

防衛大学校土木工学教室 学生会員 ○首藤 誠志 植松 正伸
防衛大学校土木工学教室 正会員 山田 正 池内 正幸

1. はじめに 小規模河床波に関する研究は従来多くの研究者によって精力的に進められてきたが、その発生、発達、の物理機構は未だ十分解明されていないのが現状であろう。このような観点から著者らは文献(1)において、2次元小規模河床波に閉じて理論解析を行っており、河床波の高さ h (m)に関して次式を得ている。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} + m(1+2\delta)\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + (\alpha - m\delta)(1+2\delta)\frac{\partial^2 h}{\partial x \partial t} + \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} \right) m(1+2\delta) - \alpha \left(\frac{\delta}{\alpha} \right) \right\} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \alpha \left(\frac{\delta}{\alpha} \right)^2 \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = G(x) \dots (1)$$

ここに、 x : 流れ方向座標、 δ : 流砂の遅れ距離、 α : 林の導入した2) inclination factorである。この理論により、河床波を発生させ、成長させる要因が α 、すなわち河床形状と河床剪断応力との位相差であり、一方、減衰させる要因が流砂の遅れ距離 δ になっていることが一見して理解できる。さらに(1)式より、発生初期に現れるいわゆる卓越波長が、

$$L_{max} \approx 600d \quad (d: \text{砂粒子の粒径}) \dots (2)$$

この著者らの理論に対して本研究は2次元小規模河床波の発生、発達を実験的に明らかにすることを目的としたものであり、以下に示す項目につき検討を行っている。

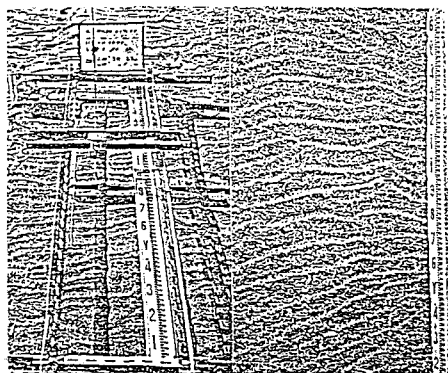
- (1) 種々の初期河床形状を与えて、以後の河床の変形状況をみる。
- (2) 水路実験、風洞実験、現地飛砂観測を行い、水流及び空気流の違いが河床波形に与える影響を見る。

2. 実験装置、実験方法及び実験条件

実験に用いた水路は長さ5m、幅25cm、深さ20cmの可変勾配開水路である。実験に用いた砂は豊浦産標準砂である。水深及び河床形状は可動超音波測深器で測定し、さらに写真撮影によって移動床の時間的変化を追跡した。風洞実験に用いた風洞は長さ5.5m、幅40cm、深さ39cmである。風速はベッツ型マノメータ及び1mmのピトー管で測定し、河床波はポイントゲージで5mmおきに測定した。用いた砂は豊浦産標準砂及び野比海岸で採取した砂の2種類である(図1)。風紋の現地観測は、神奈川県横濱市野比海岸にて行った。風速は回転風速計、波高は風紋の移動のない風の弱い日にポイントゲージにて測定(写真1)した。

水路には通水開始前にあらかじめ初期の河床形状を与えており(図2)以後、初期河床形状として与えた正弦波の振幅及び波長を初期振幅及び初期波長と呼ぶ。このときの実験条件を表1に示す。

3. 実験結果及び考察 CASE 1: 規則的な河床波が発生するものと波長が分布する不規則河床形状を呈するものの2種類が現れた。CASE 2: 著者らの理論より与えられる卓越波長(2)式より短い初期河床形状を与えた場合には約1分後にほぼ平坦となり、2分後には初期波形と砂連が混ったような不規則波形が現れた。4分30秒後には波長は6cm~9cmとばらつきはあるものの1波1波は前傾した形の整った河床形状を呈した(写真2)。(2)式で与えられる卓越波長と



(a) 現地観測 (b) 風紋

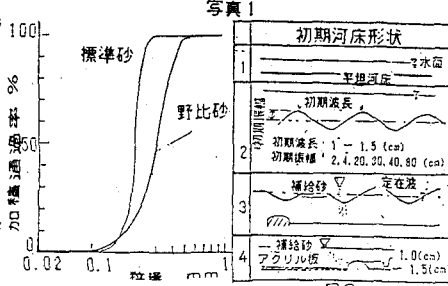


図1 粒径加積曲線 図2

表1 実験条件

CASE	勾配	水深 (cm)	流速 (cm/s)	流速 (cm/s)	Fr	波長 (cm)	波速 (cm/s)	波速 (cm/s)
1	0.0050	7.00	0.550	0.0050E+2	0.461	8.20	0.50E+2	2.39
2	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.462	8.40	0.50E+2	2.41
3	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	8.50	0.50E+2	2.41
4	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	8.60	0.50E+2	2.41
5	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	8.70	0.50E+2	2.41
6	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	8.80	0.50E+2	2.41
7	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	8.90	0.50E+2	2.41
8	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	9.00	0.50E+2	2.41
9	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	9.10	0.50E+2	2.41
10	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	9.20	0.50E+2	2.41
11	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	9.30	0.50E+2	2.41
12	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	9.40	0.50E+2	2.41
13	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	9.50	0.50E+2	2.41
14	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	9.60	0.50E+2	2.41
15	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	9.70	0.50E+2	2.41
16	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	9.80	0.50E+2	2.41
17	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	9.90	0.50E+2	2.41
18	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	10.00	0.50E+2	2.41
19	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	10.10	0.50E+2	2.41
20	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	10.20	0.50E+2	2.41
21	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	10.30	0.50E+2	2.41
22	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	10.40	0.50E+2	2.41
23	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	10.50	0.50E+2	2.41
24	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	10.60	0.50E+2	2.41
25	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	10.70	0.50E+2	2.41
26	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	10.80	0.50E+2	2.41
27	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	10.90	0.50E+2	2.41
28	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	11.00	0.50E+2	2.41
29	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	11.10	0.50E+2	2.41
30	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	11.20	0.50E+2	2.41
31	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	11.30	0.50E+2	2.41
32	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	11.40	0.50E+2	2.41
33	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	11.50	0.50E+2	2.41
34	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	11.60	0.50E+2	2.41
35	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	11.70	0.50E+2	2.41
36	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	11.80	0.50E+2	2.41
37	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	11.90	0.50E+2	2.41
38	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	12.00	0.50E+2	2.41
39	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	12.10	0.50E+2	2.41
40	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	12.20	0.50E+2	2.41
41	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	12.30	0.50E+2	2.41
42	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	12.40	0.50E+2	2.41
43	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	12.50	0.50E+2	2.41
44	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	12.60	0.50E+2	2.41
45	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	12.70	0.50E+2	2.41
46	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	12.80	0.50E+2	2.41
47	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	12.90	0.50E+2	2.41
48	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	13.00	0.50E+2	2.41
49	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	13.10	0.50E+2	2.41
50	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	13.20	0.50E+2	2.41
51	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	13.30	0.50E+2	2.41
52	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	13.40	0.50E+2	2.41
53	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	13.50	0.50E+2	2.41
54	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	13.60	0.50E+2	2.41
55	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	13.70	0.50E+2	2.41
56	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	13.80	0.50E+2	2.41
57	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	13.90	0.50E+2	2.41
58	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	14.00	0.50E+2	2.41
59	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	14.10	0.50E+2	2.41
60	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	14.20	0.50E+2	2.41
61	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	14.30	0.50E+2	2.41
62	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	14.40	0.50E+2	2.41
63	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	14.50	0.50E+2	2.41
64	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	14.60	0.50E+2	2.41
65	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	14.70	0.50E+2	2.41
66	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	14.80	0.50E+2	2.41
67	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	14.90	0.50E+2	2.41
68	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	15.00	0.50E+2	2.41
69	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	15.10	0.50E+2	2.41
70	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	15.20	0.50E+2	2.41
71	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	15.30	0.50E+2	2.41
72	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	15.40	0.50E+2	2.41
73	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	15.50	0.50E+2	2.41
74	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	15.60	0.50E+2	2.41
75	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	15.70	0.50E+2	2.41
76	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	15.80	0.50E+2	2.41
77	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	15.90	0.50E+2	2.41
78	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	16.00	0.50E+2	2.41
79	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	16.10	0.50E+2	2.41
80	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	16.20	0.50E+2	2.41
81	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	16.30	0.50E+2	2.41
82	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	16.40	0.50E+2	2.41
83	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	16.50	0.50E+2	2.41
84	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	16.60	0.50E+2	2.41
85	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	16.70	0.50E+2	2.41
86	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	16.80	0.50E+2	2.41
87	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	16.90	0.50E+2	2.41
88	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	17.00	0.50E+2	2.41
89	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	17.10	0.50E+2	2.41
90	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	17.20	0.50E+2	2.41
91	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	17.30	0.50E+2	2.41
92	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	17.40	0.50E+2	2.41
93	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	17.50	0.50E+2	2.41
94	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	17.60	0.50E+2	2.41
95	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	17.70	0.50E+2	2.41
96	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	17.80	0.50E+2	2.41
97	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	17.90	0.50E+2	2.41
98	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	18.00	0.50E+2	2.41
99	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	18.10	0.50E+2	2.41
100	0.0100	6.50	0.550	0.0050E+2	0.461	18.20	0.50E+2	2.41

同じ12cmの場合、初期波形はそのまま前傾化し三角形状となったが、この波長以外には新たな砂連は現れなかった。(2)式の卓越波長より長い初期波長40cmを与えた場合、僅か15秒で初期波形の上に砂連ができ時間が経つと谷の部分の砂連は消えた。初期波長80cmの場合、1分30秒後に1つの峰下流側9cm、11cm、11cmの波長をもつ3つの砂連ができ7分後には不規則な河床形状を呈した。CASE 3: 水面に定在波を与えた場合、河床には定在波と同じ波長の砂堆が現れた。CASE 4: 単一凸面を初期河床形状として与えた場合、峰の下流側に砂連ができ、開水路流れでは十分時間が経つと波長の異なる混沌とした河床形状が現れるのに対して風洞実験では開水路流れに見られた河床波の後にできる砂連は現れずかつ各波形も前傾化せず20分後においても砂連はsin形状に近く、境界層厚さとはほぼ同じ波長をもつ河床形状を呈した。現地観測による風紋の波形と現地の砂を用いて行った波形もほぼ同じ形状(図3)を呈した。写真2 卓越波長より短い初期波長を与えた場合

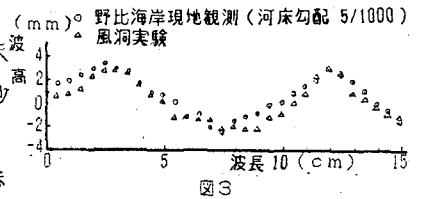
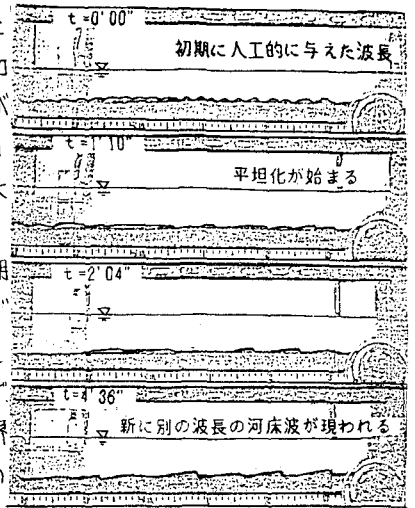


図3

(1) 波長の伸長 1) 上流側からの流砂が止った時、2) 上流側から河床波が移動して来ない時(CASE 4)。3) 砂連と砂堆が共存し、砂連と砂堆の波速が異なるとき。4) 局所的な摩擦速度が異なる時(CASE 2)。

(2) 波長と流速の関係 同じ水理条件のもとでは波長の短いもののほど波速は速い(図4)。

(3) 境界層と波長の関係 剥離のない風洞実験における砂連は境界層厚さとはほぼ同じ長さの波長をもち、かつ(2)式の理論解析の結果と同程度の波長をもつ(図5)。

(4) 砂連の発生条件 1) 砂連は滑面の領域で発生し、粗面ではできない。2) 水面に定在波があり、この定在波の波長が砂連の卓越波長より短い場合には定在波によりできる河床形状より砂連が卓越する。定在波の影響により形成された砂堆の発達過程においては砂連はできない。3) 砂連が砂堆の上にできる場合は砂堆が平衡状態に達し、砂堆がCASE 2の初期河床形状のように河川の履歴と同じ意味を持つ場合である。4) 種々の実験条件においてできた砂連波長をHarrattyら3)によってまとめられた固定床波形の波長と底面剪断応力の位相差を示す図上にプロットすると位相差を最大(80)とする波長近傍において砂連は発生していることがわかる。以上の結果が得られた。

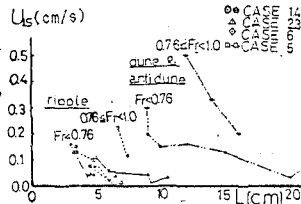


図4. 波長と実波速の関係

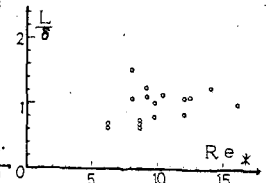


図5 境界層と粒子レイノルズ数

4 おわりに 本研究により、砂連の発生発達に与える河床の履歴効果を明らかにした。さらに水流と空気流の違いより(1)式は剥離のない空気流によってできる砂連の発生、発達をよく表現しており、空気流の場合理論的に得ている $L_{max} \approx 8.0 \approx 2\pi\delta$ なる関係を確認した。謝辞: 本研究の遂行にあたり著者の一人(山田)は文部省科学研究費試験研究(研究代表、吉川秀夫早大教授)より補助を得ている。ここに記して深甚なる謝意を表す。

5 参考文献 1) 山田正、池内正幸、重村利幸: 小規模河床波を支配する基礎方程式の導出とその特性、第40回年次学術講演会、S60、9 2) Hayashi, T.: Proc. ASCE, vol. 96, NO. HY2, pp. 431~439, 1970 3) Harratty, T.S.: JOURNAL OF FLUID MECHANICS, vol 151, pp. 443~445, 1985

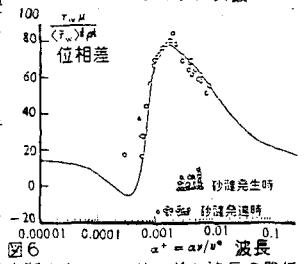


図6 せん断応力による位相差と波長の関係