

礫床河川における広い粒度分布をもつ河床材料の空隙率と土砂堆積高の解析法

五洋建設株式会社 正会員 ○立石彩乃
 広島大学 正会員 内田龍彦
 広島大学 正会員 河原能久

1. 背景と目的

現在行われている混合粒径河床変動解析¹⁾は空隙率を一定にして計算しており、礫床河川のように広い粒度分布を持つ混合粒径の河床変動量を適切に計算できない課題がある。本研究では礫床河川の河床変動解析法を開発する第一ステップとして、小さい粒子が大きな粒子の空隙を充填するとして河床材料の粒子充填モデルを開発し、検証することを目的とする。

2. 河床材料の充填モデル

本研究で用いる河床材料の充填モデルは以下のとおりである。大きな粒の空隙に小さな粒が充填すると考え、基本的な二粒径の充填モデルを検討する。二粒径の場合、空隙率は以下の式で求められる。

$$\lambda = 1 - P_c - P_f \quad (1)$$

ここに、 P_c, P_f :粗粒子と細粒子それぞれの空間存在比とした。二粒径粒子群を充填する際、細粒子は粗粒子極近傍の空間には存在できない。そこで、細粒子が粗粒子の空隙のうち進入可能な空隙率 λ_f を式(2)で表す。

$$\lambda_f = 1 - \alpha P_c \quad (2)$$

式(2)を用いると、最密充填時の P_f は $P_f = \lambda_f \lambda_{f0}$ と表現できる。ここに λ_{f0} は細粒子のみの場合の空隙率である。粒径比が大きくなるほど、細粒子は粗粒子が存在しない空隙に侵入できる割合が増加することを考慮して、式(1)の係数 α を式(3)のように粒径比を表すパラメータ γ と空隙の大きさの関数として表す。

$$\alpha = 1 + \frac{\lambda_c}{1 - \lambda_c} \gamma^n (1 - \beta)^m \quad (3)$$

λ_c :粗粒子のみの空隙比とする。式(3)に含まれる空隙の大きさと粒径比を表す β, γ はそれぞれ式(4), (5)のように仮定する。

$$\beta = (1 - \gamma) \left\{ 1 - \frac{P_c}{(1 - \lambda_c)} \right\} \quad (4)$$

$$\gamma = \min \left(a \frac{d_f}{d_c}, 1 \right) \quad (5)$$

λ_{f0} : 充填する細粒子の空隙比, d :粒径比, d_c, d_f :粗粒子と細粒子の粒径, a, m, n :任意定数とする。図-1に二粒径の球形粒子ランダム充填の実験結果²⁾と充填モデルの解析結果との比較を示す。実線が解析結果で点が実験結果である。 $n = 0.5, m = 1, n = 2$ とすることで、本モデルは二粒径の球粒子のランダム充填結果を再現できることが示された。次に、式(2)~(5)の二粒径充填モデルを、以下のように多粒径の場合に拡張する。

$$\lambda_i = 1 - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} P_j \quad (6)$$

$$\alpha_{ij} = 1 + \frac{\lambda_j}{1 - \lambda_j} \gamma_{ij}^n (1 - \beta_{ij})^m \quad (7)$$

$$\beta_{ij} = (1 - d_{ij}) \left\{ 1 - \frac{P_j}{\lambda_j (1 - \lambda_j)} \right\} \quad (8)$$

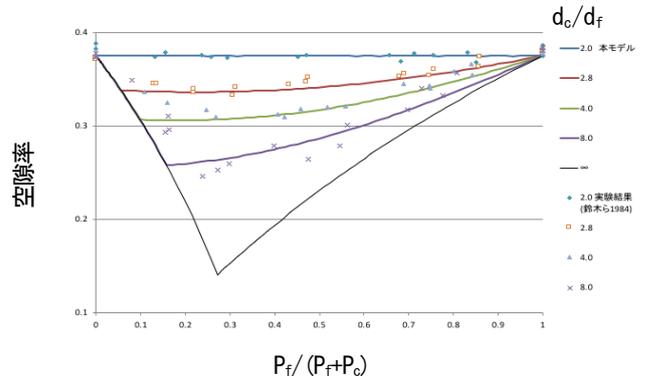


図-1 二粒径粒子群ランダム充填の解析値と既往の研究との比較。横軸粒径比, 縦軸空隙率。

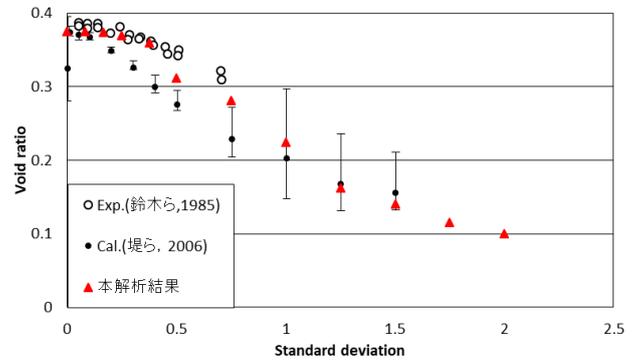


図-2 多粒径粒子群ランダム充填の解析値と既往の研究との比較

$$\gamma_{ij} = \min \left(a \frac{d_i}{d_j}, 1 \right) \quad (9)$$

ここで i 粒径 $< j$ 粒径で ij は j 粒径空間に充填可能な i 粒径である。全体の空隙率は式(1)と同様に、

$$\lambda = 1 - \sum_{i=1}^k P_i \quad (10)$$

と表せる。図-2に鈴木らの多粒径のランダム実験結果³⁾, 堤らの球状粒子を直接解析した解析結果⁴⁾との充填モデルの計算結果の比較を示す。以上より、本モデルは球形粒子群を用いた既往の研究結果を説明できるといえる。そこで、本モデルが実河川の河床材料に適用できるかを検証する。

3. 礫床河川の河床材料の粒度分布, 粒子形状と空隙率

実河川での河床材料として広島市根谷川で河床材料を採取した。採取した河床材料は篩分けをして粒度分布を調べた。又、粒径差をより正確に評価するために各篩目での体積換算粒径を計測した。さらに、粒子形状を評価するために長短度 $=b/a$, 扁平度 $=c/b^2$, シェイプファクター $F = \frac{c}{\sqrt{ab}}$ ⁶⁾, および間隙比を計測した。

4. 礫床河川の河床材料を用いた二粒径充填実験と検証

それぞれの粒径集団の場合と同様の方法で二粒径ずつ充填し充填実験を行った。ある粒子群(以下粗粒子)とその粒子群よりも小さい粒子群(以下細粒子)の割合を変え、粒径

キーワード 粒子充填モデル, 河床高, 空隙率, 粒径比, 混合粒径

連絡先 〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院工学研究科 社会基盤環境工学 専攻事務室

TEL : 082-424-7819

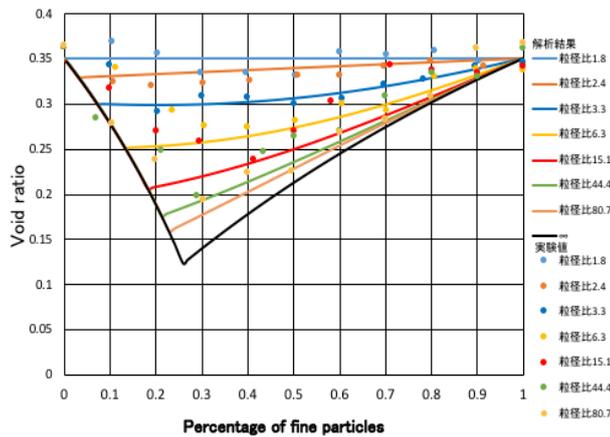


図-3 粗粒子径 58.36mm での実験値と計算値の比較

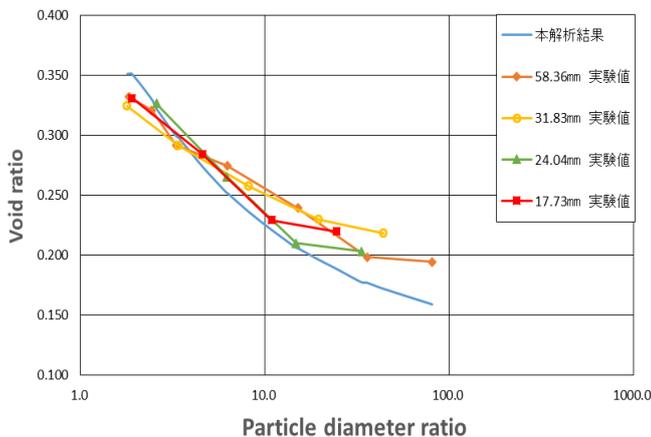


図-4 各粗粒子径での粒径比と最密間隙比の関係

比、粒子体積割合、空隙比の関係を調べた。図-3 に粗粒子 58.36 mm の場合の充填実験結果と充填モデルによる解析結果の比較を、図-4 に最密間隙比と粒径比の関係を示す。図-3 の充填モデルの解析値と実験結果では細粒子割合を変えると、間隙比も変化する傾向が同様に表せている。又、図-4 をみると粗粒子の大きさを変えた場合でも最密間隙比の値は充填モデルの解析値と実験値で概ね一致している。しかし、粒径比が大きくなると最密間隙比の値が一致しづらくなっている。これは、細粒子がより小さくなると粗粒子の間隙に充填した際により細粒子全体の表面積が大きくなるために、充填モデルの最密間隙比を実験で計測するのが難しいためであると考えられる。

5. 礫床河川の河床材料を用いた多粒径充填実験と検証

多粒径の最密充填間隙比の検証を行った。検証は2つ行った。1つ目の検証方法は任意の粒度分布に従って多粒径充填を行い測定した間隙比と、その粒度分布から求めた最密間隙比を比較する検証である。容器は縦 25.6cm、横 38.6cm、高さ 13.5cm のものを用いた。2つ目の検証方法は砂州から試料を採取し、質量を測り土粒子密度 2.6g/cm³ を用いて体積を算出した。次にその箇所ビニールを敷き水を入れ体積を測った。土粒子の体積と、水の体積から間隙比を算出した。水の密度は 1g/cm³ とした。この計測は3箇所で行った。1つ目の検証の測定結果と充填モデルによる解析結果及び、2つ目の検証の測定結果と充填モデルによる解析結果を図-5 に示す。

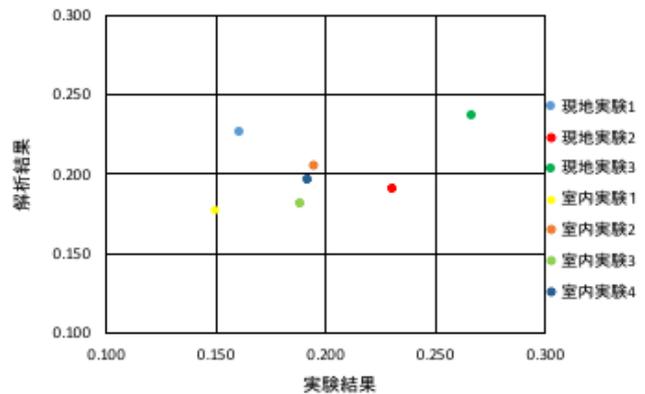


図-5 多粒径粒子群ランダム充填の解析値と実験値

1つ目の検証では二粒径の場合と同様に最密間隙比が小さければ小さいほど実験値とのずれが大きくなっている。これは粒度分布において全体の粒子群の中で粒径差が十分でない中間層の割合が大きいと、今回行った実験のような容器に充填する方法では早い段階で最密充填を取ってしまうためであると考えられる。2つ目の検証では解析結果と実験値は、概ね一致したといえる。1つ目の検証よりも解析結果と実験値の差が大きく出ているが、これは実験場所が砂州であったために最密充填を取っていなかったためであると考えられる。

6. 結論と今後の課題

本研究で開発した河床材料の充填モデルは、球形粒子群を用いた既往の研究結果を説明できた。又、実河川の河床材料を用いた二粒径の充填実験による検証と多粒径の充填実験による検証は共に充填モデルによる解析結果と実験値の値が概ね一致した。このことから、開発した粒子充填モデルは実河川の河床材料に適用できるといえる。

球状粒子と実河川の河床材料の形状の差が最密充填時の細粒子割合の差につながっていると考えられるが、実際にどれほど関係があるのか、又、充填モデルを補正できるのかを考えなければならない。さらに、この充填モデルを用いて混合粒径河床変動解析法を開発していく必要がある。

参考文献

- 1) 平野宗夫. "Armoring をともなう河床低下について." 土木学会論文報告集 1971.195 (1971): 55-65.
- 2) 鈴木道隆, et al. "3成分球形粒子ランダム充填層の空間率の推定." 化学工学論文集 10.6 (1984): 721-727.
- 3) 鈴木道隆, 市場久貴, 長谷川勇, & 大島敏男. (1985). 粒度分布のある多成分粒子ランダム充填層の空間率. 化学工学論文集, 11(4), 438-443.
- 4) 堤大三, 藤田正治, and Muhammad Sulaiman. "混合砂礫河床材料の空隙に関するシミュレーションモデル, 水工学論文集, 第 50 巻." (2006): 1021-1026.
- 5) 吉村優治; 小川正二. 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法. 土木学会論文集, 1993, 463: 95-103.
- 6) McNow, John S., and Jamil Malaika. "Effects of particle shape on settling velocity at low Reynolds numbers." *Eos, Transactions American Geophysical Union* 31.1 (1950): 74-82.