

開水路狭さく部における底面せん断応力の一評価法

STUDY ON BED SHEAR STRESS AROUND CHANNEL CONSTRICTION

橋本 進*・福井吉孝**・吉川秀夫***

By Susumu HASHIMOTO, Yoshitaka FUKUI and Hideo KIKKAWA

The flow passing through constriction in an open channel is highly three-dimensional. The center flow close to the bed, however, can be analyzed by combining the two-dimensional potential flows and by using the boundary layer analysis already developed by the authors. Although this method is applied successfully in order to calculate bed shear stress along the center line of flow, the calculation is rather tedious, and it is necessary to know the water stage at least along the center line. Furthermore, it is not possible to analyze the phenomena of flow in the whole domain of the flow. For the practical purposes, the characteristics of flow are investigated by the aid of laboratory experiments and the appreciable results can be obtained based on the hydrodynamic consideration.

1. ま え が き

著者らはこれまで、二次元急変流における底面せん断力の適切な算定法の確立を試み、一応の成果を得てきた^{1),2)}。

しかしながら、実現象においては三次元的な流れがその大半を占めており、この算定法を三次元に拡張する必要がある。本論文においては三次元性の強い流れである“狭さく部を通過する流れ”を解析の対象とし、三次元問題の二次元化を試みるとともに、その水理特性に関する実用的説明を行う。

狭さく部における流れの遷移形態は、①狭さく部を射流のまま通過する場合、②狭さく部上流が常流で下流が射流の場合、③狭さく部を常流のまま通過する場合、の3つに分類できる。

石原・志方³⁾は主として③の場合である常流遷移を対象に急縮部上流のはく離領域の性状や急縮部下流の自由流線の形状等の理論的考察およびその実験的検証を行っている。また、Das⁴⁾は狭さく部での底面せん断力の分

布特性を③の場合に対して研究している。

本論文では河川狭さく部での水理特性を知るため、最も単純な形状の狭さく部について、②の射流遷移を対象に実験的検討を行った。ここで得られた結果は堤防の破堤、ダムの決壊による流出水、および急流河川における水制等の特性ならびに河床洗掘等の特性を知るうえで有用であると考えられる。

2. 狭さく部流れの二次元化

(1) ポテンシャル解析の二次元化

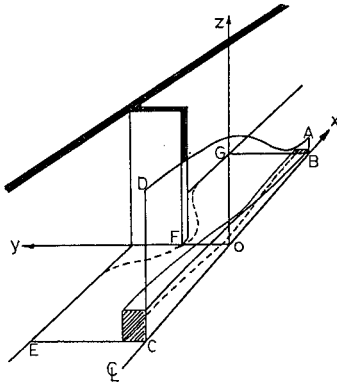
ここで解析の対象とする流れは、十分に大きな Reynolds 数を持ち、狭さく部上流のはく離領域を除いては流れ全域にわたってポテンシャル解析を適用して十分精度が得られると考えられる。しかしながら、狭さく部の上、下流部で形成されるはく離領域および狭さく部下流の水面の急激な低下等により、この流れは三次元性が強いので、三次元のポテンシャル解析をする必要がある。しかし、三次元の境界条件(特に水表面)の決定や計算に要する時間等を考えると、解析に要する労力は非常なものとなる。そこで、著者らは三次元ポテンシャル問題を二次元に近似して解くことを考えた。

狭さく部を挟んで上、下流部にそれぞれ等ポテンシャル断面を考え、これと水面、水路床で形成されるコント

* 正会員 工修 電源開発(株) (前・早稲田大学大学院前期課程)

** 正会員 工修 東洋大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科
(〒160 新宿区大久保 3-4-1)



図一 流管の概念図

ロールボリューム内に“流体の出入りのない面”を考慮することにする。このような面で四辺を囲まれた流管が作れば、この流管を通る流量より流管内の流速を知ることができる。このような流管が解析対象の流れ全域にわたって得られれば、三次元的なポテンシャル解析ができたといえる。今の場合には、流れの左右の対称性と底面が平面であることから、底面においてはすべての流線は底面に平行し、また中央測線においては流線は中央面 ($y=0$ の面) に平行である。それ以外の面では流線はこの2つの面に平行でないことは明らかである (図一参照)。したがって底面の中央線に限れば、 $x-z$ 面、 $x-y$ 面についての二次元解析の組合せで解析可能であり、これを近似的にこの線に沿う小流管に限って使用することとする。

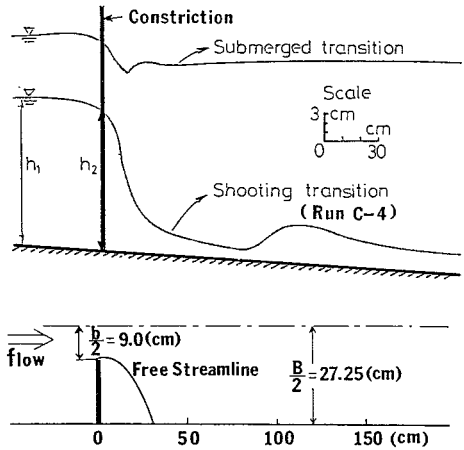
すなわち、図一に示すように中央測線上縦断平面 (ABCD) および底面のはく離領域を除いた面 (BCEFG) に対して二次元のポテンシャル解析を行い、それぞれの面での流線図を描き、底面中央測線に近似的に流管を組み立てることとする。構築する流管の大きさは要求される精度との兼ね合いで決定する必要がある。

以上の考え方に従って行ったポテンシャル解析の妥当性を確認するため、解析結果を実験による実測値と比較検討する。

実験は幅 $B=54.5$ cm、長さ約 5 m、勾配 1/75 のアクリル製水路のほぼ中央に、開口幅 $b=18$ cm の狭さくを設け、流量 $Q=22.0$ l/s を流して行った。なお、狭さく部は厚さ 1 cm のアクリル板を水路壁に直角に取り付けて作られている。図二に実験で得られた射流遷移と常流遷移の2形態の水面形および射流遷移での流れの平面形状を示す。

ポテンシャル解析の境界条件としては水面形の中央縦断形状は実測により、また狭さく部上下流のはく離形状は糸片の運動を観測することにより定めた。

狭さく部上流のはく離域の形状は高さ z により異なる。



図二 狭さく部の水面形と射流遷移の平面形状

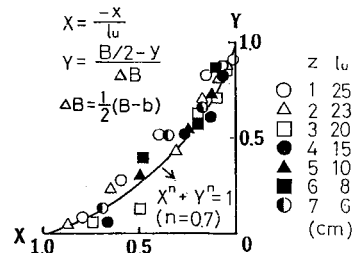
り、三次元的なはく離領域が形成される。すなわち、狭さく部上流で流線が側壁からはく離する点の狭さくからの距離 l_u は底面から水面に近づくにつれ短くなっている。

ただし、図三に示すように石原・志方にならった規格を施すと、はく離曲線はほぼ $X^{0.7} + Y^{0.7} = 1$ の曲線のり、石原・志方の求めたべき数 $1/2 \sim 2/3$ に近いことが知られた。また、はく離点と狭さく隅角部を結ぶ直線と側壁とのなす角 θ_0 も常流遷移である石原・志方の実験により求められた次式に近い値になっている。

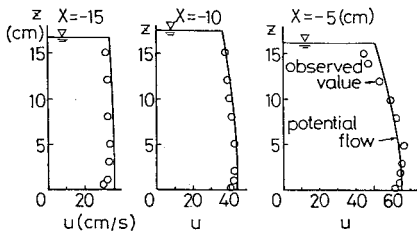
$$\theta_0 = A(1 - b/B)$$

ここに、 A : Reynolds 数によって変化する比例定数。

ここでは、実測によって得られた境界形状を用いて、図一の ABCD 面および BCEFG 面についてそれぞれ二次元のポテンシャル解析を行い、流管の考え方から中央測線上での流速を求めた。この結果を実測値とともに示したものが図四である。三次元のポテンシャル問題を近似的に二次元の問題として解析する方法では二次元解析を行う流れの対称性をもつ平面に近い部分では比較的精度がよいことが知られる。また、水路底面近傍では流速の実測値がポテンシャル解析結果より外れ、流速の対数分布則とみなせる境界層が認められる。



図三 規格化したはく離曲線 (RUN C-4)



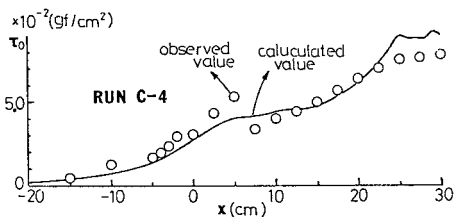
図—4 ポテンシャル解析による流速分布と実測流速分布の比較 (中央測線)

(2) 底面せん断力の近似解

中央測線上では y 方向の流速成分 v は 0 であり, また x 方向の流速成分 u の y 方向の変化が無視し得るほど小さく, さらに境界層厚 δ も代表長さ比べて非常に小さいと仮定できるので, 中央測線上底面近傍では境界層方程式の二次元的取り扱いが可能となる. また, ポテンシャル解析の結果中央測線上の流速が得られるので, 片山ら¹⁾によるカルマンの運動量方程式を利用する二次元的底面せん断力の算定法を近似的に使用することができる. 片山らと同様に, 計算始点の最上流点で等流部の水深を初期境界層厚として与え, 境界層方程式の差分計算を行い底面せん断力を求める⁷⁾. この計算結果をプレストン管による底面せん断力の実測値とあわせて図—5に示す. なお, 底面における流れ方向の圧力勾配が顕著な場合には Patel⁸⁾によるとプレストンの方法は多少大きめの値を与える者と指摘されているが, この実験の場合, 各測点で底面近傍の流れに直角方向の流速分布は対数分布則に比較的好く従っているので, プレストンの方法により測定された底面せん断力を実測値としている. 図—5より, 三次元的な流れでも近似的に二次元的境界層方程式が適用できる範囲では実用上十分な精度をもって底面せん断力を算定できることがわかる. ただし, 狭さく部下流の流れが側壁に衝突する部分 (この例では $x=25$ cm 付近) では, ポテンシャル解析の限界と考えられ, この付近では計算値と実測値のずれが生ずる.

3. 実用的研究

狭さく部を通過する流れの流速あるいは底面せん断力を知るためにポテンシャル解析を利用するならば, 境界



図—5 中央測線上底面せん断力の実測値と計算値

の形状を与える必要がある. 前述の解析では流れの形状を実測より与えているが, 実用的には上流での水位あるいは流量を与えられたときこれらの形状を決定できることが望ましい. さらには, ポテンシャル解析のために境界形状を知るというだけでなく, 流速, 底面せん断力また狭さく下流側の自由流線形状を知ることは構造物の設計において重要である. ここではまず, 狭さく上流側の水位と流量の関係を実験により明らかにし, 次に上流水位あるいは流量を与えられたとき前述の境界形状を知を試みる. 1つの境界である狭さく部上流のはく離域形状は底面に限れば石原・志方の実験式によく適合することが知られたので, ここでは特に水面の中央縦断面形状および狭さく部下流の自由流線の形状, ならびに狭さく部周辺の底面せん断力の分布について実験をもとにして解明しようとする.

(1) 実験装置および実験方法

先に述べたアクリル製水路を用い, 狭さくの開口幅 b を 6, 12, 18, 30 cm の 4 種類とし, 表—1に示す実験条件で射流遷移として実験を行った. なお, 下流水深は水路末端にせき等を設けず, 流量に対して最低条件となるようにしてある.

(2) 狭さく部上流水位と流量の関係

静水圧分布をしている上流部と狭さく部の 2 断面間のエネルギー式から流量を算定する. 狭さく部を通過する地点では射流遷移の場合, 流れの側面は大気に触れているので, この地点の流れの内部圧力を 0 と仮定し, 狭さく部での高さ z における流速を u とすると, 次のエネルギー式を得る.

$$\frac{Q_2}{2gB^2h_1^2} + h_1 + \Delta z = \frac{u^2}{2g} + z$$

$$\therefore u = \sqrt{2g \left(\frac{Q_2}{2gB^2h_1^2} + h_1 + \Delta z - z \right)} \dots \dots \dots (1)$$

表—1 実験条件 (B=54.5 cm)

Run	b (cm)	b/B	Q (l/s)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)
a 1	6.0	1/9	2.6	6.78	6.50
a 2			5.5	12.34	12.28
a 3			8.5	16.19	16.05
a 4			16.0	25.10	25.00
b 1	12.0	2/9	4.8	7.29	7.00
b 2			7.6	10.37	10.00
b 3			9.9	13.59	13.00
b 4			29.1	25.11	24.58
c 1	18.0	3/9	6.9	7.39	7.00
c 2			10.9	10.50	10.00
c 3			15.3	13.46	13.00
c 4			22.0	15.77	15.60
d 1	30.0	5/9	11.1	7.50	7.00
d 2			19.5	10.36	10.00
d 3			28.9	13.58	13.00

B : 水路幅, b : 狭さく開口幅, 水路床勾配 : 1/75
h₁ : 上流水深, h₂ : 狭さく部水深

ここに、 Δz ：上流断面と狭さく断面の底面高の差。

水深に大きな変化が現われるのは流れが狭さく部を通過後であるので、近似的に狭さく部水深 h_2 を上流水深 h_1 と等しいとすると、次式により流量 Q が求まる。

$$Q = b \int_0^{h_1} u dz$$

$$= \frac{2}{3} \sqrt{2g} b \left\{ \left(\frac{Q^2}{2gB^2h_1^2} + h_1 + \Delta z \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{Q^2}{2gB^2h_1^2} + \Delta z \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

しかし、実際は流れが狭さく部を通過するとき、流れの底面では大気圧ではなく、また流れの側面も曲率をもつので、水脈内部の合圧力 P_2 は 0 ではなく、式 (1) の流速 u は実際より大きくなり、したがって式 (2) の流量 Q も過大の値を与える。ここで、この仮定と実際の条件の差、すなわち圧力差を流量係数 C_d により補正する必要がある。狭さく部での内部圧力は側面の曲率により、また流れが大気に接している部分と底面のため大気に接しない部分との割合で決定されると思われる。したがって、 C_d は b/B と狭さく部での側面の長さや底面の長さの比 h_2/b に依存すると考えるのが妥当である。運動量方程式を上流断面と狭さく部断面との間で適用し、狭さく部水脈の内部合圧力 P_2 を算出して、その圧力 P_2 と静水圧分布と仮定したときの合圧力 $b\rho gh_2^2/2$ との比を h_2/b で整理すると図-6 のようになり、多少のデータのばらつきはあるが、 b/B にはほとんど関係がなく、 h_2/b である程度狭さく部の内部圧力を推定することができ、 h_2/b あるいは近似的に h_1/b がこの流れを支配する重要なパラメーターであると考えられる。

そこで、実測流量と式 (2) による流量とから流量係数 C_d を求め、 h_1/b (ここでは $h_1 \approx h_2$ と考える) との関係を示すと図-7 のようになる。縮脈部の鉛直方向のポテンシャルが一樣のとき、すなわち、縮脈部の鉛直方向の圧力が静水圧分布に従うとき、 C_d は Rouse⁶⁾ による二次元オリフィスの $b/B=1/9 \sim 5/9$ に対し、 $C_d=0.61 \sim 0.70$ の範囲に変化する。図-7 よりこの場合の C_d はおおよそこの範囲にあり、 h_2/b の値がごく小さい場合には図-6 から推定できるようにこの条件がほぼ満足されて、図-7 もそのようになっている。しかし、 h_2/b の大きい場合にはこの条件は満足されなく、 C_d は内部圧力 P_2 の影響を受けるので、 P_2 の程度を表わす h_1/b により C_d との関係調べ、図-7 の関係が得られた。この条件と $h_1 \approx h_2$ とした仮定とにより、この実験の範囲では C_d は b/B にほとんど影響されなく、したがって上流水深 h_1 および開口幅が与えられれば、図-7 より C_d を決定することができ、式 (2) に C_d の補正を行うことにより正しい流量を求めることができる。したがって、流量 Q が与えられたとき、上流水深 h_1 を知

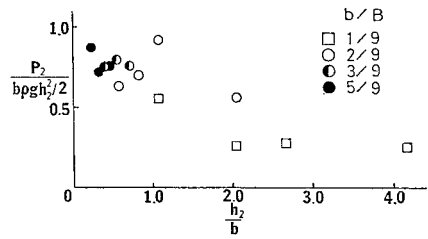


図-6 h_2/b と狭さく部内部圧力 P_2 の関係

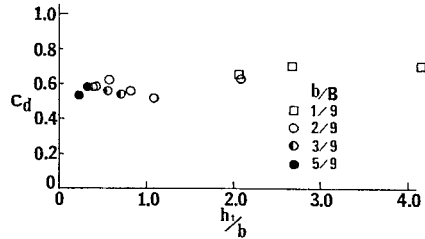


図-7 h_1/b と C_d の関係

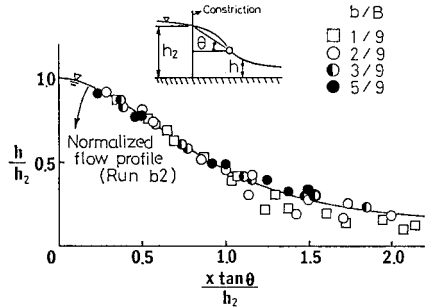


図-8 規格化した中央測線上の水面形

ることができる。

(3) 水表面中央縦断形状

狭さく部上流側は水深の変化はごくわずかであり、これを無視しても実用上差し支えないと考えられる。また、狭さく部から十分下流では下流条件により水深が決定されるので、ここでの考察から除外すると、問題となるのは狭さく部下流側での水位の急激な低下である。図-8 のように、水面の変曲点と狭さく部の水面とを結ぶ線の水路床となす角度 θ を用いて、狭さく部下流の水面の勾配を $\tan \theta$ で代表することとする。実験で得られた中央測線上の水面形をこの $\tan \theta$ を用いて整理すると図-8 のようになる。

この図より狭さく部から $x \tan \theta / h_2 = 1.0$ の関係にある点付近までは種々の b/B および h_2/b の値をもつ狭さく部の流れについて、中央測線の水面形は 1 本の規格化された曲線で表わされ、それより下流では各実験ケースにより若干ばらつきが生ずることがわかる。すなわち、ほぼ水面の変曲点までは十分精度よく、この図により水

面形が推定され、それより下流では下流水深の影響を受けることを意味している。したがって $x = h_2 / \tan \theta$ までの範囲では水路勾配、水路床粗度の多少の変化はこの曲線はほとんど影響を受けないと考えてよい。なお下流水深が $0.4 h_2$ 程度より高い場合には狭さく部水脈の内部圧力 P_2 にも影響を及ぼし、この曲線は多少の変化を受けるであろう。

次に、この $\tan \theta$ を適切に評価し得れば、図-8 より中央縦断形状を知ることができることになる。 $\tan \theta$ は狭さく部の流れの内部圧力 P_2 により定まるものと考えられるので、前述の C_a のように h_2/b に関係することが予想される。そこで、 $\tan \theta$ と h_2/b との関係調べると、図-9 のようになり、 h_2/b により $\tan \theta$ を見積ることができる。結局、Froude 相似に狭さく部水脈の内部圧力の補正をすることにより、中央測線上の縦断水面形状が決定でき、標準形状として図-8 の規格化された水面形状を用いれば、条件の違う場合にもそれを容易に決定できることがわかる。

(4) 狭さく部下流自由流線形状

狭さく部下流の縮流部に関する諸量を図-10 のように定義する。縮流部の断面積 A_c と狭さく部の断面積 A_2 との比、すなわち縮脈係数を中央縦断形状と同様に

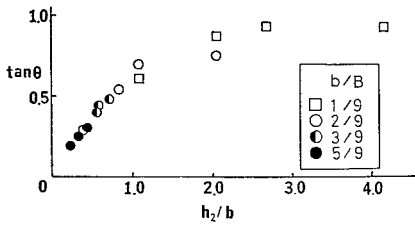


図-9 h_2/b と $\tan \theta$ の関係

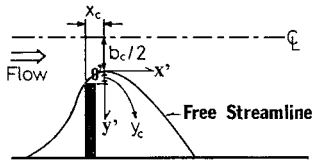


図-10 縮流部の定義図

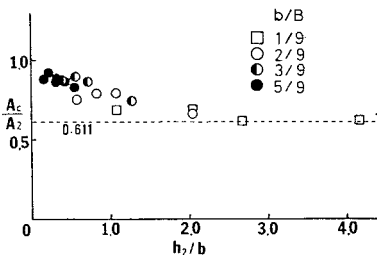


図-11 h_2/b と A_c/A_2 の関係

h_2/b で整理すると、図-11 のようになる。

この図において、 h_2/b が 1 程度より小さい三次元性の特に強い領域では、測定値がばらついているが、 h_2/b が大きくなるにつれ二次元性が強まり、二次元オリフィスの縮脈係数の解析値 0.611 に近づいていくことがわかる。狭さく部下流側の自由流線の形状を決定すると考えられる 2 つのパラメーター、水路幅と狭さく開口幅の比 b/B 、および狭さく部の内部圧力を表わす h_2/b の両者を比較すると、 b/B が特に大きくない限り、中央縦断形状の場合にもみられるように、 h_2/b の方が現象をより支配していると考えられる。さらに、 h_2/b と b_c/b の関係を示せば図-12 のようになり、この方が図-11 と比較して、プロットのばらつきが小さいので、実用上はこの関係を使って h_2/b により縮流幅 b_c を見積ることができる。このとき、 b_c がわかれば、 y_c を知ることができ、 y_c と x_c との関係は図-13 に示すようにほぼ比例関係にあるから、 y_c から縮流点の狭さく部からの距離 x_c を推定できる。以上により、縮流点の位置を決定できるので、縮流点を新しい原点 $0'$ として狭さく部下流部の自由流線形状を調べてみる (図-10 参照)。

自由流線の形状は狭さく部水深 h_2 と b/B に関係すると考えられるので、図-14 に示すように整理することにより、自由流線の規格化された曲線を定めることができる。 (x', y') の大きいところではプロットにばらつきが生ずるが、これは下流水深の影響と側壁よりの反射波の影響を受けてその位置が周期的に変動するためである。

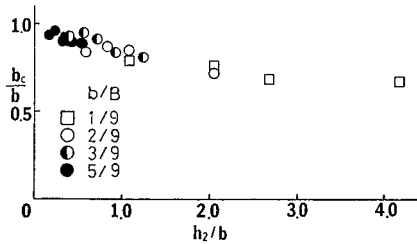


図-12 h_2/b と b_c/b の関係

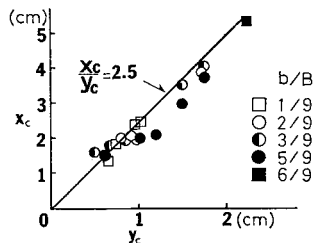


図-13 y_c と x_c の関係

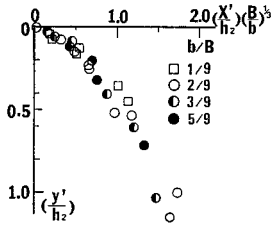


図-14 規格化した自由流線形状

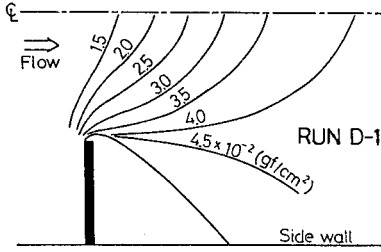


図-15 底面等せん断力線図 (RUN D-1)

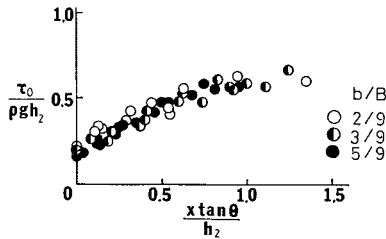


図-16 中央測線に沿う規格化された底面せん断力

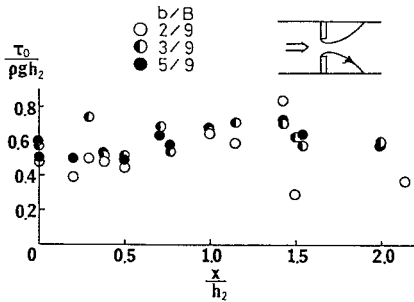


図-17 自由流線に沿う規格化された底面せん断力

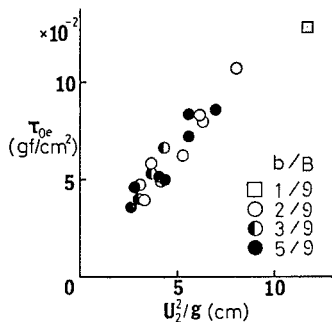


図-18 U_2^2/g と τ_{oe} の関係

この場合も中央縦断形状と同様、図-14を標準形とすれば、種々の条件下での自由流線の形状を知ることができる。

(5) 底面せん断力の分布特性

前述のように、ポテンシャル解析を行えば、底面せん断力も二次元の境界層方程式の適用できる部分(中央測線上)では算定できるが、ここでは実用的立場から特に狭さく部下流側での底面せん断力の分布特性について調べてみる。

図-15に狭さく部下流側での底面せん断力の分布の一例を示す。せん断力の分布形そのものを各実験について比較することは困難であるので、ここでは中央測線および自由流線に沿っての底面せん断力の変化を調べることにする。

まず、中央測線上の底面せん断力の流れ方向の変化を検討する。底面せん断力 τ_0 を $\rho g h_2$ (ρ は水の密度) で規格化し、距離 x については、中央測線の縦断形状の場合と同様に $\tan \theta$ と h_2 で規格化して、両者の関係について調べると、図-16のようになる。図より b/B による系統的な差異が認められないことから、 h_2/b による補正を行うことで中心線に沿っての底面せん断力を整理することができ、水面の変曲点 ($x \tan \theta / h_2 \doteq 1.0$) までは下流方向に τ_0 が漸増することが知られる。なお、図-16にプロットされている $b/B = 3/9$ の実測値は図-5においてポテンシャル解析と境界層理論で計算した実験ケース RUN C-4を含んでおり、2.での計算結果は図-16のような整理の中に含まれることが知られる。

次に、自由流線に沿う底面せん断力の分布について調べる。底面せん断力については中央測線の場合と同様に $\rho g h_2$ で規格化し、距離については狭さく部水深 h_2 だけで規格化すると、実測値は図-17に示すようになる。下流水深の影響を受ける下流部 ($x/h_2 > 1.5$ 程度より下流) では実測値はばらついてはいるが、狭さく部に近い部分では各実験ケースとも規格化された底面せん断力はほぼ一定であるといえる。

すなわち、自由流線に沿う底面せん断力はすべての点で中央測線の変曲点付近のせん断力(これがこの測線での最大値を示す)程度となっており、自由流線の位置の多少のあいまいさと測定時の方向の誤差のためせん断力にばらつきが現われている。実用的には水脈の外縁線である自由流線に沿って規格化された底面せん断力はほぼ一定と考えてよいであろう。

また、実用上底面せん断力の指標となると考えられる縮流部外縁(図-1のF点)での底面せん断力 τ_{oe} を狭さく部での平均流速 U_2 の2乗で整理すると図-18のようになる。これから、 τ_{oe} は U_2^2 にほぼ比例すると考えてよいであろう。このことは図-17において縮流部付

近の底面せん断力が h_2/b に関係なく h_2 により規格化できたことと関連がある。すなわち、狭さく部での大気の流れ方による内部圧力の影響を受ける中央部付近は流速を規定する水深 h_2 とともに圧力の影響の目安である h_2/b により底面せん断力が支配されるが、圧力が大気圧に等しくなる自由流線上では狭さく部水深 h_2 のみにより規定されていることを示す。

結局、中央縦断形状の場合と同様に Froude 相似に加えて狭さく部での圧力補正を考えることにより、底面せん断力を見積ることが可能である。

ただし、本実験結果は滑面床についてのものであり、粗面床の場合には粗度により τ_0 の値はこの実験結果と異なることに留意しなければならない。

4. あとがき

本研究では、三次元的な現象である狭さく部を通過する流れを対象として、①その二次元的な取り扱いの可否、②底面せん断力等の水理特性、を調べた。得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) 狭さく部を通過する三次元的な流れも、中央測線上(狭さく部下流では中央測線上底面近傍)に限れば、二次元のポテンシャル解析の組合せにより、流速の解析が可能である。

(2) カルマンの境界層に関する運動量方程式を用いて、ポテンシャル解析より求められる流速を用いて、二次元的な取り扱いで中央測線での底面せん断力を比較的精度よく算定できる。

(3) 一方、流れの諸特性を実験的に調べることにより、狭さく部での底面せん断力分布を中心線沿いと、狭さく部下流側水脈の外縁線沿いに図—16、図—17により推定できるようにした。

(4) 狭さく部通過時に底面以外は流れが大気に触れるという特性から、狭さく部での水深 h_2 と開口幅 b の

比 h_2/b をパラメーターとして、この流れの現象を説明できる。

(5) 流量と水位の関係、水面形、狭さく部下流の自由流線の形状等、狭さく部流れの特性を明らかにすることができ、実用上かなりの精度でそれら諸特性を推定できるようにした。

本研究は文部省科学研究費(自然災害特別研究(1)、都市河川の治水トータルシステムに関する研究、代表者:早稲田大学 吉川秀夫)の補助を受けた。

なお、本研究の遂行にあたって、実験およびその解析に協力をいただいた当時早稲田大学学生 三隅宏明氏(現・大成建設)、また実験および実験装置の作成に協力をいただいた早稲田大学流体実験室の諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 片山道夫・福井吉孝・吉川秀夫:段落ち部近傍の底面せん断力,土木学会論文報告集, pp.69~76, 1984.
- 2) 村重 宏・吉川秀夫・福井吉孝・西山勝栄:鉛直落下噴流による流水の減勢効果,第28回水理講演会論文集, pp.185~190, 1984.
- 3) 石原藤次郎・志方俊之:開水路急縮部の水理学的性状に関する研究,土木学会論文集, pp.30~38, 1967.
- 4) Das, B. P.: Shear Stress Distribution at Channel Constriction, ASCE, pp.1695~1711, 1981.
- 5) 東野 寛・木下献一・吉川秀夫:急縮部の水理,第38回年次学術講演会講演概要集, pp.377~378, 1983.
- 6) Rouse, H.: Elementary Mechanics of Fluids, pp.55~60.
- 7) 橋本 進・吉川秀夫・福井吉孝・三隅宏明:狭さく部を有する水路の流れについて,第28回水理講演会論文集, pp.161~166, 1984.
- 8) Patel, V. C.: Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients, J. Fluid Mech., Vol. 23, pp.185~208, 1965.

(1984.5.4・受付)