

電力中央研究所 正会員 ○ 石橋 毅
磯部 明久

1. 概 要

排砂路コンクリート浸蝕の主要原因を躍動して流下する砂礫が水路床に衝突する際の衝撃力とし、室内実験による衝撃力の測定から、衝突する砂礫の総運動エネルギーを流れの掃流力の関数として求める計算方法を考案した。

上記の計算方法とコンクリート衝撃試験の結果による衝突粒子の運動エネルギーと損傷量の関係を実物の排砂路に適用し、排砂路損傷量の実測値と計算値と比較し、計算方法の適合性について検討したものである。

2. 実験の概要および測定方法

断面 $0.2 \times 0.2 \text{ m}$ 、長さ 3 m のプラスチック製直線水路に、流量および流下礫の粒径を種々に変えて実験を行った。衝撃力の測定は測定器受圧面が水路床と一致するように取付けを行った。衝撃時間が $20 \mu\text{s}$ と極めて小さいので、受圧面の固有振動数が 60 kHz を有するピエゾ型圧力計を使用した。また衝撃により圧力計に発生した電荷を増増度の高いチャージ増中器（応答周波数 100 kHz ）で増中し、ブラウン管オシロスコープで観測して、それをカメラで撮影した。なお実験の範囲は次の通りである。

実験流量 $10 \sim 45 \text{ l/s}$, 水路勾配 $1:6$, $1:24$, 粒径 $1.25 \sim 20 \text{ mm}$

3. 流水中の礫が水路床に作用する衝撃力

先にのべた実験水路に、流量および流下礫の粒径を種々に変えて実験を行い、礫が水路床に作用する衝撃力を測定した。

実験流量、礫の粒径を一定にした試験条件で300波形以上を測定し、その結果を統計的に整理した。衝撃力の頻度分布の1例を示すと図-1の通りである。

各実験について平均衝撃力 $\bar{F}$ を求めた解析の結果に基づき $\bar{F}/W$ と $Z_R = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{1-\nu^2}}gd$ の関係を示すと図-2のごとくなり、それらの関係は(1)式で表わされる。

$$\bar{F}/W = 5.29 \times 10^{-3} (Z_R - 0.0076) \dots \dots \dots (1)$$

こゝに W は礫粒子の水中平均重量

(1)式は或る特性を有する測定器についての $\bar{F}/W$ と Z_R との関係であって $\bar{F}/W$ の値そのものは礫および水路材料の弾性係数ポアソン比によって変化する。

Hertzの弾性接触理論を適用すると、平面に球が衝突するときの球の運動エネルギーと衝撃力との関係は(2)式で表わされる。

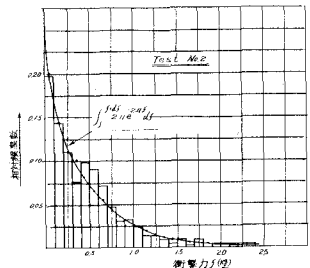
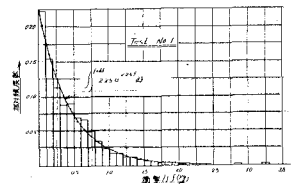


図-1 衝撃力の頻度分布の1例

$$f = \left(\frac{5}{4}\right)^{3/2} \cdot 2^{3/2} \cdot \mu_1^{3/2} \left(\frac{d}{2}\right)^{1/2} \cdot E^{3/2} \quad \text{ただし} \quad \mu_1 = \frac{4}{3 \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)} \quad (2)$$

こゝに $E = \frac{m v_g^2}{2}$: 礫の運動エネルギー, m : 礫の質量, v_g : 礫の衝突時の速度, E_1, E_2 : 各々礫および水路床の弾性係数, μ_1, μ_2 : 各々礫および水路床のポアソン比

この実験に使用した測定器の $\mu_1^{3/2}$ の値は90であるから一般的には

$$\frac{f}{W} = 58.8 \mu_1^{3/2} (Z_* - 0.0076) \quad (3)$$

いま、コンクリート水路内を礫が流下するものと考え、コンクリートのポアソン比、弾性係数を $\mu_1 = 0.15$, $E_1 = 3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とし、流下礫のこれらの値を $\mu_2 = 0.3$, $E_2 = 4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とすれば $\mu_1^{3/2} = 142.49$ となり f/W の値は(4)式のごとくなる。

$$\frac{f}{W} = 8.38 \times 10^3 (Z_* - 0.0076) \quad (4)$$

結局水路床に衝突する礫の運動エネルギーは(2)式と(4)式から Z_* の関数で求められる。

4. 礫の流下速度

水路床に衝突する礫の総運動エネルギーを求めるためには流れの特性と関連した衝撃力の他に礫の飛距離を明らかにする必要がある。流下礫の飛距離および跳躍高を16mmの高速度カメラで撮影したフィルムにより、直接読みとらうとしたけれども、それらの値は小さなものが多く正確な測定が困難であった。そこで礫の平均飛距離は礫の平均流下速度にその平均跳躍時間を乗じて得られるものと仮定した。流水中の礫の運動を高速度カメラにより毎秒600~700コマで撮影し、個々の礫の移動速度を求めた。測定した礫の移動速度の頻度分布の一例を示すと図-3のごとくなりかなりバラツキがある。礫の運動の式は(5)式で表わされる。

$$v_z - v_g = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_d} \left(\frac{F_s}{F_g} - 1 \right) g d \tan \phi} \quad (5)$$

こゝに v_g : 礫粒子の速度, v_z : 礫に作用する代表流速とし礫の跳躍高さを y_0 としたとき水路床よりの高さ $y_0 = (d + y_0)/2$ の平均流速とする。 C_d : 抵抗係数。

一般に排砂路内の流れにおいては Reynolds 数が大きく C_d を一定と見なすことができるから(5)式は(6)式のごとくなり

$$\frac{v_g}{v_z} = 1 - \frac{A'}{F}, \quad \text{ただし} \quad A' = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_d} \left(\frac{F_s}{F_g} - 1 \right) \tan \phi}, \quad F = \frac{v_z}{\sqrt{g d}} \quad (6)$$

v_g/v_z は $F = v_z/\sqrt{g d}$ の関係で表わされる。測定した v_g を使用し、かつ C_d の値を0.4として $\tan \phi$ の平均値を求めると0.08となる。従つて

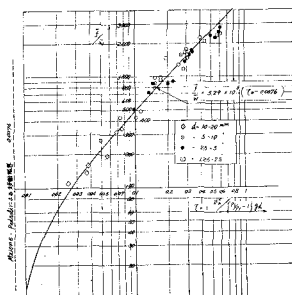


図-2 f/W と Z_* の関係

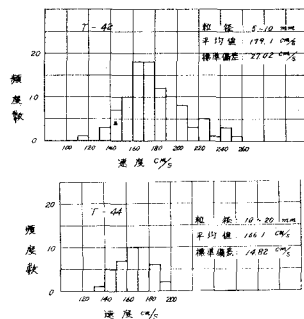


図-3 礫速度頻度分布の一例

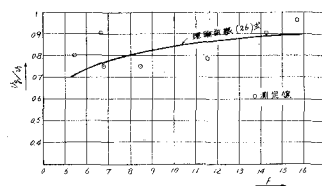


図-4 礫の平均速度

(6)式中の A' の値は1.65となり理論曲線を求めることができる。図-4は理論値と測定値を比較したものである。測定値にはバラツキが見られるが、その傾向は理論曲線とかなり良好な一致を示している。

5. 流下する礫の跳躍時間および飛距離

流下礫の跳躍高は小さいから下降域の礫粒子の沈降速度は限界沈降速度に達せず、静止の状態から加速の途中にあるため、礫の衝突速度としては測定した衝撃力の平均値から(2)式により水路床に作用する礫の平均運動エネルギーを求め、これより礫が水路床に作用する衝突速度の垂直成分を求めた。したがって、礫の跳躍時間としてはこの v_y に達するための跳躍高を算出し、この間を沈降するに要する時間として求めた。落下高 h と沈降速度との関係は

$$v_y = \sqrt{\frac{\beta_1}{\alpha_1} (1 - e^{-\alpha_1 y})}, \quad \alpha_1 = Cd \alpha \beta_2 d^2 / (m + \frac{m_0}{2}), \quad \beta_1 = 2 \alpha_1 (\beta_3 - \beta_2) g d^3 / (m + \frac{m_0}{2}) \quad \dots \dots (7)$$

各粒径について v_y の値を変え、 v_y の平均流速として $v_y = \frac{v_z}{2}$ を使用し、 $Cd = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34$ より Cd の値を求め、この値を(7)式に代入して、礫の跳躍高を求めた。 $\bar{y}_0/d$ と τ_* の関係を図-5に示す。

また y_0 を沈降する間の平均沈降速度 $\bar{v}_y$ は次式で求められ、

$$\bar{v}_y = \int_0^{y_0} v_y dy_0 / y_0 \quad \dots \dots (8)$$

かつ、礫の上昇域、下降域の軌跡が対称であると仮定すれば、礫の平均跳躍時間 $\bar{t}_0$ は

$$\bar{t}_0 = 2 y_0 / \bar{v}_y \quad \dots \dots (9)$$

となる。したがって粒子の平均飛距離 $\bar{L}_0$ で表わせば

$$\bar{L}_0 = \bar{v}_x \cdot \bar{t}_0 \quad \dots \dots (10)$$

こゝに、 $v_y = v_z (1 - \frac{1.565}{F})$, $F = \frac{v_z}{\sqrt{g d}}$, $v_z = v_* (5.75 \log \frac{8 v_*}{\nu} + 5.5)$, $y_0 = \frac{(d y_0)}{2}$ となる。このような方法で各test No.について $\bar{L}_0$ を求め τ_* と $\bar{L}_0/d$ の関係を整理した結果を図-6に示す。またそれらの関係は(11)式で表わされる。

$$\bar{L}_0/d = 90 \tau_*^{1.41} \quad \dots \dots (11)$$

6. 水路床に衝突する礫の運動エネルギーの計算方法

コンクリート水路内を粒径 d の礫が τ_* の条件で流下するものと考えれば衝撃力 f は(4)式より

$$f = W \times 8.38 \times 10^{-2} (\tau_* - 0.0076) \quad \dots \dots (12)$$

で表わされる。礫1個が1回水路床に衝突したときの運動エネルギー、

$$E \text{ は(2)式より } E = \frac{m v_y^2}{2} = f / \left(\frac{5}{4} \right) n_i^{2/3} / \left(\frac{d}{2} \right)^{1/2} \cdot 2 \quad \dots \dots (13)$$

(13)式のごとくなり、また礫の平均飛距離 $\bar{L}_0$ は(11)式より求められ、礫粒子1個が或る水路区間 L を流下するときの衝撃回数 N は

$$N = 4L / \bar{L}_0 \quad \dots \dots (14)$$

となり $1m^3$ の砂礫中に含まれる各粒径別の箇数が判明すれば、 $1m^3$ の礫が流下するときの水路床に衝突する礫の総運動エネルギー E_2 は

$$E_2 = \sum E_i N_i n_i \quad \dots \dots (15)$$

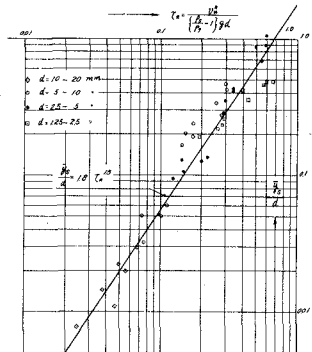


図-5 $\bar{y}_0/d$ と τ_* の関係

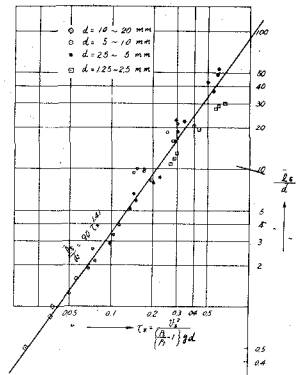


図-6 $\bar{L}_0/d$ と τ_* の関係

となる。また総排砂量を V_s とすると水路床に衝突する礫の総運動エネルギー E は(16)式で表わされる。

$$E = V_s \sum E_i N_i / N_i \dots \dots \dots (16)$$

実際の排砂路においては排砂路を ΔL 区間に細分し、その区間での $E_{\Delta L}$ を数値計算すればよい。

7. コンクリートの損傷量と運動エネルギーの関係

村野、川崎は25度の傾斜で固定したコンクリートの供試体に、重量75gの鋼球を1.5mの高さから自由落下せしめ鋼球の総数が16,560箇を落下せしめたときの衝撃破壊によるコンクリートの損傷量を求めた。鋼球が衝突したときの運動エネルギー損失がコンクリートを破壊するために費やされる仕事量と考えられるからいま反撥係数を α とすると反撥速度は $v_g(1-\alpha)$ で与えられ、衝突の際に起るエネルギー損失 ΔE は

$$\Delta E = \frac{mv_g^2}{2} \alpha (2-\alpha) \dots \dots \dots (17)$$

$\frac{mv_g^2}{2}$ を E とし、 $\alpha(2-\alpha) = A'$ とすると $\Delta E = A'E$ となる。また損傷量 V_c は $V_c = B'A' \sum E$ で与えられるものとする。 B' は材料の種類、強度によって定まる損傷係数、 $A'B' = 1/C'$ とおくと

$$V_c = \sum E / C' \dots \dots \dots (18)$$

C' は kg/m^3 の次元を有し、その値が判明すれば、損傷量と総運動エネルギーの関係が求まる。前述の村野、川崎の試験結果を使用して排砂路のコンクリートに相当する C' の値を推定すると $4.52 \times 10^{6} kg/m^3$ となる。

8. 現地排砂路に適用した場合の損傷量の検討結果

現地への適用については黒部川水系仙人谷ダムと小屋平ダムの左右兩岸にある4排砂路について行った。排砂路の概要およびその検討結果を次表に示す。

表-1 損傷量の検討結果

		仙人谷ダム		小屋平ダム	
		左岸	右岸	左岸	右岸
排砂路の概要	長さ	90.0	56.3	66.7	50.0
	巾	4.0	4.0	2.0~3.5	3.5
	勾配	1:8	1:8.5	1:20.6	1:2
検討期間		34.7.2 ~41.7.12	34.12.29 ~39.5.18	33.11.16 ~37.9.2	28.5.24 ~41.12.10
土砂疏出量 m^3		2.2×10^5	9.18×10^6	438×10^5	1.58×10^6
礫の総運動エネルギー $(kg \cdot m)$		1.346×10^{10}	3.22×10^9	5.56×10^9	2.31×10^{10}
損傷量の実測値 (m^3)		2353	275	859	2755
損傷量の計算値 (m^3)		1574	377	648	2700
計算値/実測値		0.67	1.37	0.76	0.98

9. 結 語

以上のごとく排砂路の損傷量の計算値と実測値は比較的良好な一致を示し、損傷現象を水路床に衝突する礫の総運動エネルギーで論じ得る可能性のあるものと考えられる。

最後に、本研究に当り種々指導戴いた電研、河川水理研究室長安芸周一博士、および現地調査、資料蒐集に所便宜を戴きました関西電力株式会社の担当者の方々に厚く謝意を表します。