

# 潮流による橋脚周辺部の洗掘特性に関する研究

中川博次\*・鈴木幸一\*\*

## 1. 緒言

潮流速の大きい海峡部に大型橋脚を建設する場合はその周辺部に発生する局所洗掘が基礎の安定に大きな問題となる。特に、大型橋脚の場合には施工期間が著しく長いいため、建設後のみならず、施工中の安定性が問題となり、洗掘深の時間的変化特性を知る必要がある。また、潮流は往復流であるため、橋脚に対する流れの方向（迎え角）次第では埋め戻し効果等も考えられる。

一般に局所洗掘現象は、流入砂量と流出砂量の不均衡から生じる現象であるが、流れと構造物および河床構成材の相互作用として起こる現象であるために、その内部機構は複雑であり、数学モデルによってこの現象を解析することが難しく、従来主に実験モデルによる解析が進められてきた。

模型実験によって原型の現象を再現しようとするとき、対象とする原型が非常に大きいと、実験技術上縮尺が小さくなり過ぎるために、原型と模型の相似条件を満たすことが困難となり、主たる支配要素間の関係にもとづく相似律が確立されねばならない。

本実験は、主として現在計画されている明石海峡大橋の主塔橋脚による洗掘を対象として行われたが、砂粒径、流速、橋脚規模等の洗掘に及ぼす影響が大きいことを見出し、これらを系統的に変化させてその効果を検討した。また、砂粒径縮尺を水深縮尺と変えた場合の洗掘深縮尺について検討した。最後に、現場における直径9mの鋼管周辺の洗掘に対する模型実験を行い、模型実験が現場の洗掘状況を説明し得ることを実証した。

## 2. 実験装置、実験方法および実験条件

### (1) 実験装置

実験は図-1に示す全長19.8m、幅1.5m、高さ0.45mの長方形断面水路で行われた。水路中央部に1.5m×1.5m×0.5mの砂箱が設けてあり、その間は移動床とし、その中央に橋脚模型が設置されるようになっている。また、それより上、下流各3mの区間は砂を

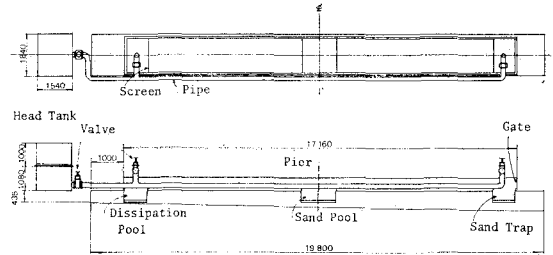


図-1 実験水路

床面にニス付けし、粗度の変化に対応した流れの遷移区間を設けた。給水バルブおよび締切りゲートを水路両端に設け、その切換えによって、流れの方向を180°変えられるようにしてある。洗掘深は特別に試作開発された小型超音波測深器で測定された。これはロッド下端から超音波を発生し、ロッド下端と砂面との距離を一定に保つようサーボモータの作動によって、洗掘深の変化に対応してロッドが上下する。このサーボ機構によって分解能が0.1mmと高精度となっている。流速はプロペラ式小型流向流速計およびブランドル型ピトー管を用いて測定された。すべての測定器具は水路の縦横断方向に可動な測定用台車にのせられ、任意点での測定が可能である。

### (2) 実験方法

実験方法としては、まず流れが所定の状態になるまでに移動床部分が洗掘されないよう押え板で押え、流れが安定状態になった後、河床を乱さないように押え板を除去し、この時の時間を $t=0$ とする。最大洗掘深については連続的に時間変化を測定した。また、適当な時間ごとに多点測深することによって洗掘孔形状を求めた。

### (3) 実験条件

現在計画中の明石海峡大橋は主塔橋脚が40m×70mの長方形断面を有し、水深が約40m、年間最大潮流速が約4m/secの場所に建設され、その地点における砂の最大粒径は約15cm、中央粒径は約5cmである<sup>1)</sup>。これらの諸量を原型として実験を行った。実験に用いた砂は図-2に示されるような粒径加積曲線を有するA~Fの6種類である。実験は洗掘の基本特性を把握するための基礎実験と、明石海峡大橋主塔橋脚を想定した模型実

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工修 鳥取大学講師 工学部土木工学科

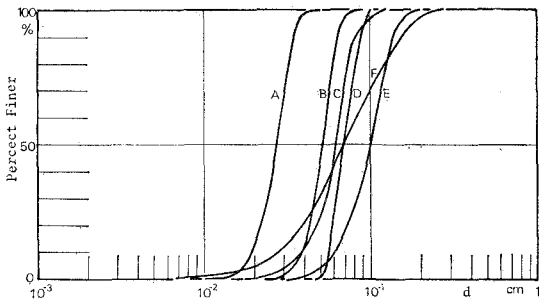


図-2 実験砂の粒径加積曲線

表-1 実験条件 (基礎実験)

Run No	Pier Size (cm)	Velocity $u_0$ (cm/s)	Depth h (cm)	Sand $d_{50}$ (cm)
1	20x35	28.28	20.0	A(0.027)
2	D=20	20.0		
3		15.0		
4		28.28		B(0.052)
5				C(0.063)
6				E(0.10)
7	8 x 14	29.71	10.0	A(0.027)
8	D= 8	23.32		
9		14.33		
10		29.71		D(0.07)
11		23.32		
12		14.33		
13		29.71		E(0.10)
14		28.08		
15		23.32		
16	4 x 7	29.71	10.0	B(0.052)
17	D= 4	23.32		
18		14.33		

表-2 実験条件 (模型実験)

Run No	Pier Size (cm)	Velocity $u_0$ (cm/s)	Depth h (cm)	Sand $d_{50}$ (cm)	Distortion	Flow Direction	Angle	
1	20 x 35 $\mu=20$	28.28	20.0	A(0.027)	1	→	0°	
4				B(0.052)	2			
5				C(0.063)	2.5			
6				E(0.10)	4			
20				F(0.07)	1			
21				A(0.027)	1			
22				F(0.07)	1			
23	8 x 14	17.89	8.0	A	2.7	→	0°	
24								30°
25								45°
26	20 x 35	28.28	20.0	A	1	↔	0°	
27				F			1	30°
28				A			1	30°
29				F			1	30°

験とに大別され、実験条件はそれぞれ表-1および表-2に示されている。すなわち、基礎実験では、橋脚規模、流速、砂粒径を種々変化させた一方向流で迎え角 0° の条件、模型実験は幾何縮尺を 1/200, 1/500, および 1/1 000 の3種とし、迎え角 0°, 30° および 45°, 一方向流と往復流の組合せで行われた。なお、往復流は矩形波で与えた。

### 3. 洗掘特性

#### (1) 洗掘形状

図-3 および 図-4 は、それぞれ一方向流 (Run 1)

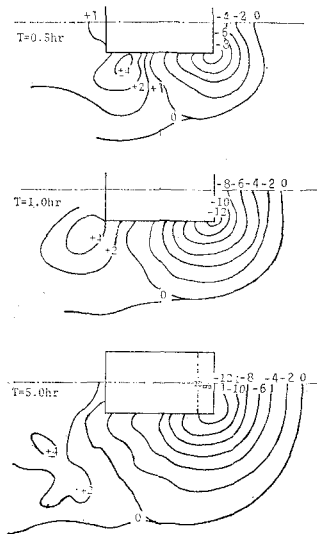


図-3 洗掘形状 (迎え角 0°, 一方向流 Run 1)

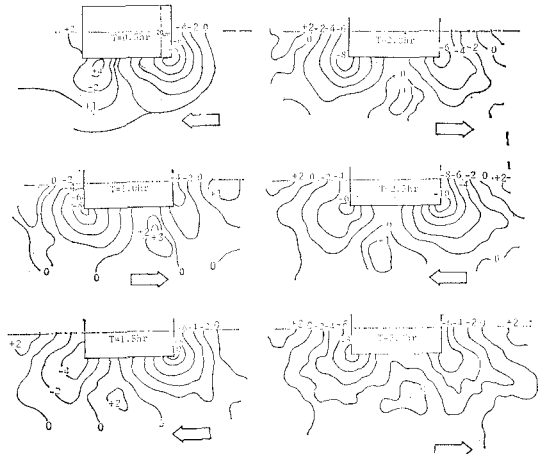
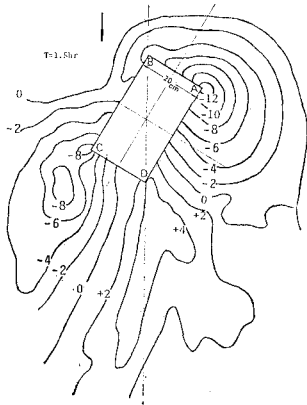


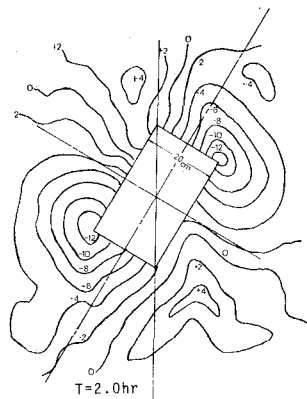
図-4 洗掘形状 (迎え角 0°, 往復流 Run 26)

および往復流 (Run 26) での洗掘形状の時間変化を示したものである。一方向流では、洗掘はまず角柱上流面の両隅から始まり、その2点を頂点とするほぼ逆円錐形の洗掘孔が発達していき、堆積域も時間と共に下流側に移動する。また、30分ごとに流れを反転させた往復流では、隅角部が最も深く洗掘され、往流と復流とで洗掘と堆積が繰り返えされ、堆積域は橋脚側面に存在する。一方向流に比して往復流では若干の埋め戻しのため最大洗掘深は小さくなる。図-5 および 図-6 はそれぞれ迎え角 30° の場合の一方向流 (Run 21,  $t=1.5$  hr) および往復流 (Run 28, 2周期後) での洗掘形状を示したものである。隅角部 A, C が顕著に洗掘されるが、迎え角 0° のときと異なって復流においても A, C 両隅角部は洗掘域であり埋め戻される傾向は認められない。

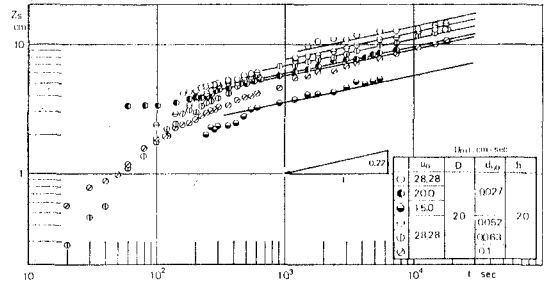
Run 1, 4, 5 および Run 6 について、縦横断方向の洗



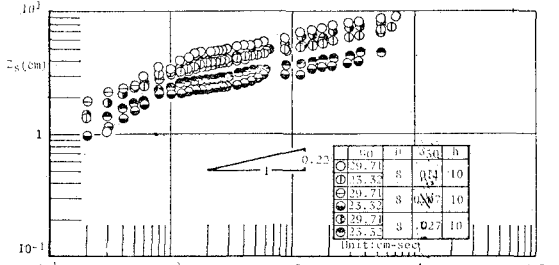
図—5 洗掘形状 (迎え角 30°, 一方向流 Run 21)



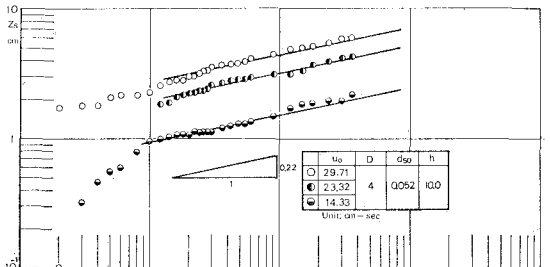
図—6 洗掘形状 (迎え角 30°, 往復流 Run 28)



(1)



(2)



(3)

図—8 最大洗掘深の時間変化

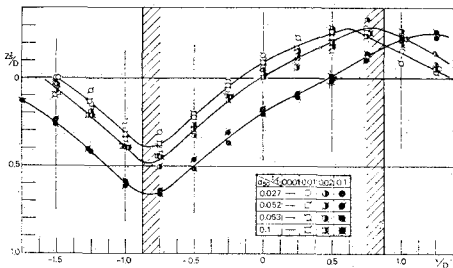
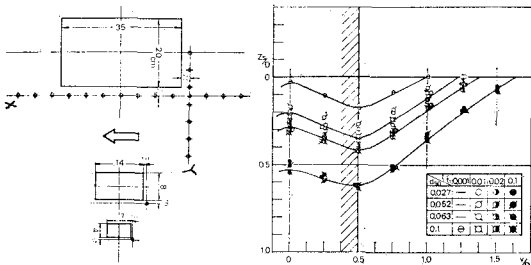
のようである。堆積域を除いて、同一  $t/t_1$  では  $z_s/D$  は各場所ではほぼ一致している。また、洗掘形状は時間的に相似形を保つことが認められる。

(2) 最大洗掘深の時間変化

図—8 は常に隅角部に認められる最大洗掘深の時間変化を示したものであるが、洗掘初期を除いて、最大洗掘深  $z_s$  が時間  $t$  に対して両対数紙上で  $1:0.22$  の傾きをもつ直線関係にあることが認められる。この直線の  $z_s$  軸切片の大きさは、砂粒径  $d$  が小さいほど、 $D$  が大きいほど、また一様流の平均流速  $u_0$  が大きいほど大きくなる傾向があるが、この関係を決定するために、 $z_s$  が  $D$  に等しくなるまでの時間  $t_1$  の評価を行う。この基準時間  $t_1$  を導入したのは、洗掘のごく初期を除いて、 $z_s \sim t^{0.22}$  の関係が成り立つ範囲での変化を取り扱おうとするためである。もし、 $t_1$  が決定されれば、

$$z_s/D = (t/t_1)^{0.22} \dots\dots\dots (1)$$

によって、洗掘深の時間変化を決定することができるし、



図—7 縦横断方向の洗掘形状の時間変化

掘深を橋脚幅  $D$  で無次元化し、測定時間  $t$  を後に述べる基準時間  $t_1$  ( $t_1$ : 最大洗掘深  $z_s$  が橋脚幅  $D$  と等しくなる時間) で無次元化したものとの関係を示すと 図—7

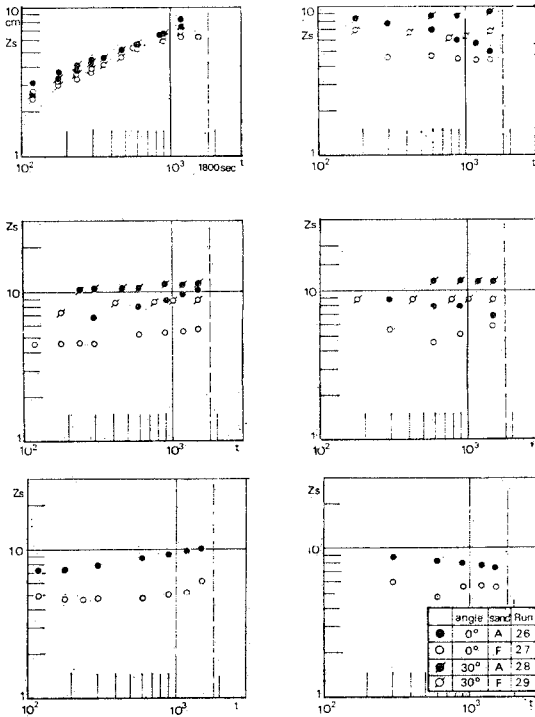


図-9 最大洗掘深の時間変化 (往復流)

図-7 にみられるように任意の時間での洗掘形状を求めることができる。

次に、図-9 は往復流における最大洗掘深の時間変化を示しているが、 $T$  を往復流の周期とすれば、 $t=T/2$  までは当然一方向流の時と同じであるが、 $T/2 < t < T$  では、迎え角  $0^\circ$  の場合、埋め戻しによって洗掘深は一定もしくは減少する傾向がみられる。また、 $T < t < 3T/2$  では、洗掘深は若干増加し、 $3T/2 < t < 2T$  ではやや減少する。以後このような若干の洗掘と埋め戻しを繰り返すが、最大洗掘深はほぼ一定となる。一方、迎え角が  $30^\circ$  の場合、往流での洗掘域が復流では堆積域とはならないため埋め戻されることはなく、1 往復以後は洗掘深

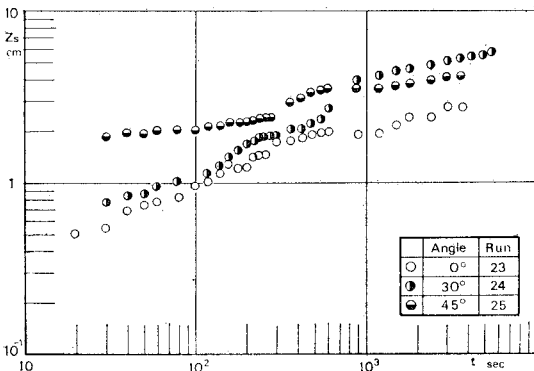


図-10 迎え角の違いによる最大洗掘深の時間変化

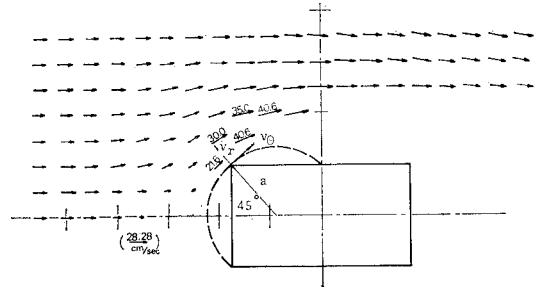


図-11 角柱周辺の表面流速・流向

は徐々に増加してほぼ一定となるようである。図-10 は、迎え角のみの影響をみるために、Run 23, 24 および Run 25 のA点での洗掘深の時間変化を示したものである。迎え角が大きくなるほど最大洗掘深も大きくなり、特に  $45^\circ$  の場合は短時間に急激に洗掘が進む。迎え角が大きいき洗掘深が大きくなるのは、みかけの橋脚幅  $D'$  が大きくなるためで、迎え角  $30^\circ$  のとき  $1.74D$ 、 $45^\circ$  のとき  $1.94D$  となり、最終的洗掘深は  $30^\circ$  と  $45^\circ$  では余り違わないが、 $0^\circ$  の場合の洗掘深とはかなりの差が生じる。

#### 4. 基準時間 $t_1$

最大洗掘深が橋脚幅  $D$  に等しくなるに要する時間  $t_1$  を求めるために半理論的考察を加える。

いま、最大洗掘深の生じる隅角部での洗掘を支配する代表流速に関しては、角柱周辺の流れを二次元ポテンシャル流として解析すれば、隅角部で不連続となるが実際現象とは必ずしも一致しない。図-11 は角柱周辺の流速流向を Run 1 で  $z_s=0$  の状態で実測したものである。この結果から、隅角部付近での流速は同図の点線で示すような円柱に対する二次元ポテンシャル流速によって近似できるものとする。したがって、図に示す極座標で、 $\theta$  および  $r$  方向の速度成分  $v_\theta$  および  $v_r$  は、

$$v_\theta = u_0 \sin \theta (1 + a^2/r^2), \quad v_r = u_0 \cos \theta (1 - a^2/r^2)$$

となり、隅角部では  $\theta=45^\circ$ 、 $r=a$  であるから、 $v_\theta = \sqrt{2} u_0$ 、 $v_r=0$  となる。このように、最大洗掘深の生じる隅角部での代表流速  $u$  を  $\sqrt{2} u_0$  とみなすことができる。

一方、一次元洗掘の連続式は、 $z_s$  を洗掘深、 $q_s$  を単位幅、単位時間当りの土砂輸送量とすると、

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda_0} \cdot \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

であり、また、 $q_s$  は  $(u_* - u_{*c})$  に支配され<sup>2)</sup>、

$$\frac{q_s}{u_* d} = K \left( \frac{u_* - u_{*c}}{\sqrt{s g d}} \right)^m \quad \dots \dots \dots (3)$$

で与えられるものとする。上式で、 $\lambda_0$ : 砂の空隙率、 $u_*$ : 摩擦速度、 $u_{*c}$ : 限界摩擦速度、 $s = \sigma/\rho - 1$ 、 $\sigma$ : 砂の密

度、 $\rho$ : 流体の密度、 $g$ : 重力加速度、 $d$ : 砂粒径、 $k, m$ : 実験定数である。いま、流速係数を  $\phi(=u/u_*)$  とし、 $u = \sqrt{2} u_0$  を用い、模型と原型との縮尺比を  $n$  とすれば、相似条件として、式 (2) および (3) から次式が得られる。

$$n_{z_s} = n_{q_s} \cdot n_x^{-1} \cdot n_t \cdot n_{(1-\lambda_0)}^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

$$n_{q_s} = n_k \cdot n_\phi^{-m} \cdot n_{(\sqrt{2} u_0 - u_c)^m} \cdot n_{\sqrt{2} u_0} \cdot n_d^{-m/2} \times n_s^{-m/2} n_g^{m/2} \dots\dots\dots (5)$$

一般に、 $n_k = n_s = n_g = n_\phi = 1$ 、また  $n_{(1-\lambda_0)} = 1$  として取り扱えるから、式 (4) および (5) から  $n_{q_s}$  を消去し、橋脚幅  $D$  で無次元化し、 $n_D = n_x = n_h$  を考慮すると、

$$n_{(z_s/D)} = n_{(\sqrt{2} u_0 t_1/D)} \cdot n_{((\sqrt{2} u_0 - u_c)/\sqrt{sgd})} \cdot n_{(D/d)}^{-1} \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここで、 $z_s/D = 1$  となる時間を基準時間  $t_1$  と定義したので、左辺を 1 とおくと、

$$n_{(\sqrt{2} u_0 t_1/D)} = n_{((\sqrt{2} u_0 - u_c)/\sqrt{sgd})} \cdot n_{(D/d)}^{-1} \dots\dots (7)$$

となり、実験で  $(\sqrt{2} u_0 t_1/D)^m$  が求められるから、式 (7) から  $t_1$  の原型値が求まる。実験結果から  $D/d$  をパラメーターとして、 $(\sqrt{2} u_0 t_1/D)$  と  $(\sqrt{2} u_0 - u_c)/\sqrt{sgd}$  との関係を示すと、図-12 のようであり、これから実験的に、

$$n_{(\sqrt{2} u_0 t_1/D)} = n_{((\sqrt{2} u_0 - u_c)/\sqrt{sgd})} \cdot n_{(D/d)}^m \dots\dots\dots (8)$$

が得られる。すなわち、 $m=3$  となり、また  $n_{D/d}$  の乗数は理論的には 1.0 であるが、実験的に 1.9 と修正される。いま、Run 1~18 の実験について測定された  $t_1$  を用い、 $(\sqrt{2} u_0/D)((\sqrt{2} u_0 - u_c)/\sqrt{sgd})^m (D/d)^{-1.9} t_1$  を計算すると、すべての実験で 29.2 のほぼ一定値をとることが認められた。

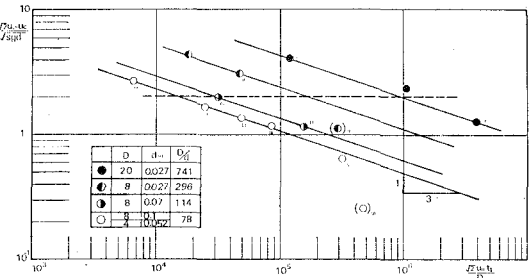


図-12  $(\sqrt{2} u_0 - u_c)/\sqrt{sgd}$  と  $\sqrt{2} u_0 t_1/D$  の関係

5. 砂粒径のひずみ度と洗掘深との関係

一般に流砂を扱う問題では、その運動機構の複雑さのために、普遍的かつ合理的な相似律を確立することがむずかしく、まして本研究で対象とする三次元的な局所洗掘問題では、完全な力学的相似律を見出すことは不可能に近い。水流に関しては、橋脚周辺部での流れの状態は幾何縮尺の相違によって変化しないと考えられるから、便宜的に一樣流での相似条件を考慮することにすれ

ば、完全乱流の範囲でフルードの相似律が適用される。すなわち、 $u_0$  を一樣流での平均流速、 $h$  を水深、 $k_s$  を粗度の大きさとし、模型と原型との縮尺比を  $n$  とすれば、 $n u_0^2/gn = 1$ 、 $n k_s/n = 1$  を満足させなければならない。次に、砂の運動の相似条件としては、同じく粘性の影響が無視できる ( $u_* d/\nu > \sim 70$ ) という条件のもとで、 $n u_*^2/sga = 1$ 、 $n h/a = 1$ 、 $n s = 1$  が満足されなければならない<sup>3)</sup>。

しかし、砂を模型河床材として用いた場合一般に  $u_* d/\nu > \sim 70$  の条件は満足されない場合が多く、さらに砂粒径が極端に小さくなると、浮流運動で輸送されるから、原型と模型とで現象が一致しなくなるおそれがある。

実験施設の規模から  $n_h$  を十分大きくできない本研究では、水深と砂粒径の縮尺比を変え、 $n_h/a = 1/\lambda$  ( $\lambda$ : ひずみ度) のようなひずみ模型を採用することとした。このようにひずませたことによって、まず流れの流速係数  $\phi(=u/u_*)$  の評価にどのような影響を及ぼすかを考える。 $\phi$  は一般に河床形態によって著しく異なる特性を示し、従来の実験によれば、洗掘孔内の円柱側面では平坦河床上の値よりかなり小さく、普通  $\phi = 8 \sim 10$  のほぼ一定値をとるといわれている<sup>4)</sup>。また、流速分布に対数則を仮定すると、 $\phi = 6.0 + 5.75 \log_{10}(h/k_s)$  であり、 $h/k_s = 800$  で  $\phi = 22.7$ 、 $h/k_s = 300$  で  $\phi = 20.1$  となるから、 $h/k_s$  の比が相当変化しても  $\phi$  の値は余り変化せず、 $n_\phi \approx 1$  とみなしても実用上差支えない。したがって、砂粒径をひずませても、 $n u_0 = n u_*$  が成立し、流れの相似に関しては問題はない。次に砂の運動の相似については、 $n_s = n_g = 1$  とすると、

$$n u_*^2/sga = \frac{n u_0^2}{n a} = \frac{n h}{n a} = \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots (9)$$

となる。いま、土砂輸送量  $q_s$  は式 (3) で与えられるものとしたから、これに  $n u_* = n u_0 = n^{1/2}$ 、 $n a = \lambda n_h$  の関係を代入すると、

$$n_{q_s} = n_h^{3/2} \cdot n_{(1-(u_{*c}/u_*))} \cdot \lambda^{-1-m/2} \dots\dots\dots (10)$$

となる。一方、一次元洗掘の連続式 (2) より  $n_{z_s}/n_t = n_{q_s}/n_x$  の関係が得られ、これに  $n_t \cdot n_x^{-1} = n_u^{-1}$  および式 (10) を代入して変形すると、

$$n_{z_s} = \lambda^{1-m/2} \cdot n_h \cdot n_{(1-(u_{*c}/u_*))} \dots\dots\dots (11)$$

が得られる。同一の  $u_*$  に対して、 $u_{*c}/u_*$  は  $d$  が大きいほど大きくなるから、 $u_*$  が  $d$  の大きさに関係なくほぼ同じとみなせる洗掘初期では、式 (11) で  $n_{z_s}$  が与えられねばならない。しかし、洗掘が進行し、最終的には  $1 - (u_{*c}/u_*) = 0$  なる状態にいかなる  $d$  の場合にも近づき、 $n_{(1-(u_{*c}/u_*))} = 1$  となり、結局式 (11) は、  
 $n_{z_s} = \lambda^{1-m/2} \cdot n_h \dots\dots\dots (12)$ 
となる。

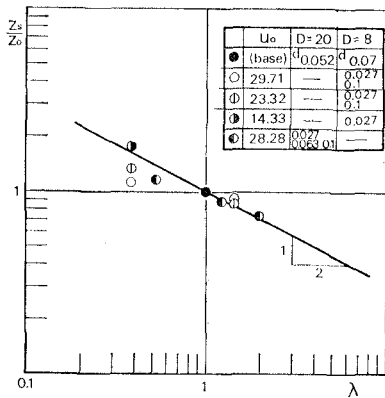


図-13 ひずみ度λと洗掘深

図-13 はひずみ度λと最終洗掘深  $z_s$  との関係を示したものである。図中  $z_0$  は  $\lambda=1$  の場合の最終洗掘深であり、直線は図-12より求められる  $m=3$  を式(12)に代入して得られる

$$n_{z_s} = \lambda^{-1/2} \cdot n_h \dots\dots\dots (13)$$

で示されるものであり、砂粒径の基準を  $D=20\text{cm}$  の場合  $d=0.052\text{cm}$ 、 $D=8\text{cm}$  の場合  $d=0.07\text{cm}$  としている。実験値は理論式をほぼ満足していると考えられるが、λが比較的小さいと、流速が大きいほど  $z_s/z_0$  は減少している。このことは流速が大きい場合、式(11)の  $n_{(1-u_{*c}/u_*')}$  を必ずしも1とみなし得ないことを示している。すなわち、 $u_{*c} \ll u_*'$  のときは十分長い時間をとらなければ、最終状態に達したとみなしえず、十分な時間をとれば、式(13)で洗掘深比が与えられると考えてよい。

## 6. 現場洗掘調査と模型実験による検証

### (1) 現場実験

現地における洗掘量を調査するために、直径9m、高さ13.5mの鋼管を主塔橋脚建設予定地点(水深約36m、最大潮流速3.5m/sec)に沈め、その周辺での洗掘深の測定が本四公団の手で実施された。昭和49年5月26日から9月5日の間鋼管が沈められていたが、設置後1日、18日、33日、102日目に鋼管周辺での洗掘状況が調査された。底質は細砂に小石が混っているような状態で最大砂粒径は約15cmである。図-14に102日後の等深線を示している。図で東流と西流の方向はかなり変化するが、ほぼC点は西流の堆積域、G点からH点にかけては東流の堆積域となる。東流、西流のいずれに対しても洗掘域となるDEF、BAHでの洗掘が卓越している。図-15は各点における洗掘深の時間的変化を示す。鋼管設置後比較的短時間に洗掘が大きく進み、102日後でも徐々にではあるがなお洗掘が進んでいる。

### (2) 模型実験による検証

現地における直径9m鋼管による洗掘状況を模型に再

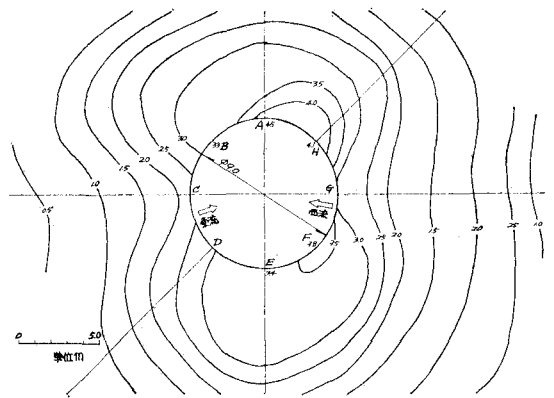


図-14 洗掘形状(設置後102日)

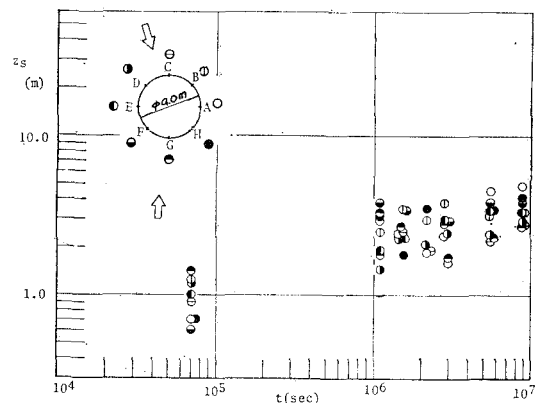


図-15 洗掘深の時間変化(9m鋼管)

現することによって、本研究で考察された主塔橋脚洗掘模型実験の結果から原型の洗掘現象を推定することの妥当性を検証する。縮尺は1/150とし、現地での流速を3.5m/sec、最大砂粒径を15cmとして実験を行った。すなわち、実験に用いた砂は最大粒径が0.1cmであり、得られた洗掘深の時間変化は図-16に示されている。半潮汐周期6時間は1/150模型で29分に当たるが、図にみられるように最大潮流速が一方方向のまま続くと、初期に急速に洗掘が進み、半潮汐周期で洗掘速度は急減する。流れを反転させると、最大洗掘深は若干増加するが、

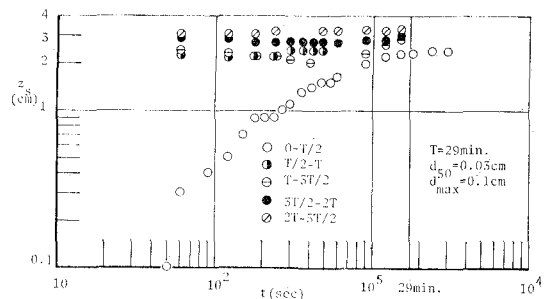


図-16 洗掘深の時間変化(模型実験)

十分時間が経つと洗掘はほとんど停止した状態になる。この状態での最大洗掘深  $z_s$  は約 3 cm で原型に換算すると 4.5 m であって、現地実験の結果と良好な一致が認められる。このように最終的な洗掘深については、模型実験によって原型の現象をほぼ満足に説明できることが示されたが、洗掘初期における洗掘速度は、模型では潮流を半周期ごとの定常矩形波で与えているから、非定常変化する原型の場合に比してかなり大きくなるものと考えられる。

## 7. 結 言

本研究は、明石海峡大橋主塔橋脚周辺における局所洗掘特性を明らかにするために行った系統的な基礎実験ならびに往復流や迎え角の影響を考慮した水理模型実験に関するものであるが、最終的な洗掘深は模型実験によって推定できるとしても、洗掘深の時間変化を厳密に論じようとするならば、模型における往復潮流の与え方をより相似させねばならないであろう。一方向流に対しては、洗

掘深が橋脚幅に等しくなるまでに要する時間という基準時間によって洗掘過程が説明できるとしたが、これは洗掘初期の半周期までしか適用できない。しかし、反転以後は、埋め戻しと洗掘を繰り返しながら、洗掘は非常に緩慢に進行する。ただ、迎え角が大きくなるにつれて、往、復流で洗掘域が一致し洗掘は一方向流と同程度生じる。

なお、この研究は本州四国連絡橋公団より委託された実験の一部であることを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 本州四国連絡橋公団：明石海峡潮流その他解析報告書，昭49.6.
- 2) Breusers, H.N.C.: Time Scale of Two Dimensional Local Scour, Proc. of 12th Congress of IAHR, Vol. 3, pp. 275-282, 1967.
- 3) たとえば, Yalin, M.S.: Theory of Hydraulic Models, The MacMillan Press, 1971.
- 4) 齋藤 隆・浦 勝・柴田幸信：円柱周囲の洗掘について，山口大学工学部研究報告，第20巻第1号，昭44.9，pp. 83-90.