

山梨大学工学部 正員 萩原能男

阪神高速道路公団 正員 井阪 清

1. まえがき 水撃圧の減衰は一般にパイプの粗度に元ずくと考えて、Manning型の抵抗則を採用する場合が多い。例えば V.L.Streeter<sup>(1)</sup>, C.Lai<sup>(2)</sup> 氏の計算等がそれである。しかし基礎方程式の線形性等を考慮して抵抗力を平均流速  $V$  の一乗に比例するとして計算する場合も多い。

筆者の実験によると後者の考え方が実験値と良く一致し、また粗度以外に相当大的なエネルギー損失の原因があることが示された。又水撃圧が絶対圧力 0 より小さくなることなく、このような場合には水中に空気が遊離し、波速が遅くなることが判明している。この点についても考察を加えてみた。

2. 理論式 貯水池より弁の方向に  $x$  軸を管路に沿って取り、 $t$  を時間、 $H$  を圧力水頭、 $V$  を平均流速、 $a$  を水撃圧波速、 $g$  を重力の加速度とすると基礎方程式は次式となる。

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - CV \dots \dots \dots (1) \quad \frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} \dots \dots \dots (2)$$

式(1)が運動方程式、式(2)が連続方程式で、急閉塞の条件の元にこれ等の式を解くと(3)式となる。ただし式(1)の  $CV$  は抵抗力を表わす。 $l$  は管路長、 $V_0$  は初期流速を表わす。

$$H = \frac{4aV_0}{g} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n e^{-\frac{g}{2}t}}{\sqrt{(2n+1)^2 \pi^2 - C^2 l^2 / a^2}} \sin \frac{(2n+1)}{2} \pi \frac{x}{l} \sin \frac{a}{2l} \sqrt{(2n+1)^2 \pi^2 - C^2 l^2 / a^2} \cdot t \dots \dots \dots (3)$$

ここで、水撃圧の減衰は  $e^{-\frac{g}{2}t}$  によってかなり明白に表われるが、波形の方は  $C^2 l^2 / a^2$  の値が筆者の実験においては  $10^{-3}$  order であるために  $\pi^2$  に比して無視され、長方形の波形とみなすことが可能である。

3. 実験設備 実験は図-1に示すような、高水槽に接続された長さ 75.58m の鋼鉄管よりなり、曲りにはベンドを8箇所用いている。実験の結果、Manningの粗度係数  $n=0.009$ 、曲り損失係数  $f_b=0.15$  である。

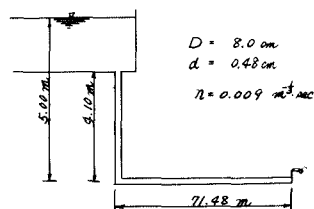


図-1 実験管路の大略

4. 実験結果 実験は閉塞弁の近くに抵抗線式圧力計を付け、動歪計、オシログラフの組合せによって図-2のような測定値が得られた。実験値の負圧部分の経過時間が長くなっているのは、

圧力が絶対圧力 0 より下れないために、 $(\text{圧力}) \times (\text{時間}) = (\text{力積} \cdots \text{運動量})$  を一定に保つためであり、他面波速が Cavitation のために遅くなるためである。式(3)による理論解を図-2に重ねて点線にて示し実験値と比較してある。各波の平均圧力と経過時間の関

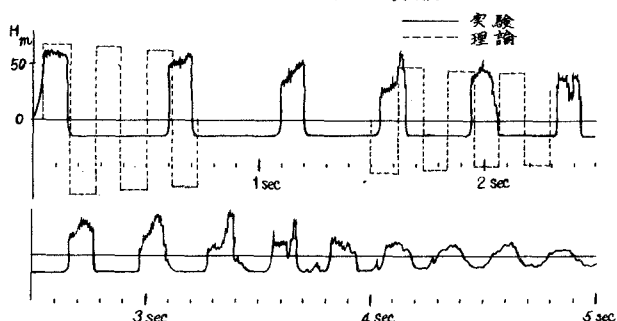


図-2 圧力波測定例  $Q=252 \text{ l/sec}$   $a=1350 \text{ m/sec}$   $a/V_0=69.2 \text{ m}$

原を図示すると、図-3(図-2と同じData)のようになり、圧力は指数関数的にほぼ減衰していることが判明する。14個のこの種のDataより平均減衰勾配を求め、それより式(1)のCの値を計算すると $C=0.49 \text{ sec}^{-1}$ となる。初期圧力とCの値は図-4に示すとおり関係がなく、減衰率は初期圧力の大小によって変うないと判断される。このことは減衰に関する法則がManning型の抵抗則によらない事を示す。次に負圧が理論上絶対圧力のより下るような場合は前述のとおり、図-2の圧力波の $H=0$ (時間軸)に関する積分面積が運動量に相当するため、この各波のなす面積の減衰性を調べると図-2と同じDataについて、図-5のような結果が得られる。これより正負圧を通じて、この面積も図-3の圧力の場合と同一の減衰勾配を有することが判明する。これ等のことより水撃圧の減衰は式(3)にもとづく、指数関数的なものであると考えられる。

**5. 結論** この管路の粗度及び曲り損失係数は前述のとおりであって、これ等の値による静的なエネルギー損失と、水撃圧の実験波形より求めた式(1)による静的エネルギー損失の関係を図示すると図-6となる。筆者の実験は初頭平均流速 $1.35 \text{ m/sec}$ 以下について行ったので、実験範囲内ではエネルギー損失はManning及び、曲り損失を考えに入れた値の2倍以上の値を示している。これらの原因は管の弾性振動

弁及び貯水池における圧力の反射等によるエネルギー損失にあると考えられる。次に負圧が絶対圧力のより下らないため理論解と一致しない点については、Cavitationによる複雑な現象が入ってくるが、図-5に示す運動量の間には一定の関係があるので、初期圧力が判明すれば負圧の継続時間すなわち波速も判明してCavitationの度合も理解される。この問題についての基礎的な研究を進めることは、管内に空気の混入した流れに対するWater Hammerの問題を解決するのに重要である。最後に本研究の計画設備等の点について、御指導頂きました東京大学の嶋祐之教授及び山梨大学の佐々木大策教授に厚く謝意を表します。

註

(1) Valve Stroking to Control Water Hammer Proc A.S.C.E. HY2 1963 March

(2) Water-Hammer Analysis Including Fluid Friction Proc A.S.C.E. HY3 1962 May

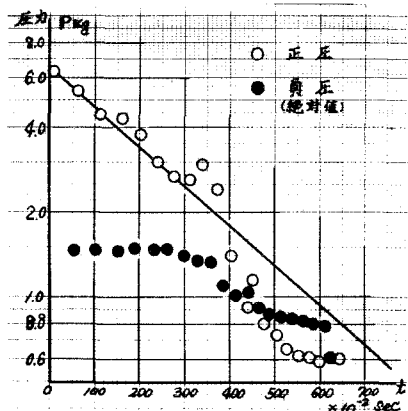


図-3 圧力の減衰

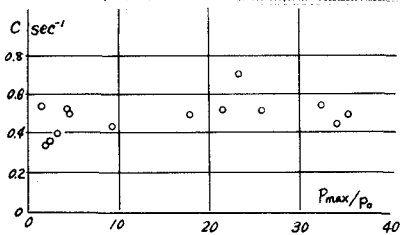


図-4 初期圧力と減衰率 ( $P_0 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$  静圧)

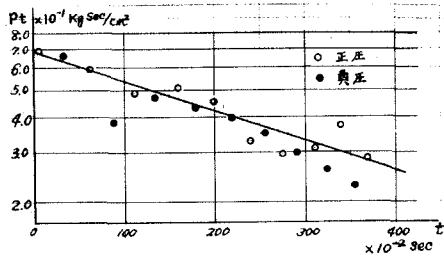


図-5 圧力波面積の減衰 ( $p=WH$ )

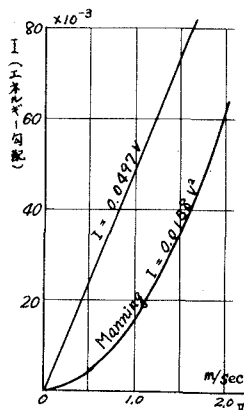


図-6 エネルギー損失(静的)