

壁面磨耗に関わる流水中の粒子径の影響に関する実験的研究

名城大学理工学部 学生会員 蓑島 宏幸

名城大学理工学部 正会員 新井 宗之

名城大学理工学研究科 学生会員 加藤 隼平

1. はじめに

水理構造物において建設材料として多用されているコンクリートは、一般的に流砂などによる耐摩耗性能が低いとされており、粒子の衝突などの影響を長時間受けることによって、コンクリート壁面の磨耗による損傷の程度が無視できなくなることがある。壁面摩耗量を定量的に予測するためには、水路床近傍での粒子挙動、とりわけ粒子の壁面接触回数やそのプロセスを明らかにする必要がある。しかし、河床近傍での粒子挙動は従来移動床の流砂の研究として行われてきた。しかし粗度が小さな固定床での河床近傍の粒子挙動は必ずしも十分研究されておらず、不明な点が多い。本研究では、浮遊砂と掃流砂では河床面への接触過程が異なるものと考えられるため、それぞれに相当する粒子径の異なる粒子を用いて実験を行い、その影響について検討した。

2. 磨耗モデル

本研究では球状粒子が壁面に衝突する前後における運動量の変化量を衝突力と考え、この衝突力の衝突前後での変化量に相当する単位時間当たりの壁面磨耗量を次式で表している¹⁾。

$$\frac{dD}{dt} = \frac{4}{9} \pi \cdot C_d^2 \left(\frac{1-e}{t_a} \right)^2 R^5 \left(\frac{\rho_s}{\tau_c} \right)^2 v^2 \cdot N \cdots (1)$$

ここに D : 平均磨耗量, R : 粒子半径, τ_c : 壁面材料のせん断強度, t_a : 粒子の壁面への接触時間, C_d : 周囲流体の影響や非球形状による補正係数, ρ_s : 粒子の密度, e : 跳ね返り係数, v : 粒子の壁面への衝突速度, N : 単位時間, 単位面積当たりの粒子の衝突個数。

3. 水路床近傍における粒子挙動の解析に関する実験

磨耗に関係する流水中における粒子の挙動を把握し、磨耗モデルに用いるパラメータを的確に評価するために以下のような実験を行った。

(1) 実験の概要

実験装置は図1に示す。水路長8m、幅15cm、高さ30cmの片面透明ガラス側壁の循環式可変勾配水路である。

実験に使用した粒子は密度 $\rho = 2.48 \text{ g/cm}^3$ 、中央粒径 $d_{50} = 0.7, 1.03, 1.71, 3.0 \text{ mm}$ の透明ガラスビーズで、掃流砂、浮遊砂の状態の粒子挙動について調べた。粒子と水を、可変流量ポンプを用いて循環させ、水路床近傍における粒子の挙動を、高速度 CCD カメラを用いて 2000(frames/sec) で撮影し、解析に供した。水路勾配は $\theta = 0.8^\circ, 1.0^\circ, 1.3^\circ, 1.8^\circ, 2.3^\circ, 2.8^\circ, 3.0^\circ, 5.0^\circ, 7.0^\circ, 10.0^\circ$ として実験を行っている、断面平均濃度は図2のようである。また、粒子の影像是、側壁より 2cm、水路中央寄りの幅約 5mm の範囲をアルミ製のスリットをもちいて照明し、得ている。

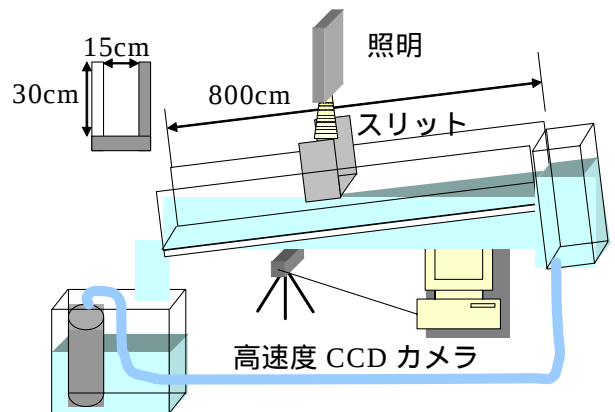


図1: 実験水路の概念図

表1 実験条件

粒径 d_{50} (mm)	水路勾配(DEG)	水深(mm)	粒子濃度(%)
0.70	0.8 ~ 10.0	10.4 ~ 21.4	0.07 ~ 1.32
1.03	0.8 ~ 2.8	13.9 ~ 21.7	0.09 ~ 0.13
1.71	0.8 ~ 10.0	7.8 ~ 21.9	0.12 ~ 0.28
3.00	1.0 ~ 7.0	13.8 ~ 19.9	0.01 ~ 0.04

(2) 解析方法

水路の任意の一段面を時間内に通過する粒子の個数と水路床に衝突する個数を計測し、水路下流端での粒子の断面平均濃度から粒子の衝突割合を求めた。同時に水路床に衝突する前後で粒子の挙動を追跡し、跳ね返り係数や衝突速度を求めた。

4. 実験結果及び考察

実験の概要で述べたように粒子を含有した流れをポンプで循環している、図2は高速度 CCD カメラで水路下流端より約 1.0m 上流側の位置の断面通過粒子の時間変化を測定した結果例である。縦軸は、断面平均濃度 C_m と一断面を通過する粒子数の濃度 C との比である。

図中の(a)は $d_{50} = 1.7\text{mm}$, 水路勾配 $\theta = 3.0^\circ$ での粒子の通過量変化を表している。(b)は勾配が $\theta = 10.0^\circ$ の場合である。いずれも微小な時間変化では粒子の輸送濃度は一様ではなく大きく変動する。特に水路勾配が大きくなるような、掃流力が大きくなるとその変動は顕著になる傾向を示している。このため、粒子の河床面衝突の割合を検討するために、十分な時間間隔での粒子挙動を解析する必要がある。

図3は粒子の河床への衝突割合を示し、断面平均粒子濃度における粒子数に対する河床幅2.8cm区間における粒子数の単位時間当たりの衝突・接触割合である。粒子径 $d_{50} = 0.7 \sim 3.00\text{mm}$ の粒子について、 $\theta = 0.8 \sim 10.0(\text{DEG})$ の関係を示している。水路勾配が急になり、掃流力が大きくなると、衝突割合が減少し、粒子径の影響は顕著ではなくなることを示している。

図4は粒子の河床面への衝突速度を流れの断面平均流速との比で表したものである。図中では粒子径 $d_{50} = 0.8 \sim 3.00\text{mm}$ のものを水路勾配 θ との関係で表している。水路勾配が急で、流速が大きく、慣性項が大きくなるような状態では、粒子径が比較的大きい場合、ほぼ断面平均流速に近い値で河床に接触することを示している。しかし、粒子径の小さい $d_{50} = 0.7\text{mm}$ の場合には、河床面近傍の遅い流体の影響を受けるため、断面平均流速の6割程度で河床面に接触することを示している。

5. 流砂によるコンクリートの摩耗実験

(1)実験の概要

粒子挙動の解析で得たパラメータを用いた磨耗モデルによる磨耗量の予測結果と壁面磨耗量を比較するために以下のような実験を行った。水路長3.0m、幅10cm、高さ15cm、勾配 7° の循環式の水路内に中央粒径 $d_{50} = 0.7\text{mm}$ 、 1.21mm 密度 $\rho = 2.6\text{g/cm}^3$ の珪砂を平均濃度2.88%含有させ、可変流量ポンプを用いて流量・濃度を一定にし、循環させた。50時間間隔で水路床内のコンクリート供試体の摩耗を測定した。

(2)実験結果及び考察

図5に50時間ごとに測定した供試体の摩耗量と式(1)の関係を示している。粒子径 $d_{50} = 0.7\text{mm}$ と 1.21mm の場合の実験結果と、前述のガラスビーズを用いた、実験結果によるパラメータを式(1)に用いて磨耗量を計算した結果である。式中には実際の土砂の粒子が球形でないことによる跳ね返り係数や粒子の衝突時間の変化など、いくつかの不確定要素があるため、それらを C_d の係数で表している。粒子径 $d_{50} = 1.20\text{mm}$ の粒径は緩勾配の流れでは掃流砂としての挙動をするものの、いずれの粒径でも $C_d = 38$ 程度で同様な磨耗量を表すことができる。これは粒子径(粒子沈降速度)に比して勾配が急な摩擦速度の大きい場合には同様な機構の河床面への衝突・接触機構があることによるものであると考えられる。

【参考文献】

1) 新井宗之, 澤木洋一: 流砂によるコンクリート製水路の磨耗予測に関する研究, 水工学論文集, No.49, pp.931-936, 2005.3 2) 新井宗之, 加藤隼平: 壁面磨耗に関わる流水中の粒子挙動に関する実験的研究, 土木学会代 61 回次学術講演会講演概要集, 2-239, 2006-9

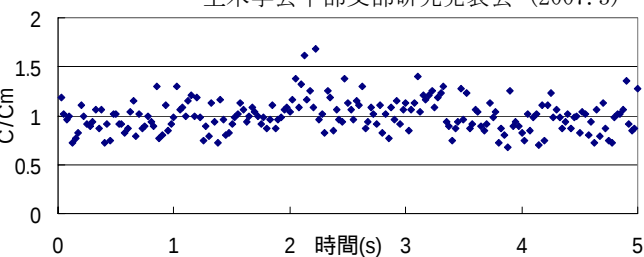


図 2-(a) 断面通過粒子の時間変化 ($\theta = 3.0^\circ$)

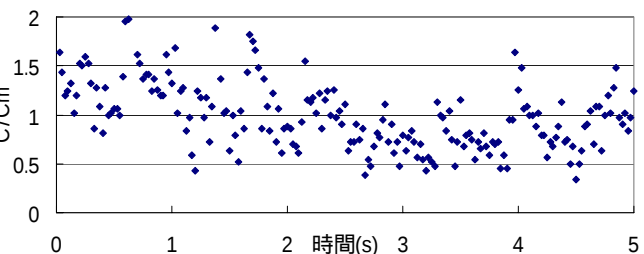


図 2-(b) 断面通過粒子の時間変化 ($\theta = 10.0^\circ$)

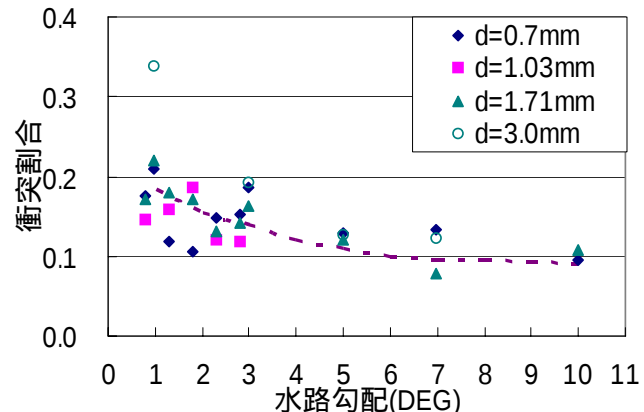


図 3 粒子の水路河床への衝突割合

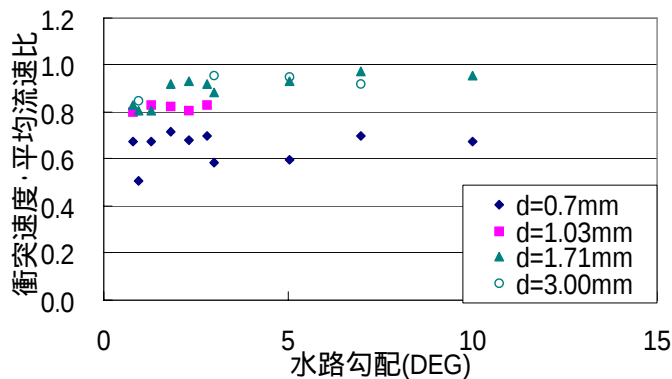


図 4 粒子の河床面への衝突速度

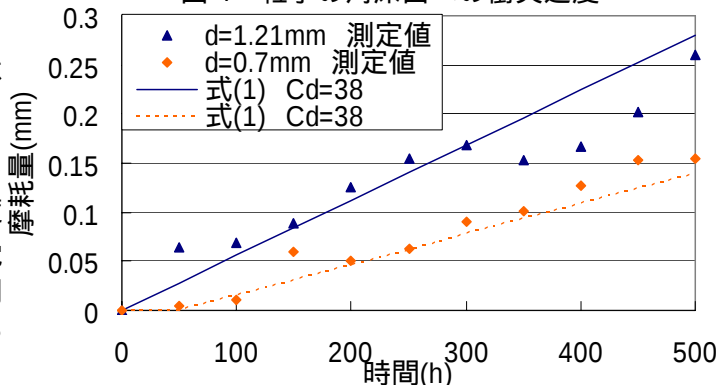


図 5 壁面磨耗量