

護床工下の河床材料の抜け出し及び下流跳水の 非定常性と護床工の応答特性

STUDY ON MOVEMENT OF BED PARTICLE UNDER BED PROTECTION
WORKS, UNSTEADY OF HYDRAULIC JUMP AND RESPONSE OF ITS WORKS

川口広司¹・諏訪義雄²・高田保彦³・末次忠司⁴

Hiroshi KAWAGUCHI, Yoshio SUWA, Yasuhiko TAKATA and Tadashi SUETSUGI

¹正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

²正会員 国土交通省 河川局 河川計画課 (〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3合同庁舎3号館)

³正会員 (株)建設技術研究所 (〒305-8561 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)

⁴正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

Bed protection works are designed in conditions that hydraulic jump occurred on that works. But recently riverbed height is apt to come down and hydraulic jump is occurred in that downstream. In this study, it is objected to make an appraisal method for degree of risk of old bed protection works and a method to insure safety in a modification of that works.

In this paper, it is described that movement of bed particle under bed protection works with hydraulic jump occurred in that downstream. And it is cleared that unsteady flow of hydraulic jump makes pressure reduction of separation flow and movement of bed particle under bed protection works.

Key Words : bed particle, bed protection works, hydraulic jump, response, bag-type gabion

1. 序論

護床工は主に射流状態から跳水に至るまでの激しい流れによる洗掘を防止するために堰や床止めの下流に設置される河川構造物である。日本では高度成長期以後、多くの河川において河床は低下する傾向にある。さらに、既存の河川横断構造物上流からの土砂供給量は減少し、下流の河床は低下していることが多い。すなわち、堰や床止め上下流のエネルギー差が増加して設計時とは異なり護床工の下流で跳水が発生し、護床工が洪水により流される危険性は年々増加している可能性が高い。

現在、護床工は予想しきれないような上下流の河床変動に追従できるように屈撓性構造とすること、高流速が生じる区間で吸出し防止工を設けることが望ましいと示されている¹⁾。しかし、護床工下流で跳水が発生している場合には、護床工下から土砂が抜け出す現象に直下流の跳水と局所洗掘が関係する未解明な部分の多い現象となるため、護床工が流される危険性を判断できないだけでなく、堰や床止めの長期的な利用、維持管理のために護床工を改修する施策を示せないのが現状である。

既往の護床工の流失機構に関わる研究には、中川ら²⁾

の護床工下の浸透流、掃流力と空洞化の進行過程を検討したもの、鈴木ら³⁾の掃流力と石礫護床工下から抜け出す河床の砂との関係を導いたもの、前野ら⁴⁾の堰などの下流に生じる跳水の水面変動と河床砂内の間隙水圧の変動との関係を検討したもの、福岡・内田・山崎ら⁵⁾⁶⁾⁷⁾の粗度群に作用する流体力に着目したものなどがある。

跳水は $Fr=1.0\sim1.7$ で波状跳水、 $Fr=1.7\sim2.5$ で弱跳水、 $Fr=2.5\sim4.5$ では動揺跳水になるなど、主に Fr 数でその形態が分類される⁸⁾⁹⁾。動揺跳水とは跳水上流の流入ジェットが水路床に沿ったり跳水表面に沿ったりして変動する跳水のひとつの形態である。日本の急流河川においては床止め水叩き部の流れの Fr 数は2~3であることが多い¹⁰⁾。

本研究は、下流端護床工周辺の跳水を含む流れ場と護床工下から河床材料が抜け出す機構、ブロック群や袋体群からなる護床工が砂の抜け出しに伴い移動、変形し、流されるまでの応答特性、護床工の屈撓性や吸出し防止工の効果を明らかにし、既存の護床工を改修する際に重要となる護床工が流される危険度の評価法及びその対策の確立を目指すものである。本論文では、吸出し防止材を用いた時を含め、屈撓性を有する護床工下からの河床材料の抜け出し、護床工の応答特性を水面形、河床形状及び流れ場から検討している。

2. 護床工下河床材料抜け出し原因検討実験

(1) 実験条件及び方法

実験水路は長さ18m、幅50cmであり、 $d_{60}=4\text{mm}$ の混合砂を敷き詰めた移動床直線水路である。実験は縮尺1/8を想定して行われた。河床に設置された落差工は重さ5kgのホロスケャブロックと3.9kgのトウフブロックからなる図-1のようなものであった。落差工下流には袋体(case1~4)及びホロスケャブロック(case5)を縦断方向に5つ連結した群体の状態、さらに下流には縦断方向に5つ各々が独立した単体で設置した(case1,3~5)。横断方向には3列設置し、護床工の間に流れが生じないようにした。case4は連結袋体群と縦断方向に3列、計9つの単体袋体の下には吸出し防止材を敷いた。設置した袋体の重量は3.9kgであり、中込材の粒径は6.2mm(case1,2,4)及び34.9mm(case2)であった。袋材は幅30cm、網目2.0mmの長方形の網が2枚合わさったものであり、長さは44cm(case1,2)、33cm(case3,4)であった。袋材の長さが44cmのものは袋材の中で中込材が移動でき、袋体単体でも屈撓性を持っていた。連結袋体群は結び目を長さ方向に2箇所つくり縦断方向に連結した。単体袋体は長さ方向に結び目を1箇所つくり幅方向と水路縦断方向を一致させた。実験は段階的に流量、下流水位を変化させて実験を行った。図-2は各caseの流量、下流端の水位を変化させた時を通水開始からの時間でプロットしたものである。下流端の河床高は基準面からおよそ20~40cmの高さで変化した。条件の変化は各段階で局所洗掘がほぼ安定したと目視で判断した時に行った。水位・河床高の測定に用いられた水路側壁アクリル面のメッシュは10cm×10cmであった。

(2) 水位・河床縦断形状と実験で確認された現象

水面形、河床形状、護床工上部及び下部の縦断形状と各実験で起こった特徴的な流れと河床材料の挙動を示す。本実験で明らかになった跳水の非定常性と河床材料の抜け出しと護床工が流される機構の関係は次節に記す。

図-3.1はcase1の横断平均水位、河床高の縦断形状を示したものである。図より通水1時間前後に袋体護床工の最下流より上流で河床材料の抜け出しが起きたこと、通水2時間半後には連結袋体群最上流の袋体は他の袋体より高い位置にあったことがわかる。

case1での最初の袋体の移動は、通水1時間後、流量199l/s、下流水位76cmの時、下流から2つめの単体袋体下の河床材料が抜け出したことによる沈下であった。このとき、単体袋体5つの上部での水位勾配は1/7程度、最下流端の局所的な水位勾配は1/2程度、河床勾配は1/3程度であり、砂の抜け出し、袋体の沈下は約1分で停止した。河床材料が抜け出す直前、沈下した袋体の上下流のすき間は単体袋体の他の場所より少し大きかった。その後、

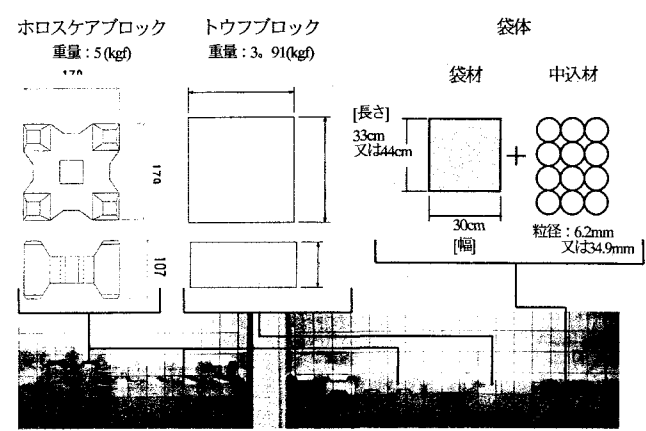


図-1 落差工の概略と用いた護床工ブロック及び袋体

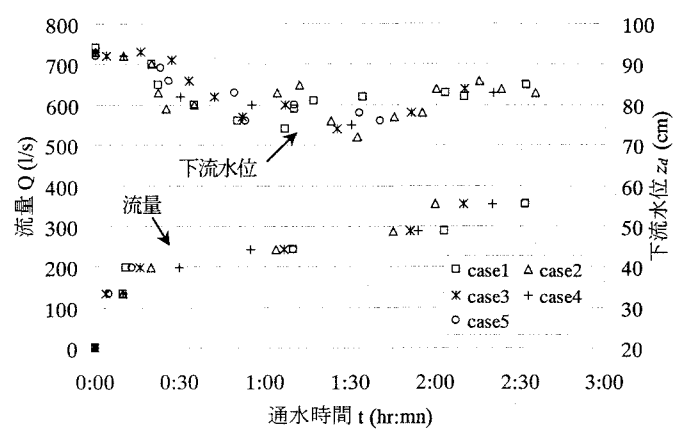


図-2 流量と下流端水位の変化

Case	中込材粒径	袋材長さ	護床工配置
1	6.2mm	44cm	袋体 連結5基縦断 +単体5基×3列
2	6.2mm	44cm	袋体 連結5基縦断×3列
3	34.9mm	33cm	袋体 連結5基縦断 +単体5基3列
4	6.2mm	33cm	袋体 連結5基縦断 (吸出し防止材有) +単体5基×3列
5	-	-	ホロスケャブロック 連結5基縦断 +単体5基×3列

下流端になった袋体は次々に滑動し下流に流された。単体袋体が全て流されると、連結した袋体群の下流より砂の抜け出しが始まった。連結袋体群の移動は下流端袋体の河床材料の抜け出しによる沈下に伴って起こった。その時、連結袋体群の上流端に位置する袋体は下の河床材料と共に移動し、他の袋体より高い位置に移動した。

図-3.2は、縦断方向に5つ連結した袋体群を護床工として用いたcase2の水位、河床高の縦断形状を示したものである。このcaseで起きた護床工袋体下部からの河床材料の抜け出しは、跳水が上下流方向に振動している時に数回起こった。また、通水1時間50分後、流量287l/s、

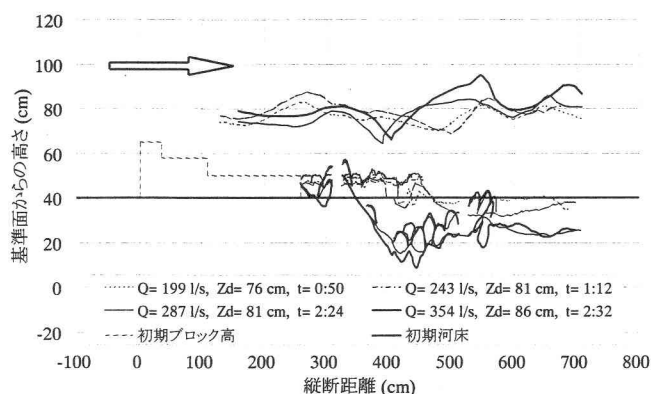


図-3.1 水面形と河床及び護床工の形状(case1)

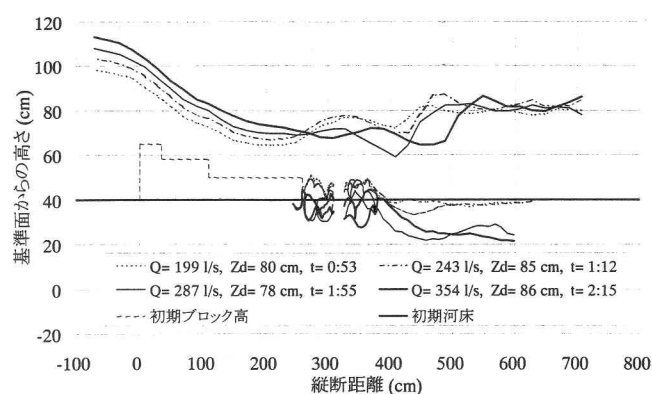


図-3.2 水面形と河床及び護床工の形状(case2)

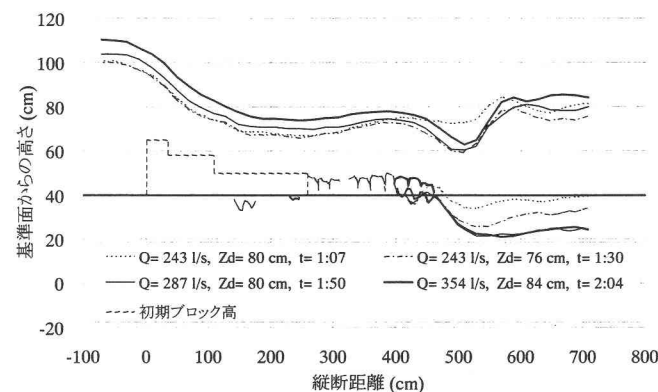


図-3.3 水面形と河床及び護床工の形状(case3)

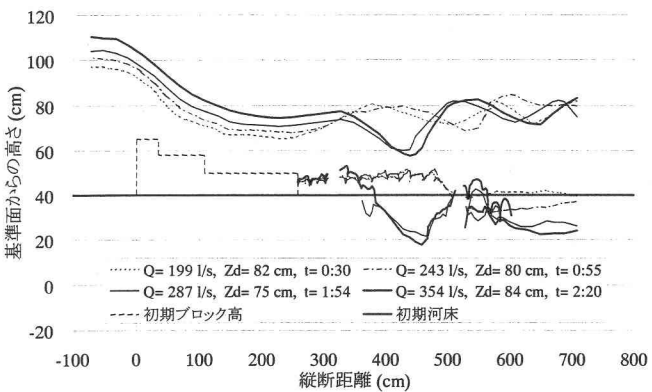


図-3.4 水面形と河床及び護床工の形状(case4)

下流水位77cmの時には落差工のトウフブロックと最上流袋体との間より高流速に伴う砂の吸出しが発生した。この時、最上流袋体下部では上流に向かって砂が動いていた。上流から3つめの袋体は他より高く、上流から2つめの袋体上部の水面は下に凸の形をしていた(写真-1)。

図-3.3は、粒径が34.9mmの玉石を中込材とした袋体を用いたcase3の水位・河床縦断図である。流量243l/s、下流水位74cmの通水1時間45分後には落差工水叩き部と想定されるホロスケヤブロック下部で砂の吸出しが発生した。図に示す砂の吸出しが停止した後の安定した状態で、上流からこのホロスケヤブロックの隙間に流れてくる砂粒子は自由落下より早い速度で河床に向かって移動していた。また、この砂の鉛直速度は下流に向かうほど速いことが観察された。流量354l/s、下流水位84cm、通水2時間25分後、跳水は上下流に振動している条件で跳水位置が上流に移動したときに下流の袋体が滑動して流された。

図-3.4は、粒径が6.2mmの袋体を吸出し防止材の上に設置したcase4のものである。吸出し防止材は連結ブロックと単体ブロックの3基の下に敷かれていた。最下流と下流から2番目のブロックには吸出し防止材が敷かれていなかった。case1の図にも見られるのと同様に流された単体袋体が積み上げられた上流で跳水が発生していた。通水2時間20分後には一度通水を止めて、これらの流された後に下流で停止していた袋体群を撤去した。その後流量354l/s、下流水位83cmで通水したが、連結袋体群及び吸出し防止材下の河床材料は移動しなかった。

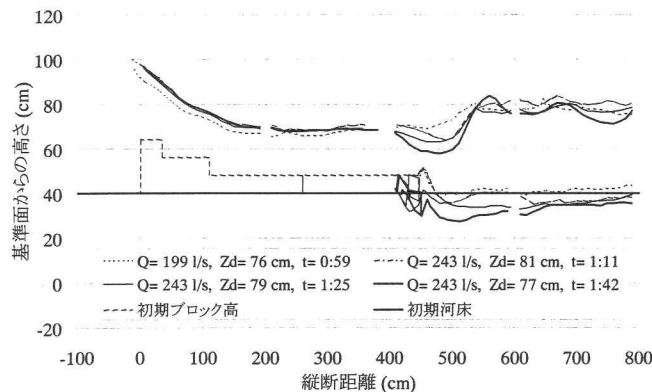


図-3.5 水面形と河床及び護床工の形状(case5)

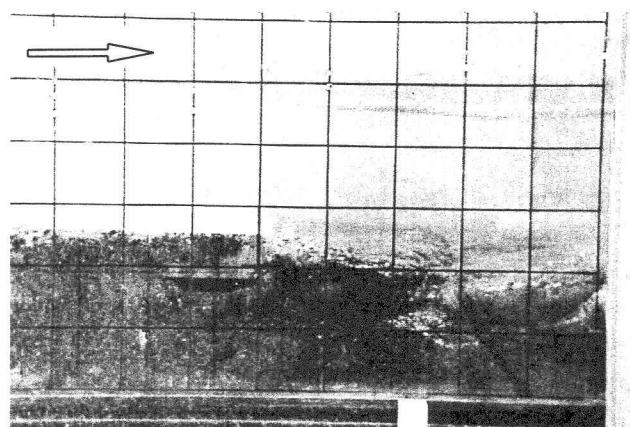


写真-1 護床工下からの河床材料の抜け出し

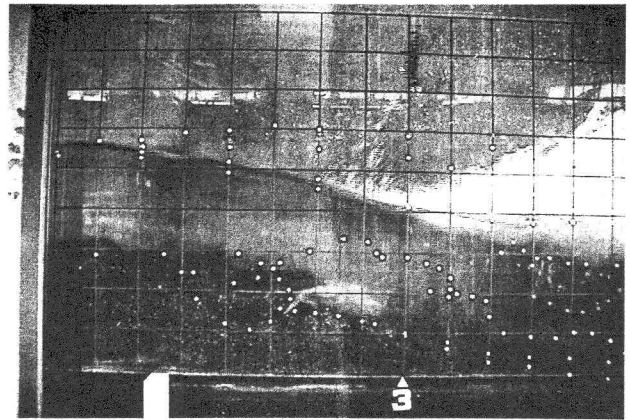
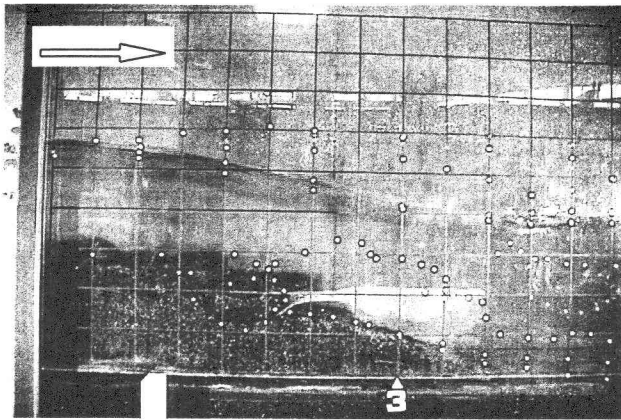


写真-2 振動跳水上流移動時の吸出し防止材による流れの可視化 (case4, $t=2$ 時間 30分 35秒 [左], 同44秒[右])

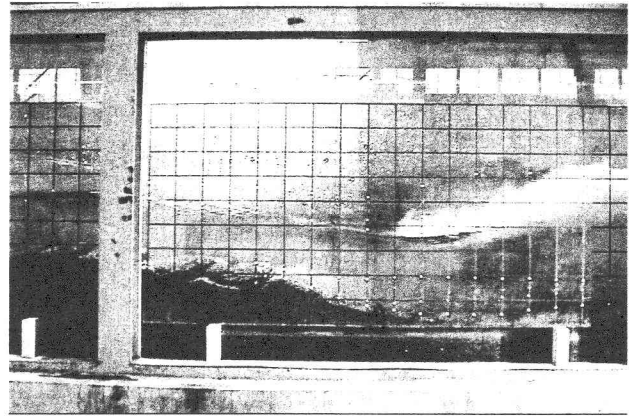
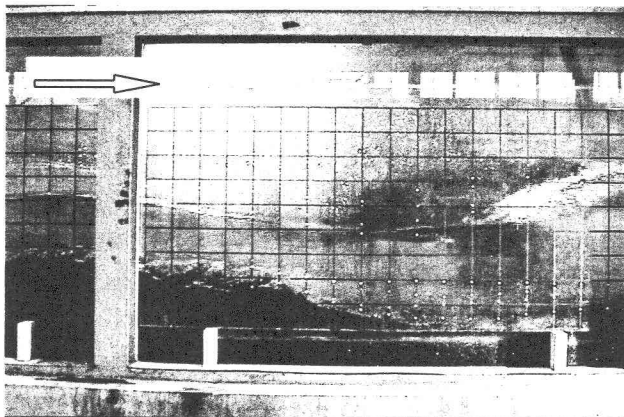


写真-3 振動跳水上流移動時に発生した下流端袋体下からの土砂の抜け出し (case2, $t=1$ 時間 45分 46秒[左], 同46分 05秒[右])

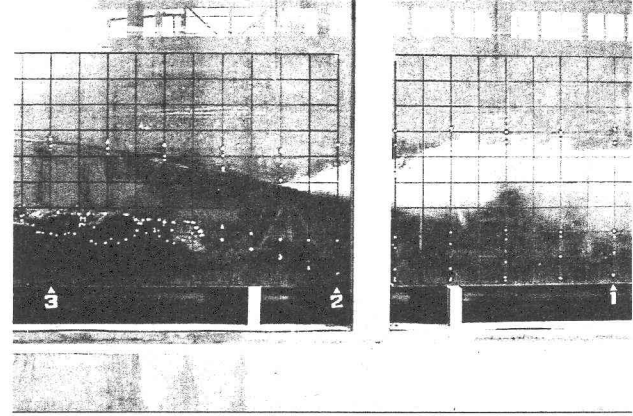
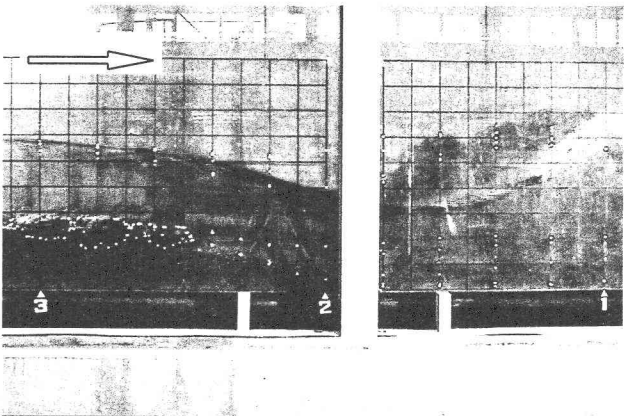


写真-4 振動跳수가上流に移動した時に下流端袋体が流される様子 (case3, $t=2$ 時間 29分 50秒[左], 同30分 18秒[右])

図-3.5に示すホロスケヤブロックを護床工として設置したcase5の水位と河床の縦断分布から、護床工下流が波状跳水であった時には下流に砂が堆積していたことがわかる。このcaseでは波状跳水から弱跳水に変化した後、下流から2つめのホロスケヤブロック下の砂が抜け出した。その直後、下流端のブロック下の砂も抜け出しブロックが沈下した。砂の抜け出しが停止した後、下流水位80cmを78cm、76cmと段階的に低下させると、下流から3つめのブロックよりめくれ上がり下流端から3つの単体ホロスケヤブロックが流された。

現在、護床工下の河床材料の移動に対しては、高流速

による吸出しと上下流の水位差で生じるパイピングの2つの機構が考慮されている¹⁾。本条件に対しては、護床工下の河床材料が移動しないように水面勾配が1/7以下となるように設計することとなる。河床材料が抜け出した時の局所的な水面勾配は水叩き部ホロスケヤブロック下での吸出しを除き1/7より大きかった。本実験から現在の設計では概ね安全側に設定されていると判断できる。

(3) 振動跳水による河床材料の抜け出しと袋体の移動

写真-2は吸出し防止材が護床工の下に設置された

case4において単体袋体がすべて流出した後の安定した状態でのビデオによる画像である。この時は跳水位置が常に上下流方向に振動しており、それに伴い吸出し防止材が上下流に伸縮を繰り返していた。左は跳水位置が下流に移動していた時の画像であり、護床工上からの高速流は水面に沿っていたと考えられる。右の画像は跳水位置が上流に移動していた時であり、高速流は河床に沿っていたと考えられる。振動跳水が下流に移動して伸びていた吸出し防止材は、跳水が上流に移動してくるとある領域の中でしか動かなかった。これは、跳水位置が上流に移動し高速流が河床に沿うと、護床工直下流の剥離域が小さくなるためと考えられる。

写真-3はcase2の下流端の袋体から河床の砂が抜け出している時(右)及びその直前(左)の画像である。砂が抜け出す直前の左の画像における袋体下流の河床形状と、抜けている時の右の画像を比較すると、砂が抜けた後に袋体直下流で砂の堆積が確認される。この砂の抜け出しは、この2枚の画像と前述の考察結果より、直下流の剥離域の圧力が小さいために起こったと考えられる。

写真-4は最下流の護床工袋体が流される直前と直後の画像である。直前には跳水が護床工下流100cm程度から始まっているが、直後は袋体下流40cmに位置している。袋体が流された原因は、跳水が上流に移動することにより流体力が大きくなったためと考えられる。

3. 護床工下流端袋体の流体力測定実験

移動床実験で得られた護床工下の河床材料の抜け出しと護床工が流される時の跳水による流れの非定常性が護床工直下流の圧力を低下させているという定性的な理解を、固定床段落ち部に設置した袋体1基に作用する流体力及び段落ち部直下流の河床面に作用する力を測定することにより定量的に検討した。

(1) 実験条件及び方法

実験水路は図-4に示すような段落ち部のある、長さ7.63m、幅0.5m、最急斜面勾配1/20の直線水路であった。段落ち部下流の流れが河床面に与える力、袋体に作用する流体力を分力計により測定した。この流体力は袋体から河床面へ作用する力を通して測定した。分力計は水压補償型のものであり、測定した河床の面積は縦断方向30cm×横断方向20cmであった。水位は側壁アクリルに作成した10cmメッシュを用いて測った。

(2) 護床工下流の跳水と下流端の袋体に作用する力

図-5は袋体を設置していないときの水位縦断分布を各流量に対して示している。段落ち部上流の射流領域でのFr数は1.2~1.5であった。この時の最下流の水位は流量が変化しても同じになるようにした。流量を増加させる

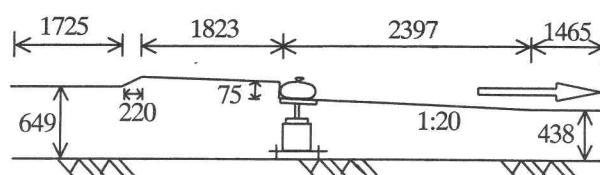


図-4 実験水路と分力計設置位置の概略図

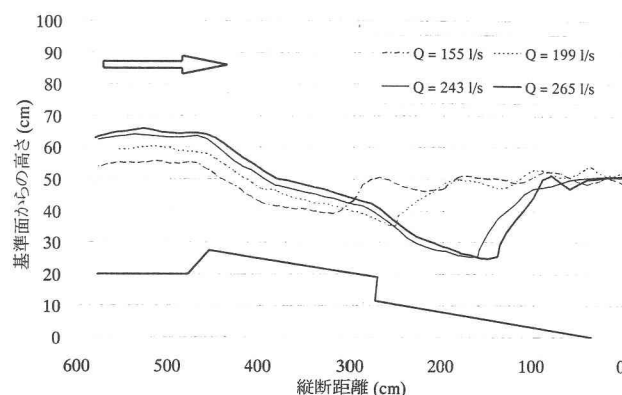


図-5 水位縦断分布と跳水

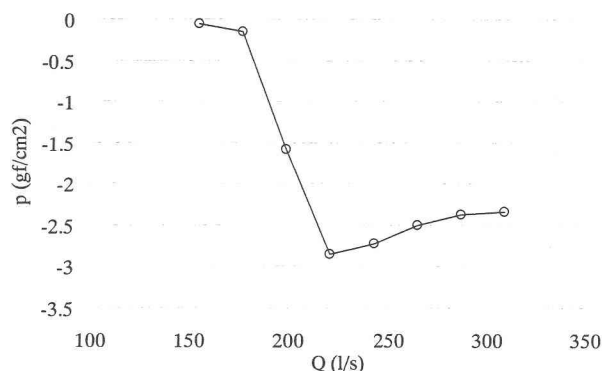


図-6 段落ち直下流の河床面に作用する圧力

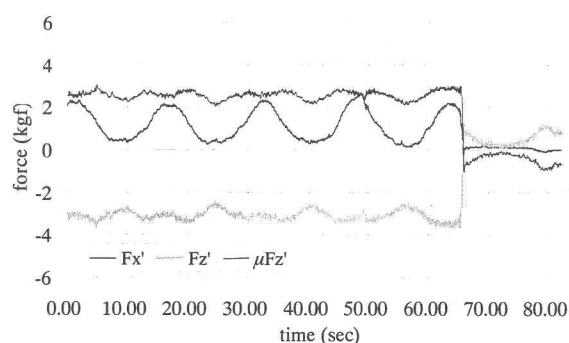


図-7 水面時間変動時に流出した袋体の流体力の変化

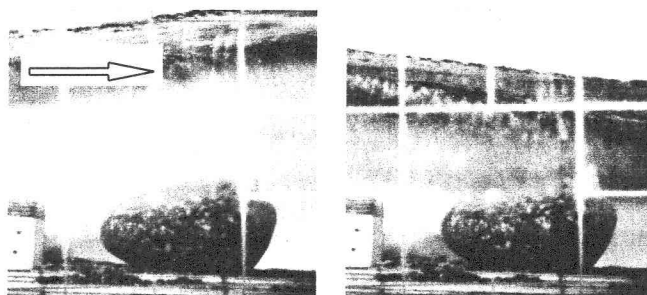


写真-5 流出直前水面変動 (左: t = 57.7 sec, 右: t = 63.6 sec)

に従い、跳水の位置が下流に移動し、波状跳水から弱跳水に変化した。

図-6は段落ち部直下流の河床面 600cm^2 に作用する力を平均的な圧力に換算したものである。ただし、圧力から静水圧の換算値が引かれている。波状跳水が段落ち部上流から発生している時は、直下流の河床面に作用する圧力は -0.2gf/cm^2 であり静水圧とみなせるのに対し、流量が大きく、段落ち部下流で弱跳水となっていた流量では水位による静水圧換算値より 2.9gf/cm^2 小さい圧力が作用していた。また、跳水位置が段落ち部より下流に移動すると底面に作用する力は静水圧換算値より 2.3gf/cm^2 小さい圧力に変化した。この時、静水圧として換算される値は約 20gf/cm^2 であった。

図-7は段落ち下流部中央に移動床実験のcase1と同様で袋材を三重にした袋体が流される直前までの力の測定結果を示している。段落ち部下流に設置されたこの袋体は滑動により流される様子が観察された。 F_x' は袋体に作用する力の斜面方向成分であり、 F_z' は斜面と垂直な方向の成分である。静止摩擦係数 μ は、袋体が動き出すときの最大引張力を測定することにより求められた。この時の流量は 188l/s であり、波状跳水から弱跳水に変化する遷移領域にあり、写真-5に示すように水面形が大きく振動しながら変化していた。写真の格子は側壁に取り付けたアクリル板上の $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ のものであり、袋体にかかる場所では交点のみを残した。図より、袋体に作用する流体力は水面の変化に伴い、平均値から F_x' が50%程度、 F_z' 15%程度変化していることがわかる。

本実験の条件では下流で跳水が発生する場合の護床工直下流の底面圧力は静水圧換算値より約15%小さくなり、護床工下流端の袋体に作用する力は跳水による流れの非定常性により平均値と同等の振幅を持って変化した。

4. まとめと結論

本研究は、既存の河川横断構造物を改修し継続的に利用する際の施策となる護床工の危険度評価法及びその対策法の構築を目的としており、現在はまだはじめの段階である。本論文では、護床工及び段落ち部下流で跳水を伴う移動床及び固定床実験を行い、吸い出し防止材を用いた時を含めて屈撓性を有する護床工下からの河床材料の抜け出し、護床工の応答特性を水面、河床形状及び流れ場から検討した。本実験より確認された現象及び明らかになった現象を以下に述べる。

- (1) 護床工下の河床材料の抜け出しは下流端から起こるとは限らず、護床工はこの抜け出しに伴い沈下しても流されない場合が多くあった。護床工袋体群の間から砂が抜け出す時、下流の袋体が高く、護床工下の河床材料が上流に向かう場合もあった。

- (2) 水叩き部ブロック下の河床材料の移動は、設計の手引きで定められている縦断水面勾配1/7以下という条件を越えて発生した。ブロック下の河床材料の抜け出しが停止した状態でブロック隙間に入り込む砂粒子の鉛直速度は自由落下より大きかった。
- (3) 護床工下流に振動跳水が発生している場で跳水位置が上流に移動する時、護床工上の高速流が直下流で河床に向かい、護床工直下流の圧力が小さくなることにより、護床工下の河床材料の抜け出しや護床工の移動が起こる。
- (4) 護床工下流の流れが波状跳水から弱跳水に変化する時、護床工に作用する流体力は流れの変化と共に大きく変動する。本実験では護床工下流の底面に作用する圧力は水位から算出できる静水圧換算値より約15%小さくなり、袋体の下流端護床工に作用する力は平均値と同等の振幅幅で変動した。

今後、流れの非定常性と河床変動特性、護床工周辺と河床材料内の流れの圧力分布に着目して研究を進めていく。

謝辞：本研究を進めるにあたり、同研究室の栗山卓也氏、新土木開発(株)の長谷川昇智朗氏、中村公広氏、(株)建設技術研究所の篠原剛氏には多大な協力を得た。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- (1) (財)国土開発技術研究センター：床止めの構造設計手引き、1998年12月
- (2) 中川博次、辻本哲郎、清水義彦、村上正吾：堰の一被災機構としての護床工からの砂のぬけ出しによる空洞化の進行過程、第31回水理講演会論文集、土木学会、pp359-364、1987年2月
- (3) 鈴木幸一、山本裕規、栗原崇：局所洗掘防止に有効な石礫護床工の条件、水工学論文集第39巻、pp695-700、1995年2月
- (4) 前野詩朗、山縣正明、里本公明：護床工からの土砂の抜け出しに及ぼす変動水圧の影響に関する研究、水工学論文集第45巻、pp409-414、2001年2月
- (5) 福岡捷二、水口雅教、内田龍彦、横山洋：水没・非水没大型粗度が混在する浅い流れに関する基礎的研究、水工学論文集第43巻、pp293-298、1999年2月
- (6) 内田龍彦、福岡捷二、福島琢二、田中正敏：大型粗度群上の浅い流れの平面二次元解析とその応用、土木学会論文集Ⅱ第57号、土木学会、pp93-103、2001年11月
- (7) 山崎幸栄、内田龍彦、福島琢二、福岡捷二：河川構造物下流の洗掘対策工の安全性に関する基礎的研究、第56回年次学術講演会概要集、pp272-273、2001
- (8) 土木学会：平成11年度版水理公式集、pp268-269、1999年
- (9) 後藤浩、安田陽一、大津岩夫：波状跳水の流況特性、水工学論文集第45巻、pp439-444、2001年2月
- (10) 田畑茂清、阿部宗平：流路工に関する研究(Ⅱ)、土木研究所資料943号、1974年3月

(2002. 4. 15 受付)