

水撃負圧部における伝播速度とボイド率との関係

東北学院大学大学院 土木工学専攻 学生会員 ○下浅 雄大

正会員 河野 幸夫

1. 序論

上流側に水槽があり、その水を管路で下流に自然に流下させて通水している場合、下流側に取り付けられた弁を急激に閉鎖すると、管内に急激な圧力上昇が発生する。これは一般に水撃現象 (Water Hammer) と呼ばれている。

圧力上昇が上流方向へ伝播し水槽側で反射すると大きな圧力降下が起こる。そして負圧部が臨界圧 (ゲージ圧で約-10 m) に達すると、気泡が発生する。この為、管内は気液混相流になる。流速が遅い場合には液体のみの単相流となり、流速が速い場合は液体と多数の気泡からなる気液混相流である。また、この時の伝播速度は正圧の伝播速度とは異なる。

そこで本研究では、まず BNC-box を用いて圧力とカメラでの映像の2つを同期させた状態での測定と、それを元に伝播速度とボイド率との関係を明らかにする事を目的としている。

2. 単層流の伝播速度 a_1

正圧伝播速度 a_1 は、一般的に管内が水のみ単相流の状態では以下の式を用いて計算される。

$$a_1 = \sqrt{\frac{\frac{k}{\rho}}{1 + \left(\frac{k}{E}\right) \times \left(\frac{D}{e}\right) \times (1 - \mu^2)}} \quad (1)$$

$$= 1341.7 (\text{m/s})$$

ここで、 k は水の弾性係数 ($2.07 \times 10^9 \text{ N/m}^2$)、 ρ は水の密度 ($1019.37 \text{ N} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$)、 E は管の弾性係数 ($2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$)、 D は管の内径 ($5.3 \times 10^{-2} \text{ m}$)、 e は管の肉厚 ($3.9 \times 10^{-3} \text{ m}$)、 μ はポアソン比 (0.3) である。これらの値を式(1)に代入すると、管内が水のみ状態における圧力の伝播速度は $1341.7 (\text{m/s})$ で流速に限らず一定である事が分かる。

3. 気液混相流の伝播速度 a_2 の算出

本研究では水撃圧が-10 (m)に到達すると管内が臨界圧となり水が気化し相転移する事によって、水と気泡の混相流である気液混相流状態となる。従って、負圧になった際の伝播速度はそれとは別のものになる。

ここで、水と空気が混合した場合のそれぞれの体積弾性係数を求める。(Fig.1を参照)圧力が ΔP だけ増加した場合、水と空気の密度と体積が変化し、その割合で密度の平均 ρ_{AVE} と体積弾性係数の平均 K_{AVE} は式(2)と(3)の様に变化した体積の割合で表す事が出来る。それを単層流の伝播速度である式(1)に代入すると、気液混相流の伝播速度

a_2 の理論値が求められる。この式中において水と気泡の全体の体積 V と気泡の体積 V_a は未知数であるが、これらは高速度カメラによる映像から求められる。また、ここで V_a/V はボイド率と呼ばれ、この値に負圧の伝播速度は依存している。

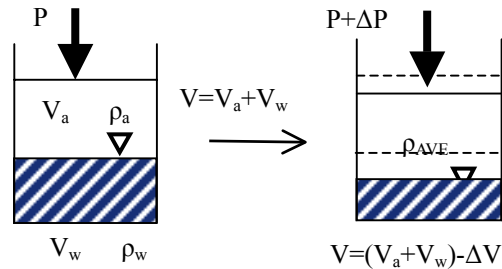


Fig.1 水と空気の体積弾性係数の定義

$$\rho_{AVE} = \rho_w - (\rho_w - \rho_a) \frac{V_a}{V} \quad (2)$$

$$\frac{1}{K_{AVE}} = \frac{1}{K_w} + \frac{1}{K_w} \left(\frac{K_w}{K_a} - 1 \right) \left(\frac{V_a}{V} \right) \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma_w - (\gamma_w - \gamma_a) V_a/V}{g} \left[\frac{1 + (K_w/K_a - 1) V_a/V}{K_w} + \frac{D(1 - \mu^2)}{eE} \right]}} \quad (4)$$

ここで、 γ_w は水の比重 (9.99 $\times 10^3 \text{ N/m}^3$)、 γ_a は気泡の比重 (23.7 N/m^3)、 V は水と気泡の混合体の体積、 V_a は気泡の体積、 K_w は水の体積弾性係数 ($2.07 \times 10^9 \text{ N/m}^2$)、 K_a は気泡の体積弾性係数 ($2.8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)、 μ はポアソン比 (0.3)、 e は鋼管の厚さ ($5.3 \times 10^{-2} \text{ m}$)、 E はヤング係数 ($2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$) である。

4. 気泡測定用実験装置

水面高 12.1 (m)、全長 60.1 (m)の管路がある。その管路の中を水槽の水をオーバーフローさせる事により、水面 H の高さを一定とし、安定した流量で水を自然流下させる。水撃実験の圧力水頭の降下から水の気化が推測されるので、管路の途中に挿入した透明アクリル管を通して瞬間的に確認される発生気泡を捕らえる為に、管内の様子を2台の高速度カメラを用いて気泡の撮影を行う。

キーワード：伝播速度、ボイド率、気液混相流、水撃圧

住所：宮城県柴田郡柴田町大字下名生字剣塚 47-4

カメラはBNC-Boxを経由し、Windows-PCに接続する。(Fig.2 参照)

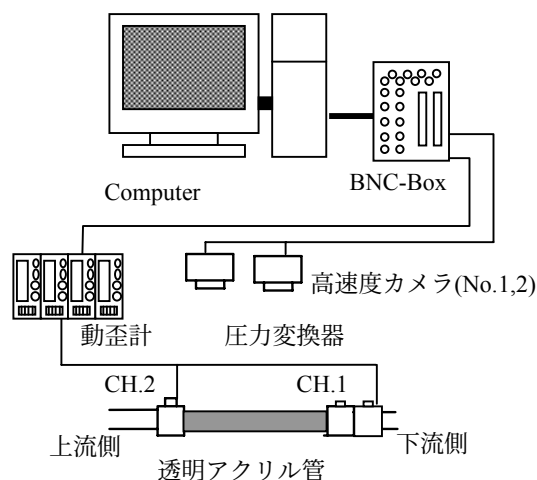


Fig.2 水撃圧測定装置

5. 実験結果

実験結果として Fig.3 と Fig.4 にそれぞれボイド率と流速の関係、ボイド率と伝播速度の関係を載せている。まず Fig.3 だが、これは気泡が高速カメラで気泡が確認できたのは、流速 約 0.7(m/s)からである。その為、それよりも流速が遅い時のボイド率が求められないが、流速が早い時のデータを用いて回帰曲線を描き、おおよその近似値を求めている。

次に Fig.4 だが、これは式(4)で求められる伝播速度とボイド率の理論値を求め描いた曲線に、実験で求められた値を載せたものである。プラスマークで描かれたものは面積で求めたボイド率と負圧での平均の伝播速度との直線であり、三角マークは面積で求めたボイド率と負圧の時間の区切り方を変えた場合の結果である。

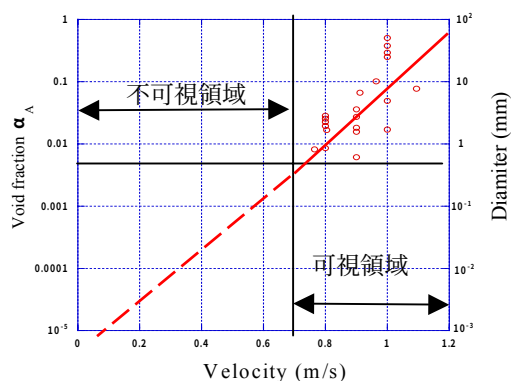


Fig.3 ボイド率と流速の関係結果

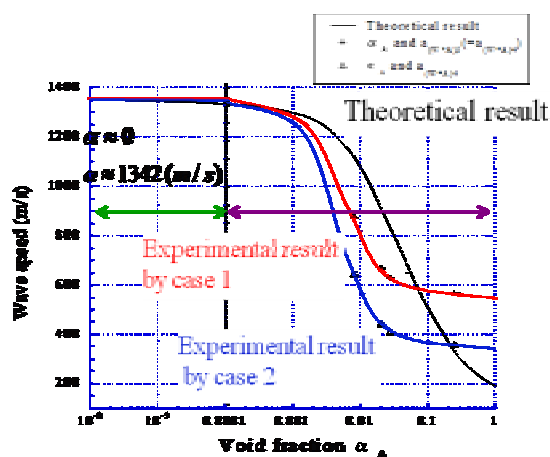


Fig.4 伝播速度とボイド率の関係

6. 結論

理論値上での伝播速度は、equation (4)においてボイド率が0の時は1342.40 (m/s)に、ボイド率が1の時は165.40 (m/s)となり、ボイド率が高い時は一般的な音速の340 (m/s)よりも遅くなる事が分かった。これは式中に水と水蒸気の別々の体積弾性係数や密度を使っているからだと思われる。

本実験での最小の伝播速度は、流速が1.0 (m/s)でボイド率が0.311の時に294 (m/s)であった。また、ボイド率が0.005から0.5までの範囲(可視領域)でのボイド率と伝播速度との関係は、Fig.3の様に分布する事が分かった。それとは反対に、ボイド率が低い時、つまり伝播速度が1341.7 (m/s)に近い時(不可視領域)のボイド率は 10^{-5} 程度と非常に微細な気泡で存在しているのではないと思われる。

ボイド率と伝播速度との関係は、ボイド率がゼロに近い場合の伝播速度は理論値の1342 (m/s)に近いが、ボイド率が0.0001からは理論値と実験値が共に大きく変化し、ボイド率が1の時にCase1の時は約580 (m/s)、Case2の時は約350 (m/s)になる事がわかった。Case2の場合の音速より遅くなる原因としては、発生した気泡が振動する事により圧力波の伝播が阻害されているのではないと思われる。

参考文献

- 1)渡辺雅二,河野幸夫:管路における気液2相流のモデル解析について 環瀬戸内応用数理研究部会 第一回論文集、応用数理学会、pp.42~46, (1998).
- 2)田嶋大樹,河野幸夫:水撃負圧部の気化現象におけるオプティカルプローブボイド計による発生気泡計測について,土木学会東北支部技術研究発表会、pp.260~261, (2002).