスラグ流の速度増加率は大きい。また、全体としてスラグ流速の増加と管路内の圧力降下の傾向は逆比例の関係にあり、平均的にみてスラグ流の速度は圧力降下量に比例した速度増加となっている。このことはスラグ流発生直後の管内圧力が管路の出口付近ではほぼ大気圧に近い $0.2\sim0.3\text{ kgf/cm}^2$ ($0.02\sim0.03\text{MPa}$)となるのでそれらの圧力減少比から管路端部付近のスラグ流の速度はおおよそ推測できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究により、長距離管路内に水・空気を混入して発生させたスラグ流動時の水・空気流量の影響や

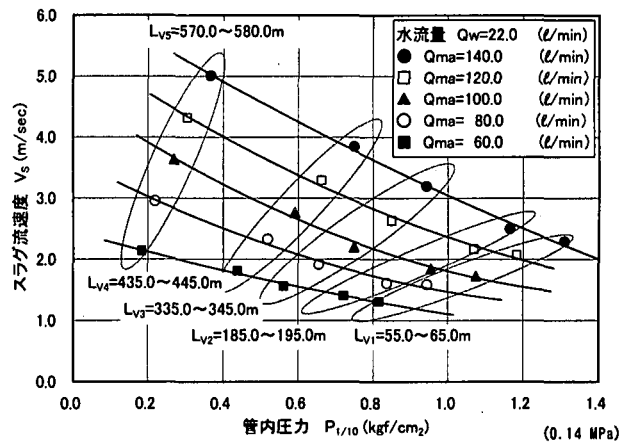


図-9 空気量、圧力、速度の関係

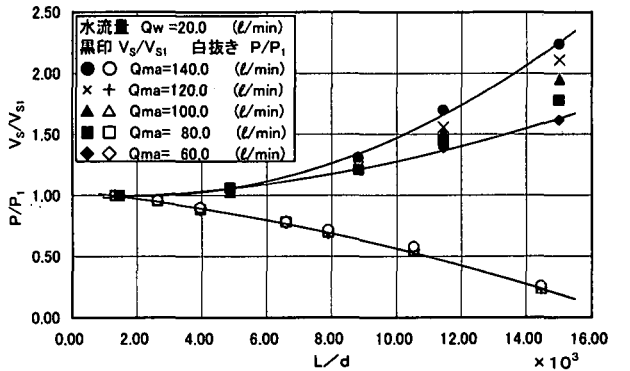


図-10 管路内の圧力と速度の関係

スラグ流の速度、管内圧力について以下のようにまとめられる。

- (1) 管路内におけるスラグ流速は空気流量が増大すると増大する傾向にあり供給点に近い所では水流量による速度変化は少ないが末端の出口付近になると速度増加が著しく水流量による速度差も認められる。
- (2) 管路内におけるスラグ流速に関する水流量の影響は少なく、空気流量が多くなればスラグ流の速度は増大し、スラグ流速には空気流量が支配的である。
- (3) 管路内を流動するときの各地点におけるスラグ流速は、本実験の場合では $L=200.0\text{m}$ までほとんど増大しないがそれ以降の地点になると徐々に増大する。この傾向は空気流量が多くなると著しくなる。
- (4) 管路内を流動するスラグ流の通過周期は空気流量によって様相が異なる。周期が短く、しかも不安定となる条件のときと、ほぼ一定で安定な周期となる条件の空気流量が存在すると推定される。
- (5) 水流量の増加に対する管路内のスラグ発生周期は供給水流量の増大に伴ってスラグが発生する条件となる水位となるまでの時間間隔が早く

なるためにスラグ流発生周期が短くなるものと考えられる。

- (6) 管路に沿った内部の圧力降下の傾向を見ると、空気流量が一定のときは水流量が多いほどスラグ流発生直後の圧力が高いので圧力の減少傾向は著しいが、水流量が少ないときはスラグ流発生直後の圧力が低いために圧力降下の割合は少ない。

一方、水流量を一定としたときの管内部の圧力降下傾向は、空気量が多い程スラグ流発生直後の圧力が上がるため相対的に降下の割合は大きくなる。このように管内圧力は、供給水量や空気量が多いと管内圧力が増大し圧力降下の割合が大きくなる。

- (7) 管路内のスラグ流の流動時の管内圧力とスラグ流の速度の距離的变化をみると、スラグ流の発生地点に近い場所では空気流量の変化により、圧力差が大きくなるが速度差は少ないのに対して、発生地点から遠い場所では空気流量の変化により管内圧力差は少ないがスラグ流の速度差が著しい。これは空気の圧縮性の効果によるものと考えられる。
- (8) 本研究で対象とした $L=600.0\text{m}$ の管路を用いたスラグ流発生時の管路内の圧力降下量とスラグ流の流動速度との関係は逆比例の関係にある。このことから、スラグ流発生直後の管路内の圧力がわかれば、管路端部の平均的圧力（ $0.02\sim 0.03\text{MPa}$ ）との関係から管路の端部を通過するスラグ流の平均的な速度はスラグ流発生時の速度との関係からおおよそ推算できる。

最後に本研究は日本大学学術助成金「国際総合研究」の交付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 宮田，沈：水平流における空気輸送の数値実験，日本機械工学会(B編)，52巻，474号，pp491-1002，1986.
- 2) 岡山：水平管における空気を含んだ軟泥の流動，作業船197号，pp23-33，1991
- 3) 岡山，鮎貝，鈴木，福本：水平管における空気混入軟泥の流動特性，港湾技術研究所報告，Vol.30，No.2，pp533-557，1991.
- 4) 岡山：水平管における空気を含んだ軟泥の流動(第2報)，作業船204号，pp38-51，1992.
- 5) 岡山，鮎貝，鈴木，福本：水平管における空気混入軟泥の流動特性(第2報)，港湾技術研究所報告，Vol.31，No.3，pp97-126，1992.
- 6) 森川，辻：空気輸送に対する数値実験，日本機械学会論文集(2部)，43巻，375号pp.4151-4167，1997.
- 7) 辻，関，森川：空気輸送の数値実験，粉体工学会，Vol.20，No.5，pp270-279，1993.
- 8) 西川，橋本，片山，武居，松前，堀井：混気圧送浚渫泥輸送のシステムにおける液相スラグの流動現象-液相スラグの生成・成長・崩壊-，混相流，7巻，4号，pp335-343，1993.
- 9) 鈴木，落合，遠藤：混気圧送における液相スラグの生成流動に関する研究，土木学会海洋開発論文集，vol.15，pp421-426，1999.
- 10) 鈴木，遠藤，落合：混気圧送水平管における液相スラグの流動特性に関する研究，土木学会水工論文集，Vol.44，pp885-890，2000.
- 11) 鈴木，黒沢，落合，遠藤：空気混入水平輸送における2次空気の効果に関する研究，土木学会海洋開発論文集，Vol.16，pp427-432，2000.