

管水路内空気の急排による圧力上昇と管内残留空気の挙動

長 勝史・河原田礼次郎

(農業水利学研究室)

昭和63年 8 月10日 受理

Rise in Pressure Head due to Rapid Release from Pipeline and Movements of Remaining Air in Pipeline

Katusi CHO and Reijiro KAWAHARADA

(Laboratory of Irrigation and Drainage Engineering)

緒 言

近年、農業用水の送水手段として管水路方式が多く採用されている。一般に農業用管水路は他の目的の管水路に比べてその管理上の不備から管内に空気が混入する機会が多い。また水需要の変動が激しいために、完全に送水を停止する頻度も高く、その都度管内に空気が混入することが考えられる。管内に混入した空気は、管水路の送水能力を著しく低下させたり、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る²⁾。さらにはエアハンマによって振動を誘起して、管路の破壊にもつながることもある。したがって送水を再開する前には、管内の空気を完全に除去しておく必要があるが、このような管内充水時にも、空気孔からの急激な空気の排除によって、エアハンマによる破損事故等を引き起こすことが報告されている。ここでは、Albertson¹⁾ら

が指摘したようにこのような管内空気の排除時に発生する圧力上昇と圧力変動について実験的および理論的考察を行った。また完全に管路から排除されなかった残留空気の挙動についても検討を試みた。

圧力上昇の理論的考察

空になっていた管内を充水する水張り作業は、一般には Fig. 1 に模式的に示すように下流側の制水弁を全閉し、上流側の制水弁を開いて管路の高所に設置された空気弁などから空気を排除し、水と置換することによって行われる場合が多い。この際の、管内の充水速度 V_w (水張り速度) は空気排除孔からの空気の排除速度 V_a に比例する。すなわち充水流量 Q_w と排除空気量 Q_a とは等しい。したがって V_w は

$$V_w = \frac{d^2}{D^2} V_a \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで、 D : 管径, d : 空気排除孔の直径。

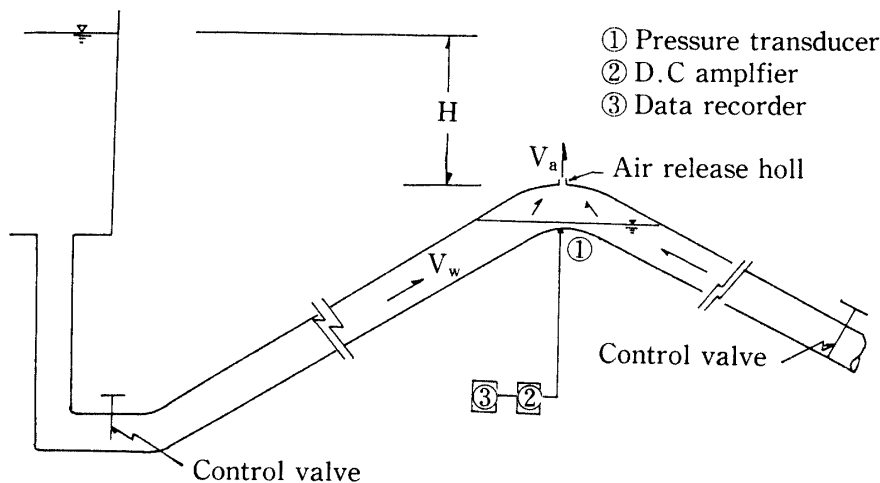


Fig. 1. Typical schematic diagram of air release means and experimental setup.

空気孔からの空気排除速度 V_a は

$$V_a = C_a \sqrt{\frac{2 g p}{\gamma_a}} \quad \text{----- (2)}$$

で表される。ここで、 C_a ：流速係数、 p ：空気排除孔部分の圧力、 γ_a ：空気の単位重量、 p の値は上流側制水弁の開度が大きい場合には、ほぼ排除孔部での静水圧と一致する。

スタンド型の通気施設のように、管内の空気が完全に排除された瞬間にスタンド内の水が上昇する時、その水の上昇速度 V_w は

$$V_w = C_w \sqrt{\frac{2 g p}{\gamma_w}} \quad \text{----- (3)}$$

である。ここで、 γ_w ：水の単位重量、 C_w ：流速係数。

圧力 p は一定であると考え、 $C_a \doteq C_w$ と仮定すると

$$\frac{V_a}{V_w} = \frac{C_a \sqrt{2 g p / \gamma_a}}{C_w \sqrt{2 g p / \gamma_w}} = \sqrt{\frac{\gamma_w}{\gamma_a}} \quad \text{--- (4)}$$

となる。 $\gamma_w \doteq 1 \text{ g/cm}^3$ 、 $\gamma_a \doteq 1.23 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ (1 atm, $t=15^\circ\text{C}$) とすれば

$$\frac{V_a}{V_w} = \sqrt{\frac{\gamma_w}{\gamma_a}} \doteq 28.5 \quad \text{----- (5)}$$

となる。

したがって空気と同一の速度で空気弁に近づいた流水は、瞬間的に $1/28 \sim 1/29$ 程度に減速される。空気弁のように空気排除完了の瞬間に水の動きが停止する場合には、充水速度 V_w が瞬時に 0 となる。このような急激な管内の充水速度の変化に伴い、排除孔で弁を瞬間閉塞したと同様な水撃現象が発生することになる。

この時の圧力上昇水頭 H は、運動方程式

$$\rho a A \Delta t \frac{\Delta V}{\Delta t} = A \rho g H \quad \text{----- (6)}$$

より

$$H = \frac{a}{g} \Delta V = \frac{a}{g} (V_w - \sqrt{\frac{\gamma_a}{\gamma_w}} V_w) \quad \text{--- (7)}$$

となる。すなわち水撃作用の Joukowsky の急閉塞の場合の式³⁾で表される。ここで、 ρ ：水の密度、 A ：管の断面積、 ΔV ：充水速度の変化、 Δt ：時間の変化、 g ：重力の加速度、 a ：圧力伝播速度で次式で表される。

$$a = \frac{1}{\frac{\gamma_w}{g} \left(\frac{1}{E_w} + \frac{1}{E} \frac{D}{e} \right)} \quad \text{----- (8)}$$

ここで、 E_w 、 E ：水および管材の体積弾性係数、 e ：

管壁の厚さ。

(7) 式から明かなように、充水速度が大きい場合には、空気排除時にはかなりの圧力水頭の上昇が予測される。

圧力上昇の実験的考察

1. 実験装置の概要と方法

実験装置の概要を前出の Fig. 1 に示す。上昇勾配から下降勾配に変化する管径 90 mm のアクリル製透明管路の頂部に $d=5 \text{ mm}$ あるいは $d=3 \text{ mm}$ の孔を設け、これより空気を排除する。その他に実際に市販されている空気弁を設置した場合や、その空気弁の立ち上がり管の途中に、急排用の T 字管を設けた場合についても実験を行った。

空気孔を設けた管の真下に半導体圧力変換器を設置し、その出力をデータレコーダに記録し、A-D 変換した後、計算機で処理する。

2. 実験結果と考察

管路の下流側の制水弁を全閉し、上流側の制水弁を全開して排除孔から管内の空気を排除した時の排除完了瞬間時の最大圧力上昇水頭 H_m とその際の排除孔での静水圧水頭 H_0 との関係を図 2. (a) および (b) に示す。図 (a) は排除孔の大きさ $d=5 \text{ mm}$ を図 (b) は $d=3 \text{ mm}$ の場合を示している。図中に示す理論値とは、充水速度を実測し、(7) 式から得られた圧力上昇値である。いずれの大きさの排除孔とも、実験値と理論値とはほぼ一致しているが、実験値の方がやや小さな値を示している。これは空気排除完了の直前に流水の表面が乱れ、空気と水とが瞬時には置換せず、一時的に空気と水とが混合状態で排出されるためである。排除孔の口径が大きい場合に、大きな圧力上昇を示すのは、充水速度が大きくなるため、当然な結果である。これらのことを考慮しても、空気排除完了の瞬間には (7) 式で表される値に近い圧力上昇が予測される。

このような圧力上昇 H は、(7) 式からも明らかなように、圧力伝播速度 a を一定とするならば、充水速度 V_w と一価的な関係にある。したがって空気排除時の圧力上昇を制御するには V_w が小さくなるように充水すればよいことになる。すなわち

① 管路の管径 D に対して空気排除孔の口径 d を充分小さくする (当然充水時間は長くなる)。ただこの場合には、経験的には管内空気と水との置換がしにくく、管内空気の完全排除が困難になると言われている。

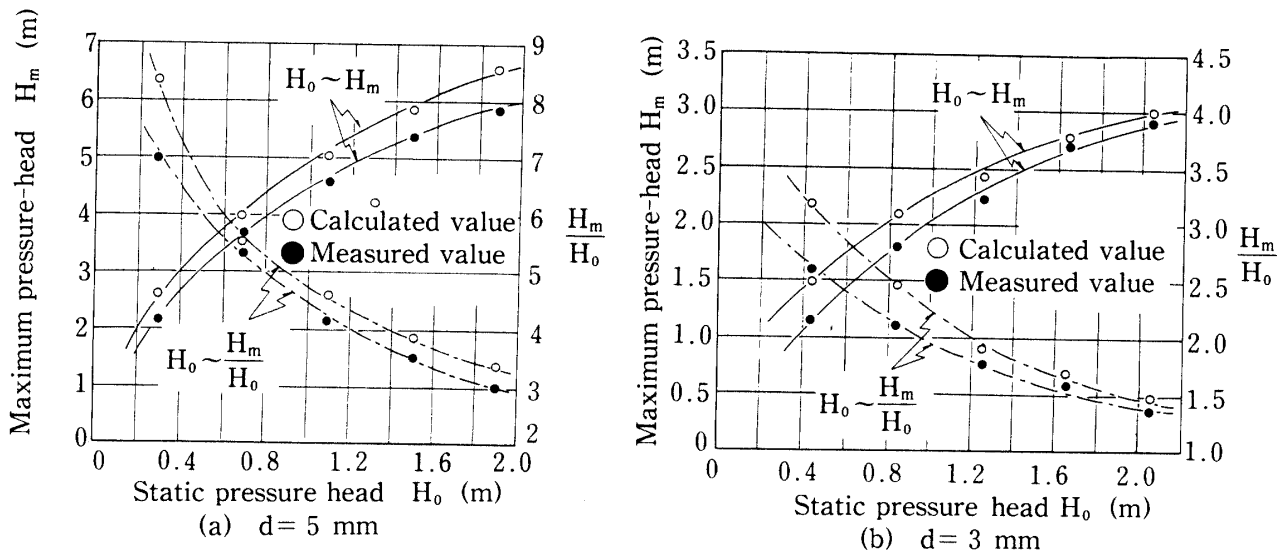


Fig. 2. Relation between maximum pressure head and static pressure head.

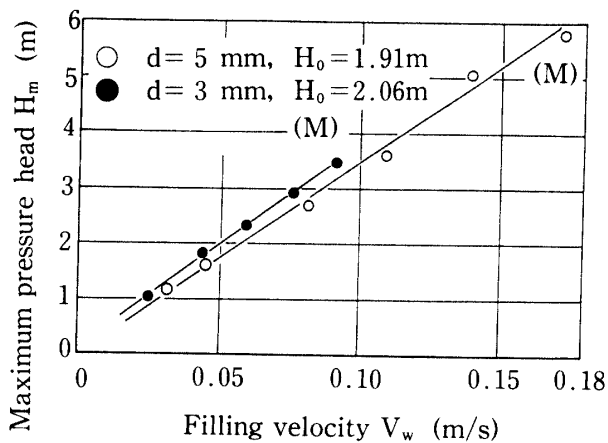


Fig. 3. Relation between maximum pressure head and water filling velocity.

②排除孔付近の圧力水頭 H_0 が小さくなるような充水操作を行う。そのためには上流側の制水弁の開度を小さくする（この場合も、充水時間は長くなる）。Fig. 3は、上流側の制水弁を部分開放して充水速度を制御した場合の、充水速度 V_w と最大圧力上昇水頭 H_m との関係の実験結果を示している。図中の (M) は上流の制水弁を全開した場合を意味している。図から明らかなように、空気排除孔が大きくとも充水速度を制御すれば圧力上昇は抑制され得る。

なお空気孔からの空気排除時には Fig. 4 に例示するように、空気孔付近の圧力の上昇とともに圧力の変動を伴う。その原因は、前述のように空気排除孔からの空気の排除完了時に、接近してくる水流の乱れによって空気の断続的な排除が継続するため

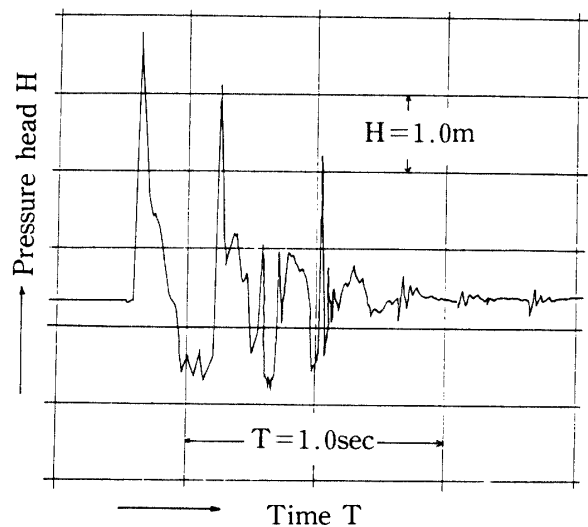


Fig. 4. Pressure fluctuation caused by air release. ($d = 5 \text{ mm}$, $H_0 = 1.91 \text{ m}$)

ある。この圧力変動は管路の振動を誘起し、圧力の上昇とともに管路の破損にもつながり得る現象である。このような圧力の変動を軽減するには水流の乱れが抑えられるような充水速度で行うことが肝要となる。

残留空気の挙動

送水開始時に、管内空気が排除されなかった場合や、排除が完全に行なわれなかった場合の管内残留空気は、管路の高所に停滞する。管路に通水が開始

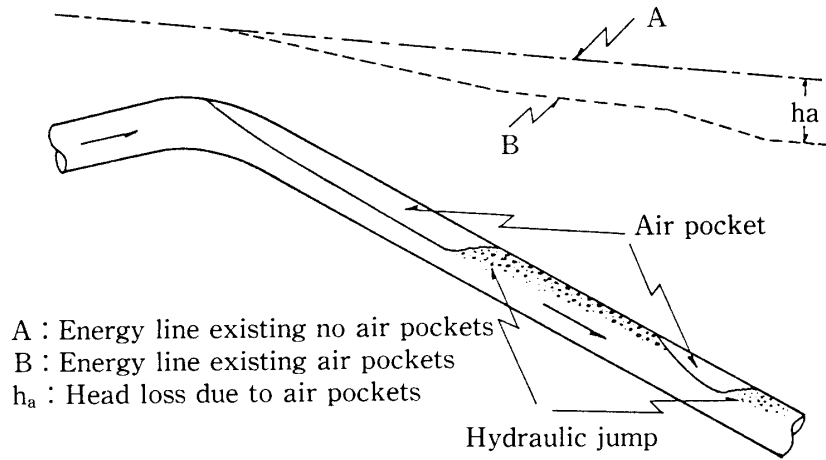


Fig. 5. Air pockets in down sloped pipeline.

された場合には、Fig. 5 に示すように流水によって、管路の頂部から傾斜管に沿ってエアポケットを形成する。その部分では実質的には開水路流と類似な流れとなり、エアポケットの長さの垂直成分に近い水頭損失を引き起こすことになる。このエアポケットがその場所に停滞し続けるかあるいは流水と共に流下してしまうかは管路の諸条件（流速、管径、粗度、下降傾斜管の傾斜角度とその長さ、エアポ

ケットの大きさなど）によって決まる。

エアポケットの下流端ではFig. 5 に示すように一般に跳水などによって水面が乱れ、ポケット内の空気は気泡状をなして流水と共に下流に連行される。跳水によって連行される空気量 Q_a は Fig. 6 (a) および (b) の実験結果で示すように、下降傾斜角度にはほぼ無関係に水の流量 Q_w と、跳水開始点でのフルード数 F_r の大きさによって決まる。すなわち

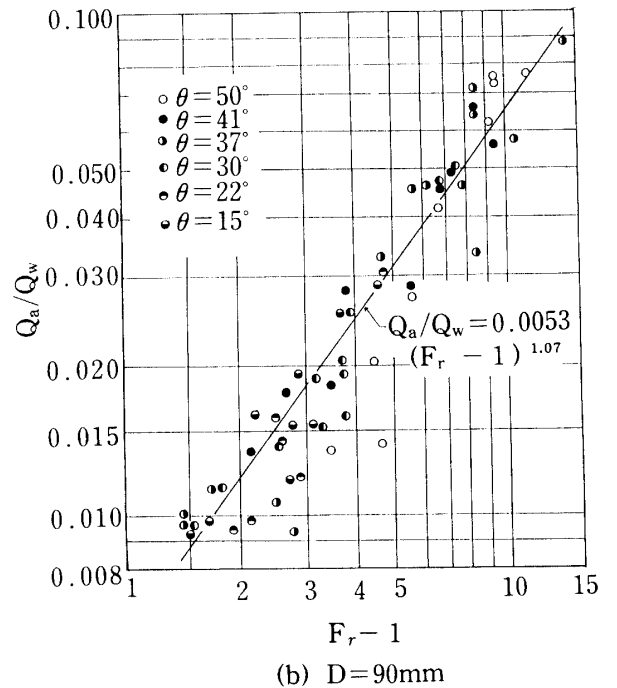
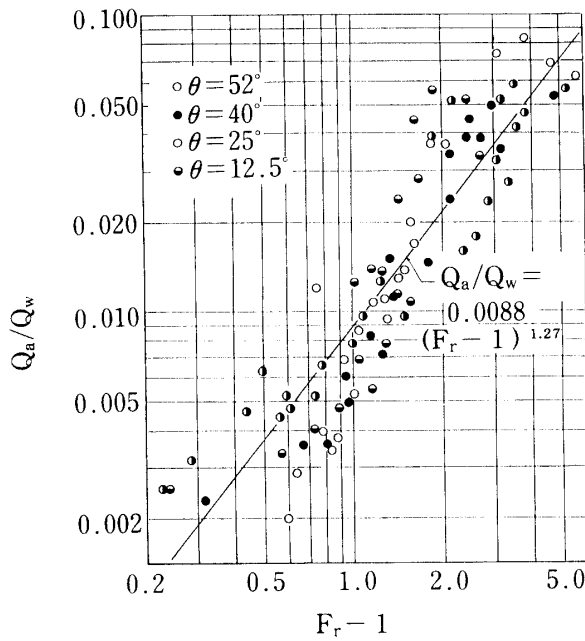


Fig. 6. Relation between entrained air ratio and Froude number at downstream end of air pocket.

管径 $D=140\text{mm}$ では

$$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0088 (F_r - 1)^{1.27} \dots\dots(8)$$

また、管径 $D=90\text{mm}$ では

$$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0053 (F_r - 1)^{1.07} \dots\dots(9)$$

となる。ただしフルード数 F_r は次式で表わす。

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot Y_e}} \dots\dots(10)$$

ここで、 V ：エアポケット下流端での流水の平均流速、 Y_e ：エアポケット下流端の平均水深。

一般式としては

$$\frac{Q_a}{Q_w} = \alpha (F_r - 1)^\beta \dots\dots(11)$$

で表される。式中の係数 α 、 β は管径や粗度、管内圧力などによって定まる値である。

いずれにしても空気連行量はエアポケット下流端のフルード数 F_r に比例するので、空気連行によってエアポケットが小さくなればこれに伴ってフルード数も小さくなり連行量も減少することになる。勾配や流速によっては全ての空気が連行されてエアポケットが消滅することになるが、一般にはエアポケットがある程度小さくなった時点で、これに作用する浮力、抗力、および壁面摩擦の平衡が崩れて跳水を生じつつ、エアポケット全体が下流方向に移動する場合が多い。

一方、跳水によって発生した気泡が、流水と共に下り勾配の管路内を流下出来ない流速や下降傾斜角度的場合には、気泡は流水の方向と逆行し、元のエアポケットと再結合して管内に停滞し続けることになる。その気泡が下降傾斜管内を流下することが出来るかどうかの限界となる流速 V_{\min} は気泡を球形と仮定するならば以下のように表わされる。ある一つの気泡に対する運動方程式は

$$\frac{\pi d^3}{6} \frac{\gamma_a}{g} \frac{dV_a}{dt} = C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{V_w^2}{2g} \gamma_r - \frac{\pi d^3}{6} (\gamma_w - \gamma_a) \sin\theta \dots\dots(12)$$

となる。ここで d ：気泡径、 θ ：下降傾斜角度、 C_D ：抵抗係数（レイノルズ数の関数） V_a 、 V_w ：気泡および水流の速度。

最少流速 V_{\min} は $V_a = 0$ とおいて

$$V_{\min} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \left(1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_w}\right) d \cdot \sin\theta} \dots\dots(13)$$

さらに

$$C = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g}{C_D}}, \quad \frac{\gamma_a}{\gamma_w} \doteq 0 \quad \text{とすれば}$$

$$V_{\min} = C \sqrt{gd \cdot \sin\theta} \dots\dots(14)$$

となる。しかし実験によると気泡径 d は定常的な形状とならず、下り勾配を流下するに伴って気泡が合体し、 d の値を増大させ (12) 式の V_a の値が負となり、管内を逆流し元のエアポケットと再結合してしまうことになる。したがって、傾斜管の長さによって気泡を流下させるに必要な最小流速 V_{\min} の値が大きく異なる結果を示した。また、気泡の大きさには水流の流速、管径、傾斜角度などが複雑に関与し合っており、簡単には決定できるものではない。この点については今後さらに検討を加えたい。

要 約

農業用管路においては通水開始前には管路内の空気を完全に除去しておく必要がある。ここでは空気排除完了時に発生する圧力上昇について、理論的および実験的考察を行った。さらに完全に排除されなかった管内残留空気の挙動についても検討した。得られた結果は次のように要約される。

1. 空気孔からの空気の完全排除の瞬間には、急閉塞の水撃作用と同様な圧力上昇現象が発生する。
2. この空気排除時の大きな圧力上昇を制御するには、充水速度を抑えて排除孔部分の静水圧を制御することである。
3. 排除孔からの空気の排除が完了に近づくと排除孔に接近した水流の乱れにより、空気が断続的に排出されるために、圧力の上昇と同時に圧力の変動を誘起する。これは管路の振動の原因となる。
4. 管内に残留し、エアポケットを形成して管の高所に停滞した空気は、エアポケットの下流端での跳水現象によって流水と共に流下する。その際の連行空気量はエアポケット下流端のフルード数に関与し (11) 式で表される。
5. 気泡が下降傾斜管路を流下するに必要な最小流速 V_{\min} は (14) 式で表わされる。ただ気泡径は傾斜管内を流下する過程で複雑に変化する。

文 献

- 1) Albertson M.L. and Andrews J.S. : Control of Flow in Closed Conduits. p. 315-340, Tullis, Colorado (1971)
- 2) 長 勝史：下降傾斜管内の空気混入流による水頭損失について、鹿大農学術報告, No. 27, 191-197 (1977)
- 3) 椿 東一郎：水理学II, p. 4-5, 森北出版, 東京 (1977)

Summary

Air must be perfectly removed from pipeline. Theoretical and experimental considerations are paid about the rise in pressure head and pressure fluctuation which may be caused by air release from irrigation pipeline. The results are summarized as follows :

1) The instant when air has been removed from pressurized pipe, rise in head is brought forth the same as water hammer is induced due to rapid valve closure.

2) Reduction of high pressure-rise due to air release from pipeline is to be done by controlling the water-filling-velocity and static pressure.

3) Pressure fluctuations are occurred by intermittent air release caused by the agitation of water approaching to air release valve. And the pressure fluctuations lead to vibration of pipe.

4) The remaining air which cannot be completely released from pipeline, forms air pocket at the summit of pipe. And then, the air is entrained by hydraulic jump occurring at downstream-end of the pocket. The ratio of the entrained air and water relates to Froude number at the downstream of the pocket.

5) The minimum velocity by which the air bubbles are to be swept out along the downsloped pipeline, is indicated by eq. (14). But the sizes of air bubbles are quite changeable while they are being swept along the downsloped pipeline.