

混凝土面板堆石坝的应力应变计算的发展与灵敏度分析

恩戈科

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 用二维非线性有限元法分析了混凝土面板堆石坝的应力变形特性,并对堆石料进行了灵敏度分析.用邓肯 E-B 模型作了应力、变形分析,得到坝体变形、面板变形和应力等成果.在此基础上得到了重要的结论,即参数的变化对位移影响很大而对应力影响很小.对堆石料需进一步研究的问题进行了讨论.

关键词 混凝土面板堆石坝;应力变形;灵敏度;非线性有限元

中图号 TV642;TV31

混凝土面板堆石坝从 20 世纪 30 年代的抛填式发展到 70 年代的现代碾压式,是筑坝史上的一个巨大突破.碾压式面板堆石坝具有工程量小、工期短、造价低、安全性高等优点,常成为坝型选择中的一种主要方案.按 Cook J. B. 对面板堆石坝发展阶段的划分,从 1965 年开始,面板堆石坝进入了现代阶段,其根本的革命是采用大型振动碾压,用石场爆破石料,一般不需要挑选,可全部上坝,面板只设竖向伸缩接缝,不设水平伸缩接缝.由于堆石体碾压很密实,变形较小,面板一般不易出现裂缝.随着 70 年代以 Cethana(高 110 m), Anchicaya(高 140 m), Golillas(高 127 m), Areia(高 160 m)为代表的百米级高面板坝的建成和运行,世界上面板坝的设计和施工上了一个新台阶,各国已广泛采用,但设计仍处于半经验性阶段,理论研究颇感不足.中国建成有关门山、成屏、西北口(高 95 m)面板堆石坝,此外 180 m 高的南盘江天生桥一级水电站面板堆石坝正在动工兴建.

面板堆石坝是混凝土、堆石或砂砾料等组成的混合结构,依靠坝体上游面的一层薄钢筋混凝土面板防渗并起护坡作用,因而坝体堆石不与水库内的水直接接触,水压力全部作用在混凝土面板上,由垫层和过渡层支撑面板,并将上游水压力传给下游的堆石体,所以面板的工作特性显得尤其重要.但是由于建筑材料性能十分复杂,建筑物的合理和正确的分析方法至今还没有从理论上得到很好的解决.

1 坝体应力和变形计算的目的

坝体应力和变形的计算基于下列目的 (a) 确定坝体可能产生拉力和裂缝的区域,尤其是研究在陡岸坡附近是否有产生裂缝的可能性 (b) 利用应力和变形的计算成果来分析坝坡稳定性 (c) 研究在地震作用下坝体的动力稳定性 (d) 利用坝体在静力和动力作用下的观测资料,推求坝体材料性质和验算计算方法的可靠性.

2 堆石料灵敏度分析

在计算中,如果要考虑坝体材料的非线性影响,则材料的变形特性为应力或变位状态的函数,所以计算结合了坝体的修建过程以及蓄水过程,采用中点增量法才能得到较好的成果.首先应拟定材料的计算模型,并通过试验或参考类似工程的经验确定各区材料的特性常数.堆石的应力应变模型分两大类:非线性弹性模型和弹塑性模型.不同的模型各有其特点和适用范围,其中邓肯的 E-B 模型使用较为简便与广泛,且具有一定的精度,目前在中国使用较为广泛.该模型共选用了 7 个参数,即 C , φ , R_f , K , K_b , n 和 m , 它们的数值可根据实测的曲线簇来确定.这 7 个参数的变化对计算成果有很大的影响,具体可在下面的算例中加以说明.

2.1 算例

某 100 m 高的混凝土面板堆石坝的 5 m 宽坝段 ,两端加轴向约束 ,相当于平面应变问题.

2.1.1 单元剖分

面板顶厚 0.3 m ,底厚 0.4 m ,沿面板厚度方向剖一层单元 ,沿坝高度分 20 层 .共剖分 542 个单元 ,结点数为 571 个 .其中堆石体单元 500 个 ,面板单元 20 个 ,接触面单元 20 个 ,趾板单元 1 个 ,止水连接单元 1 个 (见图 1).

2.1.2 计算参数

计算中采用 26 级加荷方式 .堆石体分 20 级填筑 ,每级高 5 m ,面板分两级浇筑 ,第一级从 0 ~ 50 m ,第二级从 50 m ~ 100 m ,蓄水分 4 级 ,第一级从 0 ~ 40 m ,第二级从 40m ~ 65 m ,第三级从 65 m ~ 85 m ,第四级从 85 m ~ 100 m .加荷级数较多 ,旨在使用中点增量算法 .

混凝土面板和趾板采用线弹性模型 , $E = 18\,000\text{ MPa}$, $\gamma = 0.167$,堆石体部分相应于 E-B 模型的计算参数见表 1 ,接触面的计算参数见表 2 ,止水材料受力与变形的关系见表 3 .

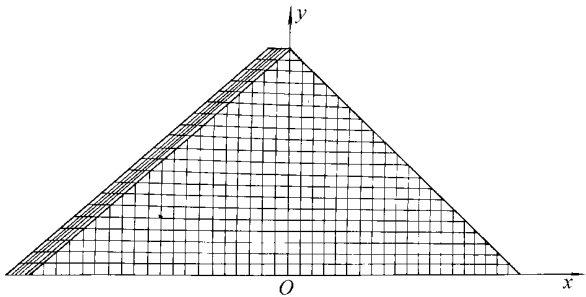


图 1 二维单元网格剖分
Fig.1 2-dimensional element net section

表 1 堆石体材料参数
Table 1 Rockfill parameters

堆石体	γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	φ ($^{\circ}$)	C_m	R_f	K	n	K_b	n_{ur}	$\Delta\varphi$	K_{ur}
垫 层	22.0	55.0 ~ 50.2	0.30 ~ 0.24	0.60 ~ 0.70	1000 ~ 1030	0.320 ~ 0.355	660 ~ 430	0.32 ~ 0.20	12.0 ~ 6.0	2 100 ~ 2 190
过渡层	22.0 ~ 21.5	55.0 ~ 52.3	0.30 ~ 0.21	0.60 ~ 0.724	1000 ~ 990	0.320 ~ 0.360	660 ~ 400	0.32 ~ 0.21	12.0 ~ 7.0	2 100 ~ 2 010
主堆石	21.5 ~ 21.2	54.0 ~ 53.0	0.30 ~ 0.20	0.66 ~ 0.84	1000 ~ 950	0.320 ~ 0.350	630 ~ 340	0.32 ~ 0.19	12.0 ~ 9.0	2 100 ~ 1 990
次堆石	22.0 ~ 20.2	53.0 ~ 52.0	0.40 ~ 0.10	0.77 ~ 0.79	900 ~ 720	0.500 ~ 0.303	500 ~ 340	0.50 ~ 0.15	10.7 ~ 10.0	1 890 ~ 1 550

表 2 接触面计算参数
Table 2 Parameters of the contact surface

参 数	δ ($^{\circ}$)	C	R_f	K_1	n	K_n/kPa
接触面	34.95	1.51	0.75	5 000	0.75	10^8

表 3 止水材料受力与变形的关系
Table 3 Relation between water-retaining body and deformation

试验情况	止水铜片	止水塑料片
拉	$\delta = \frac{F}{a + bF}$	$F = K\delta$
	$a = 17.5 \quad b = 47.6$	$K = 400 \quad \delta \leq 0.0115$ $K = 60 \quad \delta > 0.0115$
压	$\delta = \frac{F}{a + bF}$	$F = K\delta$
	$a = 65.0 \quad b = 41.0$	$K = 53.0 \quad \delta \leq 0.0115$ $K = 19.6 \quad \delta > 0.0115$
竖剪	$\delta = \frac{F}{a + bF}$	$F = K\delta$
	$a = 22.5 \quad b = 40.0$	$K = 0$
横剪	$F = K\delta$	$F = K\delta$
	$K = 60.8 \quad \delta \leq 0.0125$ $K = 56.0 \quad \delta > 0.0125$	$K = 140.0$

注 : $F = 10^4\text{ N/m}$, δ 的单位为 m.

2.2 计算成果

以下给出的成果是蓄水期最后一级的左边数值(高参数).

2.2.1 堆石体变位

图 2(a)是堆石体水平变位的等值线图.从图中可看出,堆石体的大部分有向下游变位的区域.最大向上游变位为 13 cm,发生在 $x = -45\text{ m}$, $y = 45\text{ m}$ 处.最大向下游变位为 28 cm,发生在 $x = 60\text{ m}$, $y = 35\text{ m}$ 处.

图 2(b)是堆石体铅直变位的等值线图.从图中可看出,铅直变位向下,最大铅直变位为 49.3 cm.

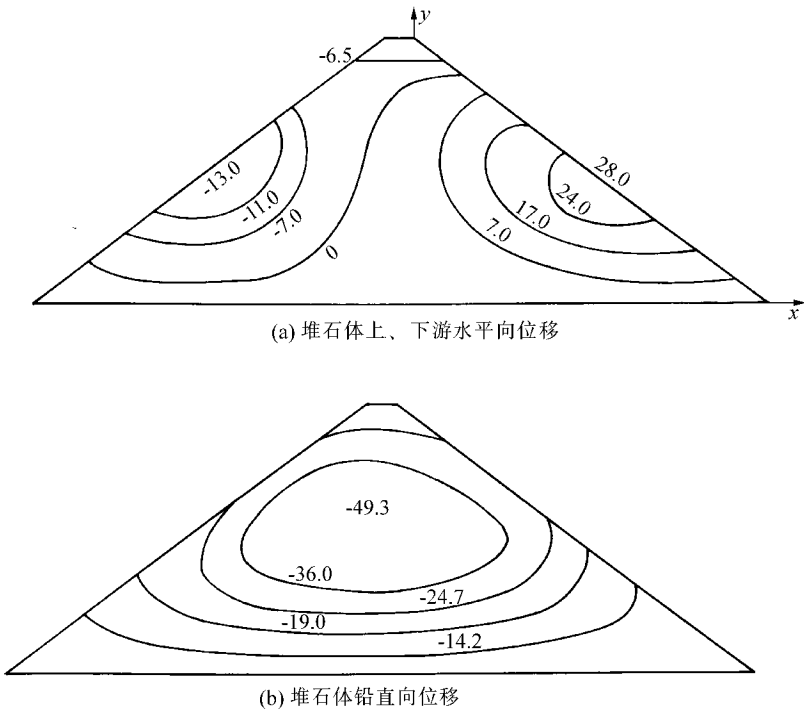


图 2 堆石体变位等值线(单位:cm)

Fig.2 The equvalue line for rockfill convection

2.2.2 堆石体应力

图 3 是堆石体大主应力等值线图.从图中可看出,大主应力的最大值发生在堆石体底部中间部位,即数值为 1.999 MPa.

2.2.3 面板的变形和应力

面板的最大挠度为 18.038 cm,发生在 $y = 40\text{ m}$ 处;面板的最大主应力值为 0.49 MPa.

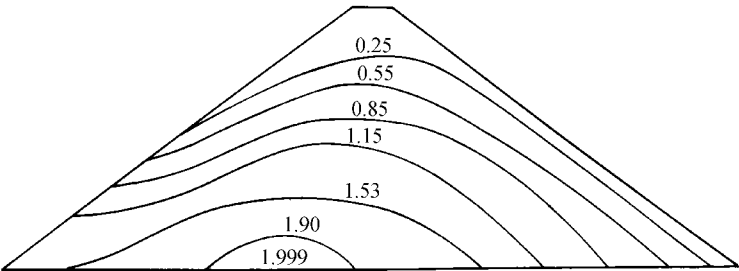


图 3 堆石体大主应力等值线(单位:MPa)

Fig.3 The equvalue line for rockfill principal stress(MPa)

2.2.4 接触面的应力和位移

顺坝坡剪应力的最大值为 -0.9 MPa ,发生在坝体底部 $y = 7.5\text{ m}$ 处.垂直坝坡法向应力的最大值为 0.6 MPa ,发生在坝体中间上部 $y = 62.5\text{ m}$ 处.顺坝坡剪切位移的最大值为 -1.115 cm ,发生在坝体底部 $y = 7.5\text{ m}$ 处.

2.2.5 止水连接单元位移

面板与趾板间分缝设止水连接单元,单元张开位移为 2.61 cm ,错动位移为 0.0076 cm .

2.2.6 参数计算主要成果

作者对表 1 中左边一组参数(低参数)按高参数完成相同步骤计算了坝体位移与应力、坝体位移与主应力成果,列于表 4 之中.

表 4 位移、应力成果比较

Table 4 Comparison of stress and deformation

参数	堆石体最大变位数值/cm			堆石体最大第一主应力数值/MPa	面板挠度/cm	面板的 σ_1 /MPa
	上游水平向位移	下游水平向位移	铅直向位移			
高	-13.00	28.00	-49.3	1.999	18.038	0.49
低	-33.65	7.00	-58.4	1.994	15.678	0.46

参数	连接单元张开位移/cm	连接单元错动位移/cm	接触面顺坝坡剪切位移/cm	接触面垂直坝坡法向应力/MPa	接触面顺坝坡剪切应力/MPa
高	2.61	0.0076	-1.115	0.60	-0.90
低	2.48	0.0038	-0.898	0.57	-0.87

3 结 论

- a. 由于变形模量公式 $E_i = K_p a (\sigma_3/p_a)^n$, $B_i = K_b p_a (\sigma_3/p_a)^m$, 当 σ_3/p_a 大于 1 时 , 增大 K (K_b) 或 n (m) 会使变形模量变大 , 位移减小 ; 反之 , 降低这些参数使变形模量减小则位移增大.
- b. φ ($\Delta\varphi$) , K (K_b , K_{ur}) , n (m , n_{ur}) , R_f 的变化对位移影响较大 , 对应力影响较小 ; 位移和应力的变化基本上是一致的 , 对面板也有类似的规律.
- c. 每个参数的变化 (降低或增大) 应在它们所规定的范围内.
- 以上所得出的结论也可以通过某些工程的计算参数及计算成果反复计算得出来. 总之 , 非线性的数学模型还有待于进一步研究、改进 , 作者认为堆石料本构关系在以下方面将引起重视 :
- a. 计算模型的选择. 计算模型仅仅是现实世界的近似反映 , 它既不是精确的 , 也不是唯一的 , 而可以随着试验研究的进展不断改变. 所以对现有各种数学模型要进行各种形式的检验和比较 , 确定其正确性和适用范围才能便于在实际工程中采用.
- b. 材料参数的确定. 各类材料的参数必须适当选用 , 这对成果有很大的影响. 因此 , 材料参数要通过试验测定和反演分析计算后选定.

参 考 文 献

1 张光斗 , 王光纶. 水工建筑物 : 下册. 北京 : 水利电力出版社 , 1994. 80 ~ 93

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. 水力发电学报 , 1991 (1) : 12 ~ 23

3 Duncan J M. Strength , stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movements in soil masses. Berkeley : University of California , 1980. 1 ~ 101

4 Cook J B. The concrete-faced rockfill dam. Water Power and Dam Construction , 1991. 1 ~ 44

5 水利电力部科学技术司 , 水利水电科学研究院. 国外混凝土面板堆石坝. 北京 : 水利电力出版社 , 1988. 108 ~ 245

6 王勖成 , 邵敏. 有限单元法基本原理与数值方法. 北京 : 清华大学出版社 , 1988. 118 ~ 259

Development and Sensitivity Analysis of Concrete Face
Rockfill Dam Stress-Strain Calculations

NGOKO

(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098)

Abstract 2-dimensional finite element method is used to analyse the concrete face rockfill dam stress-strain characteristics and the sensitivity of rockfill materials is analysed. Through a numerical illustration of calculations using Duncan E-B model , the analysis is tested. The conclusions derived from the application of that model are presented. Finally the problems worth deeper study in the future are discussed.

Key words concrete face rockfill dams ; stress deformation ; sensitivity ; non-linear finite element method