

掃流砂によるコンクリート面の摩耗

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎

金沢大学工学部 学生員 ○宮垣 圭吾

1. まえがき

ダムの越流頂や堰の水叩きの通過土砂による摩耗は深刻な問題であるが、近年、貯水ダムに排砂門が設計されたり、砂防ダムの天端の摩耗対策が考えられ、コンクリート構造の摩耗についての土砂水理学的検討がこれまで以上に注目されている。ここでは、水叩きや堰・砂防ダムの天端の摩耗予測のための基礎的研究として、掃流砂礫が水平なコンクリート面に進入してきた状態を考え、掃流砂モデルに基づいて、掃流砂礫がコンクリート面単位面積当たり・単位時間当りに加える衝撃エネルギーを評価し、従来からなされているコンクリート面の摩耗試験の結果を活用して摩耗量予測を試みるものである。

2. コンクリート面の摩耗特性

建設省土木研究所等では、コンクリート面に鋼球や礫を落下させて摩耗・損傷量を調べる試験が行われている。ここではその例を参考に掃流礫による摩耗・損傷量がどのような物理量と関係するかを調べる。石橋の研究¹⁾によると衝撃力は面に垂直な衝突速度(v_v)を用いた運動エネルギーと1対1に関係づけられるから、ここでは便宜的に v_v を用いた落下物体の衝突直前の運動エネルギーを 衝撃エネルギー(E)と定義する。衝突時の面に平行な速度による運動エネルギーはこすり摩耗と関係づけられると思われるが、これは前者に比べきわめて小さいのでここでは無視する。試験は空气中で 落下物体(その密度を σ とする)とその直径(d)、落下高さ(H)、コンクリート面の水平からの角度($\pi/2-\theta$, θ は衝突角度を表す)を変化させて数種類実施された。力学的エネルギーの保存則から、

$$v_v = \sqrt{2gH \sin \theta} \quad (1); \quad E = mv_v^2/2 = \sigma A_3 d^3 g H \sin^2 \theta \quad (2)$$

となる。ここに、 m : 落下物体の質量, A_3 : 落下物体の体積に対する形状係数(球ならば $\pi/6$)である。さて面に垂直な物体衝突前後の速度の比として定義される反発係数を e とすると、衝突によって失われる衝撃エネルギー(ΔE)は、

$$\Delta E = (1-e^2) E \quad (3)$$

となり、これが摩耗・損傷という仕事量と対応するものと考えられる。摩耗・損傷試験に使われた鋼球と礫では反発係数が若干異なるものの正確な値は今のところ不明であるので、ここではこれを一定としておく。摩耗・損傷の仕事量は摩耗・損傷を受けて損失したコンクリートの損失重量に比例する。すなわちコンクリートの損失体積を V とすると、

$$V = (1-e^2) E / [\gamma(1-\lambda)\sigma_c \xi] \quad (4)$$

で与えられる。ここに、 σ_c : コンクリートの密度, λ : コンクリートの空隙率, γ : 効率, ξ : 損傷の幾何スケール(長さの次元)である。

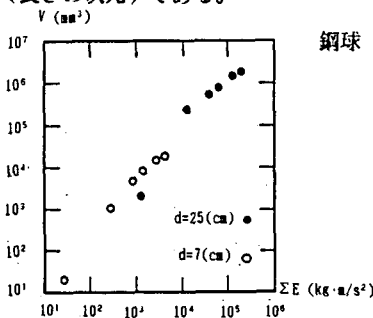


図-1 摩耗試験の結果(a)

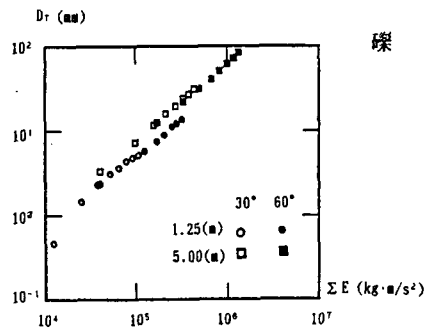


図-2 摩耗試験の結果(b)

摩耗試験の結果の一部について摩耗体積 V と衝撃エネルギー E の関係をプロットしたのが図1で、式(4)が妥当なものであると判断できる。一方、図2は平均摩耗厚さ D_T と衝撃エネルギー E の関係をプロットしたものである。ここにおいて、 D_T は試験で得られた損傷部分面積を A として、 $D_T = V/A$ として求められたものである。 A は試験の際の落下物体の着地位置のばらつきによって決まるもので、今回入手した資料だけから D_T を V に変換するのは難しい。しかしながら、図1及び2から上記の考え方の妥当性が検証されたと言える。

3. 掃流砂モデルを用いたコンクリート路床摩耗予測

掃流砂礫の運動は、小規模な跳躍の連続(successive saltation)として特徴づけられ、個々の跳躍は河床での衝突・反発を媒介に連続する。すなわちこの衝突・反発の際に路床に加えられる衝撃力が底面摩耗の原因と考えられる。辻本・中川²⁾は個々のsaltationの運動軌跡の力学的解析と、河床への衝突の際の仮想反発面の角度の不規則さを確率論的に考慮したirregular successive saltation modelを展開し、個々のsaltationの特性量の期待値と標準偏差をシミュレーションによって求めている。ここではまずその結果(期待値)を適切に表す簡潔な近似式を提案した。掃流砂礫の河床への衝突の際の衝撃力に関わると思われる saltation長さ(L_s)、saltation粒子が河床へ衝突するときの(入射)速度の鉛直方向成分(v_s)については、次のような式を得た。

$$L_s/d = 150 \tau_*^{0.95} \quad (5); \quad v_s/u_* = 1.6 \tau_*^{0.25} \quad (6)$$

ここに、 d : 砂礫の粒径、 u_* : 摩擦速度、 τ_* : 無次元掃流力である。これらの式は辻本・中川のシミュレーション結果を良く近似するものである(図3参照)。

さて、掃流砂礫の河床への単位時間・単位面積当りの衝突回数(n_c)は、掃流砂量(q_b)と saltation長さから次のように与えられる。

$$n_c = q_b / (A_s d^3 L_s) \quad (7)$$

また1回の衝突当りの衝撃エネルギーは、 $v_y = v_s$ として式(6)を用いると、 $E = \sigma A_s d^3 v_s^2 / 2$ (8)

で与えられる。よって、単位時間・単位面積当り掃流砂礫のによって床面に加えられる衝撃エネルギー(E_b)は式(7)、(8)の積として与えられる。水叩きや堰の天端での掃流砂は必ずしも平衡状態で流送されているわけではないが、ここで簡単のため平衡掃流砂量の一つであるスイス公式を用いると、単位時間・単位面積当りの掃流砂礫による衝撃エネルギー E_b と無次元掃流力の関係は図4のようになる。さらに、求められた衝撃エネルギー E_b を式(4)の E に代入することから、単位時間・単位面積当りの摩耗体積、すなわち平均摩耗厚さ、あるいは摩耗進行速度を予測することができる。

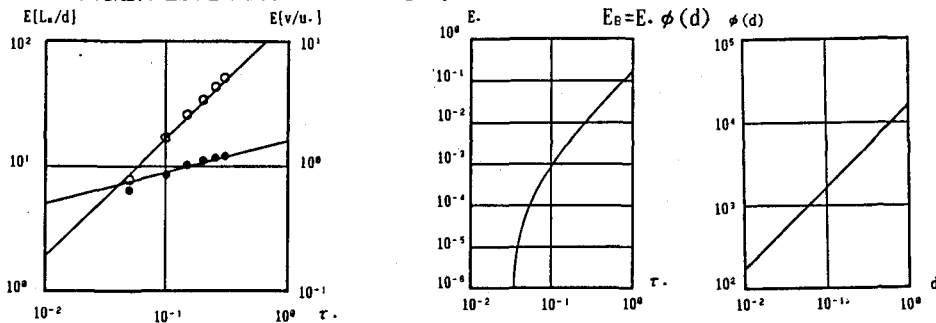


図-3 saltation の特性量 図-4 saltation による単位時間、単位面積当りの衝撃エネルギー

4. あとがき

本報告では、コンクリートの摩耗・損傷試験の結果を合理的に解釈し、摩耗・損傷と強く相関する衝撃エネルギーを定義、通常の礫の掃流状態での摩耗進行速度を予測する式を得た。今後モデル中の各パラメータを正確に推定し予測の実用化を図るとともに、予測式の適用性を基礎実験と現場データの両面から検討したい。

【参考文献】 1) 石橋：土論，第334号，1983， 2) 辻本・中川：土論，第345号，1984。