

ボイド計および高速度カメラを用いたボイド率の計測と伝播速度について

東北学院大学工学部 学生会員 鈴木 雄樹
東北学院大学工学部 正会員 河野 幸夫
東北学院大学工学部 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、その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、鋼管路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. 高速度カメラにより水撃負圧部での各流速におけるボイド率とボイド計によるボイド率をそれぞれ求める。
2. 二つの方法で伝播速度を求め、その結果と各流速との関係を求める。

実験装置及び手順

高さ約12mの上部水槽バルブを全開にし、水を自然流下させて全長約60mの管路下流の緊急遮断弁を開け、手動弁を全開にする。

上部水槽をオーバーフローさせ、手動弁で管路の流速を止める。

管路に必要な機器(圧力変換器、高速度カメラ、ボイド計アンプ等)を取り付け、初期設定をする。

再び手動弁を開け、流速が安定したら流速を調節する。

高速度カメラのトリガーを押し、緊急遮断弁を急閉鎖させることにより水撃圧を発生させる。それと同時に、高速度カメラで気泡の撮影を行う。

高速度カメラによるボイド率の算出方法

図1は $V=1.029(m/s)$ 時の高速度カメラによる画像である。本実験では気泡の体積を正確にとられる事が出来ないため、以下の様にして2次元で計算する。

この画像をまず図2のように縦36mm、横36mmの正方形に区切り、面積 A_m を $A_m = L^2 = 1296mm^2$ と求める事が出来る。

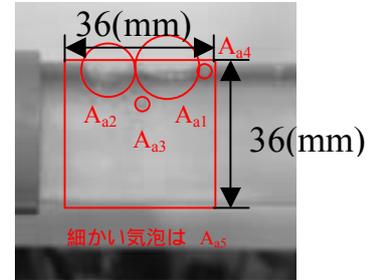


図1 高速度カメラによる影像

次に気泡の面積を計算する。多くの場合、気泡は一度に多数発生する事が多いため、一つ一つの気泡の面積を合計した値が気泡の面積となる。 A_a は、

$$A_a = \sum_{i=1}^n A_{a_i} = A_{a_1} + A_{a_2} + \dots + A_{a_n} = 114.02 mm^2$$

となる。ボイド率 α を求める式は $\alpha_A = A_a / A_m$ より、この画像のボイド率は $\alpha_A = 114.02 / 1296 = 0.0880$ と求めることができる。体積からボイド率を求めた場合は $\alpha_V = V_a / V = 0.0138$ となる。

ボイド計を用いたボイド率の算出方法

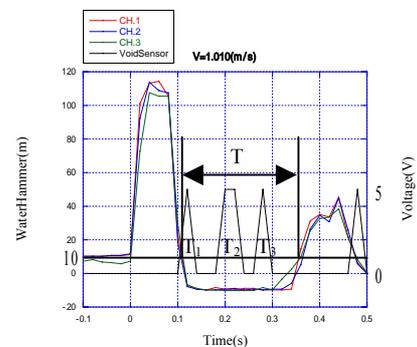


図2 ボイド率算出の際の時間の取り方

センサーは水に触れている時を0(V)、空気に触れている時を5(V)に設定している。ボイド計によるボイド率は気泡が触れている時間の合計を全体の時間で除したものである。ボイド率は $\alpha_T = T_a / T$ と表され、触れている時間は $T_1=0.01(s)$ $T_2=0.02(s)$ $T_3=0.01(s)$ より $T_a=0.04(s)$ となり、全体の時間は $T=0.35 - 0.11=0.24(s)$ なので、ボイド率は $\alpha_T=0.04/0.24=0.1667$ となる。

正圧における伝播速度の理論値計算

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。

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

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

$$= 1345.7 \text{ (m/s)}$$

k : 水の弾性係数 = 2.07×10^8 (kgf/m²)

ρ : 水の密度 = $1000/9.81 = 101.937$ (kgf・sec²/m⁴)

E : 管の弾性係数 = 2.0×10^{10} (kgf/m²)

μ : ポアソン比 = 0.3

D : 管径 (内径) = 5.28×10^{-2} (m)

e : 管の肉厚 = 4.1×10^{-3} (m)

グラフからの伝播速度算出

伝播速度については3種類の方法(の負圧を考慮した伝播速度も含む)により算出した値により理論値との関係を調べる。

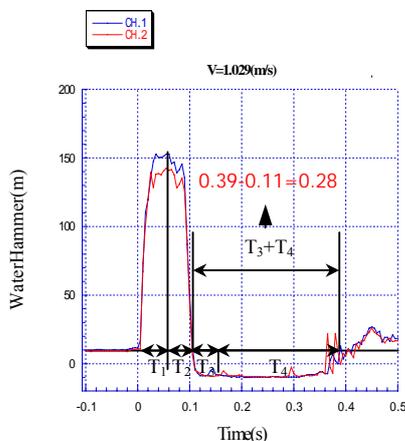


図3 伝播速度算出の際の時間の取り方

(1) $a_{3-} = 2L/(T_3+T_4)$ より算出する方法

T_3+T_4 の定義は水撃負圧部の始まりから終わりの、水撃圧が10(m)に達して交わった時間の範囲である。
 $T_3+T_4=0.28$ (s)より、

$$a_{3-} = 2 \times 56.67 / 0.28 = 404.79 \text{ (m/s)}$$

(2) $a_{3-} = L/T_4$ より算出する方法

$T_1 \sim T_3$ は液体のみの為、正圧の伝播速度を用いる。
 $T_1=T_2=T_3=56.67/1345.7=0.0421 \dots 0.042$ (s)となり、
 $T_4=(T_3+T_4) - 0.042=0.28-0.042=0.238$ (s)

$$\text{よって、} a_{3-} = 56.67 / 0.238 = 238.11 \text{ (m/s)}$$

実験結果

表1は各流速における伝播速度の計算結果を示したものである。図4は表1の値をグラフにプロットし折れ線グラフに表したものである。流速が0.6(m/s)から0.8(m/s)にかけて伝播速度が急激に遅くなっている。

表1 各流速における伝播速度 a_{3-} と a_{3+} の計算結果

平均流速	(T_3+T_4)	伝播速度 a_{3-}	T_4	伝播速度 a_{3+}
0.1	0.084	1349.29	0.042	1349.29
0.2	0.090	1259.33	0.048	1180.63
0.3	0.092	1231.96	0.050	1133.40
0.4	0.094	1205.74	0.052	1089.81
0.5	0.098	1156.53	0.056	1011.96
0.6	0.100	1133.40	0.060	944.50
0.7	0.130	871.85	0.090	629.67
0.8	0.170	666.71	0.130	435.92
0.9	0.180	629.67	0.140	404.79
1.0	0.200	566.70	0.150	377.80

正圧の伝播速度

= 1345.7(m/s)

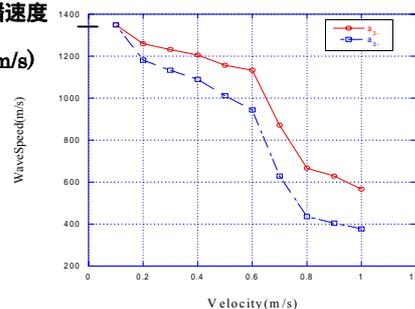


図4 流速と伝播速度の関係

表2 各流速における二つの方法から求めたボイド率の結果

平均流速	カメラ α_a	ボイド計 α_T
0.7		0.1944
0.8	0.0206	0.3968
0.9	0.0114	0.3392
1.0	0.1121	0.1010

結論

- 1 高速度カメラによるボイド率は流速 1.0 (m/s)で一番大きくなった。ボイド計では、0.8 (m/s)と0.9 (m/s)で大きくなっている。ボイド計が気泡を察知できる時とできなかった時がある事に影響された。
- 2 伝播速度は a_{3-} で求めた方法が理論値に近い値が得られた。流速が0.6 (m/s)から0.8 (m/s)にかけて伝播速度が急激に遅くなっている。これは、0.7 (m/s) から気泡を肉眼で確認できる大きさになっている事が影響していると分かった。