

II-158

鉛直シルによる跳水形成のための条件

日大 理工 正員 大津 岩夫
 日大 理工 正員 安田 陽一
 日大 理工 学生員 〇羽柴 秀樹

ダムやゲートから流出する高速流のエネルギー減勢のため、跳水を形成させることが一般的である。跳水を形成させるための一つの方法として鉛直シルが用いられている。鉛直シルを越える流れは射流のフルード数 $F_1 (=v_1/\sqrt{gh_1})$ 、 h_1 : 射流水深、 v_1 : 射流の平均流速) 相対シル高 S/h_1 (S : シル高) および下流水深 h_t/h_1 によって図-1に示されるような種々の流況が形成される^{1) 2)}。図-1aに示される流況の場合、エネルギーがほとんど減勢されることなく射流がシル上を通過する。このような流況が生じないようにし、跳水を形成させることが必要である。シルによって跳水が形成されるための条件についてはKarki³⁾、Hager⁴⁾ らによって検討がなされているが必ずしも明確とは言えない。ここでは鉛直シルを越える流れの流況について実験的検討を加え、シルによって跳水が形成されるための水理条件について明らかにした。

流況の説明

鉛直シルを越える流れは図-1に示されるようにSpray condition、Type I jumpおよびType II jumpに大きく分類されている^{1) 2)}。

与えられた F_1 のもとでSpray condition が形成されている状態から相対シル高 S/h_1 を大きくしていくと、ある段階($S/h_1 = S_c/h_1$, S_c : シル前方に表面渦が形成されるための最小必要シル高)でシル前方に表面渦が形成されるようになりType II jumpが形成される。このときシルを越える流れと後面との間でair-pocketが形成されている。なお、Type II jump が形成されている状態から S/h_1 を小さくしていった場合も同じ S_c/h_1 でSpray condition が形成される¹⁾。

また与えられた F_1 , S/h_1 ($< S_c/h_1$)のもとでSpray conditionが形成されている状態から下流水深 h_t/h_1 を大きくしていくと、シル後面側の水位(図-1a)が上昇し、ある段階($h_t/h_1 = h_s/h_1$, h_s : シル前方に表面渦が形成されるための最小必要下流水深)でシル前方に表面渦が形成されるようになり、Type I jumpが形成される。逆にType I jumpが形成されている状態から下流水深 h_t/h_1 を小さくしていった場合も同じ h_s/h_1 でSpray condition が形成される¹⁾。

シルによって跳水が形成されるための条件

シルを越える流れの流況がSpray condition の状態から相対シル高 S/h_1 を大きくしていくとシル上を通過する流線の曲りが大きくなる。これにともなってシル直下流側のC断面(図-2)での流れが限界流に近づくものと考えられる。相対シル高 S/h_1 が S_c/h_1 となると限界流が生じ、このときSpray condition とType II jumpの境界となるものと仮定する。なおこの境界においてシル後面の水深(図-2)はシル高 S とほぼ同じであることが流況の観察から認められる。図-2に示される1、C断面間の流体をコントロールボリュームに選び水平方向に運動量方程式を適用すると式(1)が得られる。

$$wh_1^2/2 - P_r - kwh_c^2/2 = \rho q (\beta_c v_c - v_1) \quad (1)$$

ここに P_r は単位幅あたりのシル前面に作用する全圧力、 q は単位幅流量、 v_c はC断面での平均流速 [$v_c = q/h_c$; $h_c (=h_1 F_1^{-2/3})$: 限界水深]、 β_c はC断面での運動量補正係数、 k は圧力を補正する係数である。また1断面での圧力は静水圧分布するものとし、運動量補正係数を1としている。C断面については β_c および k を1と仮定すると式(1)は次のように無次元表示される。

$$S_c/h_1 = (1 + 2F_1^2 - 3F_1^{4/3}) / (F_1^2 C_{ar}) \quad (2)$$

ここに、 C_{ar} は P_r の無次元量 [$C_{ar} = P_r / (\rho v_1^2 S/2)$] である。

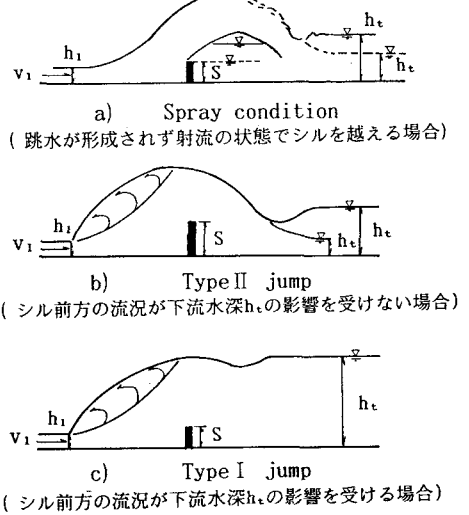


図-1 流況

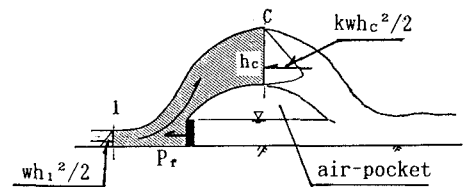
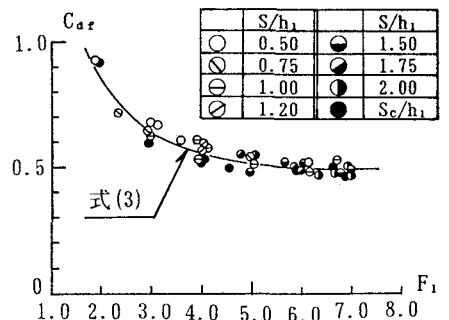


図-2

図-3 $C_{ar} = f(F_1)$ の関係

Spray condition の場合 C_{ar} は図-3 に示されるように S/h_1 に関わらず F_1 によって変化し、式(3)で示される。

$$C_{ar} = 0.5 + \text{EXP}\{- (F_1 - 1)\} \quad (3)$$

なお、図-3 において $S/h_1 = S_c/h_1$ の場合の実験値も含まれ整理されている。

与えられた F_1 に対して式(3)を式(2)に代入することによってシル前方に跳水が形成されるための最小必要シル高 S_c/h_1 の値が求められ図-4の実線で示す。図に示されるように実線と実験値は同様の値を示す。

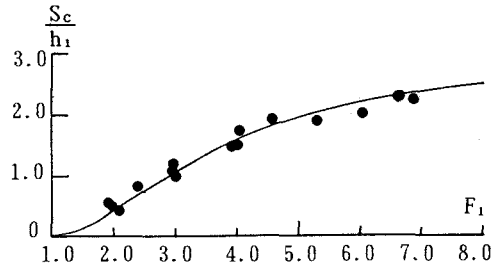


図-4 $S_c/h_1 = f(F_1)$ の関係

Spray condition の状態から h_c/h_1 を大きくするにしたがってシル後面側の水位が上昇し、図-5中の背面圧 P_B が大きくなりこの影響によりシル上を通過する流線の曲りが大きくなる。これにともないシル直下流側のC断面(図-5)の流れが限界流に近づくものと考えられる。下流水深が $h_t/h_1 = h_s/h_1$ となると限界流が生じ、このとき Spray condition と Type I jump の境界となるものと仮定する。図-5に示される1,C断面間の流体および1,2断面間の流体をコントロールボリュームに選りそれぞれ水平方向に運動量方程式を適用すると式(4),(5)が得られる。

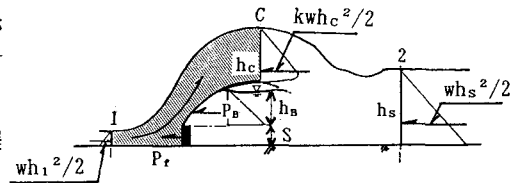


図-5

1,C断面間について

$$wh_1^2/2 - P_f - kwh_c^2/2 - wh_s^2/2 = \rho q (\beta_c v_c - v_1) \quad (4)$$

1,2断面間について

$$wh_1^2/2 - D - wh_s^2/2 = \rho q (v_s - v_1) \quad (5)$$

ここに、 D は単位幅あたりのシルに作用する抗力 [$D = P_f - w(2h_s S + S^2)/2$], h_B :シル後面側の水面からシル上までの距離(図-5)], v_s は2断面での平均流速($v_s = q/h_s$)である。また1,2断面での圧力はそれぞれ静水圧分布するものとし、運動量補正係数は共に1としている。C断面については β_c および k をそれぞれ1と仮定すると式(4)は式(6)のようにな次元表示される。

$$h_B/h_1 = (1 + 2F_1^2 - 3F_1^4 - F_1^2 S/h_1 C_{ar})^{1/2} \quad (6)$$

式(5)について無次元化すると式(7)のように整理される。

$$(h_s/h_1)^3 + (C_{ar} F_1^2 S/h_1 - 1 - 2F_1^2) (h_s/h_1) + 2F_1^2 = 0 \quad (7)$$

ここで、 C_a は抗力係数 [$D/(\rho v_1^2 S/2)$]を示し $C_a = \{P_f - w(2h_s S + S^2)/2\}/(\rho v_1^2 S/2) = C_{ar} - F_1^{-2}(2h_B/h_1 + S/h_1)$ である。なお、 C_{ar} は式(3)で示される。

与えられた $F_1, S/h_1 (< S_c/h_1)$ に対して式(3),(6),(7)よりシル前方に跳水が形成されるための最小必要下流水深 h_s/h_1 の値が求められ図-6の実線で示す。図に示されるように実線と実験値は同様の値を示す。

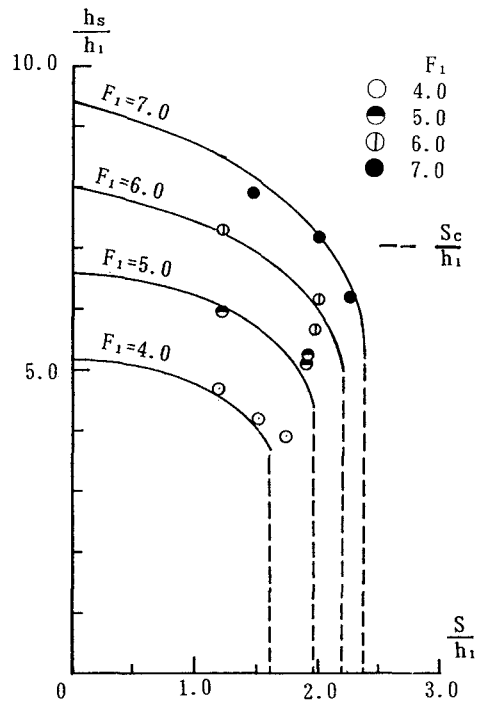


図-6 $h_s/h_1 = f(F_1, S/h_1)$ の関係

以上のことから、シルによる跳水形成のための条件(incipient jump condition)が、Spray condition と Type II jump との境界については式(2),(3)から、Spray condition と Type I jump との境界については式(3),(6),(7)から求められる。

参考文献

- 1) 大津岩夫:鉛直シルによる強制跳水、土木学会論文報告集、第311号、1981年7月、pp.56~69.
- 2) Ohtsu, I. et al., Drag on vertical sill of forced jump, J. of Hydr. Res., IAHR, Vol.29, 1991, No.1, pp.29-47.
- 3) Karki, K.S. et al., Supercritical flow over sills at incipient jump conditions, J. of Hydr. Div., ASCE, Vol.98, No. HY10, Oct., 1972, pp.1753-1764.
- 4) Hager, W.H. et al., Incipient jump condition for ventilated sill flow, J. of Hydr. Engrg., ASCE, Vol.112, No.10, Oct., 1986, pp.953-963.