

開水路断面変化部での水位の安定性に関する
 下流水位条件が及ぼす影響についての実験的検討
 Experimental investigation of water level stability around cross-sectional variation
 in an open channel affected by downstream water level condition

○中田達*・樽屋啓之*・田中良和*・向井章恵*
 ○Toru Nakada・Hiroyuki Taruya・Yoshikazu Tanaka・Akie Mukai

1. はじめに

水路システムにおける水理・水利用機能診断において、通水性は水理機能の主要な要求性能のひとつである。通水性は水密性や通水量を照査項目とし、対応する照査指標として水位や漏水量、水路壁面の粗度などに着目した機能診断手法が提案されている。開水路のある程度の長さ区間において水面が安定していることは通水性を正確に評価するための必要条件と言える。水位や流量の観測はチェックゲートや分水工においてなされるが、これらの構造物は開水路断面を局所的に急変させるため、その下流において波状跳水などの水位の不安定性を引き起こされるとして問題とされてきた。既往研究において波状跳水の生じるための水理学的な既定条件について検討がなされてきたが、下流の水管理条件等を考慮した事例は少ない。

本研究では、開水路断面の急変として、段落ち流れを対象に、波状跳水の規定条件を水理実験によって検討し、水路の構造の変化（劣化）にともなう水位不安定性と下流水位条件との関係について検討した。

2. 実験の概要

本実験に使用した水路は、幅 37.5 cm、高さ 60 cm の長方形断面の可変勾配水路である。水路内に高さ 10 あるいは 20 cm の段を設け、段落ち水路を製作した。水路下流端では可動堰があり、下流水位を調節できる。段落ち部から下流堰までの区間は 13 m である。水深の計測には 0.1 mm 精度のポイントゲージ、サーボ式水位計を用い、水路の中心線に沿った計測を行った。流量、水路勾配、段落ち高さの実験条件を表 1 に示す。下流の堰高さを変えながら波状跳水が生じる前後の水面形を計測した。

Table 1 実験条件
 Experimental conditions

流量 Q [L/sec]	50 75 100 125
勾配 I	1/100 1/1000
段落ち高さ s [cm]	10 20

3. 運動量方程式の適用

段落ち部から下流堰までの区間をコントロールボリュームとして運動量方程式を適用する。

$$\rho q(v_2 - v_1) = P_s + P_1 - P_2 + Vg \sin \theta \quad [1]$$

ここで、 ρ は水の密度、 q は単位幅流量、 v は各断面における流速、 g は重力加速度、 V は水体の堆積、 θ は水路勾配角である。壁面せん断力を無視し、運動量補正係数を 1 としている。流体の各断面に掛かる圧力は静水圧近似できるとし、

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho g h_1^2, \quad P_2 = \frac{1}{2} \rho g h_2^2 \quad [2]$$

とした。ここで h は各断面における水深である。また、段落面に作用する圧力 P_s は、

$$P_s = k P_{sw} = k \cdot \frac{1}{2} \rho g s(2h_1 + s) \quad [3]$$

とした。 s は段落ち高さ、 P_{sw} は段落ち部にかかる静水圧であり、実際の圧力 P_s は静水圧との比を k として用いて表した (図 1)。

式[1] に式[2], [3] を代入し、次のように無次元表示される。

$$Fr_1^2 = \frac{\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 - k \left\{ \left(\frac{s}{h_1}\right)^2 + 2 \left(\frac{s}{h_1}\right) \right\} - 1 - \frac{h_1 + h_2 + s}{h_1^2} \Delta z}{2 \left\{ 1 - \left(1/\frac{h_2}{h_1}\right) \right\}} \quad \dots [4]$$

ここで、 Fr_1 は段落ち部でのフルード数、 Δz は路床高さの差である。

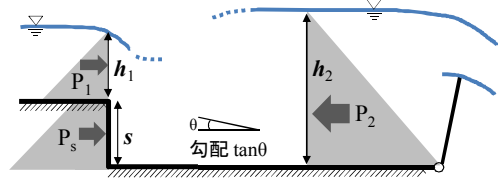


Fig. 1 段落ち流れの縦断面模式図
 Schematic illustration of flow around a step-down of open channel

*農村工学研究所, National Institute of Rural Engineering
 キーワード 水理機能, 波状跳水, 下流制御

4. 水面形の遷移

段落ちの上流側の流れは射流(フルード数 $Fr_1 = 1.5 \sim 1.7$ 程度)であり, 段落ち下流において跳水を生じる. 最下流の可動堰で下流水位を上げていくと, 段落ち下流の跳水はもぐり跳水から波状跳水となり, 水面の動揺が下流遠方まで続く. さらに堰を上げると, 波状跳水は消え, 段落ち上流となめらかに続く水面形となる(図2). この過程での堰上げ高さは下流水位と上流水位とがほぼ等しい高さであり, もぐり跳水と波状跳水および跳水が消える場合のそれぞれの堰上げ高さの違いは 2~3 cm 程度であった. 水管理操作による高々10%程度の水深の差異が下流の水位の不安定性を引き起こすことがうかがえ, 下流水位が波状跳水の規定条件であることがわかった. 波状跳水の波高は流量に応じて大きくなり, 跳水の最高面は下流水位よりも高くなる場合もあった(図3). このような構造物周りにおいては, 溢水を生じさせないような余裕高に設計するためにも水位不安定性の照査が重要となると考えられる.

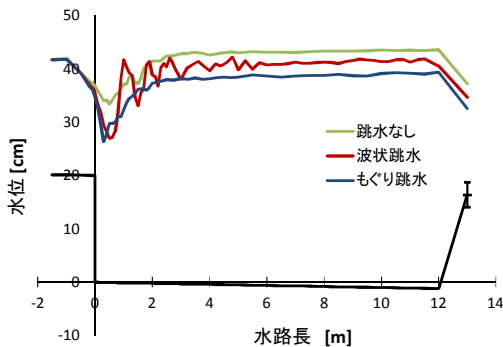


Fig. 2 下流水位を変えたときの段落ち部周辺の水面形 ($Q=100\text{L/sec}$, $I=1/1000$, $Fr_1=1.58$)
Water surface profiles around a step-down section under several downstream conditions

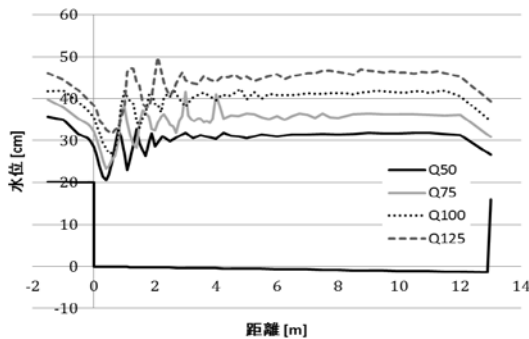


Fig. 3 流量を変化させた場合の波状跳水の水面形
Water surface profiles of undular hydraulic jump under several flow conditions ($Q: 50 \sim 100\text{L/sec}$)

与えられた上流の水利条件 (Fr_1 , s/h_1) に対して, 下流水位 h_2/h_1 を変化させた場合の k の値を[4]式より求めた. 各水面形での k と下流側フルード数 Fr_2 との関係を図4に示した. また, 波状跳水の生じる場合の水利条件を表2にまとめた. 段落ち部の流線は上に凸な曲率の影響で k は1よりも小さい(段落ちに掛かる圧力 P_s は静水圧よりも小さい)が, 下流水位を上げていくと k は1に近づき, $k = 0.9$ 付近で波状跳水を生じた. k が1よりも大きくなると波状跳水は消え, 上下流が滑らかな流線で結ばれる.

また, 分土工などの構造物周りにおいては, 2~3 cm 程度のわずかな水頭の損失は容易に生じうるものであり, 水路の構造的機能の劣化にともなう水位変化も同様に不安定性を引き起こす要因と考えられる. たとえば, 経年劣化による粗度係数の増加や堆積などによる通水面の減少は下流の水位を上昇させるであろう. また, 突発的な不同沈下などの通水断面の変状は, 意図しない箇所においての段落ち流れを作り出すことにもなる. 構造的機能の劣化が生じた際の水位安定性を保つ水位条件や損失水頭の評価などの性能照査の事例を積み上げる必要がある.

Table 2 波状跳水の際の水位条件
Characteristics of undular hydraulic jump under several water level conditions

Fr_1	H_2/H_1	s/H_1	hf/H_2
1.77	1.16	0.71	0.25
1.61	1.16	0.63	0.25
1.58	1.22	0.58	0.22
1.56	1.27	0.54	0.18
1.70	1.11	0.70	0.26
1.51	1.13	0.62	0.23
1.40	1.17	0.56	0.17
1.35	1.21	0.52	0.14

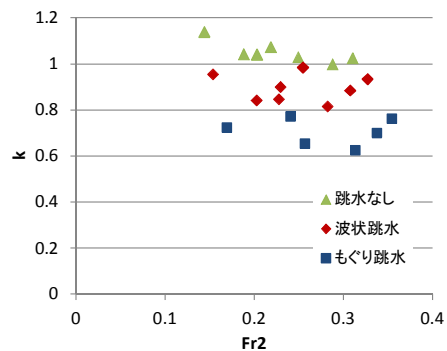


Fig. 4 波状跳水の有無による段落ち部にかかる圧力比 k
Pressure ratio (k) between hydrostatic pressures on a step-down section under several flow conditions