

導流壁と表面粗度による橋脚周辺の洗掘防止

Protection of Local Scour around Piers with
Guide Wall and Slanting Plate attached Piers
Surface.

大同淳之

By Atsuyuki DAIDO

Local scour around bridge piers are mainly caused by the action of the horseshoe vortex formed around the piers and the flow acceleration due to the gradient of water level around piers. In this paper, the guide wall setted front piers and the slanting plate attached piers surface were examined for protect to local scour. The experimental results show that the scour depths are large degrade compared with usual method. Keyword: local scour around piers, horseshoe vortex, secondary flow

1. はしがき

橋脚周辺では、河道では限界掃流力以下の水理条件でも、橋脚の周辺のみ洗掘が生じる。これは種々の原因によるものであろうが、その主因は、橋脚の周辺に発生する馬蹄形渦の作用と、橋脚によるせき上げによって橋脚まわりに生じる水位差によって加速される流れの作用するものとされている。防止対策は、この両者を同時に制御するものではないといけない。できれば、流れの力を利用して、砂を引き寄せるものであることが望ましい。

洗掘を防止する対策として、橋脚の形状をかえて対応するものと、何らかの工作物を付加して対応するものがある。形状をかえて対応する方法は、橋脚本来の目的から限定され、かつ状況の変化に対応しにくいということから、何らかの工作物を付加して対応する方法が望ましいと思われる。

後者の方法に、1) 捨石等により、耐掃流力を増やして対応するもの、あるいは、2) ペーン工法¹⁾、杭等²⁾、何らかの工作物によって流れを制御して洗掘を防止するものがある。1) のケースの問題点として、橋脚のまわりに、捨石、ブロックを積み上げると、橋脚の太さが増大し、洗掘深さが橋脚幅 D に比例することから、洗掘深さが増大して、新しい対応が要求される。又、ブロックを広範囲に敷き詰め床固めの形式は、橋脚周辺の洗掘防止には効果的と考えられるものの、河道、下流の構造物に与える影響が大きいと

* 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科
(〒603 京都市北区等持院北町56-1)

いえる。本論文では、護岸曲線部の局所洗掘防止に効果がある、傾斜棧型粗度⁴⁾を、この橋脚表面に応用することを試みた。巨視的に、橋脚頭部の形による洗掘深さの違いを橋脚頭部における運動量の差から説明し、この運動量の差が結果的に橋脚前面で洗掘に寄与する流れの大きさを規定していることを述べる。次にはく離渦の制御を目的に橋脚の前方にうすい壁を設けることを試みた。その結果、洗掘深さの大幅な減少が測定されたので以下にその結果について報告する。

2. 橋脚周辺の洗掘機構

橋脚周辺に生じる洗掘は、鉛直方向に流速勾配のある二次元せん断応力流中におかれた橋脚の周りでは橋脚の前面で河床近くにてできる剥離渦は主流によって円柱に沿って下流に運ばれ、いわゆる馬蹄形渦を形成する。このはく離渦および馬蹄形渦が橋脚の周りに沿って、橋脚前面の流れのせん断力が限界掃流力以下の場合でも橋脚周辺に洗掘を生じる。このときの静的平衡洗掘深は、動的平衡洗掘深より大きいとされているので、最大洗掘深を知るうえで重要である。

宇民³⁾によると、はく離渦を形成する流体は、橋脚前面の橋脚幅の1/5の流積より供給される。そして、この渦の位置を、柱軸からの距離 $\bar{r}_0$ 、水深を H 、脚半径を R として、

$$(\bar{r}_0 - R)/H = \alpha (R/H)^m \tag{1}$$

と表している。 α 、 m は Re 数の関数で、ほぼ0.3で、 m はほぼ1.0である。この渦を構成する流体は、橋脚前面の橋脚の幅の1/5の流積より供給されるとされている。この渦の生成によって、橋脚の前面で回転する流れによって底面付近を外側に流れが生じ、この渦が橋脚の周りで回転して河床を洗掘する。

もう一つの原因は、橋脚の前面で水位が盛り、中心から45°位の範囲で顕著な水面勾配が生じ、この圧力差によって、流れが生じる。円柱形の橋脚のとき、中心から45°の付近で、洗掘が始まるのは、この圧力差によるものと考えてよい。

3. 本研究における洗掘防止対策

3-1 橋脚周辺の最終洗掘深

3.1.1 洗掘に費やされる力

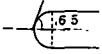
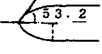
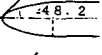
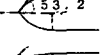
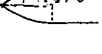
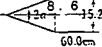
洗掘に費やされる力を流れの運動量の変化から巨視的に求めてみよう。橋脚先端部の形状で、洗掘深さが異なることは従来から知られている。例えばLaursen⁶⁾、Shen⁷⁾らによると、表1のような結果を示している。詳細な水理条件のちがいは記されていないが、こうして比較されている以上、橋脚幅 D 、水理条件および底質の条件は同じと見てよいだろう。橋脚先端の形状による洗掘深さは、長方形の場合を1すると、それ以外の形状では洗掘深さ比は1－軽減率で示される。

この洗掘に費やされる力を橋脚の前後の運動量の差から求めてみよう。図1において、橋脚の前後で運動量を調べる。勾配は0で、頭部で流線が曲がった後でも流積は変わらない、洗掘の初期で水深も変わっていないとすると、

$$\rho q u_1 - \rho q u_2 \sin \theta = \text{橋脚前面で費やされる摩擦力} + \text{圧力差} \tag{2}$$

となる。圧力差は省略できる程度に小さいとすると、運動量の差は殆ど橋脚前面で費やされる力で、この力が洗掘に費やされる力となる。多くの研究で、洗掘の初期と終期で渦度は変わらないとされているこ

表1 運動量差比と洗掘深さ比

長方形の場合に対する 最大洗掘深の軽減率	洗掘 深比	運動量の差を満足 する流線の変位角	
 長 方 形	0%	100%	90
 半 円 形	10%	90%	65
 長 円 形	20%	80%	53.2
 長 円 形	25%	75%	48.2
 両 レ ン ズ 凸 形	20%	80%	53.2
 両 レ ン ズ 凸 形	30%	70%	44.6
 両 レ ン ズ 凸 形	85%	15%	8.6

とから、洗掘に費やされる力は洗掘の過程では変わらないとすると、橋脚前面の形による運動量の差が洗掘深さ比となるはずである。運動量の差を満足する角度を図1に記入すると、この角度は先端における流線の角度とみなして無理がない。したがって橋脚前面で洗掘に費やされる力は、初期の平坦河床のときのそれと変わらないとしてよい。

3.1.2 橋脚幅が洗掘深さに及ぼす影響

従来から、最終洗掘深さ Z_{sc} は橋脚幅 D に比例して、一般に $z_s/D = 1.1 \sim 1.4$ 程度とされている。⁸⁾ 橋脚幅 D が大きくなると洗掘深さが大きくなるのは実験的に示されているが、解析的にはふれられていない。

宇民⁹⁾によると、上流側からの流量のうち剥離渦の形成に寄与しているのは、円柱の場合、橋脚幅 D の約 $1/5$ の幅の流積から供給されるとしている。洗掘深さを予測するにあたって、洗掘を起こしている幅と、この仕事をする流れの供給幅は異なるということを解析に導入する。

Baker⁹⁾ は水路床が平面のときの循環の強さ Γ_0 と、洗掘が進んだときのその値 Γ とでは保存則が成立するとして $\Gamma_0 = \Gamma$ と洗掘深さを解析している。

いま、上流から、はく離渦の形成に寄与する流れの幅を b 、橋脚幅を D として

$$b_0 \Gamma_0 = D \Gamma \quad (3)$$

が成り立つとする。 $b_0/D = k$ とすると、 k は当然橋脚の形で変わると推定される。

$k = f(N (= U/\sqrt{sgd}))$ 、橋脚の形による流線の偏位角の効果) (4)

と考えることにする。Baker⁹⁾ のモデルに従うと

$$\Gamma_0 = 2\pi r_0 U \quad \Gamma = 2\pi(r_0 + K_z d_s) V \quad \text{より} \quad (5)$$

$$V = \frac{k r_0 U}{r_0 + K_z d_s} \quad (6)$$

となる。

一方、図2のような斜面上に置かれた砂が動き始める限界の流速 V_c は

$$V_c^2 = K_s s g d \quad (7)$$

と表される。もし一様な粒径で形が球形のとき、

$$K_s = \frac{8 \cos(60^\circ - \theta)}{3(C_0 \sqrt{3} + C_z)} \quad \text{となる。最終洗掘深さは式(6)の流速 } V$$

$$\text{が } V_c \text{ になったときであるから、} K_s s g d = \left\{ \frac{k K_1 r_0 U}{r_0 + K_z d_{sc}} \right\}^2$$

この式から d_{sc} を求める

$$\frac{d_{sc}}{D} = k K_1 N_s - K_z \quad (8)$$

と表される。

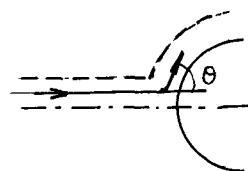


図1 検査面

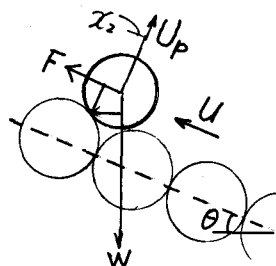


図2 粒子に作用する力

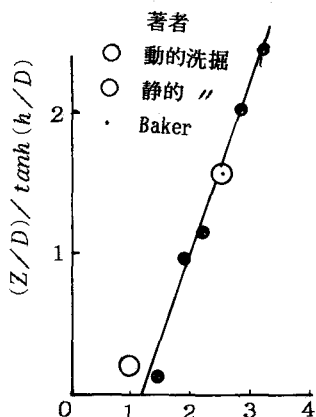


図3 最大洗掘深さ

$$\text{ここに } \alpha_1 = \frac{1}{C\sqrt{K_1 K_2}}, N = \frac{U}{\sqrt{s g d}}, \alpha_2 = \frac{r_o}{DK_2}, C = \frac{U_m}{U}$$

U_m は橋脚上流の平面上の平均流速、 U ははく離流れの表面の流速で、 $U_m/U = 0.85 \sim 0.90$ である。 K_2 は洗掘深さに関係する係数で、粒径が同じときは一定の値をとる。 s は砂の水中比重、 r_o は平均河床でのはく離渦の直径で、宇民³⁾によると $r_o = 0.2D$ としている。

いずれにしても的確な値は不明である。Baker⁹⁾によると、さらに h/D が関係するとして

$$\frac{Z_s}{D} = (\alpha_1 N - \alpha_2) \tanh\left(\frac{a_s h}{D}\right)$$

と表している。 $\alpha_1 N - \alpha_2$ の値を実験値から調べるため

$$(Z_s/D) / \tanh(a_s/b) = (k\alpha_1 N - \alpha_2)$$

として実験値を整理すると図 のようになる。著者の実験値の他に Baker⁹⁾ のデータも記入した。 $D_1 = 14\text{cm}$ で行った静的洗掘の場合は、この予測式より少し Z_s が大きくでているが、動的洗掘の場合は Baker の実験値とほぼ一致する。

図 から $k\alpha_1 = 1.2$ 、 $\alpha_2 = 1.44$ となる。 $\frac{r_o}{D} = 0.2$ とすると $k_2 = 0.14$ となる k の値は宇民は約 0.2 としているが、3.1 の長方形断面と円柱断面との流線の偏奇による運動量差からは 0.1 となる。 $k = 0.1$ を用いると $\alpha_1 = 12$ となる。 $\alpha_1 = \frac{1}{C k_s^{1/2} k_p} * \frac{r_o}{D}$ より $C = 0.9$ 、 $k_2 = 0.14$ 、 $\frac{r_o}{D} = 0.2$ を用いると k_s の C_s 、 C_L は、それぞれ 0.6 に相当する。

k の値を運動量の差から決めたことについて、さらに実証を積み重ねると頭部の形の違う場所の洗掘を予測することができる。

3.1.3 はく離渦に対する対策

はく離渦を供給する流れは、橋脚幅の k 倍とされているから、この流れを制御することが考えられる。何らかの構造物で渦を制御する場合、できるだけ単純な構造で、施設が状況に応じて変更できること、また河床に応じて変化を加えられるもの、さらにこの工作物で問題の点に砂を誘導できる構造が望ましい。

以上の考え方から、薄い壁を橋脚から前方に突出するものを採用した。壁を用いる理由は、1) 馬蹄形の渦を消散できる可能性があること、2) 壁の先端、両側で若干の洗掘が期待でき、ここで洗掘された砂を橋脚の周辺に補給することができる。この場合、壁の周辺の洗掘は、流れに対する幅が小さいから、橋脚の周辺の洗掘より大きくなることはない。3) 壁を用いることで、壁の表面を利用した対策をたてるのが可能になる等を考えたためである。

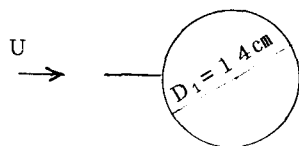


図 1 導流壁のつけ方

3.1.4 実験による検討

実験は幅 $B = 85\text{cm}$ 、有効長さ 2m の水路に直径 $D_1 = 14.0\text{cm}$ と $D_2 = 21.6\text{cm}$ の円形橋脚模型で行った。 $D_1/B = 0.164$ および $D_2/B = 0.254$ である。さきにも述べたように橋脚幅 D が大きいほど、洗掘深さ Z_s が大きくなるので、模型寸法上許される範囲で D は大きくとった。底面に敷いた砂の径は 0.8mm のほぼ一様砂である。

導流壁は厚さ 1.0mm の板で、その長さは、宇民³⁾ の求めた、橋脚前面に発生する主渦の橋脚表面からの位置が $D_1 = 14.0\text{cm}$ のとき 1.75cm となったので、その 2.0 倍 (3.5cm)、 2.85 倍 (5.0cm) および 3.71 倍 (6.5cm) を用い

た。その長さと橋脚径 D との比 L/D は 0.23, 0.357 および 0.464 倍である。実験の水深の範囲は、 $H/D = 0.785$ 付近で行った。

導流壁をつけないときは、橋脚先端より 45' 振れた位置から洗掘が始まり、次第に洗掘が前方におよび、最終的には橋脚の前面が最も深く掘れる。これに対して、導流壁をつけたときは、掘れはじめが 45' の点に変わりがないが、最終的な洗掘深さは 45' の点が最も深く、壁の先端と橋脚の先端はほぼ同じである。45' の点が深く掘れる原因は、橋脚に特に工作物をつけていないときは 45' 付近のところで、橋脚に沿う水位の盛り上がりの勾配が最大になるためと観察される。

導流壁のみをつけたときの洗掘深さの軽減効果を図 5 に示す。図 5 の横軸は、通水時間を示す。導流壁をつけていないとき、120 分の通水でほぼ洗掘深さの進行が止まったので、以下の実験も全て 120 分の通水としている。縦軸は、一番深く掘れた 45' の点の洗掘深さと橋脚径の比である。

図 5 の一番下の線は橋脚のみで、何らかの工作物を施していないときの深さを示す。これに対し導流壁をつけたとき、 L/D_1 が 0.23, 0.357 と大きくなるに従って、洗掘深さに時間的遅れが観測されたが、 L/D_1 が 0.357 と 0.464 ではあまり大きな差はみられなくなった。したがって壁に何らかの工作物をつけないとき洗掘に対して有効な壁の長さは、主渦の位置の 2.8 倍位となる。このとき、壁を導入することによる洗掘軽減率は 0.2 である。参考までに、壁の先端、橋脚の先端の洗掘深さは L/D が 0.357 の場合について示すと 図 6 に示すように 45' に比べてはるかに小さい。

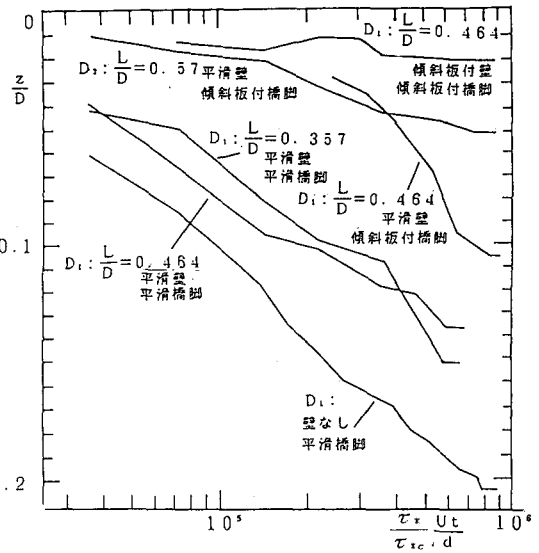


図 5 洗掘深さと通水時間の関係

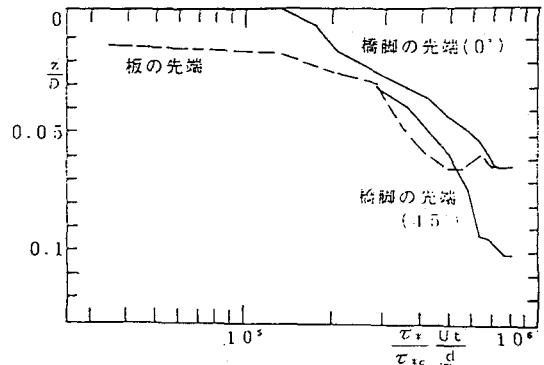


図 6 洗掘深さと通水時間の関係

3.1.5 導流壁が馬蹄形渦の制御に及ぼす影響

宇民³⁾は渦の強さを吹き出しの強さ K で表し、橋脚の対象面で主流の流れと反対方向の流れとが釣り合って流速がゼロになるという条件で K を次式のように表している。

$$K = \frac{\pi a^2 U_{os}}{z_o} \left(\frac{z_o}{H} \right) \left(1 - \frac{r_o}{R_o} \right) \cos \theta$$

ここに、 a : 渦の半径、 U_{os} : 橋脚前方の主流の表面流速、 z_o : 水路床からの渦軸の高さ、 H : 水深、 r_o : 円柱橋脚半径、 R_o : 橋脚中心から渦軸までの距離、 θ : 橋脚対象面の下流側からはかった角度である。式(2)において壁の導入効果をただちに解析的に評価できる項はない。そこで、渦の大きさに相当するものを実験的に測定して、壁の効果をしらべた。

固定床上にうすく砂をまき、水路全体の水利条件を限界掃流力より少し低い掃流力に保つとき、何の工作

物をつけていない円柱橋脚の場合、橋脚の周りにほぼ同心円に近い形で、砂が排除されてしまう。宇民は、この領域を橋脚周辺の各種渦運動が存在する範囲の最も外側に相当するとしている。実験によって各種工作物をつけたとき、この排除範囲の大きさ、形を比較して、導流壁の効果をしらべた。実験は、水路の一部に小さい砂の波形が見られたので、限界掃流力以下であるが、限界掃流力にほぼ近い水理条件で行った。

図7にその測定結果を示す。平滑な導流壁を L/D が0.23から0.87と伸ばすにしたがって排除区域の先端の長さは長くなるが排除区域の幅は狭くなる。角度 90° における排除区域の幅の減少率を壁のない場合を1として表すと、図8の黒点のようになる。排除区域は主渦の外側の小さな渦も含まれているので、この幅が渦の直径ではないが、ほぼこれに近いとみることができる。

さらに壁に傾斜板（幅9mm, 間隔3cm）を 45° の角度でとりつけて、同じように測定した。この場合も減少率を図5に付記する。これはさらに排除範囲の幅は狭くすることができた。この場合も図8の◎印で示す。傾斜板によって馬蹄形渦を作る主流を制御しているといえよう。

これは、馬蹄形渦を制御しているとみることができる。以上の実験結果から、馬蹄形渦に対して導流壁は一応の効果を示したといえる。とくに、従来最も深く掘れていた橋脚先端で、洗掘深さを低減している。 45° の点が掘れる原因は観察によると、橋脚まわりに発生する水面の盛り上がりが 45° 付近で急激な水面勾配を示すことから、この勾配で誘起される流れによるものと考えられる。そこでつぎに、橋脚の表面に傾斜した板を取り付け、これによって、この力を調整することを考える。

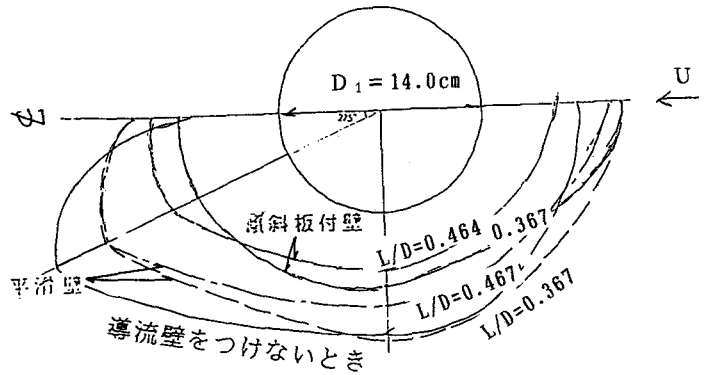


図7 砂の排除範囲の比較による導流壁の効果（平滑橋脚）

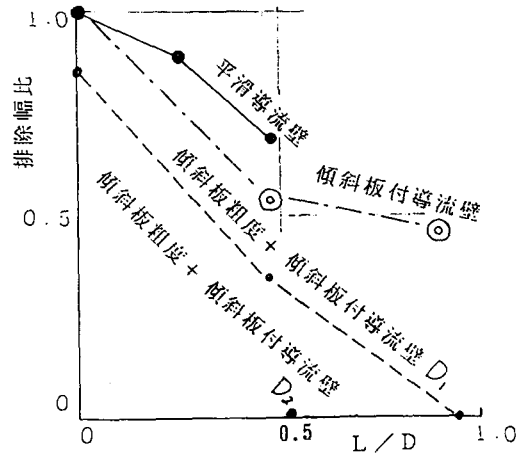


図8 各ケースにおける排除幅と工作物なしの排除幅との比

3・2 局所水面勾配の緩和

3・2・1 傾斜板導入の考え方

流れに面する形で障害物をおくとき、動水圧による水面の上昇をさけることは、流速の低減をはかる以外にないが、これは対象外とする。そこで急激な水面勾配の発生を防ぐことを考える。

圧力の制御に、吉川⁴⁾らの提案した橋脚のまわりに円板形のツバをつけるのも一方法であるが、ここでは流れを積極的に制御するという目的で、橋脚の表面に傾斜した板を取り付けた。実験で板の傾斜角度は、流れに対して直角上方に誘起される上昇流が最大になることを考えて45°に決めた。これによって圧力の制御が可能かどうか保証できないが、底面付近の流速の減速効果も考えにいった。現在までに行った板の幅は9mm、厚さ1mmで、板は90°の位置では、橋脚径が傾斜板で見掛け上増加しないよう板の幅を削ってとり、すりつけている。

3.2.2 実験による検証

実験の結果を図5に併記した。先の導流壁と傾斜板を併用した結果、90%の洗掘深さの低減が生じた。ちなみに導流壁をつけずに傾斜角型粗度をつけた場合を、過去において検査したが、粗度が角型でかつ橋脚周りにもつけたため、実質円柱径を増やす原因にもなり、つけないときにくらべて洗掘は減少するが、従来の方法に比べて効果が特に顕著ではなかった。

従来の研究では、洗掘深さは橋脚径に比例することから、橋脚径が $D_2=21.3\text{ cm}$ についても同じことを行った。この場合、壁の長さは主渦の位置までの距離の2.8倍として、 $L=12.3\text{ cm}$ 、 $L/D_2=0.57$ である。実験の結果も図5に付記する。この例では U/D_1 は、 D_1 のときとほぼ同じである。したがって経過時間も D_1 の場合と同じである。あきらかに洗掘深の低減効果がみられる。観察では傾斜板によって45°付近の水面勾配は消失し、45°付近の水位と135°付近の水位はほぼ等しい。

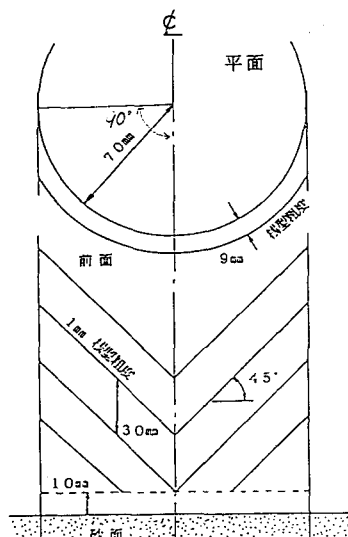


図9 板の付け方

3.2.3 砂の排除区域による効果の確認

上述のように傾斜板をつけたとき、45°付近に生じる水面勾配は減少した。ごくわずかに観測されるが板があるため、数mmの段差となって観察される。傾斜板には、水面勾配による加速を消去すると同時に底面付近の流速を減少させ、周囲から流れを引き寄せていると考えられるが、ごく微量のためそれらを明確にすることが難しいので、導流壁の場合と同じく砂の排除区域の大きさでその効果をしらべた。図10は、その測定結果

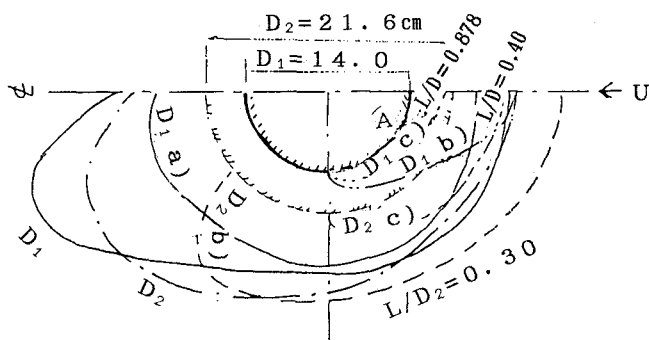


図10 砂の排除範囲の比較による橋脚表面につけた傾斜板の効果及び導流壁との複合効果

である。a)は D_1 に傾斜板のみをつけて導流壁はつけていない場合で、何の工作物もないときにくらべて排除区域は減少しているが、それほど顕著でない。b)はa)のケースに勾配1:1の傾斜板をつけた導流壁(長さ $L/D=0.464$)をとりつけたとき、c)は同じ条件で導流壁 $L/D=0.87$ をつけたときで顕著な減少をみることができる。さらに、 $D_2=21.6\text{ cm}$ を用いて行った結果も付記したが同様の結果を得ている。導流

壁および橋脚表面両方に傾斜板をつけたとき、壁の先端で丸く砂が排除されるが壁の先端から、実験の寸法で2 cmほど入ったところでは壁に砂がつく、図10 A点付近より再び排除され、90°付近で排除面がなくなり、橋脚の後ろ側に排除面はない。90°の点における排除幅と何の工作物もついていないときの排除幅の比を図5の小さい黒丸で表した。

4. むすび

- 1) 橋脚の周辺の洗掘に働く力は、橋脚前部の運動量の差から求められ、この考え方に従うと、頭部の形状が違ふときの洗掘深さが、予測できた。
- 2) 洗掘の最大深さを求めるとき、平均河床上に生じる循環 P_0 とその幅 b_0 の積は、発達した洗掘穴の循環 P と橋脚幅 D との積と等しいとおくことによって求められる。このとき b/D の関係は、1)の条件で定まる。
- 3) 円形橋脚周辺の洗掘は、馬蹄形渦によるものと橋脚周辺の水位上昇によるものと考えた。
- 4) 馬蹄形渦による洗掘に対して、長さが橋脚表面から馬蹄形渦の中心までの距離の2.8倍の長さの壁を入れたとき、橋脚前面の洗掘は壁の先端の洗掘にとどまり、45°の点の洗掘は90%減少する。
- 5) 導流壁に加えて橋脚表面に傾斜板をとりつけたとき、橋脚前面の接近水頭による水位上昇の水面勾配が消失して洗掘が減少する。
- 6) 導流壁と橋脚いずれの表面にも傾斜板をとりつけると洗掘深さを90%低減できた。

参考文献

- 1) 福岡捷二ほか：橋脚まわりの洗掘軽減に対するベン工の効果，平成四年土木学会年次講演会概要集，pp.146～147, 1992.9.
- 2) 須賀堯三ほか：橋脚周辺洗掘の低減に関する杭の効果，第29回水理講演会論文集，pp.597～602, 1985.2.
- 3) 宇民正：円柱橋脚前方における局所流の研究，土木学会論文集第247号，pp.61～69, 1975.3.
- 4) 吉川秀夫ほか：橋脚の洗掘ならびにその防止に関する考察，土木学会論文集第194号，pp.83～90, 1971.10.
- 5) 大同淳之，小澤和弘：二次流の制御による河川弯曲外縁部の局所洗掘防止，土木学会水工学論文集第37巻
- 6) Laursen, E.M.: Scour at bridge crossings, Proc. ASCE, J. of the Hyd. Div., 86, HY2, 39-54, 1960.
- 7) Shen, H.W., Schneider, V.R. and Karaki, S.: Mechanics of local scour supplement, Methods of reducing scour, Civil Engrg. Dept. Report, 66, HWS 36, Colorado State
- 8) Breusers, H.N.C.: Scouring around drilling platforms, Hydraulic Research, 1964/65, IAHR Bulletin, 19, 276, 1965.
- 9) Baker, C.J.: Theoretical approach to prediction of local scour around bridge piers, J. of Hyd. Res., IAHR, 18, 1-12, 1980.