

台形堰下流側に形成される跳水中の流速特性

日本大学理工学部土木工学科 正会員 安田陽一
日本大学理工学部土木工学科 学生会員○佐藤麻衣

1.まえがき

可動堰や固定堰などの河川構造物を設置する際に、河床保護のための水叩きや護床ブロックを設置することが義務付けられている¹⁾。現在、水叩きの長さは流水や転石による直接衝撃を受ける範囲、その厚さは水叩きにかかる揚圧力に対して安定である厚さとされている。また、護床ブロックの長さは跳水長までとされている¹⁾。しかし、護床ブロックが下流側へ流されてしまう事例が確認されている。この原因として、跳水中の主流が底面付近に位置していることが考えられる。主流が底面に沿うことでブロック上部の圧力が下がり、吸い出し作用によってブロックが不当沈下し、傾いた面に局部的に流体力が作用して流されたものと考えられる。

既往の文献から、跳水中の主流の位置が跳水始端での乱流境界層の発達状態によって異なることが報告されている^{2),3)}。境界層が発達していない場合、跳水中の主流は底面近くに位置し、境界層が十分に発達した場合は短区間で主流が水面に向かって上昇する。しかしながら、台形堰下流側に跳水が形成される場合、乱流境界層が発達した状態でも主流が短区間で上昇するのか不明である。

ここでは、台形堰下流側に形成される跳水について着目し、台形堰の接合部から跳水始端までの距離によって跳水中の主流の位置がどのように変化するについて、表1に示す実験条件のもとで検討を行った。

2.実験

実験は図1に示す傾斜角度 26.7° 、高さ40cmを有する台形堰模型を長方形断面水平路(幅80cm高さ60cm、長さ15m)に設置し、堰下流側の射流特性および跳水中の流速特性について検討を行った。なお、台形堰の斜面上で境界層が速やかに発達するようにするため、表面はシリコンで毛羽立たせている(図1中の写真1)。水路上流側に設置されている高水槽から水路に流入する流量は水路下流端に設置されている全幅堰を用いて計測している。台形堰下流側に形成される跳水の位置は水路下流端のゲートによって調整した。

堰下流側の流線の曲がりの影響を検討するためにピトー管を用いてピエゾ水頭を測定した。また、射流の水面形および跳水終端付近の水深測定のためにポイントゲージを用いた。射流区間の流速については、ピトー管を用いて測定した。跳水中の流速については、KENEK製のI型2次元電磁流速計(プローブ径4mm)を用いて計測した(採取間隔50ms, 採取時間90sec)。跳水部の流速測定は $x=0.65L_j, 0.86L_j, 1.08L_j, 1.46L_j$ (cm)の位置で(跳水長は $L_j=5.5 \times h_2^*$ で²⁾求めた)行い、横断方向へ10cm間隔7カ所で行った(図2参照)。

表1 実験条件	接合部からの距離 X		
	10cm	25cm	45cm
流量 $Q(m^3/s)$ ($=qB$)	4.80×10^{-2}	4.80×10^{-2}	4.80×10^{-2}
$Re=q/v$ (レイノルズ数)	48700	48700	48700
Fr (跳水始端のフルード数)	6.29	5.82	5.57
跳水始端水深 $h_1(cm)$	2.104	2.216	2.283
跳水始端水深(実験値) $h_2(cm)$	17.3	16.8	16.6
始端でのアスペクト比(B/h_1)	38.0	36.1	35.0
終端でのアスペクト比(B/h_2^*)	4.5	4.7	4.7
跳水長 $L_j = 5.5 h_2^*$ (cm)	97	94	93

キーワード 跳水, 台形堰, 減勢工, 主流の発達, 側壁境界層, 流速特性

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8, TEL: 03-3259-0409, E-mail : yokvas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

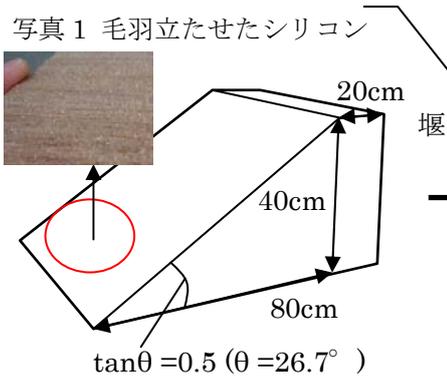


図1 台形堰模型

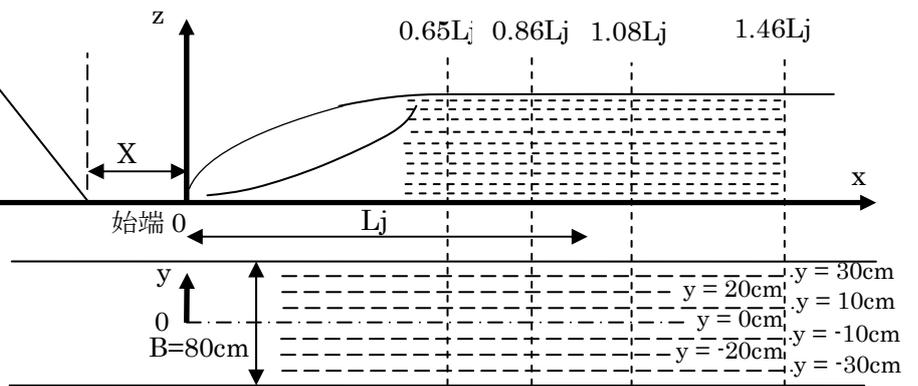


図2 測定位置

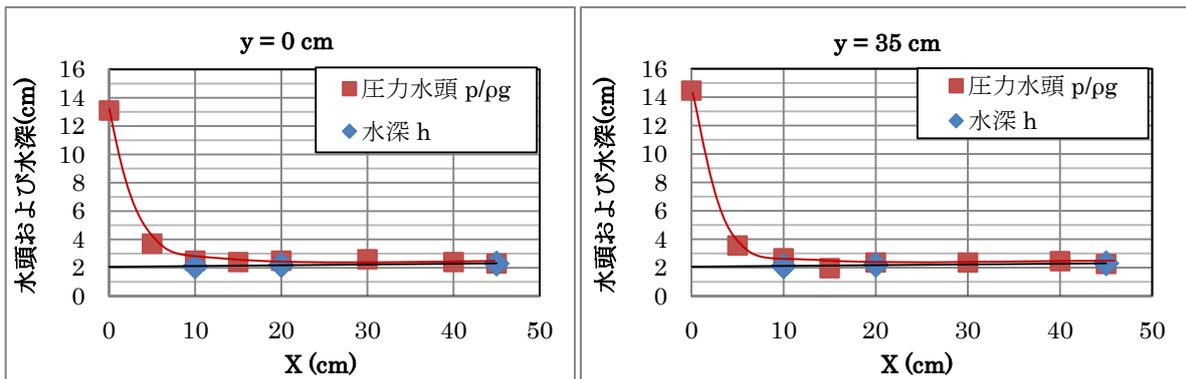


図3 接合部下流側の底面圧力水頭の流下方向の変化

3. 台形堰下流側の底面圧力水頭の変化

接合部下流側での底面圧力水頭の流下方向の変化を図3に示す。図中実線および菱形のシンボルは水面形を示す。図に示すように、 $X < 10\text{cm}$ では流線の曲がりの影響で圧力が静水圧より大きくなっている。また、 $X = 25\text{cm}$ 付近で圧力が静水圧と一致するようになる。なお、射流中では圧力の横断方向の変化は小さい。

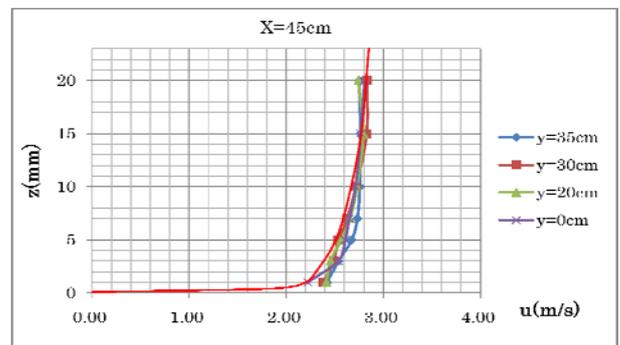
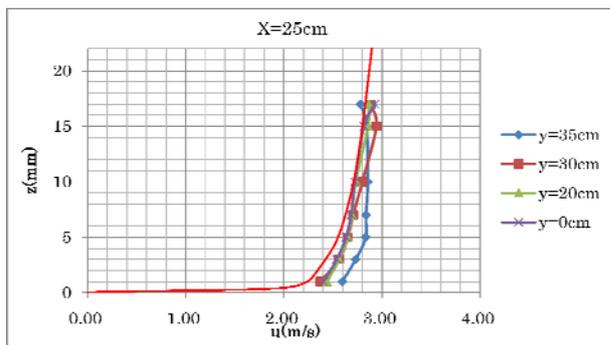
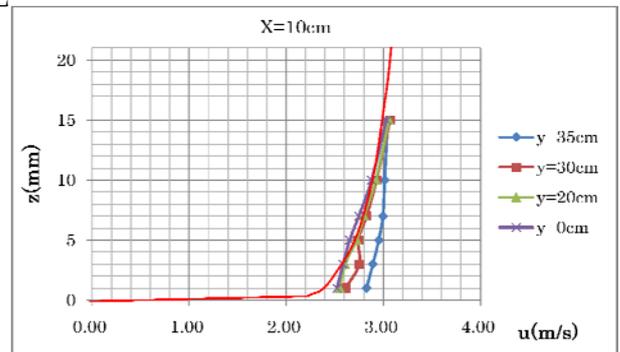
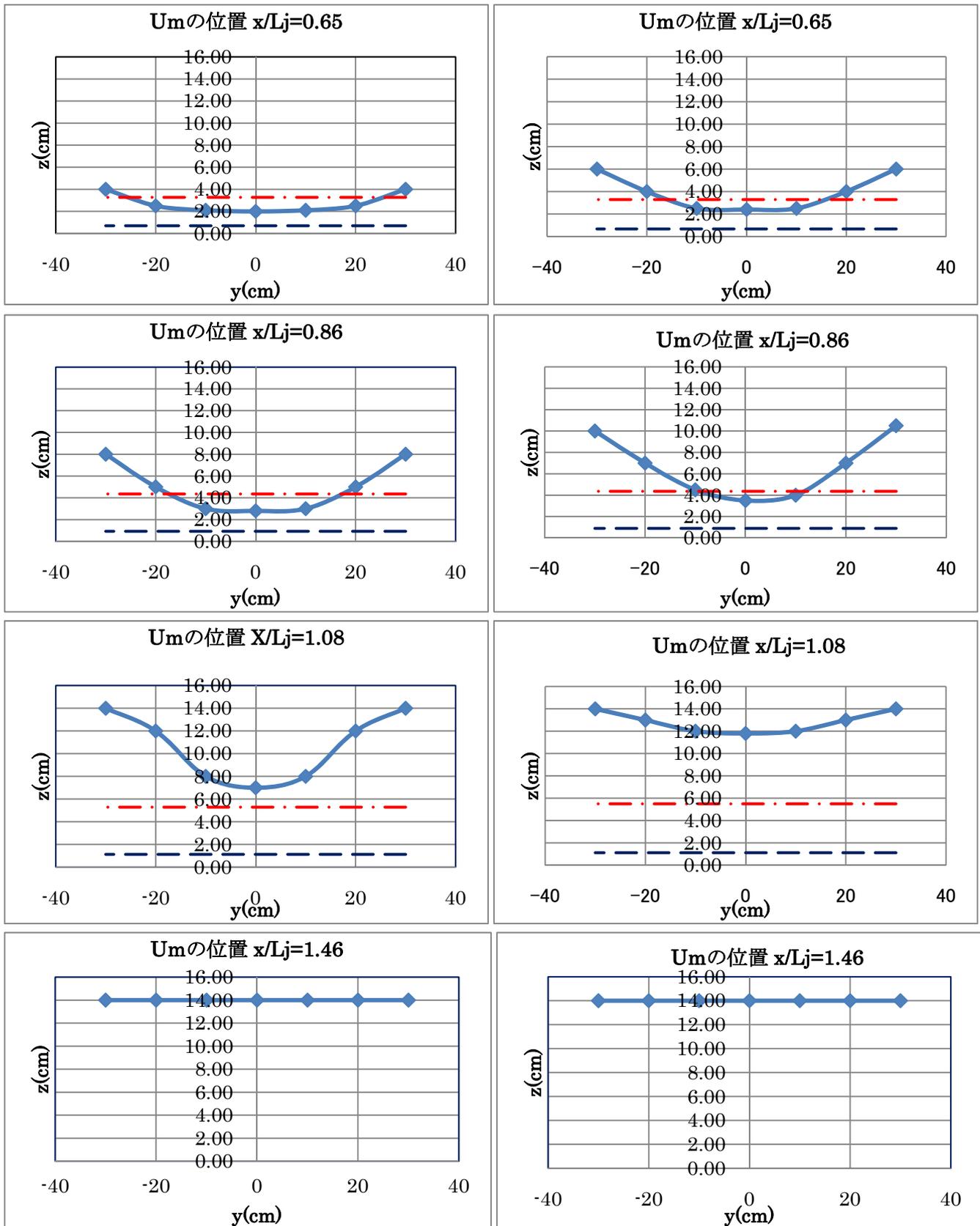


図4 跳水設定位置での射流の流速分布（上から $X = 10\text{cm}, 25\text{cm}, 45\text{cm}$ の場合）

4. 跳水設定位置での射流の流速分布

跳水設定位置($X = 10\text{cm}, 25\text{cm}, 45\text{cm}$)での射流の流速分布を図4に示す。図中 $u=0$ から示される実線は指数分布 ($1/12$ 乗則) を示し、 $y = 0\text{cm}$ の流速データに基づいて得られたものである。図に示されるように、どの断面においても様な流速にはならず、水路中央部 ($y=0\text{cm}$) を中心に指数分布に近い分布となっている。流線の曲がりの影響のない場合の射流区間では、 $1/7$ 乗則で近似される³⁾が、台形堰下流では指数の値が大きくなっている。また、 $X=10, 25\text{cm}$ では、側壁に近づくにつれて底面付近の流速が大きくなる傾向を示す。



a) $X = 10 \text{ cm}$ (始端での底面圧力が静水圧より大きい) b) $X = 25 \text{ cm}$ (始端での圧力が静水圧に回復したばかり)
 図5 水深測定方向の断面で生じる最大流速の位置に関する変化特性

5. 跳水区間下流部の主流の位置

跳水設定位置($X = 10 \text{ cm}$, 25 cm , 45 cm)ごとに、水深測定方向の断面で生じる最大流速の位置が横断方向にどのように変化するかを図5に示す。図は跳水中の測定位置 x/L_j ごと($x/L_j = 0.65, 0.86, 1.08, 1.46$)に分けて示している。図中の一点鎖線は水平水路上に形成される自由跳水(始端での乱流境界層が十分に発達した

状態)中の各断面で生じる最大流速の位置を示す²⁾。また、破線は自由水面の影響のない壁面噴流の場合⁵⁾を示す。図に示されるように、最大流速の生じる位置は横断方向に変化し、 $x/L_j > 0.6$ では側壁付近に近いほど、側壁境界層の影響を受けて主流が上昇しやすくなっている。

水平水路に形成される自由跳水の場合、 $x/L_j > 0.6 - 0.7$ では主流が短区間で水面に向かって上昇するため、一点鎖線で示した位置より上方となる²⁾。跳水始端が $X = 10 \text{ cm}, 25 \text{ cm}$ に位置した場合、 $x/L_j < 0.9$ でも最大流速は一点鎖線より下方に生じることから、流線の曲がりの影響が大きいことが理解される。始端が $X = 45 \text{ cm}$ に位置した場合、 $x/L_j = 0.65$ でも一点鎖線よりも下方に最大流速が生じている。また、 $x/L_j = 0.86$ では、水路中央部であるが、最大流速が一点鎖線近くで生じている。なお、壁面噴流の場合と比べると、自由水面の影響を受けて、最大流速が破線より上方で生じている。

これらの結果から、台形堰下流側に形成される跳水の場合、射流の流速特性が水平水路の場合と異なるため、射流中の圧力が静水圧となっても、跳水中の流速特性が大きく異なることが分かる。

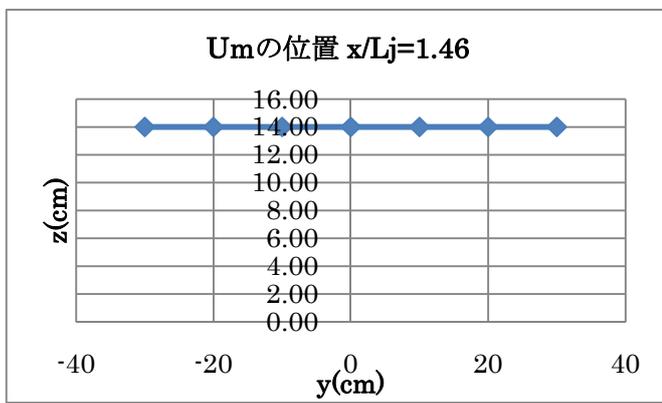
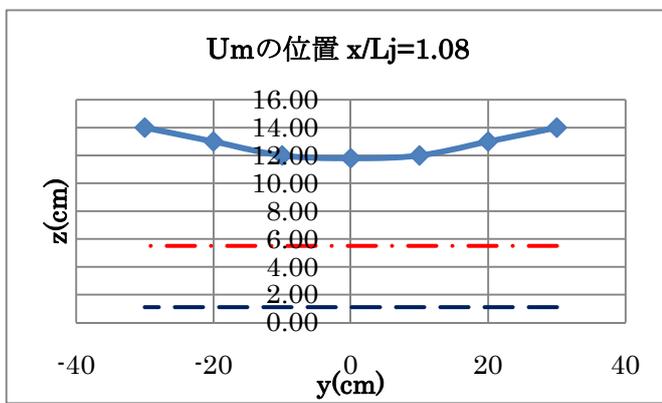
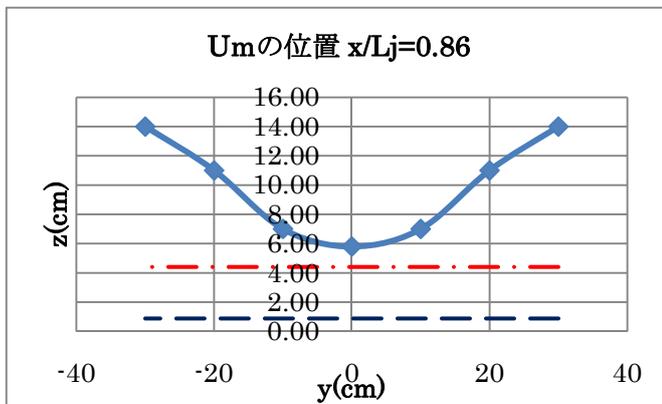
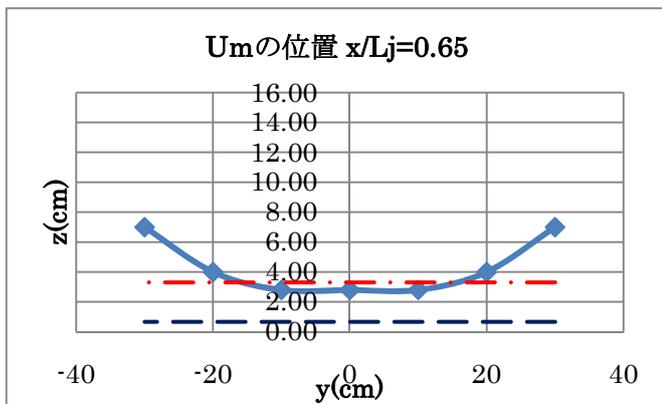
6.まとめ

表 1 に示す実験条件のもとで台形堰下流側に跳水を形成させ、跳水中の流速特性の検討を行った。

跳水始端が堰下流側の $X = 10, 25, 45 \text{ cm}$ に位置した場合、 $0.6 < x/L_j < 0.9$ の範囲で、跳水中の主流が水路中央付近で底面付近に位置し、側壁側では水面付近に位置することが明らかになった。すなわち、既往の文献で示されている跳水特性の位置づけを明確にすることが重要であり、床固め工や頭首工下流側の減勢工の水理設計に必要な水理特性を解明する必要がある。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修, 改訂新版建設省河川砂防技術基準(案) 同解説・設計編[II] 技法堂出版, 1999.
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Awazu, S., Free and Submerged hydraulic Jumps in Horizontal Rectangular Channel, Report of the Research Institute of Science and Technology, Nihon University, No.35, 1990, pp.1-50.
- 3) 松澤貴士,高橋正行, 大津岩夫, 跳水内部の空気混入率及び流速分布に対する流入射流の影響, 第 52 回日本大学工学部学術研究報告会, 土-2-10, 2009, pp.102-105.
- 4) Ohtsu, I. and Yasuda, Y., Characteristics of Supercritical Flow Below Sluice Gate, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.120, No.3, 1994, pp.332-346.
- 5) Wu, S. and Rajaratnam, N., Free jump, Submerged jump, and Wall jets, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.33, No.2, 1995, pp. 197-212.



c) $X = 45 \text{ cm}$ (始端での底面圧力が静水圧となっている)
図 5 (つづき)