

氏 名	の だ か ろく 野 田 佳 六
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和50年10月8日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和34年3月 東北大学工学部鉱山工学科卒業
学 位 論 文 題 目	傾斜管路による粗粒子群の水力輸送に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 川島 俊夫 東北大学教授 堀部 富男 東北大学教授 石浜 涉 東北大学教授 淵沢 定敏 東北大学教授 斎藤正三郎

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

鉱産物などの水力輸送における輸送動力などの諸問題は、いずれも圧力損失に関係し、そのため管路の設計における圧力損失を的確に算出することは、特に重要であるが、従来の圧力損失の計算式は、主として微細粒子群の輸送を対象としている。

しかるに、実技をみれば微細粒子群のみならず粗粒子群も輸送されるので、従来の計算式では粗粒子群を輸送した際の実験値と比較すると著しい相違がある。また管路については水平あるいは垂直の場合が従来取扱われており、傾斜管路における例は極めて少なく、僅かに上り傾斜角 45° 以下のものが見られるにすぎない。しかし実際には管路が上りあるいは下り傾斜角で敷設されることが多く、それに対応する広範囲にわたる上りおよび下り傾斜角での実験値はみられず、

管路の設計の資料としては不十分である。

本研究は、粗粒子群を上りおよび下りの傾斜管路で輸送する際の圧力損失を求める計算法を確立することを目的とし、傾斜管路における粗粒子群の挙動を主として粒子速度から考察し、それらに基づいて粗粒子と流体との相対速度を考慮した圧力損失の算定式を検討した。さらに、上りおよび下りの広範囲な傾斜角での圧力損失を測定し、平均流速、傾斜角との関係、さらに算定式との関係を詳細に検討して、従来の研究より、より十分なる精度で算定できる計算法ならびに管路の設計のための圧力損失および遷移速度などの基礎資料を求めたものである。

第2章 傾斜管路における粗粒子群の挙動に関する実験的研究

傾斜角 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の傾斜管路で、安山岩碎石、粒径 $d_s = 6.90 \text{ mm}$ の試料を流送して、管断面の粒子速度分布、流動軌跡を測定し、また碎石、ビニールペレットを流した際の粒子群の平均速度を測定して粒子群の挙動を主に粒子速度の面から考察した。また垂直管路で干渉浮遊速度を測定し、それらの挙動に影響を及ぼす抗力係数について検討した。

その結果、求められた管断面の粒子の速度比の勾配は、平均流速の増大とともに直線的に減少し、勾配が零となる平均流速が遷移速度 V_B とみなせることを明らかにし、水平管路および傾斜管路での V_B は $\theta = 0^\circ$ で $V_B = 1.8 V_{SS}$ 、 $\theta = 30^\circ$ で $V_B = 1.5 V_{SS}$ 、 $\theta = 60^\circ$ では $V_B = 1.2 V_{SS}$ 、また $\theta = 90^\circ$ では遷移速度は存在しないことも明らかにした。

またその際の流動軌跡を管軸に対して示すと、各傾斜角において、平均流速 $V_m = 2.84 \text{ m/s}$ では殆んど粒子が平行となるが、 $V_m = 1.67 \text{ m/s}$ でも全粒子の約60～70%の粒子がほぼ平行となり、残りの約40～30%の粒子は最大でも5～8°の角度を示すにすぎず、全体として粒子が平行とみなしうることがわかった。次に粒群の平均速度 V_s は各傾斜角において混相流の平均流速より小さく、その原因として粒子と管壁との間に摩擦力が、また粒子の流れ方向に重力成分が作用していることを第3章で求めた速度比の式との比較から推定できた。また各傾斜角における速度比の値は、この式によって十分な精度で計算しうることを示した。

次に、粒群の抗力係数に関し、単粒子の抗力係数 C_D 、管内重量比 k' の影響を明らかにして、次のように粒群の抗力係数の式を示した。

$$C_D = e^{2.3 k'} C_D \left(\frac{C_D}{C_{D \text{ sph}}} \right)^{-1.56 k'}$$

第3章 傾斜管路における圧力損失に関する理論的研究

十分なる精度で圧力損失を推定するために、第2章で示した傾斜管路での粗粒子群の挙動を考慮して、圧力損失の基礎式ならびに圧力損失係数の算定式について理論的な検討を行った。

また従来のWorsterら等の式についても検討を加えた。

その結果，上りおよび下りの全傾斜角における圧力損失の基礎式として，次式が得られた。

$$i = i_w \pm \frac{3}{2} C_D \frac{k}{k + \rho} \frac{(1 - \zeta)^2}{\zeta} \left(\frac{ds}{D} \right)^{-1} \frac{1}{D} \frac{V_m^2}{2g}$$

また，上りおよび下りの全傾斜角について圧力損失係数の算定式として次式を示すことができた。

$$\phi = \pm \frac{3}{2} \frac{C_D}{\lambda_w (k + \rho)} \left(\frac{ds}{D} \right)^{-1} \frac{(1 - \zeta)^2}{\zeta}$$

ただし，いずれの式においても，式中の正負の符号は， $\mu \cos \theta + \sin \theta > 0$ では正， $\mu \cos \theta + \sin \theta < 0$ では負をとり，また $\mu \cos \theta + \sin \theta = 0$ では，それぞれ $i = i_w$ ， $\phi = 0$ になる。

次に粒子を浮遊させるための圧力損失の全圧力損失に対する割合を，安山岩砕石 $ds = 3.50 \text{ mm}$ および 6.90 mm の試料による垂直管路での圧力損失から考察した結果，その割合は平均流速 $V_m = 3 \text{ m/s}$ では，それぞれ3%および11%程度であるが， $V_m = 1 \text{ m/s}$ では，2.7%および3.7%にも達し，粒子を浮遊させるための圧力損失が考慮されていない従来のWorsterらおよびGrafらの式によっては，十分な精度で圧力損失を推定しえないことも明らかにした。

第4章 水平および上り傾斜管路における圧力損失の実験的研究

はじめに，まず，8種類の粒径の安山岩砕石 $ds = 0.75 \sim 7.17 \text{ mm}$ を用いて水平管路での圧力損失を測定し，粗粒子として取り扱われるべき下限粒径などを考察し，次に安山岩砕石 $ds = 3.50 \text{ mm}$ ， 6.90 mm およびビニールペレットを用いて，上り傾斜管路での圧力損失の測定から求めた圧力損失係数と第3章で得られた圧力損失係数の算定式との関係を傾斜角，平均流速等の面から検討し，さらに著者のこの算定式および従来のWorsterらの式等による計算値と実験値との比較検討を行った。

本実験結果では，粗粒子の下限粒径は，池森によって提示されている粒径よりは小さく，SmolodyrevやDurandによって報告されているように下限粒径が $ds = 1.5 \sim 2 \text{ mm}$ であることを確かめた。また，下限粒径以上においては，粒径の大きさによって圧力損失係数は僅かながら変化し，かつ粒径の増大とともに圧力損失係数の平均流速による変化は減少することも明らかにした。

次に，上り傾斜管路での圧力損失は，水平管路の場合と同様に，圧力損失係数 ϕ で整理でき，次式で示されることを明らかにした。

$$\phi = \phi_0 V_m^{-n}$$

係数 ϕ_0 および指数 n を第3章で求めた圧力損失係数の算定式により解析し，これらの値は，実験試料の物性値，すなわち，粒径，粒子比重，粒子の抗力係数，また，輸送条件としての管径，粒子と管壁との摩擦係数，混合比，管路の管摩擦係数などの因子の影響を受けることを明らかに

した。さらにこれらの諸因子を包含した著者の算式を用いれば、 ϕ_0 、 n の値を十分なる精度で算出しうることを示した。

従って、 ϕ の値も従来のWorsterらおよびGrafらの計算式より、十分に良い精度で示しえた。例えば、安山岩碎石 $d_s = 3.50\text{ mm}$ 、 6.90 mm の場合、平均流速 $V_m = 1.50 \sim 3.00\text{ m/s}$ の範囲で比較した結果、Worsterらの式による計算値は、平均流速にかかわらず、実験値より小さく、その最大差は傾斜角 $\theta \approx 60 \sim 90^\circ$ で生じ、平均流速の減少とともにその差は大きくなり、 $V_m = 1.50\text{ m/s}$ では粒径が $d_s = 3.50\text{ mm}$ 、 6.90 mm の場合それぞれの計算値が約13%および24%も小さく得られた。また、Grafらの式による計算値との比較は、碎石 $d_s = 6.90\text{ mm}$ の場合には平均流速 $V_m = 2.00 \sim 3.00\text{ m/s}$ 、ビニールペレットでは $V_m = 1.50 \sim 2.50\text{ m/s}$ の範囲で行い、両試料ともに平均流速の大きさにかかわらず傾斜角 $\theta = 90^\circ$ で実験値と良い一致を示すが、傾斜角が小さくなるにしたがい、平均流速の如何によって実験値との差が大となり、 $\theta = 0^\circ$ では、計算値が両試料ともに平均流速の大きいときは50%程度、その小さいときは90%も小さい値を示した。

一方、著者の式による計算値と実験値との比較を、Worsterらの式と等しい平均流速の範囲で行ったが、両値の差は碎石 $d_s = 3.50\text{ mm}$ では5%、碎石 $d_s = 6.90\text{ mm}$ では3%、ビニールペレットでは6%以内の小差にとどまることを示しえ、上り傾斜管路における圧力損失は、著者の式を用いることにより極めて良い精度で求められ、かつ従来の式よりも十分に良い精度で推定しえた。

また、著者の式により、圧力損失を算定するにあたり本実験に用いた試料について算出された摩擦係数 μ_s は、次式によって示しえた。

$$\mu_s = \psi \left[\frac{V_m^2 \sqrt{C_D}}{gD(\rho - 1)} \right]^{-m}$$

$$\psi = 2.0 - 0.16 d_s$$

$$m = 0.37 + \frac{\log \psi}{1.26}$$

第5章 下り傾斜管路における圧力損失の実験的研究

下り傾斜管路で粗粒子群を輸送する際の圧力損失の現象を把握するため、安山岩碎石 $d_s = 3.50\text{ mm}$ および 6.90 mm の試料を用いて下り傾斜管路での圧力損失を測定し、傾斜角、平均流速との関係ならびに、それらの関係を第3章で得られた粒子の運動方程式を用いて検討し、さらに同じく第3章で得られた圧力損失係数の算定式および従来のWorsterらの式による計算値と実験値との比較検討を行った。

下り傾斜管路での圧力損失の測定値は、水平および上り傾斜管路の場合と同様に圧力損失係数 ϕ で整理でき、両試料ともに傾斜角 $\theta = -30^\circ$ 以外では前章と同様に $\phi = \phi_0 V_m^{-n}$ で示された。その際に、圧力損失係数は、 $\theta = -15^\circ$ では正の値となり、水平および上り傾斜管路の場合と同様に平均流速の増大とともに減少し、傾斜角 $\theta = -30^\circ$ 以上においては負の値となり、平均流速の増大とともにその絶対値は減少し、傾斜角 $\theta = -30^\circ$ では、圧力損失は清水流での値とほぼ同じ値、すなわち、圧力損失係数は零を示すことを明らかにした。

しかして前記の現象を粒子の運動方程式における力の釣合いの関係より説明し、かつこの現象における諸因子の相互関係を明らかにした。

下り傾斜管路での圧力損失は、著者が第3章で示した圧力損失係数の算定式によって計算できることを示した。すなわち、安山岩碎石 $d_s = 6.90\text{ mm}$ による平均流速 $V_m \approx 1 \sim 2.5\text{ m/s}$ の範囲の実験値との比較の結果、傾斜角 $\theta = -15^\circ, -30^\circ, -60^\circ, -90^\circ$ のいずれの傾斜角においても Worster らの式による計算値より著者の式による計算値が、より実験値に近い値を示した。

第6章 結 論

以上、各章で述べたように、まず、傾斜管路における粒群の流れを観察し、次いで、流動様式の決定にあずかる遷移速度と傾斜角との関係を明らかにし、かつ粒群の挙動の解析から圧力損失の算定に関する理論的考察を可能にし、また、実験値との詳細なる検討により、粒群の速度比を考慮に入れた新しい圧力損失の計算法を確立したものである。この結果、上りおよび下りの全傾斜管路における圧力損失を十分なる精度で予測でき、かつ遷移速度、圧力損失などの基礎資料を得たことは、正確な管路の設計を可能ならしめたことになり、傾斜管路における粗粒子群の水力輸送に関する新しい知見を得たものである。

審査結果の要旨

鉱産物などの固体粒子群を水力輸送する際の圧力損失を的確に推定することは、所要動力算定上極めて重要である。しかるに、これまで提案されている圧力損失に関する実験式のほとんどは、主として水平あるいは垂直管路における微細粒子群の輸送を対象としたものである。しかしながら、実操業の状況を勘案すれば、輸送対象は微細粒子群のみならず粗粒子群も少なくなく、かつ、管路については、上りおよび下りの種々の傾斜角での配置もある。従って、各種傾斜管路による粗粒子群の輸送における圧力損失を従来の実験式のみで求めることは十分とはいえない。

本論文は、粗粒子群の輸送に関して、従来、ほとんど取扱われていなかった種々の傾斜管路における粗粒子群の挙動の観察を基にして、粒子と流体との平均速度比、粒子と管との直径比ならびに粒子の抗力係数を考慮した圧力損失の算定式を提案し、さらに、圧力損失の実測値と各種実験式ならびに著者の算定式による計算値とを比較し、著者によるものが最もよく合致することを確かめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、傾斜管路における粗粒子群の挙動から、上記の速度比および粒群が摺動流れから浮遊流れに変化するときの流速、いわゆる遷移速度と傾斜角との関係を求め、さらに一方、粒子の抗力係数と粒群におけるそれとの関係も明らかにしている。これは貴重な成果である。

第3章では、粗粒子群の輸送における圧力損失ならびに圧力損失係数に関する理論的考察を行い、下り傾斜管路をも含めた新たな算定式を求めている。これは、速度比、直径比および抗力係数などの因子を広く包含しており、従来、求められていた実験式より、より普遍性を有し、重要な知見である。

第4章では、安山岩砕石およびポリ塩化ビニールペレットを試料として、水平および上り傾斜管路における圧力損失を実測した結果と前章で掲げた算定式による計算値との比較を行い、両者がよく合致することを見出している。

第5章では、従来、試みられたことのない下り傾斜管路における圧力損失の実測を安山岩砕石試料によって行い、著者の算定式が、下り傾斜管路の場合にも十分適用し得ることを述べている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は粗粒子群の挙動の解析から速度比などを考慮に入れた新たな圧力損失の算定式を提唱し、かつ、広範囲に角度を変えた傾斜管路における圧力損失および遷移速度の基礎資料を得るなど、粗粒子群の水力輸送に関する新知見を得たもので、資源工学ならびに流体輸送工学上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。