

河床波の変形過程に関する実験的研究

京都大学防災研究所 正 員 今本博健
 京都大学防災研究所 正 員 澤井健二
 京都大学大学院 学生員 ○ 田島泰三

1. はじめに： 著者らは、非定常時における移動床の流水抵抗や流砂量を明らかにするために、河床波の変形過程に関する研究を進めており、昨年、周期的流量変化に伴う砂堆の応答に関する若干の実験を行った¹⁾。その結果、流量の変化速度が大きい場合には、河床波の応答遅れの影響が顕著となり、流量と波長・波高・水深の關係にループが現れたり、その変化傾向が逆転する場合があることなどが見出された。本研究は、その定式化を図るため、従来提案されているモデルに改良を加えた上で、数値解析を行い、実験結果と比較してその適合性を検討しようとするものである。

2. 河床波の変形機構のモデル化： 図-1は、河床波の変形過程の特徴的なパターンを平均波長(Λ)平均波高(Δ)平面上で表したものであり、水理条件ごとにひとつのとり易い波高と波長の關係を表す直線があり、その右下の領域では河床波の分裂が卓越し、左上の領域では埋め戻しが卓越して、いずれも急速にその直線に近づいた後、その直線に沿って指数関数的に速度を緩めながら平衡状態に漸近することが見出されている²⁾。芦田・中川・加藤³⁾は、これを次のように定式化している。

$$1) \quad \delta < \delta_e \text{ の場合} \quad \frac{d\Lambda}{dt} = -A \frac{\Lambda^3}{\ell} (1 - \beta\delta) \quad (1) \quad \frac{d\Delta}{dt} = -A \frac{\Lambda^2 \Delta}{\ell} (1 - \beta\delta) \quad (2)$$

$$2) \quad \delta = \delta_e \text{ の場合} \quad \frac{d\Lambda}{dt} = -A \frac{\Lambda^3}{\ell} (1 - \beta\delta) + f \frac{q_B}{1-\lambda} \frac{1}{\Lambda} \quad (3) \quad \frac{d\Delta}{dt} = -A \frac{\Lambda^2 \Delta}{\ell} (1 - \beta\delta) + f \frac{q_B}{1-\lambda} \frac{1}{\Lambda} \quad (4)$$

$$3) \quad \delta > \delta_e \text{ の場合} \quad \frac{d\Lambda}{dt} = 0 \quad (5) \quad \frac{d\Delta}{dt} = -f_s \frac{q_B}{(1-\lambda)(1-\beta\delta)} \frac{1}{\Lambda} \quad (6)$$

ここに、 δ は波形勾配($=\Delta/\Lambda$)、 A は河床波の分裂頻度、 ℓ はstep length($=100d$)、 β は剥離域長と波高の比($=5$)、 q_B は単位幅流砂量、 λ は空隙率($=0.35$)、 f 、 f_s は河床波の分布性状から定まる係数で、波長および波高が変動係数0.4の正規分布で近似される時、 $f = 0.296$ 、 $f_s = 2.55$ である。

式(3)、(4)における右辺の第一項は分裂による波長の減少、第二項は追いつき合体による波長の増加を表しており、平衡状態ではそれらが釣り合うことから、次式が得られる。

$$A = f \frac{q_B}{1-\lambda} \frac{\ell}{\Delta_e \Lambda_e^2 (1-\beta\delta_e)} \quad (7) \quad \text{ここに、添字 } e \text{ は平衡状態を表す。}$$

ところが、このモデルでは $\delta > \delta_e$ の場合を除くと $d\Delta/d\Lambda = \delta$ であることから、波形勾配は初期値のままで変化しないことになる。これは、 $\delta < \delta_e$ の場合、分裂とともに増幅が生じていることを考慮していないためであると考えられる。そこで実験で見出された特徴に基づいて、式(2)を次式で置き換える。

$$\frac{d\Delta}{dt} = 0 \quad (8)$$

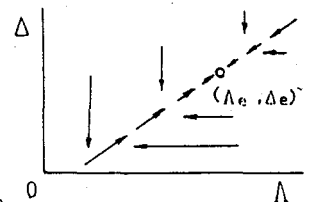


図-1 砂堆の変形過程の概念図

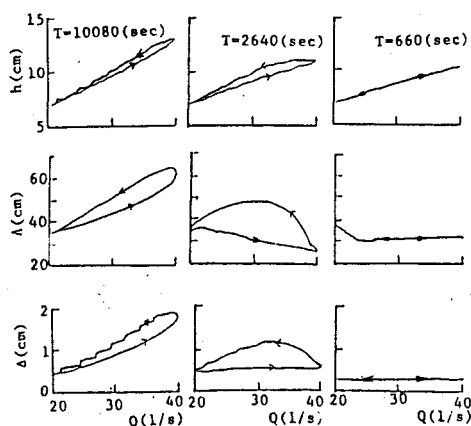


図-2 計算結果

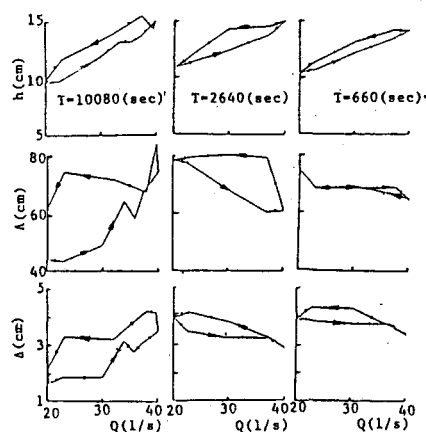


図-3 実験結果

3. 計算方法ならびに計算条件: 前記モデルに従って、正弦波状流量変化に対する河床波の応答について数値解析を行った。ただし、流砂量式には芦田・道上式、砂堆の平衡形状と抵抗則にはYalinの式を用いた。

$$\Lambda_e = 2\pi h e \quad (9) \quad \delta_e = 0.0127 \left(\frac{T_s}{T_{rc}} - 1 \right) \exp \left(- \left(\frac{T_s}{T_{rc}} - 1 \right) / 12.84 \right) \quad (10)$$

$$\frac{q_s}{\sqrt{s_b d} r} = 17 \tau_{*s} \left(1 - \frac{T_s}{T} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{T_s}{T}} \right) \quad (11) \quad \frac{u}{u_{*e}} = 6.0 + 5.75 \cdot \log \frac{h}{d(1+2\tau_{*s})} \quad (12)$$

$$C_f = C_{f0} (1 - \delta \cot \phi) + \frac{\Delta}{h} \delta^2 \quad (13) \quad C_{f0} = (6.0 + 5.75 \cdot \log \frac{h}{d})^2 \quad (14)$$

計算条件は $I = 1/500$, $q = 400 \sim 800 (\text{cm}^2/\text{s})$, $d = 0.8 (\text{mm})$ で、周期 T を約10分から3時間まで変化させている。諸量の計算においては、各時刻における流量と河床波形状から上記の抵抗則を満たす水深を取束計算によって求めた後、時間ピッチ10秒の前進差分によって、次の時刻の河床波形状を求めている。ただし $|\delta - \delta_e| < 0.001$ の場合に式(3), (4)を適用する。初期条件はいずれも $\Lambda = 50 (\text{cm})$, $\Delta = 1 (\text{cm})$ とした。

4. 計算結果ならびに考察: 図-2は、波長・波高ならびに水深の応答を示したものである。初期条件の影響は比較的早く消失するので、図には定常サイクルのみを示している。周期が長い場合には、流量の増減とほぼ同位相で河床波の波長・波高が変化し、ループも小さいが、 $T = 2520 (\text{sec})$ の場合には、増水時に波長が漸減し、減水期前半に波長・波高が増大して、大きなループが形成されている。周期がさらに短くなると河床波はほとんど応答しなくなり、水深の変化範囲も小さくなっている。また、周期が短くなるほど、波長・波高・水深の値そのものも小さくなっている。これを図-3に示す実験結果と比較すると、ある程度の対応が見られるものの、次のような差異がある。まず、波長・波高・水深とも計算値は全体的に実験値よりもかなり小さい。また、実験によると、流量の減少時には波長がほとんど変化せず、増水期に入った直後に波の分裂が生じている。さらに実験では、周期を変化させても、諸量の変域の上限値があまり変わっていない。

以上のように、現在のところ計算結果と実験結果の対応は十分ではないが、今後さらに多くのデータを詳細に検討し、モデルの改良をはかっていきたい。

参考文献 1) 澤井: 第29回水講, 1985. 2) 芦田・澤井・加藤: 京大防災研年報24号, B-2, 1986. 3) 芦田・中川・加藤: 京大防災研年報25号B-2, 1982.