

中厚覆盖层上中低面板堆石坝应力变形分析

陈 飘¹, 邓成发², 刘正国³

(1. 浙江省水利水电工程质量与安全监督管理中心, 浙江 杭州 310009; 2. 浙江广川工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310020; 3. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要: 在中厚覆盖层上修建中低面板堆石坝目前较为普遍,其应力变形特性与深厚覆盖层上修建的高面板坝有较大差异,因此有必要进行研究。利用目前应用较为广泛的邓肯-张 E-B 模型,采用二维有限元分析法针对位于宽河谷中的双溪口面板堆石坝竣工期及蓄水期的堆石体及面板的应力变形特性进行研究。结果表明:相比竣工期,蓄水期坝体沉降、向下游的水平位移、大坝大小主应力、应力水平及面板挠度均有所增加,其中以面板挠度及大坝水平位移增加最为明显,挠度增加了 16.61 cm,水平位移增加约 1 倍,沉降增加幅度约为 8%,大、小主应力增加 10%~20%,应力水平增加约 50%。大坝在竣工期及蓄水期的应力及变形均在允许范围内,大坝运行正常。

关键词: 有限元; 面板堆石坝; 覆盖层; 挠度; 水平位移; 应力变形

中图分类号: TV641.4⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)05-0075-06

面板堆石坝由于其安全性、经济性及适应性良好等特点,深受坝工界的青睐,经常成为首选的比较坝型。据不完全统计,到 2011 年底中国已建、在建和拟建的混凝土面板堆石坝已达 305 座,其中坝高 100 m 及以上的高混凝土面板堆石坝有 94 座,其中已建成 48 座,在建 20 座,拟建 26 座^[1-2]。在诸多已建或在建的面板堆石坝中有相当一部分直接建造在覆盖层上^[3-5]。甘肃的九甸峡混凝土面板堆石坝是目前已建最高的深覆盖层上的混凝土面板堆石坝,坝高 136 m,覆盖层最大厚度 56 m。一些建基于深厚覆盖层上的 200 m 级高坝也正在建设或设计中。

对于在深厚覆盖层上建坝,国内广大科研院所进行了较为深入的研究。郭兴文等^[6]对覆盖层地基上面板堆石坝的结构进行了优化设计研究。沈婷等^[7]对混凝土趾板和基础的连接方式进行了深入研究。徐泽平等^[8]对深厚覆盖层上的面板堆石坝进行了离心模型试验研究。赵一新^[9]、王文娇^[10]对深厚覆盖层上的面板堆石坝进行了动力特性有限元分析。王平等^[11]对狭窄河谷中深厚覆盖层上高面板堆石坝进行了应力变形特性研究。邓刚等^[12]根据已建面板堆石坝的竣工后沉降变形规律和室内大型三轴流变试验结果,研究了狭窄河谷中面板坝的流变特性。本文就应用最为广泛的中厚覆盖层上中低面板堆石坝变形特性进行了有限元分析,研究面板堆石坝竣工期及蓄水期的堆石体及面板的变形特性,为同类工程提供参考。

1 工程概况

双溪口水库坝址位于浙江省余姚市姚江支流大隐溪上,是以供水、防洪为主,结合灌溉、发电等功能的二等综合水利工程。大坝坝型为混凝土面板堆石坝,坝顶高程为 70.00 m,防浪墙顶高程 71.20 m,最大坝高 52.10 m,坝顶宽 6.90 m,长 426.00 m,大坝上、下游坡坡比分别为 1:1.4 和 1:1.3,在下游 23.00,39.00 和

收稿日期: 2014-04-05

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201201043);浙江省水利厅科技计划项目(RC1327)

作者简介: 陈 飘(1975-),男,浙江温州人,高级工程师,硕士,主要从事水利水电工程质量、安全监督及招投标监管工作。E-mail: cp@zjwater.gov.cn

54.00 m 高程处,设置 3 级 3.00 m 宽的马道。坝基覆盖层厚 5.50 ~ 15.40 m,上部主要为砂砾石层,厚 3.00 ~ 7.40 m,下部为含泥砂砾石夹漂石层,厚 4.35 ~ 10.90 m。

工程于 2005-12-28 开工,2006-07-22 长 311 m 的防渗墙全部浇筑完成,2009-02-16 面板开始浇筑,4 月底面板浇筑完成。2012-06-29,工程完工。

2 二维静力非线性有限元分析

2.1 二维计算几何模型

双溪口水库河谷宽约 337 m,约为坝高的 6.5 倍,为典型宽河谷地形,该类地形也是目前中低面板堆石坝普遍采用的地形形式,其大坝变形具有平面应变特性,可采用二维非线性有限元法进行分析。

根据坝趾区地质条件和坝体分区特点,除河床砂砾石覆盖层和岸坡强风化基岩参与结构计算外,地基按刚性考虑。以河床典型剖面(坝 0+192 m)为基准,采用二维自动剖分程序剖分坝体单元,坝体单元划分为四边形四结点单元和少量过渡的三角形单元。单元总数为 472 个,其中面板与垫层间设置接触面单元 15 个,结点总数 507 个,剖分后的计算网格见图 1。

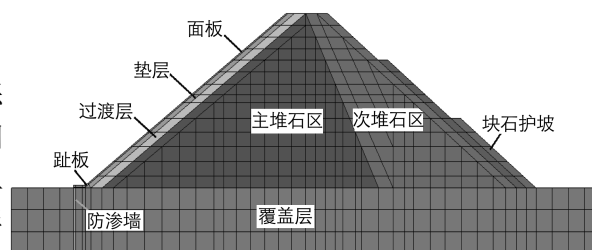


图 1 二维整体网格

Fig. 1 Two-dimensional grids

2.2 计算参数

各主要材料分区的邓肯 E-B 本构模型及接触面模型参数见表 1。混凝土面板、趾板及防渗墙采用线弹性模型,混凝土面板、趾板参数指标为:密度为 2.45 g/cm^3 ,弹性模量 20 GPa,泊松比 0.167;防渗墙指标为:密度 2.4 g/cm^3 ,弹性模量 20 GPa,泊松比 0.167。

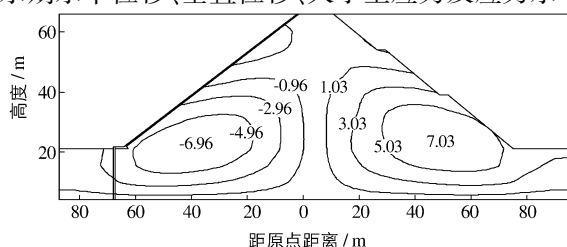
表 1 筑坝材料 E-B 模型参数

Tab. 1 E-B model parameters of damming material

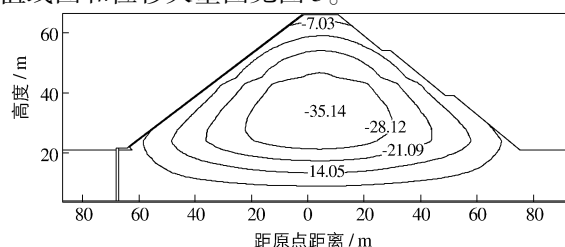
材料类型	$\rho_d /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\varphi_0 / ^\circ$	$\Delta\varphi / ^\circ$	R_f	K	n	K_b	m
垫层料	2.25	52.0	9.0	0.75	1 100	0.35	420	0.21
过渡料	2.22	51.0	8.0	0.75	980	0.28	380	0.20
主堆石料	2.20	55.0	10.0	0.83	970	0.30	350	0.19
次堆石料	2.05	52.0	13.0	0.78	790	0.40	330	0.22
砂砾料覆盖层	1.87	48.0	6.0	0.74	780	0.39	350	0.25
接触面	/	36.6	/	0.74	4 800	0.56	/	/

3 计算成果分析

0+192 m 计算剖面的竣工期水平位移、垂直位移、大小主应力及应力水平的等值线和位移矢量见图 2。蓄水期水平位移、垂直位移、大小主应力及应力水平的等值线图 and 位移矢量图见图 3。



(a) 水平位移等值线(单位: cm)



(b) 垂直位移等值线(单位: cm)

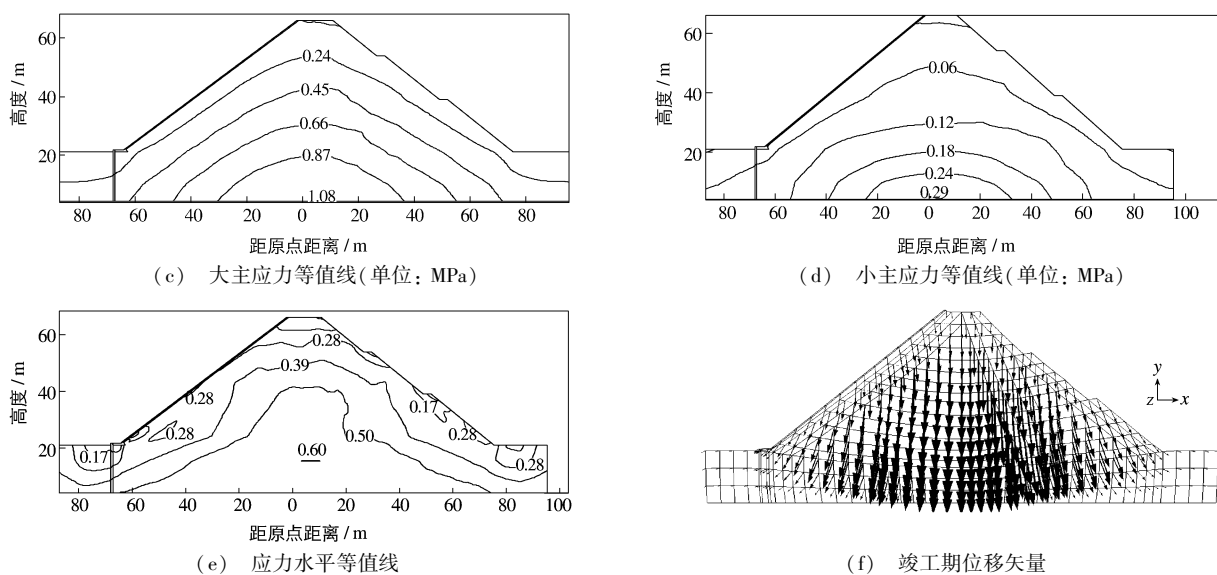


图2 竣工期坝体断面应力和位移变化

Fig. 2 Variations in stress and displacement of one section of the dam in completion period

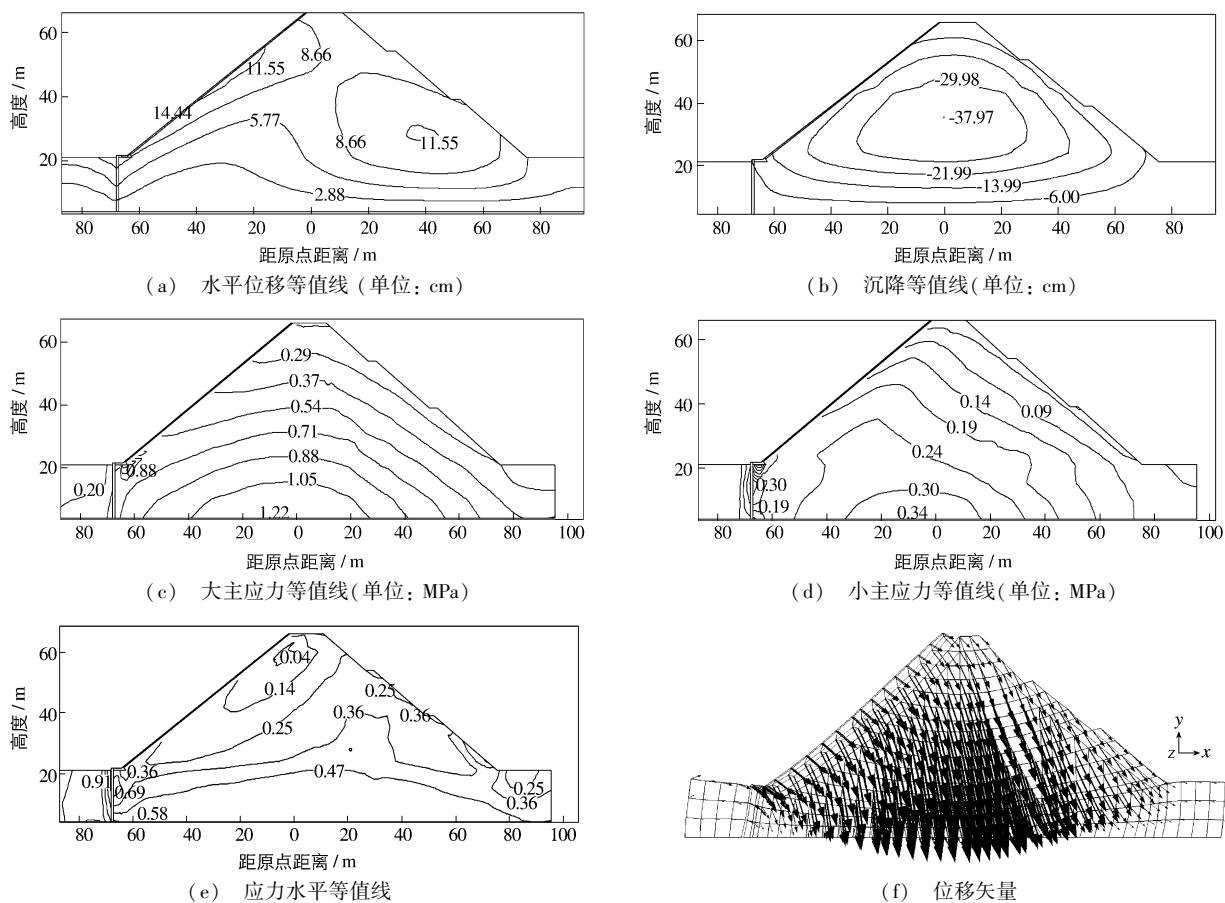


图3 蓄水期坝体断面应力和位移变化

Fig. 3 Variations in stress and displacement of one section of the dam during impoundment

3.1 堆石体变形分析

3.1.1 竣工期 由于施工期自重以及堆石料的泊松效应,坝体及覆盖层的水平位移变化规律大致以坝体中心为界,下游部分向下游移动,上游部分向上游移动。向上游位移最大值为 6.96 cm,位于上游主堆石区;向下游最大位移为 7.03 cm,位于下游次堆石区;坝体最大沉降出现在约 1/3 坝高的主堆石料内,其值为 35.14 cm,约为坝高(不含覆盖层)的 0.67%,由于堆石坝坐落在相对较软的覆盖层上,其沉降中心较一般建于基岩上的坝偏向下部。防渗墙在堆石作用下略向上游位移,最大水平位移为 3.55 cm。在自重作用下坝体的变形矢量方向为向下、向外。

3.1.2 正常蓄水期 蓄水期坝体受水压力的推动,整体向下游侧移动,向下游最大位移值为 14.44 cm,发生在坝体上游侧面板部位;在水荷载作用下,坝体的沉降量值较竣工期略有增加,增大 37.97 cm,约为坝高的 0.73%,沉降中心稍向上游移动。防渗墙向下游最大位移为 9.03 cm。在自重及水荷载综合作用下坝体的变形矢量方向为向下游移动。

3.2 堆石体应力及应力水平分析

3.2.1 竣工期 坝体堆石料内大、小主应力随深度的增加而增加,方向基本接近自重方向。坝体大主应力的最大值为 1.08 MPa,小主应力最大值为 0.29 MPa,两者均位于坝体底部中央的覆盖层内。

竣工期坝体的应力水平等值线基本平行与坝坡,个别单元最大应力水平为 0.6,主要发生在覆盖层内,不影响坝体的整体稳定性。

3.2.2 正常蓄水期 蓄水期大坝受水荷载的作用,大、小主应力线出现上抬并与面板相交,大主应力最大值为 1.22 MPa,小主应力最大值为 0.34 MPa。

蓄水期,随着水位的升高,应力水平发生了重分布,应力水平最大值 0.91,主要发生在上游覆盖层内,由于该覆盖层内摩擦角相对较小,该处应力水平较高且较为集中。蓄水后防渗墙上游覆盖层出现高应力水平区,最大值为 0.91,该区类似于主动土压力区,防渗墙下游应力水平亦有提高,由竣工期的 0.36 增加至 0.69,该区类似于被动土压力区,由应力水平分布图 3(e)可知,虽然蓄水导致两区应力水平增大,但坝体各区依然稳定,未出现应力水平接近于 1.0 的破坏区域。

3.3 面板变形分析

图 4 和 5 分别为竣工期和满蓄期面板沿高程方向挠度和应力分布图。从图中可以看出:

(1) 面板变形分析 竣工期,面板挠度仅由于自重引起,其量值较小,最大挠度仅为 0.52 cm,出现在面板中上部。正常蓄水期,面板变形分布规律较好,面板挠度指向坝内,面板中下部约 1/3 坝高部位区域数值较大,最大值为 17.13 cm,出现在高程 31.50 m 附近。

(2) 面板应力分析 竣工期,面板应力主要由自重引起,其顺坡向应力较小,最大仅为 0.03 MPa。正常蓄水期,在水压力作用下,面板绝大部分区域表现为受压状态。其中顺坡向压应力最大值为 6.97 MPa,出现在高程 31.50 m 附近。

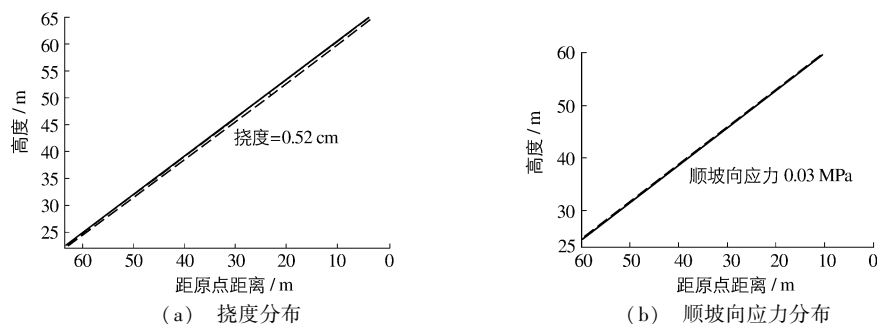


图 4 竣工期面板挠度分布和顺坡向应力分布

Fig. 4 Slab deflection distribution and longitudinal stress distribution in completion period

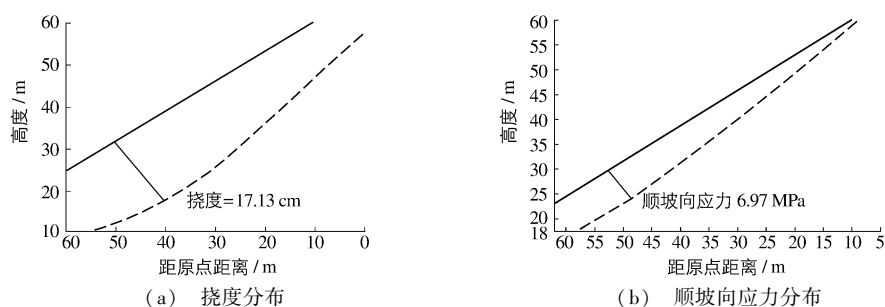


图5 满蓄期面板挠度分布和顺坡向应力分布

Fig. 5 Slab deflection distribution and longitudinal stress distribution in completion period

4 结 语

(1) 蓄水期坝体在水压力作用下整体向下游位移,最大水平位移约为竣工时的2倍,最大沉降相比于竣工时增加约8%。蓄水时,在自重及水荷载综合作用下坝体的变形矢量方向为向下游移动。

(2) 蓄水期坝体面板受水荷载的作用,大、小主应力线出现上抬并与面板相交,和竣工期相比,大、小主应力最大值增加幅度分别为13%和17%。随着水位的升高,应力水平发生了重分布,应力水平最大值0.91,未出现应力水平接近于1.0的破坏区域。

(3) 竣工期,面板挠度及应力仅由于自重引起,其量值较小,蓄水后,面板挠度指向坝内,面板主要表现为压应力,最大挠度及最大应力均分布于约1/3坝高部位。

参 考 文 献:

- [1] 郦能惠, 杨泽艳. 中国混凝土面板堆石坝的技术进步[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1361-1368. (LI Neng-hui, YANG Ze-yan. Technical advances in concrete face rockfill dams in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1361-1368. (in Chinese))
- [2] 杨泽艳, 周建平, 蒋国澄, 等. 中国混凝土面板堆石坝的发展[J]. 水力发电, 2011, 37(2): 18-23. (YANG Ze-yan, ZHOU Jian-ping, JIANG Guo-cheng, et al. Development of concrete faced rockfill dam in China[J]. Water Power, 2011, 37(2): 18-23. (in Chinese))
- [3] 赵魁芝, 李国英. 梅溪覆盖层上混凝土面板堆石坝流变变形反馈分析及安全性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1230-1235. (ZHAO Kui-zhi, LI Guo-ying. Back analysis of creep deformation and study on safety of Meixi CFRD built on riverbed alluvium[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1230-1235. (in Chinese))
- [4] 孙大伟, 邓海峰, 田斌, 等. 大河水电站深覆盖层上面板堆石坝变形和应力性状分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 434-439. (SUN Da-wei, DENG Hai-feng, TIAN Bin, et al. Deformation and stress analysis of Dahe CFRD built on thick alluvium deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 434-439. (in Chinese))
- [5] 郦能惠, 米占宽, 杨泽艳, 等. 深覆盖层地基上混凝土面板堆石坝有限元静动力应力变形分析报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003. (LI Neng-hui, MI Zhan-kuan, YANG Ze-yan, et al. Finite element static and dynamic stress-deformation behavior of high concrete face rockfill dams built on thick alluvium deposits[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003. (in Chinese))
- [6] 郭兴文, 王德信, 蔡新. 覆盖层地基上混凝土面板堆石坝优化设计研究[J]. 河海大学学报, 1998, 26(4): 54-58. (GUO Xing-wen, WANG De-xin, CAI Xin. Study on optimal design of CFRD on alluvial deposit[J]. Journal of Hohai University, 1998, 26(4): 54-58. (in Chinese))
- [7] 沈婷, 李国英, 李云, 等. 覆盖层上面板堆石坝趾板与基础连接方式的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2588-2592. (SHEN Ting, LI Guo-ying, LI Yun, et al. Numerical analysis of joint types between toe slab and foundation of CFRD in alluvial deposit layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2588-2592. (in Chinese))
- [8] 徐泽平, 侯瑜京, 梁建辉. 深覆盖层上混凝土面板堆石坝的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1323-

1328. (XU Ze-ping, HOU Yu-jin, LIANG Jian-hui. Centrifugal model tests on CFRD on deep alluvium foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1323-1328. (in Chinese))
- [9] 赵一新. 深覆盖层地基高面板堆石坝应力变形动力有限元分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2009. (ZHAO Yi-xin. The finite element analysis for dynamic stress-strain characteristics of high concrete face rock-fill dam in alluvial deposit layer[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [10] 王文娇. 深覆盖层地基高面板堆石坝的抗震特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013. (WANG Wen-jiao. A study of the seismic properties of CFRD on deep overburden layer ground[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013. (in Chinese))
- [11] 王平, 赵一新. 狭窄河谷深覆盖层地基高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 146-150. (WANG Ping, ZHAO Yi-xin. Research on stress and deformation properties of high concrete-faced rockfill dam with narrow valley and deep overburden foundation[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(4): 146-150. (in Chinese))
- [12] 邓刚, 徐泽平, 吕生玺, 等. 狭窄河谷中的高面板堆石坝长期应力变形计算分析[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 639-655. (DENG Gang, XU Ze-ping, LV Sheng-xi, et al. Analysis of long term stress and deformation of high concrete face rockfill dam in narrow valley[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 639-655. (in Chinese))

Finite element analysis of stress and deformation characteristics of low-faced rockfill dam on mid-thick overburden

CHEN Piao¹, DENG Cheng-fa², LIU Zheng-guo³

(1. Supervision and Management Center of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower Engineering Quality and Safety, Hangzhou 310009, China; 2. Zhejiang Guangchuan Engineering Consultation Co., Ltd., Hangzhou 310020, China; 3. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: It is necessary to make studies of the stress and deformation properties of the low-faced rockfill dam on mid-thick overburden with difference from high dam on deep overburden. Based on Duncan-Chang E-B model, the 2D finite element method is applied to analyze the stress and deformation characteristics of Shuangxikou concrete face rockfill dam during construction period and impoundment period. The analysis results show that compared with completion period, the settlement of dam body, horizontal displacement, principal stress, stress level and slab deflection during the impoundment period increased. The slab deflection and horizontal displacement of the dam increased most significantly, of which the deflection increased by 16.61 cm, the largest increment in the horizontal displacement up to about 1 times, the vertical displacement increased by about 8%, the major and minor principal stress increased by 10% to 20%, and the stress level increased by approximately 50%. The stress and deformation of the dam are all within the allowable range, and operation of the dam is in a normal condition.

Key words: finite element method (FEM); concrete face rockfill dam; overburden; slab deflection; horizontal displacement; stress deformation