

II-61 管水路，開水路遷移領域の水深変化に関する実験的研究

北海道大学工学部 正員 船水尚行

北海道大学工学部 正員 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．雨水管内流れの特徴の一つに管水路状態から開水路状態（またはその逆）へと流れ状態が変化することがあげられる．先に，筆者らはこの流れ状態の変化する場合の水面形について定常流室内実験結果と従来の水面形の計算法による計算結果との比較を行い，管水路状態から開水路状態へ変化する場合に，・遷移領域で安定な減衰振動様の水面形状をとること，・管水路区間は計算結果より長く存在し，管水路区間であっても，動水位が管頂以下となる場合があること，逆に開水路状態から管水路状態へ変化する場合には，・遷移は滑らかで，上流部の開水路区間の水面形は計算結果とほぼ一致することを報告した¹⁾．

本論文では，管水路状態から開水路状態へ変化する遷移領域で観察される安定な減衰振動様の流れにおける水深変化の特徴を述べる．

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により所定の値に設定した後，遷移領域の水深を測定した．水深の測定は，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．また，下流端では段落ち流れ状態となるようにした．

実験条件は管底勾配と流量であり，本実験装置で管水路状態から開水路状態への変化が観察された図-2の条件に設定した．すなわち，図-2の実験流量以下では全域が開水路状態であり，実験流量以上では全域が管水路状態となった．また，設定勾配以上の勾配では，管水路状態から開水路状態への変化は観察されなかった．本実験の範囲では流れ状態は常流であった．また，水温は約14℃に保った．

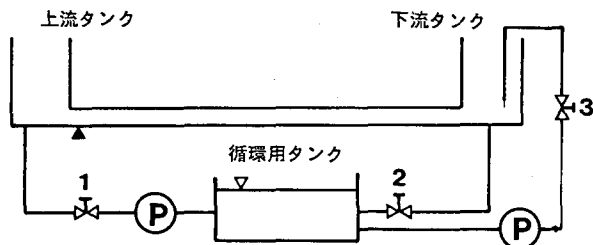


図-1 実験装置

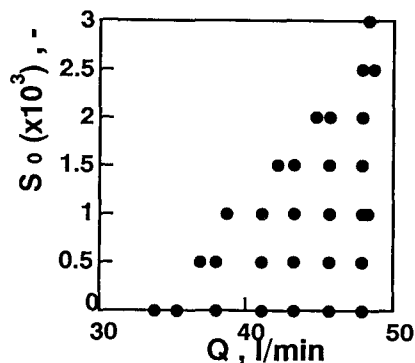


図-2 設定流量，勾配

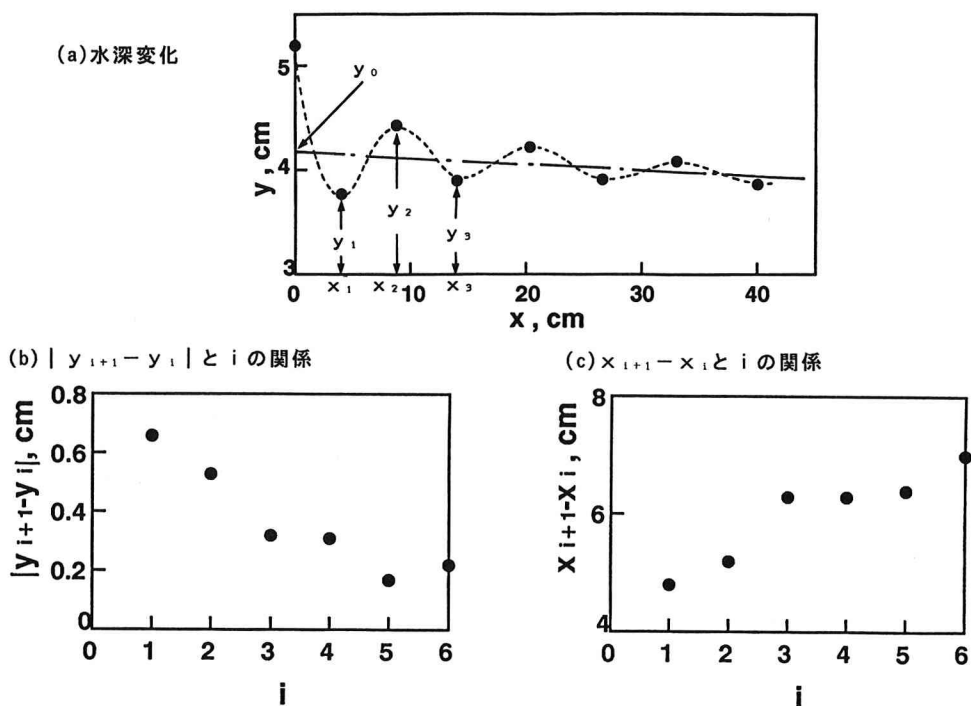


図-3 遷移領域の水深変化-1
($Q=45.7\text{ l/min}$, $S_0=1/1000$)

3. 実験結果

3-1 遷移領域の水深変化の特徴

管水路状態から開水路状態への遷移領域では写真-1のような水深変化を呈する。この水深の変化は極めて安定に存在し、波の移動等はみられない。図-3(a)に流量 $Q=45.7\text{ (l/min)}$ 、管底勾配 $S_0=1/1000$ の場合の水深変化の測定例を示す。水深の変化の測定は振動のピークの水深 y_i と流れ状態変化点からの距離 x_i について行い、図中の破線

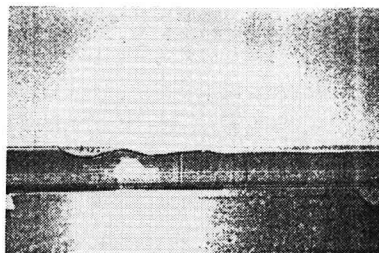


写真-1 遷移領域の水面形状

はこれらの点を滑らかに結んだものである。また、一点鎖線は振動の基準線とみなされる線であり、従来の水面形の計算法により計算された¹⁾ものである。水深変化の特徴を示す指標として隣り合うピークの水深差の絶対値 $|y_{i+1} - y_i|$ とピークの番号 i の関係を図3-(b)に、ピーク位置の差 $x_{i+1} - x_i$ と i の関係を図-3(c)に示す。これらの図より、遷移領域で観察される水深変化は振幅が減少し、波長が増加する減衰振動様の形態をとっていることがわかる。

3-2 管底勾配、流量と水深変化の関係

流量 $Q=45.7\text{ (l/min)}$ と一定のもとで、管底勾配 S_0 を $0 \sim 2/1000$ まで変化させた各場合に観察された遷移領域の水深変化を図-4に示す。図より、一定流量のもとでは管底勾配によらずほぼ同じ位置に水位のピークが存在していることがわかる。一方、勾配 $S_0=1/1000$ と一定のもとで、流量 Q を変化させた場合の結果を図-5に示す。図より流量によって水深変化の形状が異なり、流量が小さくなるほど波長が短く、水深の変化も小さくなっていることがわかる。

次に、管水路流れ状態から開水路流れ状態への遷移部で、大きな水深変化が生じる原因の一つとして、円

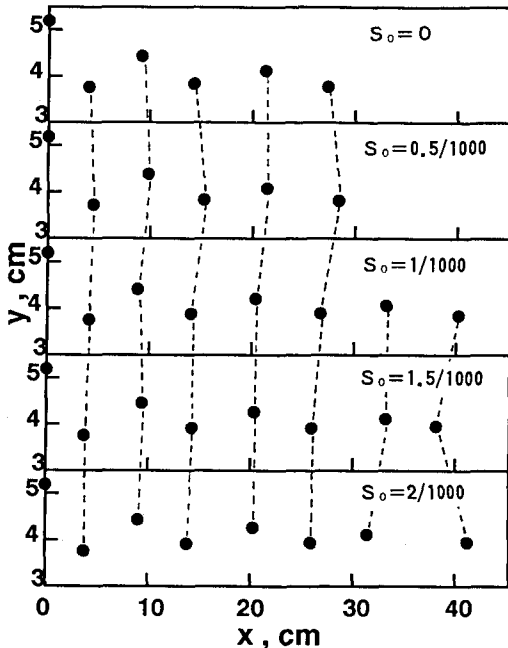


図-4 遷移領域の水深変化-2
($Q=45.71/\text{min}$)

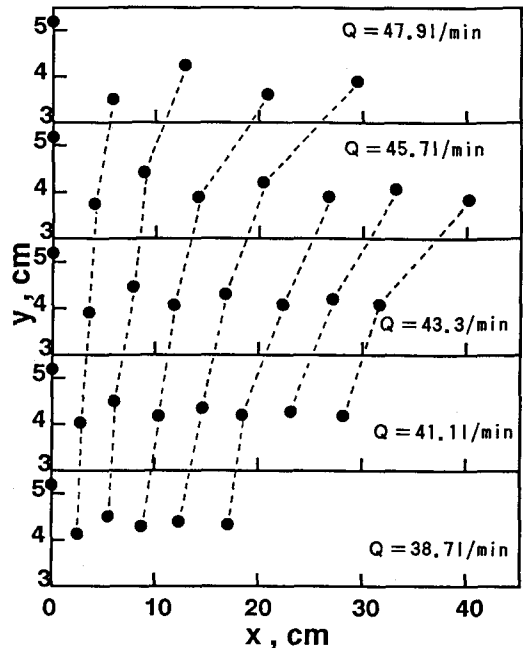


図-5 遷移領域の水深変化-3
($S_0=1/1000$)

管流では同一流量に対して二つの水深が存在することがあげられよう。すなわち、本実験に用いたアクリル管では抵抗特性がブラジウスの式で表現されるので¹⁾、水理特性曲線は図-6のようになり、水深と直径の比 (y/D) が約0.81以上の範囲では同一流量に対して二つの水深が得られる。このため、管水路状態から開水路状態への変化の過程において、水深の不連続な変化が発生する可能性が予想される。

そこで、ひとつの試みとして、管水路流れ状態から開水路流れ状態への変化を図-7に模式的に示すような伝搬速度が0の段波²⁾と仮定し、管水路部と開水路部の関係を求めると、

$$\frac{v_1}{\sqrt{g h_{G1} \cos \theta}} = \sqrt{\frac{1 - (h_{G2} A_2 / h_{G1} A_1)}{A_1 / A_2 - 1}} \quad \text{----- (1)}$$

を得る。ここで、 v は断面平均流速、 A は断面積、 h_G は水面から断面の図心までの距離、 θ は管底と水平面のなす角度であり、添字1は管水路部、2は開水路部を示す。この式の左辺は v_1 を代表速度、 h_{G1} を代表長さとするフルード数 Fr_1 であり、管水路流れから開水路流れへの遷移を特徴づける無次元数と考えることができる。 Fr_1 を構成する変量のうち v_1 が流量の効果、 $\cos \theta$ が管底勾配の効果を表現しているといえる。本実験の

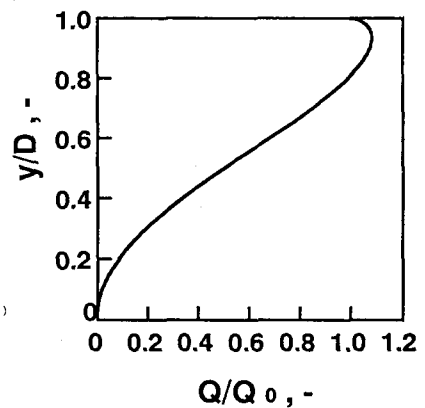


図-6 実験に用いた管路の水理特性曲線

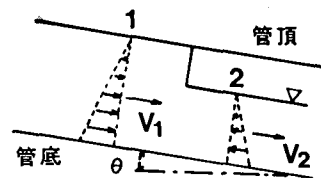


図-7 遷移領域を段波と近似 (模式図)

設定勾配範囲 ($0 \sim 2.5/1000$) では、 $\cos \theta$ の値はほぼ 1 と一定であることから、本実験の範囲では、管底勾配は遷移部の水深変化に影響を与えないことが予想される。

図-7 における開水路部の断面 2 に相当する断面を実験結果から特定することが困難であったため、直接式 (1) の関係の成否を検討できなかった。そこで、ここでは式 (1) 左辺のフルード数 Fr_1 により、遷移領域の水深変化を整理できるか検討することとする。遷移領域の水深変化を特徴づける量として、前出図-3 (a) の $y_0, y_1, y_2, x_1, x_2, x_3$ をとりあげ、 Fr_1 との関係プロットすると、図-8 ようになる。なお、図では y, x の値を直径 D により、無次元化して示してある。これらの結果より、遷移部の水深変化を特徴づける各値は管底勾配によらず、 Fr_1 によってほぼ整理されることがわかる。また、図-8 (a) では、同一流量に対して異なる水深の存在下限である 0.8 付近の値を y_0/D がとっていることが注目される。図-8 (b) の結果より、 y_2/D の値は y_1/D に比べて変化が小さく、 Fr_1 の増加に伴う振幅の増加は主として、ピーク値の下限の変化によることがわかる。

4. まとめ

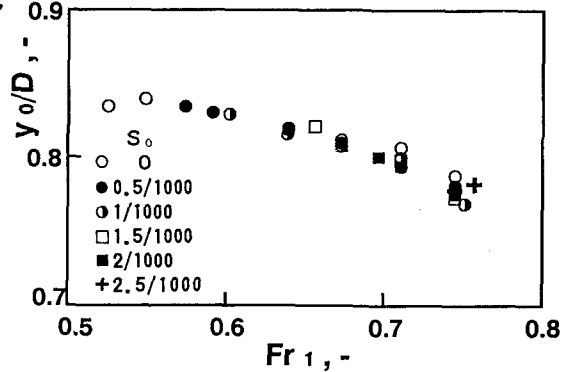
雨水管などに用いられている円形断面管路流れの特徴の一つである、管水路流れ状態から開水路流れ状態へ変化に関する検討の一環として、管水路状態から開水路状態へ変化する遷移領域に注目し、遷移領域の水深変化を測定した結果を報告した。得られた知見をまとめると以下になる。

- ・ 遷移領域の水深変化は減衰振動様の形状を呈し、本実験の範囲では管底勾配に影響されず、主として流量によって、形状が変化した。
- ・ 管水路流れ状態から開水路流れ状態への変化について、不連続性を仮定し、水深の変化を特徴づける無次元量として、式 (1) のフルード数を取りあげ、この無次元量により、水深変化の特徴を整理できることを示した。

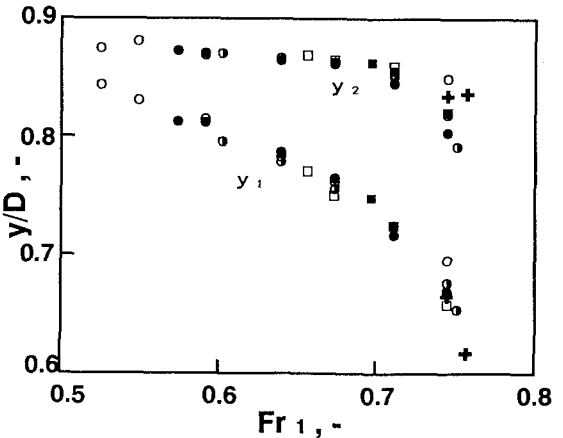
参考文献

- 1) 船水尚行, 高桑哲男: 開水路・管水路遷移流れの実験的研究, 第28回衛生工学研究討論会講演集, 1992
- 2) 岩佐義朗: 水理学, p.175, 朝倉書店, 昭和42

(a) y_0/D と Fr_1 の関係



(b) y/D と Fr_1 の関係



(c) x/D と Fr_1 の関係

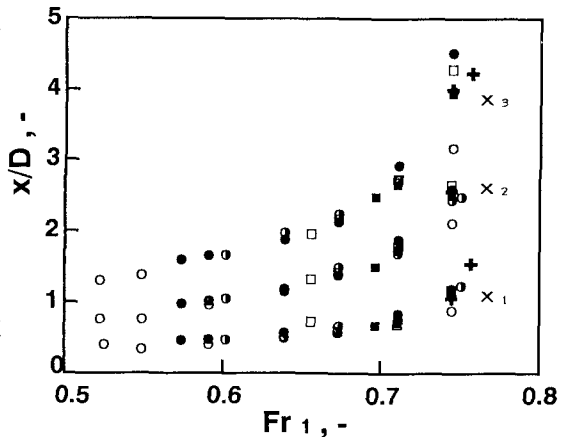


図-8 y_1, x_1 と Fr_1 の関係