

単一水平リブレットによる円柱周りの洗掘軽減

齋藤 隆*・岩本 浩**・今若 謙氏***・河元 信幸*

On the Scour Around a Circular Cylinder with a Horizontal Rectangular Groove

Takashi SAITŌ, Hiroshi IWAMOTO, Kenji IMAWAKA

and Nobuyuki KAWAMOTO

Abstract

The purpose of the present investigation is to evolve a present measure the scour around a circular cylinder.

The down flows from horse shoe vortex have a important role on the scour around a circular cylinder. It indicates the possibility of the prevention of scour around a circular cylinder from control the horse shoe vortex by a horizontal rectangular groove at vicinity of river bed.

We describe an experimental study on the scour around a circular cylinder with a horizontal rectangular groove and discussed them in this paper. It became clear after examining the experimental results that a horizontal rectangular groove is very useful method to prevent the scour around a circular cylinder and the scour depth around a circular cylinder decreased approximately 20~50% by set up a horizontal rectangular groove around a surface of circular cylinder at vicinity of river bed.

1. 緒 言

橋脚周辺部において、流れの局所的変化によって起る河床変動（局所洗掘、堆積）現象は流れと河床面形状の一方が変化すると、それとともない他方が変化し、この変化によって前者が変化する極めて複雑な現象である。この洗掘現象は橋脚底部周囲に形成される襟巻渦が重要な役割をしている。この襟巻渦を抑制することで洗掘の軽減が可能との観点から、近年幾つかの洗掘軽減工法が提案されている。その一つとして渡辺ら¹⁾と池田ら²⁾のベーン工法がある。ベーン工法とは、橋脚前面に主流に対し直角、またはハの字型に平板（ベーン）を設置するものであり、これによって橋脚まわり

の襟巻渦を抑制しようとするものである。彼らの報告によるとベーン工法では洗掘を30~40%軽減することが可能である。しかし海中構造物などの流向が常に変化している場合は、洗掘を逆に促進させる可能性がある。また、五十嵐ら³⁾による円板を用いた方法もある。この手法は、橋脚下部の襟巻渦の形成位置に円板を設置するものである。円板工法では、橋脚の直径をDとしたとき、円板直径2.5D以上、砂面と円板との隙間0.2D以下では洗掘は完全に防止される。しかし円板工法を橋脚というスケールで考えると、施工、コストの面で問題がある。

本研究室では円柱表面のリブレットによって襟巻渦の円柱軸方向への影響をなくして、アスペクト比の極めて小さい円柱で二次元流体力を測定している。そこでこの制御方法を応用すると、河床面付近の円柱表面周りに水平なリブレットを切り込むことで、襟巻渦の下降流れを円柱前後の圧力差でリブレット内に誘起される流れに導くことで洗掘を軽減することが可能と考

*社会建設工学科

**大学院社会建設工学専攻

***社会建設工学科研究生

えられる。

そこで本文はこの様な観点から、円柱に単一の水平リブレットを設けることが洗掘の軽減に有効であることを確認するため、リブレットの深さを一定にして、リブレットの幅と河床面からの高さを系統的に変えて、円柱周りの静的洗掘実験で洗掘軽減の効果を調べた結果を報告するものである。

2. 実験装置・実験条件・実験方法

2.1 実験装置

実験はFig. 1に示してあるように、長さ6 m、幅60cm、深さ18cmの亚克力製開水路で行った。水路床は砂が一様に貼りつけられている。上流端より3.5mの位置に40cm×40cm×18cmの亚克力製の箱が水路床に取り付けられている。この箱の中央に円柱を設置し砂を水路床面まで敷いて実験を行った。また、水路床勾配は、下流部に据え付けられたジャッキにより調節した。なお等流に近い流れでの実験を行うため、下流端に設けた可動堰で水位の調整を行った。

使用した円柱は、Fig. 2に示されるように、直径D=40mmの塩化ビニール製であり、リブレット部分の内径d'は36mmに固定した。また、砂面からの高さH及びリブレット部分の幅h'は必要に応じて調節できるようにした。

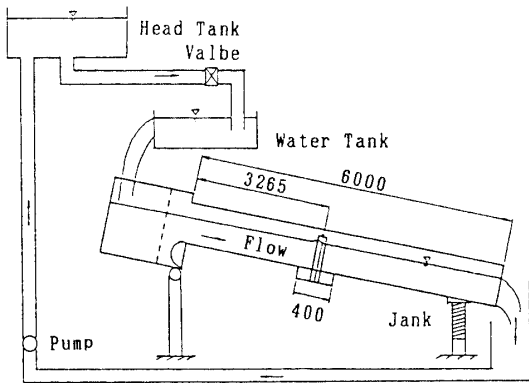


Fig. 1 Sketch of the experimental channel

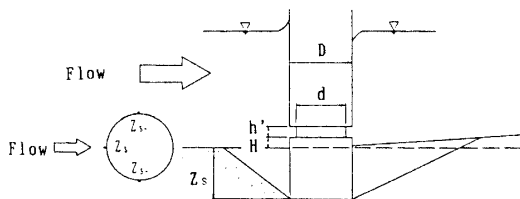


Fig. 2 Sketch of the circular cylinder

最大洗掘深の測定は、円柱前面及び側面にポイントゲージを設置して行った。ポイントゲージは、内径が2.5mmのステンレスパイプをガイドとした、径1.5mmのステンレスパイプの先端に、まち針の頭部を挿入したものをを用いた。

実験終了後の洗掘形状の測定には、水路幅に合わせたアルミベースに1cm間隔で穴を開け、各穴に30cmに切ったステンレスパイプを通し可動式とし、ステンレスパイプの最上端で描かれる断面形状を記録した。

2.2 実験条件及び実験ケース

実験条件を、Table 1に示した。本実験は静的洗掘を対象としたことから、摩擦速度 U_* が限界摩擦速度 U_{*c} の0.8倍程度になるようにした。そこで、流量と下流堰を調節した結果、流量 $Q=12244\text{cm}^3/\text{sec}$ 、等流水深 $h_0=7.65\text{cm}$ となった。実験ケースは、Table 2に示すように、CASE 1は単円柱、CASE 2～5はリブレット下端

Table 1 Experimental conditions

	Sign	Unit	Value
Average diameter of sand	d	(cm)	0.114
Submerged weight	S		1.63
Incline of channel	I		1/2000
Uniform flow depth	h_0	(cm)	7.65
Flux	Q	(cm^3/s)	12244
Critical shear velocity	U_{*c}	(cm/s)	2.34
Shear velocity	U_*	(cm/s)	1.94

Table 2 Case of experiment

Case	h'	d'	H'	R/D
1	0	36	0	1
2	1	36	0	1
3	2	36	0	1
4	3	36	0	1
5	4	36	0	1
6	2	36	-10	1
7	2	36	+10	1
8	2	36	0	1.5
9	2	36	0	2.0

(mm)

を河床面に固定し、リブレット幅を1~4mmまで変化させたもの、CASE 6, 7は、最も洗掘を軽減することができた $h' = 2\text{mm}$ を用いて河床面からの高さ H' を変化させたものである。またCASE 8, 9はさらに洗掘を軽減させるために円柱周りの河床面に床固めを施したものである。

2.3 実験方法

実験は以下の要領で行った。①水路中央部の箱に円柱を据え付け、その箱に砂を上下流部の水路底と同じ高さまで水中投棄的方法で敷きつめた。②砂面を上、下水路床に一致するように平にならす。③ポンプのバルブを少し開け、水路に水を貯め始める。このとき下流堰を調節しておき、流速が生じない状態で、所定の水探になるようにしておく。④再び砂面を一様にならし、3回の実験の内、円柱前・側面での洗掘深を計る基準値として前面と両側面の3点で河床高さを計測した。⑤予め等流条件となる水深を下流の堰高で再現するため、バルブを所定の流量となる位置まで開けると同時に、下流堰を所定の位置まで下げる。この時点で、目標とする等流水深が実現された。⑥洗掘開始までは多少の時間のずれがあるので、円柱周りに注目し、洗掘が始まる(目測で、砂が流れ始めたと認められた)と同時に時間の測定を始める。⑦洗掘開始後、所定の経過時間 t における円柱前面の最大洗掘深 Z_s を測定する。各ケースにつき一度は円柱側面の最大洗掘深 Z_{s+} 、 Z_{s-} を含めた3点で測定する。ここに Z_{s+} は左岸側の側面の最大洗掘深を表し、 Z_{s-} は右岸側のそれである。また t は、洗掘開始後1, 2, 4, 8, 16, 30, 60, 120, 240, 480, 960, 1440minである。各ケースにつき一度は洗掘開始後0.5~5.0まで0.5min間隔、5.0~8.0minまで1.0min間隔である。⑧以上の測定終了後、バルブを締め、徐々に排水した後、洗掘形状を測定し、等高線図を作る。

3. 実験結果とその考察

3.1 リブレット幅における実験結果

3.1.1 最大洗掘深

Fig. 3は、リブレット下端を砂面に固定して、溝幅を変えて円柱前面での洗掘深さの時間変化を調べたものである。リブレットにより最大洗掘深が軽減されており、これはリブレットが襟巻渦を制御したと考えることができる。また、リブレットの幅 h' と最大洗掘深 Z_s が比例しないこともわかる。無次元時間 $ut/D > 3 \times 10^3$

での洗掘の時間変化率はほぼ同じであって、この時間までの洗掘が洗掘軽減の割合を規定しているといえる。洗掘の進行が大きいリブレットで、 $ut/D = 2.0 \times 10^5$ 以降で洗掘が促進しているが、これは円柱後部の堆積物が時間経過にともない、後方に進行し円柱付近の水深を下げ、掃流力を増したために起こったと考えられる。

実験を考察すると、単円柱の場合は円柱の前面と側面での洗掘速度はほぼ同時に進行するが、リブレットを設置した場合には円柱側面の洗掘孔の増大が円柱前面に達してから前面の洗掘が進行する。このような洗掘過程の違いを調べるため、円柱前面と側面での洗掘深さの同時変化を調べた。その結果がFig. 4である。ここで Z_{s-} は右岸の最大洗掘深を、 Z_{s+} は左岸の最大洗掘深を表す。黒描点は単円柱、白描点は洗掘の軽減が

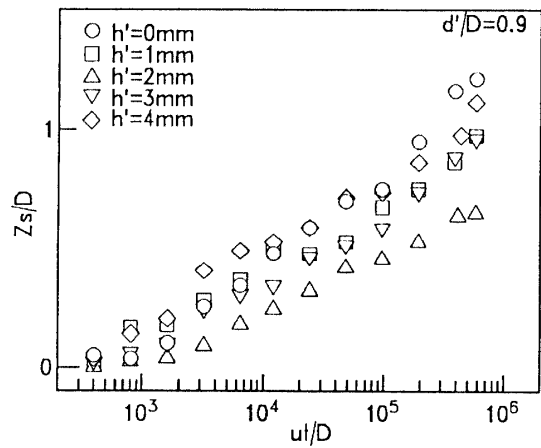


Fig. 3 The relation between time and scour depth in the front of a circular cylinder (non-dimension)

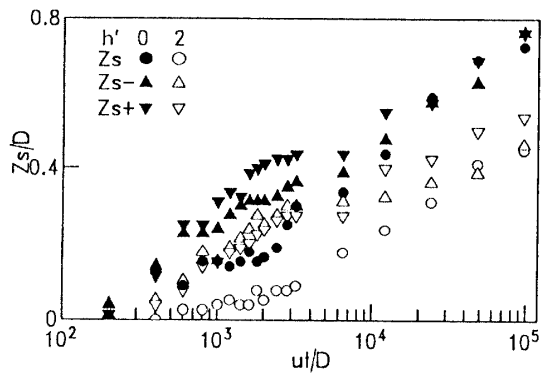


Fig. 4 The relation between time and scour depth in the front and sides of a circular cylinder ($h'/D = 0.05$)

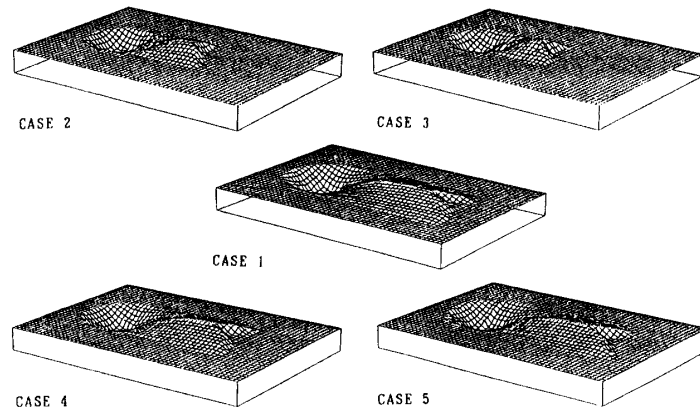


Fig. 5 A projection chart of scour shape

最大であったリブレット厚が2mmの場合である。はじめに便宜上、洗掘開始から円柱前面と側面の最大洗掘深が一致するまでを初期洗掘、それ以降を後期洗掘と定義する。初期洗掘において、いずれの場合にも側面の洗掘が先行しているが、単円柱では円柱側面から洗掘が始まるが円柱前面の洗掘進行も速い。また前面と側面の洗掘深さの差も小さく短時間で3点が一致する。これに対しリブレットを設けた円柱では最初に側面が大幅に洗掘され、前面はほとんど洗掘されず、前面での洗掘深さが側面での洗掘深さに一致するまでに単円柱の場合の約十倍の時間を要している。単円柱の場合、側面と前面とでの洗掘の差は極めて小さいことから、リブレットを設けることで、前面における洗掘に重要な役割をもつ襟巻渦が効果的に制御されていることが明らかである。また襟巻渦をリブレットの中に吸い込んでいるために側面の掃流力が増して側面の洗掘が促進していると考えられる。円柱周りの側面近くでのこのような流れの変化は、円柱周りの洗掘の進行過程の初期において円柱前面にハート形の形状が長期に渡り観察されることからわかる。後期洗掘においては単円柱、リブレット付円柱共に同様な勾配で洗掘が進行している。両方が同勾配で洗掘していることから後期洗掘は砂面以下で生じる襟巻渦がその原因となっていることがわかる。以上の考察は実際に襟巻渦がリブレットに吸い込まれているのを観察したものではないので今後、襟巻渦を可視化する実験を計画している。

3.1.2 洗掘形状

Fig. 5 は実験開始から24時間後の洗掘形状の投影図を表したものである。Fig. 6 は最も洗掘が軽減できた洗掘形状と、単円柱の場合とを比較したものである。

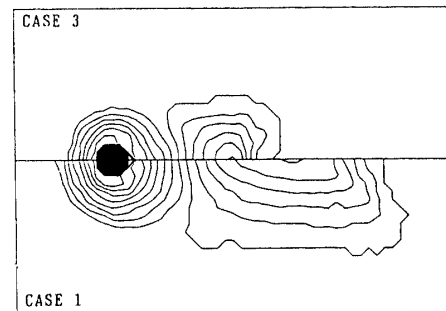


Fig. 6 The comparison between the scour shapes

Fig. 5 及び Fig. 6 より洗掘体積と洗掘面積も最大洗掘深 Z_s に比例していることがわかり、円柱後部の堆積部分がこれを顕著に表している。以上の結果より、リブレット下端を砂面に合わせたときにはリブレットの幅 $h' = 2 \text{ mm}$ において最も洗掘を軽減することができた。

3.2 リブレット高さにおける実験結果

3.2.1 最大洗掘深

Fig. 7 は洗掘軽減が最大であったリブレット幅 $h' = 2 \text{ mm}$ を用いて、河床に対するリブレットの設置位置の洗掘への影響を調べたものである。リブレット位置が河床面から離れると、洗掘軽減の効果は低下している。注目されるのは、極洗掘の初期における Δ と ∇ 描点の変化である。リブレットが河床面下にある $H = -10 \text{ mm}$ について見ると、洗掘の極初期では単円柱での洗掘の進行と同様に急激に進行するが、円柱側面の洗掘が進んで、円柱側面下流部までのリブレットが露出すると洗掘の進行速度が低下している。これからもリブレットはその上方で形成された襟巻渦の下降流を溝内に吸

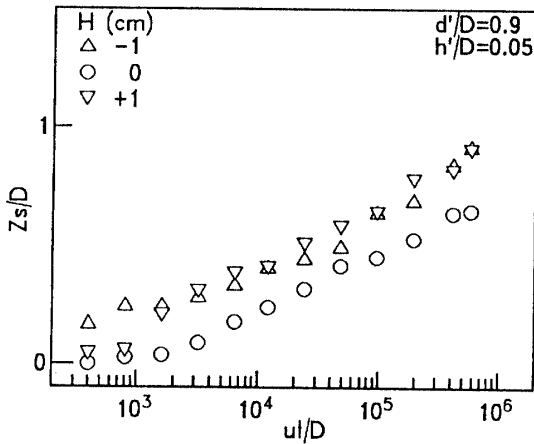


Fig. 7 The relation between time and scour depth in the front of a circular cylinder (non-dimension)

い込むことで、洗掘軽減に効果があることが改めて確認できる。リブレットが河床面上にある $H = +10\text{mm}$ について、それほど効果がなかったのはリブレットより下の部分に生じる襟巻渦の制御がうまくいかなかったためと考えられる。極言すれば、 $H = +10\text{mm}$ において初期の洗掘は単円柱の洗掘進行を縮小した過程をたどると考えられる。

以上の考察は、円柱の前面と側面における洗掘深さの時間変化を測定した Fig. 8 と Fig. 9 を見てもわかる。

3.2.2 洗掘形状

Fig. 10 は実験開始から 24 時間後の洗掘形状の投影図を表したものである。Fig. 11 はリブレットを河床面下に設置した場合の洗掘形状と、リブレットを河床面と一致させた場合とを比較したものである。リブレットを河床面上に設置した場合も、河床面下に設置した場合とほぼ類似しており、ここでは省略しておく。Fig. 10 及び Fig. 11 より洗掘体積と洗掘面積もリブレット幅のみを変化させた場合と同様に、最大洗掘深 Z_s に比例していることがわかる。

3.3 実河川との対応

今回の実験において得た洗掘軽減の結果を実際の河川に適用する。Fig. 12 と Fig. 13 は洗掘実験の精度を考慮して、同一条件で 3 回の実験を行い、リブレットの位置の無次元量 $H/D = 0$ において、リブレット幅の無次元量 h'/D と最大洗掘深の軽減率 Z_s/D の関係を無次元時間 $ut/D = 1.0 \times 10^5$ (実験開始 4 時間後) と 2.0×10^5

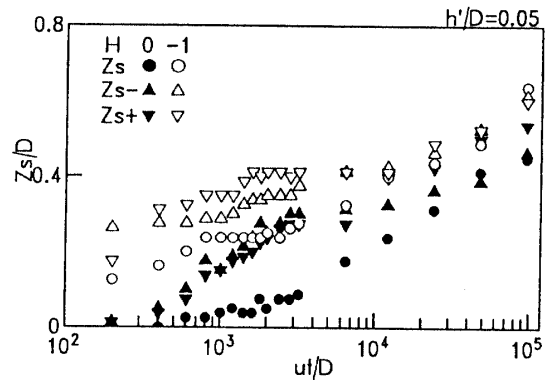


Fig. 8 The relation between time and scour depth in the front and sides of a circular cylinder ($H'/D = -0.25$)

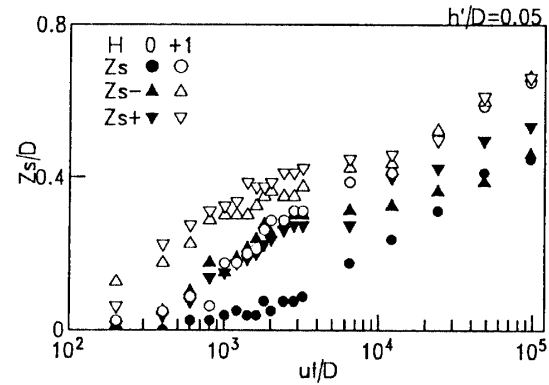


Fig. 9 The relation between time and scour depth in the front and sides of a circular cylinder ($H'/D = +0.25$)

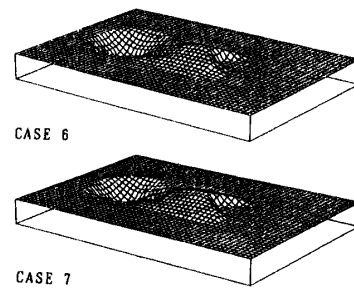


Fig. 10 A projection chart of scour shape

(実験開始 8 時間後) について示した図である。中規模河川の洪水時の条件として河床勾配 $I = 1/1000$ 、水深 $h = 500\text{cm}$ 、平均流速 $u = 500\text{cm/s}$ 、橋脚の直径 $D = 100\text{cm}$ を与えると、無次元時間 $ut/D = 1.0 \times 10^5$ 、 2.0×10^5

は中規模河川の降雨継続時間では5時間と10時間に相当する。直径100cmの橋脚に幅が橋脚径の5%のリブレット、つまり幅5cmのリブレットを下端を砂面に合

わせて設けると、洪水継続時間5時間、10時間共に洗掘は25~50%軽減できるといえる。このときのリブレットの幅と深さは等しく、リブレット幅が橋脚径の10%以上になるとリブレットの洗掘軽減効果はなくなると判断される。

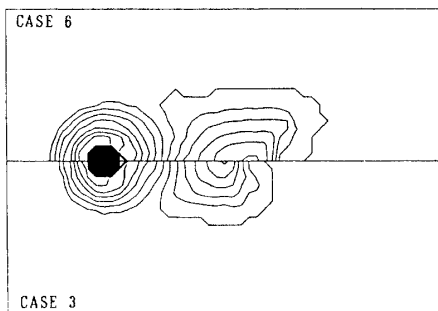


Fig.11 The comparison between the scour shapes

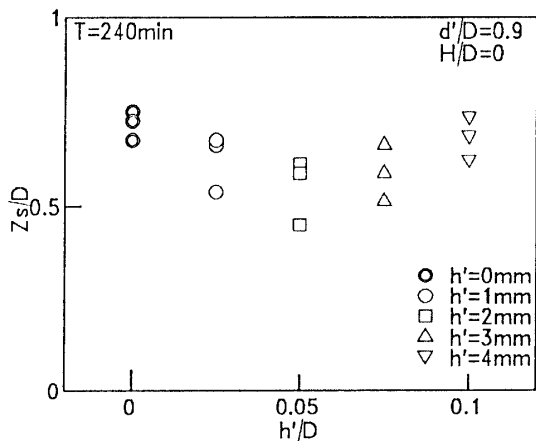


Fig.12 The relation between groove width and scour depth (T=240min)

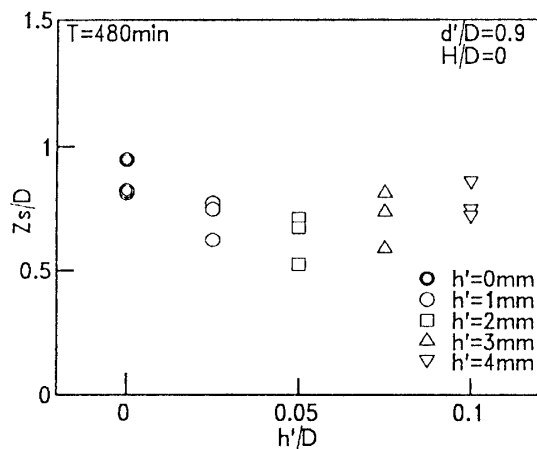


Fig.13 The relation between groove width and scour depth (T=480min)

3.4 床固めによる実験結果

リブレット円柱の洗掘初期における円柱側面での洗掘を抑制することで、洗掘を完全に制御できるとの予測で、円柱周囲の砂面上に実験砂を一様に張り付けた厚さ5mmで円柱径の1.5倍と2.0倍の円盤をその上面と河床を同じ高さで設置し、洗掘軽減に最も有効であったリブレット円柱で洗掘実験を行った。Fig.14は実験開始から24時間後の洗掘形状の投影図を示したものである。またFig.15はリブレット円柱で最も効果のあっ

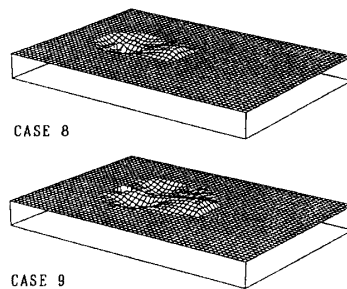


Fig.14 A projection chart of scour shape

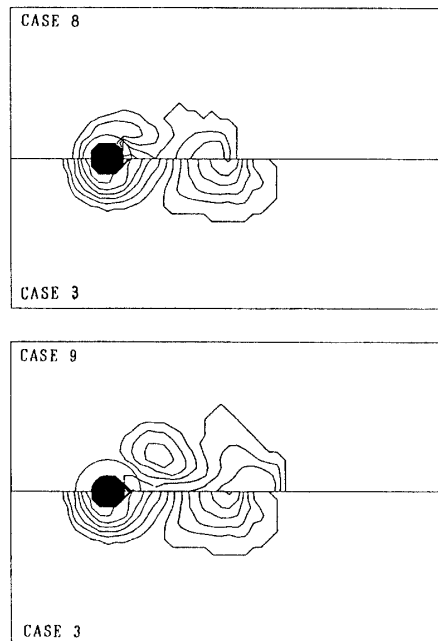


Fig.15 The comparison between the scour shapes

たものと、これに床固めを施した場合を比較したものである。1.5倍の円盤を施した場合、リブレットから噴出する流れで円盤下流部の2ヶ所で洗掘が生じ、ここから円盤下の砂粒が吹出されていき、円盤下に空洞が形成され図のような形状となった。結果として円柱前面の最大洗掘深は単円柱の場合と比べて75%軽減することができた。2.0倍の円盤を設置すると、図のように円柱前面の最大洗掘深は100%軽減することができたが、リブレットからの噴出流れのせん断層での強い渦管と円柱側面からのカルマン渦との相互作用による結果と考えられる大規模渦が形成され、この渦によって円柱下流の中心線部で堆積が、円盤下流の堆積部の両側に広範囲で極めて緩い傾斜での河床低下が生じた。

今後この工法で洗掘を完全に防止するには、円柱前面の襟巻渦を制御し、かつリブレットからの噴出が最小となるような最適のリブレット形状を究明しなくてはならない。

4. 結 語

本研究では河川における橋脚周り及び海中構造物などの方向性を持たない洗掘軽減工法の基礎資料として、橋脚を基本的構造物である単円柱に置き換え、単円柱に水平リブレットを設け静的洗掘実験を行った。洗掘軽減については円柱前面及び側面の最大洗掘深、洗掘形状の面積について細かい検討を行った。得られた知見を要約すれば以下のとおりである。

1) 河床面近くの円柱表面に水平リブレットを設けるとは、リブレット内に誘起される流れが襟巻渦による下降流となる流れを吸い込み、円柱前面では側面での洗掘孔が達するまで洗掘されず、その結果として洗掘が軽減される。

2) 河床面近くの円柱表面に幅と深さが共に円柱径の

5%の水平リブレットを設けることで最大洗掘深を25~50%軽減することができた。

3) リブレットを設置する位置については、河床面下にリブレットを設けると、洗掘でリブレットが露出した後の洗掘速度は非常に低下し、河床面上に設けるとリブレット以下に生じる襟巻渦により洗掘が進行するので、水平リブレットを適切に配置することで洗掘の大幅な軽減が可能である。

4) 洗掘を完全に防止するには床固めとの併用が考えられるが、大規模渦の形成との関連で適切な水平リブレットを検討する必要がある。

5) 完全な洗掘防止は、円柱側面での流れの集中による円柱前面での襟巻渦の阻止だけでは不可能で、円柱下流での流れを解明することが必要である。

文 献

- 1) 藤原剛・福岡捷二・渡辺明英：橋脚まわりの洗掘軽減に対するベーン工の効果（土木学会第47回年次学術講演会 1992）
- 2) 河森克至・須賀堯三・池田裕一：ベーンによる橋脚洗掘の軽減効果（土木学会第46回年次学術講演会 1991）
- 3) 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（日本機械学会論文祭(B編) 58巻550号 1992）
- 4) 齊藤隆：水平噴流による洗掘に関する研究（土木学会論文報告集第282号 1979）
- 5) 中川博次・鈴木幸一：橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究（京都大学防災研究所第17号B 1974）
- 6) 椿東一郎：水理学 I・II（森北出版 1973）

（平成5年4月15日受理）