

橋脚まわりの局所洗掘に及ぼす低水路線形の影響

Effect of main channel alignment on local scouring depth around piers in a compound meandering channel

福岡捷二* 岡田将治** 藤原邦洋*** 宮川朝浩****

Shoji FUKUOKA, Shoji OKADA, Kunihiko FUJIWARA, Tomohiro MIYAGAWA

1. はじめに

洪水時には、蛇行河道の外岸側の河床は洗掘され、内岸側では堆積が起こるものとして考えられ、計画が立てられてきた。このため橋脚を設置する場合、橋脚及び堤防の安全性を考慮して蛇行河道の内岸側に設置することが多かった。しかし、近年の複断面蛇行流路における研究から、洪水時には最大流速線が内岸寄りに現れ、洪水継続時間が長いときには内岸側河床も洗掘される可能性が指摘され^{1),2)} 実河川の内岸側河床変動調査³⁾においても確認されている。また、従来用いられている橋脚周辺の洗掘深の推定式は、直線流路に対するものが主であり、複断面蛇行流路のように相対水深、蛇行度等によって流向、流速が大きく変化する流れでは、あらためて最大洗掘深の評価、橋脚の配置箇所、設置向き等の検討が必要であることが明らかとなった。⁴⁾

本研究では複断面蛇行水路の低水路内に橋脚模型を設置し、相対水深、橋脚の設置箇所及び橋脚形状を変化させ、橋脚まわりの局所洗掘深に及ぼすこれらの影響を調べた。さらに得られた実験結果を直線流路における洗掘深の推定式と比較することにより、低水路線形の影響について考察を行った。

2. 実験方法

写真-1 に実験の状況を示す。図-1 は実験水路の平面図、表-1 に水路諸元を示す。

実験は、図-2 に示す円柱型(実験 1)と半円形小判型(実験 2)の 2 種類の橋脚模型を用いて行う。

各実験条件を表-2、表-3 に示す。実験 1 では、2 種類の径の円柱型模型を用い局所洗掘深を調べ、直線流路で用いられている実験式と比較を行う。実験 2 では、幅と長さの比が 1:1.5 の半円形小判型模型を用い洗掘深を調べ、実験 1 と比較し、橋脚形状および橋脚軸の向きの変化による影響を調べた。橋脚模型は、各橋脚が互いに影響し合わないことを確認したうえで、最大曲率断面と蛇行変曲断面の左右岸と洗掘深が最も大きくなる低水路満杯流れの最大洗掘発生箇所に設置した。橋脚軸の向きは、低水路線形と堤防線形に平行な 2 ケースについて行った。また、橋脚の径は、実河川の設計基準である阻害率(川幅に対する橋脚幅の割合、7%以内)を考慮して 7.5%と 4.5%に設定している。相対水深 D_r (高水敷水深/低水路水深) および橋脚の設置方向を変化させた計 10 ケースについて、河床形状、橋脚周辺の局所洗掘深を詳細に測定し、低水路線形の変化による河床変動、橋脚周辺の洗掘深および水面形への影響を検討している。



写真-1 実験水路全景

キーワード：橋脚、局所洗掘深、低水路線形、橋脚形状、橋脚軸の向き

* 広島大学工学部 教授 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1, TEL, FAX 0824-24-7821, sfuku@ipc.hiroshima-u.ac.jp)

** 広島大学大学院工学研究科 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1, TEL 0824-24-7847, shoji915@ipc.hiroshima-u.ac.jp)

*** 広島県 (〒725-0026 竹原市中央 5-6-28, TEL 0846-22-6611)

****建設技術研究所 東京支社 (〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町 1-7-7, TEL 03-3668-0451, t-miyagw@ctie.co.jp)

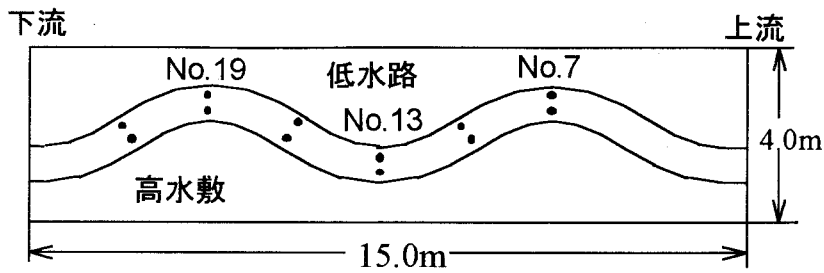


図-1 実験水路平面図

表-1 水路諸元

水路長	15.0m
水路幅	4.0m
水路勾配	1/600
低水路幅	0.8m
蛇行波長	7.5m
蛇行長	6.8m
蛇行度	1.10
最大偏角	35°

表-2 実験条件(円柱橋脚)

実験 Case	1	2	3	4	5	6
流量(l/sec)	14.5	24.5	35.9	54.0	14.5	14.5
相対水深 Dr	0	0.28	0.34	0.43	0	0
橋脚径 D (cm)	3.0				1.8	
橋脚設置箇所	最大曲率・蛇行変曲断面				蛇行変曲断面 外岸直上流	

表-3 実験条件(小判型橋脚)

実験 Case	7	8	9	10
流量(l/sec)	14.5	54.0	14.5	54.0
相対水深 Dr	0	0.42	0	0.41
橋脚径 D (cm)	3.0			
橋脚設置箇所	最大曲率断面, 蛇行変曲断面			
設置向き	低水路線形に平行		堤防線形に平行	

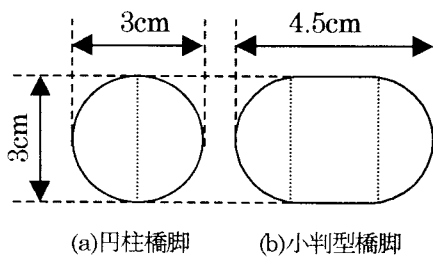


図-2 橋脚模型平面図

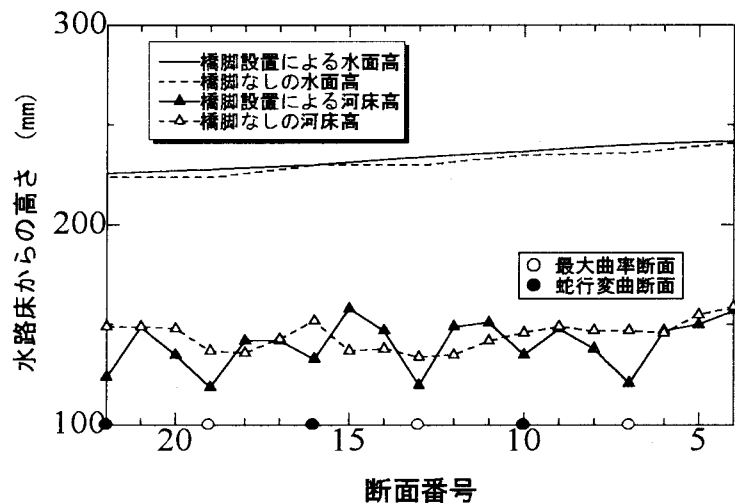


図-3 低水路内断面平均水位・平均河床高の縦断分布(case4)

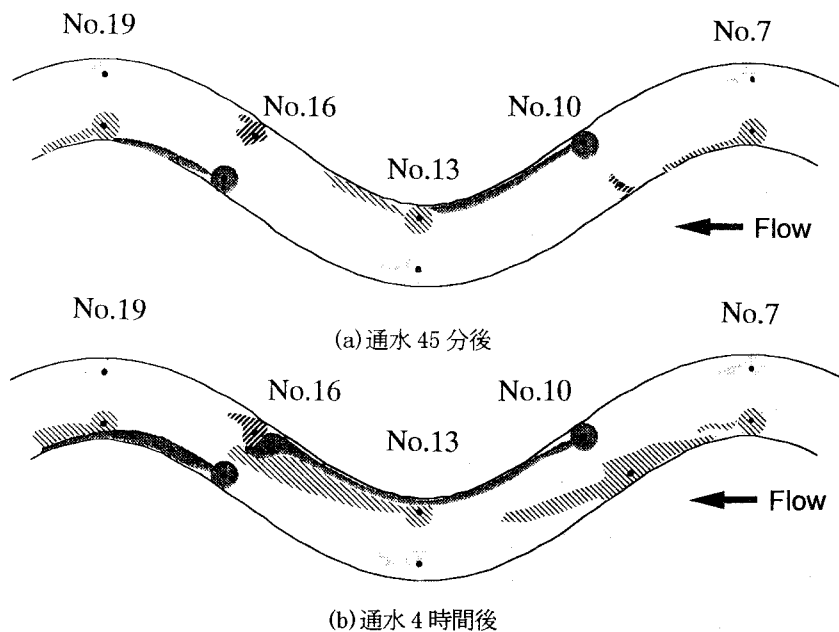


図-4 色砂を用いた実験($Dr=0.43$, 通水 45 分後、4 時間後)

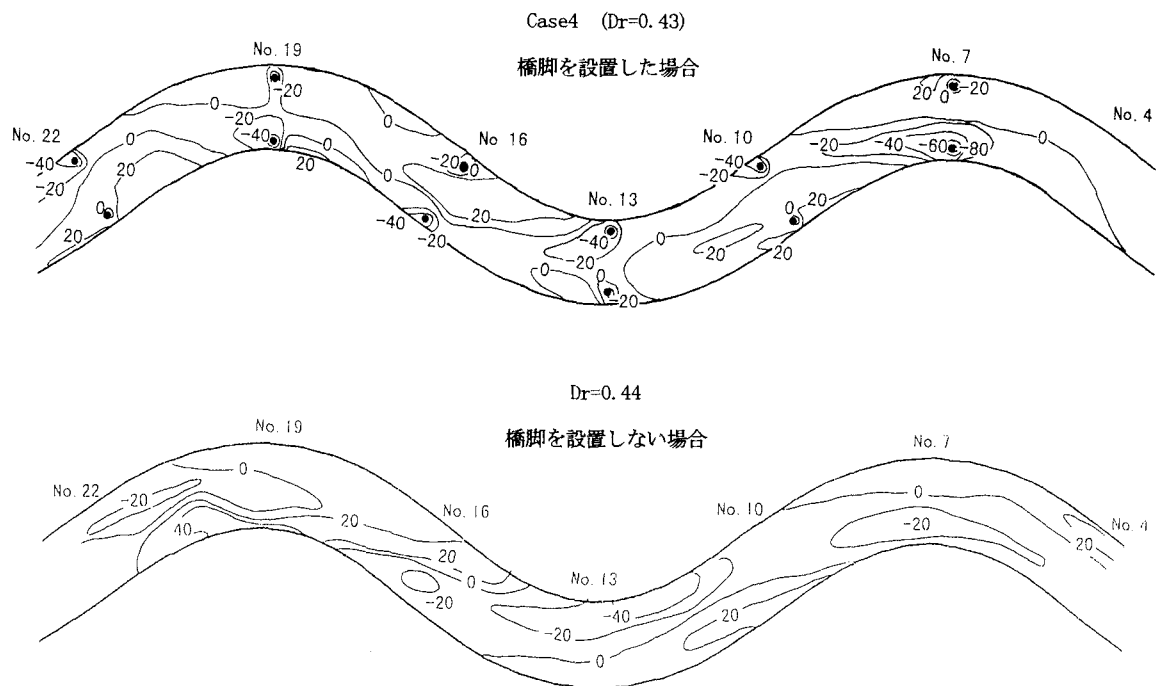


図-5 case4 の河床変動コンター(橋脚ありと橋脚なし)

3. 実験結果及び考察

3.1 縦断水位・河床高

図-3 に case4 ($Dr=0.43$)の通水 9 時間後における平均水面高および平均河床高の縦断分布を示す。橋脚の設置による水位・河床高の変化を調べるために、同じ条件で橋脚を設置していない実験の結果と比較する。

平均河床高は、橋脚の設置断面で下がり、特に蛇行変曲断面よりも最大曲率断面で下がっている。この断面は、洗掘のみが生じる傾向にあり、ここで洗掘された砂は変曲断面付近に堆積する。

縦断平均水位をみると、橋脚設置による抵抗増加のため、すべての断面で水位が若干上昇している。

3.2 河床形状

橋脚まわりで洗掘された砂が下流の河床変動にどのような影響を与えるかを調べるために、橋脚の設置箇所ごとに異なる色をつけた砂を置き、実験を行った。図-4 は、 $Dr=0.43$ の実験における通水 45 分後および 4 時間後の色砂の移動状況を示す。この水理条件では、最大流速が内岸側から内岸側に現れる複断面的蛇行流れ²⁾となる。

(a)の通水 45 分後では、蛇行変曲断面外岸と最大曲率断面内岸で洗掘された砂は、河岸に沿って移動している、(b)の通水 4 時間後を見ると、色砂はさらに下流に移動し、最大流速発生位置および最大流速の縦断変化によって蛇行変曲断面の内岸側に堆積する。一方、最大曲率断面外岸は、流速の小さい箇所であるために通水直後から砂の移動はほとんど見られない。通水開始 4 時間以降は、色砂が徐々に水路全体に広がり、河床変動が生じる内岸から内岸を連ねる線に色砂の帯が形成され、それ以降の河床変動の変化は小さい。このように橋脚の設置による洗掘によって生じる砂の移動は、洗掘の初期には河床形状に影響を与えるが、時間の経過とともに複断面の蛇行線形によって支配される河床形状に落ち着くことになる。

図-5 は case4 と同じ条件で行なわれた橋脚を設置していない場合の通水 9 時間後における河床コンターを示す。橋脚周りで洗掘、その下流で堆積が見られるものの、全体的な河床形状には、両者の有意な差は見られない。

3.3 橋脚周りの局所洗掘深

(a)種々の相対水深の流れにおける円柱橋脚と(b)小判型橋脚($Dr=0$)および(c)小判型橋脚($Dr=0.44$)について、橋脚周りの最大洗掘深の縦断変化を図-6に示す。低水路満杯で流れる単断面流れの場合(case1)に洗掘深が最も大きくなる。特に蛇行変曲断面(No. 10, No. 16, No. 22)の外岸側が水衝部となるために局所洗掘深が最も大きくなっている。一方、複断面流れの3ケース(case 2,3,4)では、洗掘深は単断面流れに比べ全体的に抑えられ、どのケースもほぼ同程度の洗掘深になっている。これは高水敷上に水が乗り複断面流れになると、高水敷上の遅い流れが低水路に流入し、低水路内の流速が減じたためであり、複断面蛇行流れの特性が顕著に現れている。

また、(b)小判型橋脚では、低水路満杯の蛇行変曲断面で橋脚軸が主流軸に対して角度を持つため、円柱型橋脚に比べ洗掘深は大きくなっている。しかし、低水路満杯水位であるcase7, case9の最大洗掘深は、各断面でほぼ等しくなっており、この場合には橋脚軸の向きの違いによる変化はほとんど見られない。

(c)に示す複断面流れのcase8, case10では、高水敷からの遅い流れによって低水路内の流速は全体的に均一化され、洗掘深は最大曲率断面、蛇行変曲断面ともほぼ等しくなる。流速は単断面流れの場合よりも小さくなるため、掃流力は減少し、橋脚形状・橋脚軸の向きの影響はさらに小さくなっている。

以上のことから蛇行流路の橋脚の設計特に根入れ深には、外力として低水路満杯流量時の水理量を用いる必要がある。

3.4 直線流路におけるの洗掘深推定式との比較

複断面蛇行流路では、蛇行度 S や相対水深 Dr によって最大流速線の発生位置が変化することが直線流路と大きく異なる特徴である。この最大流速の縦断変化により河床変動が生じ、場所によって洗掘深、堆積高が異なる。このため、複断面蛇行流路における橋脚周りの局所洗掘深を評価するためには、複断面蛇行流れの線形に起因する河床変動をまず考慮することが必要となる。3.2で述べたように、橋脚による洗掘土砂が下流の河床変動に与える影響は、橋脚の周辺に限定されることから、橋脚周りの局所洗掘深を複断面蛇行流れの河床変動特性によるものと橋脚設置によるものに分けることができる。

そこで、流路線形の影響に起因する河床変動を除き、橋脚設置による洗掘深の評価を行う。まず、橋脚を設置していない場合の河床変動実験図-7(a)を行い、この結果を複断面蛇行流れの河床変動による洗掘・堆積とする。次に橋脚を設置した実験図-7(b)を行い、この橋脚設置前後の洗掘深の差 Z_s を橋脚設置による洗掘深と定義する。

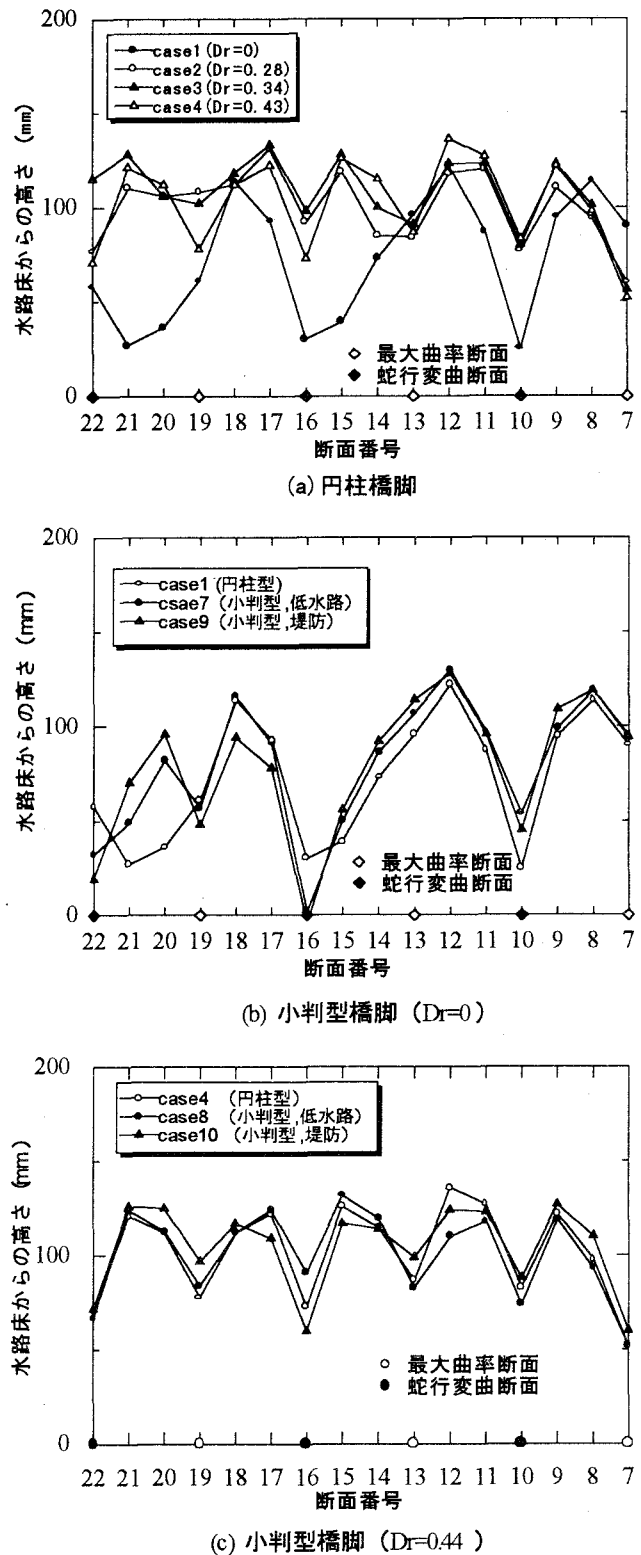


図-6 各ケースにおける最大洗掘深の縦断変化

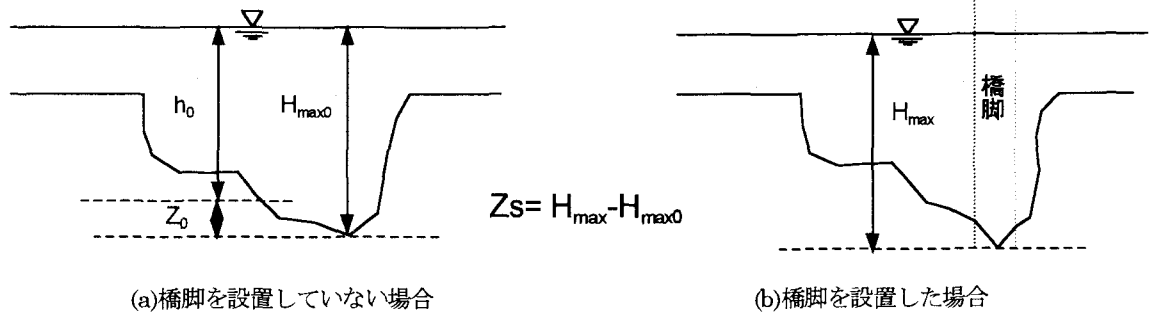


図-7 橋脚設置による洗掘深 Z_s の定義

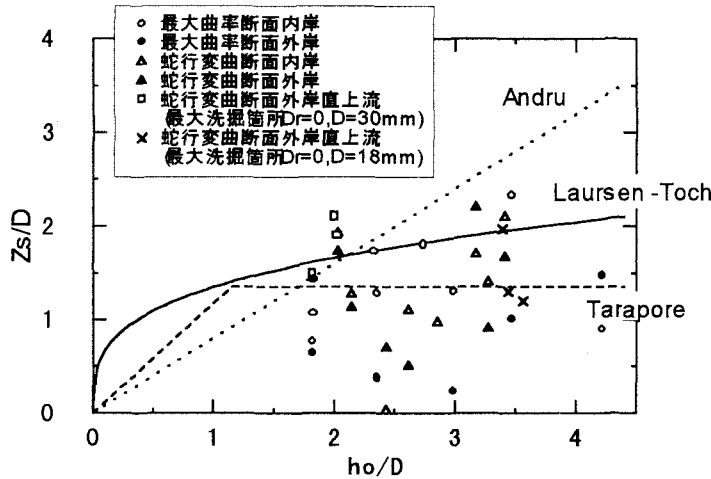


図-8 直線流路における洗掘深推定式と実測値の比較(円柱型橋脚)

異なる円柱径の橋脚模型について、得られた Z_s を従来から提案されている直線流路における橋脚周りの局所洗掘深の推定式と比較したものが、図-8 である。用いた推定式は、直線流路の洗掘深の式として代表的な(1)Andru の式、(2)Laursen-Toch の式、(3)Tarapore の式である。⁵⁾

図-8 の結果によれば、複断面蛇行流れの河床変動特性の影響をあらかじめ評価しておき、橋脚設置の影響による洗掘深の増大量を評価すれば、複断面蛇行流路においても、直線流路円柱橋脚の洗掘式を代表する Laursen-Toch の式($K=1.35$)⁷⁾を用いることによって最大洗掘深を概ね見積もることができる。しかし、 $ho/D=2$ ($Dr=0$) および 3.5 ($Dr=0.44$) 付近で、 Z_s/D は推定式よりも大きな値をとる。この理由として、 $Dr=0$ の単断面蛇行流れでは、河床の二次流が大きく、特に水衝部となる蛇行変曲断面外岸で洗掘深が大きくなる。また、高水敷に冠水しても相対水深が小さいうちは、高水敷からの遅い流れの流入によって低水路内の流速が減じ、洗掘深が小さくなるが、さらに相対水深が増大すると高水敷流れの速度が大きくなり、低水路内の流速は均一化されて河床変動は水路全体で生じ、洗掘深は再び大きくなり各設置箇所と同程度となる。これは、複断面蛇行流路において種々の相対水深で行なわれた福岡らの河床変動実験の結果¹⁾からも明らかである。

これらの結果は、橋脚設置による洗掘は、低水路線形を考慮した各流れにおける河床変動を推定できれば、その箇所に橋脚を設置した場合の全洗掘深が概ね推定可能であることを示唆するものである。複断面蛇行流路における低水路の河床変動量については、福岡・渡邊ら⁸⁾による三次元解析によって理論的に求められる段階に達している。これを用いることによって、かなりの精度で円柱橋脚の周りの洗掘深を求めることができると考えられる。

これらの結果は、橋脚設置による洗掘は、低水路線形を考慮した各流れにおける河床変動を推定できれば、その箇所に橋脚を設置した場合の全洗掘深が概ね推定可能であることを示唆するものである。複断面蛇行流路における低水路の河床変動量については、福岡・渡邊ら⁸⁾による三次元解析によって理論的に求められる段階に達している。これを用いることによって、かなりの精度で円柱橋脚の周りの洗掘深を求めることができると考えられる。

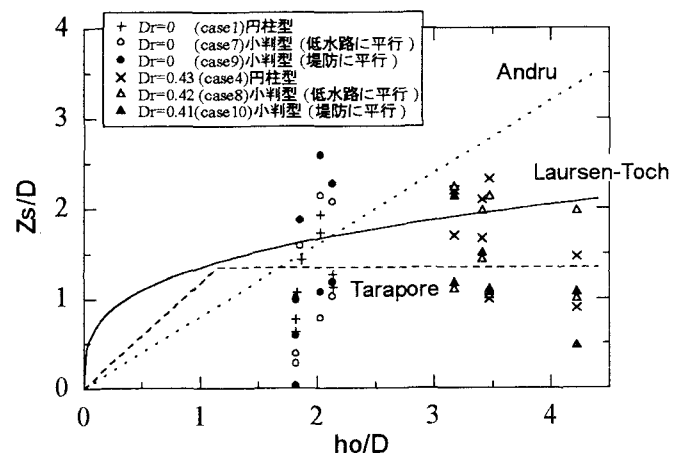


図-9 直線流路における洗掘深推定式と実測値の比較
(小判型橋脚)

3.5 橋脚形状と橋脚軸の向き

小判型橋脚と円柱型橋脚の結果を比較し、橋脚形状と橋脚軸の向きの変化による最大洗掘深への影響を調べた結果が図-9である。小判型橋脚の設置による洗掘深は、 $Dr=0.43$ では円柱型とほとんど差は見られないものの、 $Dr=0$ では低水路内の流速が大きいため、主流と橋脚軸の向きの違いによる影響を受け、洗掘深はさらに大きくなっている。

4. おわりに

複断面蛇行流路において橋脚周りの洗掘実験を行い、直線流路の場合と比較することにより低水路線形が橋脚周りの局所洗掘深に及ぼす影響を明らかにした。本実験で得られた主要な結果を以下に示す。

- 1) 蛇行流路に設置された橋脚周辺の洗掘深はどの断面でも単断面蛇行流れ ($Dr=0$) の場合が最も大きくなる。複断面蛇行流れでは、洗掘深は小さくなり、相対水深の大きさは洗掘深の大きさにほとんど影響を与えない。蛇行流路の橋脚の根入れ深は、低水路満杯流量での水量を用い、求める必要がある。
- 2) 蛇行流れにおいては、蛇行変曲断面外岸の水衝部で洗掘深が最も大きくなる。
- 3) 複断面蛇行流路における橋脚周りの洗掘深は、複断面蛇行流れの線形に起因する河床変動によるものと橋脚設置による局所洗掘の和と考え、橋脚設置による局所洗掘深を求めた。橋脚設置による最大洗掘深は、直線流路の場合の最大洗掘深を表す Laursen-Toch の式でほぼ表現できるが、単断面蛇行流れおよび相対水深の大きい複断面蛇行流れの洗掘深は、推定式よりも大きくなるようである。
- 4) 長さ/幅 = 1.5 の半円形小判型橋脚を設置した場合の洗掘深は、円中型橋脚と比して、複断面蛇行流れでは同程度となるが、単断面蛇行流れでは、主流と橋脚軸の向きの違いによる影響を受けるため、さらに大きくなる。

橋脚周りの局所洗掘深は、蛇行線形に起因する河床変動と橋脚設置による洗掘深の和として把握することが可能となった。蛇行流れの河床変動は、かなりの精度で計算できるようになっていることから、複断面蛇行流れの中に橋脚が設置された場合の最大洗掘深の大きさは、橋脚なしの複断面蛇行流路の河床変動量を計算し、洗掘深を求め、これに図-8または図-9の結果を加えることによって決定できるであろう。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 渡邊明英, 加村大輔, 岡田将治: 複断面蛇行流路における流砂量, 河床変動の実験的研究, 水工学論文集第 41 巻, pp. 883~888, 1997.
- 2) 福岡捷二, 高橋宏尚, 加村大輔: 複断面蛇行河道に現れる複断面的蛇行流れと単断面的蛇行流れ-洪水航空写真を用いた分析-, 水工学論文集第 41 巻, pp. 971~976, 1997.
- 3) 福岡捷二, 道中貢, 平生昭二: 複断面蛇行河川における洪水時の低水路内岸側河床の最大先掘深調査, 水工学論文集第 42 巻, pp. 973~978, 1998.
- 4) 福岡捷二: 複断面蛇行河道設計法の課題, 第 3 回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp. 1~8, 1997.
- 5) 土木研究所資料 第 1797 号「橋脚による局所洗掘深の予測と対策に関する水理的検討」, 1982.
- 6) 土木研究所資料 第 3225 号「治水上から見た橋脚問題に関する検討」, 1993.
- 7) Laursen, E. M. and Toch, A: Scour around bridge piers and abutments, Iowa Highway Research Board Bulletin, No. 4, 1956.
- 8) 福岡捷二, 渡邊明英, 岡田将治: 静水压近似 3 次元解析モデルによる複断面蛇行水路河床変動解析, 水工学論文集第 42 巻, pp. 1015~1020, 1998.