

## ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷 に関する水理学的研究

### A HYDRAULIC STUDY ON PROTECTION FOR EROSION OF SEDIMENT FLUSH EQUIPMENTS OF DAMS

石 橋 毅\*  
By Takeshi ISHIBASHI

#### 1. ま え が き

上流からの土砂の流入によって貯水池が埋没し、洪水時に砂礫がダム洪水吐、排砂路などから流下して水路床が摩耗・損傷される実例が多くみられるようになり、特に大粒径の礫の流下する所の被害が大きい。しかしその損傷の機構はいまだ明らかにされておらず、石材、木材、鋼材または特殊コンクリートなどを用いて経験的に補修を行っているが、十分な防止対策が立てられていないのが現状である。

本研究は、著者らが行った既往の研究結果<sup>1)~3)</sup>を再検討し、このような流下砂礫によるダム排砂設備の摩耗・損傷現象について水理学的に検討した結果について述べるものである。

排砂設備が浸食される主要原因を、躍動して流下する砂礫の水路床に衝突する際の衝撃力とし、室内実験により流下砂礫の衝撃力を実験的に検討し、流下砂礫の運動機構の理論解析結果を用いて、衝撃力の測定値から、固定床水路を流下する礫の跳び上がり高さ、飛距離、衝突角度などを推算した。これに基づいて水路床に作用する砂礫の総運動エネルギー、および摩擦による総仕事量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。

上記の計算方法と既往の摩耗試験、衝撃試験結果を実物の 8 地点のダム洪水吐、排砂路などに適用して、これら、排砂設備の摩耗・損傷量の実測値と計算値とを比較し、計算方法の適合性について検討した。

#### 2. 固定床水路を流下する砂礫の衝撃力と運動機構

##### (1) 実験装置および実験方法

実験は直線水路と鉛直曲率を有する水路の両者について行った。それらの実験装置の概要を図-1 に示す。砂礫は試験装置の上流部に設けられた砂礫の供給装置より任意の量が供給され、礫採取網によって回収した。流量の調整は流量調整バルブによって行い、その計量は給水管の途中に設けたオリフィス・メーターによって行った。実験の範囲は表-1 のとおりである。図-2 は鉛直曲率を有するダム洪水吐模型の形状を示したもので、全体の実験装置の概要は図-1 と同様である。

流下礫の水路床に作用する衝撃力は測定器受圧面 ( $\phi = 10 \text{ mm}$ ) が水路床と一致するように取り付け測定し

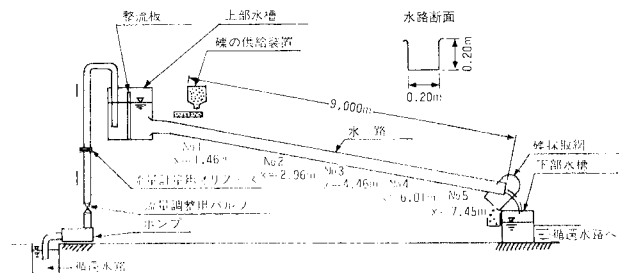


図-1 直線水路の実験装置

表 1 実験の範囲

直線水路の場合	実験流量 (l/s) 粒 径 (mm) 水路勾配 測定位置	18.2, 27.3, 36.5, 45.6 1.2~2.5, 2.5~5, 5~10, 10~20 1/6, 1/24 図-1 中の No. 2, No. 5
鉛直曲率を有する場合	実験流量 (l/s) 粒 径 (mm) 測定位置	30.1, 73.0, 104.5 1.2~2.5, 2.5~5, 5~10, 10~20 図-2 に示す

\* 正会員 (財) 電力中央研究所土木技術研究所環境水理部  
主任研究員

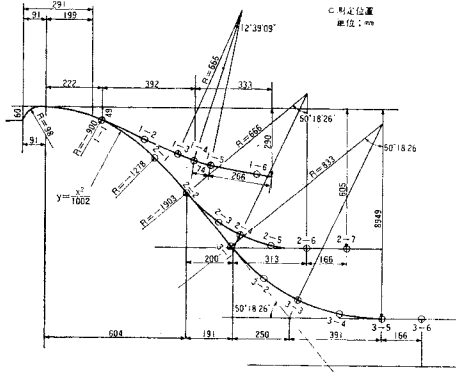


図-2 ダム洪水吐の形状

た。衝撃時間が 20~250 μs であるので、測定器受圧面の固有振動数が 58 kc/s 有する Kistler 社の Quartz Pressure transducer を使用した。また衝撃力により測定器に発生した電荷を、増幅度の高いチャージ増幅器で増幅し、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。チャージ増幅器の応答周波数は 100 kc/s である。

(2) 測定器受圧面の固有振動数および静・動的な検定

a) 測定器の静的な検定

測定器受圧面の中心部に鋼球を押し付け静的な検定を行い、荷重と出力との関係がきわめてよい直線性のあることを確認した。

b) 測定器受圧面の固有振動数

測定器受圧面上に小さな鋼球を自由落下せしめ受圧面の自由振動の平均周期を求めると、17.3 μs であり、受圧面の固有振動数は 58 kc/s である。

実験での衝撃時間は 20~250 μs であって、受圧面の固有周期より衝撃時間が大きくなる粒径を対象としたので正確な衝撃力が得られたものと考えられる。

c) 測定器の動的な検定

測定器受圧面に球形に近い石を自由落下せしめ動的な検定を行った。この結果を Hertz の弾性衝突理論を適用し検討したところ後述するように良好な一致を示した。Hertz の 2 球面弾性衝突理論によれば<sup>(4),(5)</sup>、衝撃中の 2 球面内に働く力は静的な接触と同一に考えて

$$f = n_0 x^{3/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$n_0 = \sqrt{\frac{16}{9} \cdot \frac{r_1 r_2}{(k_1 + k_2)^2 (r_1 + r_2)}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $f$ ：衝撃力、 $x$ ：押込み深さ、 $k_1 = (1 - \mu_1^2)/E_1$ 、 $k_2 = (1 - \mu_2^2)/E_2$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ ：それぞれ 2 球のポアソン比、 $E_1$ 、 $E_2$ ：2 球の弾性係数、 $r_1$ 、 $r_2$ ：2 球の半径。

ここで、 $r_2 = \infty$  すなわち球面と平面との接触に書き換え、 $r_1 = d/2$  とすると次式のようになる。

$$n_0 = n_1 (d/2)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $n_1 = 4/\{3(k_1 + k_2)\}$ 、 $d$ ：粒径。

平面に質量  $m$  の球が衝突するものとすれば、接触後の運動方程式は

$$m d^2 x / dt^2 = -f \dots\dots\dots (4)$$

となり、式 (1)、式 (4) より

$$m d^2 x / dt^2 = -n_0 x^{3/2} \dots\dots\dots (5)$$

式 (5) を積分して  $x=0$  において、 $dx/dt = v_y$  (球の衝突前の速度) の条件を入れると

$$\frac{m}{2} \left\{ \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 - v_y^2 \right\} = -\frac{2n_0}{5} x^{5/2} \dots\dots\dots (6)$$

$dx/dt = 0$  において押込み深さ  $x$  は最大となり、それを  $x_{max}$  とすれば

$$x_{max} = \left( \frac{5 m v_y^2}{4 n_0} \right)^{2/5} \dots\dots\dots (7)$$

これより最大圧縮力  $f_{max}$  を求めれば

$$f_{max} = \left( \frac{5}{2} \right)^{3/5} n_1^{2/5} \left( \frac{d}{2} \right)^{1/5} \left( \frac{m v_y^2}{2} \right)^{3/5} \dots\dots (8)$$

となる。したがって、測定器受圧面と砂礫の特性で決まる  $n_1$  は

$$n_1 = \frac{f_{max}^{5/2}}{(5/2)^{3/2} (d/2)^{1/2} (m v_y^2 / 2)^{3/2}} \dots\dots\dots (9)$$

となるから、測定器について  $E = m v_y^2 / 2$  に応じた  $f_{max}$  を測定すると  $n_1$  の値が求まる。このようにして求めた  $n_1$  の平均値は  $7.68 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2 (7.53 \times 10^9 \text{ N/m}^2)$  であり、その結果を使用して式 (8) の理論曲線を描くと 図-3 中の実線で示すようになる。なお同図中に動的な検定を行ったときの測定値をプロットしたが、これらは良好な一致を示した。したがって動的な検討結果としては平面と球との弾性衝突の結果を使用することと

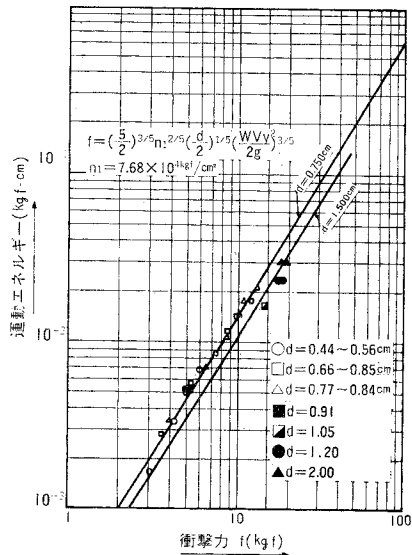


図-3 動的検定結果

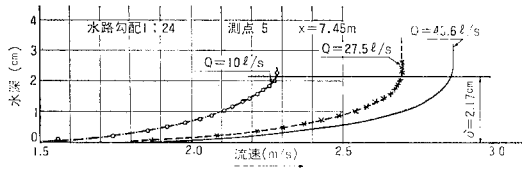


図-4 境界層内の流速分布の測定値

する。

(3) 滑面水路の流速分布および掃流力

流量を変えて各測点の流速分布を測定した。その一例を図-4に示す。一般に水路床に作用する流体の局所的なせん断応力  $\tau_0$  は式(10)で定義される。

$$\tau_0 = C_f \rho u_0^2 / 2 \dots \dots \dots (10)$$

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 $C_f$ : 局所摩擦係数、 $\rho$ : 水の密度、 $u_0$ : 境界層外の主流の流速、または垂直断面の最大流速、 $u_*$ : 摩擦速度。

本実験では境界層が発達過程にあるため、局所的なせん断応力  $\tau_0$  は、流速分布形状を測定して行う F.H. Clauser の図式解法<sup>6)</sup>によって求め、実験結果の整理を行った。

(4) 流水中の礫が水路床に作用する衝撃力

先に述べた直線水路および鉛直曲率を有する水路において、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。

衝撃力が  $f$  と  $(f + \Delta f)$  内に発生する確率を  $q(f) \Delta f$  とし、 $f$  より大となる確率を  $p(f)$  として、実験値を  $\log p(f)$  と  $f$  との関係で示すと図-5のようになり、 $f$  の分布は指数分布に適合している。したがって、

$$-d \log p(f) / df = m \text{ (定数)} \dots \dots \dots (12)$$

と書くことができ、これを積分して式(13)が得られる。

$$p(f) = e^{-mf} \dots \dots \dots (13)$$

また、

$$q(f) = m e^{-mf} \dots \dots \dots (14)$$

すなわち、粒径、流砂量および水理量を一定にしても、衝撃力が大きくなるに従って、その発生確率は指数的に減少することを示している。また、衝撃力の平均値を  $\bar{f}$  とすれば、

$$f = \int_0^{\infty} f m e^{-mf} df = 1/m \dots \dots \dots (15)$$

となる。実験結果より  $m, \bar{f}$  を求め、各 Test No. ごとに整理した。

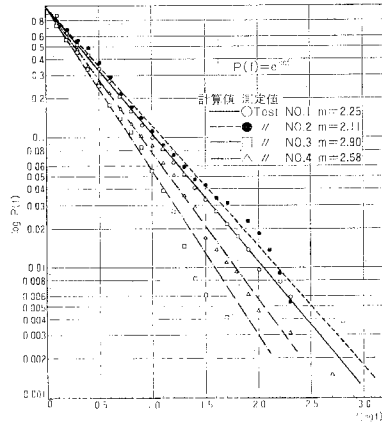


図-5  $\log P(f)$  と  $f$  との関係

(5) 固定床水路における砂礫の運動機構

a) 理論解析

流水の掃流力が限界掃流力以上になると、まず砂礫は固定床を転動、滑動し、掃流力の増加とともに Saltation (跳躍) 形式の移動が加わる。河床粒子の運動機構については Einstein<sup>7)</sup>, Yalin<sup>8)</sup>, 岸・福岡<sup>9)</sup>, 尾崎<sup>10)</sup> などによって掃流砂量と関連して研究されている。

固定床水路を流下する大粒径の礫の運動機構については、流れの揚力のほかに非球形粒子の転動による跳び上り、衝突による反発などを考慮しなければならないと考えられるが、その理論的な取扱いが難しく、まだなされていない。尾崎は、河床上にある砂粒に働く揚力  $L$  が砂粒の水中重量  $W'$  を上回ったとき、砂粒は  $w_0$  の鉛直方向初速度で跳び出すものとして、砂粒の跳び上り高さ、浮上水中滞留時間、1ステップの移動距離を求めている。そこで尾崎の解析手法を基本とし、これに水路勾配、床面の鉛直曲率の影響を加味して、図-6に示すように固定床上を流れる砂礫の運動機構を検討した。すなわち、 $t=0$  で初速度  $w_0$  で跳び出した砂礫の水路床面に直角な方向の運動方程式は粒子の回転の影響を無視し、遠心力が定常的に作用するものと仮定すると式(16)のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{6} \rho s d^3 \frac{dw}{dt} &= -\frac{\pi}{6} (s-1) \rho g d^3 \\ &\times \left( \cos \theta + \frac{s}{s-1} \right. \\ &\cdot \left. \frac{u_g^2}{gR} \right) - \frac{1}{2} \\ &\cdot \rho C_{dw} |w| \frac{\pi}{4} d^2 \\ &- \frac{1}{2} \frac{\pi}{6} \rho d^3 \frac{dw}{dt} \end{aligned} \dots \dots \dots (16)$$

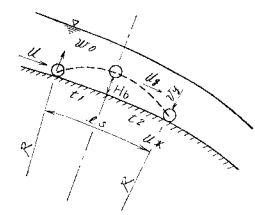


図-6 礫の運動モデル

ここに、 $\rho$ ：流体の密度、 $s$ ：砂礫の比重、 $d$ ：粒径、 $w$ ：床面に直角方向の速度、 $t$ ：時間、 $u_g$ ：水路床と平行な砂礫の移動速度、 $R$ ：水路床の鉛直曲率半径、 $\pm u_g^2/(gR)$ ：遠心力で凹の場合+、凸の場合-、 $\theta$ ：床面の水平とのなす角度。

式(16)の左辺は粒子を加速するための力、右辺の第1項は粒子に作用する重力、浮力、遠心力、第2項は粒子に作用する流体抵抗、第3項は仮想質量を加速するための力である。

排砂設備の摩擦・損傷には粒径の大きなものが支配的であり、砂粒 Reynolds 数  $Re = wd/\nu$  は大きいので、砂粒の抗力係数  $C_d$  は一定 ( $\approx 0.4$ ) と仮定すると式(16)は式(17)のようになる。

$$dw/dt = -a - bw|w| \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{ここに、 } a = \frac{2(s-1)g}{2s+1} \left( \cos\theta \pm \frac{s}{s-1} \frac{u_g^2}{gR} \right)$$

$$b = \frac{3C_d}{2(2s+1)d}$$

$dw/dt=0$  の等速運動を行う終端沈降速度  $w_f$  は、

$$w_f = \sqrt{\frac{a}{b}} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_d} (s-1)gd \left( \cos\theta \pm \frac{s}{s-1} \frac{u_g^2}{gR} \right)} \dots\dots\dots(18)$$

$0 \leq t \leq t_1$  の砂礫の運動方程式は式(17)より次式のようになる。

$$\int \frac{dw}{a+bw^2} = -\int dt \dots\dots\dots(19)$$

$t=0$  で  $w=w_0$  の初期条件のもとに式(19)を積分すると式(20)が得られる。

$$w(t) = \frac{w_0 - w_f \tan t \sqrt{ab}}{1 + (w_0/w_f) \tan t \sqrt{ab}} \dots\dots\dots(20)$$

$t_1$  は  $w(t)=0$  となるとき時間であるから式(20)より次のように求まる。

$$t_1 = \frac{1}{\sqrt{ab}} \tan^{-1} \left( \frac{w_0}{w_f} \right) \dots\dots\dots(21)$$

砂礫の跳び上り高さ  $H_b$  は以下のように計算される。

$$H_b = \int_0^{t_1} w(t) dt = \frac{w_f}{2\sqrt{ab}} \ln \left[ 1 + \left( \frac{w_0}{w_f} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(22)$$

$t_1 \leq t \leq t_1 + t_2$ 、すなわち、砂礫の下降時の運動方程式は  $t_* \equiv t - t_1$  とおくと

$$\int \frac{dw}{-a-bw^2} = -\int dt_* \dots\dots\dots(23)$$

となり、 $t_*=0$  で  $w(t_*)=0$  の初期条件で式(23)を積分すると式(24)が得られる。

$$w(t_*) = -w_f \tanh(\sqrt{ab} t_*) \dots\dots\dots(24)$$

$H_b$  は次式から求められる。

$$-H_b = \int_0^{t_2} w(t_*) dt_* \dots\dots\dots(25)$$

$\xi \equiv \sqrt{ab} t_*$ 、 $\xi_2 \equiv \sqrt{ab} t_2$  とおくと式(24)、式(25)か

ら

$$H_b = w_f \int_0^{\xi_2} \tanh(\sqrt{ab} t_*) dt_* = \frac{w_f}{\sqrt{ab}} \int_0^{\xi_2} \tanh \xi_2 d\xi$$

$$\therefore H_b = (w_f/\sqrt{ab}) \ln(\cosh \xi_2) \dots\dots\dots(26)$$

$t_2$  は式(22)と式(26)より以下のように計算される。

$$t_2 = \frac{1}{\sqrt{ab}} \sinh^{-1} \left( \frac{w_0}{w_f} \right) \dots\dots\dots(27)$$

したがって、砂礫の浮上滞留時間  $T = t_1 + t_2$  とすると、

$$T = \frac{1}{\sqrt{ab}} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{w_0}{w_f} \right) + \sinh^{-1} \left( \frac{w_0}{w_f} \right) \right\} \dots\dots\dots(28)$$

礫の固定床における移動速度については不明な点が多いので椿・平野・渡辺<sup>11)</sup>によって提案されている式(29)を用いる。

$$u_g/u = 1 - (u_c/u) \approx 1 - \sqrt{\tau_{*c}/\tau_*} \dots\dots\dots(29)$$

ここに、 $u_g$ ：礫の移動速度、 $u$ ：代表流速。

ただし、上式は礫が固定床上を sliding しているときを対象としたものであるが、掃流力が大きい saltation 領域では、式(29)中の粒子減速の影響が小さくなるので、同式を saltation 領域に拡張して用いた。

代表流速としては  $(d+H_b)$  の高さの平均流速と仮定する。

$$u = u_* \left[ 3.0 + 5.75 \log \frac{(d+H_b)u_*}{\nu} \right] \dots\dots\dots(30)$$

1ステップの移動距離  $L_s$  は式(31)で表わされるものとした。

$$L_s = u_g(t_1 + t_2) \dots\dots\dots(31)$$

**b) 実験結果の解析**

礫の仮想質量を考慮すると、水中での衝撃力と礫の運動エネルギーとの関係は式(32)で表わされる。

$$f = \left( \frac{5}{2} \right)^{3/5} n_{1m}^{2/5} \left( \frac{d}{2} \right)^{1/5} \left( \frac{W'' v_y^2}{2g} \right)^{3/5} \dots\dots\dots(32)$$

ここに、 $n_{1m}$ ：既出の式(9)で求めた  $n_1$ 、 $W'' = W + W_0'/2$ 、 $W$ ：礫の重量、 $W_0'$ ：礫と同体積の水の重量、 $v_y$ ：水路床に直角方向の落下速度。

衝撃力を測定することにより  $v_y$  は式(32)から次のように求めることができる。

$$v_y = \frac{(2g)^{1/2} f^{5/6}}{W''^{1/2} (5/2)^{1/2} n_{1m}^{1/3} (d/2)^{1/6}} \dots\dots\dots(33)$$

したがって、式(24)において  $w(t_*) = -v_y$ 、 $t_* = t_2$  とすれば、 $t_2$  は式(34)で求められる。

$$t_2 = \frac{1}{\sqrt{ab}} \tanh^{-1} \left( \frac{v_y}{w_f} \right) \dots\dots\dots(34)$$

そこで、 $H_b$  を前出の式(26)で算出し、次に  $w_0$  を式(22)を書き直した式(35)から求めると、 $t_1$  は前出式(21)により求めることができる。

$$w_0 = w_f \sqrt{\exp(2\sqrt{ab} H_b/w_f) - 1} \dots\dots\dots(35)$$

また、礫の流下速度は式(29)および式(30)から、飛距離は、式(31)から求められるものとした。

しかし、鉛直曲率を有する水路の場合には遠心力の影響が入ってくるので、礫の流下速度  $u_g$  を仮定し、これを徐々に増加して、 $H_b$  を求め、 $H_b$  によって定まる  $u_g$  を計算し、仮定した  $u_g$  に等しくなるまで試算法によって上記の各諸元を求めなければならない。このようにして求めたこれら各諸元を無次元化し、 $\left(\cos \theta \pm \frac{s}{s-1} \frac{u_g^2}{gR}\right)$  をパラメーターとして  $\tau_*$  との関係を探ると、これらの相関がかなりよいことから、最小自乗法によって定式化した。結果を以下に示す。また、これら各諸元と  $\tau_*$  との関係の一例を 図-7~図-8 に示す。

二次元緩勾配直線水路の場合

衝撃力： $\bar{f}/W' = 4.81 \times 10^3 (\tau_* - \tau_{*c}) \dots\dots(36)$

跳び上り高： $H_b/d = 1.3 (\tau_* - \tau_{*c})^{1.35} \dots\dots(37)$

飛距離： $L_s/d = 100 (\tau_* - \tau_{*c})^{1.21} \dots\dots(38)$

衝突角度： $u_g/v_y = 19.2 (\tau_* - \tau_{*c})^{-0.13} \dots\dots(39)$

鉛直曲率を有する水路の場合

衝撃力： $\frac{\bar{f}}{W'} = 1.2 \times 10^4 (\tau_* - \tau_{*c}) \times \left(\cos \theta \pm \frac{s}{s-1} \frac{u_g^2}{gR}\right)^{1/2} \dots(40)$

跳び上り高： $\frac{H_b}{d} = 6.60 (\tau_* - \tau_{*c})^{1.35} \times \left(\cos \theta \pm \frac{s}{s-1} \frac{u_g^2}{gR}\right)^{-1.0} \dots(41)$

飛距離： $\frac{L_s}{d} = 243 (\tau_* - \tau_{*c})^{1.21} \times \left(\cos \theta \pm \frac{s}{s-1} \frac{u_g^2}{gR}\right)^{-1.0} \dots(42)$

衝突角度： $\frac{u_g}{v_y} = 9.48 (\tau_* - \tau_{*c})^{-0.13} \times \left(\cos \theta \pm \frac{s}{s-1} \frac{u_g^2}{gR}\right)^{0.06} \dots(43)$

ここに、 $\tau_* = u_*^2 / \{(s-1)gd\}$ 、 $\tau_{*c}$ ：固定床水路の無次元限界掃流力。

式(40)~式(43)において  $R \rightarrow \infty$ 、 $\cos \theta \rightarrow 1$  のとき、式(36)~式(39)の各対応する式と一致せず、ここには多少の矛盾がある。この理由は測点より上流側の縦断湾曲の影響によるものと考えられるが、現時点では、この影響を考慮することができないので今後の課題とする。

固定床滑面水路における限界掃流力に関しては若田・道上<sup>12)</sup>、Novak & Nalluri<sup>13)</sup>の研究とMaione<sup>14)</sup>がPedroliの実験を解析して得た掃流砂量  $Q$  を示す掃流力を  $\tau_{*c}$  に換算したものなどがある<sup>15)</sup>。ここでは衝撃力が大きくなる Novak & Nalluriの結果を無次元限界掃流力と無次元粒子径  $R_*$  との関係で示した式(44)を使用する。

$$\left. \begin{aligned} 59.1 \leq R_* \leq 4.50 \times 10^4 \\ \tau_{*c} = 0.0907 R_*^{-2/5} \end{aligned} \right\} \dots\dots(44)$$

ここに、 $R_* = \sqrt{(s-1)gd^3}/\nu$

(6) 衝撃力の相似律

前出式(36)、式(40)は、ある受圧面特性を有する測定器についての  $\bar{f}/W'$  の値であって、この値は礫の粒径、礫および水路床材料の弾性係数、ポアソン比によって変化する。

著者らは礫の頂部に加速度計を取り付け、鋼材に礫を自由落下させた実規模の衝撃実験を実施した結果<sup>16)</sup>、衝撃力の測定値は Hertz 理論より算出された値より若干小さくなったが、Hertz 理論は実規模の衝突に対しても、適用できるものと判断された。したがって、水中における平面と球との弾性衝突による衝撃力は仮想質量を考慮すると式(32)と同様に表わされ、原型と模型との値にそれぞれ添字  $p, m$  を付すと、原型と模型とが力学的に相似であるためには、対応する各項が一様比例関係にあることが必要であって、このことから相似を満たす条件として次式が成立する。

$$\begin{aligned} \bar{f}_p / \bar{f}_m = & (n_{1p}/n_{1m})^{2/5} (d_p / d_m)^{1/5} \\ & \times (W_p'' v_{yp}^2 / W_m'' v_{ym}^2)^{3/5} \dots\dots(45) \end{aligned}$$

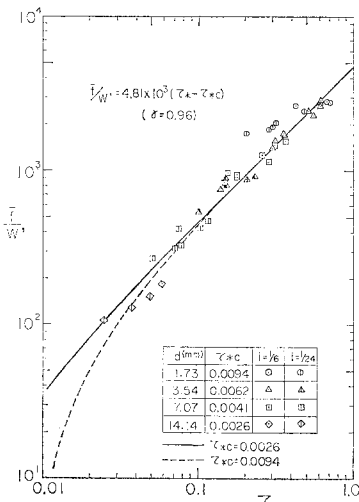


図-7  $\bar{f}/W'$  と  $\tau_*$  との関係 (直線水路)

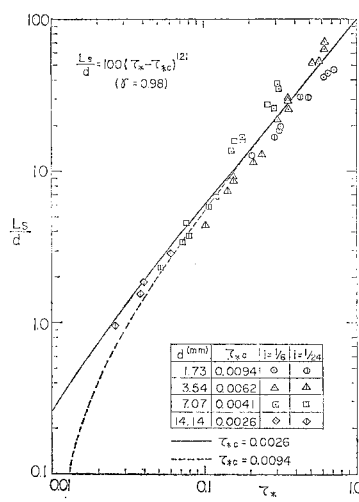


図-8  $L_s/d$  と  $\tau_*$  との関係 (直線水路)

式 (45) において  $d_p/d_m=K_L$  (模型の縮尺比=30),  $W_p''/W_m''=K_L^3$ , また, 礫の運動が原型と模型で相似であると仮定すればフルードの相似律より  $v_{yp}/v_{ym}=K_L^{1/2}$  となるから,

$$\bar{f}_p/\bar{f}_m=(n_{1p}/n_{1m})^{2/5}K_L^{13/5} \dots\dots\dots(46)$$

となる. ところで模型における直線水路の衝撃力は無次元掃流力  $\tau_*$  の関数として式 (36) で表わされ, かつ,  $W_m'/W_p'=K_L^{-3}$  であるから,

$$\bar{f}_p=4.81 \times 10^3 W_p'(\tau_*-\tau_{*c})(n_{1p}/n_{1m})^{2/5}K_L^{-2/5} \dots\dots\dots(47)$$

となる.

式 (47) 中の  $K_L^{-2/5}$  は式 (45) でみられるように, 粒径, 礫の衝突速度, 質量などのスケール効果のため現われたものであるのに対し, 式 (36), 式 (40) 中には上記のスケール効果が表現されていないなど, 現時点では不明確な点を残すものであるが, ここでは, 実験式の式 (36), 式 (40) が成り立つものとし, 式 (47) の  $K_L^{-2/5}$  は単にスケール効果の影響として, そのまま用いることとする. いま, 礫の弾性係数  $E_1=4 \times 10^9 \text{ kgf/cm}^2(3.92 \times 10^{10} \text{ N/m}^2)$ , ポアソン比  $\mu_1=0.3$ , コンクリートの弾性係数  $E_2=3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2(2.94 \times 10^{10} \text{ N/m}^2)$ , ポアソン比  $\mu_2=0.15$  とすると, 式 (3) より  $n_{1p}=2.41 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2(2.36 \times 10^{10} \text{ N/m}^2)$  となる.  $n_{1m}$  は既知量であるから式 (47) は,

$$\bar{f}_p=1.95 \times 10^3 W_p'(\tau_*-\tau_{*c}) \dots\dots\dots(48)$$

となる. 同様に鉛直曲率を有する水路の式 (40) の場合は式 (49) となる.

$$\bar{f}_p=4.86 \times 10^3 W_p'(\tau_*-\tau_{*c}) \times \left( \cos \theta \pm \frac{s}{s-1} \frac{u_g^2}{gR} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(49)$$

水路床をコンクリート面に接して鋼材で保護した場合には鋼板の板としての変形量はオーダー的に小さいのでこれを無視できるものとし, 鋼の弾性係数  $E_2=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2(2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2)$ , ポアソン比  $\mu_2=0.3$  とすると, 衝撃力は式 (50), 式 (51) で求められる.

直線水路の場合:

$$\bar{f}_p=2.59 \times 10^3 W_p'(\tau_*-\tau_{*c}) \dots\dots\dots(50)$$

鉛直曲率を有する水路の場合:

$$\bar{f}_p=6.47 \times 10^3 W_p'(\tau_*-\tau_{*c}) \times \left( \cos \theta \pm \frac{s}{s-1} \frac{u_g^2}{gR} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(51)$$

### 3. 水路床に作用する礫の総運動エネルギーと摩擦による総仕事量の計算方法

#### (1) 水路床に衝突する礫の総運動エネルギーの計算方法

ダム下流面または排砂路を長さ方向に分割し各断面の水量  $\tau_0$  または  $u_*$  を不等流計算より求める. また, 各断面の水路勾配, 水路鉛直曲率が与えられれば, 式 (48) から式 (51) の中から, 水路形状, 水路床材料に応じた衝撃力の式を選定し, 粒径別ごとに衝撃力  $\bar{f}_i$  を計算することができる. したがって, 衝撃力  $\bar{f}_i$  で礫が1回衝突したときの礫の運動エネルギーは式 (32) より得られる式 (52) で求められる.

$$E_i=W_i'v_{yi}^2/(2g)=\beta\bar{f}_i^{5/3} \dots\dots\dots(52)$$

ここに,  $\beta=1/\{(5/2)n_i^{2/3}(d_i/2)^{1/3}\}$ ,  $E_i$ : 平均衝撃力から求めた砂礫の運動エネルギー.

しかし, 図-5 に示したように水量, 粒径が一定の条件に対しても衝撃力は指数分布となり, また, 礫の運動エネルギーは式 (52) に示すように衝撃力の 5/3 乗に比例することから, 水路床に作用する礫の運動エネルギーは衝撃力の分布を考慮して求めなければならない.

いま, 衝撃力の分布を考慮して求めた礫の運動エネルギーを  $E_{di}$  とすると  $E_{di}$  は式 (32), 式 (14) から

$$E_{di}=\beta \int_0^\infty f^{5/3}q(f)df=m\beta \int_0^\infty f^{5/3}e^{-mf}df \dots\dots\dots(53)$$

となり, 定積分公式によると

$$\int_0^\infty f^{5/3}e^{-mf}df=\Gamma(8/3)/m^{8/3} \dots\dots\dots(54)$$

ここに,  $\Gamma(\ )$ : ガンマ関数. したがって,

$$E_{di}/E_i=\Gamma(8/3) \doteq 1.5$$

となる. また, 礫の粒径別の平均飛距離  $L_{si}$  は式 (38), または式 (42) から得られるから, 礫粒子1個がある水路区間  $\Delta L$  を流下するときの衝突回数  $N_i$  は

$$N_i=\Delta L/L_{si} \dots\dots\dots(55)$$

となる. また,  $1 \text{ m}^3$  の砂礫中に含まれている粒径  $d_i$  の礫の個数を  $n_i$ , 総排砂量を  $V_s$  とし, 衝撃力の分布によるエネルギーの補正を考慮すると, 水路床に衝突する礫の総運動エネルギー  $E_t$  は式 (56) で求められる.

$$E_t=1.5 V_s \sum E_i N_i n_i \dots\dots\dots(56)$$

#### (2) 礫の摩擦力による総仕事量の計算方法

礫の回転に消費されるエネルギーを無視して, 各粒径別ごとに水路面には平行な摩擦力が作用するものと仮定する. 図-9 に示すように, 礫が衝突しているときの移動距離を  $\Delta L_x$  とすると礫が1回衝突したときの平均衝撃力の摩擦による仕事量  $W_{xi}$  は式 (57) で表わされる.

$$W_{xi}=(\mu_s \bar{f}_i/2) \Delta L_x \dots\dots\dots(57)$$

ここに,  $\mu_s$ : 動摩擦係数.

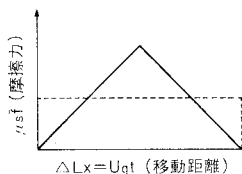


図-9 礫の仕事量

また、 $\Delta L_x$  は近似的に礫の衝突時間  $t_i$  に床面に平行な移動速度  $u_{gi}$  を乗じたものに等しいと仮定すると式 (58) のようになる。

$$W_{xi} = (\mu_s \bar{f}_i / 2) u_{gi} t_i \dots\dots\dots (58)$$

ところで、 $\bar{f}_i$  は Hertz の弾性衝突理論により仮想質量を考慮すると式 (59) で表わされる。

$$\bar{f}_i = \left(\frac{5}{2}\right)^{3/5} n_i^{2/5} \left(\frac{d_i}{2}\right)^{1/5} \left(\frac{W_i'' v_{yi}^2}{2g}\right)^{3/5} \dots\dots\dots (59)$$

衝突時間  $t_i$  は式 (6) の  $dt$  を  $x_i/x_{i\max} = y$  とおいて積分すると式 (60) が得られる。

$$t_i = \frac{2 x_{i\max}}{v_{yi}} \int_0^1 \frac{dy}{\sqrt{1-y^{5/2}}} = \frac{2.94 x_{i\max}}{v_{yi}} \dots\dots\dots (60)$$

ここに、 $x_{i\max}$  は最大押し込み深さであり、式 (61) で表わされる。

$$x_{i\max} = \left(\frac{5 W_i'' v_{yi}^2}{4 n_i (d_i/2) g}\right) \dots\dots\dots (61)$$

式 (59)、式 (60)、式 (61) を式 (58) に代入して  $W_i'' v_{yi}^2 / (2g) = E_i$  として整理すると式 (62) が得られる。

$$W_{xi} = 3.675 \mu_s (u_{gi}/v_{yi}) E_i \dots\dots\dots (62)$$

式 (56) と同様に、衝撃力の分布によるエネルギーの補正をすると式 (63) のようになる。

$$W_{dxi} = 5.513 \mu_s (u_{gi}/v_{yi}) E_i \dots\dots\dots (63)$$

したがって、水路床に作用する礫の総運動エネルギーの計算とまったく同様な方法で、ある水路区間を  $V_s$  の砂礫が流下したときの礫の摩擦力による総仕事量  $W_{xt}$  は式 (64) のように求められる。

$$W_{xt} = 5.513 \mu_s V_s \sum (u_{gi}/v_{yi}) E_i N_i \dots\dots\dots (64)$$

上式中の  $u_{gi}/v_{yi}$  は式 (39)、または式 (43) から求められるので式 (64) は計算することができる。

ただし、鉛直曲率を有する場合には  $u_g$  は一義的に求められないので試算法によって求めなければならない。

#### 4. 礫の衝撃力による損傷量と摩擦力による摩耗量

##### (1) 平面と球の弾性接触による破壊機構

Hertz, Huber, Morton および Fucks らによって導かれている平面と球との弾性接触による応力解析の結果によれば、図-10 に示すように接触円の中心で最大の圧縮応力  $\sigma_c$  を、接触円上で最大の引張り応力  $\sigma_t$  を生じ、これらは式 (65)、式 (66) で与えられる<sup>17)</sup>。

$$\sigma_c = P' \{ (1/2) + \mu_2 \} \dots\dots\dots (65)$$

$$\sigma_t = -P' \{ (1-2\mu_2)/3 \} \dots\dots\dots (66)$$

ここに、

$$P' = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi r'^2},$$

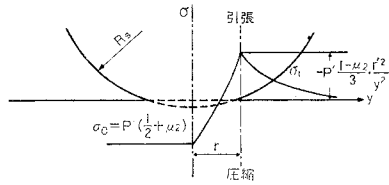


図-10 接触円線上の表面の応力 (谷口の書<sup>17)</sup>より)

$$r' = \sqrt[3]{\frac{3P}{4} \left\{ \frac{(1-\mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\mu_2^2)}{E_2} \right\}} R_s$$

$P$ : 荷重,  $R_s$ : 球の半径,  $r'$ : 接触円半径

$\sigma_c$  が水路床材料の弾性限度を超えると塑性変形を生じ、 $\sigma_t$  が材料の引張り強度を超えるとクラックが入り、一次的な破壊を生じるものと考えられている。そこで、塑性変形、クラックを生じる荷重を限界荷重  $P_c$  と定義して、限界荷重  $P_c$  と粒径  $d_i$  との関係を求めると式 (65) から、

$$\begin{aligned} \text{(圧縮)} \quad P_c &= \frac{\sigma_c^3}{3} \left(\frac{\pi}{2}\right)^3 \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)^2 \\ &\quad \times \left(\frac{1}{2} + \mu_2\right)^{-3} d_i^2 \dots\dots\dots (67) \end{aligned}$$

となる。同様に引張り強度  $\sigma_t$  が与えられたときの限界荷重  $P_c$  と粒径  $d_i$  との関係は式 (66) から

$$\begin{aligned} \text{(引張り)} \quad P_c &= \frac{\sigma_t^3}{3} \left(\frac{\pi}{2} \frac{3}{1-2\mu_2}\right)^3 \\ &\quad \times \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)^2 d_i^2 \dots\dots\dots (68) \end{aligned}$$

となる。前出の礫、コンクリート、鋼材の弾性係数、ポアソン比の値を使用し、コンクリートの  $\sigma_c = 300 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\sigma_t = 27 \text{ kgf/cm}^2$  として、限界荷重  $P_c$  と粒径  $d_i$  との関係を求めると図-11 に実線で示すようになる。同様に鋼材の場合の限界荷重を同右図に示す。一方、断面  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 、長さ  $75 \text{ m}$ 、水路勾配  $1/30$  の排砂路を想定し、 $160 \text{ m}^3/\text{s}$  の流量で排砂したときの、水路床に作用する各粒径の平均衝撃力の計算値を求め、点線でこれらを同図中に示した。コンクリート床の排砂路を流下する各

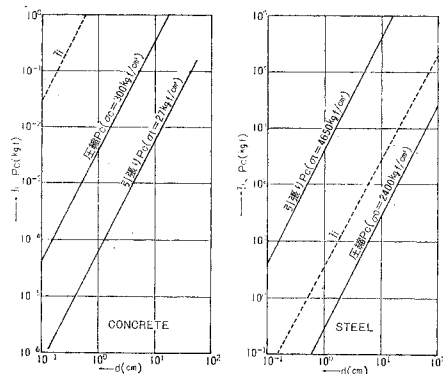


図-11 排砂路に作用する衝撃力と限界荷重

粒径の衝撃力の計算値は圧縮、引張り 両者の 限界荷重  $P_c$  を大きく上回り容易に 損傷されることがわかる。水路床を鋼材で保護した場合には、衝撃力の計算値は引張り強度に対する限界荷重より小さく、引張り応力による破壊はないと思われる。しかし、塑性変形の繰り返しによって変形摩耗が行われるものと推定される。

(2) 礫の衝撃力による損傷量と摩擦力による摩耗量

a) 衝撃力による損傷量

Bitter (1963)<sup>18),19)</sup> は衝突粒子による損傷量に関し、衝突粒子の運動エネルギーを水平および垂直成分に分け、前者による摩耗は切削摩耗 (Cutting wear)、後者は変形摩耗 (Deformation wear) と名付けその摩耗式を提案している。Neilson (1968)<sup>20)</sup> らはこの考え方を受け継ぎ、切削摩耗では運動エネルギーは粉体により表面層を削るのに費やされ、変形摩耗では粉体の運動エネルギーは塑性変形に使われるが、塑性変形の繰り返しにより塑性疲れから摩耗粉となって、はく離するという考え方を導いた<sup>21)</sup>。

著者ら (1968) は同様に衝突による損傷量は衝突の際のエネルギー損失に比例するものとした。すなわち、反発係数を  $\alpha$  とし、礫の衝突速度を  $v_1$  とすると、反発速度  $v_2 = \alpha v_1$  となるから ( $\alpha < 1$ )、損失エネルギー  $\Delta E$  は、

$$\begin{aligned} \Delta E &= (1/2)mv_1^2 - (1/2)mv_2^2 \\ &= (1/2)mv_1^2(1 - \alpha^2) \end{aligned} \quad (69)$$

となる。ただし、 $(1 - \alpha^2)$  は水路床の限界荷重を  $P_c$  とすると

$$\begin{aligned} \bar{f}_i/P_c \leq 1 : (1 - \alpha^2) &= 0 \\ \bar{f}_i/P_c \gg 1 : (1 - \alpha^2) &= \text{一定} \\ \bar{f}_i/P_c \geq 1 : (1 - \alpha^2) &\approx a \text{ func. } (\bar{f}/P_c) \end{aligned}$$

と考えられるので、定性的には式 (70)、および 図-12 に示すようになるものと考えられる。このことは 図-13 からわかるように、粒径に関係なく、粒子の運

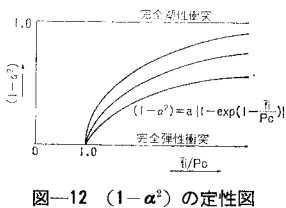


図-12  $(1 - \alpha^2)$  の定性図

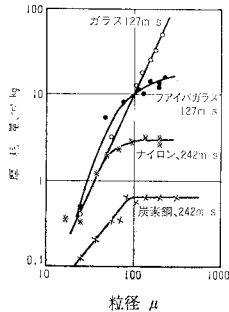


図-13 Tilly らの空気中の衝突粒子状態におけるけい砂の粒径と摩耗量の関係 (橋本<sup>21)</sup>の書より)

動エネルギーと損傷量の比が一定になることからもうかがえる。

$$(1 - \alpha^2) = a \left\{ 1 - \exp\left(1 - \frac{\bar{f}_i}{P_c}\right) \right\} \quad (70)$$

ここに、 $a$ : 材料の特性によって定まる定数。

一方、床面に衝突する礫の衝撃力  $\bar{f}_i$  は 図-11 に示したように  $\bar{f}_i \gg P_c$  であるので、 $(1 - \alpha^2)$  は近似的に定数  $a$  として取り扱うことができるものと考えられる。したがって、衝撃力による損傷量を、 $W_{c1}$ 、損傷係数を  $C_1$  とすると、

$$W_{c1} = C_1 \Sigma (Wv_1^2/2g) \quad (71)$$

となる。ただし、 $C_1 = C' (1 - \alpha^2) \approx C'a = \text{定数}$

b) 摩擦力による摩耗量

摩耗に関しては多くの研究者によって理論的、実験的に検討されているが、摩耗量は摩擦距離と荷重に比例し、金属の硬さに反比例するという Holm の法則が排砂設備の摩耗現象の解明に適用できるものと考えられる。摩耗試験では固着および自由粒子押付け法、円板回転法など種々の試験方法が採られているが、これらの試験結果に基づく摩耗現象は、巨視的にはいずれの場合も動摩擦係数  $\mu_s$  を導入し、仕事量に比例させることで、統一的に説明することができる。そこで、摩擦力による摩耗量  $W_{c2}$  は仕事量に比例するものと考え式 (72) を用いることとした。

$$W_{c2} = C_2 \mu_s PL \quad (72)$$

ここに、 $C_2$ : 材料の特性によって定まる摩耗係数、 $P$ : 荷重、 $L$ : 移動距離。

(3) コンクリートおよび鋼材の損傷係数、摩耗係数

既往の研究の中から、運動エネルギー、荷重、移動距離などの物理量と摩耗・損傷量の関係が明確な実験データを使用して、4.(2) の考え方に従って、コンクリートおよび鋼材の損傷係数、摩耗係数を求めると、表-2 に示すようになる。

ただし、自由粒子押付け法による摩耗試験による場合

表-2 摩耗・損傷係数<sup>22)~24)</sup>

Material	$C_1$ (m <sup>2</sup> /kgf)	$C_2$ (m <sup>2</sup> /kgf)
Concrete	$1.189 \times 10^{-7}$	$1.135 \times 10^{-8}$
Steel (SM. 41)	$3.73 \times 10^{-11}$	$6.59 \times 10^{-11}$
" (HT. 80)	$2.53 \times 10^{-11}$	$4.78 \times 10^{-11}$
SUS 304	$2.04 \times 10^{-11}$	$3.25 \times 10^{-11}$
SCMnH 11	$1.18 \times 10^{-11}$	$1.33 \times 10^{-11}$

は粒子が試験片と試験台になす仕事量は等しいと仮定し摩耗係数を求めた。この際、動摩擦係数  $\mu_s$  としては 0.3 を用いた。



表-3 摩耗・損傷量の実測値と計算値との比較

No.	水路幅 (m)	長さ (m)	勾配	流入・流出部の標高差 (m)	流量 (m³/s)	比堆砂量 (m³/km²/年)	期間	掃流砂量 (m³)	摩耗量の 実測値 (m³)	摩耗量の 計算値 (m³)	計算値 実測値
1	8.0	900	1/20	45.000	100	4 170	47~49 (2.5 年)	0.680×10 <sup>6</sup>	2 798	2 544	0.91
2	8.0	700	1/37	18.919	115	4 170	47~49 (2.5 年)	0.779×10 <sup>6</sup>	2 340	1 937	0.83
3	3.6	59.5	1/20	2.975	65	5 835	33~35 (2 年) 35~36 (〃)	1.82×10 <sup>6</sup>	859	543	0.63
4	3.5	53.1	0~1/2	18.120	65	同上	28~35 (8 年) 36~41 (6 年)	6.07×10 <sup>6</sup>	2 755	2 255	0.82
5	4.0	95.0	1/8	13.000	65	同上	34~35 (2 年) 36~41 (6 年)	1.92×10 <sup>6</sup>	2 353	1 280	0.54
6	4.0	56.3	1/8.5	8.176	65	同上	35 (1 年) 36~39.5 (3.5 年)	0.682×10 <sup>6</sup>	275	255	0.93
7		No. 6 と同一			65	同上	同上	同上	275	296	1.08
8		No. 3 と同一			65	河床変動の測定	55 (1 年)	0.223×10 <sup>6</sup>	30.4	43.2	1.42
9		No. 3 と同一			65	同上	55,56 (2 年)	0.337×10 <sup>6</sup>	(1.494)	(1.30)	0.87
10	5.0	62.7	0~1/1.7~1/14	12.066	100	1 517	55 (1 年)	0.133×10 <sup>6</sup>	97	64.7	0.67
11	31~24	57.8	0~1/0.83~0	26.840	400	1 517	年平均 (40~45 年)	0.363×10 <sup>6</sup>	377	320	0.85
平均											0.87

( ) 内は鋼材の平均摩耗厚 mm

### 5. 実物排砂設備に適用した場合の摩耗損傷量の検討

前述の計算方法を実物の 8 地点の排砂設備に適用して、これら排砂設備の摩耗・損傷量の計算値と実測値とを比較し、計算方法の適合性について検討した。

排砂設備の摩耗・損傷量の計算にあたって特に考慮した事項は以下のとおりである。

i) 流量は排砂路の場合、排砂が効果的に行われる開水路の状態で流し得る限度の流量とした。その他の洪水吐、仮排水路の場合はその期間に発生した洪水流量のほぼ平均値を用いた。

ii) 排砂量は原則として、ダム建設後調整池が埋没するまでの調査から得られた比堆砂量 (m³/km²/年) を用いた。

また、浮流砂と掃流砂との割合は掃流砂量の子測値と比堆砂量との比較から 1:1 とし、摩耗・損傷量の検討には掃流砂を対象とした。

粒度分布は堆積土砂のふるい分け試験結果を用いた。資料のない地点は混合砂礫の掃流砂量式<sup>25)</sup>によって計算し、その結果得られる掃流砂量および粒度分布を用いた。

対象とした排砂設備の規模・形状および摩耗・損傷量の計算値と実測値との比較を表-3 に示すが、摩耗・損傷量の計算値は、いずれの場合も実測値のほぼ 87% の値を示した。本解析においては礫の仮想質量として、排除した流体の質量の 0.5 倍の値を用いたが、沢本<sup>26)</sup>によれば球が壁面に衝突するときには理論的には 0.8 倍、実験的には 0.7 倍に増加することが示されている。仮想質量が大きくなると、実験結果の解析における式 (33) の礫の衝突速度、および式 (31) の飛距離が減少し、衝

突回数が増えるので、水路床の摩耗・損傷量は増加し、摩耗・損傷量の計算値と実測値との適合性はよくなる傾向となる。しかし、これら排砂設備の規模、形状が異なるにもかかわらず、摩耗・損傷量の計算値と実測値との比はほぼ一定であり、これを基準として実物の摩耗・損傷量を推定することは可能と思われる。

表-3 中の No. 6 (直線水路) と No. 7 (鉛直曲率を有する水路) は、水路形状による礫の衝撃力、飛距離などの算定に用いた計算式の相違が摩耗・損傷量の算定に与える影響の程度を調べるために行ったものであるが、計算式による相違は小さく 16% 程度である。その理由は鉛直曲率を有する水路の場合、礫の衝撃力は大きくなるが、飛距離も大きくなって、衝突回数が減少し、これらによって礫の運動エネルギーが相殺されるためである。

同表中の No. 8 はコンクリート床の場合で No. 9 は水路床の一部を鋼材で保護し、その効果を確かめるため現地実験を行った場合であるが、摩耗・損傷量は小さく、鋼材による水路床の保護は、摩耗・損傷対策として有効なものと考えられる。また、摩耗・損傷量の計算値と実測値との比はコンクリート床の場合と同程度と思われる。

次に粒径が摩耗・損傷量に及ぼす影響について検討した。直線水路において一定量、一樣粒径の砂礫を粒径を変えて排砂した場合の摩耗・損傷量を計算し、粒径  $d_i = 1 \text{ cm}$  のときの摩耗・損傷量を基準として、摩耗・損傷量の比を求めると、水路床材料、水路形状のいかんにかかわらず、図-14 に示すように摩耗・損傷量は粒径比のほぼ 0.3 乗で増加するものと推定される。

このことは、大粒径の礫が流下する所の被害が大きいという実例とも一致し、本手法の妥当性の一端を示すものと思われる。

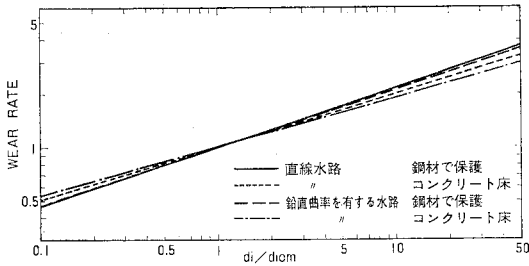


図-14 摩耗・損傷量に及ぼす粒径の影響 (計算値)

## 6. 結 語

本研究は排砂設備の砂礫による摩耗・損傷現象を解析して、その対策を検討するために行ったものである。流下砂礫による摩耗・損傷現象は水路床に衝突する砂礫の総運動エネルギーおよび摩擦による総仕事量で論じ得る可能性があるものと考えられる。おもな結果は次のとおりである。

(1) 水路床に作用する礫の衝撃力を実験的に検討し、流下砂礫の運動機構の理論解析結果を用いて、平均衝撃力の測定値から、固定床水路を流下する砂礫の跳び上り高さ、飛距離、衝突角度などを推算し、これを掃流力の関数として示した。

(2) 上記の結果に基づいて、ある量の砂礫がある水路区間を流れとともに流下する際の、水路床に作用する砂礫の総運動エネルギー、および摩擦による総仕事量の計算方法を求めた。

(3) 上記の計算方法を実物8地点のダム洪水吐、排砂路などに適用して、これら排砂設備の摩耗・損傷量の計算値と実測値とを比較し、計算方法の適合性について検討した。その結果、摩耗・損傷量の計算値は実測値のほぼ87%の値を示した。しかし、これら排砂設備の規模、形状が異なるにもかかわらず、計算値と実測値との比はほぼ一定であり、これを基準として、摩耗・損傷量を推定することは可能と思われる。

(4) 以上の結果に基づき、従来経験的に行われていた排砂設備の補修対策に対し、耐摩耗保護材の使用、設計改良による摩耗・損傷量の軽減度を定量的に推定することができるものと考えられる。

稿をおくにあたり、種々有益なご指導をいただいた早稲田大学 吉川秀夫 教授、(財)電力中央研究所土木技術研究所安芸周一副所長に厚く感謝の意を表す。

なお本研究を実施するにあたり資料のご提供と多大なご協力をいただいた東京電力(株)、関西電力(株)、中部電力(株)の各社に深甚なる謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 石橋 毅・磯部明久：排砂路の損傷に関する水理学的研究，電力中央研究所技術研究所報告 No. 67104, 1968.
- 2) 石橋・磯部・高野・奥田：OH ダム水叩の砂礫の流下による洗掘防止対策，電力中央研究所 技術第二研究所依頼報告 70554, 1971.
- 3) 石橋 毅：砂礫の流下によるダム水叩の洗掘防止対策(第2報)水路の摩耗・損傷機構に関する水理学的考察，電力中央研究所依頼報告 375521, 1975.
- 4) Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper, J. Math. (Crelle's J), Vol. 92, pp. 156~171, 1881.
- 5) Timoshenko and Goodier: Theory of elasticity, Mc Graw-Hill Book company, pp. 372~384, 1951.
- 6) Clauser, F.H.: The Turbulent Boundary Layer, Advances in Applid Mechanics, Vol. III
- 7) Einstein, H.A.: The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, Technical Bulletin No. 1026, U.S. Dept. of Agric., Washington, D.C., 1950.
- 8) Yalin, S.: An expression for bed load transportation, Proc. ASCE, Vol. 89, HY 3, May 1963.
- 9) 岸・福岡：河床粒子の Saltation の構造と掃流砂量，土木学会第10回水理講演会講演概要集 II-81, 1969.
- 10) 尾崎幸男：水流による河床砂礫の移動と流路形態に関する水理学的研究，中央大学学位論文，1980.
- 11) 椿・平野・渡辺：滑面水路における掃流機構について，九大工学集報，第42巻第3号，1969.
- 12) 芦田・道上：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No. 206, 1972-10.
- 13) Novak & Nalluri: Sediment transport in smooth fixed bed channels, Proc. ASCE, Vol. 101, HY 9, Sept. 1975.
- 14) Maione, U.: Transport di materiale solido in canali a fondo fisso e liscio, L Energia Elettrica, No. 11, pp. 787~796, 1964.
- 15) 嶋・早川：掃流砂の運動機構と流砂量，土木学会第10回水理講演会講演概要集，1969.
- 16) 石橋，ほか：流下する礫が排砂路面に作用する衝撃力に関する検討，電力中央研究所土木技術研究所依頼報告 381566, 昭和57年4月.
- 17) 谷口紀男：硬脆材料の衝撃破砕加工法，誠文堂新光社，pp. 51~55, 1959.
- 18) Bitter, J.G.A.: A study of erosion phenomena, Part I, Wear, 6, pp. 5~21, 1963.
- 19) Bitter, J.G.A.: A study of erosion phenomena, Part II, Wear, 6, pp. 169~190, 1963.
- 20) Neilson, J.H. and Gilchrist, A.: Erosion by a stream of solid particles, Wear, 11, pp. 111~122, 1968.
- 21) 橋本建次：粉粒体によるアブレーション摩耗，産業技術センター，pp. 170~175, 1974.
- 22) 村野・川崎：普通コンクリートおよび耐衝撃材を用いたコンクリートの衝撃抵抗性について，第7回電研土木，講演と懇談の会，1965.
- 23) 石橋・尾崎：排砂路保護用鋼材の損傷実験，電力中央研究所土木技術研究所依頼報告 380547, 1980.
- 24) 木村：コンクリートおよびモルタルのすりへり試験，セメント・コンクリート誌 No. 139, 1958-9.
- 25) 林・尾崎・石橋：混合砂礫の掃流砂量に関する研究，第24回水理講演会論文集，pp. 35~43, 1980.
- 26) 沢本正樹：壁面に衝突する球の仮想質量，土木学会論文報告集，第191号，pp. 77~81, 1971-7