

## 沖積河川における不安定河床波の形成に関する研究

著者	三王 英壽
号	392
発行年	1978
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/11341">http://hdl.handle.net/10097/11341</a>

氏 名	三 王 英 壽
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 53 年 6 月 7 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 43 年 3 月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程 修了
学 位 論 文 題 目	沖積河川における不安定河床波の形成に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 岩崎 敏夫    東北大学教授 後藤 幸正 東北大学教授 佐藤 敦久    東北大学教授 首藤 伸夫

## 論 文 内 容 要 旨

沖積地河川における流砂量を算定することは河川工学上非常に重要である。このため従来多くの流砂量式が提案されてきたが、精度の点で十分満足すべき算定式が確立しているとはいえない。このような流砂量式の精度に影響する要素として河床波の現象が考えられる。すなわち、底面境界が水量量に対応して波状に変形することによる有効掃流力の変化を推測する問題があり、このためにはまずいかなる条件でいかなる河床波が生成するかについて明らかにすることが必要である。しかるに、河床波に関する理論は完成の段階に至っておらず、各種河床波の生成機構および生成条件について明らかにすべき点が多く残されている。

本論文は、従来とくに明確にされていない低フルード数領域における河床波の生成機構ならびに生成条件（領域区分）を明らかにすることを目的として行なった研究をまとめたものであり全篇 6 章より成る。

### 第 1 章 緒 論

本章では、本研究の目的およびその内容の概要について述べている。

### 第 2 章 河床波の生成領域に関する従来の研究と問題点

本章では、河床波の生成特性とその領域区分に関する従来の基本的な研究について本研究の目

的との関連のもとに概説し、とくに砂漣、砂堆、平坦河床の領域区分に問題点のあることを指摘している。

### 第3章 河床波に関する実験

本章では、低フルード数領域を中心とした河床波の生成特性およびそれに関連する掃流砂量について実験的な検討を行なった。

まず、河床波の生成特性に関する実験結果より、底質砂粒径によって河床波の生じかたに顕著な相違のあることが確認され、さらに従来指摘されていなかった生成・消滅の変化の著しいごく小規模な遷移性の波動の存在することが見出された。この波を不安定波と称し、その生成機構およびそれが河床波系列の生成と関連して果す役割について考察することが本論文の中心的な課題となっている。掃流力がある程度大きくなると砂面付近に跳躍 (saltaion) あるいは浮流 (suspension) などの形式で輸送される高濃度の流砂層が形成され、上述の不安定波はこのような層内で正弦波状の波動として生ずる。これは波長8~10 cm程度のごく小規模な波であるが、遷移性が顕著で生成後小規模な河床波を生じさせる。また、比較的細粒径の底質 ( $d \leq 0.6 \text{ mm}$ ) でかつ掃流力の小さい領域では、局所的に存在する河床の攪乱を起点として、その後流域の影響によって生成する河床波がある。この河床波を改めて砂漣 (ripples) と定義した。このような底質の場合には、限界掃流力以下の流れであっても、攪乱を与えれば砂漣と同様に後流域下の洗掘と堆積の機構による河床波の生成することが確かめられた。このような場合の河床波をS-D Wavesと名づける。さらに、底質粒径が  $d \geq 0.6 \text{ mm}$  程度に増大すると、限界掃流力のある程度越えても砂漣やS-D Wavesの生じない平坦床 (flat bed) の安定であるような領域の存在することが明らかになった。上述の河床形態の領域区分について、Chabert & ChauvinおよびSimons & Richardsonによる既往の研究結果と比較して図-1および図-2に示した。ここで、不安定波から比較的規模の大きい砂堆状河床波に遷移する場合については、T-waves  $\rightarrow$  dunesの記号

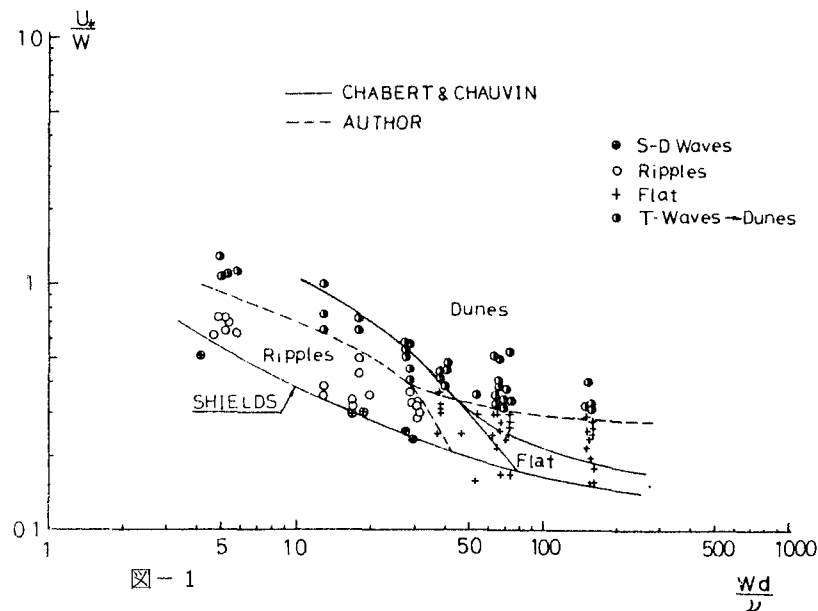


図-1

で示してある。 $U^*$ は摩擦速度、 $W$ は砂粒の沈降速度、 $\nu$ は水の動粘性係数、 $\tau$ は剪断応力、 $U_m$ は平均流速を表わす。

つぎに、細粒径かつ低フルード数領域における河床波の生成~平衡過程の周波数スペクトルに関して実験的に検討した結果、

不安定波より遷移したごく小規模な河床波が高周波部分の供給源として平衡スペクトルの形成に影響を与えていることが推測された。

さらに、河床波の生成を伴う領域における掃流砂量に関して実験的に検討した結果、従来提案されている算定式のうち篠原・椿の式および芦田・道上の式（係数17を8に修正した場合）の適合性が比較的良好であった。

#### 第4章 不安定波理論

本章では、前章の実験によって存在が確認された不安定波の生成に関する理論的な解明を試みた。移動床流れの底面付近では流速分布および流砂濃度分布に顕著な特徴のあることに着目し、密度流的な観点より不安定波の生成条件について解析して

いる。すなわち、底面付近に図-3に示すような高濃度の掃流砂層（bed layer）および浮流砂層が存在することにもとづき、こ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機構を説明し、その生成条件の検討を行なった。

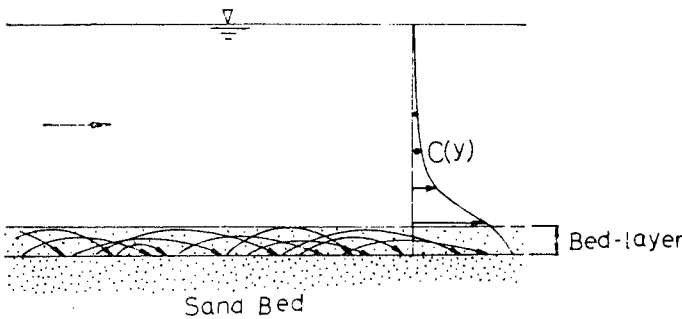


図-3

- T-WAVES → DUNES
- RIPPLES
- S-D WAVES
- + FLAT

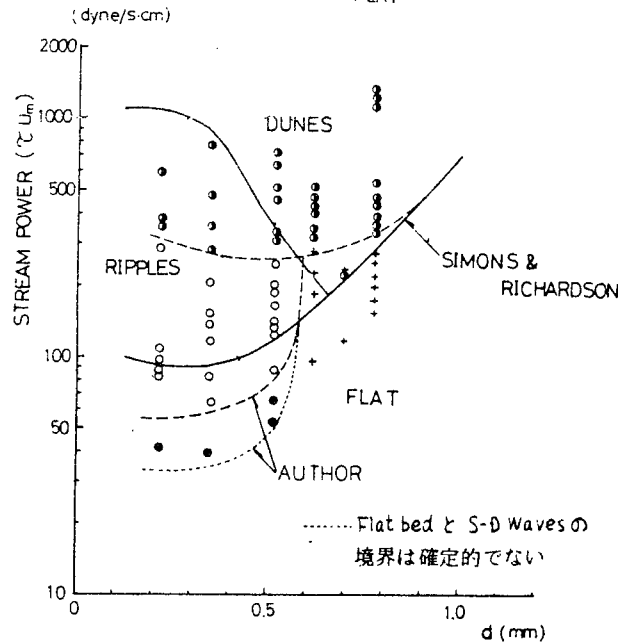


図-2

鉛直方向の流速分布および密度勾配のある流れの一部に有限の攪乱が加わった場合の流線の場所的変化の概要は、Navier-Stokesの運動方程式より出発し、定常・非粘性などいくつかの仮定のもとに誘導された次式で示される。

$$\nabla^2 \delta + K^2 \delta = 0, \quad K^2 = \frac{g}{\rho_c U^2} \left| \frac{\partial \rho_c}{\partial y} \right| \quad \dots \dots \dots (1)$$

$\delta$  : 流線変位       $\rho_c$  : 砂水混合流体の密度       $U$  : 未攪乱流速       $g$  : 重力加速度  
 $y$  : 鉛直座標

上式の解は波動性を呈し、その波長及び振幅は同式中の係数K（波数を示す）によって支配されることに着目し、不安定波の生成限界の指標としてこの係数を用いることとし、前章の実験結果より得られた不安定波生成初期の波長より、その限界値を $K \geq 0.8$  (rad/cm)とした。ここで係数Kの算定にあたっては高濃度流砂層内の密度分布および流速分布を求める必要がある。このため、まず砂水混合体の密度 $\rho_c$ の分布を与えるものとして次式を提案した。

$$\rho_c(y) = \rho_w \left\{ 1 + Ca \left( \frac{(H-y) \cdot a}{(H-a) \cdot y} \right)^z \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \right\}, \quad Z = \frac{W}{\kappa \beta U_*} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\rho_w$  : 水の密度       $\rho_s$  : 砂粒の密度      H : 水深  
a : bed layer の厚さ      W : 砂粒の沈降速度       $U_*$  : 摩擦速度  
 $\kappa$  : Kármán 常数 (0.4)       $\beta$  : 比例係数 (1.2)

なお、bed-layer 内の流砂濃度 Ca の計算には、Einstein の方法および前章の実験によって検討した篠原・椿の掃流砂量式を用いた。

つぎに、流速分布については、流砂を含有することによる混合距離の変化を流砂濃度の関数として求めた Yalin & Finlayson の実験結果を用いて次式を誘導した。

$$U(y) = \frac{U_*}{\kappa} \int_{y_0}^y \frac{dy}{y \left\{ 1 - b C_a^n \left( \frac{H-y}{H-a} \cdot \frac{a}{y} \right)^{nz} \right\}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

b, n : 流砂濃度による定数       $y_0$  : bed-layer 上縁の高さ

以上の方法によって計算した不安定波の生成限界と実験値との比較を図-4に示した。(なお、同図中の計算値 case 1, case 2 は高濃度層上限のとりかたによる相違を示す。) 図示のような理論により与えた生成限界はよく実験値を説明し本章で展開した不安定理論の妥当性を表わすものと考えられる。

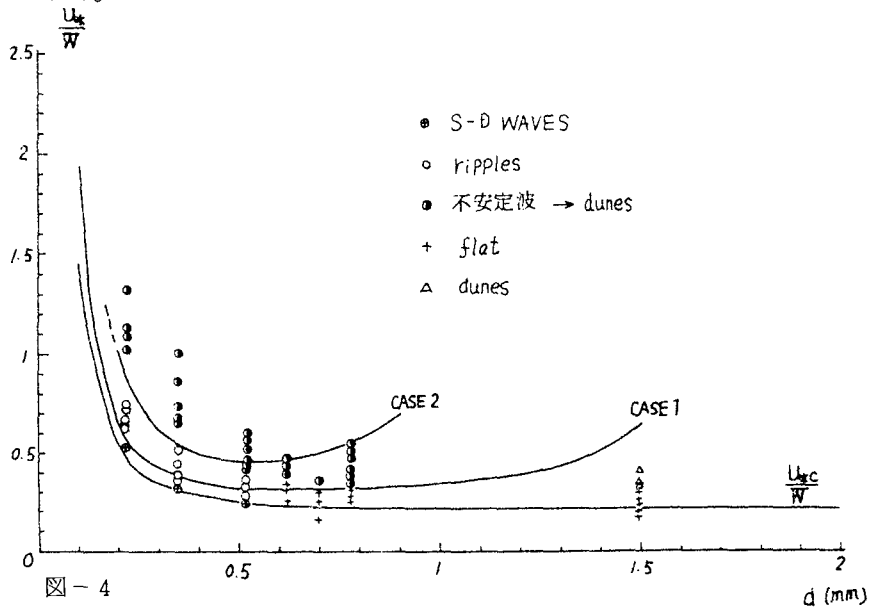


図-4

## 第5章 不安定波を加えた河床波分類論

本章では、前述のような不安定波を考慮して低フルード数領域における河床波系列の生成機構とその領域について総括的考察を行なった。この結果、上記領域における河床波の領域区分は、掃流力に関する無次元量 ( $U_* / W$  または  $\tau_* = U_*^2 / \{(\rho_s - \rho_w) / \rho_w\} gd$ ) と底質粒径 ( $d$ ) との関係によって図-5のように表わされることを提案した。なお、水の動粘性係数と底質の比重は助変数としてとり扱った。

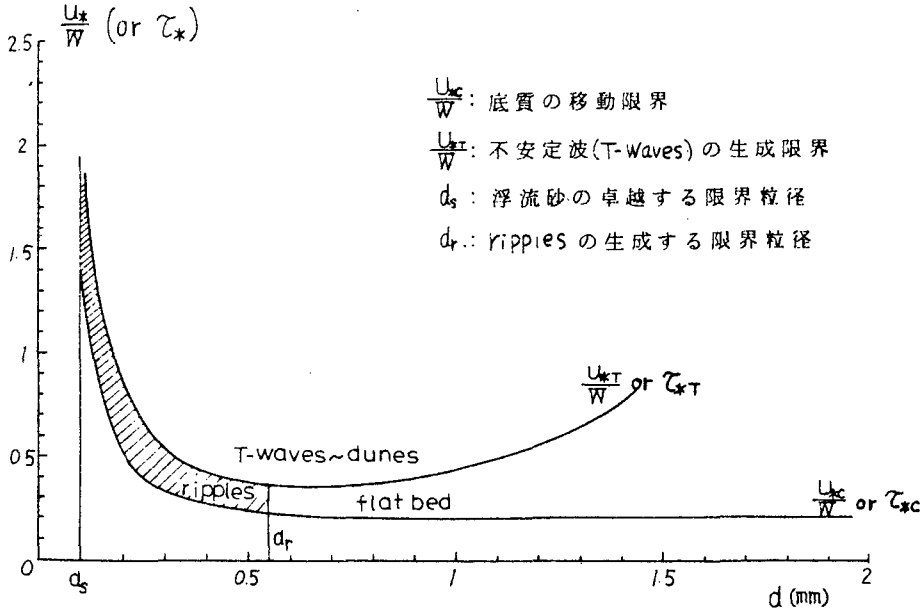


図-5

底質粒径が微細化すると、掃流力による移動開始とともに浮流形式の流送が卓越し、河床波の生成が困難になる領域がある。このような粒径の限界値を  $d_s$  とした。この値はほぼ  $d_s = 0.1 \text{ mm}$  である。砂漣 (ripples) は限界掃流力 ( $\tau_{*c}$ ) に達すると同時に生成可能であると考えられるが、底質粒径に上限があり、その値を  $d_r$  とした。この値はほぼ  $d_r = 0.6 \text{ mm}$  である。この不安定波の生成限界 ( $\tau_{*T}$ ) は前章の解析法によって算定され、この値は細粒径・低フルード数領域における砂堆 (dunes) の生成限界とも対応する。

## 第6章 結 論

本論文で述べた研究結果を総括し要約した。

## 審査結果の要旨

河床波の生成は洗堀、堆積、土砂流送等河川工学に關与する基本的問題として従来数多く研究されてきたが、砂漣、砂堆など低フルード数領域の河床波生成の機構および条件については今日なお十分明らかにされていない。本論文は従来指摘されていなかった生成、消滅の変化の著しい遷移性の河床波動の存在を実験的に見出し、これを不安定波と名づけ、その生成の機構と領域を理論的に求めることにより、従来不明確であった砂漣、砂堆の境界領域附近の水理機構を究明したもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では従来の研究を概説し、とくに砂漣と砂堆の生成の区別について的一致した見解がいまだ得られていないのは両者の機構の相違について現象的な理解が不足していた為であると述べている。

第3章では低フルード数領域を中心として行なった河床波の生成特性および掃流砂量に関する実験を述べている。まづ不安定波は限界掃流力をやや超えた流況で河床附近に形成される高濃度流砂層内に生じ、時間の経過とともに砂堆に移行することを見だし、これとは別にシールズ関数で与えられる限界掃流力以下でも砂漣状の河床波が発生すること、また河床波スペクトルはその高周波部分において不安定波としてのエネルギーの供給があり、次第に低周波にエネルギーが移行することを指摘している。また河床波生成領域において掃流砂量の計算式を実験的に検討している。

第4章では不安定波の生成に関する理論を述べている。まづ実験で明らかになった河床附近の高濃度流砂層内に生ずる流線の波動を、鉛直方向の流速及び密度分布のある流れの場における理論解によって説明し、波数は、砂水混合流体の密度勾配、未攪乱流速より成る Brunt-Váisála 振動数によって表わされることを述べ、密度流における流速、密度分布を理論的に誘導して、上記振動数を計算し、実験的に求まった限界値を与える摩擦速度・沈降速度比の数と、粒径との組合せを求めて、不安定波発生限界を表わし、これを実験と比較してその正しさを証明している。これは著者の独創である。

第5章では本論文で新しく得た不安定波なる河床波を考慮して、低フルード数領域における河床波系列の生成機構とその発生領域について総括的考察を行った。掃流力が不安定波発生限界を超えると砂堆が生じ、またこの限界より低いが、シールズ関数値より高い場合には0.1内至0.6ミリの砂粒径で砂漣を生じ、それ以外では平坦河床であることが、述べられている。これは重要な結果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は不安定波に着目して低フルード数領域における河床波の生成機構および生成領域をよく説明する新たな知見を得たもので、その成果は土砂水理学の進展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。