

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

神田佳一¹・村本嘉雄²・藤田裕一郎³

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西岡)

²正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒606-01 京都府京都市吉田本町)

³正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

堰・床止め工などの河道横断構造物の下流に設置される護床工を対象とし、その安全で合理的な設計に関する指針を得ることを目的として、護床工周辺部の流れと流砂特性および洗掘機構に関する基礎実験と水理解析を行った。実験では、その主要現象について流量条件や護床工の様式および河床砂の粒径をパラメータとして、それらと護床工下流部の洗掘特性との関係を系統的に明らかにするとともに、洗掘の進行過程における洗掘穴内の流速分布、河床せん断応力の分布を詳細に計測した。その検討結果から、護床工下流部の局所洗掘に対する安定条件を導くとともに、その軽減法を提案した。

Key Words : bed protection works , open channel flow , local scour , bed load

1. 序論

堰・水門・床止め等の治水施設や取水施設の主な被災要因として、それらに付随する水叩きおよび護床工下流部の局所洗掘がある。この局所洗掘は、掃流力が構造物周辺のみで河床の移動限界を越え、護床工直下流付近の砂だけが移動する静的洗掘と掃流力が大きく全体的な流砂を伴う動的洗掘に分けられ、いずれの場合にも底面粗度の形状や粗度係数の急変が強く影響している。洪水時において問題となるのは後者の動的洗掘であって、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重要な課題の一つである。

洪水時における河道横断構造物周辺の流れ特性および流砂機構に関する研究は、局所洗掘の防止・軽減における基礎的な課題の一つとして実験的、理論的にも行われてきている。

まず、水叩きを有する構造物の下流部における洗掘に関する研究は、水叩き下端付近で生じた跳水に伴う渦による洗掘が卓越する場合を対象としたものと、水叩き上で射流が持続するか、あるいは限界流に近い状態にあって、過大な掃流力の作用による洗掘を対象とするものに分けられる。前者に関するものとしては、*Farhoudi・Smith*¹⁾ および阿部ら²⁾の研究がある。

*Farhoudi・Smith*¹⁾は、堰を越える流れについて、水叩きの下端で跳水が起こる条件で最も洗掘が進行するとの立場から実験的な考察を行うとともに、水深規模の渦による砂の移動をモデル化して、形状を双曲線で近似した洗掘穴の最大洗掘深の時間変化を算定している。阿部ら²⁾は、比較的低い落差工に続く水叩き下流部の局所洗掘に対して、水叩きの長さとも最大洗掘深との関係を実験的に求めている。

一方、鈴木ら^{3), 4)}は、下流水深が小さく水叩き下端において限界流に近い流れを対象として、床止め水叩き下流部の動的な局所洗掘過程について詳細な実験的検討とその結果に基づいた河床変動の計算を行っているが、流砂に関して動的条件にあるにもかかわらず、上流部からの給砂は考慮されていないので、動的平衡状態を取り扱ったものではないと解釈される。また、山下ら⁵⁾は、急流河川の床止め近傍の河床変動を1次元 *MacCormack*法を用いて解析し、豊平川の実測データと比較している。しかしながら、イボ型の粗度要素で構成される護床工の下流部では、イボ要素間の速い流れが下流移動床上で拡散されるという3次元流の速い流れ特性を示すために、河床形状は水叩きの下流部とは異なり、横断方向に凹凸のある複雑なものとなる。こうしたことから、実際の護床工の下流における最大洗掘深およびその発生位置を理論的に予測することは

非常に困難となっている。

このような護床工下流部の局所洗掘に関しては、松下⁶⁾、Breusers⁷⁾の実験的研究およびHoffmansらを中心とするDelft工科大学のグループによる理論的研究^{8), 9)}がみられる。松下⁶⁾は、頭首工の洪水吐および土砂吐の下流に直方体ブロックおよび異型ブロックによる護床工を設置した場合について洗掘実験を行い、護床工下流部の洗掘特性について考察しているが、護床工による洗掘量の低減効果と流れの条件について定性的な関係を示すにとどまっている。Breusers⁷⁾は、多くの実験から護床工の下流における最大洗掘深の時間変化に関してつぎの経験式を得た。

$$\frac{z_m}{h_0} = \left(\frac{t}{t_1} \right)^\gamma \quad (1)$$

ここで、 z_m は最大洗掘深、 h_0 は護床工上の初期水深、 t は経過時間、 t_1 は z_m が h_0 に等しくなるときの経過時間および γ は係数である。 t_1 および γ の値は、流れおよび砂粒子の特性に依存するが、その後幾つかの実験式が提案されている。また、Hoffmans・Booij^{8), 9)}は、Rhine河の河口に計画された護床工を有する河口堰下流部の洗掘量を予測するため、堰背後および洗掘穴内の剥離域において渦の発生に伴う乱れの作用に着目した理論的解析法を提案している。しかし、護床工の上流部からの流砂は考慮されておらず、一般に見られるような河川構造物の上流に移動床河道が続く場合には過大な洗掘量を予測することになる。

以上のように、従来の研究では、護床工および洗掘穴内の流況の把握が十分でなく、護床工の形状や河床砂の特性および流砂の連続性を考慮した動的洗掘の系統的な検討はなされていない。

本研究では、護床工周辺の動的局所洗掘過程に関して、3種のイボ型の護床ブロックで構成される粗面区間に、均一砂または混合砂を敷き均した移動床区間を接続した粗度急変部を対象として系統的な実験を行い、初めに河床の変動特性を明らかにする。この結果を参照実験とした静的洗掘の場合および護床工を施工しない水叩きのみの場合の結果と比較・検討し、護床工下流部の動的洗掘過程の特徴を明確にする。ついで、洗掘の進行過程における洗掘穴内の流速分布、河床せん断応力の分布および流砂の運動特性を詳細に計測し、護床工下流部の洗掘特性と流れ特性の関係について考察する。さらに、その検討結果に基づいて、局所洗掘に対する護床工の安定条件を導き、安定性からみた適正な護床工様式について述べるとともに、捨て石による洗掘の軽減法について考察する。

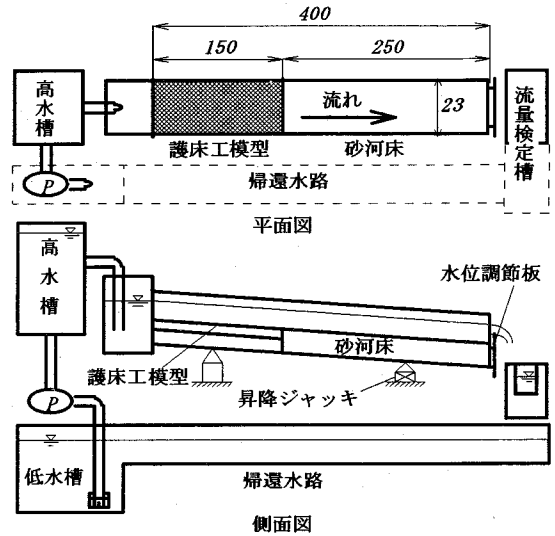


図-1 実験水路の概要 (単位: cm)

2. 護床工下流部の洗掘過程に関する実験

(1) 実験の概要

護床工は、その主な水理機能が水叩き上の高速流を減勢することであって、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。そのため、最近では耐久性や施工の容易さおよび経済性の面から、各種のコンクリートブロックや捨て石などが多用されているが、それら全てについて、その流れ特性を検討することは不可能である。ここでは、護床工のモデルとして、中村ら¹⁰⁾によってその抵抗特性が明らかにされている6脚ブロックと兵庫県下の中小河川で比較的多く用いられているホロースケアブロックおよび捨て石工を模擬した半球粗度を対象とした。また、水叩きのみの場合を摸して滑面から移動床に接続する場合も加えた。

実験には、図-1に示す幅23cm、深さ30cmおよび長さ4m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、図-2に示すような3種の護床工模型と滑面路床を設置した。6脚ブロックは、一辺が1.5cmの立方体を7個接合したモルタル製のブロックを図-2(a)のように、3点支持として規則正しく水路に敷並べたものである。ブロック下部の浸透流を防止するため、図に示す高さまで平均粒径0.15cmの様な細砂を敷き詰めて空隙を満たした半球粗度は、直径2.46cmのガラス球を水路床に最密に敷並べ、その下半分を石膏で充填したものである(図-2(b))。ホロースケアブロックは、アルミニウム製のブロック模型を図-2(c)に示すように水路幅方向に7列設置したもので、6脚ブロックの

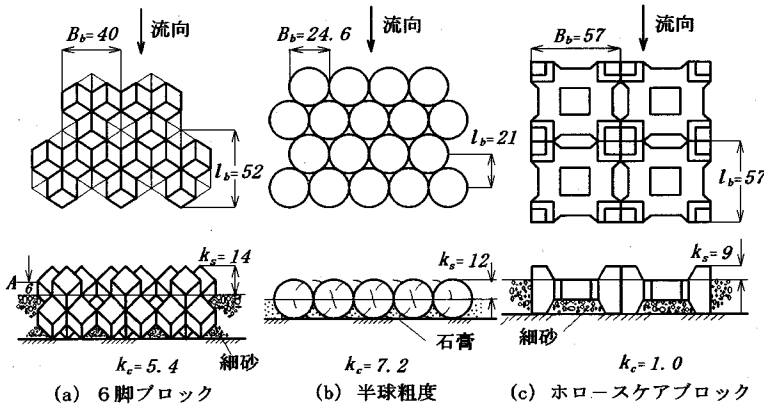


図-2 粗度要素の形状と配置 (単位: mm)

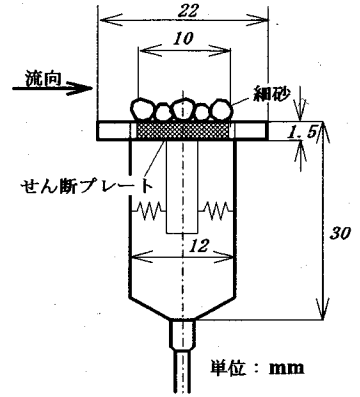


図-3 セン断応力計詳細図

場合と同様に、その下部の空隙には細砂を充填している。各ブロック模型の大きさや粗度高さおよび配列の選定に関しては、それらの粗度係数がほぼ等しくなるように留意し、いずれも実際河川での多くの施工例を参考として、出来る限りそれらを模擬している。

各底面粗度の基面 ($z=0$ の位置) は、粗度要素近傍の流れの形態を検討して選定するべきであるが、ここでは、粗度要素の突起を全て水平にならした場合の幾何学的基面高さ k_c に基づいてつぎのように決定した。各粗面に対して粗度要素底面 (中詰めめの砂および石膏の天端面) を基準として k_c を求めれば、図-2に示すとおりである。簡単のため、ホロスケアについては、 $k_c \approx 0$ として基面を粗度要素の底面高さに設定し、6脚ブロックについては、A点 ($k_c \approx 6\text{mm}$) を基面とした。また、半球粗度に関しては、その基面は従来から半球の頂点より僅かに下方にとられることが多いが、ここでは、等流状態での流速分布の測定結果から半球の天端と判断した。このときの各底面粗度の粗度高さ k_s 、相当砂粒粗度 k_{se} および Manning の粗度係数 n_b の値を表-1にまとめて示す。

護床工の下流部2.5mの区間は、砂および礫を護床工の基面高さまで敷き詰めた移動床である。河床材料としては、平均粒径 d_m がそれぞれ1.5, 2.4および3.0mmのほぼ様な3種の砂 (細砂, 中砂および粗砂) および細砂と粗礫 ($d_m = 7.2\text{mm}$) を混合した混合砂礫を用いた。

実験条件は、表-2および表-3に示すとおりである。ホロスケアブロック護床工と細砂河床の組み合わせによる動的洗掘の実験 Run BFH.1 を基本ケースとして、流量条件、砂粒径および護床工の様式を変化させ、さらに混合砂床を加えた計16ケースについて実験を行った。混合砂床の実験では、それぞれについて

表-1 底面粗度の特性

	記号	粗度高さ k_s (cm)	相当粗度 k_{se} (cm)	粗度係数 n_b
6脚ブロック	R	1.4	1.6	0.023
半球ブロック	P	1.2	1.4	0.020
ホロスケア	H	0.9	1.7	0.023
滑面	S			0.010

表-2 実験条件 (均一砂の実験)

実験番号 Run	平均粒径 d_m (mm)	流量 Q (l/s)	$\frac{U_{*02}}{U_{*c}}$
BFH.1	1.5	1.78	1.36
BFH.2	"	0.48	0.94
BIH.1	2.4	6.07	1.31
BIH.2	"	3.50	1.18
BIH.3	"	2.56	1.09
BIH.4	"	0.90	0.86
BCH.1	3.0	7.10	1.29
BCH.2	"	6.03	1.13
BCH.3	"	3.40	1.02
BCH.4	"	2.56	0.96
BFR.1	1.5	1.78	1.36
BFP.1	"	"	"
BFS.1	"	"	"

表-3 実験条件 (混合砂礫の実験)

実験番号 Run	砂と礫の 混合割合	平均粒径 d_m (mm)	流量 Q (l/s)	$\frac{U_{*02}}{U_{*c}}$
BMH.1	7:3	2.4	2.79	1.33
BMH.2	6:4	3.3	5.58	1.31
BMH.3	5:5	4.3	8.28	1.34

移動床区間の等流状態における摩擦速度 U_{*02} が河床材料の90%粒径に対する限界摩擦速度に等しくなるように流量を設定している。通水時には、水面形、砂粒子の移動および河床の変形過程を側面および上方からビデオカメラによって追跡した。さらに、河床形状の時間的变化は、測定しようとした所定の時刻まで連続通水した後水を止め、ポイントゲージによって河床位を詳細に計測し、ついで路床を敷き均して再度所定の測定時刻まで連続通水して計測することを繰り返して求めた。いずれの場合も、水路床勾配は $i_b = 1/100$ に固定し、移動床の下流区間で等流状態が得られるように水路下流端で水位の調節を行っている。

下流等流部の摩擦速度 U_{*02} が砂の平均粒径に対する移動限界 U_{*c} を越える動的洗掘の場合には、路床全域で流砂が存在し、護床工区間からの砂の供給が無ければ移動床区間では全体的な河床低下が生じて平衡状態が得られない。このため、予め予備実験を行って水路下流端における流砂量の時間変化を計測しておくとともに、本実験では水路下流端で回収した砂をブロック上流端から連続的に給砂することで動的平衡状態を模擬している。

つぎに、洗掘穴内の流れ特性とその時間的变化を明らかにするために、*Run BFH.1*と同じ条件下でそれぞれ通水後 $t = 0, 5, 10, 30$ および60 minの各時刻まで連続通水した後、水を止めて砂表面をニスで固定し、洗掘穴内の流速3次元分布および河床せん断応力の流下方向変化を詳細に測定した。流速の測定には、プロペラ流速計（篠塚製作所製、Model-SV3）を用いた。また、河床の砂面に働くせん断応力の測定に用いたせん断応力計（東京計測製、Model-S10W）は、センサー部が図-3に示すような構造であって、中央部のせん断プレートに働くせん断応力を周囲の板バネの歪みから直接測定することができるようになっている。せん断プレートの上面には図に示したように周囲と同じ砂を密に張り付け、砂面の先端を洗掘穴内の河床面と一致するように砂中に設置して、河床砂面に作用するせん断応力を評価した。

水路の座標は、粗度変化点から流下方向に X 軸、右側壁から左側壁方向に y 軸、粗度基面から鉛直上方に Z 軸をとった。

(2) ホロースケア護床工下流部の洗掘特性

護床工下流部の局所洗掘は、護床工とそれに接続した移動床砂面との境界における粗度急変に伴う河床せん断応力の増加に起因するものであって、周辺河床に作用する掃流力と河床材料の限界掃流力との関係から、動的洗掘と静的洗掘に分類される。この問題を取扱う

最初として、まず、ホロースケアブロック護床工に均一砂床が接続した場合の実験結果から、イボ型の護床工下流部における動的および静的な洗掘形状について考察し、両者の洗掘機構の違いを明らかにする。

a) 護床工上の流れと洗掘穴の横断形状

図-4は、細砂河床の動的洗掘 (*Run BFH.1*) および静的洗掘 (*Run BFH.2*) について、河床形状の時間変化の鳥瞰図を示したものである。また、*Run BFH.1*における護床工上の $X = -2.7$ cmについて、水位、流速の鉛直分布および底面流速から評価した底面摩擦速度の横断方向の変化を図-5に示す。

イボ型の粗度要素が直角格子状に並ぶホロースケア護床工では、底面付近の流れは図-5に見られるようにイボ要素間に集中して、底面流速が大きくなり、流速の鉛直分布も一様化している。また、底面摩擦速度もイボ要素の間では、イボ要素中心線上における値の3~5倍にも達している。このため、洗掘初期のブロック直下の洗掘形状は、イボ要素間の延長上で深掘れが生じ、洗掘された砂の一部が流れの拡散とともに横方向へ運ばれてイボ要素の下流中心線上に堆積して横断方向に凹凸のある3次元的な形状となる。

さらに洗掘が進行してイボ要素間の洗掘深が大きくなると、側方の斜面勾配が砂粒の水中安息角を越え、斜面上の砂が洗掘穴内に滑落してイボ要素の下流中心線上においても河床低下が生じる。したがって、この段階になると、洗掘穴はほぼ相似な形状を保ちながら発達していく。一方、洗掘穴の流下方向変化は、流れの拡散とともに流砂量が横断方向に平均化されるので、ある程度の距離進むと河床の凹凸も流下方向に減衰していく。最大洗掘深および洗掘領域の長さは、ともに*Run BFH.1*の場合の方が*Run BFH.2*よりも大きな値を示している。

また、洗掘穴の横断形状を図-6に模式的に示したような最深部の底面幅 B_c 、斜面角 φ_i の台形断面で近似すれば、底面幅 B_c は動的、静的洗掘を問わず洗掘穴のいずれの断面でもほぼ一定であって、粗度要素の純間隔 B_0 の約1/3 (≈ 1 cm) となっている。そこで、洗掘穴内の各横断面について横断方向の斜面勾配角の平均値 φ_i を求め、その流下方向変化の時間的推移を示せば、図-7のようである。ただし、流下距離 X は、護床工下流端から洗掘穴の最深部までの距離 L_m で無次元表示されている。横断面の斜面の角度 φ_i は、 X/L_m が0から1の間、すなわち、洗掘穴の上流側の斜面では、位置および時間に無関係にほぼ一定となり、その値は動的洗掘の*Run BFH.1*で 25° 、静的洗掘の*BFH.2*の場合は 30° であって、それぞれ、久宝¹¹⁾が示した流水中における安息角の下限値および標準値

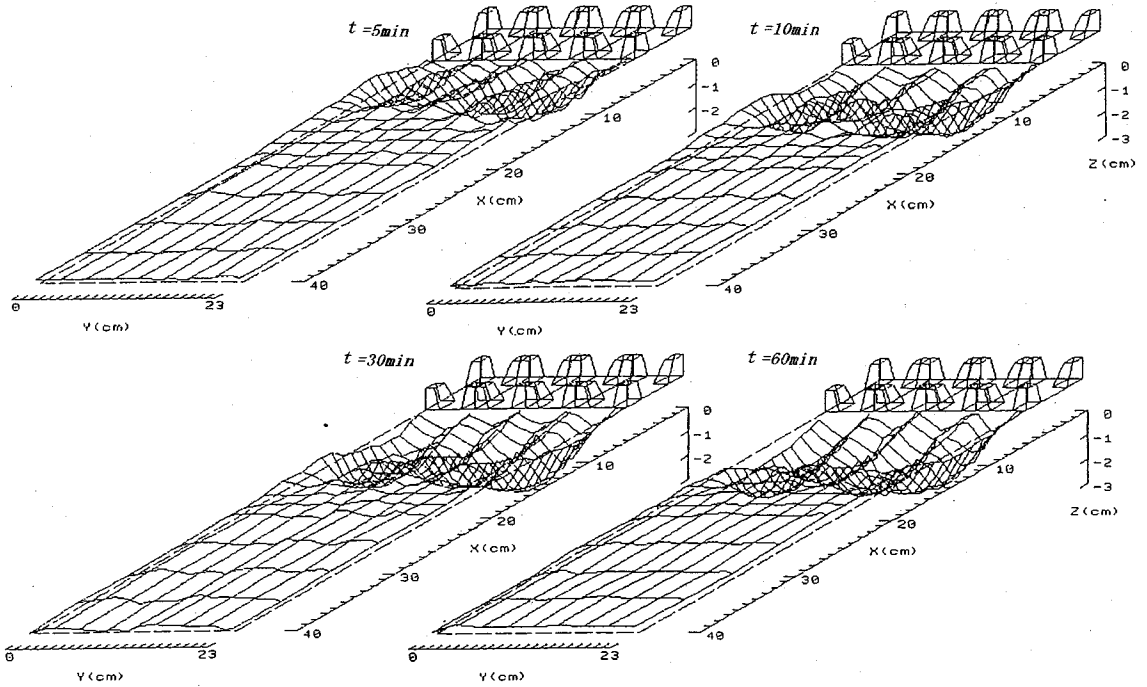
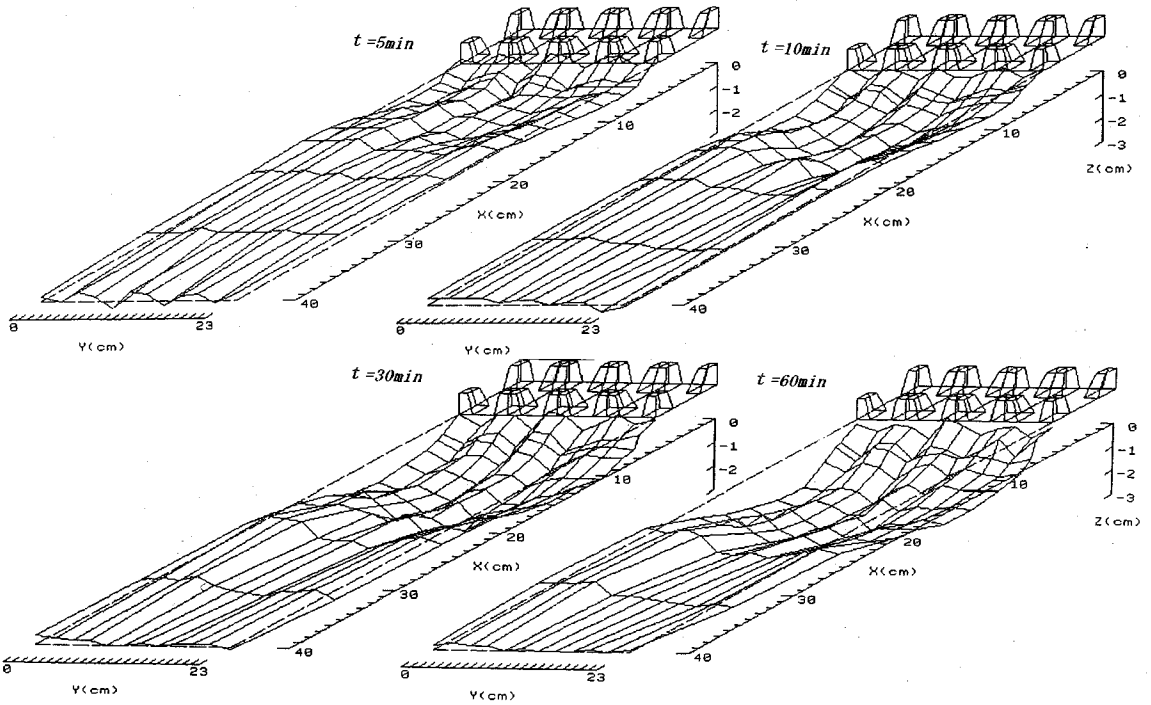
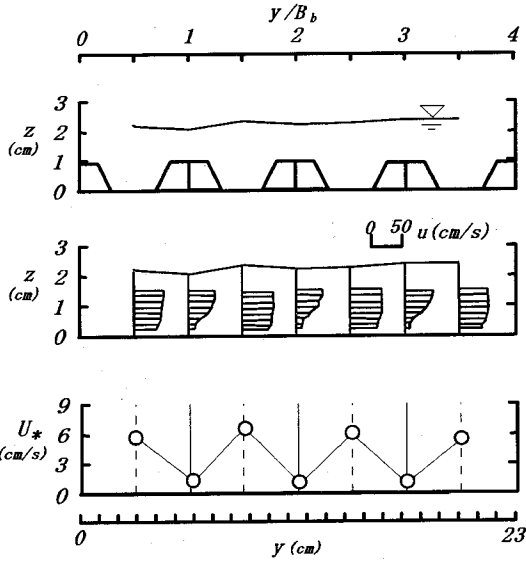


図-4 護床工下流部の洗掘形状の時間的变化



Run BFH.1

図-5 護床工上の水位、流速分布および底面摩擦速度の横断方向変化

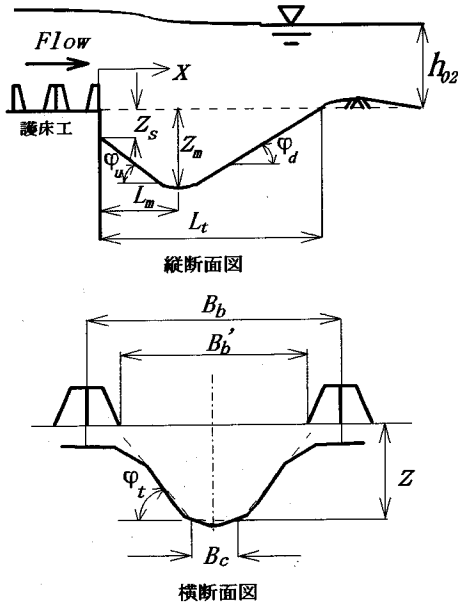


図-6 洗掘形状の模式図

にはほぼ等しい。 x/L_m が1を越える洗掘穴下流側斜面では、 ϕ_t の値は直線的に減少し、横断方向に平坦な河床形状へと移行していくが、ここでも、動的洗掘と比較して静的洗掘の場合に ϕ_t は大きな値を示している。 ϕ_t のこのような傾向は、Run BFH.2では粗度変化点での水深が粗度要素の高さにほぼ等しく、流れがよ

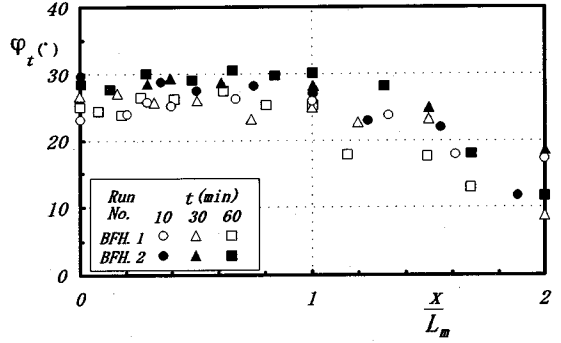


図-7 洗掘穴の横断方向斜面勾配の流下方向変化

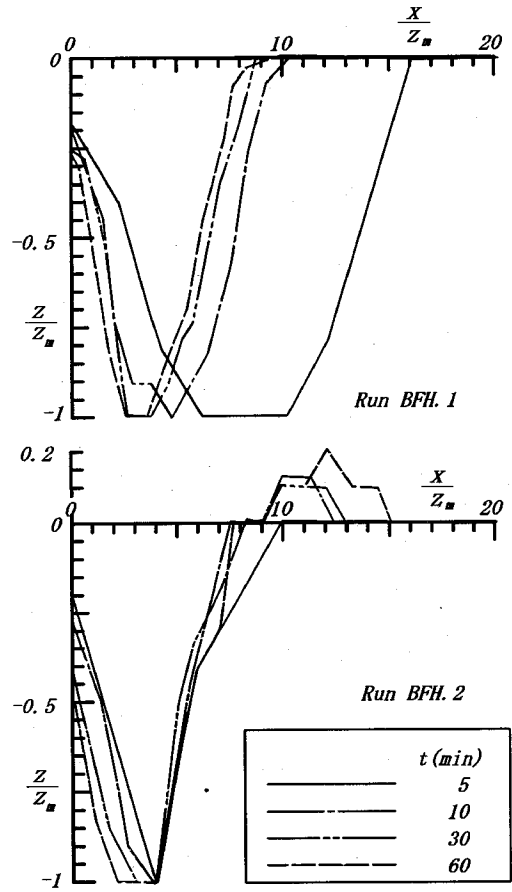


図-8 洗掘最深部の無次元河床形状の時間的変化

り粗度要素間に集中しているためであると思われる。

b) 最大洗掘が生じた縦断面での水面形と河床形状に関する考察

図-8はRun BFH.1およびBFH.2について、最大洗掘深が生じた縦断面 ($y=8.7\text{cm}$) における河床形状の時間変化を最大洗掘深 Z_m で正規化して示した

表-4 摩擦速度・限界摩擦速度比のほぼ等しい
一様砂礫実験の諸量

実験番号 Run	平均粒径 d_m (mm)	$\frac{U_{*02}}{U_{*c}}$	最大洗掘深 z_m (cm)	洗掘長さ L_t (cm)
BFH.1	1.5	1.36	2.3	23
BIH.1	2.4	1.31	2.4	27
BCH.1	3.0	1.29	2.3	30

ものである。洗掘初期における無次元洗掘形状は、いずれの場合も、洗掘深の時間的な増加割合が洗掘長のそれを上回っているために、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している。しかし、 t が30minを越えるとほぼ相似な形状となり、最終時点までこの相似性は保持されている。一方、洗掘穴の下流側斜面の角度 φ_d は時間的にほぼ一定に保たれており、その値は約 15° であって、横断方向の斜面勾配角の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、粗度急変に伴って増加する掃流力が下流等流部のそれを越えるために生ずるが、初期洗掘が進行すると ($t > 10\text{min}$)、射流の発生による掃流力の増大と粗度要素の後流および跳水渦による水流の乱れによって土砂の流送能力が上昇して洗掘穴が発達するようになる。そして、洗掘穴下流斜面の長さは最大洗掘深 z_m と斜面の角度 φ_d ($\approx 15^\circ$) によって決まるようになり、洗掘形状の相似性が保たれているものと思われる。このとき、最大洗掘深 z_m は、粗度変化点から z_m の3倍の距離にあって、洗掘の長さは z_m の約10倍である。また、下流等流部の掃流力が限界掃流力を下回っているRun BFH.2では、洗掘された砂が洗掘穴の下流に堆積してマウンドを形成しているのに対して、Run BFH.1における洗掘穴下流部の河床位は、洗掘前の初期状態とほぼ等しく、顕著な砂の堆積は見られない。

c) 河床砂の粒径による洗掘形状の相違

表-4は、砂の粒径が異なる3つの動的洗掘河床 (Run BFH.1, BIH.1およびBCH.1) について、平衡状態における洗掘形状の特性量を比較したものである。これらは、いずれも等流状態における摩擦速度 U_{*02} と河床材料の平均粒径に対する限界摩擦速度 U_{*c} の比が $U_{*02}/U_{*c} \approx 1.3$ と概ね等しい場合であって、最大洗掘深 z_m はほぼ同じ値となっている。このことは、洗掘深が主に U_{*02}/U_{*c} によって規定されることを示唆するものである。一方、洗掘穴の長さ L_t は、同じ U_{*02}/U_{*c} の値に対して粒径が大きくなるほど、すなわち、水深が大きいくほど長くなる傾向にある。

(3) 護床工の様式による洗掘形状の相違

図-9は、3種の護床工粗面 (ホロースケアブック、6脚ブロック、半球粗度) および滑面について、等しい流量条件下における細砂河床の動的最終洗掘形状 ($t = 60\text{min}$) を示したものである。また、洗掘穴の最深部における河床の横断形状を比較すれば図-10のようであって、図中の縦の実線は各粗度要素の中心線の位置を表し、破線は粗度要素間の中心線を示す。

まず、護床工の様式が異なる場合について、洗掘穴形状の全般の特徴を述べる。護床工下流部の河床の横断形状は、ホロースケアの場合と同様に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なった凹凸のある状況を示すが、凹凸の間隔および高低差は、粗度要素の形状と配列および横断方向の間隔によって決定される。すなわち、粗度要素が千鳥配列であって粗度間隔が最も小さく、しかも粗度の形状が最も滑らかである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ず、ほぼ平坦な横断形状を示す。6脚ブロックの場合は、ホロースケアブックと半球粗度の中間であって、洗掘穴に横断方向の凹凸は認められるがその間隔は短く、凹の形状は最深部に幅をもたない3角形となる。また、洗掘穴中央部の縦断形状に関しては、粗度変化点での洗掘量を除けば、ブロックによる顕著な差は現れていない。

一方、滑面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 $x = 5\text{cm}$ まで横断方向にほぼ一様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にもかかわらず、 $x = 7 \sim 12.5\text{cm}$ の区間では水路中央部の河床は上昇している。しかし、 x が 15cm を越えると逆に水路中央部が大きく洗掘されていて、そこに最大洗掘深が現れており、一方、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って、下流砂面上に粗度変化点の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、最大洗掘深および洗掘範囲は、ともに護床工のある場合よりも大きくなっている。このように、水叩きで射流が持続する場合には、下流端の射流状態と衝撃波を除くために粗度の大きい護床工の必要性が指摘できる。

図-11は、動的平衡状態に達したと考えられる $t = 60\text{min}$ での無次元縦断形状を比較したものである。また、表-5は、図-6で定義される最大洗掘深 z_m とそれが生じる位置 L_m 、粗度変化点での河床低下量 Z_s 、洗掘長さ L_t 、洗掘穴上流側斜面の角度 φ_u および下流側斜面の角度 φ_d の平衡値をまとめたものである。平衡状態での洗掘穴の縦断形状は、 φ_u が φ_d よりもわ

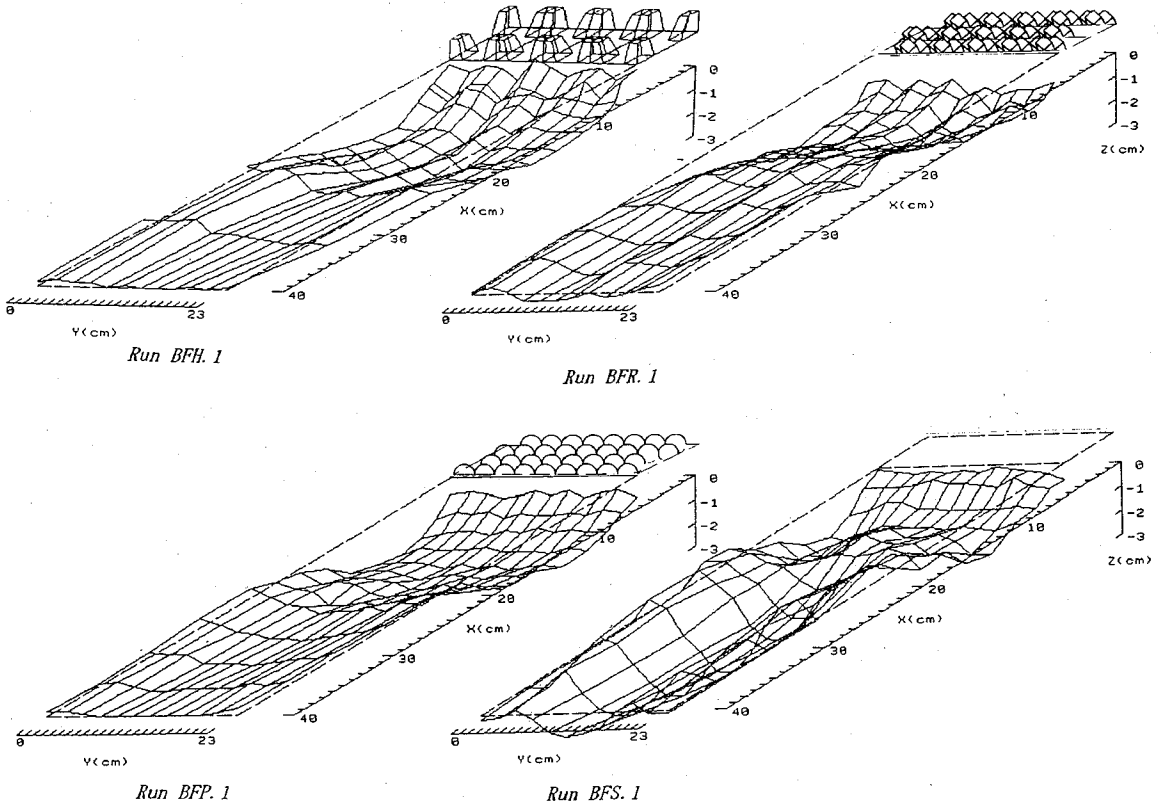


図-9 護床工様式による洗掘形状の相違

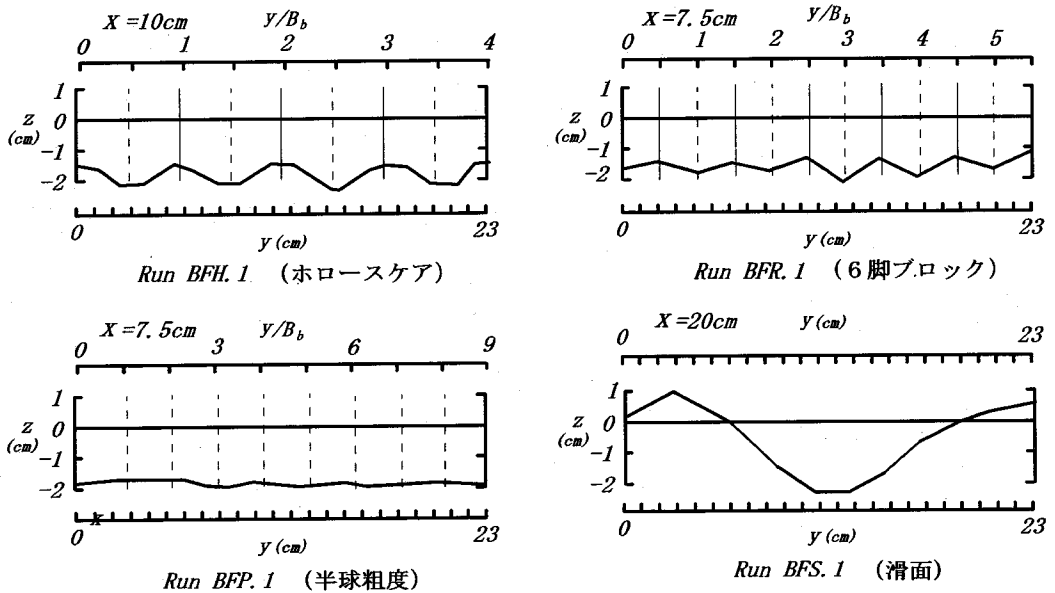


図-10 護床工様式による洗掘穴最深部の横断形状の比較

表-5 最終河床形状の特性

実験番号 Run	護床工様式	Z_m (cm)	L_m (cm)	Z_s (cm)	L_t (cm)	Φ_u (deg)	Φ_d (deg)
BFH.1	ホロースケア	2.3	8.0	0.6	2.3	1.5	1.7
BFR.1	6脚ブロック	2.3	8.0	1.4	2.5	1.5	1.5
BFP.1	半球粗度	2.0	7.7	0.4	2.3	1.3	1.7

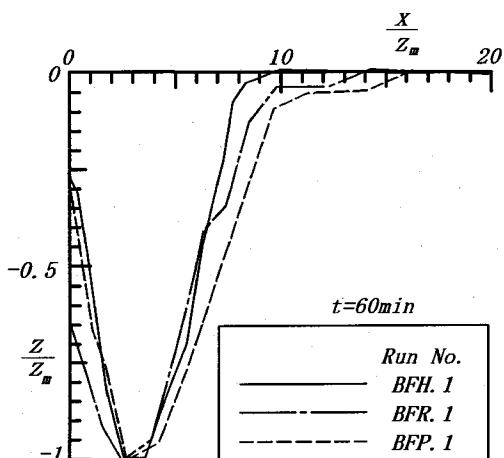


図-11 平衡状態における洗掘最深部の無次元河床形状（護床工の様式による比較）

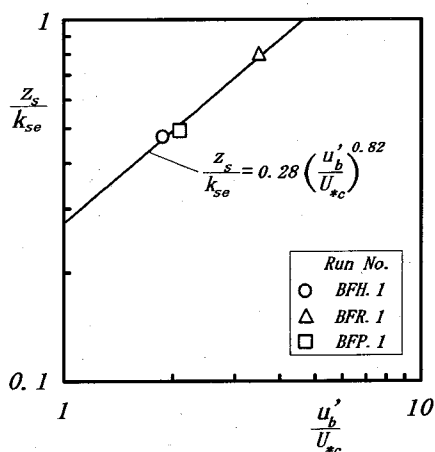


図-12 粗度変化点の洗掘深と底面乱れ強度の関係

ずかに大きいと同程度であって、最深部を通る鉛直線に対してほぼ対称な形状を示しており、3者とも概ね相似であると見なしうる。 Z_m および L_m の絶対値についてみると、Run BFH.1 および BFR.1 の場合に比べて、Run BFP.1 ではいずれも小さな値となっている。これは、前者で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に対して、後者の場合には粗度要素の間隔が短く、単位幅流量の横断方向変化が小さいためであると思われる。

つぎに、護床工の様式によって洗掘特性の相違が最も顕著に現れた粗度変化点での河床低下量 Z_s について考える。 Z_s の値は、6脚ブロック (Run BFR.1) 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状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と考えられる。そこで、各護床工について粗度要素背後の流れ方向流速の乱れ強度 u'_b をパラメータとして Z_s との関係を検討した。図-12は、プロペラ流速計で測定した流速の時間変動記録から算定した u'_b と横断面内で最大の Z_s との関係を両対数で示したものであって、それぞれ、河床砂の移動限界速度 U_{*c} および護床工の相当粗度 k_{se} で正規化されている。図より、 Z_s/k_{se} と u'_b/U_{*c} は、両対数表示でほぼ直線関係にあり、つぎの回帰式が得られる。

$$\frac{Z_s}{k_{se}} = 0.28 \left(\frac{u'_b}{U_{*c}} \right)^{0.82} \quad (2)$$

(4) 混合砂礫河床の洗掘特性

図-13は、河床が混合砂礫で構成される場合について、ホロースケア護床工下流部の洗掘形状の時間的変化の一例 (Run BMH.2) を示したものである。ホロースケア護床工の下流部では、混合砂礫河床においても均一砂の場合と同様に、粗度変化点直下流のイボ要素間の延長上で深掘れが生じ、横断方向に凹凸のある3次元的な河床形状となる。しかしながら、混合砂礫の場合には、洗掘穴の最深部より下流では河床の横断形状はほぼ平坦であり、また、洗掘深に対する洗掘長さの比は均一砂の場合よりも大きくなっている。さらに、平衡状態における最大洗掘深 Z_m についてみれば、混合砂礫の平均粒径に対する限界摩擦速度 U_{*c} と等流状態での摩擦速度 U_{*02} との比 U_{*02}/U_{*c} は、Run BFH.1 の場合とほぼ等しいものの、Run BMH.2 の Z_m の値 (= 2.1cm) は、Run BFH.1 のそれ (= 2.3cm) に比して小さい。この原因は、洗掘穴の最深部および下流斜面で河床のアーミングが生じていることによる。すなわち、河床近傍の細粒分が吸い出されて粗粒化し、河床表面が礫のみで覆われることによって、イボ要素間での深さ方向の洗掘が抑制された

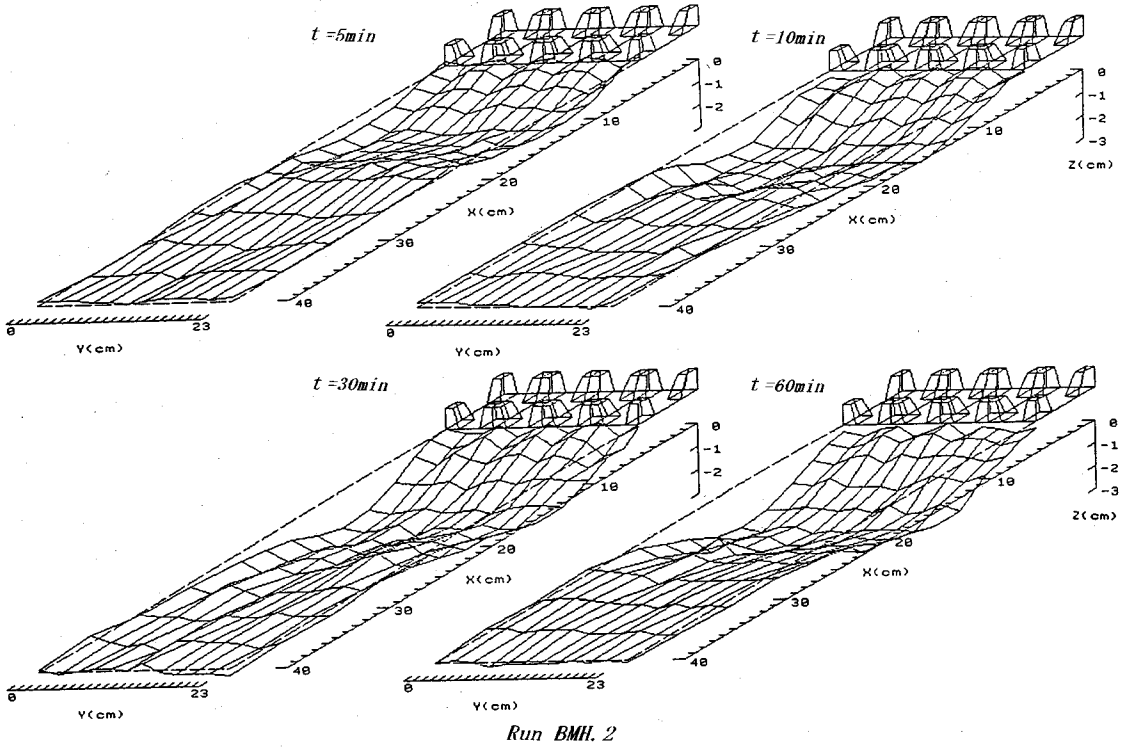


図-13 混合砂礫河床における護床工下流部の洗掘形状の時間的变化

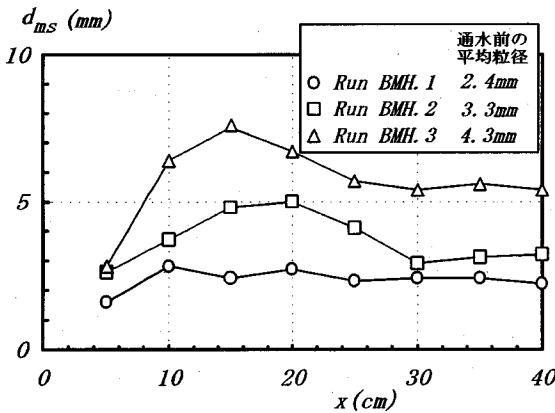


図-14 通水後 $t = 60\text{min}$ における河床表層砂の平均粒径の流下方向分布

ためであると考えられる。したがって、本実験ケースのように、等流状態における掃流力が礫の限界掃流力以下の場合には、礫の存在によって洗掘穴における細砂の流送を低減させる効果が期待できよう。

つぎに、図-14は、実験終了後 ($t = 60\text{min}$) の洗掘穴表面の土砂を X 方向に 5cm ピッチで最大礫径の2倍に当たる約 2cm の厚さで採取し、その平均粒径 d_{ms}

の流下方向分布を示したものである。 d_{ms} は、いずれも洗掘穴の最深部 ($x = 15\text{cm}$) 付近で最大となり、これは河床せん断応力のピークとも一致しており、ここで最も粗粒化が進行していることを示している。この傾向は、粗粒分の割合が大きい場合ほど顕著である。一方、洗掘穴の下流では、 d_{ms} の流下方向への変化は小さいのに対し、粗度変化点の直下流部 ($x = 5\text{cm}$) で d_{ms} が最小となっているのは、洗掘穴の上流斜面上での主流の剥離に伴う渦に細粒分が捕捉され、河床に堆積したことによるものと考えられる。

(5) 最大洗掘深およびその発生位置に関する検討

水門および床止め下流部の局所洗掘に関しては、従来より河川構造物の安定性という工学的要請から最大洗掘深を推定するための多くの経験式が提案されている。それらの式は、洗掘現象を支配する要因の中から、次元解析と実験結果に基づいて現象をとくに支配する無次元量を各研究者が抽出して得たものであるが、その多くは、式(1)のような水深あるいは砂粒径に対する最大洗掘深の比が時間のべき乗に比例するとしてべき乗則に帰着されている。ここでは、まず、その適用範囲が明確であって、流路および河床砂などの実験条

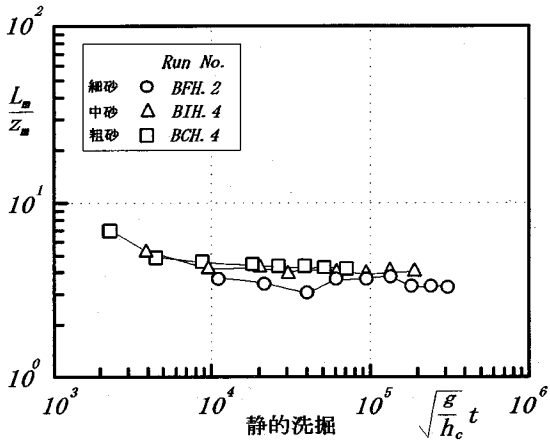
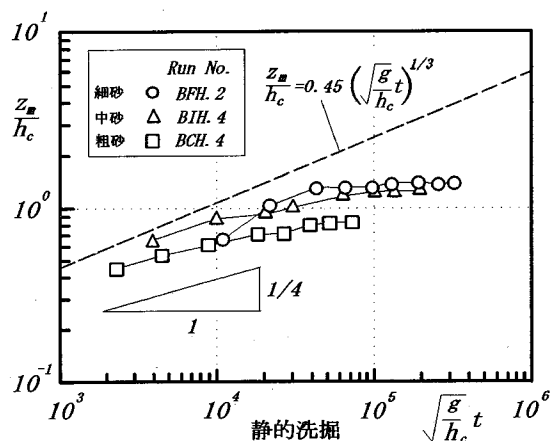
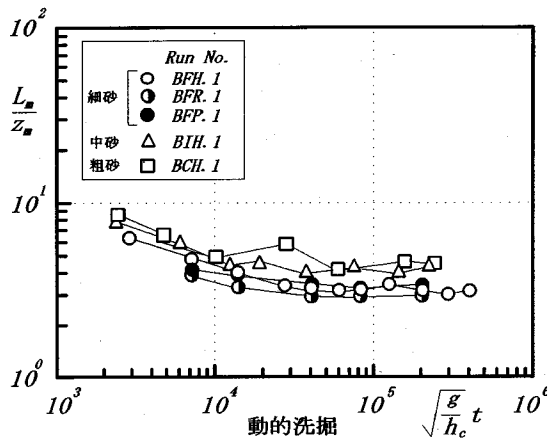
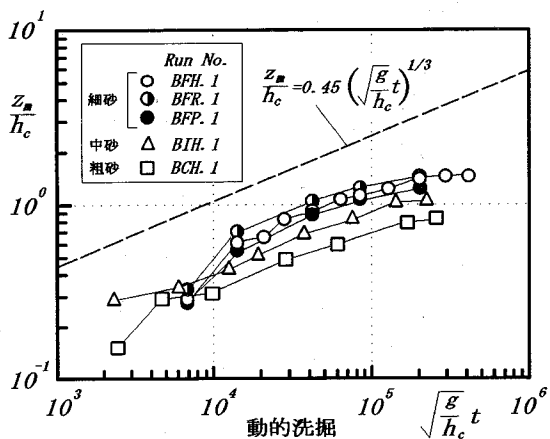


図-15 最大洗掘深の時間的变化

図-17 最大洗掘位置の時間的变化

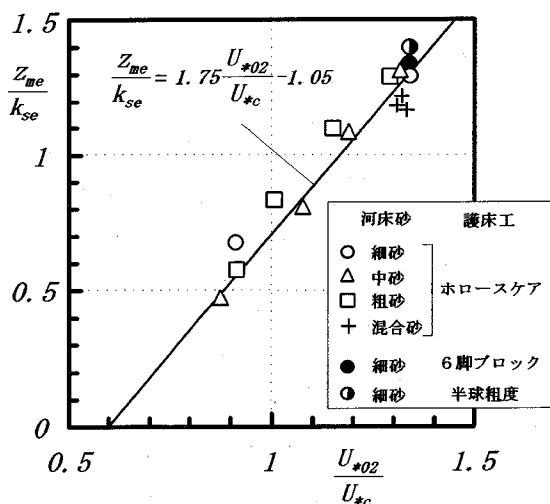


図-16 平衡状態の最大洗掘深と摩擦速度の関係

件が本実験と類似している鈴木ら³⁾の実験式を取り上げ、護床工下流部の洗掘穴の発達に対する適用性について検討する。

図-15は、動的および静的洗掘における最大洗掘深 z_m の時間変化を、鈴木らの方法にならって限界水深 h_c で正規化し、両対数表示したものである。図中の破線は鈴木らの実験式

$$\frac{z_m}{h_c} = \alpha \left(\sqrt{\frac{g}{h_c}} t \right)^{1/3} \quad (3)$$

である ($\alpha = 0.45$)。

まず、動的洗掘について考える。洗掘初期および平衡状態となる $\sqrt{g/h_c}t > 2 \times 10^5$ の領域を除けば、実測値はいずれの場合も上式と平行な直線の変化となっていて、 z_m/h_c の値は $(\sqrt{g/h_c}t)^{1/3}$ に比例して増大することを示しているが、比例定数 α は鈴木らが示した 0.45 よりも小さく、護床工様式や河床砂の粒径によって異なるものと判断される。 h_c が等しい細砂を用いた 3 ケースを比較すると、 α の値は、Run BFR.1, BFH.1, BFP.1 の順で大きくなり、護床工の相当粗度 k_{se} に比例する傾向にある。このことから、平衡状態における最大洗掘深 z_{me} を護床工の相当粗度 k_{se} を用いて正規化し、 U_{*02}/U_{*c} との関係を示せば図-16

のようである。 z_{me}/k_{se} と U_{*02}/U_{*c} は、静的洗掘 ($U_{*02}/U_{*c} < 1$) および動的洗掘 ($U_{*02}/U_{*c} > 1$) を問わず線形関係にあって、次式で表現できる。

$$\frac{z_m}{k_{se}} = 1.75 \frac{U_{*02}}{U_{*c}} - 1.05 \quad (4)$$

また、混合砂礫河床の場合には、上述のように平均粒径を用いて整理すると、 z_{me}/k_{se} の値は一樣粒径の場合よりも小さくなるが、洗掘深を評価する上では安全側であることを考慮すれば、上式が適用できるものと考えられる。

つぎに、最大洗掘深が生じる位置までの距離 L_m と z_m の比を求め、その時間変化を示せば図-17のようである。(2)で述べたように、洗掘初期では、最大洗掘深 z_m の時間的な増加率が L_m のそれよりも大きいために、 L_m/z_m の値は時間の経過とともに減少するが、 $\sqrt{g/h_c}t$ が 10^4 を越えると粗砂、中砂、細砂の順に時間的に変化しないほぼ一定の値となる。その値は、細砂の実験ではいずれも $L_m/z_m = 3.0$ 程度であって、河床の粒径が大きくなるほど増加する傾向にある。

(6) 護床工下流部の流れ特性に関する検討

a) 洗掘穴内の流速分布

図-18は、Run BFH.1の平衡状態 ($t = 60\text{min}$) における護床工下流部の洗掘穴内の流速分布を示したものである。まず、粗度要素間の延長上の流れについてみる。洗掘穴の上流斜面上 ($x \leq 5\text{cm}$) では、河床の低下とともに洗掘穴内の流速は減少し、底面付近において一樣な小さな流速を持った領域が現れる。ここの流速は 10cm/s 程度であって、 $x = 10\text{cm}$ の洗掘の最深部までは流下方向にもほとんど変化しない。水面近傍では、依然上流部の速い流速が保持されていて、流速の鉛直方向分布は、水面近くの最大流速から河床に向かって急激に減少する指数関数型の分布を示す。下流斜面上 ($x > 10\text{cm}$) では、最深部付近で下方に移動した主流水脈が斜面に沿って流れるので、水面近傍の流速は流下方向に減少し、逆に、河床近傍の流速は徐々に加速されて下流等流部の粗面対数則へと漸近する。

一方、粗度要素直下流の河床付近の流れは、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、 $x \leq 3\text{cm}$ では、流れの剥離に伴う逆流域が見られる。このことから、洗掘穴の上流側斜面の河床近傍では、図-19の模式図に示されるように、粗度要素の背後に生じる後流とともに、粗度要素の中心線上では下流部から上流部へ、粗度要素間の延長上では逆の方向へ河床面に沿って流れる平面的な循環流が生じているものと推察される。

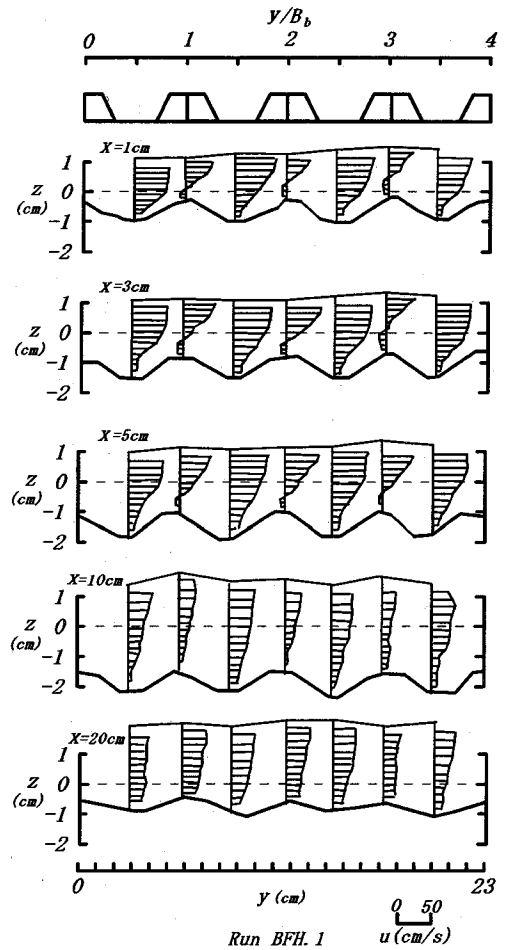


図-18 平衡状態におけるホーレスケ護床工下流部の流速分布

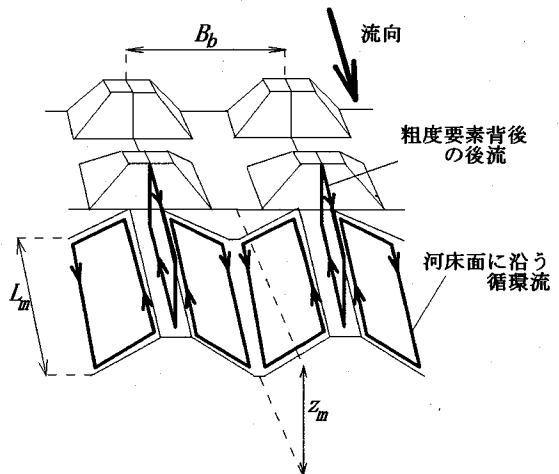


図-19 洗掘穴内の粗度要素背後の後流と河床面に沿う循環流の模式図

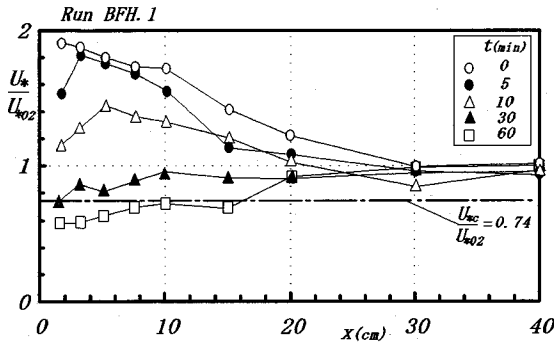


図-20 洗掘穴内の摩擦速度の流下方向分布

b) 洗掘穴上の河床せん断応力分布

せん断力計によって測定した摩擦速度 U_* の流下方向分布を洗掘過程の各段階について示せば、図-20のようである。 U_* は、下流等流部の摩擦速度 U_{*02} で無次元化されており、図中の一点鎖線は、砂粒子の無次元限界摩擦速度 U_{*c}/U_{*02} を示している。

初期段階における摩擦速度は、粗度変化点で最大（下流等流部の約2倍）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_{*02} に漸近する。この摩擦速度の流下方向変化を流砂の連続性の面から考えると、上流からは U_{*02} に対応した流砂量が供給されるが、粗度変化点の直下流ではそれを上回る輸送能力を持つ流れが生ずるので、護床工下流部では非平衡な流砂状態となり、上述したような洗掘形状が形成される。洗掘が進行すると粗度変化点近傍の U_* は急激に減少し、 U_* の最大値はほぼ洗掘穴の最深部に対応して $t = 5\text{min}$ では $x = 2\text{cm}$ 、 $t = 10\text{min}$ では $x = 5\text{cm}$ の地点に現れる。平衡状態（ $t = 60\text{min}$ ）では、摩擦速度は粗度変化点直下流で移動限界以下であり、流下方向に増加している。

洗掘深が増加すると、水流が洗掘穴内に落ち込み、粗度要素の背後で形成される渦の乱れが強まり、それによる巻き上げによって流砂量が增大するものと考えられる。また、上流から供給された砂の多くは、斜面上を転がりながらそのまま停止することなく、 U_{*02} にほぼ等しい値を持つ洗掘穴の下流側斜面まで達するために、洗掘穴の中央付近の掃流力が移動限界以下であっても連続的な移動状態を保ちうるものと思われる。このような砂粒の移動状態は、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いる。

なお、図-20の摩擦速度（掃流力）分布の関数形と非平衡流砂の関係式を用いた解析結果については既に発表¹²⁾しており、実験および実河川への適用性を確認している。

3. 護床工の洗掘に対する安定性の評価と洗掘の軽減法に関する考察

局所洗掘による護床工の破壊を防止するには、河道の特性およ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。これまでの考察によって、護床工下流部の局所洗掘機構が実験的に明らかにされた。ここでは、その結果に基づいて、最大洗掘深やその発生位置および護床工下流部の洗掘量と護床工の安定性との関連から、合理的な護床工の設計のための参考となる指針を示す。

(1) 洗掘深の推定と安定性の評価

まず、最大洗掘深について考える。実験結果より、平衡状態における均一砂の最大洗掘深 z_m は、砂面等流部の摩擦速度と砂の移動限界速度との比 U_{*02}/U_{*c} の関数として式(4)で表された。粒径 $d_m \geq 0.303\text{cm}$ の砂に対して $U_{*c} = \sqrt{80.9 d_m}$ とし、広幅断面の近似を用いると、式(4)はつぎのように書き直される。

$$\frac{z_m}{k_{se}} = \frac{1.75\sqrt{g}}{\sqrt{80.9}} \sqrt{i_b} \sqrt{\frac{h_0}{d_m}} - 1.05 \quad (5)$$

ここで、 k_{se} は護床工の相当粗度、 h_0 は砂面上の等流水深である。上式において、河床勾配 i_b をパラメータとして z_m/k_{se} と h_0/d_m の関係を示せば、図-21のようである。また、図-22は、 $h_0/d_m = 10, 50, 200, 500$ および1000の場合について、式(5)を図示したものである。

さらに、Chezyの平均流速式を用いて単位幅流量 q_0 を

$$q_0 = C \sqrt{i_b} h_0^{3/2} \quad (6)$$

と表し、 z_m と q_0 の関係を示すと

$$\frac{z_m}{k_{se}} = \frac{1.75g^{2/3}}{\sqrt{80.9}C^{1/3}} i_b^{1/3} \left(\frac{q_0}{\sqrt{gd_m^3}} \right)^{1/3} - 1.05 \quad (7)$$

のようであって、図-21と同様にこれを図化したものを図-23に示す。Chezy係数は、 $q_0/\sqrt{gd_m^3}$ によって変化するものと考えられるが、ここでは、自然河川の平均的なManningの粗度係数 $n_b = 0.035\text{m}^{-1/3}\text{s}$ に近い値として、 $C = 30\text{m}^{1/2}/\text{s}$ を仮定した。また、いずれの図にも、著者ら¹³⁾による万願寺川におけるホロスケア護床工下流の局所洗掘深の観測結果がプロットされている。現地での観測結果と曲線群との対応は良好であり、これらの図から所定の水深、あるいは単位幅流量に対する最大洗掘深が推定できるものと考えられる。また、最大洗掘深の許容値が設定され

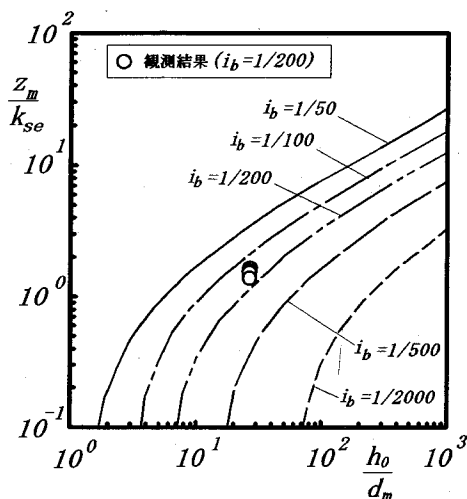


図-21 水深と最大洗掘深の関係

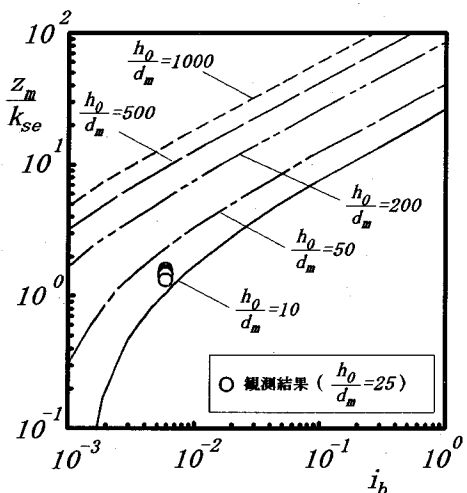


図-22 河床勾配と最大洗掘深の関係

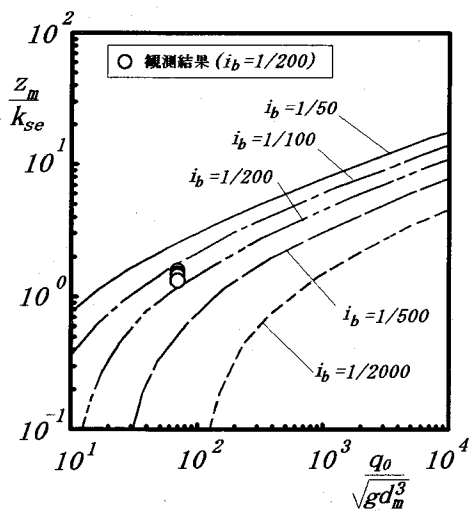


図-23 流量と最大洗掘深の関係

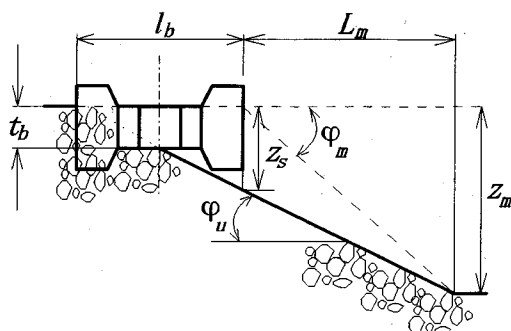


図-24 ブロックの安定条件に関する模式図

ば、それに対応する流量条件および河床材料の粒径を知ることができる。

つぎに、洗掘が生じた場合の護床工ブロックの安定性について考察する。実験および観測結果から、粗度要素基面より下部が地中に埋め込まれたホースケアブロック下流の洗掘形状は、図-24のように表される。すなわち、洗掘穴上流側斜面の勾配 $\tan\phi_u$ は、最大洗掘深 z_m とそれが生じる位置 L_m との比 $z_m/L_m (= \tan\phi_m)$ よりも小さく、ブロック下流端では z_s の河床低下が生じる。そこで、最下流端のブロック中心線上の洗掘深がブロックの厚さ t_b を越えたときに、自重によるモーメントが作用し、ブロックはバランスを失って洗掘穴内に転倒するものと考え、その安定条件は次式で示される。

$$(z_m - t_b) \cot\phi_u \leq \frac{l_b}{2} + z_m \cot\phi_m \quad (8)$$

ここで、 l_b はブロック1個の長さである。上式を z_m について解けば、ブロックの安定に関する最大洗掘深の許容値 z_{mc} は、

$$z_{mc} = \frac{t_b \cot\phi_u + \frac{l_b}{2}}{\cot\phi_u - \cot\phi_m} \quad (9)$$

で与えられる。いま、細砂における実験結果から $\cot\phi_m = 3.0$ 、 $\cot\phi_u = 3.9$ 、 $l_b = 5.7\text{cm}$ および $t_b = 1.2\text{cm}$ として、 z_{mc} を試算すれば $z_{mc} = 8.4\text{cm}$ となる。これらの値を用いて、図-21および図-23からブロックの安定に対する限界の水深 h_{0c} および単位幅流量 q_{0c} を求めれば、 $h_{0c} = 16\text{cm}$ 、 $q_{0c} = 0.19\text{m}^2/\text{s}$ である。

式(9)は、洗掘形状のみから検討したホースケア護床工の安定性に関する一つの目安を与えるものであって、ブロック下流端で生じる渦による乱れ的作用、下層の浸透流、ブロックの自重および隣接するブロック間の摩擦・連結性などの影響は考慮されていない。したがって、護床工の様式によって安定条件は異なる。6脚ブロックの場合には、2.(3)で述べたように、粗

度要素背後の強い乱れによって護床工下流端の洗掘量 Z_s が Z_m の7割にも達しており、ブロックの安定性はホロースケアの場合に比較して劣るものと思われる。これより、単体ブロックの安定性からみた適正な護床工の様式としては、イボ粗度要素が直方体など単純な形状であって、下流砂床との境界面が幅方向に不整でなく、さらに、粗度高さに比してブロック長の大きいものが適しているものと考えられる。

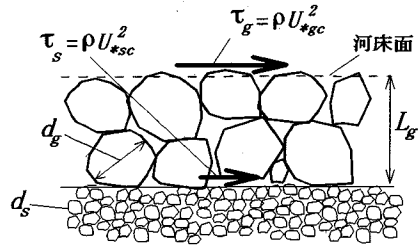


図-25 礫による護床工法の模式図¹⁴⁾

(2) 洗掘の軽減法と被災防止に関する指針

混合砂礫の実験結果からも知れるように、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考えられる。しかしながら、被覆礫の粒径が河床の構成材料に比して極端に大きければ、半球粗度の実験でみられたように、粗度が増大してその下流部で大きな洗掘が生じることになる。したがって、効果的に洗掘を軽減する方法としては、礫の粒径を流下方向に次第に小さくして在来河床の粒径に漸近させるか、あるいは、粒度分布の大きな礫床河川では、河床材料の90%粒径程度の礫を被覆材として用いる捨て石工法が有効であると思われる。

鈴木・岩月¹⁴⁾は、床止め落差工下流部の均一砂の洗掘を礫による捨て石工で防止することを考え、詳細な実験に基づく考察から、洗掘が生じない礫層厚の条件を見出した。すなわち、保護工としての礫が流されず、しかもそれによって下層の河床砂に働く掃流力が砂の限界掃流力にまで減衰され、洗掘が生じなくなると仮定した(図-25)。このとき、河床表面の礫も移動限界状態にあると考えて、礫の層厚 L_g と粒径 d_g の比 L_g/d_g と掃流力の減衰率 β_g との関係を次式で表した。

$$\beta_g = \frac{U_{*sc}^2}{U_{*gc}^2} = \exp\left(-0.7 \frac{L_g}{d_g}\right) \quad (10)$$

ここで、 U_{*sc} および U_{*gc} は、それぞれ砂および礫の移動限界速度である。砂の粒径 d_s が 0.303cm 以上であれば、砂と礫の無次元限界掃流力は等しいと考えられるから、 $\beta_g = d_s/d_g$ となる。

この結果を混合砂礫の場合に適用して、 $d_s = d_{10}$ 、 $d_g = d_{90}$ と置けば、 $\beta_g = d_{10}/d_{90}$ に対する90%粒径の礫層厚 L_{90} が求まる。一方、礫に対する最大洗掘深の予測値を Z_{m90} とすると、局所洗掘を軽減するための捨て石工の厚さは、 $L_{90} + Z_{m90}$ となる。また、計画流量以下の流量条件においても Z_{m90} の洗掘を許容するならば、捨て石工下流部の洗掘を防止し、かつ被覆厚を小さくする意味から、図-26に示すように、初期の河

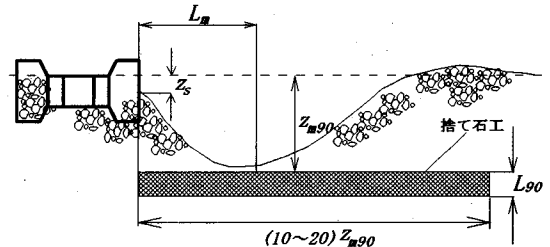


図-26 捨て石工による洗掘軽減法の一例

床面より Z_{m90} だけ下層に L_{90} の厚さで礫を埋設する方法が効率的である。捨て石の施工長さは、洗掘穴の流下方向の大きさと等しくとれば、 Z_{m90} の10~20倍程度必要であろう。

また、護床工下流端の洗掘によるブロックの転倒および流出に対しては、護床工下流端に矢板を施工し、ブロック下部の土砂の流出を防止する方法が考えられる。矢板の根入れ長さとしては、実験結果から判断して、予測される最大洗掘深の5~7割が目安となる。

4. 結論

本研究は、護床工周辺部の流れおよび局所洗掘の水理機構を明らかにし、洗掘の防止・軽減をはかることを目的として、系統的な実験的検討を行ったものである。以下に得られた主要な知見をまとめる。

- (1) 護床工直下流の洗掘形状は、各ブロックの粗度要素突起間の延長測線上で深掘れが著しく、横断方向に凹凸のある3次元的な形状を示し、その間隔や高低差は護床工ブロックの形状と配列および横断方向の間隔によって異なる。一方、滑面路床の下流部では、射流が持続するため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発生して、護床工がある場合よりも大きな洗掘穴が形成される。
- (2) 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。

- (3) 最大洗掘深の時間変化は、動的洗掘では経過時間の1/3乗、静的洗掘では1/4乗にほぼ比例するが、比例係数は河床砂の粒径によって異なる。平衡状態における最大洗掘深と護床工の相当粗度高さの比は、砂面等流部の摩擦速度と砂の移動限界速度との比 U_{*02}/U_{*c} の関数で表される。
- (4) 砂床上の摩擦速度は、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。さらに洗掘穴が大きくなると、摩擦速度は逆に粗度変化点直下流で最小値をとり、流下方向に増加する。
- (5) 河道の計画規模の流量条件に対して、河床勾配や砂粒径をパラメータとする最大洗掘深を推定する図を作成するとともに、局所洗掘に対する最下流端の護床工ブロックの安定条件を示した。また、粒度分布の大きな礫床河川における護床工下流部の局所洗掘の軽減対策として捨て石工に着目してその有用性と施工範囲について論じ、捨て石工下流の洗掘防止と施工量の節減に対して有効な工法の一例を提案した。

参考文献

- 1) J. Farhoudi and Kenneth V. H. Smith: Local Scour Profiles Downstream of Hydraulic Jump, *JOURNAL OF HYDRAULIC RESEARCH*, IAHR, Vol.23, No.4, pp. 343-358, 1985.
- 2) 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.
- 3) 鈴木幸一, 道上正規, 川津幸治: 床固め直下流部の流れと局所洗掘について, 第26回水理講演会論文集, pp. 75-80, 1982.
- 4) 道上正規, 鈴木幸一, 川津幸治: 床固め直下流部の局所洗掘過程のモデル化, 京都大学防災研究所年報第32号B-2, pp. 1-14, 1982.
- 5) 山下彰司, 清水康行, 渡邊康玄: 急流河川の床止め近傍の河床変動, 水工学論文集第36巻, pp. 35-42, 1992.
- 6) 松下 玄: 頭首工護床工の洗掘機構の基礎的研究, 農業土木学会論文集, 第91号, pp. 73-87, 1986.
- 7) H. N. C. Breusers: Conformity and Time Scale in Two-Dimensional Local Scour, *PROC. SYMP. ON MODEL AND PROTOTYPE CONFORMITY*, HYDR. RES. LAB., POONA, pp. 1-8, 1966.
- 8) G. J. C. M. Hoffmans and R. Booij: Two-Dimensional Mathematical modelling of Local-Scour Holes, *JOURNAL OF HYDRAULIC RESEARCH*, IAHR, Vol.31, No. 5, pp. 615-634, 1994.
- 9) G. J. C. M. Hoffmans and R. Booij: The Influence of Upstream Turbulence on Local-Scour Holes, *PROC. XXV CONGRESS OF IAHR*, Vol. II, pp.A471-A478, 1993.
- 10) 中村俊六, 中村勝男, 田中昌治: 3次元人工粗度の粗度特性に関する実験的研究, 第27回水理講演会論文集, pp. 807-813, 1983.
- 11) 久宝 保: 土砂の水中安息角について, 土木技術資料, 第6巻, 第5号, pp. 2-4, 1951.
- 12) 神田佳一, 村本嘉雄, 藤田裕一郎: 護床工下流部における洗掘過程の数値解析, 水工学論文集, 第37巻, pp. 657-662, 1993.
- 13) 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.
- 14) 鈴木幸一, 岩月章浩: 礫河床による段落ち直下流部の洗掘防止, 第47回土木学会年次学術講演会講演概要集 II, pp. 138-139, 1992.

(1995. 12. 25 受付)

LOCAL SCOUR AND ITS REDUCTION METHOD IN DOWNSTREAM OF BED PROTECTION WORKS

Keiichi KANDA, Yoshio MURAMOTO and Yuichiro FUJITA

This study deals with local scour in downstream of bed protection works. In order to establish the reasonable design of bed protection works, the experimental study was carried out in the case of sudden change in bed roughness longitudinally from a rough bed consisting of several types of bed protection works to a movable bed under dynamic and static condition of bed load. Variations of bed profile and the maximum depth of scour hole were discussed and flow characteristics, such as, velocity distribution and bed shear stress were measured at several stages of scour. As the result, we proposed a method to reduce scour depth by using rubble works.