

# 水撃圧の現地実験と理論解析

東北学院大学工学部 正員 河野 幸夫

学員 ○四家 真喜男

学員 柿崎 一志

## I. まえがき

近年、水道管が水撃圧発生による破損で漏水現象が起った。本研究は 現在使用中の S 市配管システムを使い水撃の発生状況を調べ水撃実験を行い、又、水撃圧の抑制等について研究を行った。

## II. 配管システムの現地状況

U 浄水場 ( $H=99.71\text{m}$ ,  $V=10,000\text{m}^3$ ,  $\text{HWL}=99.71\text{m}$ ,  $\text{LWL}=95.52\text{m}$ ) から  $\phi 600\text{mm}$  タクタイル鍍銀管で  $1320\text{m}$  降下し  $H=10\text{m}$  から  $\phi 300\text{mm}$ ,  $e=114\text{mm}$  管で  $1920\text{m}$  上昇し G 高区配水池へと送水される。G 高区配水池 ( $H=57.2\text{m}$ ,  $V=3,000\text{m}^3$ ,  $\text{HWL}=57.2\text{m}$ ,  $\text{LWL}=52.5\text{m}$ ) から S 市の 3425 戸へ月平均  $161.025\text{m}^3$  配水されている。そこから  $\phi 250\text{mm}$ ,  $e=108\text{mm}$  管で  $2310\text{m}$  降下し  $H=5\text{m}$  の地床まで行く。又、この地床は漏水ヶ所の集中しており測点として計器類をセットした。そこから  $\phi 250\text{mm}$ ,  $e=108\text{mm}$  管で  $1000\text{m}$  上昇して、A 配水池 ( $H=38.1\text{m}$ ,  $V=2,000\text{m}^3$ ,  $\text{HWL}=38.1\text{m}$ ,  $\text{LWL}=33.6\text{m}$ ) から給水戸数 748 戸配水量  $76,260\text{m}^3$  で配水されている。

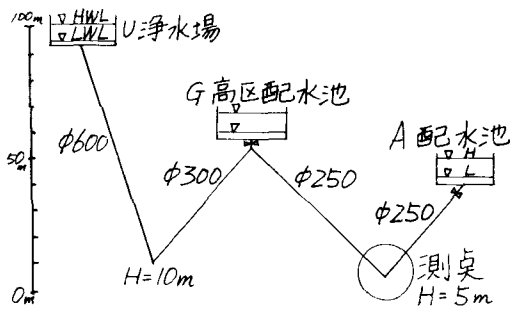


図-1 配管システム

## III. 実験方法

S 市配管システムを使用し、G 高区配水池バルブを開にして A 配水池のバルブを開から閉める。その時のニードル角度を 20, 15, 10, 5, 3 と変えて測点での管に生じる水撃圧を圧力変換器より動歪計を通り、デジタルメモリーにて波形を記憶させ、シンクロスコープで波形をチェックした後 パンレコーダーで書き出した。

## IV. 水撃圧の理論とコンピューター解析

### 1. WAVE SPEED ( $\alpha$ ) の理論と理論値

瞬間的に弁が閉塞された後、 $\Delta t$  秒間に管のある区間内 ( $\Delta S$ ) に流入した質量  $V_0$  ( $\Delta M$ ) は  $\Delta M = \Delta(\rho AL) = \rho LA\Delta S + \rho LA\Delta P = \rho LA\Delta V_0$  と表わされ、この式に  $\Delta V = \Delta S/\alpha - V_0$  と  $\Delta H = \pm \frac{\rho}{\Delta \rho} \Delta V$  を代入し、まとめると  $\alpha^2 = \frac{g \Delta H}{\Delta A + \frac{\rho}{\Delta \rho} \Delta V}$  となる。次に、水の体積弾性係数  $k = \frac{\Delta P}{\Delta \rho}$  及び  $g \Delta H = \frac{\Delta P}{\Delta \rho}$  を代入すると  $\alpha^2 = \frac{k/\rho}{1 + k(\Delta A/\Delta \rho)}$  となる。現地の状態より、管は軸方向に対して伸びないように固定されているとすると  $\Delta A = \mu \Delta \rho$  となり、 $(\frac{\Delta A}{\Delta \rho}) = \frac{2}{\Delta \rho} (\Delta \epsilon_2 - \mu \Delta \epsilon_1) = \frac{2}{\Delta \rho E} (\Delta \sigma_2 - \mu \sigma_1) = \frac{2}{\Delta \rho E} \Delta \sigma_2 (1 - \mu) = \frac{1}{\Delta \rho} \frac{D}{E} (1 - \mu^2)$  となる。なお  $\Delta \sigma_2 = \frac{\Delta P}{E}$  である。故に WAVE SPEED は  $\alpha = \sqrt{\frac{k/\rho}{1 + (\frac{k}{E} \times \frac{D}{\Delta \rho}) (1 - \mu^2)}}$  で表わされる。

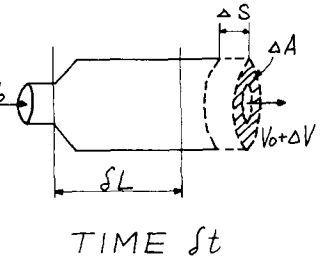


図-2 Control Volume

この配水池内で使用されているダクタイル鍍銀管 ( $D=250\text{mm}$ ,  $e=75\text{mm}$ ) が使用されている。- $\mu=0.28$ , 弾性係数  $E=16 \times 10^{10} \text{kg/m}^2$  水の体積弾性係数  $k=21 \times 10^8 \text{kg/m}^2$  水の密度  $\rho=10197 \text{kg/m}^3$  を代入すると  $\alpha=1214.2 \text{m/sec}$  となる。

### 2. 水撃圧の理論と解析

#### (1) 水撃理論

管内における水撃理論は一般に一次元非定常流として取り扱う、オイラーの運動方程式は  $\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{ds} + g \frac{dz}{ds} + \frac{f}{2D} |V| = 0$  となる。その時 条件として管の傾斜  $\alpha = 0 (= \frac{dz}{ds})$ ,  $\frac{dP}{dt} = \frac{dP}{ds} \frac{ds}{dt}$ ,  $\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{ds} \frac{ds}{dt}$  とおく。又、連続方程式より  $\alpha \frac{dV}{ds} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{ds} = 0$  が与えられる。これらの方程式を特性曲線法で解くには 2 式の linear combination  $\lambda (\frac{dV}{ds} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{ds} + \frac{f}{2D} |V|) + (\alpha \frac{dV}{ds} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{ds}) = 0$  より  $\lambda = \pm \alpha (\frac{dP}{ds})$  の条件における、 $\frac{dV}{dt} + \frac{g}{\alpha} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2D} |V| = 0$  の式となる。プログラムするため、図-3 のようにおくと  $\Delta t = \Delta S/\alpha$  ①  $V_p = \frac{1}{2} [(V_{le} + V_{ri}) + \frac{g}{\alpha} (H_{le} - H_{ri}) - \frac{f \Delta S}{2D} (|V_{le}| + |V_{ri}|)]$  ②

$$H_p = \frac{1}{2} \left[ \frac{Q}{A} (V_{le} - V_{ri}) + (H_{le} + H_{ri}) - \frac{Q}{A} \frac{\Delta t}{2D} (V_{le} |V_{le}| - V_{ri} |V_{ri}|) \right] \quad (3)$$

の式となる。S市における送水システムと水位調整弁を考えると、

Upstream Boundary Condition は水槽なので、 $H_{pi} = H_s$  (静水圧) となり、 $C^-$

より  $V_{pi} = V_2 + \frac{Q}{A} (H_{pi} - H_2) - \frac{\Delta t}{2D} V_2 |V_2|$  となる。又、Downstream Boundary

Condition において実際に水位調整弁は独特の流量特性をもっているの

はあるが、ここでは瞬間的に、いわゆる急閉塞をしているので、弁は直線的に

閉塞するものと仮定すると、 $0 \leq t \leq T_c$  ( $T_c$  は閉塞するまでの時間) において

$V_{pi+1} = V_0 (1 - \frac{t}{T_c})$ 、又、 $t > T_c$  においては  $V_{pi+1} = 0$  となり、 $C^+$  より  $H_{pi+1} =$

$H_N - \frac{Q}{A} (V_{pi+1} - V_N) - \frac{Q}{A} \frac{\Delta t}{2D} V_N |V_N|$  となる。以上の式をもってプログラムを

作成する。

## (2) MODEL 作成

MODEL 1 N-PARTS = 6,  $A = 1214.2 \frac{m^2}{sec}$ ,  $e = 75mm$ ,  $D = 250mm$ ,  $V_0 = 1126 \frac{m}{sec}$ ,  $ELEV-UP = 5m$ ,  $ELEV-DN = 5m$

MODEL 2 N-PARTS = 6,  $A = 1214.2 \frac{m^2}{sec}$ ,  $e = 75mm$ ,  $D = 250mm$ ,  $V_0 = 1126 \frac{m}{sec}$ ,  $ELEV-UP = 95.52m$ ,  $ELEV-DN = 5m$

MODEL 3 N-PARTS = 6,  $A = 1214.2 \frac{m^2}{sec}$ ,  $e = 75mm$ ,  $D = 250mm$ ,  $V_0 = 1126 \frac{m}{sec}$ ,  $ELEV-UP = 0m$ ,  $ELEV-DN = 0m$

MODEL 4, 5, 6 は 1, 2, 3 の MODEL で、データから計算した時間を使用しているのは 1, 2, 3 で、現地設計した時間を使用したのは 4, 5, 6 の MODEL である。なお、グラフ 1 ~ 5 の MODEL 3, 6 は、見やすくする為、省略した。

## V. 結果

1. ニードル開度を 5 にすることによってこの実験の場合水撃を抑制できた。

2 理論の MODEL 1 が実験値と最も一致しているのかわかる。

3. 最大水撃圧と弁の閉塞時間

needle 開度 20 のとき弁の閉塞

時間から 16 sec で最大水撃圧は

$1483 \frac{kg}{cm^2}$ , needle 15 のとき時間

22 sec, 最大水撃圧  $1375 \frac{kg}{cm^2}$ ,

needle 開度 10 のとき時間 56 sec

最大水撃圧  $1227 \frac{kg}{cm^2}$ , needle

開度 5 のとき閉塞時間 134 sec, 最大水撃圧  $1092 \frac{kg}{cm^2}$ , needle 開度 3 のとき

は、デジタルメモリーの機能範囲外で測定できなかった。

## 考察

差圧式の弁の開閉では水圧差によって弁の開閉スピードが変化するのでニードルの最適化のみでは結論づける事はできない。

この論文をよとめるにあたり S 市水道部職員の援助を心から感謝致します。

## VI. 参考文献

1. Watters, G.Z. 1979. Modern Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines. Ann Arbor S.

2 河野幸夫; 水撃圧の現地調査とコンピュータ解析. 55年度 技術研究発表会講演概要

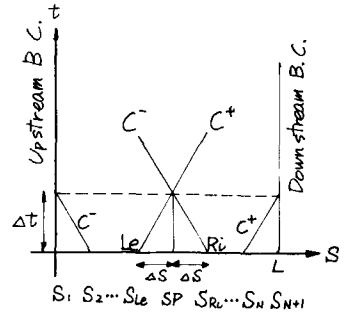


図-3 特性曲線

