

流砂によるコンクリート製水路の摩耗に与える 土砂粒径の影響に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF PARTICLE SIZE CONCERNING EROSION OF CONCRETE FLUME IN THE FLOW WITH SEDIMENT

新井宗之¹・加藤隼平²
Muneyuki ARAI and Junpei KATO

¹正会員 博士(工学) 名城大学准教授 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 愛知県名古屋市中白
区塩釜口1丁目501)

²正会員 修士(工学) 国土交通省中部地方整備局 高山国道事務所 (〒506-0055 岐阜県高山市上岡本町
7丁目425)

It is described the influence of the particle size on the erosion of the concrete flume under the flow with sediment load. The particle distribution in the depth and the ratio of the particle colliding on the bottom in the flow with deferent four particle size $d=0.71\text{mm}$, 1.03mm , 1.71mm , 3.00mm were measured in the experiments. It is shown the deferent ratio of the particle collisions on the flume bottom concerning with the small or large tractive force to the particles. If the tractive force becomes to be small, the ratio of the collision becomes to increase. A conclusion is that if the deferent particle sizes are in the condition of the suspended load, the concrete flume bottom is eroded as same type, that is, the same coefficient of the equation predicted erosion of the concrete bottom.

Key Words : concrete flume erosion, particle size, bed material load, experiment, physical mode

1. はじめに

コンクリート製水路は、水理構造物の中でも大きな役割を果たしている一つである。コンクリートは、施工性、経済性、耐久性に優れているため、水路ばかりでなく水理構造物に多用されている。しかし、コンクリートは、一般的に衝撃には弱く石礫の衝突による破損や流水中の土砂の流送にともなう損傷や摩耗が生じる。土砂礫の流送の多い山間部の代表的な水理構造物である砂防ダムでは、石礫の流送による損傷が生じ¹⁾必ずしも効果的な対策方法は見出されていない。また、コンクリート製水路ばかりでなく、橋梁の橋脚部の損傷等もありその研究もされている²⁾。このため耐摩耗性に優れた対策方法等の研究も多くなされてきている^{3), 4)}。耐摩耗性に優れた材料の主要な要件は、コンクリート圧縮強度を上げることであるため、高強度コンクリート、特に繊維材を混入したコンクリートの研究が多くなされてきている^{5), 6)}。また、石礫等による砂防ダム、堰等の水理構造物の破損や損傷を軽減するためにゴムで被覆する方法などが考案さ

れている。

コンクリート製水理構造物の摩耗予測については、特に排砂路における損傷が多いことから、実測例や実験的な研究が比較的多くなされてきている^{7), 8), 9), 10), 11)}。流水中に土砂を含有した流によるコンクリートの摩耗に関しては、流砂機構と関連しており固定床上の粒子挙動について必ずしも十分明らかにされていない。しかしながら、粒子径が比較的小さく浮遊砂領域における固体粒子によるコンクリート床の摩耗特性について著者等はすでに検討している¹²⁾。しかし、このような摩耗に関してどのような粒子径まで浮遊砂として扱えるのか不明である。このため本研究では浮遊砂から掃流砂遷移領域において浮遊砂としての摩耗予測がどのような条件であるかを明らかにすることを目的としている。

2. 固体粒子の壁面衝突による摩耗モデル

流水中におけるコンクリート壁面が摩耗する原因には幾つかのタイプが考えられ、1) 流砂などの固体粒子の壁

面衝突による壁面が剥離することにより摩耗が生じる場合、2) 粒子の接触によって壁面の一部が削られて摩耗する場合、3) 壁面の凹凸の一部が流体力に抵抗することができなくなり剥離することで摩耗する場合、4) 流体の持つ化学的な作用による侵食作用や腐食作用、溶解などによって摩耗が生じることなどが考えられる。したがって、壁面全体の損傷としての摩耗量は次式で表される。

$$D_T = D_i + D_r + D_f + D_c \quad (1)$$

ここに、 D_T : 摩耗量、 D_i : 粒子の衝突による摩耗量、 D_r : 粒子の接触による摩耗量、 D_f : 流体の作用による摩耗量、 D_c : 化学的な作用による侵食量、とすることができる。

しかし、流水中の粒子による摩耗は含有する粒子濃度や、粒子径によって壁面に衝突するプロセスが異なるものであると考えられ、浮遊砂から掃流砂の領域における粒子径を対象として、固体粒子が壁面に衝突し、その作用によってコンクリート壁面が摩耗、減少する現象について検討するものである。ここでは式(1)における D_i についてのみ着目し検討している。

粒子が壁面に衝突し、単一粒子が壁面に衝突する際の壁面に作用する衝突力に相当する壁面摩耗が生じると考えるものである。1個の球状粒子が壁面に衝突した場合、粒子の壁面に接触する面積を ΔS 、またその体積を ΔV とすると、粒子の衝突により発生する衝突力 F は壁面との接触面 ΔS に対してせん断力 τ として作用すると考えられ、壁面のせん断降伏応力 τ_c とせん断力 τ の等しい分量だけが剥離するものと考えられる。つまり次式の関係が成り立つものとする。

$$\Delta S \tau_c = F$$

ここに、 F : 一粒子の壁面に対する衝突力、 τ_c : 壁面材料のせん断降伏応力。

これより、単位面積あたりの平均摩耗量(深さ)を D とすると次式の関係を得る¹²⁾。

$$\frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{4}{9} \pi C_d^2 \left(\frac{1-e}{t_a} \right)^2 R^5 \left(\frac{\rho_s}{\tau_c} \right)^2 v^2 \cdot N \quad (2)$$

ここに、 v : 粒子の壁面への衝突速度、 e : 粒子の跳ね返り係数、 ρ_s : 粒子の密度、 t_a : 粒子の壁面への接触時間、 R : 粒子の半径、 C_d : 粒子の非球形性や周囲水及び流況の影響に関わる係数、 N : 単位時間、単位面積あたりの衝突粒子数。

上式を微分式にし、粒子径を用いて摩耗速度として書き直すと次式のようになる。

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\pi}{72} \left\{ C_d \frac{(1-e)d^{\frac{5}{2}} \rho_s}{t_a \cdot \tau_c} v \right\}^2 \cdot N \quad (3)$$

ここに、 d : 粒子の直径。

初期の摩耗量を0、すなわち $T=0$ における摩耗量を $D=0$ とすると摩耗量 D と経過時間 T との関係は次式のようになる。

$$D = \frac{\pi}{72} \left\{ C_d \frac{(1-e)d^{\frac{5}{2}} \rho_s}{t_a \cdot \tau_c} v \right\}^2 \cdot N \cdot T \quad (4)$$

ここに、 T : 経過時間(sec)。

3. 粒子径が流水中の運動に与える影響

コンクリート製水路における粒子衝突による剥離や摩耗に関するプロセスは一般的に複雑なものであり、必ずしも十分に研究されているとはいえない。ここでは前節のように、1個の固体粒子が壁面へ衝突することによる壁面の一部の剥離し摩耗する過程に関する摩耗モデルを立て、壁面の摩耗量を定量的に予測することを目的としている。この物理モデルを用いるためには、流水中における壁面に衝突する粒子数や衝突速度といった粒子の持つ諸特性を知る必要がある。しかし、実河川や水理構造物等に含まれる土砂粒子の壁面への衝突速度や衝突割合等を知することは困難なことであり、現状では求める方法や測定する方法が十分に明らかにされていない。そこで、流水中における、単位時間・単位面積あたりの水路壁面への衝突する粒子の水路断面を通過する粒子に対する割合、流速に対する粒子の衝突する速度の割合、流水中における壁面への接触時間、跳ね返り係数、濃度分布などを実験水路で求めている。また、濃度分布や水路床への粒子衝突割合などについて検討し、浮遊砂から掃流砂における水路床摩耗に与える要件について明らかにする。

(1) 実験方法の概要

実験に使用した水路は図-1に示すようである。水路長8m、幅15cm、水路壁の高さ30cmの透明ガラス側壁の循環式可変勾配水路である。水路床はモルタルを施した滑面状態で行った。使用した実験粒子は図-2に示すように、中央粒径が $d_{50}=0.7\text{mm}$ 、 1.03mm 、 1.71mm 、 3.00mm で、密度は $\rho_s=2.48\text{g/cm}^3$ の透明ガラスビーズである。実験では粒子を含んだ水を、水路内をほぼ一定の流量・濃度で循環させるために、インバータを用いて可変流量ポンプの出力を調整して行なった。また、流水中の粒子の挙動を撮影するために高速度CCDカメラ(フォトロン製)を用いて行なった。実験条件は表-1に示すようである。水路勾配は $\theta=0.8\sim 7.0\text{deg}$ 、流量は $2470\sim 3880\text{cm}^3/\text{s}$ 、水深は $0.91\sim 2.19\text{cm}$ 、粒子体積濃度は $0.07\sim 0.46\%$ である。実験ではインバータを用いた可変流量ポンプによってガラスビーズを含んだ水を循環させ、水路下流端より2mの

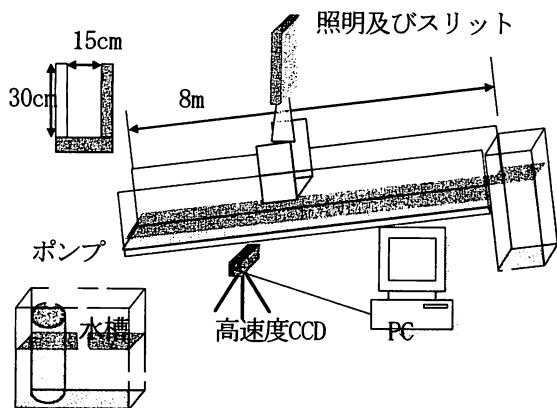


図-1 実験装置概念図

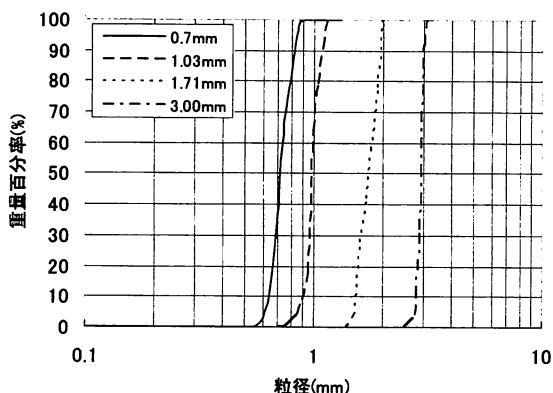


図-2 実験砂粒径加積曲線

表-1 実験条件

粒径	d50=0.71mm			
水路勾配 (Deg.)	0.8	1.8	2.8	7.0
流量 (cm ³ /s)	2854	2692	2470	3027
水深 (cm)	2.14	1.69	1.39	1.21
断面平均流速 (cm/s)	89.1	106.2	118.1	169.1
断面平均粒子濃度 (%)	0.07	0.14	0.11	0.46
粒径	d50=1.03mm			
水路勾配 (Deg.)	0.8	1.8	2.8	7.0
流量 (cm ³ /s)	3008	2791	2714	-
水深 (cm)	2.17	1.65	1.39	-
断面平均流速 (cm/s)	92.4	113.0	130.3	-
断面平均粒子濃度 (%)	0.14	0.09	0.09	-
粒径	d50=1.71mm			
水路勾配 (Deg.)	0.8	1.8	2.8	7.0
流量 (cm ³ /s)	2895	2779	2807	2186
水深 (cm)	2.19	1.64	1.40	0.91
断面平均流速 (cm/s)	88.0	112.7	133.9	159.7
断面平均粒子濃度 (%)	0.26	0.25	0.13	0.17
粒径	d50=3.00mm			
水路勾配 (Deg.)	1.0	3.0	5.0	7.0
流量 (cm ³ /s)	2930	2728	3882	3776
水深 (cm)	1.99	1.38	1.50	1.39
断面平均流速 (cm/s)	98.1	131.8	172.5	181.2
断面平均粒子濃度 (%)	0.20	0.15	1.13	0.47

位置で側面より高速度CCDカメラを用いて1/2000 frames/secで5~8秒間撮影し画像解析に供した。撮影に際しては側壁の影響をなるべく少なくするためにほぼ水路中央部に照明用スリットを設け、粒子挙動の撮影範囲を水路中央部の幅方向約5mm程度の範囲に設定した。流下方向の撮影範囲は34mmである。

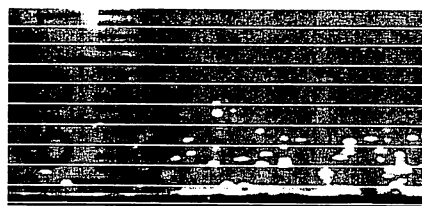


写真-1 撮影画像例

(2) 濃度分布特性と粒子河床衝突特性

水深方向の粒子濃度分布は撮影画像の粒子解析より求めた。写真-1は画像解析例の一例である。写真中の白横線は水深方向に分割した境界線で区間内の粒子存在割合から濃度を求めている。

粒子の流下方向への挙動を水路全体に追跡することは困難である。このため、粒子が浮遊状態で流下するのか掃流状で流下するのか濃度分布特性を調べ検討するものとした。粒子が浮遊砂として流下する場合は、粒子拡散方程式の拡散係数が通常測定されている値に近い値を示すが、大きく異なっている場合は浮遊砂の流下形態とは異なると考えられる。ここでは次式のRouseの濃度分布式を用いるものとする。

$$\frac{C}{C_a} = \left[\left(\frac{h-y}{y} \right) \left(\frac{a}{h-a} \right) \right]^{Z'} \quad (5)$$

ここに、 $C(y)$: 河床からの高さ y の点における濃度、 C_a : $y=a$ における濃度、 u_* : 摩擦速度($=g\tau\sin\theta$)、 $Z'=Z/\beta$ 、 $\beta=w_0/\beta\kappa u_*$ 、 h : 水深、 κ : カルマン係数($=0.4$)、 β : 実測値による補正係数。

図-3は粒子径 $d_{50}=0.71\text{mm}$ 、水路勾配 $\theta=0.8\text{deg.}$ の濃度分布である。横軸に C/C_a 、縦軸に水深 $y(\text{cm})$ で表している。この条件では上式の補正係数 β は $\beta=1.8$ であり、浮遊砂として示されている通常の値とほぼ同じである。これはこの水理条件における粒子径 $d_{50}=0.71\text{mm}$ の粒子は浮遊砂としての挙動を示しているものと考えられる。同様に図-4は水路勾配 $\theta=7.0\text{deg.}$ の場合であるが、 $\beta=1.8$ でRouseの式(5)に良く対応している。また、図-5は $d_{50}=1.03\text{mm}$ 、 $\theta=0.8\text{deg.}$ の場合であるがほぼ $\beta=1.8$ に対応している。図-6、図-7はそれぞれ $d_{50}=1.71\text{mm}$ 、 3.00mm の $\theta=0.8\text{deg.}$ 、 1.0deg. の場合を示している。この場合、補正係数 β は $\beta=1.8$ よりもかなり大きな値となることを示しており、通常の浮遊砂としての挙動でないことを表しているものと考えられる。

そこで粒子の河床面との衝突割合について検討する。流水中のある断面を通過する粒子は必ずしも一定ではない。図-8は断面を通過する粒子数の割合を時系列的に示した一例である。横軸に時間(sec)、縦軸に時間平均濃度 C_m と断面通過粒子数からの濃度 C の比 C/C_m を示している。比較的安定した濃度の流下状況でも1/50sec間隔程度で大きな変動をしていることがわかる。したがって、少なくとも数秒程度の時間間隔のサンプリングが必要で

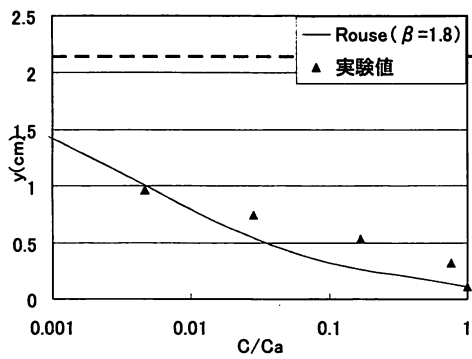


図-3 濃度分布 $d_{50}=0.71\text{mm}$, $\theta=0.8\text{deg}$

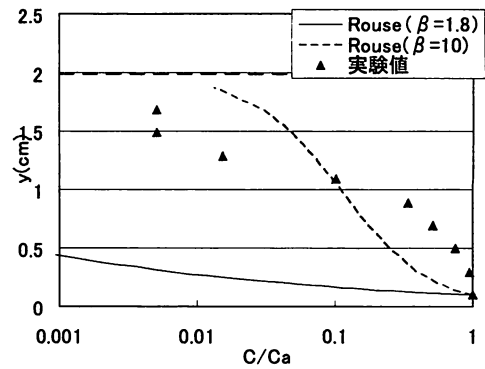


図-7 濃度分布 $d_{50}=3.00\text{mm}$, $\theta=1.0\text{deg}$

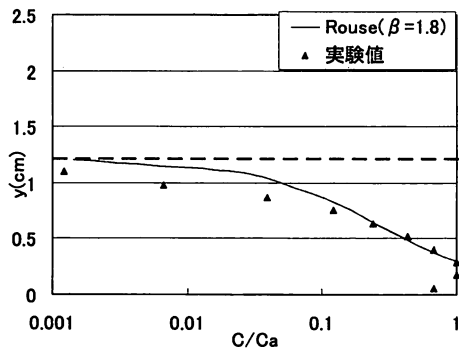


図-4 濃度分布 $d_{50}=0.71\text{mm}$, $\theta=7.0\text{deg}$

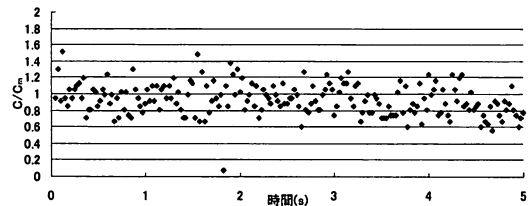


図-8 粒子濃度の時系列変化例

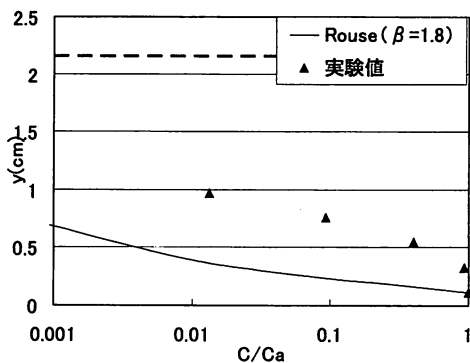


図-5 濃度分布 $d_{50}=1.03\text{mm}$, $\theta=0.8\text{deg}$

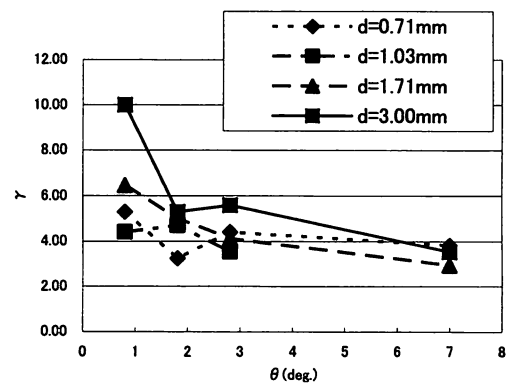


図-9 $\gamma-\theta$ の関係

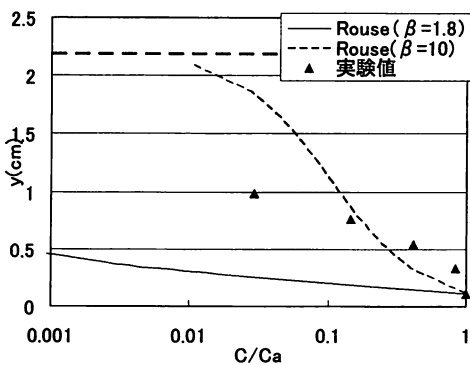


図-6 濃度分布 $d_{50}=1.71\text{mm}$, $\theta=0.8\text{deg}$

ある。断面通過粒子と水路床衝突粒子との割合 γ を示したのが図-9および図-10である。ここで示している衝突割合 γ はCCDカメラによる撮影区間34mmに衝突する粒子数を1mの区間に換算した粒子数Mと撮影画像中央を通過する粒子数Nとの比 $\gamma=M/N$ である。約5秒の間では任意の位置で同様な衝突現象が生じていると仮定している。図-9は横軸に水路勾配縦軸に衝突割合 γ を示している。これは水路勾配が大きくなると河床面への粒子衝突割合は同様なものとなることを示している。図-10は縦軸に衝突割合 γ 、横軸に粒子径 d_{50} を表している。この図では粒子径が大きく水路勾配が小さくなると衝突割合が非常に大きくなることを示している。これは粒子が掃流力の大きさとの関係によって、浮遊状態か掃流状態かによりその河床との衝突機構が異なるものと考えられる。図-11は粒子の水中沈降速度と摩擦速度との関係を示したものである。横軸に摩擦速度 u_* 、縦軸に粒子の沈降速度 w_0 を示している。前述の粒子の衝突割合の大きいケースは、粒子径が大きく勾配が小さい場合で、粒子の沈降速度が

大きく摩擦速度が小さい場合に相当している。この場合には、摩擦速度が粒子の沈降速度よりも小さく粒子を十分に浮遊させることができない条件である。このため掃流状に流下するため衝突割合が大きくなっているものと考えられる。しかし、同じ粒径であっても水路勾配が大きく摩擦速度が粒子の沈降速度よりも大きいような場合には浮遊砂状として挙動するものと考えられる。

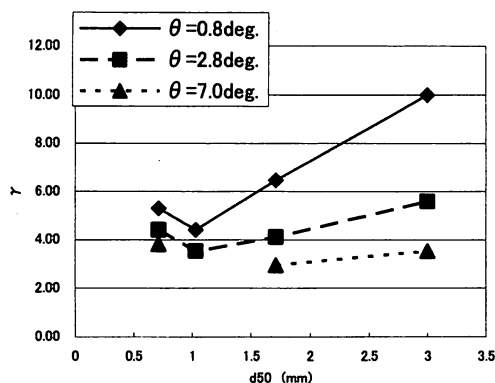


図-10 $r-d$ の関係

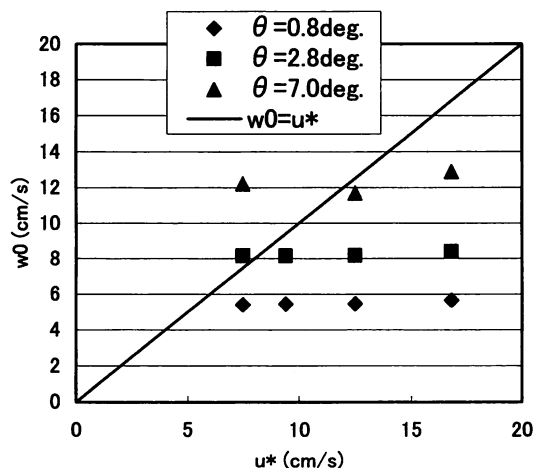


図-11 w_0-u_* の関係

4. 流砂によるコンクリート製水路の摩耗予測に

関する実験

(1) 実験の概要

実験で使用した土砂粒子は、中央粒径 $d_{50}=0.71\text{mm}$ 、 1.21mm の2種類の粒子である。密度はともに $\rho_s=2.48\text{g/cm}^3$ の珪砂である。実験で使用した水路の概念

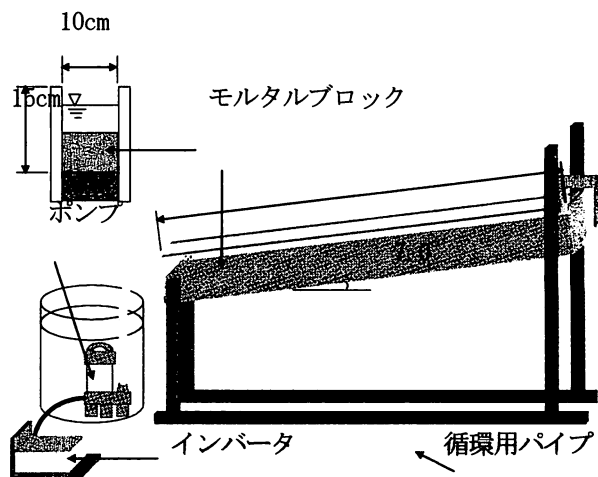


図-12 実験水路概念図

表-2 実験条件

No	1	2
粒径(mm)	0.7	1.21
接触時間(sec)	0.0002	0.0002
跳ね返り係数	0.85	0.85
減衰係数Cd	38	38
粒子の体積濃度(%)	2.85	2.42
圧縮強度(MPa)	41.7	52.3

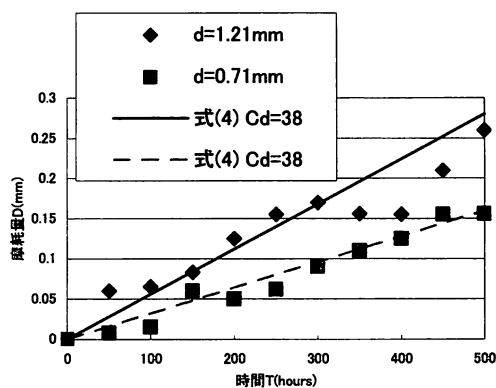


図-13 摩耗量の時間変化

図を図-12に示す。水路長3m、幅10cm、高さ15cm、の循環式水路である。水路勾配は 7.0° である。実験条件等は表-2に示す。供試体は圧縮強度41.7MPa、52.3MPaのものをを用いそれぞれ水路床に敷き、珪砂を含有した水を循環して実験に供した。モルタルブロックの摩耗量の測定は、実験開始前の供試体表面の高さと基準面が変動しないように供試体内に設置したステンレス片面上の基準点の高さの差を、光波測定器(分解能 1μ)を用いて測定した。測定は、実験開始から50時間ごとに行った、粒子が水路床面に衝突する時の跳ね返り係数、接触時間は前節の解析結果を用いている。

(2) 実験結果及び考察

図-13に実験結果と式(4)との関係を示す。式中のせん

断降伏応力は圧縮強度の1/2を用いている。粒径 $d_{50}=1.21\text{mm}$ の粒子は、緩勾配の水路では掃流砂の範疇となるが、この実験のような勾配では浮遊状態となる。実験結果は供試体の圧縮強度等が異なるため摩耗量に違いがあるが、摩耗モデル式の補正係数は C_d が38程度でほぼよく一致している。これは前節の掃流力が大きな状態での粒子衝突割合がほぼ同じような値となることに対応している。したがって、粒子の沈降速度より大きな摩擦速度となるような掃流力となる条件では、粒子は浮遊砂状態となり同じ機構でコンクリート水路床の摩耗を生じさせるものと考えられる。

5. 結論

流砂によるコンクリート水路床の摩耗における粒子径の影響について検討した。摩耗に影響を与える流砂形態のうち浮遊砂と掃流砂が考えられるが、河床近傍における粒子挙動を実験的に詳細に検討した。その結果、粒子径が大きく掃流力の小さい状態、すなわち粒子の水中沈降速度が摩擦速度より小さな状態では掃流砂として粒子は挙動するため浮遊砂としての粒子よりも河床への衝突割合が著しく増加することを明らかにした。一方、浮遊砂状態での粒子の河床への衝突割合はほぼ同じような状態になることを明らかにし、コンクリート製水路床の摩耗実験においても粒子径は異っても同様な補正係数を用いることができることを明らかにした。

参考文献

- 1) 泉岩男, 竹村具美, 杉山勉, 水山高久: 流送土砂によるコンクリート摩耗の例, 新砂防, No33(4), pp. 35-36, 1981. 5
- 2) 渡辺明, 高山俊一, 松田浩: PC桁コンクリートの摩耗性状に関する研究, 九州工業大学研究報告, No. 42, pp. 21-28, 1981. 3.
- 3) 戸川一夫, 中本順次: モルタル, コンクリートの表面破壊特性と衝撃摩耗特性に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No. 282, pp. 115-125, 1979. 2.
- 4) 杉田英明, 永松武教, 藤本浩: 耐摩耗性コンクリートの評価とその施工, 電力土木, No. 223, pp. 63-72, 1989. 11.
- 5) 犬塚雅生, 堀口隆, 押切均, 菅野善博: 鋼繊維補強コンクリートの摩耗性状(2), 土木学会北海道支部論文報告集, No. 36, 1980. 1.
- 6) 豊福俊英, 片岡譲治: 炭素繊維補強コンクリートの摩耗特性, 香川大学農学部学術報告, No. 41, pp. 169-178, 1989. 10.
- 7) 堀口敬, 長野雅夫, 渡辺吉一: コンクリートの摩耗機構に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, No. 41, 1985. 1.
- 8) 安藤兼治, 伊東芳男, 深川積: 排砂路耐摩耗材の実験的研究, 電力土木, No. 250, pp. 47-58, 1994
- 9) 渡辺高士, 野津誠, 綱木雅博: 多量の流送砂礫によるコンクリート製排砂水路底面の侵食, 蛇行に関する実験的研究, 建設省中国地方建設局管内技術研究論文, vol. 51, pp. 225-228, 2000.
- 10) 大野善雄, 林栄港: コンクリート河川構造物の摩耗予測の一手法, 電力土木, No. 211, pp. 112-117, 1987. 11.
- 11) Jenks D, Smith L, Chambers G : Repairs to abrasion damage on the Ruataniwha spillway, Proc. IPENZ Annu. Conf, vol. 1, pp. 151-162, 1989.
- 12) 新井宗之, 澤木洋一: 流砂によるコンクリート製水路の摩耗予測に関する研究, 水工学論文集, No. 49, pp. 931-936, 2005. 3.

(2008. 4. 3 受付)