

粘弾性管路における水柱分離を伴う水撃現象

Water hammer with column separation in viscoelastic pipes

○堀 雄貴 (早大院) 笹田 裕貴 (早大院)
 亀山 将広 (元早大院) 正 山本 勝弘 (早大)

Yuki HORI, Hiroki SASADA, Masahiro KAMEYAMA and Katsuhiko YAMAMOTO

Dept. of Applied Mechanics and Aerospace Engineering, Waseda University, Ookubo3-4-1, Shinjuku-ku, Tokyo

The purpose of this paper is analyzing the effect of valve closure time on water hammer phenomenon with column separation in viscoelastic pipes by experiment and numerical solution based on the Discrete Free Gas Model. The results are following: (1) Duration of column separation, pressure spike, water hammer pressure and superposition pressure increase linearly with a decrease of valve closure time. (2) The velocity of the tip of the cavity at collapse is bigger than the one at occurrence. (3) There are little differences between the results of numerical solution with linear interpolation and with curved interpolation in characteristic method, if Courant number is near 0.7 and dividing number of pipe length is bigger than 100. And both agree with the experimental results except pressure spike.

Key Words : Water hammer, Column separation, Pressure spike, Discrete Free Gas Model, 3-element Voigt model

1. 緒言

水柱分離を伴う水撃現象において、水柱の再結合時にしばしば水撃圧よりも大きなスパイク状の圧力上昇が観測される。相変化を伴う水撃現象の解析モデルとして、特性曲線法を基にしたガス離散化モデル(Discrete Free Gas Model, 以下 DGM と略記)⁽¹⁾が知られているが、このようなスパイク圧の発生は説明できない⁽²⁾。特性曲線法による差分計算では、時間および空間刻みを一定とするため、関数値の内挿が必要になる。本研究では気液二相流の計算に有効な CIP 法を参考に、3 次曲線内挿を行い、通常の線形内挿の結果と比較する。さらに、本研究では室内規模の実験装置で過渡現象の測定精度を確保するため、高分子製の管路を用いて、圧力波の伝播速度を遅くしている。その効果を表す管路の変形特性として、通常の薄肉弾性管路の代わりに 3 要素フォークトモデルを採用した⁽³⁾。本研究では以上のように管路の粘弾性効果を考慮した DGM により、水柱分離再結合現象におよぼす弁閉鎖時間の影響を明らかにすると共に、実験によりスパイク圧の発生原因を考察する。

2. 実験

Fig.1 に実験装置の概略を示す。ニードル弁を弁内部が観察できるように加工し、弁下流にアクリル管、粘弾性管を接続した。弁閉鎖時間を $T_c=0.1\sim 1.6[s]$ の範囲で実験を行い、弁内、アクリル管内の気泡挙動を高速度ビデオカメラ (1000fps) で撮影した。Table.1 に実験装置の主要パラメータ

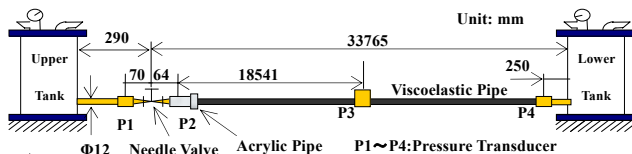


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

Table.1 Experimental condition

L mm	33765	τ s	0.164
D mm	12	P_u kPa	199.4
δ mm	2	P_d kPa	P_0
E_1 MPa	889	ρ kg/m ³	999.1
E_e MPa	613	a_e m/s	320

と実験条件を示す。表中の記号は以下のとおりである。

L : 管路長, D : 管内径, δ : 管の肉厚, E_1, E_2 : 3 要素モデルの弾性係数, η : 3 要素モデルの粘性係数, $\tau=\eta/E_2$, $E_e=(1/E_1+1/E_2)^{-1}$, P_u : 上流タンク圧, P_d : 下流タンク圧, P_0 : 大気圧, ρ : 水の密度, a_e : 圧力波伝播速度。

3 要素フォークトモデルのパラメータ E_1, E_e, τ は動的粘弾性測定装置を用いて、実験により求めた。また、作動液は脱気処理を施した水道水を使用した。

3. 解析

格子点間の流れに関して基本変数を $\mathbf{U}(x,t)=^t(u, P, \varepsilon_{\theta\theta})$ とおく。流体の運動方程式、連続の式、管壁の変形特性に Fig.2 に示す 3 要素フォークトモデルを適用すると次式が得られる⁽²⁾。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{B} \quad (1)$$

ただし、

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} u & 1/\rho & 0 \\ K_e & u & 0 \\ K_e/E_1 & 0 & u \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} -(f|u|/2D)u \\ 2(K_e/\tau)\{\varepsilon_{\theta\theta} - (P - P_0)/E_e\} \\ -(K_e/\tau K_w)\{\varepsilon_{\theta\theta} - (P - P_0)/E_e\} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 x : 管路に沿っての距離, t : 時間, u : 管内流速, P : 管内圧力, $\varepsilon_{\theta\theta}$: 管壁の円周方向歪み, $\sigma_{\theta\theta}$: 円周方向応力, $K_e=(1/K_w+2r_0/E_1\delta)^{-1}$, K_w : 水の体積弾性係数, r_0 : 管内

半径(初期定常状態), f : 管摩擦係数, $E_1' = E_1 \delta / r_0$, $E_e' = E_e \delta / r_0$, A : 管断面積である.

格子点上では連続の式, 等温変化より次式が成り立つ.

$$\frac{d\Delta V_g}{dt} = A(u_{out} - u_{in}) \quad (4)$$

$$(P - P_v)\Delta V_g = (P_0 - P_v)(\alpha_0 A \Delta x) \quad (5)$$

ここで, P_v : 水の飽和蒸気圧, ΔV_g : 気泡体積, $\alpha_0 = 1.0 \times 10^{-7}$: 初期ボイド率, Δx : メッシュサイズである.

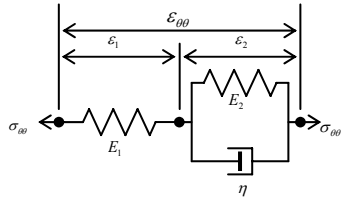


Fig.2 3-element Voigt model for viscoelastic pipe wall

4. 結果と考察

Fig.3 に水柱分離時のアクリル管内の写真を示す(0.02 秒毎). スラグ先端速度は発生時よりも消滅時の方が大きい.

Fig.4 に P2 と P3 における圧力波形の実験値と計算値の比較を示す. 空間分割数を 100 以上, クーラン数を $C_n = a_e \Delta t / \Delta x = 0.7$ とすれば直線内挿と 3 次曲線内挿の差はほとんどなく, スパイク圧を除いて, どちらも実験値とよく一致する. Fig.5 はスパイク圧の拡大図である. 本実験で観測されたスパイク圧波形はどれも類似の形をしている. しかし, スパイク圧は DGM では再現できない.

Fig.6 に弁閉鎖時間による各値の変化を示す(L_{cmax} : 最大スラグ長さ, P_j : 水撃圧, P_m : 反射波・管摩擦による圧力上昇, P_s : スパイク圧, T_{cs} : 水柱分離時間). $0 < a_e T_c / 2L < 6$ の範囲で水柱分離が発生し, スパイク圧が観測される. また, この範囲で T_{cs} , P_s , P_j , P_m は T_c の減少と共に単調に増加する. スパイク圧は $0 < a_e T_c / 2L < 1$ の範囲で特に大きくなる.

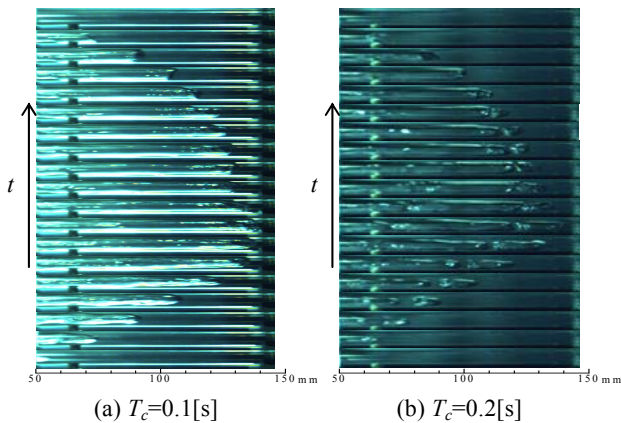


Fig.3 Photos of column separation after valve closing

5. 結 言

本研究で得られた結果は次のとおりである. (1) 水柱分離時間, 水撃圧, スパイク圧, 反射波・管摩擦による圧力上昇は弁閉鎖時間の減少と共に単調に増加する. (2) 水柱分離時のスラグ先端速度は発生時より消滅時の方が大きい. (3) 粘弾性を考慮した DGM は分割数 100 以上, クーラン数 0.7

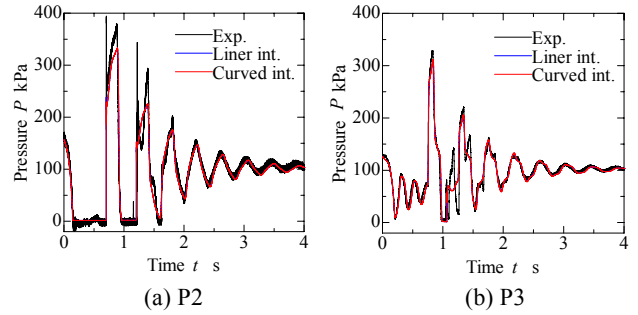


Fig.4 Pressure time history at some points in Fig.1($T_c=0.2$ [s])

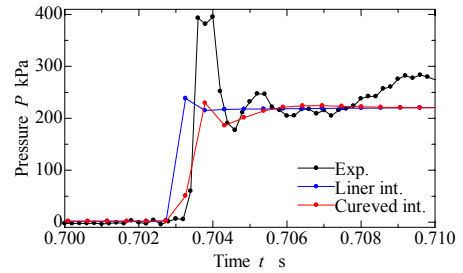


Fig.5 Detail of pressure spike ($T_c=0.2$ [s])

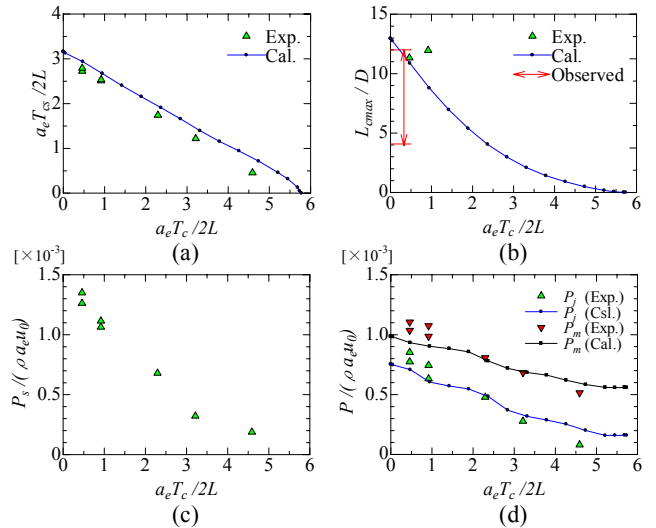


Fig.6 Effect of valve closure time on column separation

とすれば直線内挿と 3 次曲線内挿の差はほとんどなく, どちらもスパイク圧を除いて水柱分離現象をよく再現できる.

謝辞: 本研究の一部は JST, CREST (2010 年度) の援助及び早稲田大学特定課題研究重点助成(課題番号 2010A-606)を受けて実施した.

参 考 文 献

- (1) M.H.Chaudhry, "Applied Hydraulic Transients", Van Nostrand Reinhold Company, p.286 (1979)
- (2) H.Takakoshi, S.Fukumoto, R.Yamamoto, K. Yamamoto, "On Maximum Pressure of Water Hammer with Column Separation", The 5th JSME-KSME Engineering Conference, Nov. 12-21 (2002)
- (3) 中野和夫, 吉本正彦, "粘弾性管壁をもった油圧管路の動特性", 計測自動制御学会論文集, 6-3, 201/209 (1970)