

面板堆石坝有限元仿真计算及参数敏感性研究

岑威钧, 朱岳明, 罗平平

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 :回顾了面板堆石坝仿真计算中各类材料的本构模型. 结合某抽水蓄能电站混凝土面板堆石坝, 运用三维非线性有限单元法对其进行了坝体施工和库水蓄降的仿真模拟计算, 预测了各时期坝体和防渗体系的变形和应力. 并对计算模型的主要参数进行了敏感性分析, 其中参数 K 、 R_f 和 φ_0 对坝体位移有较大影响.

关键词 :面板堆石坝; 非线性有限元; E-B 模型; 参数敏感性

中图分类号 :TV641.4+3 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-764X(2005)04-0016-03

FEM simulation of concrete face rockfill dams and their parameter sensitivity study//CEN Wei-jun, ZHU Yue-ming, LUO Ping-ping/ College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :The 3-D FEM was applied to simulation of the construction process and reservoir water-level variation of a concrete face rockfill dam(CFRD) at a pumped-storage power station. The stress distribution and deformation of the dam body and the seepage control system in different stages were predicted. The sensitivity analysis of main parameters of the E-B model shows that the parameters K , R_f and φ_0 have considerable effects on dam displacement.

Key words :CFRD; nonlinear FEM; E-B model; parameter sensitivity

自 20 世纪 60 年代以来, 随着岩土力学、土工试验技术与施工碾压设备的发展以及面板接缝的止水设施改进等, 混凝土面板堆石坝得到了迅速发展. 目前, 面板堆石坝作为主要坝型在我国已呈大规模推广趋势, 因此, 有必要采用先进合理的数值方法, 对混凝土面板堆石坝进行三维仿真模拟分析研究, 以提高混凝土面板堆石坝的设计水平.

1 材料本构模型

1.1 堆石料本构模型

堆石料(或砂卵石料) 的变形不仅随荷载大小变化, 而且还与加载的应力路径有关, 应力应变关系呈明显的非线性. 进一步对变形机理研究表明, 其应力应变关系除非线性以外, 还具有压硬性、剪胀性和各向异性等. 目前, 堆石料常用本构模型主要有弹性非线性模型和弹塑性模型两大类. 弹性非线性模型只能反映堆石料的非线性和压硬性, 主要有邓肯双曲线模型、内勒 K-G 模型等. 这些模型最初是针对土、砂等材料在常规三轴试验基础上提出的, 仅适用于二维分析计算. 其中邓肯 E-B 模型^[1]因使用简便, 参数确定经验丰富, 且计算结果与实测较为符合, 在工

程界得到了较为普遍的应用. 在三维计算中应对原模型做修正^[2], 以平均主应力 p 代替原模型中的 σ_3 , 以广义剪应力 q 代替原模型中的 $\sigma_1 - \sigma_3$, 借此考虑中主应力 σ_2 的影响. 修正的 E-B 模型切线弹性模量和切线体积模量由式(1) 计算^[2].

$$\begin{cases} E_t = Kp_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^n \left(1 - R_f \frac{q}{q_f} \right)^2 \\ B_t = K_b p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^m \end{cases} \quad (1)$$

弹塑性模型除反映堆石料的非线性和压硬性外, 还能反映剪胀性和各向异性, 以双屈服面模型应用为多, 其中最具有影响的当属沈珠江模型, 该模型由椭圆函数和幂函数组成, 如式(2) 所示.

$$f_1 = p^2 + r^2 q^2 \quad f_2 = \frac{q^s}{p} \quad (2)$$

1.2 接触面模型

由于面板与垫层之间材料性能相差悬殊, 因此两者之间往往设置接触面, 以反映两者的相互作用. 接触面本构关系有弹性双曲模型、弹塑性模型、刚塑性模型及黏弹塑性模型. 单元形式有薄层单元和无厚度单元两种. 在实际应用中以 Desai 薄层单元和 Goodman 无厚度单元应用最广, 其切向劲度均由式

(3) 计算.

$$K_l = K_1 \gamma_w \left(\frac{\sigma_y}{p_a} \right)^n \left(1 - \frac{R_f' \tau}{\sigma_y \tan \delta} \right)^2 \quad (3)$$

1.3 接缝止水材料模型

接缝止水材料模型主要有分离缝、自由面、软单元及止水连接单元等计算模型,其中止水连接单元模型较为合理,应用较广.该单元模型是河海大学通过对天生桥一级大坝所做的面板竖直缝和周边缝力-位移的室内模型试验而得到的,可以模拟止水材料的拉压、剪切和沉陷三向力学行为.

混凝土一般采用线弹性或分段线弹性模型,其他坝基岩体等材料亦多采用线弹性模型.

2 工程算例

2.1 有限元模型及计算参数

某抽水蓄能电站混凝土面板堆石坝坝高64.0m,上、下游坝坡为1:1.4,设计运行水位172.6m.因基岩中存在F₁₀₁大断层,因此计算模型选择了部分地基.计算模型沿坝轴线方向考虑面板分缝共设置37个剖面,在面板和垫层间设置接触面单元,面板竖向缝和周边缝设置止水连接单元.整个计算域剖分结点5168个,单元4086个.网格剖分见图1.

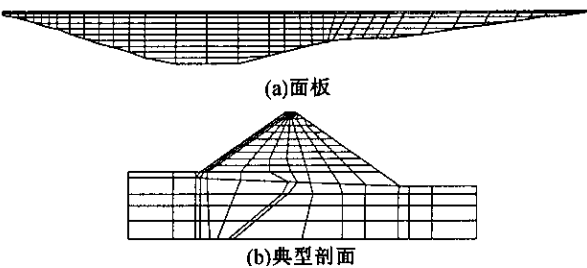


图1 有限元计算网格

坝体堆石料采用修正的E-B模型,计算参数见表1.接触面用Goodman单元进行模拟,其计算参数分别为:K₁=4800,n=0.56,R_f=0.74,φ=36.6°.

2.2 坝体变形和应力

竣工期坝体顺河向水平位移基本上以坝轴线为界各向两侧发展,上下游向水平位移最大值分别为19.6cm和29.8cm,坝体最大沉降值为69.1cm.蓄水后上下游向水平位移最大值分别为5.6cm和37.9cm,最大沉降值为70.6cm.竣工期和蓄水期坝体位移分布符合一般规律,但数值偏大,这与表1中堆石料参数“较软”有关.

表1 堆石料E-B模型计算参数

材 料	γ/(kN·m ⁻³)	c	φ ₀ (°)	Δφ(°)	K	n	R _f	K _b	m	n _{ur}	K _{ur}
垫 层	24.0	0.0	53.20	10.50	603	0.19	0.80	194	0.15	0.19	904
过渡层	23.5	0.0	52.75	11.65	560	0.22	0.79	166	0.16	0.22	840
上游堆石	22.3	0.0	51.77	10.50	546	0.23	0.77	192	0.10	0.23	819
下游堆石	22.0	0.0	51.10	11.10	429	0.26	0.76	131	0.19	0.26	643

图2是蓄水引起的大坝最大剖面处位移增量等值线.由于挡水面板只起到传递水压的作用,因此蓄水引起了坝体较大的位移增量,尤其上游坝体部位最为明显.水平位移和竖向位移的净增量最大值分别为19.2cm和17.9cm,位置均发生在上游坝坡约1/2坝高处.

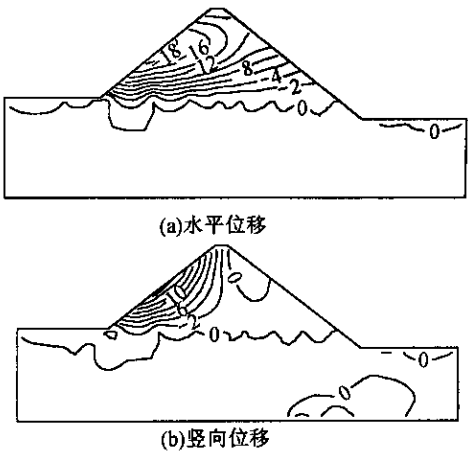


图2 蓄水引起的位移增量等值线(单位:cm)

竣工期坝体大小主应力基本上随坝体深度而增加.蓄水后,坝体大小主应力较竣工期有所增加,主要集中在上游坝体部位.相比较,下游坝体主应力变化不明显,这是因为上游坝体是水压力主要作用之处.

图3为竣工期和蓄水期最大剖面坝体堆石料应力水平等值线.可以看出,无论是竣工期还是蓄水期,坝体应力水平均小于1.0,说明坝体没有出现破坏区,坝体的安全是有保障的.蓄水后上游坝体的应力水平较竣工期有所减小,说明水库蓄水对上游坝坡的稳定是有利的.

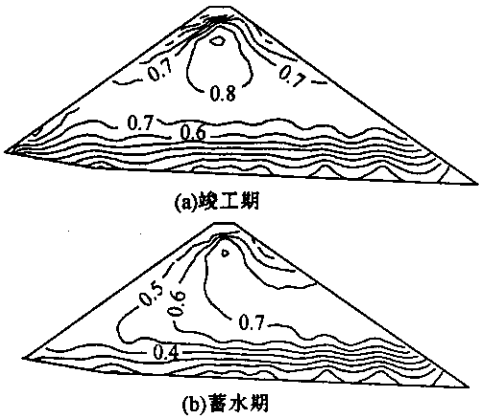


图3 坝体堆石料应力水平等值线

2.3 大坝防渗体系变形和应力

竣工期面板仅在自重作用下,变位甚小.蓄水后,面板呈“锅底形”变位特性,最大挠度为27.1 cm.图4为蓄水期面板轴向变位等值线分布,分布规律较为合理.由图4可见,受水压作用,主体坝段两侧面板向河床中间移动.由于坝轴线在右岸平缓岸坡部位向上游转折,因此转折剖面以右的面板在水压作用下向岸坡方向移动.



图4 蓄水期面板轴向变位等值线(单位:cm)

蓄水期面板应力数值不大,分布规律较好.面板在库水压力作用下,顺坡向面板应力主要为压应力,沿坝坡向下总体上逐渐增加,最大值为0.73 MPa.面板顺坡向还存在较小范围的拉应力区,集中在坝轴线转弯剖面附近面板的顶部,其最大值为0.5 MPa.面板坝轴向压应力主要集中在河谷中间面板部位,最大压应力为0.73 MPa;在两侧岸坡相当范围内出现了拉应力区,尤其右岸拉应力区较大,这与该处坝轴向上游转折有关,但拉应力数值不大,最大值为0.47 MPa.图5是蓄水期面板轴向应力等值线,分布规律较为合理,面板岸坡两侧一定范围内出现了拉应力区,但拉应力数值较小.

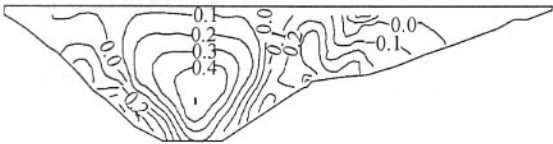


图5 蓄水期面板轴向应力等值线(单位:MPa)

计算结果显示,大坝接缝三向错动位移分布规律较为合理,最大值为周边缝的拉开位移,其值为1.63 cm,位于右岸坝轴线转弯剖面附近面板的底部.整个大坝接缝的三向错动位移均在止水片的通常变形极值范围之内,因此止水结构能够正常工作.

3 参数敏感性分析

为了进一步分析大坝的变形规律,笔者对堆石料的E-B模型计算参数进行了敏感性分析.修正的邓肯E-B模型中堆石料共有10个参数,即 $c, \varphi_0, \Delta\varphi, K, n, R_f, K_b, m, K_{ur}, n_{ur}$,其中有几个参数具有一定的相关性,如 K_b 一般在 $(1/2.5 \sim 1/3.5)K$ 的范围内, $K_{ur} = (1.2 \sim 3.0)K, n_{ur}$ 基本上与加荷时的 n 一致.本次分析取 $K_b = 0.4K, K_{ur} = 1.5K, n_{ur} = n$.另外,堆石料的黏聚力 c 取为0, $\Delta\varphi$ 数值较小且它的变化与 φ_0 有关,对这2个参数不作敏感性分析.实

际作敏感性分析的参数为 K, n, m, R_f, φ_0 5个.分析方法^[3]就是在表1给出的参数的基础上变动其中一个参数,其余参数保持不变,看计算结果的变化规律.表2给出了参数 K 的变化对坝体位移的影响,图6和图7为上述5个参数对坝体位移的影响关系曲线.

表2 参数 K 的变化对坝体位移的影响

参数	参数变化率/%	向上游位移/cm	向上游位移变化率/%	向下游位移/cm	向下游位移变化率/%	竖向位移/cm	竖向位移变化率/%
0.75K	-25	26.05	32.92	39.69	33.18	92.13	33.33
0.8K	-20	24.47	24.84	37.18	24.77	86.30	24.89
0.85K	-15	23.00	17.39	35.09	17.76	81.34	17.72
0.9K	-10	21.79	11.18	33.14	11.21	76.83	11.18
1.0K	0	19.60	0.00	29.80	0.00	69.10	0.00
1.1K	10	17.89	-8.70	27.01	-9.35	62.83	-9.07
1.2K	20	16.43	-16.15	24.79	-16.82	57.58	-16.67
1.3K	30	15.22	-22.36	22.84	-23.36	53.21	-23.00
1.4K	40	14.12	-27.95	21.31	-28.50	49.42	-28.48

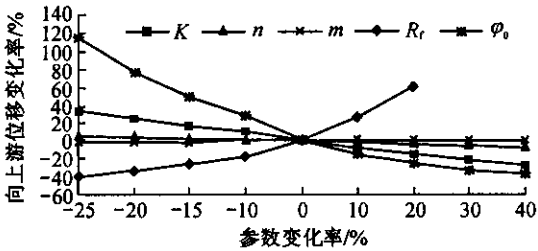


图6 各参数与向上游位移的关系

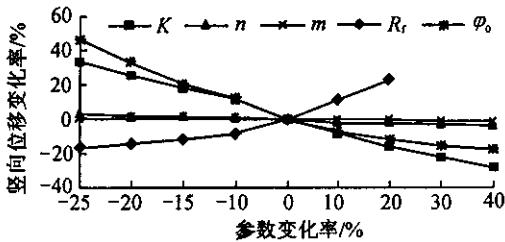


图7 各参数与竖向位移的关系

由图6和图7可以看出:①参数变化对不同位移的影响规律相似,只是影响幅度有所差别,其中对向上游位移的影响与对向下游位移的影响程度很接近(文中未给出各参数变化与下游位移关系曲线).②位移(水平位移和竖向位移)在5个参数变化过程中,与 R_f 呈递增关系,而与其他4个参数呈递减关系.③从 R_f 的定义可以看出, R_f 的增大表明 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的增大,定性上意味着变形的增大.④参数 m 和 n 变化对位移的影响不是很大,从-25%变化至40%时,位移变化幅差在10%以内.相比而言, K, R_f 和 φ_0 的影响较大,尤其 φ_0 从-25%变化至40%时,水平位移从115%左右变化至-40%左右,竖向位移从45%左右变化至-20%左右,变化幅差分别为155%和65%.这主要因为 φ_0 较小时,在不大的偏应力时就能到达较高的应力水平,使得 E_t 较低,堆石料的变形就会明显增加.

(下转第25页)

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.

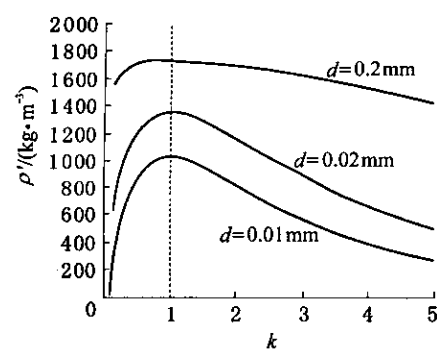


图 4 同一中值粒径时 ρ' 与 k 的关系
($\theta = 0.5, \delta = 0.0008\text{mm}$)

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)