

河床波の変形過程に関する研究 (2)

——洪水時における河床波の変動予測——

澤 井 健 二

TRANSFORMATION PROCESS OF SAND WAVES (2)

—Estimation of the Scale of Sand Waves During Flood—

By Kenji SAWAI

Synopsis

The response of sand waves due to the time change of flow condition extending to both the lower and upper regime was measured in a flume test varying flume inclination with a constant flow discharge. As a general tendency, it was found that in the lower regime the response seems to be slow and it appeared a remarkable time lag. On the other hand, in the upper regime or transition, the response seems to be so quick that the bed form nearly coincides with that for the steady state.

Some hydrological and hydraulic data of several principal rivers in Japan were arranged to estimate the bed configuration during floods, by means of a numerical simulation model. In some cases, the bed configuration is estimated to be dunes and the wave length and/or height will differ considerably from those for equilibrium state.

1. 緒 言

水理量の時間変化に伴って河床波形状がどのように変化するかを明らかにすることは、洪水時における流水抵抗や河床変動を予測する上で極めて重要な課題である。前報¹⁾において、著者は、周期的流量変化に伴う砂堆の応答特性を実験的に解明するとともに、従来提案されている河床波の変形過程の追跡モデルに若干の修正を加えて、数値シミュレーションを行った。その結果、砂堆領域では河床波の変形にかなりの時間を要し、流量の変化周期が短い場合には、平衡状態からのずれのかなり大きくなることが明らかにされた。

しかしながら、砂堆領域以外あるいは、領域間にまたがって水理量が変わる場合の河床波の応答に関しては、従来ほとんどデータがなく、その特性は未知のままとなっている。そこで本報では、砂堆から反砂堆への遷移領域にまたがる河床波の変形過程を実験的に解明するとともに、その機構を定式化し、より一般的なシミュレーションモデルを組み立てる。

また、わが国の代表的河川における河道条件と水文資料を整理し、本シミュレーションモデルを適用して、洪水時の河床形態の変動予測を行う。

2. 砂堆から反砂堆にまたがる領域遷移を伴う河床波の変形過程に関する実験

2.1 実験方法

実河川における水理量の時間変化は、主として流量の時間変化に起因するものであり、それに下流部の水位変化ならびに河床形態の変化が加わって、諸量が支配されているものと考えられる。この意味では、実験水路においても、水路勾配を一定として、流量を時間的に変化させて河床形態を遷移させるのが、実現象に

より近いものと考えられるが、水深粒径比のあまり大きくない領域では、勾配によって河床形態がほぼ定まってしまう、緩い勾配のもとで upper regime への遷移を生じさせるためには、きわめて大きな水深したがって流量を必要とする。そこで本実験では、流量を変化させるかわりに水路勾配を時間的に変化させることにした。また、実河川では、流れが不等流であることの影響は決して小さくないと考えられるが、河床波の変形機構を解明する上では、その影響を極力除外し、等流に近い条件のもとで、実験を行うのが有効である。そこで、本実験では、極力等流条件を維持できるよう、種々の工夫を試みた。

用いた水路は、幅 50 cm、長さ 21 m の流砂循環水路で、勾配 $I=1/1000$ のもとで長時間通水して平衡状態を作った後、勾配を $1/1000$ から $1/150$ まで等速で上昇させ、ただちに同じ速さで $1/1000$ まで下降させ、再び $1/1000$ に保って長時間通水を続けた。河床材料は平均粒径 0.8 mm の均一砂で、流量は 30 l/s の定常とした。通水中、極力等流条件が維持できるよう、水路下流端に流砂の透過できる可動堰を設け、頻繁に水位調節を行った。また、比較のため、 $1/1000$ から $1/150$ の間のそれぞれの勾配に対する平衡状態の河床波の測定も行った。いずれの実験ケースにおいても、通水前の河床の敷きならしは行われず、前の通水終了時の河床を次の通水の初期河床とした。

2.2 実験結果

Fig. 1 は定常勾配条件下での水路中心線に沿う河床形状の時間変化を示したものである。通水開始直後の河床には、前の河床の影響が残っているが、数十分後には、それぞれの水理条件に固有の河床波が形成されている。

まず、河床波の概形に着目すると、 $I=1/1000$ の場合には、比較的なだらかな背面と急傾斜の前縁を持つ砂堆が形成され、下流方向に伝播しているのがよくわかる。河床波形状はかなり規則的であるが、クレスト近傍にさらにいくつかの小さな波の重なることがある。しかしながら、それらの小さな波は、個々に増幅することはなく、より大きな波に吸収されていく特徴をもっている。個々の波の伝播速度は、波高と逆相関をもっているようである。

$I=1/500$ の場合にもその傾向は共通しているが、 $I=1/1000$ の場合に比べると、波高がかなり小さくなっている。 $I=1/400$ の場合には、波長がやや短くなるとともに、不規則性がやや増しているようである。

$I=1/300$ の場合には、なだらかな背面と急峻な前面からなる砂堆の特徴がほとんど失われ、種々のスケールの波が不規則に混在している。それに伴って、個々の波の伝播も不明瞭となっている。小さなスケールの波の連なっている部分では、それらをならした河床勾配が水路勾配よりも急になっている傾向があり、他の実験ケース

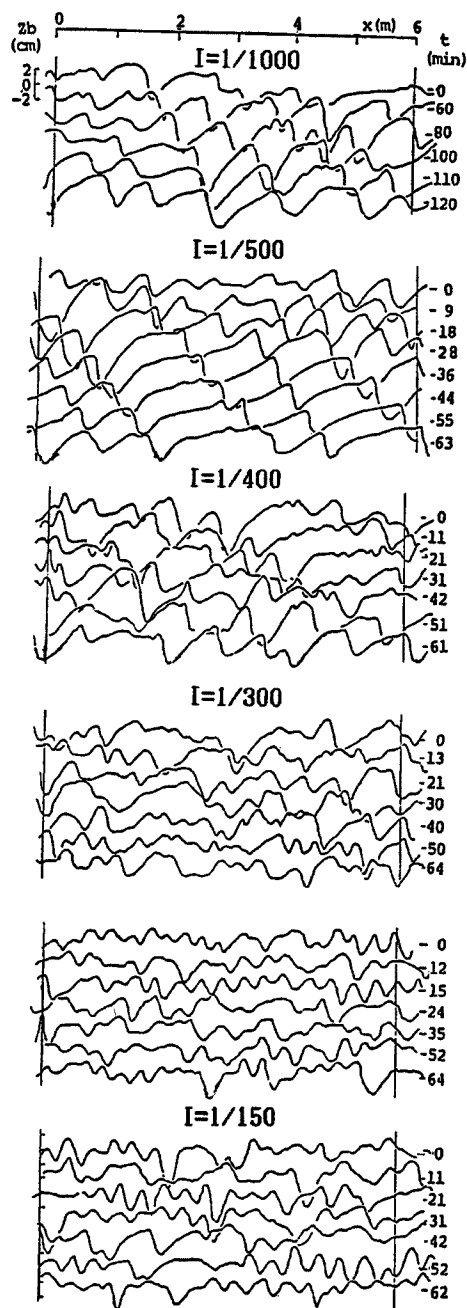


Fig. 1 Bed forms under steady flow conditions.

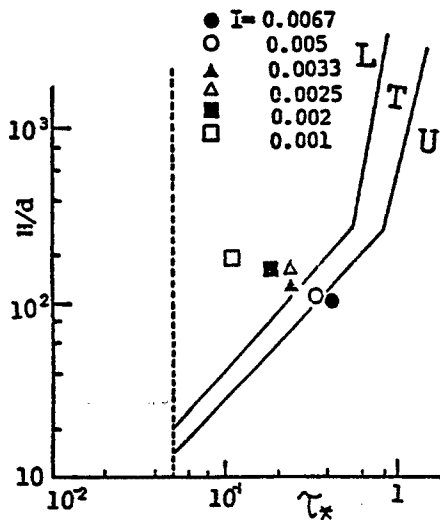


Fig. 2 Plots on the diagram of bed configuration.

ときわだった違いを見せている。これは砂堆の崩壊する遷移領域の特徴ではないかと考えられる。

さらに勾配を大きくした $I=1/200$ の場合には、河床波のスケールはさらに小さくなるが、再び規則性を有するようになっている。その比較的規則的な小さなスケールの波に着目すると、正弦波に類似した前後対称に近いなめらかな波形を有しているのが特徴的である。しかしながらこれらの波群は長時間にわたっては安定せず、消長をくりかえしている。その伝播特性も明確ではない。これは、反砂堆の特徴と合致するものであり、既に lower regime から upper regime への遷移が生じているものと判断される。

$I=1/150$ の場合には、やや波高が増加し、不規則性も増しているようであるが、 $I=1/200$ の場合と大きな差異は見られない。

このように、定常勾配条件下では、 $I=1/300$ を境にして、lower regime から upper regime への遷移が生じているようであるが、これを芦田・道上²⁾の領域区分図にプロットすると、Fig. 2 のようである。

Fig. 3 は、各勾配での平衡状態における 6m の区間での平均波長、平均波高ならびに平均水深をプロットしたものである。個々の波の読み取りには、峰から谷までの落差が 2mm 以上の凹凸を抽出して波高とし、隣り合う谷の間隔を波長と定義した。波長、波高、水深とも、勾配の増加に伴って減少する傾向にあるが、さらに細かく見ると、波高は $I=1/300$ で最小となり、それよりも大きな勾配では、勾配とともに若干増加傾向にあるようである。

Fig. 4 は、勾配を時間的に変化させた実験における、河床形状の変化を示したものである。勾配が一定の間は、河床波はほぼ同一の形状を保って下流へ移動しているが、勾配が上昇し始めるとかなり急速に河床波形状が変化し、とりわけ、 $I=1/300$ 付近で顕著な分裂が生じるとともに、砂堆から反砂堆への移行が生じている。勾配が $1/150$ から減少し始めると、スケールの小さな波のいくつかが消滅して河床波形状が不規則

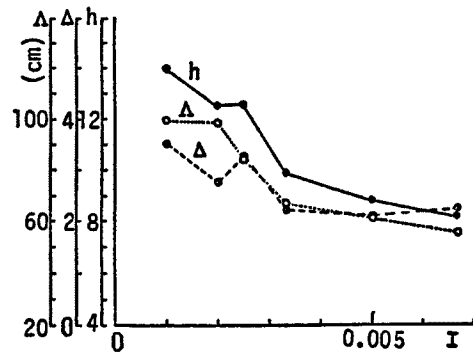


Fig. 3 Equilibrium wave length, wave height and flow depth.

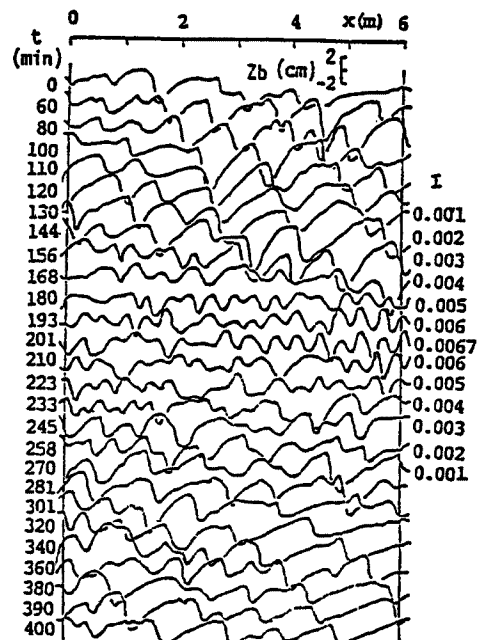


Fig. 4 The response of bed form due to the time change of flow inclination.

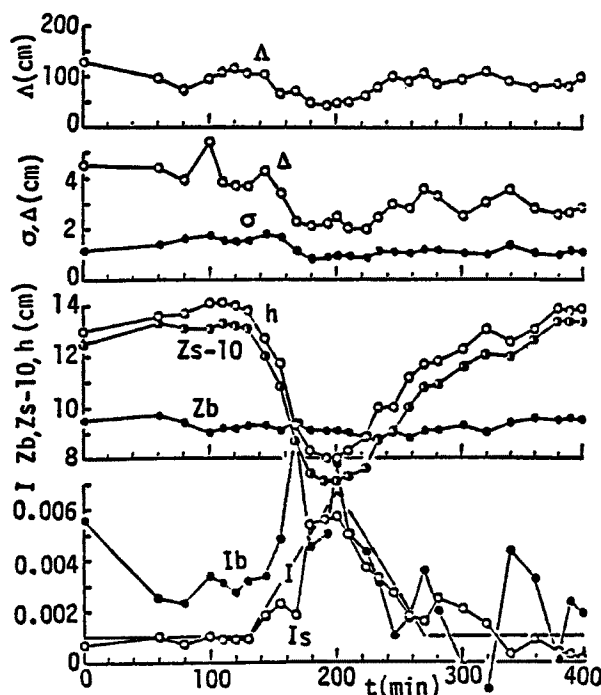


Fig. 5 Time change of some parameters averaged longitudinally.

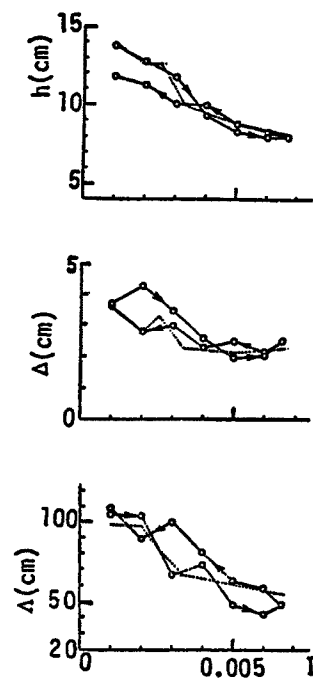


Fig. 6 Hysteresis of wave length, wave height and flow depth.

となり、 $I=1/300$ 程度まで勾配が減少すると再び砂堆が形成されるが、勾配変化前の状態に回復するにはかなりの時間がかかっている。

Fig. 5 は、流下方向に平均化した諸量の時間変化を示したもので、 I は水路勾配、 I_b は河床勾配、 I_s は水面勾配、 z_b は河床位、 z_s は水位、 h は水深、 σ は河床位の標準偏差、 Δ は河床波高、 λ は河床波長を表している。最大勾配の時刻 ($t=200$ min) をはさんで前後 30 分ずつ程度の間は、諸量の時間変化がほぼ対称になっているが、それよりも隔たった所では、勾配の上昇期と下降期、あるいは勾配変化前と変化後で、河床形状や水深にかなりの差異が現れている。

Fig. 6 は、勾配変化中の諸量の変化を、水路勾配を横軸にとってプロットしたものである。領域遷移を伴う河床波の応答は、かなり複雑であるが、概して砂堆領域では大きな遅れが存在するのに対し、遷移領域や反砂堆領域では応答が速いようである。

3. わが国の代表的河川における洪水時の河床形態の変化予測

3.1 洪水時の水理量

一口に「洪水」と言っても、その規模は千差万別であり、どの程度の洪水を対象にするかが問題となるが、ここでは、河床形態に重要な役割を演ずる洪水規模として、年 1 回ないし 2 年に 1 回程度の頻度の洪水を考えることにする。Fig. 7 は、山本ら³⁾ の資料を用いて、わが国の代表的河川の中下流部における年一回程度の洪水ピーク時の τ_* と R/d の関係をプロットしたものである。図中の線群は山本らによる河床形態の領域区分線を表しており、左下の砂堆領域および右上の遷移領域付近に多くのデータが集中している。

そこで、Fig. 7 のさまざまな領域にまたがって 8 つの地点を選び、ピーク流量が過去 20 年間における最大と 20 番目の洪水のハイドログラフを示すと、Fig. 8 のようである。図中の点線は、それらを内挿して求めた、年超過確率 1/2 の洪水のハイドログラフである。いずれの河川においても洪水の継続時間は比較的短く、

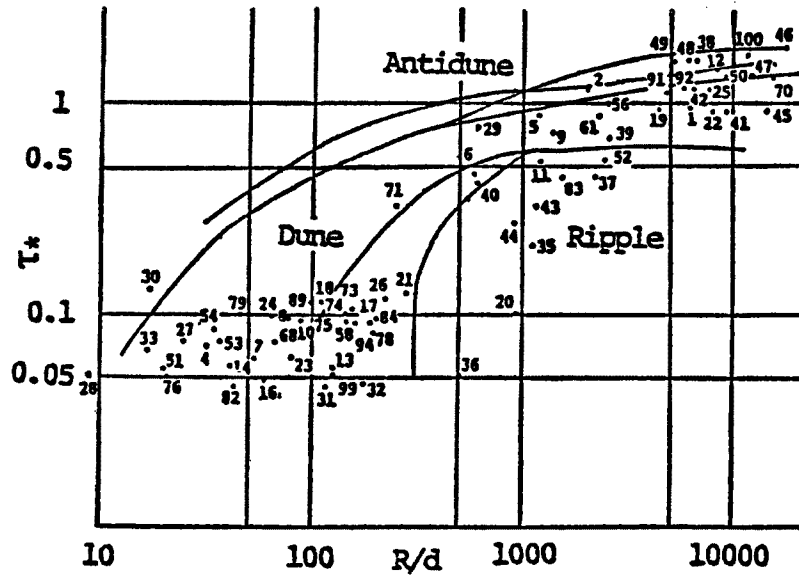
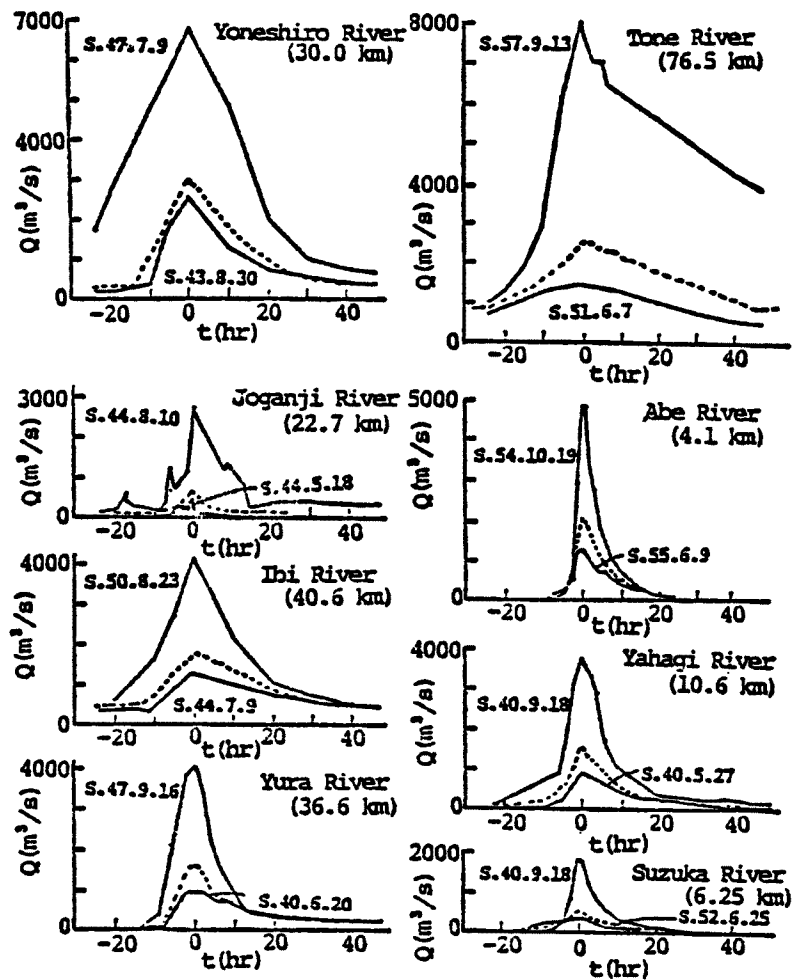

 Fig. 7 τ_* and R/d at the mean annual maximum discharge.


Fig. 8 Observed and estimated hydrographs for several floods.

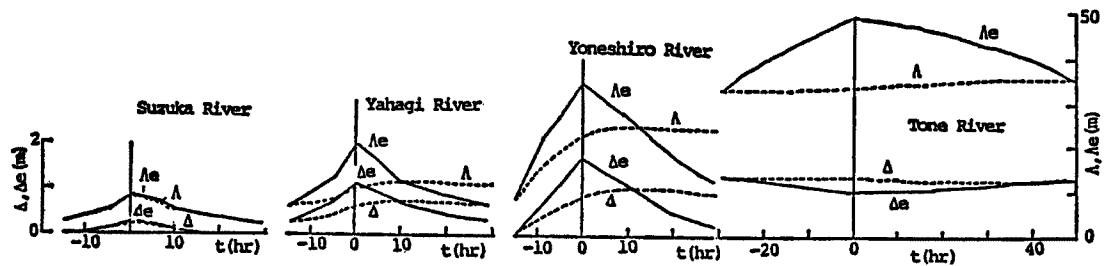


Fig. 10 Equilibrium and time integrated scales of sand waves during floods.

対する平衡状態の河床波スケールを与えることにした。

3.3 計算結果

Fig. 10 は、シミュレーション結果を示したものである。図中、実線は各時刻の水理量に対する平衡状態の波長、波高を示し、点線が、前期のモデルに従って時間的に追跡した結果を示している。この図から断定的な結論を導くのは早計であるが、わが国の代表的河川における洪水時の河床形態は、流量変化に対してかなり応答が遅れ、波長や波高の変化量が平衡状態に対するものよりもかなり小さくなる場合があることが推測される。

4. 結 論

以上、水理量の時間変化に伴う河床波の変形過程について、実験およびシミュレーションを行った結果、次の点が明らかにされた。

- 1) 砂堆から反砂堆への領域遷移を伴う河床波の応答は、かなり複雑であるが、概して砂堆領域では大きな遅れが存在するのに対し、遷移領域や反砂堆領域では応答が速く、平衡状態との差異が顕著でない。
- 2) わが国の代表的河川では、年超過確率 1/2 程度の洪水において、砂堆領域に属するものも多く、河床波形状が各時刻の水理量に対応する平衡形状とかなり異なる場合があることが推測される。

なお、本研究の一部は、昭和58、59年度文部省科学研究費補助金一般研究 (B) (代表者：京都大学芦田和男教授) ならびに昭和59、60、61年度自然災害特別研究 (1) (代表者：北海道大学岸力教授) の補助を得て行ったものである。また、実河川の資料は、建設省から提供していただいた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 澤井健二：河床波の変形過程に関する研究一周期的流量変化に伴う砂堆の応答に関する実験一，京都大学防災研究所年報，第28号 B-2, 1985, pp. 539-548.
- 2) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，1972, pp. 59-69.
- 3) 山本晃一他：河川における土砂の移動機構に関する研究ノート，土木研究所資料，第1416号，1976.
- 4) 中川博次・辻本哲郎・竹束正孝：河床波を伴う非定常流れの特性，第27回水理講演会論文集，1983, pp. 665-671.
- 5) Yalin, M. S. and E. Karahan: Steepness of Sedimentary Dunes, Proc. ASCE, 1979, pp. 381-392.
- 6) Yalin, M. S.: On the Average Velocity of Flow over a Movable Bed, La Houille Blanche, No. 1, 1964, pp. 45-53.