

透過性防護工の橋脚周辺の局所洗掘に 及ぼす影響について

EFFECT OF POROUS PROTECTION WORKS ON LOCAL SCOUR AROUND A BRIDGE PIER

村上正吾¹・辻本哲郎²・金崎伸夫³・萱島正友⁴

Shogo MURAKAMI, Tetsuro TSUJIMOTO, Nobuo KANASAKI, Masatomo KAYASHIMA

¹正会員 工博 国立環境研究所室長 水圏環境部 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-2)

²正会員 工博 名古屋大学大学院教授 地圏環境工学専攻 (〒464-0814 愛知県名古屋市中種区不老町)

³佐藤工業東京支店 (〒163-1033 東京都新宿区西新宿3-7-1)

⁴JR西日本鉄道大阪支社 (〒545-0053 大阪府大阪市阿倍野区松崎町1-12-2)

In order to prevent the increase of disasters of hydraulic structures caused by local scour, it is important to estimate the performances of protection works around hydraulic structures. Based upon the experiments and field data and field data, the design criteria for protection works mostly have been proposed. Recently several analytical researches have been carried out to clarify the mechanism of reduction of local scour depth due to protection works. In this study, after we conducted the flume experiment on the effect of porous protection works, we proposed the physical model of performances of porous protection works. The proposed model almost explained the reduction rate of the local scour depth when the porous protection works are constructed.

Key Words : local scour around bridge pier, porous protection works,

1. まえがき

近年、河床低下に加えての局所洗掘によって河川構造物の機能・安定性が損なわれる例が少なくない。最近では洗掘を極力抑えたり、少々洗掘されても機能や安定性が損なわれることの無いよう設計されることが多いが、建造年が古くしかも更新の予定がかなり先になるものについては、適切な暫定的洗掘軽減工を考えなければならない。ところが、過大な防護工が流水疎通を妨げたり、局所流をかえって強いものにする例も散見され、河積を減少させない防護工が望まれている。

橋脚周辺の局所洗掘についてはこれまで多くの研究が行われているが¹⁾、解析的アプローチの先駆けとなったものとしてShenらのグループによる馬蹄形渦への注目とその強さの循環保存モデルによる見積りについての研究があげられる²⁾。このように機構の枠組みが見えてから、河床波の進行に伴う洗掘深の変動、armor coatの影響、歪み模型における相似率等の解析的研究が進んだ³⁾。

洗掘過程の基本機構が近似的にでも解析的にモデル化されていると、洗掘現象に関わる種々の要因の効果がある程度予測でき、こうした意味で現象のモデル化は重要である。本論文ではこの立場で、比較的洗掘機構を簡単に表現した洗掘モデルに基づいて、洗掘防護工の効果の評価を行なう基礎を与えるようとするものである。

本研究では洗掘防護工が河道の他の領域に影響を及ぼさない(疎通を阻害させない)ことを優先させ、図-1に示すような洗掘領域を適切な厚さにわたって捨石で覆い(河積を減少させないように元河床以下)、橋脚前面において橋脚に沿う下降流が直接、砂面に当たらないタイプの防護工を対象とする。こうした捨石形式の防護工については多くの研究が行われており^{4) 5) 6) 7)}、防護工を通しての流れの強度変化についての水理学的検討がモデル化の一つの鍵となっている。本研究でも室内実験により防護工効果に関する素事象を抽出、それに関わる作用外力の特性を考慮することで解析モデルの構築を試みる。

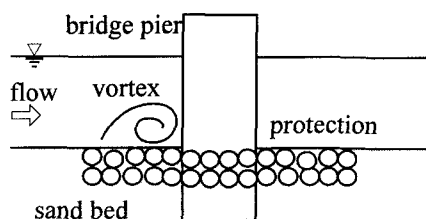


図-1 橋脚周辺の透過性防護工の概念図

表-1 水理条件表

Run No.	h_0 (cm)	U_0 (cm/s)	Fr_0	τ_{*0}	d_p (cm)	n
A - 1	12.30	28.2	0.26	0.045		None
2	12.90	25.1	0.22	0.047	2.97	1
3	14.00	25.2	0.22	0.051	2.97	2
4	13.50	24.9	0.22	0.050	1.70	1
5	13.00	25.7	0.23	0.048	1.70	2
B - 1	12.67	46.7	0.42	0.047		None
2	12.60	45.9	0.41	0.046	2.97	1
3	12.67	45.6	0.41	0.047	2.97	2
4	12.60	45.9	0.41	0.046	2.97	3
5	12.57	46.3	0.42	0.046	1.30	1
6	12.57	46.3	0.42	0.046	1.30	2
7	12.57	46.3	0.42	0.046	1.30	3
C - 1	6.00	29.2	0.38	0.022		None
2	6.00	29.2	0.38	0.022	1.70	1
3	6.00	29.2	0.38	0.022	1.70	2
4	6.00	29.2	0.38	0.022	1.70	3

2. 洗掘防護工に関する実験的検討

(1) 実験方法

円柱橋脚周辺に防護工を施した場合の効果を見るための実験を行った。実験は長さ14m、水路幅1.5mの水路中央部に粒径 $d=0.11\text{cm}$ の砂粒で区間1.5mの移動床部を設け、その中央部に直径 $D=10\text{cm}$ の円柱を設置した（実験ケースA）。円柱周辺と防護工内の流れと砂粒運動の状況の側方よりの観察も併せて行なう実験ケースB、Cでは、水路幅33cmの水路中央部に実験ケースAと同様の移動床部を設け、直径 $D=7\text{cm}$ 、3cmの円柱を設置し、通水時、円柱上流より染料を注入し流れの可視化を行った。

防護工を構成する捨石、ブロックのモデルとしては粒径が $d_p=2.79, 1.70, 1.30\text{cm}$ のガラスビーズを用いた。層数 n は1, 2, 3層積みと変化させた。ケースCでは正逆プロペラ流速計を用いた円柱前面での流速分布の測定を行なうため、ガラスビーズ同士を接着し洗掘孔へのガラスビーズの落下を防いだ。

通水条件、ガラスビーズの層数の条件は実験条件表-1に示されており、いわゆる静的洗掘に設定した。ここで、 h_0 、 U_0 は円柱上流の非擾乱場での流れの平均水深、平均流速、 $Fr_0(=U_0/\sqrt{gh_0})$ はフルード数（ g ：重力加速度）、 τ_{*0} は無次元掃流力である。

時間150分の通水後、水路内の水を排除し、洗掘孔等深線を記録し、中央縦断面に沿って路床高をポイントゲージで側定した。予備実験よりこの程度の通水時間で最終洗掘状態に十分達していると判断された。

(2) 実験結果

幅の狭い実験水路ケースB、Cでは流れの可視化より円柱前面に沿ってビーズ層内に流入する下降流が認められた。これはケースCにおける円柱前面での流速分布の流下方向変化（円柱中心線に沿う）の計測結果において、従来、指摘されている円柱前面での回転渦の領域の水平スケール $L_s=0.65D$ （ここでは、 $L_s=4.5\text{cm}$ 程度）内で明確な逆流域が存在しないことに対応するものと考えられる⁸⁾。ケースB、Cでの砂粒の観察によると、円柱前面に沿う下降流はガラスビーズ層に流入後、砂面に衝突し透水層内に回転流を生じさせる。砂粒は上流に向かってpick-upされ直ちに円柱の側方へ流送される。上流に向かう砂粒が防護工捨石層内に巻き上げられることは少な

く、円柱側方から下流で透水層内を上昇し、表面水流内に取り込まれ、洗掘領域外へ流送される。砂粒のpick-upは概ね円柱前面で卓越しており、この部分より防護工下方への空洞化が進行する。図-2は実験で得られた最終状態での洗掘孔形状を等深線表示したもので、前述した洗掘進行の結果予想される洗掘孔形状となっている。図中、洗掘深 z_s は砂面から測られており、防護工の有る場合は防護工下部をゼロとしている。図-3は流れ方向（ x ：流下方向軸で上流側が正）に、円柱中心線に沿う洗掘孔の側面形状を橋脚径 D で無次元したもので、特に円柱前面で安息角によるすり鉢形状が顕著であることがわかる。図-2、3よりガラスビーズ層数の増加に伴う洗掘深と洗掘領域の増減が認められ、円柱径の2倍程度の設置領域をとれば十分であることがわかる。

また、洗掘の進行に伴いガラスビーズが洗掘孔に落下、変形すると、配置状況によってはガラスビーズの背後に剥離域が形成されたことによって、路床砂粒の抜け出す現象も認められた。さらに、洗掘領域の上流においては、透水層上の表面流によって誘起されるビーズ層内浸透流がビーズ層厚が薄い場合には十分減衰されず、直接ビーズ層下部の砂粒に作用し、砂粒が移動する場合があることも観察された。

図-4は防護工の効果を見るために、施した場合の洗掘深 z_s と施さない場合の洗掘深 z_{s0} との比 z_s/z_{s0} とビーズの層数 n との関係を示したものであり、ビーズ層数と z_s/z_{s0} の間には比較的単調な関係が認められた（図中の実線は後述3.のモデルの計算結果）。ケースA、B、C間の通減率に明確な特徴は見出しにくく、ビーズ径の大小による透水層の間隙スケールと一層分の通過距離スケールとの相対的な大小関係が一つの要因ではないかと推測される。

本節での実験結果より、防護工の効果を検討する上で考慮すべき事象としては、(i) 防護工を通過した円柱前面回転流（渦）が減勢されず路床に作用する場合、(ii) 表面流によって誘起される透水性防護工内の浸透流の速

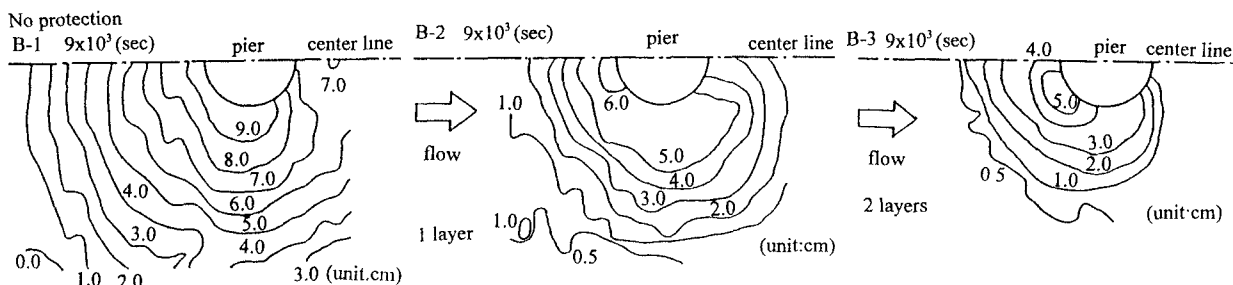


図-2 洗掘孔の等深線表示

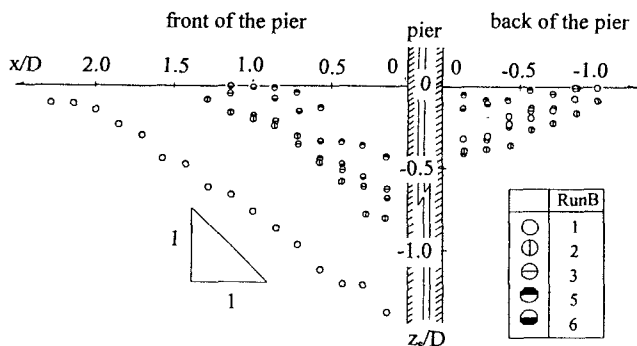


図-3 洗掘孔の側面形状

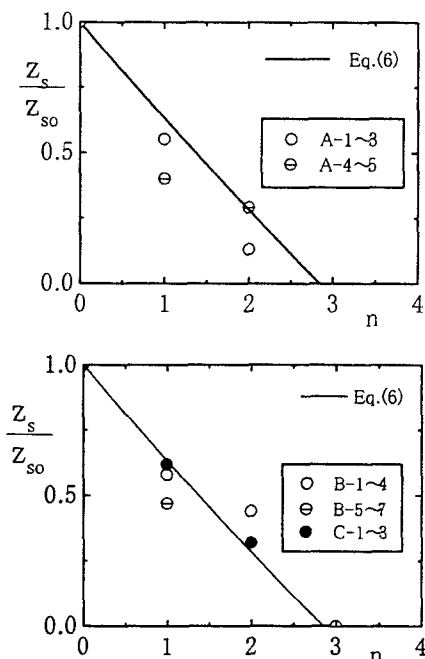


図-4 防護工による洗掘深の通減効果

度が砂粒の移動限界流速を上回る場合、(iii) 洗掘孔の拡大に伴って防護工を構成する捨石の配置が変化、変形した防護工の背後に形成される剥離域内からの砂粒が吸い出される場合が挙げられる。本研究では、以下の節でこれら3つの事象についての検討を試みる。

3. 透過性防護工下での最終洗掘深評価

防護工が無い場合における円柱前面での最終洗掘深 z_{s0} を辻本⁹⁾は次式で与えている。

$$z_{s0}/D = (\sqrt{\gamma_0 \cdot \eta} - 1)/k_z \quad (1)$$

ここに、 D は円柱橋脚の直径、 γ_0 は非攪乱流場の底面せん断応力 τ_0 と回転渦の初期底面せん断応力 τ_v との比($\gamma_0 = \tau_v/\tau_0$)、 η は非攪乱流場の掃流力 τ_0 と限界掃流力 τ_c との比($\eta = \tau_c/\tau_0$)、 k_z は渦径の拡大と洗掘深の増加との線形関係を仮定したときの比例定数であり、 $k_z \approx 1/7$ 程度と推定されている。

図-1のタイプの防護工の洗掘深の通減は捨石により構成される透水層によって、橋脚に沿う下降流の流速(鉛直下向き)が透過性の防護工を通過しても十分に減勢されずに洗掘が進行するもので、基本的な機構は式(1)で代表される防護工のない場合と同じと考えられる。すなわち、この捨石層下の路床砂礫に作用する下降流による掃流力と非攪乱流場の掃流力との比 γ_0 の評価を行えば、式(1)の式形が援用できることになる。

n 層より成る防護工のある一層を通過する前後で下降流の速度が v_i から v_{i+1} に変化するとき、その前後で位置水頭と圧力水頭の和に差が無いと仮定すると次のベルヌーイ式が得られる。

$$v_i^2/(2g) = v_{i+1}^2/(2g) + f \cdot d_p/R \cdot v_i^2/(2g) \quad (2)$$

ここに、 g ：重力加速度、 d_p ：防護工を構成する捨石の直径、 R ：径深、 f ：摩擦損失係数である。径深 R を防護工の間隙の長さスケールである $\sqrt{K}$ (K ：Wardの非線形Darcy則¹⁰⁾における長さの二乗の次元を持つ透水係数)を用いると、防護工一層を通過することによる速度減少率は次のようになる。

$$v_{i+1}/v_i = \sqrt{1 - f \cdot d_p/\sqrt{K}} \quad (3)$$

浸透層が n 層で形成されている時、橋脚に沿う下降流が透過性防護工を通過する前後での流速 v と v' の比は次式で与えられる。

$$\alpha = v'/v = \left(1 - f \cdot d_p/\sqrt{K}\right)^{n/2} \quad (4)$$

この時、下降流による掃流力と非攪乱流場の掃流力との

比 γ'_0 は $\gamma'_0 = (\alpha \phi_v / \phi_s)^2 \cdot \gamma_0$ となる (ϕ_s, ϕ_v は防護工ある場合と無い場合の渦の摩擦抵抗係数)。防護工のない場合でも渦の摩擦抵抗係数については十分な検討がされておらず¹⁾、ここで $\phi_v = \phi_s$ と仮定すると、床面に作用する掃流力と非攪乱流場のそれに対する比は次のようになる。

$$\gamma'_0 = (1 - f \cdot d_p / \sqrt{K})^n \cdot \gamma_0 \quad (5)$$

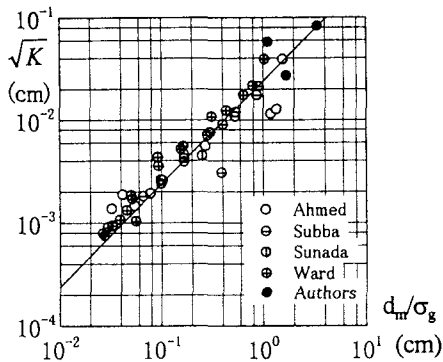
式 (5) を式 (1) に代入すると護床工が存在する場合の洗掘深 z_s が評価され、防護工の効果は存在する場合と無い場合の洗掘深の比 z_s/z_0 として次のように書ける。

$$\frac{z_s}{z_0} = \frac{\sqrt{\gamma_0 \cdot \eta}}{\sqrt{\gamma_0 \cdot \eta} - 1} \left\{ \left(1 - f \frac{d_p}{\sqrt{K}} \right)^{n/2} - \frac{1}{\sqrt{\gamma_0 \cdot \eta}} \right\} \quad (6)$$

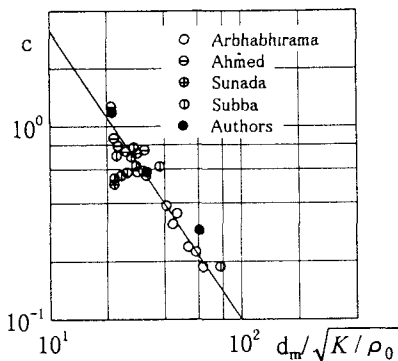
著者らは今回使用したガラスビーズの透水特性¹¹⁾とArbhabhiramraら¹²⁾が収集した実験値を用いて、平均粒径 d_m 、幾何標準偏差 σ_g の混合砂礫より構成される透水層の間隙スケールを図-5(a)のように整理した。一方、防護工内の流れを乱流状態と仮定すると、摩擦損失係数 f は非線形Darcy則に基づく次式でかける。

$$f = 2c \rho_0^2 \quad (7)$$

ここで、 c ：非線形抵抗係数、 ρ_0 ：間隙率である。 c については、Arbhabhiramraら¹²⁾は図-5(b)のように整理している。



(a) $\sqrt{K}$ と砂礫径との関係



(b) c と砂礫径との関係

図-5 透水層の抵抗特性と砂礫径との関係

図-3中の実線は間隙スケールを $\sqrt{K} = 0.02d_p$ 、摩擦損失係数を $f=0.005$ として計算した洗掘深の減少率 z_s/z_0 と

防護工の層数 n との関係を示したもので、実験値の遞減傾向を十分に表現している。ただし、 f については式(7)で推定される値ではやや大き目であったため、 $f=0.005$ とした。捨石形式の透水層の c 、 $\sqrt{K}$ が適切に評価されると適切な防護工厚の算定が可能であると思われる。

4. 防護工下の砂礫の移動限界流速

捨石層厚が十分でない場合には、橋脚前面の表面流によって誘起される浸透流が捨石層下部の砂礫を移動させることが実験的に認められ、防護工の安定、効果を考える上で、砂礫の移動限界流速の評価がまず必要とされる。摩擦速度 u_* が明確である場合にはShields diagram、岩垣公式を用いれば容易に限界掃流力、限界流速が算定できるが、摩擦速度が明確でない場合には砂粒に働く力のつり合い条件より移動限界流速 U_c を求めなければならない。

砂礫の底面からの移動を滑動形式と仮定すると、移動限界流速 U_c は作用抗力 $D (= \varepsilon_0 C_D \rho U_c^2 A_2 d^2 / 2)$ と摩擦力 $F (= \mu_r \{ \rho (\sigma / \rho - 1) g A_3 d^3 \} - k_L D)$ との釣り合い式 ($D=F$) より次式で与えられる (ここで、抗力係数の表示は $C_D = C_{D0} + 24/(U_c d/\nu)$ とした¹⁾)。

$$U_c / \sqrt{(\sigma / \rho - 1) g d} = (-A_0 + \sqrt{A_0^2 + 4B_0}) / 2 \quad (8)$$

ここで、

$$A_0 = 12\nu / (C_{D0} / d) \quad (9)$$

$$B_0 = \mu_f / (1 + k_L \mu_f) \cdot 2A_3 / (\varepsilon_0 C_{D0} A_2) \quad (10)$$

であり、 ν ：水の動粘性係数、 C_{D0} ：Reynolds数が十分大きい時の抗力係数、 μ_r ：静止摩擦係数、 k_L ：揚力・抗力比、 ε_0 ：遮蔽係数、 A_3 、 A_2 ：2、3次元の形状係数、 σ ：砂礫の密度、 ρ ：水の密度である。

図-6中の実線は砂礫径 d (cm)と移動限界流速 U_c (cm/s)の関係を示したものである。計算に当たっては、 $k_L=0.85$ 、 $\mu_r=1.0$ 、 $C_{D0}=2.0$ 、 $A_2=\pi/4$ 、 $A_3=\pi/6$ 、 $\varepsilon_0=0.4$ 、 $\nu=0.01\text{cm}^2/\text{s}$ 、 $\sigma/\rho=2.65$ とした¹⁾。図中には石野ら⁹⁾が整理した2次元浸透流下における砂礫の移動限界の従来の実験値と、これに基づいて提案された経験式 (単位はCGS系)

$$U_c = 21.5 \sqrt{d} \quad (11)$$

が併示されており、ほぼ同様の傾向を示すことがわかる。

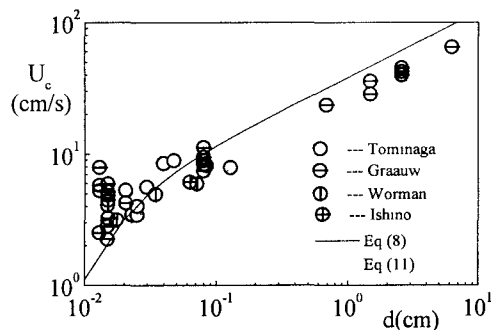


図-6 防護工下の砂礫の移動限界流速

防護工下部における浸透流は表面流の特性と非線形 Darcy 則によって防護工下部の砂層に作用する浸透流速が評価でき、移動限界浸透流速以下になるまでの捨石工の層数を求めることで、こうしたタイプの外力に対する砂礫の安定、捨石工の効果の評価が可能となる。

5. 圧力変動による砂粒の抜け出し機構

(1) 鉛直方向圧力変動による砂粒の抜け出し率

防護工構造が変形すると捨石の配置によっては、その背後に発生する剥離渦に伴う局所的な圧力の低下、剥離流が再付着した底面近傍付近の鉛直方向の圧力変動が主な外力となり、透水層下部の砂粒の抜け出し現象が起こり、時にはこれが洗掘を進行させ、防護工の安定性にとって問題となる。本節では鉛直方向圧力変動 p が砂粒の抜け出しに関わる主要な外力と仮定し、抜け出し率の評価法の検討を進める。

図-7のように間隙にある砂礫に鉛直方向の揚圧力 p が作用している時、摩擦力を無視すると、砂粒に作用する力は全揚力 P 、水中重量 W であり、その運動方程式は次のように書ける。

$$M \cdot dv_g / dy = P - W \quad (12)$$

$$M = \rho(\sigma / \rho + C_M) A_3 d^3 \quad (13)$$

$$P = \varepsilon_0 p A_2 d^2 \quad (14)$$

$$W = \rho(\sigma / \rho - 1) g A_3 d^3 \quad (15)$$

ここで、 v_g ：砂粒子の鉛直方向抜け出し速度、 C_M ：仮想質量係数である。式(12)の左辺を零とすると、無次元移動限界圧力が次のように与えられる。

$$\hat{p}_c = p_c / \{\rho(\sigma / \rho - 1) g d\} = 1 / \varepsilon_0 \cdot A_3 / A_2 \quad (16)$$

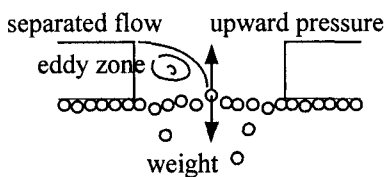


図-7 圧力変動による砂粒の抜け出し

運動方程式に対応する砂粒の単位時間当りの抜け出し率 p_{s0} は無次元表示して次のようになる¹³⁾。

$$p_{s0*} = p_{s0} \sqrt{d / \{(\sigma / \rho - 1) g\}} = F_0 (\hat{p} - \hat{p}_c) \quad (17)$$

ここで、

$$F_0 = \varepsilon_0 A_2 / (2 A_3) \cdot \hat{t}_0 / \{K_0(\sigma / \rho + C_M)\} \quad (18)$$

$$\hat{p} = p / \{\rho(\sigma / \rho - 1) g d\} \quad (19)$$

$$\hat{t}_0 = t_0 \sqrt{(\sigma / \rho - 1) g / d} \quad (20)$$

あり、 K_0 ；抜け出し距離に関する実験定数、 t_0 ：圧力変動の時間スケールである。

砂礫が動き出す状況では、砂礫の移動に有効な圧力は大きく変動していると考えられ、式(17)にその変動の効果を取り入れると、 p_{s*} は次のように書ける。

$$p_{s*} = \int_{\hat{p}_c}^{\infty} F_0 (\hat{p} - \hat{p}_c) \phi(\hat{p}) d\hat{p} \quad (21)$$

ここに、 $\phi(p)$ は鉛直圧力変動の分布関数である。

$\phi(p)$ として、次式で表される平均値が零、標準偏差（変動強度） σ_p の正規分布、

$$\phi(p) = 1 / (\sigma_p \sqrt{2\pi}) \exp\{-p^2 / (2\sigma_p^2)\} \quad (22)$$

を仮定すると、無次元 pick-up rate p_{s*} と無次元圧力変動強度 $\alpha_p (= \sigma_p / \{\rho(\sigma / \rho - 1) g d\})$ との関係は図-8のようになる。計算に当っては移動限界流速の計算に用いた値を用い、

実験定数として、 $\hat{t}_0 = 0.015$ 、 $K_0 = 1.0$ とした¹³⁾。

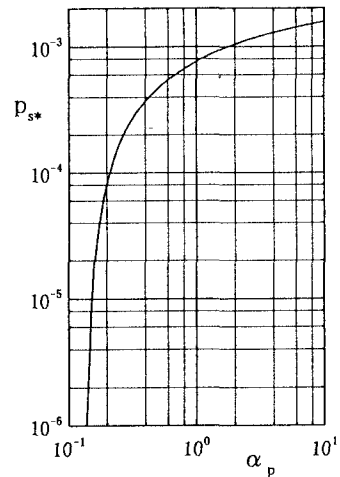


図-8 圧力変動による砂粒の抜け出し率

(2) 圧力変動による砂粒の移動実験

圧力変動による砂粒の抜け出し率に関する実験を行うことは容易ではないため、砂粒の路床面からの離脱外力である鉛直方向の圧力変動を跳水による水面変動で与えることで、水叩きを構成する平板ブロックの間隙からの砂粒の抜け出し実験を行った（図-9）。

実験は、跳水を生起させるためのダム模型を設置した長さ9m、水路幅0.33mの水路で行なった。ダム模型直下流部の移動床部（粒径 $d=0.077\text{cm}$ の一様砂で構成）を一边が3.6cm、厚さ0.5cmの正方形アクリルプレートで四方とも間隔 s だけ離して覆い、水叩き部（区間長30cm）とし、この上で跳水を起こさせ、通水前には平板間の隙間に充填されていた砂粒の抜け出しをビデオで撮影した。平板間の間隔は $s=0.5, 1.0, 2.0\text{cm}$ と変化させた。砂粒に作用する圧力変動を直接計測することが困難なため、ここでは跳水の水面変動の強度（標準偏差）とほぼ等価と

みなし、波高計によって水面の変動強度（標準偏差） σ_H を計測した。通水流量は $Q=8.32, 8.49, 8.49$ litre/sで、射流水深は $h_1=1.33, 1.30, 1.29$ cm、対応するケースの水面変動強度は $\sigma_H=0.11, 0.45, 0.81$ cmであった。無次元圧力変動強度との関係は $\alpha_p=\sigma_H/\{(\sigma/\rho-1)d\}$ で与えた。

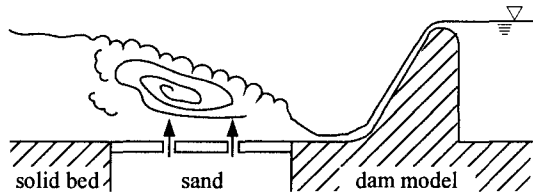


図-9 圧力変動による砂粒の抜け出し実験概要

図-10は平板間の砂粒が抜け出すことによる砂面の低下量 Δz （平板上面から測った）の時間変化である。抜け出し初期においては砂面低下量は時間に比例し、その後、低下はほぼ停止に至ることを示している。この砂面低下がほぼ停止するまでの低下量 Δz の時間変化は圧力変動による抜け出しと考えられ、 p_s を用いると次のように表すことができる

$$\Delta z/d = A_1 p_s t_* \quad (23)$$

ここで、 A_1 ：砂の1次元の形状係数（球状粒子を仮定すると1）、 $t_* = t\{(\sigma/\rho-1)g/d\}^{0.5}$ である。

図中に示す式(22)と(23)を用いた計算結果は実験結果と比較的良好一致をみせており、圧力変動が外力として考えられる砂粒の離脱量推定法の一つの雛形と考えている。今後は防護工の変形に伴って起こる剥離渦等の強度評価が可能になると、洗掘防護工の変形が洗掘現象に及ぼす影響についての検討も可能になると思われる。

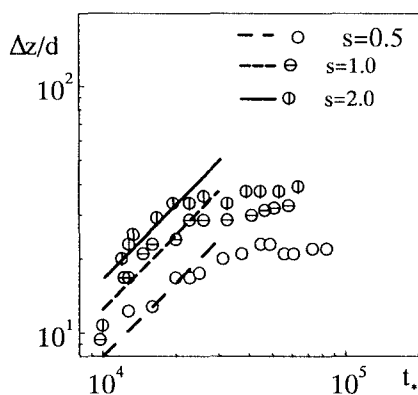


図-10 砂粒の抜け出しによる砂面低下量

6. おわりに

本研究では、室内実験によって、透過性の防護工が設置された橋脚周辺の局所洗掘現象に関係すると考えられた3つの素事象を抽出し、それぞれについて簡単な力学

モデルを提案することで、その定量的な評価を試みた。橋脚前面に沿う下降流については、防護工がない場合の洗掘機構との類似性から洗掘深の逓減率までの議論が可能となった。実際問題として重要な事象である防護工の変形に伴う砂粒の抜け出しについては現象のごく一部の定式化にとどまった。しかしながら、未解明な点が多い捨石形式の防護工であっても、室内実験と現場観測によって力学的な素事象を見出し、定量的な評価法を確立していくことが必要であると考えている。

参考文献

- 1) 中川博次・辻本哲郎：新体系土木工学23，移動床流れの水利，技報堂出版，1986.
- 2) Shen, H. W., Schneiderand, V. R. and Karaki, S. : Local scour around bridge piers, *Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, Vol.95, HY6, pp.1919-1940, 1969.
- 3) 北川 信・伊東進一郎・土谷政治・今井貫爾：強潮流下における大規模橋梁基礎の洗掘防止工に関する研究，土木学会論文集，No.4.8/II-17, pp.61-70, 1991.
- 4) 大谷英夫・石野和男・勝井秀博：橋脚の捨石洗掘防護工の効果，大成建設技術研究所年報，第25号，pp.355-364, 1992.
- 5) 石野和男・大谷英夫・勝井秀博：強潮流下における橋梁周辺の捨石洗掘防止工の設計法に関する研究，土木学会論文集，No.521/II-32, pp.123-133, 1995.
- 6) 富永晃宏・藤原和弘・水野伸也・末広健夫：透過および不透過型の橋脚洗掘防護工の効果と周辺流動への影響，水工学論文集第39巻，pp.677-682, 1995.
- 7) 鈴木幸一・山本裕規・徳安芳典：逆フィルターを利用した捨石洗掘防止工に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.572/II-40, pp.1-9, 1997.
- 8) 中川博次：明石海峡大橋主塔基礎の洗掘防止工法に関する研究：財団法人防災研究協会 検討報告書，1987.
- 9) 辻本哲郎：流砂量変動に伴う円柱周辺の局所洗掘深の変動，土木学会論文集，No.375/II-6, pp.53-60, 1986.
- 10) Ward, J. C. : Turbulent flow in porous media, *Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, Vol.90, HY5, pp.1-12, 1964.
- 11) Nakagawa, H., Tsujimoto, T., Shimizu, Y. and Murakami, S. : Interaction between flow over rough permeable bed and flow in porous medium composed of bed material, *Proc. of the 3rd Int. Symp. on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements*, pp. 627-634, 1988.
- 12) Arbbabhirama, A. and Dinoy, A. A. : Friction factor and Reynolds number in porous media flow, *Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, Vol.99, HY6, 1973.
- 13) 村上正吾・辻本哲郎・中川博次：河床砂礫の pick-up rate 推定式について：土木学会論文集，No.443/II-18, pp.9-16, 1992.

(1998. 9. 30受付)