

複断面蛇行流路の河床変動に及ぼす 流入土砂と流れの非定常性の影響

EFFECT ON THE CHARACTERISTICS OF THE BEDTOPOGRAPHY
BY THE OVER LOADING SEDIMENT SUPPLY AND UNSTADY FLOW
IN A COMPOUND MEANDERING CHANNEL

岡田将治¹・福岡捷二²・田中淳一³

Shoji OKADA, Shoji FUKUOKA and Junichi TANAKA

¹ 学生員 広島大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 博士課程後期 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

² フェロー会員 工博, Ph.D. 広島大学 教授 工学部第四類建設系 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

³ 正会員 鳥取県米子土木事務所 (〒683-0054 米子市糞町 1-160)

It has been observed from the previous investigation that the flow structure in the main channel changes and sediment transport rate decreases for meandering compound flow compared to bank-full flow. Because of this characteristics of the meandering compound channel flow, we have considered over loading sediment supply due to dam or bank failure in the channel that might cause large bed level fluctuation. In this paper, we have investigated the mechanism of bed level change for compound meandering channel experiment using steady flow and overloading sediment supply. The parameters for meandering compound channel bed fluctuation of this study include over loading sediment supply, planform of the channel and changes of relative depth. Additionally, we also have examined the characteristics of bed topography during flood period with unsteady flow condition.

Key Words: compound meandering channel, bed topography, overloading sediment supply, unsteady flow

1. 序論

複断面蛇行流路の流れと河床変動に関する研究では、芦田・江頭ら¹⁾は、複断面蛇行流れと単断面蛇行流れの相違点に着目し、underbank flow, bankfull flow, overbank flowの3ケースについて検討している。福岡ら²⁾は、相対水深の大きさを変化させた実験から、複断面蛇行流れには相対水深が小さいとき($Dr \leq 0.28$)単断面的蛇行流れ、 $Dr > 0.28$ のとき複断面的蛇行流れが現れることを示し、実河川の洪水データからもそれらの流れが存在することを明らかにしている。

これらの結果から、複断面蛇行河道における河床変動の主な特徴は、低水路の蛇行度が大きくなるほど土砂移動の縦断的变化が増大すること、蛇行度によって異なるが、高水敷の水深がある水深以上になると低水路のみを流れる単断面蛇行流れと全く異なる流れと河床変動特性を示し、低水路満杯流に比べて土砂輸送能力が低下すること等が明らかにされてきた。

複断面蛇行流れがこのような流れと河床変動特性をもつために、ダムからの排砂や流域から多量の土砂流入がある場合には、下流河道ではさらに複雑な土砂移動形態を呈するものと考えらる。このことは治水、環境面からも重要な課題であり、十分な検討が必要とされる。

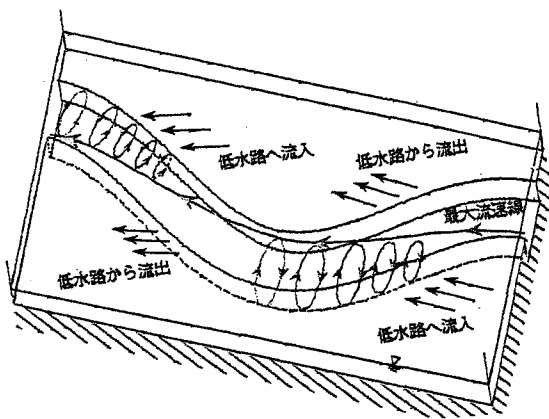
本研究では、これらの実際上の問題に対する理解を深めるために複断面蛇行流路において、上流のある断面から平衡流砂量を超える土砂を供給し、過剰に流入する土砂が流路の平面形、横断面形の影響を受けることによって生じる河床変動機構を明らかにする。さらに洪水ハイドログラフを与えた実験を行い、非定常性が流れや河床変動に及ぼす影響を調べ、これらの実験結果から複断面蛇行流路における洪水時の河床変動について検討する。

2. 複断面的蛇行流れの平衡河床形状(実験1)

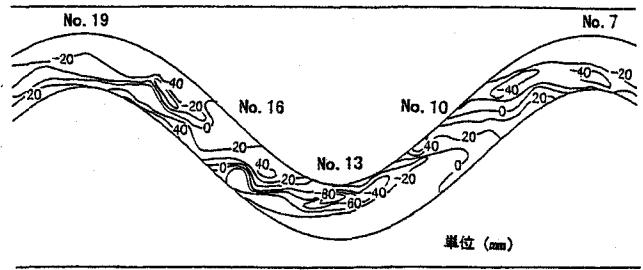
(1) 複断面的蛇行流れの構造と河床変動

図-1に蛇行度 1.17, 相対水深 0.37 の複断面蛇行流れ²⁾における(a)最大主流速線と二次流構造の模式図及び(b)河床形状コンターを示す。

複断面蛇行流れにおいて、複断面的蛇行流れが単断面的蛇行流れと大きく異なる点は、低水路と高水敷との間で主に低水路の線形に応じた流れの出入りがあるために、高水敷高さ付近で水平せん断力が働くことにより高水敷高さより下の低水路内には逆向き二次流が形成され、最大流速線が内岸寄りに現れること、高水敷流れの流出入の強さは縦断方向に異なるため二次流セルの強さも異なり、単断面蛇行流れの場合に比べ小さくなること、高水敷流れの流入



(a) 複断面的蛇行流れの二次流構造の模式図



(b) 河床変動コンター(通水9時間後)

図-1 複断面的蛇行流れの構造と河床変動
(蛇行度 $S=1.17$, 相対水深 $Dr=0.37$)¹⁾

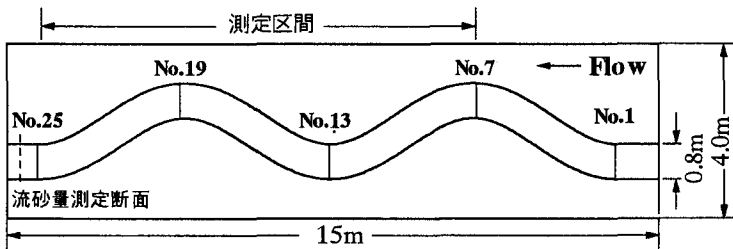


図-2 実験水路平面図

表-1 水路諸元

蛇行長	7.5m
最大偏角	35°
蛇行度	1.10
河床粒径	0.8mm(一様砂)
初期河床勾配	1/600

表-2 実験条件(実験1)

実験ケース	Case1		Case2		Case3	
	1	2	1	2	1	2
流量(l/sec)	35.6		54.1		63.9	
相対水深 Dr	0.31		0.44		0.49	

によって付加的な抵抗が働くことにより、低水路下層の流量は減少し、河床に働く掃流力が減少すること、このため土砂の輸送能力が単断面蛇行流れに比べ減少すること等が挙げられる¹⁾。

このような流れの構造により複断面的蛇行流れの河床変動は、(b)に示すように最大流速線の付近を中心に主に流速の縦断的な変化によって生じ、最大曲率断面内岸寄りに洗掘、蛇行変曲断面で堆積が生じる。

(2) 複断面的蛇行流れの平衡河床形状

複断面的蛇行流れは、(1)に示したような流れ、河床変動特性を持つために流れの構造が変化することによって洗掘、堆積が生じやすくなり、その影響で流れも変化することになる。したがって、複断面的蛇行流れの河床変動の再現性を調べ、平衡流砂量が存在し得るのかを調べる必要がある。

図-2に実験水路の平面図、表-1に水路緒元および表-2に実験条件を示す。実験に用いた水路は、全長15m、幅4m、高水敷勾配1/600の直線水路の中に幅0.8m、sine-generated curveで蛇行する蛇行度1.10の低水路を持つ複断面蛇行水路である。測定区間は断面No.7より下流側とし、上流から流れに応じた土砂移動があるため給砂は行っていない。実験は相対水深を変化させ、複断面的蛇行流れが現れる3種類について、各2回ずつ行った。

図-3に相対水深 $Dr=0.44$ の Case2-1, Case2-2における平均河床高、図-4に単位時間流砂量の経時変化を示す。

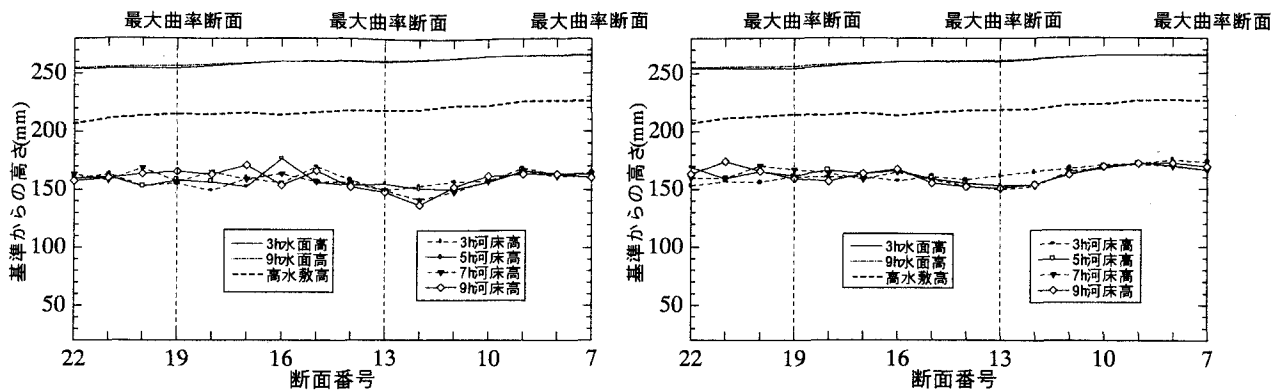
両ケースの平均河床高の経時変化は、ほぼ同じであり、有意な差は見られない。また、図-4を見ると、単位時間

流砂量も時間的な変動があるものの、通水3時間以降では差が小さくなり、9時間後には土砂はほぼ平衡状態で輸送されていると考えられる。他の Case1, Case3 についても同様の結果が得られたことから、流れおよび水路の平面形、横断面形に対応した土砂の移動がある場合には、複断面的蛇行流れにおいても河床変動の再現性は高く、平衡状態が存在するといえる。

3. 平衡流砂量を超える土砂供給がある場合の河床変動(実験2)

(1) 実験概要

実験条件を表-3に示す。実験に用いた水路は、実験1で用いたものと同じである。上流から給砂する土砂量は、次のように設定した。実験1の結果より、相対水深 $Dr=0.44$ の流れに応じた安定な河床が形成されたことから、このときの流砂量(約60cc/min)をこの水理条件、河道条件に対する平衡流砂量と考え、上流からの給砂量はこれに対して、約2倍の100cc/min(Case1)、約3倍の200cc/min(Case2)を与えた。さらにこれらと比較するために給砂量が100cc/minで相対水深を変化させた $Dr=0$ (Case3)と $Dr=0.26$ (Case4)の実験を行った。既往の研究結果¹⁾から、相対水深が0.26では、高水敷に水が乗っても単断面的な蛇



(a) Case2-1 平均河床高

(b) Case2-2 平均河床高

図-3 Case2-1, Case2-2 の平均河床高

行流れの特性を示すことがわかっている。実験は初めに平坦河床から給砂を行わずに通水(Case1, 2では3時間, Case3, 4では2時間)し、流れに応じた河床が概ね形成されたことを確認した後、No.7の直上流の断面から行った。単断面流れでは通水2時間後から3時間毎に、複断面流れでは、通水3時間後から7時間までは2時間毎、それ以降は3時間毎に水位、河床形状および下流端での流砂量を測定した。

(2) 平衡流砂量を超える土砂供給がある場合の河床変動

図-5～図-8に各ケースの(a)平均河床高, (b)最大洗掘深の経時変化を示す。

Case1は、流し得る土砂量に対して約2倍の土砂供給を行った場合である。給砂の影響による堆砂の影響が時間と共に下流に進み、堆砂前面で河床勾配が局所的に増大し、流速が大きい断面に達すると著しい洗掘が生じる。最大曲率断面のNo.13付近は、内岸側流速が最大となる断面であり、これが土砂移動による局所的河床勾配の増大の影響と重なり最大洗掘深が生じる。その下流河床は逆勾配となり砂が掃流されにくく、堆積が生じる断面となる。この断面より下流部では、洗掘深は徐々に小さくなっている。この結果、最大洗掘深の縦断変化に着目すると、最大曲率断面(No.13)を頂点とする下に凸型の変化が見られる。

このような複断面蛇行流れの河床変動特性は低水路内の流速(せん断力)が横断的にも縦断的にも異なる分布特性を持つためであり、それに加えて上流からの流入土砂という外乱により平衡状態に比べて洗掘・堆積が促進されることにより最大洗掘深は大きくなっている。Case2では、流し得る土砂量に対して約3倍の土砂供給を行った場合であり、洗掘を促進させる影響以上に上流からの過剰な土砂供給により土砂の堆積傾向が強くなっている。流入地点付近では、内岸側河床高の上昇に伴い、低水路の河積は徐々に減少している。しかし、河床高が上昇しても水位変化はほとんど見られない。これは高水敷幅が低水路幅よりも十分に広いため、低水路内の流れが高水敷に拡がり、高水敷流れの流速が大きくなることによって水位上昇に至らなかったと考

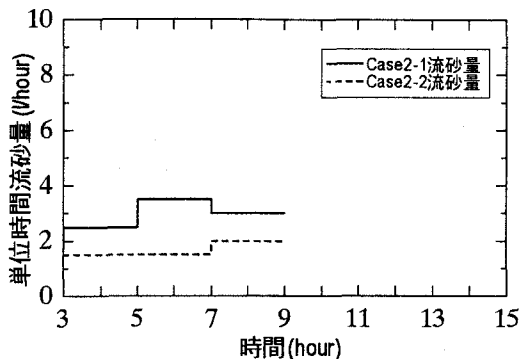


図-4 Case2-1,2-2の単位時間流砂量

表-2 実験条件(実験2)

実験 Case	1	2	3	4
流量(l/sec)	54.1		14.4	25.0
相対水深 Dr	0.44		0	0.26
給砂量(cc/min)	100	200	100	
通水時間	25時間			

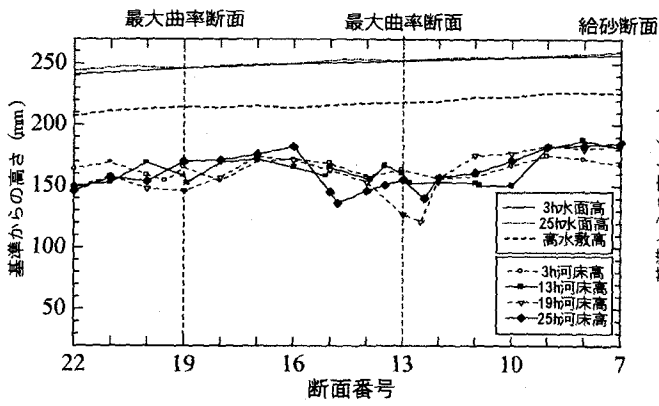
えられる。

Case3の低水路満杯流れでは、通水8時間後には最大洗掘深がほぼ一定となり平衡な河床形状が形成され、それ以降は安定して土砂を下流に輸送している。Case4は、相対水深が0.26の場合であり、最大洗掘深はCase3に比べて小さくなるものの、Case3と同様に最大洗掘深が同じ箇所に生じており、単断面的蛇行流れの様相を示している。

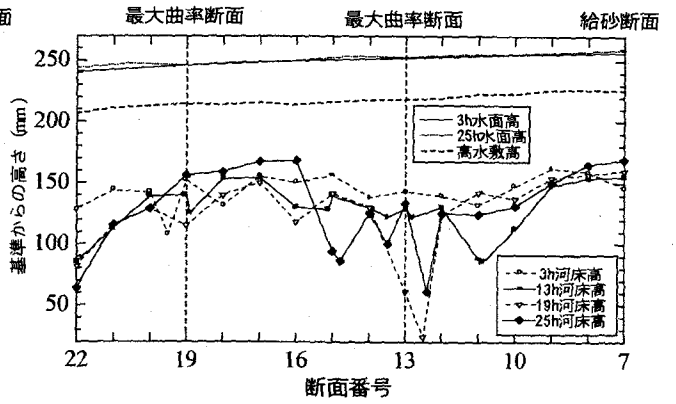
以上のことから低水路幅が一定という理想化された複断面蛇行流路においても平衡流砂量を超えるような土砂供給がある場合、掃流力の大きい単断面的蛇行流路ではある程度土砂を輸送することができるが、掃流力が小さくなる複断面的蛇行流路では局所的な洗掘、堆積が生じ、その影響が上・下流に及ぶことになる。

(3) 土砂供給量と流砂量

図-9に各ケースにおける単位時間流砂量を示す。水路下流端において測定された流砂量は、測定時間内におけるその上流側の河床高の変動と密接に関係しており、上流からの給砂の影響やそれに伴う河床変動の伝わり方によって変

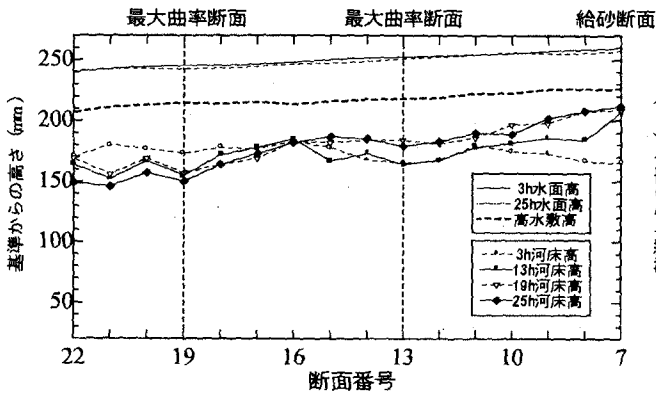


(a) 平均河床高

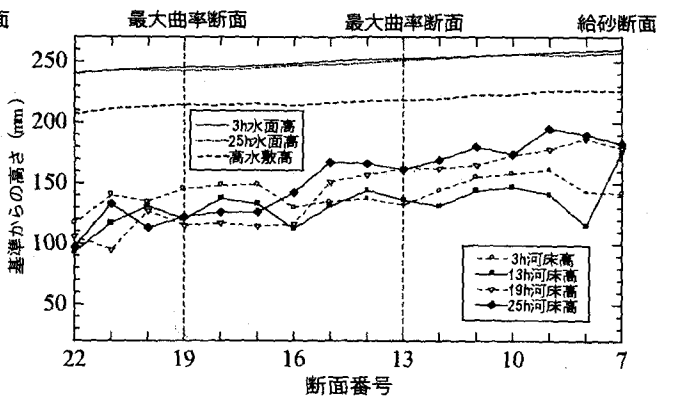


(b) 最大洗掘深

図-5 Case1($Dr=0.44$, $Q_{oin}=100\text{cc/min}$)

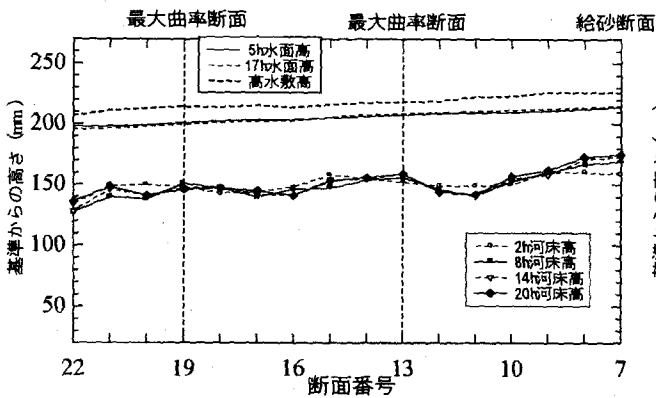


(a) 平均河床高

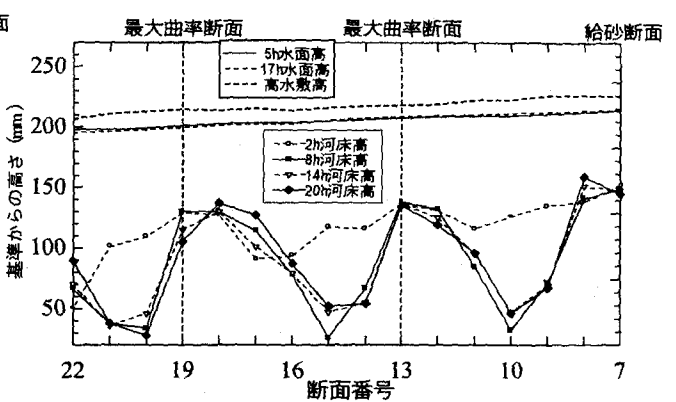


(b) 最大洗掘深

図-6 Case2($Dr=0.44$, $Q_{oin}=200\text{cc/min}$)

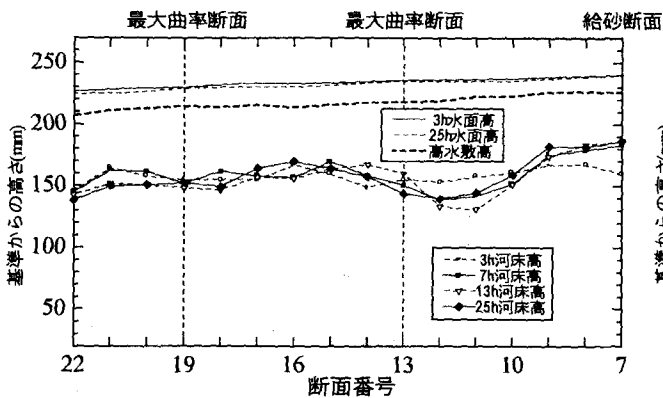


(a) 平均河床高

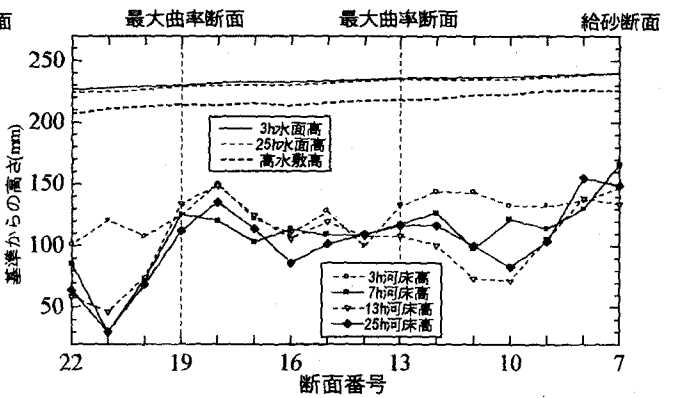


(b) 最大洗掘深

図-7 Case3($Dr=0$, $Q_{oin}=100\text{cc/min}$)

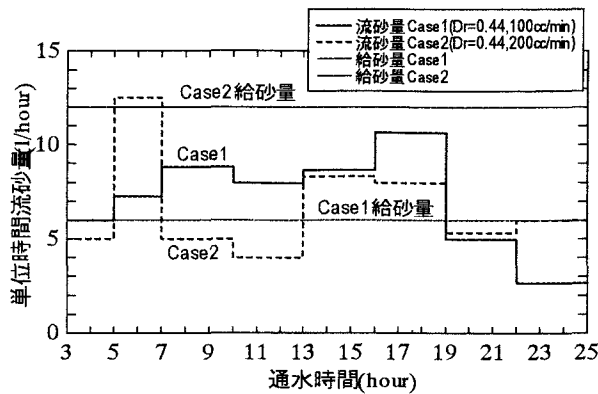


(a) 平均河床高

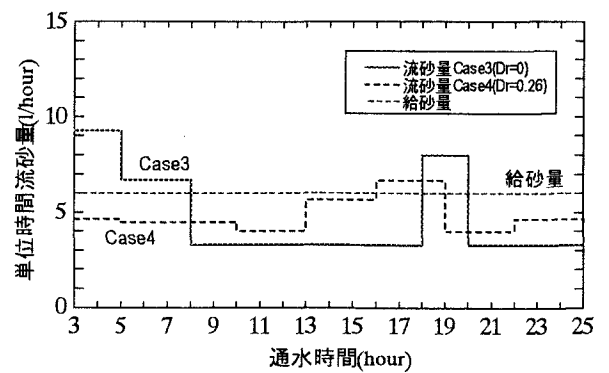


(b) 最大洗掘深

図-8 Case4($Dr=0.26$, $Q_{oin}=100\text{cc/min}$)



(a) Case1, Case2の単位時間流砂量



(b) Case3, Case4の単位時間流砂量

図-9 各ケースの単位時間流砂量

化する。(b)Case3, Case4を見ると、図-7、図-8の平均河床高が示すように測定区間では平衡状態となるために下流端において測定された流砂量の時間的な変化は小さい。ただし、給砂量に対して流砂量が若干少ないのは、測定区間上流部の給砂断面付近では横断的な流速分布の差のために流掃されずに堆積した土砂があることによるものと考えられる。(a)Case1, Case2では、通水19時間後から流砂量は減少している。これは、河床高の経時変化を見ると、流砂量測定断面上流部の蛇行変曲断面付近に土砂が堆積し、下流への土砂の流送が小さくなっているためである。したがって、さらに通水を続ければ堆積していた土砂が下流に流送されることにより、流砂量は再び増加すると考えられる。

このように複断面的蛇行流れでは土砂の供給によって土砂移動の非平衡性が強まることにより、流砂量は時間的にも場所的にも大きく変動する。

4. 複断面蛇行流路における非定常流れと河床変動(実験3)

前節まで取り扱われた複断面蛇行流路の河床変動は、定常流れで行われたものである。各相対水深の流れと土砂輸送に与える特性を把握するには良いが、洪水の重要な特性である非定常性の影響については検討されていない。そこで洪水ハイドログラフを与えた実験を行い、非定常性が河床変動に及ぼす影響について検討した。

(1) 実験概要

実験1, 2と同じ水路条件で、図-10に示すような洪水ハイドログラフを流量制御装置によって与える。実験水路を1/100スケールと考えると、Case1のハイドログラフはピーク流量 $6000\text{m}^3/\text{sec}$ 、ピーク相対水深0.47、継続時間40時間程度となり、大河川の洪水に相当する条件と考えてよい。Case2は洪水継続時間がCase1の1/2のハイドログラフを与えた場合である。実験の初期河床形状は、実河川の平常時の河床形状を想定して、低水路満杯流量で平坦河床から2時間通水を行った形状(外岸河床の洗掘、内岸河床の堆積)と

し、時々刻々と変化する流量に対し水位を5分毎、河床形状は超音波式河床形状測定器を用いて40分毎に停水して測定し、経時的な変化を調べた。下流端水位は低水路満杯流量時にほぼ等流となる条件に設定した。

(2) 流れ、河床形状に及ぼす非定常性の影響

図-11にCase1における縦断水位の経時変化を示す。20分~180分の間が高水敷上も水が流れる複断面蛇行流れの状態にある。水位はゆっくりと変化し、縦断水面勾配はほぼ一定値をとっている。

図-12にCase1の初期状態と通水中に現れた各時間の河床形状を示す。(a)の初期河床形状は、実河川の平常時の河床形状(外岸河床の洗掘、内岸河床の堆積)を示す典型的な単断面蛇行流れの河床形状である。水位が少し上昇した(b)の状態では、最大流速が内岸寄りに現れる複断面的蛇行流れを呈しているが、その継続時間が短いため、河床形状は初期状態からほとんど変化していない。(c)の通水120分後には $Dr=0.44$ となり、最大流速線上で徐々に洗掘、堆積が見られる。その際、蛇行部頂点の内岸で洗掘された砂は下流の水衝部(変曲断面の外岸側)に流送され、深掘れを埋め、洗掘深が小さくなっている。(d)の状態になると、低水路内の流れは、遠心力が卓越する単断面的蛇行流れとなり、洗掘域が外岸側へと移動している。その結果、変曲断面の水衝部に深掘れが生じ、(c)の時間帯に発生していた内岸の河床の洗掘域が埋め戻されつつある。(d)の洪水直後の河床形状は、単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れのふたつの流れの特性を残した河床形状となっている。その後、その河床形状は平常時の小さい流量によって徐々に変化し、時間をかけて洪水前の(a)の河床形状に戻る。Case1のハイドログラフの継続時間を1/2としたCase2でも洗掘域及び堆積域の発生位置の変化は、Case1とほぼ同様の結果を得た。しかし、Case2では複断面的蛇行流れとなる時間帯が相対的に短いためCase1に比べ変動量が減少した。

わが国の大河川の洪水について調べたところ、ピーク時の相対水深は既往最大クラスで0.4~0.5程度、洪水継続時間は2~3日間程度であることがわかっている⁴⁾。複断面的

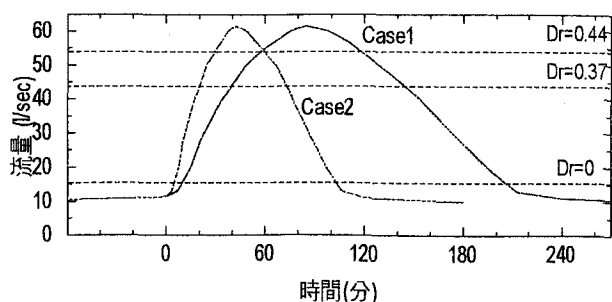


図-10 設定ハイドログラフ

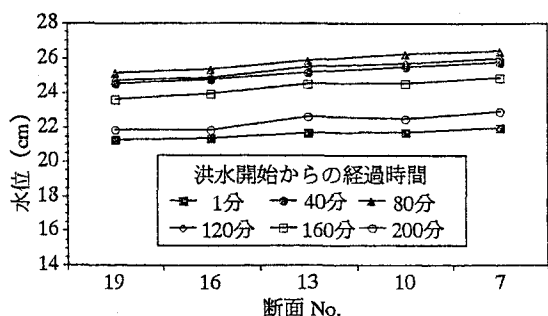
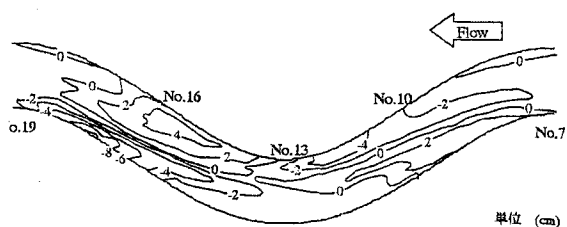
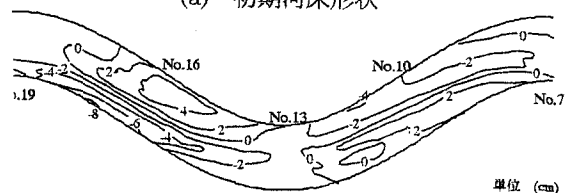


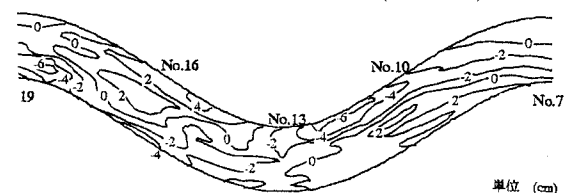
図-11 縦断水位の経時変化(Case1)



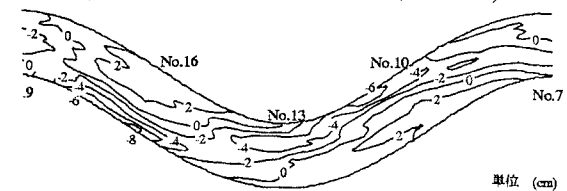
(a) 初期河床形状



(b) 通水 40 分後の河床形状(Dr=0.37)



(c) 通水 120 分後の河床形状(Dr=0.44)



(d) 通水 200 分後の河床形状(Dr=0)

図-12 河床形状の経時変化(Case1)

な流れが現れる時間帯は中でも十数時間程度であり、よほど大きい相対水深が長く続く場合か、洪水が続けて発生する等の特別な場合を除けば内岸側河床の洗掘はそれ程大きくないといえる。江の川での洪水時の内岸河床変動調査⁵⁾では、内岸河床の洗掘が確認されたが、この場合はピーク流量時の相対水深が0.40で、河岸段丘上を5日以上流れ続けた長時間の長い大洪水であった。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 単断面蛇行流れに比べて二次流の強さが小さく、土砂の輸送能力が減少する複断面蛇行流れにおいても、流れに応じた土砂の供給がある場合には、河床変動の再現性が高く平衡河床が形成される。
- (2) 複断面的蛇行流れにおいて、与えられた条件に対して平衡状態で流し得る土砂量よりも多く土砂を流した場合には、給砂という外乱による土砂の移動と流路の平面形に起因する流速分布との相互作用によって、平衡状態よりも大きな河床変動が生じ、洗掘・堆積作用が促進される。この河床高の変動により、流砂量は、時間的にも場所的にも変動する。
- (3) 初期河床を実河川の形状に想定して行った非定常実験から、洪水時の河床変動について検討した結果、複断面的蛇行流れが現れる時間帯は短く、よほど大きい相対水深が長く続く場合か、洪水が続けて発生する等の特別な場合を除けば内岸河床の洗掘は生じにくい。

参考文献

- 1) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義, 滝口将志: 蛇行低水路を有する複断面流路における流れの特性と河床変動機構, 京都大学防災研究所年報, 第32号B-2, pp. 527-551, 1989.
- 2) 福岡捷二, 小俣篤, 加村大輔, 平生昭二, 岡田将治: 複断面蛇行河道における洪水流と河床変動, 土木学会論文集No.621/II-47, pp. 11-22, 1999.
- 3) 岡田将治, 藤原昌典, 福岡捷二, 渡邊明英: 複断面蛇行流路の非定常流れと河床変動, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, II-333, pp. 666-667, 1998.
- 4) 福岡捷二, 高橋宏尚, 加村大輔: 複断面蛇行河道に現れる複断面的蛇行流れと単断面的蛇行流れ—洪水航空写真を用いた分析—, 水工学論文集, 第41巻, pp. 971~976, 1997.
- 5) 福岡捷二, 道中貢, 平生昭二: 複断面蛇行河川における洪水時の低水路内岸側河床の最大先掘深調査, 水工学論文集第42巻, pp. 973~978, 1998.

(1999. 9. 30受付)