

河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動計算法

○京都大学防災研究所 藤田 正治
 京都大学大学院 Jazaul IKHSAN
 ガジャマダ大学 Muhammad SULAIMAN

1. はじめに

河床材料の空隙率や空隙構造は河床内の浸透流や生物の生息場として重要である。河床変動計算が治水、利水の問題だけでなく、環境の問題を対象に行う必要があることを考えると、河床変動解析において空隙率や空隙構造の変化が解析できることが要求される。一般的に河床材料の空隙率は粒度分布や河床砂礫の移動現象の影響を受ける。しかし、砂礫の移動特性の影響を考慮することは難しいので、本研究では研究の第一歩として、粒度分布に依存して空隙率が変化するという考え方のもとに、空隙率の変化を考慮した河床変動の解析方法を提案する。

2. 解析モデル

(1) 基礎式

ここでは、従来の一次元河床変動計算法と異なる点について述べる。まず、流砂の連続式は空隙率が時空間的に変化するので式(1)の形式を用いなければならない。また、河床材料の粒度分布も式(2)のような粒径別流砂の連続式から解析される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z_0}^z (1-\lambda) dz + \frac{1}{B} \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_0}^z (1-\lambda) p_j dz + \frac{1}{B} \frac{\partial Q_{sj}}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここに、 λ : 空隙率, z : 河床位, z_0 : 基準河床位, Q_s : 全流砂量, B : 川幅, t : 時間, x : 流れ方向の距離, j : 粒径階, p_j : 河床材料中の粒径階 j の存在率, Q_{sj} : 粒径階 j の全流砂量である。これらの式の積分項を求めるためには、平野¹⁾が提案しているような最大粒径程度の厚みの層モデルを考える必要がある。

(2) 解析モデルの構成と特徴

本河床変動解析モデルは、空隙率を変数とおいた河床変動計算のモデルと河床材料の粒度分布の幾何形状から空隙率を算定するモデルからなる。式(1),(2)からわかるように河床変動量は流砂量の空間分布と空隙率の時間変動から算定され、粒度分布は河床高変化率、粒径別流砂量の空間分布および空隙率の時間変化率から計算される。空隙率の時空間的变化は粒度分布の時間変化と関係づけて計算するとともに、その結果を考慮しながら河床変動計算を行う。これまでの河床変動計算では空隙率を一定としているため、流砂量の場所的な不均衡があれば必ず河床変動が生じるが、本手法では流砂量の不均衡を空隙率の変化で吸収することで河床変動が生じないような解析も行える。

(3) 河床材料の粒度分布の分類

粒度分布の密度関数のピークが1つか複数かによってユニモダル分布とマルチモダル分布に分類されるが、本研究ではユニモダル分布を対象とする。ユニモダル分布の代表的な分布型には、密度関数が対数正規分布を呈する対数正規分布型、通過百分率分布がタルボット分布や反タルボット分布のタルボット分布型、反タルボット分布型がある。これらの分布型に分類するための指標として、Sulaimanら²⁾は次式を用いている。

$$\beta = \frac{\log d_{\max} - \log d_{\text{peak}}}{\log d_{\max} - \log d_{\min}} \quad (3) \quad \gamma = \frac{\log d_{\max} - \log d_{50}}{\log d_{\max} - \log d_{\min}} \quad (4)$$

式(3)および(4)は、密度関数のピークに対する粒径および50%粒径が最大粒径と最小粒径の間において相対的にどこに位置するかを表すものであり、対数正規分布の場合、 $\beta=0.5$, $\gamma=0.5$ となり、図-1に示す β - γ 空間 ($0<\beta<1$, $0<\gamma<1$) のPoint C にプロットされる。タルボット分布の場合、図中のLine-1 ($\beta=0$, $0<\gamma<0.5$)、反タルボット分布の場合、Line-2 ($\beta=1.0$, $0.5<\gamma<1.0$) 上にプロットされる。ユニモダル分布の指標値は幾何学的に図中のBorder-1および2に囲まれた領域に限定される。さて、3つのタイプへの分類は下記のように行う。まず、任

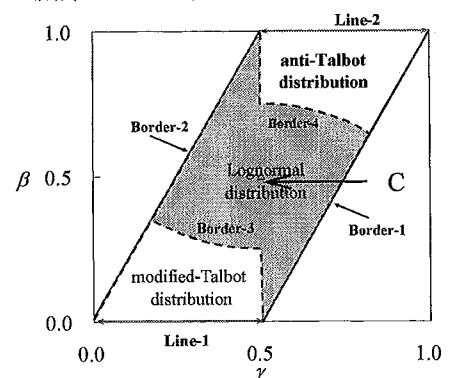


図-1 粒度分布型の領域区分

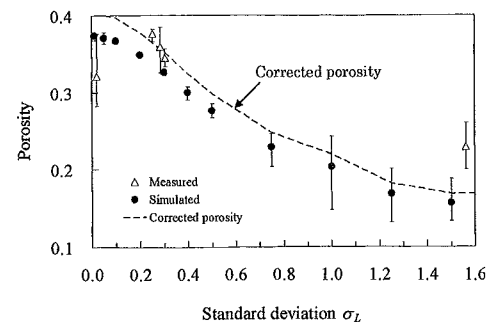


図-2 対数正規分布型の混合砂礫の空隙率

意の粒度分布の指標値の座標とPoint C, Line-1および2の距離を求め、どれに最も近いかを判定し、それぞれに対応する分布型に分類する。図-1はその結果得られた領域区分を示したものである。

(4) 空隙率の算定方法

異なる粒度分布型の混合砂礫は異なる空隙率を有し、同じ粒度分布型であっても分布形状の幾何パラメータによって空隙率は変化すると考えられる。空隙率は粒度分布の幾何学的特性パラメータの関数であると仮定する。たとえば、対数正規分布型では標準偏差 σ_L 、タルボット分布型では最大最小粒径比 d_{max}/d_{min} 、タルボット数 n^T が特性パラメータである。空隙率とこれらのパラメータの関係はすでに調べられており²⁾、図-2はその一例であり、対数正規分布型に対して、空隙率 λ と σ_L の関係を求めた結果を描点で示したものである。ただし、これらの解析では混合砂礫の締め固め度を制御して行われていない。そこで、粒度分布の標準偏差が0.1以下のとき混合砂は一様砂と判断し、そのときの空隙率は標準的に用いられている0.4と仮定し、解析で得られた幾何パラメータに対する空隙率の関係を一様砂のとき空隙率が0.4になるように平行移動する。図-2の点線はこの方法で得られた補正曲線であり、このような結果を河床変動計算に組み込む。なお、砂と礫の2粒径混合砂のときは、それぞれ一様砂の場合の空隙率と砂の混合割合から空隙率は解析的に求めることができる。

3. 解析例

(1) 2粒径分布に対する適用

長さ15m、勾配1/50の水路の下流端に5cmの堰を設け、粒径0.05cmと2cmの砂礫を用いて2つの場合を条件設定した。Case 2P-1では、砂30%、礫70%の混合砂礫を河床に敷き、給砂なしで給水する。Case 2P-2では、砂10%、礫90%の混合砂礫を河床に敷き、 $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の割合で給砂する。流量は $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、この流量では砂は移動するが、礫は移動しない。

図-3および4はCase 2P-1, 2P-2の河床表層材料の空隙率の変化を示したものである。Case 2P-1では初期河床の砂の割合は30%であるが、最終的にはすべての砂が河床表層から流出した。これに伴って、空隙率は0.17から0.4に増加している。Case 2P-2では河床の砂の割合10%から43%まで増加し、その結果、空隙率が0.33から0.22に減少している。このように、砂の堆積と侵食により河床表層の空隙率が増加するプロセスがよく説明できている。なお、空隙率の変化により両ケースとも河床変動はほとんどない。

(2) 連続した粒度分布に対する適用

(1)と同様の水路の下流端に砂止めを設置し、図-5に示す対数正規分布型の混合砂礫を河床に敷き、給砂なしで $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量を与える。図-5は水路中央部の河床表層の粒度分布の変化を示したもので、粗粒化に伴い粒度分布型がタルボット分布に変化する様子がわかる。初期の河床表層の空隙率は本モデルでは0.3と求められ、図-6はその時空間変化を示したものである。河床表層が粗粒化しタルボット分布型になるに従って、空隙率が増加していることがわかる。

4. おわりに

提示した河床変動計算モデルは礫床への砂の堆積による空隙率の時空間変化や混合砂礫河床からの砂の選択的流出による空隙率の増加が適切に計算された。今後、このような計算方法の妥当性の検証や、河床表面とその下層との砂粒子の交換や流砂履歴を考慮した空隙率の評価などについて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 平野宗夫: Armoringをとまなう河床低下について, 土木学会論文集, 第195号, pp.55-65, 1971.
- 2) Muhammad Sulaiman et. al.: Porosity of sediment mixtures with different type of grain size distribution, AJH E, JSCE, Vol.51, 23, 2007.
- 3) 堤大三郎: 混合砂礫河床の材料の空隙率に関するシミュレーションモデル, 水工学論文集, 第50巻, 171, pp.2006.

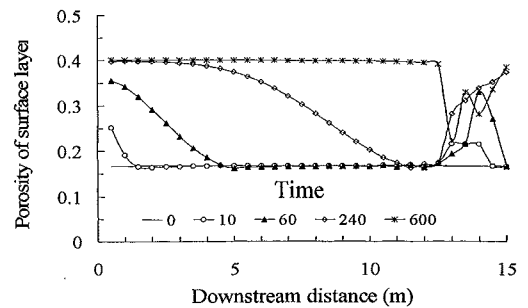


図-3 河床表層の空隙率 (Case 2p-1)

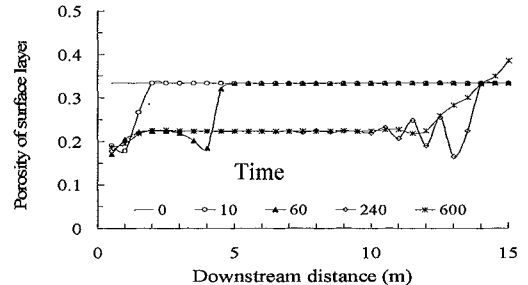


図-4 河床表層の空隙率 (Case 2p-2)

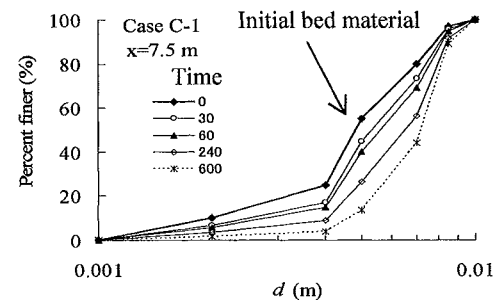


図-5 水路中央部の粒度分布の変化

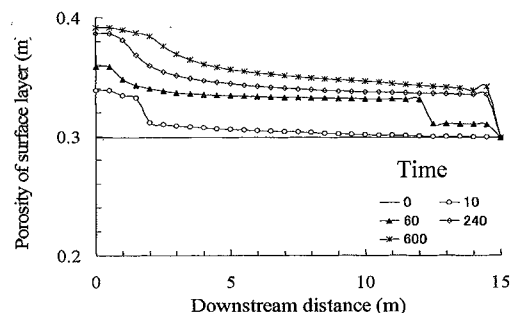


図-6 河床表層の空隙率の変化 (Case C-2)