

幅広い粒度分布を持つ土砂の空隙率の算定法とその検討

広島大学 学生会員 ○橋本 光生
 広島大学 正会員 内田 龍彦

1. 目的

多くのダムや砂防施設は建設から長い年月が経過し、近年増加しているゲリラ豪雨や降雨時間の長い大雨により、その容量を超え、砂の捕捉率が低下している。捕捉できない土砂は下流に流出し土砂・洪水氾濫の原因となっている。また、砂を多量に捕捉するダムや砂防施設を新たに建設することは下流河川の河床材料の粗粒化、河床低下、河岸侵食など河川環境に悪影響を及ぼす可能性がある。このため砂防・河川計画における流入する土砂量の明確化のために土砂の空隙率を適切に評価する必要がある。林ら¹⁾は土砂が流れの分級作用によって体積を変えることを示しており粒度分布と空隙率の関係を評価することは非常に重要である。土砂の空隙率には粒度標準偏差を用いたアプローチが多くなされている²⁾。しかし、これらは検討している粒度分布の幅が狭いことや粒度分布に対数正規分布を仮定しており、粒度分布の形の影響を評価できる手法とはいえない。林ら³⁾は、幅広い粒度分布を持つ土砂の空隙率を計算するオイラー型の混合粒径充填モデルの改良を行なったが、二粒径から多粒径への拡張の仮定についての検証が十分でなかった。本研究は二粒径において数値解と解析解の違いを明らかにし、多粒径における粗粒子の影響を再評価することと、粒度分布の形が空隙率の評価に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 二粒径土砂充填問題の再考

本手法では粗粒子がつくる空隙に対し、細粒子が入れる空間を評価しそこに一様に充填することを考える。二粒径の解析値の空隙率 λ は以下の式(1)~(5)を用いて算出できる⁴⁾。

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

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

$$\alpha = 1 + \frac{\lambda_0}{1 - \lambda_0} \gamma^{C_2} (1 - \beta)^{C_1} \quad (3)$$

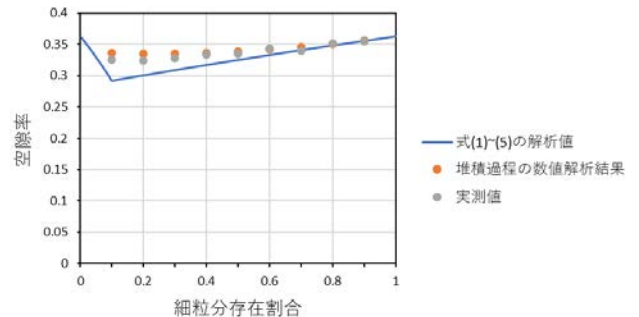


Fig. 1 Porosity for $d_c/d_f=2.5$

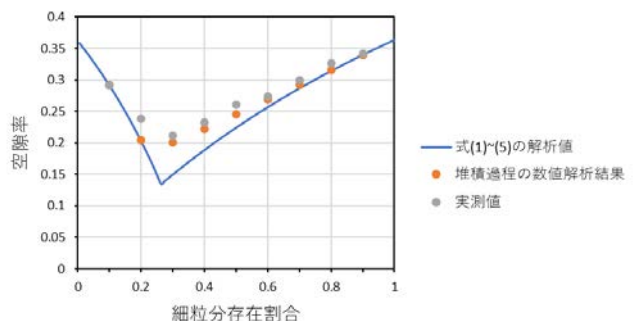


Fig. 2 Porosity for $d_c/d_f=38.4$

$$\beta = (1 - \gamma) \left(1 - \frac{P_c}{1 - \lambda_0} \right) \quad (4)$$

$$\gamma = \min \left(C_3 \frac{d_f}{d_c}, 1 \right) \quad (5)$$

ここで、 P_c, P_f :粗粒子、細粒子の存在率、 λ_f :細粒子の充填可能な空間、 λ_0 :一様粒径の空隙率、 d_c, d_f :粗粒子と細粒子の粒径、 $C_1=2, C_2=1, C_3=0.5$:任意定数である。本手法では多粒径の土砂に対しこれらの式はこのモデルにおいて使われていたが粗粒子の多い Coarse packing 状態において、適切に空隙率を評価できているとはいえない課題があった。そのため本研究では微量の土砂を堆積させる二粒径の数値計算を行なう。ここでは2パターンで行い Uchida ら⁴⁾の二粒径充填実験で粗粒子粒径が 58.36mm、細粒子粒径が 22.93mm、1.52mm のものと比較した。

キーワード 空隙率, 多粒径, 粒度分布

連絡先 〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1 広島大学工学部

TEL 082-424-7847

その結果を Fig.1, Fig.2 に示す. 堆積過程の数値解析結果は細粒分の多い Fine:packing 状態もより適切に評価できることを示した.

3. 混合粒径土砂への適用

多粒径の式は二粒径の式を粒径の大きい順番で計算することを仮定し, 以下の式(6)~(10)に表す

$$\lambda = 1 - \sum_{i=1}^k P_i \tag{6}$$

$$\lambda_i = 1 - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} P_j \tag{7}$$

$$\alpha_{ij} = 1 + \frac{\lambda_0}{1 - \lambda_0} \gamma_{ij}^{C_1} (1 - \beta_{ij})^{C_2} \tag{8}$$

$$\beta_{ij} = (1 - \gamma_{ij}) \left\{ 1 - \frac{P_j}{(1 - \lambda_0)\lambda_j} \right\} \tag{9}$$

$$\gamma_{ij} = \min \left(C_3 \frac{d_i}{d_j}, 1 \right) \tag{10}$$

ここで, 式(9)で定義される β は粗粒子がどれだけ空間に充填しているかを考慮するものである. 粗粒子より大きな粒子が充填している空間を省くために式(9)に λ_j が導入された³⁾が, 既往のモデルではこの項の検討が十分でなかった. 平成30年7月豪雨で発生した広島県矢野川における土石流の土砂の場合⁴⁾と本研究で採取した令和3年8月に発生した安佐南区山本における土砂で計算し, λ_j 項を導入したときとしていないときの結果と人工最密した時の空隙率を Table1 に示す. 人工最密充填について, 乾燥させた土砂を微量ずつアクリルケースの中に入れて棒突き充填を行った. 空隙率は乾燥体積を用いて算出した. 解析値は β 項に λ_j 項を導入することによって人工最密充填の空隙率により近くなることを示した.

4. ひずみ度を用いた粒度分布の評価と空隙率

本研究では, 対数粒度分布の形に着目し, その粒度分布形をひずみ度(三次モーメント)を用いて空隙率の解析値と人工最密空隙率の誤差を評価した. ひずみ度 S の式を(11), (12)に示し, その結果を Fig.3 に示す. ひずみ度が負のとき解析値は人工最密空隙率より小さく算出し, 正のときは大きく算出する傾向がある.

$$\log_{10} \bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^k V_i \log_{10} d_i}{V_d} \tag{11}$$

Table 1 The effect of λ_j on porosity prediction

		解析空隙率	λ_j なし	最密空隙率	ひずみ度
矢野川 No.1	表層	0.154	0.138	0.138	0.0298
	堆積層	0.151	0.129	0.159	-0.0768
No.2	表層	0.127	0.110	0.153	-0.0806
	堆積層	0.133	0.099	0.139	-0.209
No.3	表層	0.097	0.081	0.090	-0.519
	堆積層	0.085	0.069	0.101	-0.904
安佐南区	No1堆積層	0.180	0.173	0.152	0.208
山本	No2	0.179	0.155	0.205	-0.298

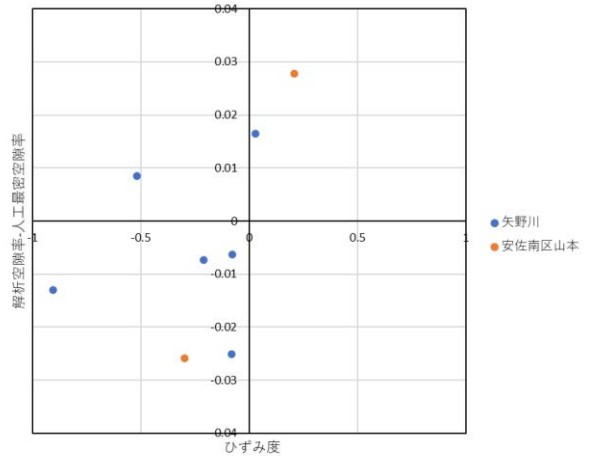


Fig. 3 Relationship between calculation error and the skewness of grain size distribution

$$S = \frac{\frac{1}{V_d} \sum_{i=1}^k \{V_i (\log_{10} d_i - \log_{10} \bar{d})^3\}}{\left[\frac{1}{V_d} \sum_{i=1}^k \{V_i (\log_{10} d_i - \log_{10} \bar{d})^2\} \right]^{\frac{3}{2}}} \tag{12}$$

5. 結論と今後の課題

微量の土砂を堆積させる数値計算によって二粒径の人工最密充填の空隙率を適切に表せることが示された. 多粒径の人工最密充填においては β を λ_j で補正することでより適切に空隙率を評価できることが分かった. さらに, ひずみ度の正負によって解析値が誤差を出す方向が示された. しかし, ひずみ度では自然堆積状態の土砂と解析値の誤差を説明するまでには至らなかった. 解析値と自然堆積状態の関係を示すような指標が必要である.

参考文献

- 1) 林ら: 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.75(2),: I_913-I_918,:2019.
- 2) 藤田ら: 河川技術論文集, Vol.14,pp.13-18,:2008.
- 3) 林ら: 河川技術論文集, Vol27, 2021.
- 4) Uchida:et:al.:J:Hydraul:Eng,:146(10),:2020