

1. はじめに：近年都市河川においてコンクリート製の護岸・根固め工に対し河川の景観や環境の保全に関する声が強くなり、水制の設置が試みられている。しかし水制自体まだまだ研究段階であり河川によって適した水制が異なることもあり、中には洗掘により壊れる水制がある。そこで本研究では河川の景観と安定性を考慮した自然形成型に近い三角錐の水制¹⁾を用いて実験し、その流れの特性が多自然川づくりに利用できるか検討した。

2. 実験方法：実験水路は全長 13m, 幅 60cm の水路を使用し、勾配を 1/500 で固定床実験と移動床実験を行った。また全長 6m, 幅 30cm, 勾配 1/2000 の水路でも移動床実験を行った(caseC-1)。固定床実験及び移動床実験の水理条件を表-1, 表-2 に、水制の写真を図-1 に示す。自然形成型水制のモデルは、針金、金網で造った型枠に細礫を詰めて作成し、固定床実験では底面からの高さ 7.5cm, 幅 14cm, 長さ 14.5cm の三角錐とした。幅 30cm の水路での移動床実験ではそれを 3.5cm の高さまで埋めた。幅 60cm 水路での移動床実験では底面からの高さ 14.5cm, 幅 24cm, 長さ 24.5cm の三角錐を作成し高さ 5cm まで埋めて河床より上は固定床と同じになるようにした。比較のための直方体水制は同様の方法で作成し、固定床実験では高さ 5cm, 幅 5cm, 長さ 10cm の直方体の水制とし、移動床実験では高さ 10cm, 幅 5cm, 長さ 10cm の直方体の水制を使用し、5cm を砂に埋めた。空隙率はいずれも体積比で約 22% である。直方体の水制は三角錐の水制の体積と流れ方向の投影面積が近くなるように寸法を決定した。固定床実験では水深 5cm, 流量 0.013m³/s とし、水深はポイントゲージを用い、流速は 2 成分電磁流速計を用いて計測した。移動床実験では中央粒径 $D_{50}=0.571\text{mm}$ の砂を使用し、流量を変化させて水深を 5cm に固定し、通水開始から 90 分後の河床の高さをレーザー距離計を用いて計測した。caseB-4 では通水開始 50 分で水路の底まで洗掘したためそこで実験を中止した。

3. 実験結果と考察：図-2 に $z=2\text{cm}$ での主流速 U のコンターを示す。堰上げ効果により水制上流側の流速 U が遅くなっている。また、水制の背後では剥離渦により流れと逆の方向の流速が発生している。三角錐の水制は直方体に比べ水制背後の剥離渦の範囲が狭く、再付着点距離は直方体で 42cm 程度、三角錐では 32cm 程度であった。これは三角錐の水制は部分的に越流しているため、直方体の水制よりも抵抗が少ないことが原因と考えられる。図-3 に $x=-73\text{cm}$ の x 方向底面せん断応力の平均値で無次元化した y 方向の無次元底面せん断応力コンターを示す。直方体と三角錐のどちらの水制も上流側の水制先端で y 方向のせん断応力が最大となっており、直方体では

表-1 固定床実験の水理条件

	水制の形状	流量 Q (m ³ /s)	水深 H (cm)	平均流速 u_m (cm/s)	フルード数 F
caseA	直方体	0.013	5	43.33	0.619
caseB	三角錐				

表-2 移動床実験の水理条件

	水制	流量 Q (m ³ /s)	水深 H (cm)	平均流速 V (cm/s)	フルード数	推定摩擦速度 u_{*c} (cm/s)	限界摩擦速度 u_{*c} (cm/s)	u_{*c}/u_{*c}	
caseA-1	直方体	0.006	5	20	0.286	0.0144	0.0177	0.816	
caseA-2		0.007		23.33	0.333			0.0168	0.952
caseA-3		0.009		30	0.429			0.0217	1.224
caseB-1	三角錐	0.006		20	0.286			0.0144	0.816
caseB-2		0.007		23.33	0.333			0.0168	0.952
caseB-3		0.009		30	0.429			0.0217	1.224
caseB-4		0.013	43.33	0.619	0.0313	1.768			
caseC-1		0.0014	3	15.6	0.287	0.0123	0.693		



(a)三角錐の水制 (b)直方体の水制

図-1 水制の写真

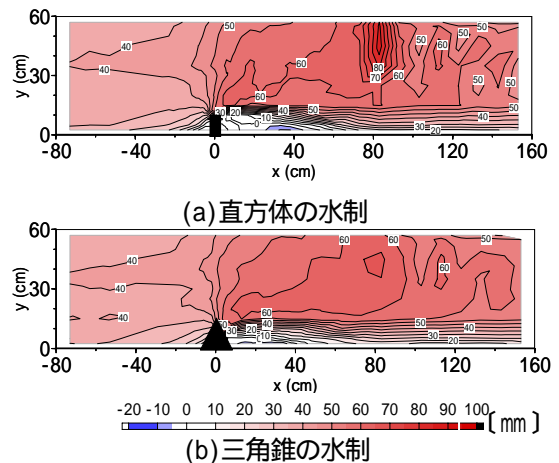


図-2 主流速 U コンター ($z=2\text{cm}$)

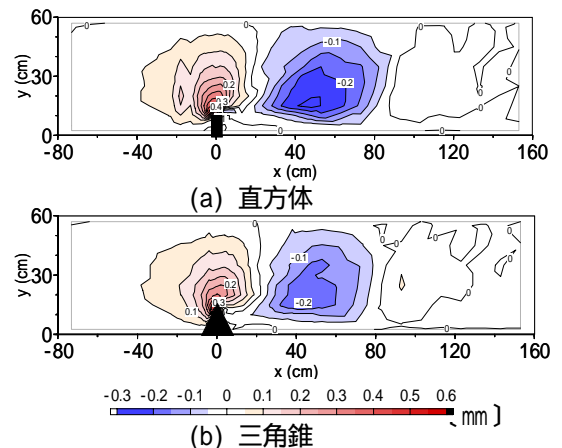
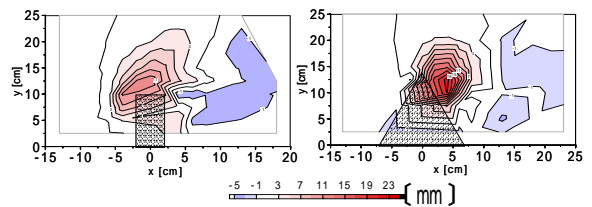


図-3 y 方向の無次元底面せん断応力コンター

$(x,y)=(-2,12.5)$ の位置で最大値 0.913 , 三角錐では $(x,y)=(-2,12.5)$ で最大値 0.743 となっている . 比較すると三角錐の方が最大値は小さくなっているが , これも三角錐先端の越流による影響であると考えられる . 図-4 に $z=2\text{cm}$ の鉛直方向流速 W のコンターを示す . 三角錐の水制は先端部分の下流側を中心に下降流が発生している . 直方体の水制は前面から下降流があり , 水制の先端から y 方向 2.5cm のところで最大となっている . 下降流速の最大値は三角錐の水制の方が約 10cm/s 程度大きい . これは越流した流れが三角錐の斜面によって先端部分に集まるためと考えられる .

河床変動について , まず caseC-1 の河床コンターを図-5 に示す . 水制下流側で大きく洗掘するが , 水制周辺の局所洗掘はあまり起こらず安定するという結果となった . 水制の下流側でのみ洗掘したのは , 水制周辺では摩擦速度が限界速度以下であり , 図-2 において流速が速くなっていた箇所でも局所的に限界摩擦速度を超えたことによる . 次に図-6 に各流量時の移動床実験の河床高コンターを示す . caseB-1 では洗掘量は少ないが caseC-1 のように水制の下流側でのみ洗掘した . caseB-2 では下流側の洗掘が水制先端まで達し水制先端の局所洗掘が発生した . 最終的に水制の底まで洗掘し , 水制の下をもぐる流れが発生した . さらに流速を速くした caseB-3 では全体的に推定摩擦速度が限界摩擦速度を超えたため , 下流側の洗掘と同時に図-3 の y 方向のせん断応力が発生している場所から洗掘が始まり , 水制全体が側壁近くまで洗掘した . それに対して直方体の洗掘は図-3 より水制先端の y 方向のせん断応力が大きいいため上流側の水制先端から洗掘が始まる . その洗掘の地点から同心円状に洗掘が大きくなる . 図-7 に平均流速 u_m の変化に対する最大洗掘深 D_{max} , 洗掘体積 V_s の変化についてのグラフを示す . 三角錐の水制は流速が遅い場合は水制先端の下流側でのみ洗掘するが , $u_m=23.3\text{cm/s}$ を境に水制の底まで洗掘するため , 直方体よりも最大洗掘深 , 洗掘体積の変化の傾きが大きい . さらに流速 30cm/s では , 水制先端から流れ方向の右岸側へと洗掘が進むことで洗掘体積は大きく増えているが , 水制の底まで洗掘すると馬蹄渦の発達が始まり最大洗掘深はあまり増えることはない . 直方体では流速 20cm/s で最大洗掘深が三角錐より深かったが 23.3cm/s で逆に小さくなり , 流速 30cm/s で三角錐とほとんど同じとなった . 最大洗掘深に対し洗掘体積が大きく異なるのは , 水制の上流側が洗掘したとき , 三角錐の方が流れ方向の投影面積が遙かに大きく , 馬蹄渦による洗掘が大きくなるためと考えられる .

4 . おわりに : 固定床実験と低流速の実験結果から三角錐の水制は局所洗掘が抑制され安定すると考えた . 掃流力が一定値を超えると水制周辺の局所洗掘は直方体以上に発達した . 今回の実験結果を踏まえて自然形成型水制の構造により近づけて実験を行い , 今回の三角錐の水制と



(A) 直方体 (B) 三角錐
図-4 鉛直方向の流速 W コンター

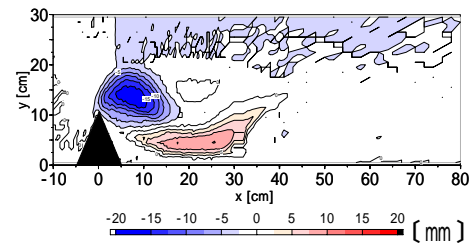
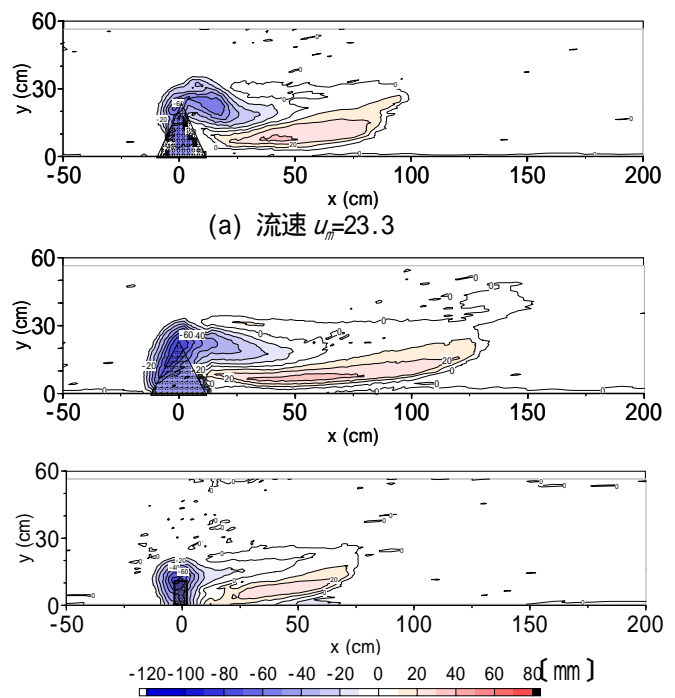
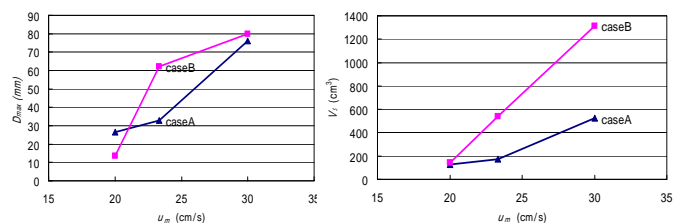


図-5 河床高コンター



(a) 流速 $u_m=23.3$
(b) 流速 $u_m=30.0$
図-6 河床高コンター



(a) 洗掘体積の変化 (b) 最大洗掘深の変化
図-7 流速の変化に対する変化量

の比較などから洗掘のメカニズムや自然形成型水制の安定性など , 多自然川づくりに適した水制を追及していきたい .

参考文献:(1) 須賀如水・三品智和 : 自然形成型水制の合理性に関する第一段の考察 , 水工学論文集 , pp.1033-1038 , Vol.54 , 2010.2 .