

角端型流入口を有する急勾配管路における 管・開水路遷移流れの理論的考察

東京都立大学大学院 正会員 宇井正和
東京都立大学大学院 正会員 安川 浩
日本工営 (株) 坪井薫正

1. はじめに

角端型流入口の付いた下水管渠やカルバート等における流入水位と流量との関係は図-1 に示すような履歴特性を有することが知られている^{1),2)}。これらの履歴曲線上での管路内流況については筆者らの実験結果等を報告してきたが^{2),3)}、特に開水路流れから管路流れ、あるいはその逆の遷移は流況が複雑なため、理論的説明や定式化がほとんどなされて来なかった。

昨今都市部の有効利用や再開発のために極めて急勾配の雨水管路も計画されてきており、そのような管路やマンホールでの流況や衝撃的圧力の予測が要求されてきている。ここでは1/40 急勾配管路での実験的観察を基にし、その流況の定式化を試み良好な結果を得たので報告する。

2. 実験概要

実験は管径10cm、長さ14.6m のアクリル製管路を用い、勾配を1/40 に設定し一定流量を与えながらその時の流入水位と管内流況を計測したものである。件の雨水管路はより急勾配を要求されているが、ここでの実験用水路の有効限界勾配である1/40 を用いての計測結果と、過去の実験結果を比較しながら検討するものである。

3. 流量増加時の流況と定式化

管口閉塞後の流量増加に対する流量と流入水位との関係は図-1 の区間BCに沿って変化していく。この区間では開水路流れから、エアを排出しながら管路流れとなるまでの遷移流況を呈す。管口ではオリフィス的な流入のため流入断面は円形となるが、それが管底に触れて最小断面を取った後、S3 の不等流水面形に沿って等流水深へと漸近する。

従って、まずこの最小断面を決定することが可能であれば、その流れを特定することができる。図-2 に示すように、管口底部からの水槽水位を E とし、縮流による最小断面“c”での水深を y_c としたとき、両点にベルヌーイの式を、又管口部前面での断面“I”と断面“c”間に運動量の式を適用する。

$$E = (\alpha + f_e) \frac{v^2}{2g} + y_c + \frac{p_0}{\rho g} \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho Q v_c = P_1 - P_c - p_0 A = \rho g A \left(E - \frac{d}{2} \right) - p_0 A - P_c \dots\dots\dots (2)$$

ここで f_e は管口部での損失を総合したものである。 Q は流量、 A は管路断面積であり、 P は流水断面に作用する水圧の合力である。 P_c は水深 y_c の関数であるから式 (1)、(2) より $E - p_0/\rho g$ を消去した次式

より y_c を決定することが出来る。

$$y_c - \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{2} - \frac{A_c}{A} \right) v_c^2 - \frac{P_c}{A} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

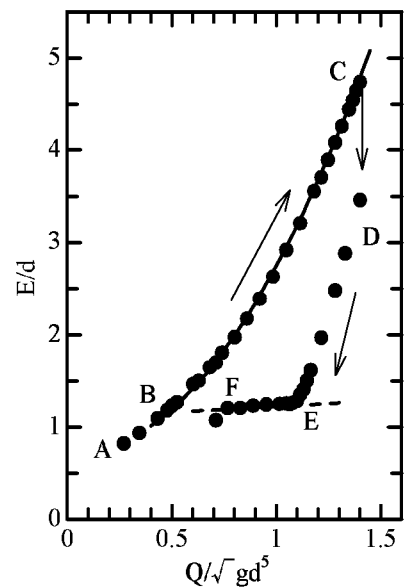


図-1 流量と流入水位

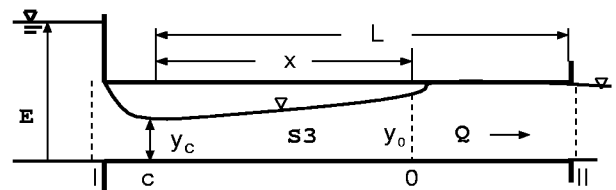


図-2 管内流概念図

さらに (1) 式を用いて流量 Q に対応する流入水位 E が決めることが出来る。図-1 において区間 BC での実線は $p_0 = 0$ として導いた $Q - E$ 関係曲線である。曲線上 C の近傍はエアーを閉じこめた被圧流であるが極めてよく合致しているのが解る。

4. 流量減少時の流況と定式化

図-1 の区間 EF は流量減少に伴い被圧状態で流れていた管路の管口からエアーの連行が始まり、被圧部を下流側に押しやりつつエアーポケットが伸張し、最終的に全管が開水路状態になるまでの区間である。ここでの流入はオリフィスの流入とは異なるが、流量増加時と同様に、まず (3) 式で決まる最小断面を経た後に S3 の不等流水面形にそって変化し、その水面上の適当な水深から跳水して被圧状態の流れに移移するものとする (図-2 参照)。どの水深で跳水するかはエアーポケット内の空気圧 p_0 と、被圧流部の長さに依存すると考えられる。

まず空気圧 p_0 は運動エネルギーに比例するものとし、履歴曲線の中で同一の流量に対応した区間 BC と EF の差が管内圧 p_0 であると考えて、対応する運動エネルギーと比較したのが図-3 である。その結果空気圧 p_0 を下記のように表せることが確認された。

$$\begin{aligned} -\frac{p_0}{\rho g d} &= 2.5 \frac{v^2}{2 g d} - 0.5 & \text{for } \frac{V^2}{2 g d} \leq 0.983 \\ &= 1.95 & \text{for } \frac{V^2}{2 g d} > 0.983 \end{aligned}$$

跳水するまでの距離を χ とし、跳水の長さを無視すると被圧流の長さは $l - \chi$ で表せる。跳水が S3 水面形のある断面で発生するものとし、その断面“0”と被圧流部端“II”の区間に運動量の式を立てると次式となる。

$$\rho Q (v_2 - v_1) = P_1 + A_2 p_0 + \rho g A_2 (l - \chi) \sin \theta - \pi d (l - \chi) \tau_0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで l は支配断面 c から管路端までの長さであり、 τ は壁面摩擦応力である。したがって、(4) 式が成立するよう S3 上の χ と深さを決定することが出来る。このようにして求めた長さ χ と流量との関係を示したのが図-4 である。 χ はエアーポケットの長さとも考えられるが、その短い区間を除いては良くあっていると言える。したがって、エアーを連行しエアーポケットの長さを伸張していく過程での水理現象が式 (4) と空気圧の式で与えられ、流量に対する流入水位 E との関係が解析的に求められる。

5. まとめ

昨今実際の必要性が増加してきた角端型流入口を有する急勾配雨水管路に対応し、管・開水路遷移流れの理論的解明を試みた。

1. 流量増加時での流入は、管口から噴流的に流入し最小断面を経た後に等流水深へと漸近する。水槽水面と管内最小断面にベルヌーイの式、管口部直前と縮流部に運動量の式を適用することによって、流入水位と流量との関係を十分に説明する事ができる。
2. 流量減少時では、被圧部には跳水直前と管路端に運動量の式を適用し、S3 水面形の距離 χ と水深を用いて、被圧長さを決定することが出来た。

参考文献

1) Blaisdell, F.W.; Hood inlet for closed conduit Spillways, ASCE, Vol.86, No.HY5, May, 1960, pp7-31
2) Ui, M. and Yasukawa, H.; Headwater level and discharge in a steep slope pipe, Hydrodynamics, The III, ICHD/Seoul, 1998, pp511-516
3) Zech, Y., Huberlant, B. and A.Reffat; Hydraulics of Sewers: Intake Conditions and Instabilities, 4th of I.C. on USD, 1987

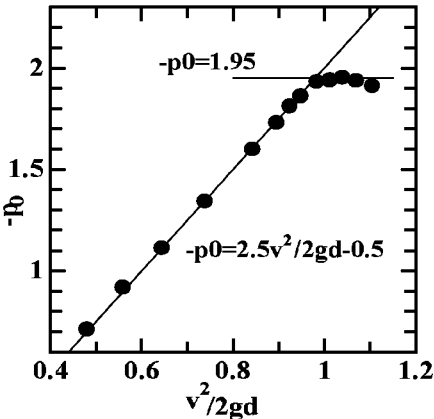


図-3 管内空気圧と運動エネルギー

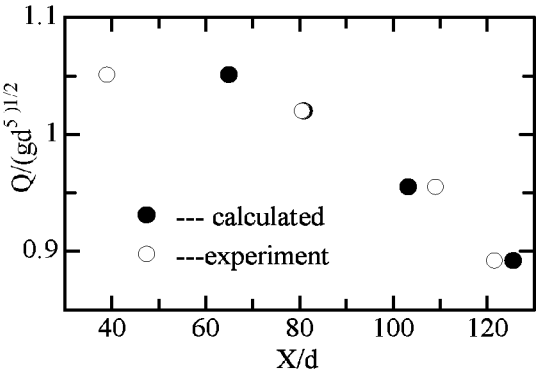


図-4 エアーポケットの長さとは流量