

空気混入による段落ち落下水の減勢効果に関する研究

Influence of Air Entrainment on Deflected Jet from Plunging Jet

西日本工業大学	赤 司 信 義	Nobuyoshi AKASHI
西日本工業大学	石 川 誠	Makoto ISHIKAWA
山口大学工学部	斎 藤 隆	Takashi SAITOU

This paper describes the influence of the air-entrainment on the deflected jet from plunging nappe induced by open channel step flow and the characteristics of the deflected jet from inclined submerged jet. The characteristic values such as maximum velocity, representative width of the deflected jets, and so on, are related to air-entrained discharge. And the air-entrained deflected jets are connected with the inclined submerged jet through the density Froude number F_d . By the experimental equations, those correspondences are clear. Furthermore, it becomes clear on the basis of the calculated results of the boundary layer growth of the deflected jets that the tractive forces are considerably reduced more than $h_* = 0.5$.

Keywords: plunging jet, air entrainment, deflected jet, falling nappe

1. 序 論

砂防ダムや河川段落ち部等からの落下水は、下流水面に突入する際に水中に多量の空気泡を混入して、河床に斜めに衝突する流れになる。構造物直下流の河床が土砂で構成される場合には、気泡の混入を伴った衝突流れによって河床は洗掘される事になる。この様な洗掘の現象を解明したり、洗掘の防止を目的として設置される水叩きの長さを検討したりする場合には、河床衝突流れの特性を明らかにしておく必要がある。従来の自由落下式減勢工に関する研究では、空気混入や空気混入によって衝突後の流れ特性がどの様に規定されるのかと言った事等はほとんど明らかにされていない。本研究は、段落ち落下水によって混入される空気量、この流れによる河床衝突流れの平均流速特性、空気混入量を増大させた時の段落ち落下水による平均流速特性、及び、空気混入のない斜めもぐり噴流による衝突流れの平均流速特性を、限られた条件ではあるが、実験によって検討し、段落ち落下水の河床衝突流れの空気混入による減勢効果、特に空気混入による底面せん断力の軽減効果を明らかにする事を目的として、行われたものである。

2. 実験装置と実験方法

実験は、通常の直角段落ち部からの落下水による衝突流れ (RUN-A)、段落ち背面に突起をつけて空気混入量を増大させた時の落下水による衝突流れ (RUN-B)、及び、気泡混入のない斜めもぐり噴流による衝突流れ (RUN-C) について行われた。

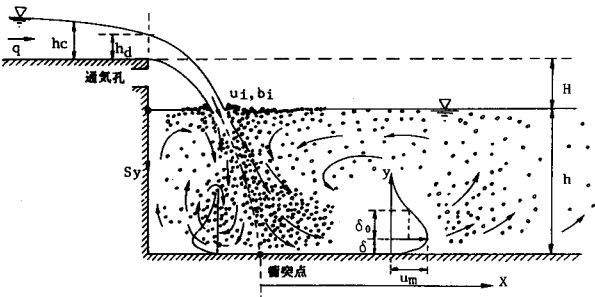


図1 段落ち落下水による衝突流れの概略

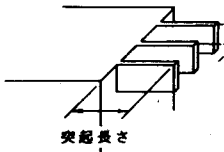


図2 段落ち背面の突起の概略

RUN-A の実験装置は、幅 20 cm 高さ 40 cm 長さ 12 m の開水路下流に幅 20 cm 高さ 1.25 m 長さ 4 m の開水路を接続した直角段落ち水路で、上流水路底から下流水路底までの高さは 86 cm である。図 1 はこの実験で観察された流れの概略を主要な記号と共に示したものである。RUN-B の実験装置は、空気混入量の増大を図るために、RUN-A の実験装置の段落ち背面に突起を設けたもので、突起の設置状況を図 2 に示している。突起の厚さは 5 mm、突起の高さは 5 cm で、突起長さ l が 5 cm と 10 cm、突起本数 n が 3 と 7 の場合について流れの測定が行われた。RUN-C の実験装置は、図 3 にその概略を示す様に、幅 1 m 高さ 1 m 長さ 4 m の水槽内に幅 1 cm のノズルを水面下 30 cm の位置に 45° 傾けて取り付けたものである。RUN-A、B、C 共に、水路底面には、滑面床として、アクリルガラス板を用いた。

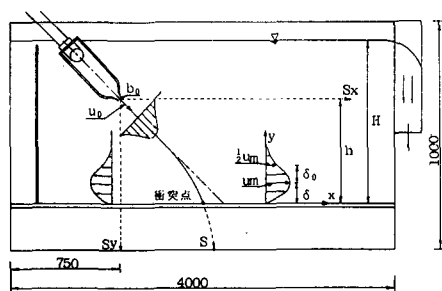


図3 斜めめくり噴流の実験装置の概略

流速測定には、レーザー流速計と外径 2 mm、総圧口径 0.5 mm のプラントル型ピトー管を併用した。気泡の時間的存在率を表すボイド率の測定には、ボイドプローブを使用した。底面圧力水頭は、水路中心線上の底面に設置したピエゾ管で測定された。落下水の水面突入によって静水中に混入される空気量 q_a は、河床衝突前で測定された速度分布とボイド分布を次式に代入して求められた。 $q_a = \int f(u-u_b) dy$ 。 u_b は気泡の浮上速度で、この値を 25 cm/sec とした。

なお、RUN-A、B での落下水脈の突入速度 u_i 及び突入幅 b_i は、段落ち地点の水深を h_d として、それぞれ $u_i = \sqrt{2g(H + h_d/2) + (q/h_d)^2}$ 、 $b_i = q/u_i$ によって定めた ($Q = 20$ l/sec の時 $h_d = 7.4$ cm、 10 l/sec の時 4.7 cm、 5 l/sec の時 2.9 cm であった)。

3. 実験結果とその検討

3.1 段落ち落下水による空気混入量について (RUN-A と RUN-B)

図 4 は、RUN-A と RUN-B の場合の空気混入量 q_a を、落下高 H を $H = 26$ cm、 46 cm の場合について示している。RUN-A の場合、 H が大きいと、

又、 q が多いと、 q_a は多くなっている。実験での観察によれば、水脈の突入によって混入される空気泡は、水脈の突入地点付近の水面が引き込まれたような形になって、水脈界面と静水面との間に空気が侵入し、その間隙内の空気が水脈の変動によって閉じ込められて、水中に水流と共に連行される。水脈の変動が少なければ、すなわち、水脈界面に生じる縦筋状の凹凸が小さく、凹凸の水平下流方向及び幅方向への揺らぎが少なければ、水脈界面はつららの様な鏡面を呈し、閉じ込められる空気量は減少する。逆に、水脈の変動が多ければ、その空気量は増大する。図 4 の RUN-A の結果は、落下高 H が大きいほど、水脈周囲の静水面の引き込みが大きく、又、流量 q が大きいほど (Re 数 $= q/\nu$ が大きいほど) 水脈の変動が大きい事によるものと

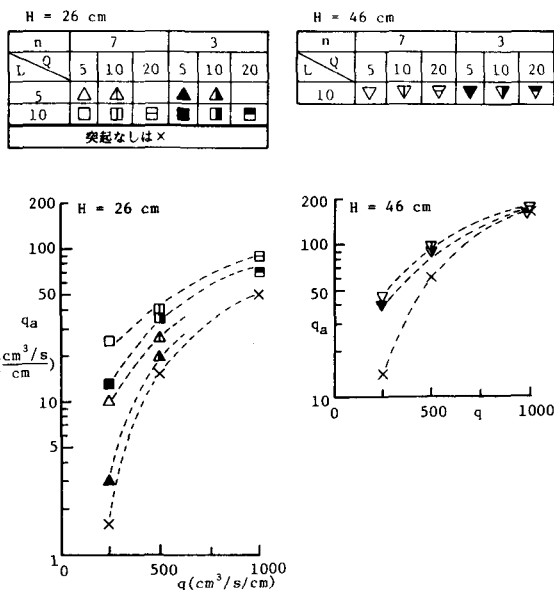


図4 空気混入量と水流量との関係

考える。RUN-B の実験は、水脈の変動を変えた時、どの程度空気量が増えるのかを見るために行われたもので、図 4 から、突起が長く、突起の本数が多いと、空気量が増えている事が分かる。

3. 2 段落ち落水による衝突流れの特性 (RUN-A と RUN-B)

鉛直落水に関する研究結果¹⁾を参考にして、落水水の水面突入点で様なボイド率 f_0 を持つとして、これを $f_0 = q_a/q$ で表し、最大流速や流れの幅等の代表値を次の様に無次元化して表す事にする。

$$u_{m*} = \frac{u_m}{u_i} (F_d^2)^{1/3}, \quad \delta_{0*} = \frac{\delta_0}{b_i} (F_d^2)^{-2/3} \tag{1}$$

$$h_* = \frac{h}{b_i} (F_d^2)^{-2/3}, \quad X_* = \frac{X}{b_i} (F_d^2)^{-2/3}, \quad F_d^2 = \frac{u_i^2}{f_0 g b_i}$$

河床に垂直な断面内での最大流速は、衝突点 ($X = 0$)より急に増大して、ある位置 (衝突点よりこの位置までを衝突域と呼ぶ) でピーク値に達し、その後減少する。衝突点よりピーク値までの衝突域の長さを X_j 、その無次元量を X_{*j} 、最大流速のピーク値 (これを代表最大流速と呼ぶ) を u_j 、その無次元量を u_{*j} として、各実験条件での X_{*j} 、 u_{*j} を読み取り、最大流速の変化を規格化したものが図 5 である。RUN-A と RUN-B に関わらず、ばらつきが大きい、空気混入の影響が判読できないため、一曲線で近似する事にする。図中の実線は、実験値の平均的な傾向が表せる様に定めた次式を示している。

$$u_m/u_j = 1.012 - 1.2 (0.5 X/X_j - 0.6)^2 \tag{2-1}$$

$$u_m/u_j = \sqrt{2.0 / (X/X_j + 1.0)} \tag{2-2}$$

図 6、7 は、それぞれ図 5 の規格化に用いた u_{*j} 、 X_{*j} を示している。両図から、実験式を定めれば、

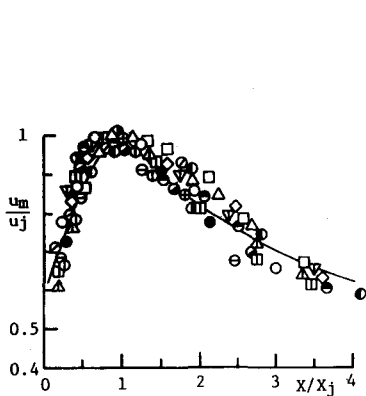


図 5 最大流速の変化

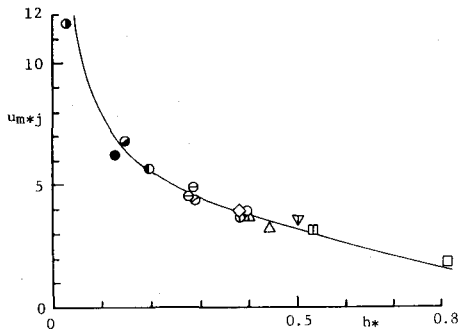


図 6 代表最大流速

RUN - A (突起なし)													
	Q (l/s)	h (cm)	H (cm)	u _i (cm/s)	b _i (cm)	$\frac{u_i b_i}{v}$	f ₀	F _d ²	$\frac{h}{b_i}$	h _*	記号		
A-1	20.	40.	46.	341	2.93	1×10 ⁵	0.20	203	13.7	0.40	○		
A-2	10.	40.	46.	326	1.54	5×10 ⁴	0.12	588	26.1	0.37	●		
A-3	5.	40.	46.	317	0.79	2.5×10 ⁴	0.056	2320	50.7	0.29	●		
A-4	20.	60.	26.	278	3.60	1×10 ⁵	0.050	439	16.7	0.29	●		
A-5	10.	60.	26.	259	1.93	5×10 ⁴	0.030	1177	31.0	0.28	●		
A-6	5.	60.	26.	248	1.01	2.5×10 ⁴	0.0064	9664	59.4	0.13	●		
A-7	20.	34.	6.	195	5.12	1×10 ⁵	0.0026	2919	6.6	0.032	○		
A-8	10.	30.	10.	189	2.65	5×10 ⁴	0.0017	8038	11.3	0.028	●		
A-9	10.	40.	22.	243	2.06	5×10 ⁴	0.020	1464	19.4	0.15	○		
A-10	20.	40.	22.	264	3.79	1×10 ⁵	0.050	374	10.5	0.20	●		

RUN - B (突起あり)													
	Q (l/s)	h (cm)	H (cm)	L (cm)	n	u _i (cm/s)	b _i (cm)	$\frac{u_i b_i}{v}$	f ₀	F _d ²	$\frac{h}{b_i}$	h _*	記号
B-1	10.	40.	46.	10	7	326	1.54	5×10 ⁴	0.19	371	26.1	0.51	▽
B-2	10.	60.	26.	10	7	259	1.93	5×10 ⁴	0.080	441	31.0	0.54	□
B-3	5.	60.	26.	10	7	248	1.01	2.5×10 ⁴	0.10	619	59.4	0.82	□
B-4	20.	40.	46.	15	7	341	2.93	1×10 ⁵	0.19	214	13.7	0.38	◇
B-5	5.	60.	26.	5	7	248	1.01	2.5×10 ⁴	0.040	1546	59.4	0.44	△
B-6	10.	60.	26.	5	7	259	1.93	5×10 ⁴	0.052	679	31.0	0.40	△

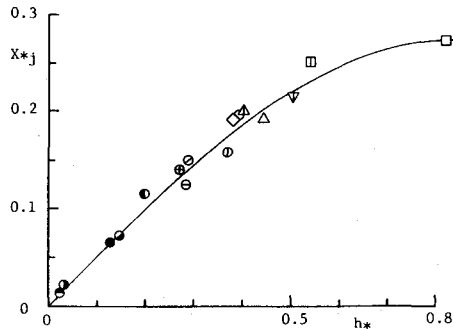


図 7 衝突域の長さ

それぞれ次の様になる。図中の実線は、これらの式を示している。

$$u_{m*j} = 2.5 (h_*^{-0.5} - h_*^3) \quad (3) \quad X_{*j} = 0.5 h_* - 0.25 h_*^3 \quad (4)$$

図 8 は、流れの代表幅として定めた $1/2$ 最大流速幅 δ_0 を示している。ばらつきが大きい、実験式を定めると次式になり、図中にこれを実線で示している。

$$\delta_{0*} = 0.07 \{ X_* + h_*/2 + 0.2 (X_* + h_*/2)^3 \} \quad (5)$$

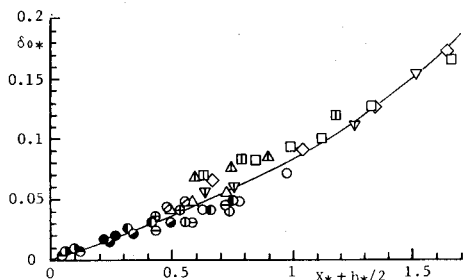


図 8 流れの代表幅 ($1/2$ 最大流速幅)

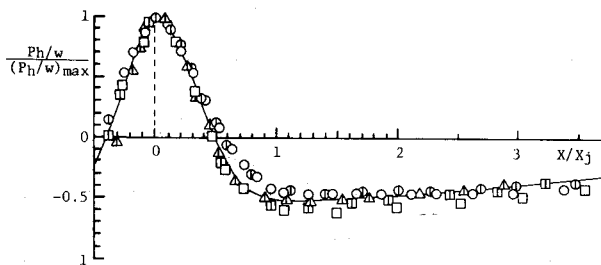


図 9 底面圧力分布

図 9 は、下流水面を基準線にとった底面圧力水頭分布を示していて、規格化に用いている $(p_h/w)_{\max}$ は最大の底面圧力水頭である。最大圧力水頭を実験式として定めたものが (6) 式で、図中に実線で記入している。水脈の突入によって水脈周囲に負圧を生じて水面が低下すると共に水脈の突入によって混入される気泡が存在するために、衝突域終端付近で底面圧力水頭が下流水深よりかなり低くなっている。図 10 は、無次元化した最大圧力水頭を示したものである。この平均的な傾向を実験式として示したものが (7) 式で、図中の実線はこれを示している。

$$(p_h/w)/(p_h/w)_{\max} = 1.51 \exp \{-5.35 (X/X_j - 0.05)^2\} - 0.51 \quad \text{for } -0.5 < X/X_j < 1 \quad (6-1)$$

$$(p_h/w)/(p_h/w)_{\max} = -0.5 \exp \{-0.07 (X/X_j - 1.0)^2\} \quad \text{for } 1 < X/X_j \quad (6-2)$$

$$(p_h/w)_{\max} (F_d^2)^{2/3} / (u_i^2/2g) = 5 (1/h_* - h_*^{1/6}) \quad (7)$$

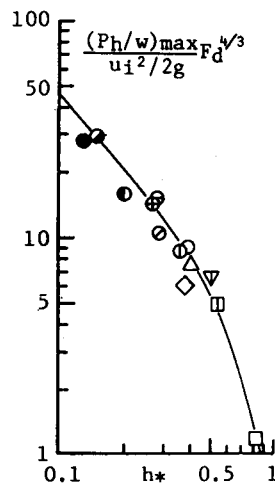


図 10 最大底面圧力

3. 3 斜めもぐり噴流による衝突流れの特性 (RUN-C)

段落ち落下水による衝突流れにおいて、気泡の存在を無視すると噴出軸が傾いた斜めもぐり噴流による衝突流れと見なせる。そこで、段落ち落下水の突入流れの突入速度 u_i と突入幅 b_i を斜めもぐり噴流の噴出速度 u_o とノズル幅 b_o に対応させて、段落ち落下水の突入流れによる衝突流れに関する実験式 ((2) ~ (7) 式) を斜めもぐり噴流による衝突流れの実験結果と重ね合わせて見る事にする。

図 11 は、衝突流れの代表最大流速 u_j と衝突域の長さ X_j を規準量にして最大流速の変化を比較したもので、図中の破線は (2) 式を、実線は、次の実験式を示している。

$$u_m/u_j = \sqrt{3.5 / (X/X_j + 2.5)} \quad (8)$$

最大流速の低減率は、斜めもぐり噴流による衝突流れの方が、段落ち落下水による衝突流れよりも小さくなっている。これは、噴出角

RUN - C

	u_o (cm/s)	b_o (cm)	$\frac{u_i b_i}{v}$	$\frac{h}{b_o}$	記号
C-1	304	1.0	3.04×10^4	11.5	○
C-2	308	1.0	3.08×10^4	21.5	△
C-3	306	1.0	3.06×10^4	31.5	□

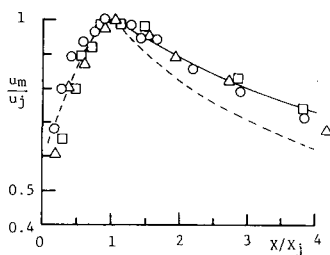


図 11 最大流速の変化

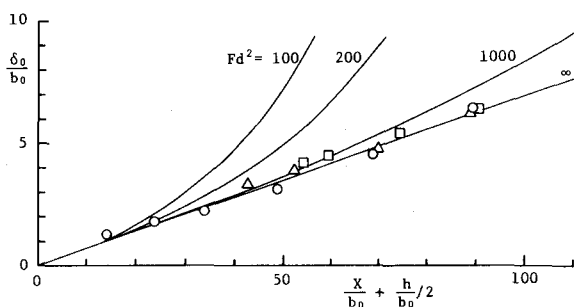


図 12 流れの代表幅 (1/2 最大流速幅)

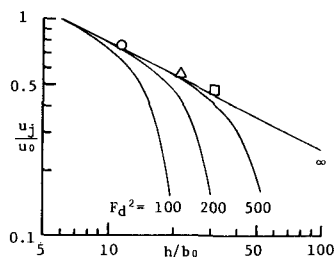


図 13 代表最大流速

度の違い (段落ち落下水の突入角度は $30^\circ \sim 40^\circ$ であった) や噴出速度分布の違い (斜めもぐり噴流では一様分布、突入流れの水面近くの速度分布はほぼガウス分布) も考えられるが、それよりももぐり噴流であるために突入流れの場合よりも水面低下が少ない事によるものとする。

図 12 は流れの代表幅の変化を比較したもので、図中の実線は、(5) 式を示している。実験値は、(5) 式の $F_d^2 = \infty$ の場合と合致している (図中の実線は、混入空気割合 f_0 が増えるにつれて、すなわち、 F_d^2 が小さくなるにつれて、流れの幅は直線的な広がりから離れてさらに広がる事を示している)。

図 13, 14 は、代表最大流速 u_j 及び衝突域の長さ X_j を比較したもので、両図中の実線は、それぞれ(3) 式、(4)式を示している。これらの値も、 $F_d^2 = \infty$ の場合の段落ち落下水によるものとはほぼ合致している事が分かる。(鉛直落下水による突入流れでは $h^* = 1$ がほぼ気泡の停滞する深さになる事¹⁾から、段落ち落下水による突入流れの場合もほぼこの値に近いと考えられる。(3)式、(4)式からも分かる様に、これらの図中の実線は、 h, u_i, b_i が一定の時、混入空気割合 f_0 が増えるにつれて、代表最大流速 u_j/u_i は $-1/2$ 乗の傾きから離れてさらに減少し、衝突域の長さ x_j/b_i はほぼ一定値に近づいている。)

図 15 は底面圧力水頭の分布を、図 16 は最大底面圧力水頭を示していて、図中の実線はそれぞれ (6)、(7) 式である。底面圧力水頭の分布は $X/X_j < 0.3$ では (6-1) 式と合致しているが、もぐり噴流のため水面低下が少ない事と関連して、 $X/X_j > 1.0$ では、(7) 式で求められる値の $1/5$ 程度になっている。又、最大圧力水頭は (7) 式の $F_d^2 = \infty$ の場合とほとんど合致している。

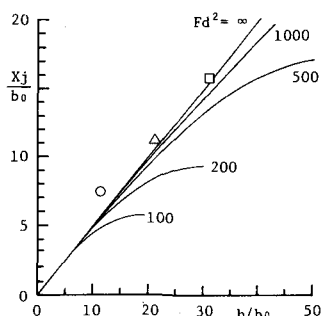


図 14 衝突域の長さ

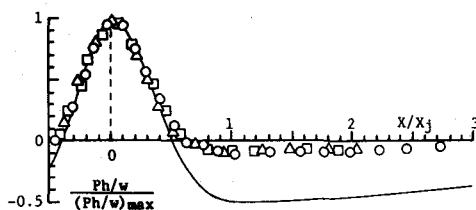


図 15 底面圧力分布

RUN - C

	u_0 (cm/s)	b_0 (cm)	$\frac{u_i b_i}{v}$	$\frac{h}{b_0}$	記号
C-1	304	1.0	3.04×10^4	11.5	○
C-2	308	1.0	3.08×10^4	21.5	△
C-3	306	1.0	3.06×10^4	31.5	□

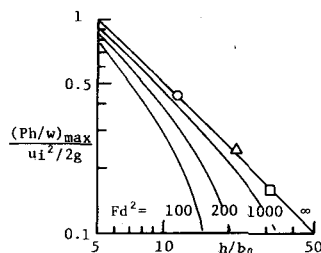


図 16 最大底面圧力

4. 底面せん断力の数値的検討

底面せん断力を次の境界層運動量方程式によって検討する。

$$\frac{d\theta}{dX} = \left(\frac{u_*}{u_m}\right)^2 - \frac{\delta}{u_m} \frac{du_m}{dX} \left(2\frac{\theta}{\delta} + \frac{\delta^*}{\delta} - 1\right) + \frac{\delta}{\rho u_m^2} \frac{dp}{dX} \quad (9)$$

又、境界層速度分布として、衝突域では対数速度分布を、衝突域下流の減速域ではこれまでに著者らが壁面噴流境界層に対して提案した次の速度分布式²⁾を適用する。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1-E}{\kappa E} \ln\left(\frac{1-E\eta}{1-E\eta_0}\right) + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\eta}{\eta_0}, \quad E = 1 - \frac{\alpha u_m \delta_0}{\kappa u_* \delta}, \quad \eta = \frac{y}{\delta}, \quad \alpha = \frac{\epsilon}{u_m \delta_0} \quad (10)$$

η_0 は仮想壁面位置で、Nikuradse の実験結果と比較して求めた。無次元渦動粘性係数は、湾曲噴流の衝突流れに対して定められた値 ($\alpha = 0.026$) を用いる事にする。境界層発達の計算の初期値 δ を $X = 0$ で、 $d\theta/dX = 0$ とおいて (9) 式によって定める。

図 17 は、RUN-A-5 と RUN-B-2 と RUN-C-3 の条件で計算した境界層の発達に関する結果を示している。計算結果は実験結果とよく合致していて、空気混入量が少なくなるほど、境界層は直線的に発達する事を示している。図 18 は、図 17 の計算過程で求められた底面せん断力の分布を示している。斜めめくり噴流の場合最大流速の変化率が緩いため、底面せん断力の減衰が緩やかになっている。又、落水による場合、空気混入量が多いと底面せん断力が低下している。図 19 は、種々の条件で計算された底面せん断力の最大値 (図中に黒丸で示す) を示したものである。次式は計算結果の平均的傾向が表せるように定められたもので、図中に破線でこれを示している。

(u_*/u_i)²_{max} (F_d^2)^{2/3} =
0.021 (1.0/ h^* - $h^{*1.1}$) (11)
 h^* がほぼ 0.5 付近で、急激に低下している事が認められる。これは、空気混入量が増えても h^* が 0.5 を越える程でないと、底面せん断力を減少させる効果は非常に少ない事を意味している。

$$(u_*/u_i)^2_{\max} (F_d^2)^{2/3} =$$

$$0.021 (1.0/h^* - h^{*1.1}) \quad (11)$$

h^* がほぼ 0.5 付近で、急激に低下している事が認められる。これは、空気混入量が増えても h^* が 0.5 を越える程でないと、底面せん断力を減少させる効果は非常に少ない事を意味している。

5. 結 論

限られた実験範囲ではあるが、段落ち落水による衝突流れと斜めめくり噴流による衝突流れの平均的特性が明らかにされ、空気混入量が多くなるほど衝突流れの速度や底面せん断力が小さくなる事が示された。そして、無次元水深 h^* が 0.5 以下になる様な空気混入量では、空気混入による流れの減勢効果は、非常に少なく、 h^* が 0.5 より大きくなるにつれて減勢効果が高くなる事が明らかとなった。

【参考文献】

- 1) 赤司 信義・斎藤 隆・石川 誠：気泡混入を伴う衝突壁面噴流の抵抗係数について、第31回水理講演会論文集、1987.
- 2) 斎藤 隆・赤司 信義・亀田 芳満：衝突及び再接触噴流による壁面噴流、山口大学工学部研究報告、Vol.28, No.1, 1977.

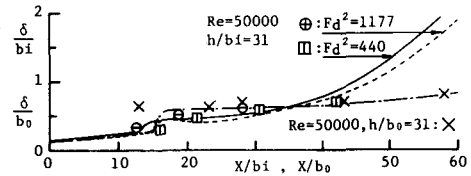


図 17 境界層の発達

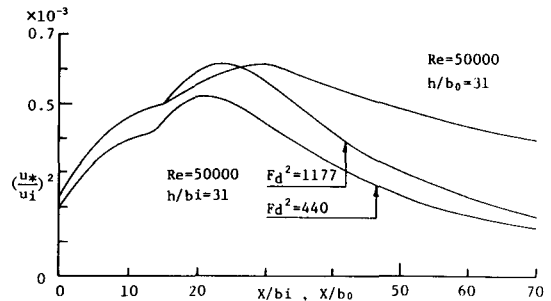


図 18 底面せん断力分布

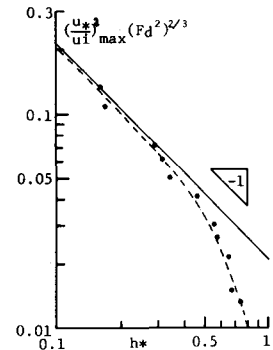


図 19 最大底面せん断力