

緩勾配管路における管・開水路遷移の特性

東京都立大学大学院 正会員 宇井正和

1. はじめに

筆者は、カルバートや下水管渠内での水流解析においてもっとも重要な課題は管・開水路遷移現象の解明と考え、急勾配管路を用いてその特性を調べてきた。そしてその遷移が管口形状に大きく関わっていることを指摘すると共に流入水位と管内流量との関係を説明してきた¹⁾。しかし、緩勾配管路での遷移がどのように移行するのかは、他の研究者からの報告もなされていない。ここでは、管路両端の水位および流入量を調節して、管・開水路流れ相互の遷移特性を実験的に明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置

実験装置は可傾台の上に直径 10cm、長さ 1m のアクリル製管路を 14 本連結させたものである。管口にはベルマウスを付け滑らかな流入を期待した。管路下流端はゲート付き整流水槽に接続され、ゲート高調節によって管路下流端水位条件を変化させることができる。また、管路内での圧力変化を計測するために、管路底を 1m おきにビニールチューブでマンメータへ導き、写真撮影によって記録した。流入量および上流側整流水槽の流入水位の計測にはサーボ式水位計とポイントゲージを用いている。実験では、所定の勾配に対し計量水槽から既知流量を供給し、管路内の流況を観察すると共に、水位変化等を計測した。

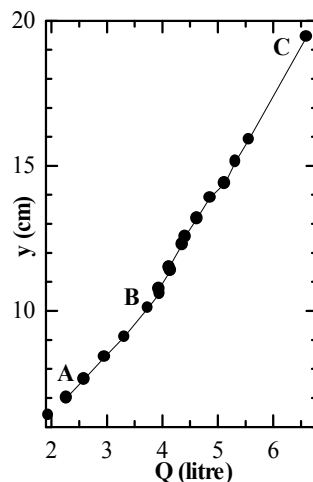


図-1 流入水位と管内流量

3. 実験結果

図-1 は管路勾配 1/400 における流入水位と管内流量との関係である。角端型流入口付き急勾配管路における履歴特性とは異なり、流量が増減しても流入水位は単調曲線上を変化するため両者に一意的な関係が存在する。管路下流端を自由放流にした場合の管路流れへの移行状況は、流入量を増すに連れて流入水位は管口を閉塞する水位に近づくが、同時に管路内水位も上昇し、開水路上部は細くなり狭い空気の道のようなになる。その後空気道は分離されて泡状で流下していくが、それはそこが満管流れに移ったことの証左とした。



図-2 遷移点における流況

この満管流れは管路途中で急に管頂から離れ、不等流水面形として下流端へと低下していく。この遷移点は流量を増すにつれて下流側へと移動し、最終的に全管が満管流となる。(図-2 参照)。

ゲートによって管路端水位を上げておき、流量を増して全管を満管にした場合には、流入量が多い範囲ではゲートを降下させても管路端から満管流が放出される。しかし、適当な流入量においてはキャビティが管路下流端から遡上し、管路途中で静止することになる。このような管・開水路共存流れにおける圧力水頭の特性に関しては鮎川²⁾らの研究がある。又、さらにゲートを降下させるか、流量を減少さ

せると管路流入口からエアーが連行される。この連行では空気厚を $ha/d=0.2$ 程度に保ちつつ高速で下流側へ送られ、途中のキャビティと合流し全管が開水路状態へ移行変わることになる。

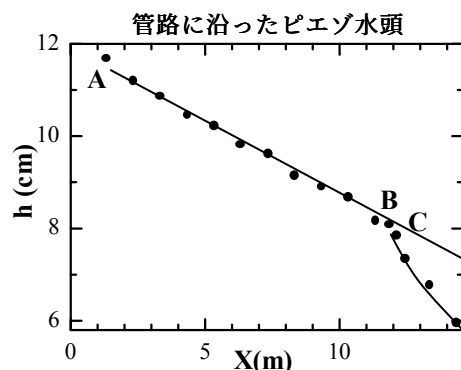


図-3 管路のピエゾ水頭

キーワード 管路、遷移流

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 TEL 0426-77-1111

図-2 は管・開水路遷移時での流況を示したものである。遷移点両側での水頭差を確認するため、管路に沿うピエゾ水頭を示したものが図-3 である。図中の A～B までは満管状態でのピエゾ水頭であるから、それらを結んだ線は管路内動水勾配線を示すことになる。B 点と C 点は管・開水路境界面がその間にあるため、圧力の不連続さを確認しうるものとなる。実際には B 点直後に水位が $h/d \approx 0.7$ に急落しているものの、その下流側で脈動が存在しているため計測点 C での水位はその特徴を示してはいない。C～D は開水路流れであり、C 点より管路下流端の限界水深へと変化していく。従ってその水面勾配は A～B 間の動水勾配とは異なっている。図-4 は流入量に対する満管領域の長さを実験から得たものである。横軸は管口からの距離であり、縦軸は流量である。計測結果を最小自乗法で近似し実線で示してある。従って、ある流量に対してこの曲線の左側の部分が満管流れであり、右側が開水路流れの領域と解釈できる。左端の○印より少ない流量 ($Q \leq 0.37$) に対して管路は常に開水路状態であり、又 $Q \geq 0.47$ に対しては常に満管状態で流れる。

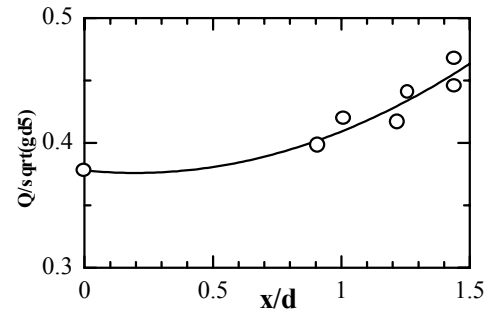


図-4 満管領域の長さ

図-4 は流入量に対する満管領域の長さを実験から得たものである。横軸は管口からの距離であり、縦軸は流量である。計測結果を最小自乗法で近似し実線で示してある。従って、ある流量に対してこの曲線の左側の部分が満管流れであり、右側が開水路流れの領域と解釈できる。左端の○印より少ない流量 ($Q \leq 0.37$) に対して管路は常に開水路状態であり、又 $Q \geq 0.47$ に対しては常に満管状態で流れる。

4. 満管流れの長さの算定式

上記のような管・開水路共存時における満管流の長さは以下のようにして計算することが出来る。

管路上流側の満管の領域を図-5 のように三つの領域に区分する。上流側領域では水槽水面と管口頂部の間にベルヌイの式を適用させる。

$$E = \frac{u_1^2}{2g} + d + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{Q_1^2}{2gA^2} + d + \frac{p_1}{\rho g} \quad 1)$$

領域 II の断面 I と II に囲まれた区間に運動量の式を適用すると以下のようになる。

$$P_1 - P_2 + (p_1 - p_2)A = (S_0 - S_f)\ell A \quad 2)$$

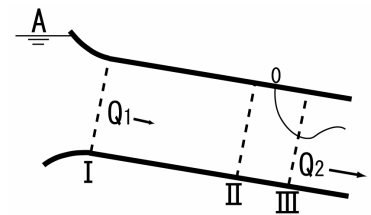


図-5 計算領域の区分

さらに境界面の条件として Benjamin³⁾の理論を応用して、断面 II の頂部と止水点にベルヌイの式を、さらに開水路流れの水深は相対座標上での限界水深を取るものと仮定する。

$$\frac{u_2^2}{2g} + d + \frac{p_2}{\rho g} = d + \frac{p_0}{\rho g}, \quad \rho Q(u_2 - u_3) = P_2 - P_3 + (p_2 - p_0)A \quad 3)$$

上記一連の式より、 E と Q と ℓ との関係が得られる。

5. まとめ

緩勾配管路における管路流れへまたは開水路流れへの遷移の特性を実験的に検討した。まず、流入水位と管内流量との関係は単調な曲線に沿うものであり、両者は一意的に関連している。流量変動に基づく流入水位の増加に対して、管路は上流から管路流れへと移行する。しかし、管・開水路境界面は不連続を保ちつつ下流へと移動する。満管状態で流れている管路において下流端水位が降下する場合は、管内流量に対応してキャビティが遡上する。さらに流量を減少させると管口側からエアが連行され、それがキャビティと合流して開水路流れへの急速な移行現象が生じる。また、これらの管・開水路共存時における両者の長さの計算法を提案した。

参考文献

1. 宇井正和、角端型流入口を有する急勾配管路における管・開水路遷移と履歴特性、水工学論文集、第 46 巻、2002、pp851-856
2. 鮎川、鈴木；管路の流れから開水路の流れに遷移する円管路の定常流の解析、土木学会第 55 回年講、2000
3. Benjamin, T.B., Gravity currents and related phenomena, J.F.M., Vol.33, part2, 1968