

基于子模型法的面板堆石坝三维应力变形分析

朱 敏,邓华锋,许晓亮

(三峡大学土木与建筑学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:基于三维有限元非线性方法,考虑某高面板堆石坝面板分期施工浇筑的特点,建立精细模拟面板特性的子模型,用有厚度的接触面单元模拟坝体与面板的接触面,设置相应的连接单元模拟面板缝的相互作用,分析了该面板堆石坝在施工期和蓄水期坝体和面板的应力变形,并与类似坝高的面板堆石坝的计算或监测结果进行比较。结果表明:在施工期和蓄水期坝体的最大沉降值约为坝高的 1%,位于次堆石区;面板应力以压应力为主,拉应力主要集中在面板与周边山体连接处;周边缝的最大错动剪切变形、最大张拉变形及最大沉降剪切变形均未超过 30 mm。

关键词:面板堆石坝;应力变形;子模型法;邓肯 *E-B* 模型

中图分类号:TV641.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2012)06-0027-04

3D stress-deformation analysis of CFRDs based on sub-model method//ZHU Min, DENG Huafeng, XU Xiaoliang (College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Based on the 3D nonlinear finite element method, a sub-model is established for the refined simulation of characteristics of concrete face slab by considering the stage construction of a high CFRD. The interface element with certain thickness is employed to simulate the contact surface between dam body and face slab, and the relevant linkage element is set to simulate the interaction between joints of face slab. The stress-deformation behaviors of the CFRD during the construction and impoundment periods are analyzed. They are compared with the calculated results or the observed data of the CFRDs with the similar height. It is found that during the construction and impoundment periods, the maximum settlement is about 1% of the dam body, and it occurs in the secondary rockfill area. The stress in the face slab is almost compressive one, and the tensile stress mainly concentrates on the connecting part between the face slab and the surrounding mountain. For the peripheral joints, the maximum shear deformation of slippage, the maximum tensile deformation and the maximum shear deformation of settlement are all not larger than 30 mm. The proposed sub-model method may greatly improve the precision for calculating the stress and deformation of the face slab and preferably satisfy the design requirements of projects.

Key words: CFRD; stress deformation; sub-model method; Duncan *E-B* model

混凝土面板堆石坝造价低,工期短,安全性良好,对地质条件的适应性强,并可充分利用当地材料,是一种富有生命力的坝型,正越来越多地应用于水利工程^[1]。然而坝体填料的密实度、河谷形状、坝地质条件、蓄水方式和坝体填筑工序等都将影响坝体和面板的应力变形及其分布规律^[2-4],而坝体和面板过大的应力和变形将导致防渗系统破坏而产生严重渗漏,危及大坝正常运行与安全,因此坝体和面板在施工期和蓄水期的应力、变形以及稳定性能否满足设计要求是一项非常有价值的研究课题^[5]。目前

面板堆石坝计算中的面板应力变形分析主要采用整体模型进行计算^[6],这就意味着有限元建模时将对面板的单元尺寸进行简化,比如沿面板厚度方向仅仅剖分一层网格,或把几块面板合并成一块等,这样的简化将极大地降低面板应力变形的计算精度。针对上述问题,本文以某面板堆石坝为例采用三维有限元非线性方法^[7-8]建立精细模拟面板特性的子模型,分析了施工期和蓄水期坝体和面板的应力变形,最后通过与类似坝高的面板堆石坝的计算或监测结果进行比较,综合评价了设计的合理性。

基金项目:湖北省教育厅自然科学基金项目(Q20091301);宜昌市科学技术研究与开发项目(A2011-302-6);三峡大学研究生科研创新基金(2011cx021)

作者简介:朱敏(1987—),女,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事岩土工程和水利工程研究。E-mail:zhumin2006101531@qq.com
通信作者:邓华锋(1979—),男,湖北宜都人,讲师,博士,主要从事岩土工程教学与研究。E-mail:dhf8010@ctgu.edu.cn

1 工程概况

某面板堆石坝的最大坝高 131.49 m,是以发电为主的混合式开发电站。总库容为 2.25 亿 m³,调节库容为 1.22 亿 m³,具有季调节能力。水库正常蓄水位为 1590 m,校核洪水位为 1590.44 m,总装机容量为 3×80 MW,保证出力为 110.7 MW,多年平均年发电量为 14 亿 KW·h。坝基部位地形较完整,河谷狭窄,呈近对称的“V”字形,坡度为 30°~40°,两岸各发育两条冲沟,地表第四系覆盖广,主要为坡积层及冲、洪积层,坡积层厚度 1~2 m,冲、洪积层厚度为 7~9 m。基岩以似斑状花岗岩为主,局部见中、粗粒花岗岩。该面板堆石坝河床段坝体的施工填筑顺序如图 1 所示,共分 19 级,其中面板分 2 级施工。

2 计算模型及参数

2.1 分析方法和计算模型

子模型法是获得模型部分区域精确解的有效方法。在三维有限元非线性分析中经常遇到这类情况,即对于关心的区域,如面板的应力精度问题,若网格太疏将不能得到满足要求的解,为了得到精确解通常用较细的网格重新划分整个模型或细化关注区域的网格。显而易见,对模型整体网格进行细化将费时费力,而细化部分区域的网格将为计算提供便利,这种方法称为子模型法,又称为切割边界位移法或特定边界位移法。切割边界即子模型从整体较粗糙的模型中分割开来的边界。整体模型切割边界的计算位移、应力值即为子模型的边界条件。根据圣维南原理,当实际分布荷载被等效荷载代替以后,应力和应变只在荷载施加的位置附近有改变,这说明若子模型的位置远离应力集中位置,则子模型就可以得到较精确的结果。大量研究成果也表明运用子模型法计算面板的应力和变形比较符合监测结果^[9]。

本文运用子模型法采用自主开发的三维有限元程序分析面板的应力和变形,具体分析过程是:①先

不考虑面板与垫层的接触问题,考虑复杂的施工分区、材料分界和加载历程;②计算实际加载路径下整个坝体的应力与变形;③将面板、趾板和垫层作为独立的子模型,主堆石体表面的位移作为已知位移边界条件;④将子模型的网格细分,考虑面板与堆石体、面板与面板、面板与趾板的接触,计算子模型的应力与变形。这种方法可以有效地提高面板应力与变形数值分析的精度。

计算中采用多种不同的本构模型:坝体堆石料的应力变形关系采用邓肯 *E-B* 模型,该模型被广泛应用于坝体应力变形分析中,计算结果符合实际^[10];混凝土面板、趾板、防渗墙和基岩采用线弹性模型;堆石体与混凝土面板、防渗墙与覆盖层、防渗墙与基岩间的相互作用采用有厚度的接触面单元来模拟;混凝土面板间垂直缝、连接板与防渗墙间接缝均采用连接单元模拟。

坝体和面板的有限元网格均主要采用六面体 8 节点等参单元,及少量的 6 节点三棱柱过渡单元,坝体单元总数共 10762 个,节点总数 9253 个;面板单元总数为 19349 个,节点总数为 17423 个。计算中坐标系取为:*x* 轴以顺水流方向为正,*y* 轴以沿坝轴线方向从右岸至左岸为正,*z* 轴以竖直向上为正。采用中点增量法模拟土体逐层填筑、蓄水荷载逐级施加以及外加荷载作用下土体的非线性变形特征^[11-12]。

2.2 计算参数

根据堆石料试验结果和类似工程设计经验,大坝 *E-B* 模型材料参数如表 1 所示。表中 φ_0 为第三主应力等于单位大气压力时的材料摩擦角,*k* 为切线模量基数,*n* 为切线模量指数,*R_f* 为破坏比,*k_b* 为体积模量系数,*m* 为体积模量指数,*k_{ur}* 为卸载时的切

表 1 坝体 *E-B* 模型材料参数

分区	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\varphi_0/(\text{°})$	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>R_f</i>	<i>k_b</i>	<i>m</i>	<i>k_{ur}</i>	$\varphi/(\text{°})$
主堆石	2250	51.31	817.83	0.35	0.73	512	0.182	2044	9.70
次堆石	2255	52.28	670.47	0.33	0.71	438	0.146	1676	11.30
过渡层	2300	51.56	1119.00	0.35	0.74	1350	-0.170	2797	9.92
垫层	2355	52.83	1800.00	0.52	0.70	2062	0.010	4500	11.42

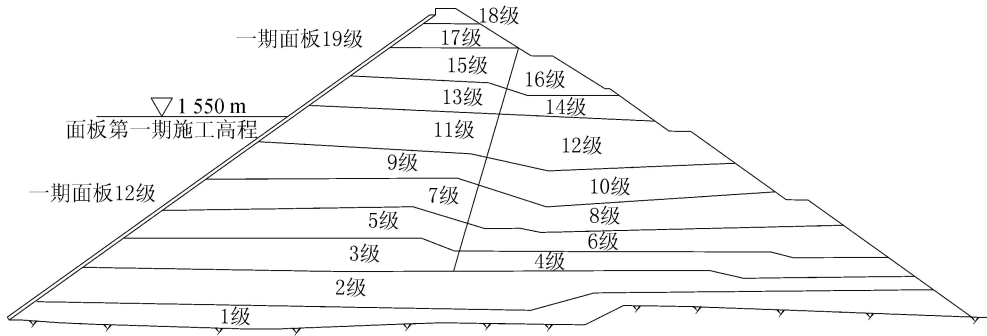


图 1 大坝施工填筑顺序

线模量基数, $\Delta\varphi$ 是反映摩擦角随第三主应力降低的参数。接触面单元计算参数采用: $k=4800$, $n=0.58$, $R_f=0.74$, $\varphi_0=36^\circ$ 。依据试验结果, 面板、趾板、连接板和混凝土的计算参数为: 密度 2.449 kg/m^3 , 泊松比 0.167 , 混凝土弹性模量 28 GPa 。

3 计算结果及分析

3.1 坝体的变形和应力

河床段坝体剖面在施工期和蓄水期的变形和应力计算结果如表 2 所示。

表 2 坝体的变形和应力计算结果

工况	变形/cm			应力/MPa			
	顺河 流向 下游	顺河 流向 上游	垂直 沉降	第一主应力		第三主应力	
				最大 拉应力	最大 压应力	最大 拉应力	最大 压应力
施工期	18.59	-17.39	-109.3	0.120	-0.816	-3.031	
蓄水期	26.22	-9.19	-133.2	0.734	-0.728	-2.055	

计算结果表明, 坝体顺河流向变形大致以主堆石区与次堆石区的分界线为界分为两部分, 上游区域向上游侧变形, 下游区域向下游侧变形。施工期向上游的最大位移和向下游的最大位移均出现在 $1/3$ 坝高附近; 蓄水期向上游最大位移出现在 $1/3$ 坝高附近, 而向下游的最大位移出现在 $1/2$ 坝高附近。施工期和蓄水期的坝体最大沉降均出现在次堆石区 $2/3$ 坝高附近。在第一主应力中, 施工期和蓄水期的最大拉应力均出现在坝轴线偏向上游侧基岩部位; 在第三主应力中, 施工期和蓄水期均未出现拉应力。

3.2 面板的变形和应力

通过三维有限元非线性方法的计算分析, 面板在蓄水期的变形和应力分布如图 2 和图 3 所示。

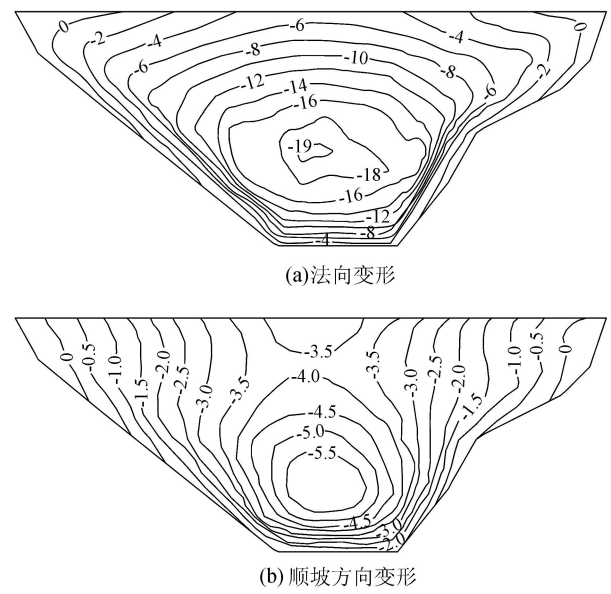


图 2 面板变形 (单位: cm)

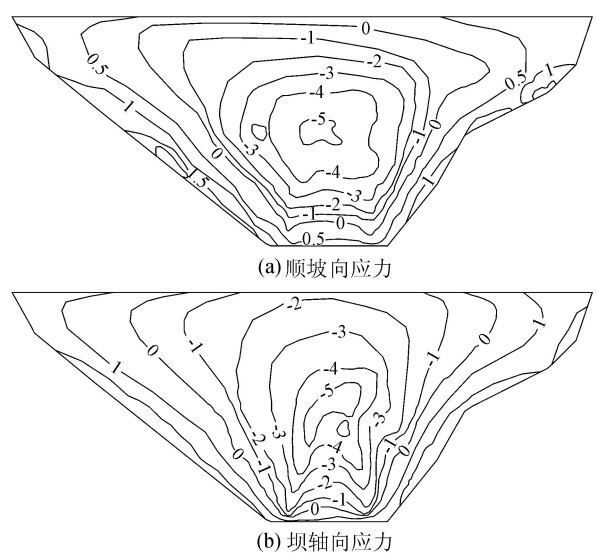


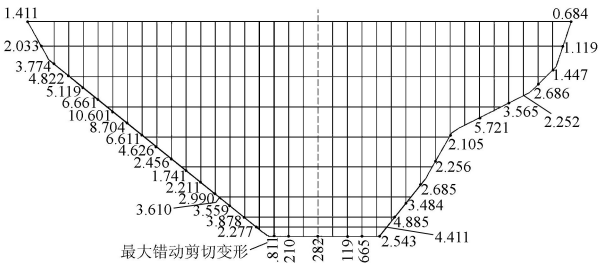
图 3 面板应力 (单位: MPa)

由图 2 和图 3 可知, 蓄水期面板变形和应力基本沿面板中心轴线呈左右对称状态。面板最大法向变形以垂直面板向上为正, 中部变形最大值为 19.34 cm , 向四周逐渐减小, 面板变形整体上呈中部向坝坡面法线方向下陷的下凹变形形态。顺坡向变形最大值为 6.01 cm , 均出现在面板中心线约 $1/3$ 坝高附近; 面板应力以压应力为主, 顺坡向最大压应力 5.14 MPa , 坝轴向最大压应力为 5.87 MPa , 均出现在面板中下位置; 面板顺坡向最大拉应力为 0.74 MPa , 坝轴向最大拉应力为 0.85 MPa , 均出现在面板与周边山体相接处。因此, 设计在面板上游 1530 m 高程以下铺设粉细砂和粉煤灰作为保护层是合理的。

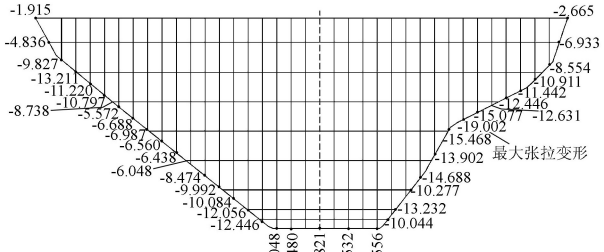
3.3 面板周边缝变形

通过三维有限元非线性方法的计算分析, 面板周边缝在蓄水期的变形如图 4 所示。

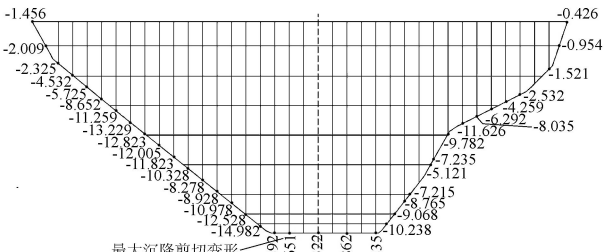
张拉变形以张开为“-”, 以压缩为“+”; 顺缝向错动剪切变形中, 左岸以缝左沿缝斜向下、缝右沿缝斜向上为“+”, 缝左沿缝斜向上、缝右沿缝斜向下为“-”, 右岸相反; 沉降剪切变形中, 左岸以缝左向坝内、缝右坝向外为“+”, 缝左向坝外、缝右向坝内为“-”, 右岸相反。根据图 4 可知, 蓄水后, 在水压力的作用下周边缝错动剪切变形基本沿面板中心轴线方向对称, 变形值随着高程的降低有先增大再减小最后再增大的趋势, 其中面板底部的错动剪切变形最大, 为 11.811 mm , 出现在面板左岸底部; 张拉变形基本沿面板中心轴线方向对称, 主要表现为张开变形, 变形值随高程的降低先增大后减小, 在面板底部趋于稳定, 张拉变形最大值为 19.002 mm , 出现在面板右岸 $1/2$ 高程处; 沉降剪切变形基本沿面板中心轴线方向对称, 数值上在各高程分布较均匀, 最大值为 16.651 mm , 出现在面板左岸底部。坝体内



(a) 错动剪切变形



(b) 张拉变形



(c) 沉降剪切变形

图4 周边缝三向变形(单位:mm)

多处设置三向测缝计,根据计算结果与监测结果的比较可知,计算值与监测值基本相符,说明计算结果是合理的。

4 与类似工程的比较

面板堆石坝应力变形计算结果的合理性主要取决于3个方面:合理的本构模型、合理的计算参数和正确的模拟方法。本项目计算采用的堆石体本构模型为邓肯 *E-B* 模型,能较好的反映堆石体的变形特性;计算采用的材料参数根据试验成果和工程经验综合确定,是合理可靠的;建模计算时对施工工序进行了全面模拟;面板应力变形分析运用子模型方法,大大提高了面板应力变形的计算精确度。为了验证计算结果的合理性,本文列举了类似坝高的面板堆石坝的计算或监测结果进行比较,如表3所示。

根据本文计算结果与国内类似坝高面板堆石坝计算监测结果的比较可知,本文的计算结果是合理的。运用子模型法分析面板的应力和变形可以极大地提高计算精度。

表3 与类似坝高面板堆石坝计算或监测成果比较

工程	坝高/ m	坝体变形/cm				面板应力/MPa			
		施工期		蓄水期		顺坡向		轴向	
		上游 方向	下游 方向	上游 方向	下游 方向	压 应力	拉 应力	压 应力	拉 应力
紫坪铺 ^[13]	156.0	-28.9	36.3	-15.3	41.6	5.42	1.67	3.48	1.31
双沟 ^[14]	110.5			-7.8	40.7	6.83	1.01	2.48	1.55
鱼跳 ^[15]	110.0	-34.0	47.0			2.29		2.61	1.36
鲤鱼塘 ^[16]	105.0	-23.0	27.7	-5.0	35.0				
茅坪坝 ^[17]	104.0	-11.6	14.3	-10.8	24.5				

5 结论

a. 在施工期和蓄水期坝体沉降值约占坝高的1%,位于约2/3坝高的次堆石区,根据与同类工程的比较可知该沉降值是合理的。坝体应力均在规范要求的范围之内,没有出现破坏,坝体是安全的。

b. 施工期和蓄水期面板应力以压应力为主,面板拉应力主要集中在面板与周边山体连接处,高程约为1520m,因此,在面板上游1530m高程以下铺设粉细砂和粉煤灰作为保护层是合理的。

c. 周边缝的最大错动剪切变形、最大张拉变形及最大沉降剪切变形均不大,未超过30mm,因此采用一般铜片止水即可以满足设计要求。

参考文献:

[1] 蒋国澄,傅志安,凤家骥. 混凝土面板堆石坝工程[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1997.

[2] 梁利喜,许强,刘天翔,等. 四川某滑坡成因机制分析及稳定性评价研究[J]. 水土保持研究,2007,14(2):189-190.

[3] 赵纪生,魏景芝. 汶川8.0级地震滑坡、崩塌机制[J]. 震灾防御技术,2008,3(4):379-383.

[4] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4版. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

[5] 胡再强,李宏儒,苏永江. 岗南河混凝土面板堆石坝三维静力应力变形分析[J]. 岩土力学,2009,30(增刊2):312-317.

[6] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 国家“九五”科技攻关项目“200m级高混凝土面板堆石坝研究”[R]. 武汉:长江水利委员会长江勘测规划设计研究院,1999.

[7] 陈慧远. 土石坝有限元分析[M]. 南京:河海大学出版社,1988.

[8] 顾淦臣,黄金明. 混凝土面板堆石坝的堆石本构模型与应力应变分析[J]. 水力发电学报,1991(1):12-24.

[9] 汪明元,程展林,林绍忠. 高面板堆石坝应力变形的三维子模型法研究[J]. 长江科学院院报,2005,22(5):49-51.

(下转第59页)

参考文献:

[1] 殷宗泽,余湘娟,王媛,等. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[2] 吴春勇. 真空联合堆载预压软土路基稳定控制与沉降预测[D]. 长春:吉林大学,2004.

[3] 王孝存,周健,贾敏长. 不同堆载方法在软基堆载预压中的稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报,2005, 1(2):299-301.

[4] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京,北京人民交通出版社,2002.

[5] 彭劼,刘汉龙,陈永辉. 真空-堆载联合预压法加固机理讨论[J]. 河海大学学报:自然科学版,2008,31(5): 560-562.

[6] 朱群峰,高长胜,杨守华,等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9): 1432-1433.

[7] 任志福. 真空预压法加固软土地基机理相关问题的探讨[J]. 建筑科学, 2008,24(3):43-44.

[8] 李宁,吴跃东,左文荣,等. 真空-堆载联合预压法加固软基效果的理论研究[J]. 水运工程,2008,8(12):233-234.

[9] 向臻锋. 真空联合堆载预压法加固机理及稳定性研究[D]. 长沙:湖南大学,2007.

[10] 祝峻. 地基固结过程中软土抗剪强度增长评价[D]. 杭州:浙江大学,2010.

(收稿日期:2012 - 03 - 16 编辑:周红梅)

(上接第 37 页)

俄罗斯最多(20 座)。世界高坝大库工程主要位于亚洲、欧洲、北美洲国家,而非洲、大洋洲国家高坝大库工程建设较少。高坝大库工程主要分布在水资源丰富、国土面积广、人口众多、经济与科技发达的地区。

c. 高坝的坝型通常是混凝土拱坝、堆石坝和混凝土重力坝。有 52 座大库工程是由 100 m 级以上高坝兴建而成,这些高坝多为混凝土重力坝、堆石坝和混凝土拱坝;其余 48 座则是由一系列的土坝围成,或是主坝为混凝土重力坝的混合坝兴建形成。

d. 高坝大库工程基本上建成于 1945 年之后。美国最早建设高坝大库工程,目前世界高坝大库的建设中心已转移至中国,已建最高的混凝土拱坝、最高的混凝土面板堆石坝、最高的碾压混凝土重力坝都位于中国。

参考文献:

[1] International commission on large dams. World register of dams [EB/OL]. [2011-11-17]. http://www.icold-cigb.net/GB/World_register/general_synthesis.asp.

[2] 赵纯厚,朱振宏,周端庄. 世界江河与大坝[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.

[3] 贾金生,袁玉兰,李铁洁. 2003 年中国及世界大坝情况[J]. 中国水利,2004(13):25-33.

[4] List of countries by population in 2010 [DB/OL]. [2011-12-16]. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_population_in_2010.

[5] FAO. Review of world water resources by country [R]. Rome: FAO,2003.

[6] 张利平,夏军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120.

[7] 贾金生,袁玉兰,马忠丽. 2005 年中国与世界大坝建设情况[C]//水电 2006 国际研讨会论文集. 昆明:中国

水利水电科学研究院,2006.

[8] 周建平,杨泽艳,陈观福. 我国高坝建设的现状和面临的挑战[J]. 水利学报,2006,37(12):1433-1438.

[9] 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.

[10] 阿萨林 A E. 俄罗斯的水资源及其利用[J]. 赵秋云,译. 水利水电快报,2008,29(5):1-4.

[11] FAO. Review of world water resources by country [R]. Rome: FAO,2003:19-22.

[12] 何学民. 我所看到的美国水电:美国密西西比水系的综合开发及其借鉴意义[J]. 四川水力发电, 2007,26(3):117-121.

(收稿日期:2012 - 02 - 21 编辑:骆超)

(上接第 30 页)

[10] 朱百里,沈珠江. 计算土力学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990.

[11] 罗刚,张建民,沈珠江. 紫坪铺混凝土面板堆石坝三维应力位移分析[J]. 水力发电学报, 2002, 24(1): 13-18.

[12] 刘芳,张丙印,沈珠江,等. 西龙池下库沥青混凝土面板堆石坝的应力变形分析[J]. 水力发电学报, 2003, 83(4):31-38.

[13] 高希章,杨志宏. 紫坪铺水利枢纽工程混凝土面板堆石坝设计[J]. 水利水电技术,2002,33(11):14-17.

[14] 李桂芳,谭志军. 双沟水电站面板堆石坝反演计算分析[J]. 吉林水利,2009,11(3):13-15.

[15] 吴兴征,周晓光,徐泽平. 鱼跳混凝土面板堆石坝三维静力应力变形分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2003,1(1):75-80.

[16] 潘家军,费胜. 混凝土面板堆石坝三维非线性有限元应力变形分析[J]. 水电能源科学,2007,25(2):39-42.

[17] 张丙印,李全明,熊焰,等. 三峡茅坪溪沥青混凝土心墙堆石坝应力变形分析[J]. 长江科学院院报,2004,21(2):18-21.

(收稿日期:2012 - 02 - 17 编辑:周红梅)