

河床波の構造について

鳥取大学工学部

正員 道上正規

鳥取大学工学部

正員 鈴木幸一

株式会社新日本技術コンサルタント

正員 岩垣孝一

1. まえがき 従来、水路幅の影響を主に受ける河床形態は砂州であると言われているが、実験水路のように幅の比較的小さい水路に形成される河床波は、各種河床波の共有合成されたものが多く、水理条件にもよるが砂州のような小規模河床形態の特性を合せ持っている。本研究ではこの点に鑑み、水路横断方向に河床波の構造がどのように変化するか、また、同一水理条件下でも水路幅の違いによってその統計的特性が大きく異なるかどうかという点について実験的に検討した。

2. 実験の概要 実験の目的は、十分発達した移動床の上の河床波の水路横断方向構造の解明、および、実験水路幅の違いによる河床波構造の変化特性の解明である。用いた水路は、長さが20cm断面が50cm×50cmの長方形断面水路であり、水路幅の変更は鉄板で水路を仕切ることによって行ない、給砂は水路上流端にあるエレベータ式給砂装置によって連続的に行なった。実験の方法について

表-1

Run No.	B (cm)	q (cm ² /s)	q ₀ (cm ² /s)	h (cm)	R ₀ (cm)	t ₀ (s)	d ₀ (cm)	f (cm)	U ₀ (cm/s)	Fr
1	50	400	0.222	8.55	7.83	2.41	2.22	71.3	0.51	26.9
2	50	400	0.107	8.37	7.44	2.39	2.21	80.9	0.53	26.6
3	50	400	0.111	9.10	8.54	1.89	2.02	67.5	0.47	24.7
4	50	320	0.107	7.64	7.12	2.49	1.12	47.1	0.48	25.9
5	50	240	0.107	5.74	5.35	2.58	1.21	59.9	0.56	22.9
6	50	285	0.0413	6.78	6.10	1.73	1.18	65.8	0.52	20.2
7	40	400	0.222	7.61	6.92	3.53	2.08	72.4	0.61	30.8
8	40	400	0.107	8.61	7.70	2.38	2.58	95.6	0.51	23.6
9	40	400	0.111	9.64	8.26	1.42	2.61	76.4	0.43	22.0
10	40	320	0.107	6.57	5.75	2.29	1.44	56.1	0.61	23.0
11	40	240	0.107	5.72	5.29	3.01	0.92	45.1	0.56	24.7
12	40	285	0.0413	6.86	6.02	1.75	1.06	53.3	0.51	20.6
13	30	400	0.222	8.22	6.99	2.52	1.99	67.0	0.54	27.1
14	30	400	0.107	8.10	7.71	2.02	2.13	71.8	0.47	25.4
15	30	400	0.111	9.69	8.63	2.49	2.43	80.1	0.42	29.2
16	30	320	0.107	7.53	6.57	2.20	1.24	55.7	0.50	26.2
17	30	240	0.107	5.31	4.55	2.46	0.69	35.8	0.63	21.5
18	30	285	0.0413	6.67	5.77	2.27	0.88	37.2	0.53	23.1
19	20	400	0.222	6.44	3.82	2.72	0.88	45.0	0.84	24.2
20	20	400	0.107	7.73	5.55	2.33	1.26	60.5	0.59	24.7
21	20	400	0.111	8.62	6.07	2.20	1.24	53.7	0.49	25.2
22	20	320	0.107	5.78	3.99	2.49	0.70	38.4	0.74	22.6
23	20	240	0.107	5.14	3.65	2.31	0.51	34.6	0.66	20.5
24	20	285	0.0413	6.30	4.54	1.90	0.54	54.6	0.58	20.5
25	10	400	0.222	6.70	3.31	3.69	0.83	35.8	0.74	29.5
26	10	400	0.107	8.35	3.89	2.11	1.20	67.2	0.53	22.7
27	10	400	0.111	7.20	3.89	2.00	0.97	38.9	0.66	22.6
28	10	320	0.107	7.19	4.31	2.86	0.42	38.9	0.54	26.6
29	10	240	0.107	5.07	2.80	2.84	0.29	31.7	0.67	22.6
30	10	285	0.0413	6.99	3.69	1.99	0.56	52.8	0.49	22.1

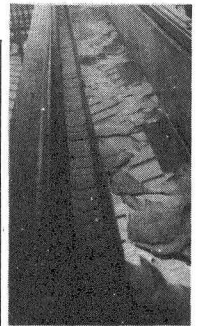


写真-1

では、まず水路床に約15cm厚に中央粒径が0.6/mmのほぼ均一な砂を敷き、所定の流量および給砂量のもとに通水を行ない、河床が平均的に平衡状態になった後、河床の縦断形状を測定する。実験条件は表-1に示す通りであり、河床形態の一例を示すと写真-1のように幅の小さい水路では規則正しい河床波が形成され、幅が広い水路では河床形態は三次元的となる。

3. 河床形態の水路横断方向特性 図-1は側壁付近の測線($y/(B/2)=0.6$, B:水路幅, y:水路中央側線からの横断方向距離)での河床高の標準偏差 σ_0 と中央側線($y/(B/2)=0$)での標準偏差 σ_c で割って無次元化した σ_0/σ_c とB/L (B:水路幅, L:水深)との関係を示すが、 $B/L < 4$ では $\sigma_0/\sigma_c = 1.0 \sim 1.4$ となっており、中央側線と側壁付近の側線とでの河床変動の大きさはあまり変わらないことがわかる。B/L > 4では若干の例外はあるものの σ_0/σ_c はかなり大きくなり $\sigma_0/\sigma_c = 2$ 程度のもも認められる。このことから、変動の大きさから見て、B/L < 4では河床形態はほぼ二次元的、B/L > 4では三次元性が強くなっていることがわかる。

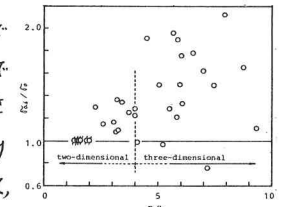


図-1

図-2(a)および(b)は、同一流量・流砂量の条件で、水路幅がそれぞれ50cmおよび20cmであるRun1とRun19の縦断河床の波数スペクトル密度を示したものである。まず、図-2(a)をみると、低波数域にみられる卓越波数 k_e に対するスペクトル密度は側壁に近い測線ほど大きく、側壁に近いほど規則的でしかも河床変動が大きいことが認められる。この k_e は3側線とも $6 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ 程度である。 k_e より高波数側にスペクトル密度がやや卓越したものがみられるが、とくに水路中央側線で相対的に顕著であって、この卓越波数を k_m とすると、 $k_m \approx 1.2 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$ である。つぎに、水路幅が比較的小さいRun19についての図-2(b)をみると、中央側線と側壁に近い測線とで

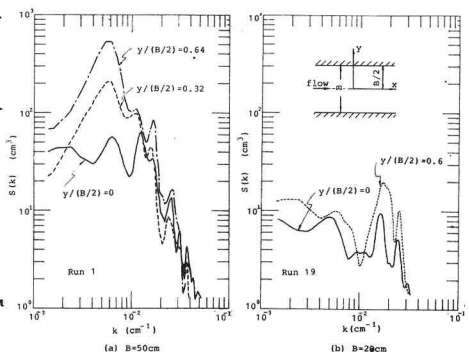


図-2

のスペクトル密度はほとんど同じ形をしておりその大きさも側壁近くやや大きいもののほとんど変わりなく、河床形態は二次元的であると考えられる。また、低波数域での卓越波数 k_e は顕著ではなく、上記の k_m のスペクトル密度がとくに卓越している。図-3は R_{m1} について、中央側線の河床変動に対する $y/(B/2)=0.32$ および 0.64 測線での河床変動のコヒーレンスを示したもので、図-2(a)の卓越波数 k_m および k_e に対するコヒーレンスは $0.7 \sim 0.8$ と大きく、これらの波数の変動は水路横断方向に線形的に伝わっていると考えられる。また、図-4は R_{m1} のコヒーレンスのフェイズを表わしたものである。 k_m に対する $y/(B/2)=0.32$ および 0.64 測線のフェイズはほぼ 0 であり、この波数成分の変動は水路横断方向には変化していない。一方、 k_e のフェイズは約 $-\pi/4$ であり、この波数成分の変動は位相差をもって、水路横断方向に線形的に伝わっていると考えられる。

4. 水路幅の河床波特性に及ぼす影響 図-5は、卓越波数 k_e および k_m と水路幅の関係調べたものであって、6種類の水利条件で得られたものの平均値を示している。この図によると、水路幅が 20cm より小さいときは k_m と k_e は区別できなくて、卓越波数が1つの単構造の河床形態となっているが、水路幅が大きくなるにつれて2つの卓越波数が存在する多重構造となっている。 k_e については、水路中央測線の方が $y/(B/2)=0.6$ 測線よりやや大きくなっているがほぼ $k_e \propto B^{-1}$ の関係が成り立ち、卓越波数 k_e は水路幅に反比例する関係が認められる。一方、 k_m は水路幅の変化にほとんど影響されないことがわかる。ここで、スペクトル密度のピークに対応する卓越波数 k_m と平均波長 $\bar{\lambda}$ との関係を図-6に示した。ただし、 $\bar{\lambda}$ はzero-up-cross法によって、また $\bar{\lambda}_t$ はtrough-to-trough法によって定義した平均波長である。まず、黒丸で示される $\bar{\lambda}_t$ を見ると、 $y/(B/2)=0.6$ 測線より $y/(B/2)=0$ 測線の方がやや大きくなっていて、側壁近くでは $1/k_m$ と $\bar{\lambda}_t$ はかなり一致しているが、中央測線近くでは $\bar{\lambda}_t$ は $1/k_m$ より全体的に小さくなっている。一方、白丸で示される $\bar{\lambda}_z$ は、 $y/(B/2)=0$ 測線については $1/k_m$ と比較的よく一致しているが、 $y/(B/2)=0.6$ 測線ではばらつきは大きい。これらのことから、zero-up-cross法によって波長を論じる場合には水路横断方向特性をも同時に論じることが必要であるが、trough-to-trough法では砂州に対応するような大波長の影響が除外できるので、小規模河床形態を論じる場合には水路横断方向には一様とみなせるかもしれない。しかし、図-7の $\bar{\lambda}_t/\bar{\lambda}_z$ あるいは平均波高比 $\bar{\Delta}_t/\bar{\Delta}_z$ と $B/\bar{\lambda}$ との関係を見ると、 $B/\bar{\lambda} > 4$ では $\bar{\lambda}_t/\bar{\lambda}_z$ あるいは $\bar{\Delta}_t/\bar{\Delta}_z$ は、 $B/\bar{\lambda}$ の増加とともに減少する傾向が認められるが、 $B/\bar{\lambda} < 4$ では平均的には1に近く、zero-up-cross法でもtrough-to-trough法でも同じ結果になる。このことは、 $B/\bar{\lambda} < 4$ では砂州が生じないか、砂州のスケールが砂堆のスケールより小さくなりその影響がなくなるため、水路横断方向に河床が一様に近くなっていることを示している。ここで、河床波の平均波高 $\bar{\Delta}$ と河床縦断形状の標準偏差 σ の関係を図-8に示す。図に見られるように、 σ は $\bar{\Delta}$ にほぼ比例しており、その比例定数は約 $1/2$ であって、 $\sigma = \frac{1}{2}\bar{\Delta}$ で表わすことができる。

5. あとがき 以上のように、水路幅が小さい場合に河床形態が水路幅の影響を受けることが分かったので、実験室規模の河床波を議論する場合、水路幅の影響をも考えた検討をする必要がある。

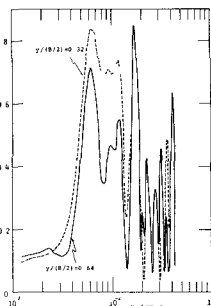


図-3

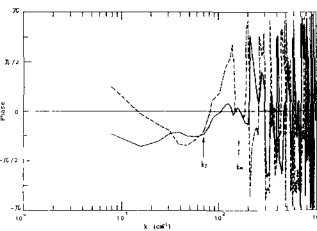


図-4

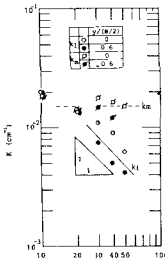


図-5

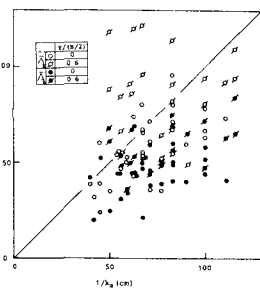


図-6

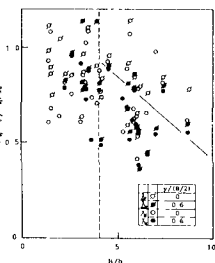


図-7

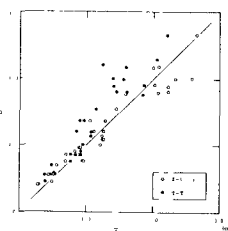


図-8