

跳水の水面変動および河床圧力変動の特性

九州工業大学工学部 学生会員 ○後藤伸一
九州工業大学工学部 学生会員 白石達郎
九州工業大学工学部 フェロー会員 秋山壽一郎

九州工業大学大学院 学生会員 尾関弘明
九州工業大学工学部 正会員 鬼束幸樹
九州工業大学工学部 正会員 重枝未玲

1. はじめに

跳水現象はダムの余水吐き、堰の下流側など河川の様々な場所で観察される。水平な平坦河床上の跳水における共役水深の関係は、連続式と運動量の式とを連立させ、壁面摩擦を無視し、静水圧分布を仮定することで求められ、流入フルード数の一価関数であることが理論的に証明された。また、形態もフルード数により、波状跳水、弱跳水、動揺跳水、定常跳水および強跳水に分類されることが解明されている。一方、跳水長は Smetana¹⁾による実験的研究によって、共役水深の一価関数として定式化された。以上のように平坦河床上の跳水現象に関して、時間平均された共役水深の関係、跳水長などの特性はほぼ解明されている。一方、跳水現象が生じている河川における問題として、河床材料の抜け出しによる護床工破壊が挙げられる²⁾。これは、漂流物の衝突やパイピングだけでなく、瞬間的な負圧も一因と考えられる²⁾。瞬間的な圧力の検出に関しては、動圧を逆算した楠津ら³⁾の研究例があるものの、跳水内の瞬間的圧力の計測はこれまでほとんど行われていない。

本研究ではフルード数を変化させることで波状跳水、弱跳水、動揺跳水、定常跳水をそれぞれ発生させ、各跳水中の底面圧力変動および水面変動を同時計測し、圧力変動、水面変動および両者の相関などを解明したものである。

2. 実験の概要

本実験には長さ 20.5m、幅 0.6m、高さ 0.6m の水平な水路を用いた。水路内にスルースゲートを設け、その下流側に図-1 に示すような長さ 3m、幅 0.6m、高さ 0.1m の木製のボックスを設置した。 L_r は跳水長である。ボックス天端の水路中央部には直径 6mm の多数の孔が流下方向に点在しており、任意の位置での圧力が計測可能である。孔から圧力計までのビニールチューブの長さは 3m である。チューブの変形による圧力変化の影響が考えられるが、白石ら⁴⁾の研究によりチューブの変形が圧力の変動成分および検出時間に影響を受けることが明らかとなり、補正式を提案している。本研究ではこの補正式によりチューブによる影響を除去する補正を行っている。

流入水深 h_i が 0.01m、流入フルード数 $Fr_1 \equiv U_{m1} / \sqrt{gh_i}$ が 1.6, 2.2, 4.0, 6.0 の 4 ケースの跳水を計測対象とした。ここに、 U_m は水深平均流速、 g は重力加速度、添字 1 は射流域の諸量を意味する。跳水始端から流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸をとる。

8 個の圧力計を用いて射流域の 1 カ所(No.1)、跳水始端の 1 カ所(No.2)、跳水内の 3 カ所(No.3~5)、跳水終端の 1 カ所(No.6)、跳水終端の下流側で跳水の影響を受けるとされる領域の 1 カ所(No.7)および跳水終端の下流側で跳水の影響を受けないと思われる領域の 1 カ所(No.8)の合計 8 カ所の底面圧力を、測定間隔 0.05s、測定時間 51.2s で計測した。以後、上流からの測点番号を添字として用いる。また、この計測と同時に 2 つの超音波波高計を用いて上記の 8 カ所の全ての組み合わせの場所における波高を測定間隔 0.05s、測定時間 51.2s で計測した。超音波波高計の応答は 0.018s であり、測定間隔より高周波なため、測定の応答遅れによる誤差は微小である。

3. 結果と考察

図-2 に各フルード数における平均水深 H_i を黒線で、平均水深から水面変動の標準偏差の 3 倍を加算した位置 $H_i + 3h'_i$ を赤線で、 $H_i - 3h'_i$ を青線で示すと共に、圧力変動の標準偏差 p'_i を平均圧力 P_i で除したものを示す。跳水内の水面変動強度はフルード数の増加とともに増加傾向を示している。圧力変動に関しては跳水先端付近において増加傾向を示し、その後は減少傾向を示している。

図-3 に各フルード数における各点の圧力を静水圧 $\rho g H_i$ で除したものを示す。跳水内の No.3 付近では跳水の渦がまきこむことにより大幅に圧力が低下していると考えられる。

跳水現象の周期性を調べるために水面変動の自己相関係数 $R_{hi,hi}(\tau)$ を次式より求めた。

$$R_{hi,hi}(\tau) \equiv \frac{\overline{h_i(t) \times h_i(t + \tau)}}{h_i \times h_i} \quad (1)$$

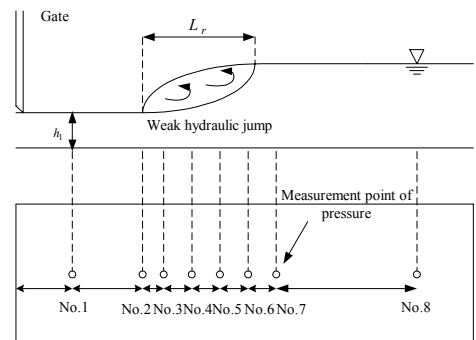


図-1 実験装置および測定点

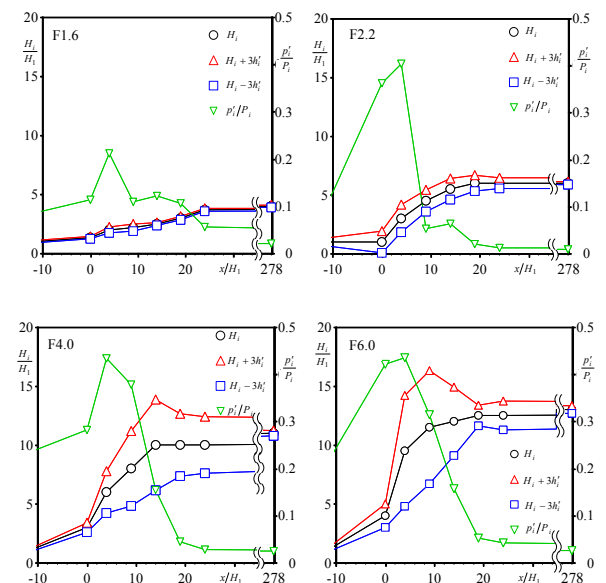


図-2 水面形および圧力変動

図-4に $R_{hi,hi}(\tau)$ の一例を示す。射流部分(No.1)では極小値および極大値を示すことなく、遅れ時間 τ の進行に伴い値が減少している。これは、周期的な変動がないことを意味し、流入状態が適切であったこと示している。一方、跳水始端のNo.2以降では極大値、すなわちセカンドマキシマムの発生が観察された。セカンドマキシマムは、跳水が水路の上下流方向に周期的に振動しているために生じているものと考えられる。また、等流部分のNo.8ではセカンドマキシマムの値が極めて小さく、跳水の影響をほとんど受けていないことを示している。圧力の自己相関も水深の自己相関とほぼ同様に、跳水内(No.3~6)および跳水直後(No.7)でセカンドマキシマムが観察される。そこで、セカンドマキシマムの値を $R_{pi,piM}$ 、セカンドマキシマムが発生する遅れ時間を $\tau_{pi,piM}$ と定義した。図-5に圧力変動の自己相関から得られた $R_{pi,piM}$ 、 $\tau_{pi,piM}$ および同様に水面変動の自己相関から得られた $R_{hi,hiM}$ 、 $\tau_{hi,hiM}$ の流下方向変化を示す。各フルード数で $\tau_{pi,piM}$ と $\tau_{hi,hiM}$ はばらついているものの、フルード数の増加とともに減少傾向を示し、跳水の変動周期が短くなっていることが示唆される。一方、 $R_{hi,hiM}$ 、 $R_{pi,piM}$ はフルード数の増加とともに若干減少傾向を示し、跳水の組織構造が失われていることが示唆される。

水面変動および圧力変動の流下方向への伝搬特性を調べるために跳水内の比較的上流に位置するNo.3における水深および圧力の相互相関係数を求めた。その一例を図-6に示す。両者ともにNo.8を除く点でセカンドマキシマムの発生時間が流下に伴い遅れていることが確認され、No.3で表面渦に伴って発生した組織構造が流下方向に移流しながら減衰していることが示唆される。また、フルード数の増加とともに相関係数は減少していた。

跳水現象において、水面変動が河床圧力変動に及ぼす影響はほとんど解明されていない。そのため水深と圧力の相互相関 $R_{hi,pi}(\tau)$ を求めた。その一例を図-7に示す。跳水内およびその前後においては、 $\tau=0(s)$ 付近で $R_{hi,pi}(\tau)$ が最大値をとっている。これは水面変動によって圧力変動が生じていることを示している。ただし、最大となるのは $\tau>0(s)$ であり、水面変動と底面圧力変動の位相が一致していないことを表している。フルード数が変化しても顕著な結果はみられなかった。

4. おわりに

本研究ではフルード数を変化させることで波状跳水、弱跳水、動揺跳水、定常跳水をそれぞれ発生させ、各跳水中の底面圧力変動および水面変動を同時計測し、圧力変動、水面変動および両者の相関などを解析した。その結果、跳水内の水深変動および圧力変動が表面渦に伴って組織的になっていることおよび、跳水始端は水路の上下流方向に振動しているが、この周期的な変動が水面だけでなく、底面でも生じていることおよび跳水内では両変動に位相差があることを解明した。また、フルード数の増加とともに水面変動および圧力変動の相関係数は減少傾向を示し、跳水の組織構造が失われていることが解明された。

参考文献

- 1) Smetana: Condress de Navigation Insterture, 1935.
- 2) 中川博次, 辻本哲郎, 清水義彦, 村上正吾: 第31回水理講演会論文集, pp.359-364, 1987.
- 3) 瀬津家久, 中川博次, 天野邦彦: 第30回水理講演会論文集, pp.601-606, 1986.
- 4) 白石達郎, 尾関弘明, 後藤伸一, 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 重枝未玲: 平成18年度土木学会西部支部研究発表会概要集, 2007.

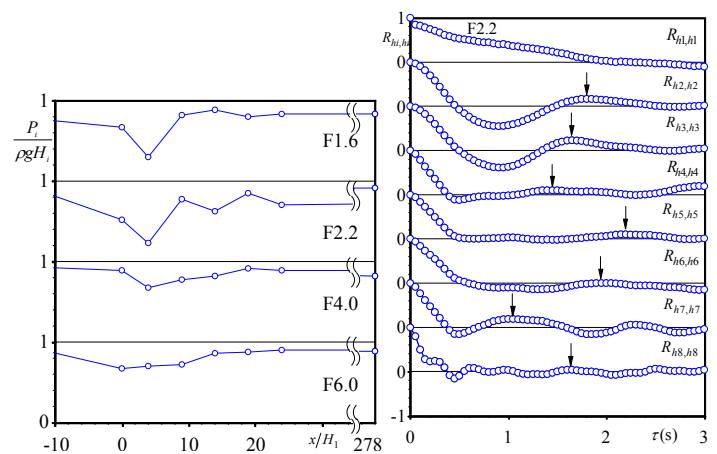


図-3 圧力変動

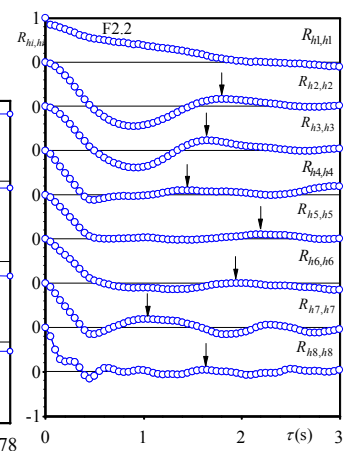


図-4 水深の自己相関

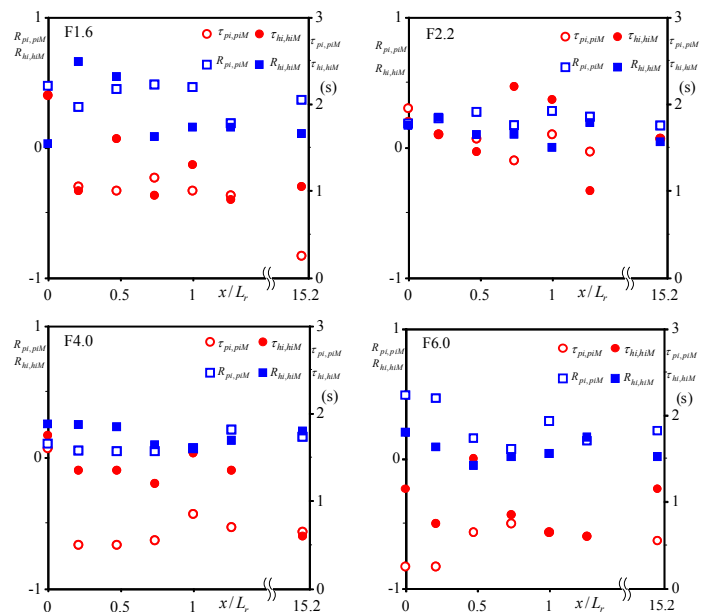


図-5 自己相関係数および遅れ時間

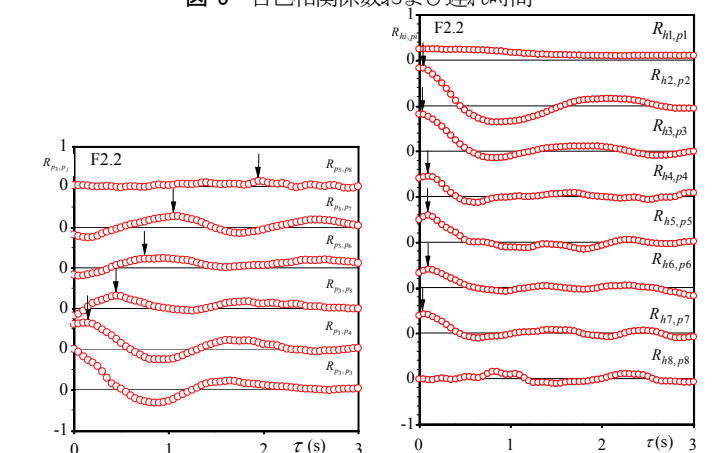


図-6 No.3と下流域圧力の相互相関

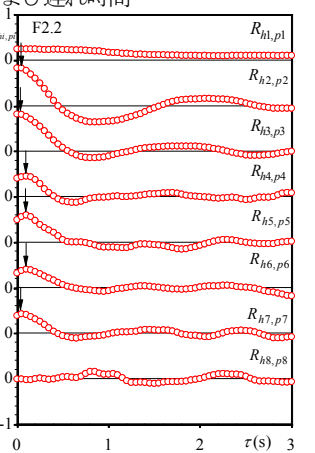


図-7 水深と圧力の相互相関