

水路における砂礫堆の水理特性について

芦田 和 男・塩 見 靖 国

STUDY ON THE HYDRAULIC BEHAVIOURS OF DUNES (MEANDER) IN CHANNELS

by Kazuo ASHIDA and Yasukuni SHIYOMI

Synopsis

Diagonal dunes are formed and meandering flow occurs even in a straight channel with movable bed and rigid side walls under the special conditions of hydraulic quantities and flow geometries. Dunes in a channel with not straight alignment are different from those in a straight channel. To make clear the characteristics of dunes in channels with various alignment is very important problem in river engineering. In this paper, authors discussed the hydraulic characteristics of dunes in a straight channel and in meandering channels of three kinds of amplitude with rigid side walls which have same wave length equal to the one of the dunes in the straight channel. In the case of small amplitude, dunes move downstreams as in straight channels but the movement stop for the larger amplitude than critical one. Authors discussed the above critical condition and the configuration of dunes and flow geometries when the movement of dune stopped.

1. 緒 言

移動床上の Sand Wave には種々の形態があって、その名称も必ずしも統一されていないが、Ripple, Dune, Transition, Smooth, Standing Wave, Antidune に区分されるのが普通のものである。本論で取り扱う砂礫堆は、上の Dune の中の特別の形態であって、水路の斜め方向に前縁を持って蛇行する Scale の大きな Dune で、Meander ともいわれるものである。

砂礫堆は上のように河床形態の特別の場合ではあるが、実験室においてもまた実際河川においてもかなり一般的に見受けられ、蛇行流の発生、発達、流路の変動と密接な関係がある重要なものであって、木下^{1), 2)}によって数多くの実証的、実験的研究が進められており、多くの特性が明らかにされている。この砂礫堆の名称も木下によって与えられたものである。

砂礫堆は、洪水の破壊力にも大きな関係を持つ。すなわち砂礫堆の外側部に流れの集中する付近に洪水災害が集中するのはしばしば経験する事実である。また砂礫堆は一般に移動し、これに伴って深掘れの位置が変って行くので、その移動特性は護岸計画に大きな影響を持つ。一方側壁が適当に蛇行している場合には砂礫堆の移動は停止し、流路は固定する。従来より、法線は適当に蛇行させる方が流路を固定する上によいとされているが、この事実を示すものであろう。しかし現状ではこれについての科学的根拠が明らかでなく、定量的な評価を行ないえない。

そこで本論においては、洪水の破壊力、法線計画との関連のもとに、側壁形状が砂礫堆の挙動に及ぼす影

響およびその時の流れの特性を解明することを目的として、まず直線水路における砂礫堆の特性について考察し、さらに直線水路における砂礫堆の一波長を波長として振幅のみ異なる3種類の側壁を固定した蛇行水路を作り、その中における砂礫堆の特性および流れの特性に関して実験的検討を行なう。

2. 砂礫堆の発生原因と発生条件

砂礫堆およびこれにもとづく Meander はなぜ発生するかについては数多くの説があるが、まだ定説はない。一方その発生に関しては、木下²⁾は実験的にその発生の限界条件を提案している。足立³⁾は、流れの不安定性が Meander の発生に限界を与えるとする考え方から、微小変動理論を用い、主流方向と直角方向の微小変動項 v' の安定、不安定の限界を検討し、その限界が存在することを示している。この中には未知の無次元量も含まれているが、 Fr , $(f'/2\pi) \cdot B/R$ が限界を規定する重要な無次元量とされている。

(Fr : Froude 数, f' : 抵抗係数, B : 水路幅, R : 径深)

砂礫堆の発生機構が明確でない現在、その発生条件を適確に知ることは困難であるが、現象的に若干考察するとつぎのとおりである。 Fr がそれほど大きくなく、かつ粒径が小さく、土砂の移動がかなり活発な場合には Fig. 1 に示すような三次元的な Dune が発生する。これは、その形状から考えて側壁近傍から発生する Vortex Tube の作用によるものであろう。この場合水深を小さくして、流速を大きくしていくと、砂礫堆が形成されていくが、この移行の限界状態は Fig. 1 に示すようであって、Vortex Tube のうち特別

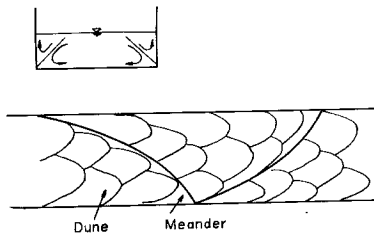


Fig. 1 Dunes and meander.

のものが次第に卓越して来てかなりはっきりした Meander が形成されるようである。これには Vortex Tube の消少、発達の様相が大いに関係するものと考えられる。この場合底面摩擦は Vortex を減衰させる方向に働く。一方 Sand Wave とそれによって誘起される表面波の相互干渉、流水と流砂の間の Lag^{4) 5)} などある条件のもとでは Vortex Tube を維持する作用を持つものと考えられる。したがって砂礫堆の発生条件を解析的に求めるためには Side から発生する Vortex Tube の強さ、摩擦による減衰、流水と

流砂の Lag, Sand Wave と水面波との相互干渉の効果をすべて導入することが必要であろうと考えられ、これは今後に残された課題であるが、上の考察に関係する重要な無次元量としては、 Fr , B/h , f' , $u_*^2/(\sigma - \rho)gd$ であって、これがある範囲にあるとき、砂礫堆が発生するものと思われる。

Einstein⁶⁾ は側壁を粗にした水路において、Meander が発生することを認め、これを Vortex Tube の消少によるものであるとし、ここで取り扱っているような砂礫堆は水面のセイシュによるものであるとして区別しているが、著者は、本質的にはいずれも上に示したように同じであって、どの要素がより強く影響するかによると考える。

従来の実験結果では、側壁を粗にしない場合には、 $Fr > 0.7 \sim 0.8$, $B/h > 10 \sim 20$ でないと砂礫堆が発生していないようであり、また B/h があまり大きくなりすぎると複列の砂礫堆が発生するようである。上に示したようにこの他にも種々の無次元量に関係すると考えられるので、これだけでは適確な範囲を定めることができないが、一応の目安となりえよう。

3. 砂礫堆に関する実験装置および方法

(1) 概 要

まず、有効長 18m, 幅 50cm のコンクリートモルタル張りの直線水路に Fig. 2 に示すような実験用砂を敷き、流量、流砂量および勾配を種々変えて、形成される砂礫堆の特性を検討した。この場合の砂礫堆の波

長は条件によって異なるが、約 4.0m であつたので、波長を 4.0m とし、振幅のみ異なる 3 種類の蛇行水路（水路幅 0.5m，両側壁板金製）を作り，この中における砂礫堆の特性および流れの特性を検討した。

（２）実験水路

実験水路は Fig. 3 および Photo. 1 に示すとおりである。

（３）実験種類

実験種類は Table. 1 のとおりである。

勾配は初期の河床勾配である。蛇行水路については水路中心線に沿って測つたもので示している。流量はあらかじめ水路の他の部分に流して調節してお

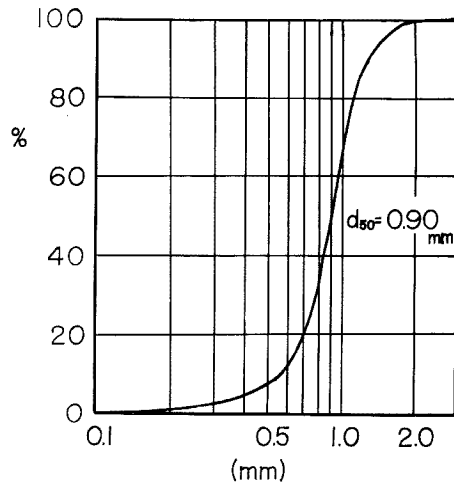


Fig. 2 Grain-size accumulation curve of used sand.

Channel –	S	M ₁	M ₂	M ₃
r _c (m)	Straight	1.20	3.41	10.01
a (m)		0.40	0	0
θ		90°	34°12'	11°30'
λ (m)		4.0		
B (m)	0.5			

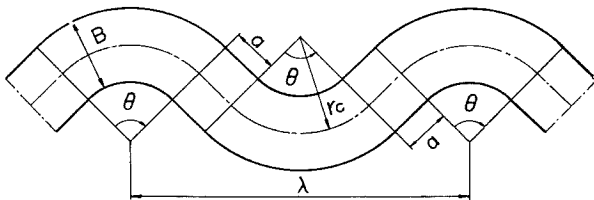


Fig. 3 Experimental flume.

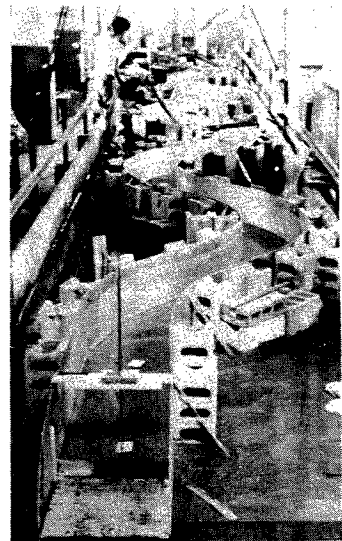


Photo. 1 Experimental flume : M₁ channel.

き，実験開始と同時に水路に流入させ，同時に給砂を開始し，河床形状，水面形状，流向，砂礫堆の移動状況，最下流端における流砂量を測定した。給砂量と流砂量とが等しくなく，実験終了時の河床勾配が初期河床勾配と若干変化している実験ケースもあった。

4. 直線水路における砂礫堆の特性

（１）砂礫堆および流れの特性

実験開始後約 2 分程度で，Fig. 4 に示すような斜めの線に沿っての堆積がおり，約 5 分程度で高低差が大となって，そのままの形を維持しつつ下流へ移動する。砂礫堆の発生に伴って表面および底面の流線も

Tadle. 1 Runs of Experiment

Discharge Q (l/sec)	I	Sediment Discharge Q_B (g/sec)	Runs of Experiment			
			S	M_1	M_2	M_3
1. 0	$\frac{1}{100}$	0	S-1			
2. 0	"	0	S-2			
3. 0	"	0	S-3			
2. 0	"	10.0	S-4	M_1-4		
3. 0	"	15.0	S-5	M_1-5	M_2-5	M_3-5
4. 0	"	20.0	S-6	M_1-6	M_2-6	M_3-6
5. 0	"	18.0	S-7	M_1-7	M_2-7	
5. 0	"	30.0	S-8			M_3-8
3. 0	$\frac{1}{80}$	10.0	S-9	M_1-9	M_2-9	M_3-9
4. 0	"	10.0		M_1-10		
5. 0	"	15.0	S-11	M_1-11	M_2-11	M_3-11
1. 0	$\frac{1}{70}$	0	S-12			
2. 0	"	10.0	S-13			
3. 0	"	15.0	S-14	M_1-14	M_2-14	M_3-14
4. 0	"	20.0	S-15		M_2-15	M_3-15
5. 0	"	30.0	S-16		M_2-16	M_3-16

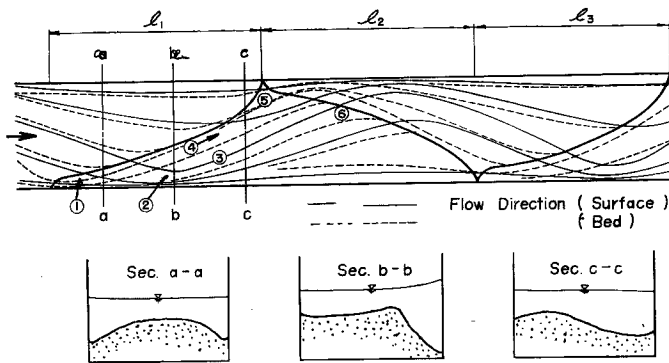


Fig. 4 Meander in a straight channel.

で、表面と底面における流向にも差があり、二次流が発生していることがわかる。④の部分では掃流される砂があまりなく、上流側の砂礫堆との境界線から滑り落ちる砂が堆積し、砂礫堆が前進する。この部分では表面、底面の流向差が最大であって、表面流は砂礫堆の境界線と直角に近い方向に、底面流はこの境界線に沿った方向に流れる。

ある位相差を持って蛇行形状を呈する。このような砂礫堆の特性は本下によって詳しく調べられている所であるので、ここでは簡単に説明するにとどめる。

①は砂礫堆の先端であってかなり明瞭に認められる。②は洗掘深最大の個所である。③は②の部分で洗掘あるいは上流側の砂礫堆から滑り落ちて Flash された砂が、水路方向とかなりの角度を持って掃流されている部分

⑤の部分は、②、④で掃流される砂が、この部分まで回り切らず、流量の小さい場合にはほとんど流砂がなく、河床高は高い、⑥の部分は蛇行している流れの流路に当たっていて、流砂が多い。

砂礫堆の一波長はFig. 4における $(l_1 + l_2)$ であるが、一般に砂礫堆の長さ l として $l_1, l_2, l_3, \dots$ の値が用いられているので、ここでもこれを採用することにする。

砂礫堆の移動速度は早く、小人数で砂礫堆の全体にわたって水位と河床を同時に測定するのは困難であり、普通の場合にはまず水位を測り続いて下流側のせき上げ板を引き上げて水をせき上げ、河床を測定しているが、S-15の場合は一たんせき上げて固定している河床にセメント粉をまき、主要部分には固結剤アロン41を用いて河床を砂礫堆の発生している状態に固定し、ふたたび通水して水位を測定した。Fig. 5(1)、Fig. 5(2)はS-5およびS-15の左右岸にそっての水位および河床の縦断形状である。水面勾配は階段的に変化し、砂礫堆の前半部は緩く、後半部は急である。一測線に沿う河床の縦断形状はかなり大きく変化しているが、平均河床高の縦断形状はほとんど直線に近くなる。Fig. 6・

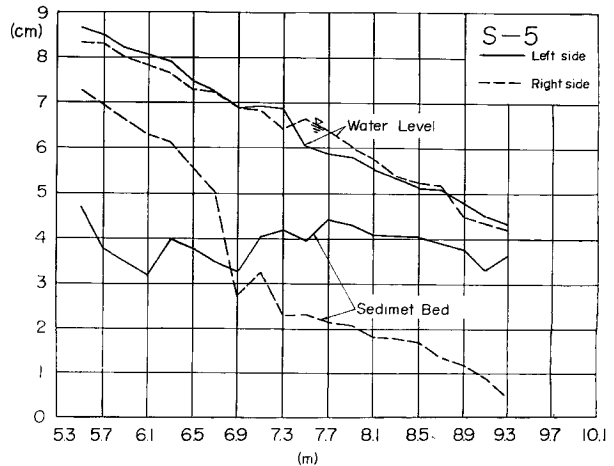


Fig. 5 (1) Profiles of the water level and of the sediment bed along the side walls when meander occurs in a straight channel.

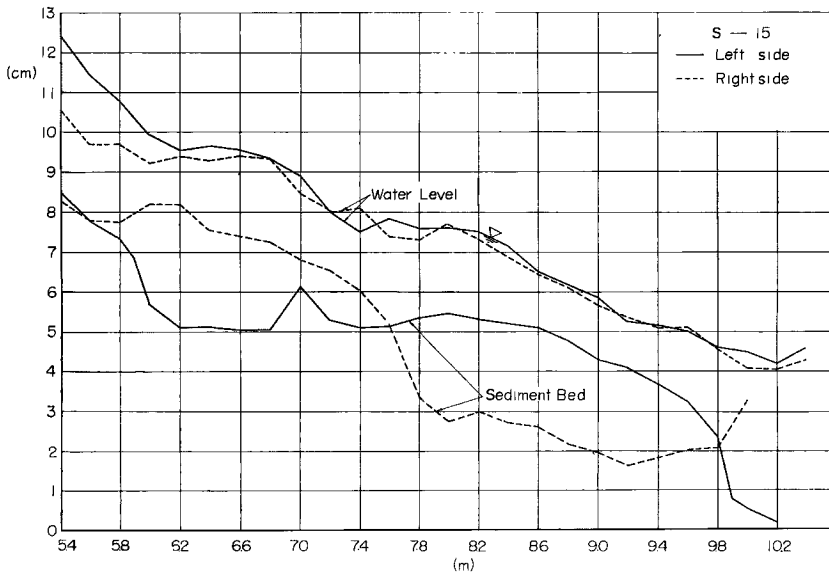


Fig. 5 (2) Profiles of the water level and of the sediment bed along the side walls when meander occurs in a straight channel

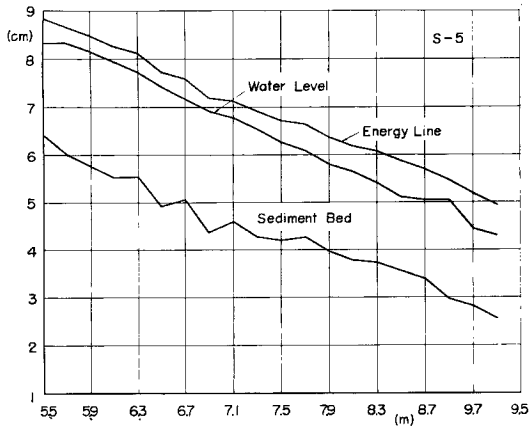


Fig. 6 Profiles of the mean water level and of the mean bed.

Fig. 7 は S-15 の実験における 各断面の底面付近の流速分布を表わす。セメントおよびアロン 41 による固定が十分でなく、新たに河床が洗掘され始めた所があって精度は十分ではないが、砂礫堆の先端部付近では流速がほとんどなく、次第に増大していき、つぎの砂礫堆の先端部の対岸付近で最大となるようである。また、最大流速の位置は中央部付近にくることなく、蛇行している水流の特質をよく表わしているようである。

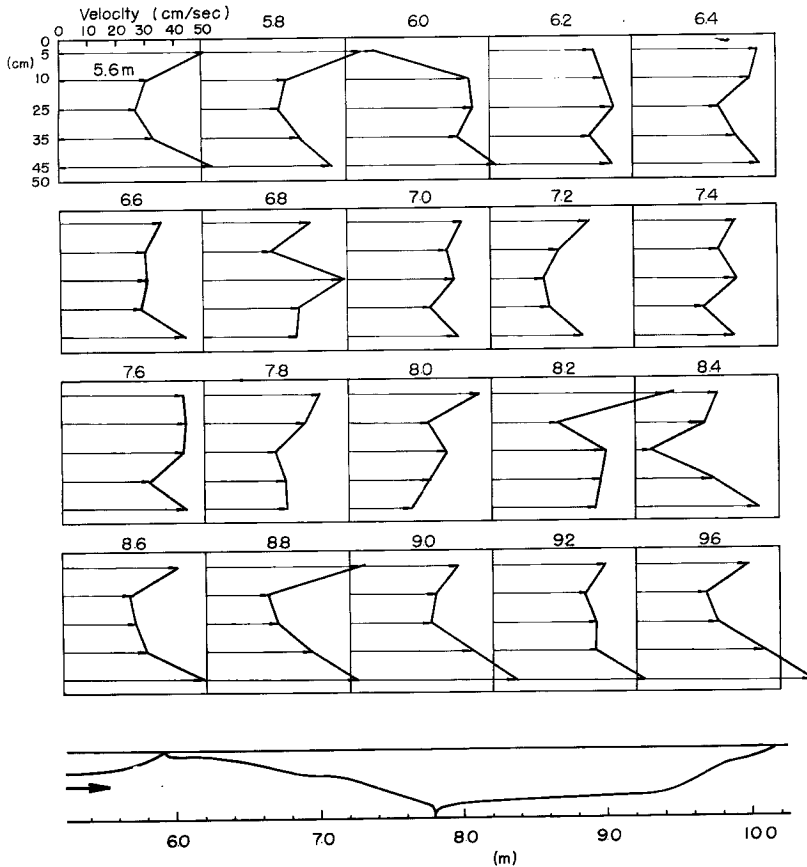


Fig. 7 Velocity-distribution near the bed in various cross sections along the meandering bed in straight channel.

(2) 砂礫堆の長さ、流下速度

砂礫堆の長さおよび移動の状況を知るために、砂礫堆の先端の位置を時間、距離平面上に plot したものの1例が Fig. 8 (1), Fig. 8 (2) である。

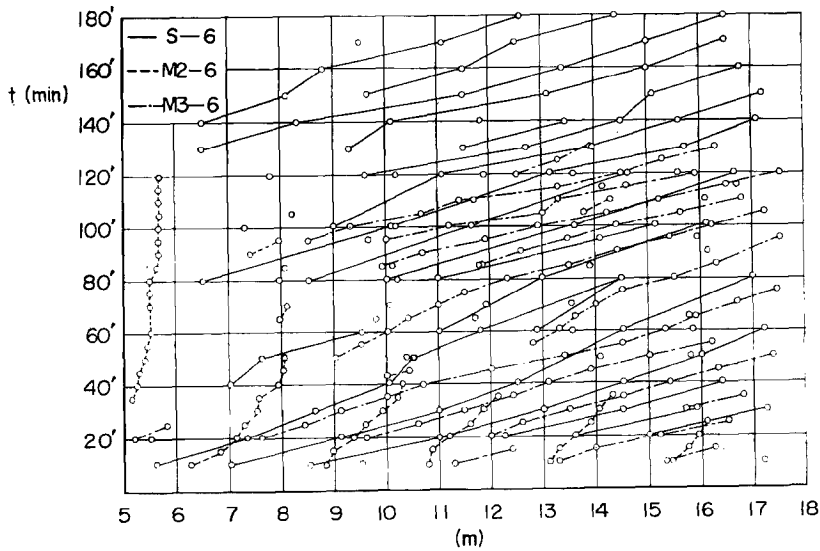


Fig. 8 (1) Position of the dunes (meander) in a $x \sim t$ plane.

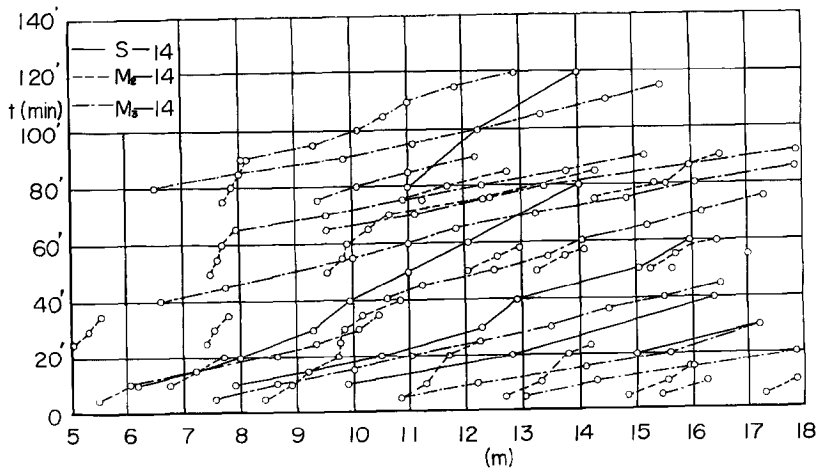


Fig. 8 (2) Position of the dunes (meander) in a $x \sim t$ plane.

このようなFig. 8より砂礫堆の長さ l と移動速度を各実験ケースについて求めるとTable. 2のようになる。砂礫堆は通水の初期の段階ではまだ十分に発達しておらず長さも多少短かいので、実験初期と実験時間内の平均の長さの両方を示しておいた。

Table. 2 Experimental results of the length and the travelling velocity of dunes in various channels.

No.	l_{mean} (m)	l_{initial} (m)	$v_{d\text{mean}}$ (cm/sec)	$v_{d\text{initial}}$ (cm/sec)	depth h (cm)	mean velocity v (cm/sec)
$S-1$	1.40	1.29	3.69	4.08	0.86	23.26
2	1.96	1.69	6.15	7.00	1.32	30.30
3	1.95	1.41	10.58	12.16	1.68	35.70
4	1.60	1.41	7.31	12.60	1.32	30.30
5	1.74	1.36	11.77	22.30	1.68	35.70
6	1.76	1.48	13.27	18.50	2.01	39.80
7	1.73	1.70	13.95	19.25	2.30	43.49
8	1.44	1.48	3.39	4.00	0.78	25.64
9	1.73	1.76	14.20	20.85	1.18	33.90
10	2.28	2.10	11.13	35.00	1.52	39.54
11	2.15	1.89	21.37	55.50	1.80	44.44
12	2.07	1.96	21.08	39.20	2.06	48.54
M_2-1	2.15	2.01	4.66	2.96	1.88	31.80
2	2.25	2.25	7.14	4.87	2.63	30.50
3	2.20	2.38	8.86	8.56	2.41	40.38
4	2.19	2.29	8.84	7.70	1.73	34.60
5	2.18	2.29	8.82	10.70	2.46	36.05
6	2.33	2.18	9.42	9.64	1.64	36.60
7	2.48	2.19	11.66	15.20	2.08	38.40
8	2.14	2.14	8.51	8.63	2.18	45.80
M_3-1	2.61	2.34	14.94	22.35	1.83	32.80
2	2.19	2.23	19.10	19.40	1.97	40.60
3	2.59	2.94	17.44	18.45	2.40	41.70
4	2.58	2.89	23.22	19.70	1.70	35.30
5	3.07	2.46	28.30	27.00	2.82	35.86
6	2.79	2.80	23.70	29.90	1.81	33.79
7	3.29	1.98	35.09	46.55	1.90	42.10
8	3.04	2.83	38.06	44.13	2.52	39.65

砂礫堆の形状には Froude 数や B/h が重要な影響を与えると考えられるので、砂礫堆の長さ l と水路幅 B との比 l/B と Froude 数との関係を B/h を parameter にして画いたものが Fig. 9である。

Froude 数が増加するにつれて l/B は増加する関係が認められる。この図には示していないが実際河川においては、 $l/B=2.0\sim3.0$ の場合が非常に多いようであるが、この場合の Froude 数は Fig. 9の小さい範囲が普通であろうから、これは Fig. 9の傾向とも一致するものと考えられる。

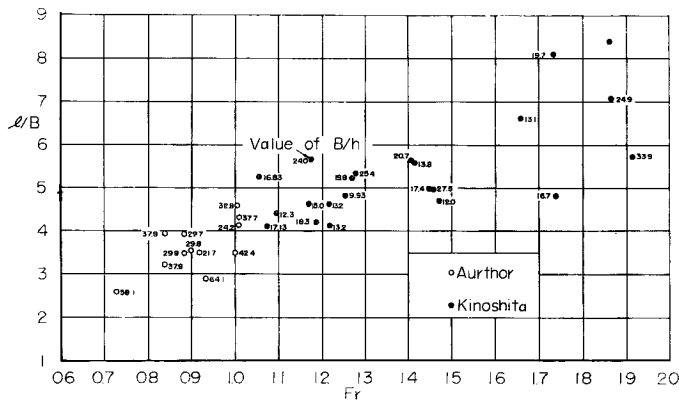


Fig. 9 Relation between l/B {nondimensional length of dune (meander)} and Froude number.

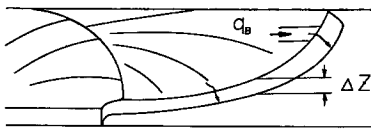


Fig. 10 Schematic sketch of dunes.

砂礫堆の流下速度 v_d について、Fig. 10 のように砂礫堆の境界線より滑りおちる流砂が、すべて前面に堆積すると仮定し、単位幅当りの流砂量を q_B 、砂礫堆の高さを ΔZ とすれば、

$$v_d = \frac{q_B}{\Delta Z (1-\lambda)} \quad (1)$$

である。 $\Delta Z/l$ 、 l/B は Froude 数の関数であると考えられるので、上式は、

$$v_d = \frac{q_B}{B(1-\lambda)} \cdot f(F_r) \quad (2)$$

の形で書き表わされる。

このような河床形状のときには、どのような流砂量式が最も適当であるかは問題であるが、ここでは次式

$$\frac{q_B}{u_* \cdot d} = K \left\{ \frac{u_*^2 - u_{*c}^2}{(\sigma - \rho)gd} \right\}^2 \quad (3)$$

を用いることにすれば、(2) 式は

$$\left(\frac{v_d}{u_*} \cdot \frac{B}{d} \right) / \left\{ \frac{u_*^2 - u_{*c}^2}{(\sigma - \rho)gd} \right\}^2 = \frac{K}{1-\lambda} \cdot f(F_r) \quad (4)$$

となる。すなわち、砂礫堆の流下速度 v_d を上式のように無次元化したものは Froude 数の関数になるという結果がえられた。Fig. 11 は実験値によって (4) 式の関係を求めたものである。

5. 側壁固定した蛇行水路における砂礫堆の特性

(1) 砂礫堆の挙動に関する実験結果の概要

(a) M_1 水路： M_1 水路における実験方法は S 水路の場合と同様である。通水直後、弯曲部の凹岸に沿って線状に洗掘され始め、この洗掘線が次第に巾を増し、洗掘深さが急激に増大して、通水直後約 5 分で完全に砂礫堆が形成される。この場合の砂礫堆の形成は、 S 水路のように掃流されている砂が一定の線に沿って堆積し始め、これが砂礫堆の境界線となっていくのと違って、元河床が洗掘されることによっておこなわれる。こうして出来た河床の形態を S 水路の場合と同じく砂礫堆として取り扱うのには若干疑問の点もあるが

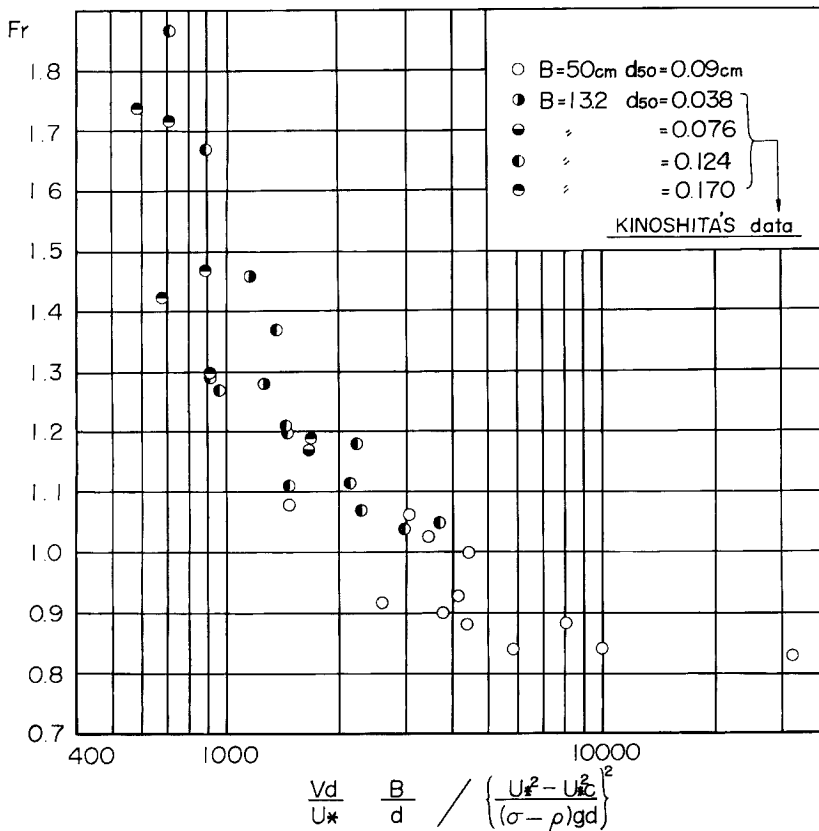


Fig. 11 Relation between nondimensional travelling velocity of dune and Froude number.

その河床の状態は S 水路の場合とかなり似ている。一たん形成された砂礫堆の境界線の上流側の部分はほとんど動かず下流側の部分は若干変動した。Fig. 12 (1), (2) はこの場合の左右岸の水位、河床高および砂礫堆の平面形状の 1 例である。平面形状においてハッチした部分は平均河床高より高い部分で、堆積の位置を示す。

(b) M_2 水路: M_1 水路では砂礫堆の移動は停止したが, M_2 水路では形成された砂礫堆がある範囲内のみを移動して消え, ふたたびもとの位置近くに形成されるというような周期的な運動をする場合と, 凸岸をまわり切って流下する場合の 2 通りがあらわれた。すなわち, M_2 水路が砂礫堆の移動停止の限界付近にあって, それよりも振幅の大きい水路では移動が停止し, 振幅の小さい水路では砂礫堆は移動流下すると考えられる。 M_2 水路の砂礫堆の先端は凹岸側の上流部に形成され, 流下して凸岸に近づくにつれて, 洗掘の深さは減少し, 速度は増加する。凸岸をまわり切る場合には, 速度は曲頂付近で最高となり, 洗掘深さは曲頂をまわり切った少し下流側で最小となる。 M_2 水路の実験範囲において, 勾配大, 流量大の場合には S 水路の場合と同じく高低差 0.5~2.0 cm 程度の激しい波立ちがおこり, その時の河床形状は縦すじにならぶ Ripple を伴っている。すなわち Dune with Ripple の状態である。波立ちの状態は砂礫堆の移動と大きく関係し, 砂礫堆の移動と共に水路内における位置が変動し, 先端が凸岸の曲頂部付近まで移動すると, その波立ちも水路中心部に寄ってくるか, 消失する。Fig. 13 は M_2 水路の左右岸の水位, 河床高の 1 例であ

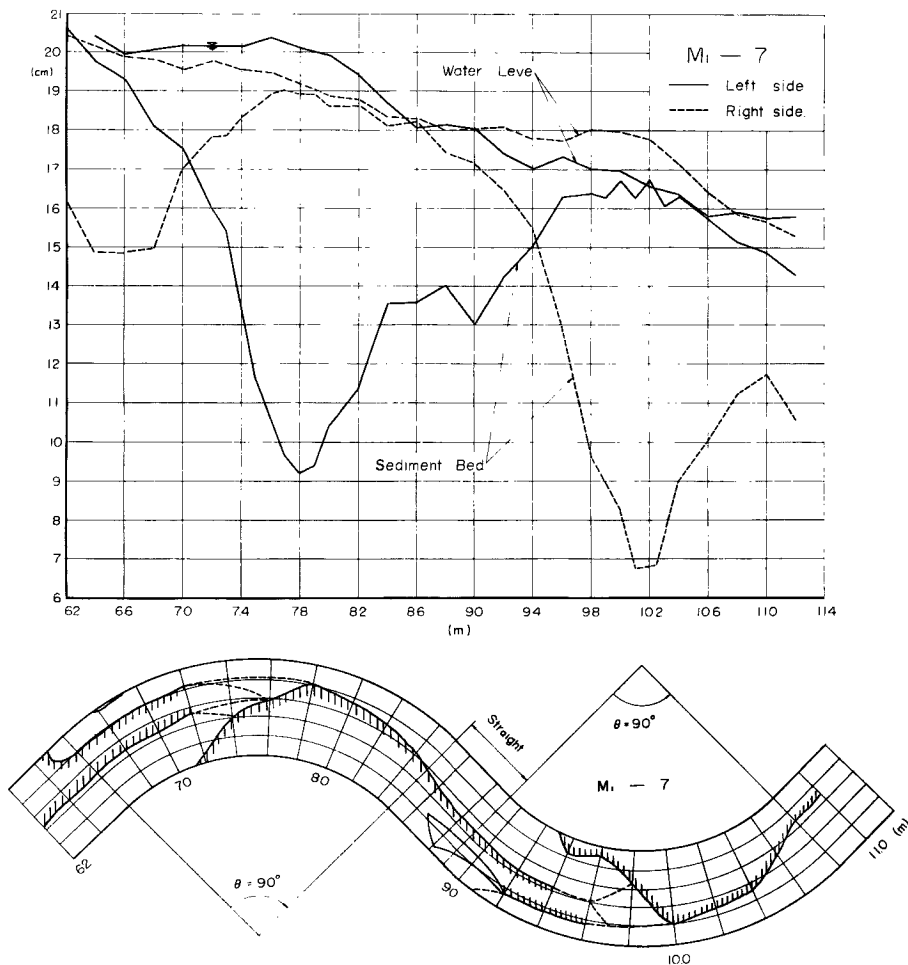


Fig. 12 (1) Profile of the water level and of the sediment bed along the side walls, and forms of the dumes. (M_1)

る。

(c) M_3 水路：この場合は、振幅が小さいため砂礫堆の発生、移動速度、長さなどは S 水路の場合とほとんど同じであって、砂礫堆は全部移動流下する。砂礫堆の移動状況は、Fig. 8 に示したとおりである。

砂礫堆の発生していない場合には、横断方向に4列程、高低差 0.25~2.5cm、波長 10~18cm、波立ちの巾 5~15cm 程度の激しい波立ちができ、表面、底面の流向差もほとんどなく、流れは直線に近い状態で流下する。この場合の河床形状はRippleである。また M_2 水路と同じく、Dune with Ripple の状態もあった。Fig. 14 は M_3 水路における左右岸の水位と河床高の1例である。

(2) 水面形に関する考察

(i) 縦断形状：上に示した Fig. 12~Fig. 14 より水位の縦断形状について考察するとつぎのとおりである。

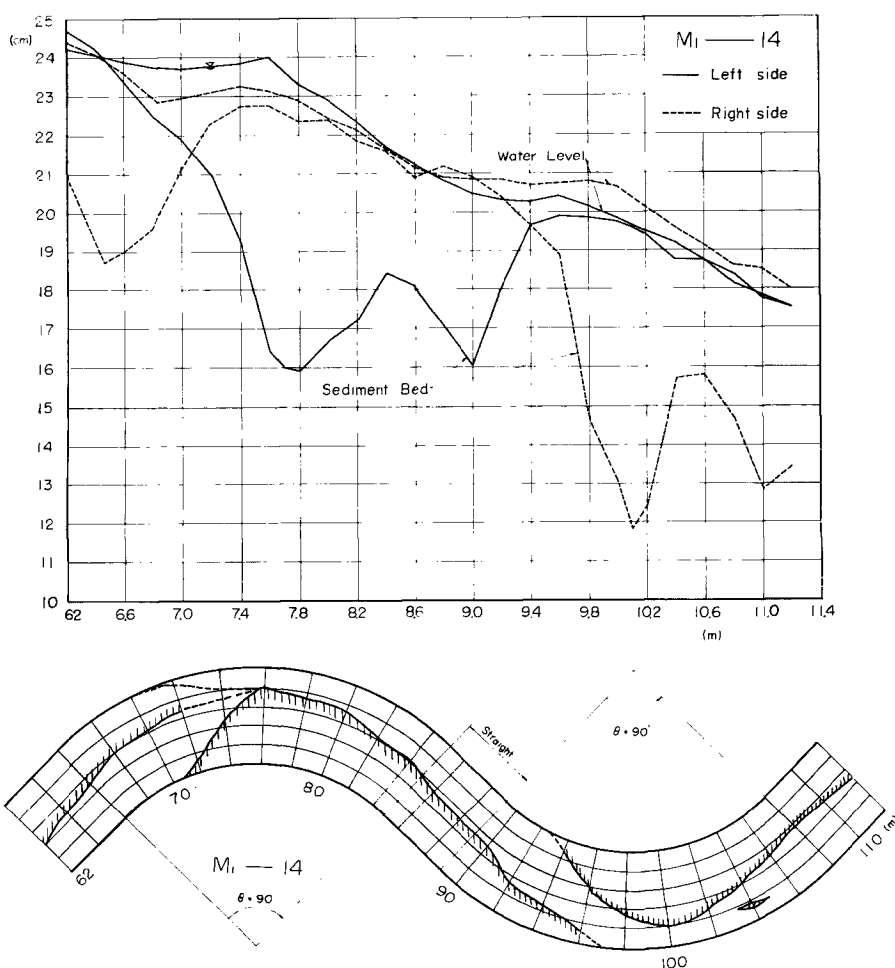


Fig. 12 (2) Profile of the water level and of the sediment bed along the side walls, and forms of the dunes (M_1)

(a) M_1 水路：水面形を模式的に示すと Fig. 15 のとおりであって、凹岸、凸岸とも水面勾配には急変点があって、水位は2本の折線であらわされる。凹岸に沿っては弯曲部の入口から中心偏角 $45^\circ \sim 60^\circ$ 付近までは水位はほとんど水平であって、 60° 付近から急勾配となる。凸岸に沿っても弯曲の入口から $45^\circ \sim 60^\circ$ 付近までは水面勾配はゆるいが、凹岸側の勾配よりは急であって、左右岸の水位差は次第に大きくなって 60° 付近で最大になる。 60° 付近からは勾配は急になるが凸岸の勾配よりはゆるく、水位差は次第に小さくなって、下流側の弯曲部へ移行する直線部付近で、左右岸の水位差はなくなる。水路が蛇行しているので、上記の現象を縦断的に繰り返す。

左右岸の水位が等しくなる直線部の水位を結ぶと平均河床勾配にはほぼ等しい直線となる。凸岸の水位はこの直線にかなり近い。

(b) M_2 , M_3 水路：上記のような傾向は明瞭ではなく、水面形はほぼ直線に近い。

(ii) 横断的变化： M_1 水路におけるように左右岸の水位差がかなりある場合には、その値が非常に問題と

なる。これには水路幅、曲率半径、偏角、断面形のような水路の特性や、流速、水深などの流れの特性が関係し、詳細な議論を要するが、この場合のように洗掘、堆積によって断面形が非常に複雑に変化している場合の解析は現状では困難である。そこで実用上の観点から、

$$4H = \frac{v_m^2}{g} l_n \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \dots \dots \dots (5)$$

ここに $4H$ ： 左右岸の水位差、

v_m ： 断面の平均流速、

r_1, r_2 ：それぞれ外壁および内壁の曲率半径

によって、どの程度実測値と一致するか検討してみたものが Fig. 16 である。水位の実測値はかなりばらつ

いていて計算値と実測値の詳細な比較はむずかしいが、水位差が最大になる偏角 60° 付近では計算値と実測値は比較的一致しているとみることができる。

(3) 河床形状に関する考察

M_1, M_2, M_3 水路の平均河床高の縦断面図の一例はそれぞれ Fig. 17, 18, 19 に示すとおりである。これらの図および左右岸の河床高を示している Fig. 12~Fig. 14 およびここには示していないが横断面などより、蛇行水路における河床形状に関していうことをまとめるとつぎのとおりである。

(i) 砂礫堆の境界線は明瞭に現われる。この砂礫堆のはじまりの位置は、 M_1 水路においては彎曲部の入口、またはそれよりやや下流側にある。砂礫堆の境界線の前半部はほとんど移動しないが、後半部は時間的に変動してかなり不安定である。

(ii) 彎曲部の一波長の中には2箇所横断的に河床高のほとんど変化しない断面が存在する。この位置は、左右岸の水位がほとんど変化しない位置(直線部)と左右岸の水位差が最大になる位置(M_1 水路では偏角 $45^\circ \sim 60^\circ$) のほぼ中央にある。

(iii) 砂礫堆の高さは、他の量が一定であれば、曲率の大きい水路ほど大である。

(iv) 砂礫堆の先端部付近の境界線は横断的に急勾配であり、約 26° 程度になることもあって砂の水中安息角に近い。

(v) 最深部の位置は曲頂部よりやや下流側にあり、最浅部の位置はそれよりも少し下流側になる場合が多い。

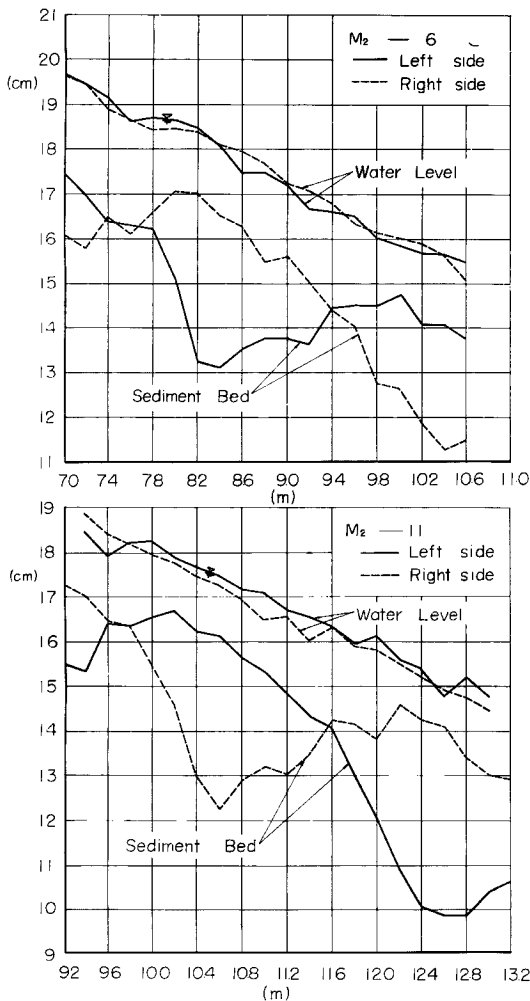


Fig. 13 Profile of the water level and of the sediment bed along the side walls. (M_2)

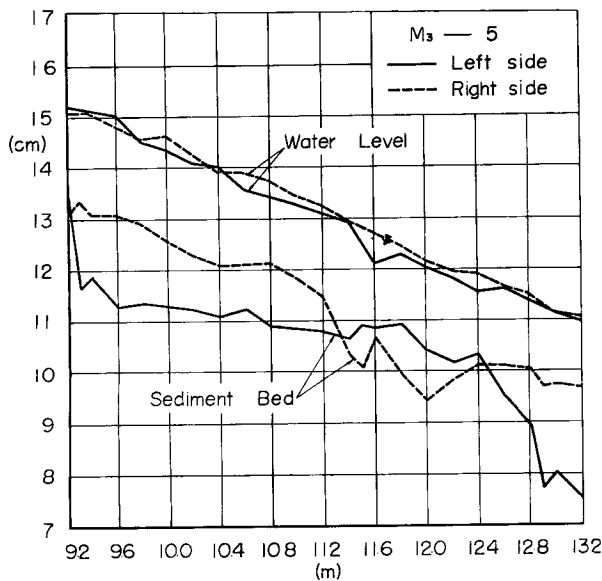


Fig. 14 Profile of the water level and of the sediment bed along the side walls. (M_3)

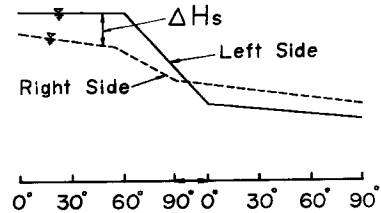


Fig. 15 Schematic sketch of the profile of the water level along the side wall in M_1 channel.

(vi) 砂礫堆の前半部においては逆勾配となる。

(vii) 左右岸の河床高の差は非常に大きく、断面形は複雑に変化しているにもかかわらず、断面の平均河床高でみるとほぼ直線に近い。ただし M_1 水路については詳細に見ると、若干波打っている。砂礫堆が固定したときの境界線の位置に関して若干考察を行なう。通水初期においては弯曲部の入口の所から遠心力の影響が現われ、主流と直角方向の二次流が発生して、底面付近の流れは凹岸より凸岸に向う方向となり、流砂も凸岸方向に移動する。Fig. 20 のように弯曲部の入口、凹岸にある砂粒を考え、この移動の軌跡が図の太線のようになったと考えれば、ハッチングの部分では同様に砂粒が移動するが、上流側からの流砂がないために、当然洗掘がおこるものと思われる。よって洗掘のあまり進まぬ初期の段階では、図の太線に沿って洗掘の境界線が現われるものと思われる。Fig. 21 を参照して、半径 r 方向の運動方程式は、すべての加速度項を v_θ^2/r の項に比して省略すれば、

$$-\frac{v_\theta^2}{r} + gI_r = \frac{\partial}{\partial Z} \left(\nu_T \cdot \frac{\partial v_r}{\partial Z} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここに I_r : 半径方向の水面勾配

ν_T : 渦動粘性係数

である。Rozovskii⁷⁾ は基礎方程式として (6) 式を用い、鉛直方向の流速分布形として放物形、対数分布形など種々な形を仮定し、滑面および粗面に対する v_r の式を求めている。この中、対数分布形で粗面に対するものを示すと、

$$v_\theta = v_m \left[1 + \frac{g}{\kappa C} (1 + l_n \eta) \right], \dots\dots\dots (7)$$

$$v_r = \frac{1}{\kappa^2} v_m \cdot \frac{h}{r} \left[F_1(\eta) - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} F_2(\eta) \right] \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{ここに } F_1(\eta) = \int \frac{2l_n \eta}{\eta - 1} d\eta \quad F_2(\eta) = \int \frac{l_n^2 \eta}{\eta - 1} d\eta + 0.8(1 + l_n \eta)$$

C : Chézy の係数, v_m : 平均流速, $\eta = Z/h$, κ : Kármán 常数

上式中 $0.8(1+l_n\eta)$ の項は底面における剪断力の影響を示すものであって, 0.8 は実験的に求められた値である。

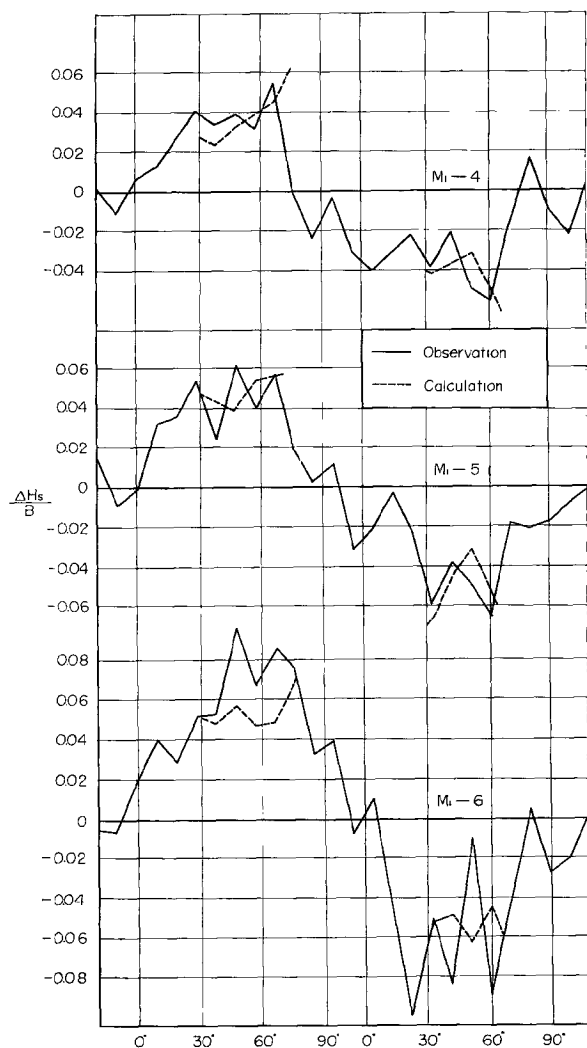
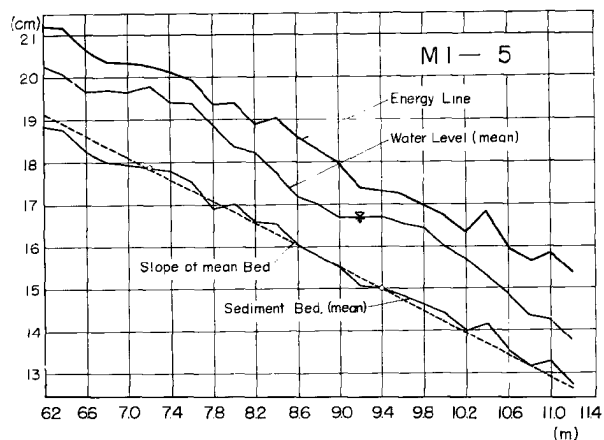
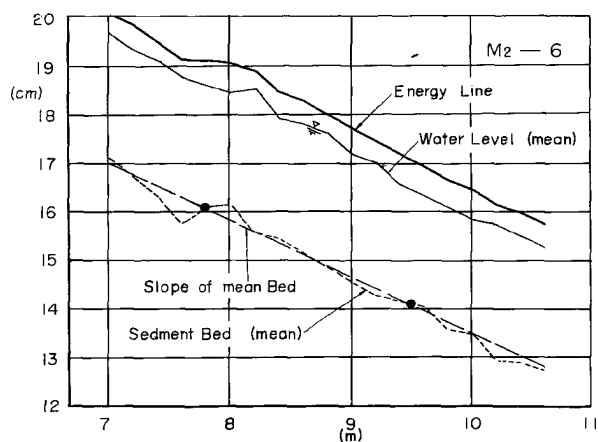
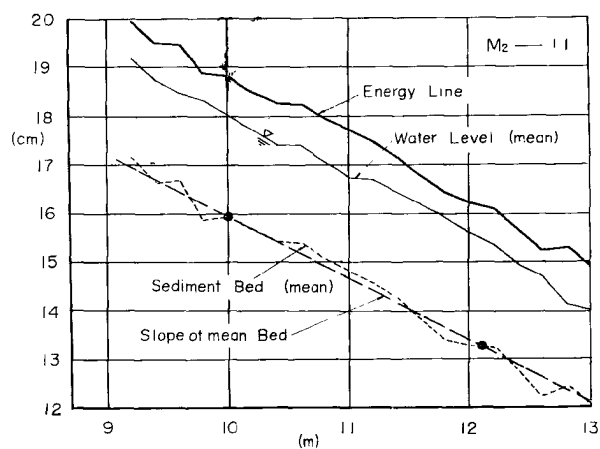


Fig. 16 Comparison of the observed cross-sectional slope of the water level in curved sections with calculated one by Eq. (5)

Fig. 17 Profiles of the energy line, water level and mean bed in M_1 channel.Fig. 18 Profiles of the energy line, water level and mean bed in M_2 channel.

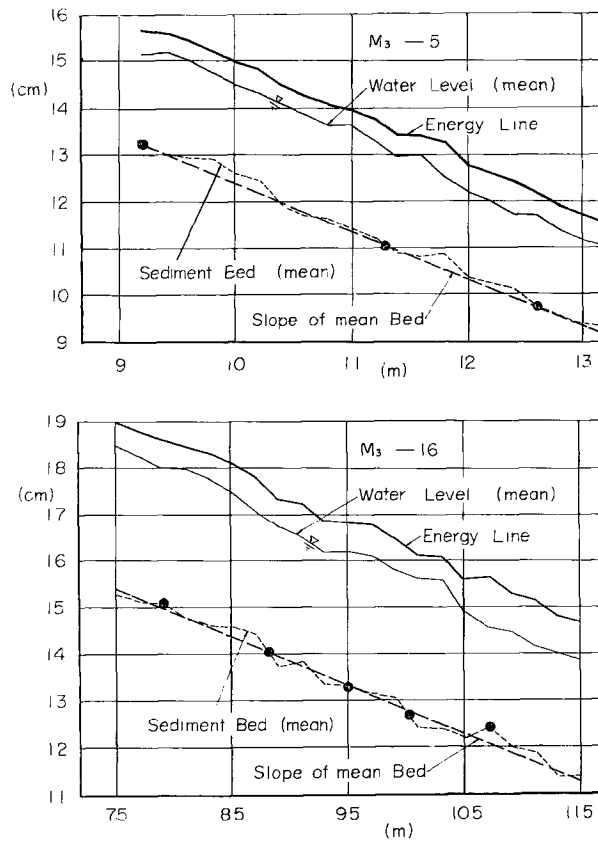


Fig. 19 Profiles of the energy line, water level and mean bed in M_3 channel.

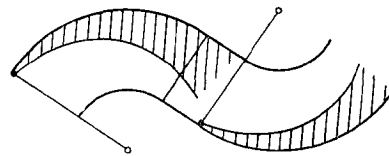


Fig. 20 Schematic sketch of the path of a particle along the bed.

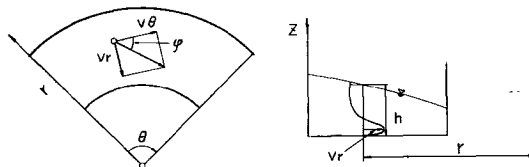


Fig. 21 Schematic sketch of the flow in a curved section.

(7), (8) 式より

$$\tan \phi = \frac{v_r}{v_o} = \frac{1}{\kappa^2} \frac{F_1(\eta) - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} F_2(\eta)}{1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} (1 + l_n \eta)} \frac{h}{r} = D \cdot \frac{h}{r} \dots \dots \dots (9)$$

D の値に対する抵抗係数の影響が検討されているが、 $C=30 \sim 60$ の範囲で $D=11.0 \sim 11.5$ であって、抵抗の影響は比較的小さい。なお滑面に対しては実験および河川の実測の結果、 $D=11$ が与えられている。

基礎方程式として (6) 式を採用することには理論的に問題があって、村本⁸⁾は詳細な理論的展開を行ない種々の角度から検討を進めている。ここでは実用的な意味で (9) 式を採用し、これによって求められた底面付近の流線と砂礫堆の境界線を対比することにする。いま底面近傍の流線として流砂のある付近の高さのものを取り、これを粒径 d の値として $\eta = d/h$ とし、通水初期の勾配、水深などを用いて、(9) 式により流線を求めると Fig. 22 のとおりである。図中の黒点は境界線の実測位置を表わす。砂礫堆の前半部

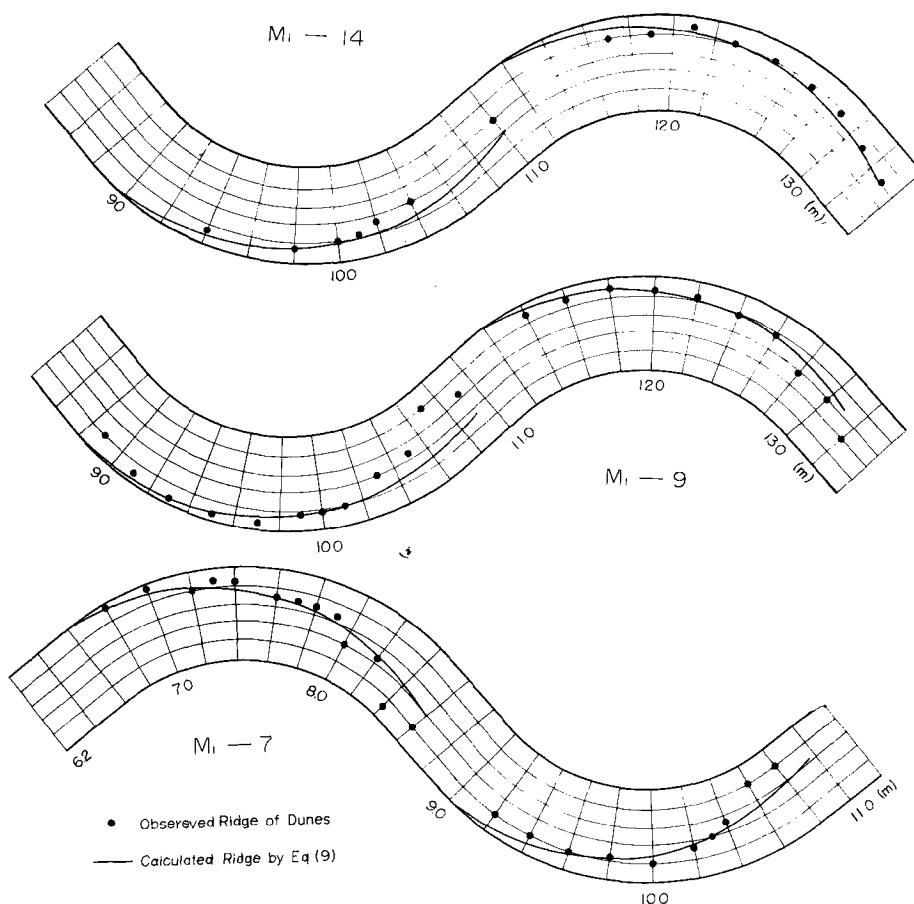


Fig. 22 Comparison of the observed edge of dune with calculated one by Eq. (9)

においてはかなりよく一致しており、後半部では差異が生じているが、この部分は境界線が時間的に変動し不安定な領域である。なお上の取り扱いでは、 $D=8 \sim 9$ 程度の値となったが、 $D=10$ 程度を用いればさらによく一致するようである。洗掘、堆積がかなり進行してから上式がそのまま適用されるとは思われないが、

砂礫堆の前半部の位置は、通水後 5 分程度で形成された後はほとんど変動しないので、上述のような取り扱いをしたわけであるが、(9) 式により、かつ $D=10$ 程度の値を用いれば、砂礫堆の概略の位置を推定しうるのである。つぎに横断形状に関しては、流速分布形が場所的に非常に複雑に変化していくので、現在のところ解析的に求めることが困難であって、さらに単純な場合の検討から進めていくことが必要である。

(4) 流水断面積に関する考察

砂礫堆の位置が固定している M_1 水路においては流水断面積は縦断的に特徴ある変化をする。この 1 例を示したものが Fig. 23 である。この場合の A_0 は一波長間の平均断面積である。前記したように平均河床

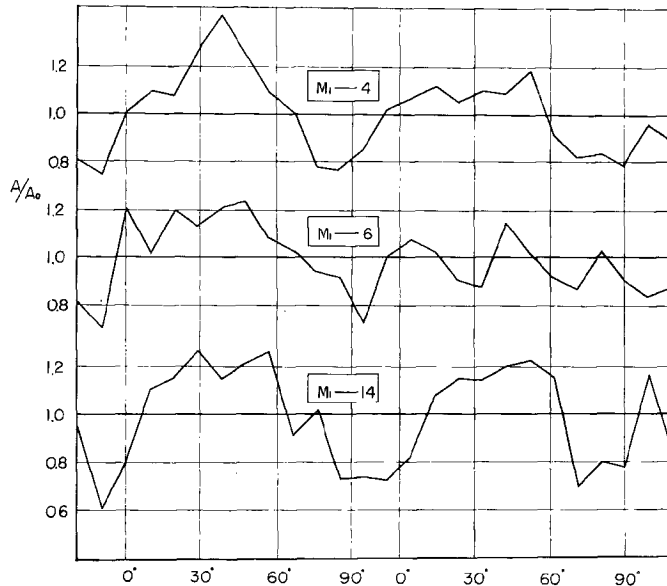


Fig. 23 Variation of cross-sectional area with distance in M_1 channel.

高はほぼ直線的な変化をし、平均水位は縦断的に波状に変化するので、流水断面積の変化は平均水位の変化に対成する。すなわち水位が $\max$ となる偏角 $45^\circ \sim 60^\circ$ 付近で $A_{\max}$ となり、水位が $\min$ になる前後の弯曲部の接続部の直線区間で $A_{\min}$ となる。

(5) 砂礫堆の移動限界に関する考察

蛇行水路における実験において、砂礫堆が固定してしまう場合、ある範囲内を動く場合、完全に流下する場合の三通りが生じたことはすでに述べたとおりである。もちろんこれらの場合はいずれも流砂のある状態での話しである。この砂礫堆の停止限界を求めるためには弯曲部の水理機構について十分な検討を加えるとともに、直線水路における砂礫堆についてさらに詳細に究明していくことが必要であって理論的に求めることは困難である。ここでは移動限界に関する一応の目安をうる意味で、つぎのような考察を行なった。

S—水路において砂礫堆が発生している場合、水流は蛇行し、横断方向に水面勾配を生じ、丁度弯曲部の流れと同じような特性を持つ。一方流路が弯曲している場合には、その曲率と水量に応じて横断水面勾配を生じる。この場合、水流自身の持つ蛇行特性（S—水路の蛇行特性）が水路によって強制される蛇行特性に比してかなり大きければ砂礫堆は水路形状にかかわらず流下し、逆の場合には停止し、同程度の場合には移動停止の限界になるものと思われる。波長を同じに取ってあるので、蛇行特性として振幅を取ること

る。いま直線水路の振幅は、水路幅 B で規制されるから、 $B/2$ よりも小さい。したがって1より小さい値をととし、振幅を a_c で表わせば

$$a_c = \zeta \cdot \left(\frac{B}{2} \right)$$

したがって弯曲水路の振幅が a_c のとき移動停止限界付近にあると考えられる。すなわち、

$$a_c / (B/2) = \zeta$$

がある値のとき移動停止限界になる。 M_1 , M_2 , M_3 の a の値はそれぞれ 50cm, 15cm, 5cm であるので、 $a / (B/2)$ はそれぞれ 2.0, 0.6, 0.2 となる。実験では M_2 が移動停止限界にあったので、これから考えると、限界の ζ の値は0.6程度であろう。しかし、これは一応の目安であって、さらに流れの特性を導入し、詳細に検討していくことが必要である。

6. 結 論

以上、水路の側壁形状が砂礫堆の挙動および流れの特性に与える影響を解明することを目的として、直線水路および波長が同一で振幅のみ異なる3種類の蛇行水路を用いて実験的検討を行なったが、明らかにされた点を列挙するとつぎのようである。

(1) 直線水路において砂礫堆が発生する場合には、その特性は従来いわれているとおりであって、蛇行水路の特性を示す。

(2) 上の場合の砂礫堆の長さ l , 流下速度 v_d は、簡単な考察からそれぞれ

$$l/B = f_1(F_r)$$

$$\frac{v_d}{u_*} \cdot \frac{B}{d} / \left\{ \frac{u_*^2 - u_{*c}^2}{(\sigma - \rho)gd} \right\}^2 = f_2(F_r)$$

であって、その関数形が実験の結果求められた。ここに B : 水路幅, F_r : Froude 数, u_* : 摩擦速度, u_{*c} : 限界摩擦速度, d : 平均粒径, σ , ρ : 砂および水の密度

(3) 砂礫堆が発生している場合でも、平均河床高および平均水位の縦断勾配は場所的にはほとんど変化しない。

(4) 側壁固定した蛇行水路における砂礫堆の挙動は水路の曲率に応じて変化し、曲率が小から大になるにつれて、完全に流下する場合、ある範囲を移動する場合、固定する場合の3通りがあらわれる。この移動停止の限界についてはさらに検討を必要とするが、同一の波長(直線水路における砂礫堆の波長に等しい)の水路に対する一応の目安は、振幅 a , 水路幅 B とすれば、

$$a/(B/2) \approx 0.6$$

程度であって、 a がこれより大きい場合は固定、小さい場合は流下する。

(5) 砂礫堆が流下する場合の砂礫堆および流れの特性は直線水路の場合とほとんど変化しない。

(6) 曲率が大で砂礫堆が固定した場合の水面形状、河床形状、流水断面積などの定性的な特性が、偏角との関係において明らかにされた。特にこのような場合でも平均河床高の縦断的变化は近似的に直線と考えられることは注目に値する。

(7) 砂礫堆が固定した場合には前後の砂礫堆の境界線が明瞭に現われる。この境界線の位置は本文(9)式によってかなりよく推定することができる。

種々の境界条件下における砂礫堆の挙動の解明は重要な問題であるが、これは水路の形状によって非常に変化すると考えられるので、さらに広範囲の実験的研究が必要である。この場合、移動床の状態では、河床高、水位、流向、流速などの正確な資料をうるものが困難であるので、適当な薬剤などを用いて河床の固定を行なって測定する方法をもっと採用すべきであろう。一方この種の問題を理論的に取り扱うためには、二次流および単一弯曲部の河床変動の問題についてさらに検討していく必要がある。

最後に本研究を行なうにあたって多大の御協力をいただいた坂本忠彦君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 木下良作：河床における砂礫堆の形成について，土木学会論文集，第42号，1957.
- 2) 科学技術庁資源局：石狩川河道変遷調査，科学技術庁資源局資料第36号，昭37.
- 3) 足立昭平：蛇行の発生過程に関する研究，土木学会水理研究会講演前刷，1957.
- 4) J.F. Kennedy：The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels, Journal of Fluid Mechanics Vol. 16, part 4, 1963.
- 5) A.J. Reynolds：Waves on the erodible bed of an open channel, Journal of Fluid Mechanics Vol. 22, part 1, 1965.
- 6) H.A. Einstein：A study on meandering in straight alluvial channels, Journal of Geophysical Research, Vol. 69, No. 24, 1664.
- 7) I.L. Rozovskii：Flow of water in bends of open channels, Academy of Science of the Ukrainian SSR, 1957.
- 8) 村本嘉雄，井上喬之：開水路弯曲流の内部機構，京大防災研究所年報第8号，昭40.