水撃負圧部の気液混相流中を通過する水撃波の伝播速度について

東北学院大学大学院工学研究科　学生会員○今泉良明
正会員　河野幸夫

1. 研究目的

水が流れる管路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-10 m）に達すると気泡が発生し、管内は気液混相流になる。気液混相流中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 1/10000 秒オーダーで水撃圧を計測すると同時に、高速度カメラにより 1/2000 秒オーダーでボイドをとらえることで、水撃現象の負圧部における伝播速度のメカニズムを明らかにする。

2. 水撃圧実験装置

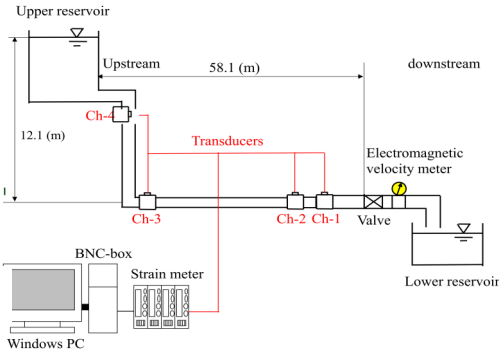

図-1 水撃圧実験装置

3. 正圧部における伝播速度 a の理論値

正圧部の伝播速度 a は一般に管内が水のみの単相流の状態では以下の式を用いて計算される。

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

k：水の弾性係数=2.07×10^9 (N/m^2)

ρ：水の密度=1019.37 (N・sec^2/m^4)

E：管の弾性係数=2.0×10^{11} (N/m^2)

D：管の内径=5.3×10^{-2} (m)

e：管の肉厚=3.9×10^{-3} (m)

μ：ポアソン比=0.3

上記の式より、正圧部における伝播速度 a は 1341.7 m/s となる。

4. 負圧部における伝播速度 a の理論値

正圧部の伝播速度 a は管内に微小な気泡が一様に分布して含まれている場合、以下の式を用いて計算される。

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

γ_w：水の比重量=9.99×10^3 (N/m^3)

γ_a：気泡の比重量=23.72 (N/m^3)

Va：気泡の体積 (m^3)

V：水と気泡の混合体の体積 (m^3)

K_w：水の体積弾性係数＝2.07×10^9(N/m^2)

K_a：気泡の体積弾性係数＝2.8×10^5(N/m^2)

D：鋼管の直径=5.3×10^{-2}(m)

μ：ポアソン比=0.3

e：鋼管の厚さ=3.9×10^{-3}(m)

E：ヤング係数=2.0×10^{11}(N/m^2)

5. 水撃圧実験結果および伝播速度算出結果

実験で得られたグラフを用いて伝播速度を算出する際に、二つの case を仮定した。

case 1 では、T_3 と T_4 を図-2 のように同じ時間と考えた。管長が L の時、伝播速度 a_3 及び a_4 は a_3 and $a_4 = 2L/(T_3+T_4)$ によって計算される。

case 2 では、T_3 の伝播速度は図-3 のように正圧の伝播速度と同じであると仮定した。しかし T_4 の伝播速度は混相流下での伝播速度となるため、伝播速度 a_4 は $a_4 = L/T_4$ によって計算される。

キーワード:水撃圧、伝播速度、ボイド率、負圧、気液混相流
住所:宮城県多賀城市八幡 2 丁目 9-18 ティエラ末の松山 108

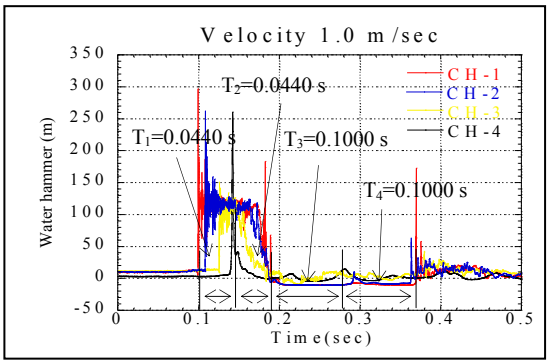

図-2　case 1 における時間の分け方

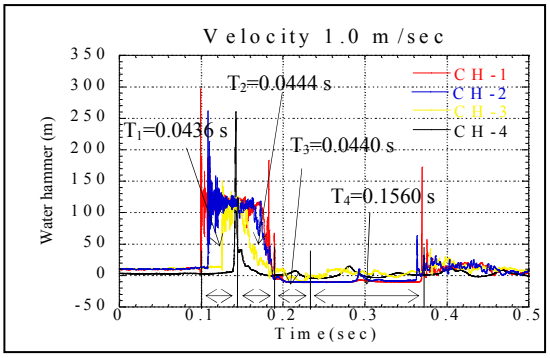

図-3　case 2 における時間の分け方

表-1、表-2 は伝播速度の算出結果である。

表-1 正圧部における理論値及び実験結果

	a_1	a_2	a_3
case 1	1320.5 m/s	1320.5 m/s	—
case 2	1332.6 m/s	1308.6 m/s	1320.5 m/s
Theoretical Result	1341.7 m/s		

表-2 負圧の伝播速度

	a_3	a_4
case 1	581.0 m/s	581.0 m/s
case 2	—	372.4 m/s

6. 理論値と実験値の比較

図-4 は伝播速度の理論値、実験値とボイド率の実験結果の関係を表わしたグラフである。

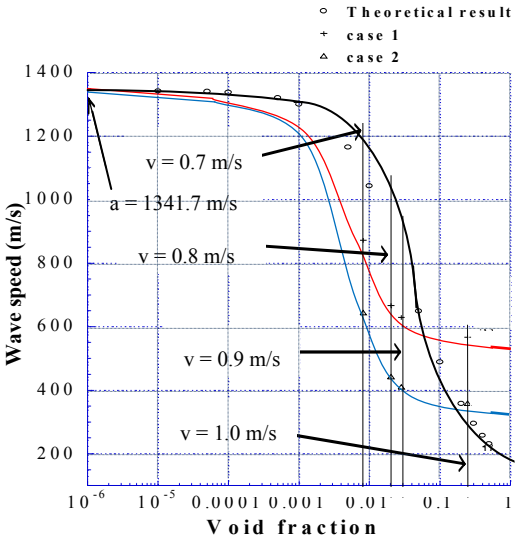

図-4　伝播速度の理論値および実験値とボイド率の実験値の関係

7. 結論

1. case 1 の伝播速度は a_1＝1320.5 m/s、a_2＝1320.5 m/s、a_3＝581.0 m/s、a_4＝581.0 m/s であった。

2. case 2 の伝播速度は a_1＝1332.6 m/s、a_2＝1308.6 m/s、a_3＝1320.5 m/s、a_4＝372.4 m/s であった。

3. 流速 1.0 m/s, ボイド率 0.311 の時の伝播速度は 373.7 m/s となることが分かった。

4. ボイド率 1.0 の時の伝播速度は理論値で 164.7 m/s、case 1 で 532.5 m/s、case 2 で 342.7 m/s となった。

参考文献

1)横山重吉：水撃入門，日新出版，p. 154. 1979.

2)下浅雄大，河野幸夫，芳賀昭，石川和己，加藤和夫：水撃負圧部の気泡発生と計測方法について，東北学院大学工学部研究報告　Vol.43 No.1-2, pp. 41 - 46. 2009.

3)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.