

開水路・管水路遷移流れの実験的研究

北海道大学工学部 ○船水尚行, 高桑哲男

1. はじめに

雨水管網の設計・解析のためには、管網全体を対象とした流れ状況の解析法の開発と管網内で局所的に起こる雨水管独特の現象の解明が必要となる。本報告では雨水管内流れの特徴の一つである開水路状態から管水路状態（またはその逆）への流れ状態の変化に関する知見を得るために定常流室内実験を行い、従来の水面形の計算法による計算結果と比較した結果を述べる。

2. 実験装置、方法

実験装置には図-1の直径5.2cm、長さ4mの亚克力製パイプの上、下流端にタンクを設置した可変勾配水路を用いた。実験では管路流量をバルブ1、下流端タンクの水位をバルブ2、3により所定の値に設定した後、水面形の測定を行った。水面形の測定では、ノギスによって水面幅を測定し、あらかじめ求めておいた換算式により水位を求めた。一部の実験では、管路下部に設置した圧力タップによる動水位の概略値の測定も実施した。

実験は(1)管水路から開水路へ変化する場合と(2)開水路から管水路へ変化する場合に大別される。実験条件は、流れ状態が常流となるように、それぞれ表-1、2のように設定した。また、水温は約13℃に保った。

3. 水面形の計算法

開水路部分の水面形は次式により計算した。

$$\int dx = \int \frac{1 - \alpha Q^2 T / g A^3}{S_0 - S_f} dy$$

ここに、x:流れ方向、y:水深、 α :エネルギー係数(=1)、Q:流量、T:水面幅、A:断面積、 S_0 :管底勾配、 S_f :摩擦勾配。

実験に用いた亚克力管の壁面は極めて滑らかであるため、摩擦勾配はDarcy-Weisbach式とBlasius式を組み合わせる計算した⁽¹⁾。水面形の計算は流れが常流であるため、下流タンク水位を計算開始点とした。ただし、水位が限界水深以下の場合には限界水深となる場所を計算開始点とした。

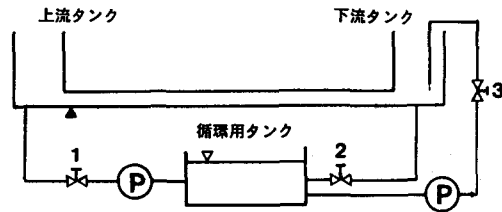


図-1 実験装置

表-1 実験条件 (管水路から開水路へ変化する場合)

勾配	流量 (m ³ /s)	下流水位* (cm)
5.53×10 ⁻⁴	4.38×10 ⁻⁴	-15.0
	6.56×10 ⁻⁴	
	7.10×10 ⁻⁴	
	7.53×10 ⁻⁴	
	8.11×10 ⁻⁴	
5.53×10 ⁻⁴	6.56×10 ⁻⁴	1.62
		2.61
		3.30
		3.95
		4.20
4.75×10 ⁻⁴	6.82×10 ⁻⁴	-15.0
	7.96×10 ⁻⁴	
1.45×10 ⁻³	7.96×10 ⁻⁴	-15.0

*水位は管底基準

表-2 実験条件 (開水路から管水路へ変化する場合)

勾配	流量 (m ³ /s)	下流水位* (cm)
5.18×10 ⁻³	5.34×10 ⁻⁴	4.69
		5.12
		5.37
		5.71
6.40×10 ⁻³	6.24×10 ⁻⁴	5.65

*水位は管底基準

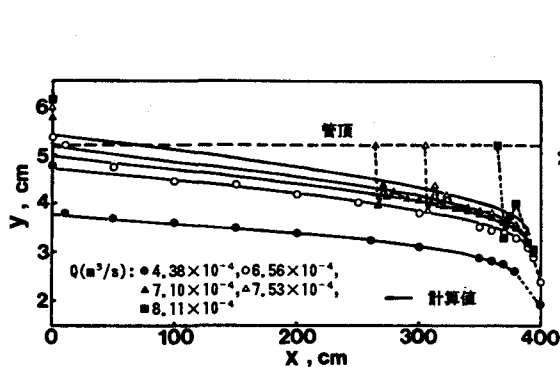


図-2 水面形の計算値と実測値の比較-1
(下流端: 段落ち $S_0=5.53 \times 10^{-4}$)

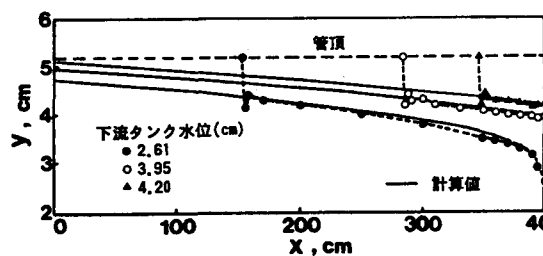
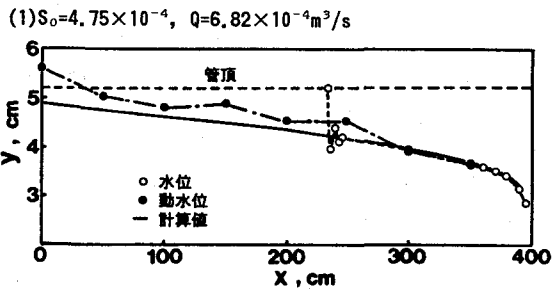
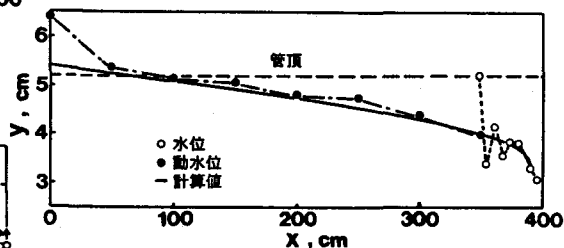


図-3 水面形の計算値と実測値の比較-2
($S_0=5.53 \times 10^{-4}$, $Q=6.56 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)



(1) $S_0=4.75 \times 10^{-4}$, $Q=6.82 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$



(2) $S_0=4.75 \times 10^{-4}$, $Q=7.96 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

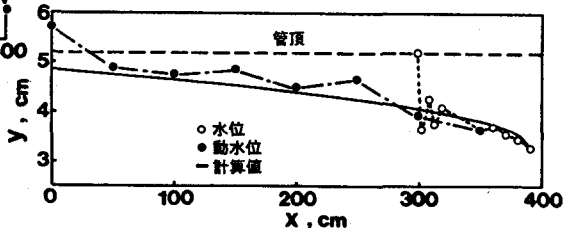


図-4 水位、動水位の測定結果-1

管水路部分の動水勾配は開水路部分と同様にDarcy-Weisbach式とBlasius式より計算した。また、開水路状態と管水路状態の変化点は、下流が開水路状態の場合には水位が管頂と等しくなった点、逆に下流部が管水路状態の場合には動水位が管頂と等しくなった点とした。

4. 実験結果とまとめ

(1) 管水路状態から開水路状態に変化する場合

下流端タンクの水位を管底以下の値に設定し、管路からタンクへ段落ち状態で流出させた場合の水面形の測定結果と計算結果を図-2に示す。図は管底勾配を一定とし、流量を変化させた場合の結果である。流量が $4.38, 6.56 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合(図中●, ○印)では、全域が開水路流れとなり、水面形の測定結果と計算結果はほぼ一致している。流量が $7.10, 7.53, 8.11 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合(図中▲, △, ■印)では、管水路状態から開水路状態への変化が急激で、遷移領域では水面が減衰振動様の形状を呈した。また、この遷移領域は極めて安定に存在した。水面形の計算結果は、下流部の開水路状態区間では実測値とほぼ一致しているが、実測の管水路から開水路流れへの状態変化を予測できず、ほぼ全域で開水路状態となっている。

図-3に管底勾配と流量を一定に保ち、下流タンクの水位を変化させた場合の結果を示す。水面形の測定結果は図-2の場合と同様に、管水路から開水路状態への急激な変化を示している。計算結果についても図-2の場合と同じく、開水路部分の水面形状はほぼ一致しているが、管水路状態の存在を予測できていない。

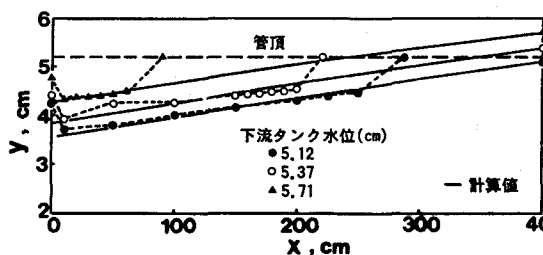


図-5 水面形の計算値と実測値の比較-3
($S_0=5.18 \times 10^{-3}$, $Q=5.34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)

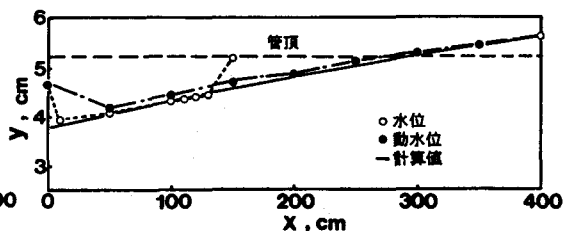


図-6 水位、動水位の測定結果-2
($S_0=6.40 \times 10^{-3}$, $Q=6.24 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)

図-4には、水面形の測定結果に加えて、管底部に設置した圧力タップによる動水位の概略値の測定結果も示した。開水路流れ区間では水深と動水位の測定結果はほぼ一致しているが、流れが管水路状態となっている区間では、動水位は管頂以下の値を示し、下流の開水路部分の水面形状との連続性が見受けられる。一般に、管水路流れでは動水位は管頂よりも上にあると考えられるが、本実験で管頂以下の値を示した原因については、現在検討中である。

(2)開水路状態から管水路状態へ変化する場合

実測と計算結果の比較を図-5に示す。図中の結果は、管底勾配、流量を一定とし、下流タンクの水位を変化させた場合のものである。開水路から管水路状態の変化は(1)項で示した管水路から開水路の場合ほど急激ではなく、水面も振動波形を示していない。計算結果は上流の開水路区間の水面形をほぼ再現しているが、管水路区間を短く見積もっている。

図-6には水深と動水位の測定結果と計算結果を示した。管水路流れ状態の区間において動水位が管頂以下の値をとり、動水位勾配線は計算結果と似た形状を示している。

(3)まとめ

本研究で得られた知見をまとめると

(1)管水路状態から開水路状態へ変化する場合

- ・遷移部では水面は安定な減衰振動様の形状を呈した。
- ・管水路流れ区間は計算結果より長く存在し、管水路流れ区間にあっても、動水位が管頂以下となる場合が観察された。

(2)開水路状態から管水路状態へ変化する場合

- ・開水路流れから管水路流れへと滑らかに遷移した。
- ・(1)の場合と同様に管水路流れ区間は計算結果より長く存在した。しかし、上流部の開水路流れ区間の水面形は計算結果とほぼ一致した。

以上のことから、下流から順次上流へと水深を計算する定常、常流状態の雨水管網の水面形の計算では、従来の計算法を(2)の場合に適用すると誤差は少ないが、(1)の場合に適用する場合にはある程度の誤差を生じるといえる。

参考文献

- (1) Ven Te Chow; Open Channel Hydraulics, p.8