

圧力波の伝パ速度を減少させることによる Waterhammerのコントロールについて

西山 壮一

I ま え が き

Waterhammerの研究は19世紀の終りから20世紀の始めにかけてJoukowskyやAllieviの先駆的研究の後次々と多くの研究がなされ、1933, 1937年にはWaterhammerに関する国際シンポジウムが開かれている。この頃すでにWaterhammerのコントロールの研究もなされた。R. W. Angus⁽¹⁾は空気室, F. Knapp⁽²⁾はバルブのついたバイパスを導入している。その後多くの研究がなされた。近年ではKarel Haindl⁽³⁾はかんがい用パイプの低圧の場合のコントロールの方法をのべている。定常状態においては管の許容応力内でできるだけ利用し、Waterhammerに対してはコントロールの方法を考える方がより経済的な場合が多い。

Waterhammerの研究の多くはこの目的によりなされてきた。Waterhammerのコントロールの方法を原理的に大別すると次の二つに分類できる。

(1) 圧力波の伝パ速度を減少させる方法

(2) 圧力波のある値以上にならないように装置をつける方法

空気を送って水撃圧を減少させる方法は(1)に属し、サージタンク、空気タンク、リリーフバルブ等は(2)に属する。圧力波の伝パ速度は主として管の弾性と幾何学性及び気体の含有量に関係する。

この論文では圧力波の伝パ速度を減少させる方法として、フレキシブルパイプや空気の影響について述べた。フレキシブルパイプによるコントロールについては硬質パイプラインの一部にフレキシブルパイプを使い、圧力波の伝パ速度を減少させ、Waterhammerのコントロールの実験を行ない、また平均的な圧力波の伝パ速度を使って、コントロールされた水撃圧の推定を行なった。

II 記号の説明

- H : 水頭
- V : 管内平均流速
- g : 重力の加速度
- a : 圧力波の伝パ速度
- x : 距離
- t : 時間
- θ : 管が水平となす角度
- f : Daray-Weisbach式中のまざつ係数
- D : 管径
- L : 管の長さ
- K : 流体の弾性係数
- ρ : 流体の密度

III フレキシブルパイプを用いることによるコントロールについて

フレキシブルパイプの畑地かんがいへの導入はずいぶん前になされ、いろいろの試験も行なわれている⁽⁴⁾。弾性係数が普通に使われている塩ビ管と比べ小さく、管が変形しやすい特徴を生かし、他の分野でも多く使われている。硬質塩ビ管の一部にフレキシブルパイプを接続してWaterhammerのコントロールを行なった。

1. 実験装置と実験方法

実験装置の概要を Fig.1 に示す。

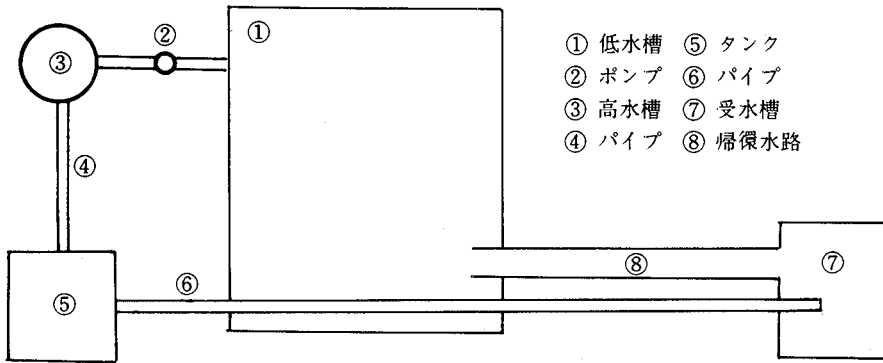


Fig.1. 実験装置の概要

水は①の低水槽より②のポンプで揚水され③の高水槽に達し、④のパイプを通して⑤のタンクに流入する。⑥の実験管(管径0.05m)を通して⑦の受水槽に達し⑧の帰還水路を通して低水槽に戻る。

(1) 圧力波の伝バ速度の測定と急閉鎖の場合の水撃圧について

フレキシブルパイプはFig.2に示すように表面が波状であるため計算より圧力波の伝バ速度を求めることは困難である。

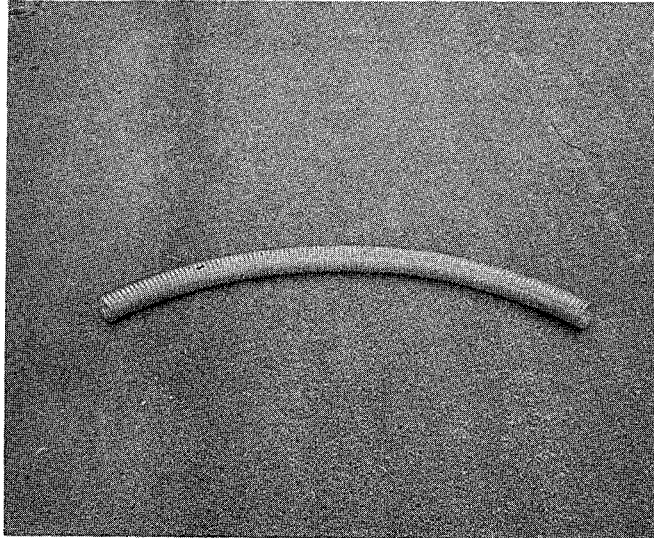


Fig.2. 実験に使用したフレキシブルパイプ

Fig.3のようにまず硬質塩ビ管 (Fig.4 に示す) について圧力波の伝バ速度を測定した結果 360m/sec であった。次に硬質塩ビ管の一部を Fig.5 に示すようにフレキシブルパイプでおきかえ (硬質塩ビ管27m, フレキシブルパイプ3m, 内径はいずれも0.05m), 圧力波の伝バ速度を測定した結果約 200m/sec であった。

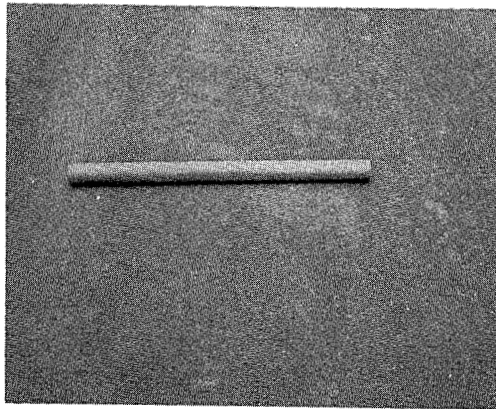
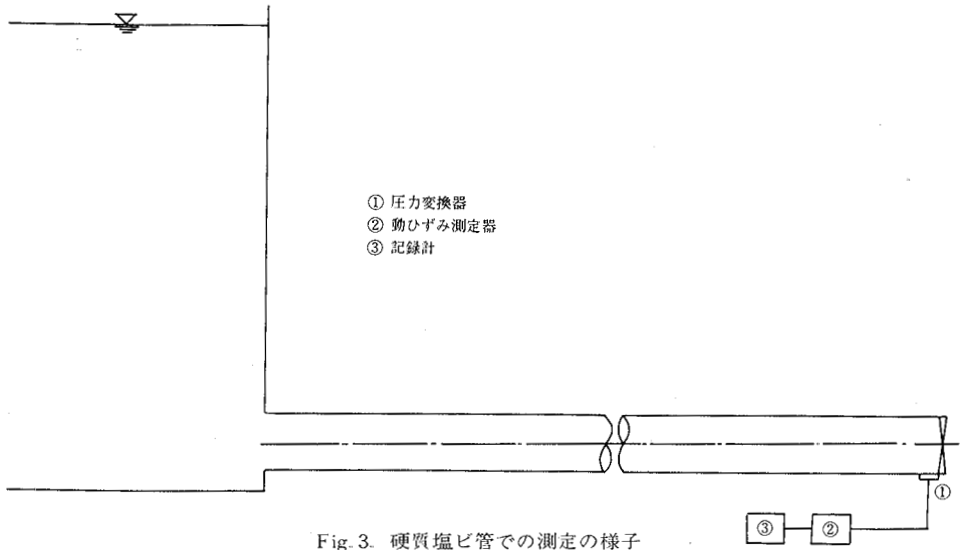
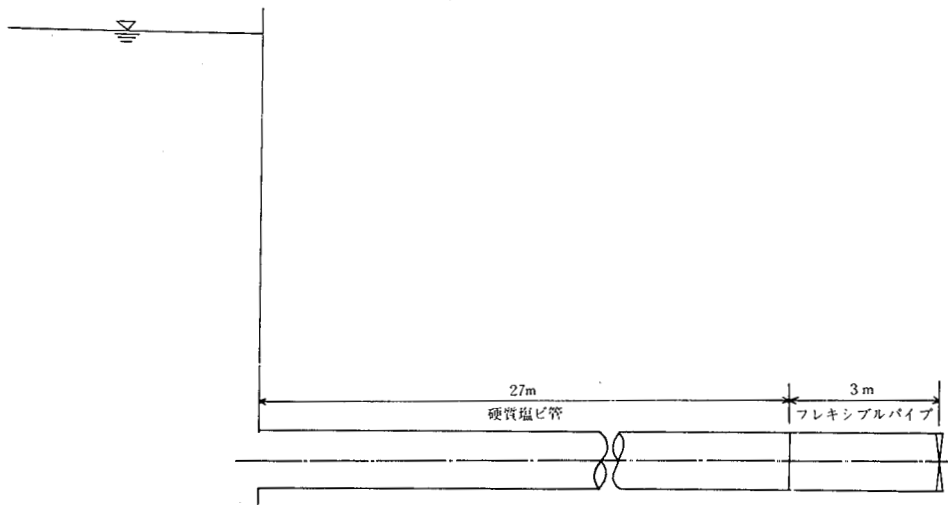


Fig. 4. 硬質塩ビ管



本実験ではフレキシブルパイプをパイプライン全長の10%だけ使ったが圧力波の伝バ速度は約60%に減少している。従ってフレキシブルパイプのまさつ係数も同一とすると急閉鎖の場合はジョコフスキーの式より水撃圧は約60%に減少する。

(2) 緩閉鎖の場合のコントロールされた水撃圧について

Fig 5のようにフレキシブルパイプをパイプラインの一部に使って、下流端のバルブを閉鎖することにより水撃圧をおこし、圧力変換器、動ひずみ測定器、記録計を接続して行なった。バルブはスルースバルブで開度と損失係数の関係をFig 6に示す。

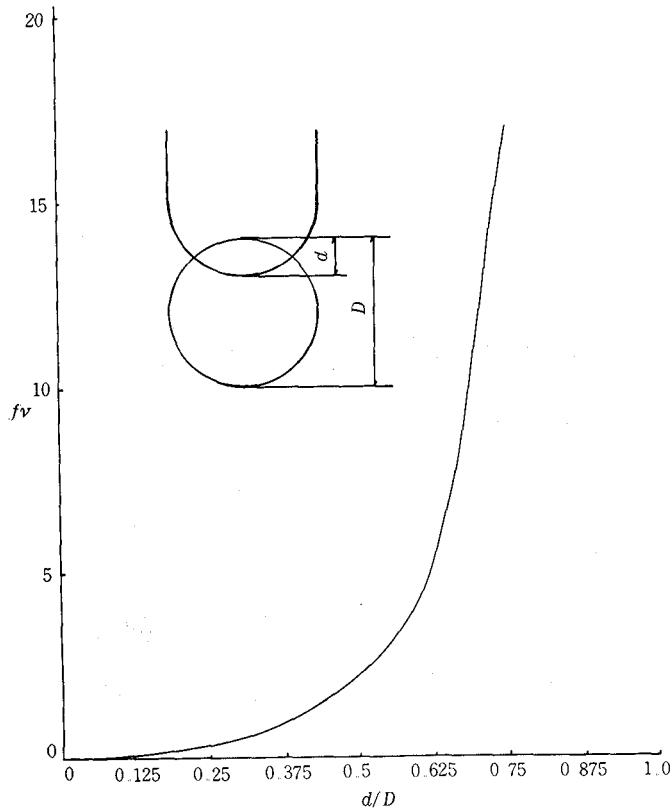


Fig. 6. スルースバルブの開度と損失係数の関係

閉鎖にあたってはバルブにハンドルをつけ回転数と時間の関係をチェックし、等速に動かした。

2. 理論的解析

フレキシブルパイプを使って緩閉鎖の場合のコントロールされた水撃圧を平均的な圧力波の伝バ速度を使って推定する。管路の非定常流を支配する基礎方程式は次の運動方程式と連続の方程式で与えられる。

a 運動方程式

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + v \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

b 連続の方程式

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2 \partial V}{g \partial x} + V \sin \theta = 0 \dots\dots\dots (2)$$

以上の式から対流項を無視して解く。対流項の大きさについては多くのべられている^(5,6)

3. 結果および考察

Fig. 7, Fig. 8 に実験値と平均的な圧力波の伝ば速度を使って, 基礎方程式(1), (2)を解いた理論値の比較を示す。

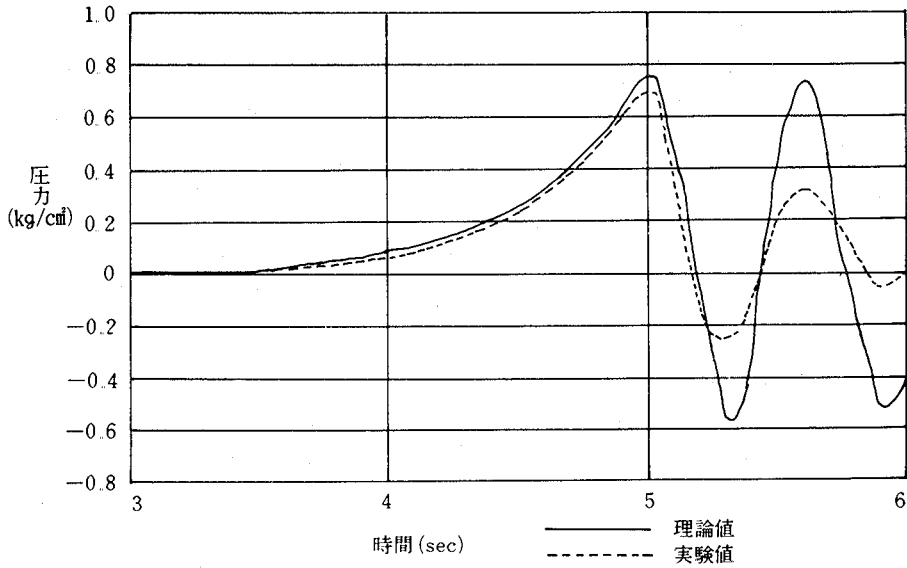


Fig. 7. 理論値と実験値の比較
(バルブ閉鎖時間5秒)

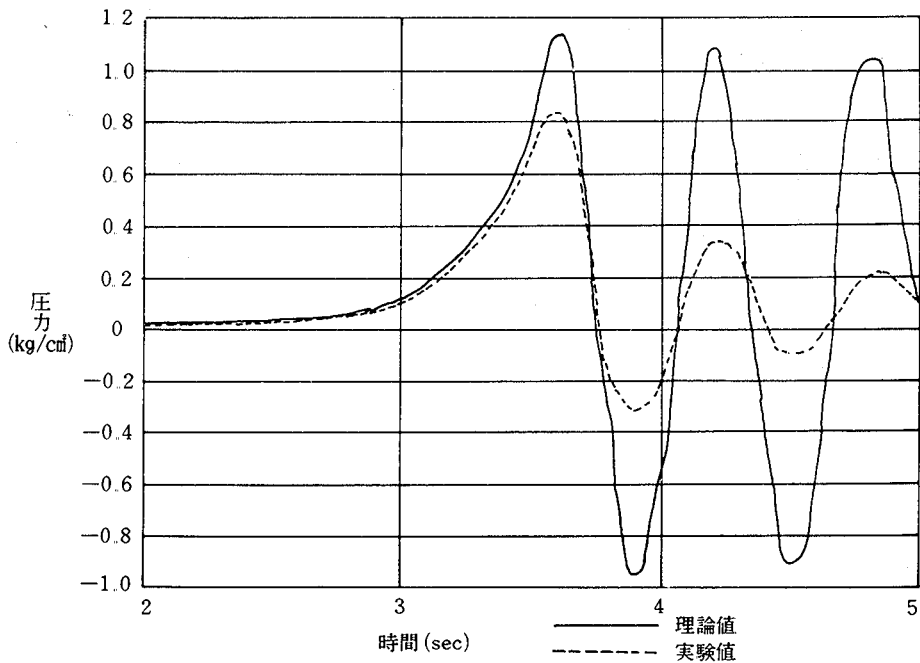


Fig. 8. 理論値と実験値の比較
(バルブ閉鎖時間3.6秒)

フレキシブルパイプの弾性と水の弾性の問題もあるが平均的な圧力波の伝バ速度で最大水撃圧は推定できる。Fig 9 に硬質塩ビ管だけ使ったと仮定して、バルブ閉鎖時間5秒の場合の水撃圧を示す。

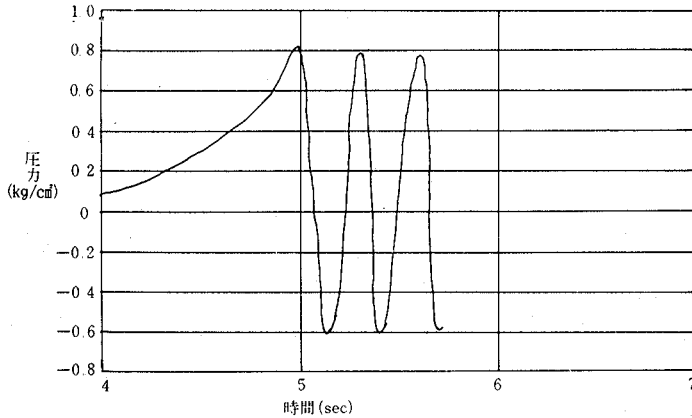


Fig. 9. 硬質塩ビ管だけ使った場合のバルブ地点における圧力の変動 (バルブ閉鎖時間5秒)

Fig 7, Fig 9 と比較すると余り最大水撃圧は減少していない。これはバルブの閉鎖時間が圧力波の往復時間に比べ大きすぎたためである。しかしバルブの閉鎖時間が速い場合は、大きく減少することは明らかである。

IV 空気の影響について

一般に液体中を進行する波の速さは次式で与えられる。

$$c = \sqrt{K/\rho} \dots\dots\dots (3)$$

管水路内の水が空気を非溶性として含むとき管の弾性の影響が無視される場合の圧力波の伝バ速度は(3)式より計算できる。その場合の弾性係数及び密度は、水と空気の混合流体の値である。このように理論的に計算された空気の含有量と圧力波の伝バ速度の関係を Fig.10 に示す。

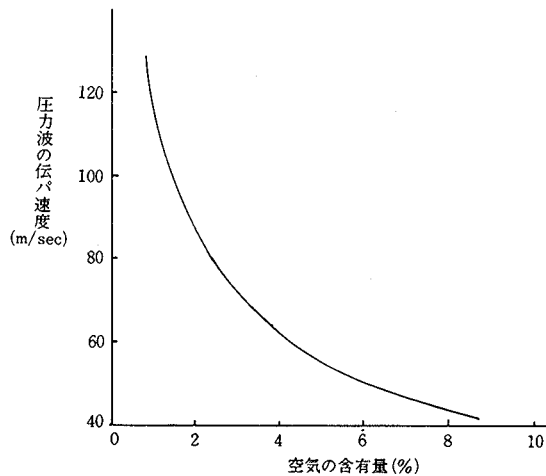


Fig. 10. 空気の含有量と圧力波の伝バ速度の関係 (大気圧)

圧力は大気圧として計算した。空気が含まれると圧力波の伝バ速度は急激に減少し、水撃圧は減少することがわかる。

V ま と め

Waterhammerのコントロールについて、特にフレキシブルパイプを使う方法について述べ、またコントロールされた最大水撃圧が平均的な圧力波の伝バ速度を使って、基礎方程式を解き推定できることを示した。本研究に対して御指導を賜わった九大田辺教授に謝意を表する。計算は香川大学計算センターで行なった。職員の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) ANGUS, R. W.: Air chambers and valves in relation to waterhammer, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, HYD-59-8, 661-668 (1937).
- (2) KNAPP, F.: Operation of emergency shut off valves in pipe lines, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, HYD-59-10, 679-682 (1937).
- (3) KAREL Haidl: The protection of low head irrigation pipe-networks against waterhammer effects, *L'Energia Elettrica*-n6, 410-415 (1969).
- (4) 杉二郎ほか: 畑地かんがい用フレキシブルパイプの試作および水理試験, 中群馬畑地かんがい中間報告第6報(1958).
- (5) GIUSEPPE Evangelisti: Water hammer analysis by the method of characteristics (I), *L'Energia Elettrica*-n10 673-692 (1969).
- (6) 浦田暎三: 長い円管内の非定常粘性流れ, 日本機械学会論文集, 36(286), 957-965 (1970).

STUDIES ON THE CONTROLLING THE WATERHAMMER BY REDUCING THE SPEED OF PRESSURE WAVE

Souichi NISHIYAMA

Summary

It is more advantageous that permitted stress in pipe was fully used during operation and I controll the waterhammer pressure in unsteady flow.

On the standpoint of principle, the method of controlling the waterhammer was as follows.

- 1) Reducing the speed of pressure wave.
- 2) Pressure restriction device.

In this paper, I used the flexible pipe and controlled the waterhammer. In case of this experiment, the speed of pressure wave decreased by approximately 40%. Accordingly if the closure of valve is instantaneous, the waterhammer pressure was decreased by approximately 40%.

And I used the mean speed of pressure wave, solved the basic equation of unsteady flow, and compared with the experimental and theoretical result.

Concerning the ultimate waterhammer pressure, the experimental values agreed well with theretical results.

(1974年5月31日受理)