水路実験による堰上流護床工被災メカニズムの検討

岩手大学農学部 三輪 弌

1. 研究の背景と目的

平成 19 年 9 月の台風 9 号による洪水によって、多摩川に設置されている宿河原堰上流の護床工が、Fig. 1 のように多数流出した。堰周辺の護床工被災は、通常、堰の下流側において発生することが多く、堰の上流護床工が被災した事例はあまり知られていない。そのため、堰を管理する国土交通省京浜河川事務所において被害状況の詳細な調査がなされた。その報告資料を参考にして、堰上流護床工の被災現象を小型水路実験によって再現し、被災が発生するメカニズムと要因を明らかにしようとした。

2. 実験の方法と手順

2.1 使用した実験水路

実験水路は、全長8m,幅20cmのジグザグ型蛇行水路(蛇行半波長86cm,屈折蛇行角24°Fig.2参照)とした.直線水路において明瞭な砂礫堆が形成される水理諸量(水路流下方向の谷勾配:1/70,水路床砂の平均粒径:0.8mm(0.6mm~1.0mm),流量:0.4,0.6,0.8L/sの3通り)を通水したさいに、水路上に十分発達して形成される砂礫堆の長さに合わせて蛇行水路の半波長を決めた。限界蛇行角より少し大きい蛇行角にして、砂礫堆の下流への移動を抑えた。約5蛇行の区間をとることができる。

2.2 堰と上流護床工模型

堰は、水路側壁に直角方向の堰とし、上流から全長の約2/3にあたる区間付近に設置した。堰の位置は、蛇行半波長区間において、順次4カ所に移動させて実験した。Fig.2の堰位置は③とし、他の堰は①、②、④の位置に配置する。

護床工模型としては、Table 1 のように、比重と大きさを変えた5種類を用い、堰の上流側に敷き並べる.



Fig. 1 多摩川宿河原堰における上流護床工の流亡(平成19年9月洪水による. 同年10月三輪撮影)

Experimental study on washed-away mechanism of bed protection works paved along upstream area of a diversion dam by Hajime MIWA

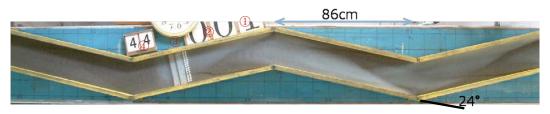


Fig. 2 実験水路と上流護床工を配置した堰 小タイルを2列配置した堰3の場合. 2分間通水後の撮影.

2.3 実験の手順

水路砂床は、通水前は所定の 勾配になるように平坦に(堰上 流は、堰の天端高に合わせ、堰 下流は、それより 6mm 下がり の高さで)均してある。通水後、 凹岸下流側河岸沿いで洗掘さ れて淵が生じ、凸岸下流側に堆 積する。淵にかかる堰の下流 側に大きな局所洗堀が生じる.

上流側に敷き並べられた護 床工模型は、模型の種類や堰の 位置、流量のちがいによって、流亡状況が異なる。各実験において、流亡の有無と流亡個数を - 調べるとともに、流亡状況を把握するため、直上方と斜め上方からビデオ撮影を行う。また、随時パンチくずを流下させて表面流況も記録した。

3. 実験結果

3.1 護床工流亡の経過

通水当初,護床工模型は,

Table 1 上流護床工模型の諸元一覧

護床工 諸元	小タイル	4コ連結 タイル	ブリキ板	画鋲	ナット
縦横 (mm)	10×10	20×20	10.4×10.4	直径 10	10×10
厚み (mm)	4.3	4.3	0.1	1.0	2.5
比重	2.31	2.31	8.11	8.05	7.84
備考	2列配置	1列配置	1列配置	2列配置	中央に直径 6mmの円穴 2列配置

Table 2 上流護床工のタイプ別流亡状況一覧

堰位置	護床工タイプ 流量	小タイル	4 コ連結 タイル	ブリキ板	金属画鋲	ナット
	0.4 L/s	0	_	_	_	_
1	0. 6	0	_	_	_	_
	0. 8	0		_		_
	0. 4	0	_	_	_	_
2	0. 6	2	(1)	_	_	_
	0. 8	4	1(1)	_		_
	0. 4	2	0	_	_	_
3	0. 6	6	1	_		_
	0. 8	9	2	_	7	0
4	0. 4	0	0	0	0	_
	0. 6	1	0	1	0	_
	0. 8	4	2	3	4	_

①から順次22cm間隔で下流へ移して設置

注) -: 実施せず, (1): 位置が少しずれたもの

Fig. 2 のように堰の上流側の平坦な砂床に埋め込まれている. 時間の経過とともに、屈折蛇行水路の凹岸下流河岸沿いに深掘れ、凸岸下流前面に堆砂が発達してくる. 護床工の上流砂床が深掘れし、護床工の上端面が露出して、水流を直接受けるようになった後、突然、めくれ上がるように下流に流亡する. 連続的にあるいは時間をおいて、いくつか流亡した後は、流亡しなくなる.

3.2 堰の位置による流亡状況のちがい

流亡状況は、Table 2 に整理したように、堰位置と流量によって異なる。Fig. 3 は4 コ連結タイルの堰位置③、0.6L/s の場合で、最も高流速部分が通過する位置でタイルが流亡している。Fig. 2 にある 2 列に並べられた 1cm 四方のタイルの場合で比較すれば、堰①では流亡しないのに対し、堰③において最も多数のタイルが流亡する。流量の増大とともにより多数のタイルが流亡する。

3.3 流量増大の効果

堰①の場合は、最大流量でも流亡したタイルはなかった。他の堰②、④では、0.4L/s のときに流亡しなかったのに、流量の増大とともに流亡個数が増えていった。4コ連結タイルほかの護床工模型をみても、流量増大によって流亡しやすくなることが分かる。

3.4 他の護床工の場合

タイルを真四角に4個連結したものは、1個当たりの重さも大きくなり、1辺の長さも大きくなり、1辺の長さも大きくなることから、1個の小タイルに比べると流亡しにくくなる. ブリキ板と金属画鋲は、タイルより比重は大きいものの、厚さがないために、重量がなく砂床に埋め込めないので、小タイルと類似した結果になった。金属製のナットは、小タイルで最も多数が流亡した条件での実験においても流亡はなかった。

3.5 上流護床工設置の効果

上流護床工を設置せず、堰③で通水すると、Fig. 4 に見られるとおり、堰の上流側砂床が堰上端に沿って局所的に深掘れを生じる。流量増大とともに深掘れは大きくなる。そこに、護床工を設置した場合、残留した護床工模型の影響で、深掘れが抑えられる。特に、すべてが残されたナットの場合、砂床を被覆する効果によって深掘れ防止の効果が大きい。



Fig. 3 4 コ連結タイルの流亡状況 (堰③, 0.6L/s の場合)

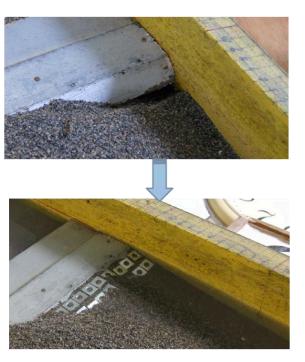


Fig. 4 上流護床工設置の効果 (ナット配置. 堰③, 0.8L/s の場合)

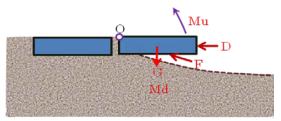


Fig.5 上流護床工に働く力とモーメントの概略 G:護床工模型重力、F:下面流体力、D:上流面流体力 Md:0軸回り下向きモーメント、Mu:0軸回り上向きモーメント

4. 上流護床工に働く力とモーメントの概算

護床工模型の流亡過程をみると、Fig. 5 に見られるように、上端下部の砂床が洗堀されて、上端部が全体的に水流にさらされると、下方から押し上げる力を受ける。めくれ上がるように流亡する場合と、全体が浮き上がって滑るように流亡する場合がある。蛇行水路における淵と洲の形状の発達によって、流速の平面的な遅速分布が生じるので、堰の位置が異なると、護床工上流端にぶつかってくる流速、ひいては流体力が異なり、流亡状況が変化する。

4.1 揚力の計算

Fig. 5は、小タイル2個並列で並べた場合に、上流側のタイルの下面が3/4露出した状態を示している。このとき、水流は、上流の深掘れ部から斜め上方に向かってくる。護床工下面と30°の角度をなして下面にぶつかってくるとして、各流量の揚力を下式によって計算してみると、Table 3の通りになる。いずれもタイルの重力の方が大きくなっている。

Q=0.8 L/S の場合(平均流速: 36.5cm/s を用いて計算)の揚力(流体力Fの上向き成分):

$$\rho v^2 A \sin 30^{\circ} (N) = 1000 \times 36.5^2 \times (1 \times 0.75) \times 0.5 \times 10^{-8} (N) = 0.50 \times 10^{-2}$$

なお、Q=0.4 L/sの場合の平均流速は 29.1 cm/s、Q=0.6 L/s の場合の平均流速は 33.6 cm/s として計算する.

4コ連結タイルとブリキ板の場合は、下面の上流側3/8が露出しているものとし、画鋲とナットは小タイル同様、上流側の3/4が露出しているとして計算した。いずれの場合も護床工模型の重力の方が大きくなっているが、小タイルとブリキ板については、流量0.8 L/s の場合に、値が近づいて流亡しやすくなることがわかる。

4.2 〇軸回りのモーメントの計算

Fig. 5 において、O軸回りの下向き、上向きのモーメントを計算してみる。上向きモーメントが大きくなったとき、護床工はめくれ上がるように流亡すると考えられる。下向き、上向きのモーメントは、それぞれ下式によって概算できる。なお、護床工上側面に働く力 D も存在するが、作用面積が小さくモーメントの腕の長さも短いので、ここでは無視している。

小タイルで
$$Q$$
=0.8 L/S の場合: $\mathrm{Md} = \mathrm{G} \times \frac{\mathrm{L}}{2} = 0.55 \times 0.5 \times 10^{-4}$ $\mathrm{Mu} = \mathrm{F} \sin 30^{\circ} \times \left\{ \frac{\mathrm{L}}{4} + \frac{3\mathrm{L}}{4 \times 2} \right\} = 0.50 \times 0.625 \times 10^{-4}$

なお、4つ連結タイルの場合とブリキ板の場合は、下流端をモーメントの軸と考えて同様の計算を行う.

諸量	護床	E.	小タイル	4コ連結タ イル	ブリキ板	画鋲	ナット
重力 G(10 ² N)			0.55	2.21	1.15	0.60	1.37
揚力 Fsin30° (10 ⁻² N)	流	0.4L/s	0.32	0.64	0.65	0.27	0.23
		0.6L/s	0.42	0.85	0.87	0.36	0.31
	量	0.8L/s	0.50	1.00	1.03	0.42	0.37
下向きモーメント Md(10⁵N・m)			2.75	22.10	11.50	3.00	6.85
上向きモーメント Mu(10 ⁵ N・m)	流	0.4L/s	1.98	10.30	10.60	1.67	1.46
	派 量	0.6L/s	2.65	13.80	14.20	2.23	1.94
	里	0.8L/s	3.12	16.20	16.70	2.63	2.29

Table 3 力とモーメントの大きさ比較(概算)

小タイル 0.8L/s とブリキ板 0.6L/s, 0.8L/s において、上向きモーメントが大きくなる. ナットでは、0.8L/s の場合でも下向きモーメントの方が 3 倍近くも大きく、流亡しないことが分かる.

4.3 概算結果の考察

Table 3の計算は、いずれの流量でも平均流速を用いて計算している。今回の実験蛇行水路の場合、右岸側壁沿いが淵になっ

て深掘れし、流れも集中して流速も大きくなる. そのため、 堰の位置によって上流護床工が受ける力とモーメントの 大きさが異なってくる.

堰③の場合、Fig. 6 に見られるように、右岸側に流れが偏り、高流速部になるのに対し、凸岸下流となる左岸側はパンチくずが流れない水裏となって流速は遅く、寄洲が発達する。この結果、平均流速から計算したモーメントの比較では、上向きモーメントが小さい流量 0.4L/s と 0.6L/s の場合にも、主流部分はより大きな力を受けるため、小タイルが流亡する。これに対し、最も流れが広がった位置にある堰①では、堰の上流側砂床が洗堀されないこともあって、どの流量でも小タイルの流亡はなかった。

他の護床工模型においても、堰位置のちがいと流量 (流速)のちがいによって、護床工模型の流亡が変化する 状況がよく現れている.



Fig. 6 堰を越える流れの様子 (水表面を流下するパンチくずの1/10 秒間の流跡、堰3)、0.6L/s の場合)



Fig. 7 多摩川宿河原堰上下流河道区間 (Google Earth より)

5. 現地被災状況の検討

5.1 堰と砂礫堆の位置関係

多摩川宿河原堰上流の河道区間は、Fig. 7 のように大きく右に左に蛇行している. 低水路内の砂礫堆は、低水路幅の3 倍程度の長さで形成されており、河道の湾曲をすり抜けるように移動しようとしている. しかし、小田急線鉄橋上流の強い湾曲の影響によって、右岸側に流れが寄せられるため、少し複雑な流れになっている. H.19 洪水直後の堰上流側の河床形態は、Fig. 8 の通り(左岸側から撮影)で、左岸に広く寄洲が発達し右岸側が淵になっている. 低水河岸護岸ブロックが投入されていることからみても、右岸側が水衝部であり、今回の実験における堰③の位置関係にあったことが分かる.

5.2 護床工に働く揚力と上向きモーメントの試算

現地での被災状況について、京浜河川事務所のCCTV映像の解析によって、実験と同様に護床ブロックの下面に働いた揚力によって、ブロックがめくれ上がるように流出したとされている。 洪水前に設置されていた護床ブロックの正確な形状資料が入手できなかったので、Fig. 9 に示す災害復旧工事において使用したブロックについて、4.1 および 4.2 と同様な試算を試みる。

護床ブロックの重量4トンは、水中重力で約23kNになる. それに対し、1620mm×1600mmの底面積から中央のく



Fig. 8 H. 19 洪水後の宿河原堰直上流区間の河床形状 (H. 20. 3 三輪撮影)

ぼみ部分の面積を差し引くと、約2m²の底面積になり、それに斜め30°下方から流体力が作用すると考え、その局所流速を4m/sと仮定すれば揚力は16kNになる。局所流速が5m/sあれば、重力より大きな25kNの揚力が発生し、流出する. 災害当時のブロックは、これよりも軽量の厚さのないもののようで、より小さい流速でも流出可能であったと推察される.

5. まとめと今後の課題

水路幅 20cm という小型水路の実験であったが、堰上流護床工の流 亡メカニズムをうまく再現し、力とモーメントのつり合い関係もほぼ合理 的な説明が可能であった。その解析に倣って行った現地災害での概算 ももっともらしい結果が得られた。

今後は、実験蛇行水路における流速分布測定を試みて、さらに定量 的な検討を進めるとともに、使用した護床工模型と現場ブロックとの力 学的な相似関係についても考察を深めていきたい.

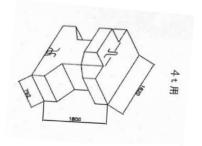


Fig.9 護床ブロック (H.19災害の復旧工事で使用)

本研究の遂行にあたって、国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所の工藤美紀男調査課長および松本将能開発調査係長から貴重な資料と情報の提供をいただいた.水路実験においては、平成21年度三輪研究室専攻生にご尽力していただいた.なお、費用の一部は、科学研究費補助金・基盤研究(C)(代表者・三輪弌、課題番号・20580260)によった.記して心よりお礼申し上げる.

[参考文献]

- 1)国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所(2007~2009):多摩川「過去の水害記録」,京浜河川事務所ホームページ,http://www.ktr.mlit.go.jp/keihin/disaster/record/index.htm
- 2)高井・三輪(2010)堰下流河床洗堀の発生メカニズムと深堀れ軽減対策,水土の知(農業農村工学会誌)78-1, pp. 49-52.
- 3) 高井・三輪(2009): 水路実験による堰下流護床工の洗堀軽減対策効果の検討, 平成21 年度応用水理部会講演集(農業農村工学会), pp. 1-6