

## II-173 低圧時の水撃現象における気泡発生と波速についての研究

東北大学大学院 学生員 日比谷 穰  
山梨大学工学部 正員 荻原 能男  
久保田鉄工 齋 藤 実

### 1. はじめに

管水路の上流側を急閉塞すると、閉塞位置直下流において、水撃現象により急激な圧力降下を生じる。この圧力低下が著しいと、水蒸気圧にまで降下することがある。この気化現象を考慮した水撃作用の解析方法としては1962年にL. EscandeおよびW. H. Liによって提案された水柱分離理論がある。しかし、この理論では、水中に気泡が混在する領域を無視して、水撃圧の波速は一定の値をとるものとして扱っているため実験値と一致しないことがしばしばあった。そこで、荻原は、圧力降下によって気泡が混入すると、水の体積弾性係数が低下し、圧力波の波速が遅くなるという波速変化理論を提案している。

本研究においては、実験によって、管路の上流側断面を急閉塞した時、水撃現象により発生する圧力波の波速を実測し、理論値との比較検討を行なった。

### 2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図は図-1の通りである。閉塞位置より、下流側6.4 mの管路には透明アクリル管を使用し、閉塞時に、閉塞位置近辺の管内の状態を観察できるようにした。その他の管路には塩化ビニール管を用いた。また閉塞位置では、図のように断面が急縮しており、管内径よりわずかに小さい径を持ったピストンを流下させることによって、この位置で瞬間閉塞を起こした。その時、図-1に示す上流側と下流側に設けた圧力ヘッドによって、その2点における圧力変化を電磁的に記録した。そして、オシログラフペーパーに表われる圧力変化の立ち上がり点により、圧力波が上流側圧力ヘッドから下流側圧力ヘッドまで伝播するのに要した時間を求め、これで管路長を除して、波速（以下、これを「行きの波速」と呼ぶ）とした。また、同様にして、圧力波が、その後下流側水槽で反射して、下流側圧力ヘッドを通過してから、上流側圧力ヘッドまで、戻ってくる時の波速（以下、これを「帰りの波速」と呼ぶ）を求めた。なお、この後、閉塞位置で圧力波が反射すると、ピストンは押し戻されるので、最初の圧力波の一往復のみが信頼できるデータを与える。以上の方法によって、様々な流量において実験を行ない、行きと帰りの波速を求めた。

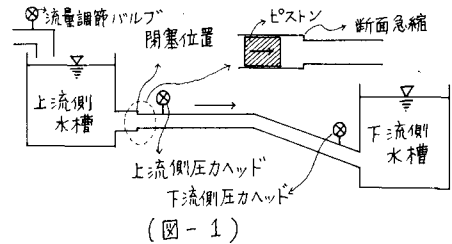


図-1に示す上流側と下流側に設けた圧力ヘッドによって、その2点における圧力変化を電磁的に記録した。そして、オシログラフペーパーに表われる圧力変化の立ち上がり点により、圧力波が上流側圧力ヘッドから下流側圧力ヘッドまで伝播するのに要した時間を求め、これで管路長を除して、波速（以下、これを「行きの波速」と呼ぶ）とした。また、同様にして、圧力波が、その後下流側水槽で反射して、下流側圧力ヘッドを通過してから、上流側圧力ヘッドまで、戻ってくる時の波速（以下、これを「帰りの波速」と呼ぶ）を求めた。なお、この後、閉塞位置で圧力波が反射すると、ピストンは押し戻されるので、最初の圧力波の一往復のみが信頼できるデータを与える。以上の方法によって、様々な流量において実験を行ない、行きと帰りの波速を求めた。

### 3. 水撃圧の波速の理論値

(1) 気泡混入のない場合の理論波速 $a_0$ は次式で与えられる。

$$a_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho(1 + \frac{DK}{bE})}} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 $K$ は水の体積弾性係数、 $E$ は管材の体積弾性係数、 $\rho$ は水の密度、 $D$ は管内径、 $b$ は管の肉厚である。水柱分離理論では、閉塞後、蒸気圧以下となっても、気泡が混在する領域を考慮せず、波速はすべて $a_0$ で取り扱う。なお、 $\rho$ 、 $K$ 、 $E$ の値は水温によって変化するが、水温の変動が $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度であったので、 $a_0$ は図-3のように513.0～514.0%の間に分布し、ほぼ一定の値をとった。

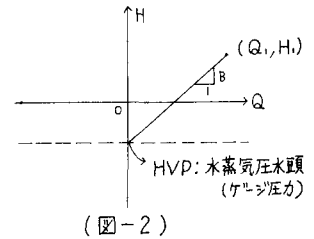
(2) 気泡混入があった場合は、ボイド率が変化するため、圧力波の波速は(1)式で与えられるが、 $\rho$ 、 $K$ 、 $E$ はボイド率を含んだ式で表わされる。しかし、ボイド率は波速と圧力水頭から決定される値であるため、定量的

に決定することができない。そこで、気泡混入時の波速 $\alpha$ は、波速変換理論によって次のように求めた。水撃圧の特性方程式は、次式で表わされる。

$$\frac{d\pi}{dt} = \frac{Q}{A} \pm \alpha \quad \text{----- (2)}$$

$$dH = \mp B dQ \mp R Q|\alpha| \quad \text{----- (3)}$$

$$\text{ただし } B = \frac{a}{gA}, R = \frac{f a \cdot dt}{2 g D A^2}$$



ここに、 $A$ は管断面積、 $Q$ は流量、 $\alpha$ は波速、 $H$ は圧力水頭、 $g$ は重力加速度、 $D$ は管内径、 $f$ は抵抗係数である。(3)式を差分化し、特性曲線法によって、 $Q-H$ 面(図-2)において、初期状態( $H_1, Q_1$ )と閉塞後の管内状態( $0, HVP$ )を表わす点を結んだ直線の勾配 $B$ より波速 $\alpha$ が求まる。(ただし、摩擦項は無視する)

#### 4. 実験結果および考察

様々な流速において、実測した波速の値を図-3に示す。横軸は流速、縦軸は波速である。記号は、閉塞時に観察した状態を表わしており、 $\times$ は無変化、 $\circ$ は気泡発生、 $\triangle$ は水柱分離で、 $\otimes$ は $\times$ と $\circ$ の中間状態、 $\odot$ は $\circ$ と $\triangle$ の中間状態を表わしている。①は、(1)式より求めた気泡混入のない時の理論波速 $\alpha_0$ 、②は波速変換理論より求めた気泡混入時の理論波速 $\alpha$ 、③は行きの実測波速、④は帰りの実測波速である。なお、無変化と気泡発生の限界流速は、およそ0.200%であった。閉塞位置の状態を観察すると、流速が大きくなるほど、水柱分離の範囲が広がり、発生する気泡量もふえているので、波速はより小さくなることが予想される。しかし、行きの実測波速は流速が大きくなると、 $\alpha_0$ に近いば一定の分布をしている。従って行きの場合は、水柱分離理論があてはまっている。しかし、気泡発生と無変化の限界流速付近においては、 $\alpha$ にほぼ一致した値をとっている。このごく狭い領域においては、波速変換理論が成り立っている。もともと、波速変換理論は、水柱分離を生じない程度の流速で、気泡混在のみの状態を対象としているので、この理論の妥当性がよくわかる。しかし、帰りの実測波速は、 $\alpha_0$ および $\alpha$ とはかけ離れた値をとっている。また、行きと帰りの波速は、水柱分離理論、波速変換理論によれば、同じ値をとるはずであるが、図-3のように、帰りの波速は行きの波速の $1/3 \sim 1/4$ の値をとっている。この差は予想以上に大きい。波速変換理論によれば、管内のある地点を、閉塞によって発生した圧力波が通過すると、水蒸気圧となり、気泡が発生する。この気泡は圧力波が下流側水槽で反射して、初期水圧となってこの地点に戻ってくるまで存在している。そのため、圧力波が一往復する間はボイド率が一定であるから、行きと帰りの波速が等しいとしている。しかし、行きの場合、ボイド率0の水の中を水蒸気圧の水頭をもった圧力波が伝播していくが、気泡はこの圧力波が到達することによって発生するわけで、行きの波速が $\alpha_0$ に近いのは、この気泡の影響をそれほど受けていないからだと考えられる。帰りの場合は、すでに気泡が混在している水中を、初期圧力水頭をもった圧力波が伝播していく。そして、この圧力波が到達すると気泡は消滅するが、波速は前面に存在する気泡の影響によって、実測値のような小さな値をとったのだと考えられる。従って、行きに比べて帰りでは波速が低下することを考慮して、波速変換理論の修正を検討する必要がある。

#### 5. 参考文献

1) 荻原能男 水柱分離前の水撃現象の計算法 (P127~132 土木学会水理講演会論文集 昭和49年2月)