

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.05.006

300 m 级弧形直心墙超高堆石坝应力变形分析

褚福永^{1 2} 朱俊高^{1 2} 张富有¹ 李永红³

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098 ;2.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098 ;
3.中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,四川 成都 610072)

摘要 :对某 300 m 级超高直心墙堆石坝及作为比较方案的弧形直心墙堆石坝进行了三维有限元应力变形计算.对 2 种坝型在蓄水期心墙的应力、变形进行了比较分析.结果表明,蓄水期,弧形心墙堆石坝比直心墙堆石坝的水平位移和沉降略小,弧形心墙坝的心墙拱效应较弱,其抗水力劈裂能力优于直心墙堆石坝,弧形心墙堆石坝坝肩处的应力水平小于直心墙堆石坝的相应值,减少了坝肩处心墙拉坏或剪坏的可能性.

关键词 :堆石坝 ;弧形心墙 ;三维有限元 ;应力变形

中图分类号 :TV314 文献标志码 :A 文章编号 :1000-1980(2011)05-0506-05

堆石坝是一种重要坝型,能适应较复杂的地质条件.在深覆盖层等较差地质条件上建坝,堆石坝常常是较有竞争力的坝型,有时甚至是唯一的选择.随着筑坝技术的发展,国内外已有很多超过 200 m 的高堆石坝,已建的有墨西哥的奇森坝 263 m,加拿大麦卡坝 243 m,哥伦比亚瓜维奥坝 245 m.目前,堆石坝正向着 300 m 级高度发展,如前苏联罗贡坝 335 m,前苏联努列克坝 300 m 等^[1].

近 20 年来,我国的筑坝技术也获得了飞速的发展,国内已建成坝高 100 m 以上的堆石坝 17 座,另有 24 座超过 100 m 以上的堆石坝正在建设或设计论证中^[2],其中包括位于大渡河上的双江口水电站心墙堆石坝,最大坝高达 314 m,位于雅砻江上的两河口水电站心墙堆石坝,最大坝高达 293 m,位于澜沧江下游的糯扎渡水电站,最大坝高 261.5 m.

国外 300 m 级堆石坝所积累的成功经验很有限,200 m 级堆石坝设计相对成熟些,现有的计算理论、方法能否适用于 300 m 级也没有得到验证.因此,建设 300 m 级高堆石坝,还存在关键性技术问题需要深入研究,如变形协调问题、水力劈裂问题,减轻高心墙坝的应力拱效应、增强心墙抗裂能力的方法等^[3-12].

对某超高心墙堆石坝,成都勘测设计研究院建议以弧形心墙堆石坝型作为比较方案.本文对该超高堆石坝进行直心墙和弧形心墙 2 种坝型的三维有限元应力变形计算分析,为类似工程提供参考.

1 计算模型与计算参数

所谓弧形心墙,即心墙坝轴线为弧形,类似于拱坝.但是,由于心墙为土质或掺砾黏土,竖直方向不宜弯曲,因此,采用图 1(a)所示的剖面,作为比较方案,直心墙堆石坝剖面如图 1(b)所示.

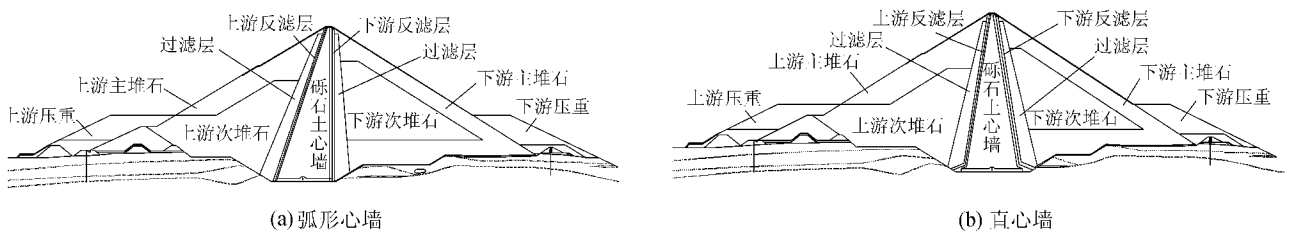


图 1 典型断面及材料分区

Fig. 1 Typical sections and material zoning

某 300 m 级高心墙堆石坝最大坝高 314 m,坝址河床覆盖层最大厚度约 68 m.本文分别对 2 种不同心墙坝型的堆石坝进行了计算,即弧形心墙堆石坝和直心墙堆石坝.2 种坝的三维有限元网格见图 2.

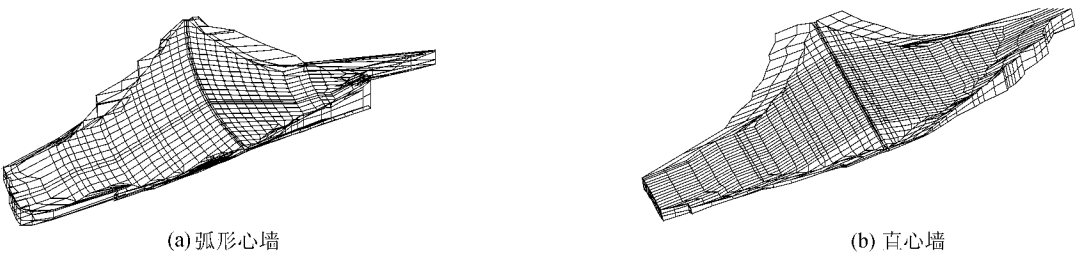


图 2 三维有限元网格

Fig. 2 Three-dimensional finite element mesh

三维有限元应力变形计算中,考虑了坝体分期填筑及蓄水的过程.坝体堆石料采用邓肯-张 $E-v$ 非线性弹性模型,计算采用的模型参数如表 1 所示.

三维有限元应力变形计算分 25 级加荷,对施工及先期蓄水逐级加荷过程进行模拟.其中,填筑和蓄水关系如下:(a)坝体填筑高程 2 385 m,蓄水至 2 350 m;(b)坝体填筑高程 2 460 m,蓄水至 2 425 m;(c)坝体填筑高程 2 480 m,蓄水至 2 450 m;(d)坝体填筑高程 2 510 m,蓄水至 2 500 m.

计算考虑了蓄水引起的坝壳湿化变形,采用双线法进行计算.湿化后堆石料的邓肯-张参数 K 比表 1 中的数值减小 15%,摩擦角小 2° ,其他参数同表 1.

表 1 邓肯-张 $E-v$ 模型计算参数

Table 1 Parameters of Duncan-Chang's $E-v$ model

材料	R_f	K	n	G	F	D	K_{ur}	$\varphi/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
覆盖层③	0.66	900	0.32	0.30	0.03	3	1 760	42	4	0	1.40
覆盖层②	0.68	780	0.34	0.32	0.03	3	1 560	38	0	10	1.38
覆盖层①	0.65	1 050	0.30	0.32	0.01	4	1 900	44	5	0	1.42
围堰及压重	0.74	900	0.33	0.32	0.01	5	1 800	43	6	0	2.30
高塑性黏土	0.86	200	0.26	0.40	0.01	2	300	20	0	20	1.80
心墙掺砾土	0.70	700	0.34	0.36	0.02	4	1 600	35	0	25	2.31
反滤层	0.72	900	0.32	0.36	0.04	5	1 500	38	0	10	2.28
过渡层	0.74	1 000	0.33	0.32	0.01	4	1 800	44	0	0	2.30
上下游主堆石	0.80	1 200	0.32	0.31	0.02	3	2 000	50	9	0	2.30
上下游次堆石	0.80	900	0.33	0.32	0.01	3	1 800	46	10	0	2.28

2 计算结果分析

对弧形心墙和直心墙 2 种坝型的堆石坝进行了三维有限元应力变形计算,其变形最大值及相关应力统计值见表 2.由表 2 可以看出,2 种坝的应力变形性状有一定程度的差异,本文重点分析心墙应力变形性状.

表 2 三维有限元应力变形计算的蓄水后大坝主要应力变形值

Table 2 Calculated stress and deformation after water storage using three-dimensional finite element method

心墙形式	指向右岸的 坝轴向位移/cm	指向左岸的 坝轴向位移/cm	坝体向下游最大 水平位移/cm	坝体向上游最大 水平位移/cm	坝体最大 沉降量/cm	$\frac{\sigma_z}{\rho gh}$	$\bar{\sigma}_x/\text{MPa}$	$\bar{S}$
弧形心墙	37.69	-29.17	138.38	-61.79	-229.46	0.826	1.877	0.394
直心墙	46.33	-39.16	160.55	-68.30	-235.60	0.814	1.843	0.424

注: $\sigma_z/\rho gh$ 为 1/3~2/3 坝高范围内,河谷段心墙各单元的竖向应力与自重应力(ρgh)之比值的平均值; $\bar{\sigma}_x$ 为(坝轴向)上 1/3~2/3 坝高范围内,河谷段心墙各单元的应力平均值; $\bar{S}$ 为全部心墙单元的平均应力水平.

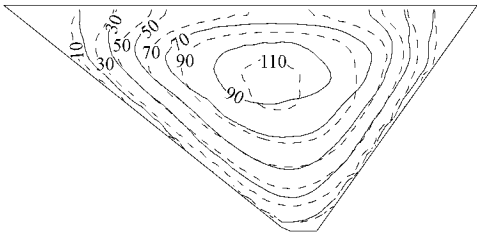
2.1 心墙变形性状

图 3 和图 4 分别为弧形心墙和直心墙堆石坝的蓄水期心墙纵剖面沉降、顺河向水平位移及坝轴向水平位移等值线图(虚线代表直心墙堆石坝,实线代表弧形心墙堆石坝).由图 3 和图 4 可以看出,2 种心墙变形分布规律基本相同.

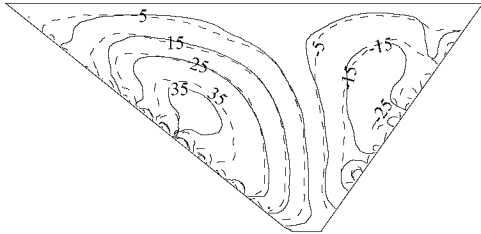
从图 3 可以看出,2 种堆石坝心墙沉降均在 1/2 坝高附近的河谷部位为最大,其中,直心墙堆石坝心墙最

大沉降量为 235.6 cm,占坝高的 0.75%.弧形心墙堆石坝心墙最大沉降量为 229.46 cm,占坝高的 0.73%.最大横断面上,直心墙的面积比弧形心墙的面积大 25%,这可能是直心墙堆石坝沉降较大的主要原因.

图 4(a)显示 2 种心墙堆石坝的顺河向水平位移左右基本呈对称性状,心墙内的顺河向水平位移由于水荷载的作用,呈现向下游的规律.弧形心墙堆石坝顺河向水平位移的最大值位置比直心墙堆石坝略微靠上.由表 3 可知,直心墙堆石坝(下游坝壳)向下游及(上游坝壳)向上游的水平位移最大值均比弧形心墙的大,增幅分别为 16.02%和 10.54%,心墙拱效应的强弱差别可能是 2 种坝顺河向水平位移之间差别的主要原因.



(a) 顺河向



(b) 轴向

图 4 蓄水期心墙纵剖面水平位移等值线(单位:cm)

Fig. 4 Contour of longitudinal horizontal displacement of core wall in water storage period(units :cm)

从图 4(b)可以看出,受坝体左岸坝基比右岸坡度稍缓影响,坝轴线方向水平位移左岸部分比右岸大.弧形心墙堆石坝指向左岸和指向右岸的水平位移最大值分别为 29.17 cm 和 37.69 cm,比直心墙堆石坝的相应值减少了 9.99 cm 和 8.64 cm.

2.2 心墙应力性状

图 5~7 给出了 2 种心墙坝 x 方向(坝轴向)上应力 σ_x 纵剖面的大、小主应力及应力水平等值线图(虚线代表直心墙堆石坝,实线代表弧形心墙堆石坝).从图 5 和图 6 可以看出,蓄水期 2 种坝心墙纵剖面的大、小主应力,坝轴向应力的分布规律基本相同,看不出明显差异,均沿高程均匀减小,主应力的最大值在河谷底部.2 种坝的心墙大主应力大致相同,小主应力值和坝轴向应力值有差异,弧形心墙堆石坝的小主应力值和坝轴向应力值比直心墙堆石坝的略大.

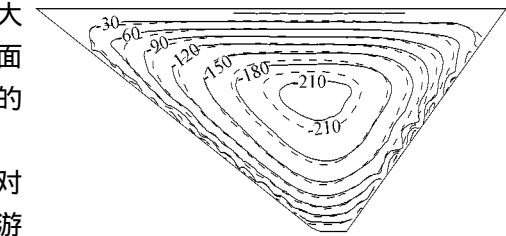


图 3 蓄水期心墙纵剖面沉降等值线(单位:cm)

Fig. 3 Contour of longitudinal settlement of core wall in water storage period(units :cm)

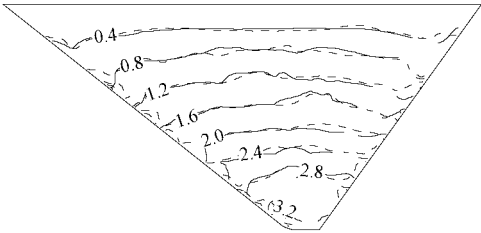
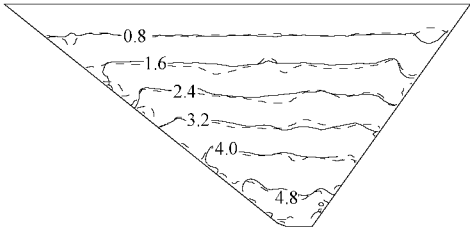
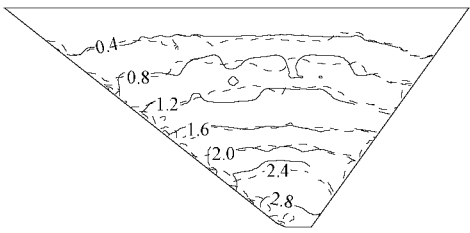


图 5 蓄水期心墙纵剖面 σ_x 等值线(单位:MPa)

Fig. 5 Contour of longitudinal σ_x of core wall in water storage period(units :MPa)



(a) 大主应力



(b) 小主应力

图 6 蓄水期心墙纵剖面应力等值线(单位:MPa)

Fig. 6 Contour of longitudinal principal stress of core wall in water storage period(units :MPa)

由表 2 可知,弧形心墙堆石坝和直心墙堆石坝的心墙坝轴向 $1/3 \sim 2/3$ 坝高范围内,河谷段心墙各单元的应力平均值 $\bar{\sigma}_x$ 分别为 1.877 MPa 和 1.843 MPa,弧形心墙堆石坝的 $\bar{\sigma}_x$ 值比直心墙堆石坝的大 1.84%,可以看出,弧形心墙有一定的拱作用.这里的拱作用是指由于坝轴线为弧形,心墙形成以岸坡为拱脚的类似于拱坝的力的传递作用,与后面提及的心墙拱效应是完全不同的概念.

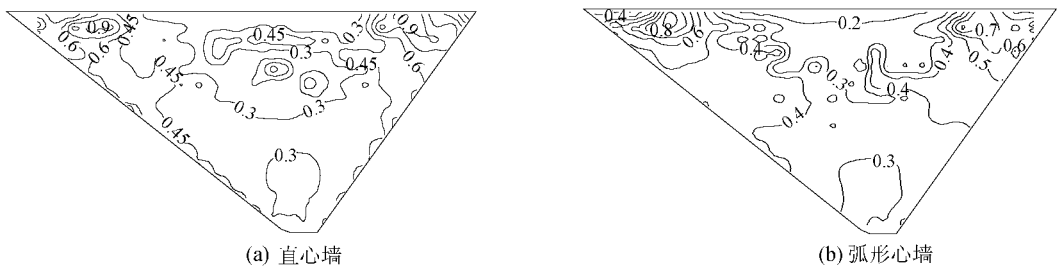


图 7 蓄水期心墙纵剖面应力水平等值线(单位 MPa)

Fig. 7 Contour of longitudinal stress of core wall in water storage period(units MPa)

图 7 为 2 种堆石坝的心墙纵剖面主应力水平等值线. 2 种心墙内应力水平均不高,但两坝肩处的应力水平较高,弧形心墙堆石坝的值比直心墙堆石坝的值略小,减小了该处剪切破坏或拉坏的可能性.由表 2 可知,弧形心墙与直心墙蓄水期应力水平的平均值分别为 0.394 和 0.424. 可以看出,弧形心墙堆石坝的心墙应力水平明显小于直心墙堆石坝的相应值.

心墙拱效应是造成高心墙坝的心墙水力劈裂、裂缝等的主要因素.它是特指由于心墙比坝壳软弱,心墙沉降大,坝壳沉降小,心墙部分自重传递到坝壳,以至于心墙内部应力减小,坝壳应力增大的现象.为了对比分析 2 种坝心墙拱效应的强弱,图 8 给出了最大断面蓄水期的大主应力等值线.由图 8 可以看出,弧形心墙堆石坝和直心墙堆石坝均有一定的心墙拱效应.但是,在心墙上游面部位,弧形心墙堆石坝的心墙拱效应比直心墙堆石坝的轻.表 2 的 $\frac{\sigma_z}{\rho gh}$ 值也体现了 2 种坝心墙拱效应的差别,弧形心墙的 $\frac{\sigma_z}{\rho gh}$ 值大于直心墙的相应值,增幅为 1.47%,说明弧形心墙的拱效应相对较弱,对心墙抗水力劈裂有利.

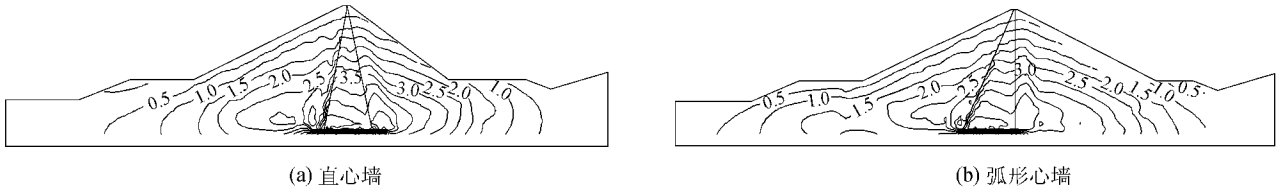


图 8 蓄水期 0+405 断面最大主应力等值线(单位 MPa)

Fig. 8 Contours of maximum principal stress of 0+405 section in water storage period(units MPa)

水力劈裂是高坝设计中非常重要的问题之一.利用有限元计算结果,将心墙单元总应力与对应高程处的上游水压力进行比较,来判定是否发生水力劈裂是常用的方法.因此,本文采用文献[12]中的总应力法判断水力劈裂的发生.该方法用心墙外水压力是否超过心墙上游处土中的中主应力来判断水力劈裂发生的可能性,同时考虑心墙土抗拉强度.

从心墙上游面各单元的 $u/(\sigma_z + \sigma_t)$ 为心墙上游面水压力, σ_z 为对应高程处心墙单元的竖向应力, σ_t 为心墙土的抗拉强度(这里近似取为黏聚力)发现,直心墙的 $u/(\sigma_z + \sigma_t)$ 比值均在 0.8 以下,而弧形心墙的 $u/(\sigma_z + \sigma_t)$ 比值在 0.7 以下.笔者还求出了直心墙与弧形心墙上游面 $u/(\sigma_z + \sigma_t)$ 的平均值,分别为 0.441 和 0.434.可以认为,弧形心墙的抗水力劈裂能力强于直心墙.

3 结 论

- a. 弧形心墙堆石坝的水平位移和沉降量比直心墙堆石坝的相应值略小.
- b. 2 种坝均存在心墙拱效应,但弧形心墙堆石坝轴向应力平均值 $\overline{\sigma_x}$ 、小主应力平均值和 $\frac{\sigma_z}{\rho gh}$ 平均值均大于直心墙堆石坝的相应值,说明了弧形心墙的拱作用,其心墙拱效应比直心墙堆石坝的弱.
- c. 总应力法判断结果表明,弧形心墙抗水力劈裂能力优于直心墙.
- d. 蓄水期间 2 种坝的心墙整体应力水平不高,弧形心墙和直心墙平均应力水平分别为 0.394 和 0.424. 两坝肩处应力水平较高,弧形心墙堆石坝的值比直心墙的略小,减小了该处剪切破坏或拉坏的可能性.
- e. 总体上,弧形心墙堆石坝的受力变形性态优于直心墙堆石坝.

参考文献:

- [1] 王柏乐. 中国堆石坝工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] 张丙印, 于玉贞, 张建民. 高堆石坝的若干关键技术问题[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003: 163-186.
- [3] 卢廷浩, 汪荣大. 瀑布沟堆石坝心墙应力变形分析[J]. 河海大学学报, 1997, 25(4): 26-30. (LU Ting-hao, WANG Rong-da. Stress and deformation analysis of core wall for Pubugou soil and rock fill dam[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(4): 26-30. (in Chinese))
- [4] 朱俊高. 双江口心墙堆石坝静力三维有限元应力变形分析[R]. 南京: 河海大学, 2008.
- [5] SOROUSH A, ARAEI A A. Analysis of behaviour of a high rockfill[J]. Geotechnical Engineering, 2006, 159: 49-59.
- [6] 李国英, 王禄仕, 米占宽. 土质心墙堆石坝应力和变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1363-1369. (LI Guo-ying, WANG Lu-shi, MI Zhan-kuan. Research on stress-strain behaviour of soil core rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1363-1369. (in Chinese))
- [7] 李榕, 张建海, 纪亮. 不同围压公式对双江口心墙堆石坝应力应变计算的影响[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(增刊1): 72-77. (LI Rong, ZHANG Jian-hai, JI Liang. Different confining formulas effect on calculation of stress and deflection of Shuang Jiangkou core rock-fill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(Sup1): 72-77. (in Chinese))
- [8] LUIS E, VALLE J O. Shear stress and the hydraulic fracturing of earth dams soil[J]. Soils and Foundations, 1993, 33(3): 14-27.
- [9] 张丙印, 袁会娜, 孙逊. 糯扎渡高心墙堆石坝砾石土料变形参数反演分析[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 18-23. (ZHANG Bing-yin, YUAN Hui-na, SUN Xun. The back analysis of deformation parameters of core gravelly soil of the Nuozhadu high rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(3): 18-23. (in Chinese))
- [10] 徐晗, 汪元明, 程展林, 等. 深厚覆盖层300m级超高土质心墙坝应力变形特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 65-68. (XU Han, WANG Yuan-ming, CHENG Zhan-lin, et al. 3D stress and deformation characteristics of 300 m level high earth core dams with thick overburden layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup1): 65-68. (in Chinese))
- [11] 张继宝, 陈五一, 李永红, 等. 双江口堆石坝心墙拱效应分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 185-188. (ZHANG Ji-bao, CHEN Wu-yi, LI Yong-hong, et al. Analysis of core arching effect of Shuangjiangkou earth-rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup1): 185-188. (in Chinese))
- [12] 殷宗泽, 朱俊高, 袁俊平, 等. 心墙堆石坝的水力劈裂分析[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1348-1353. (YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao, YUAN Jun-ping, et al. Hydraulic fracture analysis of rock-fill dam with core wall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1348-1353. (in Chinese))

Stress and deformation analysis of 300 m-level high rockfill dams with arc and vertical cores

CHU Fu-yong^{1,2}, ZHU Jun-gao^{1,2}, ZHANG Fu-you¹, Li Yong-hong³

- (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geo-mechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Hydrochina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, China)

Abstract: The stress and deformation of a high rockfill dam with vertical core and with arc core is investigated by using three-dimensional finite element method. The stress and deformation of the two kinds of dams in the period of water storage is analyzed. The results show that the horizontal displacement and vertical displacement of the dam with arc core is slightly smaller than that of the rockfill dam with vertical core after the water storage. The arch effect of the dam with arc core is relatively weaker and its ability of resisting hydraulic fracturing is stronger than that of the dam with vertical core. The stress level of the arc core dam at the abutment is smaller than that of the vertical core dam, and this reduces the possibility of shear failure and tensile failure at the zone of abutment.

Key words: rockfill dam; arc core; three-dimensional finite element; stress and deformation