

護床工下流部における局所洗掘穴内のせん断応力と洗掘の軽減に関する研究

STUDY ON BED SHEAR STRESS IN LOCAL SCOUR HOLE AND SCOUR REDUCTION DOWNSTREAM OF BED PROTECTION WORKS

神田佳一¹・森本龍助²

Keiichi KANDA and Ryusuke MORIMOTO

¹正会員 工博 明石工業高等専門学校助教授 都市システム工学科 (〒674 兵庫県明石市魚住町679-3)

²学生会員 明石工業高等専門学校専攻科建築・都市システム工学専攻 (〒674 兵庫県明石市魚住町679-3)

This study deals with local scour downstream of bed protection works in order to establish a reasonable design method for the bed protection works. A relation between bed shear stress and maximum scour depth in the scour hole under dynamic conditions of bed load was derived using Newton's second law of motion. Comparing the relation with the results of experiments carried out using several kinds of bed materials, the effect of riprap works for reduction of scour depth was discussed. An equation to predict equilibrium maximum scour depth was also proposed and verified by using experimental data sets of several researchers as well as our own. The calculated values of the equilibrium maximum scour depth agreed with measured ones in the experiments.

Keywords : bed protection, local scour, shear stress, momentum analysis

1. はじめに

河道を横断して設置される堰・水門・床止め等の治水・利水施設の主な被災要因として、それらに付随する護床工下流部の局所洗掘がある。護床工は本来、河道横断構造物下流における高速流のエネルギーを減衰させ、在来河床の洗掘を防止して河道の安定を図るために設けられる。しかしながら、護床工と在来河床との接続部では、底面粗度の急変に伴って河床せん断応力が急激に増大し、本来の機能すべき護床工の効果が得られず、逆に局所洗掘が助長される場合が多く見られる。この局所洗掘は、掃流力が大きく河道全域で土砂流送が生じる洪水時（動的洗掘）に顕著な現象であって、その洗掘特性を解明することは、護床工をも含めた河道横断構造物の安全性を検討する上で工学上重要な課題の一つである。

こうした護床工下流部の局所洗掘について、筆者ら^{1), 2), 3)}はこれまでに、護床工の様式、河床砂の特

性及び流量条件等をパラメータとした系統的な模型実験を行い、護床工周辺部の流れと流砂特性及び洗掘形状やその支配要因等について検討を重ねてきた。本報では、これらの実験的事実に基づいてモデル化された洗掘穴上の流れに対して運動量式を適用し、洗掘過程及び動的平衡状態について、洗掘深と洗掘穴内の河床せん断応力との関係式を導出する。さらに、栗石等の捨石を想定した球状粗度で洗掘穴表面を被覆した場合について実験を行い、そのときの平衡洗掘深と球粗度の限界掃流力を用いて上述の関係式を検証するとともに、捨石による護床工下流部の洗掘軽減効果について言及する。

2. 運動量解析による洗掘穴内のせん断応力の評価

(1) 護床工下流部の洗掘特性

局所洗掘による護床工災害を防止するには、河道の特性及び流量条件に対して的確に局所洗掘深を予測し、

それに対する安定性を評価するとともに、洗掘の軽減対策を講ずる必要がある。これまでの実験的考察から、護床工下流部の局所洗掘特性について主要な知見をまとめると以下のようである³⁾。

- 1) イボ状の突起を有する護床工直下流の洗掘形状は、底面近傍の流れが集中するイボ粗度要素突起間の下流延長線上で深掘れが生じて、横断方向に凹凸のある3次元的な形状を示す。その間隔や高低差は粗度要素の形状と配列及び横断方向の間隔によって異なる。
- 2) 護床工周辺部の流れは、粗度変化点で常流から限界流を経て射流に遷移し、その後弱い跳水状の水位変化を伴って砂面上の等流状態へと遷移する。
- 3) 最大洗掘が生じる洗掘穴中央断面の縦断形状は、洗掘初期を除いて、洗掘の進行とともにほぼ時間的に相似な形状を示す。
- 4) 河床が混合砂礫で構成される場合には、洗掘穴内の最深部よりも下流側で細粒分が流送されて粗粒化が進行するが、河床表面が礫で覆われることによって、礫の限界掃流力以下の掃流力の流れに対しては細砂の洗掘量が低減される。
- 5) 河床近傍の速度勾配から評価した砂床上のせん断応力は、初期の平坦河床状態では粗度変化点付近に最大値があって流下方向に漸減する。洗掘が進行すると洗掘穴上流斜面上の摩擦速度が急激に減少し、その最大値は洗掘穴の最深部付近に現れる。平衡状態では、せん断応力は逆に粗度変化点直下流で最小値をとり、流下方向に漸増する分布を示すが、洗掘深の増加とともに粗度要素の背後で形成される渦の乱れの作用が強まり、それによる巻き上げによって護床工直下流においても洗掘穴下流の等流区間と同じ流砂量が維持される。この護床工直下流における乱れによる作用力を、乱れエネルギーの収支式を用いて砂粒子の流送に対して等価な作用を及ぼすせん断応力に置き換え、これを付加した全せん断応力が、動的平衡状態において洗掘穴下流の等流区間におけるせん断応力とほぼ等しくなることが示された。

(2) 洗掘過程における洗掘深とせん断応力の関係

以上のような実験的事実に基づき、図-1に示すような護床工下流端の洗掘深 Z_i 、最大洗掘深 Z_m 、洗掘穴上流側及び下流側斜面の角度 φ_u 、 φ_d で表わされる洗掘穴縦断面において、流れの運動量方程式を適用する。簡単のため、洗掘穴斜面及び下流部の河床形状は全て直線で近似する。護床工下流端から洗掘穴の下流端までの区間をコントロールボリュームと

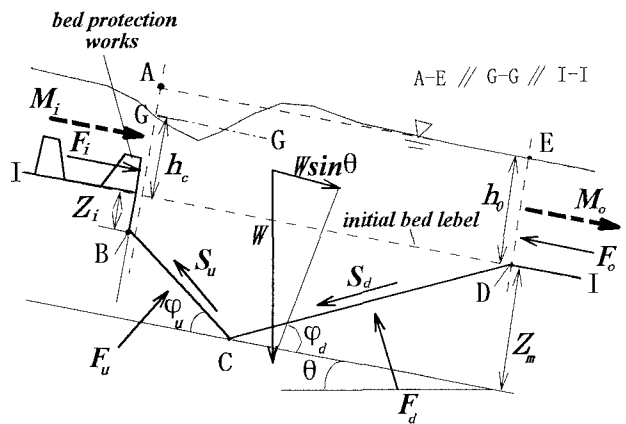


図-1 局所洗掘穴内に作用する流体力

し、その境界の水深をそれぞれ、 h_u 及び h_d 、水路勾配を θ とすると、単位時間単位幅当たりの流れ方向の運動量の収支は次式で表わされる⁴⁾。

$$W \sin \theta + F_i + F_u \sin \varphi_u - F_o - F_d \sin \varphi_d - S_u \cos \varphi_u - S_d \cos \varphi_d + M_i - M_o = 0 \quad (2)$$

ここで、 W はコントロールボリュームに作用する重力、 F_i (断面A-B)、 F_u (断面B-C)、 F_d (断面C-D) 及び F_o (断面D-E) はそれぞれ、上流端、洗掘穴上流側斜面、下流側斜面及び下流端の各境界断面に働く垂直応力の合力、 S_u 及び S_d はそれぞれ、洗掘穴上流側及び下流側斜面上に作用する全せん断応力、及び、 M_i 、 M_o はそれぞれ、上流端及び下流端における運動量フラックスである。

実験結果より、上流端水深 h_u は限界水深 h_c 、下流端水深 h_d は等流水深 h_0 にそれぞれ等しいと仮定する。コントロールボリュームを五角形A-B-C-D-Eで近似すると、重力項 W は次式で示される。

$$W = \rho g h_0 Z_m \left((1-\varepsilon) \cot \varphi_u + \cot \varphi_d \right) + \rho g Z_m^2 \left(\frac{(1-\varepsilon)^2 \cot \varphi_u}{2} + \varepsilon (1-\varepsilon) \cot \varphi_u + \frac{\cot \varphi_d}{2} \right) \quad (3)$$

ここで、 ε は護床工下流端の洗掘深 Z_i と最大洗掘深 Z_m の比 ($\varepsilon = Z_i / Z_m$) である。

粗度変化点近傍及び上流斜面上では、水位の急激な変化にともなって鉛直方向の加速度が卓越する。圧力計を用いた測定結果²⁾より上流斜面上の底面圧力は、斜面上の初期河床面からの水位が粗度変化点での水位と同じ値で一定とした場合(図-1の一点鎖線G-G)の静水圧にほぼ等しいと仮定できることから、断面A-B及びB-C上に作用する流下方向の流体力の合力を次式で与える。

$$F_i + F_u \sin \varphi_u = \frac{\rho g (h_c + Z_m)^2}{2} \quad (4)$$

一方、洗掘穴下流側斜面及び下流端では、洗掘穴下流等流部の等流水面からの静水圧分布を仮定する。すなわち、断面C-D及びD-E上の流下方向の力は、次のようである。

$$F_d \sin \varphi_d + F_o = \frac{\rho g (h_o + Z_m)^2}{2} \quad (5)$$

護床工背後の渦の作用をも含めて定義される斜面上の平均せん断応力を $\tau = \rho U_*^2$ とすると、それによる全せん断力の流れ方向成分は、次式で与えられる。

$$S_u \cos \varphi_u + S_d \cos \varphi_d = \rho U_*^2 \left((1-\varepsilon) \cot \varphi_u + \cot \varphi_d \right) Z_m \quad (6)$$

また、洗掘穴上流端及び下流端での運動量フラックスの差は、単位幅流量 q とし両境界での水深をそれぞれ限界水深 h_c 及び等流水深 h_o とすれば、次式で表わされる。

$$M_i - M_o = \rho q^2 \left(\frac{1}{h_c} - \frac{1}{h_o} \right) = \rho g h_c^3 \left(\frac{1}{h_c} - \frac{1}{h_o} \right) \quad (7)$$

式(3)~(7)を式(2)に代入すると、次式が得られる。

$$\left(\frac{Z_m^2 \Phi_1}{\lambda} + \frac{Z_m h_o \Phi_2}{\lambda} - Z_m h_o \Phi_2 \right) \rho U_*^2 \quad (8)$$

$$\rho g Z_m h_c h_o (1-\beta) + \frac{\rho g h_c^2 h_o \Psi}{2} = 0$$

$$\Phi_1 = \frac{(1-\varepsilon)^2 \cot \varphi_u}{2} + \varepsilon (1-\varepsilon) \cot \varphi_u + \frac{\cot \varphi_d}{2}$$

$$\Phi_2 = (1-\varepsilon) \cot \varphi_u + \cot \varphi_d$$

$$\Psi = \left(3 - \frac{2}{\beta} - \beta^2 \right)$$

ここで、 $\beta = h_o/h_c$ 、 λ は動的平衡状態(砂面上の等流状態)における河床せん断応力 τ_o に対する河床せん断応力 τ の比($\lambda = \tau/\tau_o$)である。

上述したように、洗掘穴内のせん断応力は、底面粗度の急変に伴う洗掘初期の大きな値から洗掘の進行とともに減少し、動的平衡状態での値に漸近することから、河床せん断応力に関する第1近似として、 λ^2 が最大洗掘深の2乗に比例するものと考え、次式を用いる。

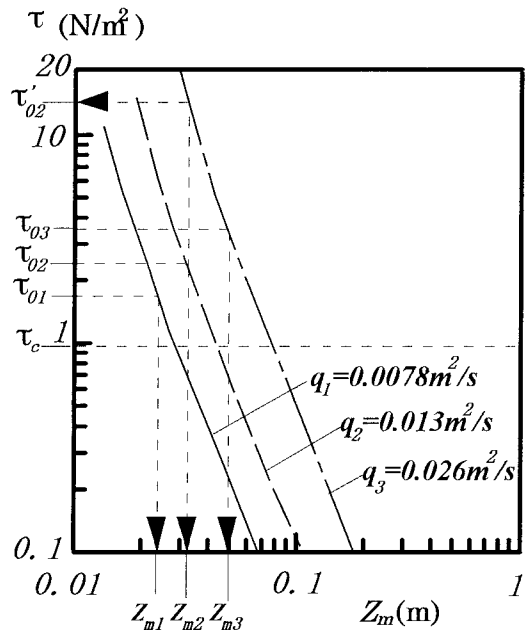


図-2 洗掘穴内の最大洗掘深とせん断応力の関係

表-1 洗掘穴の形状特性

上流側斜面勾配 $\varphi_u (^{\circ})$	下流側斜面勾配 $\varphi_d (^{\circ})$	洗掘深比 $\varepsilon = Z_1/Z_m$
15	17	0.4

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\tau_o}{\tau} = \alpha \frac{Z_m^2}{h_o^2} \quad (9)$$

ここで、 α は比例係数である。上式を式(8)に代入し、河床せん断応力 τ について整理すると次式を得る。

$$\tau = \rho U_*^2 = \rho g h_c h_o \frac{Z_m (1-\beta) + \frac{h_c \Psi}{2}}{\frac{\alpha \Phi_1 Z_m^4}{h_o^2} + \frac{\alpha \Phi_2 Z_m^3}{h_o} - \Phi_2 h_o Z_m} \quad (10)$$

図-2は、単位幅流量 q が $q_1 = 0.0078 \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $q_2 = 0.013 \text{ m}^2/\text{s}$ 及び $q_3 = 0.026 \text{ m}^2/\text{s}$ の場合について式(10)を図示し、最大洗掘深 Z_m と河床せん断応力 τ との関係を示したものである。但し、洗掘穴形状の特性量(φ_u 、 φ_d 及び ε)については、ホロースケア護床工の実験結果から表-1のように与え、式(9)の比例係数 α は、同じく平衡状態における実測結果より $\alpha = 4$ とした。水路勾配は $\sin \theta = 1/100$ である。また、河床材料は、後述する実験で用いたものと同じ粒径 $d_m = 1.5 \text{ mm}$ 、密度 $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ 、マンングの粗度係数 $N = 0.02$ 及び移動限界掃流力 $\tau_c = 0.95 \text{ N/m}^2$ の細砂を対象としている。

今、動的平衡状態での最大洗掘深を、せん断応力が $\tau = \tau_0$ となるときの Z_m として評価すると、各单位幅流量 q_1 、 q_2 及び q_3 に対応する τ_0 の値は、それぞれ、 $\tau_{01} = 1.74 \text{ N/m}^2$ 、 $\tau_{02} = 2.24 \text{ N/m}^2$ 及び $\tau_{03} = 3.36 \text{ N/m}^2$ であって、図より最大洗掘深 Z_m は、それぞれ、 $Z_{m1} = 0.025 \text{ m}$ 、 $Z_{m2} = 0.031 \text{ m}$ 及び $Z_{m3} = 0.05 \text{ m}$ を得る。

一方、 $q_3 = 0.026 \text{ m}^2/\text{s}$ の単位幅流量の場合、洗掘深 $Z_{m2} = 0.031 \text{ m}$ に対応する河床せん断応力の値は、 $\tau_{02}' = 14 \text{ N/m}^2$ である。このことより、その限界掃流力が $\tau_c = \tau_{02}' = 14 \text{ N/m}^2$ であるような粒径の大きな材料で河床表面を被覆するものとすれば、洗掘量は、 $Z_{m3} = 0.05 \text{ m}$ から $Z_{m2} = 0.031 \text{ m}$ まで約4割軽減されることになる。

また、式(8)において、 $\lambda = \tau / \tau_0 = 1$ 、 $U_* = U_{*0} = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ 及び $Z_m = Z_{me}$ と置けば、動的平衡状態における最大洗掘深 Z_{me} が2次方程式の解として求まる。

$$Z_{me} = \frac{-\frac{U_0^2(1-\beta)\beta^2}{2g} + \sqrt{\left(\frac{U_0^2(1-\beta)\beta^2}{2g}\right)^2 - \Phi_1 \Psi \zeta \frac{h_0^2}{2\beta^5}}}{\Phi_1 \zeta / \beta^3} \quad (11)$$

ここで、 ζ は、平衡等流状態での砂河床の抵抗を表わす係数 ($= \tau_0 / \rho U_0^2$ 、 U_0 は等流状態での断面平均流速) であって、移動床における粗面乱流の抵抗則から、河床材料及び河床波の特性に依存するものと考えられる。しかしながら、河床波による抵抗の増加は、結果として平衡洗掘深を小さく評価することになるので、ここでは簡単のため平坦河床の場合について、河床材料の特性の効果だけを考える。 ζ を河床材料の無次元粒径 $D_* = d_m \{(\rho_s / \rho - 1) g / \nu^2\}^{1/3}$ のべき関数と仮定し、3種の異なる粒径の河床材料を用いた実験結果³⁾から、 ζ についてキャリブレーションを行った結果を示せば、図-3 のようである。図より、次の回帰式が得られる。

$$\zeta = 0.025 D_*^{1/3} \quad (12)$$

3. 洗掘軽減法に関する実験

(1) 実験の概要

以上のことを検証するために、洗掘軽減のための河床保護工(捨石工)として粗礫及びガラスビーズを用いた検証実験を行った。実験には、図-4 に示す幅23cm、深さ30cm、長さ4m及び水路勾配1/100の亚克力製長方形断面水路を用い、その上流部1.5mの区間には、既報³⁾で用いたものと同じく、図-5 に示すようなホロースケアブロック護床工の模型を水路幅方

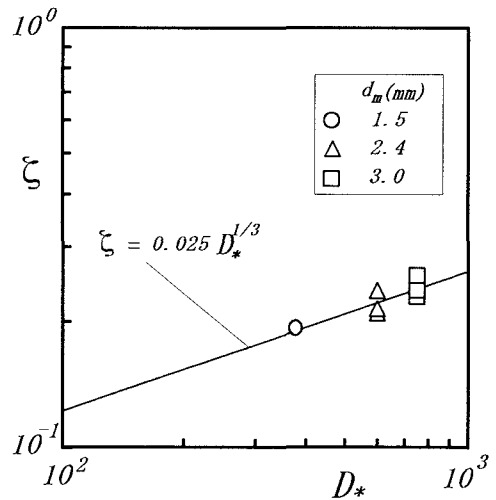


図-3 D_* と ζ の関係

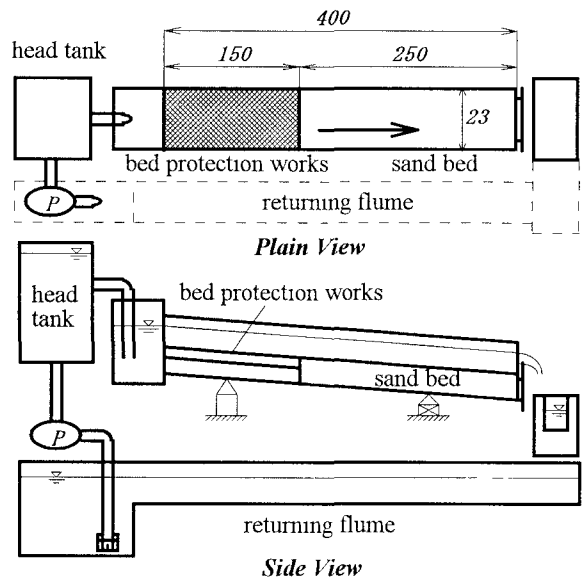


図-4 実験水路

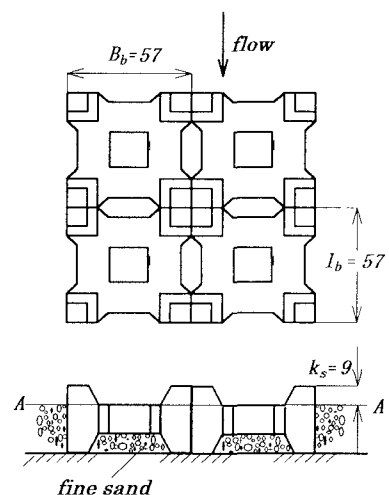


図-5 護床工ブロックの形状

表-2 河床保護工の特性と実験条件

Run No.	河床保護工の特性					単位幅流量 q (m^2/s)	下流等流部の摩擦速度 U_{*c} (cm/s)
	保護工の材料	平均粒径 d_m (mm)	密度 ρ (g/cm^3)	限界摩擦速度 U_{*c} (cm/s)	限界掃流力 τ_c (N/m^2)		
V1	粗礫	7.2	2.65	7.8	6.1	0.026	5.6
V2	ガラスビーズ	12.6	2.50	9.6	9.3	〃	〃
V3	〃	16.9	〃	11.1	12.4	〃	〃
V4	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃

向に4列設置した。ブロック下部の浸透流を防止するため、ブロックの基準面（図中のA-A断面の高さ）まで平均粒径1.5mmの様な細砂を充填し空隙を満たした。このときのホロースケアブロック護床工の相当砂粒粗度 k_{se} 及びManningの粗度係数 N は、それぞれ、 $k_{se} = 1.7\text{cm}$ 及び $N = 0.023$ である。

護床工の下流部2.5mの区間は、ブロック間を充填したのと同じ細砂を護床工の基面高さまで敷き詰めた移動床とした。護床工下流部の局所洗掘の軽減法を考えると、前述のように、同じ流量条件では砂粒径が大きいほど洗掘深は小さくなるので、粒径の大きな礫で河床を被覆すれば、洗掘は軽減されて護床工の安全性も向上するものと思われる。ここでは、洗掘軽減のための河床保護工として、平均粒径 $d_m = 12.6\text{mm}$ 及び 16.9mm のガラスビーズ（密度 $\rho = 2.50\text{g}/\text{cm}^3$ ）と $d_m = 7.2\text{mm}$ の粗礫を用い、護床工下流端から1mの区間に各河床保護工の頂点が元の細砂面と等しくなるように、それぞれ約5cmの厚さで設置した。実験は、表-2に示すように、単位幅流量を $q = 0.026\text{m}^2/\text{s}$ （全流量 $Q = 0.006\text{m}^3/\text{s}$ ）として4ケース行い、それぞれ河床変動の動的平衡状態が得られるまで60分間通水して、水面形及び河床の洗掘過程を側面からビデオカメラによって追跡するとともに、動的平衡状態における後洗掘穴形状を詳細に計測した。いずれの実験条件においても、水路下流の等流区間における河床せん断応力が河床砂の限界掃流力を越え、水路全区間において掃流砂が生じるので、通水時に水路下流端で回収した砂を60秒毎にブロック上流端から給砂することで動的洗掘過程を模擬している。

(2) 実験結果及び考察

図-6は、図-2の解析結果に検証実験の結果をプロットしたものである。河床保護工の限界掃流力 τ_c はいずれも下流部等流区間の掃流力 $\tau_{0B} = 3.36\text{N}/\text{m}^2$ よりも大きいので、洗掘穴内の掃流力が河床保護工の限界掃流力まで減少したときに洗掘深は平衡状態に達するものと考え、各 τ_c と平衡最大洗掘深 Z_{me} との関係を示している。また、○印は単位幅流量 $q = 0.0078\text{m}^2/\text{s}$ の場合について、通水後 $t = 10, 30\text{min}$

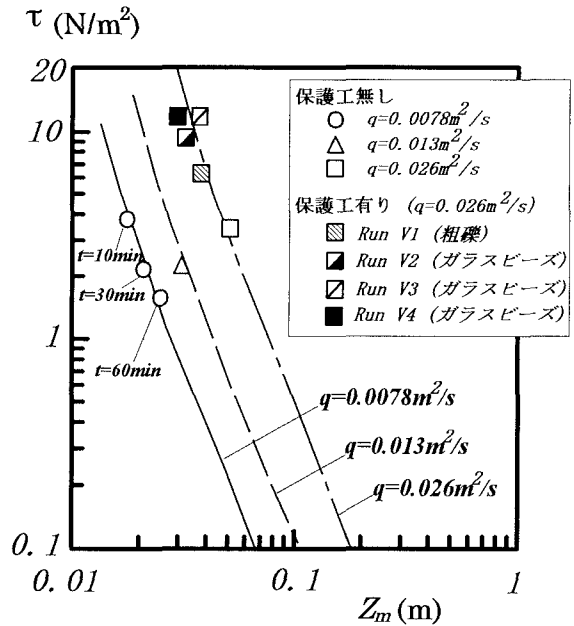


図-6 最大洗掘深とせん断応力の関係 (計算値と実測値の比較)

及び動的平衡状態に達したと考えられる60minにおける洗掘穴内の河床せん断応力とその時の最大洗掘深との関係をせん断応力計を用いた直接計測の結果³⁾から示したものであり、△印は $q = 0.013\text{m}^2/\text{s}$ での動的平衡状態における実験結果⁵⁾を示している。

同図より、まず初期の平坦河床からの洗掘過程における最大洗掘深と河床せん断応力の変化について考察すると、 $q = 0.0078\text{m}^2/\text{s}$ の場合の解析結果（実線）と実験結果（○印）との対応は良好であって、洗掘の発達とともに洗掘穴内の河床せん断応力が減少する過程を式(10)で表現しうるものと考えられる。

次に、護床工下流部の局所洗掘を軽減するための河床保護工として粗礫及びガラスビーズを用いた検証実験（Run V1～Run V4, $q = 0.026\text{m}^2/\text{s}$ ）の結果についてみると、各河床保護工の限界掃流力と平衡洗掘深との関係は、式(10)の曲線（一点鎖線）とほぼ一致している。これより、ある流量条件に対して許容しうる最大洗掘深を設定すれば、それに対応する河床保護工の限界掃流力が式(10)を用いて評価でき、

表-3 式(11)の検証に用いた実験データの概要

	護床工の様式	河床砂の粒径 d_m (mm)	単位幅流量 q (m ² /s)	下流水深 h_0 (m)
神田 ⁵⁾	ホロースケアブロック	3.0~5.0	0.8~1.5	0.4~0.7
阿部ら ⁶⁾	滑面	0.6	0.02~0.03	0.05~0.12
Bormann & Julien ⁷⁾	滑面	0.3~1.7	0.29~2.47	0.24~1.65

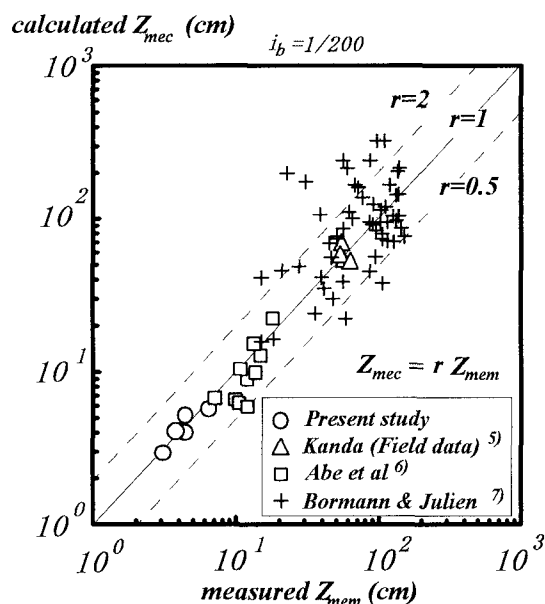


図-7 Z_{me} の解析結果と実験結果との比較

その粒径及び施工厚等の選定に有用な知見を得ることができる。

図-7は、平衡洗掘深に関する式(11)の妥当性を評価するために、本実験及び表-3に示すような加古川水系万願寺川における現地観測⁵⁾、滑面護床工下流の洗掘を対象とした阿部ら⁶⁾及びBormann & Julien⁷⁾の実験に対して、式(11)から平衡状態における最大洗掘深を予測し、実測値と比較したものである。図より、Bormann & Julienの幾つかのデータを除いて、 Z_{me} の計算結果は実測値の50~200%の範囲内にあり、護床工の様式や河床砂の粒径及び流量条件が異なる場合についても、ある程度平衡洗掘深を予測できるものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、護床工周辺部の流れ及び局所洗掘の水利機構を明らかにし、洗掘の防止・軽減をはかることを目的として、運動量方程式を用いて洗掘穴内のせん断応力を評価するとともに、その実験的検証を行ったものである。以下に主要な結論をまとめる。

1) 護床工下流部の局所洗掘について、護床工下流端の洗掘深 Z_i 、最大洗掘深 Z_m 、洗掘穴上流側及び

下流側斜面の角度 ϕ_u 、 ϕ_d を用いてモデル化したコントロールボリュームに流れ方向の運動量方程式を適用し、実験的事実に基づいた流れ特性に関する仮定のもとで洗掘穴内の最大洗掘深と河床せん断応力との関係式及び平衡最大洗掘深に関する評価式を導出した。

2) 細砂河床による従来の実験データに加えて、同じ流量条件に対して密度及び粒径の異なる河床保護工を用いた検証実験の結果から、洗掘軽減法としての捨石による河床保護工の効果について述べるとともに、平衡最大洗掘深に関する評価式に関して、現地観測を含めた他のデータを用い、その適用性を検討した。

3) 対象とした現象が非常に複雑なために、洗掘穴の形状やせん断応力分布に関して実験的事実に基づいた大胆な仮定や多くの実験定数を導入せざるを得なかった。これらの妥当性の評価については、現在、乱流モデルを用いた詳細な河床変動解析法の検討を行っており、その結果による検証も含めて、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎：護床工下流部の洗掘過程と流れ特性，京都大学防災研究所年報，第36号B-2，pp 551-569，1993。
- 2) Kanda K., Y Muramoto and Y Fujita : Local Scour Downstream of Bed Protection Works, Proc XXV Cong. IAHR, Vol. II, pp A447-A454, 1993.
- 3) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎：護床工下流部における局所洗掘とその軽減法に関する研究，土木学会論文集，No.551, II-37, pp.21-36, 1996。
- 4) Hoffmans, G. J. C. M. : Jet scour in the equilibrium phase, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 124, No.4, pp.430-437, 1998
- 5) 神田佳一：河道横断構造物の護床工周辺部の流れと局所洗掘に関する研究，京都大学博士論文，1995。
- 6) 阿部宗平・下東久巳・福本晃久：床固工水叩き下流の局所洗掘と護床工の形状，土木技術資料，第29巻，第5号，pp. 253-259, 1987。
- 7) Bormann N. E. and P. Y. Julien : Scour downstream of grade-control structures, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 117, No.5, pp 579-594, 1998.

(1998.9.30受付)