

水中に没した円柱周辺の河床変動について

武藤裕則・芹澤重厚

要 旨

河川の水際に形成される微地形の保全・創出にあたっては、構造物による流れと地形の擾乱機能を利用することが考えられる。本研究では、最も基本的な構造物として橋脚を模した円柱を用い、円柱高さが周辺河床の地形形成に与える影響を、円柱頂部が水没するケースも含めて、基礎的実験により検討した。本研究の結果、円柱高さを水深の 70%以下とすると、上流への水位のせき上げはほとんど無視できることが示された。一方、円柱周辺の局所洗掘は、円柱の高さを減じるほど洗掘深・洗掘範囲共に減少し、特に生態的に重要とされる下流側の浅水・緩傾斜領域への影響が大きいことが示された。

キーワード：円柱，局所洗掘，河床変動，せき上げ，水没円柱，水際

1. はじめに

水際に形成される浅い水域が魚貝類の生息・生育に重要な場所であることは従来より指摘されている（淀川環境委員会，2002；小川，2004）。そのような浅い水域の代表例としては、水制に起因するわんど（矢田ら，1999）や、砂州上の副流路に形成されるたまり（紀平，2002）などが挙げられるが、そのような領域における流れや土砂動態に関しては、例えば著者ら（2006）や鍛冶ら（2006）に見られるように、これまで数多くの研究がなされてきている。一方、橋脚周辺に形成される洗掘孔もまた、周辺とは異なる多様な流れ場を生み出すことに寄与しており、特に水際に設置された橋脚周辺部の洗掘孔は、浅く流れが穏やかなわんど状の水域として貴重な生息場となっていることが矢野（2003）により報告されている。このような、橋脚とその周囲の洗掘孔の環境的な機能をより積極的に活用することを考えた場合、架け替えに伴い不要となった橋脚を残置することや、水際に橋脚を模した構造物を設置して、水際の多様な地形の保全・創出を誘導することが考えられる。しかしながら、一般に橋脚は背の高い構造物であるため、平水時には威圧感など景観上の問題があり、また洪水時には水位のせき上げや流木等の補足に寄与するなどの問題が考えられる。

これらの問題点を軽減する方策としては、橋脚ない

しはそれを模した構造物の高さを減じること、径を減じること、スリットのような空間を構造物に設けることなどが考えられる。これまでの構造物周りの局所洗掘に関する検討結果（土木学会，1985）によれば、洗掘深さや洗掘領域の面積に関しては構造物の径が第一義的な変数として扱われており、径を減じることやスリット等を設けることは、洗掘地形ひいてはその環境的な機能に与える影響が大きいことが想定される。さらに、従来の研究では対象として橋脚を想定しているため構造物の頂部は常に非水没として扱われており、構造物の高さを变化させた検討は皆無である。そこで本研究では、構造物の高さを变化させることに注目し、その場合に構造物周辺の洗掘孔形状がどのように変化するか、特に構造物が完全に水没するような条件では洗掘領域や最大洗掘深がどのように変化するかを基礎的実験により検討した。具体的には、橋脚模型として従来から多数検討されている円柱を用い、単円柱および縦列に配置した複円柱の水没・非水没を含む数種のケースを対象として、直線水路における定常状態での移動床実験を行い、水面形および平衡河床形状の計測を行った。検討のねらいとしては、前述のように治水および景観の観点から高さはできるだけ下げつつも、同時に円柱周辺、特に下流側における洗掘孔の環境機能を維持するために、その形状を激変しない円柱高さの条件を模索することに留意した。

Table 1 Hydraulic conditions (single pier)

Case	Discharge Q (cm ³ /s)	Water depth [※] h (cm)	Mean velocity u (cm/s)	Friction velocity u_* (cm/s)	Sediment discharge Q_s (cc/min)	Pier height T (cm)	Bed condition
S0	5,700	5.00	28.5	1.98	---	---	Static
S1						7.5	
S2						3.5	
S3						2.5	
D0	10,000	7.00	35.7	2.25	65	---	Live-bed
D1						7.5	
D2						3.5	
D3						2.5	
Bed material: Mean diameter d_m =1.45mm, Specific gravity σ =1.9, Critical friction velocity u_{*c} =2.09cm/s Pier diameter D =5cm ※Quasi-uniform flow depth that is established in Case-S0 and D0, where no pier is installed							

Table 2 Hydraulic conditions (double pier)

Case	Discharge Q (cm ³ /s)	Water depth ※ h (cm)	Mean velocity u (cm/s)	Friction velocity u_* (cm/s)	Pier height	
					upstream T_1 (cm)	downstream T_2 (cm)
S11	5,700	5.00	28.5	1.98	7.5	7.5
S22					3.5	3.5
S33					2.5	2.5
S20					3.5	0
S30					2.5	0
Used bed material, pier diameter and definition of the water depth are <u>the same as in Table 1</u> . All experimental cases for the double piers are conducted in the <u>static bed condition</u> .						

2. 実験装置および方法

実験は、京都大学防災研究所宇治川水理実験所に設置された、長さ 8m、幅 40cm、深さ 40cm の循環式勾配可変型ガラス製直線水路を用いて行った。水路の一部（流入部～4m および 5.7m～7.5m 部分）をベニヤ板を用いてかさ上げし、流入部から 4m～5.7m の区間に深さ 20cm の掘込区間を設け、この部分に河床材料を充填して移動床部分とした。

円柱模型は、直径 $D=5\text{cm}$ の塩化ビニル棒を用い、単円柱のケースの場合、水路流入部より 4.7m の水路中央部に設置した。複円柱のケースでは縦列配置とし、設置間隔を円柱中心間距離で円柱径 D の 2.5 倍（＝12.5cm）とした。なお、円柱模型は 3 種類の長さのものを用意し、実験ケースごとに円柱の高さを変化させ、円柱周辺部の局所洗掘および下流側河床変動への影響を比較検討した。Table 1 および 2 に実験ケースを示す。表に示したように、複円柱のケースでは、2 本の円柱高さを同じとしてその高さを変化させた 3 ケース（Case S11, S22 および S33）と、上流側の水没円柱と下流側の高さを 0、すなわち円柱頂部を初期河床高さに合わせた円柱を組み合わせた 2 ケース（Case S20 および S30）の、合わせて 5 ケースについて検討した。ここに、下流側の高さを 0 としたケースは、上流側円柱

と組み合わせて設置することで、ある程度洗掘孔が単円柱の場合よりも拡大ないし維持されることを期待したものである。

実験においては、水理条件としては流量および疑似等流水深を変化させることで、静的および動的洗掘状態の 2 種を検討した。流量の計測は、循環系に設置された面積流量計によった。また、いずれの場合でも、疑似等流状態となるように水路下流端の越流堰を調節している。水路床勾配は 1/1000 に設定した。なお、表中の疑似等流水深とは、ケース間の比較を容易にするため、円柱によるせき上げを局所的なものとし、円柱なしの場合の等流水深を代表値として示したものである。

実験手順としては、最初に試験区間（移動床部分）の河床を前後の固定床部分と同じ高さに平坦に敷き均した後に、水路に湛水し河床材料（スラジライト、平均粒径 $d_m=1.45\text{mm}$ 、比重 1.9、限界摩擦速度 $u_{*c}=2.09\text{cm/s}$ ）自体および材料間の空隙が十分に飽和するまで待ち（約 1 時間）、その後バルブを操作することで所定の流量となるように素早く調節した。次に、円柱周辺部の河床変動が平衡状態となるまで定常流量を供給し、この間の河床変動状況を観察した。なお、動的洗掘状態となる実験ケースでは、所定量の給砂を試験区間の上流側から供給した（Table 1 参照）。試験区

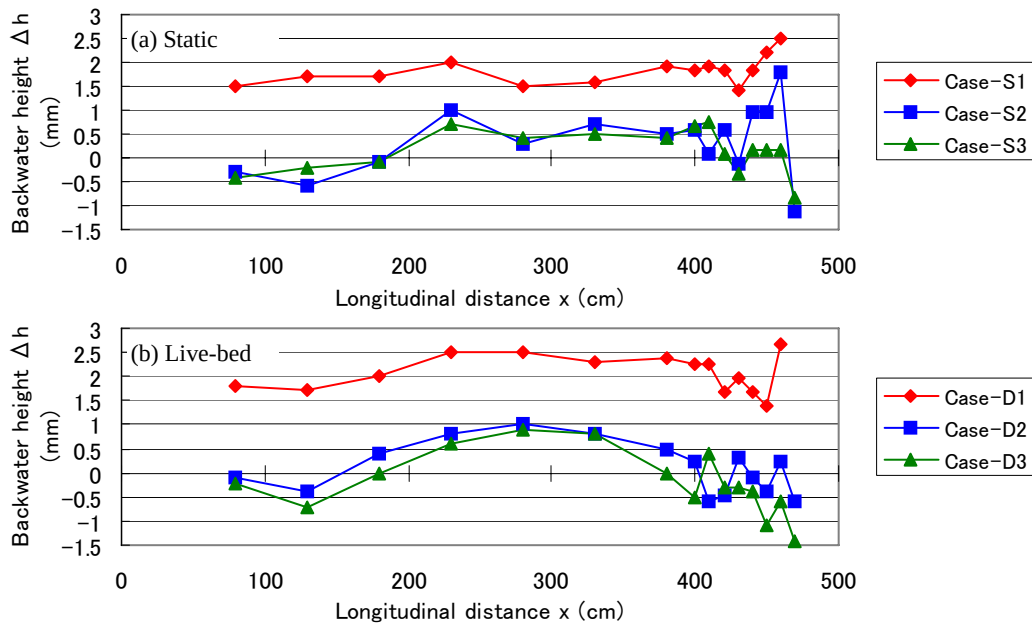


Fig. 1 Effect of backwater by the single pier

間の河床変動が平衡状態となったと判断された時点で、水路中央部において水面形計測を行い、通水停止後河床形状計測を行った。

水面形の計測はポイントゲージを用い、試験区間においては 10cm ピッチ、試験区間前後の固定床部分については 50cm ピッチで水路中央部における水深を計測し、水面形を求めた。河床形状の計測は、レーザ距離計（キーエンス社製 LK-500）を用いて行った。円柱設置箇所を中心として、上流側に 1B（ここで B は水路幅＝40cm）、下流側に 2.5B の範囲の河床形状について、横断方向に 1cm ピッチ、縦断方向は河床形状の変動状況に合わせて 1cm～4cm ピッチの範囲で計測を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 単円柱の場合

(1) 水面形計測結果

Fig. 1 は、水路流入部～円柱設置地点の範囲における水位について、円柱を設置しないケース（Case-S0 および Case-D0）を基準とした変化量として示したものである。図より、いずれのケースについても、円柱上流側に水位の上昇する範囲が見られることがわかる。円柱の高さとせき上げ区間の関係を見ると、円柱が水没しないケース（Case-S1 および Case-D1）においてせき上げ区間は最も大きく、水路流入部近くにまで及んでいることがわかる。しかしながら、円柱が水没する場合は Case-S2 を除いてせき上げ区間は明瞭ではなく、水位は円柱を設置しないケースとあまり変わらない。次に、水位上昇量の場所的な変化を見ると、Case-S1, S2

Table 3 Averaged backwater height (mm)

Case	All ($x=0\sim4.6\text{m}$)	Fixed bed ($x=0\sim4.0\text{m}$)	Movable bed ($x=4\sim4.6\text{m}$)
S1	1.82	1.70	1.93
S2	0.45	0.21	0.69
S3	0.21	0.19	0.24
D1	2.08	2.17	1.99
D2	0.16	0.43	-0.11
D3	-0.10	0.20	-0.40

および D1 については円柱の直上流（ $x=4.6\text{m}$ ）の地点で水位上昇量が最大であるが、その他のケースについては同地点での水位上昇量が小さく、円柱高さ／水深（ T/h ）が小さくなれば水位上昇に対する円柱の影響がほぼ無視できることが示されている。一方、円柱が水没するケースについては、円柱設置地点（ $x=4.7\text{m}$ ）では水位が低下している。

Table 3 は、Fig. 1 に示した水位上昇量の空間的な平均値を各ケース別に示したものである。表では、全区間、固定床範囲（ $x=0\sim4\text{m}$ ）および移動床範囲（ $x=4\sim4.6\text{m}$ ）それぞれにおける平均値を示している。表より、静的洗掘・動的洗掘いずれの場合でも、円柱が水没しないケースにおける水位上昇量が最大となっており、その値は円柱を設置しない場合に対して約 3% の水深の増加となっている。これに対し、円柱が水没するケースではいずれも 1mm 以下の上昇量となっており、円柱を設置しない場合とほとんど変わらない。次に、静的洗掘と動的洗掘を比較すると、静的洗掘の場合は移動床範囲の方が大きいのに対し、動的洗掘の場合は

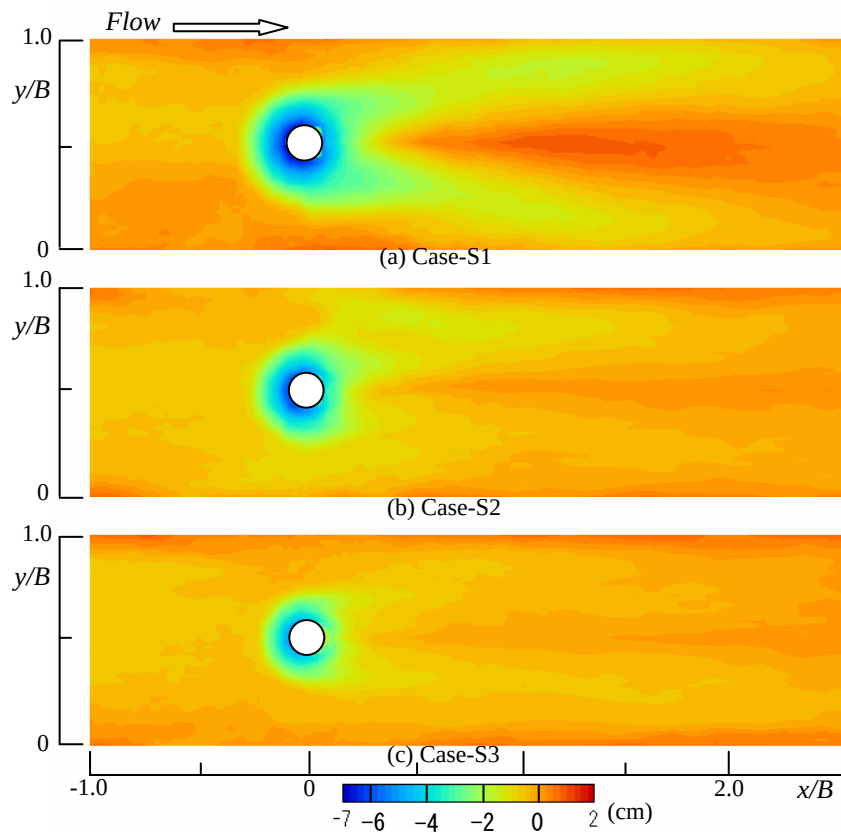


Fig. 2 Equilibrium bed configuration (Single pier, Static condition)

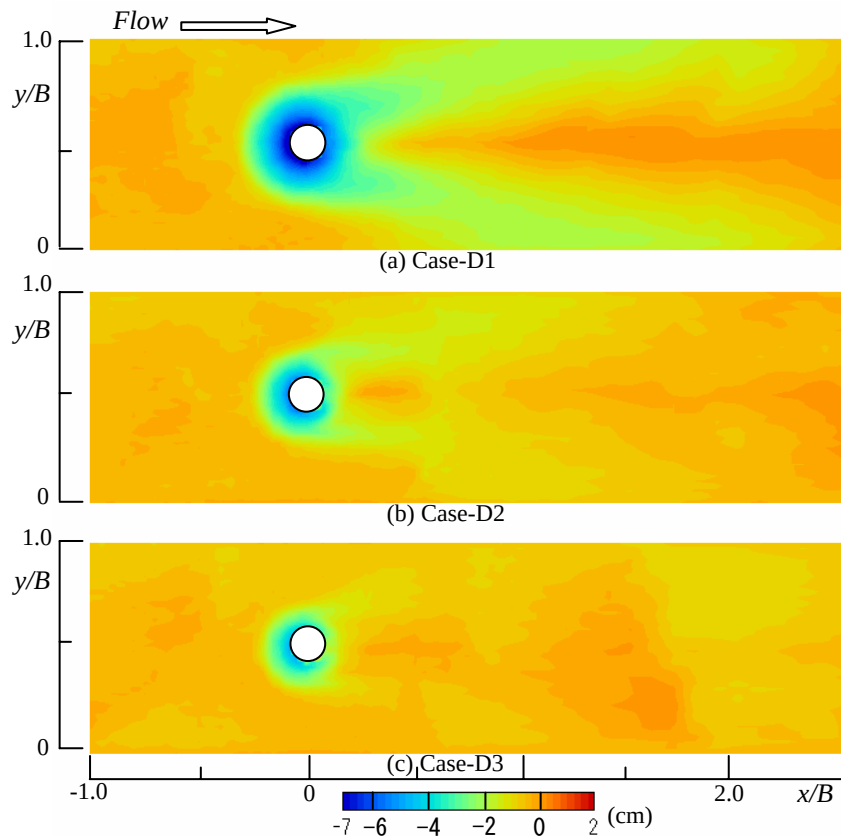


Fig. 3 Equilibrium bed configuration (Single pier, Live-bed condition)

Table 4 Equilibrium maximum scour depth for the single pier cases

Case	h (cm)	T (cm)	Equilibrium maximum scour depth Z (cm)	Z/D	h/D	Z/Z_0	T/h
S1	5.0	5.0	6.75	1.35	1.0	1	1
S2		3.5	6.00	1.20		0.89	0.7
S3		2.5	4.96	0.99		0.73	0.5
D1	7.0	7.0	7.38	1.48	1.4	1	1
D2		3.5	5.67	1.13		0.77	0.5
D3		2.5	4.81	0.96		0.65	0.36
Note: $D=5\text{cm}$: Z_0 denotes equilibrium maximum scour depth in Case-S1and D1.							

移動床範囲の方が固定床範囲より平均水位上昇量が小さく、河床の状態が水位に影響を及ぼしていることを示唆している。さらに、水没した円柱の高さの影響を見ると、静的洗掘・動的洗掘いずれの場合でも、円柱の高さが低い方が水位上昇量が全区間・固定床範囲・移動床範囲いずれでも小さくなっている。しかしながらその差は、例えば固定床範囲で $0.1\text{mm} \sim 0.2\text{mm}$ 程度であり、実験の精度を考慮すると、円柱高さとは何らかの相関傾向が認められるもののそれほど明確とは言えない。

(2) 河床形状計測結果

Fig. 2 は、静的洗掘の各ケースにおける平衡河床形状の計測結果をコンターで示したものである。数値は初期河床からの低下量である。図より、円柱が水没しないケース（Case-S1）では、従来の研究結果と同様に、洗掘孔の形状は、円柱前面では逆円錐形状を持ち、円柱側面から後方にかけては円柱から緩い角度をもって斜め方向に離れながら徐々に浅くなり、また円柱の後方では河床材料が堆積していることがわかる。このような洗掘孔形状が形成されるのは、円柱周辺の渦構造と密接な関連があり、円柱前面部の馬蹄形渦や円柱後流のはく離渦の関与が宇民（1975）により指摘されている。今回の実験では、円柱の後方で底面付近からはく離し洗掘孔の形状に沿って巻き上がる強い流れが観察され、この流れにより円柱前面より運ばれた河床材料が堆積している様子がうかがえた。次に、円柱が水没した場合（Case-S2 および S3）では、円柱前面部では Case-S1 と同様に逆円錐形の洗掘孔が形成されているが、その範囲は円柱高さが低くなるにつれて縮小している。また、円柱後方への影響は Case-S1 ほど顕著ではなく、その影響範囲も円柱の高さが低くなるにつれて大きく縮小しており、とりわけ Case-S3 では、円柱を中心とした同心円上の範囲にほぼとまっている。

一方、Fig. 3 は動的洗掘の各ケースにおける平衡河床形状の計測結果をコンターで示したものである。図より、円柱が水没しないケース（Case-D1）では、円柱前面部では静的洗掘（Case-S1）とほぼ同様の洗掘孔形状

となっている。それに対して円柱後方では、円柱側面から形成される洗掘孔のはく離角度が静的洗掘に比してやや大きく、かつその範囲も大きい。その一方で、円柱後流部に形成される堆積域はやや小さく、その開始位置も下流側にずれている。図からは明らかではないが、動的洗掘の場合、移動床区間全域に渡って河床は変動しており、一部には河床波（波高数 mm 程度）も形成されているため、そのような変動構造との重畳により堆積域が明瞭とはならなかったと考えられる。円柱が水没したケース（Case-D2 および D3）では、洗掘孔が Case-D1 に比して全体的に縮小する点、ならびに洗掘孔の大きさと円柱高さとの相関がある程度見られる点など、静的洗掘の場合と同様である。一方で、円柱の高さが同じ各ケース間の比較をすると、円柱が水没しないケース（Case-S1 および D1）では、前述の下流域への影響を除いては洗掘孔形状に大きな差異は見られないが、円柱が水没するケースでは、動的洗掘の場合の方が静的洗掘より洗掘領域がやや小さい。

橋脚周辺の洗掘孔を産卵場とする魚種の中には、ゼゼラ（*Biwia zezera*）のように橋脚下流側のより緩やかな河床勾配の箇所を好んで利用するものがあることが矢野（2003）により報告されているが、今回の実験結果は、円柱を水没させることで、そのような箇所に大きく影響を与えることを示している。

(3) 最大洗掘深の評価

前節で示したように、今回の実験条件では、静的洗掘・動的洗掘いずれの場合でも洗掘孔の形状は、円柱前面部では逆円錐形状を持ち、円柱側面から後方にかけて徐々に浅くなり、また円柱の後方では河床は上昇傾向にあった。この結果、従来の非水没型円柱と同様に、円柱前面部に最大洗掘深が現れる結果となった。本節では、最大洗掘深と円柱高さとの関係を検討すると共に、従来提案されてきた最大洗掘深の予測式の拡大適用の可能性について検討する。

Table 4 は、各ケースにおいて計測された平衡状態における最大洗掘深をまとめたものである。Fig. 2 および 3 に示した結果からも推測されるように、水理条件が

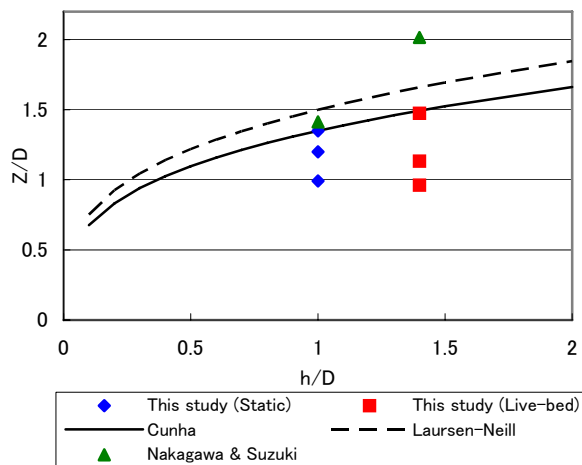


Fig. 4 Equilibrium maximum scour depth

同じケース間で比較すると、円柱が水没しないケースにおいて最大の値となっており、水没したケースでは円柱の高さが低い方が最大洗掘深が小さい。一方、静的洗掘と動的洗掘の比較をすると、円柱が水没しないケースでは動的洗掘の方が最大洗掘深は大きい、水没するケースでは2 ケース共静的洗掘の方が若干大きな値を示している。

Fig. 4 は、従来の研究結果をまとめたもの（土木学会，1985）と同様に、横軸に水深／円柱径（ h/D ），縦軸に平衡最大洗掘深／円柱径（ Z/D ）をとり今回の実験結果をプロットしたものである。図には、Laursen-Neill (1963)の式，Cunha (1970)の式および中川・鈴木 (1974)の式による予測値も示している。図より、今回の実験結果はこれらの予測値から大きくは外れてはおらず、また、円柱が水没しないケース（Case-S1 および D1）に対しては、Cunha による予測式が非常に高い適合性を示している。しかしながら、従来の結果は円柱が水没し、かつその高さが変化することは考慮されていないため、当然のことながら同一の h/D に対して洗掘深が複数プロットされる結果となっている。これまでの検討の結果、円柱高さが低くなるにつれて、最大洗掘深が小さくなることが伺えたことから、両者の関係を示したものが Fig. 5 である。なお、横軸には円柱高さ／水深（ T/h ）を、縦軸には非水没ケースを基準とした最大洗掘深の割合（ Z/Z_0 ，ここに Z_0 は非水没ケースにおける洗掘深）をとっており、また非水没ケースにおける円柱高さ T は水深 h と同じとしている。図より、両者には強い相関関係が伺われ、その関係は図中にも示したように次式によって表される。

$$\frac{Z}{Z_0} = 1.0 \left(\frac{T}{h} \right)^{0.41} \quad (1)$$

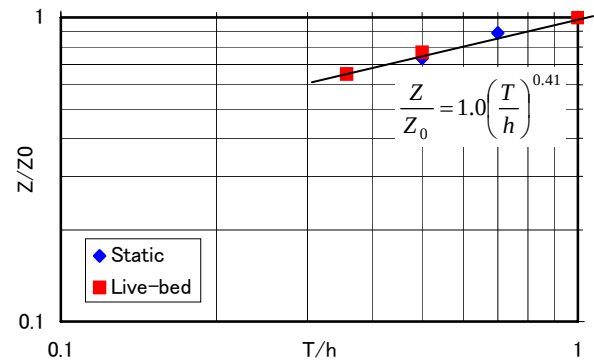


Fig. 5 Pier height vs. Maximum scour depth

式(1)と、次に示す Cunha の式

$$\frac{Z_0}{D} = 1.35 \left(\frac{h}{D} \right)^{0.3} \quad (2)$$

を組み合わせることで、円柱が水没した場合も含む平衡最大洗掘深の予測式は、以下のように表される。

$$\frac{Z}{D} = 1.35 \left(\frac{h}{D} \right)^{0.3} \left(\frac{T}{h} \right)^{0.41} \quad (3)$$

式(3)を今回の実験ケースに適用したところ、いずれのケースに対しても誤差は±3%以内となった。以上のことから、式(3)のような比較的簡便な一つの式で、円柱の水没・非水没にかかわらず最大洗掘深を精度良く予測できることが示された。

3.2 複円柱の場合

(1) 水面形計測結果

Fig. 6 は、高さが同じ円柱を2本縦列に配置した場合における水路流入部～上流側円柱設置地点の範囲における水位の上昇量について、Fig. 1 と同様の方法により示したものである。図より、単円柱の場合（Fig. 1）と同様に、円柱が水没しないケース（Case-S11）において水位上昇量・せき上げ区間共に最大となっており、円柱が水没するケース（Case-S22 および 33）では、せき上げ区間は水路流入部にまでは及んでいない。一方、これら2 ケースの差異はそれほど明確ではなく、円柱高さの影響が明瞭には伺えない。次に、水位上昇量の場所的な変化を見ると、いずれのケースでも上流側円柱の直上流地点である $x=4.6\text{m}$ で極大となる他、 $x=3.8\text{m}$ および 2.3m でも水位上昇量が大きくなっており、ある種の周期性が伺える。Fig. 1 に示した単円柱の場合にはこのような周期性は明瞭ではない。一方、円柱が水没するケースにおいて円柱設置地点である $x=4.7\text{m}$ で水位が低下しているのは単円柱の場合と同様である。

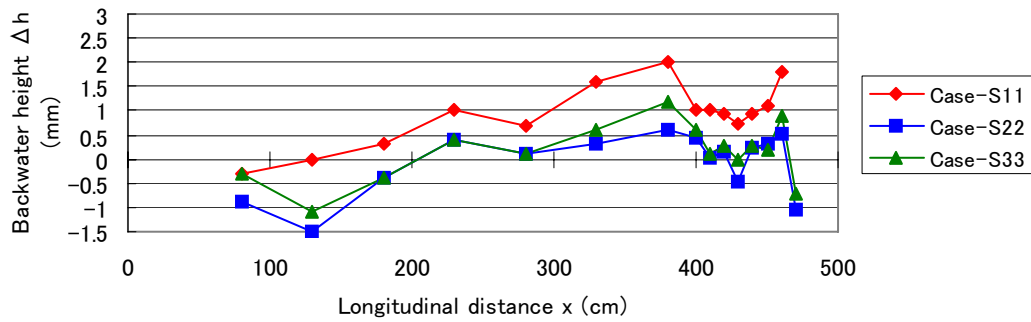


Fig. 6 Effect of backwater by the double piers

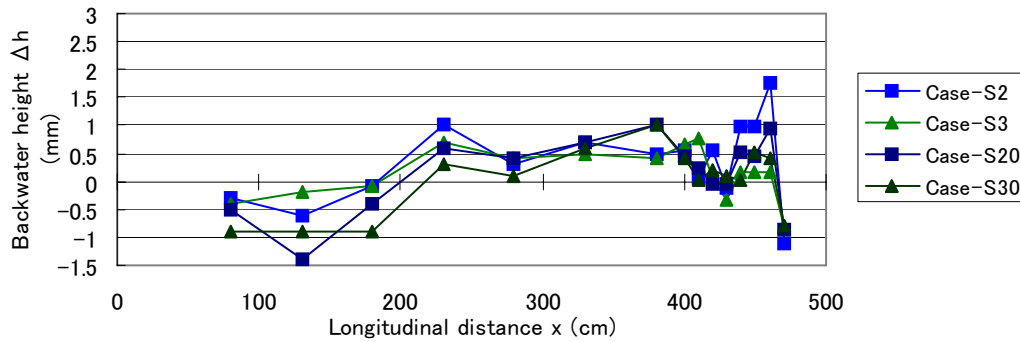


Fig. 7 Effect of backwater by the double piers

Table 5 Averaged backwater height (mm)

Case	All ($x=0\sim4.6\text{m}$)	Movable bed ($x=4\sim4.6\text{m}$)
S1	1.82	1.93
S2	0.45	0.69
S3	0.21	0.24
S11	0.92	1.08
S22	-0.01	0.18
S33	0.21	0.33
S20	0.20	0.35
S30	0.07	0.24

Fig. 7 は、下流側円柱の高さを 0 とした場合の水位の上昇量について、単円柱の場合と共に示したものである。図より、各地点ごとに 0.5mm 内外の差異はあるものの、上流側円柱の高さが同一であるケース間（Case-S2 と S20、および Case-S3 と S30）の水面形はほぼ一致し、したがって下流側円柱の高さが 0 の場合には、上流側水位へ及ぼす影響は単円柱の場合とほぼ同様と考えることができる。

Table 5 は、Fig. 6 および 7 に示した水位上昇量の空間的な平均値を各ケース別に示したものである。表では、全区間と移動床範囲（ $x=4\sim4.6\text{m}$ ）それぞれにおける平均値を示しており、また比較のため Table 3 に示した単円柱（静的洗掘）の場合を再掲している。表より、複円柱の場合も単円柱の場合と同様に、円柱が水没しないケースの水位上昇量が、全区間・移動床区間共に最大となっているが、その値は単円柱の場合と比

してやや小さい。このことは、後に示すように、円柱による洗掘範囲が単円柱の場合に比してやや拡大していることが影響しているものと思われる。一方、円柱が水没するケースでは、Case-S22 の全区間を除いて全てのケース・区間で+となっており、水位はやや上昇傾向であることが伺えるが、いずれの値も 0.5mm 以下であり、円柱無しの場合とほぼ変わらないと言える。また、円柱高さ水位上昇量の関連も明確ではない。今回の実験条件の範囲では、上流区間の水位上昇は上流側円柱の高さによって規定され、その結果は、円柱高さが同じである単円柱の場合とほぼ同様であることが示された。

(2) 河床形状計測結果

Fig. 8 は、高さが同じ円柱を縦列に配置した場合における平衡河床形状の計測結果を示したものである。まず、複円柱とすることによって、それぞれの円柱周辺に洗掘孔が形成されており、円柱間に凸部が形成され、それぞれの円柱前面に最深部が形成されていることがわかる。最大洗掘深は、今本・大年（1983）による検討結果と同様に、上流側円柱の前面に観察される。しかしながら同時に、各円柱ごとの影響範囲は、その範囲が最大となる円柱が水没しないケース（Case-S11）においても、円柱壁面から距離 D （＝円柱径）程度にとどまり（図中青色： $z<-5\text{cm}$ の範囲）、円柱からそれより離れた部分では、2 本の円柱があたかも一体となって洗掘領域が形成されているように見受けられる（図中、緑～黄色の部分）。その結果、単円柱の場合（Fig. 2）と比較すると、特に横断方向と上流側へ洗掘領域が

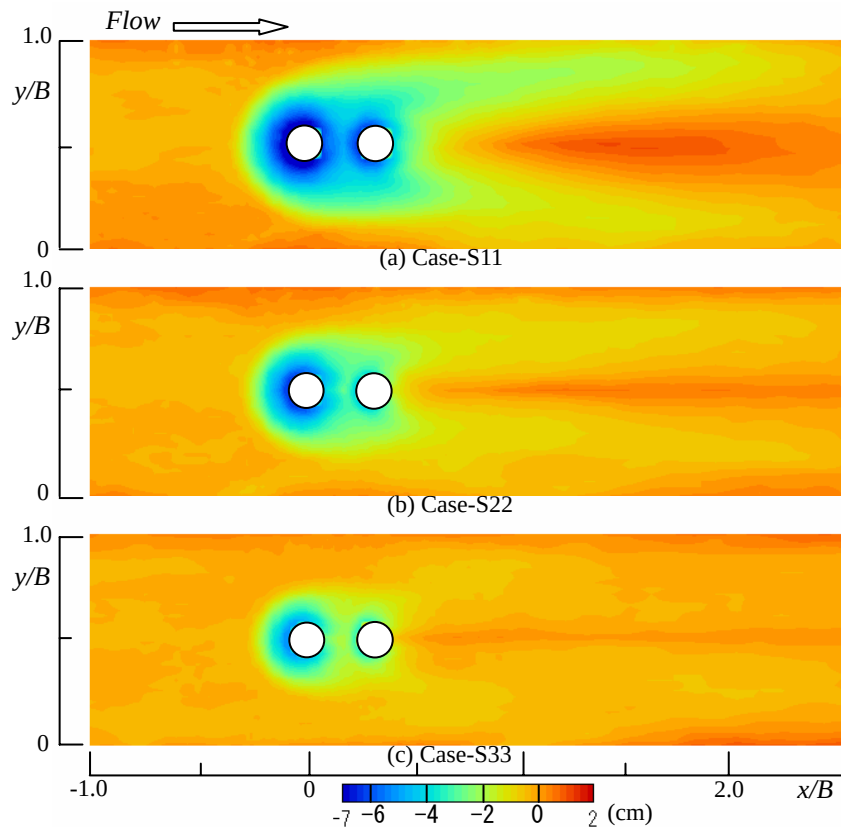


Fig. 8 Equilibrium bed configuration (double piers)

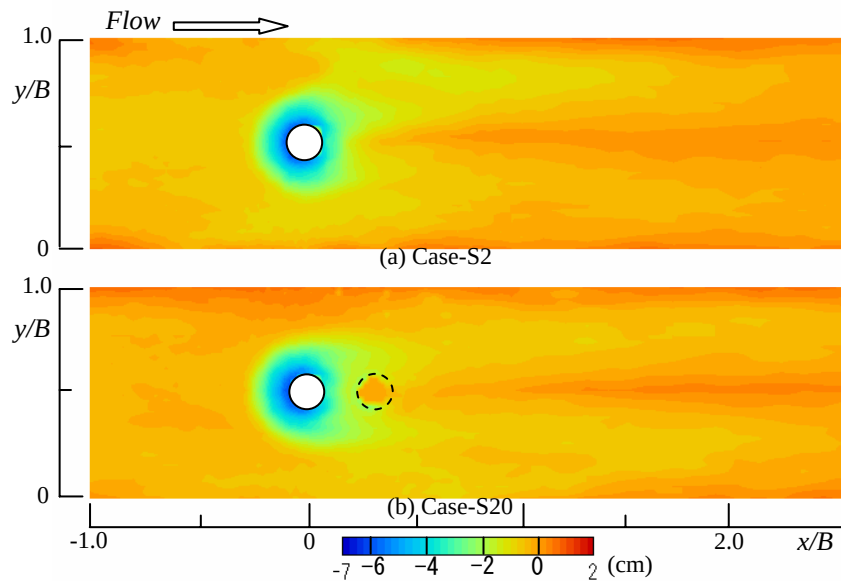


Fig. 9 Equilibrium bed configuration (double piers)

拡大していることがわかる。なお、円柱の高さが減少するにつれて、洗掘範囲・最大洗掘深共に減少する傾向は単円柱の場合と同様である。下流側への影響は、洗掘範囲の大きさはあまり変化しないが、洗掘量がやや拡大している。

Fig. 9 は、下流側円柱の高さを 0 とした Case-S20 における平衡河床形状を示したものである。比較のために、Fig. 2 に示した単円柱の場合の結果 (Case-S2) を再掲している。図に示されるように、単円柱の河床変

動結果と下流側の高さが 0 である複円柱の結果はほぼ同一である。すなわち、下流側円柱の存在に起因する洗掘領域は、その高さが 0 の場合には明確には形成されていない。下流側円柱の高さを 0 とした目的は、上流側円柱による洗掘の影響範囲に設置することから、仮に円柱頂部を初期河床に合わせたとしても、流砂の非平衡状態に伴う河床変動が下流側円柱周りに生じることを期待しての条件設定であるが、その効果はほとんど発揮されなかったと言える。なお、ここには図示

Table 6 Equilibrium maximum scour depth for the double pier cases

Case	T_1 (cm)	T_2 (cm)	Equilibrium maximum scour depth		Z_1/D	Z_2/D
			upstream Z_1 (cm)	downstream Z_2 (cm)		
S1	5.0	---	6.75	---	1.35	---
S2	3.5	---	6.00	---	1.20	---
S3	2.5	---	4.96	---	0.99	---
S11	5.0	5.0	7.73	6.87	1.55	1.37
S22	3.5	3.5	6.41	4.27	1.28	0.85
S33	2.5	2.5	5.25	3.43	1.05	0.69
S20	3.5	0	5.89	2.22	1.18	0.44
S30	2.5	0	5.29	1.35	1.06	0.27

Note: $D=5\text{cm}$

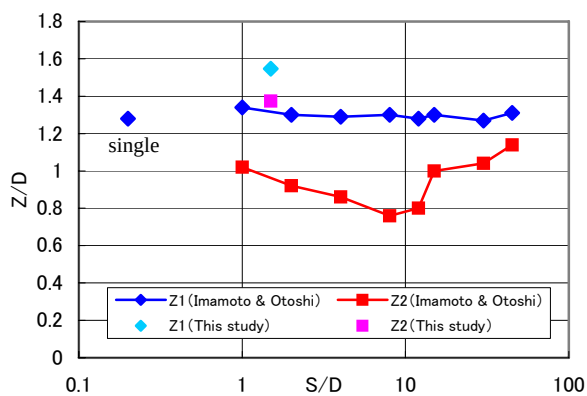


Fig. 10 Pier space vs. Maximum scour depth

していないが、Case-S30 と Case-S3 を比較した結果についても同様のことが観察された。

(3) 最大洗掘深の評価

Table 6 は、複円柱の各ケースにおいて計測された平衡状態における最大洗掘深をまとめたものである。表には、比較のために単円柱の場合の結果も再掲している。表より、高さが同じ円柱を縦列配置にした複円柱のケース (Case-S11, S22 および S33) では、上流側円柱による洗掘深 Z_1 と、対応する高さの単円柱における洗掘深を比較すると、いずれのケースについても複円柱の方が洗掘深が拡大していることがわかる。一方、下流側円柱による洗掘深 Z_2 は、単円柱による洗掘深と同程度かやや小さい。次に、下流側円柱の高さが 0 のケース (Case-S20 および S30) について見ると、上流側の洗掘深 Z_1 は対応する円柱高さ条件の単円柱の結果とほぼ同様である。なお、下流側円柱については、前述のように上流側円柱の影響範囲に位置するため、洗掘孔は明確には形成されていない (Fig. 9 参照) が、表に示したように僅かながら周囲より深い領域が形成されている。

円柱を非水没の条件で縦列配置した場合の洗掘孔形状に関する検討の先行事例としては、先述の今本・

大年 (1983) による研究がある。Fig. 10 は、円柱の設置間隔と上流側・下流側円柱それぞれの前面に表れる最大洗掘深の関係を示したものである。マーカー付実線が今本・大年による結果 (Z_1 に関する単円柱の結果を含む)、マーカー単独のプロットが本研究による結果である。図では、最大洗掘深 (Z : 縦軸), 設置間隔 (S : 横軸) 共に円柱径 D で無次元化されており、本研究における条件は $S/D=1.5$ である。なお、ここでいう設置間隔は円柱の面間距離であり、中心間距離から円柱径を減じたものである。図より明らかなように、本研究による結果は、今本・大年によるそれより、上流側・下流側いずれにおいても最大洗掘深は過大となっている。原因は、河床材料の選択や水路幅/水深比の影響などが考えられるが、詳細は不明である。本研究では、円柱の設置間隔については 1 ケースしか検討しておらず、今後設置間隔を変化させた実験を行って比較検討を行う必要があると考える。

Fig. 8 にも示したように、本研究における円柱の設置条件では、2 本の円柱が一体となって河床変動全体に影響を与えていると見なされる特徴が伺える。Table 6 に示したように、複円柱とすることによって、最大洗掘深は単円柱の場合の約 1.1 倍となることがわかった。この値を単円柱で得るために必要な円柱径を式(2)より逆算すると、 $D'=1.15D$ となった。なお、 D' は所要の最大洗掘深を得るために必要な仮の円柱径である。このことより、今回の複円柱の設置条件である $S/D=1.5$ は、最大洗掘深に関しては、単円柱の径を 1.15 倍したのと同等の影響をもたらしたと考えられる。

4. おわりに

本研究により得られた成果を列挙すると以下のようである。

1. 水中に没した円柱周辺に形成される局所洗掘孔の

形状は、円柱前面においては水中に没しない場合とほぼ相似形であり、最大洗掘深は円柱前面に現れる。

2. 円柱高さを低下させることで、洗掘範囲および最大洗掘深は減少する。円柱が水没した場合においても、最大洗掘深は、Cunha の式に円柱高さをパラメタとする新たな変数を導入することでほぼ予測可能である。
3. 静的洗掘状態と動的洗掘状態の結果を比較すると、動的洗掘の方が下流洗掘領域への影響範囲は大きい、静的洗掘の方が堆積域の形成は明瞭である。この傾向は、円柱が水没しないケースにおいて特に顕著である。
4. 円柱を水没させた場合、上流側へ及ぼす水位のせき上げへの影響は円柱が水没しない場合に比していずれも小さい。水位上昇に及ぼす円柱高さの影響は、今回の実験条件の範囲では顕著には見られなかった。
5. 複円柱とした場合、水没円柱による水位のせき上げは、上流側の円柱高さにより規定される。洗掘孔は、個々の円柱に起因する深い部分と、両者が一体として機能する浅い部分との複合的な形状を示し、全体の最大洗掘深は上流側円柱の前面に表れる。
6. 複円柱で下流側円柱の高さを 0 とした場合、流砂の非平衡効果による下流側円柱周辺の洗掘孔は形成されず、単円柱の場合とほぼ同様の結果となる。

今回の実験結果からは、単円柱・複円柱いずれの場合でも、円柱の高さを低くすることで洗掘孔が縮小するという傾向が確認された。このことは、例えば不要となった橋脚の高さを低くして残置したとしても、従来と同様の生息環境は確保されない恐れがあることを示唆している。しかしながら、河川地形とその生態機能の定量的な関係は必ずしも明確にはなっておらず、今後特に浅水域や緩傾斜領域に着目し、その物理過程を明らかにすることを通してそのような検討に対して貢献していきたい。

加えて、円柱以外の断面形状を有する橋脚を対象にした検討や、浮遊砂が卓越する状態での検討、ならびに今回提案した式(3)の現地に対する適用性についても検討を進める予定である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、大阪教育大学教授・長田芳和氏、中間法人水生生物保全研究会会長・紀平肇氏、大阪市立大桐中学校・河合典彦氏ならびに大阪府立西野田工業高等学校・小川力也氏には、わんど・た

まりにおける魚貝類の生態について多くのご教示を得た。また、京都府山城土木事務所および財団法人河川環境管理財団には、木津川下流部わんど・たまり群における生物調査データの提供をいただいた。深くお礼申し上げます。

参考文献

- 今本博健・大年邦雄 (1983) : 開水路流れに設置された橋脚周辺の水利特性について(1), 京都大学防災研究所年報, 第 26 号 B-2, pp.489-501.
- 宇民 正 (1975) : 橋脚周辺の流れの機構と洗掘防止法に関する研究, 京都大学学位論文.
- 小川力也 (2004) : 砂州の静水域の環境特性と魚類の生態, 流水・土砂の管理と河川環境の保全・復元に関する研究, 財団法人河川環境管理財団河川整備基金事業報告書, pp.116-132.
- 鍛冶塩太・綾 史郎・武藤裕則・馬場康之・中西 章・出口 恭・藤田一郎・竜門俊次 (2006) : 淀川楠葉復元ワンド群の水利環境, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.1117-1122.
- 紀平 肇 (2002) : 砂州に生じる一時的水域と魚類の生態, 流水・土砂の管理と河川環境の保全・復元に関する研究, 財団法人河川環境管理財団河川整備基金事業報告書, pp.133-141.
- 土木学会編 (1985) : 水利公式集, 昭和 60 年版, pp.273-275.
- 中川博次・鈴木幸一 (1974) : 橋脚による局所洗掘の予測に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 17 号 B, pp.725-751.
- 矢田敏晃・長田芳和・紀平 肇・近藤高貴 (1999) : 淀川のワンドの生物たち, わんどの機能と保全・創造～豊かな河川環境を目指して～ (財団法人河川環境管理財団大阪研究所編), pp.95-128.
- 矢野祐之 (2003) : 氾濫原に適応したゼゼラ (コイ科) の繁殖生態, 大阪教育大学修士論文.
- 淀川環境委員会編 (2002) : 自然豊かな淀川を目指して.
- Muto, Y. and Aya, S. (2006): Field Measurements and Laboratory Experiments on Flow and Bed Evolution in Embayments, The 6th Japan-Taiwan Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation (Paper on CD-ROM).
- Neill, C.R. (1963): Measurements of bridge scour and bed changes in a flooding sand-bed-river, *Proc. ICE*, London, Vol.30, pp.415-436.
- Veiga da Cunha, L. (1970): Discussion to "Local scour around bridge piers" by Shen, H.W., Schneider, V.R. and Karaki, S., *Proc. ASCE*, HY8, pp.1742-1747.

Local Scour and Bed Evolution around Submerged Cylindrical Piers

Yasunori MUTO and Shigeatsu SERIZAWA

Synopsis

Laboratory experiments were conducted on local scour and bed evolution around cylindrical piers. Not only with a traditional non-submerged pier, but some cases with a submerged pier were explored. In addition to the single pier, double piers arranged in the longitudinal direction are also studied. Experiments were carried out in both static and live-bed scouring conditions. The shape of the scouring hole in the submerged conditions is similar to that in the non-submerged condition, thus the maximum scour depth appears in vicinal front of the pier. The maximum scour depth reduces as the height of the pier decreases. A refined equation for estimating the maximum scour depth including the effect of variable pier height is proposed and shows good performance in the range tested here. Backwater in the upstream is not so noteworthy in the submerged cases.

Keywords: cylindrical pier, local scour, bed evolution, backwater, submerged pier, embayment