

橋脚基礎周辺の洗掘過程に関する実験的研究

EFFECTS OF FOUNDATION LOCATION ON SCOUR PROCESS AROUND A CYLINDRICAL BRIDGE PIER

楳田真也¹・山崎達夫²・由比政年³
Shinya UMEDA, Tatsuo YAMAZAKI and Masatoshi YUHI

¹正会員 博(工) 金沢大学講師 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

²学生会員 金沢大学大学院博士前期課程 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³正会員 博(工) 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (同上)

Laboratory experiments were conducted on the time development of clear water scour around a non-uniform cylindrical pier in steady flow. The pier comprised a slender cylinder founded on a large cylinder. This study aimed at investigating the effects of foundation location on the scour process. Three-dimensional topography of the scour around the pier and its foundation was carefully measured using digital stereo-photogrammetry as a method to level the sandy riverbed. The spatial distributions of the sediment transport rate were estimated with the variation in the riverbed elevation. The results show that the scour development and the sediment transport process depend on the foundation location. The retarding and limiting the scour development due to the foundation occur when it is placed at an appropriate level below the initial bed level. When the foundation protrudes above the initial bed level, the scour depth increases with foundation level. The scour is deeper than that at the upper uniform pier.

Key Words : scour process, bridge pier, exposure of foundation, stereo-photogrammetry

1. はじめに

河川構造物周辺の局所洗掘および河床低下に起因する橋脚の沈下、傾斜および転倒などの被害は頻発しており、橋脚周辺の洗掘現象に関して数多くの実験的・解析的な研究が古くから行なわれてきた。その研究の大部分は一樣な断面の円柱を対象として、洗掘深の予測および洗掘機構の解明を試みたものである。一方、実際の橋脚は構造物の安定性の確保や洗掘防止等を考慮して、基礎部分の断面は橋脚部より大きく、一般に断面は軸方向に非一樣である。現在も多くの河川において、流砂量の不均衡および流路の固定化等により河床低下傾向にあるため、橋脚基礎は根入れ不足に陥りやすく、出水時に基礎部が露出しやすい状態にある。そのため橋脚基礎の河床面に対する天端位置(根入れや露出の度合)の変化が洗掘の発達過程や流砂現象に与える影響を明らかにし、その適切な対応策を見出すことは工学的に重要な課題である。

非一樣断面の円柱橋脚周辺の洗掘に関する研究例は少ないものの、幾つか行われている。今本・大年¹⁾は、基礎部直径に対する相対水深が0.7~1.5程度の浅水状態で実験を行い、基礎部の天端位置や直径比等の変化と最終

(平衡)洗掘深の関係を整理し、基礎部の僅かな露出により洗掘が促進される場合と抑制される場合があることを示した。Tsumimotoら²⁾は、紀ノ川における河床低下、橋脚基礎の露出および洗掘対策状況を示すとともに、橋脚基礎の前面における渦に着目して洗掘のモデル化を行い、露出状態の橋脚基礎の洗掘深を予測した。Melville・Raudkivi³⁾は、橋脚径に対する洗掘深が最大になる場合のデータを取得するために、砂の移動限界摩擦速度 u_{*c} と等しい摩擦速度 u_{*} になる条件で実験を行った。彼らは、基礎により洗掘が最も抑制される橋脚と基礎の直径比と洗掘深の関係を示し、最大洗掘深に関して相当直径や相当基礎高を用いて予測する実験式を幾つか提案している。Luら⁴⁾は、静的洗掘状態における洗掘深の時間変化を予測するための手法を提案し、洗掘の進行に伴って基礎部が露出する形態の洗掘深の変動特性を捉えることに成功している。これらの研究成果から洗掘深についての知見はある程度蓄積されつつあるものの、洗掘機構を解明する上で不可欠な洗掘・堆積形状や底質移動状況の変化過程についてはほとんど報告されていない。

そこで本研究では、非一樣断面の円柱橋脚基礎周辺の洗掘について、基礎部の根入れや露出の度合による洗掘過程の変化を明らかにすることを目的とし、移動床流れ

実験を行った。計測には、洗掘の3次元形状を詳細に捉えるためにステレオ画像解析を適用して、平衡状態に到達するまでの洗掘地形の時間変化を調べた。また、河床変動量を用いて地形変化に寄与する流砂量ベクトルを泉宮・内山⁹⁾の方法に従って算定するとともに、底質輸送状況と洗掘地形の変化過程を詳しく考察した。

2. 実験方法および条件

(1) 円柱橋脚基礎周辺の洗掘過程に関する模型実験

実験には、長さ12m、幅0.4m、深さ0.4mの長方形断面直線水路を用いた。流入部から下流7~9m区間に砂を厚さ0.135m敷き詰め、その前後区間は砂面と同じ高さになるようアクリル板で底上げし、水路勾配を1/1000にして、一定流量を通水した。図-1に示すような橋脚部（直径 $D=3\text{cm}$ ）と基礎部（直径 $D^*=5\text{cm}$ ）からなる円柱橋脚基礎模型を砂層中央部に設置した。河床砂面に対する基礎部の天端位置 Z を変化させて洗掘実験を行った。基礎根入れ深 $Z>0$ の場合は基礎部が河床砂面下に埋まった状態、 $Z<0$ の場合は基礎部が流水中に露出した状態に対応する。また、それぞれ直径3.2cm（橋脚部の直径と同程度）と5cm（基礎部の直径と同一）の一樣直径円柱を用いた洗掘実験も比較のため実施した。

砂は中央粒径 $d_{50}=0.17\text{mm}$ 、均等係数 $d_{60}/d_{10}=1.78$ 、比重 $s=2.65$ である。平均水深は $h=14.7\text{cm}$ 、断面平均流速は $U_0=17.0\text{cm/s}$ 、平均水温は約 25°C であった。このときFroude数は0.14、橋脚部のReynolds数は5700である。流速分布の計測結果より推定したShields数は $\theta \approx 0.04$ 、砂の移動限界Shields数は $\theta_c \approx 0.05$ であり、静的洗掘状態である。洗掘実験はMelvilleら⁶⁾に従って洗掘深の変化量が24時間で円柱直径 D の5%以下になるまで継続した。この準平衡状態に至るまで洗掘開始から約4日~5日要した。

(2) ステレオ画像解析に基づく河床地形の3次元計測

実験では円柱壁面上の洗掘深の時間変化、周辺の水位や流速を計測すると共に、河床砂面の3次元形状を詳細に捉えるため、次の手順でステレオ画像解析を行った。

①流れを一時停止した静水状態で、円柱周辺の河床を囲むように物理座標が既知である標定点を水中に配置し、4方からカメラ撮影を行い、ステレオ画像を得る。②紙面に印刷した特殊な模様を①と同じ光学設定で撮影し、撮影画像からレンズ歪、焦点距離や主点位置を算定する。③②の結果を用いて①の画像のレンズ歪や主点のズレを補正する。④各画像上の標定点の座標と物理座標との関係から撮影位置や傾き等を求める。⑤各画像上の同一対応点を相互関係法により求めて、④の結果に基づいて画像座標から物理座標に変換することで、河床砂面の3次元座標を算定する。この方法により初期平坦河床から平衡洗掘状態まで洗掘地形を断続的に計測した。なお、地

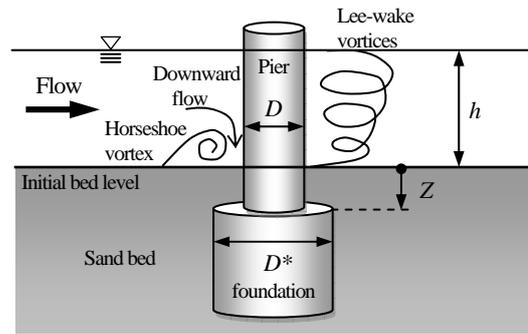


図-1 円柱橋脚基礎のモデルと初期河床面 ($Z/D>0$ の場合)

表-1 ステレオ画像解析による座標計測の精度（水深15cm）

	Estimation (A) mm	Measurement (B) mm	Absolute error (C= A-B) mm	Rate of error (D=100C/A) %
Horizontal dimensions Xa	53.7	54.0	0.3	0.6
	236.7	237.0	0.3	0.1
	295.9	296.0	0.1	0.0
Vertical dimensions Za	383.7	384.0	0.3	0.1
	24.8	25.2	0.5	1.9
	50.6	51.1	0.6	1.1
	75.8	75.0	0.7	1.0
	100.2	99.4	0.7	0.7

形計測の際も水深を約10cm確保して、通水の停止・再開時に洗掘地形が改変されないように配慮した。

本手法による座標計測の妥当性を検証するため、洗掘実験と同様の画像解析条件になるように、被写体の寸法、撮影条件や水深等を決め、座標既知点に対する解析精度を調べた。表-1に水平・鉛直座標に関する解析値、実測値および誤差を示す。水平方向の座標計測の精度は非常に良好で、絶対誤差を概ね0.3mm以下に抑えることができる。鉛直方向の計測精度は比較的劣るものの、絶対誤差は0.5~0.7mmである。従って、本実験の河床地形のスケールを考慮すると、本手法は円柱模型周辺の洗掘・堆積形状を詳細に捉えるのに必要な精度を確保していることが分かった。

3. 実験結果および考察

(1) 円柱基礎部の天端位置による最終洗掘深の変化

図-2は平衡状態に達した最終洗掘深と基礎根入れ深 Z/D の関係を示すもので、縦軸の洗掘深は直径 D の一樣断面円柱の場合の最終洗掘深 S_{eD} で基準化した値を表示した。同図には比較のためMelville・Raudkivi³⁾およびChabert・Engeldinger⁷⁾の実験結果を追加したが、本実験データは既存の実験結果と全体的に同様の傾向を示すことが分かる。すなわち、基礎部の根入れ Z が十分深ければ、洗掘深 S_e は一樣断面円柱のもの S_{eD} と等しく($S_e/S_{eD}=1$)、根入れ深 Z が S_{eD} より浅くなるにつれて、最終洗掘深 S_e は減少し、根入れ深 Z が上部円柱の直径 D と同程度付

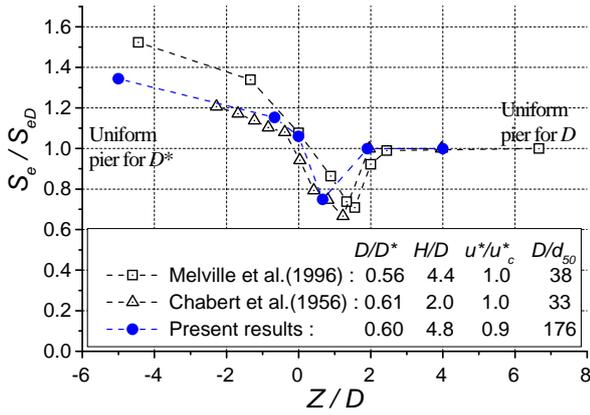


図-2 最終洗掘深と基礎根入れ深 Z/D の関係

近の条件で洗掘深は最小になる。根入れ深 Z がさらに浅くなると、洗掘深は増加し始めて、基礎部の天端位置が初期河床面に近づくとき、洗掘深 S_e は一樣断面円柱の洗掘深 S_{eD} と同程度になる。さらに基礎部が流れに露出するにつれて洗掘深は徐々に増加し、基礎部の直径 D^* に等しい一樣断面円柱の場合の洗掘深に漸近する。ところで、各実験は図に示すように相対水深 H/D 、相対摩擦速度 u^*/u_c^* および相対粒径 D/d_{50} 等の条件が異なるため、洗掘深の基準化に用いた直径 D の一樣断面円柱の場合の最終洗掘深の値 S_{eD} は各実験で異なる。一樣断面円柱の各種パラメータの影響については例えばMellvilleら⁶⁾に詳しい。Mellvilleらの実験³⁾は $S_{eD}D=2.3$ 、Chabertらの実験⁷⁾は $S_{eD}D=2.0$ 、本実験は $S_{eD}D=1.9$ である。そのため、根入れ深 ZD に対する各実験の円柱基礎の洗掘深 S_e は異なるものの、図-2のように S_{eD} で基準化することにより、洗掘深 S_e/S_{eD} は根入れ深 ZD の関数として比較的良好に表されることが分かる。

(2) 洗掘地形の発達過程

基礎部の根入れ深 ZD が異なる各円柱基礎および一樣断面円柱の前方よどみ点での洗掘深の時間変化を図-3に示す。基礎天端が初期河床面よりある程度下にある場合、洗掘の進行を遅らせて、洗掘深を制限する効果があることが分かる。 $ZD=0.67$ の場合、洗掘深は基礎天端位置まで急速に増加するが、洗掘はその深さで約5時間一定になる。その後、洗掘深は再び増加するものの、洗掘深の時間変化率は比較的小さく、最終的な洗掘深は直径 D の一樣断面円柱の場合より小さくなる。一方、基礎天端が初期河床面と同じまたは上にある場合、初期段階の洗掘深の時間変化率は比較的小さいものの、途中から洗掘深の時間変化率が徐々に増大して、最終的な洗掘深は直径 D の一樣断面円柱の場合より大きくなる。

図-4は、 $ZD=0.67$ の円柱基礎周辺の洗掘地形の発達過程を示すものであるが、洗掘地形は左右ほぼ対称であったので、左岸側の河床高のみ表示している。基礎部が露出する前までは、洗掘の発達過程は一樣断面円柱の場合⁸⁾と同様である。洗掘は円柱の斜め上流部(肩部)から

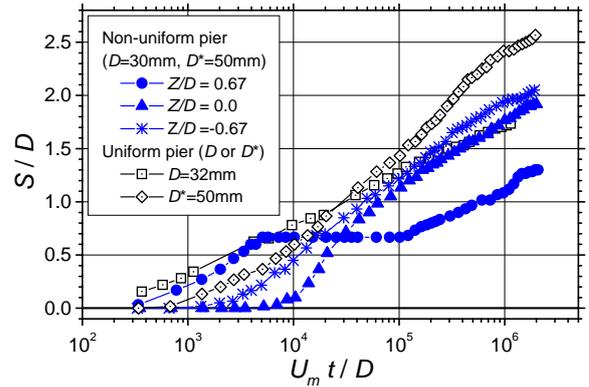


図-3 円柱前方よどみ点の洗掘深の時間変化

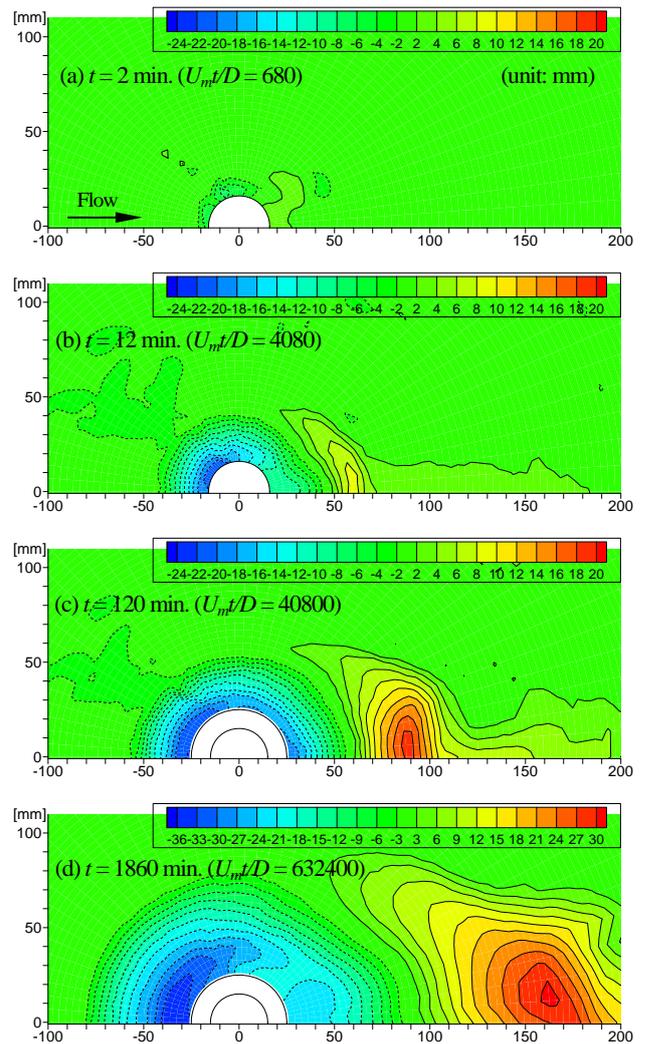


図-4 河床高の時間変化 ($Z/D=0.67$, 負の等値線は点線)

始まり、円柱壁面に沿って周辺に拡大すると同時に、底質の一部は円柱背後の根元付近に堆積する。その後、洗掘が円柱周りに拡大するに従って、底質の水中安息角の斜面を持つ逆円錐形状の洗掘孔が形成され、後流域では堆積が顕著になる。さらに洗掘が進行し基礎部の天端に達すると、洗掘の発達は一時的に抑制される。洗掘孔は天端に阻まれ深くなれないので、洗掘孔斜面が安息角を

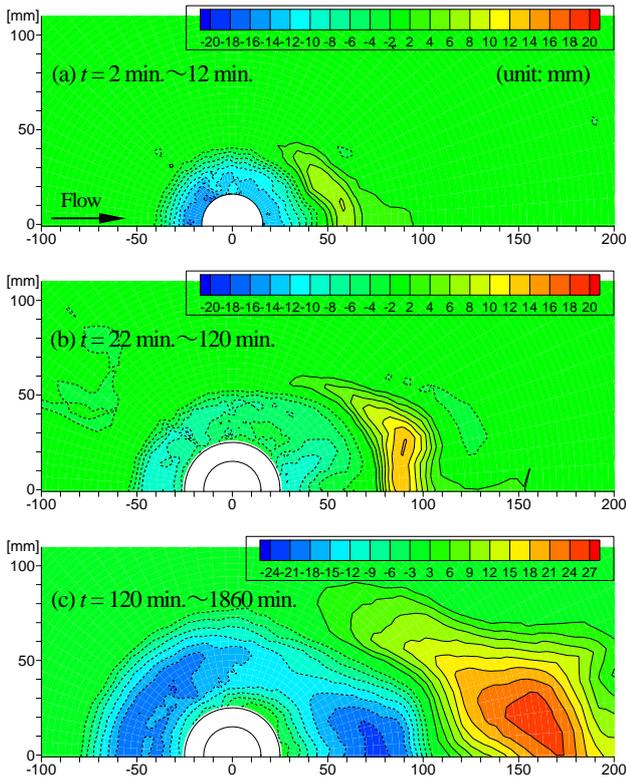


図-5 河床高の変化量 ($Z/D=0.67$, 負の等値線は点線)

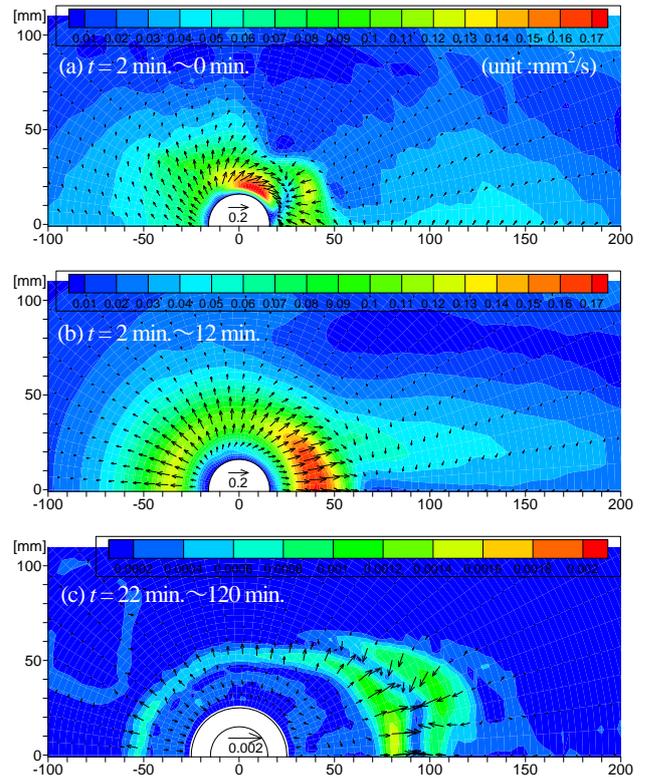


図-6 流砂量のベクトルと等値線 ($Z/D=0.67$)

維持しながら馬蹄形渦や後流渦等(図-1)の作用により侵食され、洗掘孔が平面的に拡大する。この間は円柱下流側での洗掘が顕著になる。円柱上流側の洗掘深が先に天端位置に到達するものの、下流側の洗掘孔斜面の先が基礎部天端の外縁に達して、洗掘は下流側で先に天端位置より深くなる。その後、円柱下流側の洗掘深はあまり増加しないが、上流側の洗掘深はある程度増加しながら、河床地形は徐々に平衡状態に達する。最終的な洗掘・堆積の分布形状は一樣断面円柱の場合⁸⁾と類似する。

図-5は、同じく根入れ深 $Z/D=0.67$ の場合の各時間における河床高の変化量を示す。洗掘が逆円錐形状に発達する初期段階(a)において、河床低下は円柱周方向にほぼ一様に進行する。一方、洗掘が基礎部の天端で停滞する中期段階(b)において、円柱基礎部の前面(上流側)および背面(下流側)での侵食が側面より激しくなる。さらに洗掘が天端以下まで進行した後期段階(c)において、中期段階と似た侵食状況を示すものの、河床低下量は円柱基礎部の前面側より背面側で大きくなり、背面側の侵食域の中心が円柱基礎表面から下流に離れる点が特徴的である。

次に、流砂量の変動特性を把握するために、泉宮・内山⁵⁾の方法を用いて、地形変化から平面的な流砂量ベクトルの分布を算定した。その結果を図-6に示す。この流砂量ベクトル q_i は、Helmholtz分解した際の非回転成分のみで、回転成分を含まないものであるが、河床高の時間変化量 $\partial z_b / \partial t$ と次の関係式を満足しており、地形変化に直接寄与する正味の流砂量成分を意味する。

$$\partial z_b / \partial t = -(1-n) \partial q_i / \partial x_i \quad (i=1,2) \quad (1)$$

n は河床の空隙率(0.3とした)、 x_i は水平面座標である。なお、実験は静的洗掘状態であるため、境界部の流砂量がゼロと見なせる領域で流砂量を算定した。

図-6より、流砂量ベクトルは侵食域で発散、堆積域で収束する傾向の分布を示し、その絶対値は河床高の変化量の空間勾配が大きい所で増大していることが分かる。また、流砂量は時間の経過と共に減少傾向にある。流砂量が最大となる場所は、洗掘開始時(a)では円柱側面付近であるが、洗掘初期段階(b)および中期段階(c)では円柱下流の堆積域付近に変わる。洗掘開始時(a)の流砂量ベクトルの円柱周辺の分布状況は、既存文献に見られる平坦固定床上の円柱周辺の流速分布⁹⁾と類似するとともに、本実験で目視やビデオ映像で観察された砂の掃流状況と全体的に良く整合する。また、洗掘初期・中期段階でも、円柱下流側における流砂状況と図-6の対応は良好であり、砂が堆積域の上流側斜面上で掃流される状況を把握することができる。ただし、洗掘孔が発達した円柱上流側における流砂量ベクトルに関しては、底質移動状況とあまり一致しないので注意が必要である。斜面が安息角を保持しながら洗掘孔が拡大する際は、円柱前面の馬蹄形渦により斜面下方の砂が巻き上げられ、局所的に斜面が安息角を越えて急勾配になると、斜面上方の砂が滑落する⁷⁾。従って、観察による砂の移動は斜面上方では円柱向きであり、算定された流砂量と異なる。この理由は回転成分の流砂量が含まれないことや本手法で浮遊砂の影響を直接的には考慮できない等が考えられる。

図-7および図-8は、基礎部の天端が初期河床面と一致

する $Z/D=0$ の場合の河床高および流砂量分布の時間変化を示したものである。この場合、洗掘初期段階における洗掘や流砂は円柱下流側で卓越することが分かる。洗掘は円柱基礎の下流域で始まり、この洗掘域が後流渦の影響下で徐々に拡大するにつれて、その下流側に一部の砂

が堆積する。この時、後流渦域の戻り流れによる砂の巻き上げが基礎部の後方よみ点付近で激しく生じるため、基礎天端上にも砂が堆積する。一方、洗掘初期段階の馬蹄形渦による円柱上流側の洗掘は基礎天端の存在により進行速度は非常に遅い。それでも円柱根元に形成される

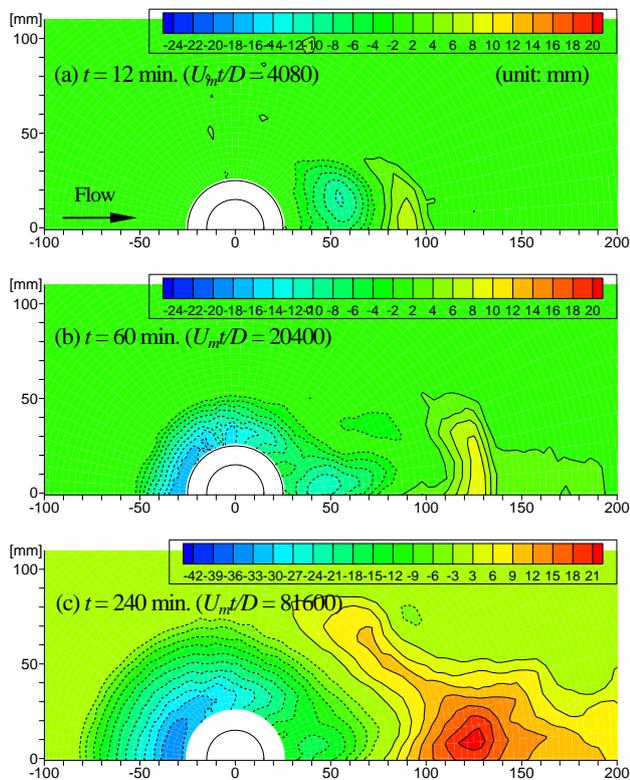


図-7 河床高の時間変化 ($Z/D=0.0$)

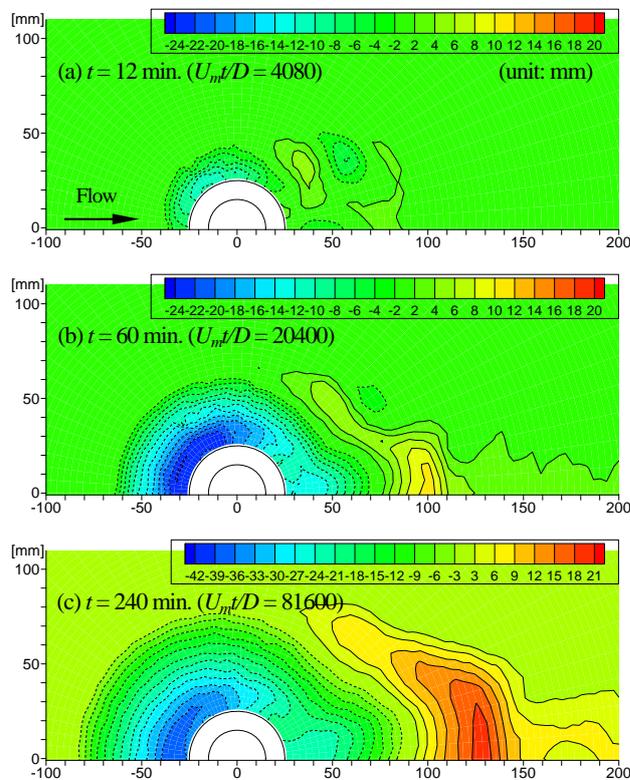


図-9 河床高の時間変化 ($Z/D=-0.67$)

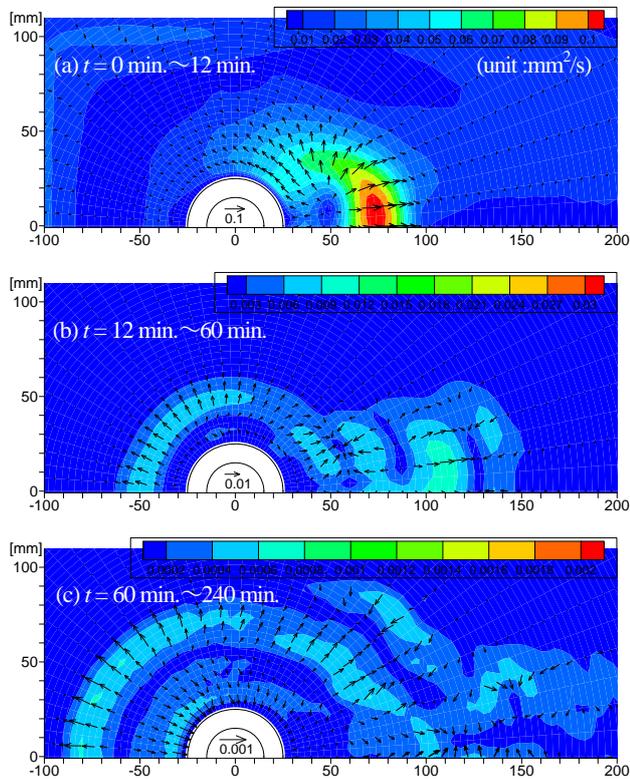


図-8 流砂量のベクトルと等値線 ($Z/D=0.0$)

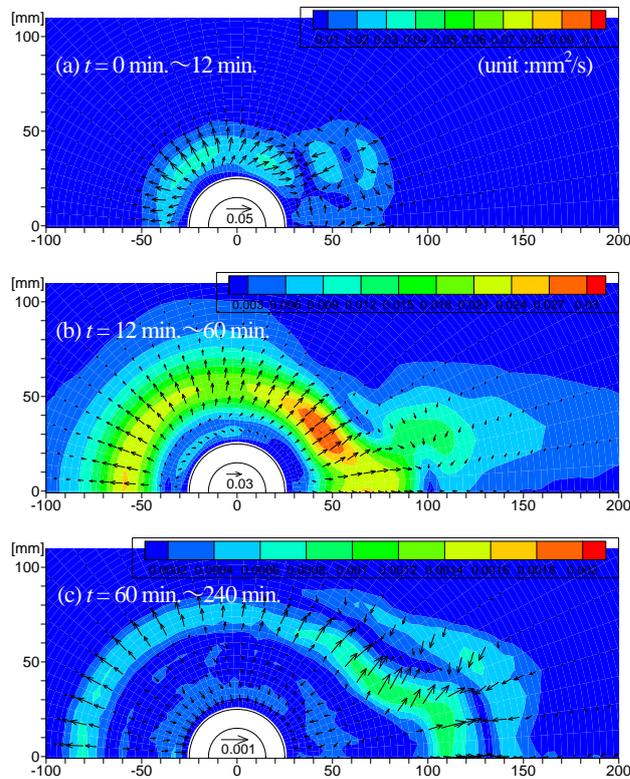


図-10 流砂量のベクトルと等値線 ($Z/D=-0.67$)

馬蹄形渦および流れが円柱付近で収縮するために局所的に加速する流れ（縮流）の作用により、徐々に砂が基礎部の縁に沿って下流へ掃流され、基礎上流側でも洗掘が進行する。その後、基礎前面の洗掘が深くなるにつれて、基礎前面に沿って下降流が発生するとともに、洗掘孔内に馬蹄形渦が形成される。次第に馬蹄形渦によって砂が大量に巻き上げられ始めるため、円柱前面の洗掘深は無次元時間 $U_m t/D \div 10^4$ 頃から急増し（図-3）、最終洗掘深に到達する。図-8の流砂量分布より、流砂は洗掘開始段階において円柱下流部で集中的に生じるが、流砂の範囲は洗掘の進行につれて拡大するとともに、流砂量のピークは円柱上流部へ移ることが分かる。

基礎天端が始から初期河床面より高い $ZD=0.67$ の場合の河床高および流砂量分布を図-9および図-10に示す。この場合、洗掘は一様断面円柱の場合と同様に上流肩部から開始し、徐々に周辺部に拡大して、最終的には円柱上流側に逆円錐形の洗掘孔と円柱下流側に堆積域を形成する。ただし、円柱前面における洗掘深の時間変化率は直径 D および D^* の一様断面円柱の場合に比べて洗掘初期段階は小さい。また、 $ZD=0$ の場合と同様に、途中で下降流や馬蹄形渦の発達に伴って洗掘深の時間変化率は両者の中間程度まで増加することが図-3より分かる。

図-10の流砂量分布より、流砂の卓越する範囲は洗掘の進行と伴に変化することが分かる。洗掘開始段階(a)では円柱基礎肩部から側面にかけて、中期・後期段階(b)(c)では円柱基礎の斜め下流の堆積域付近および上流部の流砂量が局所的に大きい。洗掘開始時、基礎前面に沿う下降流は未発達であるため、馬蹄形渦による砂の巻き上げはほとんどなく、縮流によって基礎上流肩部付近の砂が下流へ押し流される。中期段階では、洗掘孔は基礎肩部から前面まで拡大しており、馬蹄形渦による洗掘孔内の砂の巻き上げが顕著になる。その砂は浮遊状態で円柱側面付近を通過し、下流の堆積域を超えて運ばれる。なお一部の砂は後流渦内に取り込まれ、水面付近まで高く巻き上げられた後に流下する。後流渦は同時に自身の剥離点のある基礎斜め下流の壁面付近の砂を大量に巻き上げ、水面付近まで浮遊した砂が円柱からかなり遠方（堆砂状況から判断して数m以上）下流域へ運ばれる。円柱下流の堆積域の斜面上では、縮流により砂が掃流され、堆積域の頂部が徐々に高くなりながら下流に移動する。洗掘が平衡状態に近づくにつれて、掃流砂がまず見られなくなり、次に馬蹄形渦に砂のよる巻き上げが止まって、後流渦による砂の巻き上げが最後まで観察された。

4. おわりに

本研究では、一様流場の円柱橋脚基礎周辺の河床地形をステレオ画像解析により詳細に捉えるとともに、河床変動量を用いた流砂量の推定および底質輸送状況の観測

を行い、基礎部の根入れや露出状態の違いが局所洗掘の発達過程に与える影響を調べた。その結果、①最終的には一様断面円柱の場合と類似した逆円錐形の洗掘地形になるが、洗掘地形の発達過程、流砂量分布および最終洗掘深は基礎天端の根入れ深によって異なること、②基礎天端が初期河床面よりある程度下にある場合、洗掘深を制限する効果があり、その効果は根入れ深が円柱直径程度である時に最大になること、③基礎天端が初期河床面と一致する場合、当初は洗掘や流砂は円柱下流側で卓越するが、洗掘の進行につれて流砂量のピークは円柱上流側へ移動すること、④基礎天端が初期河床面より上にある場合、初期の洗掘進行速度は②③の中間であるが、最終的な洗掘規模は最も大きく、流砂の卓越範囲は円柱上流肩部、側面、下流、円柱前面へと洗掘の進行と伴に変化すること、⑤平衡状態になるにつれて、掃流砂および馬蹄形渦による砂の巻き上げが止まること、など洗掘地形や流砂の変動特性に関する知見を得ることができた。

謝辞：本研究を進める上で、当時金沢大学工学部土木建設工学科学生の高田亮平君には実験にご協力頂いた。また、本研究の一部は科学研究費（課題番号：19760335）の補助を受けたものであり、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 今本博健, 大年邦雄：2段円柱橋脚の水理特性に関する研究, 第29回水理講演会論文集, pp.585-590, 1985.
- 2) Tsujimoto, T., Murakami, S., Fukushima, T. and Shibata, R. : Local scour around bridge piers and its protection works, Mem. Fac. Technol. Kanazawa Univ., Japan, vol. 20, No.1, pp.11-21, 1987.
- 3) Melville, B.W and Raudkivi, A.J. : Effects of foundation geometry on bridge pier scour, J. Hydr. Eng., vol.122, No.4, pp.203-209, 1996.
- 4) Lu, J.Y., Hong, J.H., Lee, J.J. and Shi, Z.Z. : Temporal variation of scour depth at nonuniform cylindrical pier with unexposed foundation, Proc. of 4th Scour and Erosion, pp.174-179, 2008.
- 5) 泉宮尊司, 内山岳士：漂砂ポテンシャル関数を用いた平面二次元の漂砂量ベクトルの推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.321-325, 1992.
- 6) Melville, B.W. and Yee, M.C. : Time scale for local scour at bridge piers, J. Hydraulic Engineering, vol. 125, No.1, pp.59-65, 1999.
- 7) Chabert, J. and Engeldinger, P. : Etude des affoulements autour des piles des ponts (study of scour at bridge piers), Rep., Laboratoire National d'Hydraulique, France, 1956.
- 8) Umeda, S., Yamazaki, T. and Ishida, H. : Time evolution of scour and deposition around a cylindrical pier in steady flow, Proc. of 4th Int. Conf. on Scour and Erosion, pp.140-146, 2008.
- 9) Sahin, B., Ozturk, N.A. and Akilli, H. : Horseshoe vortex system in the vicinity of the vertical cylinder mounted on a flat plate, Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 18, pp.57-68, 2007.