

護床工の様式による下流部局所洗掘形状の相違

Bed Scour Profiles in Downstream Reaches of Various Types of Bed Protection Works

神田佳一*・村本嘉雄**・藤田裕一郎***

Keiichi KANDA, Yoshio MURAMOTO, and Yuichiro FUJITA

This paper reports characteristics of local scour formed in downstream reaches of various types of bed protection works. Four types of bed protection works are used in experiments under a dynamic equilibrium condition to investigate time related changes in scour profiles, maximum scour depths and locations. The scour processes are also discussed in comparison with bed shear stress distributions measured in the maximum scour hole.

In addition, field observations of scour profiles were carried out at a downstream reach of hollow-squared blocks in the Manganji River in Hyogo Prefecture, and the observed scour profiles and velocity distributions were similar to those in the experiments.

Keywords : local scour, bed protection work, field observation

1. はじめに

取水施設に付随する護床工の主な被災原因は、その下流部の在来河床との境界における粗度急変部での局所洗掘であり、洪水時の動的洗掘過程における護床工下流部の流れの遷移及び洗掘穴の発達機構の解明とその予測モデルの確立は、工学的に重要な意義を持っている。このような護床工下流部の動的洗掘過程に関して、筆者ら¹⁾はイボ型護床ブロックの粗面から移動床への粗度急変部を対象とした基礎実験の結果から、最大洗掘深と洗掘形状の時間的变化の特徴を明らかにした。また、洗掘の進行に伴う洗掘穴内の流速分布、底面のせん断応力及び圧力分布の変化を詳細に測定するとともに、その結果を用いて洗掘過程の計算を行い、洗掘初期においては実験値にほぼ対応した結果を得ている。しかしながら、一般に、護床工法としては木工沈床、捨て石及び各種コンクリートブロックなど、様式及び形状の異なる種々のものがあり、その形式と施工範囲は既設構造物を参考にして決められる場合が多く、設置場所の流路特性及び水理特性と各種護床工との適応性を検討した設計例は少ない。本研究では、既実験¹⁾と同じ水理条件の下で滑面路床も含めた3つの様式の異なる護床工模型を用いた洗掘実験を追加し、護床工の様式が下流部の流れ特性と洗掘形状に与える影響について検討する。さらに、実際の堰下流に設置された護床工下流の河床形状を実測し、それらと実験結果との相似性を検討して現地の洗掘現象についても考察する。

* 正会員 工修 明石工業高等専門学校助手 土木工学科 (〒674 兵庫県明石市魚住町西岡)

** 正会員 工博 京都大学防災研究所教授 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

*** 正会員 工博 京都大学防災研究所助教授 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

2. 護床工の様式と実験概要

護床工は、その主な水理機能が水叩きの高速流を減勢する作用であるので、抵抗が大きく堅固であり、また土砂の流下を阻害しない構造であることが望ましい。構造材料としては、古くは木工沈床、そだ沈床、捨て石などが用いられてきたが、最近では、耐久性や施工の容易さ及び経済性の面から各種のコンクリートブロックが多用されている。また、護床工下流端での抵抗を在来河床と同等にするために、様式及び抵抗特性の異なる複数の材料を組み合わせ使用している例もある。ここでは、筆者ら²⁾によってその抵抗特性が明らかにされている3種類の護床工模型(ホロースケア、6脚ブロック及び半球粗度)をそれぞれ単独で用いた場合を対象とする。ホロースケアはイボ型の粗度要素が直交格子状に、6脚ブロックは千鳥状に配列されており、いずれも消波ブロックとして開発されたものであり、半球粗度は捨て石工を模擬している。また、水叩きのみの場合を模した滑面路床から移動床に接続する場合も加えた。

実験は、アクリル製長方形断面水路(幅23cm、長さ4m)の上流部1.5mの区間に、それぞれ図-1に示す3つの粗度要素を最密に敷設した護床工模型と滑面路床を設置し、下流部には中央粒径 $d_m=1.5\text{mm}$ の様な砂を敷き詰めた4種類の底面粗度急変水路を用いて、同じ水理条件の下で行われた。各粗面路床は、下流部の移動床材料と同じ砂を図-1のAの高さまで充填したのち表面をニスで仕上っている。基面位置は、粗度要素一個あたりについての流れ方向への投影面積 A_s と水路床面積 A_F の比から、ホロースケアは粗度要素の底面、6脚ブロック及び半球粗度は粗度要素の頂面位置とし、下流部の砂面の高さをこれと一致させた。各粗度要素の粗度高さ k_s 、粗度面積比 A_s/A_F 、Manningの粗度係数 n の値を表-1に示す。流量条件は、表-2のようになって、各実験とも水路下流端で回収した砂を適宜ブロック上流端から給砂して動的洗掘過程を模擬し、通水後の砂粒子の移動および河床の変形過程を測定した。また、6脚ブロックの実験では、ホロースケアの場合¹⁾と同様に、通水後 $t=5, 10, 30$ 、及び60分の各時間における洗掘穴内での流速分布をプロベラ流速計を用いて測定した。

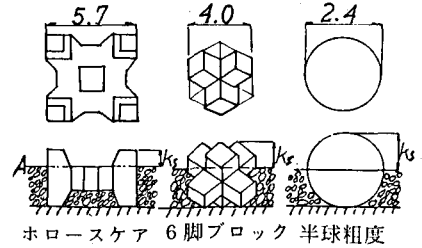


図-1 護床ブロックの形状(単位cm)

表-1 底面粗度の特性

底面粗度	粗度高さ k_s (cm)	A_s/A_F	粗度係数 n
ホロースケア	0.90	0.15	0.023
6脚ブロック	1.67	0.61	0.023
半球ブロック	1.20	0.45	0.020
滑面粗度	—	—	0.010

A_s : 粗度要素1個の流れに対する投影面積

A_F : 粗度要素1個の水路床占有面積

表-2 実験条件

i	Q(l/s)	h_c (cm)	h_{o2} (cm)	U_{*o} (cm/s)
1/100	1.78	1.83	2.30	4.18

i: 河床勾配、Q: 流量、 h_{o2} : 下流砂面上の等流水深
 h_c : 限界水深、 U_{*o} : 下流等流部の摩擦速度

3. 護床工様式による洗掘形状の比較

図-2は、通水1時間後の各実験における河床形状の鳥瞰図を示したものである。護床工下流部の河床の横断形状は、各ブロックの粗度要素間に流れが集中するために、その測線上で深掘れが著しく横断方向に凹凸のある分布を示す。凹凸の間隔及び高低差は、粗度要素の形状と配列及び横断方向の間隔によって決まり、粗度要素が千鳥配列であって粗度間隔が最も小さい半球粗度の下流部では、横断方向の凹凸はほとんどみられない。また、同図の洗掘穴中央部の縦断形状に関しては、ブロックによる顕著な差は現れないが、この点については後に詳しく検討する。

一方、滑面路床下流部の洗掘形状は、これらの場合とは異なり、粗度変化後 $X=5\text{cm}$ まで横断方向に一樣に河床が低下した後、側壁近傍ではさらに洗掘が進行しているが、水路中央部では河床の上昇がみられる。

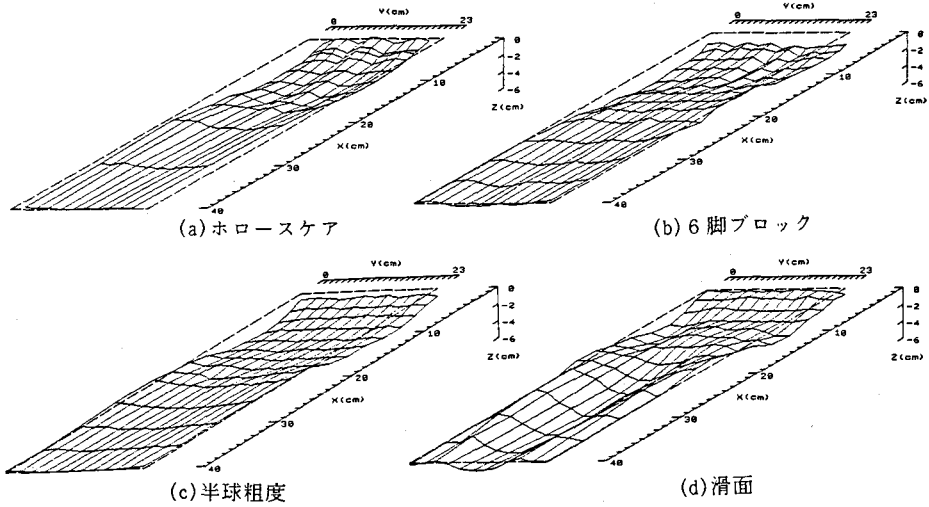


図-2 最終洗掘形状の比較

Xが15cmを越えると逆に水路中央部に大きな洗掘穴が形成され、そこに最大洗掘深が現れており、側壁近傍の河床は初期状態よりも高くなっている。これは、滑面路床上の流れが射流であり、かつ下流砂面上に側壁から水路中央に向かう衝撃波を伴った波状跳水が生じていることに起因している。このため水路中央部では水位の変化と同位相の河床波が形成され、最大洗掘深及び洗掘範囲は、ともに護床工のある場合によりも大きい。このように、水叩きで射流が持続する場合は、護床工の必要性があらためて指摘できる。

図-4及び図-5は、図-3の説明図で定義される最大洗掘深 Z_m とそれが生じる位置 L_m の時間変化を限界水深 h_c を用いて正規化し、各護床工間で比較したものである。 Z_m/h_c の時間変化は、洗掘初期を除いてはほぼ次式³⁾で表され、比例定数 α は0.03から0.04の範囲にある。

$$Z_m/h_c = \alpha \cdot (g/h_c)^{1/6} \cdot t^{1/3} \quad (1)$$

L_m/Z_m は、通水初期には急激に減少するが、その後は時間的に変化せずその値は3.5程度である。

つぎに、各護床工実験において、最大洗掘位置の河床の縦断形状を Z_m で正規化し、その時間変化を示せば、図-6のようである。洗掘初期においては、いずれの場合も、洗掘深の時間的増加割合が洗掘長のそれに比べて大きいために、無次元洗掘形状は時間の経過とともに見かけ上洗掘範囲が減少するような変化を示すが、 t が30分を越えるとほぼ相似な形状となっている。一方、洗掘穴の下流側斜面勾配 ϕ は、時間的にほぼ一定に保たれており、これは河床材料の粒径に

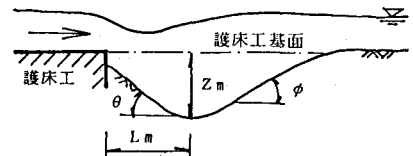


図-3 洗掘形状の説明図

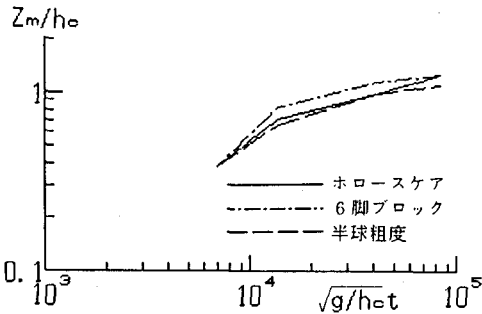


図-4 Z_m の時間的変化

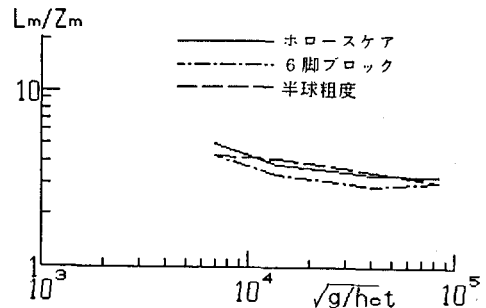


図-5 L_m の時間的変化

よって定まる水中安息角 ϕ_d に対応するものと考えられる。しかしながら、本実験では ϕ の値は約 15° であり、久宝の示した ϕ_d の下限値の $1/2$ 程度である。すなわち、護床工下流における初期の洗掘は、粗度急変に伴って掃流力が下流等流部のそれを越える領域で生ずるが、洗掘が進行すると($t > 10$ 分)、洗掘穴下流斜面の長さは Z_m と斜面勾配 ϕ によって決まり、 L_m は図-5より Z_m に比例すると考えられるので、洗掘形状の相似性が保たれるものと思われる。

図-7は、図-6の各洗掘形状において、動的平衡状態に達したと思われる通水後1時間のものをまとめて比較したものである。また、そのときの Z_m 、 L_m 、 ϕ_m 及び洗掘穴上流斜面の勾配 θ_m の値を表-3に示す。洗掘穴上流斜面の勾配 θ_m は、いずれの場合も ϕ よりもわずかに大きいと同程度であり、最終洗掘形状は対称に近い。

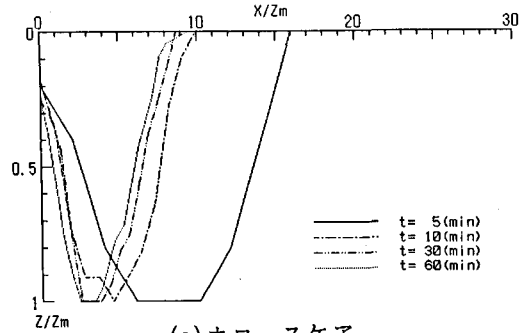
洗掘穴の下流側斜面では、ホロースケアと6脚ブロックで同じ形状を示しており、 ϕ_m 、 L_m 及び Z_m の値もほぼ等しい。しかし、半球粗度の場合は Z_m が他の2つに比べて小さく、斜面位置は下流側に現れている。これは、最大洗掘深が現れる粗度要素間の縦断面に流れが集中するホロースケアと6脚ブロックに比して、半球粗度の場合、粗度要素間隔が小さく単位幅流量の横断方向変化が大きくないためであると思われる。また、粗度変化点での河床低下量は、6脚ブロックの場合が最も大きく、最大洗掘深の7割にも達している。これは、粗度要素がその背後に最も渦を生じ易い形状であること、粗度要素の配列が千鳥であって砂面との境界面が不整であることに起因するものであろう。

表-3 最終河床形状の特性

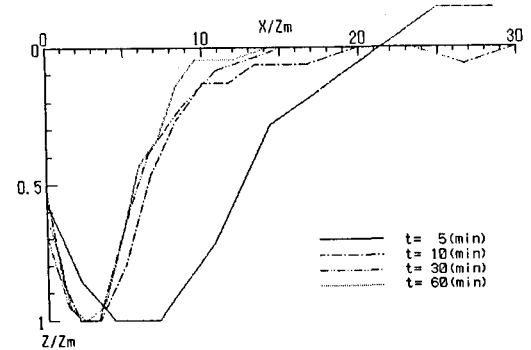
護床工模型	Z_m (cm)	L_m (cm)	ϕ ($^\circ$)	θ ($^\circ$)
ホロースケア	2.3	8.0	15	17
6脚ブロック	2.3	8.0	15	15
半球ブロック	2.0	7.7	13	17

4. 洗掘穴上のせん断力分布

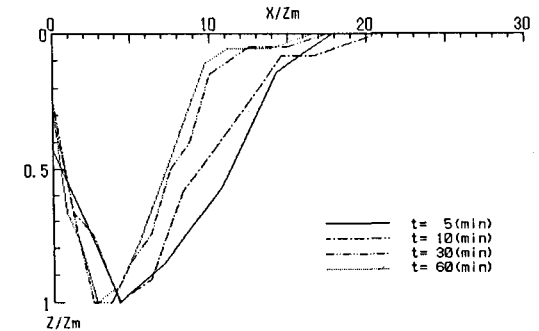
図-8には、6脚ブロック下流の洗掘穴内において、底面近傍の流速から推定した底面摩擦速度 U_* の流下方向分布の時間変化を、せん断力計(東京計測、Model-S10W)を用いて直接計測したホロースケア



(a) ホロースケア



(b) 6脚ブロック



(c) 半球粗度

図-6 無次元縦断河床形状の時間変化

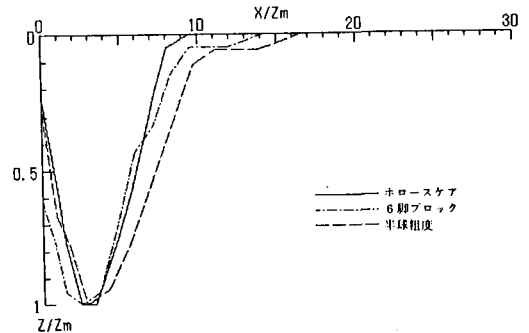


図-7 最終洗掘形状の比較

アの場合¹⁾と比較している。図中の U_{*0} は、下流等流部の摩擦速度、一点鎖線は、砂粒子の限界摩擦速度 U_{*c} である。護床工の形状及び測定方法が異なるものの、両者の U_* の縦断分布はほぼ同様の時間変化を示している。すなわち、初期状態の摩擦速度は粗度変化点で最大であって、流下するに従って指数関数的に減少して下流等流部の値 U_{*0} に漸近する。このとき、上流からは U_{*0} に対応した流砂量が供給されるので、護床工下流部の粒子運動は非平衡な状態となり、流砂量の最大値は粗度変化点の下流にあって、上述したような洗掘形状が形成される。洗掘が進行すると洗掘穴内の U_* は急激に減少するが、一方、洗掘深の増加に伴って洗掘穴内では渦が形成され、それによる砂の巻き上げと下流斜面上の上昇流によって砂の流送が増大するものと考えられる。このことは、洗掘穴上でのトレーサー粒子の挙動の観察結果からも確かめられており、動的平衡状態における粒子運動を解析し、洗掘形状の変化を予測するには、洗掘穴内のせん断力分布のみならず、乱れによる揚圧力と流向をも正確に評価した解析モデルを構築する必要がある。

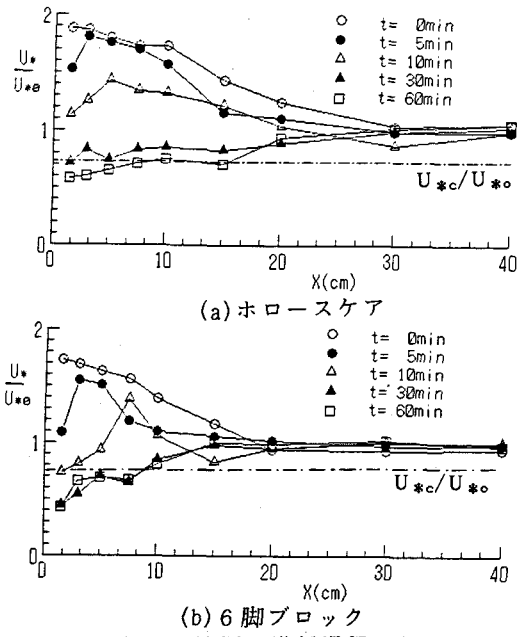


図-8 洗掘の進行過程における底面摩擦速度の縦断変化

5. 護床工下流部の局所洗掘に関する現地観測

調査対象とした護床工は、図-9に示すような加古川水系万願時川の合流点から2 km地点(流域面積148 km²)に設置されたゴム引布製起伏堰の水叩き下流部の護床工であって、3 tホロースケアブロック(辺長 $B_0=1.6$ m、粗度高さ $k_B=0.4$ m)が幅72 m、長さ28.5 mの区間に敷設されている。表-4に示すように現地調査としては、平成2年6月から3年10月の期間に計5回の光波測距儀(測器舎、Model-SET4)による護床工下流部(平均河床勾配約1/200)の縦横断測量を行った。また、第4回の観測では、ブライス音響式流速計(金剛測量器械、Model-A936)を用いて、最大洗掘穴内の流速分布の測定も行った。現地の河床材料は、図-10に示す代表的粒度分布をもつ砂礫混合物(中央粒径 $d_M=3$ cm)であるが、5回の調査はいずれも低水時(流量2～4 t/s)に行われたものであって、洗掘穴の表面は、直径10 cmを越える石で覆われていて流砂は存在しておらず、観測された河床形状はそれ以前の洪水によるものであると思われる。

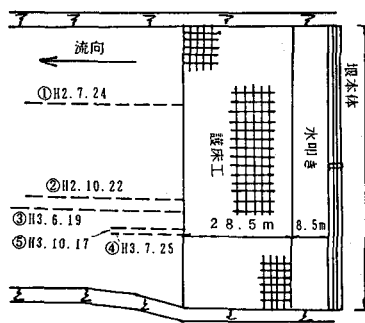


図-9 観測地点の概要と最大洗掘が生じた縦断測線

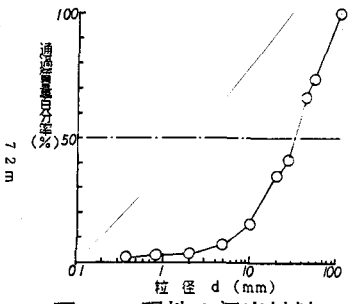


図-10 現地の河床材料の代表的粒度分布

表-4 現地観測結果

観測番号	観測年月日	最大洗掘深 Z_{mt} (cm)	最大洗掘深比 Z_{mt}/Z_{m0}
第1回	H2. 7. 24	63	27.4
第2回	H2. 10. 22	44	19.1
第3回	H3. 6. 19	58	25.2
第4回	H3. 7. 25	57	24.8
第5回	H3. 10. 17	55	23.9

Z_{m0} : 最大洗掘深の実験値 (= 2.3 cm)

図-11は、各観測において最大洗掘が生じた縦断測線(図-9参照)上の河床形状を図-7と同様に無次元表示したものであって、平衡状態におけるホロースケアの実験結果も併記している。また、各観測における最大洗掘深 Z_{mf} とその実験値 $Z_{m0}(=2.3\text{cm})$ に対する比を表-4に示す。第1回と第2回の観測の間には台風19号(1990年9月18日)による出水があり、最大洗掘深の位置は大きく左岸側へ移動していた。このように、最深部の位置や洗掘形状は観測日によってばらつきはあるものの、同図ではほぼ相似な河床形状が示されていると言えよう。実験結果と比較すれば、最大洗掘深の発生位置及び上流側斜面の形状はよく一致しているが、下流側斜面では実験結果とは異なり、 X/Z_m が10を越えるとその勾配が急激に緩やかになって非対称な形状を示している。これは、当初減水期の埋め戻し作用によるものと考えていたが、先述の洗掘穴内の粗粒化の進行と観測形状が上流からの給砂がない条件で行われた鈴木³⁾の実験結果と類似していることからみれば、上流部の堰によって土砂の供給が抑えられ、一方、細粒分が流送されて全体的な河床低下が生じたことによる可能性が高いと思われる。

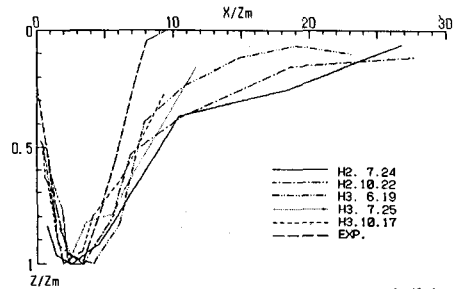


図-11 無次元縦断河床形状の観測結果と実験結果の比較

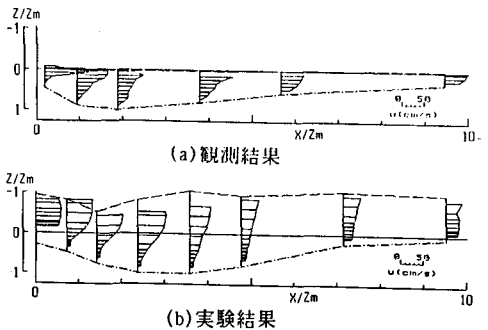


図-12 洗掘穴上の流速分布の観測結果と実験結果の比較

実験と現地での最大洗掘深 Z_m の比からフルード相似則によって洗掘穴形成時の単位幅流量 q を推定すれば、 $q=0.7\sim 1.1\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ であって、観測地点では年平均1～2回の割合で生じる洪水に対応する。このとき、河床材料はそのほとんどが移動状態にあると推定され、観測形状は動的洗掘によって生じたものと考えられる。

図-12は、第4回の観測における洗掘穴内の流速分布を実験結果と比較したものである。現地の流量は洗掘穴形成時よりもかなり小さく、護床工の粗度要素は水面より露出し、下流の水位も護床工の基面高さと同レベルであった。このため、粗度変化点直下流の流れは、段落ち部で見られるような表面噴流に似た分布特性を示し、底面付近の流速は0に近く、洗掘穴下流斜面上では、底面流速が徐々に回復して通常の対数分布に漸近している。洗掘形状に対する流量条件が異なるため実験結果との流れの相似性を直接議論することは難しいが、護床工基面よりも下方の鉛直分布形の流下方向変化は同一傾向を示しており、今後、さらにこうした観測及び実験結果の比較検討を進めていけば現地における動的洗掘時の水理機構を推定するための手がかりが得られよう。

6. おわりに

本研究では、護床工下流部の動的洗掘に関して、護床工様式の違いが洗掘穴の形状、とくに最大洗掘深とその発生位置及び底面せん断力に及ぼす影響を実験的に考察するとともに、実際の護床工下流部の河床形状の実測を行い、実験結果との比較からその相似性について検討した。今後、両者の結果を組み合わせる洗掘機構のモデル化を試み、護床工下流部における洗掘現象の予測と護床工の合理的な設計指針を提案したい。

【参考文献】

- 1) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎・金川靖・中村元郎：水工学論文集、第35巻、1991、pp. 501-506。
- 2) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎・大坪高：水工学論文集、第34巻、1990、pp. 511-516。
- 3) 鈴木幸一・道上正規・川津幸治：第26回水理講演会論文集、1982、pp. 75-80。