

① 昨年度、貯水池・単管路システムの Valve Stroking による水撃制御の解析法を示した。^{*}境界条件を一般化した非粘性解より、管内流速を時間線型に変化させる制御が、最大水撃圧を最小化する意味である種の最適制御を与える事を示した。又、解析の妥当性が実験的にも検証された。^{**}本報告では、貯水池・複合管システムについて同様の解析法を示す。

問題

系の流量を Q_0 から Q_1 へ、Valve 操作時間 T_v と変更し、完全な定常状態を実現する。この時、Valve の操作と最大水撃圧を求めたい。なお、過渡現象は、貯水池入口流量が時間線型に変化するよう制御される。

解法

pipe 1 は、すでに得られた解で記述される。この解の Junction での表理を Pipe 2 の上流境界条件として、非粘性解および抵抗係数を含む微小パラメータによる摂動解を求める。

解の分岐

単管路システム

$(T_e - T_b) / (2L_1/a_1) \geq 2$ の 2つの TYPE

複合管路システム

図2に示すように 2つのパラメータ $(T_e - T_b) / (2L_1/a_1)$, $\beta = (a_2/a_1) / (L_2/L_1)$ により、12個の TYPE に分岐する。

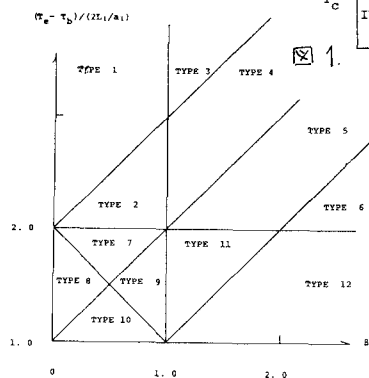
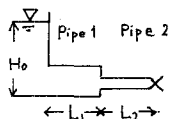


図2. SERIES PIPE SYSTEM FLOW PATTERN CLASSIFICATION



T: 時間

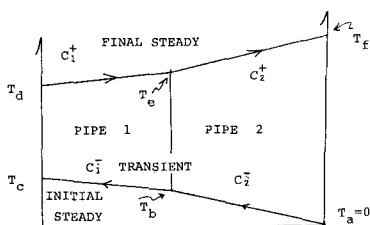


図3.

ただし、 a_1, a_2 は、Pipe 1, 2 の弾性波伝播速度である。

解析にあたっては、流れの TYPE を分類し、特性直線の影響領域を明らかにすることが重要である。例えば図3に、図2の TYPE 1 の流れの特性線図を示す。

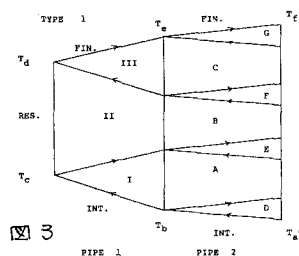


図3

PIPE 1	C ⁺	C ⁻
AREA I	INT.	RES.
II	RES.	RES.
III	RES.	FIN.
VI	INT.	FIN.

RES. RESERVOIR

INT. INITIAL CONDITION (PIPE 2)

FIN. FINAL CONDITION

I, II, III, VI JUNCTION CONDITION

図4.

PIPE 2	C ⁺	C ⁻
AREA 0	INT.	INT.
A	I	I
B	II	II
C	III	III
D	INT.	I
E	I	II
F	II	III
G	III	FIN.
H	I	III
I	INT.	II
J	II	FIN.
K	INT.	III
L	I	FIN.
M	I	VI
N	III	VI
O	VI	VI
P	INT.	VI
Q	VI	FIN.
R	INT.	FIN.
19	FIN.	FIN.

図4には、特性直線の影響領域により分類した、Pipe 1, 2 の流れの領域区分を示す。例えば、Pipe 2 の AREA F は、正の特性線 C^+ (Junction II の部分) と負の特性線 C^- (Junction III の部分) より、解が規定される。

2. 解析

基礎方程式 (pipe 2)

$$\nabla_T + g H_X + \frac{f_2}{2D_2} \nabla |V| = 0 \quad (1)$$

$$H_T + (a_2^2/g) \nabla_X = 0 \quad (2)$$

無次元化した特性形式 (3), (4).

$$C^+: dx/dt = 2, \quad C^-: dx/dt = -2.$$

$$C^+: dh + B_2 dv + 2 hf_2 v |v| dt = 0 \quad (3)$$

$$C^-: -dh + B_2 dv + 2 hf_2 v |v| dt = 0 \quad (4)$$

$$t = T / (2L_2/a_2), \quad x = X / L_2, \quad h = H / H_0, \quad v = V / V_0.$$

$B_2 = a_2 \nabla_0 / (g H_0)$, $hf_2 = f_2 \cdot \frac{V_0^2 L_2}{2g D_2 H_0}$. suffix 2 は、Pipe 2 の量を示す。記号は、文献^{*}を参照のこと。

$$v = \bar{v} + hf_2 \tilde{v} + o(hf_2^2) \quad (5)$$

$$h = \bar{h} + hf_2 \tilde{h} + o(hf_2^2) \quad (6)$$

$\bar{v}$, $\bar{h}$ は、非粘性解, $\tilde{v}$, $\tilde{h}$ は、 h_{f2} に関する擾動解である。

① 非粘性解

初期条件: $\bar{v} = 1$ $\bar{h} = 1$ ($x = -2t$ 上)

最終条件: $\bar{v} = v_{c2}$ $\bar{h} = 1$ ($x = 2(t - t_{c2})$ 上)

境界条件: pipe 1 の非粘性解を用いる. ($x = -1$)

② 擾動解

初期条件: $\tilde{v} = 0$, $\tilde{h} = -h_{f1} - h_{f2} (1+x)$

最終条件: $\tilde{v} = 0$,

$$\tilde{h} = -h_{f1} v_{c1}^2 - h_{f2} v_{c2}^2 (1+x)$$

境界条件: pipe 1 の擾動解を用いる。

以上の条件より 解が得られる。次に、図 2 の TYPE 1, 2, 3, 4 の最大水撃圧を示しておく。 t_M は、その発生時刻、 h_M は最大水撃圧である。

TYPE 2, 4

$$t_M = a + 1, \quad \alpha = 1/\beta, \quad t_c = (T_e - T_b)/(2L_1/a_1)$$

$$h_M = 1 + \frac{B_1 + B_2}{4} (1 - v_{c1}) + 2B_2 R (1 - \frac{1}{\alpha})$$

$$+ (1 - \frac{B_2}{B_1}) \left[\frac{(1+m/\alpha)^3}{3m} - \frac{(1+v_{c1})}{2} + \frac{m}{2} \right] \frac{2+\beta-t_c}{2} (h_{f1}/2)$$

$$- (1 - \frac{B_2}{B_1}) \left[\frac{2+\beta-t_c}{2} v_{c1}^2 + \frac{v_{c1}^3}{3m} \right] (h_{f1}/2)$$

$$+ \left[\frac{B_2}{B_1} \left(\frac{m}{2} + \frac{m^2}{4} \right) - \left(\frac{m^2}{3} + m + 1 \right) \right] (h_{f1}/2) + \frac{B_2}{3mB_1} \left(\frac{1+v_{c1}^2}{2} \right) h_{f1}$$

$$- \left[\frac{1}{m} (v_{BP} (P5)^3 - v_{BP} (\alpha + \frac{1}{2})^3 + v_{FM} (P6)^3 - v_{FM} (\alpha + 1)^3) \right]$$

$$+ \left(\frac{v_{FP} (\alpha + 1)^3 - v_{FP} (P5)^3}{4R} + \frac{v_{CM} (\alpha + \frac{3}{2})^3 - v_{CM} (P6)^3}{4S} \right) \frac{\alpha}{3} h_{f2}$$

$$P5 = \frac{1}{2} (\alpha t_c + 1), \quad P6 = \frac{1}{2} (\alpha t_c + 2), \quad R = \frac{m}{8} (1 - \frac{B_1}{B_2}), \quad S = \frac{m}{8} (1 + \frac{B_1}{B_2})$$

$$v_{BP} () = \frac{m}{\alpha} () + 1 - \frac{m}{2} (1 + \beta), \quad v_{FP} () = \frac{4R}{\alpha} () + 1 + \frac{B_1}{4B_2} \frac{(v_{c1} - 1)}{2} - 2R (1 + \beta)$$

$$v_{CM} () = \frac{4S}{\alpha} () + \frac{1+v_{c1}}{2} - 4S (1 + \beta) + 2R\beta$$

$$v_{FM} () = \frac{m}{\alpha} () + 1 + \frac{B_1}{4B_2} (v_{c1} - 1) - 2 (1 + \beta) (R + 2S)$$

TYPE 1, 3

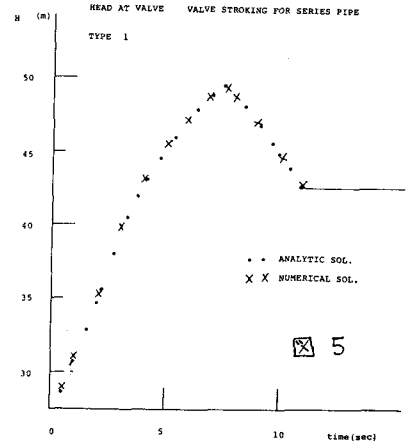
$$t_M = \alpha (t_c - 1)$$

$$h_M = 1 - \frac{m}{2} B_2 \left(\frac{B_1}{B_2} + \frac{1}{\alpha} \right) - \left(\frac{m^2}{4\alpha} \frac{B_2}{B_1} - \frac{m}{\alpha} \frac{v_{c1}}{2} + \frac{m^2}{2\alpha^2} \right) \cdot h_{f1}$$

$$- \left(3(v_{c1} - \frac{m}{2}) - \frac{3m}{\alpha} (v_{c1} - \frac{m}{2}) + \frac{m^2}{\alpha^2} \right) h_{f2}/3$$

③ 解析結果の検証

解析結果がすべての TYPE の複合管に対して、数値解析によって検証された。最大水撃圧比較の例を図 5 に示す。



$$L_1 = 1219m \quad a_1 = 1280m/s \quad D_1 = 0.0241m \quad f_1 = 0.035$$

$$L_2 = 914m \quad a_2 = 1219m/s \quad D_2 = 0.0254m \quad f_2 = 0.032$$

$$t_c = 5.0 \quad v_{c1} = 0.091 \quad v_{c2} = 0.325m/s \quad H_0 = 42.7m$$

実験値との比較が図 6 に示される。

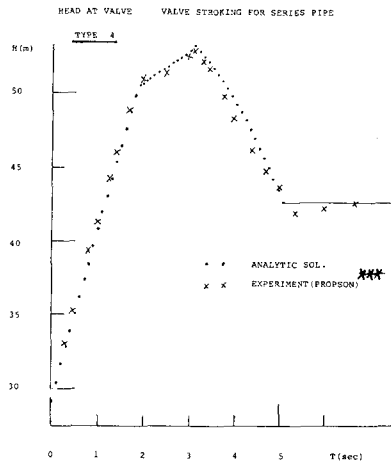


図 6

* Valve Stoking の近似解析法とその評価
(1981年土木雑誌)

** 単管路システムの Valve Stoking (1982. 農工土木)

*** Valve Stoking to Control transient flows in Liquid piping systems
(1990. Ph.D. Civil. Eng. Univ. of Michigan, Ann Arbor)