

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

EFFECT OF WATER PRESSURE VARIATION ON
SAND REMOVAL FROM BED PROTECTION WORKS

前野詩朗¹・山縣正明²・里本公明³

Shiro MAENO, Masaaki YAMAGATA and Kimiaki SATOMOTO

¹ 正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

² 学生会員 岡山大学大学院 自然科学研究科環境システム学専攻 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

³ 正会員 岡山大学技官 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

The bed protection works around the hydraulic structures like dam and bridge piers are usually collapsed due to disasters of sinking into the sand and transporting of sands around its bed protection works specially during flood flow. Disasters of protection works are declined the function and the stability of important hydraulic structures, and they are the factors of utterly destruction of the hydraulic structures. So, it is very important problem in hydraulic engineering to clarify destruction mechanisms of bed protection works and to propose disaster prevention measure.

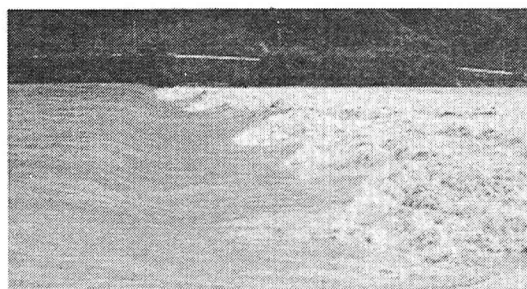
In this study, we take up the phenomenon of sand removal from bed protection works considered to be a main cause of disasters. To examine such a phenomenon, an experimental flume model was used to conduct a set of experiments subjected to water pressure variation. The experimental results found good to be able to explain the effect of water pressure variation.

Key Words : bed protection works, water pressure variation, local scouring, liquefaction

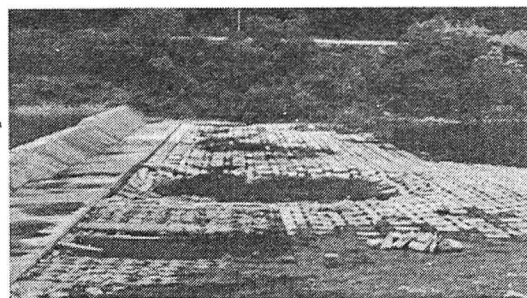
1. はじめに

高度成長期の砂防施設の整備や河川改修の結果、河川への流出土砂量が減少し、全国的各地の河川において河床低下が深刻な問題となっている。このような状況下において、堰や橋脚などを保護する目的で設置される護床工が洪水時に沈下散乱するといった被害が多く見られるようになってきた。写真-1は堰下流部の被災状況を示している。このような護床工の被災は、堰や橋脚などの重要な河川構造物の機能・安定性を低下させるのみならず、構造物そのものの壊滅的な破壊の要因となるため、護床工の被災機構を明らかにし、被災防止策を提示することは水工学上重要な課題である。

以上のような背景のもと、代表的な水理構造物である円柱橋脚周辺の局所洗掘を取り扱った研究が多くなされてきた(例えば、鈴木¹⁾、辻本²⁾)。本研究で対象としている護床工の安定性を検討した研究としては、中川ら³⁾が護床工からの砂の抜け出しによる空洞化の進行過程を明らかにした研究や、神田ら⁴⁾が護床工様式の違いが護床工下流部の最大洗掘深位置や底面せん断力に及ぼす影響を明らかにした研究などがある。しかし、これらの研究は殆どが水理構造物周辺の流れ場と河床材料のせん断抵抗力との関係により現象を捉えた研究であった。



(a) 洪水時の状況 (旭川合同堰, 平成10年台風10号)



(b) 同地点の被災状況

写真-1 洪水前後の状況

一方、名合⁵⁾は水理構造物周辺に作用する急変流が水圧変動として構造物周辺砂地盤に作用し、砂地盤内の間隙水圧を変化させることにより砂地盤の有効応力が減少

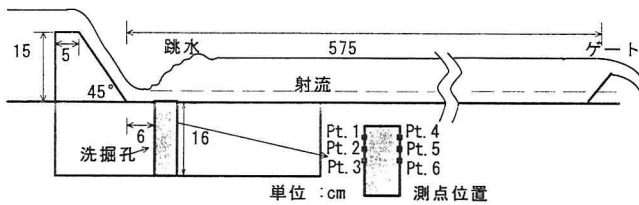


図-1 実験装置

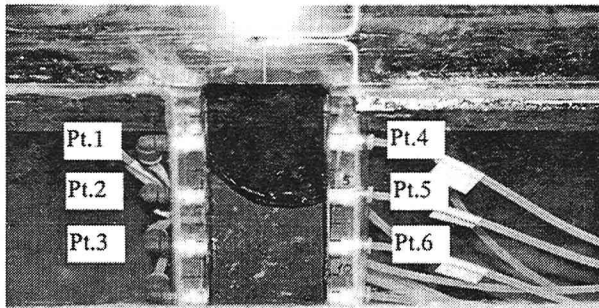


写真-2 圧力変換機の取り付け状況

し、極端な場合には液状化が発生することを明らかにしている。また、このように液状化した砂層では、水平方向の流れにより洗掘が容易に進むことを指摘している。その後、名合ら⁶⁾やMaenoら⁷⁾は変動水压のみが作用する場において護岸裏込め土砂の流出により護岸裏込め部の空洞化が発生することや護床ブロック下部の砂の側方流動によりブロックの沈下が発生することを実験により明らかにしている。実際の流れ場において変動水压の影響を検討した研究としては、Miaら⁸⁾が急激な水压低下時の円柱橋脚周辺の局所洗掘に及ぼす液状化の影響を明らかにしている。また、村上ら⁹⁾は透過性防護工からの砂粒の抜け出しに及ぼす圧力変動の影響を検討し、圧力変動を外力とした砂粒の離脱推定法を提案し実験値と良く一致することを示しているが、実際の間隙水压変動は計測されていない。このように実際の流れ場における変動水压と洗掘との関係を取り扱った研究例は非常に少なく、洗掘に及ぼす変動水压の影響は詳細には明らかにされていない。また、跳水の有無による変動水压の挙動の相違を扱った研究は、これまでのところ行なわれていないようである。そこで、本研究は護床工の被災の主な原因と考えられる護床工からの土砂の抜け出し現象に着目し、現象に及ぼす変動水压の影響を明らかにしようとするものである。以上の目的を達成するために、本研究では堰下流部における護床工からの土砂の抜け出し現象をモデル化した洗掘孔を堰下流部に設置した実験を行い、土砂の抜け出し現象と変動水压との関係を実験的に検討する。

2. 実験の概要

(1) 実験装置

本実験に用いた水路は、長さ16m、幅0.6m、深さ0.4mの水平水路で、洗掘孔より上流部6cmの位置に堰を設置し

表-1 実験条件

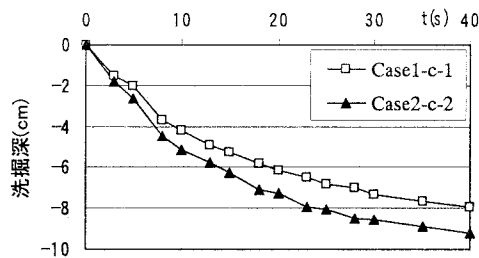
Case	流量 (l/s)	状態
1-a-1	29.9	土砂 無
1-a-2	30.0	土砂 無
1-b-1	30.0	洗掘 無
1-b-2	29.9	洗掘 無
1-c-1	29.9	洗掘 有
1-c-2	29.9	洗掘 有
2-a-1	29.9	土砂 無
2-a-2	29.9	土砂 無
2-b-1	30.0	洗掘 無
2-b-2	30.0	洗掘 無
2-c-1	30.0	洗掘 有
2-c-2	30.0	洗掘 有
1-c-3	20.0	洗掘 有
1-c-4	29.9	洗掘 有
1-c-5	40.0	洗掘 有
2-c-3	19.9	洗掘 有
2-c-4	30.0	洗掘 有
2-c-5	40.0	洗掘 有

ている。水路の下流部にはゲートを設置しており跳水を生起させる位置を調節することができる。図-1に示すように、洗掘孔として16cm×5cm×5cmの亚克力製の角柱を洗掘の状況が可視化できるように水路右側のガラス面に添わせて設置した。間隙水压の計測のため、図-1の測点位置に示すように洗掘孔の上流側と下流側の面にそれぞれ上から順に3cm、6cm、9cmの6ヶ所、および洗掘孔の中心位置と等しい水路中央部の河床面に圧力変換器を取り付けた(写真-2)。また、洗掘孔上の水位変動を計測するために容量式波高計を設置した。砂試料としては、平均粒径0.25mm、比重2.65の豊浦標準砂を使用した。

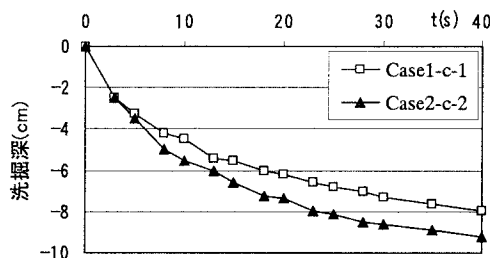
(2) 実験方法および実験条件

本実験では、土砂の河床面からの離脱外力に影響すると考えられる鉛直方向の変動水压を、跳水による水面変動で与えることとし、洗掘孔より下流側に跳水が生起する場合をCase1、図-1に示すように洗掘孔上に跳水が生起する場合をCase2としている。表-1は実験条件を示しているが、実験ケースの最初の数字がCase1とCase2の違いを示している。それぞれについて、洗掘孔内に土砂を充填していないケース(a)と充填しているが洗掘孔をメッシュで覆い土砂が抜け出さないようにしたケース(b)、およびメッシュを取り除き洗掘孔内の土砂が実験開始と同時に抜け出すようにしたケース(c)の3種類の実験を行った。表中の2番目の数字がこれらの実験条件を示している。また、3番目の数字は、同じ条件の実験を2度行っていることから1,2としている。c-3~5(Case1-c-1,2とCase1-c-4およびCase2-c-1,2とCase2-c-4は、それぞれ同じ条件の実験)では、流量を20, 30, 40(l/s)と変えて洗掘孔上部の流速および洗掘開始後1時間後(洗掘が殆ど進行しなくなった状況であり、本研究ではこの状態を以下最終洗掘深とする)の洗掘形状の計測を行った場合を示している。

洗掘孔内の土砂が抜け出すケースの間隙水压の計測は、

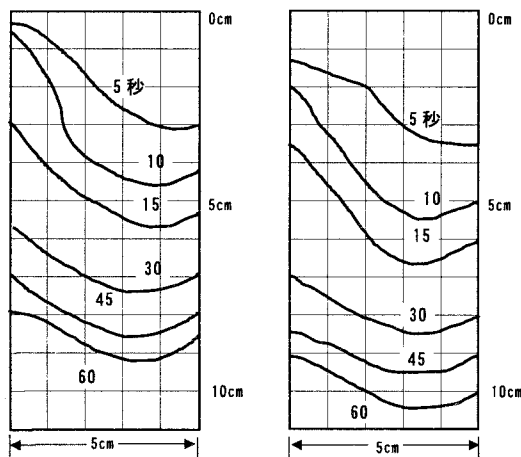


(a) 洗掘孔の中心



(b) 洗掘孔中心より下流側1.5cm

図-2 洗掘の進行状況



(a) Case1-c-1

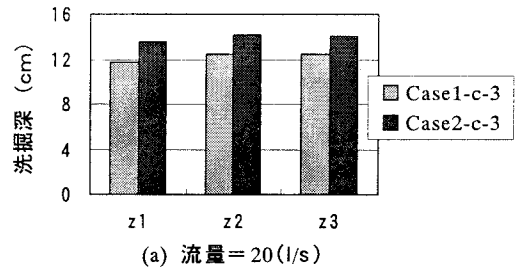
(b) Case2-c-2

図-3 洗掘の時間推移

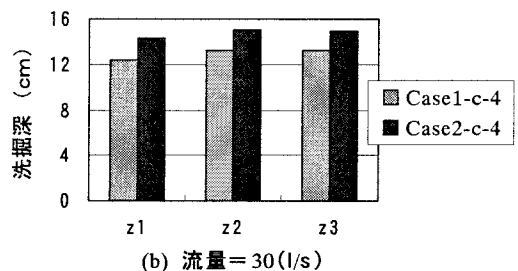
洗掘孔内の土砂が流水により抜け出さないように、あらかじめ洗掘孔上にメッシュを敷き、所定流況に達した後、30秒間経過した時点でメッシュを取り除く方法で行った。この実験の際には、土砂の抜け出す様子もあわせてビデオ撮影した。洗掘が進行している時の洗掘孔内の流速分布測定は困難であったため、本研究ではCase1-c-1の20秒程度洗掘が進行した時の洗掘孔内の河床形状を固定床として設置し、その状態における洗掘孔内の流速分布を計測した。計測の際には一度に多点で流速計測可能なPIV法によるビデオ画像解析を用いた。トレーサ粒子には、直径が1mmの発砲スチロールビーズを用いた。撮影には高速度ビデオカメラを用い、1コマ1/240秒、シャッター速度 1/240秒で撮影した。

3. 実験結果および考察

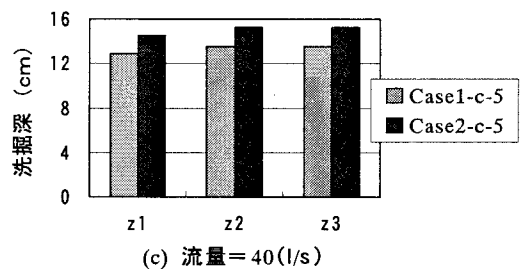
(1) 洗掘の進行特性



(a) 流量 = 20 (l/s)



(b) 流量 = 30 (l/s)



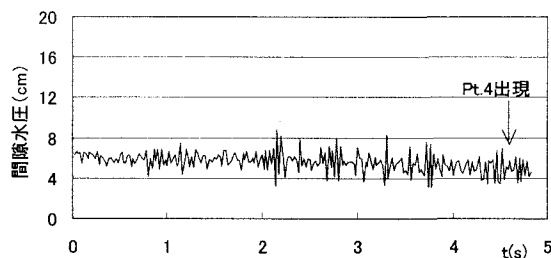
(c) 流量 = 40 (l/s)

図-4 最終洗掘深

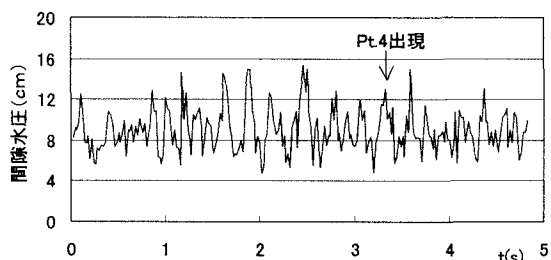
図-2は、洗掘孔の中心位置と中心から下流側1.5cmの位置における洗掘の進行状況を示した図である。また、図-3は、土砂の抜け出し直後から60秒間の洗掘の推移を示した図である。これらの図より、洗掘は初期の段階で短時間に進行し、徐々に洗掘の進行の割合が小さくなることからわかる。また、洗掘開始後15秒程度までは、洗掘孔の下流側の洗掘深が最も大きく、洗掘孔の上流側に向かって洗掘深が小さくなることからわかる。これは、洗掘開始直後は洗掘孔下流部上端に衝突した流れが洗掘孔下降に向かう噴流となるためであると考えられる。洗掘開始後20秒程度経過すると洗掘孔内には洗掘孔の水平距離と同程度のスケールの渦が発生し、最大洗掘深は洗掘孔の下流部から洗掘孔の中心方向に移動する。また、図-3に示す実験開始後30秒～60秒の洗掘形状より、このような渦が発生した状況下においては、洗掘の進行は洗掘孔内でほぼ相似形を保ったまま進行することがわかる。洗掘上の跳水の有無についてみると、洗掘孔上に跳水があるCase2-c-2の場合の方が洗掘の進行は早くなり、60秒経過した時点で約1.5cm程度洗掘深が大きくなっている。

(2) 最終洗掘深の特性

図-4の(a), (b), (c)は、流量の違いによる洗掘開始後1時間後の最終洗掘深を示したもので、それぞれ流量を20, 30, 40 (l/s)とした場合である。図中のz1は洗掘孔の中心より上流側1.5cm, z2は洗掘孔の中心, z3は洗掘孔の



(a) Case1-c-1(跳水無・洗掘有)



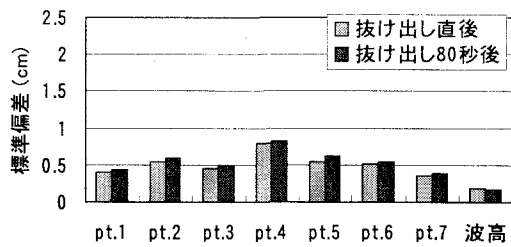
(b) Case2-c-2(跳水有・洗掘有)

図-5 間隙水圧の時間変化

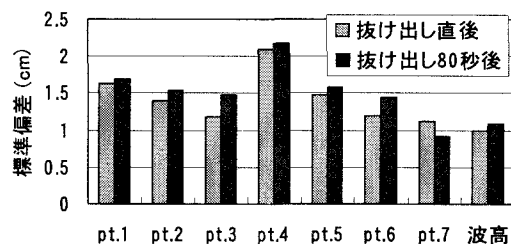
中心より下流側 1.5cm の位置を示している。Case1 と Case2 での洗掘深を比較すると、流量が 20(l/s) の場合には Case2-c-3 の方が 10% 程度、流量 30, 40(l/s) の場合には Case2-c-4, Case2-c-5 の方が 11% 程度大きくなる。また、流量による洗掘深の違いを比較すると、Case1 シリーズでは、流量が 30(l/s) の Case1-c-4 および 40(l/s) の Case1-c-5 は、20(l/s) の Case1-c-3 に比べ、6% 程度および 9% 程度大きい。Case2 シリーズでは、流量が 30(l/s) の Case2-c-4 および 40(l/s) の Case2-c-5 は、20(l/s) の Case2-c-3 に比べ、5.5% 程度および 6.4% 程度大きい。以上のことより、流量の大小に関わらず洗掘孔上の跳水の影響により洗掘深が 10% 程度大きくなることが明らかにされた。

(3) 間隙水圧の変動特性

図-5(a), (b) は、それぞれ Case1-c-1, Case2-c-2 の洗掘が進行して土被り厚が少なくなり、Pt.4(図-1, 写真-2 参照)が現れる時間帯の Pt.4 の間隙水圧データを表したものである。Pt.4 は、Case1-c-1 では 4.7 秒後に、Case2-c-2 では 3.3 秒後に現れる。Case1-c-1 についてみると、2 秒程度経過した時点で間隙水圧変動が大きくなっており、土砂が抜け出して Pt.4 の土被り厚が減少すると、間隙水圧の変動が大きくなることがわかる。Case2-c-2 の場合にも 1 秒程度経過した時点から間隙水圧変動はやや大きくなっており、同様な傾向が見られる。間隙水圧の変動は洗掘孔上に跳水がある場合の方が大きくなっており、洗掘孔上の跳水による水面変動が変動水圧として砂層に作用していることがわかる(図-1 参照)。図-6 は、Case1-c-1 と Case2-c-2 における土砂の抜け出し直後と土砂が抜け始めてから 80 秒後の間隙水圧の変動特性を示したもので、Pt.1~Pt.6 は洗掘孔内の測点、Pt.7 は洗掘孔の中心位置と等しい水路中央部の河床面の測点である。この図より、Case1-c-1 は抜け出し 80 秒後の方がやや間隙水圧の変動は大きくなるがその量は非常に小さい。一方、Case2-c-2



(a) Case1-c-1(跳水無・洗掘有)



(b) Case2-c-2(跳水有・洗掘有)

図-6 間隙水圧の変動

では、抜け出し直後に比べ、土砂が抜け出してから 80 秒後の方が間隙水圧の変動が大きくなっていることがわかる。これは、実験開始直後の土砂が充填されている時には砂層中で減衰していた間隙水圧が、土砂の拔出が進むにつれて土砂の影響を受けなくなり、洗掘孔内に直接水圧が伝播するようになったためと考えられる。また、洗掘孔内の間隙水圧の変動は、上流側、下流側ともに河床に近い測点 Pt.1, Pt.4 の値が大きくなっている。これは、洗掘孔上部の乱れの影響が河床面に近いほど大きく、深くなるほど弱まっていくためであると考えられる。水路中央部に位置する河床面の測点 Pt.7 に比べ、洗掘孔内の方が間隙水圧の変動が大きくなっている。これは、洗掘孔の存在により洗掘孔上縁部と河床面との境で流水が大きく乱されることが原因であると考えられる。

(4) 有効応力の変動特性

図-7 は、土被り厚が減少して Pt.1, Pt.4 が現れる時間帯の有効応力の変化を示している。この図より、Case1-c-1 では、土被り厚が減少し Pt.1, Pt.4 の出現が近づくにつれて有効応力の変動が大きくなっていることがわかる。洗掘孔上に跳水がある Case2-c-2 では、実験初期の段階から有効応力が急激に減少し、変動もかなり大きくなっている。また、Case1-c-1, Case2-c-2 ともに Pt.1, Pt.4 が出現する前に有効応力が 0 となる液状化が発生しており、砂粒子が浮遊したような状況になっていることが予測される。

(5) 周波数特性

表-2 は、Pt.1, Pt.4 の間隙水圧および水面変動(波高計)の周波数分析の結果を示したものである。この表より Case1 シリーズでは卓越した周波数が存在していない。これは流れが射流であり、洗掘孔上で水面変動の乱れがほとんど無かったことから卓越した周波数が存在しなかったと考えられる。また、洗掘孔上に跳水がある Case2 シ

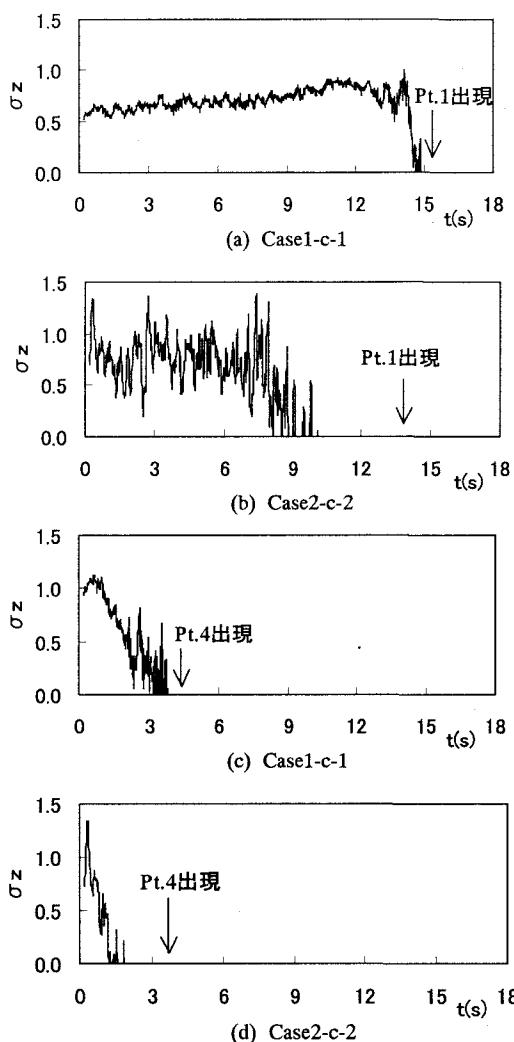


図-7 有効応力変化

リーズでは、3.0~4.0Hzの卓越周波数があることがわかる。図-8はCase2-c-2の上流側の測点Pt.1、下流側の測点Pt.4、波高計の卓越周波数特性を示した図である。Pt.1、Pt.4と波高計とのパワースペクトルが同様な変化傾向を示すことがわかる。このことより水面変動と間隙水圧変動とは密接な関係があることがわかる(図-1参照)。

(6) 跳水の有無による洗掘孔上の流速分布特性

図-9は、洗掘孔の中心位置と等しい水路中央部の河床面からの高さが0.5cm、1.0cm、1.5cmの流速を示したものである。この図より、洗掘孔上の流速は洗掘孔上に跳水が無いCase1-c-1の方が速く、13%程度大きくなることがわかる。このことより、洗掘孔上に跳水があるCase2-c-2の場合にはCase1-c-1よりも流速が遅いに関わらず、洗掘深が大きくなったという実験結果を考慮すると、洗掘孔上に生起している跳水による水面変動が洗掘に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

(7) 洗掘孔内の流速分布特性

図-10および図-11は、Case1-c-1およびCase2-c-2に

表-2 卓越周波数

Case	Pt.1	Pt.4	波高計
1-a-1	—	—	—
1-a-2	—	—	—
1-b-1	—	—	—
1-b-2	—	—	—
1-c-1	—	—	—
1-c-2	—	—	—
2-a-1	3.6Hz	3.7Hz	3.7Hz
2-a-2	3.4Hz	3.4Hz	3.4Hz
2-b-1	3.4Hz	3.4Hz	3.3Hz
2-b-2	3.9Hz	3.9Hz	3.9Hz
2-c-1	3.9Hz	3.9Hz	3.9Hz
2-c-2	3.4Hz	3.4Hz	3.2Hz

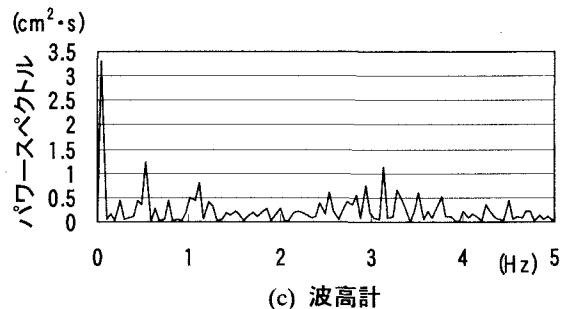
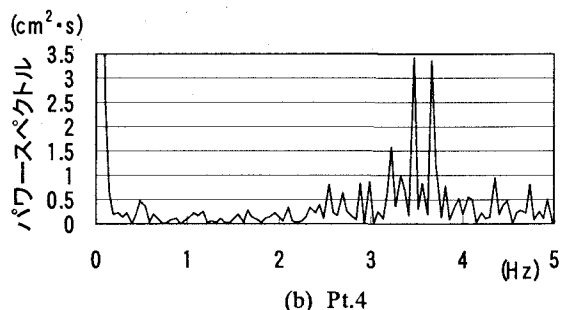
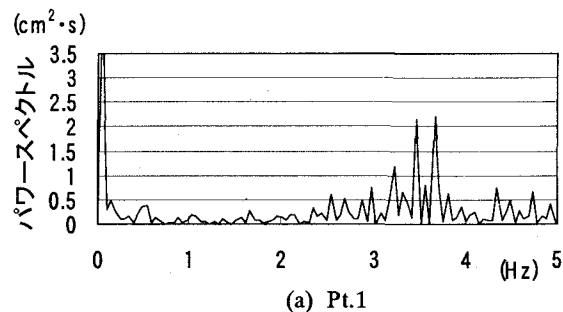


図-8 Case2-c-2における周波数特性

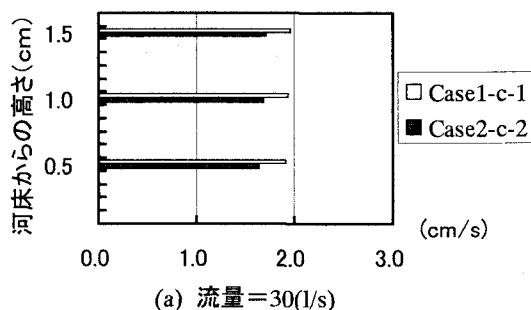


図-9 堰下流部における流速分布特性

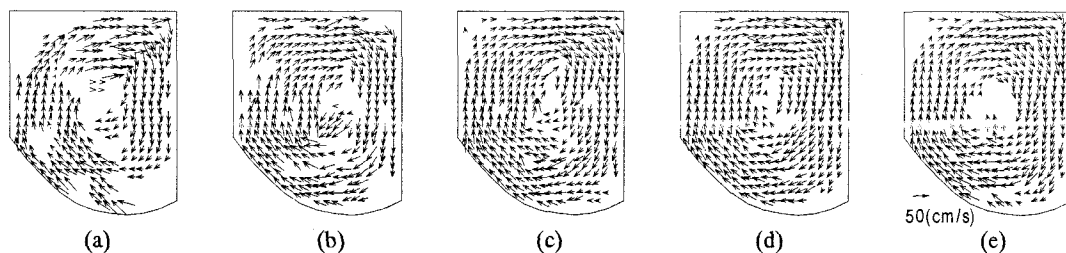


図-10 洗掘孔内の流速分布特性(跳水無)

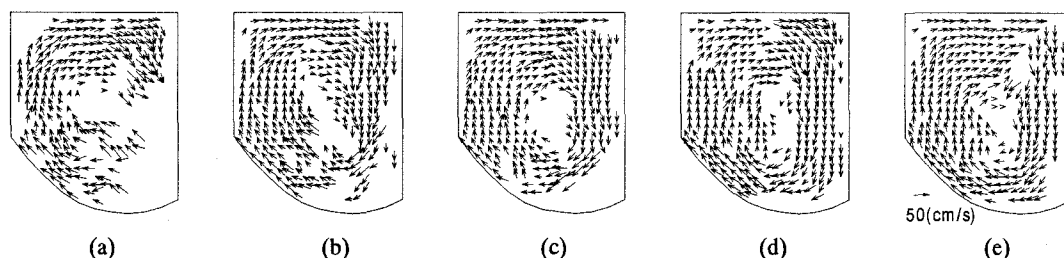


図-11 洗掘孔内の流速分布特性(跳水有)

における洗掘孔内の流速分布を示したものである。2章でも述べたように、Case1-c-1の洗掘が20秒程度進行した時の洗掘孔内の河床形状を固定床として設置し、その状態における洗掘孔内の流速分布を計測した。図中の(a)~(e)は、それぞれ連続した6コマの画像から流速分布を算出している。図-10より、洗掘孔内には時計回りの流れが発生することがわかる。また、渦の中心部はほぼ同じ位置にあり、洗掘孔内の流れはかなり安定している。一方、図-11をみると、(a)、(c)、(e)に比べ(b)、(d)の渦の中心位置が下がっていることがわかる。これは、跳水による水面変動の影響によりCase2-c-2の洗掘孔内の流れが不安定となるためである。この渦が上下する際には洗掘が急激に進行することが実験中確認された。

4. 結 論

本研究では、護床工からの土砂の抜け出しに及ぼす変動水圧の影響を明らかにすることを目的として、洗掘孔上における跳水の有無により変動水圧の影響を実験的に検討した。その結果、以下のことが明らかにされた。

- 1) 洗掘孔上に跳水が生起している方が洗掘孔上の流速が遅いにもかかわらず、洗掘の進行が早くなり、しかも最終洗掘深も大きくなった。
- 2) 洗掘孔上に跳水が生起することにより、洗掘孔内の流れは不安定になる。間隙水圧については、河床に近い方が変動が大きく、深くなるにつれて小さくなることが示された。
- 3) 洗掘孔内の間隙水圧の卓越周波数は水面変動の卓越周波数と密接な関係があり、跳水による水面変動が変動水圧として洗掘孔に作用することが示された。
- 4) 洗掘は砂層表面付近の砂の液化化を伴いながら進行することが示された。

今後は、本研究で得られた成果をもとに洗掘孔内で発生する渦の機構や洗掘に及ぼす変動水圧の影響をさらに詳細に検討し、変動水圧の影響を考慮した洗掘モデルを確立するとともに、洗掘予測式や護床工の合理的な設計指針を提示していく必要がある。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費の補助を得て行われた。また、画像解析にあたっては神戸大学の藤田一郎先生より貴重な助言を得た。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 鈴木幸一：円柱橋脚周辺の局所洗掘に関する研究，土木学会論文集第313号，pp.47-54，1981。
- 2) 辻本哲朗，水上敏昭：円柱前面での局所洗掘機構のモデル化，第29回水理講演会論文集，pp.591-596，1985。
- 3) 中川博次，辻本哲郎，清水義彦，村上正吾：堰の被災機構としての護床工からの砂の抜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，pp.359-364，1987。
- 4) 神田敏一，村本嘉雄，藤田裕一郎：護床工の様式による下流部局所洗掘形状の相違，水工論文集，第36巻，pp.43-48，1992。
- 5) 名合宏之：砂層内水圧変動と液化化，土木学会水理委員会，水工学シリーズ82-A-9，1982。
- 6) 名合宏之，前野詩朗：変動水圧作用下における護岸の裏込め土砂の吸い出しに関する研究，第32回水理講演会論文集，pp.595-600，1988。
- 7) Maeno S. and Nago H. : Settlement of concrete block into a sand under water pressure variation, Proc. of SOWAS'88, pp.67-76, 1988.
- 8) Mia Md. F. and Nago H. : Effect of liquefaction on local scour around a circular bridge pier under sudden water pressure drop, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.44, pp. 521-526, 2000.
- 9) 村上正吾，辻本哲郎，金崎伸夫，萱島正友：透過性防護工の橋脚周辺の局所洗掘に及ぼす影響について，水工学論文集第43巻，pp.629-634，1999。

(2000. 10. 2受付)