

不同围压公式对双江口心墙堆石坝应力应变计算的影响

李 榕,张建海,纪 亮

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065)

摘要 结合双江口高心墙堆石坝(坝高 314 m)工程实际,运用三维静力非线性有限元法,基于邓肯-张非线性弹性模型,对 3 种不同侧向围压计算方案分别模拟计算了双江口高心墙坝坝体的变位与应力,研究不同围压计算方案对坝体受力变形的影响。计算结果表明:侧向压力越大,坝体沉降以及坝体变位越小,不同围压方案对坝体主应力影响微弱,主应力值主要由坝体自重决定;各方案下双江口堆石坝坝体应力水平分布规律一致,量值变化不明显。

关键词 围压 有限元法 心墙堆石坝 应力 坝体变位 双江口水电站

中图分类号:TV641.4⁺1 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2010)S1-0072-03

心墙堆石坝计算中所用的本构模型大都由常规三轴试验导出^[1],将邓肯-张模型推广至三维时,侧向围压的取值没有二维那样清晰明确的定义,一些文献^[2-5]在可能的条件下对邓肯-张模型进行了改造和改进,使其计算结果更接近工程实际,不同围压取值公式对堆石坝的变位和应力计算会产生多大的影响是一个值得研究的问题。

本文结合双江口高心墙堆石坝工程实际,运用三维静力非线性有限元法,基于邓肯-张非线性弹性模型对 3 种不同侧向围压计算方案进行探讨。方案 1: $p_1=(\sigma_2+\sigma_3)/2$ (基准方案);方案 2: $p_2=(2\sigma_1+5\sigma_2+5\sigma_3)/12$;方案 3: $p_3=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$ 。分别模拟计算双江口高心墙坝坝体的变位与应力,研究不同围压计算方案对坝体受力变形的影响。

1 工程概况

双江口水电站是大渡河流域水电梯级开发的上游控制性水库,是大渡河流域水电梯级开发的关键性工程之一。电站水库正常蓄水位为 2 500 m,对应的库容约为 27.32 亿 m³。

该大坝建基面高程为 2 196 m,坝顶高程为 2 510 m,坝顶宽 16 m,上游坝坡为 1:2.0,下游坝坡为 1:1.9;防渗心墙顶宽 4 m,上下游坡均为 1:0.3,心墙上下游分别设 2 层反滤层,上游 2 层反滤层水平厚度均为 4 m,下游 2 层反滤层水平厚度均为 6 m。上下游反滤层与坝体堆石之间设置过渡区,见图 1。

双江口心墙堆石坝最大坝高 314 m,对其进行计算分析研究,可以为我国高土石坝的建设设计提供

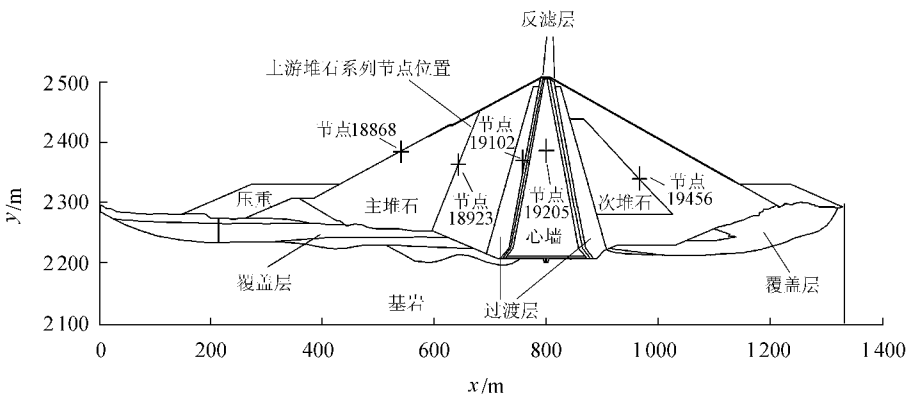


图 1 坝体材料分区与特征节点位置

重要的参考依据。

2 计算模型及参数

2.1 计算模型和工况

三维网格图见图 2。模型沿心墙坝轴线上下游各取 800.0 m,即顺河向 x 方向截取 1 600 m 横河向总长度为 1 678.68 m ;铅直向由高程 2 000 m 取至地表自由面。三维有限元网格共计剖分 34 280 个节点和 34 112 个单元。

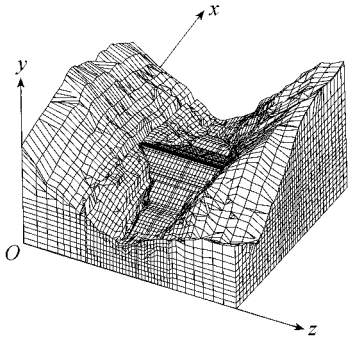


图 2 大坝三维网格图

本文计算分析的工况 以竣工期为例,分级填筑至坝顶 2 510 m,不考虑蓄水,模拟施工过程中 3 种围压公式对应力应变计算的影响。

2.2 材料参数与计算方法

计算采用的材料参数见表 1,由现场对材料进行三轴实验得出。

本次三维静力有限元分析时,坝基和覆盖层作为一次加载,只计入初始应力场,考虑到上游围堰先期填筑,将围堰由下至上分 3 级填筑,坝体由下至上(2 196.0 ~ 2 510.0 m 高程)分为 20 层填筑。

计算程序采用中点增量法模拟每层填筑。

3 计算成果分析

3.1 基准方案坝体应力应变特征

本方案按照侧向围压公式 $p = (\sigma_2 + \sigma_3)/2$ 进行坝体变位与应力分析,以河床段典型剖面 0 + 380 为例,讨论坝体变位与应力的分布规律。

3.1.1 坝体位移

图 3 ~ 4 为剖面 0 + 380 顺河向位移 U_x 与竖向

位移 U_y 分布图。

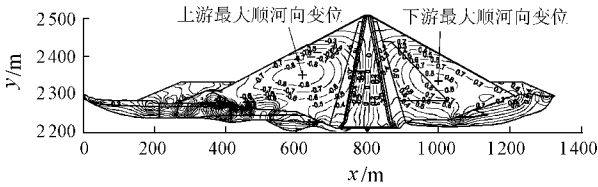


图 3 剖面 0 + 380 顺河向位移 U_x 等值线(单位 :m)

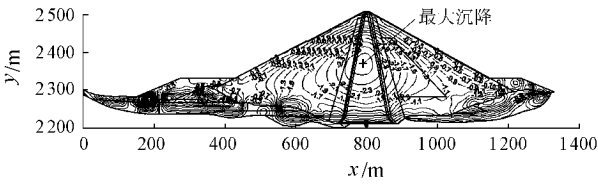


图 4 剖面 0 + 380 竖向位移 U_y 等值线(单位 :m)

a. 0 + 380 剖面的最大沉降量发生在心墙中轴线上,距坝底约 1/3 ~ 1/2 坝高范围,坝高增加,填筑量增加,则沉降增大,其中坝体最大沉降量约为 - 2.805 m(占坝高的 0.893%)。

b. 河床坝段顺河向水平变位分布规律为坝轴线以上区域一般向上游变位,坝轴线以下区域则向下游变位。上游堆石区坝体顺河向变位最大值为 - 0.888 m,发生在大约 2 350 m 高程处 ;下游堆石区顺河向变位最大值约为 0.821 m,发生在大约 2 316 m 高程处。

3.1.2 坝体应力

图 5 ~ 6 为剖面 0 + 380 主应力等值线。

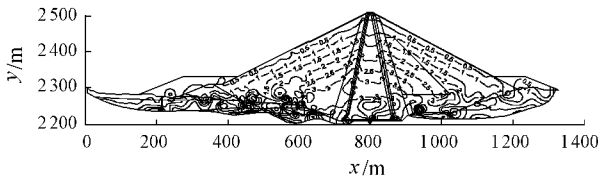


图 5 剖面 0 + 380 大主应力 σ_1 等值线(单位 :MPa)

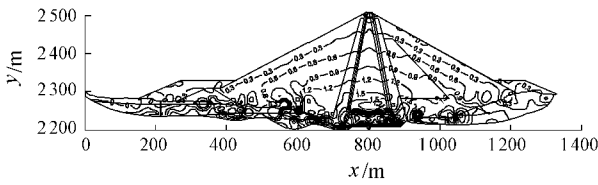


图 6 剖面 0 + 380 小主应力 σ_3 等值线(单位 :MPa)

表 1 坝体材料参数

材料部位	干密度/ (t·m ⁻³)	φ_0 / (°)	$\Delta\varphi$ / (°)	c / (t·m ⁻²)	R_t	K	n	K_{ur}	K_b	m
覆盖层	2.06	39.0		1.7	0.81	1 050	0.21	2 100	519	0.25
围堰及压重	2.07	35.0		0.0	0.74	800	0.27	1 600	510	0.26
高塑性黏土	1.67	18.3		4.6	0.87	270	0.47	550	180	0.31
心墙掺砾土	2.10	31.0		3.5	0.88	447	0.51	900	255	0.51
反滤层	2.00	42.7	3.8	0.0	0.72	1 141	0.20	2 200	423	0.23
过渡层	2.09	47.3	6.4	0.0	0.79	960	0.25	2 000	357	0.34
堆石料	2.12	41.8	3.0	0.0	0.71	1 050	0.25	2 100	500	0.25
上下游砌石护坡	2.12	41.8	3.0	0.0	0.71	1 050	0.25	2 100	500	0.25

a. 0 + 380 剖面上下游坝壳浅部大主应力值接近自重应力,心墙内存在一定拱效应^[6],主应力关于纵轴线基本呈对称分布。过渡层大主应力极值为 3.5 MPa 左右,心墙内大主应力极值为 3.6 MPa,下游堆石区大主应力最大值为 3.0 MPa。

b. 小主应力与大主应力比较,其分布较为平顺。上游堆石区小主应力值为 0.2 ~ 1.2 MPa,上游过渡层小主应力值为 0.2 ~ 1.4 MPa,心墙内小主应力值为 0.2 ~ 1.5 MPa。在心墙内均未发现拉应力。

3.1.3 应力水平

如图 7 所示河床 0 + 380 剖面坝体上游堆石区应力水平为 0.45 ~ 0.65,上下游过渡层应力水平为 0.45 ~ 0.55,心墙应力水平约为 0.5 ~ 0.6,下游堆石区应力水平为 0.35 ~ 0.65。上下游堆石区应力水平较大值出现在岸坡浅表部区域。

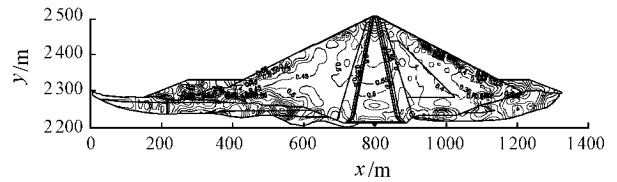


图 7 剖面 0 + 380 应力水平等值线

3.2 不同围压方案对坝体变位的影响

a. 方案 2、方案 3 大坝的沉降特性与基准方案基本相同,但因方案 2、方案 3 的围压比基准方案大,使得坝体材料颗粒间的相互作用增大。

从图 8 中可以看出,不同计算方案下坝体上游堆石系列节点(位置见图 2)的沉降分布特征基本相同:呈现中间大两头小的特点,沉降最大值均出现在坝高 1/3 ~ 1/2 处。沉降极值基准方案最大,方案 2 次之,方案 3 最小。3 个方案的堆石沉降最大值均在高程 2336 m 的节点处,该节点基准方案沉降量为 1.847 m。方案 2 沉降量为 1.701 m,比基准方案减小 7.9%。方案 3 沉降量为 1.590 m,比基准方案减小 13.9%。

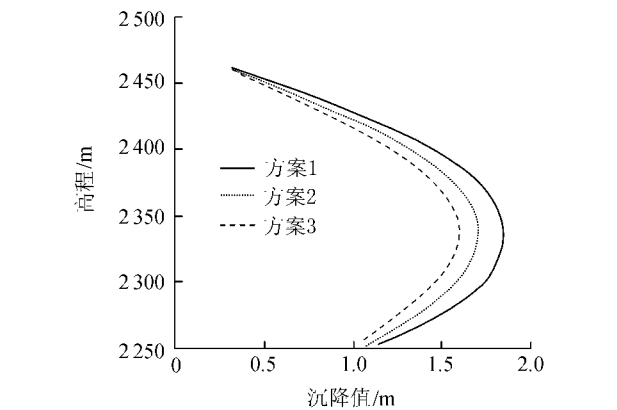


图 8 各方案上游堆石系列节点沉降曲线

b. 如图 9,不同侧向围压计算方案坝体顺河向变位的规律一致,上游坝体向上游变位,下游坝体向下游变位。坝体心墙中心部位顺河向变位值较小,远离心墙中心向上下游延伸区域部位顺河向变位值逐渐增大。

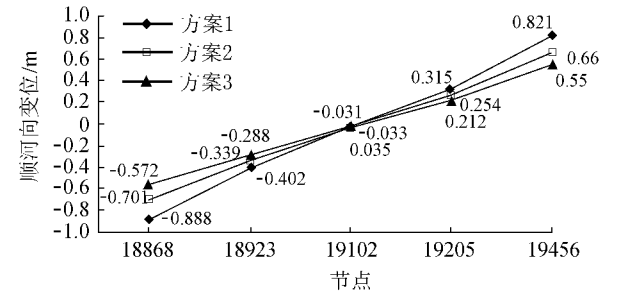


图 9 各方案坝体特征节点顺河向变位

不同侧向围压计算方案坝体顺河向变位有所差异,基准方案由于侧向围压值较小,坝体更易发生形变,故方案 1 坝体顺河向变位最大,方案 3 侧向围压大,坝体颗粒间作用最大,不易发生形变,故方案 3 坝体顺河向变位最小,方案 2 侧向围压值介于基准方案和方案 3 之间,故方案 2 坝体顺河向变位介于两者之间。

3.3 不同围压方案对坝体应力的影响

a. 如图 10 所示,各方案坝体上游堆石大主应力值曲线相互缠绕。在坝体中上部高程,各方案大主应力值变化较小,在坝体底部高程,由于应力集中现象的扰动,各方案大主应力值有突变,但各方案大主应力值始终围绕一条直线上下浮动。这是因为各方案大主应力主要受坝体自重影响,而不同侧向围压计算方案围压不同,自重不变,大主应力值变化微弱。

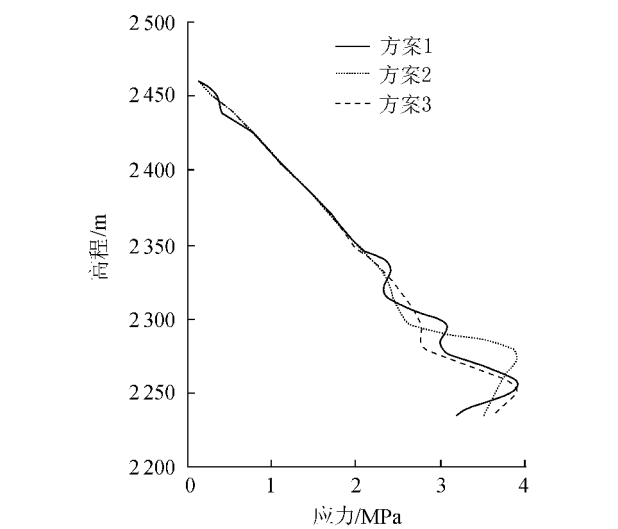


图 10 各方案坝体上游堆石系列节点大主应力曲线

b. 各方案小主应力值相近,随着高程的降低而增大,说明小主应力值主要受自重影响。

(下转第 78 页)

别为 2.2% 和 4.1% ;玄武岩纤维高强砂浆、聚丙烯纤维高强砂浆、高强砂浆其次 聚丙烯纤维高强砂浆及玄武岩纤维高强砂浆具有良好的抗渗性能,1.5 MPa 水压下的渗水高度分别为 1.0 mm 及 1.5 mm,表明加入聚丙烯纤维与玄武岩纤维可以有效地改善砂浆的耐久性能。

参考文献：

[1] 徐斌. 硅粉砂浆在修补船闸闸室墙的应用 [J]. 水运工程,2003,10 52-54.
[2] FOWLER D W. Polymer in concrete : a vision for the 21th century [J]. Cement and Concrete Composites,1999,21 (5/6) : 449-452.
[3] CHEN Pu-woei, FU Xu-li, CHONG D D L. Improving the

bonding between old and new concrete by adding carbon fibers to the concrete [J]. Cement and Concrete Research,1995,25 (3) 491-496.
[4] 王茹. 聚合物改性水泥砂浆性能及机理研究 [R]. 上海：同济大学,2005.
[5] 胡显奇,申屠年. 连续玄武岩纤维在军工及民用领域的应用 [J]. 高科技纤维与应用,2005,6(30) 7-13.
[6] 胡显奇,益锋. 玄武岩连续纤维及其复合材料 [J]. 高科技纤维与应用,2004(2) :1-5.
[7] 王鲲鹏,张伟. 玄武岩纤维的性能与应用 [J]. 建筑技术与应用,2002(4) 17-18.
[8] 支栓喜,尚许阁,贺科志. 新型水工抗冲磨护面材料的研制与应用 [J]. 四川水力发电,1995(12) 83-87.
(收稿日期 2009-06-08 编辑 骆 超)

(上接第 74 页)

3.4 不同围压方案对坝体应力水平的影响

a. 方案 2 河床 0+380 剖面坝体上游堆石区应力水平值为 0.4~0.6,上下游过渡层应力水平值为 0.4~0.5,心墙应力水平值约为 0.45~0.55,下游堆石区应力水平值为 0.3~0.6。上下游堆石区应力水平值较大值出现在岸坡浅表部区域。方案 3 坝体应力水平值比方案 2 稍小,分布规律基本一致。

b. 不同围压计算方案对双江口心墙堆石坝应力水平影响不大,河床坝段上游堆石、心墙内应力水平从方案 1 到方案 3 稍有减小的趋势,上下游过渡层、下游堆石应力水平基本不变。

4 结 论

a. 不同围压计算方案下双江口心墙堆石坝坝体变形规律与主应力分布规律一致,但是坝体变形与应力随着不同的侧向围压计算方案而有差异。

b. 不同侧向围压计算方案下双江口心墙堆石坝坝体变位值变化明显,基准方案最大沉降为 2.805 m,方案 2 最大沉降为 2.571 m,比基准方案减小 8.34% 方案 3 最大沉降为 2.386 m,比基准方案减小 14.9%。计算结果表明,侧向压力越大,坝体沉降以及坝体变位越小。

c. 不同侧向围压下双江口心墙堆石坝坝体大主应力值变化微弱,不同侧向围压计算方案下各节点大主应力值没有增大或减小的规律,而是围绕某条曲线上下波动,说明大主应力值主要由坝体自重决定,不同侧向围压计算方案对坝体大主应力影响不大。

d. 方案 1、方案 2、方案 3 的双江口堆石坝坝体小主应力值依次递减,与坝体变位相比小主应力递

减量值较小 心墙中心面特征节点基准方案小主应力值为 0.891 MPa 方案 2 小主应力值为 0.861 MPa,比基准方案减小 3.37% ;方案 3 小主应力值为 0.830 MPa,比基准方案减小 6.85%。

e. 不同侧向围压计算方案对双江口坝体的应力水平影响不大,各方案下双江口堆石坝坝体应力水平分布规律一致,量值变化不明显。

参考文献：

[1] 陈兴华. 脆性材料结构模型试验 [M]. 北京 水利电力出版社,1984.
[2] 路程,李跃明,陈翰. 考虑中主应力的邓肯模型 [J]. 西安工业学院学报,1992,12(3) 13-19.
[3] 邹金锋,罗恒,李亮,等. 考虑中主应力时土体劈裂灌浆力学机制的大变形分析 [J]. 岩土力学,2008,29(9) 2515-2520.
[4] 周小平,张永兴,周可善. 中低围压下细观非均匀性岩石本构关系研究 [J]. 岩土工程学报,2003,25(5) 606-610.
[5] 陈忠辉,谭国煊,杨文柱. 不同围压作用下岩石损伤破坏的数值模拟 [J]. 岩土工程学报,2001,23(5) 576-580.
[6] 张继宝,陈五一,李永红,等. 双江口土石坝心墙拱效应分析 [J]. 岩石力学,2008,29(增) 185-188.
(收稿日期 2010-06-03 编辑 高建群)

