

# 静的洗掘条件下でのリブレット円柱の 局所洗掘特性

朝位孝二 (社会建設工学科) 高橋宏道 ((株) ワールド測量設計) 河元信幸 (社会建設工学科)

## LOCAL SCOUR AROUND CIRCULAR CYLINDER WITH RIBLET UNDER CLEAR WATER SCOUR CONDITION

Koji ASAI (Department of Civil and Environmental Engineering)  
Hiromichi TAKAHASHI SUWA (World Survey and Design Co., LTD.)  
Nobuyuki KAWAMOTO (Department of Civil and Environmental Engineering)

Asai et al. have proposed a cylinder with multi riblets in order to improve the lack of a cylinder with single riblet proposed by Saito et al. Asai et al. investigated the characteristics of the local scour with them under the hydraulic condition fixed to one type. In this paper, the dependences of the local scour with a cylinder having multi riblets on the experimental parameters which are the Froude number, cylinder types, a width of a riblet, water depth are discussed. The experimental parameters are varied systematically, and the clear water scour experiments are conducted.

The characteristics of the local scour are influenced strongly by the Froude number  $Fr$ . When  $Fr=0.3$ , the reduction effect of the local scour decreases as the ratio of water depth to a diameter of the cylinder  $H/D$  increases. On the other hand, the dependences on  $H/D$  are not so much large when  $Fr=0.4$ .

**Key Words** : local scour, riblet, clear water scour, maximum scour depth

### 1. はじめに

構造物周りの局所洗掘現象は河道内に設置された橋脚の安全性に関連し古くから研究されており、様々な洗掘軽減工法が提案されている。その一つとして斎藤・岩本らは円柱表面に一本の細幅溝(以下、リブレットと称する)を設置する方法を検討している<sup>1)</sup>。これは円柱前面に生じる馬蹄形渦をリブレット内に吸収させることで渦を崩壊させ、洗掘作用を軽減しようとする考えに基づいている。斎藤・岩本らの研究では、円柱と河床面との境に単一水平リブレットを設けることで、洗掘現象を 30~50%軽減できることを実験的に示している。しかし、洗掘現象が進行するとその効果が小さくなることが報告されている。この原因として、洗掘現象が進行すると河床面とリブレット設置位置の間隔が拡がり、リブレットの効果が小さくなるためと考えられた。

朝位らは洗掘軽減効果の持続を目的として、円柱表面にリブレットを数段にわたり設置する工法を提案し、リブレットの設置位置や設置間隔を変化させて、その効果を実験的に検討した<sup>2)</sup>。そ

の結果、リブレットを円柱全体または、初期河床面から下側のみを設置した場合において洗掘軽減効果が認められた。しかしながら、朝位らの研究は水理条件を固定し、円柱形状とリブレット間隔をパラメーターとして検討したもので、水理条件の違いによる洗掘特性の変化は検討されていない。また斎藤・岩本らの研究も水理条件は一種類に固定されている。

本研究は、静的洗掘条件下において、円柱形状、リブレット間隔、フルード数、水深・円柱径比を系統的に変化させて、リブレット円柱の洗掘特性を実験的に検討したものである。

### 2. 実験方法

#### (1) 実験装置と円柱形状

実験は図-1に示す、長さ 600cm、幅 60cm、深さ 20cm のアクリル製開水路で行った。水路上流端から 300cm の位置に取り付けた長さ 100cm の砂箱の中に円柱を設置し、砂を河床面まで敷き詰めて洗掘現象を可能とした。使用する砂は、平均粒径 1.4mm で粒度分布がほぼ一様のもを使用

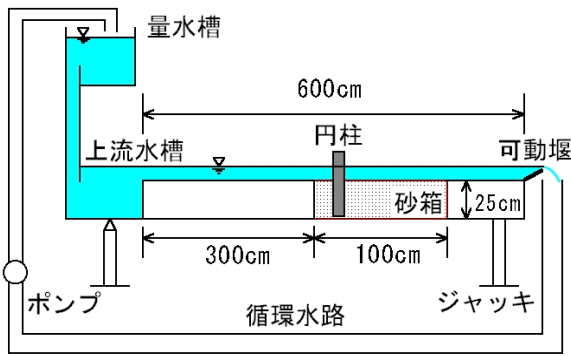


図-1 実験装置

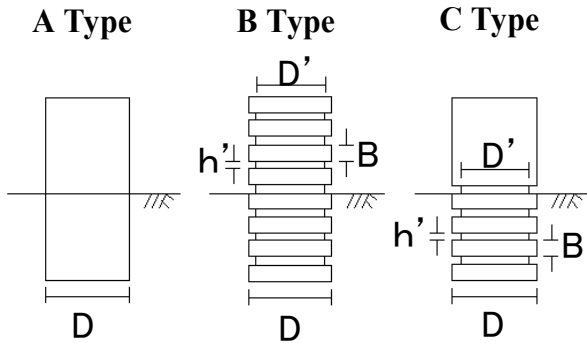


図-2 円柱形状 (D: 円柱直径,  $h'$ : リブレット幅, B: リブレット間隔,  $D'$ : リブレットの奥行きを差し引いた円柱径)

した。固定床部分には実験で用いた砂を薄くはりつけ水路全体にわたって同一の粗度面にした。

使用した円柱は図-2 に示すように、単円柱、全体リブレット円柱、下側リブレット円柱であり、それぞれ A Type, B Type, C type とする。円柱直径  $D$ 、リブレット幅  $h'$  およびリブレット奥行きは一定値とし、それぞれ 40mm, 2mm, 2mm とした。リブレット奥行きを差し引いた円柱径  $D'$  は 36mm となる。リブレット間隔  $B$  を 2mm, 6mm, 10mm と変化させた。洗掘形状はポイントゲージを用いて洗掘現象が安定した 480 分後に計測した。

(2) 実験条件

水路勾配は河川中流域を想定し 1/1000 とした。フルード数  $Fr$  を 0.3 と 0.4 の二通りとした。フルード数 0.3 の場合では水深  $H$  を 4cm, 6cm, 8cm と変えて水深・円柱径比  $H/D$  を 1, 1.5, 2 と変化させた。一方、フルード数 0.4 の場合では  $H/D$  が 2 になると動的洗掘状態となった。本実験は静的洗掘条件を対象としているため、この条件は採用しなかった。最終的に、フルード数 0.4 の場合では水深を 4cm, 5cm, 6cm と変えて  $H/D$  を 1, 1.25, 1.5 と変化させた。

全実験条件を表-1 にまとめる。全部で 42 通りの実験ケースとなる。一個の実験条件に対して最低 3 回の実験を行い、現象の再現性を確認した。3 章に示す実験データは複数回行った実験の平均

表-1 実験条件

Case	Fr	type	H/D	B(mm)	V(cm/s)	Q(cm <sup>3</sup> /s)	$u_s$ (cm/s)	$u_{sc}$ (cm/s)
1	0.3	単円柱 (A type)	1	-	18.8	4500	1.98	2.95
2			1.5	-	23.0	8300	2.42	2.95
3			2	-	26.6	12800	2.80	2.95
4		全体リブレット円柱 (B type)	1	2	18.8	4500	1.98	2.95
5			1.5	2	23.0	8300	2.42	2.95
6			2	2	26.6	12800	2.80	2.95
7			1	6	18.8	4500	1.98	2.95
8			1.5	6	23.0	8300	2.42	2.95
9			2	6	26.6	12800	2.80	2.95
10		下側リブレット円柱 (C type)	1	10	18.8	4500	1.98	2.95
11			1.5	10	23.0	8300	2.42	2.95
12			2	10	26.6	12800	2.80	2.95
13			1	2	18.8	4500	1.98	2.95
14			1.5	2	23.0	8300	2.42	2.95
15			2	2	26.6	12800	2.80	2.95
16		単円柱 (A type)	1	6	18.8	4500	1.98	2.95
17			1.5	6	23.0	8300	2.42	2.95
18			2	6	26.6	12800	2.80	2.95
19			1	10	18.8	4500	1.98	2.95
20			1.5	10	23.0	8300	2.42	2.95
21			2	10	26.6	12800	2.80	2.95
22	0.4	単円柱 (A type)	1	-	25.0	6000	1.98	2.95
23			1.25	-	28.0	8400	2.21	2.95
24			1.5	-	30.7	11000	2.42	2.95
25		全体リブレット円柱 (B type)	1	2	25.0	6000	1.98	2.95
26			1.25	2	28.0	8400	2.21	2.95
27			1.5	2	30.7	11000	2.42	2.95
28			1	6	25.0	6000	1.98	2.95
29			1.25	6	28.0	8400	2.21	2.95
30			1.5	6	30.7	11000	2.42	2.95
31		下側リブレット円柱 (C type)	1	10	25.0	6000	1.98	2.95
32			1.25	10	28.0	8400	2.21	2.95
33			1.5	10	30.7	11000	2.42	2.95
34			1	2	25.0	6000	1.98	2.95
35			1.25	2	28.0	8400	2.21	2.95
36			1.5	2	30.7	11000	2.42	2.95
37		単円柱 (A type)	1	6	25.0	6000	1.98	2.95
38			1.25	6	28.0	8400	2.21	2.95
39			1.5	6	30.7	11000	2.42	2.95
40			1	10	25.0	6000	1.98	2.95
41			1.25	10	28.0	8400	2.21	2.95
42			1.5	10	30.7	11000	2.42	2.95

H:水深 D:円柱径(4cm) Q:流量 V:断面平均流速  $u_s$ :摩擦速度  $u_{sc}$ :限界摩擦速度

値を用いた。

3. 実験結果と考察

(1) 単円柱による最大洗掘深のフルード数依存性

本研究はリブレット円柱と単円柱の洗掘深の比較が主要な目的となるが、その前に本実験の単円柱による洗掘深のフルード数依存性について考察する。

図-3 の横軸は水深・円柱径比を示し、縦軸は最大洗掘深  $Z_s$  を円柱直径で無次元化した無次元最大洗掘深  $Z_s/D$  を示している。白丸と黒丸の描点はそれぞれフルード数 0.3, 0.4 の本実験結果である。文献 3) から中川・鈴木, Shen, 斎藤らの静的洗掘条件下での実験値を読み取った値を参考値として図-3 に示している。直線および破線で示すのは Laursen-Toch, Andru らの推定式である。これら推定式は主として動的洗掘に関するものと言われているが<sup>3)</sup>、参考のために図示している。なお、既存の実験値のフルード数が不明のため、既存値のフルード数依存性は検討していない。

本実験値はフルード数に関係なく、水深・円柱径比に関して無次元最大洗掘深は単調に増加する。また水深・円柱径比の増加につれて洗掘深の増加量は小さくなる。この傾向は Laursen-Toch の

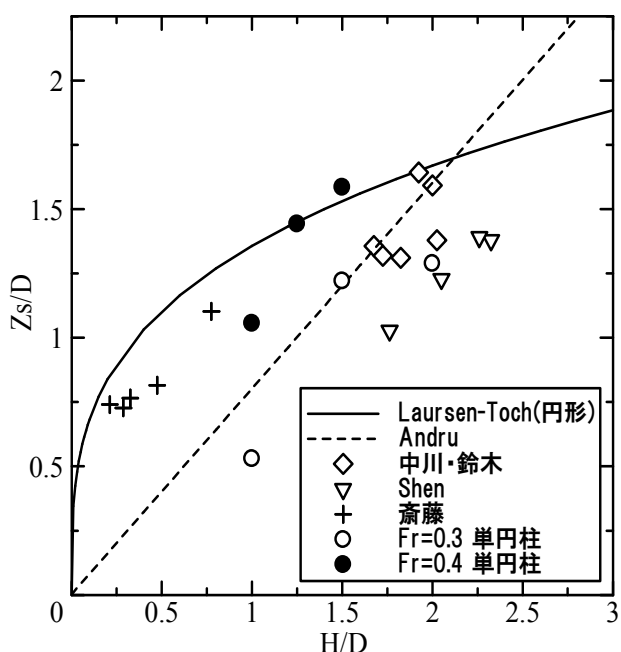


図-3 無次元最大洗掘深  $Z_s/D$  と水深・円柱径比  $H/D$  の関係 (A Type)

推定式と似ている。同一の水深・円柱径比であればフルード数が大きい方が無次元最大洗掘深は大きい。中川・鈴木, Shen らの実験値はフルード数 0.3 の本実験値に近い。

(2) 最大洗掘深

(a) 全体リブレット円柱 (B type)

図-4 に B Type の最大洗掘深と水深の関係を示す。縦軸は各実験で得られた最大洗掘深  $Z_s$  を同水理条件における A type の最大洗掘深  $Z_{s単}$  で除した無次元最大洗掘深  $Z_s/Z_{s単}$  である。横軸は水深・円柱径比である。描点の違いは円柱形の違いを示し、丸の描点は  $B=2\text{mm}$ , 三角の描点は  $B=6\text{mm}$ , 四角の描点は  $B=10\text{mm}$  である。白抜きの描点は  $Fr=0.3$ , 黒塗りの描点は  $Fr=0.4$  を示す。また、縦軸は 1 以上であれば単円柱に比べ洗掘促進効果, 1 以下であれば洗掘軽減効果を意味する。  $H/D$  に関する傾向性を示す補助的な線も挿入している。以降の図面も同様の補助線を挿入している。

$Fr=0.3$  では,  $H/D=1\sim 1.5$  のとき 30~40%程度の洗掘軽減効果がみられるが,  $H/D=2$  では, すべてのリブレット間隔において洗掘促進効果を示している。全体的に,  $H/D$  の増加に伴い掘軽減効果が小さくなり, 最終的に洗掘促進効果に変化する。 $Fr=0.4$  では, Case25( $H/D=1, B=2\text{mm}$ )を除くと水深・円柱径比に関係なく 10%程度の洗掘軽減効果を示している。 $Fr=0.4$  の中で Case25 のみが特異な値であるが, この理由は定かではない。同一の水深・円柱径比であれば  $Fr=0.4$  の方が  $Fr=0.3$  の場合よりも洗掘軽減効果は小さい。

図-5 に B Type の最大洗掘深とリブレット間隔

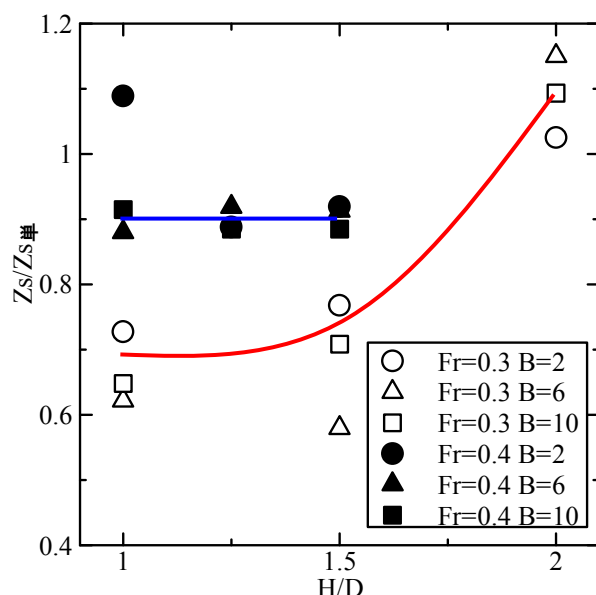


図-4 無次元最大洗掘深  $Z_s/Z_{s単}$  と水深・円柱径比  $H/D$  の関係 (B Type)

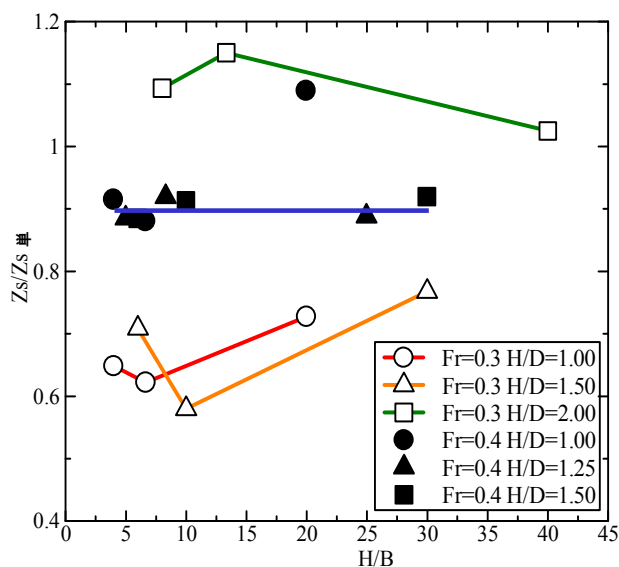


図-5 無次元最大洗掘深  $Z_s/Z_{s単}$  と水深・リブレット間隔比  $H/B$  の関係 (B Type)

の関係を示す。縦軸は図-4 と同様である。横軸は水深をリブレット間隔で除した水深・リブレット間隔比  $H/B$  である。白抜きの描点は  $Fr=0.3$ , 黒塗りの描点は  $Fr=0.4$  を示す。白丸の描点は  $H/D=1$ , 白三角の描点は  $H/D=1.5$ , 白四角の描点は  $H/D=2$  である。黒丸の描点は  $H/D=1$ , 黒三角の描点は  $H/D=1.25$ , 黒四角の描点は  $H/D=1.5$  である。

$Fr=0.3$  において  $H/D=1, 1.5$  では  $B=6\text{mm}$  で最小値をとる下に凸のグラフの傾向性を持つ。一方,  $H/D=2$  では逆に  $B=6\text{mm}$  で最大値をとる上に凸のグラフの傾向性を持つ。このように, 水深・円柱径比によって洗掘深のリブレット間隔に対する依存性は大きく変化することが分かる。 $Fr=0.4$  では, 特異な値を示す Case25 のデータを無視すれ

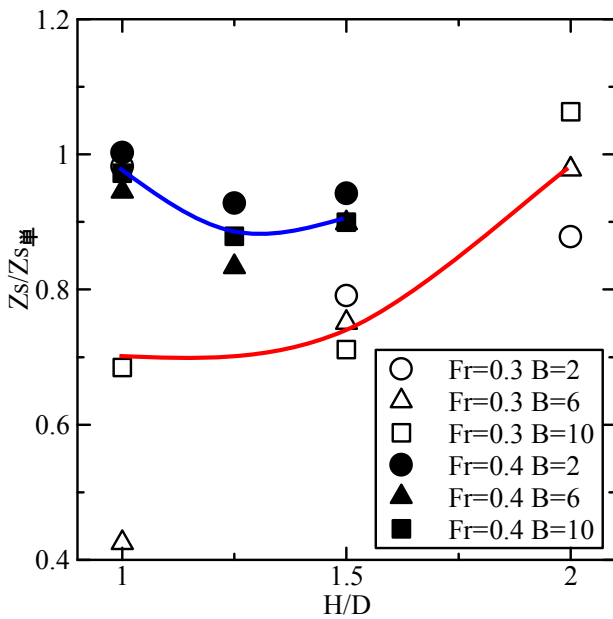


図-6 無次元最大洗掘深  $Z_s/Z_{s単}$  と水深・円柱径比  $H/D$  の関係 (C Type)

ば、無次元最大洗掘深の水深・円柱径比や水深・リブレット間隔比に関する依存性は小さい。

(b) 下側リブレット円柱(C type)

図-6 に C Type の最大洗掘深と水深の関係を示す。図の縦軸、横軸、描点の意味は図-4 と同様である。

Fr=0.3 では  $H/D=1$  のとき描点のばらつきは大きいですがすべてのリブレット間隔で洗掘軽減の効果が認められる。  $H/D=1.5$  では 20~30% 程度の洗掘軽減効果がある。  $H/D=2$  では  $B=10\text{mm}$  のときに洗掘促進効果が見られる。 B type と同等に水深・円柱径比の増加とともに洗掘軽減効果が小さくなる。

Fr=0.4 では Case13 ( $H/D=1, B=2\text{mm}$ ) のときは A Type と同程度の洗掘深である。それ以外では洗掘軽減効果が認められる。無次元洗掘深は水深・円柱径比に関して下に凸のグラフの傾向を持ち、  $H/D=1.25$  で最大の洗掘軽減効果を示す。 B Type とは異なる挙動である。しかしながら、 B Type と同様に Fr=0.3 と比較して洗掘軽減効果は小さい。

図-7 に C Type の最大洗掘深とリブレット間隔の関係について示す。図の縦軸、横軸、描点の意味は図-5 と同様である。 Fr=0.3 では、リブレット間隔と洗掘深の関係が水深・円柱径比によって大きく異なり、統一的な傾向性が見受けられない。一方、 Fr=0.4 では、詳細に見ればすべての水深・円柱径比において、  $B=2\text{mm}$  から  $B=6\text{mm}$  で無次元洗掘深が減少し、その後増加している。しかし、  $B=6\text{mm}$  での減少量は小さく、全体的には水深・リブレット間隔比に関して単調増加の傾向性が見受けられる。

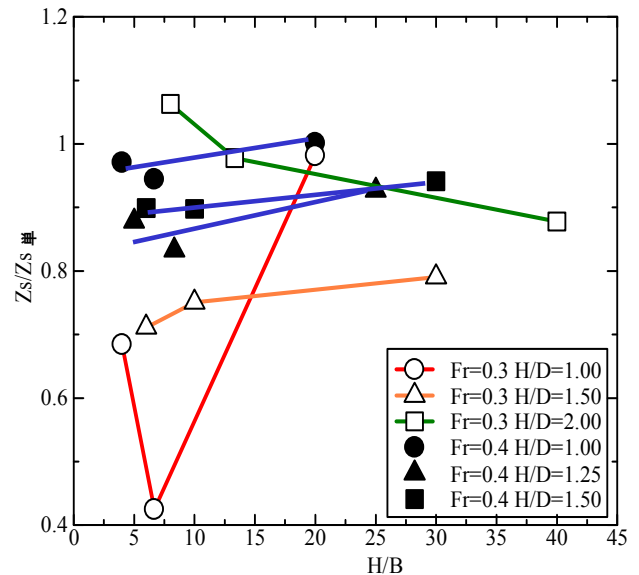


図-7 無次元最大洗掘深  $Z_s/Z_{s単}$  と水深・リブレット間隔比  $H/B$  の関係 (C Type)

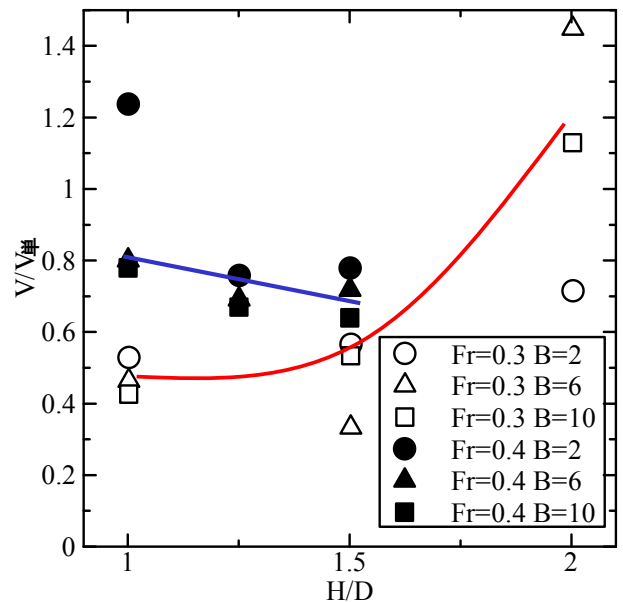


図-8 無次元洗掘体積  $V/V_{単}$  と水深・円柱径比  $H/D$  の関係 (B Type)

(2) 洗掘体積量

(a) 全体リブレット円柱(B type)

最大洗掘深は洗掘孔における局所的な情報である。全体的な洗掘現象の様相を検討するために洗掘孔の体積 (以下、洗掘体積量) について議論する。

B Type における洗掘孔の体積量と水深の関係を図-8 に示す。縦軸は、各実験で得られた洗掘体積量  $V$  を同水理条件における A type の洗掘体積量  $V_{単}$  で除した無次元洗掘体積量  $V/V_{単}$ 、横軸は水深・円柱径比である。描点は図-4 と同様である。

Fr=0.3 における無次元洗掘体積量は、水深・円柱径比が 1.5 以下では 50% 程度の洗掘軽減効果が見られるが、  $H/D=2$  では  $B=2\text{mm}$  を除いて洗掘促

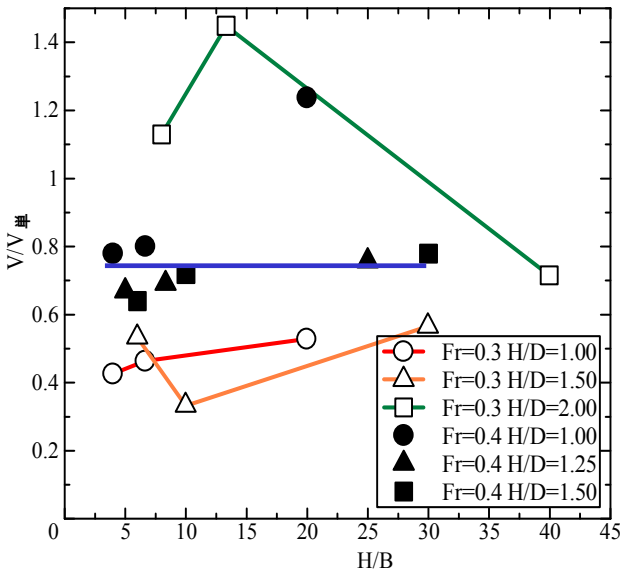


図-9 無次元洗掘体積  $V/V_{\#}$  と水深・リブレット間隔比  $H/B$  の関係 (B Type)

進効果となっている。特に Case9( $H/D=2, B=6\text{mm}$ )では 40%程度の洗掘増加となった。無次元洗掘体積量は定性的には水深・円柱径比に関して増加傾向を示している。一方、 $Fr=0.4$  については最大洗掘深において特異値を示した Case25 で 20%程度の洗掘促進が見られる。Case25 のデータを除けば 20~30%程度の洗掘軽減効果が認められ、また水深・円柱径比に対する無次元洗掘深の挙動は単調減少傾向を示す。

図-9 は B Type の無次元洗掘体積量と水深・リブレット間隔比の関係を示したものである。 $Fr=0.3$  では  $H/D=1$  を除けば図-5 と同様の傾向を示している。 $Fr=0.4$  では Case25 を除外して考えれば図-5 と同様に、無次元洗掘体積量の水深・円柱径比と水深・リブレット間隔比に関する依存性は小さい。

(b) 下側リブレット円柱 (C type)

図-10 は C type の洗掘体積量比と水深・円柱径比の関係である。 $Fr=0.3$  では、Case13 ( $H/D=1, B=2\text{mm}$ )で A Type と同程度の洗掘体積量を示す。また、Case15 ( $H/D=2, B=2\text{mm}$ )と Case21 ( $H/D=2, B=10\text{mm}$ )では若干の洗掘促進効果が認められる。それ以外のケースでは 30~60%の洗掘軽減効果を示している。 $Fr=0.4$  では、Case34 ( $H/D=1, B=2\text{mm}$ )以外はすべての条件で洗掘軽減効果を示している。また、 $H/D=1.25$  で最小値となる下に凸のグラフの傾向性を有する。

図-11 は C type の無次元洗掘体積量と水深・リブレット間隔比の関係を示したものである。 $Fr=0.3$  では  $H/D=1$  を除いて、 $B=6\text{mm}$  で最小値をとる下に凸のグラフの傾向性を持つ。また  $Fr=0.4$  においても詳細に見れば同様の変化をしているが、図-7 と同様に水深・リブレット間隔比に関し

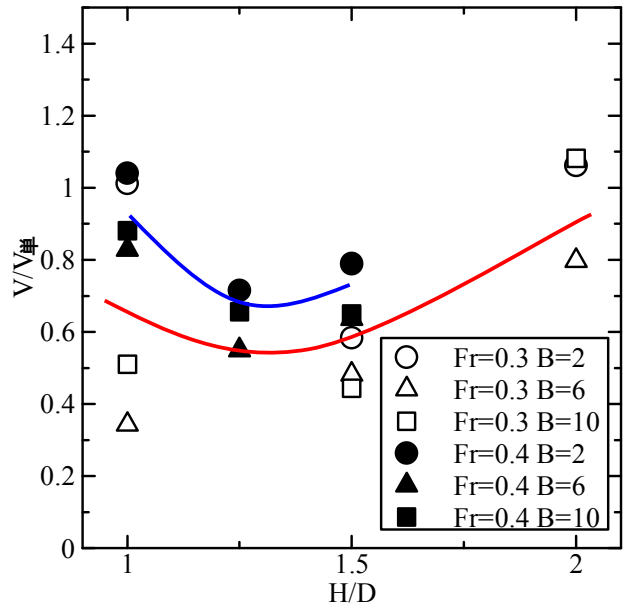


図-10 無次元洗掘体積  $V/V_{\#}$  と水深・円柱径比  $H/D$  の関係 (C Type)

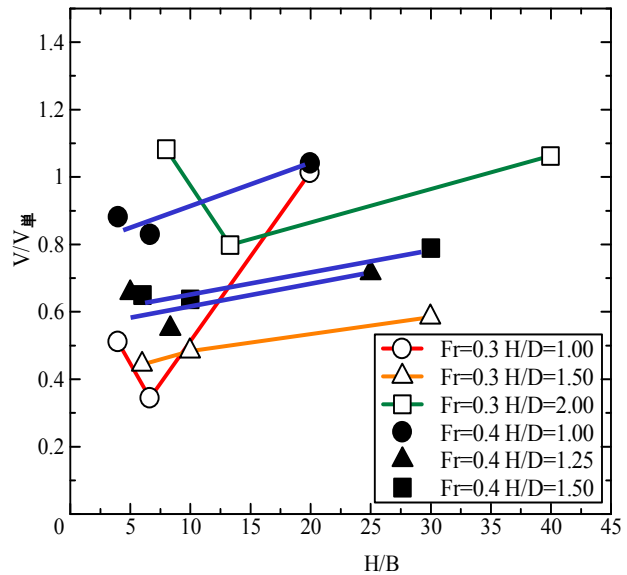


図-11 無次元洗掘体積  $V/V_{\#}$  と水深・リブレット間隔比  $H/B$  の関係 (C Type)

て単調増加の傾向性がある。

(3) 洗掘形状の比較

この節では洗掘孔の形状について議論する。先駆軽減効果が見られた二例を示す。フルード数 0.3 の代表例として Case2 (A Type,  $H/D=1.5$ )と Case5 (B Type,  $H/D=1.5, B=2\text{mm}$ )、フルード数 0.4 の代表例として Case23 (A Type,  $H/D=1.25$ )と Case26 (B Type,  $H/D=1.25, B=2\text{mm}$ )の等値線の比較を行う。それぞれ図-12, 13 に示す。縦軸は水路幅方向距離、横軸は流下方向距離を示しており、原点は円柱中心としている。また、縦軸、横軸ともに単位は cm である。流下方向は左から右で、等値線間隔は 1cm である。縦軸 0cm を境界に上下

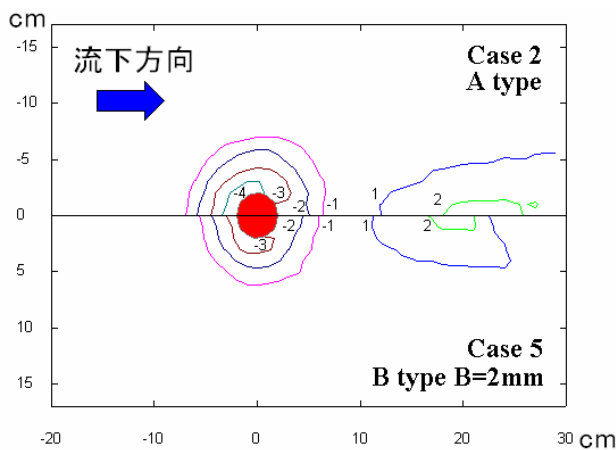


図-12 洗掘形状の比較( $Fr=0.3$ ,  $H/D=1.5$ )

で異なる Case を示している。

図-12 から Case5 は Case2 に比べ洗掘孔始端部が円柱側に寄った位置に存在し、洗掘孔の深さが浅いことが分かる。特に Case5 の円柱前面（上流方向の面）の洗掘深は Case2 のそれよりも浅いことが分かる。また、円柱背後の土砂堆積の規模も小さい。しかし、水路幅方向の洗掘孔長さは両者で大きな相違は見られない。

図-13 から B Type の流下方向長さは A Type のそれよりも短いことが分かる。B Type の洗掘孔始端部および洗掘孔終端部は A Type のそれらよりも円柱側に位置しており、また円柱前面の洗掘深が浅くなっていることが分かる。また、水路幅方向の洗掘孔長さは両者で顕著な差は見受けられない。図-12 と照らし合わせるとリブレットは洗掘孔の流下方向長さを短くするが、水路幅方向長さには大きな影響を与えていない。このことは洗掘軽減効果が見られたケースについて共通している。

#### 4. おわりに

本研究では、円柱形状、フルード数、水深、リブレット間隔を系統的に変化させ、各条件により洗掘規模に違いが現れることを確認した。円柱形状に関わらずフルード数によって洗掘特性が大きく異なることが分かった。本研究で得られた知見を以下に要約する。

- (1)  $Fr=0.3$ では、円柱形状に関わらず水深・円柱径比は1.5以下であれば最大洗掘深、洗掘体積ともに洗掘軽減効果が認められた。
- (2)  $Fr=0.3$ では、円柱形状に関わらず水深・円柱径比の増加とともに洗掘軽減効果が減少し、

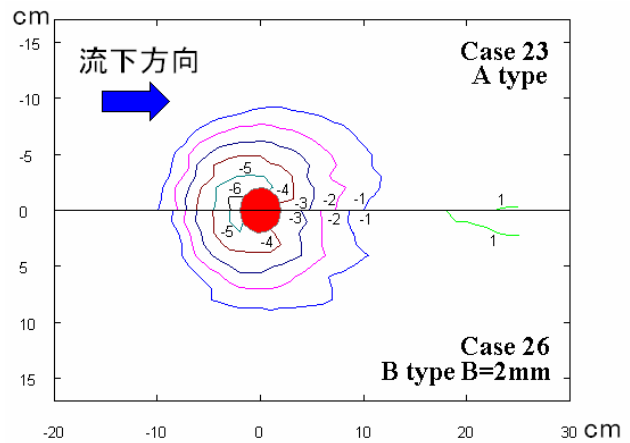


図-13 洗掘形状の比較( $Fr=0.4$ ,  $H/D=1.25$ )

$H/D=2$ では最大洗掘深、洗掘体積ともに洗掘促進効果が現れる。

- (3)  $Fr=0.4$ の B Type では Case25 で特異的な値を示したが、これを除外して考えれば全実験ケースで最大洗掘深、洗掘体積ともに洗掘軽減効果が認められた。また無次元最大洗掘深は  $H/D$  に依存せず、10%の洗掘軽減効果があった。
- (4)  $Fr=0.4$ の C Type では Case13 を除くすべての実験ケースで最大洗掘深、洗掘体積ともに洗掘軽減効果が認められた。B Type と異なり  $H/D$  に対する依存性が見受けられる。
- (5) 同一の水深・円柱径比であればフルード数が大きいと洗掘軽減効果は小さい。
- (6) 洗掘軽減効果の水深・リブレット間隔比への依存性について、 $Fr=0.3$ では円柱形状に関わらず水深・円柱径比でその依存性が異なる。一方、 $Fr=0.4$ の B Type では水深・リブレット間隔比と水深・円柱径比に強く依存しない。また  $Fr=0.4$ の C Type では水深・リブレット間隔比に対して単調増加の傾向が見られた。

#### 参考文献

- 1) 斎藤 隆, 岩本 浩, 今若謙氏, 河元信幸: 単一水平リブレットによる円柱周りの洗掘軽減, 山口大学工学部研究報告, No44, 1993.
- 2) 朝位孝二, 三村幸広, 河元信幸, 坪郷浩一: 細幅溝付き円柱周りの局所洗掘に関する研究, 水工学論文集, 第48巻, pp.823-828, 2004.
- 3) 土木学会編: 水理公式集 (平成11年版), pp.220-221, 土木学会, 1999

(平成 18 年 8 月 31 日受理)