

堰下流底面剪断力に関する研究

建設省九州地建 元局長 現 K.K.鴻池組 正員 秋竹敏実

建設省九州地建 松原下笠ダム工事 正員 畔津幹郎

§ 1. 概説

従来より掃流力に関する研究は、限界掃流力を中心として理論的、実験的研究がなされてきたが、その内容は主として、この限界掃流力と砂礫の粒径などとの関係を取扱ったものが多く、その文献は言つて満ちない。しかしながら、これらの研究の展開とも言うべき構造物との組合わせ、例へば、圪あるいは水門、床固めなどの下流部に生ずる掃流力は、はたしてどの程度のもが生ずるか、といった事柄は、なお検討を要する分野である。即ち、圪下流部などの処理に関して、水叩きなど護床工の長さの決定に対するこの面からの配慮は、その複雑な水理現象のために、解析的な研究は充分行われていない。従つて、従来この種の長さの決定に対しては、既設構造物の分析結果に基くとか、あるいは、Bligh⁽¹⁾、Leliansky⁽²⁾などの方法を用いているに過ぎない。

最近のわが國におけるこの種の研究として、南氏⁽³⁾、土屋氏⁽⁴⁾の研究が注目されるが、なお一般的方法是方法は導かれていない現状である。

こゝに本研究は圪下流部の水理機構、特に底面剪断力分布を定量的に把握するために、模型実験を行ない、これを通して、前述の問題点の一部を明らかにすることを試みた。即ち、本研究の第一の目的とする圪下流底面剪断力分布は、その変動要素として、① 圪体の形状、② 圪高 ③ 下流の粗度係数、河床勾配といった河道要素、などによって異なってくることに着目し、これらが流量の増減に応じてどのような関連を示すか、また流水が先ず潜流より波状跳水に移行することによって底面剪断力が不連続に減少することに着眼し、河道要素と危険流量との関係、洗掘防止上有利な圪形状、及び保護工の長さなど、圪下流部処理に関する設計上の重要事項と明らかにしたものである。

§ 2. 圪下流底面剪断力に関する実験及び解析

(1). 実験装置及び実験方法：実験水路は $60 \times 100 \times 1524 \text{ cm}$ の合成樹脂製の滑面直線水路で $1/100$ の勾配をもつ。実験に用いた圪は図-1に示すA型、B型、C型の3種でいずれも圪高 10 cm の木製表面はペイント塗装。本実験による測定諸値は任意流量、任意下流水位における圪下流各点の水位及び底面流速であるが、流量は水路下流側に設けたパーシャルフリュームにより、水位はポイントゲージにより、また流速はピトー管マノメーターを使用して測定を行ない、併せて流況測定（跳水、潜流、波状跳水の現象測定）を行った。

(2) 流量： $10 \sim 110 \text{ l/sec}$ の範囲で、約 10 l/s の間隔で測定。

(3) 水位：図-2に示す水位 (H_0, H_1, H) と測定したが、 H_2 は測定値 H_1 より水平路における跳水公式を用いて算出。

(4) 底面流速：表-1に示す各点で底面流速と精度を測定。

図-1 堰体の形状
(単位 mm)

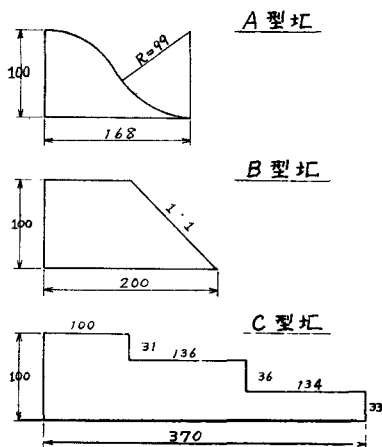
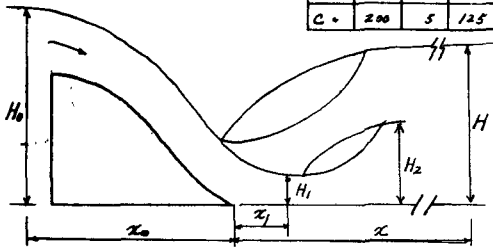


図-2 測定水位 & 位置

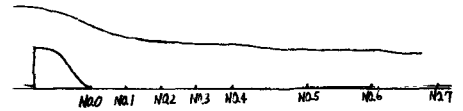


	x_0	x_1	x_2
A型坑	200	15	150
B型坑	200	5	125
C型坑	200	5	125

表-1. 底面流速測定値

測定	NO.0	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7
A型坑	0	10	20	25	50	75	100	125
B型坑	0	5	10	30	50	75	100	125
C型坑	0	10	20	30	50	75	105.5	125

(坑下流端より距離 単位 cm)



(2). 実験結果: 本実験のデータを整理するに当り、 π 定理による次元解析を行った。実験による方程式を $f(H, W, L, \rho, g, U, q) = 0$ ----- (1)

[H : 水深, W : 坑の高さ, L : 坑下流の距離, ρ : 水の密度, g : 重力の加速度
 U : 底面流速 q : 単位中流量]

とし、 ρ, H, g と他の量に対する従属変数とすると (1) 式は

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \text{ ----- (2)} \quad \text{と表わされ、これを解くと}$$

$$\pi_1 = H/W, \quad \pi_2 = H/L, \quad \pi_3 = g^2/gH^3, \quad \pi_4 = U^2/U_*^2$$

となるが、4つの変数となるので、距離の項 π_2 を一定としパラメーターに π_1 ととり、断面力の測定点と組む各点において、 π_3, π_4 の関係をプロットし、関数 φ の性質を探ることにした。(なお π_3 はフルード数に相当する項である。) この解析上、水位の項 H は、 H/W の項のみ下流水深ととり、他は水深 H_1 をとって、 F_r, U_* にて表示した。従って $H/W, F_r, U_*/U_*$ をもって関数 $\varphi = 0$ を表わすこととする。

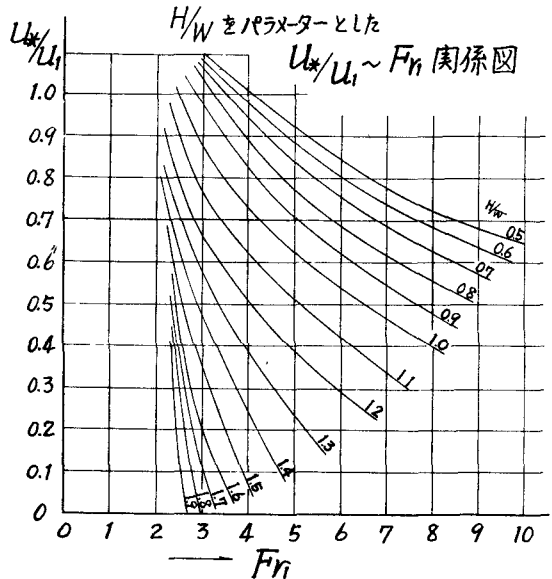
A型坑について、NO.0 地点 (坑直下の地点) での $H/W \sim F_r \sim U_*/U_*$ の関係をその一例として図-3に示す。

(3). 実験結果に基づく解析: 坑下流各点での底層流速 U_* は、坑下流部の常流状態の境界条件 (水位 ~ 流量曲線) を与えることにより定まる。そこで実際の河川に適用させるために、坑下流部の境界条件をパラメーターとした底層流速、底面断面力の関係を図示するよう試みた。即ち坑下流部の境界条件となる水位、流量の関係は次式で与えられる。

$$q = 1/\pi \cdot I^{1/2} \cdot H^{5/3} \\ = \alpha \cdot H^{5/3} \text{ ----- (3)}$$

∴ α : $m^3/sec/m, \pi$: マンニングの

図-3 A型坑 測定NO.0



粗度係数, I : 水面勾配 = 河床勾配

α , 概称: 河道要素 = $\frac{1}{n} I^{\frac{1}{2}}$

粗度係数と河床勾配との関係は、九州の主要河川について調べると、大畧、図-4で表わされ、これより $\frac{1}{n} \cdot I^{\frac{1}{2}}$ の値は、概ね 0.7 ~ 1.6 の範囲で示される。また、この値は本実験の低落差堤としての適用から考えると 4 ~ 5 m が限度と思われる。

これらのことから、一般河川への設計に供するため、表-2に示す組合せで、相似律を考慮して、検討を行った。その結果の一例を図-5に示す。

表-2

組合せ 4x4 = 16通り	
堤高: W	1m, 2m, 3m, 4m
河道要素: $\alpha = \frac{1}{n} I^{\frac{1}{2}}$	0.8, 1.0, 1.2, 1.4

図-4 九州の主要河川の

粗度係数(n) ~ 河床勾配(I)関係図

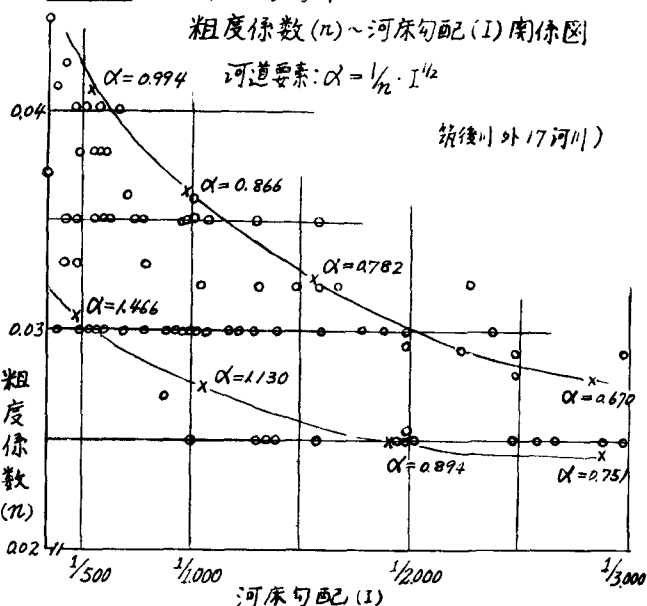


図-5 A型堤, 河道要素 $\alpha = 1.0$

堤高 $W = 2.0$ m

$U_* \sim q$ 曲線

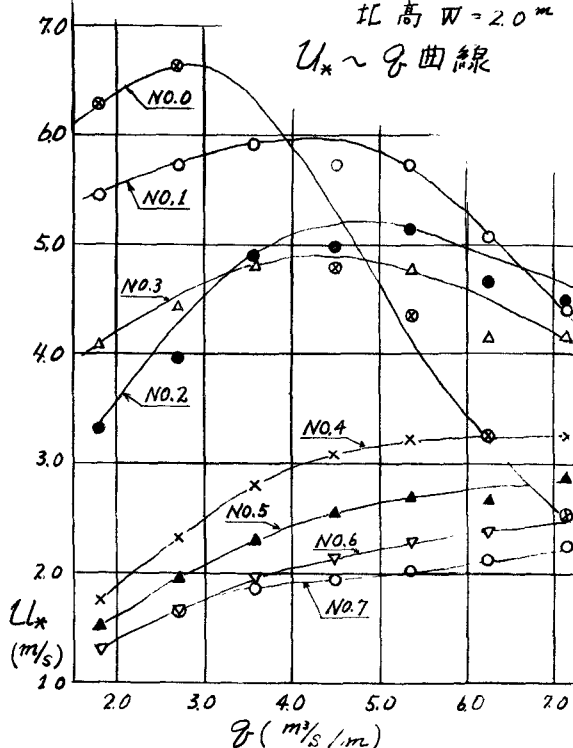
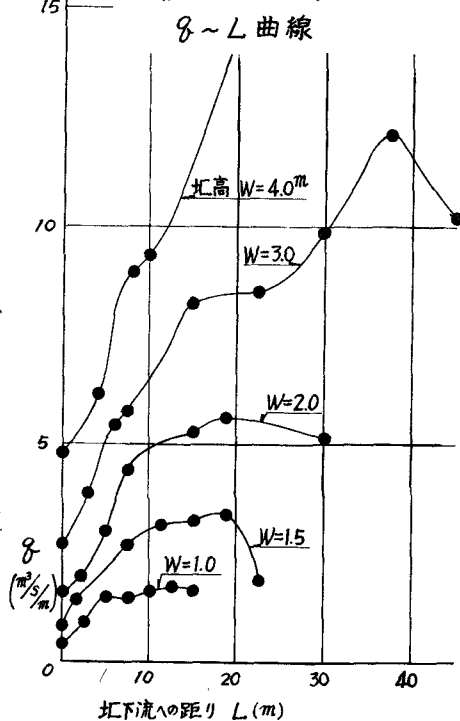
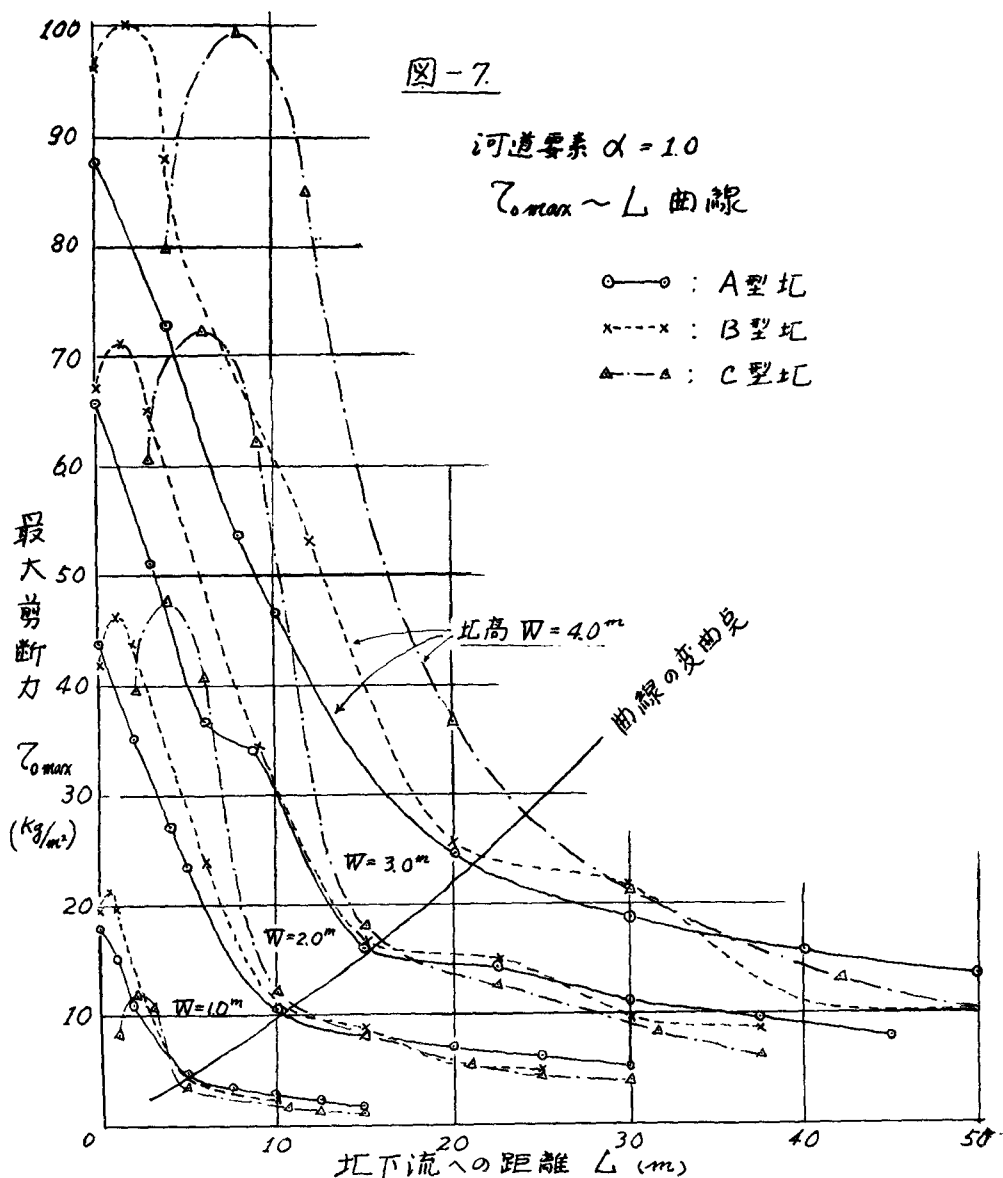


図-6 A型堤, $\alpha = 0.8$

$U_* \text{ max}$ を生ずるときの

$q \sim L$ 曲線





§ 3. 考察及び結論

(1) 結論；①剪断力の最大値はA, B, C型堤いずれも水叩き始点付近であられる。A型堤が最も上流側に生じ、次いでB, C型堤の順で下流側へ移行する。また、いずれも流量と剪断力とは相関関係はない。即ち、ある流量のときに最大剪断力を示す。最大剪断力を示す流量は堤下流の距離に比例して増加するが、剪断力値は減少の傾向を示す。従って、一般的に出水時の洗掘は堤面下より次第に下流におよび、その洗掘度合は漸次減少の傾向を示すと解される。

②最大剪断力分布曲線はA, B, C型堤とも、堤高の約5倍の地点(例之は、堤高2mの場合、堤下流約10mの地点)で変曲点を見出す。本曲線はこの変曲点より上、下流に分て、上流側はC, B

A型坑の順に、剪断力は減少の傾向を示す。即ち、坑下流の河道の境界条件とは無関係に、変曲点より上流側はA、B、C型坑の順に好ましいが、この区間は潮流部と推定され、強固な保護工、例としてコンクリート水叩きなどが必要であろう。従って、坑型別の優劣は、変曲点より下流の水理条件によって判断することになり、剪断力が小さいC、B、A型の順に好ましいとすることが出来る。

③変曲点と水叩きの終点とした場合、その所要長より考へれば、坑高が小なるときは、C、B、A型の順で有利であり、坑高が大なるに従って逆の傾向を示す。

④水叩き下流の保護工のなごは、河床材料の粒度との関連によって決定されるわけであるが、最大剪断力分布曲線図(図7はその一例)の作成によって、今後の坑下流処理に關する設計指針を提案することができた。

(2). 坑形状の比較: A型坑 ①剪断力の最大値は、流量がさほど大きくないときは、坑西下地質で生じ、流量の増加につれて、下流側へ移行するが、その値は等差的に減少する。②変曲点より下流側の剪断力分布は、坑高の变化によってその傾向を異にする。③A型坑は比較的B型坑に類似の傾向を示すが、特に河道要素、 α が大なる程、その類似性が高い。

B型坑 ①剪断力分布、最大剪断力と主する流量などの関係はA型坑に似る傾向を示すが、全般的に剪断力はA型坑より大きな値を示す。②坑高及び河道要素が大なるに従い変曲点は不明確になる。

C型坑 ①最大剪断力と主する各点の流量は、河道要素が小さい場合、ほぼ一定流量に近い。②剪断力分布曲線はA、B型坑のいづれにも類似せず、変曲点より上流側は、A、B型の剪断力より相対的に大きな値を示すが、下流側にいくに従い、剪断力の減少は顕著である。この傾向は坑高が小なる程、大きい。

(3). 本論法に基づく破壊坑への適用: 実際破壊した坑について、破壊時の流量より Q_{br} とを推定し、先に作成された最大剪断力分布曲線の特性と適用して、坑の破壊地点を推定したところ、表-3の如きで、次の結果が得られた。

①破壊の位置は、実験結果で得られる地点と概ね一致する。②破壊地点は最大剪断力分布曲線の変曲点の手前へ、全て発生している。

あとがき

実験を通して、坑下流の断面剪断力分布を主とした水理的一応把握されたが、水叩き下流の処理に關しては、限界掃流力理論との関連においてなお検討を要する点が残されており、これらは今後の課題である。また護床上よりみた各種保護工の耐用度、剪断強度などと研究する必要があると考える。

参考文献

- (1). Bligh W G: Dams and Weirs American Technical Society, Chicago 1918
- (2). Leliansky, S: Irrigation and Hydraulic Design Vol.1 Chapman and Hall, London 1955
- (3). 南郷: 越流坑下流の洗掘保護工所要区間に対するBligh公式の批判、及これら理論による水理計算、農工研 24巻1号、24号
- (4). 土屋義人: 水門下流部における洗掘限界に關する研究、土木学会論文集、第22号、237.

表-3

No	坑名	坑の形状	坑高H	粒度係数 α	河床勾配 τ	河道要素 α	破壊時		破壊位置	
							Q_{br}	Q_{br}	実測	推算
1	伊田坑	A	160	0.033	1/380	1.55	330	10.9	10.0	7.0
2	島田坑	B	160	0.044	1/520	1.02	340	11.6	5.0	5.0
3	柿原坑	B	200	0.044	1/400	1.14	330	10.9	10.0	10.0
4	岩瀬坑	B	210	0.044	1/400	1.14	370	12.7	0-10.0	2.0
5	一作坑	B	130	0.033	1/520	1.35	320	10.2	0-20.0	2.6
6	北沢川工事用水坑	C	150	0.025	1/2000	0.89	320	27.0	7.5	7.0
7	泉利坑	C	267	0.030	1/950	0.90	380	33.6	11.0	11.0