

流入口形態による管内流況特性

Flow Characteristics in a Pipe
with Different Entrance Geometries

宇井 正和* 安川 浩**

By Masakazu UI and Hiroshi YASUKAWA

Flow characteristics and headwater-discharge relations in a pipe with different entrance geometries were investigated experimentally. Bell-mouth shaped inlet and sharpened edged inlet were used. Three types of flow behavior were observed in the flow through bell-mouth entrance, but a flow rate through sharpened edged entrance changed along a hysteresis due to headwater. The headwater level simulation according to inflow rate change using above the relation derived smaller level-variations than experimental results.

Keywords: pipe flow, pulsating flow, bell-mouth

1. まえがき

流入口として、ベルマウスを付けた管路においては、ある流量範囲において満管流れと、開水路流れの混在する pulsating flow が発生する。この流れは、空気を連行することや不規則な圧力変動による管路へのダメージが懸念され、一般に忌避されている。しかし、実験により、この現象の発生領域は管路としての通水能が急激に増大する領域であることが明らかになっている^{1), 2)}。

都市化の急激な進行により降雨の地下浸透が大きく減少し、雨水は河川や下水道に急激に集中する。十分な雨水排水手段の確保が必要なため、下水道の充実や、幹線道路下での巨大な貯留用排水管渠の構築が進められているが、後者などは資金的にも膨大な負担を覚悟しなければならない。管路流入口等の改善によって大幅な通水能の増加が可能であれば既存の下水道管渠に対してもより大きな活用が期待できる。

流入口を持つ管路内流況の研究は、1950年代に米国で進められた。その頃、ハイウェイ建設に伴うカルバートの建設が不可欠であったが、カルバートの流量算定が困難であったことに研究の必要性があった。例えば、流入水頭を管径の数倍与えても満管流ができないことや、管路長によっては急勾配管路でも満管になることがあり、管内流況が推測できなかったためである。

Chow³⁾はカルバートの流れが、流入水位、流入口形状、管路壁面抵抗や下流端水位等に依存すると考え、

* 正会員 東京都立大学工学部助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科

(〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

それぞれの条件に対応して6種類の流況を想定している。また、Li と Patterson⁴⁾ は、管路長や勾配による self priming の発生原因を3種類に分類した。

このような管内流況に関する研究の進展は、管路流入口の改善へと変化した。特に構造が簡単で製作も容易な hood inlet は、Soil Conservation Service の支援を受けて広く研究された⁵⁾。それは hood inlet を用いた管路では流入水位が inlet の頂部近傍でも管路を満管にし得る特性を有し、管内流況が把握しやすいためであった。

ベルマウス型流入口も hood inlet に近い流入特性を有しているが、その詳細はまだ研究されていない。また、今までの研究では、定常的な水理特性を調べることのみで流量変動に対する管路の応答特性に付いては、ほとんどなされていない。ここではベルマウス型と角端型流入口の静的な水理特性を実験的に調べると共に流入流量の変動に対する流入水位変化をシミュレートし、実験結果と比較した。

2. 実験装置

実験装置を図-1に示す。

可変勾配架台上に内径10cm長さ1mの亚克力製管路を9本継ぎ、直線性が0.2mm以内になるようセットした。管路上流端は、計量用三角堰を通過した流れをうける整流水槽に蛇腹を通して接続し管路勾配変化に対応できるようにした。

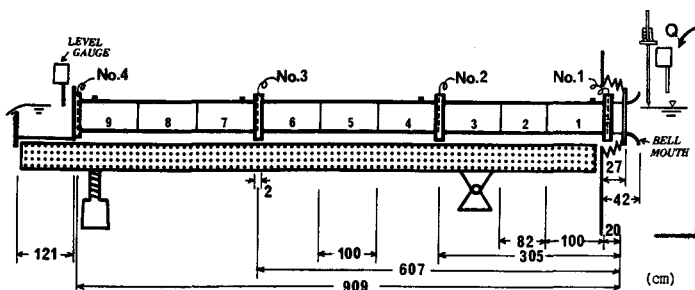


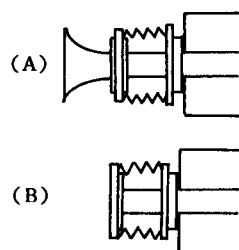
図-1 実験装置

又管路下流端にもゲート付き整流水槽を付け、ゲートの開度によって下流端水位が常に一定になるよう調節した。流入口としては長径15cm、短径5cmの回転楕円体より作られたベルマウスをつける場合と、付けないで角端型と見なしたときの2種類を用いた(図-2)。管路内には、上流側より20cmの地点、および3番管路、6番管路、9番管路の4箇所に管路用抵抗線式水位計を取り付けた。また上流側と下流側の両整流水槽には水面追針式のサーボ水位計を取り付け、両水槽の水面変化を記録した。

3. 実験結果と検討

3.1 ベルマウス型流入口

実験では、三角堰の越流水深を与え、管路系全体が定常になってから流入水位と流量、および各部の計測を行った。図-3は流入口にベルマウスが付いたときの流入水位と管内流量の関係を示したものである。流入水位とは流入口底面を基準面として測った水位である。図中右側の曲線群は管路勾配が、1/131、1/100、1/70、及び 1/47 に対するものである。この図から、流入水位-流量特性が3つの区間に分けられることに気づく。すなわち流量が少ないA-B区間、流量増加率の急なB-C区間、および管路勾配毎に分離して立ち上がるC-D区間である。



(A) ベルマウス型
(B) 角端型

図-2 流入口形態

3.1.1 区間A-B

A-B区間の特徴は、測定データが管路勾配の差異に関わらず、一本の曲線にのっていることである。これは管内流量Qが、管路それ自体には無関係で、流入口近傍の水理的特性、すなわち限界水深に依存していると推測することができる。流入水位の基準面と、限界水深をとる支配断面

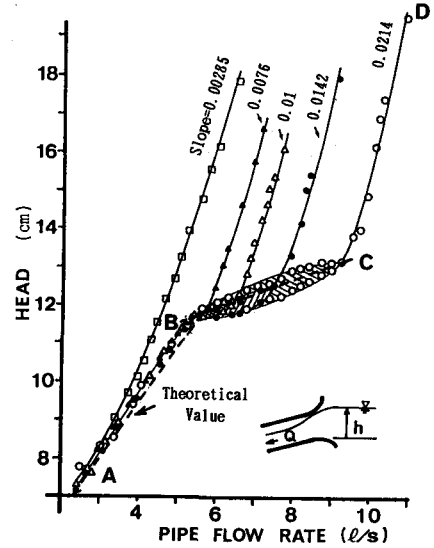
の底部がほとんど等しいと仮定すると、比エネルギー（ E ）の関係式より（１）、（２）が得られる。

$$h(=E) = \frac{A_c}{2B_c} + h_c \quad (1)$$

$$Q^2 = g \frac{A_c^3}{B_c} \quad (2)$$

ここに A_c 、 B_c 、 h_c は限界状態における流水断面積、水面幅、及び水深で、 g は重力加速度である。上式より流入水位 h を与えたときの管内流量 Q を求めることができる。図中 A－B 区間内の実線は上式より得たものであるが、データとの一致は管内流量が限界水深に支配されていることを証明している。

B 点の位置は、図より流入水位 $h = 11.5 \text{ cm}$ ($h/d = 1.15$)、管内流量 $Q = 5.5 (\text{l})$ とした。Chow は角端型流入口が水没しない最大の流入水深を限界値として定義し、 $1.2d \sim 1.5d$ を与えているが、B 点も同様の意味を有すると考えられ、角端型に近い水位となることに注意を引かれる。



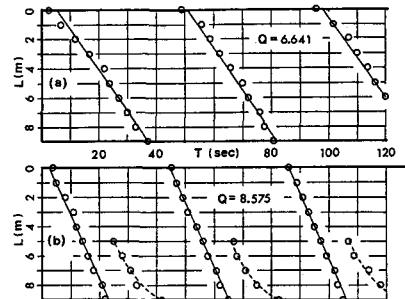
図－３ 水位－流量特性（ベルマウス付）

3.1.2 区間 B－C

流入水位（あるいは管内流量）が B 点を越える辺りは、流れ込む水面がベルマウス頂部に非常に接近するが、このときの流量に対する限界水深は未だ 7 cm 程度であるから、管内は十分に開水路状態を保ち得る範囲である。しかし、僅かの流量増加により流入水面がベルマウス頂部に接触すると、そこから満管流れが伸長してくる。伸長している間は流入水位が 3 mm～5 mm 上昇するが、満管流れが適当な長さになると、ベルマウスの頂部に小さな空気孔が開き、空気を連行し始める。空気はベルマウス直後に集められエア・ポケットを形成するが、それは次第に増大して長くなり開水路流れと見なせる程成長する。開水路部の先端は移動跳水の形状をして満管流れとなり下流へと移動する。この間、管内への流入流量の、わずかな増大のため、水位は降下していくが、適当な水位に達するとベルマウス頂部の空気孔が消滅し、水面が頂部に接触する。そして再び満管流れが伸長を始める。この様な満管流れと開水路流れの混在流を、slug flow あるいは、pulsating flow と呼び、空気圧の変化による管路へのダメージが強く、一般に避けるべき流況とされている。

(a) Pulsating Flow の周期

領域 B－C は、この様に満管流れと、開水路流れが周期的に発生する領域である。満管部と開水路部の長さや周期は流量に依存する。図－４は管路勾配が $1/47$ の場合の満管部先端の移動状況を流量別に図化したものである。流量が少ない方が満管の発生する周期が長く、また移動速度も遅いことがわかる。すなわち流量の少ない間は、満管部が長くは伸びず、すぐに開水路部が発達するが、流量が増すにつれて、満管部の占める割合が多くなり、周期は短くなる。しかし、周期は上流側の貯水池の容量や発生機構にも依存し、貯水池の容量が十分大きければ、pulsating flow は発生しないことが予想される。



図－４ 満管部境界面の移動

(b) 管路勾配と Pulsating Flow の発生

図－３の左側の曲線は、管路勾配が $1/350$ の緩勾配における

水位－流量曲線である。この曲線は急勾配での曲線（右側の曲線群）とは異なり単調な増加曲線であり、pulsating flow は発生していない。図－5 は管路勾配に対する pulsating flow の発生する流量をプロットしたものである。発生に関わる流量は管路勾配が緩やかになるほど範囲が狭くなり、勾配が約 6×10^{-3} 以下では発生しないことを示している。発生領域の中で、最少流量は管路勾配に依存しないためかほとんど変化しないが、最大流量に関しては、一本の曲線上に乗っており、この曲線は等流水深がちょうど管径 d とした時のマンニングの平均流量公式（3）と一致している。

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (3)$$

したがって、pulsating flow の発生の上限限界は、その管路勾配における等流水深が管径 d と等しくなる流量であることが解る（（3）式はメートル単位）。

領域 B－C は、与えられた流量に対して、水位変動が極めて小さいが、平均的に水位－流量特性を考えると、直線近似が最も合理的と見える。ここでは毎秒当たり、

$$Q(l) = 2.5h(\text{cm}) - 23.5 \quad (4)$$

と近似した。

3.1.3 区間 C－D

C－D 区間での流れは全て満管流れとなるので、管路全体が流れを支配しているといえる。即ち、管内流れは、管路上下流端での水頭差（ H ）と、壁面摩擦損失、流入損失および流出損失などによって（5）式で決定される。

$$H = \left(f_e + f_o + f \frac{l}{d} \right) \frac{Q^2}{2gA_o^2} \quad (5)$$

ここで、 A_o は管路断面積、 f_e は流入損失係数、 f_o は流出損失係数、 f は摩擦損失係数である。図－6 は図－3 中の各管路勾配に対応した C－D 区間の曲線を流入水位（ h ）ではなく、全水頭（ H ）と対応させたものである。図より各データが全て同一の曲線に乗り、一つの流量特性に従っていることが読み取れる。

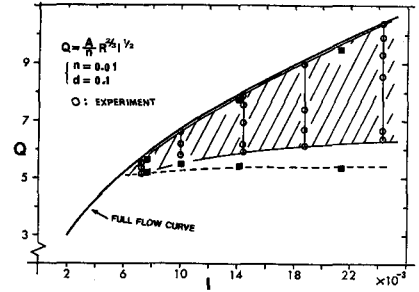
ベルマウスの場合、流入損失係数 $f_e = 0$ 、流出損失係数 $f_o = 1$ とし、また摩擦損失係数 f は管内流のレイノルズ数と関係するので（6）式より求めた。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log(R_o \sqrt{f}) - 0.8 \quad (6)$$

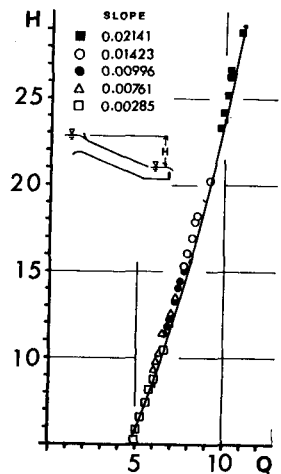
図の実線より、C－D 区間の水位－流量特性が、（5）式に従っていることが確認された。

3.2 角端型流入口

図－7 は角端型流入口の場合の水位流量特性である。流量の増加に伴い、流入水位は図中左側の曲線 AB に沿って増加していくが、満管になった後、流量が減少すると、曲線 BC に沿って降下する。C 点に達すると空気の連行により管内にエアポケットが発生し、水位変動の少ない CD 曲線に沿うが、管路全体が開水路状態に達すると CD 曲線上の点から、急に E 点に移り、水位は不連続に上昇する。その後の流量減少に対しては、AB 曲線に沿って降下する。角端型流入口の特徴は、水位－流量曲線が履歴曲線をとることである。



図－5 管路勾配と Pulsating Flow



図－6 全水頭 と 流量

3.2.1 区間 A-B

印●■で表したデータは、管路勾配がそれぞれ 1/100 と 1/50 において流量が増加するときの特性である。△印は Zech⁶⁾ 等による直径 14.4cm 長さ約 13m で、2 本のマンホール付き管路での特性であるが、図は比較のため水位は管径 d 、流量は $\sqrt{gd}d^2$ で無次元化して表示した。両結果ともによく合致し、この水位-流量特性が、管径に依存しない一般的特性であることが解る。さらに管路勾配の差異に関係なく一本の曲線上に乗っていることから管内流量が流入口で支配されていると推測できる。曲線は $h/d = 1.2$ ($Q/\sqrt{gd^5} = 0.5$) 近傍で変曲点を有しているが、流入状況はこの点以下では限界流、以上ではオリフィスの流入になっているように観察された。B 点近傍での満管への移行は、Chow や Li と Patterson が self priming 現象の一つとして説明するように、S 3 型水面形の上昇水面が管頂に接触することによって生ずることが実験的にも確認された。

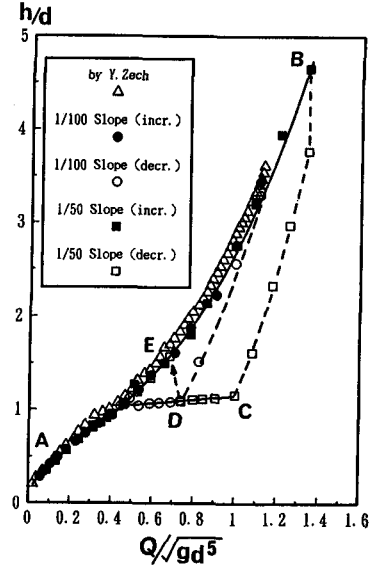


図-7 水位-流量特性(角端型)

3.2.2 区間 B-C

管路が満管になった後、流量が減少すると、水位は曲線 B-C に沿って降下する。この降下は流入水位が流入口頂部 (C 点) に近づき、空気を吸い込むようになるまで続く。従って、この領域での流量コントロールは、管路全体に依存し、流量は (5) 式から得られる。角端型の場合は、ベルマウス型とは異なり流入口による損失が大きいため、(5) 式の流入損失係数 f_e を決める必要がある。図-8 の●印は図-7 の水位-流量曲線の B-C 区間を、全水頭 H によりプロットし直したものであるが、他の印は、(5) 式の f_e を変えたときの変化である。図よりこの流入口に対して、 $f_e = 0.8$ が最適と考えられる。

3.2.3 区間 C-D

空気の連行が始まると、管路上流側にエア・ポケットが形成され、流量変化に比べ水位の変化は極めて小さくなる。このエア・ポケットが拡大し、最後に管路全体が開水路になると流入水位は急に上昇し、A-B 区間の E 点に飛び移る。又エア・ポケットが大きくなりえない僅かの区間に、pulsating flow が発生することも観察されている。ベルマウス型と同様に、C-D 区間の水位-流量特性を直線と見なし、ここでは次式を適用した。

$$Q(l) = 4 \times h(cm) - 36 \quad (7)$$

それ故、水位降下時に、空気の連行の始まる位置は、上記直線と各管路勾配での水位-流量曲線との交点で得られる。しかし、いつエア・ポケットが抜けて開水路になるかは特定することは出来ない。

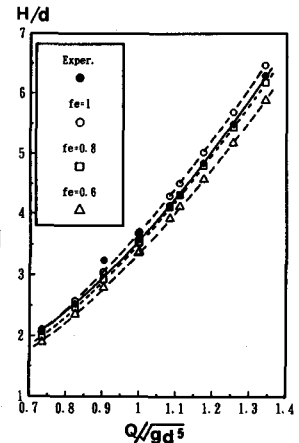


図-8 水位-流量曲線

4. 流量変化による水位変動

以上のように、外部からの流入量が定常であるときの水位-流量特性は、ベルマウス型及び角端型に付いて、実験的に得ることが出来た。しかし、豪雨時での都市河川や、あるいは下水管渠のマンホールのように、急激な水位(あるいは流入量)変化が生じた場合、前記のような定常流から得られた特性がどの程度有効かは極めて不安である。

そこで、検定水槽から非定常な流量を供給した時の整流水槽内水位変動を実測すると共に、前述の静的な水位-流量特性を用いて計算した水位変化と比較した。

図-9での曲線はベルマウス付き管路での計測値②と計算値③である。曲線①は検定水槽での越流水深の変化で、グラフは変化量のみを示し原点は移動してある。初期越流水深は10.142cmであり、バルブを開けて約3.7cm上がるまで流量を増した。整流水槽の初期流入水位は10.55cmであった。シミュレーションの結果は破線で示したものであり、実験結果と比べかなり低い値になっている。このことは実際には、非定常な流入量変化に対して管内流量が速やかに対応せずに増加しないため、整流水槽内水位が増すものと考えられる。角端型の場合には定常状態においても、管路を満管にさせるには管径の3~5倍の水位が必要である。それゆえ非定常な流入量に対しては、極めて大きな水位上昇が予想され、マンホール等では、この効果が特に顕著ではないかと考えられる。

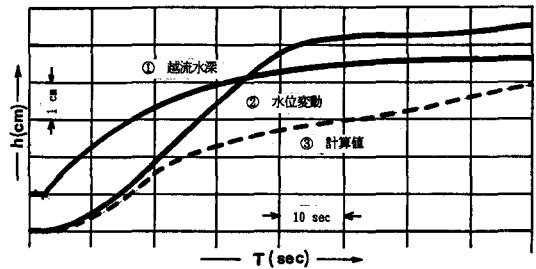


図-9 水位変化の比較

5. まとめ

管路流入口としてベルマウス型と角端型を用い、水位-流量特性を実験的に調べ、その特性を非定常流量に適用して、流入水位変動のシミュレーションをし、実験結果と比較した。

ベルマウス付きの場合は、流入水位の低い区間では流入口での限界状態が、高い区間では管路両端の全水頭とエネルギー損失が管内流をコントロールし、またその中間では pulsating flow が発生し、通水能の急激に増大する領域の存在することが明らかになった。

角端型での水位-流量特性はベルマウス型と比べ、全体的に管内流量が極めて少なく、管径の3~5倍の水頭が必要になる。満管になるまでの間に self priming の発生領域はなく、満管への移行も偶然性を含んでいる。流量が減少するときは、別の水位-流量特性に従い、全体として履歴曲線となる。

上記の静的な水位-流量特性を用いた水位変動シミュレーションは、実際の水位変動より極めて少なく見積もり、危険側の結果を導いている。

6. 参考文献

- 1) Yasukawa, H. and M. U: On The Phenomenon of Self-Priming in Circular Conduit, 7th Congress of APD-IAHR, Nov. 1990.
- 2) 安川 浩・宇井 正和: 流入口形態による満管流れ近傍の特性, 土木学会第47回年次講演会, 1992.
- 3) Chow, V.T.: Open-Channel Hydraulics, McGRAW-HILL, 1959.
- 4) Li, W.H. and C.C. Patterson: Free outlets and self-priming action of culverts, paper 1009, Proceeding, ASCE, Vol.82, No. HY3, PP.1-22, June 1956.
- 5) Blaisdell, F.W.: HOOD INLET FOR CLOSED CONDUIT SPILLWAYS, Proceeding, ASCE, Vol.86, No. HY5, May 1960.
- 6) Zech, Y., C. Delmee-Willemsens, J.F. Dewandre and J.L. Jacquemart: Instability problems in Urban Storm Sewers, 3rd International Conference on URBAN STORM DRAINAGE, 1984.