

导流底孔结构受力分析与坝上游面拉应力控制措施

程 宵 苏 凯 伍鹤皋

(武汉大学水资源和水电工程科学国家重点实验室 湖北 武汉 430072)

摘要 结合某导流底孔工程,针对封堵期结构的受力特征,采用三维有限单元法对导流底孔坝段结构和坝上游面的应力分布情况进行计算分析。结果表明:导流底孔进水口段和坝内孔身段的分缝布置于坝面上游时,坝上游面将出现较大范围的横河向拉应力,当考虑大坝两侧分缝内填充材料作用或将导流底孔进水口段与坝内孔身段的分缝位置下移至与大坝上游面平齐时,能够有效地减小坝上游面拉应力的数值与范围,降低坝上游面混凝土受拉开裂的可能性。

关键词 水工结构;导流底孔;封堵期;应力分布;有限单元法

中图分类号:TV311 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2011)06-0027-04

Analysis of forces acting on bottom outlet structure and measures for tensile stress on upstream dam surface//CHENG Xiao, SU Kai, WU He-gao(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract : Based on a bottom outlet project, with regard to the characteristics of forces acting on the structure during the blocking period, the stress distributions of the structure and upstream dam surface were studied by means of the 3D finite element method. The results show that a wide range of tensile stress along the dam axis will appear at the upstream dam surface when the position of the seam which links the orifice of the bottom outlet and the dam is arranged in front of the upstream dam surface. In order to reduce the tensile stress along the dam axis efficiently, measures of filling materials in the seams at both sides of the dam or moving the position of the seam which links the orifice and the dam to the parallel position of the upstream dam surface should be taken. In this way, the possibility of concrete crack on the upstream dam surface during the construction, operation and blocking periods may be reduced.

Key words : hydraulic structure; bottom outlet; blocking period; stress distribution; FEM

底孔导流是水利水电工程建设中常见的导流形式之一^[1-2]。该导流方式要求混凝土建筑物在施工过程中允许过流,采用底孔与缺口泄流的导流方式较为经济合理^[3]。但这种导流方式亦存在一定的缺陷,其一是底孔封堵困难,其二是底孔开孔率大,且存在底孔、各种高程缺口双重过水及后期高水头度汛等复杂过水情况,泄洪量大,流速大,运行工况复杂^[4],因此底孔的设计必须保证其在施工期、正常运行期、后期度汛及封堵期的结构安全可靠。笔者以某水电站导流底孔边孔坝段为例,利用大型有限元软件建立三维有限元数值模型,对导流底孔坝段结构应力分布和坝上游面的拉应力分布情况进行分析,针对大坝上游面产生较大范围的横河向拉应力这一现象展开研究,并在此基础上提出了减小混凝土坝上游面拉应力的方法,可为相关工程导流底孔

的设计提供参考。

1 工程概况与计算模型

1.1 工程概况

某工程在左岸布置 4 个 8.00 m × 12.50 m(宽 × 高)的导流底孔,底孔断面采用有倒角的矩形,导流底孔底板高程为 188.00 m,底孔长 73 m。导流底孔进水口采用整体浇筑,与孔身段(坝内)之间进行分缝施工,分缝位置如图 1 所示。

1.2 计算模型

本文以左岸导流底孔边孔坝段为研究对象,建立有限元计算模型,如图 2 所示。结合大量经验和计算结果分析,基岩深度(y 方向)取为 60 m(1 倍坝高);上下游方向(z 方向)基岩各按坝体底部宽度的 1 倍考虑,取为 59.15 m。基岩左右两侧、上下游端

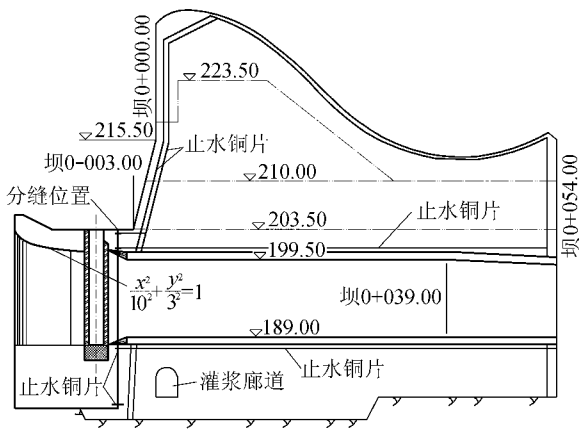


图1 导流底孔纵剖面(单位:m)

面以及底部均采用法向位移约束。大坝两侧分缝为自由边界。

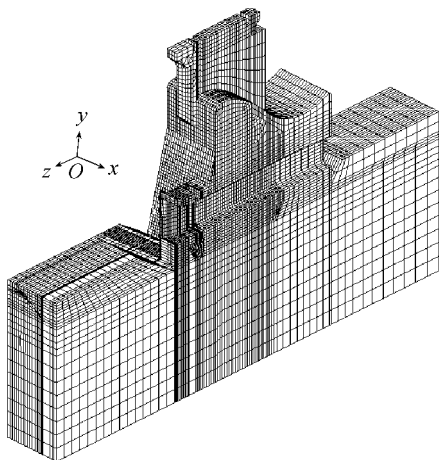


图2 整体模型网格

计算模型中的混凝土与基岩均采用八节点等参单元(SOLID45)模拟,在结构分缝位置,则采用面-面接触单元(target170,conta174)进行模拟。其中,混凝土与基岩材料均为线弹性材料。

2 封堵期结构受力与变形分析

封堵期计算工况下,导流底孔下闸,表孔不溢流,且底孔未回填,上游洪水位为250.00 m,下游无水,坝基防渗系统已形成。导流底孔结构所受荷载有结构自重、土压力和水荷载等,其中,水荷载包括坝上游面静水压力、大坝两侧缝内静水压力、底孔内壁测压管水头对应的静水压力、坝基扬压力、底孔闸门水推力和表孔弧形闸门水推力等。

在上述荷载作用下,封堵期大坝主要发生向下游变形和向底孔右侧横河向变形,在坝顶横河向(x 方向)位移最大达1.6 mm。在底孔孔口闸门槽位置横河向拉应力最大达2.634 MPa,坝体横河向应力数值也较大,为-0.46~1.38 MPa。

同时,计算结果表明,坝上游面出现了较大范围的拉应力区,主要出现在底孔底板高程以上的部位,

表现为横河向拉应力,拉应力数值范围为0.03~0.85 MPa。对于203.50 m高程断面,横河向拉应力数值范围为0.01~0.44 MPa,靠近坝上游面最大,往下游拉应力逐渐减小。

一般重力坝在水压力作用下,由于泊松比效应,除了坝踵部位外坝上游面以压应力为主。而本文计算中由于有导流底孔的存在,坝上游面出现了横河向的拉应力,且范围较大,最大值达到了0.85 MPa,如果考虑温度应力等因素,则大坝上游面的混凝土抗裂安全度明显不足,可能产生裂缝^[5-6],不利于大坝的安全^[7-10],因而笔者针对这一现象产生的原因展开分析,并尝试提出应对措施。

3 坝上游面出现拉应力的原因

针对坝上游面产生较大范围的拉应力这一现象,笔者首先从结构承担的荷载着手分析,将荷载分为2类:一类为坝体自重、土压力;另一类为水荷载。由于水荷载较为复杂,笔者又将其细分为2部分,以便于分析水荷载产生坝上游面拉应力的原因,详见表1。

表1 荷载分类

荷载类别	荷载组合
完建荷载①	坝体自重+土压力(上游回填砂卵石,顶部高程为182.50 m,底部高程为坝基上游高程)
水荷载②	坝基扬压力+坝上游面静水压力+大坝两侧缝内静水压力+底孔内壁测压管水头对应的静水压力
水荷载③	弧形闸门水推力+弧形闸门前水重+弧形闸门前侧向压力+闸墩头静水压力+底孔闸门水推力(通过闸门传给门槽)

注:底孔内壁测压管水头对应的静水压力仅在闸门槽前段施加。

a. 在①类荷载作用下,由于边孔坝段导流底孔结构的不对称性,大坝有向孔口右侧倾斜的趋势(即有横河向的倾斜趋势),横河向最大位移为1.44 mm。在底孔顶板高程以下坝面表现为压应力状态,而在底孔顶板高程以上坝上游面出现了拉应力区域,拉应力数值范围为0.01~0.27 MPa,如图3(a)所示。对于203.50 m高程断面,拉应力数值为0.01~0.20 MPa,上游侧拉应力最大达0.2 MPa,往下游逐渐减小,如图4(a)所示。

b. 在②类荷载作用下,孔口有向右岸变形的趋势,横河向最大位移为1.55 mm。孔口底板高程以上的上游坝面出现了较大的横河向拉应力,数值为0.05~0.91 MPa,超过了所有荷载共同作用下坝上游面的拉应力0.85 MPa,如图3(b)所示。对于203.50 m高程断面,拉应力数值为0.025~0.75 MPa,上游侧拉应力最大为0.75 MPa,往下游逐渐减小,如图4(b)所示。

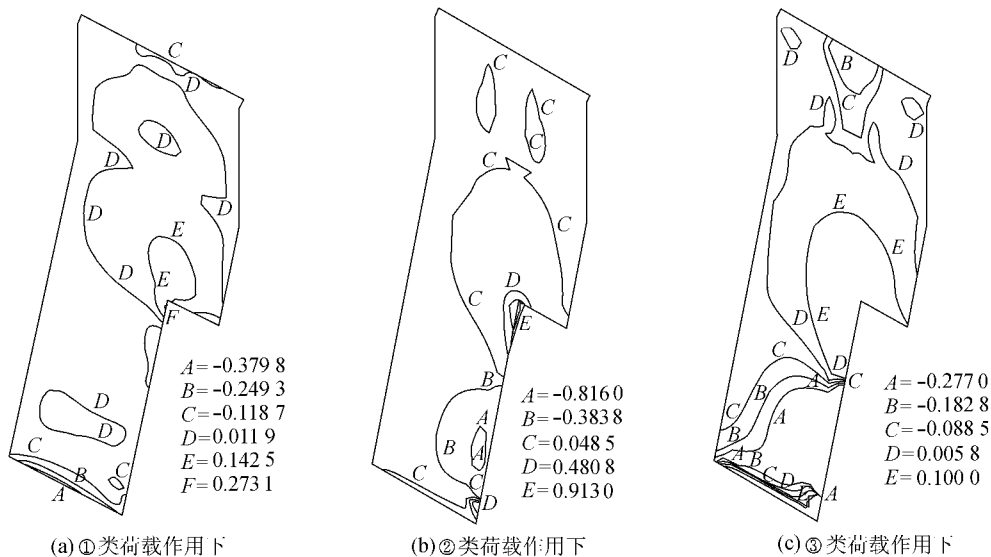


图3 坝上游面横河向应力等值线(单位:MPa)

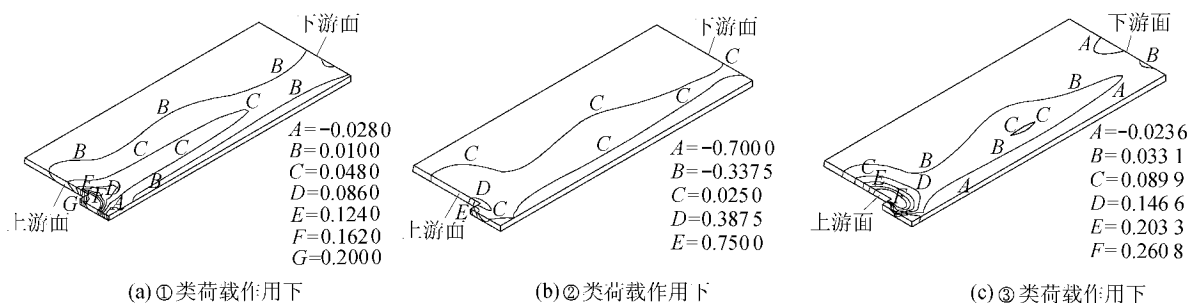


图4 203.50m高程横河向应力等值线(单位:MPa)

c. 在③类荷载作用下,底孔闸门槽位置出现了较大的横河向拉应力,最大值为1.62 MPa,但坝上游面仅在孔口中下部产生了0.006~0.10 MPa的拉应力,如图3(c)所示。对于203.50 m高程断面,拉应力数值为0.03~0.26 MPa,与在自重作用下的坝面应力数值差不多,如图4(c)所示。

为进一步分析坝上游面产生拉应力的原因,笔者将以上3种荷载情况下典型高程断面的应力数值列于表2。

从表2可以看出:①类荷载中的自重和②类荷载中的静水压力(尤其是导流底孔坝外孔身段外表面水压力的水平分量)是坝上游面产生拉应力的主要原因。其中,自重引起的孔口顶板高程以上的坝上游面产生拉应力,高程越高,自重产生的拉应力所占比例越显著。例如203.50 m、205.50 m和210.00 m高程处,自重产生的拉应力分别为0.21 MPa、0.18 MPa、0.15 MPa,分别占总拉应力的26%、42%和94%。静水压力引起孔口顶板高程四周的坝上游面产生拉应力,例如203.50 m高程处,静水压力产生的拉应力为0.64 MPa,占总拉应力的80%;199.50 m高程处,静水压力产生的拉应力达0.69 MPa。

表2 典型高程控制断面拉应力分布

高程/m	控制断面	节点应力/MPa			
		①类荷载	②类荷载	③类荷载	所有荷载
193.50	大坝上游面	-0.09	-0.12	0.24	0.03
	0+00.0	-0.12	0.01	-0.04	-0.15
	0+03.0	-0.12	0.01	-0.02	-0.13
	0+47.1	-0.09	-0.04	-0.01	-0.14
199.50	大坝上游面	-0.17	0.69	0.01	0.53
	0+00.0	-0.16	0.07	0.00	-0.09
	0+03.0	-0.17	0.04	0.01	-0.12
	0+47.1	-0.10	-0.05	-0.01	-0.16
203.50	大坝上游面	0.21	0.64	-0.05	0.80
	0+00.0	0.09	0.07	-0.01	0.15
	0+03.0	0.08	0	-0.01	0.07
	0+47.1	0.03	0	0	0.03
205.50	大坝上游面	0.18	0.28	-0.03	0.43
	0+00.0	0.14	0.05	-0.02	0.17
	0+03.0	0.11	-0.01	-0.01	0.09
	0+47.1	0.05	0.01	0	0.06
210.00	大坝上游面	0.15	0.03	-0.02	0.16
	0+00.0	0.12	0.02	-0.02	0.12
	0+03.0	0.10	0	-0.02	0.08
	0+47.1	0.05	0.01	0.01	0.07

4 减小坝上游面拉应力的措施

从第3节的分析结果可以看出,坝上游面产生较大范围的拉应力是底孔坝外孔身段水压力与大坝

两侧约束条件共同造成的,针对这一问题,笔者提出以下2种措施:①在满足施工布置等方面要求的同时,将导流底孔进水口与孔身段的分缝位置移至坝上游面平齐位置,建议分缝位置见图5。②考虑大坝两侧缝内填缝材料的作用。通常大坝两侧缝内会设填缝材料,对大坝两侧横河向变形有一定的约束作用。

对于措施①,当分缝位置移至坝上游面平齐位置时,坝上游面拉应力最大值为0.5 MPa,相比之前减少了41%,证实采取此措施减小拉应力效果显著,具体应力分布如图6所示。对于措施②,本文分别计算了填缝材料弹性模量为2 MPa、3 MPa、4 MPa的方案,结果见表3,其中填缝材料弹性模量为3 MPa时的坝上游面应力分布如图7所示。

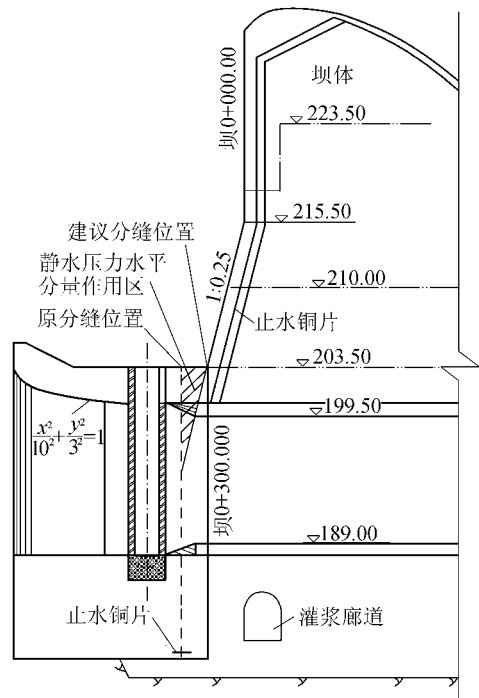


图5 导流底孔建议分缝位置示意图

表3 不同垫层材料计算方案坝上游面拉应力的比较

填缝材料 计算方案	坝上游面典型断面节点应力/MPa			
	199.50 m 高程	201.50 m 高程	203.50 m 高程	205.50 m 高程
无填缝材料	0.53	0.76	0.80	0.43
填缝材料弹性模量为 2 MPa	0.34	0.28	0.22	-0.09
填缝材料弹性模量为 3 MPa	0.33	0.21	0.12	-0.17
填缝材料弹性模量为 4 MPa	0.31	0.17	0.06	-0.23

由表3和图7可以看出,坝段分缝间采用的填缝材料弹性模量越大,减小坝上游面拉应力的效果越显著。例如203.50 m高程处,在坝段分缝间不设填缝材料时拉应力为0.80 MPa,设置弹性模量为2 MPa、3 MPa和4 MPa的填缝材料时,坝上游面拉应力分别为0.22 MPa、0.12 MPa、0.06 MPa,分别减小了72.5%、85%和92.5%。

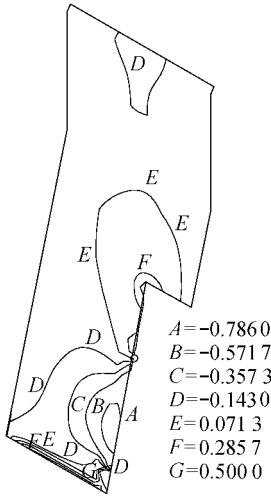


图6 采用措施①后的坝上游面横河向应力(单位:MPa)

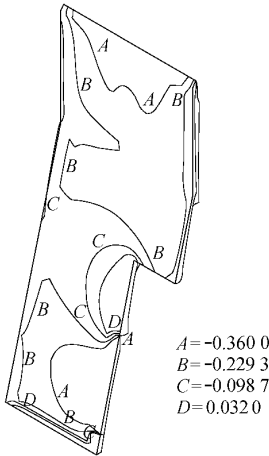


图7 采用措施②后的坝上游面横河向应力(单位:MPa)

5 结 论

a. 对于有混凝土导流底孔的边孔坝段,封堵期间将在坝上游面产生较大范围的拉应力区域,其中底孔坝外孔身段四周静水压力是引起坝上游面产生拉应力的主要原因。

b. 当在大坝两侧缝内增设填缝材料时,可以限制边孔坝段坝体在自重作用下向右岸倾斜的趋势,明显减小坝上游面拉应力的数值与范围,且填缝材料的弹性模量越大,减小坝上游面拉应力的效果越显著。

c. 当导流底孔进水口段与坝内孔身段间的分缝位置移至上游坝面平齐位置时,可以避免封堵期间导流底孔坝外孔身段外侧水压力的水平分量传递至上游坝面,坝上游面的拉应力数值可以降低41%左右,效果显著,因而建议在满足布置要求时采用此措施。

参考文献:

[1] 陈秀瑜. 导流底孔水力设计中的几个问题[J]. 水力发电, 1999(4): 21-26. (下转第54页)

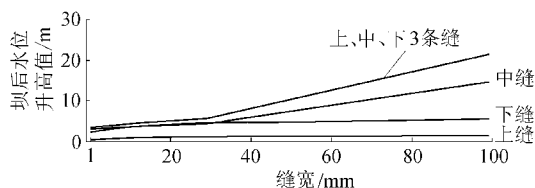


图7 坝后水位升高值随缝宽的变化(缝长1 m)

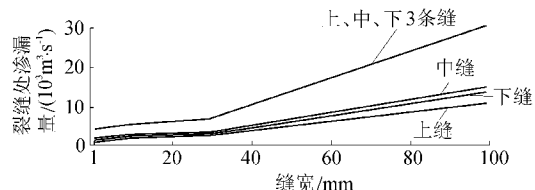


图8 面板裂缝处的渗流量随缝宽的变化(缝长1 m)

开裂后(缝长1 m、缝宽1 mm)垫层内渗透比降为2.89,过渡区内渗透比降为1.45,和其他位置出现裂缝的计算结果较为接近。因此,一旦发生裂缝,垫层和过渡区的渗透坡降明显增大,主要原因是垫层和过渡区的渗透系数比其后面坝体材料的渗透系数小得多,水头损失较大,且裂缝周围的渗透比降随着与裂缝距离的增大急剧减小,见图(a)。

总之,在面板竖向缝止水失效、面板产生大量裂缝的极端情况下,面板的防渗性能大幅度降低,坝体渗流状况急剧恶化。在此情况下,除面板、主次堆石区、坝基和防渗帷幕处的渗透坡降有所减小外,垫层和过渡区的渗透坡降明显增大。垫层及过渡区的渗透稳定性应特别予以关注。

3 结 语

采用裂缝面单元法和固定网格的有限元理论进行含裂缝面单元的面板堆石坝的全场渗流分析。针对积石峡水电站大坝面板发生局部裂缝的极端工况进行三维稳定渗流分析。从积石峡水电站大坝面板发生裂缝的渗流场计算结果可得出以下结论:①在正常设计工况及水位条件下,面板和坝基防渗系统起到了很好的防渗作用,大坝渗流量不大,垫层和过渡区渗透比降较小,坝体具有较高的渗透稳定性。②裂缝位置不同对大坝渗流场和渗流量的影响程度也不同。裂缝发生在坝顶附近时,对大坝渗流场的影响较小,而当裂缝出现在大坝底部和中部时,大坝的渗流量较大,浸润线较高,特别是裂缝宽度较大、长度较长时,将影响坝体的稳定。③一旦面板发生裂缝,面板后的垫层和过渡区渗透比降急剧增大,垫层及过渡区的渗透稳定性应特别予以关注。

参考文献:

[1] 杨得勇, 雍莉. 混凝土面板砂砾石坝垫层料过渡料渗流及渗透稳定性试验研究[J]. 西北水电, 2001(2): 47-50.

[2] 宋永杰. 公伯峡面板堆石坝设计与施工特点[J]. 水力发电, 2002(8): 38-40.
 [3] 赵君. 面板堆石坝集中渗流研究[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(3): 460-463.
 [4] 张有天, 陈平, 王镭. 有排水孔的三维渗流场的有限元-边界元耦合分析[J]. 水利学报, 1985, 16(5): 30-38.
 [5] 许国安, 杨凯宏, 武桂生. 小浪底水库坝基防渗墙裂缝对渗流控制的影响[J]. 人民黄河, 1993(9): 28-31.
 [6] 朱岳明, 龚道勇, 章洪, 等. 碾压混凝土坝渗流场分析的缝面渗流平面单元模拟法[J]. 水利学报, 2003, 34(3): 63-68.
 [7] 王瑞骏, 吕海东, 李炎隆. 堆石坝混凝土面板裂缝的渗流形态及计算模型[J]. 水资源与水工程学报, 2008(1): 19-22.
 [8] 张嘎, 张建民, 洪锦. 面板堆石坝出现裂缝工况下的渗流分析[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 420-425.
 [9] 宋飞, 张嘎, 张建民. 各向异性对积石峡面板堆石坝渗流的影响分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 286-290.
 [10] 刘昌军, 丁留谦, 孙东亚, 等. 溪古水电站左岸三维渗流场有限元分析[J]. 长江科学院院报, 2009(5): 54-57.
 [11] 刘昌军, 丁留谦, 杨凯虹, 等. 水位骤降条件下有密集排水孔大坝三维渗流场数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2011(3): 24-30.
 [12] 周朋, 刘昌军, 池为, 等. 万家口子水电站拱坝坝基渗流场有限元数值模拟分析[J]. 中国西部科技, 2009(3): 12-16.
 [13] 刘昌军, 丁留谦, 高立东, 等. 文登市抽水蓄能电站三维渗流场有限元分析[J]. 水电能源科学, 2011(7): 57-60.
 [14] 刘昌军. 虹吸井子结构法在尾矿坝复杂渗流场求解中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 65-69.

(收稿日期 2010-06-22 编辑 骆超)

(上接第30页)

[2] 孙启冀, 侍克斌, 李捷. 碾压混凝土坝底孔缺口坝段三维有限元应力分析[J]. 吉林水电, 2006(2): 29-30.
 [3] 吕岳鹏. 混凝土大坝中施工导流底孔与缺口的优化布置[J]. 武汉水利电力学院学报, 1990, 23(6): 97-99.
 [4] 王才欢, 杨文俊, 周赤, 等. 三峡工程导流底孔水力学研究与运用[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 65-70.
 [5] 潘家铮. 世界上无没有裂缝的水坝[J]. 中国三峡建设, 2002(4): 6-8.
 [6] 汪安华, 许志安. 防止三峡大坝上游坝面产生垂直裂缝的研究[J]. 人民长江, 1994, 25(9): 7-13.
 [7] 阮征, 李林松, 张绘. 混凝土坝上游坝面裂缝处理[J]. 湖北水力发电, 2004(1): 29-30.
 [8] 许正平, 李浚元. 三峡二期工程大坝上游面裂缝处理[J]. 西北水电, 2005(2): 33-36.
 [9] 王盟, 凌春海, 陈共建. 红河南沙水电站底孔孔口效应分析与结构设计[J]. 人民珠江, 2010(3): 25-31.
 [10] 屈高见, 王健, 马东辉. 龙口水电站大坝横缝渗漏处理工程的施工工艺[J]. 水利与特殊构筑物防水, 2010(13): 14-16.

(收稿日期 2011-05-23 编辑 骆超)