

混合砂河床における流量変化に伴う 河床波の応答予測

SAND WAVE TRANSFORMATION UNDER UNSTEADY CONDITIONS IN GRADED SEDIMENT BED

三輪 浩¹・大同淳之²
Hiroshi MIWA and Atsuyuki DAIDO

¹正会員 工博 舞鶴工業高等専門学校助教授 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-0055 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Sand wave response to change of water discharge in graded and uniform sediment beds is not necessarily the same. Therefore, difference of the response influences water depth. Transformation process of sand waves, temporal variations of mean water depth and reach averaged sediment transport rate under unsteady flow conditions for graded and uniform sediment beds were investigated on the basis of flume tests and were predicted by introducing reference grain size for sand wave transformation. As for the response, it was found that the width of loop in graphs of discharge-wave height and discharge-water depth for graded sediment are smaller than that for uniform sediment under same water discharge condition. Therefore, time lag of response for graded sediment is smaller than that for uniform one.

Key Words : graded sediment, unsteady flow, sand waves, transformation process, reference grain size, time-lag of response

1. 緒 言

移動床流れ場における種々の水理現象は水流、流砂および河床形状の相互作用によって生じているが、河川における水理現象を考える場合、洪水時のように流量が変化する場での河床波の変形過程を明らかにし、移動床系としての水理現象を適切に予測することは工学上重要な課題である。この問題を扱う際の着目点の一つは流量変化に対する河床波変形の応答遅れの特性を明らかにすることである。中川・辻本¹⁾や芦田・中川²⁾はそれぞれ河床波の変形速度式を提案し、これを移動床流れ場の基礎式に導入して、流量変化に対する河床波の応答を解析し、流量と河床波形状あるいはそれらに支配される水深との間に種々のループが形成されることを示すとともに実験によって検証した。また、澤井³⁾は周期的に変化する種々の流量条件の下での河床波の応答特性を実験的に検討し、流量の変化周期や変化速度との関係を議論している。このように、これまでの種々の研究によって流量変化に伴う河床波の変形過程とそれに付随する水深の応答特性はかなり明らかにされてきた。しかし、従来の研究ではそのほとんどが一様砂として扱われ、混合砂の効果を検討したもの

は少ない。著者ら^{4), 5), 6)}は河床波の発達過程や流量急変時の変形過程をほぼ同一の平均粒径を有する一様砂と混合砂を用いて比較し、両者でかなりの相違が見られることを示すとともに、粗・細砂の存在を考慮する必要性のあることを指摘している。このことから、流量変化に対する河床波の応答性状は混合砂と一様砂では相違が生じるものと推測される。

以上の点に鑑み、本研究では混合砂河床を対象として、連続した流量変化による河床波の変形過程と流れ場への応答予測を行い、一様砂河床の場合と比較してその特性を検討する。研究の主眼は河床材料に応じた代表粒径を河床波の変形過程の予測解析に導入し、実験結果と比較してその適否を検討すること、および流量変化に対する応答特性の混合砂と一様砂間の相違を明らかにすることにある。

2. 実験の概要

実験は長さ9m、幅0.2mの亚克力製可変勾配水路を用いて行った。本研究は混合砂河床を対象としているが、混合砂が河床波の変形に及ぼす影響を明確にするために、ほぼ同一の平均粒径を有する一様砂を用いた実験も実施した。実験に使用した砂の粒度

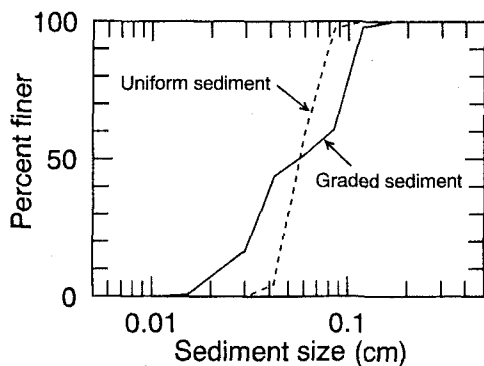


図-1 使用砂の粒度分布

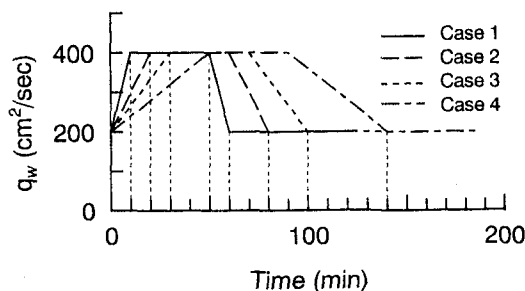


図-2 実験での流量波形

分布を図-1に示す。混合砂は平均粒径 $d_m = 0.066\text{cm}$ 、幾何標準偏差 $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.87$ を、一様砂は $d_m = 0.062\text{cm}$ 、 $\sigma_g = 1.24$ を有する。比重 σ/ρ はいずれも 2.65 である。

実験は河床を平坦に敷き均し、路床勾配を 1/400 に設定した後通水を開始し、流量変化に伴う河床波の変形、水深および流砂量の変化を追跡した。通水時の流量波形は図-2に示すような台形状のもので、単位幅流量 q_w を $200\text{cm}^2/\text{sec}$ から $400\text{cm}^2/\text{sec}$ へ増加させた後、40分間定常通水し、その後 $400\text{cm}^2/\text{sec}$ から $200\text{cm}^2/\text{sec}$ へ減少させて、さらに45分間定常通水するものである。流量の変化時間 T_f は増水、減水とも 10, 20, 30 および 50 分であり、それぞれの実験を Case1, Case2, Case3 および Case4 と呼ぶ。実験中は平均河床勾配およびほぼ等流の状態が保たれるように水路上流端で給砂を、下流端でゲートの開度調整を行った。また、超音波式測深器とサーボ式水位計を搭載した台車を水路上を往復させて河床面および水面の縦断形を測定するとともに、水路下流端からの流出砂を適時採取して流砂量を測定した。本研究では河床波の形状を波長と波高で代表させているが、これらは河床の縦断記録から zero-up cross 法によって求めた。なお、本実験は lower regime 領域での現象を対象としており、全粒径階の砂粒子に対して transition 領域に入らないよう条件が設定されている。

3. 河床波の変形状

図-3、図-4は実験結果の一例として Case4 における波長および波高の平均値の時間的変化を示したものである。波長に関しては混合砂と一様砂で顕著な差異は認められず、両者とも同様の変化傾向を示し

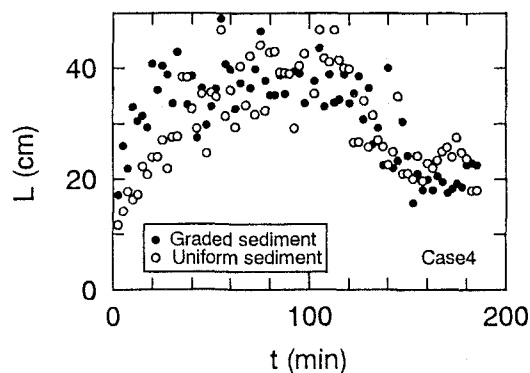


図-3 流量変化に伴う波長の時間的変化

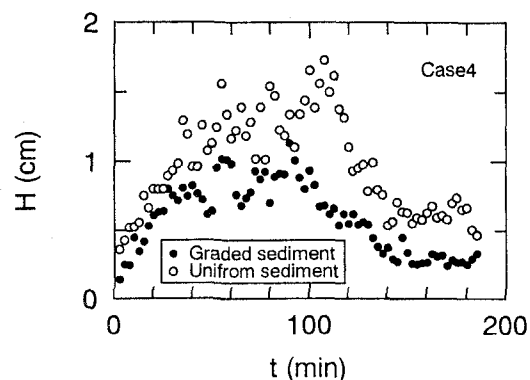


図-4 流量変化に伴う波高の時間的変化

ていると見なせる。ただ、減水期では波長は漸減しており、一定もしくは増加するといった従来の研究結果^{1), 2)}とは異なっている。一方、波高に関しては全通水期間にわたって混合砂は一様砂よりも低く抑えられ、両者で顕著な差異が認められる。鈴木・道上⁷⁾や著者ら^{4), 5), 6)}は一定流量下における平坦河床からの河床波の発達過程や流量急変時の変形過程においてこのような現象が起こることを指摘しているが、本実験のように流量が連続的に変化する、より一般的な流れ場においても同様の結果となっていることは実河川を考える上で興味深い。なお、他の Case においても上記と同様の結果が得られている。

ところで、減水期における平均波長の変化は残存河床波の埋め戻しと新たに発達した河床波の相互関係に依存している。すなわち、残存河床波の埋め戻しが卓越するような事象では波長は変化しないか、もしくはより小さな河床波の消滅によって増加することになる。しかし、減水期の水理条件が河床波を生じるようなものであれば、流れ場全体では埋め戻しによる波長一定（または増加）と新たに発達した河床波の両者が混在している。その結果、平均的には波長が減少することになる。図-3の減水期での波長の漸減はこのような状況によってもたらされたと考えられる。しかし、現時点ではこの条件は明らかではなく、今後詳細に検討する必要がある。

4. 河床波を有する移動床流れ場の記述

河床波を有する移動床流れ場では、流量変化に対

して河床形状、水深および流砂量の変化が相互に作用し合う系を成しているが、河床波を対象とした場合、河床波の変形に対する流れの応答が流れの変化に対する河床波の応答に対して十分に早いと見なせるので、時々刻々の河床波形状に応じて抵抗則、流砂量式を適用して水深、流砂量の時間的変化を算定しても移動床系のバランスは保たれる。流れ場を記述するための基礎式は抵抗則式、流砂量式および河床波の波高、波長の変化速度式である。

(1) 抵抗則

抵抗則は河床波形状を媒介とした次式⁸⁾を用いる。

$$\frac{u_m}{u_*} = \left\{ \frac{4}{7} \Pi' \left(\frac{h_m}{k_s} \right)^{-1/4} + \frac{1}{2} C_D \Lambda \right\}^{-1/2} \quad (1)$$

ただし、 $\Pi' = (B'/A)^2 C^{1/4}$, $A = 8.94$, $B' = (1 - \zeta/2)^{-1} \xi^{-1/8}$
 $\times (1 - n\lambda)^{3/8} (1 + \lambda^2)^{3/16}$, $C \approx A^2 \left\{ 0.26 + \lambda / (F_r \cdot B) \right\}^2$,
 $B = (1 - \zeta/2)^{-1} \{ \xi(1 - n\lambda) \}^{-1/2}$, $C_D = \{ 4(1 - 4\lambda)(2 + \zeta) \}$
 $/ \left[(2 - \zeta)^2 \{ 2 + (1 - 8\lambda)\zeta \} \right] \{ 2(1 - 4\lambda)\zeta / \{ 2 + (1 - 8\lambda)\zeta \} + 0.13 \}$,
 $\Lambda = \lambda / (1 + \zeta/2)$, $\zeta = H/h_m$, $\xi = L/h_m$, $\lambda = H/L$, $n = L_s/H$.
ここに、 u_m は平均流速、 u_* は摩擦速度、 h_m は平均水深、 k_s は等価砂粗度、 F_r はFroude数、 H , L は河床波の波高および波長、 L_s はクレスト直下流の剥離域の長さ（再付着点距離）である。

(2) 流砂量式

流砂量の算定には有効掃流力を考慮したMeyer-Peter and Müller型の流砂量式⁹⁾を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{q_{Bi}}{p_i \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd_i^3}} &= 8(\tau_{*i}' - \tau_{*ci})^{3/2} \\ q_B &= \sum_{i=1}^k q_{Bi} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 p_i は粒径 d_i の砂粒子が河床に占める割合、 k は粒径階の数、 τ_{*i}' は無次元有効掃流力、 τ_{*ci} は無次元限界掃流力である。 τ_{*i}' は次式¹⁰⁾で算定する。

$$\tau_{*i}' = \frac{4}{7} \Pi' \left(\frac{h_m}{k_s} \right)^{-1/4} \frac{u_m^2}{(\sigma/\rho - 1)gd_i} \quad (3)$$

また、 τ_{*ci} は芦田・道上の修正Egiazaroffの式¹¹⁾によって求める。なお、一様砂の場合は平均粒径に対して計算する。

(3) 波高、波長の変化速度式

河床波の波高、波長の時間的変化の予測には中川・辻本の式¹⁾を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \frac{k_H}{1 - \rho_0} \frac{q_B}{L} \left(1 - \frac{H}{H_e} \right) \\ \frac{dL}{dt} &= \frac{k_L}{1 - \rho_0} \frac{q_B}{H} \left(1 - \frac{L - L_0}{L_e - L_0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

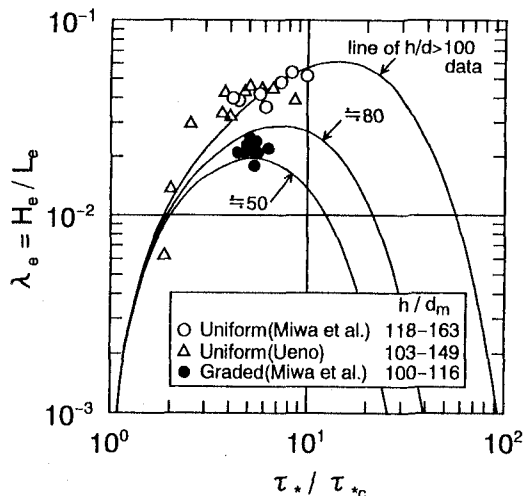


図-5 平衡波形勾配の評価

ここに、 k_H , k_L は定数、 ρ_0 は河床砂の空隙率($=0.4$)、 H_e , L_e は波高、波長の平衡値、 L_0 は初期波長($=100d_m$)である。

L_e はYalin¹²⁾によれば、

$$L_e = \alpha \cdot h_{me} \quad (\alpha \approx 5) \quad (5)$$

で与えられ(h_{me} は L_e に応じた平均水深)、 H_e は波形勾配が掃流力と水深・粒径比で表されている次のYalin and Karahanの式¹³⁾によって推定する。

$$\lambda_e = \frac{H_e}{L_e} = 0.0047 \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1 \right) \exp \left\{ 1 - \frac{0.0047}{\lambda_{\max}} \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1 \right) \right\} \quad (6)$$

ここに、 $\lambda_{\max}$ は最大波形勾配で、水深・粒径比の増加関数である。

5. 河床波の変形過程と移動床流れ場の予測

(1) 計算方法

前節の基礎方程式を用いて、流量変化に対する河床波の変形過程と水深および流砂量の応答予測を行う。これに先立ち、基礎式の中の変数の扱いについて述べる。

式(1)中の $n = L_s/H$ は、著者らがプロペラ流速計を用いて逆流率¹⁴⁾によって再付着点の時間平均位置を調べた結果¹⁵⁾から4.25とした。

混合砂河床における河床波の発達過程では平均粒径の2倍程度の粗砂が河床波のスケールを規定する代表粒径になっている^{4), 5)}が、減衰過程でも砂粒子が活発に運動している場合にはこれを認め、流れ場における代表粒径 d_r は $2d_m$ とし、式(1)中の等価砂粗度は $k_s = 2d_r$ で与えた。また、式(6)に対して d_r を用いると、図-5のように h/d の値が d_m を用いたときの約半分となり、平衡波形勾配が適切に評価できる。 $d_r = 2d_m$ におけるのは著者らが調べた粒度構成の場合であるが、実際には最大粒径程度の粗砂が物理的な意味を持っているのではないかと考えている。いずれにしても、今後、粒度分布の標準偏差などを介して d_r と d_m の関係を明らかにする必要がある。なお、一様砂の場合は $d_r = d_m$ である。

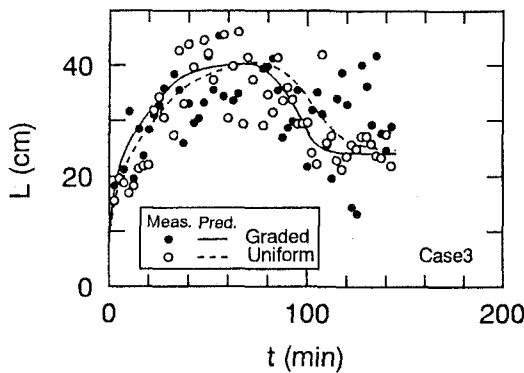


図-6 波長の時間的変化

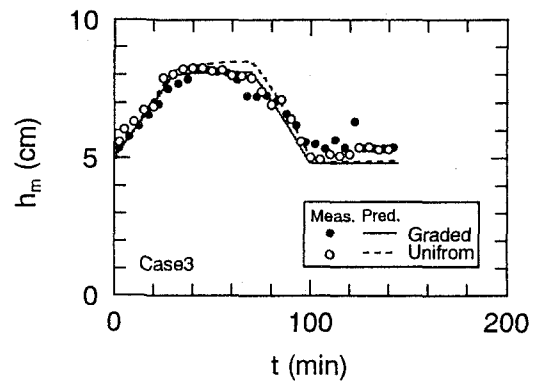


図-8 平均水深の時間的変化

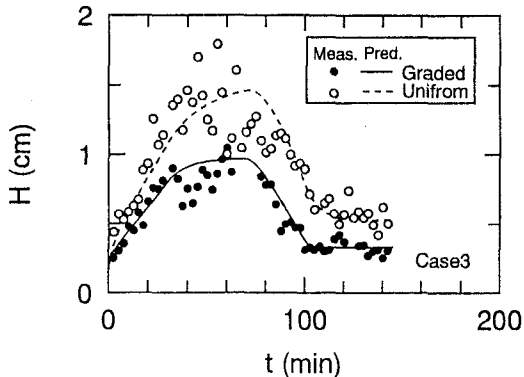


図-7 波高の時間的変化

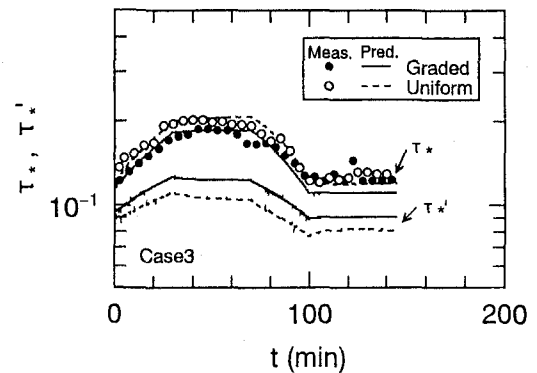


図-9 無次元掃流力の時間的変化

平坦河床では砂粒子の交換は河床表層で行われるが、河床波を有する場合はこれを構成する砂粒子全てが交換対象で、移動層となりうる。実験で数波長の河床波に対して採取された移動層の粒度構成は全通水期間にわたっておおむね給砂に近かったので、式(2)中の p_i は給砂の粒度構成と同じものを用いた。

式(4)中の定数は増水期では $k_H=0.36$ 、 $k_L=0.24$ 、減水期では $k_H=0.72$ 、 $k_L=0$ とされているが、図-3に示したように減水期で波長が漸減しているのでは増水期の $k_L=0.24$ を用いた。

計算は、流量を1分ごとのstep状で近似し、流量、勾配および粒径を与えて式(1)、(5)および(6)からこの間の平衡河床波形状(波長、波高)を求め、これをこの流量区間の収束値として、式(1)～(4)によって波長、波高、水深および流砂量の変化を10秒ごとに予測するものである。

(2) 計算結果と考察

以下、Case3を例にとり、流量変化に伴う河床波の変形過程と流れ場への応答特性について述べる。

図-6、図-7はそれぞれ波長および波高の変化過程の計算結果を測定結果と比較したものである。波長に関しては先にも述べたように一様砂と混合砂で顕著な差異は認められず、両者とも同様の变化傾向を示している。計算結果もおおむね良好であると見なせる。なお、減水期での波長の漸減現象もある程度再現できているが、波長の変化速度式に与えた係数($k_L=0.24$: 減水期)については今後検討する必要がある。一方、波高に関しては全通水期間にわたっ

て混合砂の方が一様砂よりも低く抑えられるが、計算結果はこれと良好に適合しており、粗砂の効果を考慮した代表粒径を用いることの有用性を示している。

図-8は平均水深の時間的変化の計算結果を測定値と比較したものである。減水後の定常通水期において計算結果が測定値を若干下回っているが、それ以外はおおむね良好であると見なすことができる。したがって、河床波の波長、波高の変化過程を適切に推定することができれば実用上十分な精度で抵抗の予測が可能であるといえる。

図-9は平均粒径で無次元化した無次元掃流力の時間的変化の計算結果と実験結果を示したもので、良好に推定されているといえる。また、同図には無次元有効掃流力の計算値も併せて示されているが、全通水期間にわたって全抵抗に占める摩擦抵抗の割合は一様砂よりも混合砂の方が大きく、全抵抗の大小が必ずしも摩擦抵抗に反映されるわけではないことがわかる。著者ら¹⁶⁾によると、河床波を有する流れ場の全抵抗に占める摩擦抵抗の割合は、一様砂では0.4～0.5程度であるのに対して混合砂では0.6～0.7程度で、これが上記の結果を生んでいると考えられる。

図-10は図-9の無次元有効掃流力を用いて求められた流砂量の時間的変化を測定結果とともに示したものである。測定結果はかなりばらついてはいるが、おおむね流量の増減に応じて変化している。予測結果もこの傾向を示しているが、減水期以降では精度が劣る。これについては今後検討する必要がある。

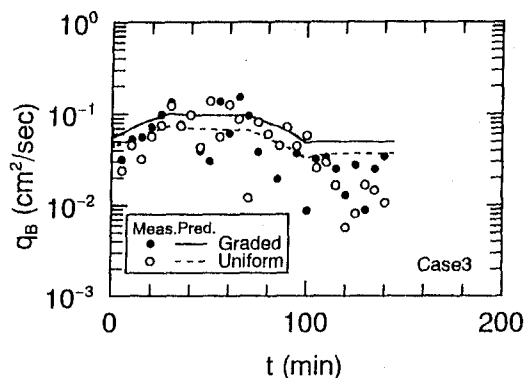


図-10 流砂量の時間的变化

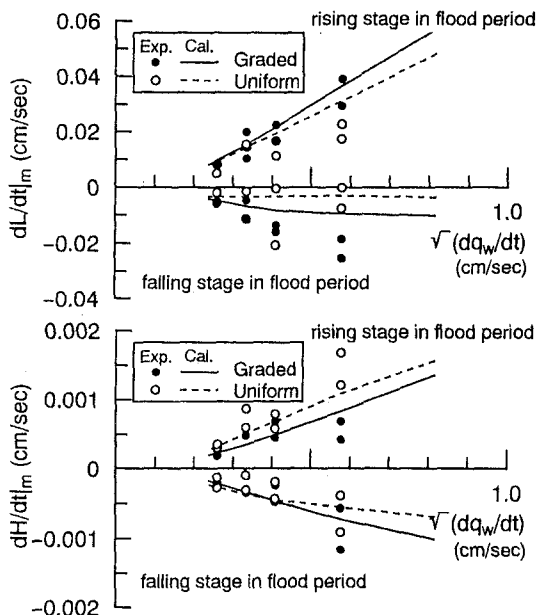


図-11 流量の変化速度と波長、波高の変化速度の関係

図-11は流量の変化速度（増水，減水）に対する波長，波高の変化速度（発達，減衰）の平均値を示したものである。同図より，流量の変化速度が大きくなるにつれて波長，波高の変化速度も大きくなる傾向がある。とくに，増水期では波長に対しては混合砂の方が，波高に対しては一様砂の方が変化速度が大きいことがわかる。

図-12，図-13および図-14はそれぞれ流量と波長，波高および水深の関係を示したものである。流量が増減する場では流量変化に対して河床波形状は応答遅れをもって追従するため，同一の流量に対する波長，波高および水深は増水期より減水期の方が大きく，流量－波長，流量－波高および流量－水深の関係はループを描く。図-12の波長に関してはデータのばらつきもあって明確ではないが，計算曲線では混合砂の方がループの幅は若干小さい。また，図-13の波高に関してはループの幅は混合砂の方がかなり小さくなっており，一様砂に比べて流れ場の変化に追従し易いことを示している。さらに，図-14の水深についても波高の影響を反映して混合砂のループの幅は小さく，流量の増減水に対する履歴性は弱いと推察される。

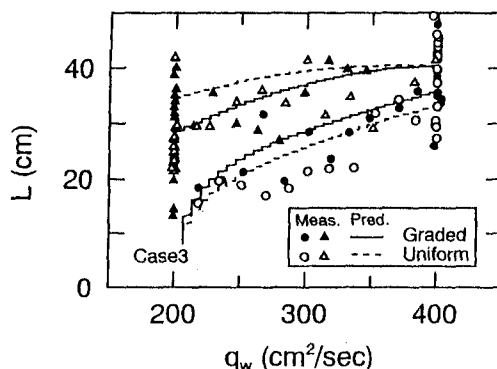


図-12 流量変化に対する波長の応答

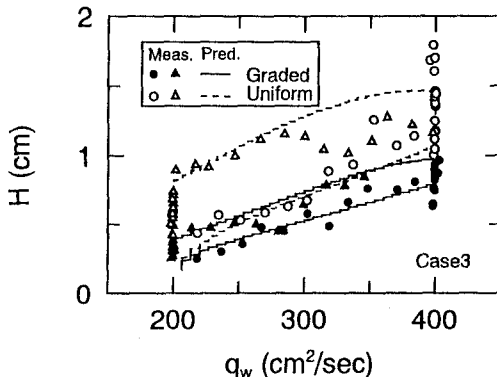


図-13 流量変化に対する波高の応答

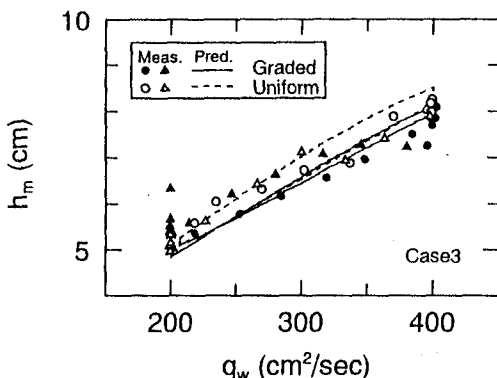


図-14 流量変化に対する水深の応答

6. 周期的流量変化に対する混合砂，一様砂河床の移動床系の応答性状

上述のように，河床砂に応じた流れ場の代表粒径を導入することによって流量変化に対する移動床系の非定常応答が混合砂，一様砂ともほぼ適切に予測できることがわかったので，周期的な流量変化に対する応答性状を混合砂と一様砂で比較・検討する。

流量波形は時間とともに直線的に増水と減水を繰り返す二等辺三角形形状のものを設定し，水路，路床勾配，河床材料および流量範囲は先の実験と同一とした。

図-15は流量変化の半周期 T_f を30分とした場合の流量変化に対する平坦河床からの波長，波高および水深の応答を示している。いずれも流量変化の回数が進むにつれて一定のループに近づく様子が見られ

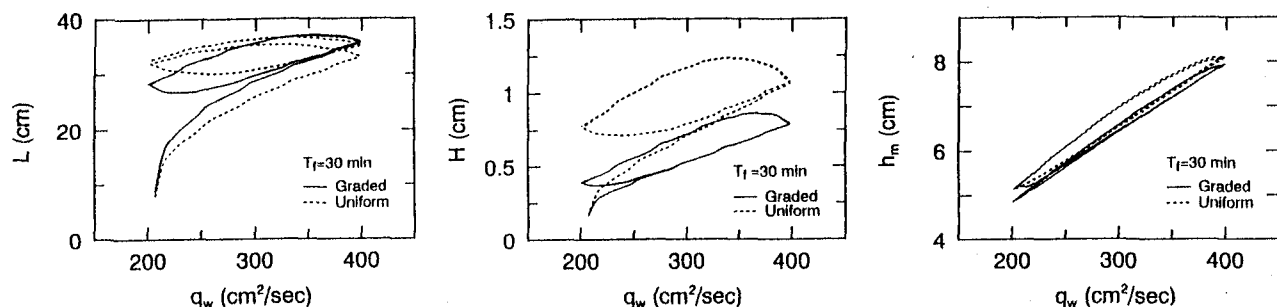


図-15 三角波状流量変動に対する移動床系の応答

るが、波長については混合砂は2周期目に定常ループとなっているのに対して一様砂ではそれ以上を要し、流れへの追随性に差があることがわかる。一方、波高については混合砂のループの幅は一様砂より小さくなっていると同時に、減水期において最大波高を生じる流量は混合砂の方が大きい。これは混合砂の方が波高の応答遅れが小さいことを示している。

7. 結 言

本研究は、非定常流れ場における河床波と流れ場の応答性状に関して、混合砂と一様砂を対比してその特性を明らかにするとともに、移動床系の応答予測を行ったものである。本研究によって得られた結果を以下に要約する。

(1) 流量が連続的に変化する流れ場では波長に関しては混合砂と一様砂で顕著な差異は認められないが、波高は混合砂の方が低く抑えられ、流量変化に対する履歴性も弱い。また、流量減少期の波長が漸減するのは残存河床波の埋め戻しと新たに発達する河床波との混在によるものであると考えられる。

(2) 混合砂に対しては、著者らが扱った粒度構成のもとでは平均粒径の2倍程度の粗砂を代表粒径として、これを等価砂粗度および平衡波形勾配の予測式に導入することによって、流量変化に対する移動床系の応答をおおむね予測し得ることを示した。

(3) 流量増減に対する波長、波高および水深の関係では、混合砂の方が一様砂よりもループの幅が小さく、これは波高および水深で顕著に現れる。また、応答遅れは混合砂の方が小さく、一様砂よりも流れの変化に追随し易い。

以上のように、本研究では混合砂河床における流量変化に伴う移動床系の応答性状と予測を試み、一様砂河床の場合と比較してその特性について検討した。しかし、流量減水時の波長の評価や流砂量の予測精度については不十分な点として残されている。また、lower regime領域からtransitionやupper regime領域に及ぶ条件下での検討は実河川を考える上で重要である。これらについては今後の課題としたい。

謝辞：本研究は文部省科学研究費（奨励研究(A)：課題番号08750638）の補助を受けて行われた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川博次, 辻本哲郎, 竹東正孝: 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, pp. 665-671, 1983.
- 2) 芦田和男, 中川 一, 加藤 均: 流量変化に伴う河床波の応答に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第25号B-2, pp. 473-491, 1982.
- 3) 澤井健二: 周期的流量変化に伴う河床波の応答に関する実験, 第29回水理講演会論文集, pp. 473-478, 1985.
- 4) 三輪 浩, 大同淳之: 河床粒子の分級と河床波の形成過程の相互作用に関する実験的研究, 水工学論文集, 第35巻, pp. 403-410, 1991.
- 5) Miwa, H. and Daido, A.: Sand wave development with sediment sorting, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.10, No.2, pp.39-50, 1992.
- 6) 三輪 浩, 大同淳之: 河床波の変形に及ぼす混合砂の分級効果, 水工学論文集, 第41巻, pp. 901-908, 1997.
- 7) 鈴木幸一, 道上正規: Dunesの波高およびそれに及ぼす混合砂礫の影響について, 第23回水理講演会論文集, pp. 151-156, 1979.
- 8) 大同淳之, 三輪 浩, 矢野定男: 河床波の平衡波高, 第50回土木学会年次学術講演会概要集II (A), pp. 490-941, 1995.
- 9) Meyer-Peter, E. and Müller, R.: Formulas for bed-load transport, *Proceedings of II Congress, IAHR*, pp.39-64, 1948.
- 10) 三輪 浩, 大同淳之: 河床波による流水抵抗と流砂量, 水工学論文集, 第36巻, pp. 123-130, 1992.
- 11) 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, 土木学会論文集, 第206号, pp. 59-69, 1972.
- 12) Yalin, M. S.: Geometrical properties of sand waves, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol.90, No.HY5, pp.105-119, 1964.
- 13) Yalin, M. S. and Karahan, E.: Steepness of sedimentary dunes, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol.105, No.HY4, pp.381-392, 1979.
- 14) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulent shear Flows*, Springer-Verlag, Vol.6, pp.313-337, 1988.
- 15) 三輪 浩, 大同淳之: 河床波上の流れの特性と流水抵抗の評価, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 第28号, pp. 99-106, 1993.
- 16) 三輪 浩, 大同淳之: 混合砂河床における河床波を有する移動床流れ場の抵抗評価と河床波の移動速度の算定法, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 第30号, pp. 55-61, 1995.

(1997. 9. 30受付)