

高混凝土面板堆石坝应力变形数值模拟研究

洪振国, 李建伟

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 常规计算方法无法精准反映高面板堆石坝实际受力情况, 造成国内外修建的一些高面板堆石坝出现面板挤压破坏和结构性裂缝问题。采用邓肯 E-B 模型进行高面板堆石坝三维有限元分析计算, 结果表明: 高混凝土面板堆石坝的应力和沉降量较小, 绝大部分荷载是经过垫层和过渡层由主堆区石传入坝轴线以上的地基中, 坝壳料具有足够的变形模量及自由排水性能, 孔隙率控制是合理。面板堆石坝应力的分布在各堆石区的分界处没有较大突变, 坝体填筑分成防渗补强区、垫层区、堆石区各区坝料之间满足力学平稳过渡的要求。因此高面板堆石坝设计是合理的, 对类似工程设计具有参考意义。

关键词: 高面板堆石坝; 应力; 变形; 数值模拟; E-B 模型

中图分类号: TV314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2016)06-0174-05

Research on numerical simulation of high concrete face rockfill dam stress and deformation

HONG Zhenguo, LI Jianwei

(Yunnan Water and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research Institute, Kunming 650021, China)

Abstract: The conventional calculation method can not accurately reflect the actual stress of high concrete face rockfill dam, which causes the extrusion damage and structural crack of high face rockfill dam at home and abroad. This study uses Duncan E-B model to carry out three dimensional finite element analysis of high rockfill dam. The results indicated that the stress and settlement of high concrete face rockfill dam is small, most of the load was transferred to the foundation above dam axis by the main rockfill zone between the cushion layer and the transition layer, the dam shell material had enough deformation modulus and free drainage performance, and the porosity control was reasonable. The distribution of boundary stress in the dam rockfill area had no large mutation, the dam was divided into anti-seepage area, cushion zone, pile stone area and all dam areas met the mechanical requirements of the smooth transition. Therefore, the design of high concrete face rockfill dam was reasonable, which had reference value for similar engineering design.

Key words: high concrete face rockfill dam; stress; deformation; numerical simulation; E-B model

混凝土面板堆石坝对地质要求低、经济、施工质量有保证、技术成熟以及后期承担的风险小、维修维护方便, 因而深受水利水电建筑设计者的青睐。从 20 世纪 80 年代以来, 混凝土面板堆石坝在我国得到迅速发展和广泛应用, 该坝型的建设不仅在数量上发展迅速, 而且在大坝高度上不断有新突破^[1]。

在高面板堆石坝的高应力场作用下, 堆石体颗粒强度低, 破碎等明显, 坝体应力和变形大, 面板挠度和应力也大。采用常规计算方法无法精准反映

高面板堆石坝实际受力情况, 造成国内外修建的高面板堆石坝面板的挤压破坏和结构性裂缝问题, 因此高面板堆石坝计算方法是重要的研究课题。本文以云南某水库混凝土面板堆石坝为例, 采用邓肯 E-B 模型进行高面板堆石坝三维有限元分析计算, 精准反映高面板堆石坝实际受力情况, 有效地模拟高混凝土面板堆石坝应力变形数值^[2], 分析论证混凝土面板堆石坝设计的合理性, 同时解决了高面板堆石坝精准实际受力情况难题。

1 工程概况

云南某水库坝址以上径流面积 39.5 km^2 , 多年平均径流量 $1\ 865 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。水库工程供水任务是解决农田灌溉和农村生活供水问题, 水库总库容 $1\ 159.5 \text{ m}^3$, 设计总灌溉面积 2.16 万亩。水库枢纽工程由大坝、溢洪道和导流输水隧洞组成^[3-5], 水库投入运行后, 农村灌溉用水 $970.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 生活供水 $135 \times 10^4 \text{ m}^3$, 下放生态流量 $186.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

大坝坝型为混凝土面板堆石坝, 顶高程为 $1\ 857.3 \text{ m}$, 防浪墙墙顶高程 $1\ 858.5 \text{ m}$, 坝顶宽 10.0 m , 趾板坝轴线处最低清基高程 $1\ 776.00 \text{ m}$, 最大坝高 81.3 m , 属于高面板堆石坝, 坝轴线长 265 m 。堆石料采用强、弱风化砂岩, 上游坝坡 $1: 1.4$, 下游坝坡 $1: 1.5$ 。大坝上游死水位以下设任意石渣料层和粘土辅助防渗层。C25 钢筋混凝土面板平均厚 0.45 m , 上游设水平宽度 3.0 m 厚垫层料和过渡层。坝体下游采用水平宽度 3 m 超径块石护坡。趾板厚 0.6 m , 宽 4 m 、 7 m 和 9 m 。

2 有限元分析计算

面板堆石坝应力变形数值模拟采用的堆石体结构模型为邓肯 E - B 模型。该模型应用广泛, 能较好地反映堆石体的应力变形特性, 材料参数选择结合试验成果和工程经验, 对竣工期和蓄水期进行了数值模拟。

2.1 计算模型

为考虑坝基及两岸山体变形对混凝土面板堆石坝应力及变形的影响, 计算范围除了整个混凝土面板堆石坝外, 还包括了大坝基础。整个计算模型范围为上、下游侧地基长度各取 1.5 倍坝高, 竖直方向由建基面向坝基深处延伸 1.5 倍坝高。设 X 向为顺河向, Y 向为竖直向。

计算网格采用四边形等参单元, 整个计算域共剖分 $6\ 022$ 个单元和 $6\ 368$ 个节点。整体网格见大坝典型断面计算模型图 1。

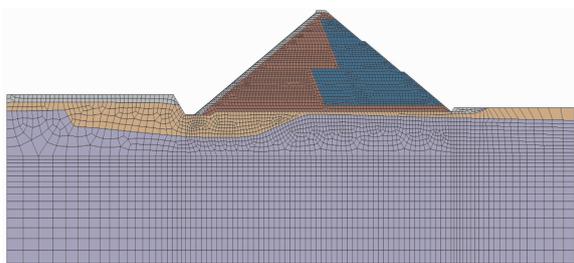


图 1 大坝典型断面计算模型图

2.2 计算荷载与参数

(1) 材料结构模型。计算针对不同的材料特性主要采用了三种材料本构模型, 即线弹性模型、非线性弹性模型、接触面模型^[6]。

(2) 线弹性模型。计算中, 对于混凝土面板、趾板、基岩采用的是线弹性模型。

(3) 非线性弹性模型。邓肯 - 张模型是非线性弹性模型的典型代表。该模型的弹性模量是应力状态的函数, 可以描述粗粒料应力应变关系的非线性和压硬性。该模型对加荷和卸荷的粗粒料分别采用不同的模量, 可以在一定程度上反映粗粒料变形的弹塑性^[7]。虽然它不能描述粗粒料的剪胀性和剪缩性, 但是邓肯 - 张 (E - B) 模型具有模型参数少、物理概念明确、确定计算参数所需的试验简单易行等优点, 因此在土石坝和面板堆石坝的应力变形分析中得到了广泛的应用。

对于堆石体材料采用 Duncan - Chang (E - B) 模型, 下面采用水工设计手册公式进行计算^[8]。

切线弹性模量 E_t 为:

$$E_t = K p_a (\sigma_3 / p_a)^n \left[1 - R_f \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2 \quad (1)$$

根据 Mohr - Coulomb 准则, 得到:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \cdot \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

切线体积变形模量为:

$$B_t = K_b \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (3)$$

坡体的内摩擦角的修正如下:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (4)$$

在计算中, 单元应力同时满足如下条件:

如坡体单元处于卸荷或再加荷状态, 改回用弹性模量表示如下:

$$E_{ur} = K \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (5)$$

式中: R_f, K, K_b, n, m 为实验参数, 可由材料三轴实验得到; p_a 为大气压力; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为在小主应力的条件下破坏时的应力差; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; σ_1 为大主应力; σ_3 为小主应力,

(4) 接触面模型。面板堆石坝中混凝土面板与垫层堆石料的刚度差异较大, 大坝在荷载作用下, 此接触面常会发生剪切滑移。为反映两种材料之间的相互作用, 进行有限元分析时, 一般采用 Goodman 等^[2]提出的无厚度平面 4 节点接触单元。以两边

对应节点相对位移作为变量,分析时不考虑接触面 σ_n 法向应力和 τ 剪应力与法向相对位移和切向相对位移之间的耦合作用^[2-15],即:

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_s \\ \omega_n \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中: K_s, K_n 分别为切向和法向的单位长度劲度系数; ω_s 和 ω_n 分别为切向相对位移和法向相对位移。

Goodman 单元能较好地模拟接触面上的错动,且能考虑接触面变形的非线性特性。其缺点是单元厚度为0,有时会使两侧单元重叠^[9]。为了防止出现这种现象,一般在受压时采用较大的法向劲度系数。

(5) 坝体材料参数。面板堆石坝采用不同特性坝壳料,坝体材料参数见堆石料参数表1。

表1 坝体堆石料参数

材料	$\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C /$ kPa	$\varphi / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$	K	n	R_f	K_b	m
垫层	22.2	0	59.3	13.4	800	0.38	0.75	220	0.18
过渡层	20.0	0	57.4	13.3	280	0.30	0.69	285	0.23
上游主堆石	20.1	27	52.2	15.1	1000	0.26	0.74	300	0.20
下游次堆石	19.05	30	50.2	11.5	640	0.27	0.65	280	0.19

注:C25 混凝土弹性材料参数:弹性模量 28.0 GPa,泊松比 0.167。

(6) 荷载及其施加方式。计算所考虑的荷载为自重荷载和水荷载。考虑到材料的非线性性质,荷载施加模拟坝体填筑过程,采用逐级施加的方式,其中坝体填筑共有 17 级,蓄水共有 2 级,共计 19 级主增量。由于缺少相关的实际地震分析数据,故暂未考虑地震工况。

3 计算结果分析

(1) 堆石体应力。通过邓肯 E-B 模型进行高面板堆石坝三维有限元计算,得到竣工期坝体第一主应力等值线图 2 和竣工期坝体第三主应力等值线图 3,由图 2~3 可知,竣工期最大主应力为 1.42 MPa,为压应力,位于坝轴线基岩部位。竣工期大主应力的分布为坝轴线附近大,坝上下游边坡附近小,坝基附近最大,随着坝高的增加逐渐减小,这与竣工期坝体主要荷载为自重荷载是相一致的^[15]。大主应力的分布在各堆石区的分界处略有突变,这与各堆石区的材料物理学特性及容重不相同有关。竣工期小主应力最大值为 0.39 MPa,为拉应力。

和蓄水期坝体第三主应力等值线图 5,由图 4~5 可知,蓄水期最大主应力为 1.50 MPa,为压应力,位于坝轴线基岩部位。蓄水期工况在库水压力作用下,坝体应力发生重新分布,等值线起点从地基移至面板,应力向下游边坡逐渐减少,随着坝高的增加逐渐减小,主拉应力即小主应力比竣工期明显增大,其最大拉应力为 0.86 MPa。

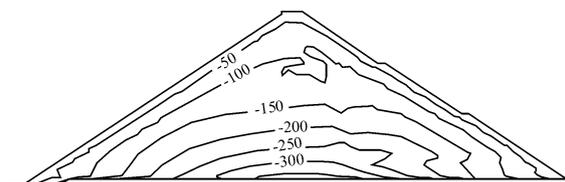


图2 竣工期坝体第一主应力等值线图(单位:kPa)

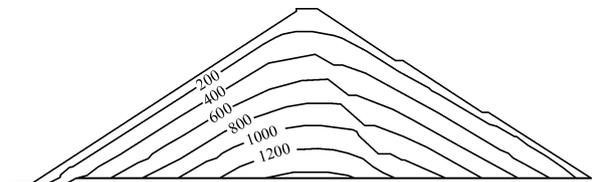


图3 竣工期坝体第三主应力等值线图(单位:kPa)

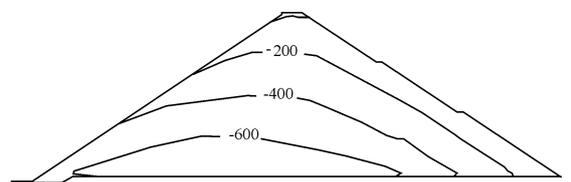


图4 蓄水期坝体第一主应力等值线图(单位:kPa)

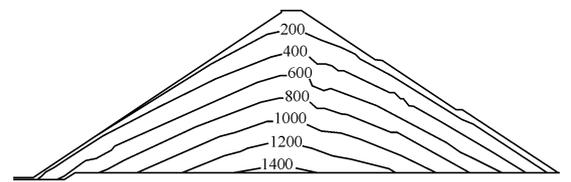


图5 蓄水期坝体第三主应力等值线图(单位:kPa)

通过邓肯 E-B 模型进行高面板堆石坝三维有限元计算,得到蓄水期坝体第一主应力等值线图 4

根据以上计算分析成果,将竣工期堆石体应力极值列于表 2。

表 2 竣工期堆石体应力极值表 MPa

工况	大主应力	小主应力
竣工期	1.42	0.39
蓄水期	1.47	0.86

大坝的应力较小,绝大部分荷载是经过垫层和过渡层由主堆石区传入坝轴线以上的地基中,主堆石区采用饱和抗压强度大于 60 MPa 的弱风化砂岩,主堆石区设计干密度 2.0~2.1 t/m³,次堆石区设计干密度 2.03 t/m³ 是合理的。

各堆石区的材料物理力学特性及容重不相同,但大坝应力的分布在各堆石区的分界处没有较大突变,坝体填筑分成防渗补强区、垫层区、堆石区各区坝料之间满足力学平稳过渡的要求。

(2)堆石体变形。通过邓肯 E-B 模型进行高面板堆石坝三维有限元计算,得到竣工期坝体水平向位移等值线图 6。由图 6 可知,竣工期顺河流向位移分布的基本规律为:大致以主堆石区与次堆石区的分界线为界分为两部分,上游区域的位移方向为朝向上游侧,大坝最大向上游的位移为 8.9 cm,位于坝高(包括覆盖层)约 1/3 处附近;下游区域的位移方向为朝向下游侧,大坝最大向下游的位移为 11.1 cm,位于坝高(包括覆盖层)约 1/3 处附近。

通过邓肯 E-B 模型进行高面板堆石坝三维有限元计算,得到竣工期坝体竖直向位移等值线图 7。由图 7 可知,竣工期竖向位移均为负,表现为竖向沉降。其最大竖向位移为 57.8 cm,位于坝高(包括覆盖层)约 2/3 处的次堆石区内,其向四周竖向位移减少。

由蓄水期坝体水平向位移图和竖直向位移图可知,蓄水期大坝上游最大位移约 6.6 cm;大坝向下游最大位移为 18.9 cm,约位于坝高(包括覆盖层)1/2 处附近。蓄水期竖向位移表现为竖向沉降。坝体最大沉降为 60.4 cm,约位于次堆石区坝高(包括覆盖层)2/3 附近,其向四周竖向位移减少,大坝的主要沉降量表现竖向沉降。

根据以上计算分析成果,竣工期堆石体变形见堆石体位移极值表 3。

表 3 堆石体位移极值表 cm

工况	水平向下游位移	水平向上游位移	垂直沉降
竣工期	11.1	8.9	57.8
蓄水期	18.9	6.6	60.4

大坝的沉降量较小,大坝坝壳料采用砂岩,主堆石区采用弱风化砂岩料,次堆石区采用强、弱风化砂岩混合料,坝壳料具有足够的变形模量及自由排水性能,孔隙率控制 ≤22% 是可行的。

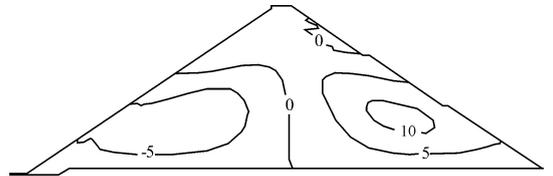


图 6 竣工期坝体水平向位移等值线图(单位:cm)

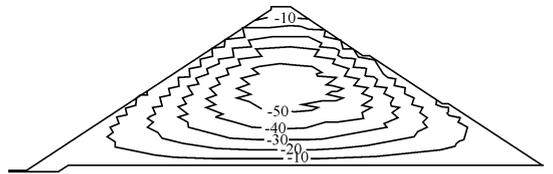


图 7 竣工期坝体竖直向位移等值线图(单位:cm)

(3)面板挠度与应力。通过邓肯 E-B 模型进行高面板堆石坝三维有限元计算,得到各工况面板挠度曲线见竣工期面板挠度(图 8)和蓄水期面板挠度(图 9)。由图 8 可知,竣工期面板挠度最大值为 14.1 cm,位于坝高 2/3 处内,方向为朝向下游侧,顺坡向面板主要为压应力,存在一定拉应力,其数值均不大,法向拉、压应力均有。面板最大顺坡向压应力为 0.9 MPa,拉应力约为 54 kPa。由图 9 可知,蓄水期面板挠度最大值为 18.2 cm,大致位于面板中部。水库蓄水后面板挠度发生重新分布,挠度向地基移动,应力向下游边坡逐渐减少,随着坝高的增加逐渐减小,顺坡向面板主要为压应力,存在一定拉应力,其数值均不大,法向拉、压应力均有。面板最大顺坡向拉应力为 3.4 MPa,位于面板中下部。

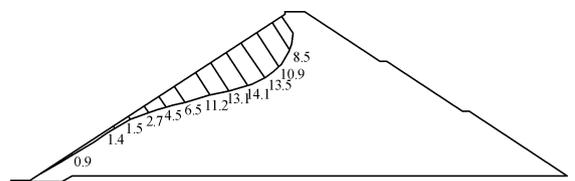


图 8 竣工期面板挠度图(单位:cm)

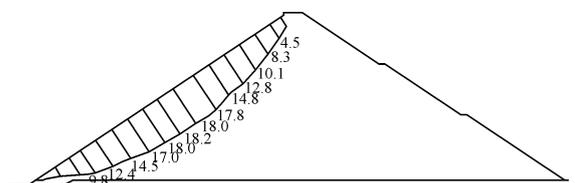


图 9 蓄水期面板挠度图(单位:cm)

根据以上计算分析成果,各工况面板应力、变形

及挠度见面板应力、变形及挠度极值表4。

表4 面板应力、变形及挠度极值

工况	顺坡向面板应力		法向面板应力		面板挠度/cm
	压应力/	拉应力/	压应力/	拉应力/	
	MPa	MPa	MPa	MPa	
竣工期	0.9	0.05	0.17	0.04	14.5
蓄水期	1.1	3.40	1.40	0.40	18.5

4 与其它工程对比分析

表5为成屏、莲花、鱼背山、泽雅、白莲河、松山6个国内与本工程同级别坝高的混凝土面板堆石坝应力变形数值资料。

表5 国内同等高混凝土面板堆石坝应力变形数值

坝名	坝高/ 向下游最大	沉降量/	面板挠	顺坡向面
	m	水平位移/cm	度/cm	板应力/MPa
成屏	74.6	19.4	79.5	25.8
莲花	71.8	9.3	42.5	13.2
鱼背山	72.0	9.2	55.0	
泽雅	78.8	15.2	49.5	
白莲河	63.7	9.7	30.1	11.6
松山	80.8	6.1	24.8	11.3

从国内同级别坝高混凝土面板堆石坝应力变形数值资料表5可知:向下游最大水平位移在6.1~19.4 cm,沉降量在24.8~79.5 cm,面板挠度在11.3~25.8 cm,顺坡向面板应力在3.05~3.5 MPa。云南某水库混凝土面板堆石坝向下游最大水平位移18.9 cm、沉降量60.4 cm、面板挠度18.5 cm、顺坡向面板应力3.40 MPa,各指标均基本处于表5的6个国内同等高混凝土面板堆石坝应力变形数值资料范围内,可见云南某水库混凝土面板堆石坝应力变形数值成果基本合理。

5 结论

(1)通过国内6个同级别坝高混凝土面板堆石坝应力变形数值资料比较,本文所研究计算的云南某水库混凝土面板堆石坝坝体应力和变形均在合理的范围之内,该面板堆石坝蓄水后的安全运行是有保障的。

(2)高混凝土面板堆石坝的应力和沉降量较小,绝大部分荷载是经过垫层和过渡层由主堆石区

传入坝轴线以上的地基中,堆石区饱和抗压强度和干密度是合理的。坝壳料具有足够的变形模量及自由排水性能,孔隙率控制是合理的。因此高面板堆石坝设计是合理的。

(3)采用邓肯E-B模型进行高面板堆石坝三维有限元分析计算,可精准反映高面板堆石坝的实际受力情况,有效地模拟高混凝土面板堆石坝应力变形数值,对研究高面板堆石坝实际受力情况具有重要意义。今后进一步加强高混凝土面板堆石坝计算方法研究,更有效地解决高混凝土面板堆石坝受力复杂的课题,并在经济技术方面广泛地应用。

参考文献:

- [1] 沈婷,李国英. 超高面板堆石坝混凝土面板应力状态影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9):1345-1349.
- [2] Goodman R E. 溢流混凝土面板堆石坝结构设计研究[D]. 南京:河海大学, 2002.
- [3] 洪振国. 云南省某引水工程穿山隧洞间大流量倒虹吸方案选择[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8):120-123+119.
- [4] 洪振国. 沉沙池分时段泥沙沉降率计算研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6):158-162.
- [5] 洪振国. 调压井结构内力计算研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4):177-182.
- [6] 方维凤. 混凝土面板堆石坝流变研究[D]. 南京:河海大学, 2003.
- [7] 乔吉平,王艳洲. 混凝土面板堆石坝三维有限元静力分析[J]. 山西建筑, 2013, 39(14):208-210.
- [8] 索丽生,刘宁. 水工设计手册[M]. (第2版第1卷). 北京:中国水利水电出版社, 2011.
- [9] 史振华. 基于退火算法的面板堆石坝参数反演及三维有限元分析[D]. 南京:河海大学, 2008.
- [10] 王帅. 复杂加载条件下高面板坝应力变形有限元分析[J]. 广东水利水电, 2014(7):4-7.
- [11] 方国宝. 面板堆石坝堆石体湿化变形分析方法研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [12] 苏桐麟. 软岩料填筑混凝土面板堆石坝的应力变形及稳定分析[D]. 西安:西安理工大学, 2011.
- [13] 韩艳丽. 面板堆石坝高趾墙应力变形及其稳定研究[D]. 西安:西安理工大学, 2011.
- [14] 梁军. 高面板堆石坝流变特性研究[D]. 南京:河海大学, 2003.
- [15] 鞠石泉. 面板堆石坝坝体变形监控模型研究[D]. 南京:河海大学, 2005.