

セルフ・プライミングについて

中部工業大学

佐々木大策

山梨大学

荻原 能男

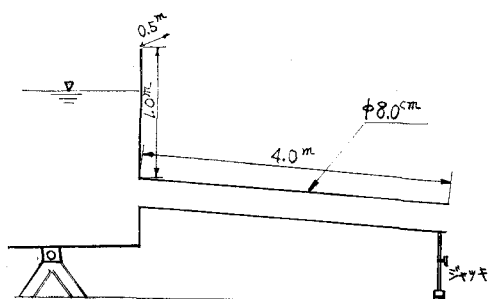
○山梨大学 大学院

加藤 真樹

1. はじめに

暗さよに送水をしている際に、流量の少ない場合は開水路として流れ、流量を増加させると管水路として流れる。この開水路から管水路に変化する際に、送水流量が著しく増加し、圧力は減少し送水暗さよに異状な振動を与える。この種の現象が発生する場合をセルフ・プライミング（呼び水現象）と言う。

この現象は瞬間的に発生し、多種の水理特性を含みつつ、セルフ・プライミング現象を進展させて行く。そこでこのプライミングの発生原因と進行過程を実験の考察より分類し、解明への基礎を作り、次に暗さよ内の圧力変化と上流タンクの水位変動に問題の焦点をしばりプライミング現象を解く足がかりを作るのが目的である。このプライミング現象に関する論文は、今のところ数編しか見当らず、解析的な面にまで至っていない。本論文でもプライミング現象における初期段階の解析を試みる。



実験装置略図

実験の考察より分類し、解明への基礎を作り、次に暗さよ内の圧力変化と上流タンクの水位変動に問題の焦点をしばりプライミング現象を解く足がかりを作るのが目的である。このプライミング現象に関する論文は、今のところ数編しか見当らず、解析的な面にまで至っていない。本論文でもプライミング現象における初期段階の解析を試みる。

2. セルフ・プライミング発生形態

セルフ・プライミングの発生形態については、⁽¹⁾Wen-Hsiung と Calvin C. Patterson がすでに発表をしているが、ここでは次のセルフ・プライミングの進行過程での説明に必要であるので、蛇足とは思われますが、載せる事にします。また本実験で得られた考察も同時に載せる事にします。

(1)・跳水により発生するセルフ・プライミング・

比較的緩勾配で、上流タンクの水位が低く、暗さよの管長が長い場合に跳水によって、盛り上った水面が管の頂にあたりプライミングを誘発させる。流量が少ない場合は、流入口付近で跳水をきたし、プライミングが発生するが、流量が増大すると、流入口より離れた場所に発生する。また実験の結果、プライミング時間は短く連続的に発生、消滅をきたす。これは送水暗渠の断面特性に左右される。

(説明図は 2の(1)図)

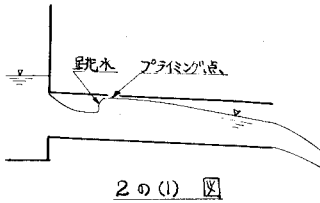
(2)・発散する流れによるセルフ・プライミング・

送水暗さよが長く、勾配が急で流量が大なる場合に発生し、一般に水面形は M_3 、 S_3 形水面形になっている。円形暗さよでは流入口から 7D 付近に発生すると Wen-Hsiung などは述べているが本実験では 10D~13D の間に発生している。(説明図は 2の(2)図)

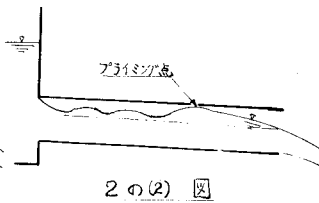
(3)・定常的な水面波形によるプライミング・

送水暗さよが長く、タンクの水頭が高い場合に発生し、最初の定常波頭が暗さよの頂にあたる際にプライミングが発生する。(2の(3)図参照)

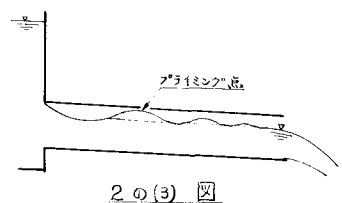
○セルフ・アライミング発生形態説明図



2の(1) 図



2の(2) 図



2の(3) 図

3. セルフ・アライミングの三進行過程

(1)・空洞を持つ場合・

これは、上の(2)(3)の形態の場合に発生し、流量が大きな場合は空洞が気泡となって下流に流され、完全な管水路となる。そしてタンクの水位が下降し、空気混入をして開水路となる。この際水位は約 $\frac{1}{2}D$ に近づく。

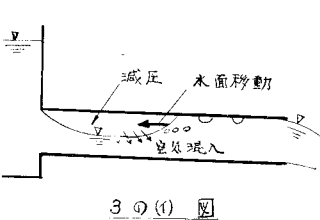
(2)・管水路と開水路との共存・

図3のロに示すように、タンクより流入直後にアライミングが生じ、アライミング点が下流に移動して、その上流側は管路、下流側は開水路になっている。全管路が満水状態になった後、再び上のような現象を繰返す。

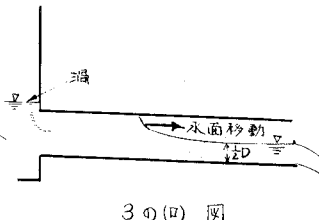
(3)・部分的に管水路となる場合・

流速の大きな場合に発生し流入口より10D付近の波頭が暗さの頂にあり、部分的にセルフ・アライミングが誘発させるが、(1)(2)とは異なり、アライミングの断面が2~3D流下して開水路となり、再び前と同じ位置に同様のアライミングが発生する繰返しの現象である。

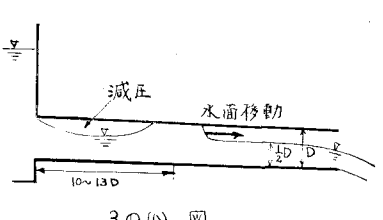
セルフ・アライミング進行課程説明図



3の(1) 図



3の(2) 図



3の(3) 図

4. 実験

水路の勾配を一定にしておき、少量ずつ流量を増加させながら、アライミングの実験を行い、一勾配が終わった後次の勾配へと、勾配を移動させて、上述の様な分類を行った。本実験において水路床勾配は0~7.5%まで変化ができ、管断面は円形、内径は80mm、暗さの長は4.0mである。タンクの水位、水路の水位はメートルにより、流入口より2D離れた点での圧力変動はプレッシャーヘッドにより測定した。

今アライミング現象に關係する物理量には次のようなものがある。H：タンクの水位、D：暗さの直径、R：径深、Q：流量、n：粗度係数、g：重力加速度、i：水路床勾配。

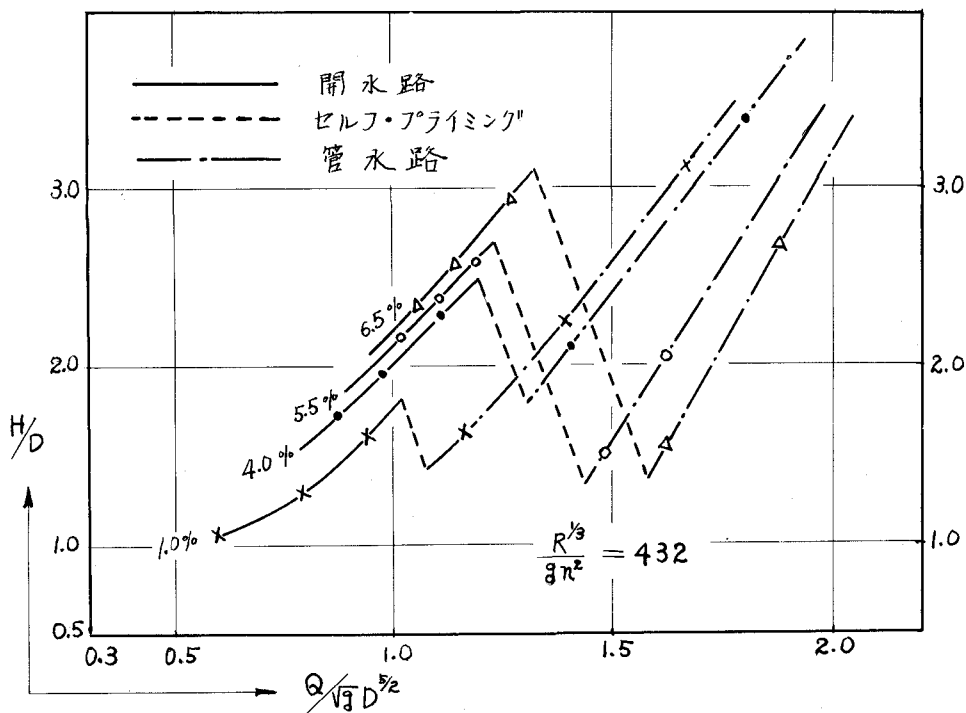
これらがアライミングの誘因となって、H/Dの函数は次の様になると考えられる。

$$H/D = f\left(\frac{Q}{\sqrt{g} D^{5/2}}, i, \frac{R^{1/3}}{g n^2}\right)$$

本実験にては、送流水位により粗度はあまり変化しないので均一と考え、実験の結果を H/D と $Q/\sqrt{g}D^{5/2}$ で下図の如くまとめた。*

* 上述の発生形態に種々ある如く、フライミング現象の発生にもゆかりあり、この問題を解決するには多くの実験が必要である。

円形暗きよにおけるセルフ・フライミング



5. 理論解析

次の仮定のもとに理論的な解析を行う。

- (1) セルフ・フライミング現象は瞬間的に発生し、開水路から管水路にすみやかに移行する。
- (2) 開水路から管水路に変化した時から、空気混入をするまでをセルフ・フライミングとする。

• 理論解析に必要な記号の説明・

P : 圧力 Z : 基準面から水路底までの距離
 v : 管内の平均流速 V : タンク内平均流速
 h_r : 損失水頭 t : 時間 x : 水路底の距離
 H : タンクの水頭 (暗きよの頂よりの水頭)
 A : タンクの面積 Q : 暗きよの流量
 B : タンクの幅 Q : 平均流量

l : タンクの横幅 L : 暗きよの長さ

g : 重力の加速度 α : エネルギー係数

η : 運動量係数 h : 暗きよの流入口と流出口との鉛直距離

• 運動の方程式・

ベルヌーイの定理より

$$\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{\omega} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{g} \left(\frac{\alpha}{2} \frac{\partial v^2}{\partial x} + \eta \frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{\partial h_r}{\partial x} = 0$$

書き換えると

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\omega} + Z + \alpha \frac{v^2}{2g} + h_r \right) = - \frac{\eta}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$$

タンク内の運動に変換すると

$$\frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{\eta}{ga} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad \text{①}$$

・連続の方程式・

上流タンクの連続の方程式は

$$\frac{\partial Q}{\partial S} = -B \frac{\partial H}{\partial t} \text{ ----- ②}$$

境界条件

$x=0$ において $Q=Q_0$ = 一定

$$x=L \text{ において } Q = K \left(\frac{H(L,t) + h}{L} \right)^{3/2} \\ \div K \left(\frac{h}{L} \right)^{3/2} \left(1 + \frac{H(L,t)}{2h} \right) \text{ ---- ③}$$

1,2 式のラプラス変換を行う。 ($t \rightarrow s$)

$$\frac{d\bar{H}}{dx} = -\frac{1}{ga} \{ s\bar{Q} - Q(x,0) \} \text{ ---- ④}$$

$$\frac{d\bar{Q}}{dx} = -B \{ s\bar{H} + H(x,0) \} \text{ ---- ⑤}$$

6. 管内の圧力変動

水路床勾配 7.5% の勾配で $Q(L,0)=10.025 \text{ l/sec}$
 $H(L,0)=24.0 \text{ cm}$ の場合の場合のアライミング現象時の、流入口より 2D 離れた所における圧力変動を右図に示す。

測定はプレッシャーヘッドを使用して測定した。

7. むすび

実験の結果次の事がわかる。セルフ・プライミングは断面の特性、こう配、流量等に関係し流入口の縮流、跳水等により発生する。又ある勾配において開水路として流せない流量を上流タンクの水値が下って管入口の付近に来て管永路として流せる場合に発生する。すなわち管水路で流せる最小の流量が開水路の最大流量が流せない時にアライミングが起こる。

次に暗きよ内の動水圧に関して考えると暗きよ内を開水路で流れている時は水値に等しい正水圧が加わらず、プライミングにより管水路となると負圧になる。理論解析においては $H(L,t)=0$

④⑤ 式の微分方程式を解き、ラプラス逆変換を行い、 β^2 の項まで考える。

$$H(L,t) = H(L,0) - (H(L,0) - \frac{\gamma}{\beta}) \beta^2 (1 + 2T_1 + 2T_2 + \dots + 2T_n) \\ + (\beta^2 (H(L,0) - \frac{\gamma}{\beta}) (1 + 4T_1 + 8T_2 + \dots + 4(n+1)T_n + T_{n+1}))$$

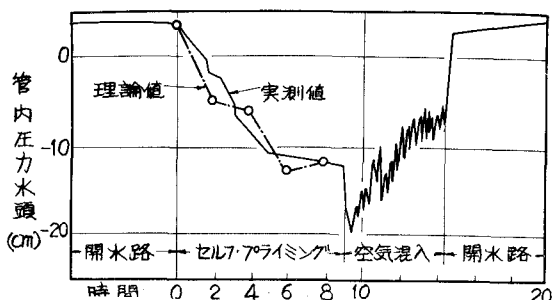
$$Q(L,t) = K \left(\frac{h}{L} \right)^{3/2} \left(1 + \frac{1}{2\beta} H(L,t) \right)$$

但し

$$T_n = \begin{cases} 0 & 2\omega(n-1)L < t < 2\omega nL \\ 1 & 2n\omega L < t \end{cases}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\gamma B}{ga}} \quad \gamma = \frac{\omega}{B} (Q(L,0) - K \left(\frac{h}{L} \right)^{3/2})$$

$$\beta = \frac{\omega K}{2B} \left(\frac{h}{L} \right)^{-3/2} \text{ である。}$$



になる時はタンクに渦が発生して空気を吸込む為開水路となってしまう、今までの仮定をくつがえし理論式は通用しなくなる。空気混合から開水路に至る現象は今後の後された問題でありさらに研究を進める予定である。

本研究は文部省科学研究費(特定研究)の援助を受けた事と報告し、深く謝意を表わす。

8. 参考文献

(1) Free outlets and Self-Priming action of culverts.

Wen-Hsiung Li and Calvin C. Patterson.