

正圧と負圧における伝播速度の決定およびボイド率との関係

東北学院大学工学部 学生会員 森 恵一
 正会員 河野 幸夫
 学生会員 下浅 雄大

実験目的

水が流れる管路を急激に閉鎖したときに生じる急激な圧力上昇(水撃圧)は、反射時に圧力が降下することにより負圧となり、液体を気化させて管内に多数の気泡が生じ、気液混相流の状態になる。本研究は、その圧力上昇と圧力降下時の圧力波の伝播速度を圧力変換器と動歪計を用いて 1/10000 秒で測定する。また、鋼管の間にアクリル管を挿入して 2 台の高速度カメラにより 1 秒に 2000 枚撮影し、気泡の発生や、それに伴う伝播速度の変化との関連性を求める事を主な研究とする。

1. 正圧における伝播速度の理論値と実験値を比較する。
2. 負圧における伝播速度の測定方法の決定について検討する。
3. 負圧の伝播速度とボイド率との関係を求める。

水撃圧実験装置

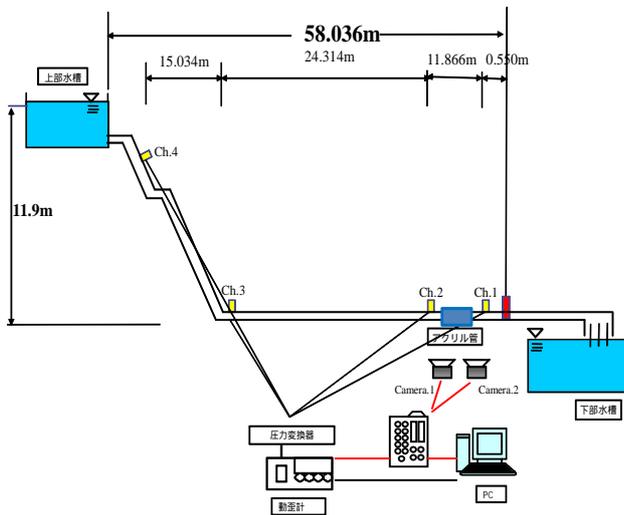


図 1 水撃圧実験装置図

正圧と負圧における伝播速度の理論値計算

正圧の伝播速度 a 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する。

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

$$= \sqrt{\frac{\frac{2.07 \times 10^8}{101.937}}{1 + \left(\frac{2.07 \times 10^8}{2.0 \times 10^{10}}\right) \times \left(\frac{5.28 \times 10^{-2}}{4.1 \times 10^{-3}}\right) \times (1 - 0.3^2)}}$$

$$= 1345.7 (m/s)$$

- k : 水の弾性係数 = $2.07 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ($2.07 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$)
- ρ : 水の密度 = $1019.37 \text{ N} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$ ($101.937 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)
- E : 鋼管の弾性係数 = $2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ($2.0 \times 10^{10} \text{ kgf/m}^2$)
- μ : 鋼管のポアソン比 = 0.3
- D : 管径 (内径) = $5.28 \times 10^{-2} (\text{m})$
- e : 管の肉厚 = $4.1 \times 10^{-3} (\text{m})$

負圧の伝播速度 a_2 は管内が気泡と水の気液混相流の状態では以下の式を用いて計算する。

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

$$= \frac{1}{\sqrt{\frac{999 - (999 - 2.372) \times (0.43 \times 10^{-2})}{9.8} \left[1 + \frac{\left(\frac{2.07 \times 10^8}{2.8 \times 10^4} - 1\right) \times 0.43 \times 0.01 + 0.02077}{2.07 \times 10^8 + (5.28 \times 10^{-2}) \times (2 \times 10^{10})} \right]}}$$

$$= 249.076 (m/s)$$

- γ_w : 水の比重量 = 9800 N/m^3 (999 kgf/m^3)
- e : 鋼管の厚さ = $5.28 \times 10^{-2} (\text{m})$
- γ_a : 空気の比重量 = 23.269 N/m^3 (2.372 kgf/m^3)
- E : ヤング係数 = $2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ($2.0 \times 10^{10} \text{ kgf/m}^2$)
- V : 水と空気の混合体の体積
- V_a : 空気の体積
- K_w : 水の弾性係数 = $2.07 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ($2.07 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$)
- K_a : 空気の弾性係数 = $2.8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ($2.8 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$)

グラフからの伝播速度計算方法

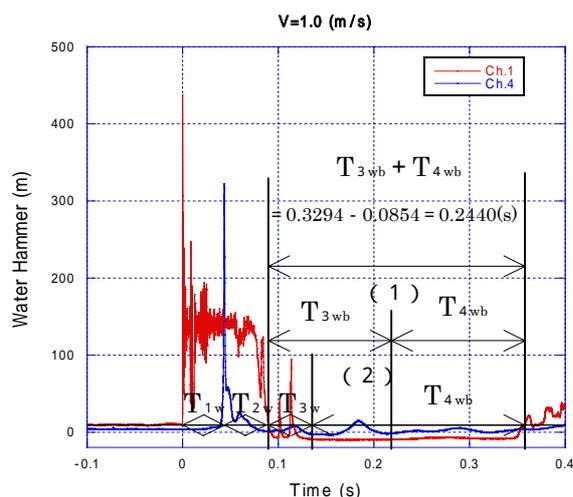


図2 伝播速度算出の時間の取り方

伝播速度については管長を時間で割ることで求めることができる。負圧の伝播速度は気液混相流状態のため、2種類の方法から算出した値により理論値との関係を調べる。

$a_1 = 2L / (T_{1w} + T_{2w})$ より算出する方法

時間 T_{1w} 、 T_{2w} は、図2の取り方をする。

$T_{1w} + T_{2w} = 0.0854$ (s)より、

$a_1 = 2 \times 57.486 / 0.0854 = 1346.276$ (m/s)

負圧の伝播速度は気液混相流状態のため、2種類の方法により算出した値により理論値との関係を調べる。

(1) $a_{2-} = 2L / (T_{3wb} + T_{4wb})$ より算出する方法

$T_{3wb} + T_{4wb}$ の定義は水撃負圧部の始まりから終わりの時間の範囲である。

$T_{3wb} + T_{4wb} = 0.2440$ (s)より、

$a_{2-} = 2 \times 57.486 / 0.2440 = 471.197$ (m/s)

(2) $a_{2-} = L / T_{4wb}$ より算出する方法

T_{1w} 、 T_{2w} 、 T_{3w} は液体のみの為、正圧の伝播速度を用いる。

$T_{1w} = T_{2w} = T_{3w} = 57.486 / 1346.276 = 0.0427$ (s)となり、

$T_{4wb} = (T_{3wb} + T_{4wb}) - 0.0427$

$= 0.2440 - 0.0427 = 0.2013$ (s)

よって、 $a_{2-} = 57.486 / 0.2013 = 285.574$ (m/s)

図3は各流速におけるボイド率の関係を表したグラフである。図4は各流速と伝播速度を表したグラフである。 $V=0.1$ (m/s)時の理論値の伝播速度 a は 1341.526 (m/s)である。 $V=1.0$ (m/s)時の理論値の伝播速度 $a=488.695$ (m/s)である。 $V=10$ (m/s)時の伝播速度 a は約 400 (m/s)となった。

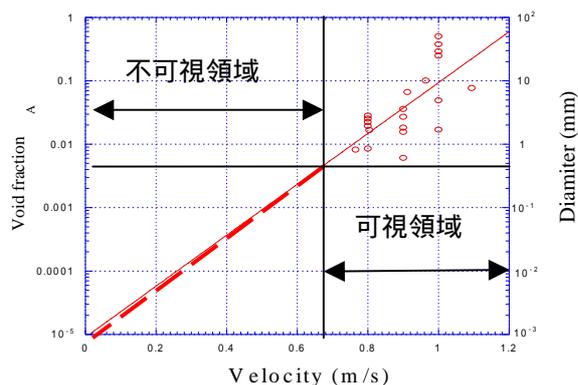


図3 各流速と伝播速度の関係

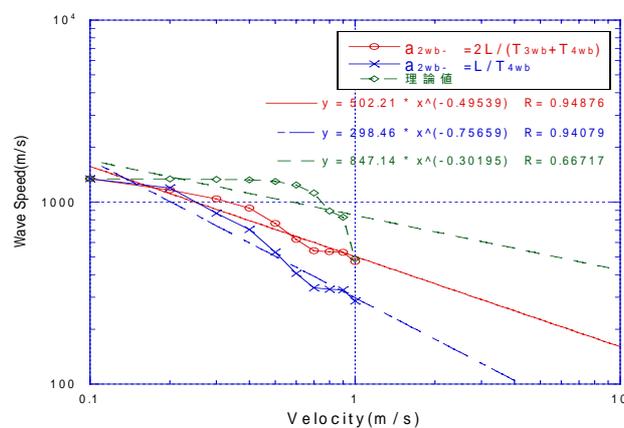


図4 各流速と伝播速度の関係

結論

1. 正圧

- 理論値は $a_1 = 1345.7$ (m/s)である。
- 流速 0.1 (m/s)時の伝播速度 a_1 は 1341.799 (m/s)となり、流速 1.0 (m/s)時の伝播速度 a_1 は 1346.357 (m/s)となった。
- 流速 0.1 から 1.0 (m/s)までの平均の伝播速度 a は 1338.470 (m/s)となった。

2. 負圧

- 理論値($\phi = 0.43$ の時)は $a_{2-} = 249.076$ (m/s)である。
- 流速 0.1 (m/s)時の伝播速度 a_{2-} 、 a_{2-} 共に 1341.799 (m/s)となった。
- 流速 1.0 (m/s)時の伝播速度 a_{2-} は 530.439 (m/s)となり、流速 1.0 (m/s)時の伝播速度 a_{2-} は 330.304 (m/s)となった。

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)。