

下降傾斜管内の空気混入流による水頭損失について

長 勝 史

(昭和51年8月31日受理)

On the Head Loss due to Air-Water Mixing Flow in Down Sloped Pipeline

Katsushi CHO

(Laboratory of Irrigation and Drainage Engineering)

緒 言

近年水資源の高度利用，農業の機械化，地価の高騰などに伴ない，農業用水路とくにカンガイ用水路は，従来の開水路方式から，管水路方式が大型水路にも採用されることが多くなってきた．しかしながら農業用管水路は，他の目的の管水路に比べて，流水中への空気や土砂などの混入の機会が非常に高いが，これら混相流の水理学的影響などについては，明らかにされていない部分が多い．とくに管水路における空気混入流は，流水中の空気の存在により管路の送水能力を著しく減少させたり，場合によっては完全に送水を停止させてしまうことすらあり，さらには水撃作用や振動などを誘発して管の破損の原因ともなるので，そのメカニズムの解明が望まれている．

ここでは，色々な原因によって管水路内の流水中に混入した空気の挙動を把握し，空気混入流による種々な水理学的影響の中で，特にその影響が著しい下降傾斜管内を空気が気泡状をなして流水と共に流下する場合の水頭損失の程度について，主に実験的に検討し，その関係要因の分析を行なった．

管内での空気の挙動

農業用管水路内の空気は，主に以下のような原因によって，流水中に混入するものと考えられる¹⁾．すなわち，

(1) 送水開始時に管内に残留していた空気が完全に除去されずに，管水路の頂部あるいは断面の大きさや型の変化する部分に停滞する場合がある．

(2) ポンプ揚水時に，取水口に近づいた水流が回流をなすことによって渦が発生した場合には，流水と共に気泡状の空気が，連続的に連行される．

(3) 取水孔に取りつけられたゲートや，管水路の途中に設置された制水弁などを部分開放した時，その部

分が射流状態になると，その下流側で跳水現象が生じる．この時の水面の乱れによって多量の空気が連行される．

(4) 流水中に溶存している空気が，圧力降下や水温上昇などによって自由空気となって放出され，気泡状をなして流水中に混入して流下する場合がある．水中の空気の溶解度は圧力に比例するので，サイフォン部分での負圧や，壁面の不連続部分などのような局所的な管内の圧力降下が発生した時には，連続的に放出されることになる．

(5) 管水路中に管内の圧力が負圧になるような断面が存在する時，その付近の管の接合部などが不備などときにはごくわずかの隙間からでも多量の空気が連続的に混入する．

これらの原因によって管水路内の流水中に混入あるいは連行された空気は，大小のエアーポケット (*air pocket*) を形成して管の頂部や下降傾斜管内に停滞するか，あるいは種々な大きさの気泡 (*air bubble*) または気泡体をなして流水中に混入して，流水と共に流下するかのどちらかである²⁾．

この停滞したエアーポケットの部分では，実質的には開水路流と類似な流れとなり，この時には Fig. 1 に示すように，そのエアーポケットの垂直成分に近い大きな水頭損失の原因となる．なおこの時，エアーポケットの下流端でのフルード数が1以上であれば跳水を生じて，エアーポケット内の空気は気泡をなして流水と共に下流に連行される．しかし跳水によって発生した気泡が，下降傾斜管内を流水と共に流下出来ない流速や傾斜角度の時には，元のエアーポケットと再結合することもある．一般にこれらのエアーポケットは管の頂部などに設置された空気弁などのような空気排除装置によって，管外に除去されるように設計されている．

一方，気泡状をなして流水中に混入した空気は，農

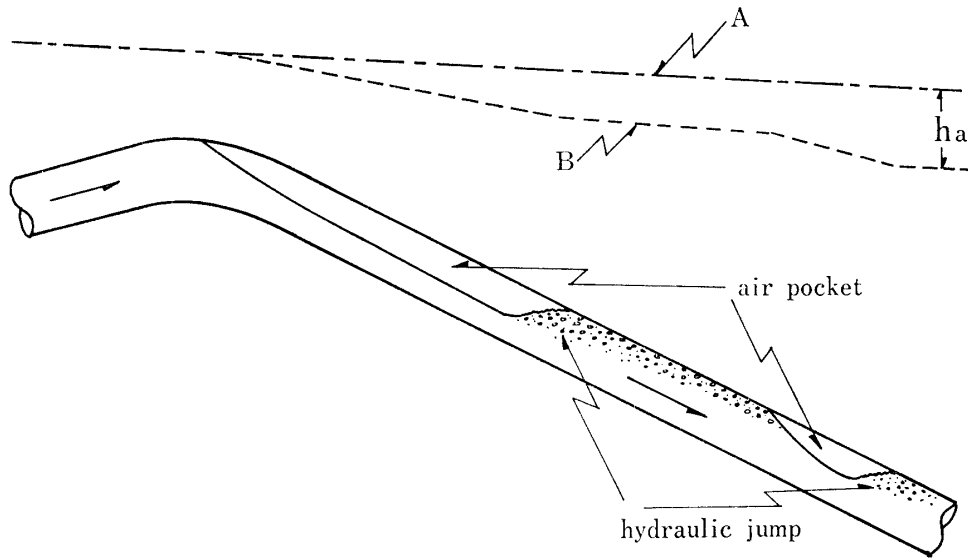


Fig. 1 Air pockets in down sloped pipeline

A: energy line in which no air pockets exist

B: energy line in which air pockets exist

h_a : head loss due to air pockets

業用管水路ではほとんどの場合、それに作用する浮力によって、管断面の上部壁面付近に沿って流動し、流水の速度や空気の混入量などの諸条件に影響されながら合体、分裂を繰り返し流下する。一般に水平な管水路や上昇傾斜管路では、流水中の気泡は停滞することなしに管内を流下する。しかし管路が下り勾配となる下降傾斜管においては、混入気泡がその開始点に達した時、流水は気泡をさらに下流方向に押し下げ流下させようとするが、気泡に作用する浮力の方向が流水による抗力とは反対方向であるために押しもどされる場合がある。この時には、気泡は後続の気泡と結合して管の頂部から下降傾斜管内に集結し、大きなエアポケットを形成して管内に残留することになる。これをエアバインディング現象³⁾ (*air binding phenomenon*) と称し、結果的には前述の停滞したエアポケットの場合と同様な水理学的影響を及ぼす。この下降傾斜管の開始点で気泡が停滞するか、あるいは流水と共にさらに下降傾斜管内を流下するかどうかの限界は、流速や空気の混入率、下降傾斜角度の大きさなどによって決まる。この限界以下では気泡は流水と共に下降傾斜管内を流下するが、この時気泡に作用する浮力のために流水と気泡との間に相対的な速度差を生じて、気泡が流水中で抵抗体の働きをなすために、気泡を含まない場合よりも大きな水頭損失を引き起し、マサツ損失や形状損失に比べて無視出来ない重大な悪影響を及ぼす場合がある。水平や上昇傾斜管内の空気混入流は、気泡と流水との間の相対速度差がないために、下降傾

斜管内の空気混入流の場合のような水頭損失は生じなかった。

以上のような予備実験で得た結果を基に、下降傾斜管内の空気混入流による水頭損失について、さらに詳細な検討を行なった。

実験装置の概要と実験方法

本研究にさいしての実験装置の概要を Fig. 2 に示す。実験管は本実験のような空気と水の混存する現象は相似則が成り立ち難いことから出来る限り管径が大きい方が良く、管内各部の流動現象を容易に観察出来る必要があることなどを考慮して、内径 140 mm, 90 mm のアクリル製透明管を使用した。管長は実験室の広さなどの関係から水平管では 10 m 以内、上昇および下降傾斜管の場合には、8 m 以内でフランジによって可変出来るようにした。管の傾斜角度は、45° 以下で自由に設定することが可能であった。

流水中に連続的に混入する空気は、まずコンプレッサーで圧縮した空気を、圧力調整装置によって圧力を一定にして、試験用ガスメータによって流量を測定したのち、Fig. 2 に示すような二重管の周囲の多数の小孔 (直径 0.5 mm の穴を 50 個) より注入した。管内の圧力測定は、管路にそって 50 cm 間隔に設置したマンメータによって測定した。また圧力変動が激しい時には小型圧力変換器を管路の壁面に設置し、電磁オシログラフに記録して圧力測定を行なった。

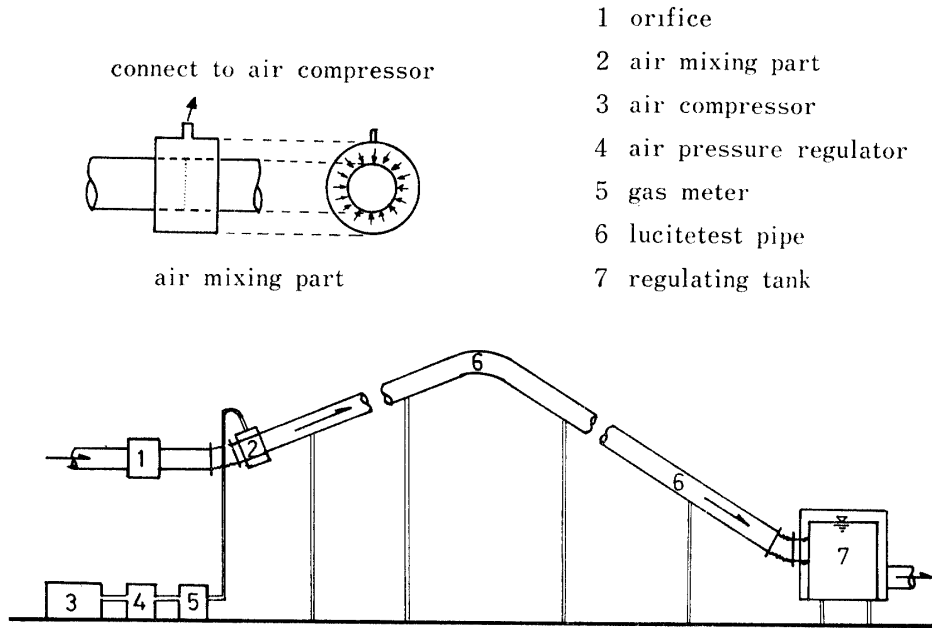


Fig. 2 Layout of experimental model

実験結果および考察

(1) 関係要因の分析

実験結果を解析する時、まず下降傾斜管内の空気混入流による水頭損失に関与すると思われる要因の分析を行なう。

本現象のような空気と水とが混合した現象を理論的に取り扱うことは非常に困難なことであるので、ここでは本現象に関係すると思われる物理量を次元解析により次のような無次元量のパラメータで表わす。すなわち、

$$\phi\left(S, \frac{Q_a}{Q_w}, \frac{r_a}{r_w}, \theta, \frac{e}{D}, \frac{v^2}{2gD}, \frac{vD}{\nu}\right) = 0 \quad \dots\dots (1)$$

ここで、

S ; 動水勾配あるいはエネルギー勾配, Q_a, Q_w ; 空気および水の単位時間当りの体積流量, r_a, r_w ; 空気および水の単位重量, θ ; 下降傾斜角度, D ; 管径, e ; 絶対粗度, v ; 流水の平均流速, ν ; 水の動粘性係数
管水路の抵抗式は一般に次のように表わされる。

$$S = f \frac{v^2}{2gD} \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 f ; 抵抗係数

したがって (1) 式は次のように書き換えられる。

$$S = \phi\left(\frac{Q_a}{Q_w}, \frac{r_a}{r_w}, \theta, \frac{e}{D}, \frac{vD}{\nu}\right) \frac{v^2}{2gD} \quad \dots\dots (3)$$

勿論、もし空気混入率 $Q_a/Q_w = 0$ の場合、すな

わち水だけが流れている時の動水勾配の S_0 は次式のようなになる。

$$S_0 = \lim_{Q_a/Q_w \rightarrow 0} S = \phi\left(\frac{vD}{\nu}, \frac{e}{D}\right) \frac{v^2}{2gD} \quad \dots\dots (4)$$

すなわち抵抗係数はマサツ損失係数となり、レイノルズ数と相対粗度の関数として表わされる。

本現象の (3) 式において $r_w \doteq 1.0 \text{ g/cm}^3$ に対して $r_a \doteq 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 程度であるので $r_a/r_w \doteq 0$ とし、相対粗度 e/D は本現象では、内壁が滑らかなアクリル製透明管であるので一定であるとする。さらにレイノルズ数 vD/ν は本現象における流速や管径などを考慮した場合、かなり大きな値となり、粘性の影響はそれほど重要でなく、かつ本実験条件においてはその範囲も狭い。また実際の農業用管水路においても、空気混入流の圧力損失に関してのこれらの要因の変化に伴う損失増減は、それほど重大だとは考えられない。勿論、マサツ損失それ自体に関しては e/D や R_e は決定的な要素である。

これらのことを考慮すれば、結果的には (3) 式は次式にて表わされる。

$$S = \phi\left(\frac{Q_a}{Q_w}, \theta\right) \frac{v^2}{2gD} \quad \dots\dots (5)$$

(5) 式の関係を、本実験条件の下で行なった $D = 90 \text{ mm}$ 管についての結果を Fig. 3(a) および Fig. 3(b) に示している。

図において、点線で示しているのが清水すなわち気泡を混入していない場合である。いずれの傾斜角度で

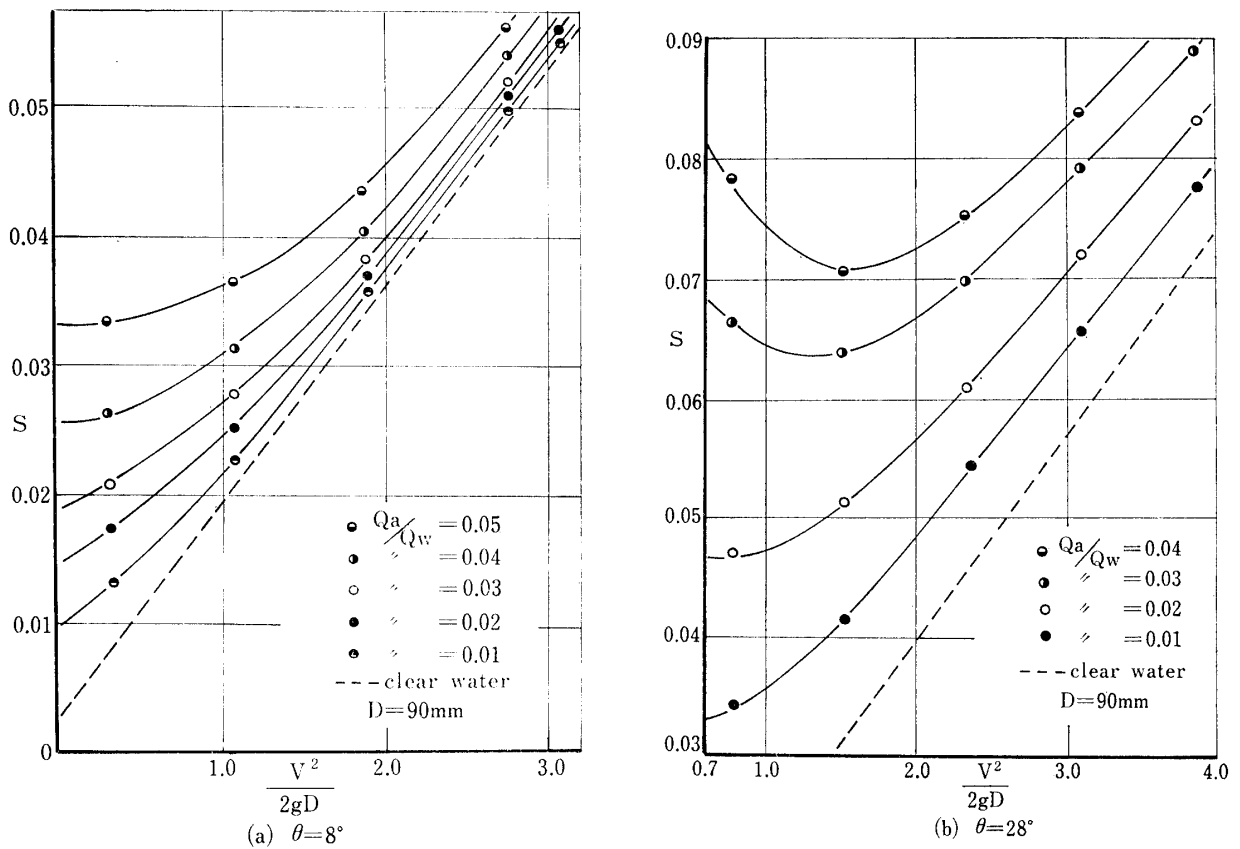


Fig. 3 Relationship between energy gradient and flow parameter for various air concentrations

も同一流量を送水するためには、混入空気が増加するに伴って、より大きな動水勾配を要することは明白である。特に流速が遅い時、すなわち小流量を送水する場合には2~3%の空気混入率 ($Q_a/Q_w \times 100$) でも、清水の時の倍以上の動水勾配を与えてやらなければ、必要な流量を送水させることが出来ない。また下降傾斜角度が大きい方が、その傾向は顕著に表われている。

実際問題としては、管水路内の流水中に空気を連行して下降傾斜管内を空気混入流をなして流れる場合、圧力流管水路では計画流量を送水するために、ポンプの容量を増加させる必要があり、重力流管水路では、もはや所要の流量を得ることが出来なくなる場合もあり得る。

(2) 実験結果の分析

実験結果を基にして、上記の関係要因について個々に検討を行なう。

(a) 空気混入率と水頭損失

流水中に混入した気泡あるいは気泡体は、Fig. 4に示すように、これに作用する浮力によって流水との間に相対的な速度差を生じ、流水の抵抗体となるため

に、流水のみの場合よりも圧力損失を増大させる原因となる。

ある一つの気泡体についての抗力の大きさは、次式によって表わされる。

$$D = C_D \frac{v_a^2}{2g}, r_w \cdot A \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 D ; 抗力、 C_D ; 抵抗係数、 v_a ; 流水と気泡との相対速度差 $v_a = v_w - v_b$ 、 A ; 気泡の流水方向の断面積

抵抗係数は気泡体の形やレイノルズ数の大きさなどによって決まる値である。この場合には気泡体の大きさとその数は、ほぼ空気混入率に比例するものと考えて整理すると、Fig. 5(a) ($D = 90\text{mm}$ 管) および Fig. 5(b) ($D = 140\text{mm}$ 管) に示すように、水頭損失比 h_{wa}/h_w (h_{wa} ; 気泡を混入した時の損失水頭、 h_w ; 水だけを流した時の損失水頭) の増加は空気混入率 Q_a/Q_w に対して比例的であり、その相関関係は高い。すなわちある流量を送水する時、混入空気量が増加するに伴って、水頭損失は増大することを示している。

なお Fig. 5(b) の図中 (c) と示しているのは、

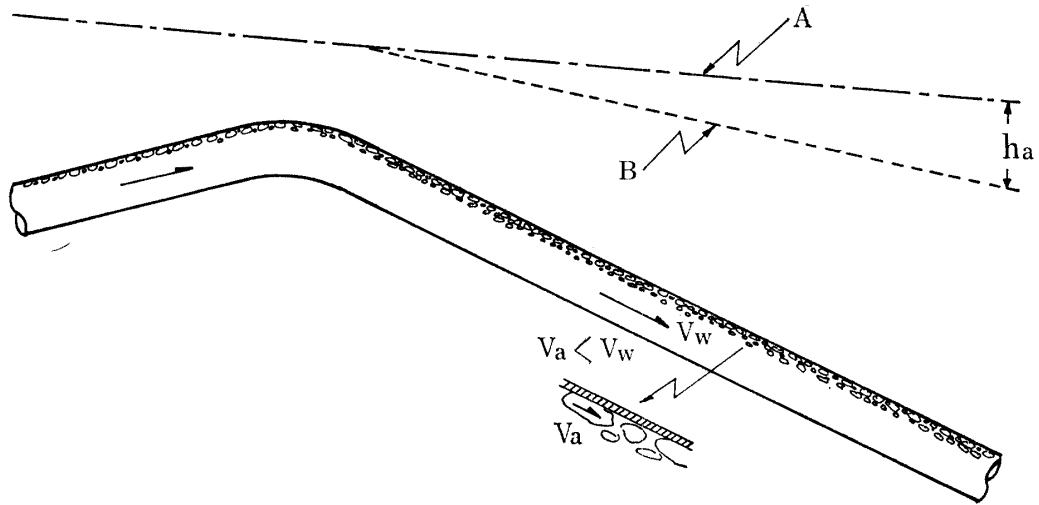


Fig. 4 Air entrainment flow in down sloped pipeline
 A: energy line in which no entrainment air exist
 B: energy line in which entrainment air exist
 h_a : head loss due to entrainment air
 V_a : velocity of air bubble
 V_w : velocity of flow water

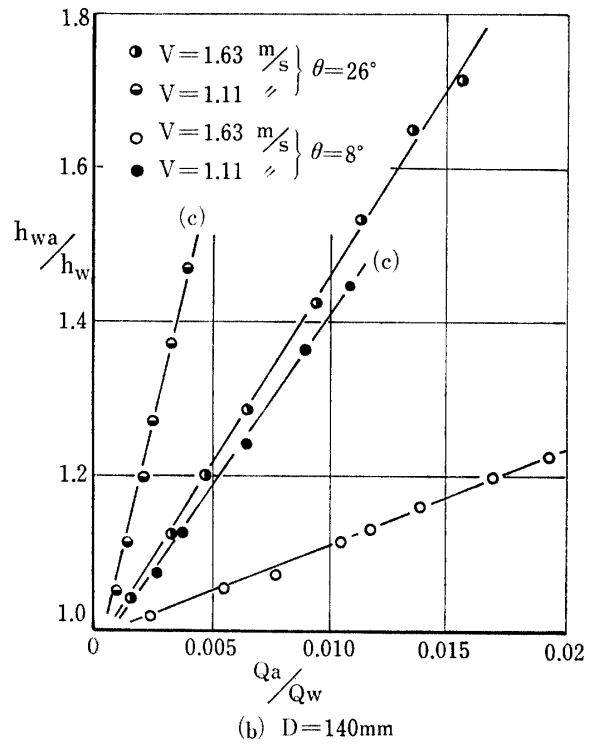
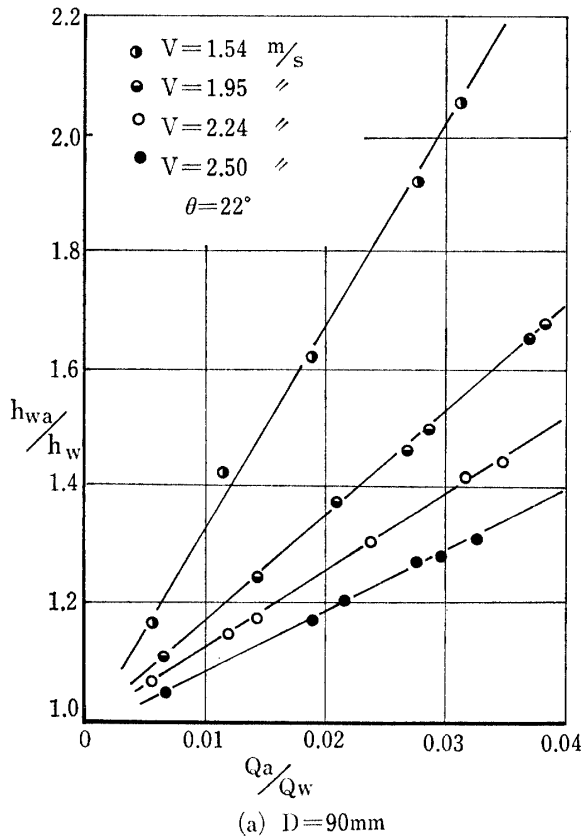


Fig. 5 Relationship between head loss ratio and air concentration

その時の条件（流速や勾配）で、これ以上の空気混入率になると下降傾斜管の開始点において、前に述べたエアライディング現象が生じ始め、管内にエア

ポケットを形成することを表わしている。

(b) 下降傾斜角度と水頭損失

流水中の気泡を球形であると仮定した時、気泡に作

用する浮力の管軸方向（流れとは逆方向）の分力は次式で示される。

$$W_{\theta} = \frac{\pi d^3}{6} (\gamma_w - \gamma_a) \cdot \sin \theta \quad \dots\dots (7)$$

ここで、 W_{θ} ；下降傾斜角度 θ なる管の管軸方向の浮力、 d ；気泡を球形と仮定した時の直径。

前記のごとく、下降傾斜管における空気混入による水頭損失の増加は、流水と気泡体との相対速度差によるものであるから、気泡に作用する浮力が大きいほど、損失は増大することになる。したがって他の条件が同一であるならば、水頭損失は（7）式から明らかのように $\sin \theta$ に比例して増加するものと考えられる。実験結果から得た Fig. 6(a) ($D=90mm$ 管) および Fig. 6(b) ($D=140mm$ 管) は明白にこの事を示している。

(c) 流水の速度と水頭損失

気泡体に作用する管軸方向の浮力は（7）式から明らかのように、傾斜角度や混入率が一定であれば、流水の速度にはほとんど関係なく、ほぼ定値である。したがって流水の速度が大きければ、流水と気泡との相対速度差は小さくなり（6）式からも明白なごとく、気泡混入による水頭損失の増加の程度は微小であるが、流水が低速度であれば相対速度差が大きくなり、水頭損失におよぼす影響は顕著になる。それに反して、水だけを流した時の水頭損失すなわちマサツ損

失は、流速が小さい方が高流速の場合よりも小さな値となる。結果的に、気泡を混入した時と混入しない時の水頭損失の比 h_{wa}/h_w の値は Fig. 7(a) ($D=90mm$ 管) および Fig. 7(b) ($D=140mm$ 管) に示すように、流水の速度が減少すなわち流量が減少するに伴って、極端に大きくなり、空気混入流の水頭損失におよぼす影響は重大となる。なお、 $140mm$ 管の図中で (c) と記入しているのも、この付近以下の流速になると、下降傾斜管内にエアーパーキング現象によって、エアークケットが形成され始めることを示す。

要 約

水平管や上昇傾斜管の場合には、流水中に空気が連続的に混入していても、水頭損失に関する限りはそれほど問題になるほどの影響は見受けられないが、下降傾斜管における空気混入流は、以上の実験結果からも明らかのように悪条件（例えば、下降傾斜角度が大きく、流水の速度が遅く、空気が連続的かつ多量に流水中に連行されている場合）が重さなれば、空気を混入しない時のマサツ損失に比べて無視出来ないどころか、その値の倍以上にもなる水頭損失を生じ、重大な事態を引き起す原因となる場合もある。特に農業用管路の場合には自然流入（重力流）型式の管水路が多いために、おのずから下降傾斜管となる頻度が高くな

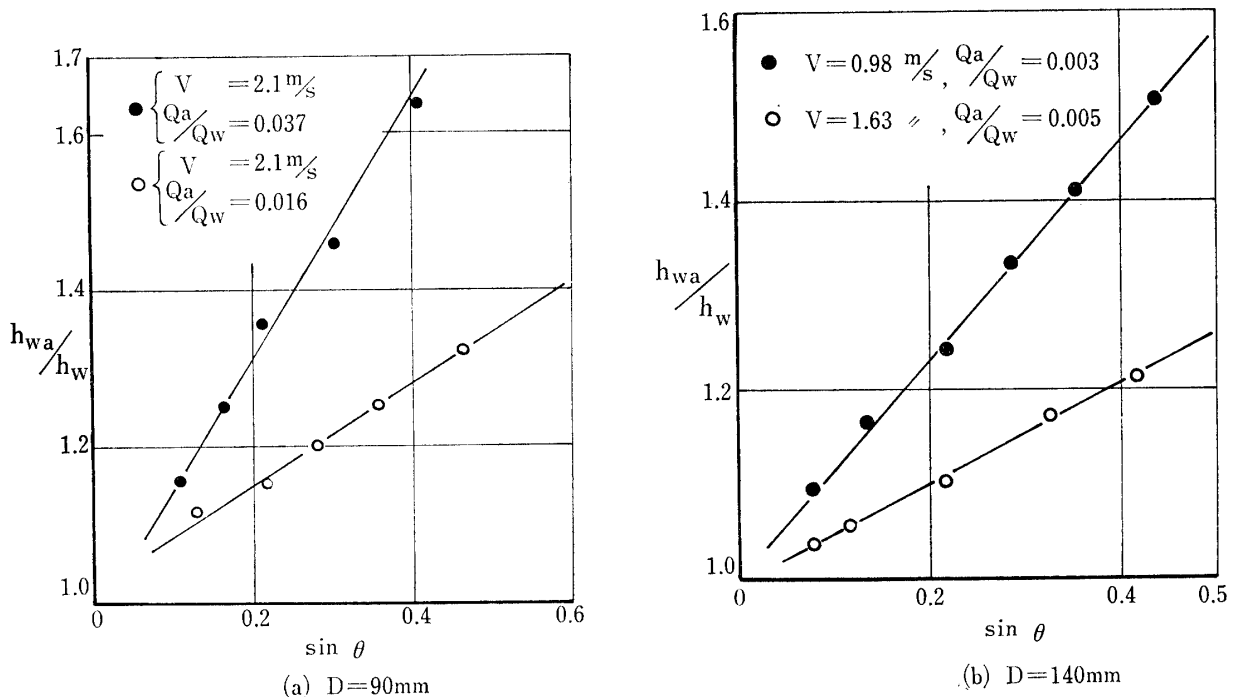


Fig. 6 Relationship between head loss ratio and sine of slope angle

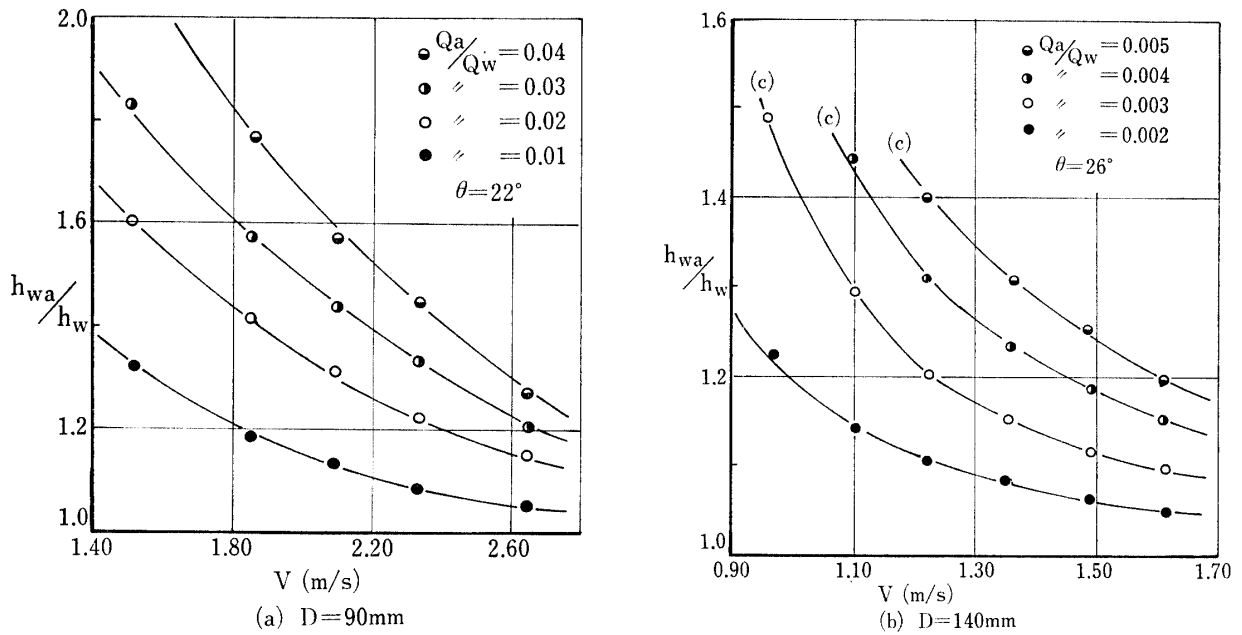


Fig. 7 Relationship between head loss ratio and mean velocity of flow

と思われるので、十分な対策と考慮が必要となるう。

なお今回は、制約された実験条件の下で行なったものであるため、あくまでも定性的な結果であり、相似則の成り立ち難い本現象をより普遍性あるものにするためには種々な大型管径を用いたより多くの実験条件の下での結果を得る必要がある。

文 献

- 1) Joseph E. Lescouich: *J. Am. Water-Works Assoc.*, **64**, 457-461 (1972)
- 2) Paul E. Wisner, Farrukh N. Mohsen, and Nicholas Kouwen: *HY2 Proc. Am. Soc. Civil Engrg.*, **101**, 243-257 (1975)
- 3) Richard T. Richards: *J. Am. Water-Works Assoc.*, **54**, 719-730 (1962)

Summary

The air entrained into a water pipeline in a variety of ways, may give serious hydraulic effects. One of these is the increase of head loss due to air-water mixing flow in down sloped pipeline. On the other hand, in horizontal or upward sloped pipeline, head loss due to air entrainment-flow is almost the same as that of no air mixing flow. The reason is that in down sloped pipeline, direction of buoyancy acting on air bubbles is opposed to that of flowing water, and so air bubbles operate as resistant bodies in pipe. Therefore excessive head loss occurs in addition to friction loss.

If the condition of pipeline may be wrong (for example, air which is mixed much and continuously, slope angle which is great, and velocity of flowing water which is low), the head loss exceeds double of the friction loss, and the presence of air seriously reduces the water-carrying capacity of the line.

As the pipeline for irrigation is usually gravity flow type, naturally frequency of down sloped pipe multiplies in comparison with pressure flow type. So more sufficient counterplans are required for air-water mixing flow.