

流量変化時の河床波の挙動について

京都大学工学部 正員 中川 博次
京都大学工学部 正員 辻本 哲郎
京都大学大学院 学生員 ○竹東 正孝
住友重機械工業 堀 重雄

非定常流況時の河床波の挙動は移動床水理学の今後の課題の一つとして最近とくに注目されるようになってきた。本報は著者の昨年の実験的研究¹⁾に続くもので、今年度は図-1に示すような流量変化パターンについては実験を行った結果とその考察を報告する。実験は長さ9m、幅33cmの可変勾配水路で、中央粒径0.07mmのほぼ均一砂を用いて行われた。河床勾配は $I=0.002$ で一定とし図-1のように単位幅流量を変化させた。なお、 $q=277, 464, 602$ cm^2/sec に対し同一流量での平坦河床からの河床収束過程の実験も行い、参考資料として用いた。また河床波の形状は自走式超音波測深器を用いて行い、crest to crest 法で走査される波高、波長の時間的変化を調べた(平均値を対象とする)。

実験結果の一例が図-2, 3に示されるように流量変化速度が大きい(Case 1, 2, 3の順)ほど顕著な遅れが認められる。波高は流量減少に伴い小さくなるものの波長については大流量時に形成された波長が残り保存されること特徴的と言えよう。また $h \sim q$ (水深~流量)関係を図-4に示したが、いわゆる遅れによるループは結構顕著であり、実河川での洪水を対象にすると洪水前後では $h \sim q$ 関係が相当異なることが予想され図-5を呈示する。以下にこれから河床波のスケール(とくに波高)と流量変化時の河床波の挙動に深く関係している。図-5の実験が実験値で、実験水路が充分なくないことを考慮し倒壁(アクリル樹脂製)の効果を除いた径深2で用いている。また図中の破線は次式で表わされるYalinの植枝予測式²⁾による計算結果である。

$$C/\sqrt{g} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{11}{2} \right) / \left(1 - \frac{1}{2} \left\{ \cos \psi - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k} \ln \frac{U}{U_*} \right)^2 \right\} \right) \dots\dots\dots ①$$

ただしC: Chézy係数, ψ : 砂の摩擦角, k : Kármán定数である。上式と、
 $U = C/\sqrt{g} \dots\dots\dots ②$ $h = U/k \dots\dots\dots ③$ に測定の河床波スケールを入力し h/d を数値計算によって求めたものである。Yalinの植枝式は河床形状をパラメータとしているので「移動床流の植枝予測式」として不完全であるように考えられているが、ここに示したような河床波の非平衡状態ではこのように h, L を別立てする形式がむしろ望ましいと言える。図5に示されるようにYalin式で

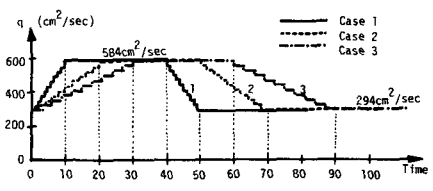


図-1 実験の対象とした流量変化パターン

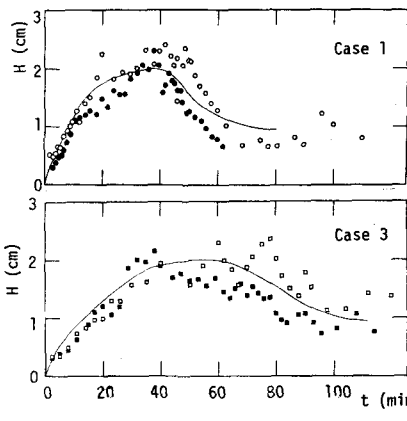


図-2 平均波高の時間的変化の例

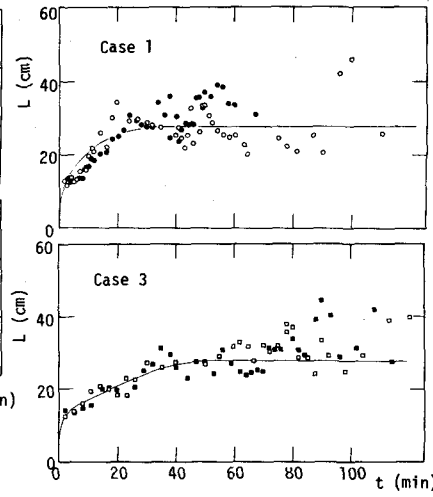


図-3 平均波長の時間的変化例

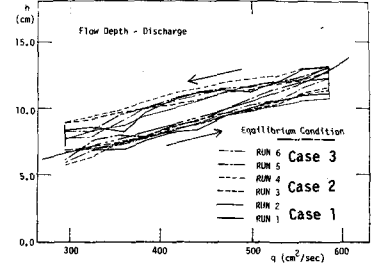


図-4 平均水深の時間的変化

図中の破線は次式で表わされるYalinの植枝予測式²⁾による計算結果である。
$$C/\sqrt{g} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{11}{2} \right) / \left(1 - \frac{1}{2} \left\{ \cos \psi - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k} \ln \frac{U}{U_*} \right)^2 \right\} \right) \dots\dots\dots ①$$

ただしC: Chézy係数, ψ : 砂の摩擦角, k : Kármán定数である。上式と、
 $U = C/\sqrt{g} \dots\dots\dots ②$ $h = U/k \dots\dots\dots ③$ に測定の河床波スケールを入力し h/d を数値計算によって求めたものである。Yalinの植枝式は河床形状をパラメータとしているので「移動床流の植枝予測式」として不完全であるように考えられているが、ここに示したような河床波の非平衡状態ではこのように h, L を別立てする形式がむしろ望ましいと言える。図5に示されるようにYalin式で

* Hiroji NAKAGAWA, Tetsuro TSUJIMOTO, Masataka TAKEZUKA and Shigeo HORI

ほぼ水深が一定で、非定常時の移動床流
 流の関連はほとんど河床波のスケールの変化通
 程に帰着される。また著者が先に示した⁴⁾ように
 $\Delta H/\Delta t$, $\Delta L/\Delta t$ を与えるモデルが得られれば逐次
 計算により河床波のスケールの変化を追跡し得る。
 河床波のスケールの変化が局所的な流動の非
 平衡に依っていると考へ、一つの河床波の前後で
 の流動偏差を α/β とし、微小時間内のスケール

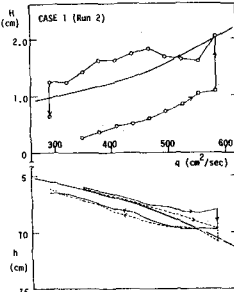


図5 波高水深～流量

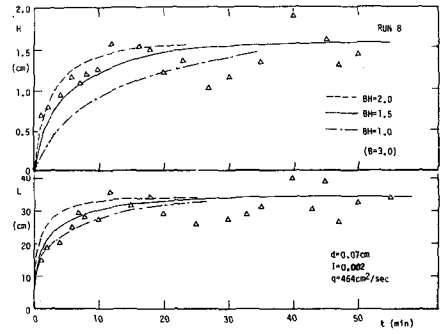


図6 平均河床からの河床波の発達率

ル変化を考へると、流動の連続式より $\frac{\Delta \beta}{\Delta t} \frac{\Delta t}{1-\beta} \approx \frac{1}{2} (H \Delta L + L \Delta H) \dots \textcircled{4}$
 が成立つ。 $\Delta L \sim \Delta H$ より $\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{\alpha/\beta}{1-\beta} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta t} \cdot \frac{1}{H}$
 が得られ $H/L = \text{const.}$ とすると q 中の q 得た L , H
 $\sim \sqrt{q}$ が得られる。上記諸語をもち、

$\frac{\Delta H}{\Delta t} / \frac{\Delta L}{\Delta t}$, $\frac{\Delta L}{\Delta t} / \frac{\Delta H}{\Delta t}$ が H/L , L/L_0
 の関数であることが期待される。実験的にこれらの関数
 の内係を検討した。その結果次式を提案した。

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{B_H + B}{1-\beta} f(\alpha) \frac{\beta}{H} (1 - \frac{H}{H_0}) \dots \textcircled{5} \quad \left(\frac{H}{H_0} \text{ については } \frac{H}{H_0} \text{ の近似} \right)$$

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{B_L + B}{1-\beta} f(\alpha) \frac{\beta}{L} (1 - \frac{L}{L_0}) \dots \textcircled{6}$$

(B_H, B_L, B は実験定数、添字 0 は平衡値 L_0 : 初期波長)
 新しく導入された $B, B_H, B_L, (1 - \frac{H}{H_0}), \dots$ などは
 河床波のスケールの変化の素過程の多様性にもづく
 もの²⁾ 例として $B(1 - \frac{H}{H_0})$ などは初期にはかなり大き
 な増幅率を与える要因で q 中の q のモデル³⁾ などに
 ではないものである。また B_H, B_L などで流量減少時

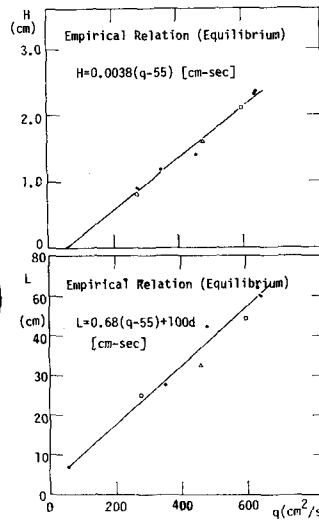


図7 平衡状態の河床波のスケール

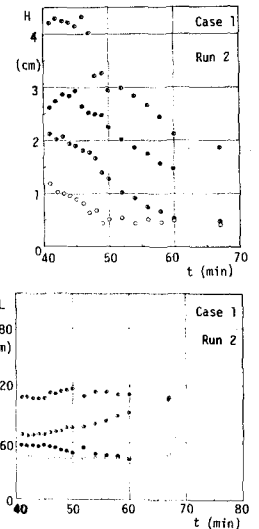


図8 流量減少時の個々の河床波のスケールの変化

には波長は変化せず、
 その分流動偏差 α/β
 が埋め戻しに使用
 されることを考慮す
 るための定数とした。
 式^⑤^⑥の計算に必要な
 平衡状態のスケールは

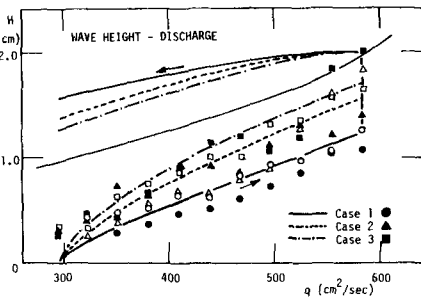


図9-1 決定した

図9-2 河床波のスケールの流量変動に対するループ図 (実験結果は流量増大時のみ)

($d=0.07\text{cm}$, $I=0.002$ の場合)。また流量減少時には河床波の挙動は特異であり
 とくに個々の波に着目してスケールの変化を模計したのが図8で、波長の場合、長
 波長のまま流量が減少し追いつきずみで右端に出現し難くなり波長変化が
 停止したものと思われる。以上の検討より河床波のスケール及び水深 (Yalin
 式利用) と流量変動との関係を手算したものが図9, 10であり、実験結果とあ
 る程度説明できようである。参考文献: 1) 中川幸夫・松田竹生: 昭和56年度(西暦)講
 義 Yalin: La Houille Blanche, 1964 2) 中川幸夫: 京大防災研年報 1976, 4) 竹東・中川幸夫: 36年度講義, 1981.

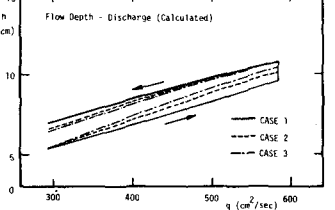


図10 図8の手算例 (図4と対比)