

橋脚周辺における出水時の 最大洗掘深の実測と河床変動状況

ACTUAL MEASUREMENT OF MAXIMUM SCOUR DEPTH DURING FLOOD AND BED VARIATION AROUND THE BRIDGE PIER

門田章宏¹・竹林洋史²・湯城豊勝³・ヒカルド アラガオン⁴・鈴木幸一⁵
Akihiro KADOTA, Hiroshi TAKEBAYASHI, Toyokatsu YUKI, Ricardo de Aragao and Koichi SUZUKI

¹正会員 工博 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

²正会員 工博 徳島大学助手 工学部建設工学科

³正会員 工博 阿南高専助教授 建設システム工学科

⁴学生員 工修 愛媛大学大学院 理工学研究科生産工学専攻

⁵フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科

In the present study, maximum scour depth around the bridge pier occurred during floods, were measured by means of brick installation under the bed surface near the piers. Field observation proved that it is possible to measure the actual and maximum scour depth by counting the bricks flushed by the floods. The target spot in the present study is Gudo point near the Shimanto-bridge at 9.5km upstream from the river mouth of Shimanto River of Shikoku-island in Japan. There were four main floods occurred for these three years from 2001-2003 and bricks have been flushed, so that the maximum scour depths were recognized for each flood and the scour hole and bed surface shows the significant variation. In this paper, the results of surveys for all these three years and characteristics of scour around Shimanto-river bride are discussed in detail.

Key Words: maximum scour depth, bridge pier, brick installation, bed morphology

1. はじめに

出水時の橋脚周辺に発生する最大洗掘深の実測については、出水時の水位上昇による計測の困難さや出水後に起きる埋め戻しの影響により、実際どの程度の最大洗掘深が発生しているかを把握することは困難とされてきた。橋脚や護岸、ダムなどの河川構造物の根固めあるいは床固め付近に発生する洗掘なども出水後の洗掘の様子は把握できても、出水中の計測は難しいといえる。

本研究グループでは出水中に発生している最大洗掘深を実測する目的で、橋脚周辺にレンガ敷設を行い、出水中の高速流によって橋脚の極周囲が洗掘され、出水後埋め戻された河床を掘り起こし、残ったレンガの数と飛散したものを確認することによって、最大洗掘深の実測を試みてきた。昨年度の報告¹⁾では、僅かな出水ではあったがレンガ飛散が確認され、最大洗掘深と洗掘孔付近の河床状態に関する調査を行ことが可能となり、レンガ敷設による計測が最大洗掘深の計測に有効であることが確

認された。なお、ここで調査対象とした計測地点および橋梁は、四万十川の河口から約9.5kmに位置する四万十川橋(通称:赤鉄橋)およびその左岸側の河床平坦部であり、橋脚の上流および左岸側にそれぞれレンガ敷設を行っている。現在、この四万十川橋周辺では、低水護岸、橋脚等の洗掘対策など様々な課題が挙げられている。

本研究では、最近3年間(平成13～15年度)の一連の調査で得られたレンガ飛散状況と最大洗掘深の測定に加え、出水状況および出水による被害状況の調査を行い、洗掘孔内と橋脚周辺の出水前後の粒度分布調査および横断面・平面測量を行った。他方、模型水路実験によって四万十川橋・橋脚モデル周辺の洗掘状況に関する実験をこれまで行い報告してきた²⁾が、これらの実験結果と照合しながら洗掘深と流れの関係を議論し、実測で得られた最大洗掘深がどのような流れと洗掘状況下で発生したのかを考察することとする。

なお、本調査および研究は平成13年度開始の河川懇談会共同研究「河川構造物周辺の局所洗掘の実測と予測精度の向上」の一環として行われている。

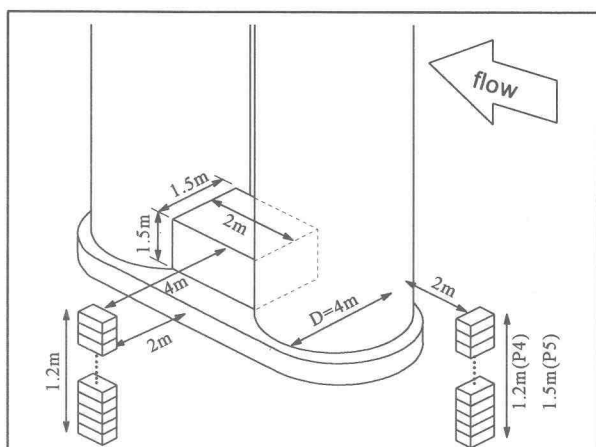


図-1 レンガ敷設の概略図

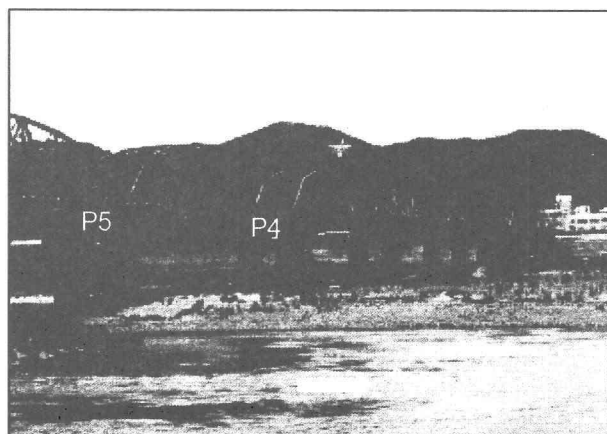


写真-1 四万十川橋左岸側の橋脚

2. レンガ敷設および出水による飛散状況

(1) 橋脚周辺における河床のレンガ敷設

調査開始直後(平成13年7月)に行ったレンガ敷設の概略図を図-1に示す。レンガ敷設は、四万十川橋左岸側のやや平坦な箇所P4(左岸側から数えて4番目の橋脚)およびP5の二つの橋脚(写真-1)の上流および左岸側に行った。レンガ敷設地点は、橋脚の縦断・横断中心線上を通り、かつ橋脚上流端部から上流側2m、橋脚コンクリート面から左岸側4m(橋脚左岸端部から左岸側2m)の位置とした。レンガ敷設の手順として、まず橋脚周辺の根固め工が施されている位置まで掘り進め、番号を付けたレンガを底部から周辺の河床の高さまで積み上げた(写真-2)。その後、埋め戻しを行い周辺の河床高と合わせるようにほぼ平坦にならした。レンガ単体のサイズは高さ6cm、長さ21cm、幅9.4cmである。また、積み上げたレンガの深さは、上流側でP4について1.2m、P5については1.5mである。また、左岸側のレンガの敷設は、P4、P5ともに深さ1.2mまで行った。なお、最大洗掘深と水深の関係の従来結果(例えば水理公式集³⁾)によると、根固め工が橋脚周辺に存在しないと仮定した場合、橋脚幅 $D=4.0\text{m}$ 、出水時の橋脚P4、P5付近の水深 $h_0=3.4\text{m}$ として、最大洗掘深 z_b は5.4mとなるが、ここでは根固め工までの

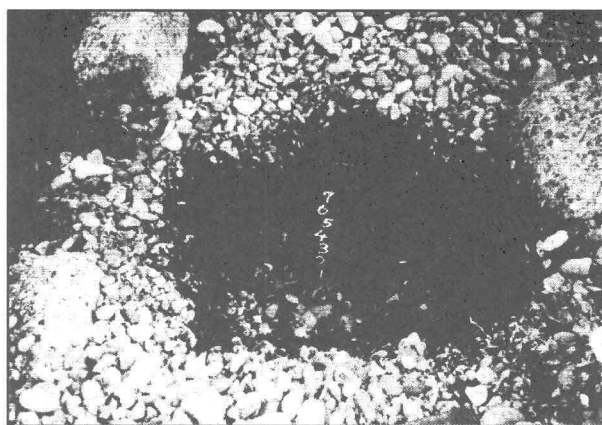


写真-2 レンガの根固め底部からの積み上げ

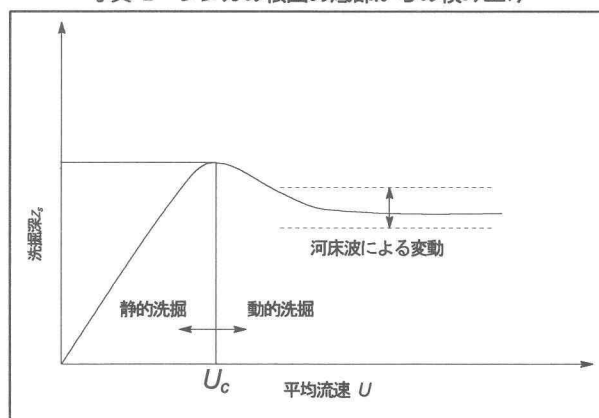


図-2 動的洗掘と静的洗掘

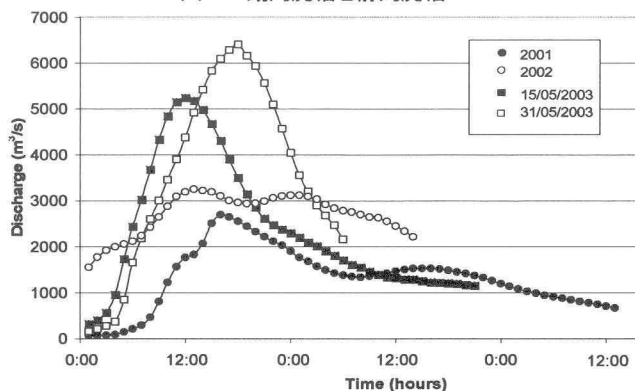


図-3 平成13年7月～平成15年5月末に起きた出水

洗掘が限界であると考え、上記のようなレンガ敷設深さとした。あくまで推測であるが、これまでの主な洪水履歴から考えると約 $6\sim 7000\text{m}^3/\text{s}$ 程度の規模の出水であれば動的洗掘(図-2)が起きて上流からの流砂が発生すると考えられ、またレンガの飛散数を見ることで最大洗掘深の計測が可能であると考えられる。また、出水後の洗掘孔を掘り起し、出水開始直後の初期に静的洗掘が起きている時点の粗粒化が起きている位置を判定することによっても最大洗掘深を推定することができると考えられる。

(2) 出水によるレンガ飛散状況

平成13年7月にレンガ敷設を実施後、平成15年5月末の時点までの間に主な出水が計4度発生した。これらの出水に関する流量ハイドログラフを図-3に、洗掘状況をまとめたものを表-1に示している。初めの出水は平成13年

表-1 レンガ敷設地点における各出水の最大洗掘深

出水 発生日	2001.7.17 (レンガ敷設時)	2001.9.14	2002.9.1	2003.5.15	2003.5.31
最大流量		2,700m ³ /s	3,100m ³ /s	5,700m ³ /s	6,700m ³ /s
最大水位		4.00T.P.m	4.90T.P.m	6.07T.P.m	6.98T.P.m
P4	上流側 (20 bricks)	0 brick	0 brick	10 bricks	11 bricks
	左岸側 (20 bricks)	0 brick	1 brick	17 bricks	18 bricks
	最大洗掘深	~3cm	~9 cm	105 cm	111 cm
P5	上流側 (25 bricks)	1 brick	7 bricks	19 bricks	19 bricks
	左岸側 (20 bricks)	0 brick	1 bricks	20 bricks	20 bricks
	最大洗掘深	40cm	76cm	148 cm	148 cm

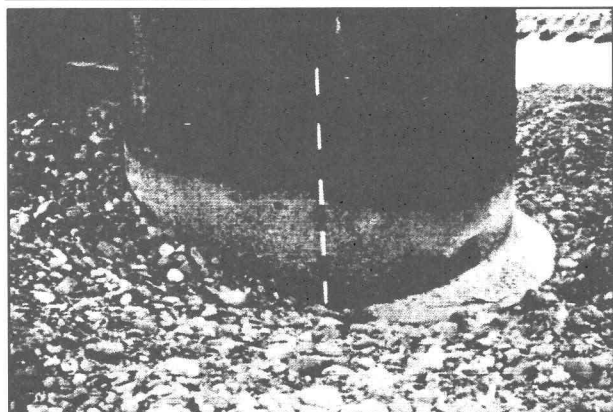


写真-3 平成14年出水後の洗掘孔の様子 (P5右側上流)

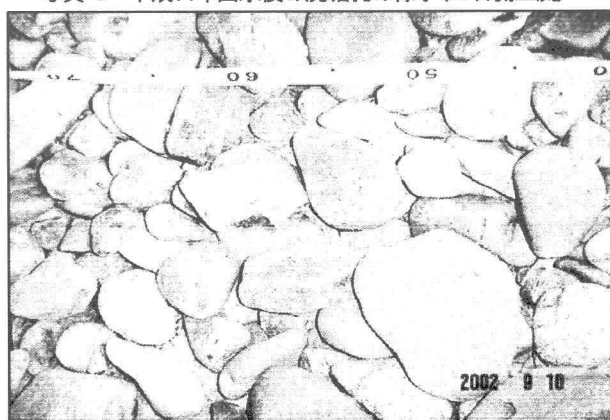


写真-4 平成14年出水後の洗掘孔表面

9月14日に出水が発生し水位約4.0(TP.m), 最大約2700m³/sの流量を記録し, P5左岸側のレンガが1個消失した。また, 約一年後の平成14年9月1日に台風15号による出水が発生し, 具同観測所において, 水位が4.9(TP.m), 流量が3100m³/sを記録した。この出水は二度のピークを迎え, 比較的大きな流量が長い時間持続していた。また, レンガ飛散状況に関しては, 上記の橋脚周辺に埋設したレンガのうちP5上流に埋設したレンガが全部で7個流出した。これらの出水後行った観測では, 洗掘箇所周辺からの洗掘孔(写真-3)の深さは64cmであり, レンガ設置当初からの変化は約76cmと算定された。また, 洗掘孔の表面を見ると比較的大きな粒径の玉石で覆われており(写真-4), 埋戻しによる砂の堆積が見られなかったため, 動的洗掘が発生するほどの大きな出水ではなく, 橋脚上流が静的洗掘状態であったと考えられる。

さらに, 平成15年5月には, 図-3に示すように最近では見られなかったほどの大きな出水が連続して二度発生

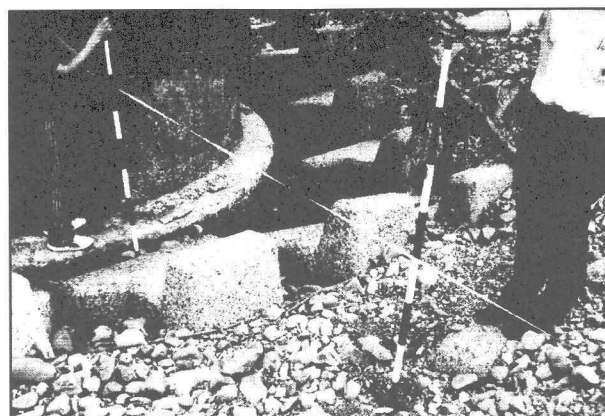


写真-5 平成15年5月15日出水後の洗掘孔の様子 (P5上流)

し, 5月15日に前線による豪雨の影響で発生した出水では, 水位6.07(TP.m), 最大約5700m³/sもの流量が流れ, 5月31日の台風4号による出水では水位6.98(TP.m), 最大約6700m³/sを記録し, 約2年間の観測期間中, 出水毎にその規模は増しているようである。これら二つの大きな出水の結果, 前回の二度目の出水で洗掘が発生したP5周辺のレンガは, 三度目の出水時点でほとんどのレンガが飛散していた。特に, 左岸側のレンガは橋脚間の縮流による影響で大きく洗掘され全て飛散したものと推察される。また上流側においてもほぼ同程度の洗掘が橋脚前面の下降流の影響で洗掘され, 現地の洗掘状況を見ると, 敷設当初より大きく様変わりし, 橋脚の根固めかそれ以下の領域まで洗掘されていた(写真-5)。静的洗掘状態であった二度目の出水後の写真-3と比較してもその変化の様子が認められる。なお, レンガ敷設した地点の洗掘深は, 先述したように橋脚前面から2mほど離れているため約1.5mと評価されているが, 橋脚の極付近で実際に起きている洗掘は人の身長を遙かに超える約3.5mにまで至っていた。また, 二度目の出水とは異なり動的洗掘状態であったことが, 後述する実験結果との比較で判別できた。写真-5にもその様子が分かるが, 橋脚の鰐より下部まで洗掘され, 橋梁の安定性そのものも劣ってきているようである。ショベルが橋脚極付近まで入ることが不可能であったため, ここでは橋脚前面から2m離れた地点の洗掘状況を議論しているが, この結果を利用し洗掘孔の安息角を考慮して橋脚極付近の洗掘深を評価すれば, 同程度の洗掘深の値が得られることが分かっている。なお, 個々のレンガの飛散した分布, ならびに洗掘深と流れとの関連については, 平面測量の結果や実験結果との比較を行うことにより次節において述べることとする。

一方, 左岸側に近いP4周辺の洗掘に関しては, 側岸に近いこともあり出水時の流れは抑えられ, また出水時の流れがやや右岸側に偏っている傾向があるため, 洗掘の規模もP5と比較して全体的に小さいといえる。平成14年9月のレンガ敷設後二度目に起きた出水では, レンガの飛散が一個程度であったため洗掘が起きなかったと判断した。一方, 平成15年5月に発生した出水では大きく洗掘され, 写真-6に示すようにP4周辺の洗掘も橋脚の鰐の



写真-6 平成15年5月15日出水後の洗堀孔の様子 (P4上流)

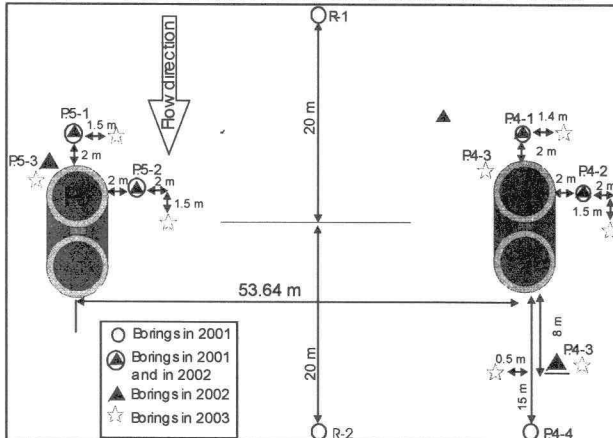


図-4 河床材料の試料採取地点

下部にまで至っている様子が分かる。

上述した結果より、レンガ敷設による最大洗掘深の測定が適用可能であることが確認できたことに加え、これらの実際の出水による最大洗掘深の測定結果は、今後の室内実験や数値解析などの最大洗掘深の解析に有用であると考えられる。

3. 洗掘孔内と橋脚周辺の河床状態の変化

(1) 橋脚周辺の平面測量および粒度分布調査

四万十川橋周辺の出水前後の河床状態を把握するため、橋梁周辺の広範な平面・横断面測量をこれまで継続して行ってきたが、ここではレンガ敷設した橋脚P4およびP5周辺の河床状態の変化を観察することを目的とし、密度が0.5mの設定で橋脚周辺の上下200m×左右350mの範囲について平面測量を行い、その結果を議論することとする。なお、測量を行った時期は、調査開始直後の平成13年7月の出水前、および平成14年9月の出水後、ならびに平成15年5月の二つの出水後である。

一方、橋脚周辺の河床における粒度分布の調査を行うために、粒度分析試料採取を行った。図-4に試料採取地点の位置を示している。平成13年7月の出水前に行った採取地点は、先述したレンガ敷設の地点で、P4およびP5の各橋脚の上流側および左岸側であり、敷設作業と同時に採取を行った。さらに、P4の下流側15m下流側地点の

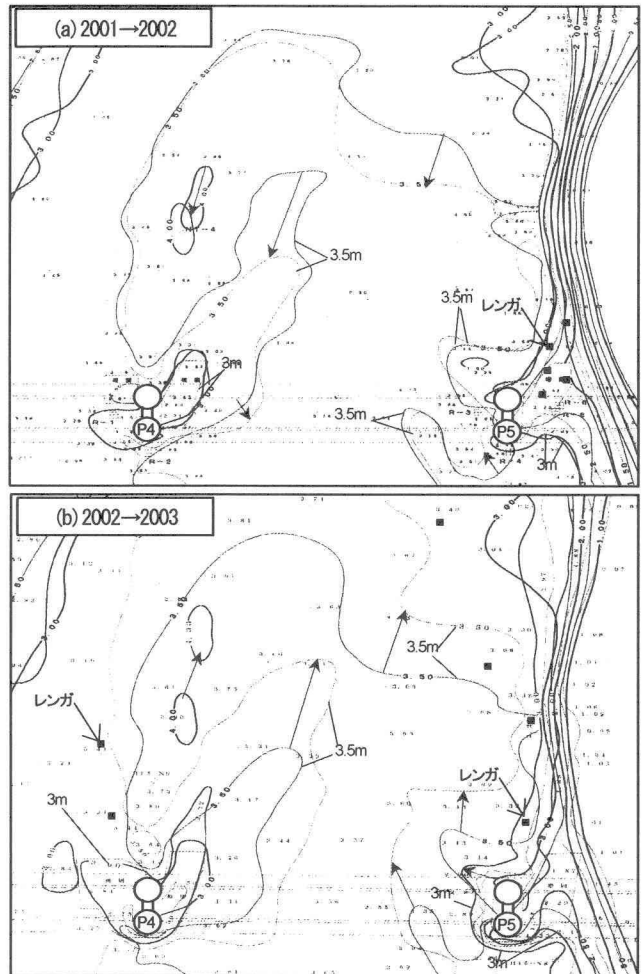


図-5 レンガ敷設地点周辺の河床平面図の変化

採取、加えて橋脚前後周辺の粒度分布を見るためにP4とP5の中心を通る橋脚上下流側の二点を採取した。平成14年および平成15年の出水後では、上述のレンガ敷設地点とほぼ同じ地点を採取し、また橋脚の直上流端では洗掘孔が形成されたため、この付近の粒度分布をも評価する必要があることから試料採取を行った。さらに、P4の下流側では若干堆積した様子が平成13年度の河床と比較して上流側に確認できたため、橋脚下端から約8mの地点を採取した。

採取方法については、現地の河床状態をみると、調査地点の周辺全域にわたって河床表層が粗粒化状態であったため、それぞれの採取地点について、上層30cm、下層20cmの二層に分けて掘り進め、それぞれの層の砂礫を採取した。上層は数cm程度の玉石が占めており30cmとしたが、下層については粒度の変化が見られず細かな粒径のものが多かったため20cmとした。

(2) 出水前後の河床状態の変化

図-5(a)および(b)は、前節で述べた橋脚周辺でレンガ敷設地点付近の出水前後の河床平面図について、それぞれ平成13から14年、平成14から15年の変化を矢印で示したものである。図(a)に示すように、飛散レンガの分布状況に応じて、P5付近の河床が変化していることが分か

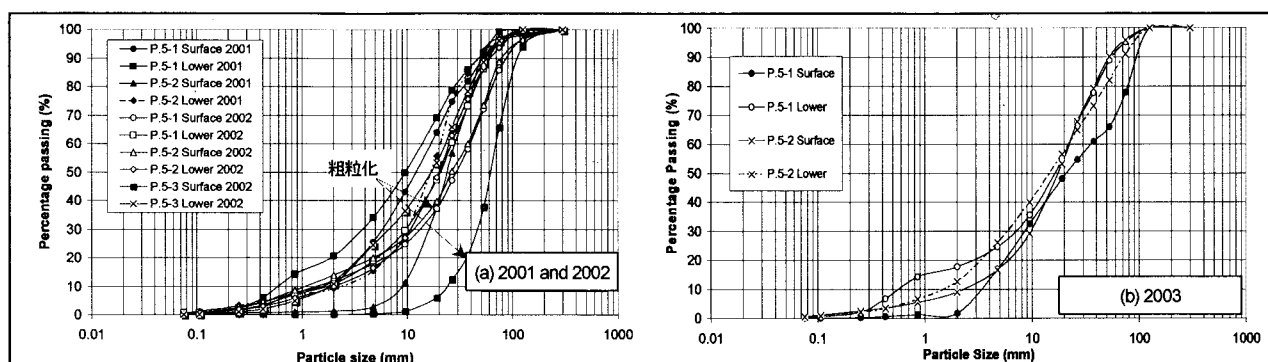


図-6 P5周辺の粒度分布の変化

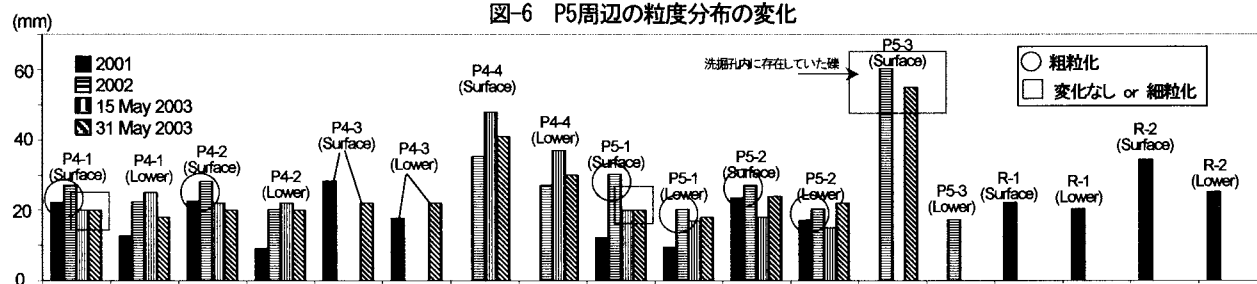


図-7 出水前後の全採取地点における d_{50} 粒径

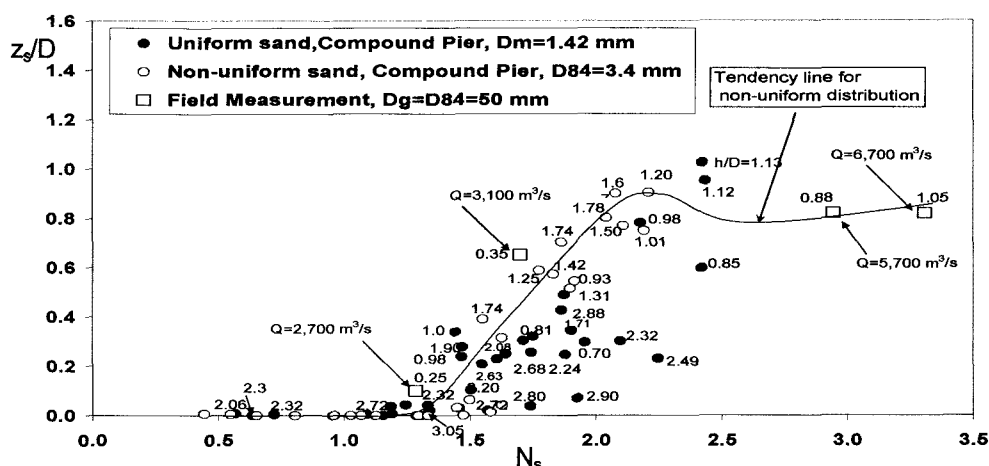
る。特にP5直上流側の洗掘は右岸側に傾いた河床勾配に応じて、洗掘もやや右岸側に傾いて起きていることが認められる。一方、P5の左岸側やレンガ飛散が起きなかったP4では、下流側の堆積が上流側へやや進行していることが確認できるが、ほぼ同じ河床状態が保たれていると言える。一方、図-5(b)の大きな出水が連続して二度発生した後の河床状態の変化状況を見ると、P4およびP5ともに、洗掘孔の形状が明確に現れていることが分かる。特に、図中に示す3mの等高線からその傾向が明らかである。図(a)の出水ではその規模は小さく、また水位も下がってくるため、流路形態に応じた流れの集中化が起こり、前述した橋脚周辺における洗掘の右岸側の偏りが生じたものと判断できる。これと比較して図(b)では、最近に見られないほどの大きな出水であったため、水位上昇に伴って、流路形態の流れへの影響はむしろ小さくなり、橋脚左岸側にも洗掘が同様に発生している様子が伺える。また、橋脚下流側の河床形態も図(a)と比較して大きく様変わりしている様子が認められる。レンガ敷設した橋脚前面や左岸側においても、1~2m程度の洗掘が確認でき、その傾向は顕著である。このように出水の規模が小さい場合は流路形態による流れの偏りが生じ橋脚極周辺のみ局所洗掘が起きるが、大きい場合は橋脚周辺河床の大きな変動に加えて、橋脚極付近の局所洗掘にも大きく影響を及ぼすことが分かる。

粒度分布調査より得られた通過重量百分率に関する結果の一例として、P5周辺の粒度分布に関して、図-6(a)として平成13年7月の出水前および平成14年9月出水後、さらに図-6(b)として平成15年5月に発生した第一回目の出水後に関する調査結果を、それぞれ示している。一般に、これら全ての出水前後では、表層を構成している土砂の方が、下層の土砂の粒径より大きいことが分かる。平成14年9月出水後の変化に関しては、P5周辺で出水に

よる河床表層の粗粒化が起きている。特に、洗掘孔内での粒度は約5cm程度の大きな粒径礫で占められており、細砂のみが礫間の隙間を抜け移動する静的洗掘状態であったことが窺える。一方、さらに大規模な出水が発生した平成15年5月の調査時点では、前回の出水後と比較してほとんど変化が見られず、上流側からの砂礫の移動に加えて、洗掘孔内の細砂および礫の交換が活発に行われた動的洗掘状態であったためと推察される。

図-7は出水前後の全採取地点についての d_{50} 粒径を示したものである。平成14年出水後では、P4およびP5の周辺において河床表面の粗粒化が進行していることがこの図からも認められる。特に、レンガが飛散したP5の上流側(P5-1)の表層では d_{50} 粒径が出水後約2倍以上に大きくなっており、この付近の細砂が下流側へ運ばれるアーマリング現象が起きたものと考えられる。特に、洗掘孔内のP5-3地点では、 d_{50} 粒径が6cmに達するほど大きな粒径により構成されていた。これらは、レンガ飛散状況などの結果も含めて、静的洗掘が起きていたと判断されたことから、上流側から運ばれた礫ではなくP5橋脚下層にすでに存在していた礫であると判断できる。一方、レンガ飛散が見られなかったP4付近においても全体的に d_{50} 粒径が出水後増加しており粗粒化が起きていることが分かった。さらに、大規模な出水が起きた平成15年における二つの出水後の結果を見ると、粒度は逆に小さくなっており、またP4上流側(P4-1)およびP5上流側(P5-1)では、これらの出水間でほとんど変化が見られず、出水中の洗掘孔内は砂礫が交換している動的平衡状態であったことが分かる。以上の出水前後の平面測量および粒度分布の調査結果より、レンガ敷設時当初より予想していたものと同様、静的・動的洗掘状態下における出水規模がどの程度のものかが明らかにできたといえる。

構成砂 (mm)	一様砂 $D_{50}=1.42$	混合砂 $D_{min}=0.15$ $D_{50}=2.2$ $D_{max}=5.0$
流量 (liters/sec)	5.0 ~ 20	
標脚径 (mm)	48.2	
実験ケース	105	29



4. 模型水路実験による最大洗掘深との比較

本研究では、レンガ敷設による最大洗掘深の結果がどのような流れの状況下で発生していたかを検討するため、現地の橋脚モデル(1/100縮尺)を再現した洗掘実験を行った。なお、図-1に示した四万十川橋の橋脚は二つの円柱が組み合わさった構造になっており、その脚部には鰐のある形状となっている。実験条件では、表-2に示すように流量(および水深)を様々に変化させ、一様砂および混合砂について実験を行った。また実験に用いた水路は、水路部分の全長20m、水路幅50cm、水路深さ50cmの循環式直線水路であり、水路のフレームに台車を設置し、橋脚前面でポイントゲージを降ろすことにより、洗掘深を随時測定できるようにした。

橋脚周辺部における局所洗掘現象を支配するパラメータとして、流体や河床材料、また橋脚形状に関するものの関係で洗掘深が決められると考えられ、様々な経験式が提案されてきた⁴⁾、本研究では流速と関連づけ、

$$N_s = \frac{u_0}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd}} \quad (1)$$

きくなった時点で上流からの砂礫の流入が始まり動的洗掘状態になり、洗掘深は小さな変動を繰り返しながら一定の値を示す³⁾。これらの傾向を考慮すると、現地で発生した平成13年および14年に発生した二つの比較的小規模な出水では静的洗掘状態であり、平成15年に発生した二つの出水下では橋脚周辺は動的洗掘状態であったことが判断できる。

本研究では、橋脚周辺における出水中の最大洗掘深を実測する目的で、四万十川橋・橋脚周辺にレンガ敷設を行い、平成13年7月から平成15年5月の間に発生した主な4度の出水について、レンガの飛散状況の調査を行った。また、調査領域の平面測量や粒度分布調査を行い、出水毎の変化を観察した。また、これらの調査の結果を室内実験とも照合し、洗掘と流況の関係を明らかにした。

謝辞：最後に、本研究を遂行するにあたり、国土交通省四国地方整備局中村河川国道事務所より多大なご協力を頂いた。記して謝意を表す。

- 1) 門田章宏, 竹林洋史, 湯城豊勝, ヒカルド・アラガオン, 鈴木幸一: 四万十川橋・橋脚周辺の局所洗掘に関する現地調査, 水工学論文集, 第47巻, pp.949-954, 2003.
- 2) Ricardo de Aragao, Akihiro Kadota, Koichi Suzuki: Local Scour around the Piers of the Shimanto River Bridge, Annual Journal of Hydraulic Eng., JSCE, Vol.47, pp.673-678, 2003.
- 3) 土木学会: 水理公式集平成11年版, pp.128-224, 1999.
- 4) Johnson, P. A., Comparison of Pier-scour Equations Using Field Data, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No. 8, ASCE, pp.626-629, 1995.
- 5) Carstens, M. R.: Similarity Laws for Localized Scour, J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol.92. No. HY3, pp.13-16, 1966.

- 1068 -