

細幅溝付き円柱周りの局所洗掘に関する研究

STUDY ON LOCAL SCOUR AROUND CIRCULAR CYLINDER WITH RIBLET

朝位孝二¹・三村幸広²・河元信幸³・坪郷浩一⁴
Koji ASAI, Yukihiro MIMURA, Nobuyuki KAWAMOTO and Koichi TSUBOGO

¹正会員 博士(工学) 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²修士(工学) 山口県錦川総合開発事務所 (〒740-0724 山口県玖珂郡錦町大字広瀬780)

³正会員 山口大学技官 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁴学生員 修士(工学) 山口大学大学院 理工学研究科博士後期課程 システム工学専攻(同上)

It is very important for bridge safety to prevent a local scour around a bridge pier. The down flows from horseshoe vortex have an important role on the scour around the pier. Local scours should be controlled if we can handle horseshoe vortices. Saito *et al.* have investigated the local scour around the pier with a horizontal rectangular groove that is called a horizontal riblet. They have reported that the horizontal riblet can reduce the maximum scour depth by 20~50% comparing with the depth obtained by pier with no riblet. However, the effect of the riblet on the prevention of the local scour decreases as time goes.

We have attempted to add not single riblet but many riblets to the pier in order to improve the effect of the riblet on the local scour and studied the characteristics of the local scour experimentally. It is found in this study that the pier having the riblets under the sand bed surface is most effective for the local scour.

Key Words : local scour, horizontal rectangular groove, riblet, maximum scour depth

1. はじめに

河道内に設置される橋脚の周辺部には、局所洗掘現象とそれに伴う堆積現象が発生する。橋脚周りの局所洗掘は橋脚の安全性に関する重要な問題であり、様々な洗掘軽減工法が提案されている。橋脚周りの河床洗掘現象は、橋脚周辺部に形成される馬蹄形渦が重要な役割をしていると考えられ、馬蹄形渦を制御できれば洗掘現象もまた制御可能となるであろう。吉川ら¹⁾は橋脚前面に沿う渦による下降流を制御する目的で橋脚につばをつける方法を提案した。五十嵐ら²⁾は河床面近傍に平板を設置することで洗掘軽減を図った。これら以外にも粗度付け工法、杭式工法、孔あけ工法などが提案されており文献3)で紹介されている。

吉川らおよび五十嵐らはいずれも橋脚を模した円柱に突起物としてのつばまたは平板をつける工法を検討したが、斎藤ら⁴⁾は逆に円柱表面に円周方向に細い溝(以下、水平リブレットと呼ぶ。)を彫りつけることで局所洗掘の軽減を試みた。これは、リブレット内で発生する流れが円柱前面に生じる下降流を吸い込むことで洗掘を軽減しようとするものである。斎藤らは、初期状態において

河床面近くの円柱表面に幅と深さが共に円柱径の5%の大きさを持つ単一の水平リブレットを設けることで(図-2のBタイプを参照)、最大洗掘深を25~50%軽減できることを実験的に示した。しかし、洗掘現象が進行するにともないその効果が小さくなることも報告している。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大きくなり、リブレットの効果が小さくなるためと考えられる。

リブレットを初期河床面近傍だけでなく数段にわたり設置すれば(以下、多段リブレットと称する)洗掘軽減効果を持続することが期待できる。本研究では、リブレットの設置位置や設置間隔を変化させ、その効果を実験的に調べたものである。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験装置は図-1に示す幅60cm、長さ600cm、深さ20cmの亚克力製開水路である。上流端から3mの位置に取り付けた砂箱の中に円柱を設置し、砂を水路床面まで敷き詰めて静的洗掘実験を行った。なお、固定床部分には実

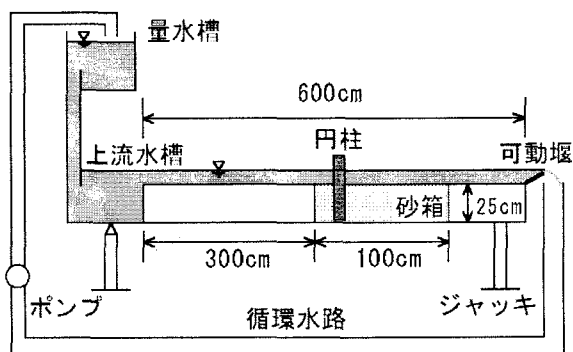


図-1 実験装置

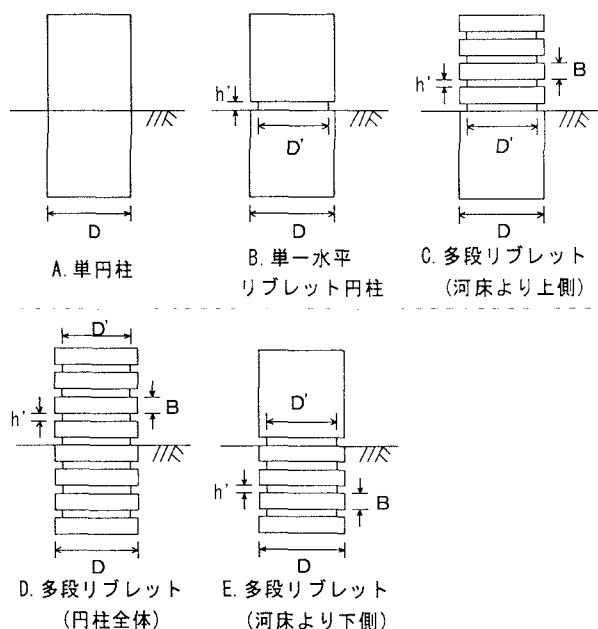


図-2 円柱型

験で用いた砂を薄くはりつけ水路全体に渡って同一の粗度面にした。

実験に使用した円柱形状を図-2に示す。円柱直径 D はすべて40mmとした。水平リブレットの幅 h' と奥行きは斎藤らの研究を参考に円柱径の5%である2mmとした。多段リブレット円柱は初期河床面より上側のみにリブレットを設置、円柱全体にリブレットを設置、初期河床面より下側のみにリブレットを設置した3通りを考えた。それぞれについてリブレットの設置間隔 B を2, 6, 10mmと変えて実験を行った。

(2) 実験条件

平均粒径1.435mmのほぼ一様粒径の砂を使用した。流量 Q は6000cm³/s、水深 h は4cm、通水時間は480分とした。各実験ケースにおいて、この時間で現象はほぼ平衡状態になっている。水路勾配は1/1000とした。実験条件を表-1に、実験ケースを表-2に示す。

洗掘深の計測位置は図-3に示すように、円柱前面部 Z_F 、右側面部 Z_R 、左側面部 Z_L 、背面部 Z_B の4カ所で、それぞ

表-1 実験条件

	記号	単位	値
水路床勾配	I		1/1000
流量	Q	cm ³ /s	6000
水深	h	cm	4
砂の平均粒径	d	cm	0.1435
限界摩擦速度	U_{*c}	cm/s	2.95
摩擦速度	U_c	cm/s	1.86

表-2 実験ケース

Case	Type	リブ設置位置	D (mm)	D' (mm)	h' (mm)	B (mm)
1	単円柱	—	40	—	—	—
2	単一リブレット円柱	河床面上	40	36	2	—
3	多段式リブレット円柱	河床より上側	40	36	2	2
4			40	36	2	6
5			40	36	2	10
6		円柱全体	40	36	2	2
7			40	36	2	6
8			40	36	2	10
9		河床より下側	40	36	2	2
10			40	36	2	6
11			40	36	2	10

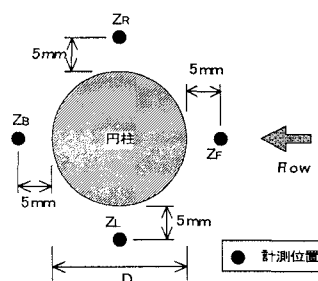


図-3 円柱周りの測定位置

れ円柱表面から5mmの位置とした。計測時間 t は洗掘開始後5分までは30秒間隔、その後6, 7, 8, 16, 30, 60, 120, 240, 480分とし、480分後には円柱周辺の河床面形状の計測も行った。洗掘深の測定は長細い針状のポイントゲージを使用した。なお、最大洗掘深は必ずしもこれらの計測位置に現れるものではないことを記しておく。

3. 実験結果と考察

(1) 円柱周りの洗掘深の時間変化

図-4～図-9に各実験ケースにおける円柱前面部と背面部の洗掘の時間変化を示す。横軸は水路の断面平均流速 u と円柱径 D で無次元化された経過時間 ut/D であり、縦軸は円柱径で無次元化された洗掘深をさらに同時刻における単円柱の無次元洗掘深で規格化したものである。つまり、縦軸の値が1より小さいときは単円柱より洗掘深が小さく洗掘軽減効果があり、逆に1より大きいときは洗掘促進効果があることを示している。

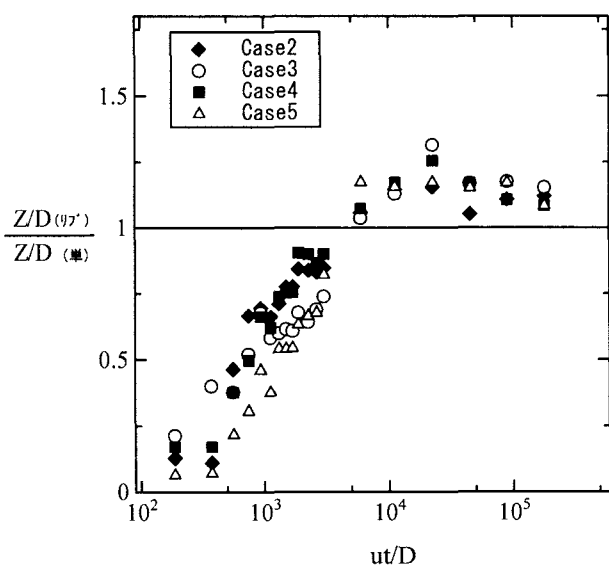


図-4 洗掘軽減効果(前面部)

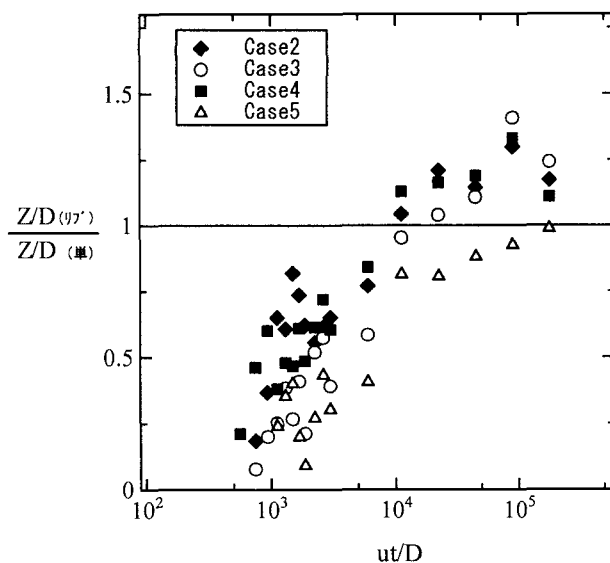


図-5 洗掘軽減効果(背面部)

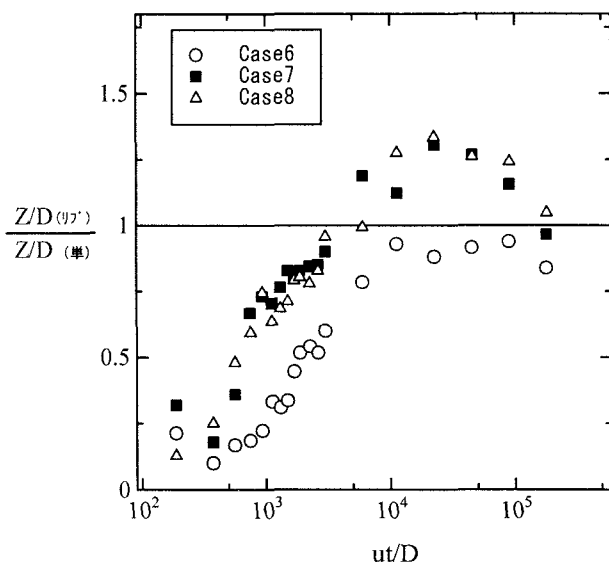


図-6 洗掘軽減効果(前面部)

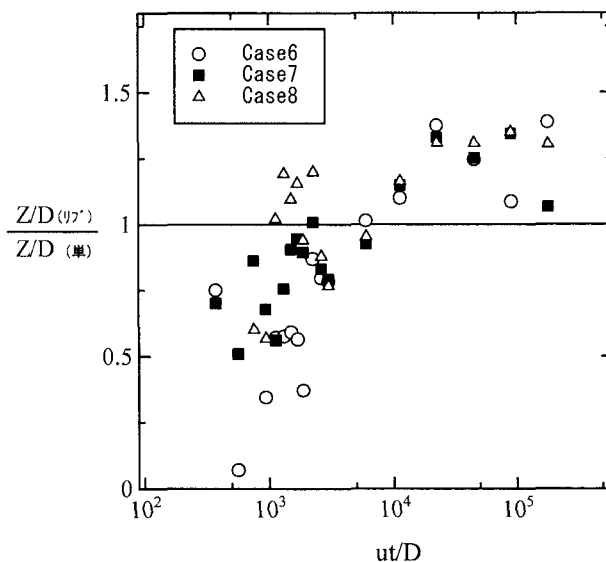


図-7 洗掘軽減効果(背面部)

図-4, 5は単一水平リブレットも含めて初期河床面より上側のみにリブレットを設置した場合の実験結果を示している。円柱前面部において洗掘初期段階には大きな洗掘軽減効果があるが、時間経過とともにその効果は小さくなり、無次元時間 10^4 を過ぎると単円柱よりも洗掘深が大きくなり洗掘促進効果が現れる。洗掘促進効果は経過時間や実験ケースに関係なくほぼ一定で、単円柱による洗掘深の1.1~1.2倍程度の洗掘深となる。初期河床面以下の円柱表面にはリブレットが施されていないので、河床面の低下により河床面とリブレット設置位置との間隔が大きくなり、リブレットが洗掘に対し有効に機能しなくなったものと推察される。

円柱背面部においても洗掘初期時に洗掘軽減効果があるが、時間の経過とともに洗掘軽減効果が小さくなり、無次元時間 10^4 を過ぎると単円柱よりも洗掘深が大きくなる。Case5は1を下回っているが、それ以外はデータの

ばらつきはあるものの単円柱の1.2倍程度の洗掘深になる。

図-6, 7は円柱全体にリブレットを設置した場合の結果を示している。円柱前面部および背面部において前図と同様、洗掘初期段階に洗掘軽減効果が大きく時間経過とともに効果が小さくなる。

前面部において、Case6では無次元時間 10^4 後は単円柱に比べて約10%の洗掘軽減効果が持続する。一方、他のケースではリブレット設置間隔の違いによる差は見られず、無次元時間 2×10^4 辺りで規格化された洗掘深はピークをとり、その後減少する。

円柱背面部において無次元時間 10^4 以降で単円柱時の1.3倍程度の洗掘深となる。リブレット設置間隔の洗掘深に対する明確な依存性は見受けられない。

図-8, 9は、河床面より下側のみにリブレットを設置した場合の結果を示している。これらの図においても無

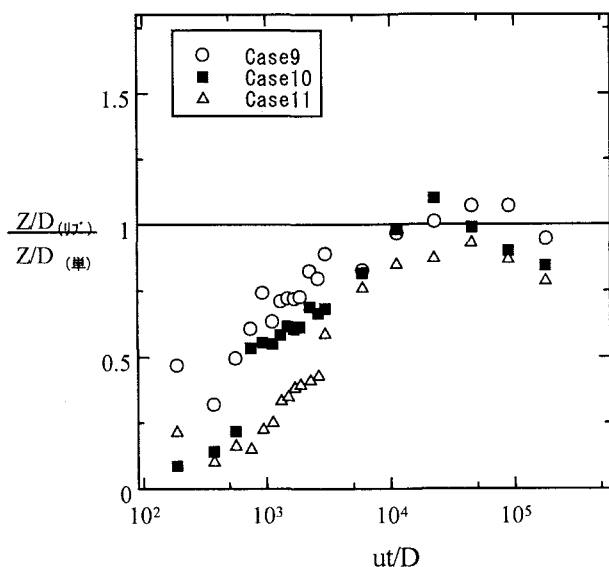


図-8 洗掘軽減効果(前面部)

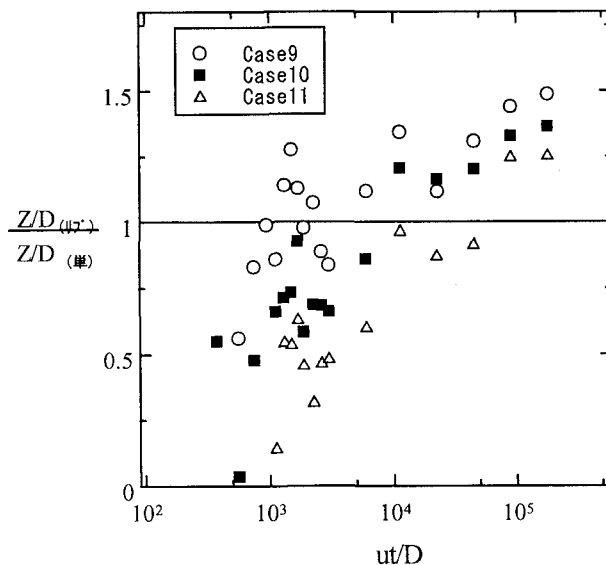


図-9 洗掘軽減効果(背面部)

次元時間 10^4 を境にして洗掘軽減効果が大きく、時間の経過とともにその効果が小さくなり、単円柱の洗掘深に近づくことが分かる。リブレット間隔が広がるにつれて洗掘軽減効果は大きくなり、 $B=10\text{mm}$ (Case11)では単円柱の場合と比較して無次元時間 10^4 以降において約20%の洗掘軽減が継続している。

図-10に洗掘軽減効果が最大であったCase11を対象として円柱周りの洗掘深の時間変化を示す。ここで、描点の違いは測定位置の違いを示し、丸描点は円柱前面部の洗掘深 Z_F 、三角形描点は円柱左右側面部の平均洗掘深 Z_S 、四角形描点は円柱背面部の洗掘深 Z_B である。また、黒描点はCase1(単円柱)の洗掘深を示し、白描点はCase11の洗掘深である。単円柱では側面部から先に洗掘が進行し続いて前面部、背面部と洗掘が進行していき、最終的に最大洗掘深は円柱前面に生じる。一方、Case11においても側面部から洗掘が生じるが、前面部および背面部は無次元時間 10^3 まではほとんど洗掘が進行していない。前面部、側面部および背面部の洗掘深は同程度の大きさとなり、洗掘孔はほぼ円錐状となる。

このようにリブレット付き円柱は円柱前面部および側面部において洗掘を軽減する効果が認められたが、背面部においては逆に洗掘が促進される。これはリブレットに吸い込まれた馬蹄形渦の下降流が円柱背後へと誘導され、背後部で何らかの渦あるいは噴流的な流れが形成されたためと考えられる。

(2) 最終形状による検討

図-11, 12はリブレットの間隔と洗掘開始から480分後における最大洗掘深および洗掘体積量の関係を示したものである。横軸はリブレット設置間隔 B をリブレット幅 h で除して無次元表示している。また縦軸は各実験条件で得られた最大洗掘深 $Z_{\max}$ および洗掘孔の体積量 V を単円柱の場合のそれらで規格化したものである。単一水平リ

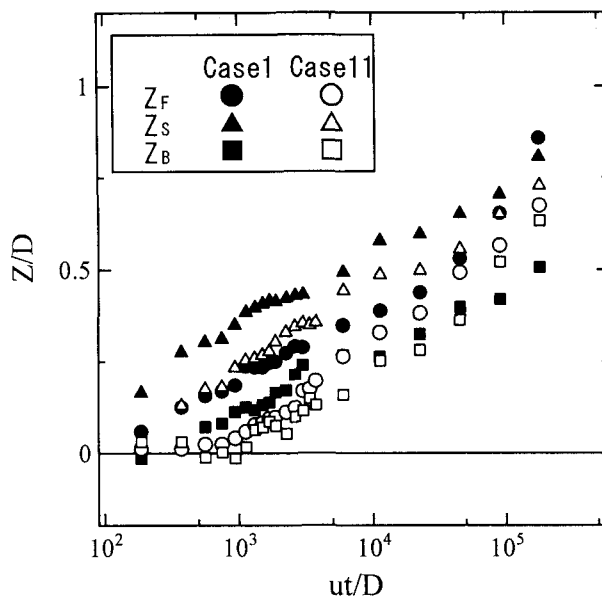


図-10 円柱周りの洗掘深の時間変化

ブレット(Case2)のデータも比較としてグラフ中に示している。

a) 最大洗掘深

図-11より上側および下側のみに設置した場合において、規格化された最大洗掘深はリブレット間隔に依存せず一定値をとることが分かる。それぞれ単円柱の場合の1.1および0.94程度の値である。一方、円柱全体にリブレットを設置した場合には、リブレット設置間隔が広がるにともない洗掘軽減効果から促進効果に変わり、上側のみに設置した場合とほぼ同様の効果となる。

多段リブレットの結果はすべて単一水平リブレット(Case2)の結果よりも小さく、リブレットの複数設置は単一リブレットよりも洗掘軽減効果があることが確認できる。

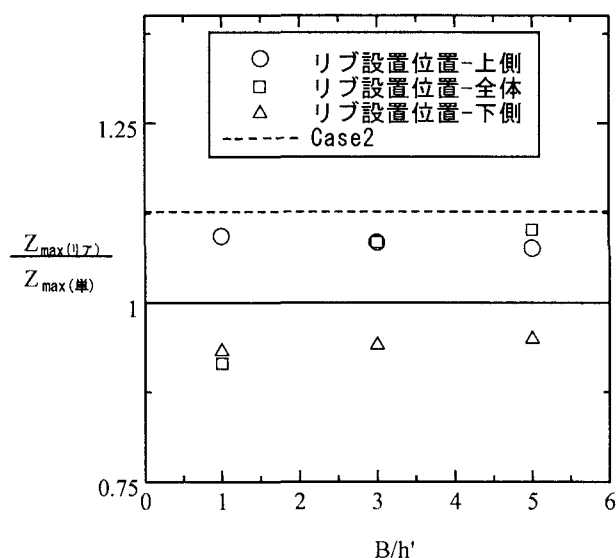


図-11 最大洗掘深

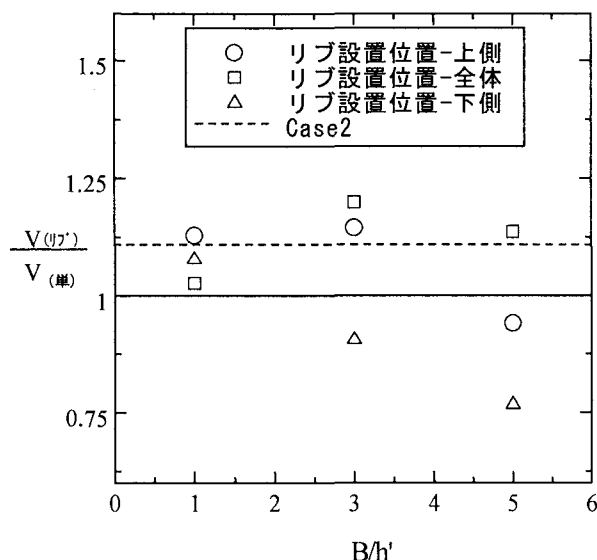


図-12 洗掘体積

b) 洗掘体積

図-12からリブレット設置位置によって洗掘体積とリブレット間隔の関係が異なることが分かる。無次元リブレット間隔が1では多段リブレットの形状に関わらずおよそ無次元洗掘体積1.1程度の値となっている。リブレットを上側および全体に設置した場合は、無次元リブレット間隔が3程度で洗掘体積は最大値をとり、その後減少する。一方リブレットを下側だけに設置した場合は単調に洗掘体積が減少する。無次元リブレット間隔5では単円柱に比較して約25%の軽減が認められた。

(3) 河床面形状

a) 河床面形状による単円柱との比較

図-13は、洗掘開始から480分後におけるCase1とCase11の河床面形状等値線図を用いて比較したものである。図中の●は円柱を示し、図中左側が上流側である。また、等値線間隔は0.5cmである。

Case11では円柱後方の洗掘孔が下流方向に延びているが、円柱前面部から側面部にかけては洗掘深が浅くなり洗掘が軽減している。3章(1)節で述べた様に、洗掘孔形状は円柱中心に関してほぼ点対称なすり鉢状となっている。

円柱背後の盛土形状を単円柱の場合と比較すると、盛土長さは短く、盛土高さは高くなっていることが分かる。

b) 縦断面による比較

図-14は、洗掘開始から480分後における円柱中心軸上の河床形状の縦断面を比較したものである。横軸は円柱中心からの距離 X を円柱直径 D で除し、縦軸は洗掘深 Z を円柱直径 D で除して、それぞれ無次元表示している。図中の $X/D=0$ の位置に示しているものは円柱であり、 $Z/D=0$ の位置の線は初期の河床面位置を示している。Case1, Case9, Case10, Case11の河床形状が示されている。

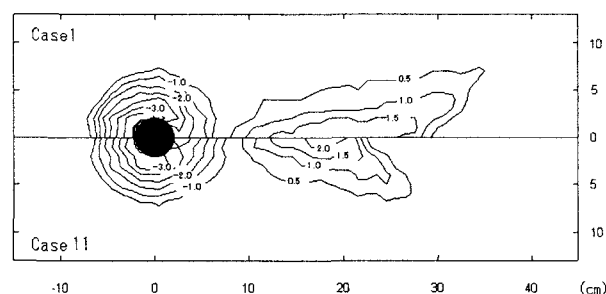


図-13 河床面形状の比較

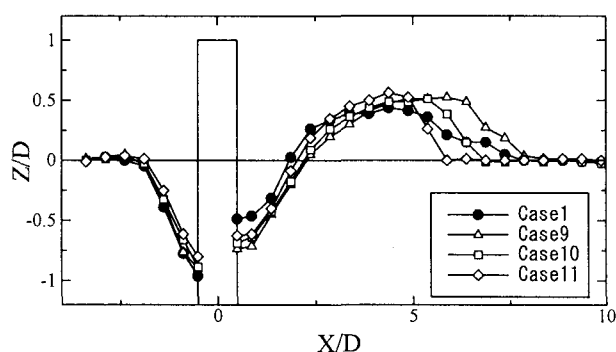


図-14 縦断面の比較

リブレット設置間隔に関係なく円柱前面部で無次元距離-2程度から洗掘が始まる。円柱前面部の洗掘孔はCase1, Case9, Case10, Case11の順で浅くなる。一方、円柱背面部の洗掘孔はCase9, Case10, Case11, Case1の順で浅くなる。円柱前面部・背面部ともに円柱のごく近傍ではリブレットの配置方法による洗掘深の相違が顕著であるが、円柱から離れるに従い洗掘深の相違は小さくなる。

一方、円柱背後の盛土の下流側形状が異なることがわかる。Case9は盛土高さが高くなり、盛土長さも長くなっている。これは、円柱背面部の洗掘孔が広がった

めに、飛散した砂粒子が高く舞い上げられて後方へ堆積されたと推察される。また、リブレット設置間隔が広くなるにともない盛土形状は、高く、短くなることを確認できる。Case11 は洗掘初期段階に盛土が高く盛られたために、飛散した砂粒子は後方に移動することが制限され、流下方向に対して横断方向に運搬されるか、あるいは再び洗掘孔に落ちたものと推察される。

4. 結論

本実験で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) リブレットの設置方法に関わらず、リブレットは洗掘初期段階に円柱周りの洗掘深を軽減することができる。しかし、この洗掘軽減効果は時間経過とともに小さくなり、条件によっては単円柱の洗掘深より大きくなる場合がある。
- 2) リブレットが設置された円柱の背後の洗掘深は単円柱の場合と比較して大きくなる。
- 3) 多段リブレットは単一水平リブレット (Case2) よりも最大洗掘深が小さくなる。
- 4) 河床面より上側にのみリブレットを設置した場合の最大洗掘深は、リブレット設置間隔に依存せず単円柱の洗掘深のおよそ 1.1~1.2 倍となる。
- 5) 円柱全体にリブレットを設置した場合、リブレット設置間隔が 2mm の場合に洗掘軽減効果が大きい。リブレット設置間隔が広がるにつれ、上側にのみリブレットを設置した場合の洗掘深と同様になる。
- 6) 河床面より下側にのみリブレットを設置した場合、円柱周りの洗掘深および洗掘体積量において、リブレット間隔が大きくなるにつれて洗掘軽減効果が大きくなる。しかし、リブレット間隔が大きくなるにともない円柱形状は単円柱に近づくため、ある設置間隔を超えると軽減効果はなくなると考えられる。
- 7) 本実験条件下では、河床面より下側のみにリブレッ

トを 10mm 間隔で設置した場合 (Case11) が最も洗掘軽減効果が得られた。その洗掘軽減効果は時間経過とともに小さくなるものの、円柱前面部と側面部においては 10~20%の軽減効果が持続することが確認できた。しかし、背面部においては洗掘が促進され、単円柱の約 1.25 倍の洗掘深となる。また、洗掘体積量も約 25%の軽減効果が得られた。

- 8) 河床面より下側のみにリブレットを設置した場合、リブレット設置間隔が広くなるにつれて洗掘体積は減少し、盛土形状は高く短くなる。

文献4)の斎藤らの実験ではリブレットを設置した場合の洗掘深は、単円柱の場合よりも必ず小さくなっている。一方、結論1)で述べたように本実験では必ずしもそうではない。これは斎藤らの実験の円柱径 D と水深 h の比 (h/D) がおよそ0.53であるのに対し、本実験のそれはおよそ1であることに原因があるものと思われる。今後は円柱径・水深比を種々変えて実験を進める予定である。

参考文献

- 1) 吉川秀夫, 福岡捷二, 岩間 汎, 曾小川久貴: 橋脚の洗掘ならびにその防止に関する考察, 土木学会論文報告集, 第194号, pp. 83-90, 1971.
- 2) 五十嵐 保, 西田幸造: 橋脚まわりの洗掘とその防止に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集 (B編), 58巻550号, pp. 336-342, 1992.
- 3) 吉川秀夫 編著: 流砂の水理学, pp. 337~341, 丸善株式会社, 1985.
- 4) 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.

(2003. 9. 30受付)