

管水路流と開水路流の遷移領域における水理特性

長 勝史

(農業水利学研究室)

平成元年8月10日 受理

Hydraulic Characteristics on Transitional Regions of Closed Conduit Flow and Open Channel Flow

Katsushi CHO

(Laboratory of Irrigation and Drainage Engineering)

緒 言

水路を流下する流れは水理学的に管水路流と開水路流に大別される。このいずれの流れの場合も何らかの流況の変化が発生しない限り定常状態を維持し、乱流現象に伴う微細な変動以外は水路内の流速、圧力、水深などに大きな変動は生じないとされている。しかし農業用水路では、開水路流として計画された暗渠、トンネルなどにおいて、流量が増加した場合に一時的に管水路流が生じたり、あるいは管水路流として設計された管路において、流量の低下に伴って開水路流が発生することは、それほど希な水理現象ではない。このようなときは、流れが定常状態であっても管水路流、開水路流いずれとも区別出来ない領域が存在する。さらに流れが非定常状態では、過渡的には管水路流か開水路流か明確に定義出来ない遷移領域を移行する場合がある。

このような管水路流と開水路流の遷移領域では流水に空気が混入して流れは極めて不安定になり、管路の振動の原因ともなるが、このような水理現象の詳細な解明はほとんどなされていないのが現状である。ここでは本現象を実験的にとらえ、その水理学的な特性の解明を試みた。

実験装置と方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。縦80cm×横80cm×高さ70cmの貯水槽から、口径90mmの透明アクリル管を管長440cmに渡って配置した。管路流入口の形状は角形である。管路下流端には流量調整用のバルブを取り付けている。また最末端には流量計測用の三角堰が設置されている。

管路勾配は主に1/100, 1/50および1/25の順勾配とした。貯水槽内の水位観測および三角堰の越流水深の測定はサーボ式水位計およびポイントゲージに

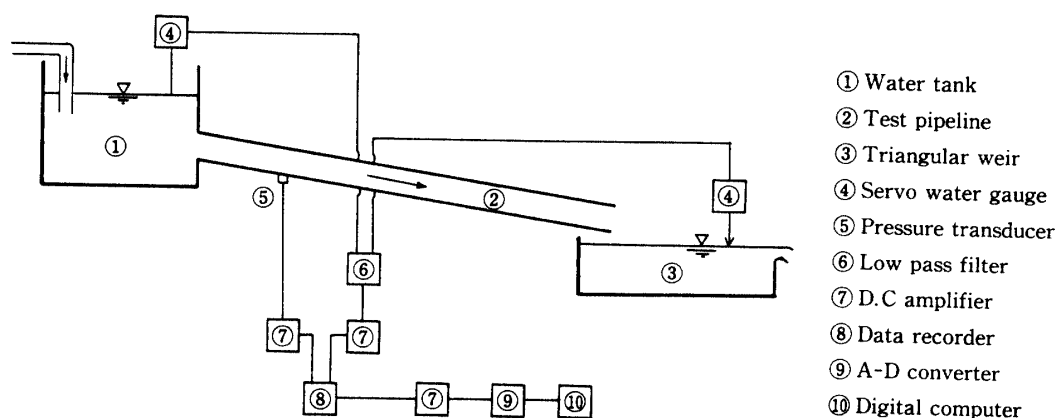


Fig. 1. Experimental setup and block diagram of data reduction system.

よった。管内の圧力測定は、定常状態ではマノメータで、また過渡状態および変動圧力の計測には小型半導体圧力変換器を用いた。管内の流況は写真および目視観測によった。

変動水位、変動圧力は各計測器からの出力をデータレコーダに記録した後、A-D変換器でアナログ量をデジタル量に変換し、計算機で統計的な処理を行った。

実験結果と考察

1. 遷移領域の流況分類

円管内の流れには、Fig. 2の(a)に示すような水路全体に渡って完全に満流して流下する完全管水路流と、同図の(f)のように水路全体に渡って自由水面をもって流れる完全開水路流との間に、いずれの流れにも区分できない流れが存在する。またその管水路流と開水路流の遷移領域にも、貯水槽の水位により幾つかの流況パターンに分類されることが実験によって確認された。すなわち

(1) 気泡流…管水路流を形成する最低貯水槽水位より水位がわずかに低くなり、貯水槽水面に吸い込み渦¹⁾が発生して管内に気泡を連行する流況 (Fig. 2(b))。

(2) 気泡塊流…さらに貯水槽水位が低下して空気連行量が増加し、管内の各所に気泡の塊が生じて、水流と共に流下している流況 (Fig. 2(c))。

(3) 混合流…管内に連行された空気の一部が管内に停滞して自由水面が発生し、その空気塊 (エアー

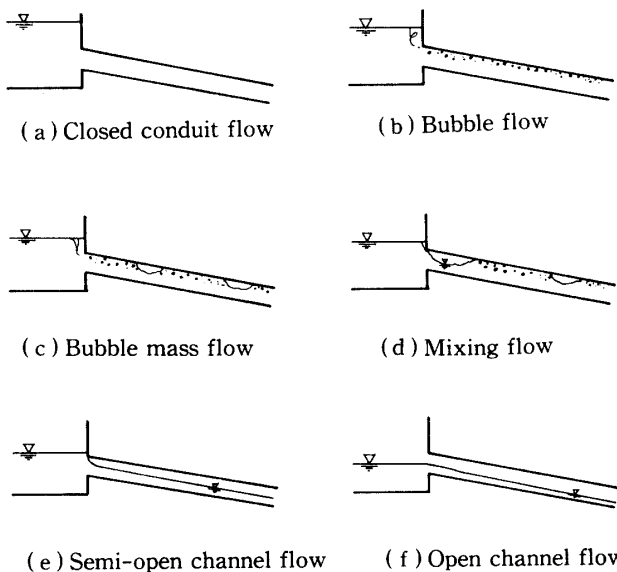


Fig. 2. Classification of pipe flow.

ポケット) の下端流では跳水によって気泡状の空気が生じている流況²⁾ (Fig. 2(d))。

(4) 半開水路流…さらに管内の空気が占める部分が広がり、水路の流入部のみ管水路流で、その後は完全に自由水面を持つ開水路流形式で流下する流況 (Fig. 2(e))。

ただ管路によっては、貯水槽の水位変化に伴って、上記の流況のいずれかが必ず発生するとは限らない。すなわち水路流入部の形状、水路の勾配、管径、管路長などが複雑に関与しあって、いずれかの流況のみが生じる場合もある。また各々の流況の判定は微

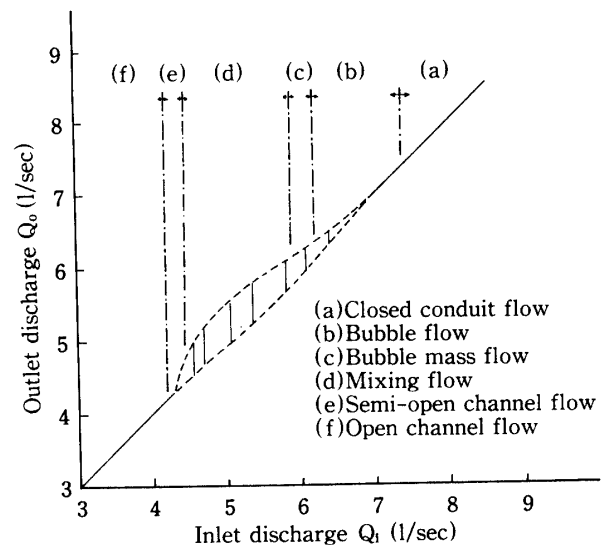


Fig. 3-1. Relation between inlet discharge and outlet discharge in pipe flow ($I=1/50$).

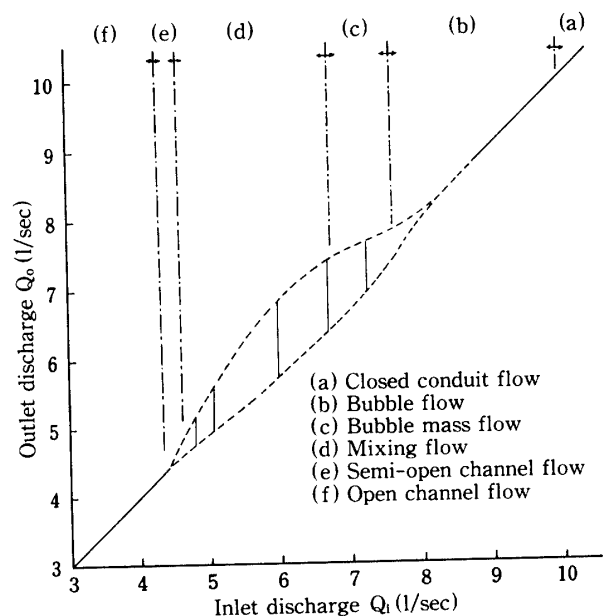


Fig. 3-2. Relation between inlet discharge and outlet discharge in pipe flow ($I=1/25$).

妙でその区別が判然としないこともある。さらにある一つの送水流量に対して複数の流況が周期的に発生することもある。

2. 流況と周期性

本実験装置において、貯水槽への流入量と水路からの流出量との関係の一例を Fig. 3-1 および 2 に示す。図 1 は水路勾配 $I = 1/50$ 、図 2 は $I = 1/25$ の場合である。図から明らかなように遷移領域では流入量と流出量とは、必ずしも一致しておらず、管内に空気を連行して混合流付近の流況になった場合には、管路内への流入量と流出量とに時間的な差が生じる。すなわち流入量が一定の定常状態であるにも係わらず、水路内のある断面の流況が時間的に変化することになる。本水理現象のように流水中に空気塊が混在する場合には、水流のみの場合に比べて流下抵抗が増加して送水流量が低下し、貯水槽の水位が増加する。その結果、管路の送水能力（貯水槽の水位と管路出口の高さとの差）が空気塊の存在する抵抗力を上回り、管内に混在していた空気塊を一気に流下させ、貯水槽の水位が低下すれば管流入口より再び空気の連行が始まり管内に空気塊が発生する。このような状態が繰り返され、周期性のある流況（貯水槽水位の変動や管内圧力の変動）を形成することになる³⁾。Fig. 3-1 と 2 を対比した場合、水路勾配が大きいほど遷移領域での流入流出の変動幅は大きくなっている。これは勾配が大きいほど気泡塊に作用する流水方向の浮力が増大するために空気連行の影響が顕著に現れるためである。このように連行空気量の多い混合流や気泡塊流などの流況の場合、周期性

を持ち易くなるが、この時の発生周期は、管路長、管径、管路勾配、管路流入口形状、貯水槽水面積などによって左右される。本実験条件における卓越周期を Fig. 4 に例示する。流量が少ない場合、すなわち貯水槽の水位が低いほど連行される空気量が増すために周期が長くなっている。また勾配が急になれば、空気に作用する浮力の大きさの関係からやや周期は長くなる。ただ流量が増し、連行空気量が少なくなる気泡流領域などでは卓越周期は明確ではなかった。

3. 流況と管内圧力変動

管内の圧力変動はその流況によって大きく異なり、圧力変動から各流況の特性を明確にすることが可能であると思われる。

ある瞬間圧力 p を、時間的平均圧力 \bar{p} とその変動圧力 p' によって表すならば

$$p = \bar{p} + p' \dots\dots\dots (1)$$

となる。この時間的に不規則かつ偶発的に発生する変動圧力 p' を基に、ある測点での圧力変動の強さを定義する方法として、ここでは離散的にサンプリングされた N 個の変動圧力 p' の平方根 2 乗平均を用いることとする²⁾。すなわち

$$p'^2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2}}{N} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここでは \bar{p} は

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^N p_i}{N} \dots\dots\dots (3)$$

管路内の流況パターンと管路流入口より $L/D=3$ (27cm) の測点における圧力の変動強度 p' との関係を図 5 に示す。この時のサンプリング間隔 $\Delta t = 0.1$ 秒、サンプリング個数 $N=6,000$ (したがってサンプリング時間は 10 分間) で処理している。図から明らかなように流況パターンによって圧力の変動強度に大きな差異が見られる。特に気泡塊流の場合には極めて大きく、流量が大きい時 (平均的流量 $Q=13.0$ l/sec) には完全開水路流の場合の 20 倍以上の値を示している。これは流水中に空気塊がランダムに連行されて、測点を流水のみが通過する場合と

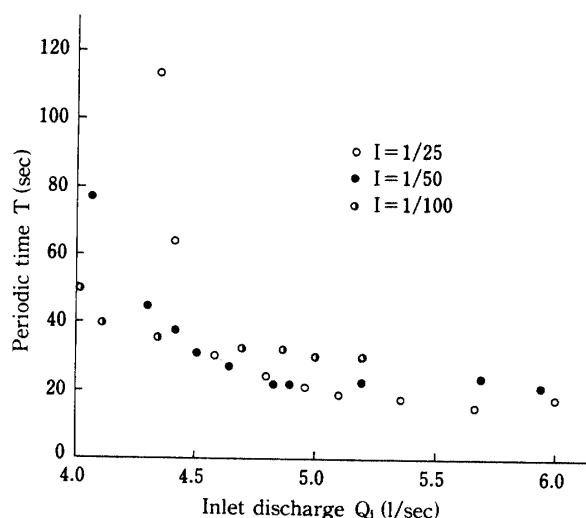


Fig. 4. Relation between periodic time and inlet discharge.

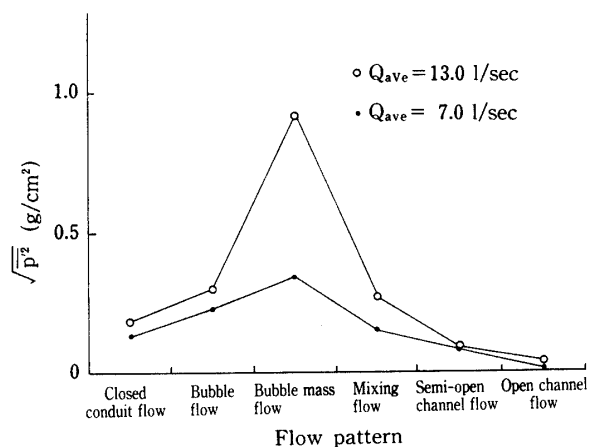


Fig. 5. Relation between intensity of pressure fluctuation and flow pattern.

空気塊が通過する場合とで、絶対的な圧力の値に大きな差が生じるためである。したがってこのような流況の場合には、管路の振動が極めて大きくなることが予測される。当然、送水流量が少なければ（平均的流量 $Q=7.0$ l/sec）同図に示すように変動強度の大きさは軽減するが、気泡塊流の場合に最も大きい値を示す傾向には変りはない。このように流水中の空気塊の存在は乱流現象による圧力変動に比べて極めて大きな圧力変動を誘発する。

4. 流況変更時の過渡現象

前述のように、上流からの流入量が一定の定常状態であっても、管路中では周期性のある非定常流であったり、乱流現象による圧力変動に比べて極めて大きな圧力変動を伴う流況が存在することが明らかになった。ここでは、本実験装置において貯水槽に流入する流量を変更した場合の過渡現象時における流況を考察した。Fig. 6-1 は、完全管路流の状態であった流入量 $Q=11.8$ l/sec を、完全開水路流となる $Q=1.1$ l/sec に、60秒間で変更した場合を、また Fig. 6-2 は逆に $Q=1.1$ l/sec を $Q=11.8$ l/sec に60秒間で変更した場合の貯水槽内水位の時間的変化を示す。

流入量を減少させれば貯水槽の水位は当然低下するが、本実験条件では Fig. 6-1 に示すように、流況変更後2分あたり（流入量の変更は完了している）で低下しつつあった水位が一過的に上昇している様子がうかがえる。また図の2では3分付近で水位が急激に上昇し、流入量の変更は終了したにも係わらず、貯水槽の水位は変化している。これらはいずれも、遷移領域において管内に連行される空気が

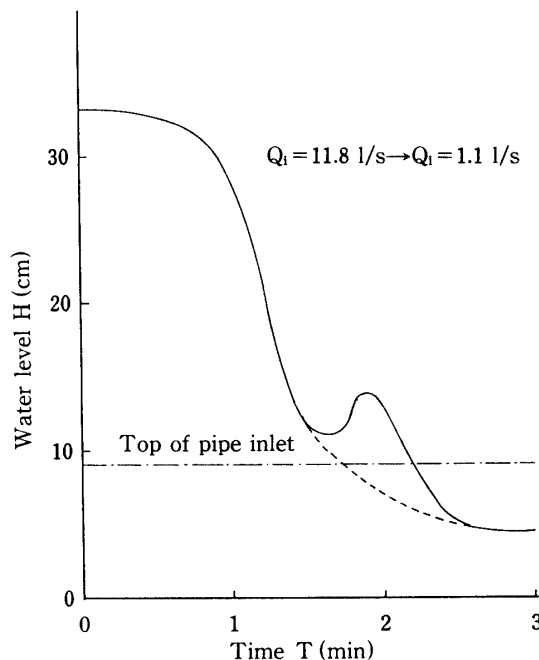


Fig. 6-1. Water level variation due to hydraulic transient. (In case of discharge-decrease).

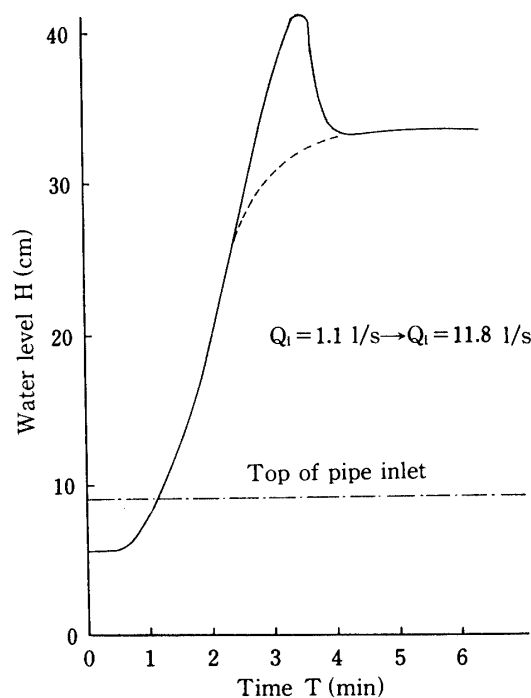


Fig. 6-2. Water level variation due to hydraulic transient. (In case of discharge-increase).

一時的に送水能力を低下させるためである。このような空気連行に伴う送水能力の低下がなければ Fig. 6 に点線で示すような水位変化を示すものと思われる。このような現象は実際問題としては、貯水槽への流入量を小さな流入量から計画流入量に変更した場合に、一過的に高い貯水槽水位を形成することとなり、貯水槽から水が溢れる溢水現象がおこる危険性があることを示唆している。したがって、このような流況が懸念される管路では、貯水槽の設計や水利施設の管理操作に十分な配慮が必要となろう。

以上のように管水路流と開水路流との遷移領域においては流水中の空気存在によって特異な水理現象を呈することが実験によって明らかになった。ただ実際の大きな管路の流れに当てはめる場合には、空気が共存する流れの相似則の不明確さから直接的には適用できない⁴⁾ところもあるが、その定性的な水理特性には変わりはないと判断される。

要 約

管路内の流れは水理学的には管水路流と開水路流に分類されるが、実際にはそのいずれとも区別出来ない領域が存在する。このような領域では空気が混在する流れとなる。一般に空気を連行する流れは、流水中の空気の形状が極めて複雑かつ非定常であるために、その理論的な取り扱いが困難である。し

たがって実験的にその水理学特性を検討した。得られた結果は次のように要約される。

1. 管水路流と開水路流の遷移領域の流況は、流水に連行される空気の量およびその混在状況によって気泡流、気泡塊流、混合流および半開水路流に分類される。ただこのような流況が遷移領域ですべて現れるとは限らず、管径、管路長、管路勾配、管路流入形状などによってその流況の存否が決まる。

2. 混合流付近の流況の場合には流れに周期性が現れ易く、管内圧力や管路流入水槽の水位に卓越周期が見られる。その周期の長さは空気量、管路勾配、管路長などによって決まる。

3. 管水路流と開水路流の遷移領域の流況では、空気の連行によって管内圧力が極めて大きく変動する場合がある。このことは管路の振動の原因となる。

文 献

- 1) 萩原能男：空気吸込渦に関する研究，土木学会論文集，215，15-25（1973）
- 2) 長勝史・河原田礼次郎：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，鹿大農学術報告，No. 39，287-292（1989）
- 3) 日本流体力学会編：流体力学ハンドブック，714-715，東京（1987）
- 4) 本間仁：応用水理学，下 I，55，丸善，東京（1971）

Summary

Flows in pipe are generally classified into closed conduit flow and open channel flow. But practically, there exist flow regions which can not be classified into those flows. Transitional region flow entrains air, and theoretical treatment become very difficult owing to the fact that shapes of air-bubble in flow are quite variable and unsteady. Accordingly hydraulic characteristics of these regions were investigated by experimental approach, and the following conclusions were obtained.

1. Due to the quantity of air entrained the flow patterns at transitional region of closed conduits flow and open channel flow may be classified into bubble flow, bubble mass flow, air-mixing flow and semi-open channel flow. But all of those flow patterns do not always occur at one transitional region, and the kinds and shapes of flow patterns are to be determined by diameter of pipe, length of pipeline, gradient of pipeline, shape of pipe inlet and so on.

2. In case of air-mixing flow pattern and such like, cyclic period is to be brought forth by pressure in pipe and by water level at pipe inlet. The length of cyclic period is to be influenced by quantity of entrained air, gradient of pipeline, length of pipeline and so on.

3. In case of transitional regions of closed conduits flow and open channel flow, high pressure fluctuation occurs due to air entrainment. Pipe vibration may be induced by this fluctuation.