

沙粒形状对泥沙干密度影响初探

舒彩文 詹义正 谈广鸣 李 莫

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室 湖北 武汉 430072)

摘要 在建立分析模式的基础上 , 采用一种新的方法建立了均匀沙理论干密度的计算公式 , 并引进形状指数 , 讨论了沙粒形状对泥沙干密度的影响 . 指出泥沙颗粒形状对泥沙干密度有较大影响 , 即泥沙的粒径愈细 , 形状愈扁平或愈长圆 , 其干密度就愈小 , 反之干密度就愈大 .

关键词 均匀沙 ; 干密度 ; 形状指数 ; 颗粒形状

中图分类号 : TV141⁺ . 1 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-7647(2005)04-0022-04

Influence of sand grain shapes on dry density of sediment // SHU Cai-wen , ZHAN Yi-zheng , TAN Guang-ming , LI Mo (State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science , Wuhan University , Wuhan 430072 , China)

Abstract : A formula was derived to calculate the dry density of uniform sand with a new method based on establishment of an analysis mode , and the effect of sand grain shape on the dry density of sediment was discussed by introduction of the form index . It is concluded that the shape of sand grains is of great influences on the dry density of sediment . The finer or the more prolate the sand grains are , the lower the dry density of the sediment , and vice versa .

Key words : uniform sand ; dry density ; form index ; grain shape

泥沙干密度是确定泥沙冲淤量与体积关系的一个重要参数 , 在泥沙研究及实际工程中有着广泛的应用 . 干密度取值准确与否直接影响到计算结果的精度 . 若处理不当甚至会导致整个研究问题的失真 . 对于群体泥沙 , 颗粒与颗粒之间存在孔隙 , 故泥沙的干密度一般小于个体颗粒的密度 . 随着时间的推移 , 淤积泥沙受负重 (自然状况下 , 负重指沉积物上覆沉积物的重量) 、堆放环境等因素的影响将不断密实 , 干密度也不断增大 , 最终接近其极限值 . 实际观测资料表明 , 泥沙干密度的变化范围很大 , 为 $48.2 \sim 2240 \text{ kg/m}^3$ ^[1~4] .

已有的研究成果表明 , 负重、粒径、淤积历时、渗透率、含气以及细颗粒泥沙的化学成分等是影响泥沙干密度的主要因素^[5,6] . 例如随着粒径或埋藏深度的减小 , 泥沙干密度同样也在减小^[3] , 淤积泥沙干密度随埋藏深度增加而增加^[3,5] . 除上述影响因素外 , 沙粒形状及其表面光洁度、沙粒不均匀程度、粒子排列方式、薄膜水、结合水以及絮凝结构等也是影响泥沙干密度的重要因素 . 显然 , 泥沙粒径愈细 , 泥沙干密度变化幅度愈大的原因 , 并不完全是因为粒径的大小 , 而必须考虑颗粒形状因素才能得以更好解释 . 这正是本文所要力图阐明的问

1 分析模式的建立

泥沙干密度表示单位体积沙样干燥后的质量 , 其单位可取 g/cm^3 , kg/m^3 , t/m^3 等 , 它是泥沙颗粒群体的一种性质 .

众所周知 , 天然沙组成粒径大小不一 , 排列方式也千差万别 , 要逐一进行讨论是不现实的 . 选择既有代表性又方便数学处理的均一、密排、有序颗粒来分析可将问题简单化 . 就排列方式来说 , 因考虑到问题的复杂性 , 暂不讨论在 3 个方向上交错^[7] , 故以下的讨论仅限于 3 种极具代表性的排列方式 : ①一重二错 ; ②二重一错 ; ③无交错 (图 1) . 为了便于理解 , 以下考虑球态和非球态两种模式来讨论 .

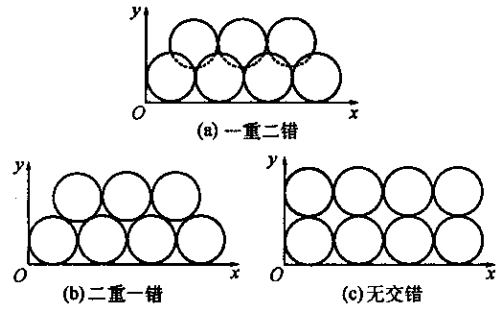


图 1 天然沙排列方式

1.1 球态模式

目前影响泥沙干密度的因素主要考虑淤积物粒径分布、中值粒径、淤积历时和埋藏深度。常见的方法是先将泥沙颗粒形状按圆球状或类圆球体状(采用等容粒径)处理,再按有序排列方式并结合实际经验给出计算淤积泥沙干密度的计算公式,最后根据实际资料对计算公式进行修正^[4,6],有一定的实用价值。

下面以球态模式为例用一种新的方法讨论不同排列方式对泥沙干密度的影响。

泥沙颗粒按一重二错排列时,对于密实球态粒子,单层泥沙的高度应为

$$h = \frac{\sqrt{2}}{2}(d + 2\delta) \tag{1}$$

式中: d 为泥沙中值粒径; δ 为薄膜水厚度。

单颗泥沙的质量为 $\frac{\pi}{6}d^3\rho_s$ (ρ_s 为泥沙颗粒的密度)。由泥沙干密度 ρ' 定义可得

$$\frac{\rho'}{\rho_s} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}}\left(\frac{d}{d+2\delta}\right)^3 = 0.7406\left(\frac{d}{d+2\delta}\right)^3 \tag{2}$$

同理可推导出二重一错、无交错情况下的泥沙干密度理论公式分别为

$$\frac{\rho'}{\rho_s} = \frac{\pi}{3\sqrt{3}}\left(\frac{d}{d+2\delta}\right)^3 = 0.6046\left(\frac{d}{d+2\delta}\right)^3 \tag{3}$$

$$\frac{\rho'}{\rho_s} = \frac{\pi}{6}\left(\frac{d}{d+2\delta}\right)^3 = 0.5236\left(\frac{d}{d+2\delta}\right)^3 \tag{4}$$

比较式(2)~(4)不难看出不同的排列方式对应不同的 ρ' 。对于有交错排列,排列系数均较文献[4]中推导所得公式(以下简称韩其为公式)中的排列系数(0.525)要大。而一重二错排列相当于最密实的泥沙干密度,且对于粗颗粒球态粒子,若不考虑薄膜水作用,泥沙的最密实干密度与 ρ_s 的比值为一定值(约为0.74,比韩其为公式约0.7要大)。

在泥沙稳定孔隙率 $\epsilon = 0.4$ 的情况下,根据三相图原理同样可得淤积泥沙相对稳定干密度为

$$\rho' = \frac{V(1-\epsilon)\rho_s}{V} \text{ 或 } \frac{\rho'}{\rho_s} = 1 - \epsilon = 0.6 \tag{5}$$

由式(3)和式(5)可见,球态模式按二重一错排列所计算的干密度即可近似作为泥沙稳定干密度。

而对于无交错,显然该系数与韩其为公式中的系数相当。这也正是韩其为公式考虑的模式。在文献[4]中曾用室内观测资料和克拉斯克资料对韩其为公式进行过验证,证明了该公式用于计算细颗粒淤积泥沙初期干密度效果较好,但也存在一定的缺陷。

为了说明韩其为公式存在的缺陷,笔者对前人根据我国官厅水库、塘沽新港、大浦闸、射阳河挡潮闸、黄河河床、新洋河新淤尖闸等6处资料绘制的淤

积泥沙干密度与中值粒径的关系曲线(图2)^[3]进行了延长(虚线),对于 $d \leq 0.002 \text{ mm}$ 部分按曲线走势延长,对于 $d \geq 0.1 \text{ mm}$ 部分按上包线、下包线在无穷远处必重合来延长,当 $d = 1.0 \text{ mm}$ 时,按一般最密实时的泥沙干密度(约 1810 kg/m^3)取用。

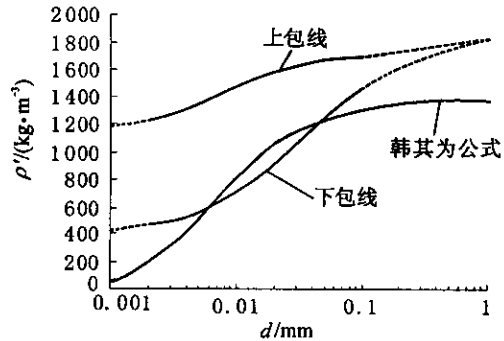


图2 淤积泥沙干密度与中值粒径的关系

从图2中不难看出,对 $d \leq 0.006 \text{ mm}$ 及 $d \geq 0.05 \text{ mm}$,由韩其为公式计算的干密度都将在下包线之下,说明该公式的系数取值偏小。主要原因在于淤积泥沙初始干密度值应该是相对稳定后的干密度值,而不是像Trask试验取浑限临界状态时的干密度值^[1],初始淤积泥沙应有一定的密实度,即应该处于二重一错与无交错之间。引入权重因子 φ ($0 \leq \varphi \leq 1.0$)取用系数 $\left[\frac{\pi}{6}\varphi + \frac{\pi}{3\sqrt{3}}(1-\varphi)\right]$ 即

$$\frac{\rho'}{\rho_s} = (0.6046 - 0.081\varphi)\left(\frac{d}{d+2\delta}\right)^3 \tag{6}$$

计算初始干密度将更为合理, φ 根据实际情况取用。另外,对于粒径较大(韩其为等认为 $d \geq 1.0 \text{ mm}$ ^[4,6];张耀哲等认为 $d \geq 0.5 \text{ mm}$ ^[1])的泥沙,其一旦淤积,干密度值会很快达到稳定值,但不同地点的淤积泥沙受负重、周围环境、渗透率等因素的影响不一样,导致其密实度、稳定度不一样,排列系数的取值也将存在差异。为了既可以反映差异,又可以统一公式,同前也引入权重因子 θ ($0 \leq \theta \leq 1.0$),将稳定干密度的公式表示为

$$\frac{\rho'}{\rho_s} = \left[\frac{\pi}{3\sqrt{2}}\theta + \frac{\pi}{3\sqrt{3}}(1-\theta)\right]\left(\frac{d}{d+2\delta}\right)^3 = (0.6046 + 0.136\theta)\left(\frac{d}{d+2\delta}\right)^3 \tag{7}$$

将更为合理, θ 根据实际情况取定。

从上述讨论可以看出,排列系数实际上反映着泥沙颗粒的松紧程度,故式(6)和式(7)中的排列系数是孔隙率 ϵ 的函数,可用 ϵ 来表示,令为 $f(\epsilon)$ 。设淤积泥沙孔隙所占体积为 ϵ ,则淤积泥沙所占体积为 $f(\epsilon) = 1 - \epsilon$,于是式(6)和式(7)可以综合表示为

$$\frac{\rho'}{\rho_s} = (1 - \epsilon)\left(\frac{d}{d+2\delta}\right)^3 \tag{8}$$

1.2 非球态模式

上述推导是针对球态粒子进行的,但众所周知细颗粒泥沙的形状各式各样,除圆球状外,有椭球状的、片状的,有的无尖角和棱线,有的尖角和棱线都比较明显,也有的棱角峥嵘,外形十分复杂,而远非人们常认为的圆球状或类圆球体状.现有的计算细颗粒泥沙干密度的经验或半经验公式,多以圆球或类圆球状描述沙粒形态,故或多或少存在一定的局限性,在同一条件下计算淤积泥沙干密度值可能相差较大,尤其是用于多呈片状、棒状细颗粒泥沙的计算.考虑到大量沙粒形状与椭球状有一定的联系,以均匀椭球状来进行讨论将极具代表性.

椭球体因有3个长短不一的轴,排列方式比球体复杂,为方便数学处理,仿照球态粒子的推导方式,考虑3种不同且具代表性的排列方式对均匀椭球体进行研究,研究发现,与球体比较,相同的排列方式对应相同的排列系数,所不同的只是后面的含参数项.以 $f(\epsilon)$ 来表示排列系数,则

$$\frac{\rho'}{\rho_s} = f(\epsilon) \frac{1}{\left(1 + \frac{2\delta}{a}\right)\left(1 + \frac{2\delta}{b}\right)\left(1 + \frac{2\delta}{c}\right)} \quad (9)$$

式中 a, b, c 分别为椭球态粒子3个轴的直径.

将式(9)与式(2),式(3)和式(4)比较不难看出相对于球态粒子,椭球态粒子因有3个轴,故其形状对干密度的影响将更为复杂.为方便处理,下面将通过比较同排列均匀椭球体泥沙与均匀球体泥沙的理论稳定干密度来阐明沙粒形状对泥沙干密度的影响.

2 沙粒形状对泥沙干密度影响分析

考虑等容粒径关系,有 $d = \sqrt[3]{abc}$,椭球态粒子与其等容球态粒子干密度(按相同的排列方式排列以消除排列系数的影响)的比值 B 为

$$B = \frac{\left(1 + \frac{2\delta}{d}\right)^3}{\left(1 + \frac{2\delta}{a}\right)\left(1 + \frac{2\delta}{b}\right)\left(1 + \frac{2\delta}{c}\right)} \quad (10)$$

考虑旋转体,引进形状指数 $k^{[8]}$,并令 $a = b = kd(k > 0)$,由等容关系 $abc = d^3$,可得 $c = \frac{1}{k^2}d$,代入式(10)得

$$B = \frac{\left(1 + \frac{2\delta}{d}\right)^3}{\left(1 + \frac{2\delta}{kd}\right)^2\left(1 + \frac{2k^2\delta}{d}\right)} \quad (11)$$

显然当 $k = 1$ 时,式(11)仅为球态粒子间的干密度之比,此时 $B = 1$.只有当 $k \neq 1$ 时,才是椭球态粒子与其等容球态粒子干密度之比,以下分两种情况讨论.

a. 对于 $k > 1$ 情况,此时 c 为短轴,粒子为盘状椭球体,对分子作如下处理可得

$$B = \frac{\left(1 + \frac{2\delta}{d}\right)^3}{\left(1 + \frac{2\delta}{kd}\right)^2\left(1 + \frac{2k^2\delta}{d}\right)} < \frac{\left(1 + \frac{2\delta}{d}\right)^2\left(1 + \frac{2k^2\delta}{d}\right)}{\left(1 + \frac{2\delta}{kd}\right)^2\left(1 + \frac{2k^2\delta}{d}\right)} = \left(\frac{1 + \frac{2\delta}{d}}{1 + \frac{2\delta}{kd}}\right)^2 < 1 \quad (12)$$

b. 对于 $k < 1$ 情况,此时 c 为长轴,粒子为棒状椭球体,若对分子作另一途径处理同样可得 $B < 1$.故只要 $k \neq 1$,其比值 $B < 1$ 恒成立.将式(11)两边对 k 或者 k 求导数并令 $B' = 0$,同样可得上述结果.

这说明按有序排列的均匀椭球态粒子干密度恒小于等容球态粒子干密度,即沙粒形状对干密度有影响.

另外,一般说来,当泥沙粒径大到一定程度时,泥沙的形状系数通常可表示为 $\frac{c}{\sqrt{ab}}$,对于天然沙,形状系数 $\frac{c}{\sqrt{ab}} \approx \frac{1}{0.7}$,则 $\frac{c}{a} = \frac{d/k^2}{kd} = \frac{1}{k^3} = \frac{1}{0.7}$,即 $k = 0.8879$.对于 $d = 0.01 \text{ mm}$, $\delta = 0.0008 \text{ mm}$,可得 $B = 0.99$,这时可近似把粒子看成等容的球态粒子,故现有的计算淤积泥沙干密度的公式有其使用价值.

对于细颗粒泥沙而言,其形状多为片状,此时有 $a > c$,若令轴比 $J = \frac{a}{c}$,可得到 $J = k^3$.一般情况下细颗粒泥沙的轴比远大于10,这说明细颗粒泥沙的 $k > 2.15$.对于 $d = 0.001 \text{ mm}$, $\delta = 0.0008 \text{ mm}$, $k = 2.15$,可得 $B = 0.688$,与1.0相差较大.故对细颗粒泥沙而言沙粒形状对干密度不仅有影响,而且影响较大.

为了描述沙粒形状对淤积泥沙干密度的影响,结合式(7)和式(11)点绘了不同形状指数时淤积泥沙干密度与中值粒径的关系图(图3).从图3中可以看出,当 k 不变时,泥沙的中值粒径愈大,其干密度愈大,考虑不同 k 时,随着中值粒径的增加,泥沙

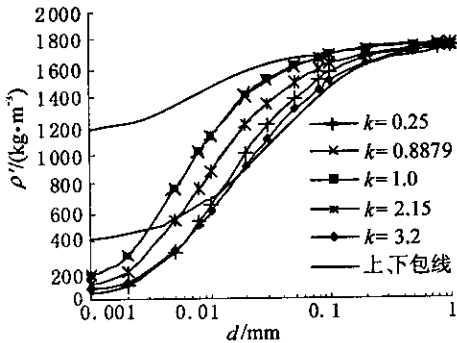


图3 不同 k 时 ρ' 与 d 的关系($\theta = 0.5, \delta = 0.0008 \text{ mm}$)

干密度的变化幅度是先增大后变小,当中值粒径接近 1.0 mm 时变化将不明显;而在同一中值粒径下,无论 k 取何值($k \neq 1.0$)其所对应的曲线均在 $k = 1.0$ (球态粒子)所对应的曲线下方,且 k 愈接近 1.0,所对应的曲线愈接近球态粒子($k = 1.0$)所对应的曲线.为了更好地说明沙粒形状对泥沙干密度的影响,同时点绘了同一中值粒径下的淤积泥沙干密度与形状指数的关系图,见图 4.

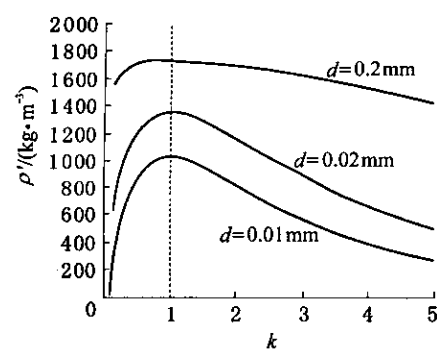


图 4 同一中值粒径时 ρ' 与 k 的关系
($\theta = 0.5, \delta = 0.0008\text{mm}$)

从图 4 中可以看出,在同一中值粒径时,随着 k 的增大,淤积泥沙干密度是先增大,达一最大值(此时 $k = 1.0$)后减小,且 k 愈靠近 1.0,干密度越大; $k < 1$ 时,曲线较陡,说明干密度对 k 变化较 $k > 1$ 敏感,反映棒状椭球体对干密度影响更敏感.

值得说明的是,对于 $d \geq 1.0\text{mm}$ 的颗粒,形状对泥沙干密度的影响将表现在排列方式上,对于棒状椭球体表现在长轴与长轴之间的夹角;对于盘状椭球体表现在其最大投影面的方位角与倾角等;对于粒径非常小的颗粒其干密度还与极限浓度、蜂窝状结构、颗粒矿物组成及物理化学性质等密切相关.这些都有待进一步的研究.

以上分析仅就均匀泥沙,且按有序情况排列.对于非均匀沙无序排列情况,仍需进一步研究.从以上分析可见,沙粒形状对泥沙干密度的影响是较大的.

3 主要结论

a. 不同排列方式对泥沙干密度有较大影响,考虑不同排列方式,泥沙干密度计算式前面排列系数变化范围为 $\frac{\pi}{6} \sim \frac{\pi}{3\sqrt{2}}$,即 0.5236 ~ 0.7405,其具体取值应根据实际淤积泥沙孔隙率 ϵ 来确定.

b. 用椭球体概化泥沙颗粒较用圆球体概化显然更接近实际,引入形状指数 k 用以考虑泥沙颗粒形状将更为合理.

c. 在不考虑特殊的排列方式时,不同 k 时淤积泥沙干密度随着中值粒径的增加,变化幅度是先增大后变小,中值粒径接近 1.0 mm 时变化将不明显.

d. 在同一中值粒径下,随着 k 的增加,淤积泥沙干密度是先增大, $k = 1.0$ 时达最大值,后减小.

e. 泥沙的粒径愈细,形状愈扁平或愈长圆,其干密度就愈小,反之干密度就愈大.

参考文献:

- [1] 张耀哲,王敬昌.水库淤积泥沙干密度分布规律及其计算方法的研究[J].泥沙研究,2004(3):54—58.
- [2] 中国水利学会泥沙专业委员会.泥沙手册[M].北京:中国环境科学出版社,1989.54—57.
- [3] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1989.40—44.
- [4] 韩其为,王玉成,向熙龙.淤积物的初期容重[J].泥沙研究,1981(1):1—13.
- [5] 师长兴,章典,尤联元,等.黄河口泥沙淤积估算问题和方法——以钓口河三角洲为例[J].地理研究,2003,22(1):49—59.
- [6] 韩其为,何明民.泥沙起动规律及起动流速[M].北京:科学出版社,1999.49—54.
- [7] Zhan Yizheng, Zhang Xianping, Huang Ying et al. The angle of repose for submerged non-cohesive sediment particles[A]. Hu Chunhong, Tan Ying. Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation(III) [C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 1439—1443.
- [8] 宋玉琴.粒子形状对筛分分级特性的影响[J].矿山机械,2001(10):42.

(收稿日期 2004-11-18 编辑 熊水斌)

(上接第 18 页)

4 结 语

通过对某抽水蓄能电站面板堆石坝的三维非线性有限元仿真计算,预测了各时期坝体及防渗体系的变形和应力分布规律.在此基础上对堆石料计算参数进行了敏感性分析,得出了主要参数变化对大坝变形的影响规律.其中有些参数的变化对坝体变形的影响很敏感,因此在试验确定其值或调参计算时应引起注意,否则可能会因其微小变化导致较大的计算结果差异.

参考文献:

- [1] Duncan J M. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movements in soil masses[M]. Berkeley: University of California, 1980. 1—101.
- [2] 顾淦臣,黄金明.混凝土面板堆石坝的堆石本构模型与应力变形分析[J].水力发电学报,1991(1):12—24.
- [3] 恩戈科.堆石坝材料参数的灵敏度分析[J].河海大学学报(自然科学版),1999,27(5):94—99.

(收稿日期 2004-04-22 编辑 熊水斌)