

礫河床の空隙率に関する基礎的研究

早稲田大学理工学部 正会員 関根 正人

早稲田大学大学院 学生会員 ○林 将宏

1. はじめに

関根ら¹⁾は礫床からのシルトの巻上げ・堆積を合理的に取り扱うため、礫・シルト充填河床モデルを提案している。このモデルでは、単一粒径の礫からなる河床に注目し、この礫の間隙を埋めるようにシルトが充填されているものと考えた。しかし、実際の河床を見ると、シルト等の微細土砂以外に二粒径以上の砂礫によって河床が構成されている、と捉える方が自然であり、たとえば大粒径の礫の間隙を小粒径の礫や砂が充填しその間隙をシルトなどが充填している、として河床を取り扱う方が理に適っている。そこで、本研究では、シルト以外の河床骨格が二粒径の礫により構成されるとし、この礫の混合比率に応じて河床の空隙率がどのように変化するか、に焦点を絞って検討を行うことにした。ここでは、礫を真球で近似できるものとして理論的考察ならびに実験を行っているが、この形状が実河川に見られるように明らかに真球からはずれている場合については、今後の検討課題として残されている。なお、二粒径の礫からなる河床の空隙率に関しては既に藤田ら²⁾による研究がある。

2. 礫の混合比率と空隙率の関係

大粒径と小粒径の礫（以下、それぞれを「大礫」・「小礫」と呼ぶ）からなる二粒径礫河床には、(a) 大礫が基本骨格を形成し、小礫がその隙間を埋めるように存在する状態と、(b) 主として小礫が骨格を形成し、大礫は其中に浮かぶように存在する状態、の2つが考えられる。このような河床の空隙率に関しては、大礫と小礫を合わせた全体積に占める小礫の体積の比率（以下、小礫含有率と呼ぶ） p_s を変数として、次のような関係を導くことができる。

大礫あるいは小礫のみからなる単一粒径河床の空隙率をそれぞれ λ_L 、 λ_S とすると、上記(a)の状態ではその大礫の空隙の一部に小礫が入り込んでいることになるため、全体の空隙率 λ は次のように表わすことができる。

$$\lambda = \lambda_L - \frac{p_s}{1 - p_s} \cdot (1 - \lambda_L) \quad (1)$$

一方、(a)と(b)の状態の境界における空隙率および小礫含有率を λ^* 、 p^* とすると、式(1)から

$$p^* = \frac{\lambda_L - \lambda^*}{1 - \lambda^*} \quad (2)$$

となり、 $0 \leq p_s \leq p^*$ の条件下で式(1)が成り立つことになる。さらに、(b)の状態については、その内部構造の局所的な空隙率が λ_S である部分と λ^* である部分とに分けて考えることができる。そこで、全体の空隙率 λ は、

$$\lambda = \frac{(\lambda^* - \lambda_S \cdot \lambda_L) + (\lambda_S - \lambda^*) \cdot p_s}{(1 - \lambda_L) - (\lambda_S - \lambda^*) \cdot (1 - p_s)}; \quad p^* < p_s \leq 1 \quad (3)$$

のように書き表わされる。よって、小礫の含有率と空隙率との関係は式(1)～(3)のように定式化されることになる。

3. 導かれた関係式の妥当性の検証

小礫含有率と空隙率との間の上記の関係式が妥当なものであることを確認するため、次のような実験を試みた。ここでは、礫に代わって鋼製の真球（元々は軸受けに用いられるもの）を用意し、直径16mmの鋼球を大礫、直径2mmあるいは1mmの鋼球を小礫として用いることにした。また、これらの鋼球を充填する容器として表-1に示したふたつのアクリル製容器を用いることにし、実際にいずれの容器を用いるかは全体の体積に応じて選定した。

実験ではまず、16mmの鋼球と2mm（または1mm）の鋼球を適当な質量だけ取り出し、これらを容器の中に投入しよく混合させる。鋼球の質量は小礫含有率の異なるデータが20個以上得られるように調整した。容器内に内蓋を落とし、鋼球の上面がほぼ水平となるように内蓋を押し付けて表面を整える。さらに、111.82 gの重りを内蓋上面より15 mmの高さから自由落下させることにより締め固めた。累計落下回数が0, 30, 80, 150, 220回となるごとに全体の体積を測定し、順番に $V_0, V_1, V_2, \dots$ としていく。 $V_n \geq V_{n-1}$ となった時点で締め固めが完了したとみなし、締め固め体積 $V_{min} = V_{n-1}$ とする。そして、大礫および小礫の質量から算出した両者の体積 V_L, V_S および締め固め体積 V_{min} から、小礫含有率と空隙率を算定した。

表-1 測定容器の内寸法（mm単位）

ケース No.	幅	奥行き	高さ
1	96.0	96.0	100.3
2	100.5	60.5	130.0

キーワード 空隙率、二粒径礫床、礫・シルト充填河床モデル

連絡先 〒169-8555 東京都新宿大久保3-4-1 TEL 03-5286-3401 FAX 03-5272-2915

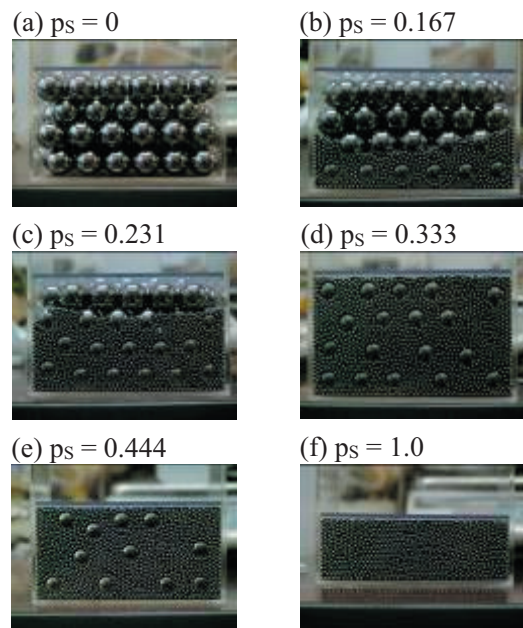


図-1 実験で観測された礫の詰まり方：
写真は小礫として直径2mmの鋼球を用いた時

表-2 推定された空隙率の値

粒径比	λ_L	λ^*	λ_S
8	0.450	0.227	0.359
16	0.449	0.200	0.370

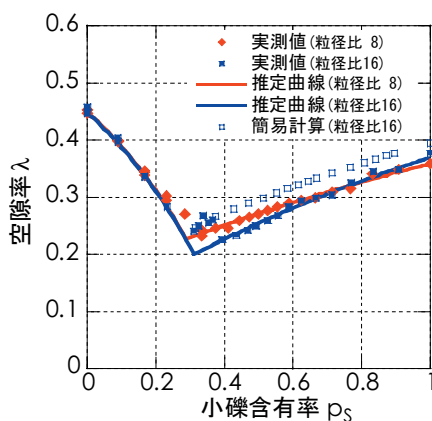


図-2 空隙率測定結果

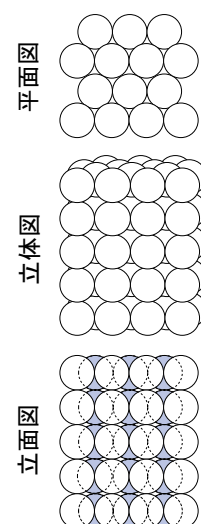


図-3 簡易計算で
想定した細礫の礫
構造

実験時に観察された礫の詰まり具合を図-1に示す。また、図-2には、粒径比（大礫の直径の小礫の直径に対する比）を変えて行った実験結果を示してある。小礫含有率が0.3～0.4の辺りで空隙率が最小値0.22程度となっていること、 $p_s = 0$ のときは空隙率が約0.45、 $p_s = 1$ では約0.36となっていることが読み取れる。なお、大礫として用いた直径16mmの鋼球の大きさが容器の大きさに対して過大であったため、 $p_s = 0$ での空隙率が過大評価されていることを考慮する必要がある。この点に関しては今後検討していく必要がある。さて、この実験の結果を踏まえて式(1)～(3)中に含まれるパラメータ λ_L 、 λ^* 、 λ_S の値を表-2のように推定し、これらを代入することで描いた関係を図-2に実線で示した。式(1)～(3)の関係は実験結果とよく一致しており、 λ_L 、 λ^* 、 λ_S の値さえ正確に設定できれば、本研究で導いた関係式によって礫間の空隙を簡易に評価できることが確認された。

4. 簡易計算による空隙率の算定

堤ら³⁾は、仮想容器内に粒子をひとつずつ充填していき、空隙率を算定するシミュレーションモデルを開発している。本研究では、大礫あるいは小礫のみからなる単一粒径河床の礫の骨格構造を仮定することで、両者が混合した状態における空隙率を簡易的に算定する手法を開発した。まず、大礫を包含できる適当な大きさの正六角柱を考え、その中に小礫が図-3に示すような礫構造で積み上がっているものと仮定する。図-3のような礫構造を選定した根拠は、この場合の空隙率が約0.395であり、3.で説明した小礫のみによる河床の空隙率の値0.36に近いためである。この小礫全てに対して座標を与え、六角柱の中心点からの距離 r を算出する。いま、この六角柱の中心点に大礫を配置させることを考えた場合、 $r \geq (D_L + D_S)/2$ （ D_L ：大礫の直径、 D_S ：小礫の直径）であればその小礫は大礫と重ならず、 $r < (D_L + D_S)/2$ であればその小礫は大礫と重なりと判定できる。重なりと判定された小礫を排除し、できた空間に大礫を配置することで両者の混合状態が設定でき、それぞれの個数から小礫比率と空隙率が算定できる。

計算の結果は図-2に併記したとおりである。 $p_s = 1$ のときの空隙率を実験結果のそれより大きく設定したため、全体的に計算結果が大きめの値となっているが、傾向としては概ね一致することがわかる。従って、このような計算を行うことで前述の3つのパラメータを定められれば、実測によらずに空隙率の値を評価することができる。

5. おわりに

今後は河床を構成する砂礫が実際に近い非球形である場合について検討を行うとともに、こうした成果を活かして前述の礫・シルト充填河床モデルを汎用性の高いものに拡張していく予定である。

参考文献 1) 関根正人, 矢島英明: 礫・シルト充填河床モデルを用いた植生を伴う流路の変動解析, 水工学論文集, 第49巻, 991-996, 2005. 2) 藤田正治, 堤大三, 藤本誠: 混合砂礫の空隙率と河床変動に伴う空隙率の変化, 土木学会第60回年次学術講演会概要書, 173-174, 2005. 3) 堤大三, 藤田正治, 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, 1021-1026, 2006.