導水および循環流場の制御による河口域での 堆砂低減効果に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF WATER INTAKE AND CIRCULATION CURRENTS AS COUNTER MEASURES FOR SEDIMENTATION AROUND THE RIVER MOUTH

吉田政貴¹・田島芳満²・佐藤慎司³

Masataka YOSHIDA, Yoshimitsu TAJIMA, Shinji SATO

¹正会員 修(工) 東京大学大学院学生(前) 社会基盤学専攻 (〒113-8656 文京区本郷7-3-1)

²正会員 Ph. D. 東京大学大学院准教授 社会基盤学専攻 (同上)

³フェロー会員 工博 東京大学大学院教授 社会基盤学専攻 (同上)

This paper aims to investigate the possible function of a new system which prevents the blockage of the river mouth and reduces the amount of trapped longshore sediment transport rate across the river mouth. Instead of using fossil energy, the proposing system utilizes natural waves to increase the flow rate at the river mouth by controlling the wave-induced circulation currents. Laboratory experiment on the fixed bed was first carried out to capture the hydrodynamic characteristics on the proposing system and also extract the optimum conditions such as allocations and sizes of the structures. Numerical experiments then followed the laboratory experiment to investigate the quantitative budgets and effectiveness of the water intake and circulation currents. Finally, the movable bed experiments were performed to examine the expecting functions of the proposing system..

Key Words : River mouth, sedimentation, circulation current, submerged breakwater

1. はじめに

河口部における閉塞の緩和と沿岸漂砂の連続性の維持は、様々な河川において本質的な課題である。従来の導流堤にサンドバイパスを組み合わせ、人工的に沿岸漂砂の連続性を維持する事例も見られるが、比較的小規模な河川や途上国などでは費用や持続性の観点で現実的な工法であるとは言えない。本研究では、波による自然営力に基づき河口部の流況場を制御し、河口域での掃流力を向上させることにより、維持費用が小さく、かつ河口閉塞緩和と沿岸漂砂の連続性維持を両立可能な漂砂制御手法を提案することを目的とする。

提案するシステムの着想となった既往研究の一つとして、導水に関するものがある。たとえば、山本ら¹⁾は潜堤付き孔空き防波堤による環境改善効果に関して現地調査を基に検証しており、静岡県馬込川では天竜川からの掃流用水により、河口閉塞を緩和させる試みがなされている(たとえば、富田ら²⁾)。本研究では、沿岸域から河口部へ導水することにより、掃流力を高めるとともに、沿岸漂砂の遮断を緩和させる新たな漂砂制御工法の提案を試みる。

また本研究ではシステムの中に潜堤を導入する。

本来潜堤は、海岸付近に幅広い浅瀬をつくるために離岸に設置するが、本研究では河口内に設置し、潜堤周辺に循環流を生成することで開口部の冲向き流速を促進させるために用いる。

本研究では図-1に示す通り、潜堤による循環流と左岸側において海から川への導水工を設置することで沿岸漂砂の連続性の維持を試みる。想定するシナリオは次の通りである。高波浪時には導水工から土砂および波を越波させ河道内に入れる。その際、潜堤開口部の幅を狭くし開口部の流速を増すことで土砂輸送力を強める。通常の波浪時は、導水工からは波のみを越波させ河道内の流量を増加させる。潜堤周辺は、循環流により開口部の土砂輸送力を促進すると共に、潜堤背後に貯め込む土砂を吐き出す機能を持つ。

この様な自然営力のみに依存する漂砂制御工が構築されれば、わが国だけでなく途上国など常時のメンテナンスが困難な地域において、非常に有益であるが、河口に構造物を設置すること、自然営力に頼っている点で外力場の条件が不確実性を伴うことなど、様々な課題が残されている。これら全ての課題を克服しなければ実用的なシステムの構築には至らないと考えられるが、本研究では、まず河道内に

図-1 漂砂制御システムの模式図(固定床実験条件)

おける流況場のみに着目し、潜堤、導水工および河川流により複雑な流況場を明らかにするとともに、このような外力場の下で、河道内での掃流力がどの程度向上させることができるのか、そして、その量は河口部に構造物を設置する、というリスクに見合う効果があるのか、などについて検証することを目的とする。

本研究ではまず固定床実験を行い、流況場の解明を試みる。次に数値実験によりその詳細を分析し、最後に移動床実験を行い実際の土砂移動傾向を確かめる。

2. 固定床実験

固定床実験では、最適な掃流力を有する制御システムを絞り込むために様々なケースの実験を行う。制御システム内の変数は、導水工の有無、潜堤の位置(岸沖方向および左右岸)、幅、長さの4つ、外力変数としては、波高の異なる3段階(波高 1cm, 2cm, 4cm)に対し、周期はそれぞれ0.8s, 1.0s, 1.2s)の単一直入射波と、3段階の河川流(線流量 $0\text{cm}^2/\text{s}$, $1.6\text{cm}^2/\text{s}$, $3.3\text{cm}^2/\text{s}$)である。表-1に実験ケースを示す。

表-1 固定床実験ケース

case	潜堤の条件				導水工		
	幅(cm)	長さ(cm)	岸からの距離(cm)	右岸/左岸	有/無		
case1	34	40	80	右岸	有		
case2	38		50			90	無
case3							
case4		40	左岸		有		
case5							
case6							

固定床実験では、電磁流速計および容量式波高計を用いた時々刻々の流速および水位の計測に加え、下園ら³⁾と同様のPTV法に基づき河道内における底層付近の水平平均流速場を計測した。PTV法による平均水平流速場の計測結果を図-2に示す。

case1からcase4は全て潜堤を右岸側に設置したが、潜堤の幅や長さ、設置位置の岸沖方向距離を様々に変化した結果である。これらを比較すると、左岸の流速値が最も大きいのは潜堤の幅、位置を変えたCase3であった。しかしながら開口部右端、つまり潜堤に最も近いところでは、Case3の流速値は小さい。更に潜堤を左岸に設置したCase5では、左右端共に17~19cm/sと比較的に大きい流速値が観察され

図-2 平均流速ベクトルの平面分布(case1~4, 6)

図-3 各測点(図-2)における平均流速の比較(□ : case3, ○ : case 5, △ : case6).

た。また流況場に関しては、Case1, 4, 5が比較的明瞭に循環流が生成されていると見受けられるが、それ以外のケースでは不明瞭ながらパターンの異なる循環流が生成されている。

次に、図-2に示した測点1～5において電磁流速計で計測した底面付近の平均流速を図-3に整理する。図-3では、開口部での流速が相対的に大きかったcase3を中心に、導水工を設けなかったこと以外はcase3と同条件にしたcase5、case3と同条件であるが潜堤を左岸側に設置したcase6の3ケースのみを比較している。図中、潜堤右岸で導水工を導入したcase3は四角で、潜堤右岸で導水工を設置しなかったCase5は丸で、潜堤左岸で導水工を設置したCase6は三角で示した。

まず導水工の効果について考える。case3とcase5を比較すると、図-3より測点5を除いて全てのcaseで、Case3の導水工有の場合の流速値が大きい。すなわち、導水工による河道内への流量増加が、潜堤横開口部の冲向き流速を促進させたと言える。また、導水工有のCase3において測点3および測点5における流速値が、他の測点における流速値と比べて相対的に小さく、潜堤を右岸に設置したcase3では開口部から導流堤端まで、流速分布に比較的大きなばらつきがあることが分かった。

次に潜堤を右岸あるいは左岸に設置したcase3とcase6について、その違いを考える。図-3より、測点1～3では潜堤を右岸に設置したcase3の方が大きいものの、潜堤横の開口部にあたる測点4～5では、case6の方がともに大きく、右岸設置ほどの大きなばらつきが見られなかった。またcase3では測点4と5、すなわち、開口部の横断方向で流速が大きく異なったのに対し、case6では両者の違いが相対的に小さかった。

以上の固定床実験による流速値や流況場の観察から、河口部、特に、潜堤開口部における漂砂の流送力の増大という観点では、Case3やCase6が実施した実験条件の範囲内では最適であることが分かった。しかしながら、異なるリスクを伴う潜堤と導水工で、どちらがどの程度流送力の増強に寄与しているかなど、さらに詳細な検討が必要であると考えられる。そこで、次節では既往の数値モデルによる数値実験を実施し、固定床実験結果のさらに詳細な分析を試みる。

図-4 潜堤横開口部における平均流速の再現結果(実線)と実測値との比較(× : case1, ◇ : case2, □ : case 3, △ : case 4)

3. 数値実験による検証

固定床実験では、潜堤のサイズや設置位置を変化させることによって河道内での流速がどのように変化するか調べた。本節では、固定床実験で得られた現象をより詳細に分析する目的で数値モデルによる実験結果の再現とその検証を試みる。

本研究で対象とした潜堤を有する場合における波・流れ場を計算するためには、まず、急激に水深が浅くなり、時には水面が天端に触れる可能性がある場で、安定に波の浅水・碎波変形を行えること、また、潜堤開口部では非常に大きな冲向き流速が発生することが予想されるため、波・流れ干渉場を正しく算定できること、また、水深が浅い領域での数値解析となるため、波浪場の碎波減衰を適切に算定できること、潜堤や導流堤などの構造物に伴う反射や回折の影響を正しく算定できること、などが数値モデルに要求される基本スペックとなる。そこで、本研究では潜堤周辺における循環流場を妥当に、かつ、安定に再現できることが確認されている田島ら⁴⁾が改良を加えたMadsenら⁵⁾透過層を考慮した修正ブシネスク方程式に基づく数値波浪モデルを用いることとした。これにより、導水工周辺の波・流れ場についても特別なモデル化を行わず、実際の形状を透過層として与え、海底面を不透過層として与えて数値計算を行った。図-4に潜堤を右岸に設置したcase 1～4における潜堤横開口部での流速値の再現計算結果と実測値とを比較する。潜堤横開口部における流速値を定量的に正しく再現するには、潜堤を越えて上流側に伝播する質量輸送量と、導水工から流入する流量を適切に再現できている必要があるが、本モデルでは、開口部における流速値を妥当に再現できていると言える。

次に、case3、case5、およびcase6に対し、時々刻々の計算結果から算定した潜堤上部、潜堤横開口部、導水工流入部、さらに河川流上流境界部における流入量を算定し、それぞれのケースで比較する。

図-5 数値モデルによる平均流場の再現結果および計算された輸送流量の収支(赤字が流量. 単位は cm^3/s)

Madsenら⁵⁾の修正ブシネスク方程式では、時々刻々の線流量が計算されるため、規則波を入射させた条件で計算終了前の2周期分の波に対して、それぞれの線分上での時々刻々の線流量に格子間隔と時間ステップを乗じて足し合わせ、最後に得られた総流量を入射波周期で除すことによって各流入・流出部での流量を算定した。こうして得られた流量と断面平均流速の周期平均値の平面ベクトル分布を図-5に示す。算定した流量は、全ての領域で足し合わせると確かに収支がゼロとなっている。また平均流速の流況について、計算では導水工からの流入が明確に表示されているのに対し、PTVによる流速分布(図-4)では導水工による流入があまり明確に見えない。これはPTVに用いたプラスチック粒子の比重が1.1程度であり、PTVでは底層付近における流れ場を計測していることに起因していると考えられる。実際の実験では、相当量の水が導水工から河道内へと流入している様子が確認できている。導水工からの流入ベクトルを除けば、河道内における循環流のパターンを、数値モデルは回転の方向や位置、潜堤横の開口部に至る流線の方向などの観点で、PTVによる実測データを妥当に再現していると言える。

次に流量の収支について考察する。導水工なしの場合(case5)では、潜堤背後に明瞭に循環流ができているのに対し、導水工有りの場合ではそのパターンが大きく変化し、導水工からの流量がより卓越的になっていることが分かる。各断面における平均流量は、導水工無しに比べ、導水工有りの場合の方が、開口部断面の流量が $22\text{cm}^3/\text{s}$ 多くなり、潜堤上を上流側に流れる量は $27\text{cm}^3/\text{s}$ 少なくなっている。これにより、導水工は開口部の土砂輸送力を強化するという実験結果が定量的に確かめられたと言える。

次に、左右岸の違いを比較して見ると、流況場については左岸に潜堤を設置したcase6の方が、場が乱れずに綺麗に右岸側開口部に流れていることが分かる。断面流量を見ても、右岸に設置したcase3に比べ、潜堤上を上流側に流入する流量は左岸側に設置したcase6の方がcase3よりも $15\text{cm}^3/\text{s}$ 大きく、導水工や河川流入量は変わらないため、結果として潜堤横の開口部を流出する流量もcase6の方が $15\text{cm}^3/\text{s}$ 大きく計算された。このことから、固定床実験では数値実験ほど明確な違いは見出せなかったものの、循環流場の発達による土砂流送力の確保という観点では、潜堤を左岸設置の方が有利であると考えられることが分かった。

5. 移動床実験

最後に、固定床実験及び数値実験で確かめられたメカニズムにおける実際の土砂輸送経路の傾向を見るため、移動床実験を行った。固定床実験と同様に実験スケールは1/100を想定して行い、できるだけ粒度の小さい砂として、中央粒径 0.13mm の細砂を用いた。現地スケールにすれば粒径 1.3cm と実際よりも大きくなってしまいが、本実験では提案したシステムで実際に漂砂移動が促進されることを確認することが大きな目的であるため、流体力に対して相対的に底質粒径が大きい本実験条件で十分な漂砂移動が認められれば、現地においても十分な効果を見込めるものと考えた。

実験では、まず各実験条件における初期地形条件を可能な限り同一となるようにならし、波高 4cm の直入射波(規則波)を10分間、さらに波高 2cm の直入

射波(規則波)を20分間作用させた。波を作用させた後、ゆっくりと排水しレーザ変位計を用いて水深を計測した。

本論文では代表的な計測結果として、図-6に case3およびcase6における水深の実測値を比較した。図に見られるように、case3およびcase5共に、波を作用させた後には開口部周辺で大きく侵食していることが分かる。開口部では流速が早くなるため、この部分が侵食するのは当然ではあるが、特にcase6については、潜堤の上流側(図の下側)においても比較的広い領域で侵食傾向が見られ、たとえば導水工から高波浪時に引き込んだ土砂を潜堤背後(上流側)に一時的に堆砂させ、ここで見られたような循環流によって少しずつ河口下流域へと輸送することが可能となることが期待される。潜堤開口部から下流方向へ土砂を輸送した後の土砂が、沿岸漂砂の下流方向へと順次輸送されていく過程については、本実験では検証できておらず、今後の大きな課題のひとつであると考えられる。

6. おわりに

自然営力のみを用いて河口閉塞を防ぎ、かつ、沿岸漂砂の遮断をできる限り緩和する河口部での新しい漂砂制御技術への試みとして、河口部における導水工および潜堤による循環流場の生成による漂砂制御技術を考案した。さらに、このような漂砂制御技術の実現可能性について、河道内での土砂流送力の増強効果という観点で、基礎的な室内実験および数値実験に基づきその機能を検証した。

固定床実験においては、導水工の有無、潜堤の幅、長さ、設置場所などの条件を変えた実験を行い、潜堤横の開口部における流速を計測するとともに、平面的な流れ場をPTV方により把握した。その結果、潜堤の設置場所によって潜堤背後の循環流場が変化し、結果として開口部での流速が変化した。また、本研究で導入した導水工では、河川流量と同等の質

図-6 移動床実験における水深計測値(case3およびcase6)

量輸送量が得られ、河口部における流送力の増強に有意な効果が得られることが分かった。しかしながら、導水工により潜堤背後における水位が上昇し、結果として、導水工の導入は必ずしも河口開口部での流量を純粋に増加させるわけではなく、潜堤を越えて上流側へと流入する質量輸送量に大きく影響を及ぼすことも明らかとなった。

次に、固定床実験と同様の条件に基づき、透過層を考慮した修正ブシネスク方程式に基づき、実験結果の再現を試みるとともに、導水工および潜堤のそれぞれの流量増加効果について検証した。その結果、モデルでは、導水工前面での流入流による循環パターンをPTVによる実験結果に比べてより明確に再現する傾向が見られたものの、潜堤背後の循環流や開口部における流速分布を妥当に再現できることが分かった。さらに、数値実験において導水工および潜堤による流量増加量を直接算定したところ、導水工、潜堤ともに、想定する河川流量と同等以上の流量を増大させるだけの機能を有していることが確認された。特に潜堤を左岸側に設置した条件においては、導水工による流入水が潜堤背後の循環流場を乱すことなく、開口部へと効率的に流下するパターンを再現し、潜堤の設置位置や導水工の流入位置の設計が、本システムにおいて重要な検討事項となることが明らかとなった。

最後に移動床実験によって、流況場に応じた浸食・堆積傾向が見られた。特に本論文で推奨する左岸側に潜堤を設置したケースでは、流速の大きな開口部での浸食傾向が見られただけでなく、土砂が一時的に堆積することが予想される潜堤背後(上流側)においても浸食傾向をしめしており、土砂を順次下流側へと輸送する機能を向上させていることが分かった。

本研究では河道内にのみ着目し、その中の波・流

れ・河川流による複雑な流況場の解明に焦点をあてたが、現地適用性を考慮すると、河道内のみならず、沖合領域の流れを踏まえ沿岸漂砂の移動特性を明らかにする必要がある。また導水工の詳細設計や実地スケールでの実験も必要となるであろう。移動床実験における地形測定については、更なる精度向上のために工夫が必要であろう。

謝辞：本研究の一部は(財)河川環境管理財団の平成22年度河川整備基金助成によるものです。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本潤・武内智行・中山哲厳・田畑真一・池田正信：志賀島漁港外港の導水工による環境改善効果に関する現地調査，海岸工学論文集，第41巻，pp. 1096-1100，1994.
- 2) 富田沙希・田島芳満・平松遥奈・佐藤慎司：砂丘を貫流する馬込川河口域における堆砂と土砂掃流用水の役割，海岸工学論文集，第55巻，pp. 701-705，2008.
- 3) 下園武範・佐藤慎司・磯部雅彦：潜堤周辺における海浜流場の発達機構，海岸工学論文集，第52巻，pp. 121-125，2005.
- 4) 田島芳満・佐藤慎司・鈴木淳也・下園武範・磯部雅彦：潜堤周辺の碎波・乱流特性を考慮した海浜流場予測モデルに関する一考察，海岸工学論文集，第53巻，pp. 106-110，2006.
- 5) Madsen・P. A.・O. R. Sorensen・H. A. Schaffer：Surf zone dynamics simulated by a boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves・Coastal Eng・32・pp. 255-287，1997.