

杭群による交互砂州の変形に関する研究

Deformation of Alternating Bars Caused by a Series of Piles

樽屋啓之*

By Hiroyuki TARUYA

The present study describes the deformation of alternating bars caused by a series of piles, based on the results of flume tests as well as of numerical solutions. A series of piles is composed of several piles which are straight arranged with proper separations and attack angle on the bars. The results show that alternating bars are well controlled and consequently a stream can be formed in a fixed region by placing a series of piles.

Keywords: alternating bar, stream, shock wave

1. 序

河川から各種用水を安定して取水するためには河道内のみお筋を取水口近くに維持しておく必要がある。大規模な取水堰を設置して取水を行う場合でも、砂州の進行などによる土砂被害を防ぐ意味で、みお筋の安定性は取水口位置選定の重要な決定因子の1つとなる。洪水時に形成される交互砂州や複列砂州などの中規模河床形態はみお筋の形成にとって重要な初期地形の1つであると考えられる。本研究は、みお筋を維持するために中規模河床形態の形状特性や移動特性をいかにコントロールできるかということに着目したものである。

三輪¹⁾は、交互砂州の形成された河道内のみお筋を維持するために、天端傾斜堰を用いて交互砂州そのものの位相を固定化することが可能であることを示した。藤田²⁾は、越流型の平行工を用いて交互砂州の形状特性量を制御し得ることを示した。しかしこれらの研究は交互砂州の制御のためには河道内の水理条件を大規模に変化させなければならないことを示唆している。河道内に設置される構造物は、できるだけ簡易な構造で、小規模なものの方が経済性、安全性の面で有利である。例えば杭群による制御等である。そのためには、杭群周辺の流れの構造や河床の変動を検討する。

本研究においては、まず移動床水路実験により、杭群を用いた交互砂州の変形について検討する。次にそのような変化がどのような過程で起こるかを調べるために、固定床滑面水路実験により、杭群の斜め配置に

* 正会員 農林水産省農業工学研究所研究員 水工部

(〒305 茨城県つくば市観音台2-1-2)

よる流れの様子を実験的に検討するとともに、数値計算によってその流れを再現できるかどうか調べた。ついで交互砂州の変形と流れのパターンとの関係について考察する。

2. 杭群を用いた交互砂州の変形現象

2. 1 移動床水路実験

杭群を用いた交互砂州の変形の様子を観察、測定するために幅15cm、長さ20mの鋼製直線水路を用いて実験を行った。水路上流端を $x = 0.0\text{m}$ とし、水路に沿って下流向きに x 軸、水路右岸を $y = 0.0\text{cm}$ として左岸向きに y 軸、水路底面を 0.0cm として底面に垂直上向きに z 軸をとる。まず実験の初期条件として、水路の底に平均粒径 $d_m = 0.7\text{mm}$ の一樣砂を厚さ 5.0cm に敷きならし、十分に水締めする。初期の水路勾配は $1/40$ に設定して流量 $Q_0 = 505.0\text{cc/sec}$ を定常給水する。通水初期の等流水深は 0.75cm であった。通水を開始し、水路全域に十分に発達した交互砂州が形成されたところで通水を止め、 $x = 16.0 \sim 18.0\text{m}$ 区間内に形成された交互砂州地形を約2砂州長分(120cm)測定した。この河床形状を河床Aとする。さて、ここで次のような問題設定を行う。いま、何らかの理由により、河床Aの最下端より更に下流側の左岸地点($x = 17.2\text{m}$ よりも下流の地点)で現時点のみお筋(水みち)を維持する目的が生じたものとする。しかし、目的の地点より上流側からは瀬の位相を有する砂州が接近しており、1砂州長以内の前進時においてはみお筋の定着または新規形成が不確実な状況にある。そのための対策として、図-1に示すような杭群の模型を左岸側に約1砂州長分(60cm)離して、図-2に示す2地点に各1基を設置することにした。このとき、上流、下流側の杭群をそれぞれ杭群1、杭群2と呼ぶことにする。この後再び設置前と同じ流量を通水し、砂州がほぼ1砂州長を目安に前進したところで通水を停止し(1分30秒後)、杭群1、2設置前の位相に対応する区間の河床を測定した。これを河床Bとする。図-2に河床A、Bの等高線を示した。また、 x 座標とは別に、2砂州長分に相当する河床A、Bを共通の位相角 θ ($0 \sim 360^\circ$)で表示した。

2. 2 交互砂州の変形

杭群周辺の流れの特徴としては、衝撃波の発生がある。以下の説明ではこの衝撃波について、福岡ら³⁾による不連続波面という用語を用いる。また、流砂の様子は、杭群近傍の洗掘と背後での堆積が特徴である。

まず、図-2(1)(2)より次のことがわかる。河床Bの杭群2の下流側は本来交互砂州の瀬に相当する部分であるが、水路壁に沿って浅い淵状の地形が形成されている。このみお筋は杭群が無け

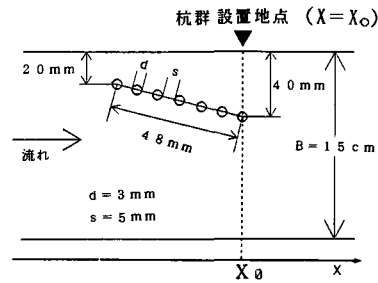


図-1 杭群とその設置方法

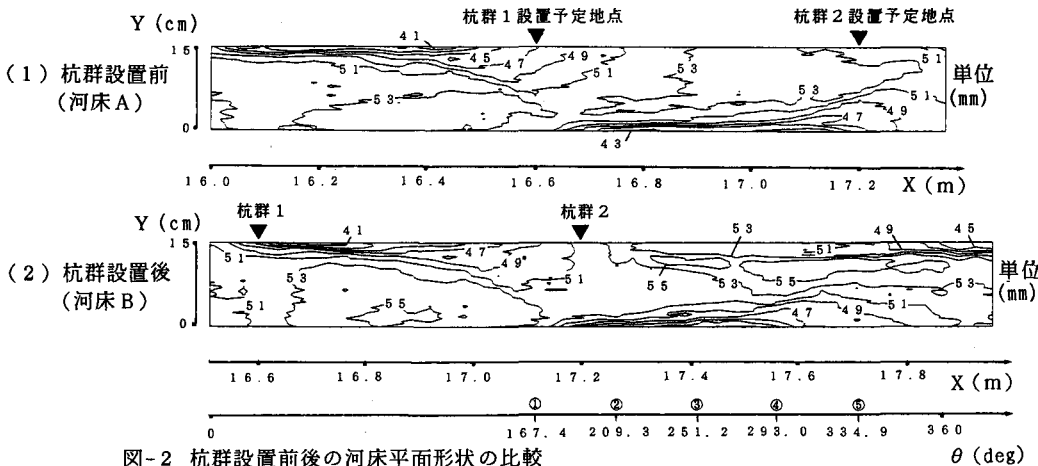


図-2 杭群設置前後の河床平面形状の比較

れば、河床Aに見られるように、本来この位相では対岸に向かって離れてしまうはずである。図-3は、河床A、Bの同じ位相角の横断面形状を示したもので、これより杭群による淵状地形の形成が明らかである。すなわち $\theta = 200^\circ$ を過ぎると、河床Bでは杭群設置側の側面付近で下流に向かうほど河床が低下しており、逆にこの低位部よりも水路中央に近づくにつれて河床Aよりも高くなっている。図-4にはそれぞれ河床A、Bの2砂州分の河床高を縦断方向に平均して求めた横断形状を示した。これより河床Bの $y = 10\text{cm}$ 付近の平均河床位が河床Aのものよりも高くなっていることが判る。交互砂州の波長のとり方に曖昧さはあるが、算出区間を変えても結果に大差は無かった。これは、交互砂州の前進する過程で生ずる杭群下流の局所的な堆積の影響である。河床Bの下流側前縁線的位置が上流側に寄っているのもこのことと関係があると思われる。

3. 杭群周辺の流れの機構

3.1 固定床水路実験による検討

前章において、杭群による交互砂州変形に関する実験結果の一例を示した。砂州の変形は杭群による流れの変化及びそれに伴う流砂量分布の変化を通して起こっているはずである。したがって、杭群による砂州の変形過程を究明するには、まず、杭群によって流れがどのように変形するかを評価することが重要である。その第一段階として、平坦固定床に杭群を設置した場合の流れについて検討する。幅 60.0cm 、長さ 20m の底面アクリル板貼の滑面水路の中央に図-5に示す3種類のケースで径 26mm の円柱を配置し、定常給水して流れを測定した。水路における座標原点は、水路下流端より 10.0m 上流の右岸底面地点にとり、 x 座標を流下方向、 y 座標を左岸向き、 z 座標を底面に垂直上向きを、いずれも正方向と決めた。給水量は $Q_0 = 6.7\text{ l/sec}$ 、水路床勾配 $i_0 = 0.008$ とし、円柱を設置しない場合の等流水深は $h_0 = 1.65\text{cm}$ であった。フルード数は $Fr = 1.675$ であり、2章の移動床実験時の値とほぼ等しい。CASE-1は、単円柱背後の流れの変化について調べるものである。CASE-2は、杭群の機能の一つと考えられる流れ方向に対して迎え角を有して設置された杭群周辺及び背後の流れの様子を調べるために、2本の円柱を配したものである。ここに迎え角は、図-5の α で定義する。CASE-3は、CASE-2と同じ迎え角で、円柱中心間距離を変えずに更に1本の円柱を追加した場合である。また、図-6～8にも示すように、どのケースでもそれぞれ1番上流側の円柱中心の x 座標が、 $x = 2.0\text{m}$ となるように設置した。以上において水深 h 及び x 、 y 、 z 方向の $z = 5\text{mm}$ 地点における流速 u 、 v 、 w を x 方向に 4cm ピッチ、 y 方向に 2cm ピッチで測定した。尚、 u の測定にはピトー管を、 v 、 w の測定には2方向電磁流速計（検出部径 5mm ）、 h の測定にはサーボ式水位計をそれぞれ使用した。

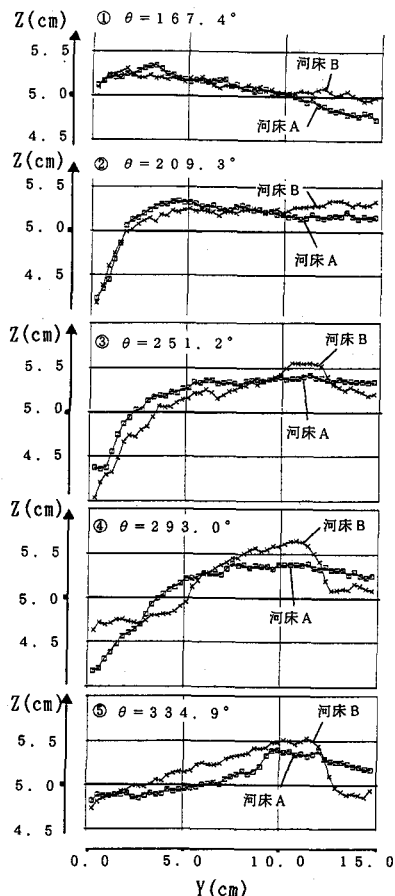


図-3 杭群設置前後の河床横断形状

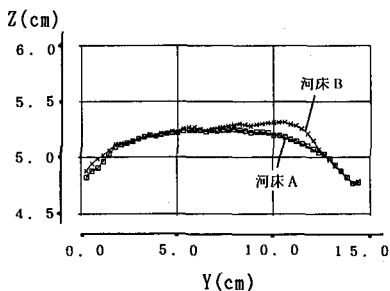


図-4 杭群設置前後の縦断平均河床位

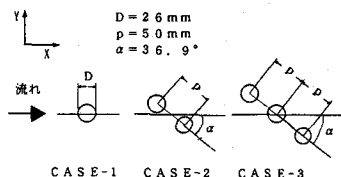


図-5 実験ケース

図-6は、CASE-1の水面形、流速 u 、 v 、 w の測定結果を示す。ここに、水面形は等水深線、流速 u 、 v は平面流速ベクトル(u 、 v)で表示し、流速 w については $x-y$ 平面上の各測定地点を始点として、上昇流の向きを図の左向きに、下降流の向きを図の右向きにとり、流速の大きさを長さとした矢印により表示した。まず、CASE-1については、水深は杭前面で最大となり、杭の上流側、下流側から左右両方向に不連続波面が形成されている。ここに波の高位部を連ねた峰線は正の衝撃波、低位部を連ねた谷線は負の衝撃波に相当する。この水面形に図-6(2)の平面流速(u 、 v)の結果を重ねて見ると、波の峰線の上流側では、流れは、杭から遠ざかるが、波の峰線を過ぎると逆に水路中心に向かって回り込むように方向を変え、加速している。しかし、流れは波の谷線に達すると急激に減速して水路重力方向に向う。更に図-6(3)を参照すると、杭前面の急激な上昇流と波の峰線から谷線にかけて急激な下降流が生じるが、これらの流れは波の谷線付近でほとんど無くなっている。このことは波の峰線と谷線がいずれも流れの急変部であることを意味し、特に谷線においては強い混合が起きているものと思われる。図-7、8はそれぞれCASE-2、3の実験結果である。まず、CASE-2について見る。水面形については、CASE-1と基本的には同じパターンの波面が形成されているが、波の峰線は左右両岸側ともいっそう高くなり、また、右岸側の方が、左岸側のそれよりも若干高くなっている。しかし波の谷線は右岸側でCASE-1よりも明瞭になっているのに対し、左岸側ではかえって不鮮明となっている。このような水面形の偏りは流速分布にも反映されて、CASE-1で見られた流線の曲率や下降流も右岸側でCASE-1より大きくなり、逆に左岸側ではいずれもCASE-1のときよりも小さくなっているのが特徴である。CASE-3ではCASE-2で見られた流れの偏り方の特徴がいずれもより顕著になっている。

以上3ケースの側岸近くの流速分布に着目すると、波の峰が側岸にぶつかる地点での水位が高くなることによって、下流向きの流速の大きさが水位の高い地点で一度減少し、その下流で再び増加するという現象がみられる。これは主として x 軸方向の水面勾配に対応しているものと考えられるが、波の峰の角度、峰の高

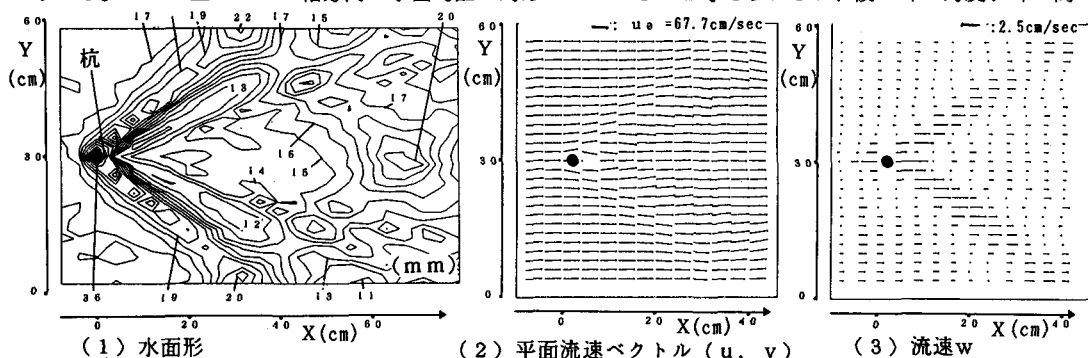


図-6 CASE-1の実験結果

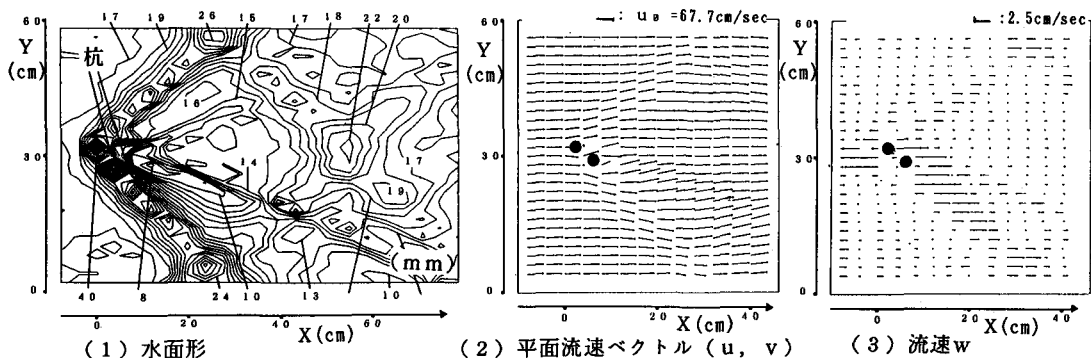


図-7 CASE-2の実験結果

さがこの現象にとって重要なファクターとなる。以上の結果より、杭群を適当な迎え角で配したときの流れの特徴を整理すると、①杭群を波源とする不連続波面（衝撃波）が形成されること②主流が杭群設置方向に偏ること③杭群の下流では杭群設置方向に偏った主流が波の峰線から谷線に向かって回り込み、水路重力方向に向きを変えること④側岸近傍の流れは流下方向に一度減速して再び加速されること⑤以上のパターンは杭群の規模（本数など）によって変化する性質のあること、があげられる。これらは特に流砂の挙動に対し重要であると思われる。

3. 3 浅水流モデルによる流れの解析

実験により明らかになった流れの特徴を数値計算によりどの程度再現できるか検討する。計算は以下に示す2次元浅水流の基礎方程式によった。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(1_{0x} - 1_{fx}) + \varepsilon \nabla^2 u \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = g(1_{0y} - 1_{fy}) + \varepsilon \nabla^2 v \tag{3}$$

$$1_{fx} = \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2} u}{h^{4/3}} \tag{4} \qquad 1_{fy} = \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2} v}{h^{4/3}} \tag{5}$$

ここにhは水深、u、v、はx、y方向の流速成分、 1_{0x} 、 1_{0y} はx、y方向の水路床勾配、nはManningの粗度係数、 ε は渦動粘性係数である。計算はstaggered mesh scheme上に杭の境界を設定し簡易ADI法によって行った⁴⁾。まず水路全域で等流の初期条件を与えて計算を進め、流れがほぼ定常となったところを求め解とした。差分は $\partial u / \partial x$ 、 $\partial v / \partial x$ については、 $Fr > 1$ 、0のときに後退差分とし、その他の差分については原則として中央差分とした。杭の境界は図-9のように境界上の流速成分の値を0とした。上流端での境界条件は、等流条件 $h=h_0$ 、 $u=u_0$ 、 $v=0$ 、下流端で $\partial^2 h / \partial x^2 = \partial^2 u / \partial x^2 = \partial^2 v / \partial x^2 = 0$ 、両壁面は $\partial h / \partial y = \partial u / \partial y = 0$ 、 $v=0$ のSlip conditionとした。渦動粘性係数 ε は、 $\varepsilon = N \cdot u_* \cdot h$ とおき、Nには通常のものよりも大きめの値を与えた。計算の条件は表-1の通りである。計算ケースは実験の杭配

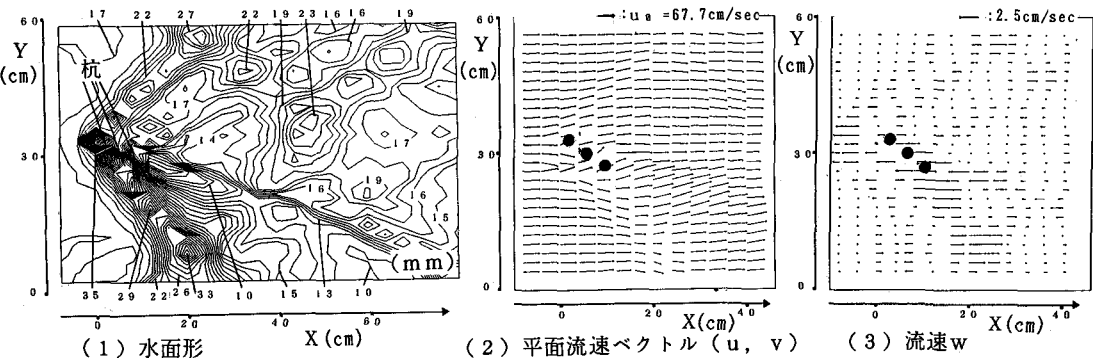


図-8 CASE-3の実験結果

表-1 計算諸元

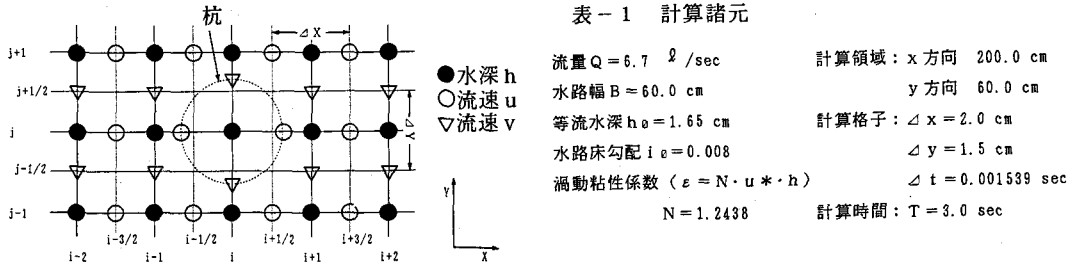


図-9 計算格子と杭の境界

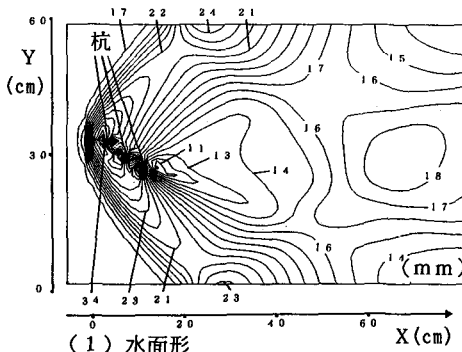
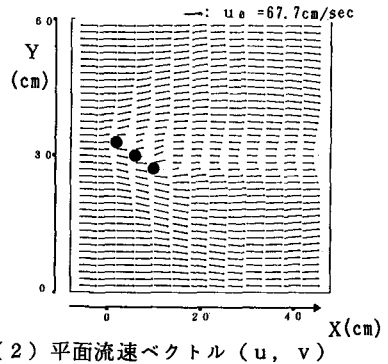


図-10 CASE-3の流れの計算結果



置を対象とし、CASE-3の計算結果を図-10に示す。水面形の計算では水深の相対的な高低関係、すなわち水面勾配の分布特性についてよく表現されている。流速分布に関しては、実験による w の絶対値が大きくなるところほど計算値のずれが大きくなることは計算の仮定上やむを得ないが、実験によって得られている流速分布の特徴を説明している。

4. 交互砂州の変形に関する考察

杭群による交互砂州の変形現象を流れの機構と結びつけて検討する。ただし、杭群は設置方向を左岸から右岸向きとし、左岸近くに設置したものとする。

①杭群を波源とする不連続波面によって流れの場が変化し、主流が偏ることによって流砂量も杭群の設置方向に偏って増加する。②杭群の下流で杭群設置方向から左岸に向かって土砂が堆積し、小規模な砂州の前縁地形が形成される。③左岸側岸近くでは側岸と波面の峰との干渉によって生ずる上下流の流速差によって下流向きに河床低下傾向となる。このような過程で2章で考察したような淵状地形が、交互砂州上の側岸近傍に形成されたものと考えられる。

5. 結語

以上の検討によって、杭群によって交互砂州が制御でき、みお筋が維持できる可能性が高いことがわかった。また、みお筋の維持機構として、杭群による不連続波面（衝撃波）の発生に伴う流れの変化が重要であり、杭群による流れの変化は、数値計算では再現可能であることがわかった。適切な杭群の種類、配置方法等は今後の検討課題であるが、これらについては、更に実験的に検討するとともに2次元浅水流式と2次元河床変動式を用いて検討していきたいと考えている。

（謝辞）

本稿をまとめるにあたり、京都大学防災研究所江頭進治助教授には貴重な御教示、御討議を賜りました。また、実験準備には当所機械技術係諸氏及び池田博嗣氏（現九州電力）にお世話になりました。最後になりましたが、茨城大学農学部木ノ瀬紘一助教授には、課題設定以来貴重な御指導、御討議を賜りました。上記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 三輪 : 天端傾斜堰による砂レキ堆の安定化に関する実験, 農土論集(85)
- 2) 藤田 : 沖積河川の流路変動に関する基礎的研究, 京都大学学位論文
- 3) 福岡ら : 移動床流れにおける側岸の水理的役割, 第27回水講論集
- 4) 木ノ瀬ら : 杭状構造物による射流水路の水面攪乱と河床変化解析, 農土論集(147)