

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

STUDY ON EFFECTS OF SECONDARY AIR INJECTION FOR COMPRESSED AIR TRANSPORT IN HORIZONTAL PIPE

鈴木理仁¹・黒沢靖正²・落合実³・遠藤茂勝⁴

Yoshihito SUZUKI, Yasumasa KUROSAWA, Minoru OCHIAI and Shigekatsu ENDO

¹正会員 工修 千葉県富里町 建設課 (〒286-0292 千葉県印旛郡富里町七栄652-1)

²正会員 東和建設(株) 工務部 (〒102-0031 東京都千代田区飯田橋1-12-5)

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)

The purpose of this research is to investigate effect of compressed secondary air injection and flow resistance in horizontal pipe flow transport system by compressed air. This transport system is very useful for high-density slurry transport because it is easily to separating air from slurry. This paper describe about the mechanism of slurry transporting system using a compressed air in the experimentally. In the experiment, the air-liquid two-phase flows have been focused on liquid of low viscosity in long distance pipelines with narrow diameter and discussed the effect of secondary air and relation between air-injection volume and friction loss. As the results of experiments it was shown that the secondary air injection is useful for acceleration of slug velocity in horizontal pipe flow.

Key Words : multiphase flow, slug flow, horizontal hydraulic transport, secondary air

1. はじめに

自然環境下で行われる土木構造物の築造に当たって、環境の保全、維持という問題が重要な課題となってきた。

特に港湾内で行われる浚渫工事においては浚渫泥の輸送が従来の方法では環境や生態系に与える影響が大きいなどの理由で、これまでのポンプ式輸送から、圧縮空気を用いた混気輸送方式が採用されるようになってきた。

空気輸送技術は、粉体や粒体を輸送するための技術として研究が進められていて、被輸送物の壊れや管内での摩擦の低減が計れることで、所要動力が少なくすむなどの利点があるため、粉体輸送の輸送方法として用いられている。しかし、粒体や浚渫泥のように集塊性の低い輸送物は粉体とは異なった流動となるため、従来の研究成果をそのまま適用することは出来ない。

特に本研究で対象としているような流動性の低い高濃度スラリー輸送の研究は極めて少ない。しかし圧縮空気を混入するスラリー輸送でも粉体輸送と同

様に圧力損失の軽減を計れる利点や泥砂と混入空気との分離が極めて容易であることなど、実用的な面からのニーズと相まって経験的に行われている。

また、含水比の高い浚渫泥は粉体や粒体とも異なり、必要な動力と輸送量の関係 1 つにしても系統的な研究は極めて少なく、本質的な輸送メカニズムの解明を目的とした研究も少ない。

一般には泥砂と圧縮空気をそれぞれ同時連続的に供給して輸送しているため管路内での輸送様式も極めて複雑で、輸送物と空気を交互に送るような方法を採用していないため、スラグ流となっていると考えられるが、これまで管路内の輸送状況を可視化できなかったため明確にされていない。

著者らは経験的に行われている現地での浚渫泥の輸送状況の観察および 2, 3 の現地計測の結果と水と空気を用いた室内での可視化実験結果を検討した結果、スラグの周期や管内での圧力損失の傾向など流動の様子が現地と室内実験の結果が定性的にかなり良い一致を示していることから、室内実験によって遠距離輸送の課題としての 2 次空気(Sub air)の供給による輸送効果を実験的に検討した。

2. 現地スラリー輸送の特性

室内実験の実施に先立って現地で行われている浚渫泥の混気圧送状態を調査し、室内での水と空気を用いた実験結果との整合性を調べるためにスラグ流の基本的な特性であるスラグ流の速度と管内圧力について検討を行った。

現地での輸送実験は概略次のような条件で行われた。

土砂は海底からの浚渫泥で、砂、シルト、粘土等が混入したもので、含水比が120~130程度の黒色の泥土であった。浚渫船のスラリーポンプにより管路に供給され、泥土は同時に供給される圧縮空気により順次管路内を5.0~10.0m/secのスピードで移動する。管路の総延長は1724.0mで、最初の114.5m区間の管径は $\phi=630$ mm、次の1090.8m区間が $\phi=560$ mm、そして残りの518.7m区間が $\phi=710$ mmで3種類の管が接続されている。途中114.5m区間の一部の高低差は最大3.0~4.0m程度で浚渫船から1200m地点で約135度ずつ、2カ所で折れ、全体として、ほぼ90度方向に曲げられていて、そこから $\phi=710$ mmの管が518.7m続き、大気中に放出されるようになっている。

測定中の圧送土砂量は600~800 m^3/hr で空気量は約300 m^3/min であった。圧力計は浚渫船の圧送地点と600mまでは300m毎に、それ以降は200m間隔で計8カ所設置されている。スラグの速度は圧力記録と現場での2地点間の通過時間から算出した。また、2次空気供給量は管路始点から1000m地点に設けられている。これらの条件で9ケース、19通りの土量と空気量の組み合わせについて実験を行った結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 圧送土量の供給量を変化させてもスラグ速度は変わらず、ほぼ一定の速度で移動し、土量の増加に伴いスラグ流の発生周期が短くなる。
- (2) スラグ流の速度は空気量にのみ支配され、空気量が増大するとスラグ流の速度も増大する。
- (3) 元空気(Main air)の他に管路の途中から2次空気(Sub air)を供給する場合のスラグ流速度は2次空気量の増加と共に増す。
- (4) 元空気量を一定として圧送土砂量を増加させるとスラグ流発生地点付近の管内圧力は増大する。

以上の結果は泥土の代わりに水と空気を用いて行った著者らのスラグ流に関する実験結果とほぼ同様な結果を示し、定性的な傾向がきわめてよく一致することから管路途中からの2次空気の供給によるスラグ流の流動メカニズムの変化や輸送効率について室内実験結果より検討するもので、物性の著しく異なる実験結果を比較検討することによりスラグ流の流動メカニズムや長距離輸送の可能性について検討しようとするものである。

3. 実験内容および方法

ここではスラグ流のモデルとして可視化を前提とした水と空気により再現するもので、スラグ流の速度や各種条件下における圧力損失などを検討するものである。

実験には内径3.8cmのビニールパイプを用い、総延長を150.0mとし、途中の65.0m地点から2次空気を導入したときのスラグ流の運動特性がどのように変化するかを検討することを目的とした。

実験装置の概略は図-1に示すとおりである。全長150.0mのビニールパイプで管路を設け、途中の5カ所に圧力測定のための圧力計を設置した。それぞれの距離は水の供給口を基点とした1.0m、20.0m、60.0m、70.0mおよび130.0mの各地点である。またスラグ流の速度については25.0m、55.0m、110.0mおよび130.0m地点からそれぞれ10.0m区間の移動時間を目視観測より求めた。

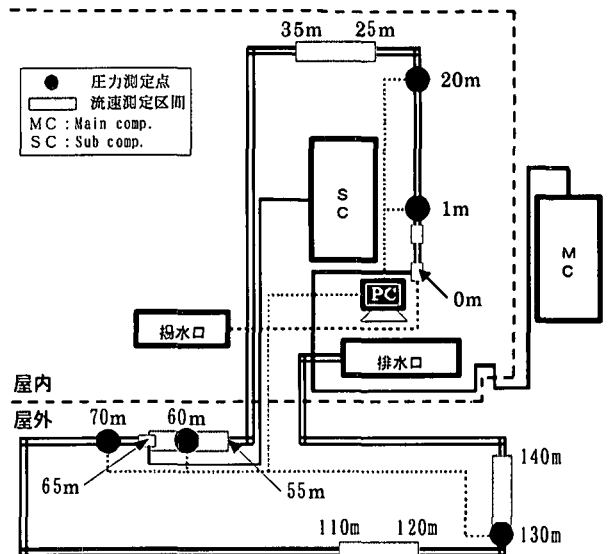


図-1 実験装置概略図

空気量や水量についてはローター式流量計および電磁式流量計を通して供給されるようになっている。そして圧力測定にはダイヤグラム式の圧力センサー許容圧力5kgf/cm 2 (0.49MPa)のものをを用いた。

実験条件は供給水量 Q_w を一定($Q_w=16.5$ l/min)として、元空気量 Q_{ma} を65.0、80.0、100.0および120.0 l/minとし、それぞれの Q_{ma} に対して2次空気量 Q_{sa} を0.0、20.0、40.0、60.0、80.0および100.0 l/minと変化させた組み合わせの条件を基本とし、この他に Q_{ma} と Q_w を変化させた組み合わせなどを含め、合計44通りの条件で実験を行った。

4. 結果と考察

水と空気を用いた実験結果と現地のスラリー輸送の計測結果との整合性についてはおおむね確認され、定性的な傾向はきわめてよく一致することが明らか

となっている。

一方、著者らの実験によって空気と輸送物を連続的に管路内に供給するとプラグ流にはならずスラグ流になること、また浚渫土砂などを輸送の対象とする場合にはプラグ輸送では管路内の摩擦損失が大きくなり、輸送速度や距離を考えると輸送効率の面であまり期待できないと考えられる。

水・空気を用いたスラグ流に関する基礎的な実験の結果、スラグ流が発生する地点は条件に関わらずほぼ一定し、その時の管内水位は管径の約70%前後となる。そしてスラグ流の速度は空気量に支配されて、空気量の増大と共に増大する。また空気量を一定とした場合、水の量を増加させるとスラグ流の発生頻度は多くなるがスラグ流の速度は変わらないなどの基本的な特性が明らかとなっている。そこで、2次空気を供給した時のこれらの特性について次に検討する。

(1) スラグ流の周期分布

ここでは2次空気の供給によるスラグ流の変化を調べることを主目的としているので、まずスラグ流の分布について検討する。

2次空気の供給地点は水の供給地点より65.0m地点なので、供給空気の影響を受けにくいと考えられる25.0m地点で測定したスラグ流の周期分布について検討する。図-2(a), (b)は $Q_w=16.5$ l/min, $Q_{ma}=80.0$ l/minで(a)の方が $Q_{sa}=0.0$ l/minで2次空気がない場合で、(b)の方は $Q_{sa}=40.0$ l/minの場合である。両者の頻度分布はほとんど変わらず同様な結

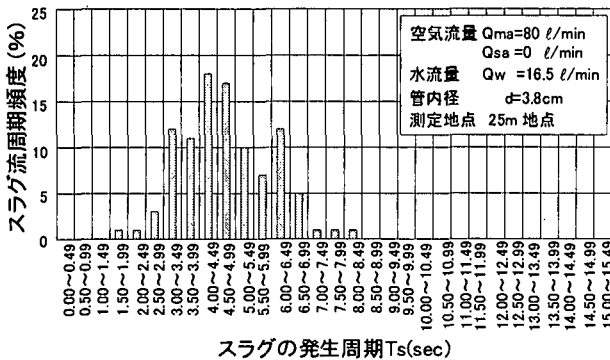


図-2(a) スラグ流周期頻度分布

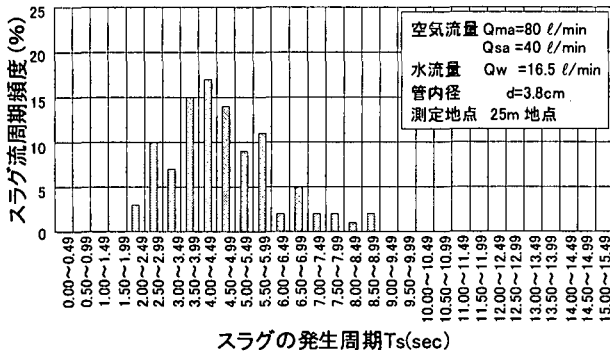


図-2(b) スラグ流周期頻度分布

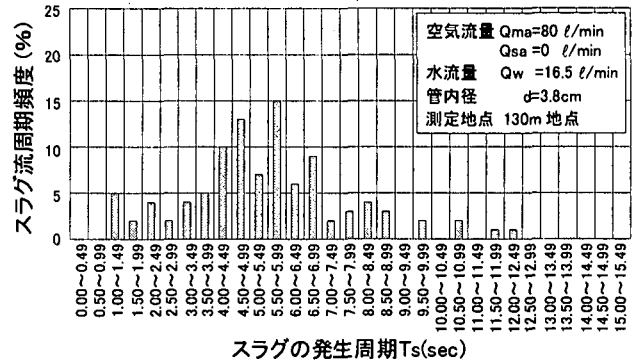


図-3(a) スラグ流周期頻度分布

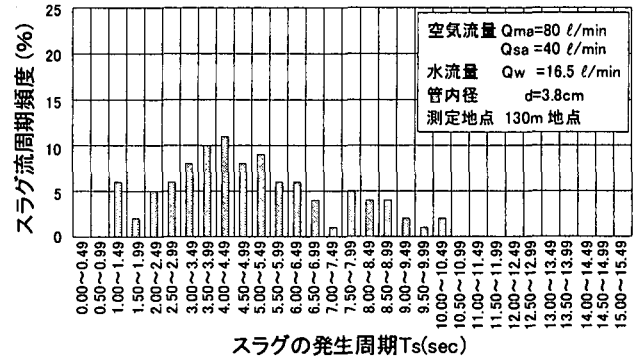


図-3(b) スラグ流周期頻度分布

果を示している。これは2次空気の供給口より40.0mも遡った地点であることから、スラグ流の発生や運動に対しても2次空気の影響はほとんど認められないためと考えられる。しかし、全く同じ条件の130.0m地点のスラグ流の周期分布を示したものが図-3(a), (b)である。これらの結果はそれぞれ図-2(a), (b)に対応するもので、(a)は2次空気がない場合で $Q_{sa}=0.0$ l/min, また(b)は $Q_{sa}=40.0$ l/minの場合であるが2次空気の供給地点より後の所であるため周期分布そのものが図-2(a), (b)とは異なっている。また図-3(a)は2次空気がないが図-3(b)は $Q_{sa}=40.0$ l/minの場合であるため2次空気の影響を受けていることがわかる。図-3(a)の方が図-3(b)に比べて分布がやや乱れているのはこの地点まで到達するまでの圧力損失の影響と考えられる。また図-3(b)の方は2次空気の供給により新たな運動が始まったため分布が整えられたためと考えられる。

(2) 2次空気量とスラグ流発生周期

2次空気供給地点前後の各2地点における2次空気量によるスラグ流周期への影響をまとめたものが図-4である。図-4は横軸に2次空気量 Q_{sa} を取り、縦軸にそれぞれ Q_{sa} に対する各地点でのスラグ流平均周期のばらつきを示したものである。

これらによれば $Q_{sa}=40.0$ l/minの時は $Q_{sa}=0.0$ l/minの時と同様に周期のバラツキは少ないが、 $Q_{sa}=20.0, 60.0, 80.0, 100.0$ l/minでは各地点によるスラグ平均周期のバラツキが大きく、2次空気量の供給量によってはスラグ流の周期を乱す結果となり、規則正しいスラグ流が形成されなくなり、輸送効率

を低下させる可能性があると考えられる。

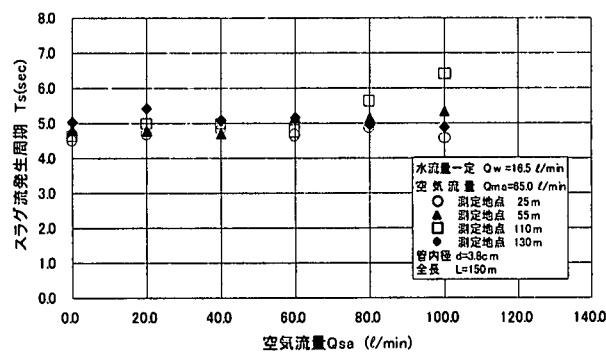


図-4 スラグ流の平均周期(水流量一定)

(3) 管内平均圧力特性

2次空気の供給がない場合の管内の圧力変化特性を示したものが図-5である。この図は水流量を $Q_w=16.5$ l/minで一定とした場合で、横軸に管路の距離を取り、縦軸にはそれぞれの地点の圧力を示したもので、元空気を変化させた場合の結果をまとめて示してある。

一般に管内圧力はスラグが通過する前後で著しく変化する。またスラグ速度は後で述べるように2.0～5.0m/secにまで達し、管内部の時間的な圧力変動が極めて早いことやスラグ流の内部に多数の気泡を巻き込んでいるため、圧力時系列は極めて複雑な履歴を示している。そのためここでは、スラグ流の通過時の管内圧力として、2.0Hzで測定した結果を降べき順にした時の上位1/10の平均圧力で示した。図中の白丸印は $Q_{ma}=65.0$ l/minで最も空気量の少ない場合であるが遠方に進むに従って管内圧力は低下し、圧力損失が生じることを示していて、10.0m地点と130.0m地点間での圧力は緩やかに減少し、およそ半程度にまで減少することがわかる。

これらの傾向は元空気量が徐々に増大する場合でもほぼ同様な圧力低下の傾向を示しているが元空気量が增大すると管内圧力が徐々に増し、圧力勾配も幾分大きくなる傾向にある。

次に示した図-6の結果は $Q_{ma}=65.0$ l/min、 $Q_w=16.5$ l/minとし、2次空気量 Q_{sa} を導入し、徐々に増加させた時の管内の圧力変化特性を示したものである。縦軸、横軸は図-4と同じであるが圧力変化の割合が2次空気の供給口より上流側がやや全体的にフラットになっている傾向を除けば、元空気を増大させたときの傾向とほぼ一致し、2次空気を導入することにより、元空気量を増加させたと同じ効果が現れ、全ての地点で2次空気の増大と共に管内圧力は上昇する傾向にあるが、1.0m地点と130.0m地点の圧力差は元空気を増大させた場合の結果と同様に約1/2程度まで減少していることがわかる。

次の図-7の結果は供給水量を $Q_w=16.5$ l/minで一定とし、元空気量と2次空気量の合計、すなわち $Q_{ma}+Q_{sa}=120.0$ l/minで一定とした時の管内の圧力変化特性を示したものである。この結果では2次空気

の供給地点65.0mより上流側では元空気の流量差による圧力差がやや認められるが、2次空気の供給地点より下流側での管内の圧力差は全ての条件に対して極めて少なく、ほぼ同様な値となっている。すなわち図-5、6、7の傾向から認められるように元空気や2次空気量に関わらず管内の圧力は Q_{ma} と Q_{sa} のtotal空気量に支配されて増加し、図-7に認められる様にtotal空気量が等しければ、管内の圧力変動特性は等しくなり、2次空気量の供給は元空気量の増加と同様の効果を有する。

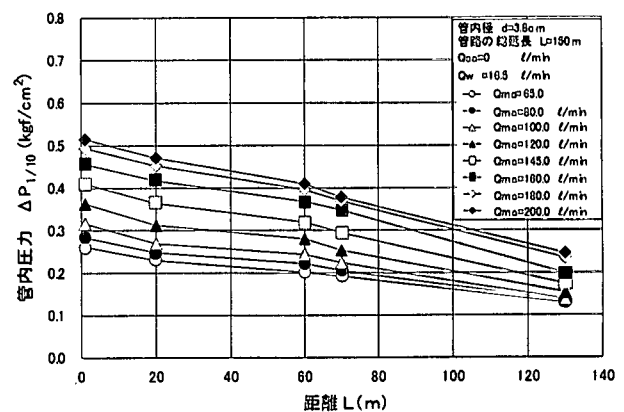


図-5 管内圧力の流れ方向変化

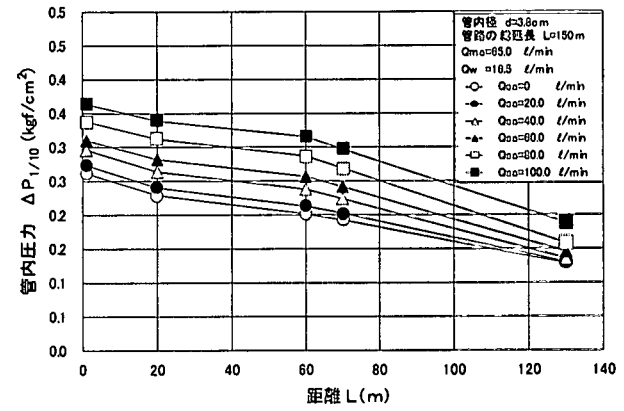


図-6 管内圧力の流れ方向変化

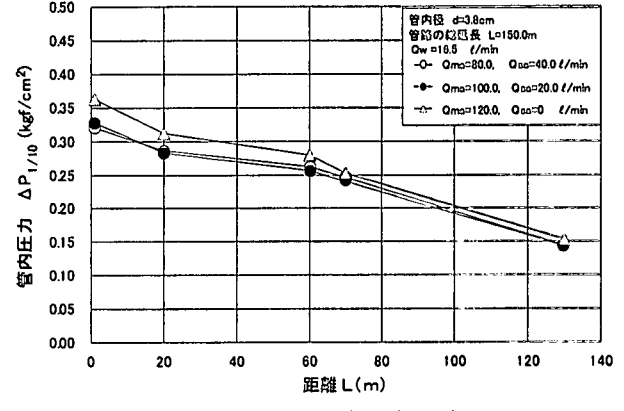


図-7 管内圧力の流れ方向変化

(4) 2次空気量とスラグ流速

スラグ流速に関する2次空気量の効果を調べたものが図-8である。図-8は横軸に管路の距離を取り、縦軸にはそれぞれの地点の前後10.0m区間の平均ス

ラグ速度を取って示したものである。条件としては、管内圧力を検討した図-6の条件に対応するもので、 $Q_{ma}=65.0$ l/min, $Q_w=16.5$ l/minとし、2次空気量を20.0 l/min毎に増大させた時の各測定地点での平均ラグ流速を示したものである。

この結果に示されるように2次空気を与えない白丸印のケースでは25.0m地点から140.0m区間の115.0m区間の平均ラグ流速は1.63m/secで途中110.0m~120.0m区間がやや速く1.69m/sec, また25.0m~35.0m区間では1.61m/secとやや遅い部分も認められるが平均的にほぼ一定した傾向となっていることがわかる。しかし、2次空気を元空気の約30%ほど供給してやると、供給口より遠方の地点で明らかにラグ速度が増加することがわかる。そして元空気量とほぼ等しい量の2次空気量 $Q_{sa}=60.0$ l/minに対するラグ流の速度は約2倍程度まで増加し、元空気量の1.5倍程度の空気量 $Q_{sa}=100.0$ l/minの場合でのラグ流速は3倍にも達している。

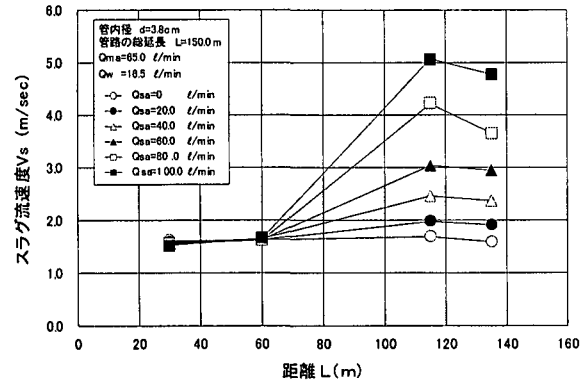


図-8 2次空気によるラグ流の流れ方向流速変化

このように2次空気の供給は管内を走るラグ流の速度の増加に著しく寄与するのでラグ流輸送効率を増大させるのにきわめて有効な方法であるといえる。このことは遠距離を輸送する場合では元空気量は少なくとも適当な部分から更に2次空気を導入することにより輸送効率を上げることができ、空気量を分割することで途中の圧力損失を軽減できることを意味している。

(5) 2次空気量と速度増加

ラグ輸送における2次空気の導入効果については前節に述べた通りであるが、2次空気量の増加によるラグ流速の増加の割合を示したものが図-9である。横軸には2次空気の供給量 Q_{sa} を、また縦軸にはラグ流の速度を示したものである。この結果では元空気量を $Q_{ma}=65.0$ l/min~120.0 l/minと4段階に変化させ、それぞれのケースについて2次空気量を $Q_{sa}=20.0$ l/minずつ増加させたものであるが、全体的に2次空気量ごとに速度は増加し、その割合は2次空気量が多くなるほど著しくなる傾向にある。しかし、この図に見られるように元空気量の差による速度差が2次空気量の大小にかかわらずそのまま維持されており、管内ラグ流の初期速度は元空気量によって

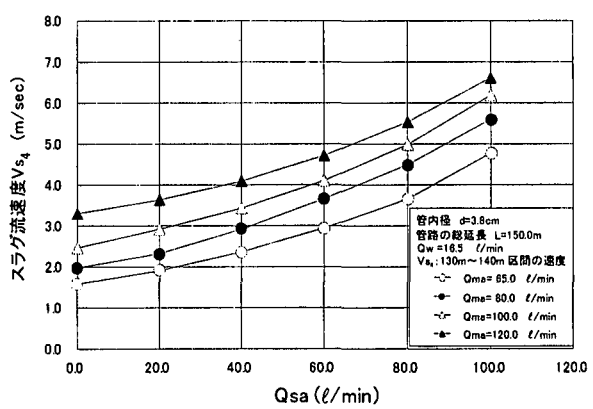


図-9 2次空気量によるラグ流の速度変化

決まることがわかる。従って元空気量と2次空気量の両方を組み合わせることによりラグ流の速度をコントロールできるものと考えられる。

(6) total空気量とラグ流速度

ラグ流の速度は2次空気の導入によって効果的に増大することがわかったが、元空気の場合や元空気量と2次空気量の組み合わせでtotal空気量と等しくした場合のラグ速度の結果をまとめたのが図-10である。この結果は横軸に元空気量 Q_{ma} と2次空気量 Q_{sa} のtotal空気量 Q_a と供給水量 Q_w の比を取り、縦軸には出口直前のラグ流の速度 V_{s4} をとって示したものである。それぞれの元空気量に対して2次空気を供給した場合の結果をまとめたものである。

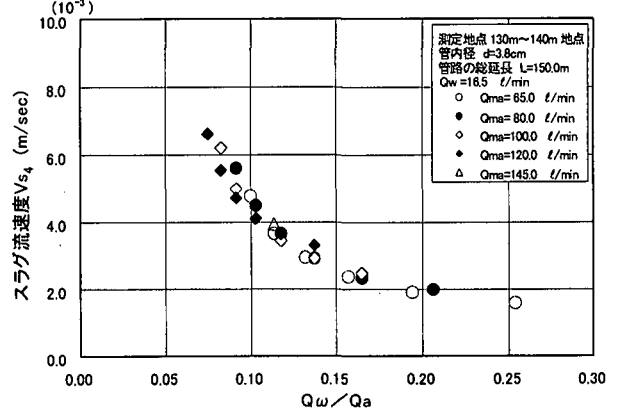


図-10 総空気量とラグ流速度

この結果の場合では $Q_w=16.5$ l/minで一定としているため、いくつかの記号が重なっている所ではtotal空気量が等しいものである。そのようにして見ると、空気量の供給の仕方に関係なくtotal空気量が等しければ、元空気量の場合でも元空気量と2次空気量の合計空気量が等しければラグ流の管内速度は等しくなることを示していて、ラグ流の速度は空気の供給の仕方には関係なく、total空気量に支配されることを示している。一方空気量が多くなり、供給水量が空気量の10%以下になるとラグ流の速度にややバラツキが生じる。これは空気量が著しく多いため基本的には安定したラグ流が形成されないことによるもので、むしろ、噴霧流や環状流といわれる流れになるためと考えられる。

(7) 輸送管内の圧力損失

スラグ輸送における管内の圧力損失は所要動力や空気流量を決める上で重要な要素である。そこで、本実験における場合の単位管長当たりの圧力損失についてまとめたのが次の図-11である。この図は横軸にスラグ発生直前の1.0m地点と管路の出口にほぼ近い130.0m地点との圧力差から求めたものである。

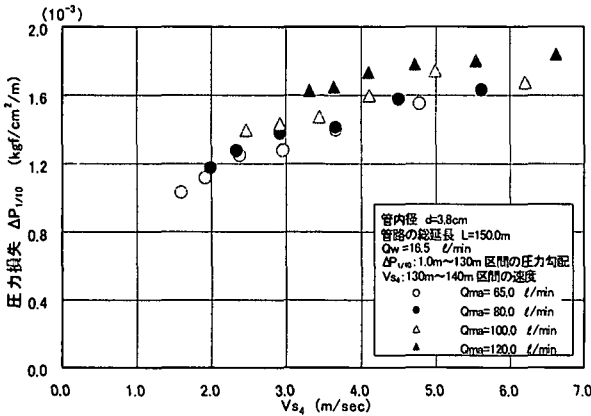


図-11 単位管長あたりの圧力損失

この結果によれば管長の単位長さ当たりの圧力損失はスラグ管の出口付近の130.0~140.0m区間の平均スラグ速度の関係で見るとスラグ速度の増加と共に単位長さ当たりの圧力損失は増大する傾向にあるがやや速度が速い方が圧力損失が少なくなるようである。これは空気の小さい気泡が多数スラグ流中に含まれるためと考えられる。

5. 結論

本研究により、水空気を用いたスラグ流に関し2次空気を供給したときのスラグ流の特性のまとめると以下ようになる。

- (1) 管内のスラグ流周期の2次空気供給地点前後の頻度分布は2次空気量の有無に関わらず基本的な分布形はほとんど変わらず平均周期もほぼ同じであるが、供給地点より後の地点の周期分布は2次空気の供給があると変化する。
- (2) 2次空気を供給する場合では供給2次空気量によってはスラグの発生周期に影響を与え、スラグ周期を乱す結果となることが多いが、ある特定な空気量の時は2次空気を供給しないときと同様にスラグ周期が乱れず、ほぼ一定となるような空気量が存在すると考えられる。
- (3) 2次空気の供給が無い場合の距離による圧力降下の割合は約130.0m区間では比較的緩やかで、ほぼ一次的に降下していく。しかしこの傾向も元空気量が大きくなると圧力降下の割合が著しくなり、空気量が多いほど圧力損失が増大する傾向にある。
- (4) 元空気量を一定として2次空気を供給した時の距離による圧力降下の割合は2次空気供給地点までの区間がやや減少が少なく、2次空気供給

区間の方が減少傾向が大きい。

- (5) 供給水量が一定で、元空気量 Q_{ma} と2次空気量 Q_{sa} の合計量が送られるような供給条件の場合では元空気量が異なるため元空気供給地点では元空気量の差に対応した圧力差が生じるが、2次空気の供給地点より後の区間の圧力降下量はtotal空気量が等しいため減少傾向は全く同様な傾向となり圧力も同じ値となる。
- (6) 2次空気量を供給する場合のスラグ流の速度は供給空気量によってその割合は異なるが、いずれの場合も2次空気を供給することにより供給後の管内のスラグ速度は上昇し、元空気量の1.5倍の2次空気量では約3倍の速度になっている。このことは空気量を分割することで圧力損失を軽減できると考えられる。
- (7) 2次空気量の大小によるスラグ速度を見ると2次空気量が多いほど速度の増加率は大きくなる。しかしスラグ流の初速度は元空気量で決まるので、元空気量による速度差はそのまま維持され、2次空気によるスラグ速度の増加率は変わらない。また、2次空気の供給前の地点のスラグ流の速度は一定なので2次空気の供給による影響はほとんど受けないと考えられる。
- (8) 管路終端付近でのスラグ流の速度は元空気のみでも2次空気を適量な量を供給した場合でもtotal空気量が等しければ途中の空気量の供給位置や供給の仕方に関係なくスラグ流の速度はtotal空気量に支配されることが明かとなった。
- (9) 管内の単位長さ当たりの圧力損失はスラグ速度の増加と共に増大する傾向にあるが、スラグ流の速度が大きくなると圧力損失がやや減少する。

参考文献

- 1) 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, pp4151~4167, 1997.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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) 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.
- 7) 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.19, pp421~426, 1999.
- 8) 鈴木, 落合, 遠藤: 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.