

1. はしがき

移動河床に生ずる各種の河床波は、流水抵抗則や底質の輸送・拡散などの関係において工学的に重要な現象である。したがって実験や野外観測などによって従来多くのデータが集積され、一連の河床波系列の基本的特性についてはかなり明らかにされてきた。しかし、その成因をはじめとする力学的機構については未解明の点が多く、とくに低フルード数領域においては卓越的现象が顕著でないため生成機構の説明が困難であり、統一的理論は確立していないと思われる。本研究は、このような領域の河床波 (ripples, dunes etc.) の生成段階に關する実験を行ない、その生成機構について考察したものである。とくに、底質が細砂の場合に河床付近に顕著に見られる遷移性の強い波 (不安定波) の存在に着目し、この波動の成因とそれが河床波の形成において果たす役割について試論を提出した。

2. 低フルード数領域における河床波の生成に關する実験

前述のような低フルード数領域における ripples, dunes などの生成する過程とその条件について明らかにすることを目的として実験を行なった。この領域の河床波の生成には砂粒径の影響が大きいが、従来の研究によって知られている経験的事実より ripples の生成も可能であるような比較的細粒径の川砂を中心として、ほぼ一様粒径に近くなるように選級した6種類の底質を用いている。

実験には幅5 cm, 深さ30 cm, 長さ7 m の可傾水路を使用した。実験にあたっては、まず水路内に砂を敷き水路に付設された台車に鉛直に固定した板を徐々に移動させることによって一様に均し、厚さ5 cm の平坦な初期砂面を作った。この砂面の upstream 側および downstream 側には、水流の急激な変化によって砂面が攪乱されることを避けるために、それぞれ 1/10 程度の勾配をつけている。また、砂面と水路側壁 (ガラス製) の接触する部分には砂粒径の数倍程度の溝をつけて側壁の影響を緩和するとともに、水路中心部の砂面上の現象が側方真横より観察・撮影できるようにした。通水に際しては、まず水路下流端の越流堰の高さを適当に調節し、砂面を乱さないような微小流量で徐々に注水して十分な水深をとり、限界掃流力未満の弱い流れでしばらく水路系内の水を循環させ、その安定を図った。ついで、流量および越流堰高を適宜調節し、掃流力やフルード数に關する各種条件下で河床波の生成状況について観察・測定を行ない、以後底質を変えて順次これをくり返した。

実験結果より、低フルード数領域における河床波の生成状況は砂粒径によってかなり明瞭な特徴をもつことが明らかになった。限界掃流力付近において底面の砂粒は滑動・転動を主とした弱い運動を始めるが、砂粒径が比較的大きい場合 ($d > 0.6 \text{ mm}$) には、数十時間通水しても平坦河床は変形せず、むしろ砂面に人為的に変形を与えても速に平滑化される領域のあることが確認された。しかし、砂粒径がより細粒の場合 ($d < 0.6 \text{ mm}$) には、通水中何らかの不規則性によって砂面上に生じた攪乱を起点として下流側に順次波状形態 (ripples と見なす) が生じ、前の場合のような平坦な砂面の安定な領域は存在しない。この場合、生成初期の波高は微小であっても、波形の下流側に流れの剥離が生じ、その後流域の影響によって規則的な洗掘・

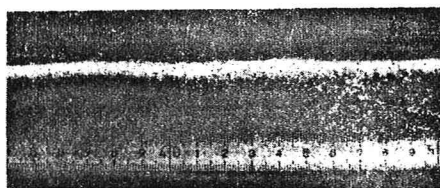


写真-1 不安定波の生成状況

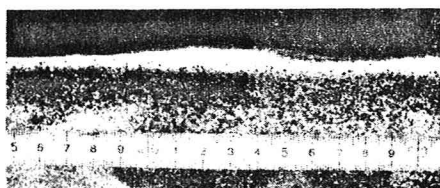


写真-2 不安定波の遷移状況

堆積を生じて波形を増幅させる状況が観察される。つぎに、平坦砂面上にさらに強い掃流力で通水すると跳躍(saltation)形式で移動する砂の層が底面付近に形成され、この層が数カ所で正弦波状を呈し、これが引金となって多数の小規模な河床波を生ずる領域のあることが明らかになった。このようにして生じた小規模な河床波は、さらに相互に重合して dune 状に成長する。生成初期の正弦波状の波と、それが成長して河床波へと移行する状況とを写真-1, 2 に示した。移動する砂の層に生ずる波は、上述のように遷移性が強く、常に生成～消滅をくり返して不安定である。

3. 不安定波の生成機構について

前述の不安定波は波長・振幅ともに微小であるが、より規模の大きな河床波 (dunes etc.) の生成を誘起するものであり、また河床波スペクトルの高周波成分の主要な供給源となっていると考えられる。したがって、この波の機構を明らかにすることは、一連の河床波現象を解明する上で重要である。このため砂水混合の密度流的観点より上の問題を考察し、とくに細粒径の砂を底質とする場合は砂面境界付近に高濃度の掃流砂層および浮游砂層が存在することに基礎をおき、そのような高濃度層内に生ずる波動性によって不安定波の生成を説明した。

密度勾配のある成層流に対して有限の攪乱が加わった場合の変化については、Navier-Stokes の方程式から出発して求める次式によって解析することができる。

$$\nabla^2 \delta + K^2 \delta = 0 \quad \text{----- (1)} \quad K^2 = \frac{g}{\rho U^2} \left| \frac{\partial \rho}{\partial y} \right|, \quad \nabla^2: \text{Laplacian}, y: \text{鉛直座標},$$

δ : 攪乱の作用による流線変位, ρ : 密度, U : 流速, g : 重力加速度

上式を適当な境界条件の下に解くとその解は定常的波動性を呈するが、波動の波長および振幅は係数 K の値によって支配される。すなわち、 K は波動の wave number に相当し、 K が一定の値以上の領域においてのみ有意の波動が存在する。このようにして河床付近の高濃度層内に生ずる波動が不安定波に相当すると考え、以下にその生成限界を K の値にもとづいて解析する。

河床付近の高濃度流砂層内の密度分布 $S(y)$ および流速分布 $U(y)$ については次式を得た。

$$S(y) = \rho_w \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_w} - 1 \right) C_a \left\{ \frac{R-y}{y} \frac{a}{R-a} \right\}^2 \right] \quad \text{----- (2)} \quad Z = \frac{W}{K \beta U_*}$$

$$U(y) = \frac{U_*}{K} \int_y^R \frac{dy}{y \left\{ 1 - A \left(\frac{R-y}{y} \right)^n \right\}^{n/2}} \quad \text{----- (3)} \quad A = b C_a^n \left(\frac{a}{R-a} \right)^{n/2}$$

ρ_w : 水の密度, C_a : 底面 (Bed-Layer 内) の基準濃度, R : 水深, a : Bed-Layer の厚さ

U_* : 摩擦速度, K : Kármán 常数, W : 砂粒の沈降速度, β, b, n : constant

つぎに、写真-1 に示したようなデータより $K \geq 0.8 (\text{cm}^{-1})$ が得られ、この限界値を用いて不安定波の生成限界を計算すると右図の実線 (CASE 1, CASE 2) が得られた。ここで、両 CASE は高濃度領域の上限 (y_u) をそれぞれ次式によって与えた場合である。

$$\left. \begin{aligned} \text{CASE 1: } \frac{y_u}{R} &= 0.0075 \left(\frac{U_*}{W} \right)^{0.49} \\ \text{CASE 2: } \frac{y_u}{R} &= 0.0083 \left(\frac{U_*}{W} \right)^{0.52} \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (4)}$$

同図中には不安定波 (T-WAVES)、攪乱の後流域の洗掘～堆積による波 (S-D WAVES) などの生じた場合の実験値も記入してあるが、上記の計算値は不安定波の生成限界をかなりよく表わしていると思われる。

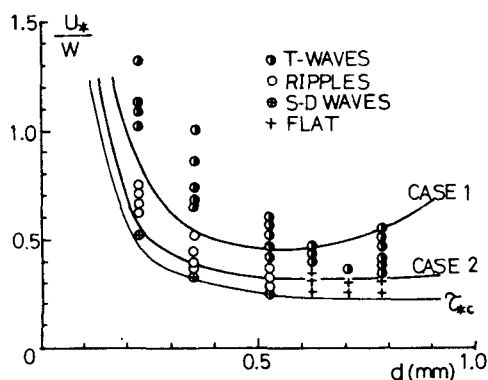


図-1 不安定波の生成限界 (計算値～実験値)

謝辞: 実験と数値計算に協力された卯花政孝技官、佐藤孝助手、学部研修生 土生道君に謝意を表します。