

II-252

セルフ・ブライミングにおける満管部の運動

東京都立大学工学部 正員 宇井 正和

東京都立大学工学部 正員 安川 浩

1. はじめに

筆者らは、流入口にベルマウスを付けた急勾配管路への流入量が満管近くになると、ベルマウスからの空気の連行が間欠的に起こり、管内には満管部と開水路部が交互に流下するセルフ・ブライミング現象の発生することを報告してきました。⁽¹⁾⁽²⁾ この現象は、直角的な流入口の管路においては発生しないこと、発生の要因が複雑であること、又この現象の発生領域では管路の疎通能力が急増すること等、興味ある特徴が見られ、又説明されなければならない問題点として生じてきた。

図-1はこの現象における満管部の運動を表わすために、その先端部(Falling down interface)と後端部(Rising up interface)の移動を記録したものであるが、移動速度および発生間隔においても極めて規則的な運動であることがわかる。しかし、この移動速度は流速とは異なるもので、dam breakのような流況の先端部と、跳水作用による後端部とによって維持される運動と見ることができる。

ここでは、先端部の運動にたいしてBenjamin⁽³⁾の考え方を、又後端部に対しては移動跳水の理論を適用し、先端部と後端部の運動の特徴を説明し、さらにこの現象の発生領域をも検討するものである。

2. 満管部先端および後端の移動速度 V_f および V_r

セルフ・ブライミング中の満管部を図-2のように模式的に表わす。 U 、 P 、 y は各領域における平均流速、水圧の合力および水深であり、 p は開水路部分での空気圧である。

Rising up 境界である満管部後端の移動を求めるために管内移動跳水の理論を適用する。このとき常流からの接近流速 U_1 は与えられた流量における等流水深での流速と仮定する。

今、この境界面の速度 V_j と共に移動する系を考えると、境界の近傍の流れは定常となり、各速度は次式のように変換される。

$$V_1 = U_1 - V_j \quad (1)$$

$$V_2 = U_2 - V_j \quad (2)$$

この跳水に対して、運動量の式と、連続の式を適用すると、

$$\rho Q (V_2 - V_1) = P_1 - P_2 + A_2 (p_1 - p_2) - W \sin \theta \quad (3)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q \quad (4)$$

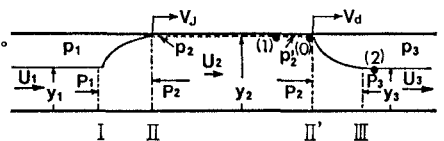


図-2 各領域での諸変数

ここで W は断面I及びIIによって囲まれた跳水の部分の重量で、 A_1 と A_2 は各流水断面積、又 θ は管路の勾配である。式(3)、(4)より次式が得られる。

$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2 + A_2 (p_1 - p_2) - W \sin \theta}{2 \rho g A_2 (1 - A_2 / A_1)} \quad (5)$$

y_1 および P_1 は流量が与えられれば決まるので、(5)式は $p_1 - p_2$ をパラメータとして数値的に解くことができる。故に、(5)、(4)、(2)より V_j が得られる。

Falling down 境界である満管先端部の移動速度は、Benjamin⁽³⁾ の管内水放流に対する考え方を適用する。 後端境界と同様に、この境界と共に移動する座標系から見ると運動は定常と考えられるから、図-2中の領域ⅡとⅢでの流速は次式に変換される。

$$V_2' = U_2 - V_b \quad (6)$$

$$V_3 = U_3 - V_b \quad (7)$$

定常と考えられた流れの(1)、(0)、(2)点にBernoulli の式を適用し、又断面ⅡとⅢによって囲まれた領域に運動量と連続の式を適用すると次式が得られる。

$$\frac{V_2'^2}{2g} + \frac{p_2'}{\rho g} + y_2 = \frac{V_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho g} + y_3 = \frac{p_3}{\rho g} + y_2 \quad (8)$$

$$\rho Q (V_3 - V_2') = P_2 - P_3 + A_3 (p_2' - p_3) - W \sin \theta \quad (9)$$

$$A_2 V_2' = A_3 V_3 \quad (10)$$

式(8)より $p_2 - p_3$ を求め、(9)式へ代入すると

$$\frac{V_3^2}{2g} = \frac{P_2 - P_3 - W \sin \theta}{\rho g A_3 (2 - A_3 / A_2)} = y_2 - y_3 \quad (11)$$

式(11)の第2式より流れの状態に関係なく V_3 が決まる。それ故、(10)と(7)式から境界の移動速度 V_b が求められる。

3. 移動速度 V_b と V_j との比較

先端部の移動速度 V_b は、水面上の圧力差 $p_2 - p_3$ を含まず、流量 Q に対し直線的に増加するが、 V_j に関しては $p_2 - p_3$ をパラメータとして下に凸な曲線となる。それ故、両曲線はそれらの位置関係によって2つの交点をもつことになる。 V_b と V_j を比較すると、

$V_b > V_j$ ならば満管部が成長し、又 $V_b < V_j$ ならば消滅するか、存在しないことになる。パラメータ $p_2 - p_3$ の値は実験的に確かめなければならないが、ここでは、セルフ・ブライミング現象の発生する最小流量(5.2ℓ)⁽²⁾を用い、その流量で $V_b = V_j$ になるものと仮定した。この時の両速度の関係を示したのが図-3である。実線は管路勾配が0.0214、点線は0.0142の場合である。上述の関係から、両曲線に囲まれた領域はセルフ・ブライミングの発生領域という事ができる。 $V_b = V_j$ となる他の交点における流量は、管路勾配0.0214 に対しては9.6ℓ、0.0142 に対しては7.2ℓの値が得られる。これらの流量は前報で示したセルフ・ブライミングの終了する、即ち管路が満管になる流量と良く一致している。

さらに、勾配が0.0244の管路における V_b の速度は、流量が 8.575ℓ の場合 52cm/s、6.641ℓ においては 3.3cm/s となるが、これらは図-1に示す実験結果をよく説明するものと云える。

4. 結 論

ここでは、セルフ・ブライミングの大きな特徴である満管部の運動を取り上げ、その先端部と後端部の運動に Benjamin の理論と移動跳水の考え方を適用して解析の説明を試みた。得られた移動速度 V_b と V_j によりセルフ・ブライミングの発生領域を規定すると共に、速度 V_b は実験的に得られた満管部の移動速度とよく一致することが確認された。

5. 参考文献

- 1) 宇井、安川；セルフ・ブライミングに関する実験的研究。第44回土木学会年講、1989
- 2) 宇井、安川；管路流入口としてのベルマウスの特徴について、第45回土木学会年講、1990
- 3) Benjamin, T.B.; Gravity current and related phenomena, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 31, 1968

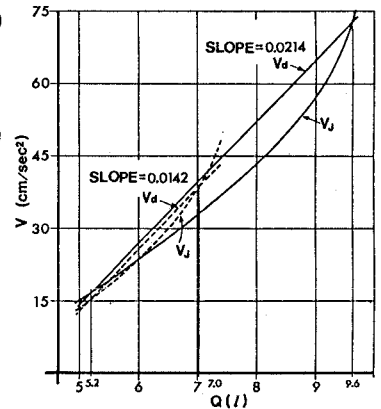


図-3 理論的移動速度