

近接した円柱橋脚まわりの河床変動と流体力

BED VARIATION AND FLUID FORCES AROUND NEIGHBORING TWO PIERS

宮川朝浩¹・福岡捷二²・名尾耕司³
Tomohiro MIYAGAWA, Shoji FUKUOKA and Koji NAO

¹正会員 (株)建設技術研究所(〒460-0003 名古屋市中区錦1-3-18)

²フェロー会員 Ph.D. 工博 広島大学教授 工学部第四類 建設系(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

³学生会員 広島大学大学院環境工学専攻博士過程前期(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

Bridge piers are often built near by. It is very important to estimate the hydrodynamic forces acting on piers and maximum scour depth around them for their safety and economical design. In this paper, two cylindrical piers were set in a straight channel of movable bed that were apart at a distance of four times of their diameter in the longitudinal direction of flow. Based on the detail measurement of the pressure, velocity and bed variation around the cylinders, the structure of flow and the fluid forces were clarified. Fluid forces and maximum depth of scour were compared with the case of single pier experiment.

Key Words: bridge pier, local scouring, fluid forces, drag coefficient

1. 序論

河道に存在する橋脚は周辺に局所洗掘を引き起こす。近年では橋脚数の増加や橋梁の大型化に伴って橋脚が河道や洪水流に与える影響はますます大きくなり、さらに橋梁が近接して建設される場合が増え、橋脚まわりの局所洗掘現象はより複雑化している。このため橋脚に作用する流体力や周辺の流れ、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。橋脚まわりの流れや局所洗掘機構に関する研究は古く、洗掘深および洗掘範囲は実用的な精度で推定することができる¹⁾²⁾。しかし河道計画における橋脚問題は最大洗掘深の推定の見積もりだけでは不十分であり、橋脚が直接的に下流の流路や構造物に影響を与える場合には、橋脚がその上下流の流れや河床変動に与える影響も含めた検討が必要となる。橋脚まわりの局所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、橋脚を含む流れ場のより高い精度の数値解析手法を確立し、橋脚の具体的なかつ経済的な設計法を確立する

ことが求められている。

最近では、橋脚周辺の三次元的な流れを解明するために、流れ場を詳細に計測した模型実験や三次元の数値計算が実施されている³⁾⁴⁾⁵⁾。これらは洗掘現象を簡単にするため洗掘領域への土砂流入がない静的洗掘現象を対象としており、また橋脚背後の堆積形状等を含む平面的な河床変動までは示していない。実河川の橋脚まわりの局所洗掘現象は洪水時には動的洗掘となり、この条件の下での検討が現象解明には重要である。さらに近接した橋脚については相互の橋脚の影響を定性的に検討しているが⁶⁾⁷⁾、流体力や流れ場を定量的には検討しておらず、それぞれの近接橋に作用する流体力、最大洗掘深等の見積もりは必ずしも十分でない。

本研究では、移動床直線水路に2本の円柱模型を縦断配置し圧力、流れ、河床変動を詳細に測定して、近接橋まわりのより複雑な流れを明らかにするとともに、単一円柱の実験結果⁸⁾と比較することにより近接橋設計のための基礎資料を得ることを目的とする。

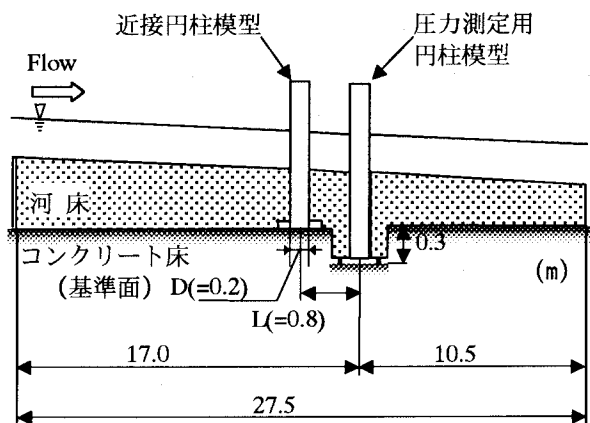


表-1 実験条件

項目	諸元
流量 Q	90 l/sec
給砂量 Qs	50.4 l/hour
初期河床勾配	1/600
円柱直径 D	20 cm
円柱中心間距離 L	80 cm
平均水深 h ₀	13.3 cm
平均流速 U ₀	45.2 cm/sec
Fr 数	0.40
Re 数	9.4×10 ⁴
砂の平均粒径	0.8 mm
砂の比重	2.59
全通水時間	72 時間
水温	22 °C

表-2 圧力計測ケース

圧力計測ケース	圧力測定円柱	計測時刻
ケース①	上流円柱	65.0 hour
ケース②	下流円柱	15.5 hour
ケース③	下流円柱	27.5 hour
ケース④	下流円柱	30.5 hour

2. 模型実験⁸⁾

実験水路は図-1 に示す幅 1.5m 全長 27.5m の大型の移動床直線水路である。この水路に 2 本の円柱橋脚模型を流れと同一方向に縦断配置して通水し、円柱周辺の水位、流速、河床変動および円柱表面の圧力について詳細な測定⁹⁾を行う。円柱模型の一つには鉛直方向に 1cm の間隔で一列に小孔があけてあり、マンオメータに接続して圧力を測定する。この円柱を回転させることにより全表面の圧力分布が測定でき、円柱に作用する流体力を算定する。これと同一径の円柱模型をその上下流に配置して、近接円柱の上流側、下流側それぞれの圧力を測定する。なお、ここでは、近接円柱のうち上流側に位置する円柱を「上流円柱」、下流側を「下流円柱」と呼ぶこととする。2 本の円柱の配置間隔は単一円柱背後の堆積が顕著

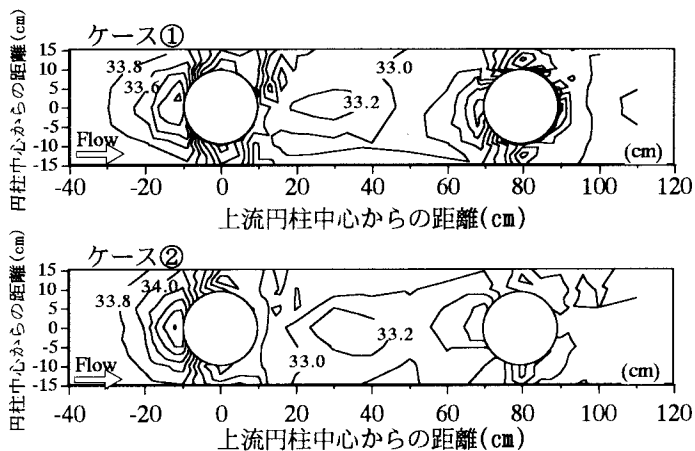


図-2 水位コンター

であった位置の 80cm とした。表-1 に実験条件を示す。上流円柱を対象とした圧力測定は 1 回としたが、下流円柱については、周囲の流れが河床形状の変化に伴い時間的に変化するため、異なる時刻に 3 回圧力計測を行った。表-2 に圧力計測の時間を示している。

3. 実験結果

(1) 流れと河床変動

図-2 は近接円柱まわりの水位コンターである。上流円柱、下流円柱とも前面で水位が上昇し、円柱前後に水位差が見られる。下流円柱の水位上昇量は上流円柱に比べて小さく、また 2 つの水面形の比較から、水位の変動が存在することがわかる。これは、後述するように、下流円柱が上流円柱の剥離領域の影響を受け、接近流速や水深が小さくなり、また河床波の移動や上流円柱背後の土砂移動の影響を受けるためである。

図-3 は水面から等しい水深にある面の流速ベクトルである。水深 1cm の面では、両円柱の背後に剥離領域が形成されており、上流円柱背後の剥離の影響が下流円柱に達している。したがって円柱中心から 20cm 上流側の接近流速を比較すると、下流円柱は上流円柱に比べ小さい。水深 7cm の面では下流円柱は背後に回り込む流れがありほとんど剥離のない流れとなり、上流円柱に比べ剥離領域の小さいことがわかる。また両円柱の間の流れは上流円柱の乱れの影響を受け不安定な流向となっているが、流速が水深 1cm の面より速くなっており剥離領域が水面付近にあることをうかがわせる。さらに水深が大きくなると両円柱とも円柱に沿って流れが回り込み剥離の小さい流れになる。

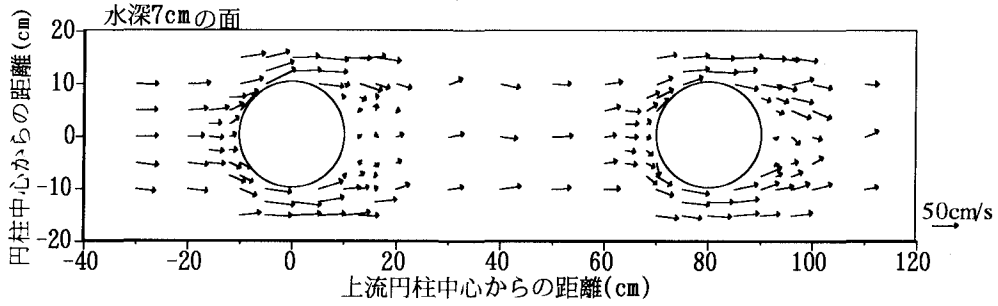
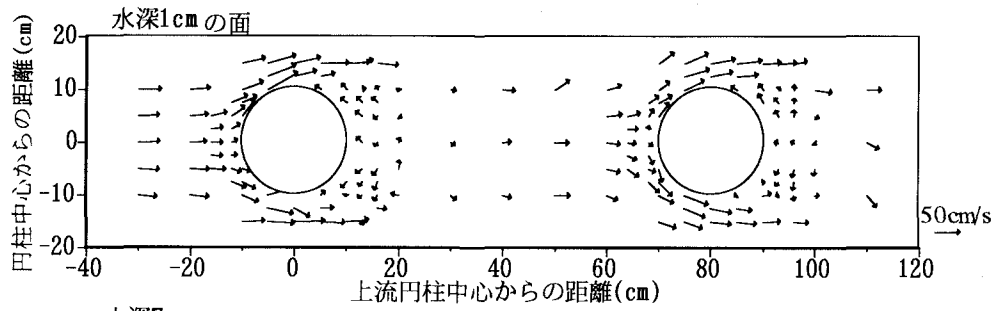


図-3 平面流速ベクトル

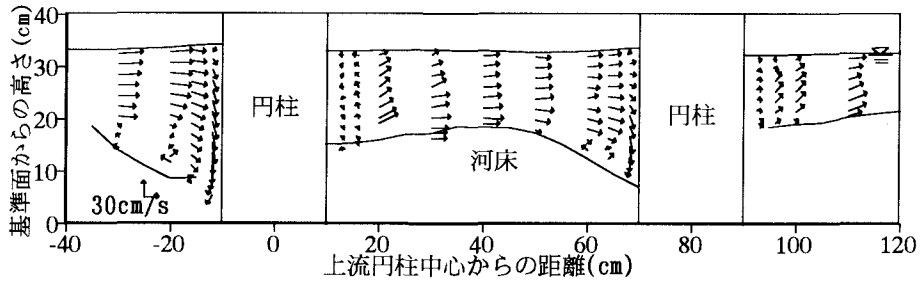


図-4 縦断面流速ベクトル

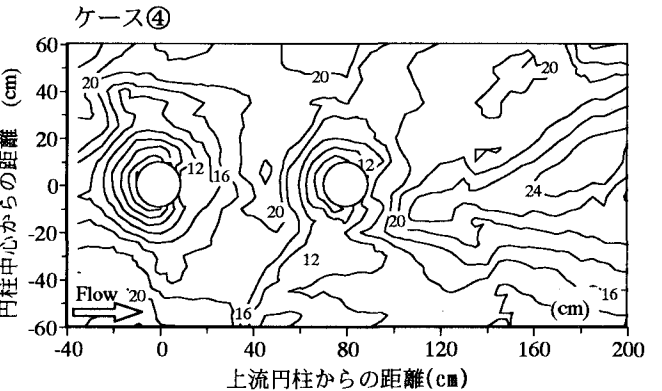
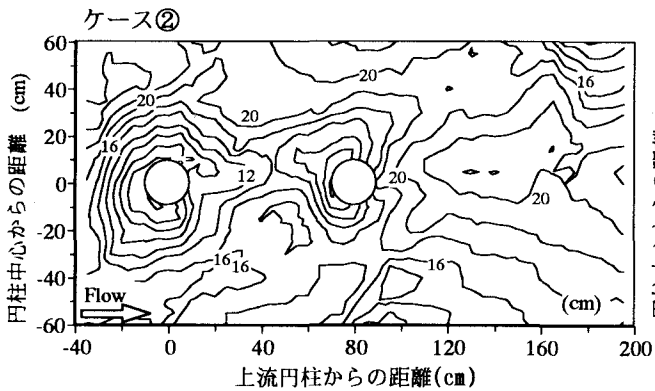
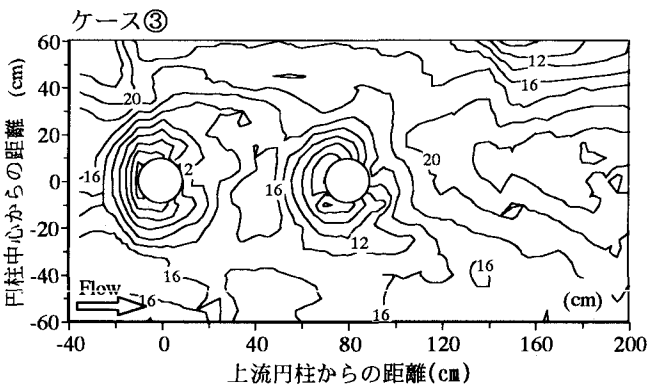
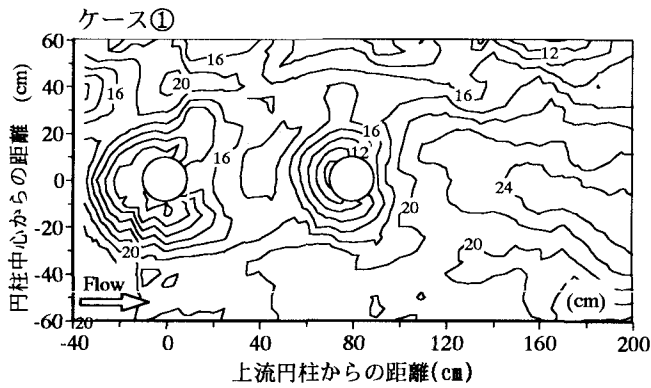


図-5 河床高コンター

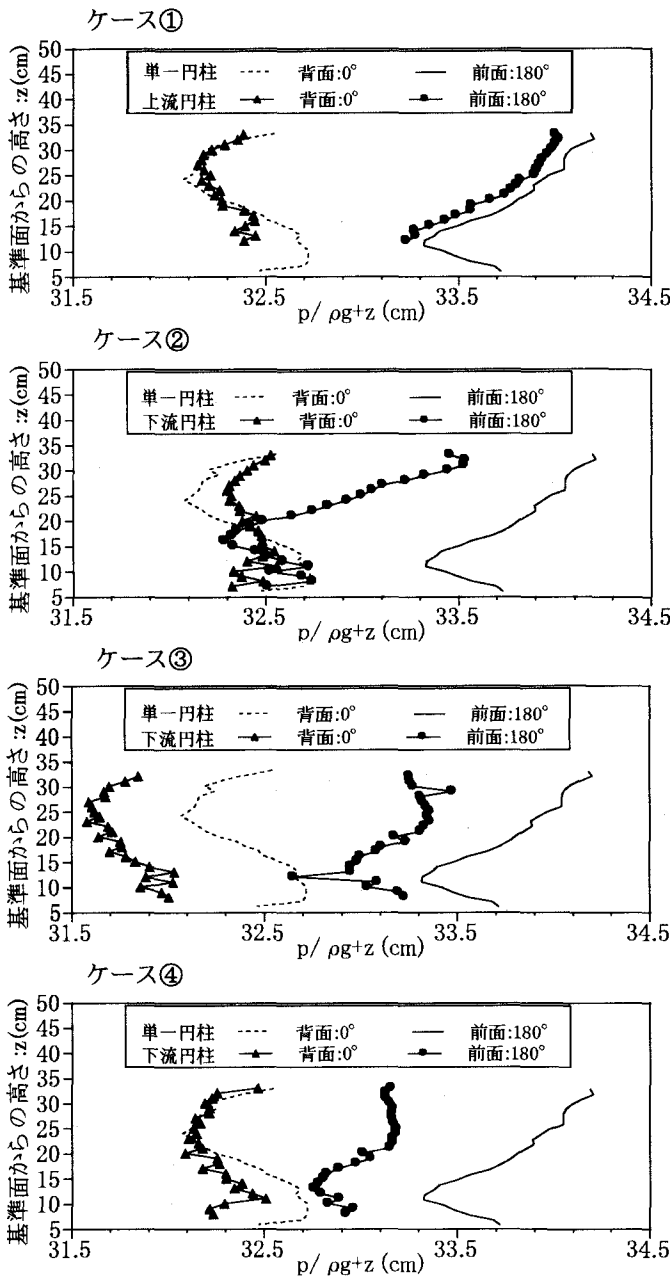


図-6 鉛直圧力分布

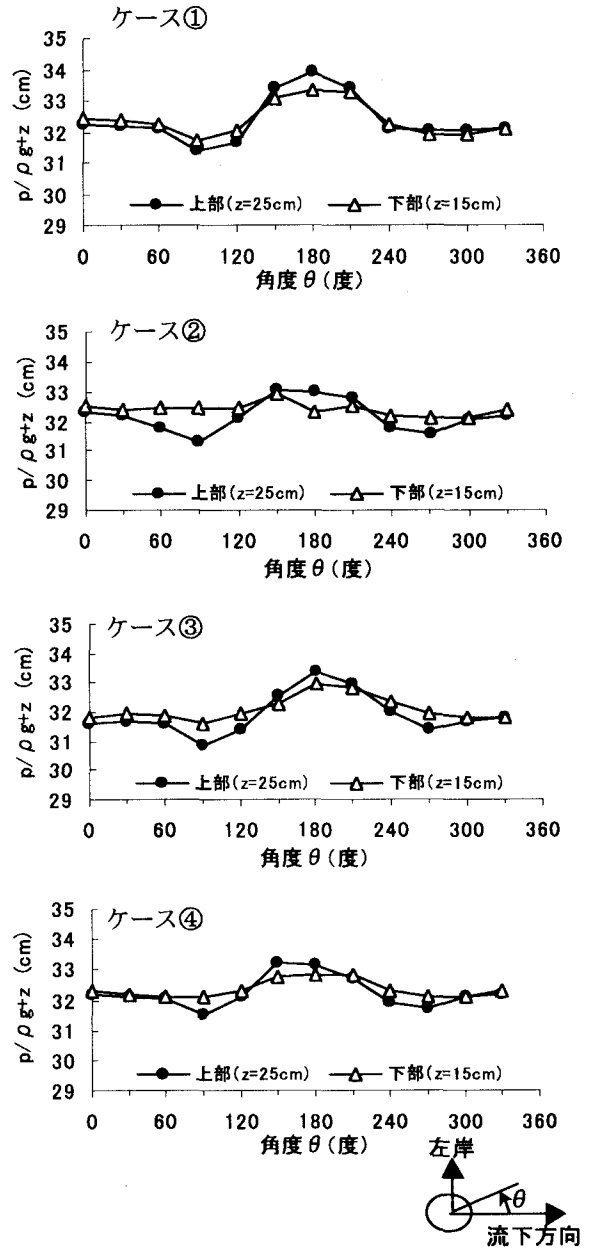


図-7 円周方向の圧力分布

図-4 に水路中央の縦断面の流速ベクトルを示す。両円柱とも前面に下降流、背後に上昇流を生じる。上流円柱背後では、水面付近の流速が剥離の影響を受けて遅く、河床付近は上昇流に伴い流れが速いことから、下流円柱の接近流速が、上流円柱と異なり、鉛直方向に速度勾配の小さい様な分布形を持つ。この流速分布により、下流円柱の下降流や河床付近の渦が小さくなる。

図-5 は通水時間が異なる河床高コンターである。上流円柱の洗掘孔は単一円柱と同程度の同心円となる。下流円柱の洗掘孔は上流円柱より浅く狭いが、上流円柱周辺の洗掘・堆積形状や河床波の影響により大きさ、形状が変化している。表-3 はその最大洗

表-3 最大洗掘深の比較

実験ケース	Z_s/D		
	単一円柱 上流円柱	下流円柱	
単一円柱 ⁵⁾	0.90	—	
近接円柱	ケース①	0.73	0.74
	ケース②	0.91	0.72
	ケース③	0.95	0.82
	ケース④	0.90	0.68

掘深 Z_s を円柱幅 D で無次元化したものである。上流円柱の洗掘深は $Z_s/D=0.73\sim0.95$ であり単一円柱の $Z_s/D=0.90$ と同等である。下流円柱は洗掘孔とともに

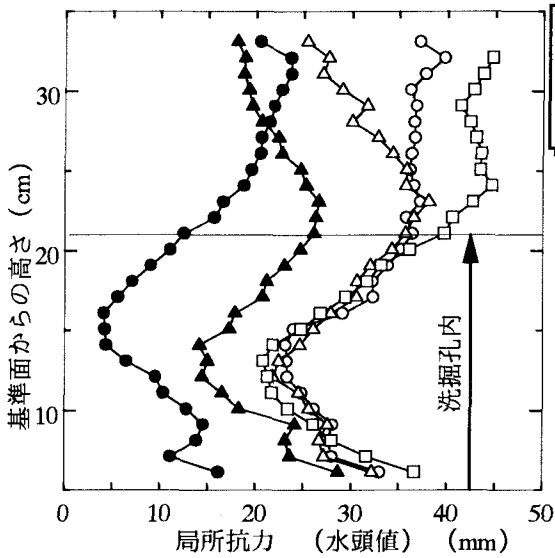


図-8 局所抗力鉛直分布

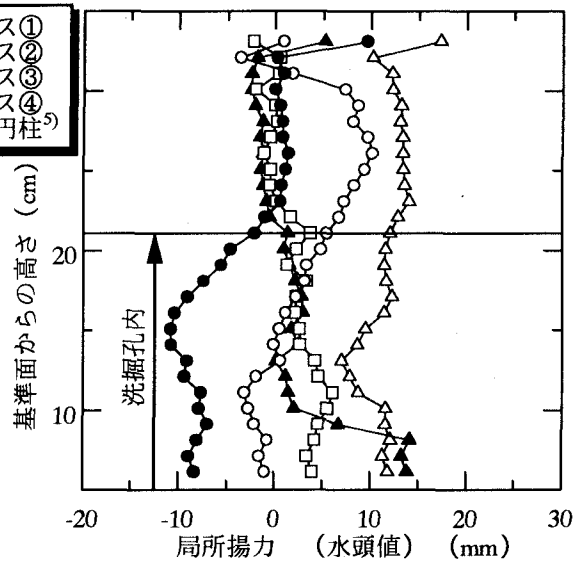


図-9 局所揚力鉛直分布

洗掘深も変動し $Z_s/D=0.68\sim 0.82$ となる。洗掘深は平均的には上流円柱より小さいが、最大では上流円柱に匹敵する大きさとなる。

(2) 圧力分布

図-6 は円柱の前面および背面における鉛直方向の圧力分布である。上流円柱では、圧力の分布、大きさともに単一円柱と概ね等しく、流れ場も単一円柱のものに近いことを表している。下流円柱前面における圧力は上流円柱に比べて小さく、鉛直方向に一樣な分布となっている(ケース③,④)。これは、接近流が上流円柱により減速されていることと、流速分布が鉛直方向に一樣であるためである。一方、上流円柱と同様に前面の水面付近で圧力が高いケース②については、上流円柱の堆積域が図-5②のように右岸側にずれ、下流円柱は上流円柱の剥離領域から少し外れているため、接近流速が上流円柱と同じような鉛直分布を持つからである。下流円柱の背面の圧力は、大きさ、分布形とも上流円柱とほぼ同じである。ただし、ケース③は他のケースより絶対値が小さい。これは、図-5③において下流円柱背後の河床高が低いために(例えば、18cm や 20cm の等高線が他のケースより円柱から離れている)、それに伴い水位が下がるためである。

図-7 は洗掘孔の上部および下部における円周上の圧力分布である。円周方向の圧力は、上部、下部とも同じようなパターンで変化するが、上部では側面で低下した圧力が背面であまり回復しないことから、円柱前後の圧力差が大きいことを表している。

表-4 流体力と抗力係数・揚力係数

実験ケース	抗力D (gf)	抗力係数 C_D	揚力L (gf)	揚力係数 C_L	圧力測定 円柱	
単一円柱 ^{*)}	493	0.89	28	0.05	—	
近接円柱	ケース①	472	0.81	44	0.07	上流円柱
	ケース②	209	0.36	-58	-0.10	下流円柱
	ケース③	436	0.75	173	0.30	下流円柱
	ケース④	310	0.53	30	0.05	下流円柱
下流円柱	平均値	318	0.55	48	0.08	—
	標準偏差	93	—	95	—	—
	変動係数	0.29	—	1.98	—	—

※変動係数=標準偏差/平均値

また、ケース②,④は上部の圧力のピークが円柱前面からずれており、接近流速の流向が変化しやすいことをうかがわせる。

4. 流体力の特性

本実験は Re 数が十分に大きく円柱に働く抵抗は形状抵抗だけを考えればよいことから、流体力は円柱表面の圧力を積分し算定した。図-8 は近接円柱の局所抗力の鉛直分布を単一円柱と比較したものである。上流円柱は、単一円柱と類似した分布形であるが、下流円柱の堰上げにより前後の水位差が小さくなり、上部の抗力が単一円柱より若干小さい。下流円柱は、上流円柱に比べて接近流速や水深が小さく背後の剥離領域も小さいことから、抗力が上流円柱より小さい。分布形については、2 ケースで水面に

近づくと抗力が減少し、1 ケースでは逆に増加する。これは先に示した図-6 の前面と背面の圧力分布の相対関係によるものであるが、前者は直接的には水面付近の接近流速が小さいためであり、後者は下流円柱が剥離領域から外れていることによると考えられる。

図-9 は揚力の鉛直分布である。一般に平坦固定床に置かれた円柱に働く揚力は一定周期で交互に作用する交番揚力であり、その時間平均値は 0 であることが知られている。しかしながら、移動床の本実験結果には平均的な揚力が存在する。上流円柱の揚力は比較的小さいが、下流円柱の揚力の絶対値は大きく、分布形が異なっている。このような揚力の発生状況を図-5 の河床形状から流れ場を推定し考察する。ケース②は洗掘孔下部のみに揚力が発生する。このときの洗掘孔は、上流円柱の洗掘孔に連なるように左岸上流方向に広がっており洗掘孔には左岸から右岸方向に流れがあると考えられ、作用する揚力の方向と一致する。このことは図-7 の圧力分布からも見ることができる。また水面付近にも同じパターンの圧力が働いているが、左岸側前面の圧力上昇が側面の圧力低下により相殺され積分値でみると左右の圧力がバランスし、揚力が小さくなる。ケース③では水深全体にわたって左岸方向に揚力が作用する。これは、洗掘孔が円柱背後で左岸方向に広がり(図-5)、左岸側の圧力が平均的に低い(図-7)ためである。

表-4 は流体力および抗力係数、揚力係数を示す。各係数は上流円柱の上流側 1.5m の断面平均流速、圧力測定範囲の投影面積を用いて算出した。上流円柱の抗力は水面付近の抗力の減少に伴い単一円柱より若干小さくなる。下流円柱は、平均的には上流円柱より小さいが、変動が大きく標準偏差は平均値の約 30% に達する。これは両円柱の間の流れが遅く水深が小さいことにより、上流円柱背後の土砂移動の変化や河床波の移動の影響を受けやすいためである。揚力は両円柱とも平均的には単一円柱と同様に小さい。ただし、下流円柱については、抗力と同じ要因により作用する方向を変えて変動し、標準偏差は抗力と同等の大きさとなり、平均値の約 2 倍となる。

抗力係数 C_D は、上流円柱では下流円柱の堰上げの影響を受け、単一円柱より若干小さい $C_D=0.81$ となる。また、二次元円柱の $C_D=1.2$ を下回るのは、洗掘孔の存在が円柱背後の剥離領域を狭めるためである。下流円柱は上流円柱より接近流速や水深が小さいため $C_D=0.36\sim 0.75$ となる。揚力係数 C_L については下流円柱で $C_L=-0.10\sim 0.30$ の範囲にある。

5. 結論

本研究では、2 本の円柱を流れ方向に縦断配置した実験を行い、圧力、流れ、河床変動を詳細に測定することにより以下の結論を得た。

- 1) 近接円柱まわりの局所洗掘現象は基本的に単一円柱と同様である。ただし、河床波や円柱相互の影響により洗掘孔の大きさや形状が時間的に変動する。特に、下流円柱はその影響を強く受けるため流体力の変動が顕著である。
- 2) 上流円柱は洗掘深や流体力が単一円柱と同様であり、 $Z_w/D=0.87\sim 0.95$, $C_D=0.81$ となる。抗力係数が単一円柱より小さくなるのは下流円柱の堰上げのためである。
- 3) 下流円柱は上流円柱の影響を受け、 $Z_w/D=0.68\sim 0.82$, $C_D=0.36\sim 0.75$ となり、上流円柱より小さい。また揚力の発生が無視できず、 $C_L=-0.10\sim 0.30$ となる。
- 4) 下流円柱の揚力、抗力は大きく変動し、変動係数はそれぞれ 0.29, 2.0 である。

参考文献

- 1) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善，pp.318-335，1985。
- 2) 土木学会：昭和 60 年度版水理公式集，pp.70-74，pp.272-276，1985。
- 3) John, E.R. and Vijay, G.P.: Three-Dimensional Simulation of Scour-Inducing Flow at Bridge Piers, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.124, No5, May, pp.530-540, 1998。
- 4) Ferdous Ahmed and Nallamuthu Rajaratnam: Flow around Bridge Piers, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.124, No3, March, pp.288-300, 1998。
- 5) 福岡捷二・宮川朝浩・飛石勝：円柱橋脚まわりの流れ、河床変動と流体力，水工学論文集，第 41 巻，pp.729-734，1997。
- 6) 今本博健・大年邦雄：開水路流れに設置された橋脚周辺の水理特性について(1)，京都大学防災研究所年報第 26 号 B-2 別冊，pp.496-500，1983。
- 7) 建設省土木研究所河川研究室：治水上から見た橋脚問題に関する検討，土木研究所資料，第 3225 号，pp.13-37，pp.51-58，1982。
- 8) 名尾耕司・福岡捷二・宮川朝浩：近接する橋脚に作用する流体力と河床変動，第 53 回年次学術講演会講演概要集，第 2 部，pp.394-395，1998。

(1999.9.30 受付)