

粗粒子混相流における水撃現象

Water Hammer in Coarse Solid-Liquid Two-Phase Flows

高橋 弘*

by Hiroshi TAKAHASHI

This paper is concerned with the water hammer in coarse solid-liquid two-phase flows in pipes. Theoretical consideration was made on in-situ concentrations, and the equations to analyze the water hammer phenomena in coarse solid-liquid two-phase flows in pipes were proposed. The calculated results for maximum surge pressure were compared with the experimental results. The agreement was observed to be good. Therefore, it was confirmed that this model proposed here is applicable to the high concentrated two-phase flows.

Keywords: water hammer, maximum surge pressure, solid-liquid flow

1. はじめに

固体粒子の管路による水力輸送は、ダム・港湾における浚渫作業、化学プラントにおける短距離輸送のみならず、種々の鉱石の長距離輸送など様々な分野で用いられている。また輸送の対象物も多種多様化し、従来は微粒子の水力輸送が主であったが、近年では粉碎費および脱水費の軽減の目的から、粒子径が大きく、かつ粒子比重の大きい、いわゆる粗粒子の水力輸送が注目されている。

さて、固体粒子の輸送中に停電等によるポンプの急停止、バルブの急閉鎖、あるいは管路閉塞などにより流れが急に遮られると管内の圧力が急激に上昇する、いわゆる水撃現象が生じ、時には管路の破損を招くこともある。従って、この水撃現象に関する検討は、管路の安全設計上、極めて重要である。

微粒子混相流の場合の水撃現象については、これまでに2, 3の研究が行われており、微粒子が搬送流体中に一様に分散した均質流中の圧力波の伝播速度に関する理論式の導出¹⁾の他、圧力波の伝播速度に対する仮想質量の影響は無視し得ないことなどが報告されている²⁾。以上のように、微粒子混相流についてはいくつか研究が見られるが、粗粒子混相流については、横山ら^{3) 4)}の研究が見られるにすぎない。横山らは粒子径が3~4mmのガラスビーズを用いて実験を行い、またZarbaによる解析の基礎式より、粗粒子混相流における圧力波の伝播速度に関する式を求め、実験値と計算値との比較検討を行っている。しかし、横山らの実験は、管

* 正会員 工博 東北大学助手 工学部資源工学科 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

内濃度が低濃度の範囲内に限定されていること、また横山らの式には仮想質量の影響が考慮されていないが、粗粒子混相流の圧力損失に関する従来の結果⁹⁾を考慮すると、仮想質量の影響は無視し得ないと考えられることから、この式を高濃度の粗粒子混相流にまで適用することは多少無理がある。それゆえ、高濃度の粗粒子混相流における水撃現象に関する理論的ならびに実験的研究が待たれる。

以上のことから、本研究は、高濃度の粗粒子混相流における水撃現象について実験を行い、最大昇圧量などに関するデータの集積ならびに横山らの式に改良を加え、高濃度領域まで適用しうる最大昇圧量の推定式を提示し、管路の安全設計に資することを目的として行ったものである。なお、便宜上、本論文においては、粒子の吐出体積濃度が5%以下を低濃度、10%以上を高濃度と呼ぶことにする。

2. 水撃に関する諸式の検討

管内の粗粒子混相流において水撃が発生した場合、圧力波は連続相である液相中を伝播することから、横山ら⁴⁾は粗粒子混相流における水撃の基礎式として、次式を提案している。

$$\frac{\partial [V(1-q)]}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2D} V^2(1-q)^2 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + a_m^2 \frac{\partial [V(1-q)]}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

(1)および(2)式はそれぞれ運動方程式および連続の式であり、 g は重力加速度、 H は圧力水頭、 V は平均流速、 f は摩擦係数、 D は管路内径、 x は流れ方向の距離である。 a_m は圧力波の伝播速度であり、次式で与えている。

$$a_m = \sqrt{K/\rho_m} \quad (3)$$

$$K = 1 / \{ (D \cdot C' / E \cdot e) + q / K_s + (1-q) / K_w \} \quad (4)$$

$$\rho_m = [\rho_s \cdot C_v + (1-C_v) \rho_w] / (1-b \cdot q) \quad (5)$$

ここに、 ρ_m は混合体の密度、 C' は管路の支持方法によって決定される係数、 E は管の縦弾性係数、 e は管の肉厚、 q は粒子の管内濃度、 K_s および K_w は粒子および清水の体積弾性係数、 C_v は吐出濃度、 b は全粒子のうち摺動または堆積した粒子の体積割合である。横山らは管路の一部に透明アクリル管の部分进行、この部分において堆積した粒子層高さを測定することにより、 b の値を決定したと報告している。しかしながら、 b の値が明記されていないため、(1)および(2)式を計算式として使用することは多少困難である。また横山らの実験は管内体積濃度が最大で約4%であり、実験が低濃度の範囲内に限定されていること、ならびに粒子の仮想質量について考慮されていないことから、(1)および(2)式を高濃度の場合に適用できるとは限らない。それゆえ、著者らは既に粒子の仮想質量を考慮に入れ、管内濃度 q' を次式のように与えている⁹⁾。

$$q' = q + k_1 \cdot q + k_2 \cdot q^2 \quad (6)$$

ここに、 k_1 は仮想質量係数であり、単粒子の球の場合には $k_1=0.5$ である。高濃度の場合には、粒子は互いに干渉し合い、仮想質量は濃度 q に応じて増加する。この影響を考慮したのが(6)式右辺の第3項であり、Bechtelerら⁷⁾にならい、 $k_2=0.25$ を用いる。

さて、 b については次のように考える。すなわち、 b は定義より次式で与えられる。

$$b = A_s / (A \cdot q') \quad (7)$$

ただし、 A は管路断面積であり、 A_s は図-1で示されるように、摺動層領域の面積を表す。 A_s は図中の角度 θ によって与えられる。しかしながら、この角度 θ の値については、未だ理論的および実験的に十分には明らかにされていないのが現状である。それゆえ、この角度 θ については次のように考察した。著者らは比重2.49のガラスビーズを用いて摺動層流れに関する実験を行い、角度 θ に関する次の実験式を得ている⁹⁾。

$$\theta = -0.55 \cdot V + 1.5 \quad (8)$$

本実験で用いた碎石の比重は2.74であり、ガラスビーズの比重よりも多少大きい。それゆえ、角度 θ と平均流速 V との関係を示す直線の傾きは、(8)式の傾きよりも多少小さくなると考えられる。従って、本研究においては、(8)式を考慮にいれ、次式を仮定した。

$$\theta = -0.5 \cdot V + 1.5 \quad (9)$$

θ を用いると、 A_s/A は次式で与えられる。

$$A_s/A = (\theta - \sin \theta \cdot \cos \theta) / \pi \quad (10)$$

従って、 b は次式のように得られる。

$$b = (\theta - \sin \theta \cdot \cos \theta) / (\pi \cdot q') \quad (11)$$

以上の考察を基に、本研究においては、高濃度粗粒子混相流における圧力波の伝播速度 a_m に関する式として次式を得た。

$$a_m = \sqrt{K' / \rho_m'} \quad (12)$$

$$K' = 1 / \{ (D \cdot C' / E \cdot e) + q' / K_s + (1 - q') / K_w \} \quad (13)$$

$$\rho_m' = (\rho_s \cdot q' + (1 - q') \rho_w) / (1 - b \cdot q') \quad (14)$$

摩擦係数 f については、次のように考える。粗粒子を水力輸送する場合、主として撓動層をともなう流れの範囲内で輸送速度が設定される。撓動層をともなう流れにおける圧力損失係数 ϕ は次式で表される。

$$\phi = K_b (S - 1) g D / V^2 = (i - i_w) / (i_w \cdot C_v) \quad (15)$$

ここに、 K_b は係数、 S は粒子の比重、 i および i_w は混相流および清水流の水力勾配である。従って、摩擦係数 f は次式のように得られる。

$$f = f_w [1 + C_v \cdot K_b (S - 1) g D / V^2] \quad (16)$$

f_w は清水流の管摩擦係数を表す。 K_b の値については、従来の結果を考慮し、 $K_b = 80$ を用いることにする。

以上の諸式を用いて、(1)および(2)式を数値計算すれば、バルブの閉鎖にともなう管内圧力変動の時刻歴を求めることができる。

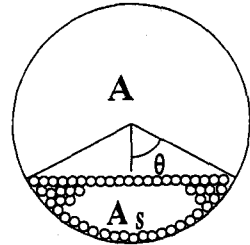


図-1 管内断面の模式図

3. 実験装置、実験方法および実験試料

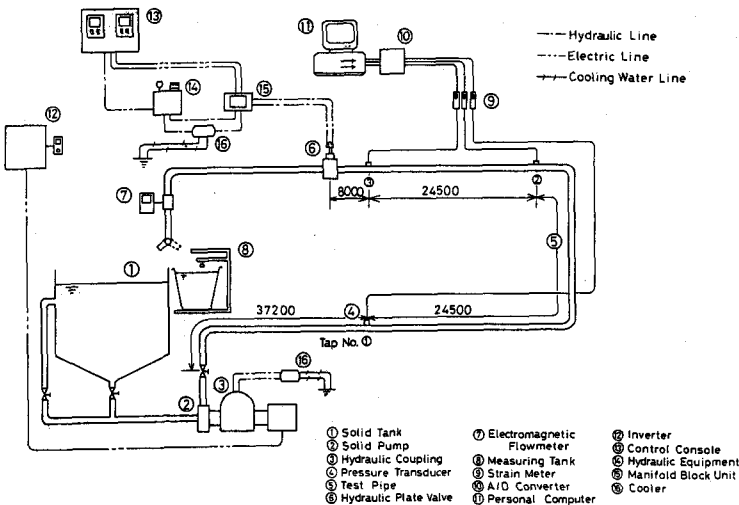


図-2 実験装置の概略

図-2に本実験で用いた装置の概略を示した。この図に示されるように、本実験装置は粒子槽、ソリッドポンプ、圧力変換器、供試管、油圧式プレートバルブ、電磁流量計、油圧装置およびマニホールドブロックユニットなどから構成されている。供試管には配管用炭素鋼管を用いた。なお供試管の内径は53.2mm、肉厚は3.7mmであり、全長は約100mである。本実験に用いたプレートバルブの形状を図-3に示した。この図に示されるように、プレートバルブには面積が管断面積に等しい円形の穴があいており、このプレートバルブが一定速度で上昇し、管を閉鎖するようになっている。この場合、弁の開度 ε は次式で示される。ただし、 t_c は弁の閉鎖に要する時間である。

$$\varepsilon = A_v/A = (2/\pi) \{ \cos^{-1}(t/t_c) - \sqrt{[1 - (t/t_c)^2]} \cdot (t/t_c) \} \tag{17}$$

実験は、まず初めに粒子槽下部のバルブを調節して、吐出濃度を所定の値に設定した後、油圧式プレートバルブを閉鎖して管内に水撃を発生させ、圧力波の通過にともなう管内圧力の変動を、容量が5MPaの圧力変換器を用いて測定した。ただし、圧力の測定は図-1に示されている①、②および③番の3ヶ所の測定点で行った。平均流速は、1.5、2.0および2.5m/sの3段階に設定したが、これは沈降性粒子を水力輸送する場合、主として摺動層流れにおいて輸送が行われることを考慮したためである。また吐出濃度Cvは4、8および12%の3段階に、バルブの閉鎖速度V_bは0.088、0.10、0.12および0.19m/sの4段階に設定して測定を行った。なお、閉鎖速度の制御はマニホールドブロックユニットによって油圧を制御する方法で行った。ただし本実験装置の限界上、V_b=0.19m/sが最大の閉鎖速度であった。圧力変換器からの信号は、動歪計、A/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータ(PC-9801)に取り込み、フロッピーディスクに記録した。なお、測定は圧力波の伝播速度が1000m/s以上になることを考慮し、サンプリング間隔を1ms、サンプリング数を各々の測定点に対し4096とした。

本実験に用いた粒子は2種類の安山岩碎石であり、これらの物性値を表-1に一括して示した。

4. 実験結果および計算結果ならびに考察

図-4に本実験で得られた圧力変動波形の一例を示した。弁閉鎖後、管内の圧力は急激に上昇するが、ピークに達した後、反射波の影響を受けてすぐに減少する。プレート弁の所で反射した圧力波は再び圧力上昇波となって下流に伝播し、第2の圧力上昇を示すが、ピーク値は第1波のピーク値に比べてかなり小さく、また第2波以降の波形は乱れていることが分かる。この原因としてはポンプの特性の影響や過渡状態における粒子の運動の影響などが考えられるが、これについては今後、詳細に検討する必要がある。

図-5に最大昇圧量 ΔP_{max} と弁の閉鎖速度V_bとの関係の一例を示した。黒く塗りつぶした点が実験結果であり、白抜きの点は計算結果を示している。なお、計算結果については後述する。本研究においては、最大昇圧量は弁閉鎖後の管内の最大圧力と弁閉鎖前の定常状態における管内圧力と定義する。最大昇圧量は弁の閉

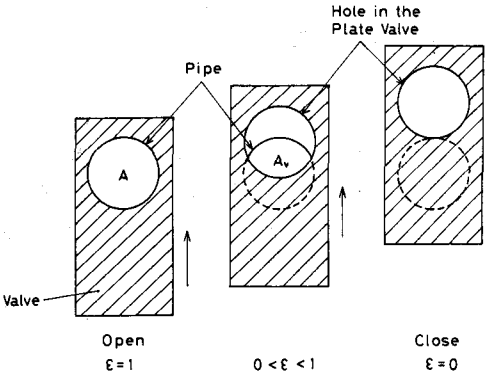


図-3 プレートバルブの模式図

表-1 粒子の物性値

Material	Particle Diameter ds (m)	Specific Gravity S (-)	Terminal Velocity Vss (m/s)	Particle Reynolds Number Res (-)	Drag Coefficient Cd (-)
Crushed Rock	1.27×10 ⁻³	2.74	0.12	197	1.93
	2.18×10 ⁻³		0.16	443	1.92

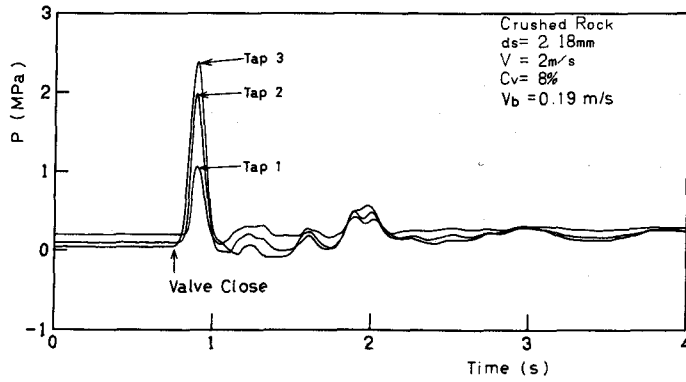


図-4 圧力変動波形の時刻歴（実験結果）

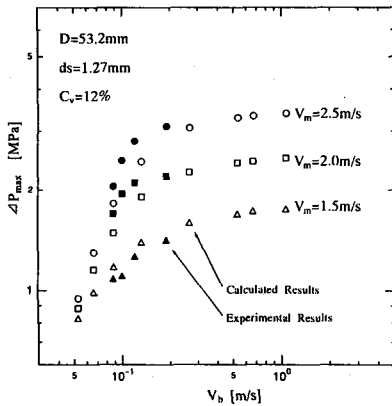


図-5 最大昇圧量と弁の閉鎖速度との関係

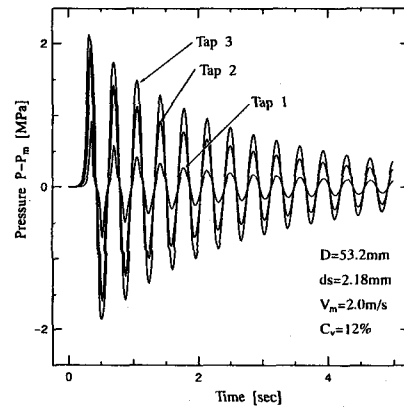


図-6 圧力変動波形の一例（計算結果）

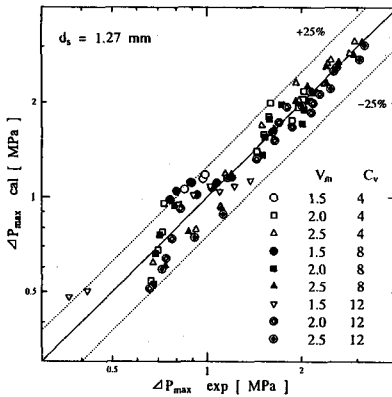


図-7 実験値と計算値との比較

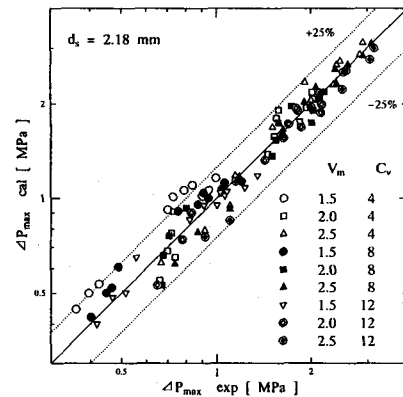


図-8 実験値と計算値との比較

鎖速度とともに増大しながら、一定値に漸近する傾向を示している。一般の水撃理論から推察すると、急閉鎖の状態に達すると、最大昇圧量は弁の閉鎖速度の影響を受けず、一定値を示すと考えられる。本実験結果には弁の閉鎖速度の影響が現れていることから、本実験は緩閉鎖による水撃現象であると推察される。

図-6に計算により求めた圧力変動波形の一例を示した。これは、(1)および(2)式を差分し、特性曲線法を用いて計算した。弁の閉鎖後、管内の圧力が急激に上昇し、ピークに達した後、反射波の影響を受けてすぐに減少するが、実験により求めた波形と異なり圧力の上昇と下降が規則的に繰り返されている。この傾向は従来の結果⁴⁾と一致するものであるが、これは(2)式中の a_m で示される圧力波の伝播速度が減衰することなく、弁と貯水槽の間を伝播するためである。従って、圧力波の伝播速度が減衰するように仮定すると、この周期的な変化の振幅を小さく抑えることができ、計算値と実験値とを近づけることができるが、これについては前述したように過渡状態における粒子の運動などについて検討し、摩擦損失係数などを補正する必要がある。しかしながら、第1波のピーク値に比べて第2波以降のピーク値は常に小さくなっているのも、この意味では、本実験で用いたような管路形状の管路の設計に必要なデータとしては、第1波によるピーク値のみでも十分であると考えられる。そこで、計算による第1波のピーク値と実験による最大昇圧量との比較検討を行った。図-7および図-8は計算値と実験値との比較を示したものである。粒子径および粒子濃度にかかわらず、両者は $\pm 2.5\%$ の範囲内で一致している。それゆえ、本モデルは高濃度の粗粒子混相流における圧力変動の時刻歴の推定には不十分であるが、第1波による最大昇圧量の推定は可能であると考えられる。

図-5中に弁の閉鎖速度を種々に変化させて最大昇圧量を計算した結果を示した。最大昇圧量は弁の閉鎖速度とともに増大し、弁の閉鎖速度が約 0.3m/s 以上では、最大昇圧量はほぼ一定値を示している。従って、(1)および(2)式を用いることにより、緩閉鎖・急閉鎖にかかわらず最大昇圧量を計算し得ると考えられる。

5. むすび

高濃度の粗粒子混相流における水撃現象について検討した結果、以下の結論が得られた。

- 1) 最大昇圧量は緩閉鎖の範囲内では、弁の閉鎖速度の影響を受け、閉鎖速度の増加とともに最大昇圧量は増加する。また急閉鎖の範囲内では、弁の閉鎖速度にかかわらず最大昇圧量は一定値を示す。
- 2) 粒子の仮想質量をも考慮に入れた水撃に関する基礎式を基に、最大昇圧量について理論的に検討し、計算値と実験値との比較検討を行った。その結果、本モデルは水撃による圧力変動の時刻歴の推定には不十分であるが、最大昇圧量の推定には使用し得ることが確かめられた。

終りに、本研究を遂行するに当たり八戸工業大学教授川島俊夫先生および東北大学助教授益山忠先生から有益なる御助言を頂いた。ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Kao, T.Y. and Wood, J. : Pressure Surge Generation due to Rapid Shutdown of Pipelines Conveying Slurries, Proc. of Hydrotransport 5, Paper E1, 1978
- 2) Liou, C.P. : Acoustic Wave Speeds for Slurries in Pipelines, J. of Hydr. Engng., Proc. of A.S.C.E., 110[7], pp. 945-957, 1984
- 3) 横山重吉 : 粗粒子混合液の管内流れにおける圧力波の伝ば速度の測定, 機械の研究, 33[3], pp. 44-46, 1981
- 4) 横山重吉 : 水平円管内の粗粒混相流れにおける水撃現象, 機械の研究, 34[4], pp. 43-48, 1982
- 5) 野田佳六 : 堆積層をともなう流れの圧力損失, 日本鉱業会誌, 101[1168], pp. 363-368, 1985
- 6) 高橋 弘ら : 固液混相流における圧力変動におよぼす微粒子の影響, 混相流, 4[4], pp. 284-306, 1990
- 7) Bechteler, W. and Vogel, G. : Pressure Wave Velocity in Slurry Pipelines, Proc. of Hydrotransport 8, Paper H2, 1982
- 8) 高橋 弘ら : 摺動層をともなう流れの粒子の運動機構, 日本鉱業会誌, 101[1173], pp. 713-717, 1985