

## 幹線水路における水撃作用の解析

西山 壮一, 弥永 孝一

## AN ANALYSIS OF WATER HAMMER IN THE MAIN PIPELINE OF IRRIGATION PROJECT

Souichi NISHIYAMA and Koichi IYANAGA

Recently agricultural pipelines have been used in irrigation systems. As a result, it is important to analyze water hammer for the safety of the pipeline and for the control of water flow.

In this paper, water hammer which occurred in the main pipeline was analyzed.

Especially, in the case of multi-level valve operation, the variation of velocity and pressure was discussed.

We clarified that under the multi-level valve operation, water hammer pressure is not always decreased. Fig. 10 is a chart analyzing water hammer at the beginning of the flow.

And a computer program is shown which is able to deal with any valve operation.

近年、農業水利の分野においては、管水路方式が多く使用されている。水圧に対する安全性の確保と流れの管理上、水撃解析は重要なものとなっている。本論文においては、幹線水路におこる水撃の解析を行った。特にバルブを階段状に操作した場合の圧力変動と管内の流速変化が論述された。バルブを階段状に閉鎖した場合は、必ずしも連続的に閉鎖した場合の水撃圧より小さくなるとは限らないことを明らかにしている。また、送水開始時の流れを解析する簡易図表と任意のバルブ操作が考慮できる計算機のプログラムが示されている。

## 1. ま え が き

水撃作用の研究は、比較的新しく、その研究が初めて行われたのは、19世紀の終りである。ロシアの物理学者、ジュコフスキーやイタリアの技師、アリエビによって、先駆的な研究がなされた。これらの研究の結果、水撃作用は波動現象であることが明らかにされた。したがって、水撃作用の問題は波動方程式を解くことに帰着する。ところが、波動方程式は、18世紀にすでに、D' Alembert らによって解かれている。それゆえ、水撃作用の解析における数学的な功績は、D' Almbert らによるものと考えられる。

ジュコフスキーや、アリエビの先駆的な研究の後、次々と多くの研究がなされ、1933年、1937年には、水撃作用に関する国際シンポジウムが開かれ、水撃解析の重要性が世界的に認識され始めた。なお、我が国における水撃作用の研究は、この頃(1937年)、鈴木<sup>(1)</sup>によって始められた。当時は、図式解法、代数的に解く方法が発表され、図式的に解く方法が多く使用されたようである。

今世紀の中頃、V. L. Streeter<sup>(2)</sup> は、従来の古典的解析方法から脱却し、非線型の摩擦の項を含む基礎方程式を電子計算機を使用して直接解き、さらに実験値との一致を示し、解析の正確さと迅速さの点において、画期的な発展を遂げた。

なお、水撃作用の解析方法を分類すると次のごとくである。

- (1) 代数的に解く方法
- (2) 図式的に解く方法
- (3) 基礎方程式を直接解く方法
- (4) その他の方法

(1)、(2)に属する方法が、いわゆる古典的方法である。(3)の方法は、電子計算機を使用することが前提となる。(4)のその他の方法の一つとして、アナログコンピューターによる方法がある。

農業水利の分野において、水撃作用の解析が今日のように重要となったのは、管路方式がとられ、且つそれが大型化、長距離化しつつあり、パイプラインの安全性の確保が緊要なためである。

このような状況であり、水撃作用のより厳密な解析が必要とされている。しかしながら、依然として、図式解法や代数的に解析する方法など古典的方法が使用されている。たとえば、バルブの閉鎖時間を例にあげると、従来の方法には、バルブの直線閉鎖などの仮定が必要であった。したがって、従来の古典的方法を使用して本論文において論ずるバルブの段階的な操作にとまなう水撃作用の解析は不可能である。もちろん、場合によっては、従来の方法を使用して、設計上の精度が得られることもある。したがって、各々解析方法の特徴を十分検討し、それに適した解析法を選ぶべきであり、必ずしも、基礎方程式を解く方法を使用して解析する必要はない。

かんがい用管路は、他の目的の管路と比べ、配管状況等が異っている。したがって、それに付随して起ってくるこの種の管路に特徴的な水撃についても、近年研究がなされている。たとえば、かんがい用管路に特徴的な複合管路の水圧振動<sup>(3,4)</sup>、塩ビ管を埋設した場合と埋設しない場合におけるそれぞれの圧力波の伝播速度の違いなどの研究<sup>(5)</sup>がある。さらに、かんがい用管路においては、かんがい期と非かんがい期があるため、管内に空気が混入しやすい条件下にある。この混入空気によって、水撃作用において、空気が含まれない場合とは大変違った現象がみられる。

すなわち、管内に空気を含まない場合の水撃圧は、空気を含まない場合のそれに比べ、著しく大きくなることもあり、また、一方では空気は水撃圧を減少させるために使用されている。いかなる場合に混入空気によって、水撃圧の上昇が助長されるか、また、そのメカニズム等の解明が重要な課題となっていた。

この点に関する研究もなされている<sup>(6,7)</sup>。本論文において述べる階段状バルブ操作による水撃解析も、発電水力等には全く見られなく(かんがい用管路においてもこの例は少ないが)、かんがい用管路に付随した問題といえる。本論文では、A県にあるパイプラインにおける、下流端バルブを段階的に閉鎖した場合の水撃の消長について検討を行った。

## 2. パイプラインの概要および解析モデル

幹線水路の総延長は約12kmであり、管径は1.2mから0.8mまで変化している。末端にバタフライバルブが設置されている。幹線水路は地形に応じて、その勾配が変化し、また分水によって、その管径も変化し、非常に複雑である。これらをすべて考慮して解析を行うと時間がかかり過ぎ、たとえ大型電子計算機を使用しても、解析が実用上不

Table-1 パイプの諸元

	管 径 (m)	長 さ (m)
1	1.2	971
2	1.1	3224
3	1.0	3138
4	0.9	1934
5	0.8	2743

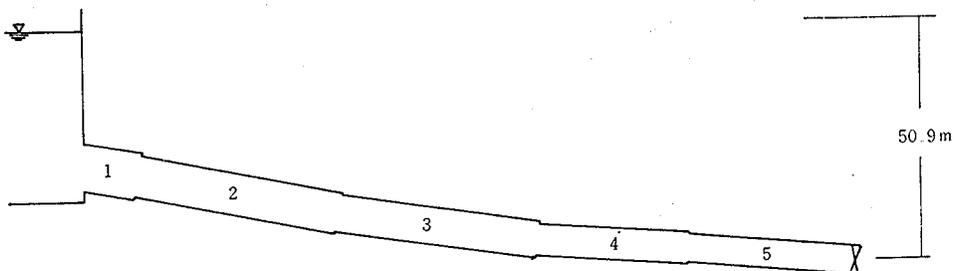


Fig. 1. 幹線水路のモデル

可能である。そこで、幹線水路のモデル化を次のように行った。すなわち、管径の変化を考え同一管径の間は、同一傾斜とする。また、分水は無視する。このモデルを Fig. 1 に示す。また、パイプラインの諸元を Table-1 に掲げる。

3. 基礎方程式およびバルブの操作法

(1) 基礎方程式

解析に用いる基礎方程式は次の運動方程式と連続の方程式である。

(a) 運動方程式

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

(b) 連続の方程式

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

ただし、 $H$ : 水頭、 $V$ : 管内平均流速、 $g$ : 重力の加速度、 $x$ : 距離、 $t$ : 時間、 $D$ : 管径、 $f$ : Darcy-Weisbach 式中の摩擦損失係数、 $a$ : 圧力波の伝バ速度、 $\theta$ : 管が水平となす角度。

(1)、(2)式は、ギ線型双曲型偏微分方程式であり、特性曲線法を用いて解析するのが一般的である。

(2) バルブの操作方法

下流端にはバタフライバルブが設置されている。 $\tau$  を次式のごとく定義するとき、バタフライバルブの特性を Fig. 2 に示す。

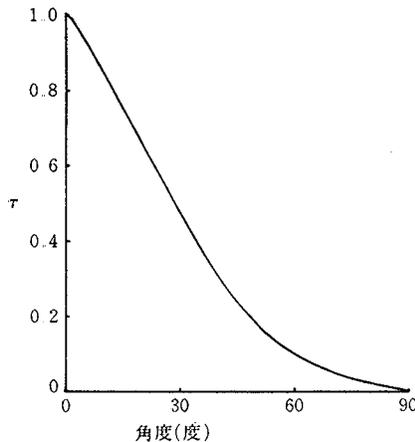


Fig. 2. バタフライバルブの特性

$$\tau = \frac{C_d \cdot A}{(C_d \cdot A)_s} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $C_d$ : 流量係数、 $A$ : バルブの開口面積、 $S$ : 定常状態における諸量を示す添字。

下流端バルブを次のごとく操作した場合の圧力、及び流速の変動の解析を行い、考察を試みた。

(a) 6°を4秒間等速の角速度で運転し、その後、56秒間休止、それをくりかえす。閉鎖終了時間は844秒である。

(b) 3°を2秒間等速の角速度で運転し、その後28秒間休止し、それをくりかえす。閉鎖終了時間は872秒である。

上記 (a)、(b) の場合における  $\tau$  の変化をそれぞれ、Fig. 3、Fig. 4 に示す。いずれも階段状になっていて、(b) の方が (a) よりも変化が多い。

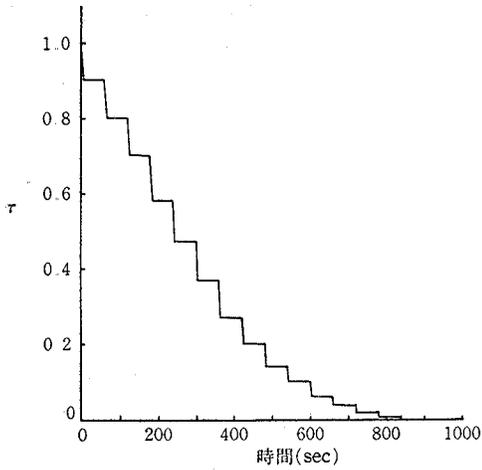


Fig. 3.  $\tau$  の変動 (a)

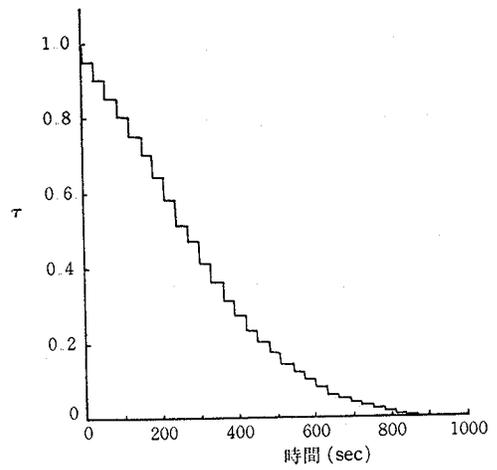


Fig. 4.  $\tau$  の変動 (b)

(1) 水撃作用の解析

下流端のバルブを閉鎖した場合、バルブ位置における圧力変動の解析を行なった。第3章におけるバルブの閉鎖方法によって閉鎖した場合の圧力変動と、それらと同じ閉鎖時間で連続的に閉鎖した場合における、圧力変動の比較を Fig. 5, Fig. 6 に示す。

4. 解析結果および考察

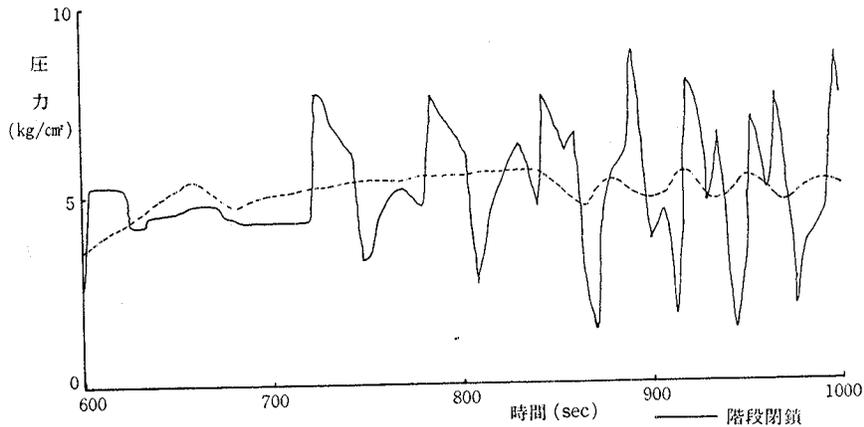


Fig. 5. 圧力の変動 (a)

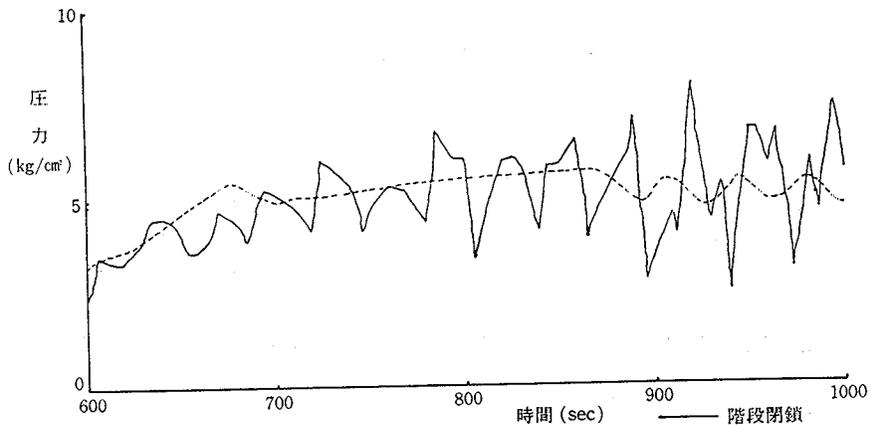


Fig. 6. 圧力の変動 (b)

これらによると, いずれも階段閉鎖における水撃圧が, 一様閉鎖におけるそれより大きい。この理由は, 閉鎖終了直前における角速度に注目すると, 階段閉鎖の場合, 一様閉鎖に比べ大きいためと考えられる。

したがって, 閉鎖終了直前のバルブの角速度について検討する必要がある。また, 水圧振動周期とバルブの操作の周期との共振についても検討する必要がある。このように段階的にバルブを閉鎖すれば, 連続的に閉鎖した場合よりも必ずしも水撃圧が小さくなるとは限らない。

なお, 本解析に使用した任意のバルブ操作が考慮できるサブルーチンを Fig. 7 に示す。

仮りに Fig. 8 に示すようなバルブの閉鎖方法について考える。直線補間が可能なように, 変化点を選び, 時間と無次元開度の関係をデータとして入力すれば, 解析が可能である。

```

SUBROUTINE VALVE(T,ST,TAU,KK)
DIMENSION TA(90),AV(90),NI(90),NV(90)
+ ,AVV(90)
IF(T,NE,ST) GO TO 30
READ(5,1) NT,II
NX=NT+1
DO 2 I=1, NX
READ(5,3) TA(I),AV(I)
WRITE(6,3) TA(I),AV(I)
AVV(I)=AV(I)
2 CONTINUE
IF(II,EQ,0) GO TO 333
DO 6 I=1, NX
AV(I)=AVV(NX-I+1)
6 CONTINUE
333 CONTINUE
1 FORMAT(3I3)
3 FORMAT(3F10,2)
DO 5 I=1, NT
NI(I)=(TA(I+1)-TA(I))/ST
NV(I)=0
5 CONTINUE
AV(NX)=0.0
IN=0
30 CONTINUE
IN=IN+1
IF(TA(IN)-T) 10,20,20
10 CONTINUE
GO TO 30
20 CONTINUE
I=IN-1
IN=IN-1
NV(I)=NV(I)+1
TAU=(AV(I+1)-AV(I))/FLOAT(NI(I))*FLOAT(NV(I))+AV(I)
IF(TAU,LE,0.0) TAU=0.0
RETURN
END
    
```

Fig. 7. 任意のバルブ操作が考慮できるサブルーチン

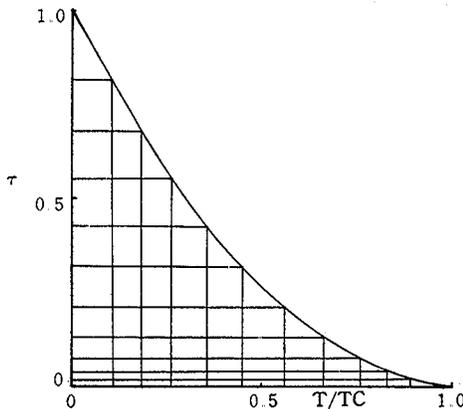


Fig. 8. バルブの操作例

TC : バルブの閉鎖時間  
T : 経過時間

(2) 送水開始時の流れ

Fig. 1 において、下流端のバルブを初め閉鎖しておき、その後開放すれば、管内の流速は0から徐々に大きくなり、いわゆる定常状態に達する。このプロセスについて解析を行った。特に長距離パイプラインにおいては、バルブ開放開始時から、定常状態に達するまで時間を要し、水の管理上、流れを明らかにすることが必要である。

なお、解析には(1)、(2)式を用いる。段階的に開放した場合(4秒間運転、56秒間休止、そのくり返し)、240秒間連続的に開放した場合、それぞれの管内平均流速の変化を Fig. 9 に示す。バルブの開放時間による定常状態に

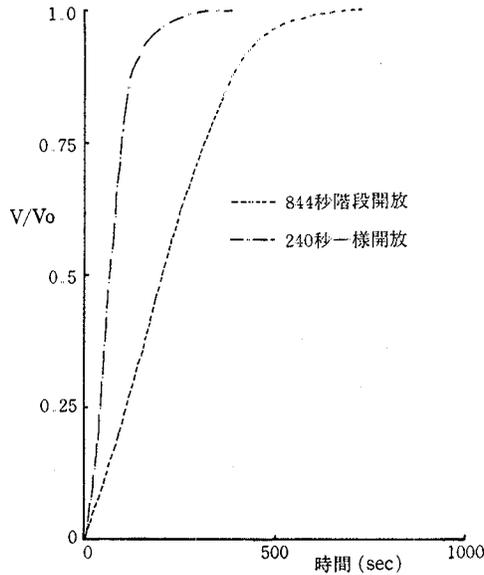


Fig. 9. 送水開始時の流れ

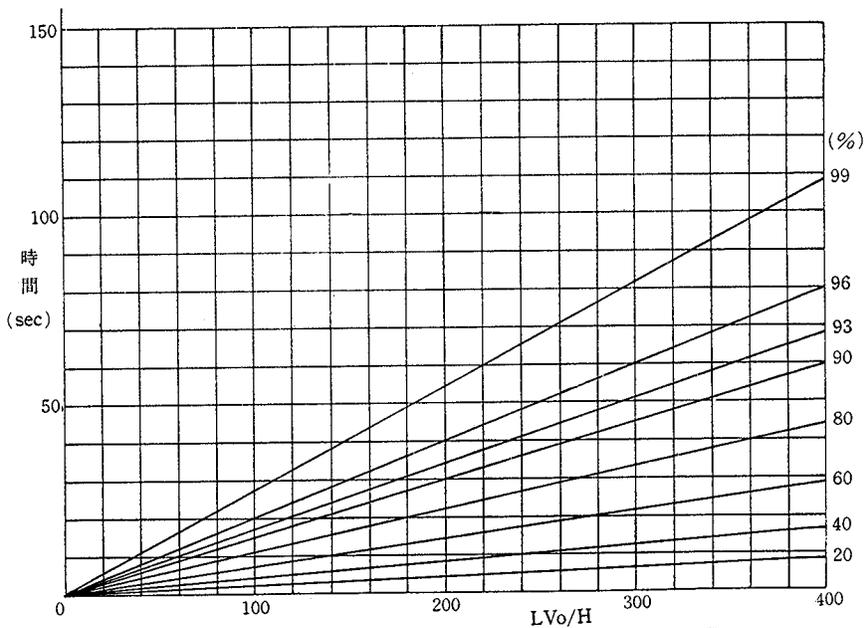


Fig. 10 時間と流速の関係

達する時間の違いは, 開放時間の違いほどではない。すなわち, 開放時間の差が, 定常状態に達する時間差にはならない。

また, バルブ開放時においては, 段階的にバルブを操作した場合と連続的に操作した場合は, バルブ閉鎖時にみられるような操作方法による圧力脈動の著しい差はない。

ついで, この場合バルブを遅く開放しているが急開放(圧力波の伝パ速度の往復時間より速く開放する場合)のとき, 管内平均流速と時間の関係は次式で与えられる<sup>(8)</sup>。

$$t = \frac{LV_0}{2gH} \cdot L_n \frac{V_0 + V}{V_0 - V} \quad (4)$$

ただし,  $t$ : 時間,  $V$ : 流速,  $V_0$ : 到達し得る最大流速,  $H$ : バルブ地点から貯水池までの水頭。

緩開放の場合でも, 比較的開放時間が速いとき(4)式は, 目安の値を算出するとき使用可能である。(4)式を解析に便利のように図式化したのが Fig. 10 である。本事業における幹線水路を等価断面積の単一管路で置き換え, 急開放として Fig. 10 を利用して解析を行うと, 定常状態に達する時間は178秒である。この値は, 前述の開放方法による定常状態に達する時間と比べた場合, その差は小さく, この図から概略の時間を推定することが可能である。

## 5. ま と め

最初に, 水撃作用の解析の簡単な歴史にふれ, 解析方法を概括し, さらに, かんがい用管路の特殊性のため, それに付随して起った水撃作用も多いことを述べた。本研究における成果を要約すると次のとおりである。

1. 幹線水路のバルブの階段操作について水撃および送水開始時の流れを解析し, 考察を試みた。その結果, 階段操作を行なった場合, 必ずしも, 連続的にバルブを操作した場合より水撃圧が小さくなるとは限らないことが明らかになった。
2. 水撃作用あるいは, 送水開始時の流れの解析を行う場合, 任意のバルブ操作が考慮できるサブルーチンを示した。
3. 送水開始時の流れを簡易に計算する図を示した。

計算は, 九州大学大型計算機センターで行った。現地調査については多くの方々の御協力をいただいた。これらの方々に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) SUZUKI, S.: Experimental Investigation of Water Hammer in Steel Pipe, *The journal of the faculty of Engineering Tokyo Imperial University*, Vol. **XXI**, No. 2, pp. 43~75 (1937).
- 2) STREETER, V. L. and C. LAI: Waterhammer Analysis Including Fluid Friction, *Proc. A. S. C. E. HY3*, pp. 79~112 (1962).
- 3) 三野徹: 複合管水路の圧力振動周期について, *農土論集*, 73号, pp. 39~46 (1978).
- 4) 三野徹ほか: 複合管水路の水撃圧——圧力振動周期と発生最大圧力との関係——, *農土論集*, 74号, pp. 53~58 (1978).
- 5) WALTERS, G. Z. et al: Water Hammer in P. V. C. and Reinforced Plastic Pipe, *Proc. A. S. C. E. HY7*, pp. 831~843 (1976).
- 6) 西山壮一ほか: バルブの下流に発生する Water hammer とそれに及ぼす混入空気の影響, *農土論集*, 77号, pp. 21~26 (1978).
- 7) 西山壮一ほか: パイプラインの一部に混入空気が存在する場合, その空気が Water hammer に及ぼす影響, *農土論集*, 82号 pp. 32~39 (1979).
- 8) STREETER, V. L.: *Fluid Mechanics*, Mcgrow-Hill (1970).

(1981年5月30日受理)