

(B-5) 砂礫が流下するダム水叩きの洗掘について

電力中央研究所 岡田 篤也
石橋 毅
福原 華一

1. まえがき

最近上流からの土砂の流出のために貯水池が埋没し、砂礫が越流頂から流下してダム下流面および水叩の摩耗、損傷を生じているところが多くなって来ている。

この実験は某ダム水叩の洗掘防止に関連して行なったものであるが当ダムからは大粒径の石が多量流下しているので、水叩の洗掘は主としてこれらの砂礫による衝撃力によって行なわれるものと考え、水叩形状および水クッションの効果について検討したものである。

某ダムの標準断面図は図-1の通りで巾約6mの4門の門扉より $835\text{ m}^3/\text{s}$ (10年洪水)を流出するようになっている。現状の水叩上の流況は下流水深が不足しているので射流状態となっている。土砂の流出量は貯水池内の過去の堆砂の実積から推定すると年平均40万立方米であって、その粒度分布は表-1の通りである。

水叩は毎年補修しているが、大出水の最悪時には図-1に示す斜線のような形状で深さ約1.3m、

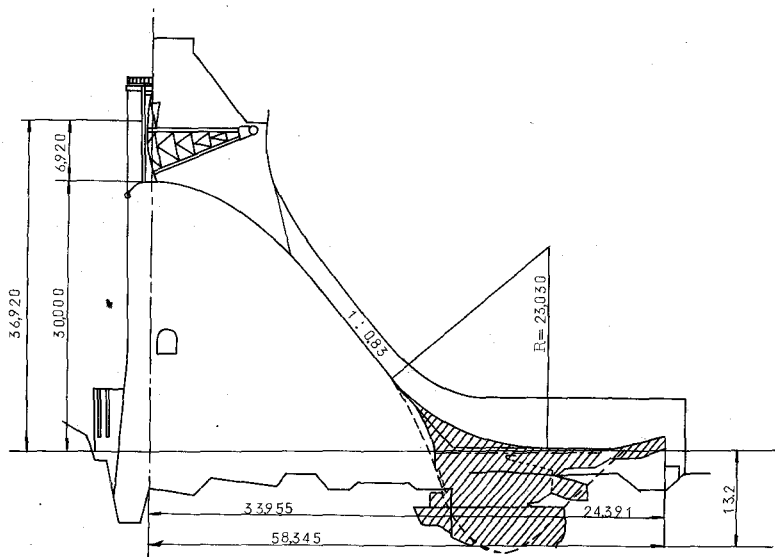


図-1 ダム標準断面および水叩洗掘形状

巾約3~4mの局部的な洗掘が行なわれた。このため洗掘孔内の下部7mに最良の鉄筋コンクリートを打込み補修した。その後 $200\sim300\text{ m}^3/\text{sec}$ の出水が一週間程度あったがコンクリート施工部は深さ約1.6mのすり鉢状に洗掘された。

2. 模型および相似律

模型は縮尺1/50、水路巾0.30mの二次元模型とし、土砂回流式とした。測定器は共和電業製のMPC30SAを使用した。

相似律はフルードの相似律によった。衝撃力をFとする

表-1 粒度分布

粒径 (mm)	残留重量百分率 (%)
10 以下	31
10 ~ 50	23
50 ~ 100	20
100 ~ 300	10
300 ~ 500	16

と $Ft = mV$ なる関係がある。こゝに t : 衝撃時間, m : 質量, v : 速度, これらの原型と模型との比値をそれぞれ K_F, K_t, K_m, K_v とすると $K_F = K_m K_v / K_t$ たゞし $K_m = K_L^3, K_v = K_L^{1/2}$ であるが K_t については現在のところ不明である。いま K_t がフルードの相似律を満すものと仮定すれば $K_t = K_v$ となるから $K_F = K_m = K_L^3 = 125,000$ となる。現状では原型の衝撃力を正確に推定することはむずかしいが定性的な判断の資料は得られるものと考えられる。

3. 実験結果およびその検討

3.1 バケット半径の影響および水クッションの効果

(1) 流砂量と衝撃力との関係

衝撃頻度を変えて衝撃力との関係を調べたがその結果は図-2の通りで流砂量の影響は殆んどない。

(2) 粒径と衝撃力との関係

バケット半径 23 m の場合について粒径を 2.5~5.0 mm のものと 5~10 mm の2通りに変えて行なった。衝撃力の累加百分率を求めると図-3, 図-4の通りで衝撃力は質量すなわち粒径の3乗に比例する。このことは破壊に対して粒径の大きなものが支配的であることを示している。

(3) ダム下流面の衝撃力

ダム下流面も相当摩耗損傷しているが、水叩のそれから見れば非常に少ない。したがって現状バケット中心部(測点3)の衝撃力と比較することによって、或る程度摩耗損傷の度合の判断の資料になるものと考えられる。累加百分率 90, 80, 70% ライン上の衝撃力を求め、現状バケット中心部(測点3)の衝撃力を100%とした場合のダム下流面の衝撃力を求めると表-2のごとく60%となる。

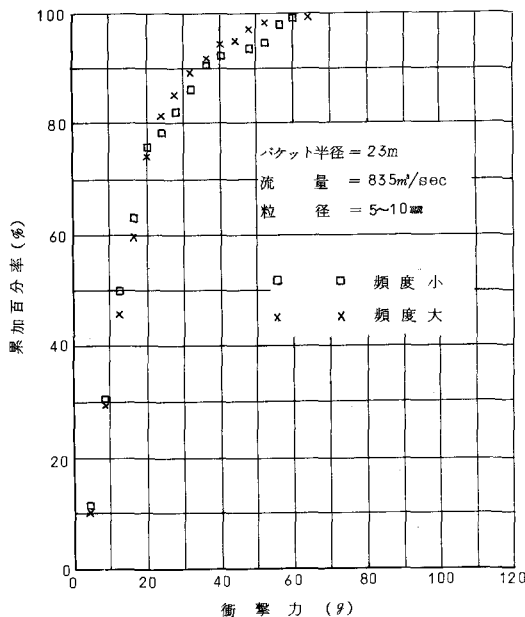


図-2 射流時における測点3の頻度変化にともなう衝撃力分布比較図

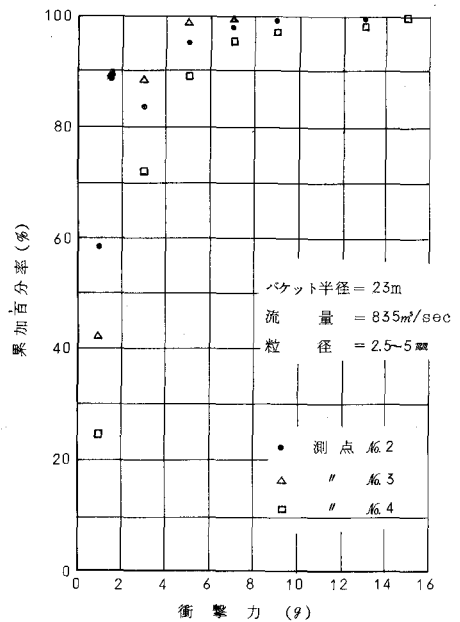


図-3 射流時における測点2,3,4の衝撃力分布比較図

表-2 ダム下流面(測点1)と現状バケット
測点3の衝撃力の比較

	現状バケット (測点3)		ダム下流面(測点1)					
	R=23 ^m		R=46 ^m		R=23 ^m		R=11.5 ^m	
累加百分率(%)	衝撃力 g	(%)	衝撃力 g	(%)	衝撃力 g	(%)	衝撃力 g	(%)
90	48	100	38	79	25	52	25	52
80	28	100	26	93	17	61	18	64
70	22	100	18	82	14	64	14	64
平均		100		85		59		60

(4) バケット半径の影響

衝撃力がバケット半径によってどう変わるかを調べるために、バケット半径を11.5m, 23m, 46mの三通りに変えて測定した。その結果は図-4～図-6に示す通りである。この衝撃果加曲線から衝撃力の大きな部分についてバケット半径の影響を調べると表-3のごとくなる。

次に流量、粒径、流砂量、測定時間を一定にして各測点の衝撃頻度を求めると図-7のごとく、半径が小さい場合には測点3に衝撃が集中し、衝撃頻度

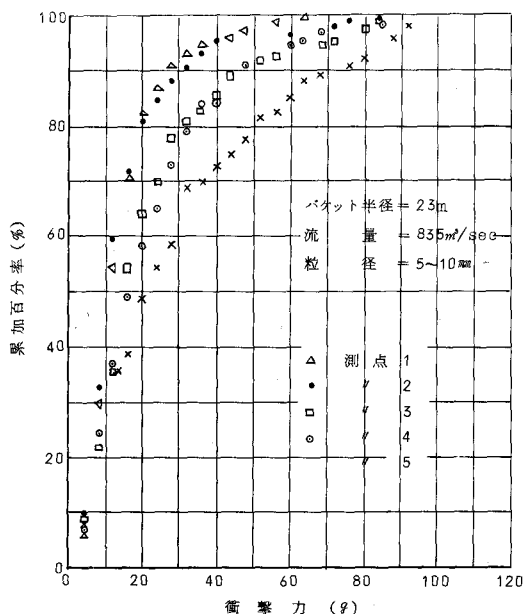


図-4 射流時における各測点の衝撃力分布比較図

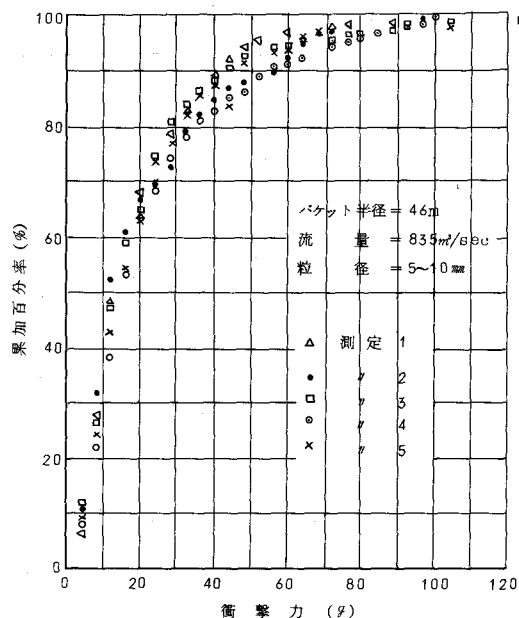


図-5 射流時における各測点の衝撃力分布比較図

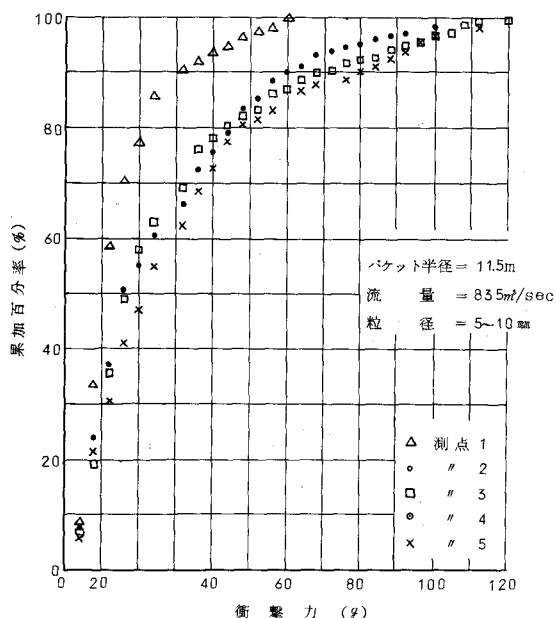


図-6 射流時における各測点の衝撃力分布比較図

表一 3 バケット半径と衝撃力の関係

($Q = 835 \text{ m}^3/\text{sec}$, 測点 3)

累加百分率 (%)	バケット半径					
	4.6 m		23 m (現状)		11.5 m	
	衝撃力 (g)	(%)	衝撃力 (g)	(%)	衝撃力 (g)	(%)
90	38	79.2	48	100	62	129.1
80	26	92.8	28	100	42	150
70	19	86.4	22	100	26	118.1
平均		86.1		100		132.4

も全体的に大きくなっている。したがって局部的に洗掘されて曲率が大きくなると洗掘は加速度的に進行するものと考えられる。

5. 水クッションの影響

現状では跳水を起すためには下流水深が不足しているので水叩上を射流状態で流下している。跳水を起すに必要な共軌水深 H_j は

13.85 m である。バケット半径を 11.5 m, 23 m, 4.6 m にした各々の場合について, 下流水深を 7.5 m (現状の下流水深), $H_j, 1.2 H_j =$

16.62 m, $1.4 H_j = 19.39 \text{ m}$ の 4 通りに変えて水クッションの効果を調べた。例えば半径 23 m, 測点 3 について先に説明したと同様の方法で衝撃力と水クッションの関係を求めると表一 4 のごとくなる。

表一 4 測点 3 における下流水深による衝撃力の変化

(バケット半径 = 23 m, 流量 = $835 \text{ m}^3/\text{sec}$, 粒径 = 5~10 mm)

累加百分率 (%)	下流水深							
	7.5 m		$H_j = 13.85 \text{ m}$		$1.2 H_j = 16.62 \text{ m}$		$1.4 H_j = 19.39 \text{ m}$	
	衝撃力 (g)	(%)	衝撃力 (g)	(%)	衝撃力 (g)	(%)	衝撃力 (g)	(%)
90	48	100	45	94	39	81	33	69
80	28	100	28	100	25	89	22	79
70	22	100	22	100	18	82	15	68
平均		100		98		84		72

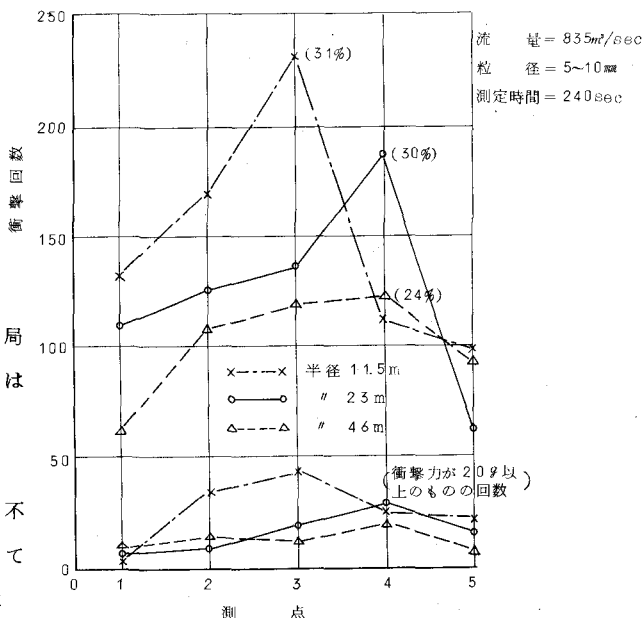
果は小さくなる。

クッションがあると各測点の衝撃頻度数は均一化される。

3. 2 自然に水褥池を形成せしめる場合

洗掘されるにまかせ自然に水褥池を形成せしめたらどのようなになるかを調べるために洗掘試験および衝撃試験を行なった。

(1) 洗掘試験 洗掘材料の強度に関する相似性については現在のところ不明であるが, 洗掘材料の製作, 実験のしやすさから, セメントの大部分をフライアッシュで代替した適当な強度を持つ貧配合



図一 7 バケットカーブ半径のちがいによる衝撃頻度の比較
(流量, 粒径, 流砂量, 測定時間は同一条件)

のモルタルを使用した。その配合は次の通りである。

(C+F) : S = 1 : 4 ここに C : セメント

W / (C+F) = 85 % S : 砂

C / (C+F) = 10 ~ 25 % W : 水

F : フライアッシュ

洗掘材料および実験の種類は表-5の通りである。

試験のうち代表的な洗掘形状を示すと図-8の通りであり通水時間と洗掘深さ、洗掘量との関係は図-9, 図-10のごとくなる。

これらの図から明らかなように水礫池が相当深く形成されてもなかなか平衡状態に達しない。これは粒径を変えた場合 (Test №2と№6) を比較すると明かなように、衝撃試験からは粒径が $1/4$ になれば $1/4^3 = 1/64$ になる筈であるにも拘らず洗掘が進行するのは、この試験での洗掘が主として摩擦力によるからであり、加えて水礫池内の高速流は固体の壁面に沿って流れるため、この程度の洗掘深さでは摩擦力が絶えず作用するのでなかなか平衡状態にならなかったと考えられる。

試験条件が同一でも、洗掘材料の強度によって洗掘の速度、形状は異なっているが洗掘孔の上流面はほぼ一定の凸面形状で安定しダムの基本三角形内へ侵蝕している。

(2) 衝撃試験 衝撃力を対象にした洗掘試験ができなかったので、実際の洗掘形状および洗掘試験の結果から図-1のごとき洗掘形状を想定して、衝撃力を水クッションと関連して測定した。衝撃は洗掘孔上流側の凸面上では殆んどなく、最深部 (測点3) に集中した。いま現状バケット上の衝撃力と洗掘孔最深部の衝撃力を比較すると表-6のごとくなる。

表-6 洗掘孔内の衝撃力とクッション水深との関係

累加百分率 (%)	洗掘孔内の水深							
	現 状		14+7.5=21.5m		14+15=29m		14+20=34m	
	衝撃力(%)	(%)	衝撃力(%)	(%)	衝撃力(%)	(%)	衝撃力(%)	(%)
90	48	100	67	139	52	137	25	52
80	28	100	44	219	30	107	16	57
70	22	100	33	150	22	100	12	55
平 均		100		169		115		55

表-5 洗掘実験の種類 (流量 = 835 m³/sec 一定)

test №	配合 C/C+F (%)	圧縮強度 K _g /cm ²	試験条件
1	10	1.9	粒径 = 5~10 mm
2	15	3.2	"
3	20	3.7	"
4	25	5.1	"
5	15	3.2	水のみ
6	15	3.2	粒径 = 12~25 mm

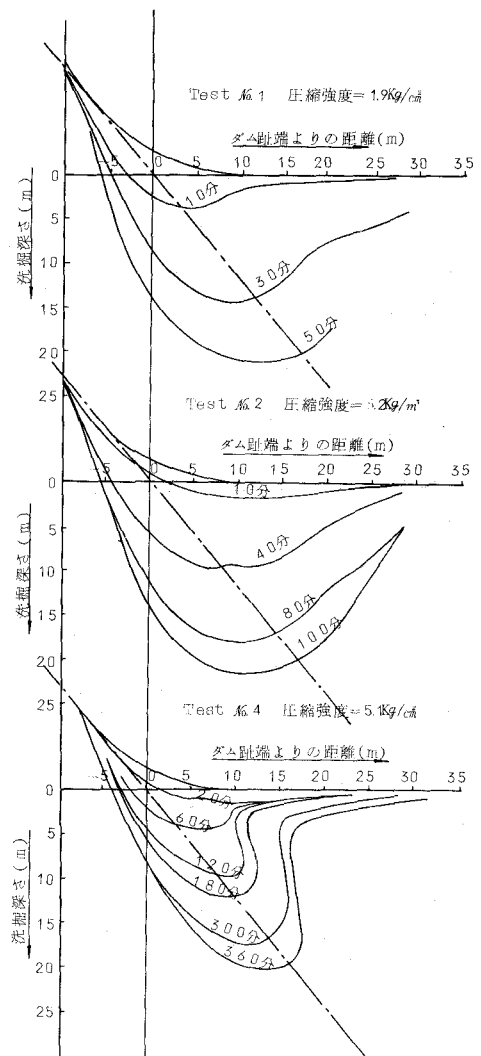


図-8 洗掘形状

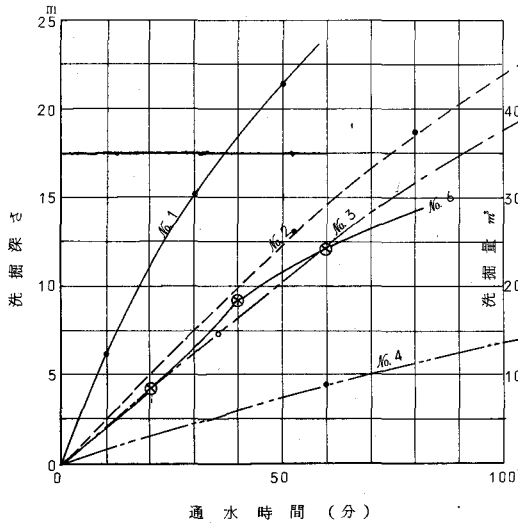


図-9 洗掘深さと通水時間との関係

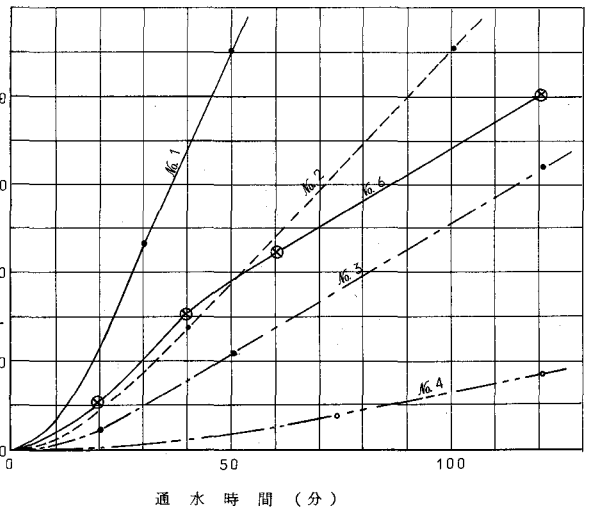


図-10 洗掘量と通水時間との関係

(3) ダムの基本三角形を保護するための水褥池の形状

原型の洗掘形状および洗掘試験によるとダムの基本三角形内に洗掘が進むきらいがある。したがって基本三角形を保護するためには洗掘孔の下流側をどの程度切取ってやればよいかについて検討した。洗掘孔の深さを2.5mとし、洗掘孔の下流面を 90° 、 60° 、 45° の三通りに切取った場合について行った。その結果、 60° 程度に洗掘孔を切取ると最大衝撃力の発生位置や最多頻度の位置は下流側に移ることが判明した。したがって 60° 程度切取ってやることは基本三角形を保護する意味で良好と思える。

水褥池内のダム下流面の衝撃力は水褥池より上部のダム下流面の衝撃力と殆んど等しい。

洗掘孔下流面を 60° に切り取った場合

の最深部の衝撃力と水クッションとの関係を求めると表-9に示すごとくであって平衡状態に近づくためには相当大きな水クッションを必要とすると考えられる。

4. 結 語

こゝでは主として衝撃力を主とした実験について記述したが、摩耗や基礎岩盤

の洗掘については不明な点が多く、衝撃力のみを対象にしてまだ十分な解決が得られない状態である。なお原型の摩耗損傷の進行状況を調査し、実験と共に更に検討して行きたい。

最後に洗掘材料の製作、養成管理等について電研、コンクリート研究室の奥田徹、中野毅弘両氏より多大の御協力を戴き謝意を表します。

表 - 9

累加百分率 (%)	現状バケット 測点3		Type II の最大衝撃力 (測点7) g					
			クッション水深 (m)					
			3.0m		3.75m		4.50m	
	衝撃力(g)	(%)	衝撃力(g)	(%)	衝撃力(g)	(%)	衝撃力(g)	(%)
90	48	100	34	71	23	48	17	35
80	28	100	22	79	17	61	11	39
70	22	100	16	73	12	55	8	36
平均		100		74		55		37