

水撃圧の減衰について

東北学院大学工学部 正会員・河野幸夫

学生員 渡辺 晃

学生員 鈴木 新

I. まえがき

沖縄県のA市において、高性能の水圧調整弁が下流に設けられた別の水圧調整弁の急激な閉塞にともなう水撃圧発生により、その水撃圧の波形の上下に共振し激しいスピードに2弁の閉閉をくり返し、その結果、で新しい水撃圧を発生させるという現象が起きた。そこで、下流側の弁の非定常的な水撃波形の変化およびその減衰が重要な問題となってきた。しかし、水撃理論においてイサツ抵抗の項が存在するにもかかわらず、短管路においてはほとんど減衰しないし、水の衝撃波の減衰に関してはまだまだ研究中で正確には把握できていないのが現状である。そこで、本研究では負圧(水柱分離)の起こらない状態の水撃圧を実験装置内に発生させ、その減衰およびWave Speedの時値軸に対しての変化についてなどの研究を行った。

II. 水撃圧の理論と解析

1. Wave Speed (a)の理論値

Wave Speed は(1)式で表され、Cは管の固定条件によって異なる。

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + (K/E)(D/e)C}} \quad (1) \quad \text{where, } D = \text{鋼管の直径} \quad e = \text{鋼管の厚さ}$$

$E = \text{鋼管の弾性係数} = 3 \times 10^7 \text{ psi} = 2.11 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

$K = \text{水の体積弾性係数} = 3 \times 10^5 \text{ psi} = 2.11 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ $\rho = \text{水の密度} = 1.94 \text{ slug/ft}^3 = 0.10197 \text{ t/m}^3$

$\mu = \text{ポアソン比} = 0.30$ $C = \text{上端のみ固定} = 1 - \frac{\mu}{2} = 0.85$

管径の変化に対して Wave Speed の理論値は、管径1インチ ($D_1 = 27.15 \text{ mm}$, $e_1 = 3.45 \text{ mm}$) の Wave Speed $a_1 = 1392.7 \text{ m/s}$ 、管径1.5インチ ($D_{1.5} = 41.08 \text{ mm}$, $e_{1.5} = 3.59 \text{ mm}$) の $a_{1.5} = 1373.2 \text{ m/s}$ 、管径2インチ ($D_2 = 52.35 \text{ mm}$, $e_2 = 4.23 \text{ mm}$) の $a_2 = 1368.1 \text{ m/s}$ となった。

2. 水撃圧の理論

管内における水撃理論は一般に一次元非定常流として取扱い、Eulerの運動方程式(2)式と連続方程式(3)

式の Linear Combination をとり、

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial s} + \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + \frac{f}{2D} |V|V = 0 \quad (2)$$

特性曲線法にてコンピュータ解析をおこなう。

$$a^2 \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (3)$$

Upstream Boundary Condition は

水槽なので Head はその静水圧を用いる。Downstream Boundary Condition は Globe valve (手動弁) で独特の流量特性をもっているのではあるが、ここでは断片的に急閉塞をするので、弁は直線的に閉塞するものと仮定して解析を行う。

III. 水撃圧実験

1. 実験装置

図-1のように上の水槽(1.7m×3.0m×1.2m)より下の水槽(1.0m×1.0m×1.0m)に鋼管(管径を1インチ, 1.5インチ, 2インチと変える)をつなぎ、下の水槽より3.5m上流部に Quick closing valve を取り付け、その手前30cmに圧力変換器を取り付ける。下の水槽に落ちた水はポンプにより上の水槽に上げられ、上の水槽の水位をほぼ一定に保つことができるようにしている。

2. 実験方法

落差約4mを利用し、自然流下式にて0.02 m/sの流速を2インチの鋼管内に作り出し、Quick closing valveにて急閉塞することにより水撃圧を発生させた。管径1インチ、1½インチの鋼管についても同様の方法で水撃圧を発生させた。Valveの閉塞時間は、2インチ管 $t_c=0.0018$ sec, 1½インチ管 $t_c=0.031$ sec, 1インチ管 $t_c=0.031$ sec, で2インチ管では急閉塞であつたが、1インチ半、1インチ管ともに $t_c=0.026$ secより大で緩閉塞であつた。発生した水撃圧は圧力変換器より動ひす計計器を通じ、Digital memoryにて波形を記憶させ、Synchroscopeでcheckした後、ペンレコーダーにて書き出した。

表-1 各管径における水撃結果

管径 インチ	2	1½	1
弁の閉塞時間 秒	0.0018 急	0.031 緩	0.031 緩
最大水撃圧 m	7.34	6.84	7.39
理論値 m	6.8	6.5	6.5
WAVE SPEED m/s	1309.1	1195.8	1272.6
理論値 m/s	1361.6	1372.9	1392.5

IV. 結果およびその考察

表-1には各管径における弁の閉塞時間、水撃圧の最大値と理論値、Wave speedの最大値と理論値などをまとめた。図-2は2インチ管における水撃波形のTypicalなものである。図-3は0.02 m/s/wardの水撃波形を理論値と比較したもので、最大水撃圧はオスピークに起こる(理論ではノーピーク)、負のピークは理論値より大きめに下がる、ことがわかる。図-4は水撃波形の正ピークのための水撃圧とWave speedのピーク番号(時間軸と考えるとよい)に対しての変化をプロットしたものである。グラフから次のことがわかる、水撃圧は理論値(マサチューセツト抵抗の項があるにもかかわらず)が6.8mと一定であるのに対して実験値では7.34m(No.2)より4.85m(No.25)まで一様に減衰している、Wave speedは定常解1362m/sに対し1350m/s(No.1)より1179m/s(No.10)まで下がり、その後、1258m/sと1219m/sの間を往復している。左方し、負ピークのWave speedはきついに一様に減衰していく。

下流側の弁で一度水撃圧が発生すると理論では減衰がほとんどないので上流側の弁は閉塞を止まらずにくり返すことになるが、実際とは減衰が早いので数回で止まる、また、負圧のおきる管路ではもっと早く減衰がすすむ。

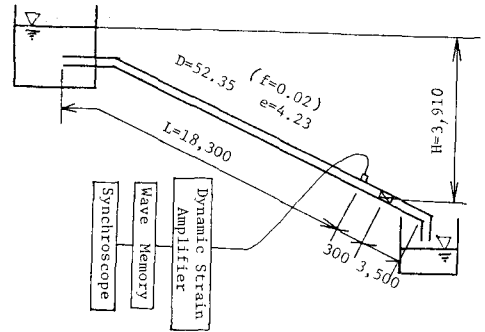


図-1 実験装置 (mm)

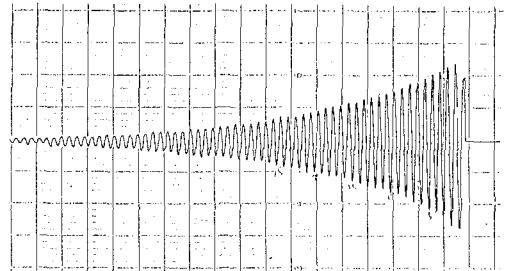


図-2 水撃圧波形 (2インチ管, 2 ms)

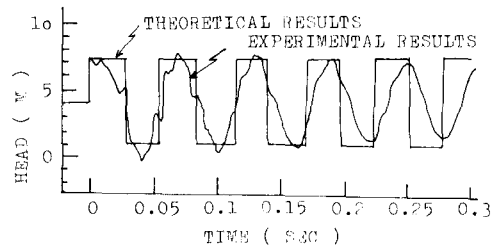


図-3 理論値と実験値 (2インチ管)

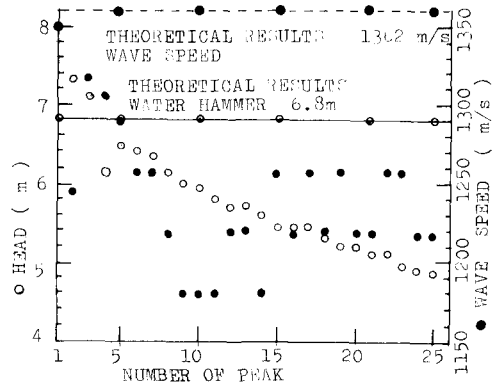


図-4 WAVE SPEED と水撃圧の減衰