

京都大学大学院 学生員 辻本 哲郎
兵庫 県 正員 藤井 嘉彦
京都大学工学部 正員 中川 博次

1. まえがき 河床波の形状特性は河床波の形成された移動床水路の抵抗、流砂量を知る上で必須のものであり、従来から多くの研究がなされてきたがいずれも平衡状態を対象としている。ところが、河床形状が水理量に対応するには相当の時間を必要とし、実際河川で見られる現象の多くは非平衡状態のものと思われ、この意味から水理条件の変化に対する河床形状の応答特性を調べることは重要であると考えられる。本研究はその第一歩として、流量の変化に対応する河床形状の変化特性を調べ、とくに現象の際立った流量急減後の河床波の崩壊過程について考察したものである。なお、本論文では対象を *lower regime* の河床波に限り、その崩壊特性を *dunes* 国/分の分布性状と関連させて論じた。

2. 流量変化に対する河床形状の応答特性に関する実験的考察

実験水路で流量を三段階(I→II→I)に変化させ、河床形状の変化特性を超音波測深器(2次元)を用いて調べた。実験砂は中央粒径が0.065 cmのほぼ均一砂である。なお、各段階とも沖までの実験結果を参考しに充分な時間通水し、各段階をRun 1, 2, 3と呼ぶことにする。実験の結果明らかになった事柄を次に列挙する(図-1, 2, 3参照)。(1)Run 1の発達性状はこれまでに行なった実験結果とほぼ同様で、波形勾配、分布性状の時間的な相似性が認められた。Run 2においてもRun 1の性状にあまり影響されずに発達成長する。(2)各Runにおける波速と実測流砂量との間にはExnerの関係式が成立し、しかも個々の波について成立していることが認められた(各波の受け持つ流砂量が一定である)。(3)Run 1, 2では、個々の波の波長・波高の間には強い相関が認められ、各波の波形勾配を一定として扱う。(4)Run 3の初期では実測流砂量は激減する。(5)Run 3の初期では形状の分布の変動係数が一般の場合より大きく、時間の経過とともに固有の一定値に近づく。(6)Run 3での河床波形状の分散は最終的にRun 1の値に収束する。これらの事実から、Run 3の状態は、Run 2の残存河床波が混在するため、その分布は比較的混乱したものであるが、時間が充分経ると、平坦河床から発達したものと同一の分布性状を示し、河床波の形状の変動係数は一つの普遍的な定数と言ふことができる。

3. 河床波の崩壊過程のモデル化 次に、前報²⁾の河床波の成長過程のモデル化と同様に、河床波形状の固有の特性、とくにその分布性状に注目して崩壊過程のモデル化を行なう。これらはいずれも、個々の波のレベルで成長または崩壊に寄与している現象に着目し、これに対して流砂の連続式をもとにしたモデルを予え、波の配列、または分布性状を加味して平均的な変化特性を記述しようとするものである。図-4を参考し、崩壊に対する基礎事象を残存河床波の埋め戻しと考えると、個々の波は次式にしたがって減衰する。

3. 河床波の崩壊過程のモデル化

次に、前報²⁾の河床波の成長過程のモデル化と同様に、河床波形状の固有の特性、とくにその分布性状に注目して崩壊過程のモデル化を行なう。これらはいずれも、個々の波のレベルで成長または崩壊に寄与している現象に着目し、これに対して流砂の連続式をもとにしたモデルを予え、波の配列、または分布性状を加味して平均的な変化特性を記述しようとするものである。

図-4を参考し、崩壊に対する基礎事象を残存河床波の埋め戻しと考えると、個々の波は次式にしたがって減衰する。

$$H_i = H_{ei} \{1 - 4 \frac{s}{L_i} t / (1 - \beta_i)\} \quad , \quad H_i \leq H_{ei} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 s はRun 2の最終状態での値、 s : 河床波の形状係数、 β_i : 砂の空隙率である。

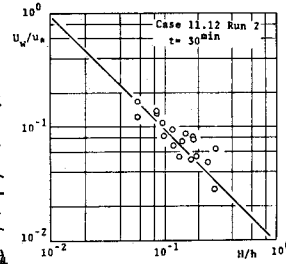


図-1 個々の波の波速と波高との関係

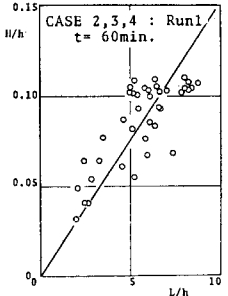


図-2 個々の波の波長と波高との相関

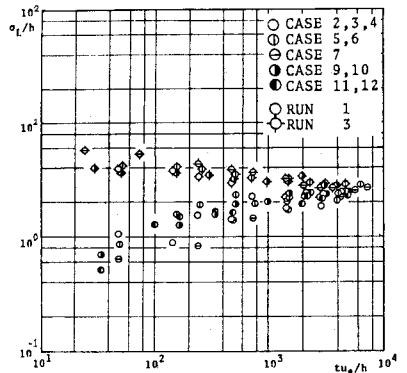


図-3 河床波長の標準偏差の時間的变化のRun 1とRun 3の比較

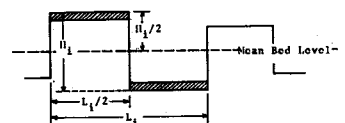


図-4 記号図

は埋の度しに用いられる流砂量で下流へ流送しない分(閉じた流砂量と呼ぶ)である。上式に L が t を経て波高が減衰すると、残存河床波は小さいものから順に消滅し、その水路床には次第平坦部が増し、平均波高は減少し、波長は増加する。残存河床波の時刻 t に流砂量減衰後をも 0 とする) の波長は、 $L_2(t)/L_0 = \{1 - I_1(\lambda(t))\} / \{1 - F(\lambda(t))\}$ (2) と表わされ(閉じた流砂量で決定される河床波の進行が遅く、残存河床波の個々の波の波長は不変)、その個数 $N_1(t)$ の最初の個数 N_0 に対する比は $1 - F(\lambda(t))$ である。ここに、 $\lambda(t)$ は時刻 t に消滅する河床波の長さから得られる無次元量で $\lambda(t) = 4q_B t / s L_0 H_0 (1 - p_0)$ 、また f_L を Run 2 における標準化した波長分布の密度関数とすると、 $F(\lambda) = \int_0^\lambda f_L(\lambda) d\lambda$ 、 $I_1(\lambda) = \int_0^\lambda f_L(\lambda) d\lambda$ である。一方 Run 3 の状態に対して固有の河床波が形成される場合は、残存河床波の消滅した平坦化部分に発生するとし、その平均波長を $1/\lambda$ としその発生過程を無視すると(この波の発生過程での個数の残存河床波個数に対する比は小さく、平衡状態の値を用いても誤差は小さいと見えた)、新しく形成される波の個数 $M(t)$ は、 $M(t)/N_0 = p L_0 I_1(\lambda(t))$ (3) となる。結局、時刻 t までの平均波長はこうした考察より次式で与えられる。

$L(t)/L_0 = 1 / \{1 - F(\lambda(t)) + p L_0 I_1(\lambda(t))\}$ (4) なお、Run 3 の状態が限界漂流力に近い場合は、この状態に固有の新しい河床波は形成せず $p = 0$ とする。さらに「閉じた流砂量」は q_B (q_B は Run 3 の平均流砂量) とし、これは波状路床上の砂の運動特性から決まるべきものであるが、ここでは実験定数として扱い運動機構にもとづいて取り扱いは今後の課題とする。なお、残存河床波の消滅に伴い C が一定でも「閉じた流砂量」は増加し、Run 3 の初期に激減した実測流砂量の回復がはかれる。^{***} 前述の考察は波高変化にも適用される。

4. モデルの実験結果による検証 まず、モデルにおいて仮定された事項は着者のこれまでの実験結果¹⁾および 2) でその妥当性が示されている。さて実験により得られた河床記録から、個々の波に 대해 解析し、式(1)を検証したもののが図-5である。個々の波の特性に含まれる統計的性状、測定誤差を考慮すると概ねその妥当性が認められる。

図-6 a) は残存河床波の消滅過程を示しており、Type I は $p = 0$ 、Type II は $p \neq 0$ で、それぞれ $C = 1$ 、 $C = 0.18$ とした。また波長の分布については、Gamma、Rayleigh 分布を仮定して計算した。また図-7 は新しく発生した波の個数を示したもので、初期には発生間もない短かい波のためその個数は理論値より大きいものの(ほぼ満足される)同様に言う(新しく発生した波に成長過程を考慮するとモデルはより理想的になる)。最後に、Run 3 における波長の時間的変化を図-8 に示した。これらの結果、

3. で考察したモデルで河床波の崩壊過程における特徴的な性状を説明し得ることがわかった。^{***} 実験条件 Run 1, 3 0.06 ~ 0.085 (Type I) 0.10 ~ 0.15 (II) Run 2 0.11 ~ 0.14 (Type I) 0.15 ~ 0.24 (II)

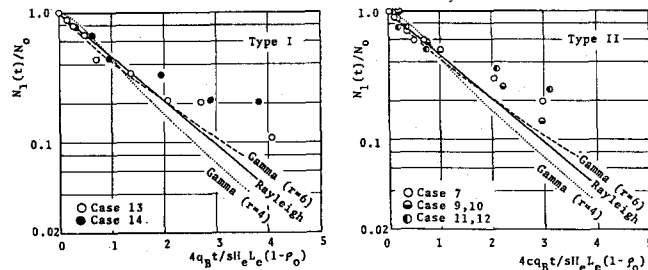


図-6 残存河床波の消滅状況

5. あとがき 本報告では、河床波の崩壊過程が河床波の固有の形状特性(とくに分布性状)に強く影響されていることに注目し、簡単なモデルを用いて考察検討を行った。河床波の発生・崩壊などの変形過程に対しては、このように個々の波についての挙動に注目してモデル化し、分布性状を考慮して平均特性を知るという手法が有効であることを示した。今後、砂の運動特性と結びつける(決定)研究を進める予定である。なお、実験の遂行、資料整理に当っては京都府立矢野島君の協力を得た。<参考文献> 1) 中川、1976、土木学会年報、1976。 2) 辻本・中川、土木学会年報、1976。

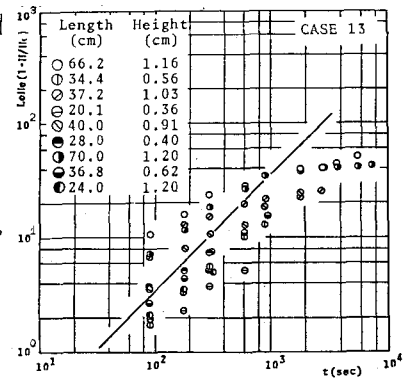


図-5 残存河床波の個々の波の減衰

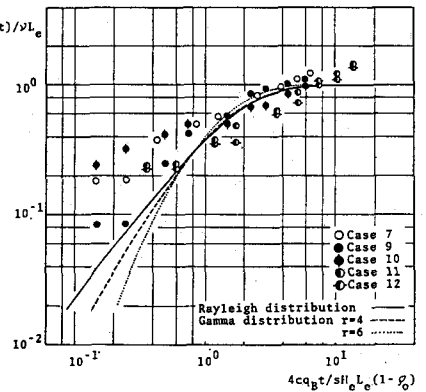


図-7 新しく形成される河床波の発生状況

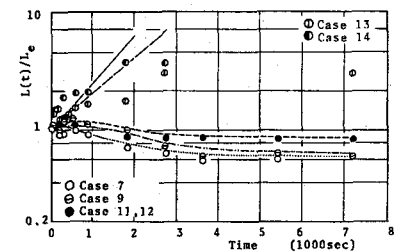


図-8 Run 3 の河床波長の時間的変化