

河道湾曲部における河床変動を抑制する 樹木群水制の配置方法

GROIN ARRANGEMENTS MADE OF NATURAL WILLOWS FOR REDUCEING BED DEFORMATION IN A CURVED CHANNEL

渡邊明英¹・福岡捷二²・安竹悠³・川口広司⁴

Akihide WATANABE, Shoji FUKUOKA, Yu YASUTAKE and Hiroshi KAWAGUCHI

¹正会員 博士(工学) 広島大学大学院助教授 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

²正会員 工博, Ph. D 広島大学大学院教授 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

³正会員 工修 ドーコン(株) (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1 条 5-4-1)

⁴学生会員 工修 広島大学大学院工学研究科 博士課程後期 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

Vegetation along riverbank or on floodplain is one of important elements which compose the river environments such as natures, scene and inhabiting space. The functions of vegetation along riverbank on river improvements and those utilization as the permeable groins were examined.

The effects of arrangements and spacing of permeable groins made of natural vegetation to the bed deformation in a curved channel was shown throughout the model experiments and the numerical analysis in this paper. The suitable arrangements of groins was ascertained by numerical simulation on the flow and bed variation in a channel.

Key Words : Arrangement of permeable groins, natural willows, vegetation, bed deformation.

1. はじめに

河川水際に繁茂している樹木や草本類は、河川の自然、環境を構成する重要な要素である。これらの河岸水際植生は、洪水時には流れの抵抗となり、これを避けるために伐採されることが多かった。しかし、河岸水際に流水に抵抗を与えることは水際植生に護岸・水制機能があることを意味する。著者ら¹⁾²⁾³⁾⁴⁾は、治水と環境の調和を目指し、水際植生を存置する方法としてこの水制機能に着目し、その効果を模型実験から評価し、現地試験施工において可能性を検討してきた。樹木群水制の効果はその配置方法によって異なり、有効に機能する配置方法が実験から見出されている。しかし、一般的な水理条件や河道形状に対してその配置法が有効であるかは確かめられていない。種々の条件に対して模型実験を行うことが煩雑である場合には、数値モデルによる検討が一般的に有効である。本研究は、樹木群水制が設置された湾曲水路における模型実験の流れと河床変動について数値解析を行い、実験結果と比較することでモデルの有効性を検討し、樹木群水制の配置と効果について流速場と河床変動から明かにし、一般的な場における適切な水制配置を求められるよう

にすることを目的としている。

本文では、一般物理座標系における静水圧近似3次元非定常流数値モデル及び河床変動数値モデルを樹木群水制が配置された湾曲水路における流れと河床変動に適用し、樹木群の配置が流れと河床変動に与える影響を評価した。まず、樹木群の設置方法と河床変動抑制効果の関係を明かにするために、①樹木群がない場合、②樹木群が連続水制のように河岸から直接張り出している場合、③縦断的に一様な樹木群から樹木群が連続水制の様に突起状に配置された場合の3通りについて検討を行った。これより、樹木群水制が設置されると洗掘位置が河岸近傍から遠ざかり洗掘深が小さくなることを示し、樹木群の配置方法として水制間隔が異なる3ケース(水制間隔/水制長=7.2,4.8,2.4)について解析し、機能が樹木群水制間隔にあまり依存しないことを確かめた。

2. 解析方法

一般座標系物理成分による流れの解析方法⁴⁾については既に報告済みであるので、ここではその考え方のみを説明し、新たに加えた河床変動モデルについて説明する。

(1) 流れ解析の考え方

流れの解析モデルは、対象とする場が水路幅に比して浅い水深であり、樹木は冠水していないため静水圧近似されている。流れの基礎方程式は、鉛直方向に σ 座標系⁴⁾⁵⁾⁶⁾が導入された一般座標系における静水圧近似の流れの運動方程式であり、反変流速ベクトルと水位について解くものである。ただし、反変流速ベクトルは物理流速成分を表すように、長さスケールで割られたものを用いるものを用いている。これは、移流項の高次風上化を行う場合に、格子スケールを風上化の対象にしないためである。移流項は、3次精度の差分によって渦を直接的に解けるようにしており、樹木群が作り出す水平渦などによる混合は考慮されている。

(2) 樹木群の抵抗の評価

樹木群による流水抵抗は樹木群の透過係数Kで表わされる⁷⁾⁸⁾。しかしながら、流れが薄い樹木群を透過する場合の透過係数は、樹木模型が一樣に敷き詰められ流れが平衡な場合とは異なっている。これは、樹木群の中で流れが平衡に至るまで混合が進まないことや遮蔽効果の違いが関係していると考えられる。

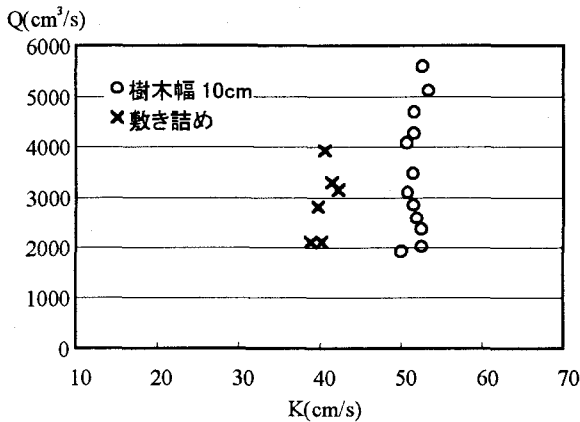


図-1 樹木群模型の透過係数

図-1は、樹木群模型を水路に一樣に敷き詰めた場合と透過幅 10cm で設置した場合における定常状態での透過係数の実験値を示したものである。これより、透過する距離によって透過係数の値が異なっている。本解析における透過係数には、樹木群が連続的な場合には 38 cm/s の値、水制的に突出して流れが透過する場合には 54 cm/s の値が用いられている。

(3) 河床変動解析

河床変動計算には一般座標系の流砂の連続式

$$J' \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial J \tilde{q}_{B\xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial J \tilde{q}_{B\eta}}{\partial \eta} \right\} = 0 \quad (1)$$

を用いる。ここで、 λ は間隙率を、 $\tilde{q}_{B\xi}$ 、 $\tilde{q}_{B\eta}$ は ξ 、

η 座標系に対する反変流砂量ベクトルであり、

$$\tilde{q}_{B\xi} = q_B \left\{ \begin{array}{l} \frac{\tilde{u}_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_k}} \frac{u_{*c}}{u_*} \left(\frac{\partial z_b}{\partial \xi \partial \xi} + \cos \theta \frac{\partial z_b}{\partial \eta \partial \eta} \right) \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$\tilde{q}_{B\eta} = q_B \left\{ \begin{array}{l} \frac{\tilde{u}_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_k}} \frac{u_{*c}}{u_*} \left(\cos \theta \frac{\partial z_b}{\partial \xi \partial \xi} + \frac{\partial z_b}{\partial \eta \partial \eta} \right) \end{array} \right\}$$

の様に表示される。ここで q_B : 掃流砂量、 μ_s : 静止摩擦係数、 μ_k : 動摩擦係数、 u_* : 摩擦速度、 u_{*c} : 限界摩擦速度、 $\cos \theta$: (ξ, η) 反変ベクトルの交差角である。流速に対する添字 b は河床面における値を表す。本解析では流砂量に芦田・道上の式を用いており、流砂量の算定に対して河床面の斜面に伴う付加的な掃流力と限界掃流力の変化を考慮している⁶⁾。河床面せん断力は、流れの3次元モデルによって算出された河床付近の流速から算出される。

3. 湾曲水路における樹木群水制の実験と解析

(1) 水理条件と樹木群水制の配置条件

対象とする湾曲流路の形状及び樹木配置方法を図-2に示す。河床材料は粒径 0.8 mm の一樣砂であり、流量 32 l/s、河床勾配 1/800 である。水路長は 13 m、水路幅 1.5 m である。本文では福岡らによる大型模型実験のうち、水制配置の異なるケースを対象とした¹²⁾。表-1は検討されたケース一覧を示す。樹木群水制工は河岸沿いに一樣に残される一樣部分と実際の樹木群をある間隔で突起状に残す突起部分によって構成されている。Case1は樹木群がない場合、Case6は奥行き 5cm の外岸沿い一樣部分の前面に長さ(L)と間隔(D)の比を 7.2 となるように突起部分を配置した場合、Case7はCase6と同様な突起部諸元を有しているが、一樣部分の前面を堅い滑らかなアクリル板で覆うことにより、一樣部分の樹木群の効果を無くした場合である。Case4, Case5はCase6に対して樹木群突起部分の間隔を変化させた場合である。

計算格子間隔は ξ 方向に 8 cm、 η 方向には樹木群が設置されている外岸側で 1 cm、それ以外の領域で 2cm である。鉛直方向には σ 座標系が適用され、平均水面が $\sigma=1$ 、平均水面から 1cm 下が $\sigma=0$ 、河床が $\sigma=-1$ として $\sigma=1, 0, -0.25, -0.50, -0.75, -1$ となるように分割されている。

表-1 ケース一覧

Case No.	水深 (cm)	樹木群水制緒元		
		一様部	水制部	L/D
1	5.7	なし	なし	—
4	6.1	幅 5cm	L 10cm	2.4
5	6.2	幅 5cm	L 10cm	4.8
6	6.2	幅 5cm	L 10cm	7.2
7	6.8	なし	L 10cm	7.2

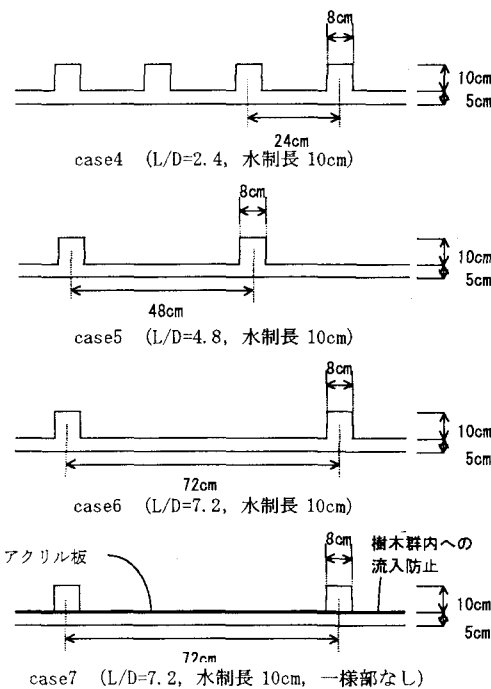
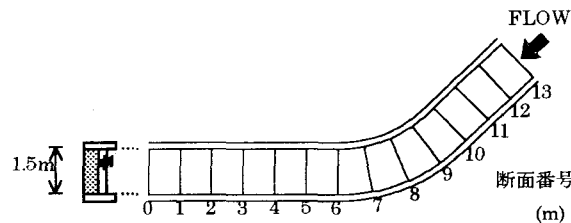


図-2 水路形状と樹木群水制の配置

(2) 樹木群配置方法の違いの影響

まず、Case 1(樹木群なし)、Case 6(樹木群水制)、Case 7(突起部のみ有)の結果を比較することで、樹木群水制の配置と河床変動抑制効果について検討する。

図-3 に水深平均された平面流速ベクトルを示す。実験結果の Case 1 では湾曲部外岸側、特に断面 6,5,4 の外岸付近で流速が速く、内岸側で流速が小さい湾曲部特有の流れとなっている。一方、樹木群の一様部分と突起部分を有する Case 6 では樹木群水制近くで流速が抑えられているだけでなく、内岸の流速減少の程度は少なく、流速分布が横断的に一様化されている。

このように樹木群の水制機能により断面全体を有効な河積とする、偏流が少ない流れとなっている。樹木群の一様部分がない Case 7 では、樹木群の一様部分のある Case 6 に比して水制先端から水路中央にかけて流速が減少している。その反面、Case 7 では突起部分の抵抗が大きくなっており、Case 6 に比して、水制先端で洗掘を受けやすい。

計算結果の Case 1 においても実験結果と同様に湾曲部外岸側で流速が速く、内岸側で流速が小さい。Case 6 では外岸樹木群水制近傍の流速低減、内岸側流速低下の減少などが現れており、流速分布も一様化されている。Case 7 でも樹木群水制際で流速を抑え、流速分布を一様化させる樹木群水制工の効果が示されている。

図-4 に河床変動コンターを示す。Case 1 では実験、解析共に湾曲部下流外岸で河床が洗掘され、内岸に堆積が発達している。ただし、解析の洗掘深は小さくなっている。Case 6 では実験、解析共に外岸から離れた位置、すなわち水制先端から最大流速線位置にかけて洗掘が生じている。これは樹木群の突起部分と一様部分の減速効果により、樹木群が水制機能を発揮していることを示している。

実験の Case 7 では突起部分の先端から下流に向けて局所的な洗掘が生じている。これは、外岸際の一様部分がないために突起部分への流入が激しくなり、局所的な流れの影響が現れていると考えられる。計算では δ 方向の計算格子間隔が粗いため、実験結果のような局所的な河床洗掘は見られない。しかし、外岸側の洗掘を抑える樹木群水制の効果は示されている。Case 6 と Case 7 を比較すると、Case 7 の方が実験・解析共に河床変動が小さくなっている。この Case 6 と Case 7 の違いは、Case 7 では突起部の樹木群に作用する流れが速く、その結果として抵抗が Case 6 に比べて大きくなって、樹木群近傍での流速減速効果が Case 6 よりも大きかったことによる。

図-5 に洗掘深が大きい断面 5 における河床の横断形状と二次流ベクトルを示す。実験結果より、Case 1 では外岸近傍で大きな二次流セルが発達しており、外岸近傍の河床が洗掘されている。一方、解析結果でも外岸近傍で洗掘が生じているが、洗掘深が小さくなっている。これは、解析メッシュの解像度や河床変動に用いている摩擦係数などのパラメータの違いに起因していると考えられ、検討の余地が残されている。これに対して Case 6 では突起部分の先端付近で二次流は水面から沈み込み、河床沿いに水路中央に向かっていく。このため、最大洗掘位置は樹木群のない Case 1 より水路中央に移動している。

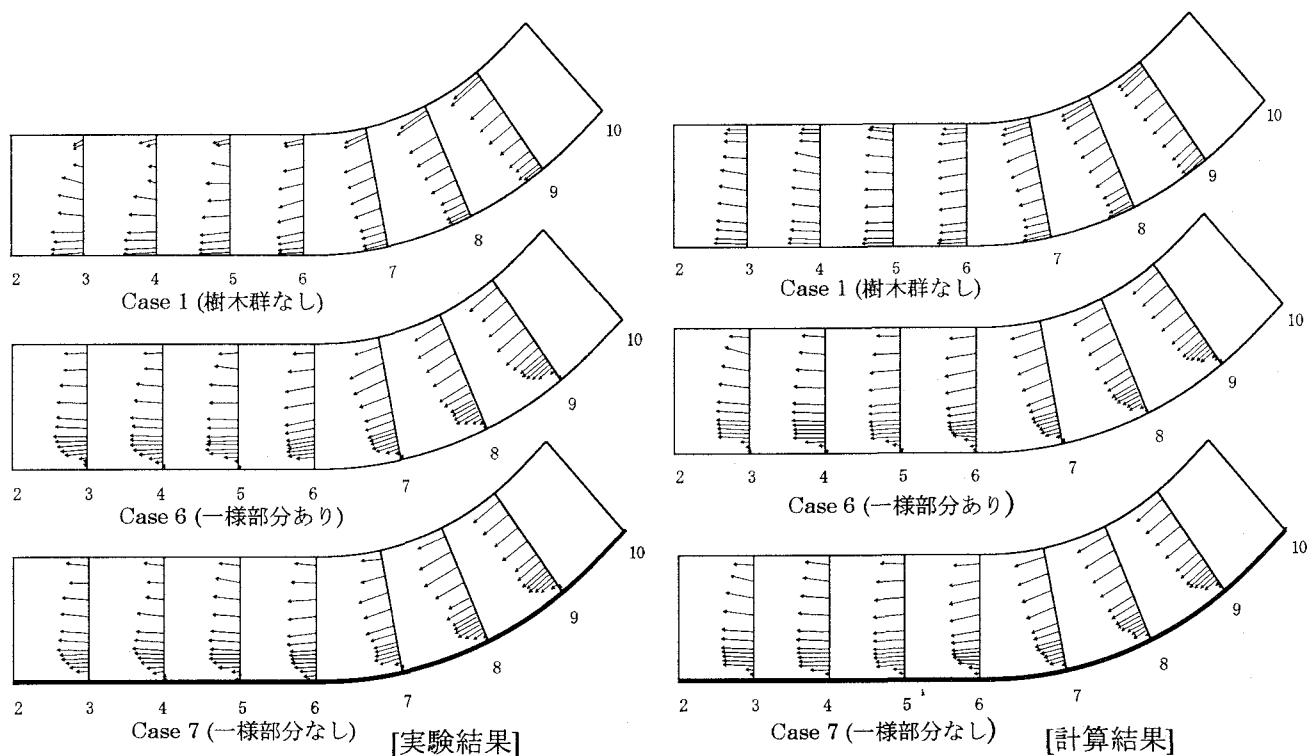


図-3 水深平均流速分布

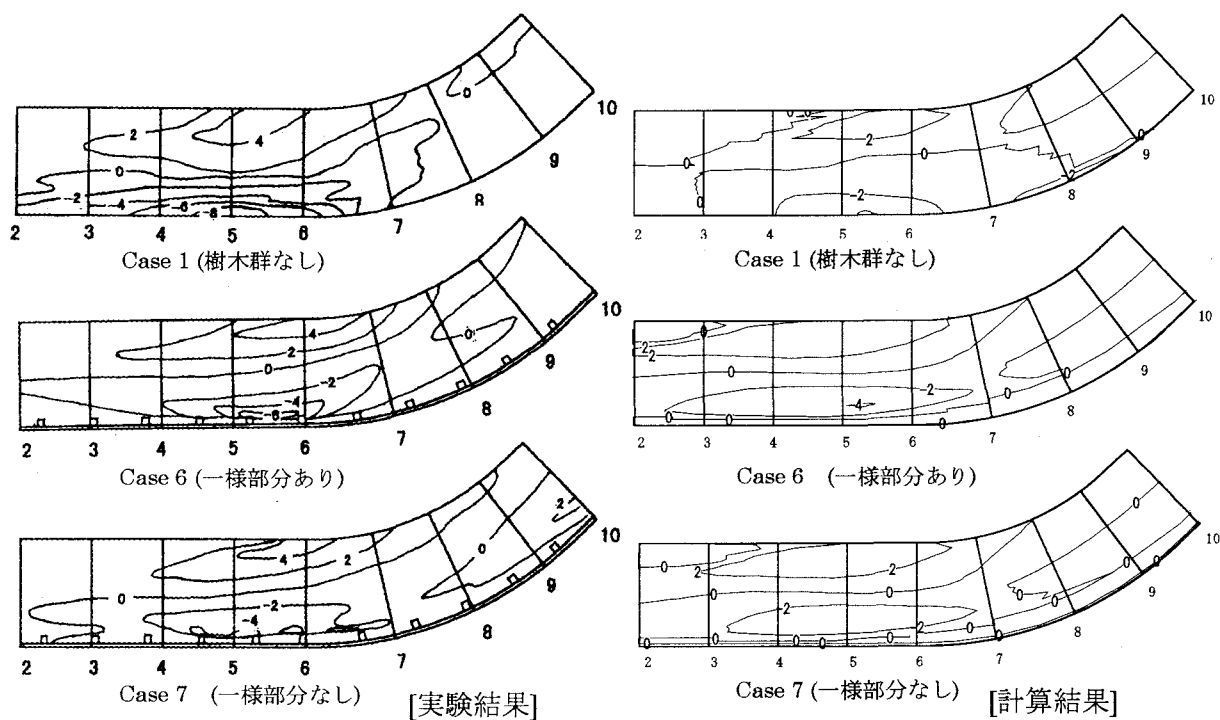


図-4 河床変動コンター

Case 6 では二次流の大きさも小さくなっており、これに伴って洗掘深が小さくなっている。Case 7 と Case 6 では横断面的な特徴に大きな違いはなく、先に述べたように樹木群突起部による抵抗が大きく、主流速の減速の度合いが大きいことが最も影響している。

(3) 樹木群水制間隔の違いの影響

次に、Case 4($L/D=2.4$)、Case 5($L/D=4.8$)、Case 6 ($L/D=7.2$)の結果を比較することで、樹木群水制の縦断間隔が河床変動に与える影響について検討する。実験結果では、背部に一樣な樹木群部があることでこれらの水制工間隔の違いによる影響はあまり大き

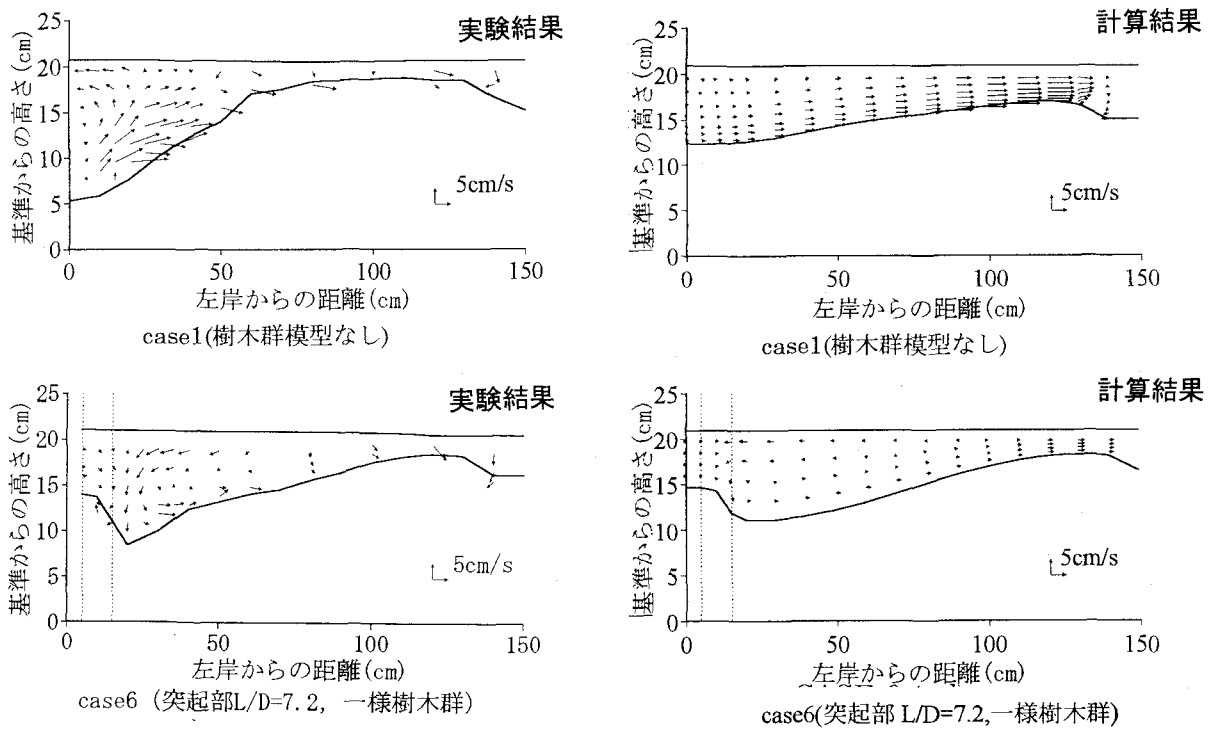


図-5 河床横断面形状及び二次流分布の実験結果と解析結果(Case 1 Case6)

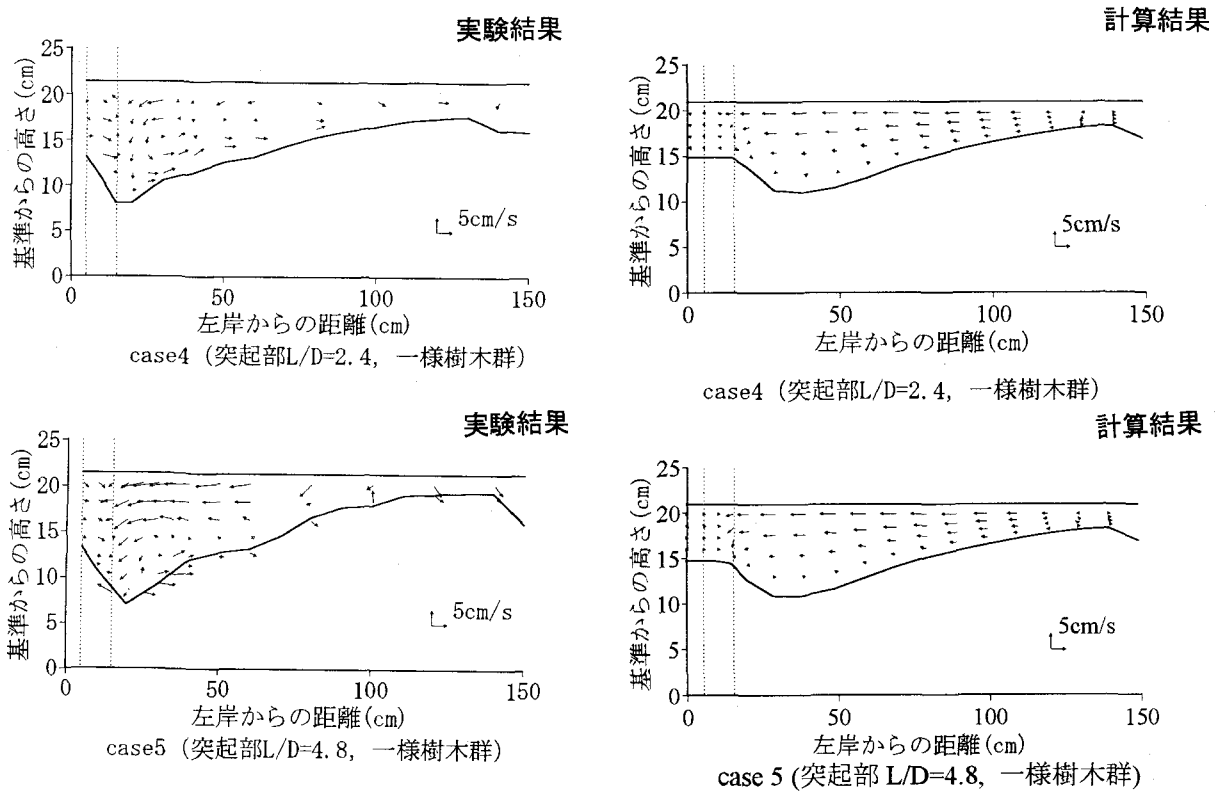


図-6 河床横断面形状及び二次流分布の実験結果と解析結果(Case 4, Case5)

くないことが福岡ら¹²⁾によって示されている。

図-6にCase 4とCase 5の断面5における横断河床形状と二次流分布の実験結果と解析結果を示す。実験では、断面5の局所的な河床変動で見れば、 $L/D=7.2$ の方が優れている様に見える。しかし、流れ場の状態はそれ程大きく変化していない。

解析結果を見ると、解析による河床形状は多少違う程度であり、洗掘深そのものに大きな変化はない。解析では河床形状と二次流分布は $D/L=7.2$ の場合が、Case 4, Case 5の場合と異なっている。最大洗掘位置はやや外岸寄りであり、表面付近の外岸に向かう流れが弱くなっている。これは、突起部分の間隔の

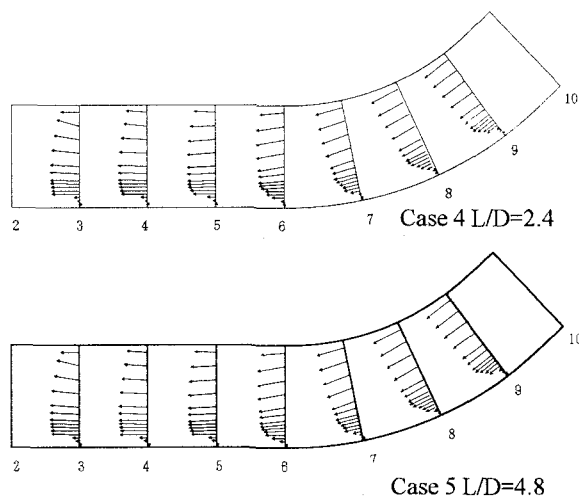


図-7 水深平均流速分布 (解析結果)

変化によって、樹木群突起部分に作用する流水抵抗が変化して、水深平均的な流れが湾曲部で集中する位置が少し移動しているためである。

図-7に Case 4, Case 5 における水深平均流速分布の解析結果を示す。図-7及び図-3より、Case 4 - Case 6 共に全体的な流れはほぼ同じであるが、断面 6~断面 7 付近の位置で流向が異なっており、流れの集中する位置が異なっていることがわかる。これに伴って、堆積や洗掘の範囲も全体的に移動する。Case 6 における流れが他の 2 ケースと比べて上流側で集中している。その結果、断面内の最大洗掘位置が横断的に異なり、断面 5 の位置でやや河岸寄りにある。また、Case 6 における全体的な河床変動の範囲は少し下流域へ移動している。同様な理由により、水面付近で外岸へ向かう流れの強さが、Case 6 で弱くなっている様に見える。

以上示した様に、突起部分の間隔の違いによって流れ場に大きな違いは生じていない。これは、突起部分の間隔 L/D の値が 2.4-7.2 程度の範囲では、流れが樹木群によって受ける抵抗の大きさの総量が変わっていないことを意味する。これは、表-1 で示した平均的な抵抗を表す平均水深について見ても明かである。樹木群がない Case 1 の水深に比べて、一様部と突起部からなる樹木群が設置された Case 4 - 6 における同一流量に対する水深は、それぞれ同程度に大きくなっている。これに対して、一様部分がない、突起部のみの樹木群が設置された Case 7 における水深は他の値と比べて大きくなっている。すなわち、背部に連続的な樹木群部分があった方が、突出した樹木群水制に速い流れが当たらなくなるために、逆に全体としての抵抗が小さくなることを示している。また、このために突起部分の縦断間隔に

よる現象の差異が現れにくくなっていると考えられる。

5. おわりに

本文で示したモデルでは、樹木群周りの局所的な現象まで厳密に再現することはできなかった。これには樹木群による流れの乱れ等が河床変動、特に流砂量へ与える影響などが考慮されていないことが考えられる。また、洗掘深などが全体的に小さくなっているのは、河床変動解析において用いたパラメータの値が、実験におけるその値と異なっていることなどが挙げられる。これらについては、今後の検討と河床変動モデルの改良が必要であろう。しかしながら、樹木群の配置によって全体的な流れ場や河床変動がどのように変化するかということやその特徴については定性的には表せていると判断できる。

したがって、河床変動モデルのパラメータなどに問題が残されているが、任意の河道形状を有する場に本モデルを適用することによって、樹木群水制の河床変動の抑制効果を評価したり、適切な配置法や樹木群伐採が河床変動に与える影響をある程度評価することは可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 福岡捷二・渡邊明英・大橋正嗣・姫野至彦：樹木群の水制的利用可能性の研究, 水工学論文集 Vol.41, pp. 1129-1132, 1997.
- 2) 福岡捷二・渡邊明英・大橋正嗣・姫野至彦：河岸に群生する樹木群の水制機能の評価, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, pp. 710-711, 1997.
- 3) 福岡捷二・樺澤孝人・斎藤潤一・布施泰治・渡邊明英・大橋正嗣：柳水制の試験施工とその機能の現地調査, 水工学論文集 Vol. 42, pp. 445-450, 1998.
- 4) 福岡捷二・渡邊明英・山内芳郎・大橋正嗣・関浩太郎：樹木型水制の配置と治水機能に関する水理的評価: 河川技術に関する論文集 Vol.6, pp.321-326, 2000.
- 5) 福岡捷二, 渡邊明英: 複断面蛇行水路における流れ場の 3 次元解析, 土木学会論文集 No.586/ II-42, pp. 39-50, 1998.
- 6) 福岡捷二, 渡邊明英, 岡田将治: 静水圧近似 3 次元解析モデルによる複断面蛇行水路河床変動解析, 水工学論文集 Vol. 42, pp. 1015-1020, 1998.
- 7) 福岡捷二, 渡邊明英, 津森貴行: 樹木群を有する開水路における平面せん断流の構造とその解析, 土木学会論文集 No.491/II-27, pp.41-50, 1994.
- 8) 福岡捷二, 渡邊明英, 上阪恒雄, 津森貴行: 低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造 - 利根川新川通昭和 56 年 8 月洪水 -, 土木学会論文集 No.509/II-30, pp.79 -88, 1995

(2001. 4. 16 受付)