

## 橋脚の洗掘ならびにその防止に関する考察

## STUDY ON SCOURING AROUND A BRIDGE PIER AND ITS PREVENTION

吉川 秀夫\*・福岡 捷二\*\*・岩間 汎\*\*\*・曾小川 久貴\*\*\*\*

By Hideo Kikkawa, Shoji Fukuoka, Hiroshi Iwama and Hisataka Soogawa

## 1. ま え が き

橋脚などの局所洗掘の問題の重要性については改めて説明を要しないであろう。この問題については従来数多くの研究が行なわれているが、現象の複雑さのために十分な精度でもって知ることは困難であり、また種々の洗掘防止工法が現実に行なわれているが、理論的に明確にできなく経験に頼らなければならない状況にある。

本文では非常に単純化して円柱形の橋脚について洗掘の機構を実験的、理論的に明らかにし、一般の橋脚の洗掘を類推する手掛りとし、その結果に基づいて洗掘防止の有効な方法を見出そうとした。

橋脚周辺部の流れあるいは洗掘については、実験的に研究がなされたものが大部分である。石原<sup>1)</sup>は移動床で非常に多くの実験を行ない橋脚形状、大きさ、流れの入射角など洗掘に及ぼす影響を調べており、Laursen-Toch<sup>2)</sup>、Shen-Karak<sup>3)</sup>、Andru<sup>4)</sup>らも局所洗掘に関する研究を行なっている。宇民<sup>5)</sup>は立体写真観測法を用いて円柱断面橋脚のまわりの局所的な流れの機構を実験的に明らかにした。最近になり実験的な研究だけでなく、洗掘現象をモデル化することにより半理論的研究も行なわれるようになってきている<sup>6)</sup>。

ここでは実験に橋脚モデルとして円柱を用い、実験的に円柱周辺の流れと洗掘との関係を明らかにしようとし、それに基づいて主として流れの三次元性の影響を非常に単純化した理論により説明しようとしている。

## 2. 実験装置および実験方法

本実験に使用した水路は全長 8 m、幅 0.4 m、高さ

\* 正会員 工博東京工業大学教授 工学部土木工学科  
\*\* 正会員 Ph. D. 東京工業大学助手 同  
\*\*\* 正会員 国鉄山陽新幹線工事局  
\*\*\*\* 正会員 建設省四国地方建設局

0.3 m の鋼製可傾還流式水路であり、水路側面は洗掘状況が観察できるようガラス張りとなっている。実験は水路勾配 1/300 で行なわれたが、水路床に砂を敷き還流するために河床勾配および水面勾配は流量および水路内の土砂量に応じて種々変化する。水路床材料として使用した砂は豊浦産標準砂で、比重 2.605、平均粒径 0.22 mm である。この砂を水路全長にわたり約 15 cm の厚さに入れ、砂も水とともに還流させ、十分に時間をかけ水路床が平衡状態に達した後測定を行なった。

橋脚モデルとしては径の異なる 3 種類の円柱を用い実験を行なった。円柱はアクリル製  $\phi 6.0$  cm、塩化ビニール製  $\phi 2.6$  cm、塩化ビニール製  $\phi 1.8$  cm (以下それぞれ C1, C2, C3 と表わす) であり、表面はいずれも滑らかである。

洗掘深の測定は円柱に図-1 のようにガイドとして  $\phi 0.4$  mm の鋼線を用い、これに  $\phi 1.0$  mm の鋼線の両端を内径約 2 mm の輪をつくったものをつけ、これが洗掘の進行につれて降下するようにし、上端の降下量により洗掘深を測定した。用いた鋼線は円柱径に比べ細いので洗掘に及ぼす影響はほとんどなく、正確に洗掘深を

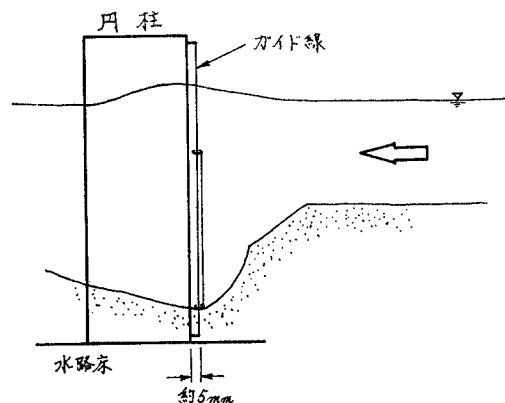


図-1 洗掘深測定法

測ることができた。

水面、河床面の高さは河床に生じた砂澱により著しく変化するため、ほぼ水路中央に設置された円柱の上流側約 50 cm から上流へ約 5 cm 間隔で 10 点測定したものの平均とした。洗掘深はこのようにして求めた平均河床からの低下量とした。

### 3. 実験結果とその考察

円柱 C1, C2, C3 について表-1 に示すごとき範囲で実験を行なった。また、洗掘の機構を明らかにする目的で円柱周辺部における砂の移動開始について実験を行なった。

表-1 実験範囲

円柱	流速 (cm/sec)	水深 (cm)	Froude 数
C1	18.4 ~ 86.4	5.2 ~ 13.9	0.177 ~ 1.52
C2	16.0 ~ 100.0	4.55 ~ 11.45	0.161 ~ 1.325
C3	13.0 ~ 118.5	4.5 ~ 11.2	0.132 ~ 1.35

#### (1) 円柱周辺部の洗掘の開始

円柱周辺部では流れの集中が生じ、流速、流向が変化するために、他の部分において砂の移動が生じない場合でも、円柱周辺部では砂の移動が生ずる場合がある。このような砂の移動開始状況を知ることにより、橋脚の洗掘のメカニズムをある程度明らかにすることができるであろう。

まず実験に用いた標準砂の限界掃流力  $\tau_c$  を種々の条件で測定したところ表-2 に示すごとくなり、この値

表-2 円柱周辺部が限界状態のときの掃流力 (単位  $g/cm^2$ )

RUN	$\tau_c$	$\tau_s$	$\tau_f$
1	0.00214	0.000847	0.00162
2	0.00260	0.000568	0.00205
3	0.001815	0.00147	0.001363
4	0.00265	0.002305	0.00298
5	0.002275	0.00172	0.000753
6	0.00169	0.000429	0.002535
7	0.001695	0.00175	0.00202
8	0.00208	0.001435	0.00176
9	0.002135	0.00200	0.00205
10	0.00309	0.00114	0.001445
11	0.00252	0.00081	0.001435
12	0.001615		0.000957
13	0.00234		0.001095
平均	0.00220	0.00132	0.00159

それぞれの領域で砂の移動開始時の流れの掃流力を示す。ここに、 $\tau_s$  は領域 I、 $\tau_f$  は領域 II で移動開始時の流れの掃流力を表わす。円柱周辺ではまず円柱側面の領域 I において洗掘が起こり、さらに流れの掃流力を増せば円

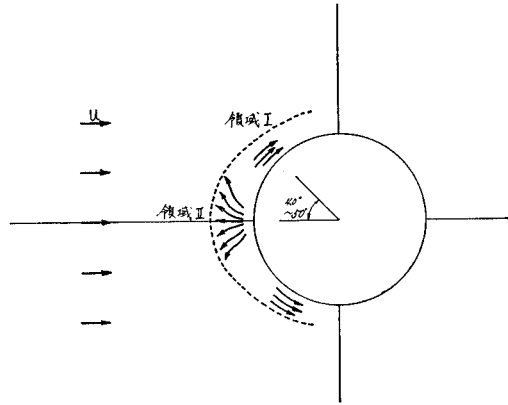


図-2 砂の移動状況

柱表面の渦のために領域 II において洗掘が生ずるようになる。しかし、いずれの場合も円柱のない場合の流れの限界掃流力よりも小さい状態で土砂の移動を開始する。流れが鉛直方向に一樣で、二次元流れと考えられる場合には、ポテンシャル流の理論より円柱の流れに直角方向の側面において最大流速となるが、実際には円柱軸方向の圧力勾配および鉛直方向の流速勾配のために、流れ方向に対し 40~50° の側面において掃流力は最大となることが知られる。したがって、円柱周辺の流れに関しては、鉛直速度勾配が重要な意味をもつものと考えられる。

円柱周辺の土砂移動は流れの河床せん断力のみでなく、河床付近の流れの上向き成分などによって影響を受けられると思われるが、簡単のために一般の河床におけるせん断力と同一の条件により起こると考えてみることにすれば、表-2 より第一領域では  $\tau_c/\tau_s=1.82$  となり、円柱周辺では河床せん断力は円柱がない場合に比し、約 1.8 倍大きな掃流力が働くことになる。Andru<sup>4)</sup> の洗掘についての結果を整理すれば<sup>7)</sup>

$$D_s/h \approx 1.8$$

ここに、 $D_s$  : 水面より測った最大洗掘深、 $h$  : 水深、である。このことは、洗掘が起こったために生ずる河床付近の複雑な流れの影響があるものと考えられるけれども、おおよそは円柱周辺での掃流力の増加に起因して洗掘が生ずるということを示唆しているものと考えられる。

領域 II での砂の移動は前面での下向き流れにより生じた水平軸をもつ渦によるものであることが観測された。下向き流れは、鉛直方向の流速分布により生ずるものであり、これが洗掘に関して重要な意味を持つと考えられるので次節において再び考察することにする。

#### (2) 最大洗掘深と水理量との関係

実験により最大洗掘深は円柱の場合には前面において

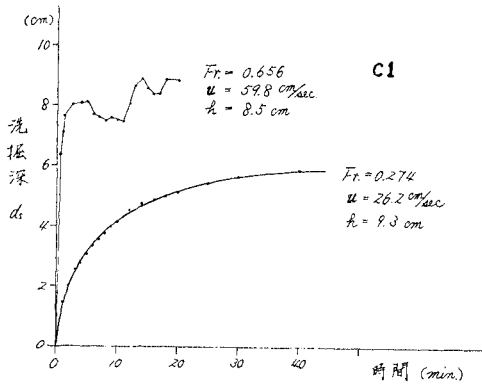


図-3 洗掘深の時間的变化

生じ、経過時間とともに洗掘深は増加し、ついに平衡状態に達することが知られた。洗掘深の時間的变化は 図-3 に例示するごとく、流れを一定状態に保てば、洗掘深は時間的に最初急激に洗掘され、時間の経過とともに洗掘の度合いは次第に減少し、ついに一定値に達し平衡状態になる。このことは、すでに従来の研究によりよく知られたことである。ここでは十分時間をかけ、平衡状態に達した最大洗掘深が橋脚の設計、保守に重要と考えられるので、この最大洗掘深を測定し、それと水流量との関係を考察してみる。

最大洗掘深に関係すると思われる物理量について考察し、その関係を次元解析した結果

$$d_{smax}/h = \phi(F_r, D/h, R_e, D/B \dots)$$

となる。ここに、 $F_r$  : 流れのフルード数、 $d_{smax}$  : 平均河床より測った最大洗掘深、 $h$  : 水深、 $R_e = \frac{DU}{\nu}$  : レイノルズ数、 $D$  : 円柱の直径、 $U$  : 流速、 $B$  : 水路幅、である。 $d_{smax}/h$  は河床材料により変化すると考えられるが、本実験では一種類の砂しか測定していないので、ここでは検討することができない。また  $D/B$  については、円柱を水路幅に比して小さいものを用いたので比較的広い水路に円柱 1 本が置かれた時の洗掘深と考えられるので、ここでは取り扱わない。上式のうちでもっとも影響が大きいと考えられる  $F_r$  について  $d_{smax}/h$  の変化を実験結果より調べると 図-4 のごとくである。図より若干のパラッキが認められるが（これは平均河床の測定に誤差が入るためと、次元解析結果および後に示す 図-6 から明らかなように、橋脚のまわりの洗掘は  $F_r$  の他に  $R_e, D/h$  の影響を受けるためと考えられる）、 $F_r$  数と  $d_{smax}/h$  の関係はほぼ  $F_r < 0.25$  の部分と  $F_r > 0.25$  の部分にわけられ、 $d_{smax}/h$  は  $F_r$  の約 0.75 乗に比例すること、および  $D$  が大きいほど  $d_{smax}/h$  は大きくなることが認められる。

すでに砂の移動開始のところで示したように、領域 II

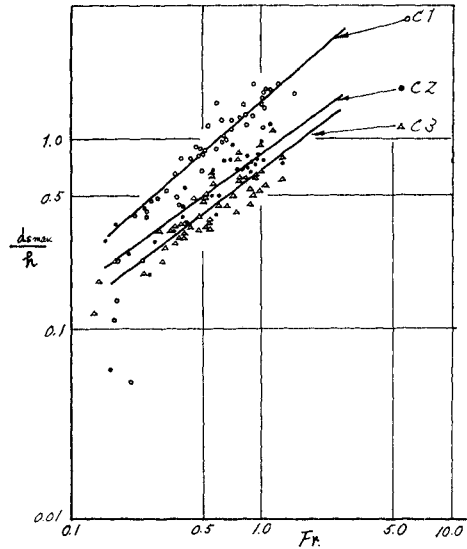


図-4  $d_{smax}/h$  と  $F_r$  数の関係

で砂が動き始める時には、領域 I ではすでに洗掘がおこり、洗掘の進行とともに洗掘斜面上では、重力の斜面方向の分力をもつようになる。また流向は洗掘部分に向うようになり、洗掘はさらに進み、円柱上流面にまで及ぶようになる。観察によれば洗掘が進まないうちは、領域 II の砂は、上流方向に進むが、洗掘が進むと領域 II の砂も円周に沿って動くことが知られる。この時は最大洗掘深は領域 I でおこっており、図-1 の方法で測定したものは最大洗掘深を表わしていない。しかし、前面に発生する水平軸を有する渦の強さが強くなると、前面における洗掘は、この渦によりおこり、最大洗掘深もこの位置で生ずるようになる。前面において渦による洗掘が支配

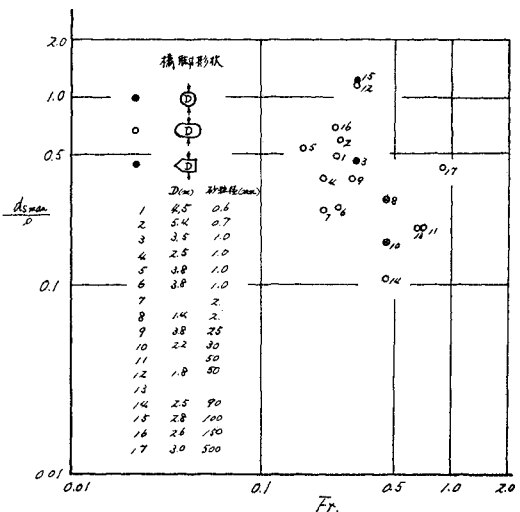


図-5  $d_{smax}/h$  と  $F_r$  数の関係 (現場データ)

的になるのが Froude 数 0.25 に対応している。したがって、ここでは  $F_r > 0.25$  の場合のみを考えることにする。なお、日本国有鉄道が洪水時に現場で実測した資料につき同様の整理をしてみると、図-5のごとくなり、図-4の場合とほぼ同じ程度となっている。したがって、最大洗掘深と水理量の関係は

$$d_{smax}/h = \alpha F_r^\beta \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\alpha, \beta$  は水路幅、橋脚幅、河床材料などによって定まる定数と考えられるが、この実験より知られる所では  $\beta \approx 3/4$  としてよいようである。

Andru<sup>4)</sup> は、砂質河床の河川における橋台、橋脚や水制のまわりの局所洗掘深についての Inglis の資料および模型実験の結果などについて Lacey の bed factor  $F_b$  を用いて次の関係を提案している。

$$d_{smax} \cdot F_b^{1/3} = 1.35 q^{0.74} \approx 1.35 q^{3/4} \dots\dots\dots (2)$$

この式を変形すると

$$d_{smax} \cdot F_b^{1/3} = 1.35 g^{3/8} \cdot h^{9/8} \cdot F_r^{3/4} \dots\dots\dots (3)$$

となり、 $F_b$  は河床粒径に比例すると考えられるので、河床材料が一定ならば  $F_b$  は一定であり、また  $h^{9/8} \approx h$  とすると式 (1) と一致する。Andru の与えた式は形状、大きさの異なる橋脚、橋台、水制について成り立っているので  $d_{smax}/h$  は  $F_r$  数によりおおよそ定まるものと考えてよいであろう。また前節で述べた Andru の関係式は、 $d_{smax}/h = 0.8$  であるが、図-4 から実験値の概略の平均値としては、このようになり、おおざっぱな推定に役立つが、さらに正確には式 (1) の関係による方が妥当であろう。

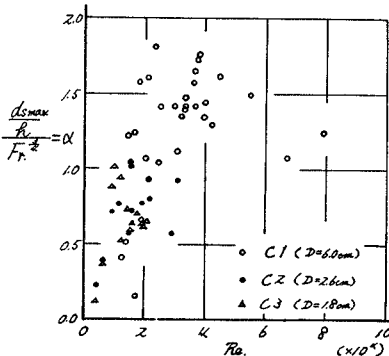


図-6  $\alpha$  と Reynolds 数との関係

次に式 (1) の  $\alpha$  について調べてみると次元解析により、これは Reynolds 数あるいは  $D/h$  の関数であろうと思われる。 $d_{smax}/h / F_r^{3/4} = \alpha$  の値と  $Re$  数の関係を実験値につき調べてみると、図-6 に示すごとくなり、比較的よい相関を示すようであるが、現場データ ( $Re$  数が  $10^6$  のオーダー) をこの方法で調べると、 $Re$  の大きさが実験値と非常に異なるにもかかわらず、 $\alpha$  の値は

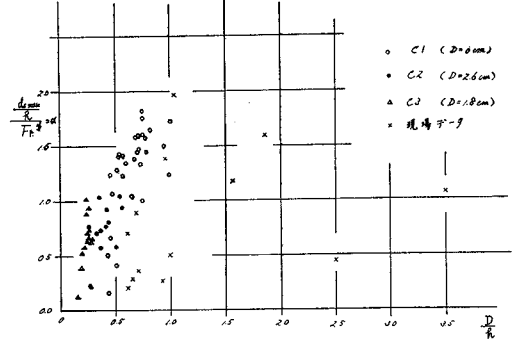


図-7  $\alpha$  と  $D/h$  の関係

あまり変わらないので、統一的にこのような関係で表わすことはできない。次に  $\alpha$  と  $D/h$  との関係を実験値、現場データにつき調べてみると、図-7のごとくなり、現場データのあるものは若干はずれるが大体は一定の関係が認められそうである。現場データの中には必ずしも洗掘が流れの状況に応じた平衡状態にまで達しないものも含まれていることを考慮すれば、図-7 の関係は、現象をある程度説明し得ているように考えられるが、さらに実験範囲を上げ、また現地データを収集して今後検討すべきものであろう。

さきに、円柱のまわりの流れが三次元的で、鉛直方向の流速分布に基づく下降流が洗掘に重要な影響を持つことを述べたが、このことを流れの円柱中心軸を通る面について考察してみる。この面を円柱に向けて流れてくるにつれて側方に流れが偏向して行くものと考えられるが、いまの問題を考える場合には、その影響程度は比較的小さいものとして簡便に取り扱う (円柱のまわりの流れを三次元的に取り扱うことは困難であるので、性質の概要を知るためこのように簡便化した) こととする。このため連続式は考慮しない。

Euler の運動方程式を円柱座標で表わし、流れが定常な場合のこの面における式を示せば

$$u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \dots\dots\dots (4)$$

$$u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで、任意の  $z$  の高さにおいては  $u_r$  はポテンシャル流れの理論より得られる

$$u_r = (u_r)_{\theta=0} = -u \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \dots\dots\dots (6)$$

を用いる。ここに  $a = D/2$ ,  $u$  は円柱の影響を無視し得る程度離れた所での流速で  $u = u(z)$  とする。

$z$  方向の速度成分  $u_z$  は式 (4), (5) を解いて求めるべきであるが、 $r$  方向については、運動方程式 (4) の代わりに、流線に沿っての Bernoulli 式を考える。すなわち、任意の流線上の円柱より十分離れた点と円柱近く

の任意の点の河床上の高さをそれぞれ  $z_1, z_2$  とすれば、

$$h(z_1) + \frac{u(z_1)^2}{2g} = \frac{1}{2g} (u_r^2 + u_z^2)_{z=z_1} + \frac{p}{w} + z_2 \dots\dots\dots(7)$$

となる。ここで、流線が円柱に近づくにつれて下降するので、 $u(z_1) \approx u(z_2)$  であるが、円柱のごく近傍までは、流線は河床にほぼ平行で、下降の程度が著しくないことが実験より知られたので、式(7)において  $u(z_1) = u(z_2)$  と仮定する。式(7)を  $z$  で微分し、 $\frac{\partial p}{\partial z}$  を求め、式(6)を用い、式(5)に代入すると、

$$\frac{\partial u_z}{\partial r} = \left( \frac{1}{1 - \frac{a^2}{r^2}} - 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots\dots(8)$$

となり、これを  $r$  につき積分すると

$$u_z = a \left( \frac{1}{2} \ln \frac{r-a}{r+a} - \frac{a}{r} \right) \frac{\partial u}{\partial z} + c$$

となり、 $r \rightarrow \infty$  で  $u_z = 0$  であるから  $c = 0$  となり

$$u_z = a \left( \frac{1}{2} \ln \frac{r-a}{r+a} - \frac{a}{r} \right) \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots\dots(9)$$

が得られる。

したがって、式(6),(9)により、円柱前方での流速分布が与えられると円柱中心軸をとる面内での各点の合速度、流向が求められる。この関係を実測値と比較するために、水路壁面に半円柱 ( $\phi = 6.0 \text{ cm}$ ) をとりつけ、前方(円柱中心より 5, 8, 13 cm の位置)から高さを 1 cm きざみに変えて、細いガラス管から過マンガン酸カリ水溶液をトレーサーとして流し、写真撮影により流跡線を求めた。この結果は図-8に実線で示されている。

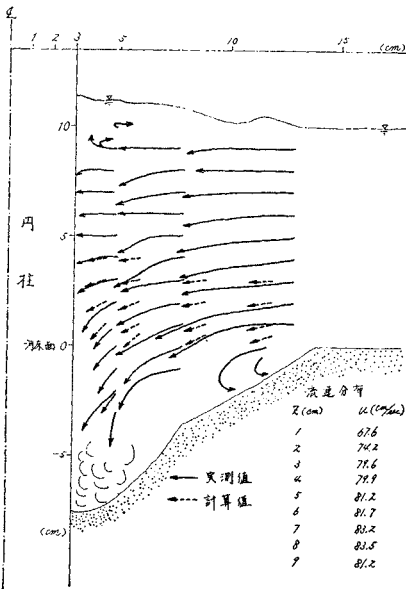


図-8 円柱前面の流向

る。測定は洗掘が平衡状態に達した後行なわれ、流れは定常であるので、この流跡線は流線を表わす。同図中に式(6),(9)より計算された流向を破線で示してあるが、この計算によりよく実測と一致することが認められる。以上のことにより円柱周辺の洗掘は二次元流と考えた時の円柱周辺での掃流力の増加と  $u_z$  に伴う流れの円柱前面河床への集中によると考えられる。 $u_z$  は洗掘深に重要な意味を持つが、式(9)より同じ水理条件に円柱をおくと円柱径に比例して  $u_z$  が増加することが知られ、図-7に示した  $a$  と  $D/h$  の関係に対応するものと考えられる。

また、式(9)より円柱径が同一であれば、 $u_z$  は  $\frac{du}{dz}$  によって決まることがわかる。河床付近での  $\frac{du}{dz}$  とし、 $d_{smax}/h$  との関係調べると、図-9のようにほぼ直線関係にあることが知られ、鉛直速度分布による円柱前面の下降流が洗掘に直接関係することが認められる。円柱以外の形状の橋脚については、式(6)の代わりに、その形状に応じた関係を見出せば、同様にして検討ができるであろう。

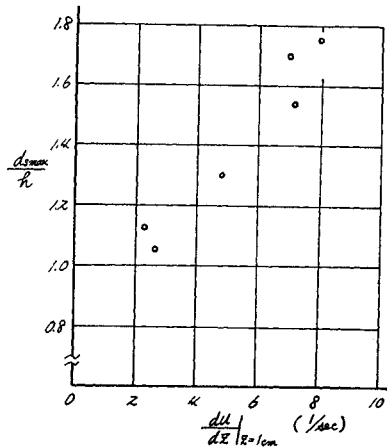


図-9  $d_{smax}/h$  と鉛直速度勾配との関係

#### 4. 洗掘防止方法

以上調べたごとく、円柱前面の向下き流れが流れの鉛直方向の速度勾配のために生じ、これが洗掘に重要な関係を持つことを知った。

橋脚による洗掘を防止または減少させることは実用上重要な問題であるが、ここでは、前記の結果に基づき橋脚前面の下降流を薄板のツバを橋脚にとりつけることにより、減少させて洗掘の軽減を計ることを考え実験的に検討した。

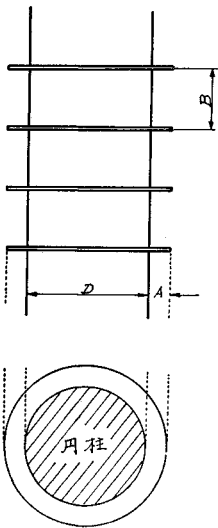


図-10 ツバ付円柱の略図

実験には橋脚として円柱 C1 を使い、厚さ 2mm の円形のツバを種々の大きさ、間隔に取りつけた (図-10 参照)。

ツバの効果は水理的には i) 下降流に対し粗度の役目を果たす、ii) 円柱周辺の流れを鉛直速度勾配のある場合にも二次元流に近づける、の 2 つの要素が考えられるであろう。

図-10 に示すツバ付き円柱についてツバなしの場合と同様な実験を行なった。 $d_{smax}/h$  と  $F_r$  数との関係は式 (1) と同様な関係があり、

また明らかにツバをつけることにより洗掘量を軽減できることが確認された (式 (1) の  $\alpha$  は小さくなり、 $\beta$  はほとんど変化しない)。

実験結果より  $F_r=0.5$  および 1.0 のケースを取り出して洗掘減少効果を示せば 図-11 に示すごとくなり、 $B/A$  が 3 付近でもっとも効果があり、同一円柱には広い幅のツバを付けることにより相当程度洗掘防止をすることが知られる。

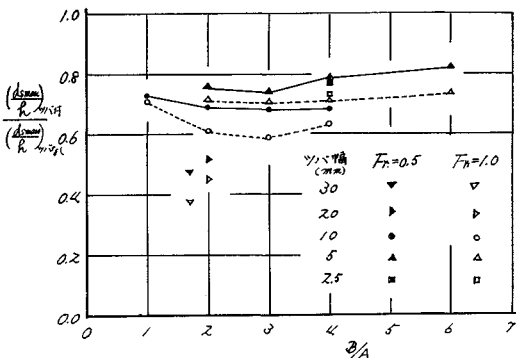


図-11 ツバの間隔幅比と洗掘減少効果の関係

一様流中に円柱が置かれたとき円周に沿って流線が曲げられることにより円周周辺で圧力変化が起こる。しかし、この場合には円柱軸方向にはまったく同様なパターンを示し、円柱軸方向には流れを生じない。円柱軸方向に速度勾配がある場合には、軸方向に圧力変化を生じ流れの軸方向の移動が起こる。このような軸方向の流れをツバによりどの程度防止できるかが洗掘に関係すると考えられるので、実際の開水路に立てられた円柱について、各水平面ではそれぞれポテンシャル流れであると考えた

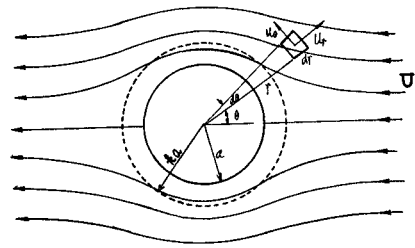


図-12 記号図

時、ツバがどの程度各層ごとの圧力降下量を覆っているかを計算してみる (図-12 参照)。この計算には円柱前半面 ( $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ ) について考慮された。計算に用いる記号は 図-12 に示す。

点  $(r, \theta)$  の圧力を  $p$  とすると Bernoulli の定理より

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{U^2}{2} = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} (u_r^2 + u_\theta^2)$$

であり、二次元ポテンシャル論より  $u_r, u_\theta$  を求め、上式に代入すれば

$$\begin{aligned} p - p_0 &= \frac{\rho U^2}{2} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right)^2 \cos^2 \theta \right. \\ &\quad \left. - \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right)^2 \sin^2 \theta \right\} \\ &= \frac{\rho U^2}{2} \left( \frac{2a^2}{r^2} \cos 2\theta - \frac{a^4}{r^4} \right) \dots \dots (10) \end{aligned}$$

となる。したがって、円柱の前半分での圧力総変化量は

$$\begin{aligned} &\int_a^{R_1} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (p - p_0) r dr d\theta \\ &= \frac{\rho U^2}{2} \left( \frac{\pi a^4}{2 R_1^2} - \frac{\pi a^4}{2 a^2} \right) \dots \dots (11) \end{aligned}$$

となる。ここに  $R_1$  は円柱による影響を無視し得ると考えられるところの円柱中心からの距離で、 $a$  に対してかなり大きい値である。たとえば  $R_1 = 100a$  ととれば式 (11) の第 1 項は第 2 項の  $1/10000$  となり、第 1 項は無視できる。したがって、円柱による流れの圧力の総変化量は

$$-\frac{\pi \rho U^2 a^2}{4}$$

で表わすことができる。

$z$  方向の  $U$  の変化に伴う  $z$  方向の圧力変化量が下降流を発生させることに関係し、円柱にツバを付けることにより、ツバの内側の範囲の圧力変化量はツバにより抑えられるので洗掘には影響しないと考えてよいので、ツバの外側の部分での圧力変化量を計算してみる。円柱の中心からツバの先端までの距離を  $ka$  とすると  $ka = a + A$  であり、圧力の総変化量は

$$\int_{ka}^{R_1} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (p - p_0) r dr d\theta$$

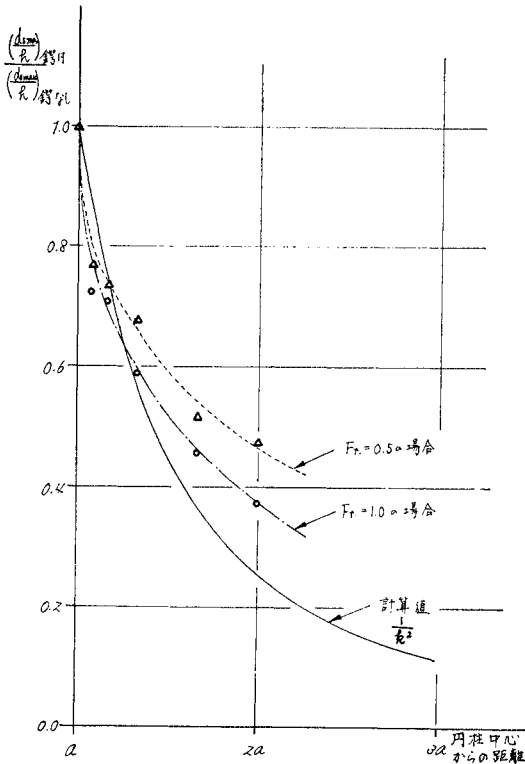


図-13 ツバ幅による洗掘減少効果

$$= \frac{\rho U^2}{2} \left( \frac{\pi a^4}{2 R_1^2} - \frac{\pi a^4}{2 k^2 a^2} \right) \approx - \frac{\pi \rho U^2 a^2}{4 k^2} \dots \dots \dots (12)$$

となる。したがって、式 (11), (12) よりツバを付けることにより圧力変化量は  $k^2$  に逆比例して小さくすることができることが知られ、洗掘深も同様の傾向で減少することが予想される。C1 の円柱の場合につきツバなしの場合とツバをつけた場合の洗掘深の比を実験値より求め、ツバ幅  $ka$  との関係調べると 図-13 のごとくなり、上記の理論的概略計算値と比較的よく一致していることがわかる。ただし、実験値には 図-11 に示すごとくもっとも洗掘減少効果の大きい間隔幅比のものをプロットしてある。また、図-13 より比較的 Froude 数が小さくツバ幅の大きい場合には理論計算結果ほど洗掘減少効果が著しくないことが認められる。これは円柱のまわりの流れが二次元である場合でも円周に沿って掃流力が大きくなり、洗掘が生ずることに起因するものと考えられる。

上記のことから一定のツバ幅のものを付けた場合に最適間隔幅比にすれば、ツバによる洗掘軽減効果はポテンシャル流れを仮定し求めたツバによる圧力変化量の減少からおおよそ見積ることができる。

次に洗掘軽減のために付けるツバの最適間隔幅比に

ついて考察する。円柱に付けられたツバは円柱により生ずる前面での下降流をさまたげ、円柱に沿っての二次元流に近づける作用があることが知られた。このことを理想的に達成するためには無限に長いツバを必要とするが、上記実験的研究により円柱による二次元流れとして考えた場合の流向、流速の変化の著しい部分を覆うことによりほぼ目的を達成できることが明らかになったが、ツバにより円周周辺の流れを二次元的に保つためにはツバの間隔と幅との間には一定の関係が必要なが実験的に認められた。これは下降流に対してツバが粗度の効果を持つものと考えられ、一定幅のツバの場合に下降流に対してもっとも有効に粗度として働く間隔があることを示唆している。

突起による粗度については従来多くの研究がなされており、これらの知識が有用と考えられる。秋草・吉川<sup>7)</sup>らは等角写像を用いて斜水制後方にできる渦領域の計算を行なっているが、円柱にツバを付けた場合も円柱に対し斜めに向う下降流に対し粗度の効果を持つものと考えてよいであろう。このように取り扱うためには、円柱前面での流線を知る必要があるが、おおよその流線に関しては、3章において述べた。ここではツバの付いた場合 (C1 の円柱に対し 1.0 cm 幅のツバを 3.0 cm 間隔

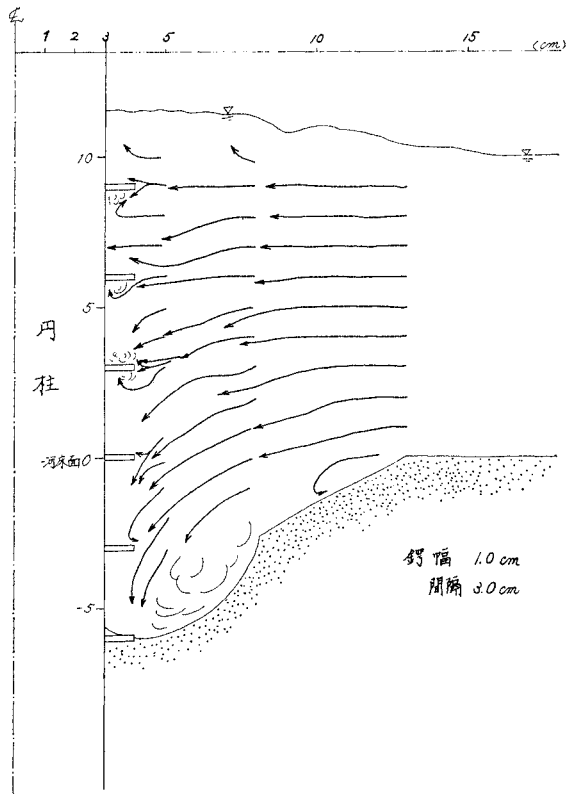


図-14 ツバ付き円柱前面の流向

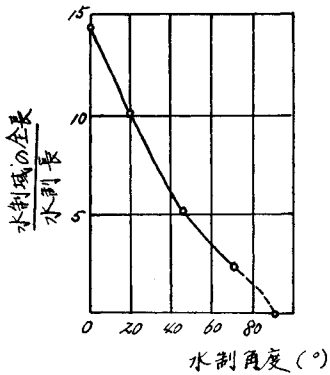


図-15

でつけた場合)に流線を前述と同様の方法により実測し、図-14に示すとき結果を得た。これより下降流はツバに対し元河床付近では、 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 程度の角度を持つことが知られた。秋草・吉川らの計算結果によれば図-15に示すごとくであり、これより渦領域は突出長の3~4倍程度と考えられ、この場合に粗度としてもっとも有効であることが知られている。したがって、円柱にツバをつける場合にはツバ幅(A)と間隔(B)との比 $B/A$ を3~4程度とすることが下降流を減少させ、洗掘防止に役立つものと考えられ、図-11に示す結果と一致する。実際には下降流の流向は前述のごとくFroude数などにより若干変化するから最適の $B/A$ は実験的に知られた $B/A=3$ に限定されなく、若干変化すると思われるが、下降流の流向を精度よく計算することはできないので、実用的には実験結果より見れば $B/A$ の変化に対し図-11に見られるごとく洗掘軽減効果に及ぼす影響はあまり顕著ではないので $B/A=3$ 程度にとってよいと考えられる。

なお、ツバを円柱に付けた場合にはツバを付けない場合より若干円柱に作用する抗力は増大することに注意しなければならない。実験により洗掘の生ずる場合には円柱前面の下降流が側方の洗掘部分を通して円柱後面のはく離領域に水流を補給するために、同じ条件下で固定床の場合に比し若干抗力は減少することが知られる。ツバを付けた場合には、このような流れを妨害することになるので流況は固定床の場合に近づき、さらにツバの面による抗力がこれに加わることになる。ただし、面による抗力は円柱による抗力に比して非常に小さいと考えられる。

## 5. 結 び

橋脚のまわりの洗掘量を知るために基本的と考えられる円柱について実験を行ない、さらに理論的検討を行なって次のような結論をうる事ができた。

(1) 円柱周辺部の掃流力は流れの河床面での掃流力の約1.8倍になる。したがって、流れの河床面での掃流力が限界掃流力以下で洗掘を生じ、掃流力を増せば円柱側面の流れに対し $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ の角度の位置において最初に洗掘が生じ、続いて水平軸を持つ渦のために円柱前面で生ずる。

(2) 最大洗掘深は $F_r > 0.25$ の場合には円柱前面において生じ、 $d_{s\max}/h = \alpha F_r^{3/4}$ の関係がある。 $\alpha$ は円柱直径 $D$ と水深 $h$ との比 $D/h$ で定まるようである。

(3) 流れの鉛直方向の速度分布のために生ずる円柱前面の下降流が洗掘に重要な意味を持ち、これは近似的な取り扱いにより、式(9)でほぼ表わすことができる。

(4) 円柱前面の下降流を減少させることにより洗掘深を減少させることができることを知り、この方法としては円柱にツバをつけることが有効であることを知った。

(5) ツバの洗掘減少効果を二次元ポテンシャル理論を用いて説明することができた。

(6) 一定幅のツバの洗掘減少効果をもっとも有効にするツバの間隔を粗度の考え方を導入して定めることができた。

以上の結論を利用して実際の河川における種々の形状の橋脚の洗掘深を推定できると考えるが、なお大型の模型実験による検証および数多くの現場での実測資料に基づく検討が望まれる。

参考文 献

- 1) 石原藤次郎：橋脚による河床洗掘に関する実験的研究，土木学会誌，Vol. 24, No. 1, 1938.  
橋脚による河床洗掘に関する実験的研究，土木学会誌，Vol. 28, No. 9, 1942.
- 2) Laursen, E.M., Toch, A.: Scour at Bridge Crossing, Proc. A.S.C.E. HY. 4, 1960.
- 3) Shen, H.W., Schneider, V.R., Karaki S.S.: Mechanics of Local Scour, Supplement, Method of Reducing Scour, Prepared for U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, Office of Research and Development, Structured and Applied Mechanics Division under Contract No. CPR 11-8022, June, 1966.
- 4) Andru, P.: Scour at Obstruction in Non-Cohesive Beds, Thesis for M.S., University of Alberta, 1956.
- 5) 宇民 正：橋脚周辺部における流れのパターンについて，京大防災研究所年報 No. 12, B, 1969.
- 6) Gradowczyk, M.H., Maggiolo, O.J., Folguera, H.C. Localized Scour in Erodible-Bed Channels, Jour. of Hydraulic Res., Vol. 6, No. 4, 1968.
- 7) 秋草 勲・吉川秀夫・阪上義次郎・芦田和男・土屋昭彦：水制に関する研究，土木研究所報告 No. 107, 1961.

(1971.3.24・受付)