

円柱橋脚まわりの流れ, 河床変動と流体力

Measurements of Flow and Bed Geometry around a Cylindrical Pier
and Calculation of Its Fluid Forces

福岡捷二*・宮川朝浩**・飛石勝***

By Shoji FUKUOKA, Tomohiro MIYAGAWA and Masaru TOBIISHI

Maximum depth of local scouring around a pier has been understood within the practical purpose. Because of the complexity, there are not sufficient amount of data about the structure of flow around a pier.

In this research, a cylindrical pier model was set up in the straight movable channel. Based on the detail measurement of the pressure and the velocity field around it, the structure of flow and the fluid forces acting around the pier were clarified.

Keywords: bridge pier, local scouring, fluid force, drag coefficient

1. 序論

流れの中の構造物に作用する流体力や構造物周辺の流れ及び河床変動を把握することは、河川管理上重要な課題である。橋脚まわりの流れについては、最大局所洗掘深及び洗掘範囲は実用的な精度で把握できるようになってきているが¹⁾、橋脚に関する課題としては最大洗掘深の見積もりだけでは不十分である。数値解析によって局所洗掘現象を表現する試みが行われるようになってきているが²⁾、それを検証する十分なデータがないため、数値解析の精度はあがっていないのが現状である。この理由は、実用上は最大洗掘深を見積もることが重要であり、必要に応じて水理模型実験を行えば答えを得ることができると考えられてきたためであり、最近ではこの分野の研究の進展はほとんどみられなくなっていた。しかし模型実験に要する労力、時間、費用は著しく大きく、橋脚周りの洗掘が関わる問題は多様であることから、洗掘のメカニズムをより詳細に検討し確かなデータを得ることによって、精度の高い数値計算法を展開し具体的な設計法の確立を目指す段階にきている。

このような問題意識のもとに本研究では、大型の移動床直線水路内に円柱橋脚模型を設置し橋脚周辺の流れ、圧力、河床変動を詳細に測定し局所的な流れの構造を明らかにするとともに橋脚に作用する流体力の算定を行う。

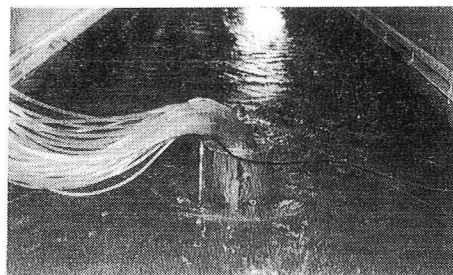


写真-1 実験の様子

* 正会員 工博 Ph.D. 広島大学教授 工学部第四類 (建設系) (〒739 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

** 正会員 (株) 建設技術研究所 技術第五部 技師

*** 学生員 広島大学工学部第四類 (建設系)

2. 移動床橋脚実験

2.1 実験水路

実験水路は図-1 に示す幅 1.5m、高さ 1m、全長 27.5m のコンクリート製直線水路である。この水路には下流端から 10.5m の水路中央部にコンクリート水路床を 30cm 掘り下げて 130×130cm のピットを設けている。ピット内に図-2 に示す基礎台を設置しここに円柱橋脚を取り付けた。水路床から高さ 0.6m の内壁の位置には水平なレールを全長にわたって取り付け、この上に置かれた測定台によって水量や河床形状の測定を行える構造となっている。

2.2 橋脚模型

図-2 に橋脚模型の設置状況の横断面図と平面図を示す。橋脚模型は直径 20cm、内径 18cm、高さ 75cm のアクリル製円柱で、表面には圧力測定用の直径 1mm の小孔が鉛直方向に 1cm の間隔で 51 個あけてある。写真-1 に示すように円柱内部から細いビニールパイプの一端を小孔に接続し、他端をマンオメータに接続し円柱を回転させて圧力分布を測定する。このため円柱中心に鋼製の支持棒を設け、支持棒の上端はワイヤーで水路壁のレールに、下端は基礎台に固定している。また支持棒の上端に設置された分度器により円柱の回転角度を正確に設定することが可能でありこれによって円柱表面の全圧力分布を測定することができる。

圧力測定用の小孔の番号を下から順に No. 1~51 とし、No. 35 の測定孔の 180°反対側の位置には圧力センサーを設置している。これにより No. 35 の圧力変動を直接測定し、マンオメータの圧力値との比較も行う。

2.3 実験方法及び条件

実験は、表-1 に示すように実験 1 と実験 2 の 2 ケースを行った。

河床材料には平均粒径 0.8mm、比重 2.59 の 4 号珪砂を使用し、初期河床勾配を 1/600 に設定している。また、河床波の発達過程における流れの非平衡性の影響が大きいため河床波が充分発達してから各測定を行う。流速、圧力等の測定には長時間の通水を要するため芦田・道上式により流砂量を求めて上流端で給砂を行う。流砂量は、下流端の砂だめに溜まる砂の量を測り求める。

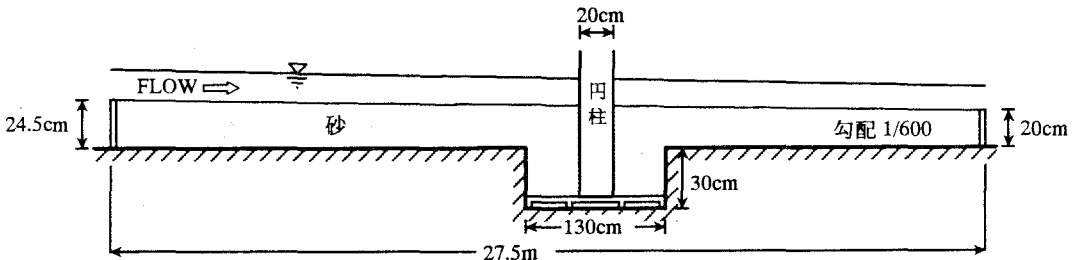
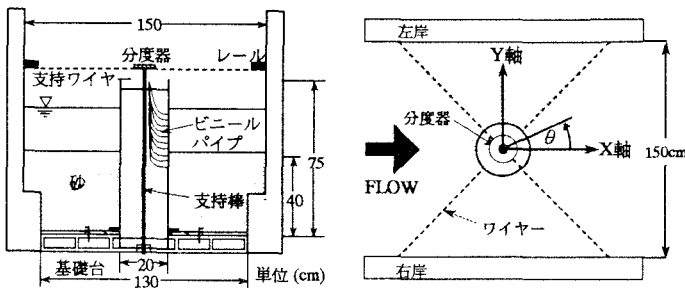


図-1 実験水路全体図

表-1 水路諸元及び実験条件

	実験 1	実験 2
水路幅	1.5 m	
水路長	27.5 m	
円柱直径	20 cm	
流量	66 l/s	90 l/s
平均水深	10.8 cm	13.7 cm
平均流速	40.7 cm/s	44.2 cm/s
Fr 数	0.40	0.38
Re 数	9.0×10^4	9.6×10^4
砂の平均粒径	0.8 mm	
砂の比重	2.59	
給砂量	0.53 l/min	0.84 l/min
河床勾配	1/453	1/372
通水時間	30 時間	61 時間
水温	25°C	24°C



(a) 横断面図

(b) 平面図

図-2 橋脚模型の設置

円柱の全表面に働く圧力は、円柱を回転させ 30°毎に 12 回測定する。実験 1 ではマンメータの読値は直接目読であったために、水頭値の変動による影響を受け測定精度に問題があった。そのため実験 2 ではマンメータの圧力水頭値の測定には写真撮影を行い、その値を読み求めた (写真-2)。各回転位置で 5 秒毎に 6 枚の写真を撮影し、圧力値は 6 枚の写真の平均水頭値を用いている。

円柱周辺の流速 (u, v, w) は、I 型及び L 型電磁流速計を用い、水面下 1cm より 2cm 毎に 30 秒間測定し、その平均値を各位置での値とする。水位は、流速と同位置の点で測定し、水位変動の激しい位置ではサーボ式水位計、その他の点はポイントゲージを用いる。河床高は、超音波式河床形状測定器を用い測定している。

3. 実験結果

3.1 水位と河床変動

図-3 に実験 2 における縦断水位と平均河床高分布を示す。通水後の平衡河床勾配は、初期に設定した河床勾配 (1/600) より急となり実験 1, 2 でそれぞれ 1/453, 1/372 となった。

図-4 に芦田・道上式による給砂量と下流端で流送された流砂量の関係を示す。通水初期の流砂量は給砂量よりも多いが、時間の経過に伴い流砂量は減少し 15~20 時間後にほぼ安定している。この時間帯で給砂量と流砂量がほぼ平衡し、河床は動的平衡状態に達しているとみなすことができる。

図-5 は橋脚周辺の水位コンター図である。よく言われているように水位は円柱前面で最も高く、側面で最も低く、円柱後方で再び水位は高くなっている。

図-6, 7 は実験 1, 2 の初期河床からの変動コンター図である。最大洗掘深は実験 1, 2 でそれぞれ 15cm, 18cm であり、従来の方法¹⁾により予測できる最大洗掘深と近い値もしくは安全側の値となっている。円柱前面の洗掘形状についても図-6, 7 を見ればわかるように従来いわれているようなほぼ同心円の形状となっている。

洗掘孔の斜面の角度 (砂の水中安息角) は既往の研究によれば約 30~45° といわれている。本実験では実験 1, 2 共に安息角は 30° であり、既往の値よりも比較的緩やかである。

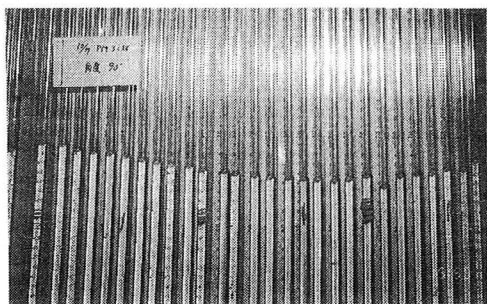


写真-2 圧力水頭の測定

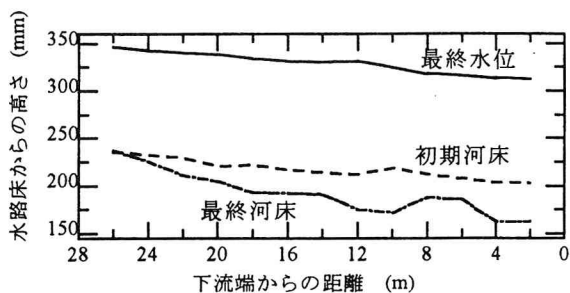


図-3 水位と河床高 (実験 2)

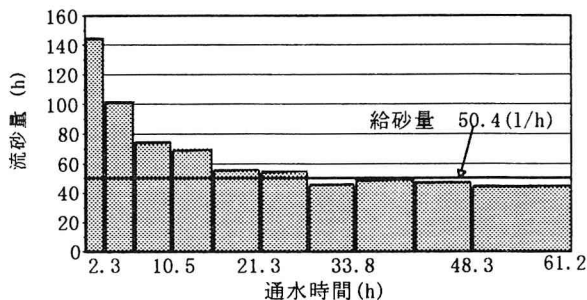


図-4 給砂量と流砂量の時間変化 (実験 2)

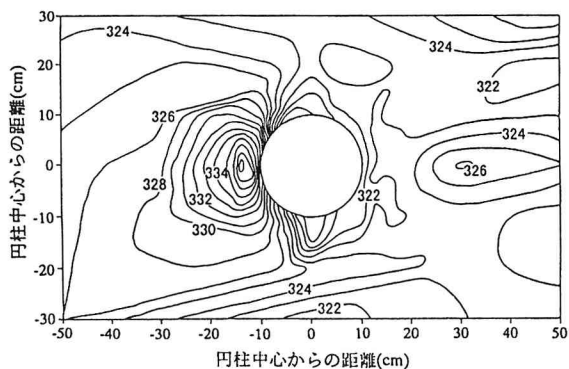


図-5 水位コンター (実験 2)

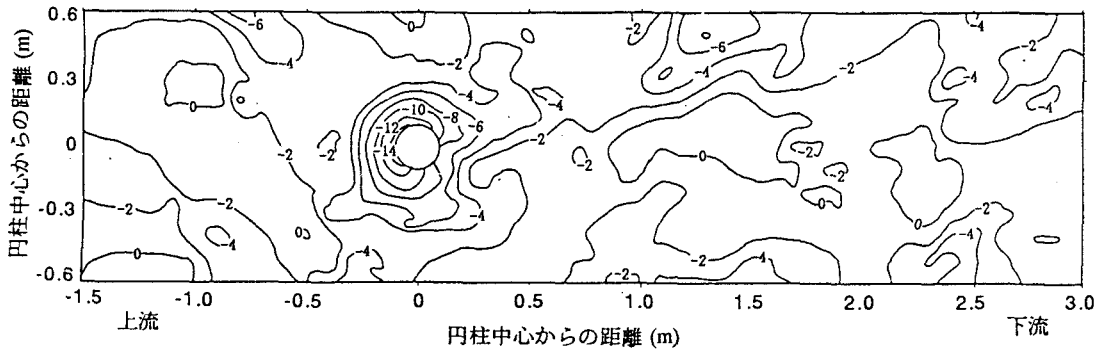


図-6 河床変動コンター (実験 1)

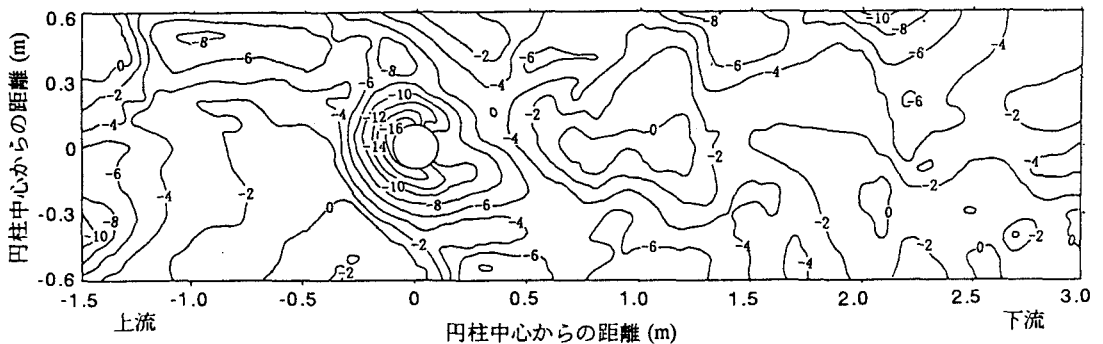


図-7 河床変動コンター (実験 2)

3.2 流速ベクトル

図-8-1, 2, 3, 4 に実験 2 での各水深の $x-y$ 平面内の流速ベクトルを示す。

水面下 1cm では、円柱側面で流れが剥離し円柱後方に逆流を含む複雑な後流域を形成している。水面下 7cm では水面下 1cm と似ているが、河床付近からの上昇流の影響を受け、後流域の逆流は小さくなりつつありわずかに下流方向の流れとなっている。水面下 17cm では円柱後方の流れ場が前者 2 つの図と大きく異なり、流れの剥離領域が極めて小さい流れとなっている。河床付近では、橋脚前面で潜り込んできた流れが洗掘孔内で洗掘孔の斜面に沿って昇る逆流が生じており、円柱側面から後面にかけても洗掘孔に沿って下流方向へ向かう流れが顕著である。

図-9 は水路中央での縦断面内の流速ベクトルを示す。橋脚前面では円柱に沿って潜り込む流れが卓越している。また、橋脚後方では上昇流がみられ、洗掘孔内で巻き上げられた砂が下流方向に移送され図-6, 7 で見たように円柱後方で堆積している。

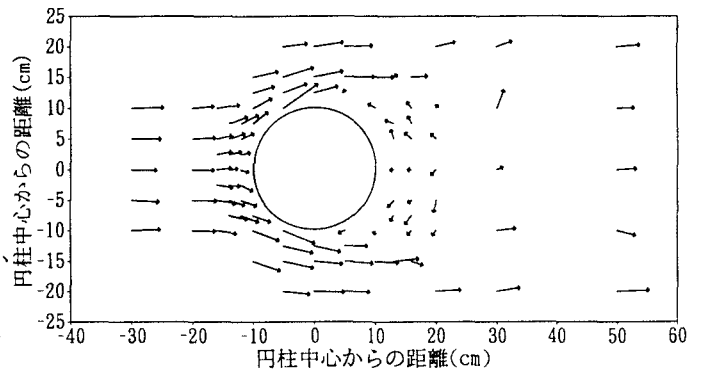


図-8-1 流速ベクトル図 (水面下 1cm)

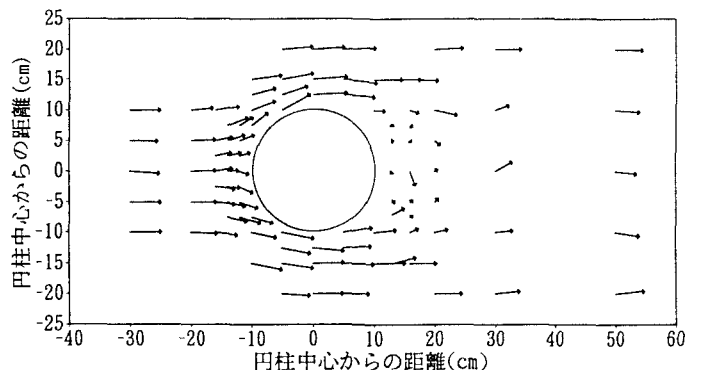


図-8-2 流速ベクトル図 (水面下 7cm)

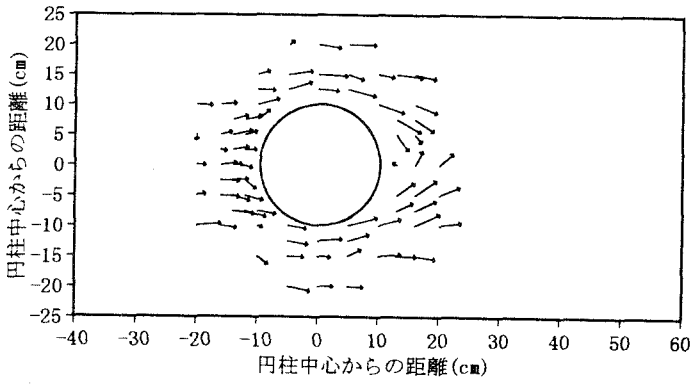


図-8-3 流速ベクトル図 (水面下17cm)

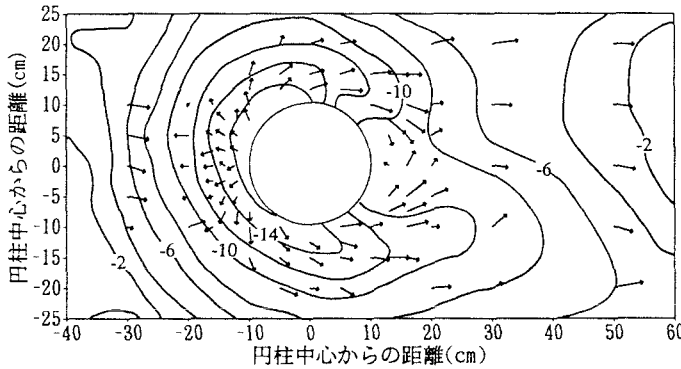


図-8-4 流速ベクトル図 (河床付近)

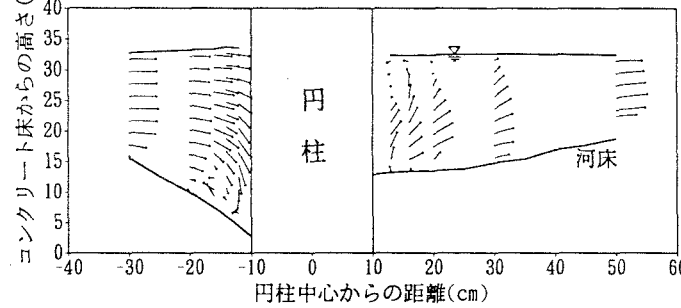
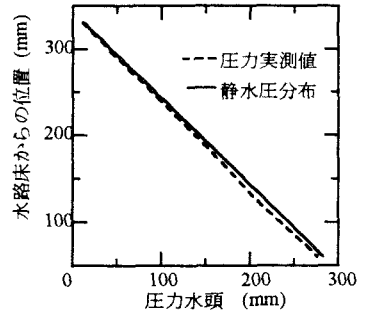


図-9 流速ベクトル図 (水路中央)

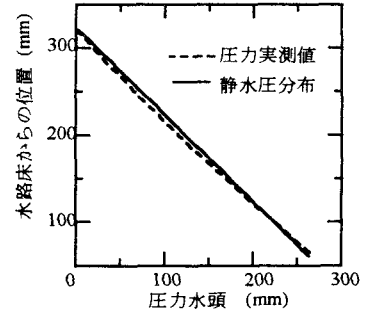
3.3 円柱周りの圧力分布

図-10の(a), (b), (c)は各角度(前面180°, 側面90°, 背面0°)で測定された圧力水頭分布と比較のための静水圧分布を示す。これにより各々の圧力分布の静水圧分布からのずれを見ることができる。(d)には $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ の各圧力分布を同じ図に示す。ここで 0° と 180° の圧力水頭の差に注目すれば鉛直方向にその差が一様でないことが分かる。特に円柱上部で水頭差が大きく、円柱下部では小さくなっている。

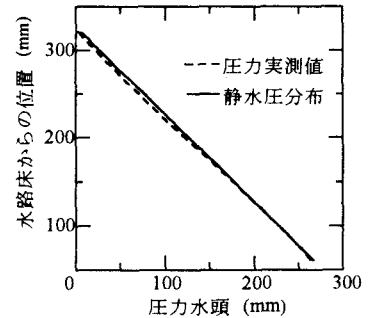
図-11は水路床から高さ211mmの位置での圧力値と円柱の反対側の同じ高さにセットされた圧力センサーの値の比較を示す。両者はほぼ同じ分布になっていることを示している。



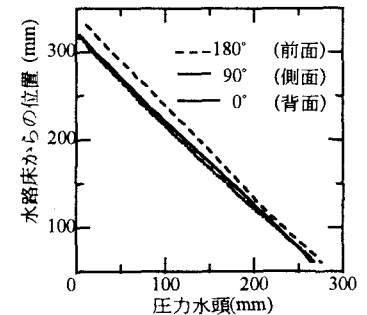
(a) 円柱前面(180°)



(b) 円柱側面(90°)



(c) 円柱背面(0°)



(d) (a), (b), (c)の比較

図-10 圧力分布図 (実験2)

3.4 抗力・揚力と抗力係数・揚力係数

本実験のレイノルズ数はほぼ 1.0×10^5 であるため円柱に働く表面抵抗は形状抵抗に比べ無視できるほど小さい。よって円柱橋脚模型に作用する抗力 D と揚力 L は図-12 の概念図により式(1)・(2)から算定できる。

$$p_i = \gamma h_i$$

$$D_i = -\sum_{n=0}^{11} p_i \cos(n\Delta\theta) a \Delta\theta \Delta h \quad \dots(1) \quad L_i = -\sum_{n=0}^{11} p_i \sin(n\Delta\theta) a \Delta\theta \Delta h \quad \dots(2)$$

$$D = \sum D_i \quad L = \sum L_i$$

ここで γ は水の単位体積重量、 h_i はマノメータで測定した圧力水頭である。 P_i は小孔 1 個毎の各圧力値であり $a \Delta\theta \times \Delta h$ の面積に作用するものとして計算する。ここで円柱の半径 $a = 10\text{cm}$ $\Delta\theta = \pi/6$ $\Delta h = 1\text{cm}$ である。

図-13 に抗力の鉛直分布を示す。実験 1 と実験 2 の鉛直分布は類似しており、円柱上部では抗力が大きく、下方にいくにしたがって小さくなっている。その要因は図-8 で明らかなように、水面付近と洗掘孔内では円柱周りの流れ場が大きく異なっているためと考えられる。水面付近では円柱背面での流れの剥離により大きな抗力を生じているが洗掘孔内では流れの剥離が小さくなり抗力も小さくなっていると考えられる。

抗力係数・揚力係数は式(3)・(4)により算出した。

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad \dots(3) \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad \dots(4)$$

ここで A は投影面積、 U は円柱の上流 1.5m の位置での断面平均流速である。

表-2 は算出した抗力係数及び揚力係数である。周囲に局所洗掘を有する円柱の抗力係数は、2次元円柱の抗力係数の値(=1.2)よりも小さい。洗掘孔内では、円柱の上流側と下流側の圧力差を小さくするような流れが起こっているためである。なお、求めた抗力には水面での造波抵抗分も含まれているがその影響は小さい。変動揚力係数は小さく、ほぼ 0 とみなしてよい。

4. 結論

本実験では移動床中に置かれた円柱のまわりの圧力分布、流速分布と河床形状について詳細に検討し、今後数値計算を進める上で重要なデータを得ることができた。本実験条件において、抗力係数の値は $C_D \approx 0.9$ という結果を得た。これは全体の水深に占める洗掘孔の深さの割合が大きく、流れの構造に洗掘孔が大きく影響しているため 2次元円柱の $C_D = 1.2$ よりも小さくなったものと思われる。円柱周りの水深が十分に大きい場合は抗力係数は 1.2 に近づくものと考えられ、設計上 $C_D = 1.2$ を用いることは安全側であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：昭和 60 年度版水理公式集，pp223～226，pp. 272～276，1985。
- 2) 福岡捷二・富田邦裕・堀田哲夫・富川朝浩：橋脚まわりの局所洗掘推定のための実用的数値シミュレーションの開発，土木学会論文集，No. 497，II-28，pp. 71～79，1994。
- 3) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善，pp. 318～335，1985。

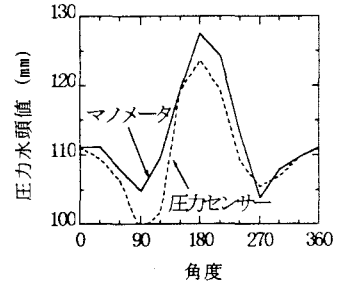


図-11 円柱 1 回転の圧力分布

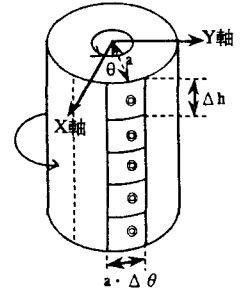


図-12 流体力計算概念図

表-2 抗力・揚力及び抗力係数・揚力係数

	D (kgf)	C_D	L (kgf)	C_L
実験 1	0.302	0.94	—	—
実験 2	0.493	0.89	0.028	0.05

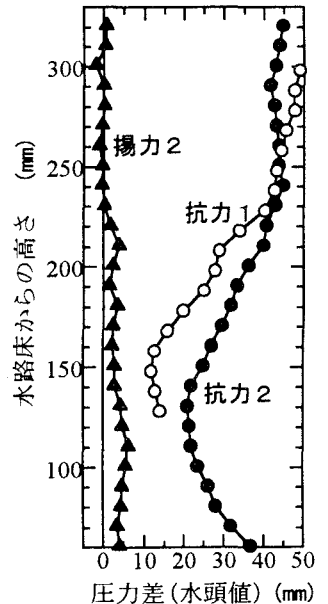


図-13 抗力・揚力鉛直方向分布図