

# 水叩き下流護床工の石礫間詰めによる 落差工下部パイピング対策の研究

STUDY ON COUNTERMEASURES OF GRAVELS AMONG BED PROTECTION WORKS  
IN DOWNSTREAM OF APRON FOR PIPING UNDER FALLING WORKS

川口広司<sup>1</sup>・末次忠司<sup>2</sup>・日下部隆昭<sup>3</sup>・高田保彦<sup>4</sup>

Hiroshi KAWAGUCHI, Tadashi SUETSUGI, Takaaki KUSAKABE and Yasuhiko TAKADA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 研究官(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

<sup>2</sup>正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 室長(同上)

<sup>3</sup>正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 主任研究官(同上)

<sup>4</sup>正会員 (株)建設技術研究所 水理砂防センター 水理室 (〒305-8561 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)

Bed protection works are constructed for protection of local scour and as energy absorber in downstream of falling works. If hydraulic gradient in bed material were over standard value, seepage control seat would be designed for piping under the falling works. The hydraulic gradient is estimated by use of difference of water levels in upstream and downstream of the river crossing structures. But the hydraulic gradient may increase by bed deformation in down stream of the river crossing structures after the construction. And in the case of low density of concrete blocks of bed protection works, pressure would come down by separate flow in the downstream end of apron.

In this paper, it is examined that causes of piping under falling works and countermeasures of gravels among bed protection works in downstream of apron by large-scale hydraulic experiment.

*Key Words : Countermeasures of gravels, Bed protection works, Falling works, Piping, Separate flow, Large-scale hydraulic experiment*

## 1. 序論

護床工は落差工下流で生じる局所洗掘の防止や、高流速の減勢のために設計される。護床工の長さは跳水により流水のエネルギーを確実に減勢できるように決められる。護床工の構造は河床変動に追従できるように屈撓性を持たせて設計される。河川横断構造物の本体及び水叩き下部は、パイピングが起ることを防ぐため、条件に応じて遮水板が設けられる。遮水板は構造物上下流の水位差と浸透路長から算出されるクリープ比が基準値より小さくならないように設計される<sup>1)</sup>。しかし、河川横断構造物は設計後の河床変動により外力が想定以上になる可能性が十分にある。古い既設構造物は基準を満たしていないこともある。点検、維持管理や補修を行い、構造物の力学的安定性を確保して既設河川構造物の被災を減じることが求められている。

河川横断構造物の施工後に下流河床が低下して護床工直下流で跳水を伴う局所洗掘が発生する場合、下流端護

床工直下流の剥離流れが護床工下部河床材料の抜け出しや護床工の流失を引き起こす。また、護床工の沈下及び護床工下部の河床材料の抜け出しは護床工敷設範囲の中上流域でも起る<sup>2)</sup>。落差工などの構造物の安全性を検討する上で重要となる剥離流れによる圧力低下は数値解析モデルにより説明されつつある<sup>3)</sup>。

護床工ブロック群に間隙が存在し、洪水時に水叩き下流で剥離流れにより圧力低下が大きくなる場合、落差工及び水叩き下部の圧力勾配は想定より大きくなり、パイピングにより構造物下部に空洞化が起る可能性がある。石礫層のフィルター<sup>4)5)</sup>を護床工の間詰めを用いて、既設落差工の安全性を確保できれば、治水面及び経済面において効果的と考えられる。

本研究は、護床工上で跳水が発生し、護床工を構成するブロックが流失しない条件で大縮尺の移動床模型実験を行い、落差工下部のパイピング発生原因と、水叩き下流護床工の石礫間詰めによる対策指針について検討することを目的とする。

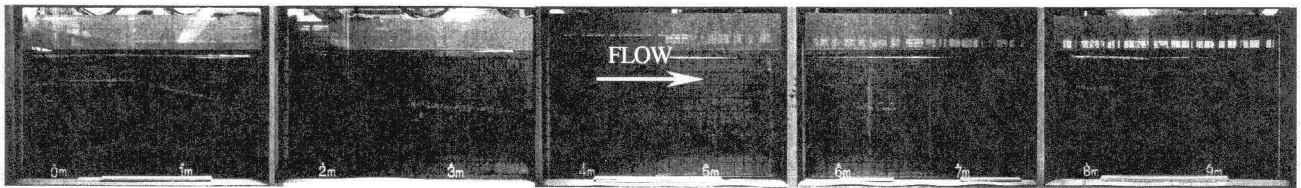


写真-1 落差工及び護床工実験模型 (水路中央10m区間)

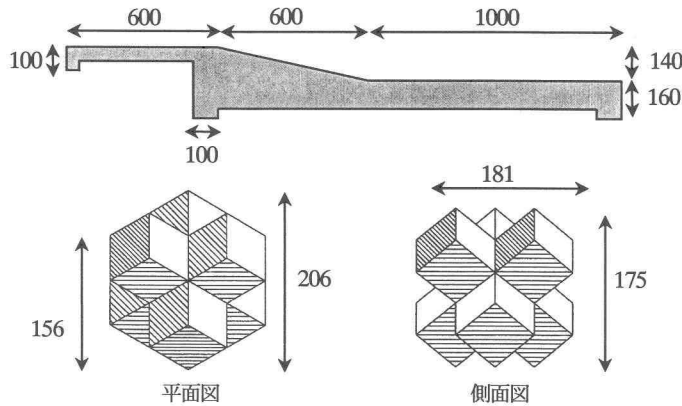


図-1 落差工及び2f六脚ブロック1/8模型 (単位:mm)

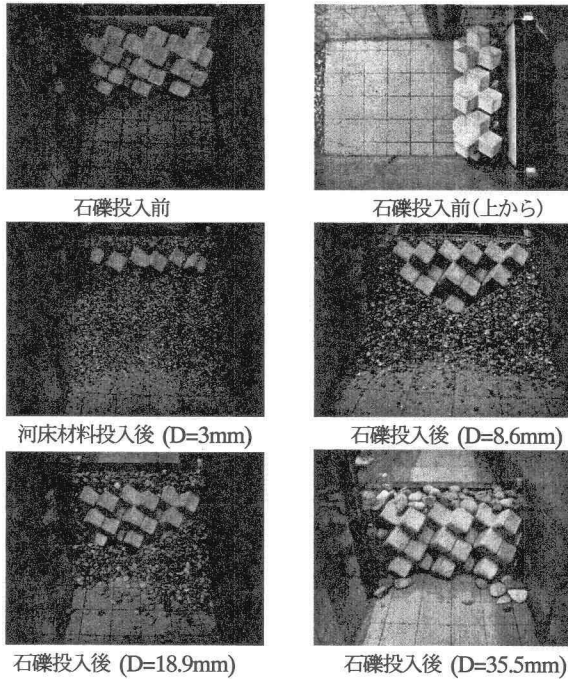


写真-2 対策工石礫径と護床工ブロック間隙の検討実験

## 2. 実験方法及び条件

### (1) 実験水路、落差工及び護床工模型と測定方法の概要

実験は写真-1に示す落差工及び護床工模型を設置した移動床直線水路で行われた。水路延長は18m、水路幅は0.52m、河床材料は3mmのほぼ様な砂であった。写真-1の距離は落差工模型上流端からの距離でありx軸の座標とする。右岸ガラス壁面に写る格子幅は10cmである。また、水路床からの高さをz軸座標とする。実験は縮尺

表-1 石礫間詰めの実験諸元 (単位:mm)

Case	第1層	第2層	第3層	1層の厚さ	距離
1	石礫間詰め無し				
2	8.6	—	—	100	350
3	8.6	18.9	35.5	30	950
4	8.6	18.9	35.5	30	550
5	8.6	18.9	—	50	550

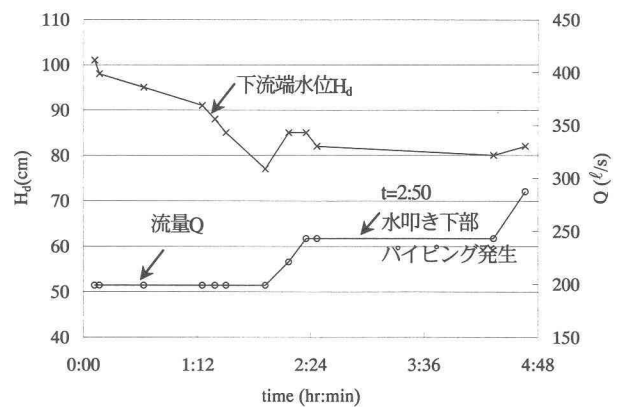


図-2 流量と下流端水位の時間変化 (Case-1)

1/8を想定し、初期河床形状、河床材料、落差工及び護床工の諸元・設置状況は実河川の既設構造物を参考に決定した。図-1に示すように、落差工模型は延長2.2m、落差14cm、斜面部勾配14/60とした。落差工上流部の河床に網を張り、上流の圧力は河床材料中及び下流に伝わり、落差工下流の河床は静的平衡となるようにした。護床工を構成する六角ブロックの1/8模型(実重量2tf、模型重量3.9kgf)は、縦断間隔3.8cm、勾配1/20で縦断方向に24基連結して、x=220~748cmの範囲に設置した。六角ブロックは2段に重ねて、横断方向に3基が等間隔に並ぶように配置した。左岸壁面にピエゾメータを設置し、流水中及び浸透流のピエゾ水頭を測定した。河床材料中右岸には、染料の出る管を設置し、浸透流及び水叩き下部の流況を可視化した。横断平均水位とブロック高、右岸側面近傍の河床高は右岸ガラス面にシールを貼って測定した。水叩き下流ではピトー管によりx方向流速uの水路中央鉛直分布を縦断的に測定した。

### (2) 実験条件

表-1は実験に用いた石礫間詰め諸元を示している。Case1は、護床工上で跳水が発生している場合に、その設置範囲における河床が低下し、落差工模型水叩き下部がパイピングにより空洞化する状況を把握することを目的とし、図-2のようにCase1の流量と下流端水位を時間

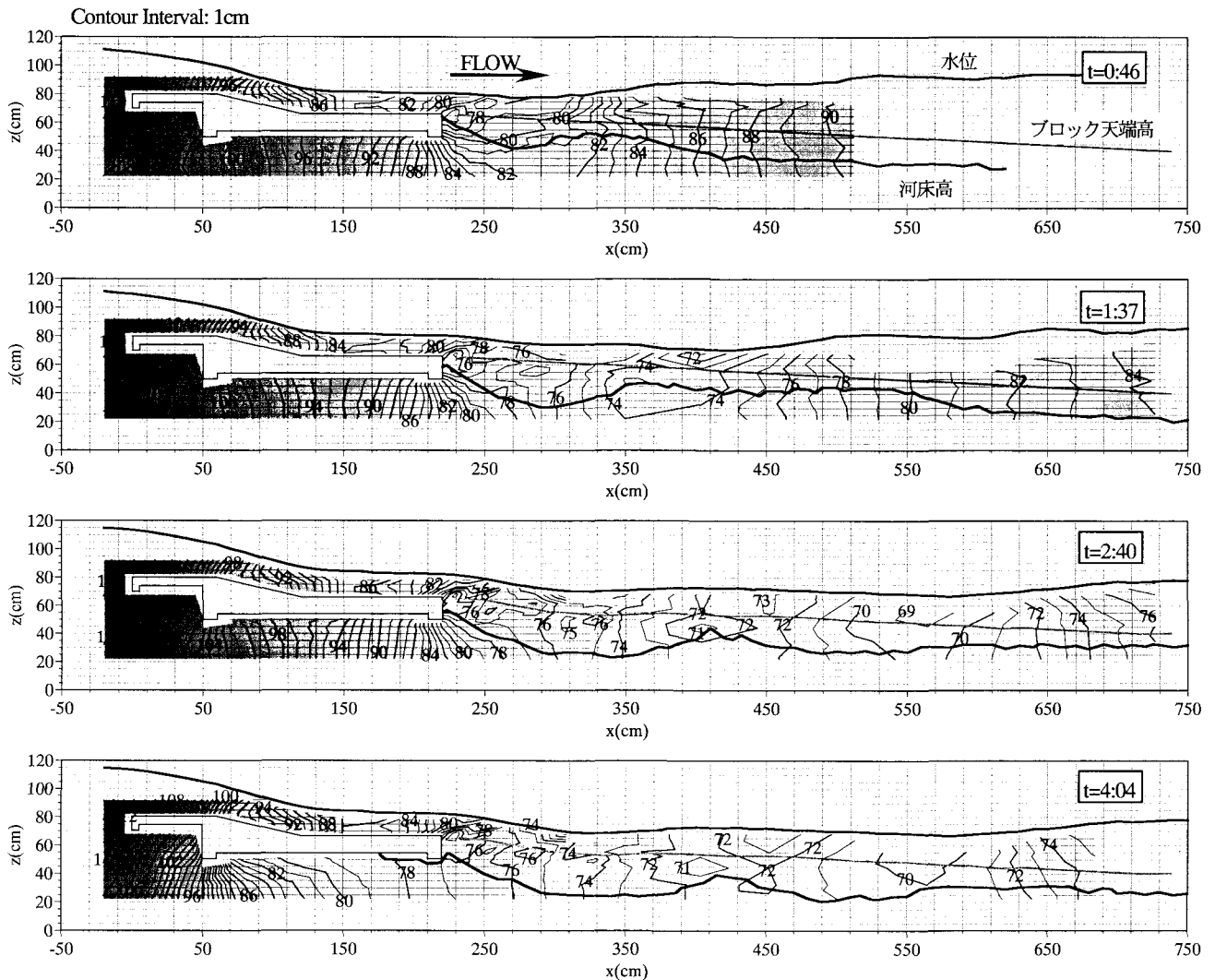


図-3 水位・河床高・ブロック天端高縦断分布とピエゾ水頭コンター (Case-1)

的に変化させた。実験の条件は、落差工上は射流で流れ、跳수가護床工上で発生し、護床工下流は局所洗掘が発生しないように設定した。Case2~5は、初期条件としてCase1のパイピングが起きた直後の河床形状及びブロック配置を用い、水叩き下部にCase-1で生じたパイピングによる空洞を残した。Case-2~5の流量は243ℓ/s、下流端水位は80cmとした。流量は現地スケールで単位幅流量 $q_f=11\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ に対応する。Case2の護床工の石礫間詰めは水叩き下流端から一基目と二基目のブロックの間( $x=255\text{cm}$ )まで1層で、Case3は最深河床( $x=315\text{cm}$ )まで3層で、Case4,5は再附着点( $x=275\text{cm}$ )まで3層及び2層を行った。石礫間詰めは合計約10cmとし、間詰め下流は層厚を徐々に小さくした。石礫間詰め各層の径はある層の間隙を下層の材料が物理的に通過しない3倍以内の条件で設定した<sup>4)5)</sup>。

### (3) 護床工間隙と対策石礫の径

護床工ブロックが流されない場合、間詰めを行う石礫は護床工間隙から抜け出ないことが重要である。対策石礫の径は、写真-2に示す簡易な実験を行うことにより決定した。実験では、(1)護床工配置と同様に横方向に2段3

列を固定床上に並べ、(2)その上流に護床工と同じ高さの木板をたて、(3)木板と護床工ブロックの間に護床工の高さになるまで石礫を投入した。

河床材料から石礫径を3倍以内で大きくして、ブロックの間隙から石礫が出なくなるまで実験を繰り返し行った結果、直径 $D=35.5\text{mm}$ の石礫を投入するとブロック下流に石礫がほとんど流出しなくなった。 $D=3\text{mm}$ の河床材料を投入すると、護床工六脚ブロックの全ての隙間から砂が流出し、ブロック下流には勾配が一定、安息角の斜面が形成された。 $D=8.6\text{mm}$ の石礫の場合、中央六脚ブロックからの流出が $D=3\text{mm}$ の場合より減少した。 $D=18.9\text{mm}$ の石礫の流出は、隙間の大きな左右岸側からがほとんどであり、中央六脚ブロックの隙間からの流出は少なかった。

### 3. 水叩き下部パイピングの発生原因検討

実験Case-1による水位、河床、ピエゾ水頭の結果を示し、水叩き下部のパイピング発生原因を検討する。図-3は実験開始からの時間 $t=46\text{分}$ 、1時間37分、2時間40分、4時

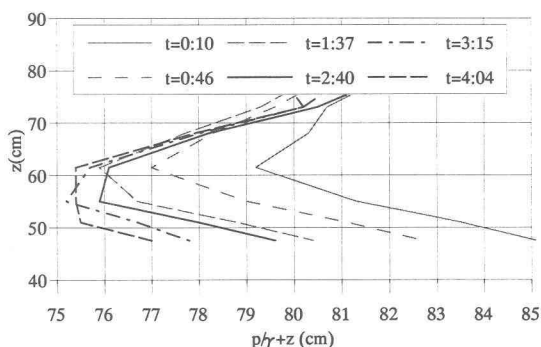


図4 水叩き下流面ピエゾ水頭変化 (case-1, x=220cm)

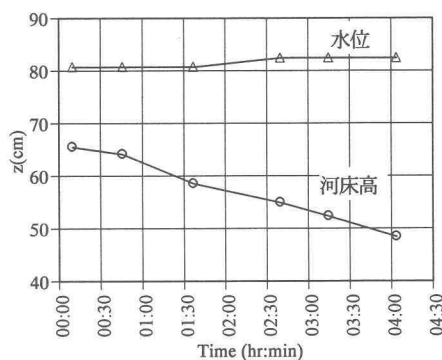


図5 水叩き下流端での水位・河床高時間変化(case-1, x=220cm)

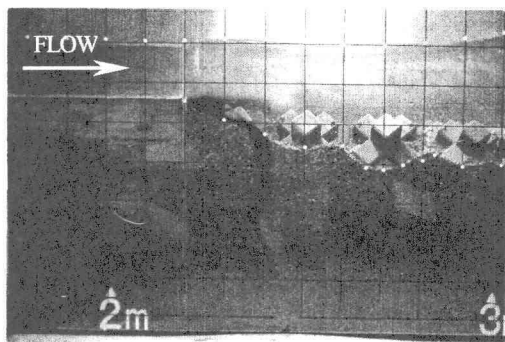


写真3 浸透流と剥離流れの可視化 (case-1, t=0:10)

間4分 ( t=0:46, 1:37, 2:40, 4:04 )での横断平均水位, ブロック天端高と右岸側壁近傍河床高の縦断分布, 流水と浸透流のピエゾ水頭コンターを表している. 水叩き下流の河床は洗掘されて低下し, 流量増加後のt=2:40には護床工ブロックが沈下した. t=2:50では水叩き下部でパイピングが, 落差工水叩き下流面x=2m20から1,2cmの範囲で河床材料が鉛直上向きに噴き上がるにより発生した. パイピングによる水叩き下流面の噴砂は, 水路中央で局所的に起こった10分後, 水叩き下流面全体にわたって起こった.

設定した実験条件において落差工を越える流れは射流となり, 水面と同様に流線が曲がる. 上に凸となる流れでは水面付近で圧力が静水圧より上昇し, 下に凸となる流れでは河床付近で静水圧より増加する. 図-3に示すように, 実験Case1の落差工上の水面及びピエゾ水頭は全ての時間において同様の傾向を示しており, 流量の等しいt=0:46とt=1:37及びt=2:40とt=4:04においてはピエゾ水頭の値もほぼ同じである. また, どの時間においても, 写真-3のように水叩き上の流れは下流端で剥離を起こし, 水叩き下流面で圧力低下を起こしていた. そのため, 水叩き下流の河床面付近の流れは再付着点から上流に向かっていった.

一方, 図-3の落差工下部河床材料中の浸透圧は, 流量, 下流端水位の変化に伴い大きく変化している. 落差工下流の護床工設置箇所での河床は流量の増加とともにt=1:37からt=2:40にかけて洗掘が進んでおり, 水叩き下流面の河床高も低下している. 通水初期の段階では水叩き下流の再付着点より上下流に向かって河床材料は移動

していたが, 通水後しばらくすると水叩き直下流の河床は下流斜面の影響を受けて安息角を保つように低下した.

また, 図中の落差工直下流のピエゾ水頭も河床の低下に伴い小さくなっており, t=2:40の水叩き下部ピエゾ水頭勾配はt=1:37より上に向いていることがわかる.

t=4:04では水叩き下部でパイピングによる空洞が形成されており, 水叩き下流端下部(x=220)のピエゾ水頭が大きく低下している. また, 落差工 (x=50cm)の下部でピエゾ水頭勾配が大きくなっている. この後, パイピングによる空洞は時間と共に上流に向かって大きくなっていった.

図-4は水叩き下流面のピエゾ水頭, 図-5は同位置での水位と河床高の時間変化を示している. 落差工水叩き下流面はz=50~66cmである. Case1, x=220cmの水位は流量の増加と共に若干高くなっているが, 河床高は時間と共に徐々に低下している. 図-3でみられた河床低下にともなうピエゾ水頭の低下も確認できる. 水叩き下流の洗掘が進み, 河床が低下して, 落差が大きくなることで, 水叩き下流の剥離流れによる圧力低下が大きくなったためと考えられる. また, ピエゾ水頭の鉛直分布に着目すると, 河床高付近で最も小さくなっており, 河床材料中の圧力低下も大きくなっていることがわかる. 落差工を越える流れの水面形及び圧力場に大きな変化がみられないため. 通水初期の段階と比べて浸透流は上に向き, 鉛直上向きの浸透流速が時間の変化と共に増加したと判断できる.

水叩き下部のパイピングは下流の洗掘が進み, 下流面の河床高が低下して, 水叩き直下流の剥離流れによる圧力低下が大きくなり, 鉛直上向きの浸透流の流速が水叩き下部で大きくなることにより発生したと考えられる.

#### 4. 石礫間詰めによるパイピング対策

水叩き下流の護床工の六脚ブロックに長さ, 厚さ, 層数の違うCase-2~5の石礫間詰めを行い, 落差工下部パイピングの対策指針を検討する. Case-2は, Case-1と同様に水叩き下流面の河床高が低下した後, パイピングが発生した. 通水後数分は河床材料が剥離流れの強い逆流

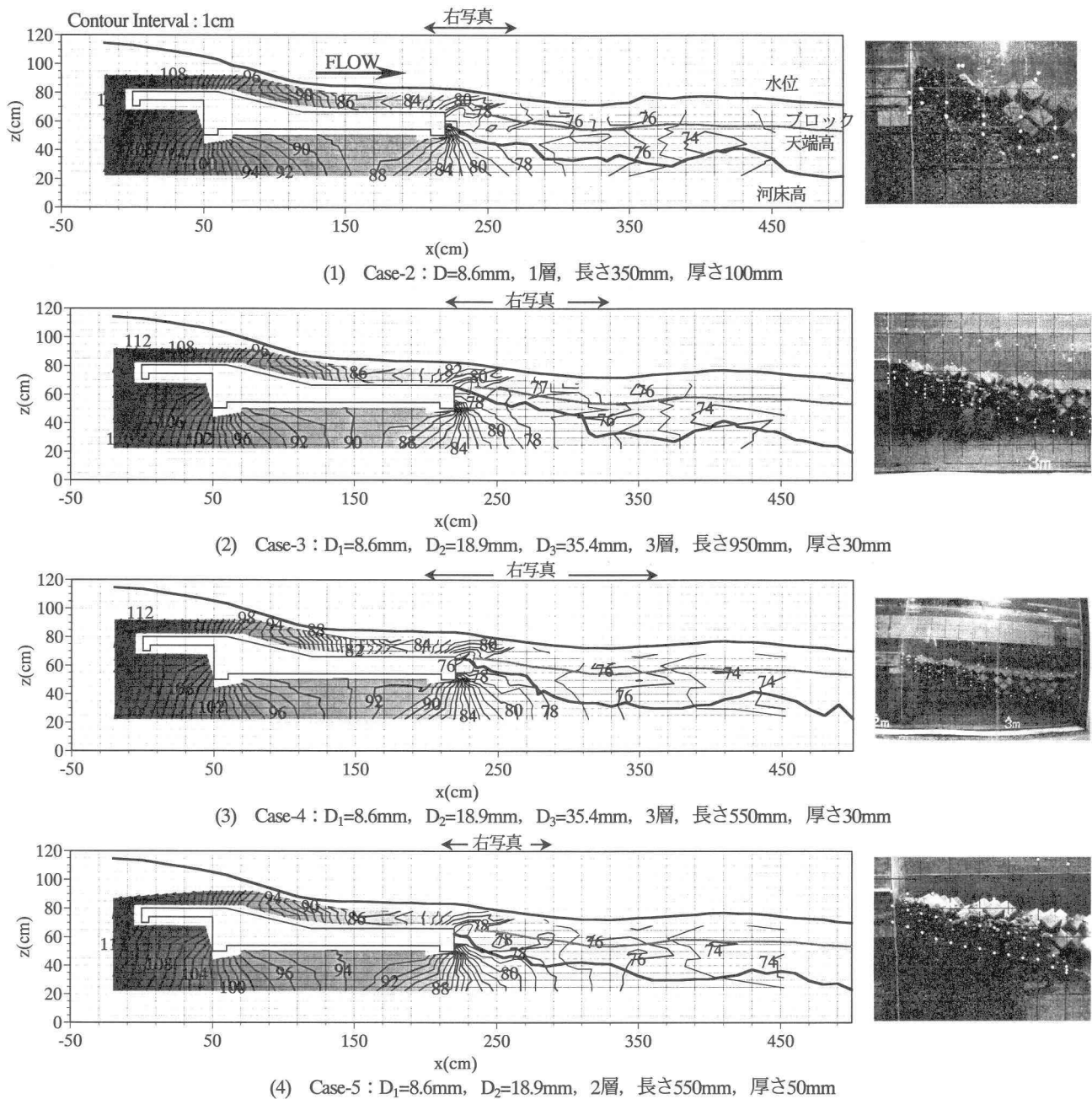


図-6 水位・河床高・ブロック高縦断分布，流水及び間隙水圧水頭コンターと水叩き下流護床工石礫間詰め状況 (Case-2~5)

による掃流をきっかけとして河床が低下していたが，数分後には下流の河床材料及び石礫の移動に伴い安息角を保つように河床は低下した。

図-6はCase-2~5の水位，河床高，ブロック高の縦断分布と流水及び浸透流のピエゾ水頭コンターと水叩き下流護床工石礫間詰め状況を示している。水叩き下流の河床高は対策石礫を含めた高さで表している。Case-2はパイピング発生10分前，Case-3~5はパイピング対策石礫が移動して平衡状態となった時のものである。Case-2~5の水叩き下流の河床形状は対策石礫が下流に流される影響を受け若干の差があるが，護床工ブロックの天端高が全て同じであるため，水面形はほとんど変わらない。

対策後のピエゾ水頭コンターと対策前のCase-1と比較すると，Case-2~5の水叩き下流端下部でコンターが密

になっていることがわかる。空洞内の流れが対策石礫内で減速し水叩き下流端下部ではx方向に沿って圧力が急に上昇するためである。染料により可視化した浸透流の流跡線もピエゾ水頭コンターの最急勾配の方向に沿うように，水叩き下流端下部で下向きに凸となった。落差工下部に空洞があり，下流の護床工との間に石礫間詰めによるパイピング対策を行った場合，対策工の下部の圧力は上昇し，圧力勾配が大きくなる。

石礫間詰めを行った後のCase-2~5のピエゾ水頭コンターを比較すると全ケースの水叩き下流でコンターと河床面がほぼ平行になっていること，Case-2,5は水叩き下流河床面下部でコンターが密になっているがCase-3,4はコンターの間隔が比較的粗になっていることがわかる。また，Case-2,5はコンターが密な箇所と河床面が接近し

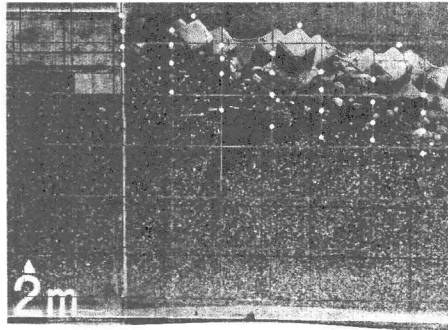


写真4 浸透流と剥離流れの可視化 (Case-3)

ている。3層で石礫間詰めを行ったCase-3,4の対策工が流されなかったのは水叩き下流の河床が低下しなかったためであり、Case-2の石礫対策工が流されたのは水叩き上の流れが再付着する箇所の下流で対策工が流され、その上流の河床が安息角を保つように低下したためである。一方、Case-5の対策工が流されたのに水叩き下部のパイピングが発生しなかったのは、対策工の石礫が護床工ブロックの間隙を通ることがほとんどできず、再付着点の河床が低下してもその上流の河床が低下しなかったためである。

写真4は染料によりCase-3における浸透流と剥離流れの流跡線を可視化したものである。染料の流出位置は写真3と同じである。Case-3はCase-1と比較して上向きに流れる浸透流の流量が少なく、石礫対策工に働く鉛直上向きの力が小さくなっていったと考えられる。

図7はCase-4,5において水叩き下流端付近のx方向流速u分布を測定した結果である。x=200cmでの流速uがほとんど同じであること、図6のピエゾ水頭の分布及び水面形が同様なことからCase-4,5の落差工上の流れに有意な差はない。しかし、x=220~265cmまでの水叩き下流の流速uは水叩き天端z=66cmより上部では同じであるものの、ブロック天端付近の流速はCase4が小さくなる。礫層が2層のCase-5は3層のCase-4と比べて、流下方向に浸透流が河床から多く流出しているためである。

落差工下部のパイピング対策として護床工に石礫による間詰めを行う場合、水叩き下流端の鉛直上向きの浸透流速が小さくなるように層数を多くすること、対策石礫が護床工ブロックの間隙を通過しないことが重要である。

## 5. 結論

落差工下部のパイピング発生原因と水叩き下流護床工の石礫間詰めによる対策工の実験的検討により、以下の

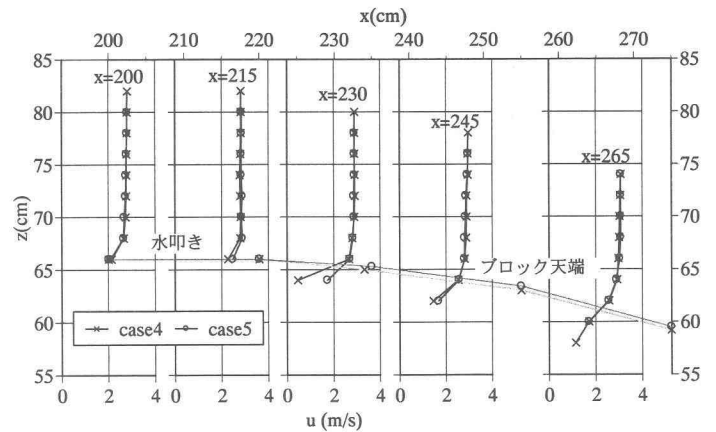


図7 水叩き下流端付近のx方向流速u分布

結論を得た。

- 1) 落差工下部のパイピングは、水叩き下流面の河床が低下し、水叩き下流端の剥離流れによる局所的な圧力低下が大きくなることにより発生する。水叩き下流面の河床低下は再付着点より下流護床工設置域の河床が低下することにより安息角を保つようにして起こる。
- 2) 落差工下部のパイピング対策として護床工ブロックの石礫による間詰めは、落差工下部の空洞化後も含めて有効である。パイピングを引き起こす水叩き下流面の河床低下を防ぐには、水叩き下流端での鉛直上向きの浸透流速が小さくなるように層数を多くすること、対策石礫が護床工ブロックの間隙を通過しないことが重要である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、新土木開発(株)の中村公広氏、(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。
- 2) 川口広司・諏訪義雄・高田保彦・末次忠司：護床工下の河床材料の抜け出し及び下流跳水の非正常性と護床工の応答特性、河川技術論文集第8巻,pp.243-248,2002。
- 3) 内田龍彦・福岡捷二・渡邊明英・山崎幸栄：二次元水理構造物を越流する流れの数値計算、水工学論文集第47巻,pp817-822,2003。
- 4) 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。
- 5) 前野詩朗・藤田修司：逆フィルターを用いた洗掘防止工に関する研究、河川技術論文集第9巻,pp.37-42,2003。

(2003.9.30受付)