

護岸の水理

Hydraulic Research for Revetment

早稲田大学 大学院 学生員 沢 野 久 弥
 早稲田大学 理工学部 学生員 水 野 英 人
 早稲田大学 理工学部 学生員 宮 地 勝 彦
 東 洋大学 工学部 正 員 福 井 吉 孝
 早稲田大学 理工学部 正 員 吉 川 秀 夫

1 はじめに

一般河川において、洪水時に堤防が決壊した場合、それにより引き起こされる被害はしばしば非常に甚大なものとなる。したがって前もって河川の水利状況を十分に把握し、適切な護岸や床固めを施すことは、河川を管理する上での重要な基本要素である。しかしながら壁面近傍においては、底面と壁面との相互作用により流れが複雑な様相を呈するため、事前の見積りがはなはだ困難である。本研究では特に壁面剪断力に注目し、矩形断面開水路で実験を行うことにより、その分布状況及び最大値等に対し考察した。又底面状況を変化させた場合についても実験を行い、さらに河川中の大規模砂堆や、河川の合流などにより生じる横方向流れに対応させるために、水路中に突堤を設けて人工的に横方向流れを作り出し、壁面剪断力への影響を調べた。台形断面に関しては Ghosh による実験結果と共に、著者らの実験結果もあわせて評価した。開水路内の流速分布は、従来より対数則を用いたものが広く利用されてきたが、著者らは開水路における対数則に対し新たな提案を行い、それをもとに壁面剪断力の計算を行った。

表1. 実験条件

Case	h (cm)	Q (l/s)	B/h	U (cm/s)	Fr	Re $\times 10^{-4}$	i	$\tau_w \times 10^{-3}$ (gf/cm ²)
RS-1	6.0	40.20	10.0	111.3	1.45	22.3	0.0049	18.78
RS-2	6.1	52.21	9.9	143.6	1.86	29.0	0.0073	29.16
RS-3	8.0	30.69	7.5	63.6	0.72	16.1	0.0018	7.17
RS-4	8.2	26.73	7.3	54.3	0.61*	14.0	0.0013	4.78
RS-5	11.0	25.32	3.5*	59.7	0.58	16.7	0.0012	8.04
AW-1	6.0		10.0		0.66	9.1		
RB-1	9.3	35.50	6.5	63.6	0.69	17.7	0.0040	5.86
RB-2	6.6	18.13	9.1	45.8	0.54	9.8	0.0038	3.24
RB-3	6.9	21.72	8.7	52.5	0.73	12.0	0.0050	7.18
RB-4	5.4	16.72	11.1	51.6	0.63	9.3	0.0068	4.02
SA-1	9.0	27.07	6.7	50.1	0.53	13.9	0.0064	4.78
SA-2	6.8	19.40	8.8	47.5	0.53	10.5	0.0036	2.90

* RS-5 の幅は 38.5 cm

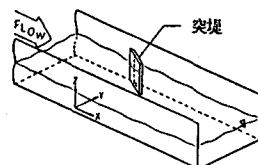


図1. 実験概要図

2 実験概要

実験には全長20m幅60cmの亚克力製可変勾配開水路を用い、上流端より11m付近で測定を行った。流速分布はピトー管により測定し、剪断力測定はプレストンの手法を用いた。実験は矩形断面に関しては底面の状況を3通りに変えて行った。底面が滑面のものは、水深4~11cm、フルード数0.5~2.0の範囲で20ケースほど行った。そのうちの5ケースを表1にRS1~RS5で示す。AW1は称津・中川らにより測定されたものである。RB1~RB4は底面に径1.6cmのビー玉を敷きつめたものでSA1~SA2は底面に粒径0.65mmの砂を敷いて移動床としたものである。台形断面の実験は壁面傾き角度45度、底面幅78.5cm、流量9ℓ/s水深4cm、Fr=0.43 $\tau_w=3.43$ で行った。突堤をつけた実験の概略図は図1の通りで、壁から45度の角度をつけて厚さ1cmの亚克力板を10cm突き出した。

3 実験結果

(1) 滑面の場合

壁面、底面とも滑面であるときの剪断力分布図を図2、図3に示した。座標系は図1に示すものと同様とし、水深 h と平均壁面剪断力 $\bar{\tau}_w$ で無次元化した。両者をみると、図中の値はそれぞれが同じ傾向を示しているため、一本の曲線で代表化することにし、破線で示した。これをもとに剪断力分布状況を概念化したものが図4である。図中の l_a の部分は底面剪断力の変化する領域であり、図中の l_b の部分は底面剪断力が一様化する部分である。実際には2次流などの存在により、 l_b 領域においても剪断力の変動は生じているが、もとの値に比べて変動の値は小さいので、実用上はこのような近似化をしてさしつかえないと思われる。 l_a の部分で底面剪断力が変化しているのは、壁面の影響によるものであり、 l_b の部分は壁面の影響の及ばなくなった領域と考えることができる。従って底面剪断力に l_b 領域が現れた場合、それ以上いくら水路幅が広がっても、底面剪断力の値は一定値を保つ。その値を τ_{lb} とする。 l_a の長さを実験値をもとに Re 数に対してプロットしたものを図5に示す。これによると、 l_a はほぼ水深 h の2.1倍となることがわかる。

護岸を施す際には、壁面剪断力の大きさと分布状況を知ることが必要となるが、実験結果をもとに、このことに関して整理してみる。まず分布状況であるが、剪断力の最大値 τ_{wmax} の現れる場所は、図2より水面より水深の $1/3 \sim 1/2$ 倍のところであることがわかる。又その大きさは図6より、平均壁面剪断力 $\bar{\tau}_w$ の約1.1倍であることがわかる。壁面剪断力の分布に関しては、他に Ghoshにより測定されたものを図7に示す。Ghoshによる実験はアスペクト比の小さなものでおこなわれているため、底面に l_b 領域が出現せず、壁面剪断力の値に、対岸の影響が現れていると思われるが、それでもかなりよく一致する。次に壁面剪断力の値について検討してみる。図4において底面剪断力を隅角部 ($y = z = 0$) から y 方向に水深 h だけとった値の総計を $\Sigma \tau_b'$ とする。これと壁面剪断力の総計 $\Sigma \tau_w$ とを比べてみたのが図8で、 $\Sigma \tau_w / \Sigma \tau_b'$ の値はほぼ0.94となっている。これは壁面と底面に関して、かなりよい対称性を示しているといえる。また $\bar{\tau}_w$ の値と τ_{lb} の値とを比べたものを、図9に示すが $\tau_{lb} / \bar{\tau}_w$ の値はほぼ1.5となっている。

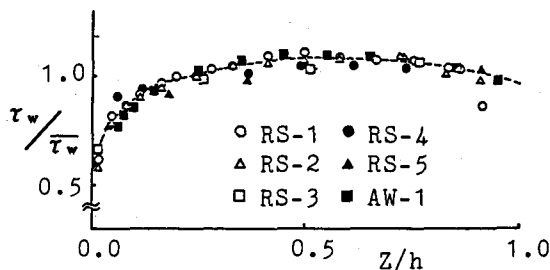


図2. 壁面剪断力分布図

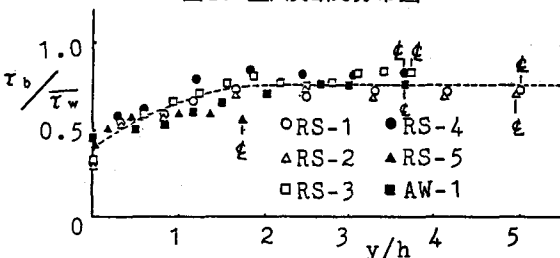


図3. 底面剪断力分布図

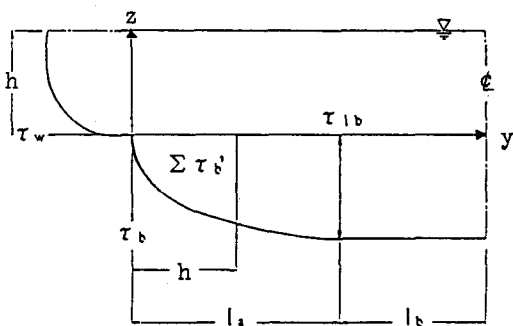


図4. 剪断力分布概念図

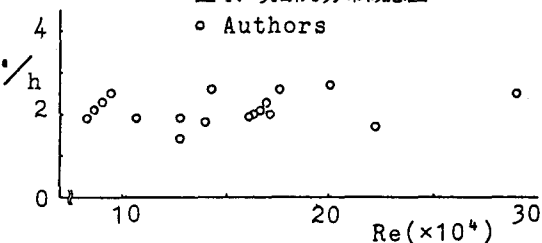


図5. l_a と Re の関係図

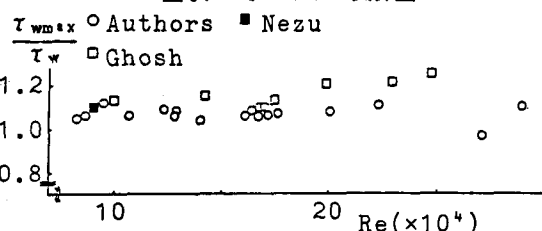


図6. 平面剪断力の平均値と最大値の比

(2) 壁面剪断力の算定

(1)での結果をもとに、底面剪断力分布をモデル化したものが図10である。底面剪断力は $y/h > 2$ の領域では一定とし、その値 $\tau_{1b} = 1.5 \bar{\tau}_w$ であるとした。任意の水路において、流量 Q 、河床勾配 i 、水路幅 B 、粗度 n が与えられると、マンニングの式により水深 h が求まる。すると潤辺に働く総剪断力は

$$\Sigma \tau_1 = \rho g B h i \quad (3-1)$$

となる。一方、図10において $y/h = 2$ までの部分の面積を A とすると、底面半断面に働く剪断力は

$$\Sigma \tau_b = \{A + 1.5(B/2h - 2)\} \bar{\tau}_w h \quad (3-2)$$

潤辺全体に働く剪断力は

$$\Sigma \tau_2 = 2[\bar{\tau}_w h + \{A + 1.5(B/2h - 2)\} \bar{\tau}_w h] \quad (3-3)$$

$\Sigma \tau_1 = \Sigma \tau_2$ なので、これより $\bar{\tau}_w$ を求めることができる。

壁面剪断力への割りふりは、図2における破線を代表曲線

とみなすことにより、上で求めた $\bar{\tau}_w$ を用いて行われる。

ただし以上の計算は $B/2h < 2$ の場合には成り立たない。 $\tau_{1b}/\bar{\tau}_w$

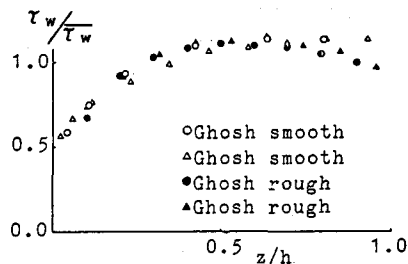


図7. Ghoshによる矩形

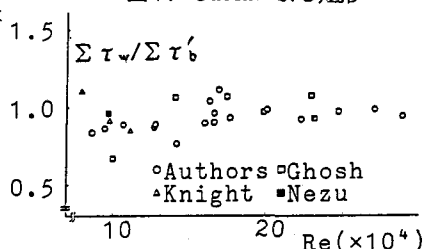


図8. 側壁面と底面の隅角部における剪断力の比較グラフ

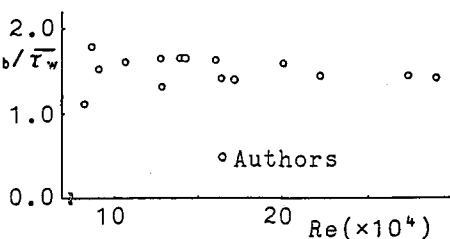


図9. $\tau_{1b}/\bar{\tau}_w$ と Re の関係図

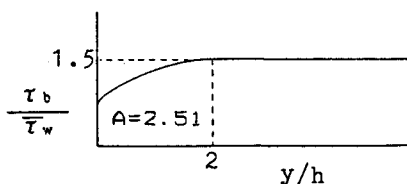


図10. 底面剪断力モデル

(3) 底面を変化させた場合

底面に粗度としてビー玉を設置したとき、底面に砂を敷いて移動床としたときの壁面剪断力を、図11、図12に示す。図11を見ると底面に粗度を設けたことにより、底面付近の剪断力の落込みが、滑面に比べて甚だしく、水面付近では逆に増大している。これは粗度の影響により底面付近の流れが減速させられた影響が、壁面剪断力にも現れたものと思われる。図12は、底面上に砂漣が生じたときの壁面剪断力の分布図である。測定は壁面に沿って砂漣が移動しているときに、その頂部上（添字a）と、斜面中腹上（添字b）の壁面剪断力を、砂漣の移動に従ってピトー管を動かしながらおこなった。砂漣はSA-1のものは波長80cm、高さ3～4cmで、SA-2のものは、波長30cm、高さ1.5～2cmであった。図をみると、分布形状に関して、頂部においては似たような傾向が現れたが、中腹部に関しては逆の傾向となった。これは砂漣が2次的に分布しているため、横方向の流れが生じ、流況が複雑化しているためと思われる。

(4) 突堤のある場合

水路に突堤を設けることにより、流れを横方向に偏向させたときの剪断力の変化の様子を、図13、図14、図15に示す。

なお流量は26.73 (ℓ/s)

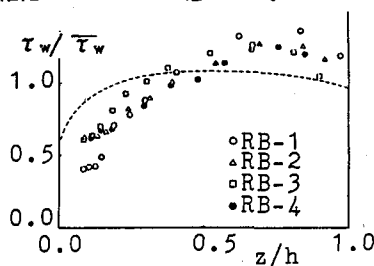


図11. 底面ビー玉

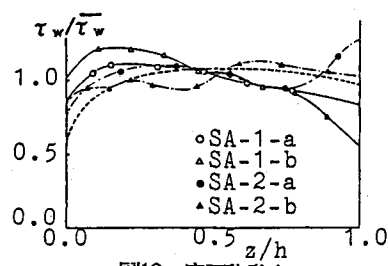


図12. 底面移動床

底面勾配は1/1000であった。図13によると、底面剪断力は突堤近傍にピークが生じている。図14によると、壁面剪断力の最大値は断面が最も縮小したあたりに生じている。図15によると、 $X = 910$ においては剪断力分布は、図2の場合と同じような分布状況を示しているが、 $X = 970$ （壁面剪断力の最大値が生じる所）においては、壁面剪断力は均一化し、ほぼ一定値を示している。 $X = 1070$ になると再び底面付近における剪断力の減少が現れ始める。

(5) 台形断面の場合

図16、図17、図18は Ghosh による台形断面での壁面剪断力分布図であり、図18には著者らによる実験値 (RD-1) も示してある。壁面の傾きは図中に示すとおりであるが、3つの図を比べると、その形状にはほとんど差異がない。従って壁面を傾けた場合、垂直な場合に比べピークがより顕著に現れ、しかも傾きの角度によらず同じ分布形状となることがわかる。

(6) 壁面剪断力値の矩形滑面水路との比較

同じ流量、同じ水深で水が流れていても、壁面剪断力 τ_w の値は底面が滑面のときの値と比べて、粗度や断面形状が変化した場合異なってくることが予想される。そこで底面移動床の場合、突堤のある場合、台形断面の場合、のそれぞれについて、同じ流量 Q を同じ水深 h で矩形断面滑面水路で流した場合の $\bar{\tau}_w$ の値を(2)の方法により算出し、実測値と比べた。図19～21がその結果でそれぞれ算出した値で無次元化してある。破線は図2より求めた矩形断面滑面水路のときの壁面剪断力分布線である。これらを見ると、図19においてはSA-1-a以外は値にそれほどの変化はなく、ただ形状がかなり歪んでいることがわかる。図20においては $X = 970$ から下流に向かうにつれて、だんだん本来の値にもどっていることがわかる。図21を見ると、壁を斜めにするとかえって剪断力は増加していることがわかる。

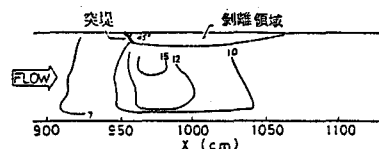


図13. 底面剪断力分布

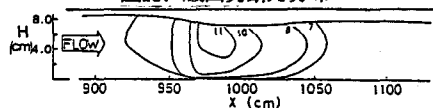


図14. 壁面剪断力分布

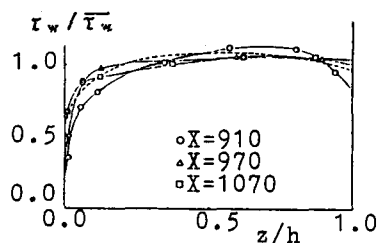


図15. 突堤

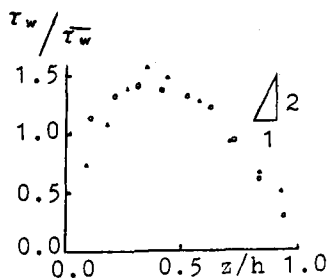


図16. 台形断面

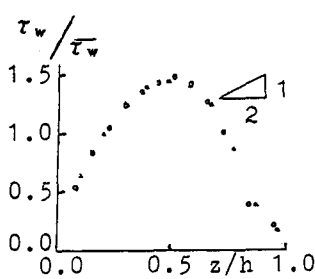


図17. 台形断面

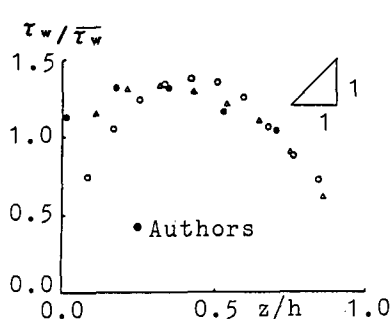


図18. 台形断面

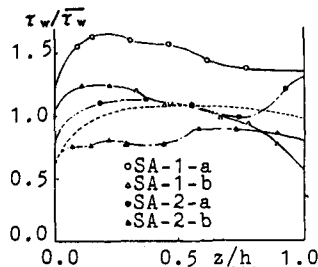


図19. 底面砂

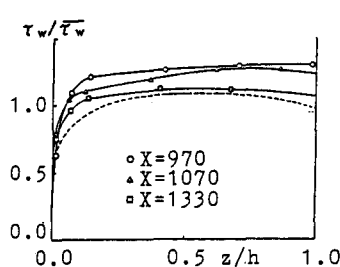


図20. 突堤

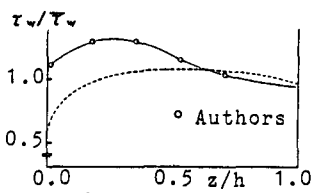


図21. 台形断面

4 開水路における流速分布及び剪断力分布について

開水路における流速分布を見積る際には、1次元場で成り立っている対数則が、2次元場でも適用できるものとして利用されている。しかしながら水路隅角部近傍においては、流れが壁面、底面双方の影響を受けるため、適用には無理が生じてくる。そこで著者らは、水路隅角部における混合距離等について新たな仮定を行い、2次元場における対数則を考案した。

乱流における混合距離は、Prandtlにより $l = \kappa \cdot y$ と仮定された。そこで開水路隅角部における混合距離が、高さ z と、壁面からの距離 y の関数であるとして、次のように仮定する。

$$l = \kappa' X \quad (4-1) \quad X = y^a z^b \quad (4-2)$$

ただし l を長さの次元とするために $a + b = 1$ とする。

流速 u が X の関数であるとする、 X が一定のとき u の値も一定となりこれは等流速線をあらわす。従って u の変動分 u' を

$$-u' = \kappa' X (du/dx) \quad (4-3)$$

とあらわした場合、この変動は等流速線に垂直方向のものと考えられる。これは図22における a_2 線矢印方向となる。この矢印方向の輸送量を ρv としたとき、 u' 、 v' の乱れが同程度であるとする、矢印方向における剪断力 τ は

$$\tau = -\rho l v' = \rho \kappa'^2 X^2 \left| du/dx \right| du/dx \quad (4-4)$$

となる。(4-4) 式を積分すると

$$u/u_* = (1/\kappa') \ln X + C = (1/\kappa') \ln (y^a z^b) + C \quad (4-5)$$

となる。ただし u_* は図22の線が壁面もしくは底面と交わる場所での摩擦速度である。実測値から何本かの線を読みとり、グラフにしたものが図23及び図24である。

グラフより $a=b=0.5$ $\kappa'=0.19$ となった。

定数 C に関しては、図25の α の点における底面近傍において、粘性底層の流速分布式

$$u/u_* = u_* z / \nu \quad (4-6)$$

が成り立っているとし、粘性底層厚さ $z = \delta_s$ において $y = \alpha$ としたときの(4-5)式と近似的に連続するとすると

$$u/u_* = u_* \delta_s / \nu = (1/\kappa') \ln(\alpha^a \delta_s^b) + C \quad (4-7)$$

$$u_* \delta_s / \nu = 0 (=const.) \quad \text{とすると}$$

$$C = D - (1/\kappa') \ln\{\alpha^a (\nu D / u_*)^b\} \quad (4-8)$$

図25において、流速分布を3-(1)にならいう領域と l_b 領域に分けると、 l_b 領域においては y 方向に流速が一様であり、 z 方向に1次元の対数則が成り立つことになる。すると両者の境界線上の対数則は、

$$u/u_* = (1/\kappa') \ln(u_* z / \nu) + A_s \quad (4-9)$$

となる。

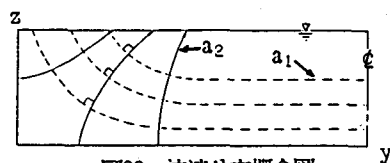


図22. 流速分布概念図

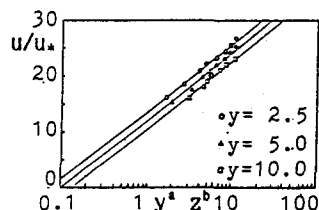


図23. 底面からの a_2 線

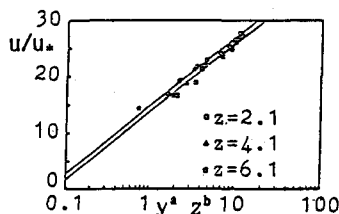


図24. 壁面からの a_2 線

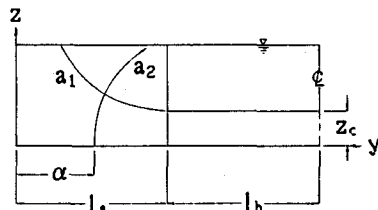


図25. 流速分布のモデル化

1. 領域における等流速線は $a=b=0.5$ より

$$y^{0.5} z^{0.5} = X \quad y z = \text{const.} \quad (4-10)$$

となるので、それと直交する a_2 曲線は

$$y^2 - z^2 = \text{const.} \quad (4-11)$$

とあらわせる。今 曲線が $y=\alpha$, $z=0$ より始まったとすると, $y^2 - z^2 = \alpha^2$ (4-12)

この線上において (4-5) 式に (4-8) 式を代入すると、開水路における対数則として

$$u/u_* = (1/\kappa') \ln(y^{0.5} z^{0.5}) + D - (1/\kappa') \ln\{\alpha^{0.5} (\nu D/u_*)^{0.5}\} \quad (4-13)$$

が成り立つ。

次に剪断力を逆算することを試みる。図25における境界線上の任意の点 z_c をとると a_1 上において

$$y z = l_a z_c = m \quad (4-14)$$

が成り立つ。これと 曲線との交点は (4-12) 式と (4-14) 式を連立させて

$$y = \sqrt{2m^2/(-\alpha^2 + \sqrt{\alpha^4 + 4m^2})} \quad z = \sqrt{(-\alpha^2 + \sqrt{\alpha^4 + 4m^2})/2} \quad (4-15)$$

となる。

上の u は一定で (4-9) 式より求まるので、この値と (4-15) 式により求めた y と z を (4-13) 式に代入すれば u が求まる。RS3 と AW1 に関する計算結果を図26、図27に示す。ただし $\kappa' = 0.19$ $D = 10.0$ $\kappa = 0.41$ $A s = 5.3$ なる値を用いた。結果を見ると計算値は実測値をかなりよくあらわしている。

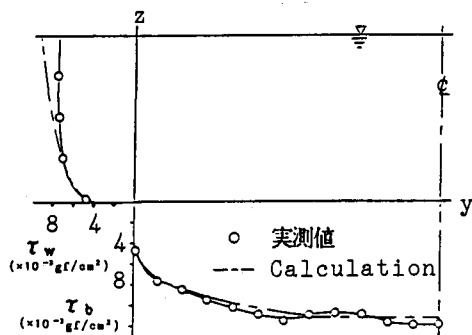


図26. RS3

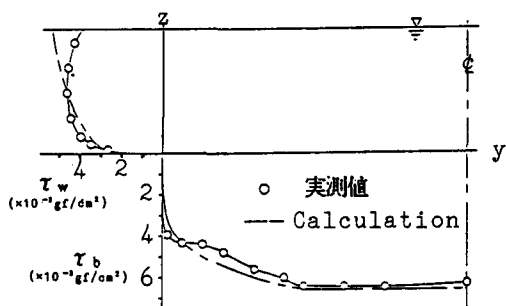


図27. AW1

5 終りに

今回は、護岸の水力を解明していく上での第一歩として、開水路における最も単純な形態である、矩形断面滑面開水路に対し、著書らの実験値と過去の実験値をもとに、定量的な解析を試みた。又現実には河川におこり得る様々な現象（砂運や横流れの存在など）の壁面剪断力に対する影響や、台形断面にした場合の効果などについて定性的に評価した。これからは、後者に対する定量的な評価も試みていきたい。

参考文献

- 1) Ghosh, S.N. and Roy, N. : Proc. ASCE, Vol. 96, HY 4, 1970.
- 2) 津津・中川 : 第29回 水理講演会論文集, 1985.
- 3) Knight, D.W., Demeftiou, J.D. and Hamed, M.E. : Trans. ASCE, 1982.
- 4) 山岡・沢野・吉川 : 第41回年次講演会概要集, 1986.
- 5) 沢野・吉川 : 第41回年次講演会概要集, 1986.