

物体周りの組織渦を利用した浮遊砂の促進について

Promotion of Sediment Suspension Utilizing Coherent Vortices
around Obstacle

田中規夫^{*}、金子哲也^{**}

By Norio TANAKA and Tetsuya KANEKO

The promotion of sediment suspension in a laboratory flume is discussed. Due to strong upward flow behind a spherical obstacle fixed at the bottom, bed materials are transported as suspended load. Horse-shoe vortices in front of the obstacle generate scour hole around it, and arch-shaped vortices behind the obstacle produce ripples in its near downstream area. Sand particles are entrained by the coherent vortices even after the scour hole has developed, which is detected by the distributions of suspended sediment. The obstacle placed in front of a weir can increase the amount of the suspended sediment passing over the weir.

Keywords: suspended load, coherent vortices, obstacle, weir

1. はじめに

河川に堰や床止めなどの横断工作物が作られると、その下流部においては給砂量が減少し、その結果、河床の低下が生じ、みお筋などの深掘れ部がひいては側岸侵食や堤防の決壊を生じさせることがある。また、河口部においては河口砂州が形成され河口閉塞などの問題が生じることがある。

一般に、河川に粗度をつけることは洪水時の抵抗となり、蛇行部におけるベーン工などを除けばあまり好まれない傾向にある。しかし、堰の前などに浮遊砂を促進するような構造物をつけておき、越流時に堰の前面部にある砂を下流側に押し流すことが出来れば、堰による給砂量の減少はある程度防げるはずである。しかも、その浮遊砂促進工は堰による抵抗に比べるとそれほど流水を阻害するものとはならない。

底面上の物体の後方には強い上昇流を持った組織渦が形成されることがわかっている^{1), 2)}。従来、物体周りの組織渦の研究は、流れの可視化による流況観察と条件付き点計測によりその組織渦の持つ情報が引き出されてきつつあるが、その現象の複雑さが故に、それを工学的に応用した例は、河川の場合にはあまりみあたらない。

そこで、本研究では、組織渦を利用した浮遊砂促進工の開発を考える。物体としては、平板に半球を取り付けた物体周りの流れが、筆者らの研究により流れ場の特性が明らかになりつつあるので、砂の中に球を半

* 学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻

** 学生会員 東京大学工学部土木工科学学生

(〒113 文京区本郷7-3-1)

分埋めたような状態の物を考えることにする（形状の影響については、ここでは取り扱わないこととする）。浮遊砂を促進するといっても、物体の周りが洗掘され定常状態に達すると、もはやあまり浮遊砂を促進する効果は期待できないと思われる。しかし、物体により作られた上昇流が流速分布や濃度分布を変化させるので、定常になったあとも堰を越えていく砂の量を増やすことは期待できる。従って、ここでは洗掘される領域を求めることと、洗掘後における流速分布ならびに濃度分布の変化を調べることにより、どの程度の容積を下流に対して押し流せるものなのかを検討することにする。

2. 実験装置および実験方法

実験には、全長20m、幅40cm、高さ50cmの水路を使用した。実験は、まず上流から10mの地点に堰を設け、その上流側の水路床上に石炭粉（平均粒径0.18mm、比重1.48、限界摩擦速度0.91cm/s、沈降速度0.85cm/s）を厚さ4cm程度に平坦に敷き詰めたのち、球を堰の上流地点に半分が埋まるような状態で沈設した（図-1）。実験に使用した球はスチール製で、半径が1.0cm、1.5cm、2.0cmの3種類を使用した。実験は下流側を堰あげた状態で行い、物体の上流、下流1mの地点で水深 H を計測し、エネルギー勾配 i_e 、摩擦速度 u_* を求めた。

実験は2段階に分けて行われた。1つは、埋設された球がその周りにどのような河床変化を引き起こすかということを調べ、河床形状が充分定常になった後、その下流側にどのような濃度場、速度場を作り出すかという実験である（実験条件、表-1のRUN1～RUN3、A実験と呼ぶことにする。なお、表-1で、 U_0 は接近流の断面平均流速を表す。）。もう1つは、その球が堰の近くに付設されたときに堰を越える浮遊砂量をどの程度変化させることができるかという実験であり、堰と物体の距離を変化させてその効果を検討した（RUN4、RUN5、B実験と呼ぶことにする。）。A実験の場合には、球と堰の距離 X_R を4.0mの位置（球の半径の200倍から400倍）に設置し、堰前面部に生じる渦との干渉がない状態で行った。また、B実験の場合には物体と堰との距離 X_R を変化させて、堰を越えていく流れとの干渉について調べた。なお、流速の測定にはプロベラ式流速計を、濃度の測定には光学式濁度計を使用した。浮遊砂量は濃度分布と速度分布を掛け合わせて求めたもの以外に、サイフォンにより実際に抜き取って求め、比較検討を行った（サイフォンによる抜き取り速度は測定点の流速にはほぼ合わせた。）。ここで、とくにこのB実験においては非定常過程において浮遊砂量がどの程度あり、また河床形状が安定した後もどの程度の巻き上げの効果があるものなのかを検討した。従って、堰頂部において10分毎に濃度分布と流速分布の同時測定を行った。ひとつの計測線を図る時間は3分30秒であり、この間も河床形状は変化しているが、時間間隔よりは短く、その大体の傾向を抑えることはできるものと思われる。流れ場は、流速を測定した以外に、染料による可視化とアルミ粉による断面視によりその概略をとらえた。また、河床形状の測定は、通水を止めた後にポイントゲージにより行った。

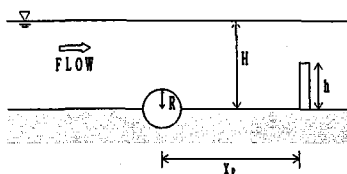


図-1 実験の概略

表-1 実験条件

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5
U_0 (cm/s)	16.5	16.5	16.5	10.6	10.6
H (cm)	10	10	10	8	8
i_e	0.0025	0.0025	0.0025	0.0029	0.0029
u_* (cm/s)	1.42	1.42	1.42	1.54	1.54
R (cm)	1.0	1.5	2.0	2.0	2.0
X_R (cm)	400	400	400	10	20
h (cm)	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0

3. 半球の周りの洗掘過程ならびに洗掘後の流速分布、濃度分布の特性について

図-2にRUN3の通水10分後の河床形状を示す。物体前面部には筆者ら²⁾により調べられているように、物体を取り囲む馬蹄形状の渦が形成される。円柱の場合と同様に³⁾、この渦が形成される領域は局所的に底面せん断力が高く、物体に沿って局所的な深掘れが生じる(A)。この深掘れはほぼ左右対象に生じ、前面部で巻き上げられた砂は物体の後方にほぼ左右対象に堆積する(B)。中央断面においては、再付着点より下流側に、

再付着点付近より持ち上げられた砂が堆積する(C)。(B)や(C)の河床波背後からは、剝離渦が放出され、周期的に砂を巻き上げるのが観察される。そして、これらが引金となってその下流側に第2、第3の河床波が形成される。

通水後1時間も経過すると河床形状そのものはあまり目だった変化はなくなり、物体回りの洗掘溝や河床波背後から巻き上がった砂が、物体や河床波によりつくられた剝離渦によりかなり下流まで持ち上げられて流下するのが確認される。

図-3 (a), (b)に通水後、1時間経過したのちのRUN1, RUN3の河床の等高線を示す(半径 R で無次元化)。いずれの場合も物体径の2倍程度の洗掘溝が形成され、物体の側方から後方にかけて浅くなり、物体背後に堆積し、また、 $4R$ 付近において左右対象に堆積した領域が確認される。

RUN1およびRUN3を比較すると形状がほぼ相似であることがわかる。ただし、流速や摩擦速度の変化や、粒径の変化による沈降速度の変化により沈降する場所が変化し、下流部の起伏の形状については様々な場合が起こりうると思われる。ここでは、この河床形状について議論するのではなく、粗度により河床変化を引き起こすことそのものを重要ととらえる。すなわち、掃流状態にある砂を河床形状の変化により生じる剝離渦により巻き上げ、浮遊砂に変換することが重要なのである。

定常後の流れを可視化した結果を図-4 (a), (b)に示す。(a)は、前面および側方部の洗掘溝を回り込む流れを染料により可視化したものであり、図中A, Bで示したものが砂を巻き上げる馬蹄形渦ならびに物体背後の剝離渦である。(b)は中央断面をアルミ粉により可視化したものであり、物体後方の剝離渦Bをとらえたものである。

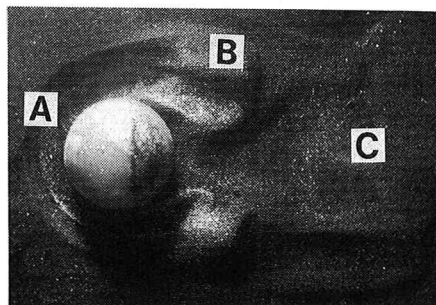


図-2 河床の変化

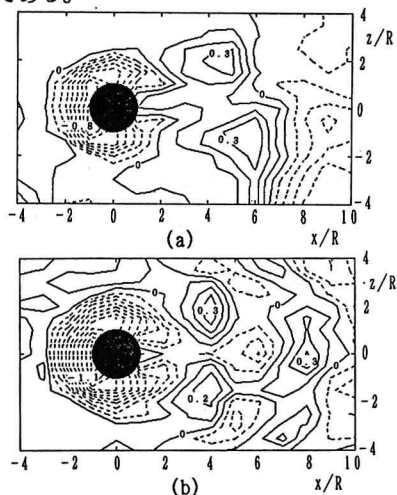


図-3 河床の等高線(実線が隆起、点線が洗掘)

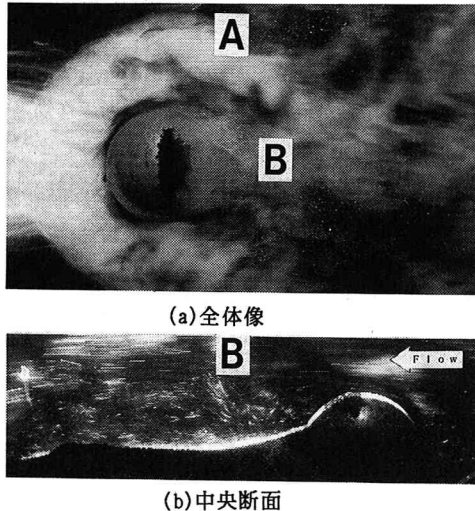


図-4 可視化結果

次に、RUN3における下流部の濃度(C)の分布並びに速度(u)の分布の計測結果、ならびにそれらを掛け合わせて求めた浮遊砂量(q)の分布を図-5 (a)~(c)に示す(ここで、濃度Cは無次元の体積濃度を用いた。)。 (a)の濃度分布において、組織渦の通過する剝離領域内部に濃度分布のピークが見られるがそれらは流下方向に微妙な変化をしているのがわかる。これらを可視化観察結果を考慮してまとめると、 $4R$ 付近で底面付近の濃度が高くなっているのは、物体前面部および側方部の洗掘溝から持ち上げられた砂の影響であり、 $8R$ 付近でその値が一端小さくなっているのは、その位置が河床の山の間にあり(図-3参照)、その両わきの断面

に浮遊砂が逃げているためと思われる。しかし、12Rから20Rにかけては、河床波の背後にあたり濃度分布に再びピークが見られ、河床波背後からの砂の巻上がり^{4), 5)}を示唆している。一方、(b)の流速分布は剝離域直後でかなり遅くなっているが流下するにしたがって回復しているのがわかる。従って、(c)のそれらを掛け合わせた浮遊砂量の分布は剝離渦の通過する高さ付近にピークのあることがわかる。そして、少なくとも20R付近までは浮遊砂量の分布は接近流の値よりも大きくなっており、この位置までは浮遊砂巻き上げの効果を十分に期待できることがわかる。

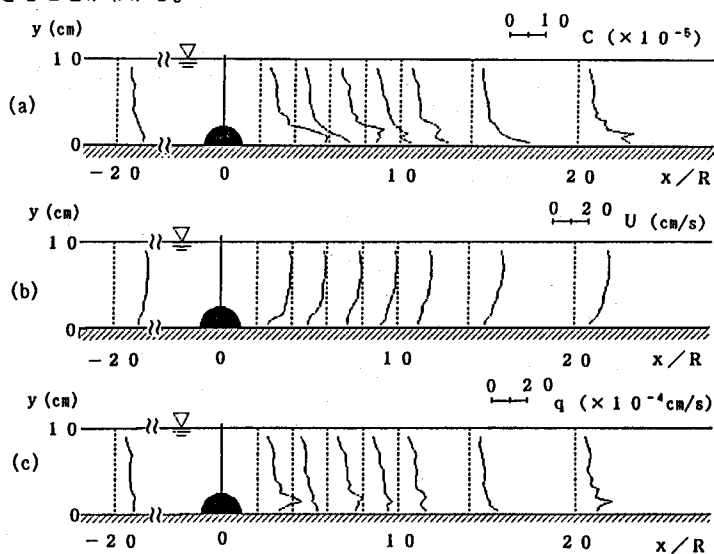


図-5 物体下流の濃度C, 流速U, 浮遊砂量qの分布 (RUN3)

4. 堰前面部における浮遊砂の促進工としての効果について

3の実験結果から物体を堰などの横断工作物の前におくと、堰の設置により止められてしまった掃流砂を浮遊砂という形に変換して堰を越えさせることができるはずである。しかしながら、粗度自身が引き起こす洗掘の影響で堰前面部が洗掘されるようではいけないし、かといって、粗度の影響により巻上がられた砂が沈降してしまえば何にもならない。従って、物体高さや堰の高さとの比によって適した位置が存在するはずである。

ここで、3より、20R付近までは、浮遊砂の巻き上げ促進の効果が期待できるので、堰の前面部にこの範囲で設置すれば、堰前面部の上昇流に乗って堰を越えることができるはずである。もちろん、堰前面部に物体を設置することにより、物体後方の剝離流と堰前面部の渦が干渉して複雑な流れになるが、ここではその流れ場そのものの変化は取り扱わず、実際に堰を越える浮遊砂量がどの程度増えるものなのかということについて検討することとする。

図-6 (a)~(c)、図-7 (a)~(c)に、それぞれRUN4, RUN5の濃度分布、流速分布、浮遊砂量分布を示す。但し、T0, T1, T3, T4, T5はそれぞれ通水後0, 10, 30, 40, 50分後の測定結果を表す。

RUN4, RUN5とも物体がない場合に比べて、流速分布が板の近くで遅くなり高速部がやや上方にずれるのが確認される。これは、物体後方の剝離渦により底面付近の低速流体が巻き上げられているためと思われる。

RUN4は物体と堰との距離が5Rと比較的近い場合である。この場合は、図-3に示した河床形状の内、第1波までが形成される。従って、定常になる時間は比較的短く、浮遊砂として巻き上げられるのは、物体回りの洗掘によるものである。すなわち、図-6 (a), (c)の濃度分布、浮遊砂分布からもわかるように、T0, T1, T3と増えていき、T4, T5になるとおちてくる。河床形状もこのときはほとんど変化せず、T5のときは定常になったと判断できる。また、浮遊砂量は定常時においても物体がないときに比べて非常に多いことがわかる。

つまり、物体前面部まで掃流状態できたものが洗掘溝に取り込まれ、渦により巻き上げられ、浮遊砂に変換されていると判断できる。一方、RUN5の場合は、物体と堰との距離が10Rの場合であり、図-3の河床形状の内、第2波までが形成される。従って、定常になるまでの時間はRUN4よりも長く、浮遊砂として巻き上げられるのは、RUN4のものに加えて、物体背後の河床から巻き上げられるものも含まれる。すなわち、図-7(a), (c)の濃度分布、浮遊砂分布からもわかるように測定した範囲内では、時間がたつにつれて上昇する。この結果、非定常時における輸送量を考えると、RUN4よりもRUN5の方が多く輸送できると思われる。

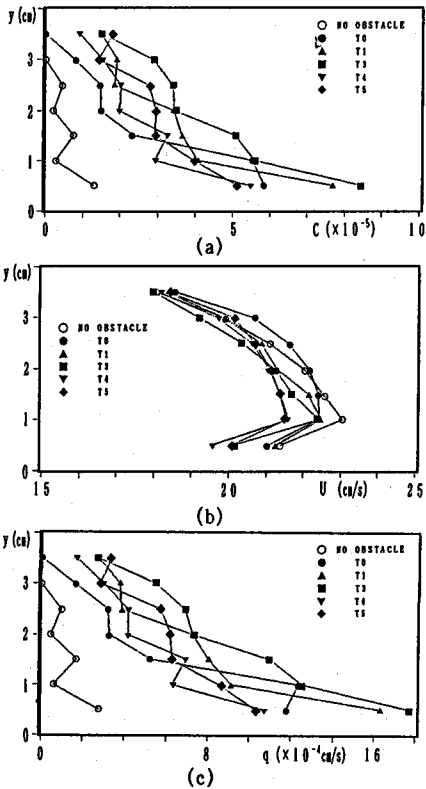


図-6 堰頂部におけるC, U, q (RUN4)

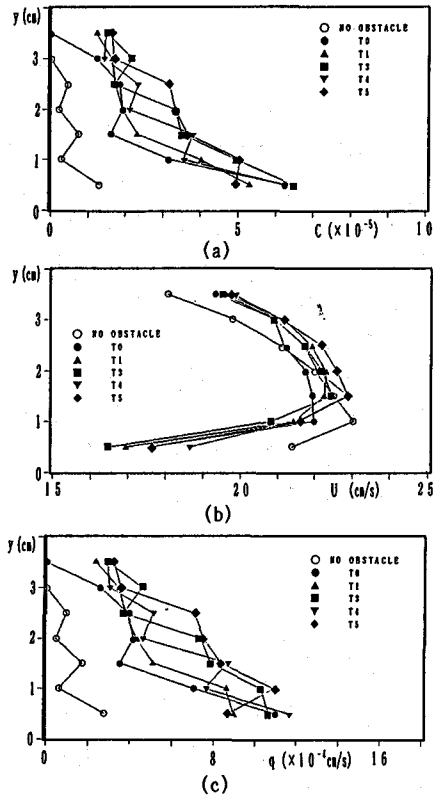


図-7 堰頂部におけるC, U, q (RUN5)

図-8(a), (b)はRUN4, RUN5における浮遊砂の輸送量を実際にサイフォンにより抜き取ってその総量を示したものである。但し、RUN4の場合は通水後0~30分(T03と呼ぶ)と通水後40~70分後(T47)をひとまとまりとして、RUN5の場合は通水後0~30分(T03)と通水後50~80分後(T58)をひとまとまりとして抜き取った。抜き取った位置は、中央断面(L1)と中央断面から物体の直径分だけ側方の断面(L2)において、堰から0.5, 1.5, 2.5cmの高さの点である(堰頂部における水深は4cm)。

図-8(a), (b)からすぐにわかることは、RUN4, RUN5とも浮遊砂量は堰に一番近い点において多く、高さが変化するにしたがって激減していることである。また、RUN4の場合はT03の方がT47よりもL1, L2とも多い。これは図-6, 7の実験において示したようにT47の場合はほぼ定常になっているからである。それに対して、RUN5の場合はT03よりもT58の方が浮遊砂量が多い。これは、時間が経過するにしたがって河床形状が変化し、第1波背後からの浮遊砂の発生があるためと思われる。また、同じT03を比較すると、RUN4の方がRUN5よりも浮遊砂量が多い。これは、RUN5の場合には、物体近傍で巻き上げられた浮遊砂のうちの半分くらいが流下するにしたがって沈降してしまうためと思われる。また、L1, L2を比較すると場合によってはL2の方が多い場合もあるが、これは物体を回り込む馬蹄形渦により運ばれている成分で、特に堰に近い高さの点でその傾向が見られる。また、RUN4, 5とも浮遊砂量qの値は、図-6, 7の値とほぼ同じとなる。

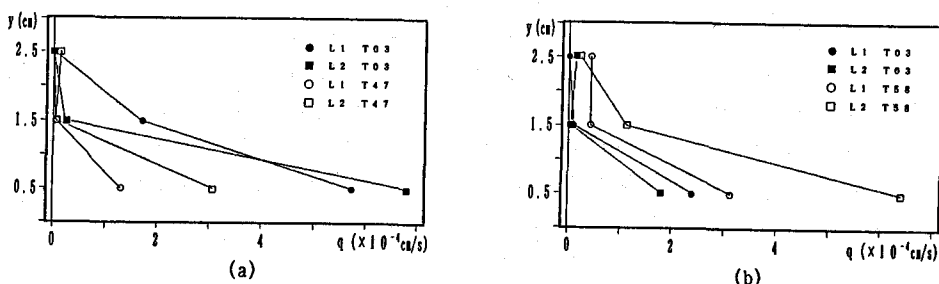


図-8 堰頂部における浮遊砂量 q (サイフォン) ((a)RUN4, (b)RUN5)

5. 結論

本研究は、底面上の物体背後に生じる組織渦が強い上昇流をもっていることに着目し、組織渦を浮遊砂の巻き上げ促進に利用するための可能性を検討したものである。すなわち、堰などの横断工作物の設置などにより流砂量が減少した地点において掃流砂を浮遊砂に変換させて堰を越えさせることを想定したものである。これにより、以下の諸点が明かとなった。

(1) 河床に球を半分ほど沈めた状態で設置すると、その周りに生じる馬蹄型渦や回り込む流れにより生じる2次流や物体背後の剝離渦により、球の周りに激しい洗掘が生じる。洗掘された土砂は球の後方4.0R位の位置にはば左右対象に堆積する。その堆積高さは球の半径の0.3倍程度で、その下流側にはその堆積形状が引金となり、第2、第3の河床波が作られる。河床波の背後からは剝離渦の放出にともなって砂が巻上がるのが確認され、浮遊砂促進という観点からは、非定常時における局所洗掘による浮遊砂の輸送のほか、河床形状がほぼ定常に達した後も、物体による上昇流が、掃流砂を浮遊砂に変換する役目を十分に果たすものであることが確認された。

(2) 球を設置した中央断面において流速分布、濃度分布、浮遊砂分布の流下方向に対する変化を計測したところ物体がない場合に比べて、濃度分布の重心が上方にずれるのが確認された。この重心のずれは、河床波が形成される20.0R付近まで続いており、堰前方における砂粒子が堰を越える限界高さとの関連で、堰の前面の適切な位置に物体を設置することにより堰を越える砂の量を増加させる効果のあることが期待できる。

(3) 堰前面部に球を設置して堰頂部における浮遊砂量を測定したところ、場所や時間による浮遊砂量の相違点が明かとなった。設置位置に関しては現象の起こる時間的なスケールの差や河床形状の差が確認され、いずれの場合も物体の設置により堰を越える浮遊砂が促進されることが明かとなった。

謝辞：東京大学土木工学科玉井信行教授、河原能久講師に御指導頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Jackson, R.G.: Sedimentological and Fluid-Dynamic Implications of the Turbulent Bursting Phenomenon in Geophysical Flows, J.F.M. 77, Part 3, pp. 531~560, 1976.
- 2) Tamai, N., Asaeda, T. and Tanaka, N.: Vortex Structures around a Hemispheric Hump, Boundary Layer Meteorol. 39, pp. 301~314, 1987.
- 3) 吉川秀夫、福岡捷二、岩間汎、曾小川久貴：橋脚の洗掘ならびにその防止に関する考察、土木学会論文報告集、第194号、pp. 83~90, 1971.
- 4) 関根正人、吉川秀夫：砂漣上の浮流砂に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第387号、pp. 95~103, 1987.
- 5) Ikeda, S. and Asaeda, T.: Sediment Suspension with Rippled Bed, Proc. ASCE, Jour. of Hyd. Div., No. 3, vol. 109, pp. 409~423, 1983.