·水工建筑物设计与施工·

马槽河水电站双曲拱坝设计

王国香，李怀斌
(贵州中水建设项目管理有限公司，贵州　贵阳　550002)

摘要：马槽河水电站大坝是一座采用外掺 MgO 混凝土筑坝技术设计建成的双曲薄拱坝，在施工图阶段通过对坝址地形地质条件进行深入细致的研究后，将初步设计阶段的抛物线拱圈优化为统一二次曲线形拱圈，在坝体应力及坝肩抗滑稳定满足要求的前提下，节省了坝基开挖及坝体混凝土工程量；同时采用 MgO 混凝土快速筑坝技术，简化了温控措施，加快了施工进度，使电站提前发电，获得了良好的经济效益及社会效益。

关键词：水工结构；双曲拱坝；体形设计；MgO 筑坝技术；马槽河水电站
中图分类号：TV222　TV642.4+2　　文献标志码：B　　文章编号：1007-0133(2009)06-0026-04

1　拱坝坝轴线选择

马槽河水电站位于贵州省松桃县境内的大梁河中游，坝址区河谷基本对称，河谷深切呈 V 字形，正常蓄水位时河谷宽高比为 1.8；两岸山体雄厚，高出河面 100 m以上，山坡陡峭，左岸地形坡度为 53°~ 56°，右岸地形坡度为 65°~ 70°；枢纽区分布有 f_2、f_3、f_4、f_5、f_6、f_7、f_8、f_9、f_{10}等多条小断层，溶沟溶槽甚多。

根据坝址区地形、地质条件，综合考虑枢纽总布置、坝肩稳定、拱坝体形等诸多因素，选择拱坝坝轴线位于右岸断层 f_5与 f_7、左岸断层 f_6与 f_{10}之间。在选定的坝轴线位置，上游右岸受断层 f_7、电站进水口、大冲沟的限制，左岸受断层 f_6限制；下游右岸受断层 f_5、负地形的限制，左岸受断层 f_{10}限制，其间断层 f_8还从左岸建基面穿过：因此，布置拱坝的空间位置十分有限。从坝肩稳定、拱坝体形及应力状态、拱端嵌入深度、泄洪消能等方面考虑，拱坝位置经数个方案的深入研究和比选后如下：使左拱端推力尽量避开断层 f_6，故将拱坝中心线向右岸偏转了 2°，使得断层 f_6在左岸从拱端受力较小的顶部高程穿过建基面；断层 f_5、f_{10}位于坝肩下游 10~ 20 m；为尽可能保持拱坝的对称性、减小右岸负地形的影响、保证右岸岩体的稳定性，右岸拱端采用适当加大嵌深而不采用重力墩弥补地形的方法。

2　拱坝体形设计

2.1　拱坝线形选择

拱坝体形合理性的判断标准的主要因素是应力和稳定[1]。由于本工程坝址河谷狭窄，大坝不高，拱坝的应力条件相对容易满足设计要求，而坝址地质条件较为复杂，故坝肩稳定条件是控制拱坝体形的关键因素。设计主要考虑拱圈轴线平面形状与位置的合理布置，尽量使拱端的推力指向山体内部，以改善坝肩稳定条件，同时尽量提高拱坝对基础变形的适应能力[2]。基于以上设想，在相同的体形约束条件下，马槽河水电站拱坝水平拱圈比较了抛物线与统一二次曲线 2种线形。在应力分布基本相当的情况下，综合比较发现后一种线形具有坝体更

收稿日期：2009-09-01
作者简介：王国香(1974—)，女，贵州省江口县人，工程师，从事水工建筑物设计工作。

围内的最大拉应力大于 2.00MPa，MgO 的补偿量仍然不足，坝体混凝土超过了允许拉应力。因此，单纯外掺 MgO不能完全解决拱坝温控问题，必须辅之以其他温控措施。

(2) 外掺 MgO 辅之以设置诱导缝方案可以明显改善坝体的应力状况。通过多个方案仿真分析，落脚河水电站拱坝设置 4条诱导缝后坝体最大拉应力满足要求。

参考文献：
[1] 朱伯芳，张国新，杨卫中，等. 应用氧化镁混凝土筑坝的 2种指导思想和 2种实践结果[J]. 水利水电技术，2005，(5)：30.
[2] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 中国水利水电出版社，1999.
[3] 张国新. 大体积混凝土结构施工期温度场[R]/温度应力分析程序包 SAPTIS编制说明及用户手册，1994—2004

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

扁平 (中心角小 3°~ 5°)、拱端合力角 (拱端合力与拱冠梁剖面垂线的夹角)更小 (小 5°~ 8°)、坝体混凝土量更节省 (节约 7.5%)等优点，故最终选择了统一二次曲线形，其主要体形参数见表 1。

表 1　马槽河水电站拱坝体形参数

项目	参数	项目	参数
最大坝高/m	67.5	顶拱中心角/(°)	82.000
上游最大倒悬	0.157	底拱中心角/(°)	52.391
下游最大倒悬	0.106	最大中心角/(°)	95.121
弦高比(中心线)	1.87	拱冠梁顶厚/m	4.002
弧高比(中心线)	2.06	拱冠梁底厚/m	9.500
坝体柔度系数	14.917	拱端最大厚度/m	11.356

2.2　拱坝体形敏感性分析[3]

ADASO程序应用非线性规划方法，由计算机求出给定设计条件下拱坝的最优体形[4]。该程序功能较完善，使用较方便，但其功能还远未完善到可以取代设计人员的经验和判断的程度，以其求得的最优体形，只是针对拱梁分载法在特定条件下数学意义上的最优体形，而不一定是合理体形。

马槽河水电站拱坝最终确定的体形方案是在地质资料、科学试验研究成果的不断丰富、完善过程中，经不断调整有关设计条件做敏感性分析而从十几个方案中挑出的成果。

敏感性分析中主要考虑了几何、物理、力学参数及计算方法、计算程序等因素。有些因素相对独立，而有些因素有较强相关性，需交叉进行敏感性分析，这是敏感性分析工作量巨大的主要原因。马槽河水电站拱坝设计敏感性分析主要考虑以下 4个因素:

2.2.1　坝基综合变形模量

常规拱梁分载法是建立在半无限各向同性线弹性体之伏格特地基假定基础上的，而马槽河水电站拱坝岩层走向与河流走向大角度斜交，岩层倾向上游，除本身分层特性显著外，还存在数条规模不一、性状较差的小断层，导致地基表现出较明显的各向异性非线性变形特征，与基本假定有一定差距。即使各类岩体变形模量能精确给出，考虑岩层产状及断层带影响的综合变形模量的确定仍有较大的随意性。

均质地基在不同综合模量下坝体应力分析成果表明，综合模量的选择与日常理解的规则刚好相反：若地质报告提供的综合模量建议参数偏小，说明地质较差，此时的拱坝体积按常理应该加厚加大，但是如果选择的综合模量值也较小，则此时优化出来的坝体工程量却反而明显偏小，坝体拱端拉应力很容易满足要求，无形带来了不安全因素。当坝基综合变形模量大于 10 GPa时，马槽河水电站拱坝最大主拉应力随综合变形模量提高而增大，最大主压应力及拱冠径向位移则相反。这说明高估或低估坝基综合变形模量都是不安全的。因此应考虑可能、安全和经济等因素，给综合变形模量以合理的浮动 (数值及分布)，在浮动范围 10~ 15 GPa内坝体应力均能满足拱坝设计规范的要求。

2.2.2　坝体厚度

敏感性分析成果表明，坝体对地基综合变形模量变化的适应能力随坝周边 (拱端及拱冠梁底)厚度及坝体体积的增大而增强。当坝周边厚度约束条件较松时，ADASO程序给出坝周边厚度和体积均较小的体形，但其坝体应力对坝基综合变形模量的变化较敏感。设计中是在约束条件最宽所得优化体形基础上，采用逐步加严各控制高程的周边厚度约束条件的办法分别作出优化体形，再对综合变形模量予以浮动，并作应力敏感性分析，直到作出的体形适应能力达到预期目的为止。

值得指出的是前述规律只在单一工况下才完全成立。当考虑多种工况时，不同体形在相同综合变形模量下、同一体形在不同综合变形模量下的应力控制工况都有可能不一样，这导致前述规律只在约束条件变化较大时才成立，厚度约束条件的宽松、严格与体积大小在较小范围内并不表现为单调的增减关系，其他约束条件也有类似情况，这大大增加了给出恰当约束条件的难度。

2.2.3　库底水温及封拱温度

库底年均水温及封拱温度选定对坝体应力进而对坝体工程量影响显著。敏感性分析成果表明，在一定范围内、其他条件不变的前提下，库底年均水温每升高 1℃，相应优化体形体积可降低 2% ~ 4%；最低封拱温度每降低 1℃，相应优化体形体积可降低 3% ~ 5%：因此，带来的效益可明显高于增加制冷设备容量和延长温控运行期所增加的费用，可见合理选择库底年均水温和最低封拱温度对经济效益的影响是可观的。经分析马槽河水电站坝址水文气象条件、入库水流条件及水库工作特点，参考贵州省铜仁地区已建的漾头水电站水库实测水温资料、下游天生桥水电站堵洞体拱坝施工实测封拱温度以及施工队伍水平，并考虑一定的安全余地，确定马槽河水电站水库年均库底水温为 8℃，封拱温度为 14℃。

2.2.4　坝肩稳定

如果不考虑坝肩稳定条件，则得出顶拱中心角

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

较大、坝体工程量较小的优化体形。ADASO程序通过约束拱中心线与可利用基岩等高线夹角及拱端中心角来反应拱座稳定要求。中上部高程拱圈中心角越大，相应部位的刚度及拱分载就越大，对该部位拱座稳定越不利，小断层需处理的范围就越大，而对底部高程的抗滑稳定却越有利，反之亦然。在尽量避免增大拱端嵌入深度而又满足底部抗滑稳定要求的前提下，尽量减小中上部高程中心角，并减小拱端小断层需处理的范围，并使坝体和小断层处理总工程量最小是确定本工程稳定约束条件的原则之一。最终方案稳定约束条件就是依据这个原则经敏感性分析而确定的。

3　应力分析

3.1　多拱梁法应力分析

马槽河水电站拱坝应力计算采用多拱梁法，即7拱 15梁全调整法分析 (河床中设 3根梁)。计算分析了 4种工况：工况 1：正常蓄水位 + 泥沙压力 + 自重 + 温降；工况 2：正常蓄水位 + 泥沙压力 + 自重 + 温升；工况 3：发电死水位 + 泥沙压力 + 自重 + 温升；工况 4：校核洪水位 + 泥沙压力 + 自重 + 温升。其中工况 1、2、3属基本工况，工况 4属特殊工况。计算程序采用中国水科院结构所的ADASO程序。马槽河水电站拱坝不同工况上下游面最大主应力计算成果见表 2。

从表 2可以看出，4种工况的最大主应力均不超过允许应力，均满足要求。荷载基本组合的上下游面最大拉应力为 1.19MPa，最大压应力为 4.46MPa，荷载特殊组合的上下游面最大拉应力为 1.11MPa，最大压应力为 4.02MPa，均未达到允许应力值，有较大的安全裕度。

表 2　马槽河水电站拱坝不同工况上下游面最大主应力

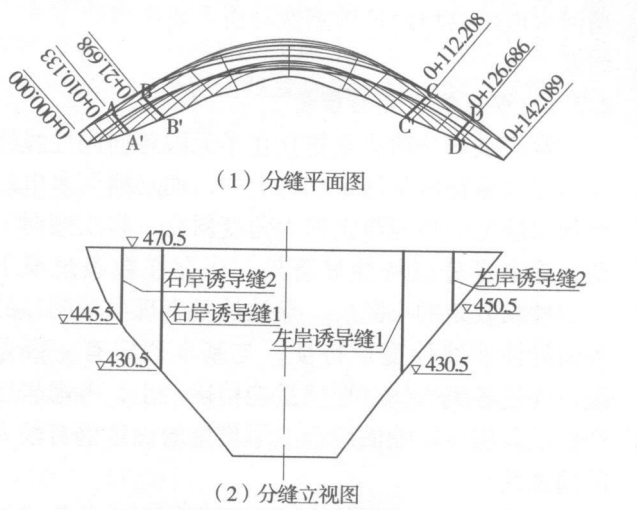
荷载组合	工况	应力及位置	上游面		下游面	
			拉应力	压应力	拉应力	压应力
基本组合	正常蓄水位+温降	应力值 / MPa	−1.19	3.45	−0.84	4.46
		高程/m，位置	423.0, 左岸	433.0, 拱冠梁	403.0, 右岸	423.0, 左岸
	正常蓄水位+温升	应力值 / MPa	−1.19	3.52	−0.64	4.02
		高程/m，位置	413.0, 右岸	470.5, 右岸	461.0, 左岸	423.0, 左岸
	死水位+温升	应力值 / MPa	−1.09	3.56	−0.95	3.41
		高程/m，位置	413.0, 右岸	470.5, 右岸	461.0, 左岸	423.0, 左岸
特殊组合	校核洪水位+温升	应力值 / MPa	−1.11	3.49	−0.56	4.02
		高程/m，位置	413.0, 右岸	470.5, 右岸	461.0, 左岸	423.0, 左岸

3.2　外掺 MgO仿真计算应力分析

马槽河水电站拱坝采用外掺 MgO混凝土快速筑拱坝技术，混凝土分层通仓浇筑，拱坝在施工过程中就已经形成整体，大致相当于改变了封拱温度，加上混凝土自生体积变形对坝体变形及应力均有影响，因此用常规多拱梁法计算得到的应力与坝体实际应力状态不一致。为了了解外掺 MgO混凝土拱坝的应力情况，中国水科院结构所对该拱坝进行有限元仿真计算分析研究：选定 MgO掺量，确定是否采取分缝等结构措施以及坝体混凝土施工过程的温控方案。

仿真计算采用 MgO混凝土 30℃养护，90 d龄期时膨胀量为 40με，最终膨胀量为 56με。

仿真计算结果表明，不分缝时坝体中下部大范围应力超过 1.80MPa，左右岸坝肩附近有大范围的大应力区，超过混凝土的允许拉应力；分 4条可灌浆诱导缝不加冷却水管方案 (分缝在左岸从高程 430.5，450.5m开始，右岸从高程 430.5，445.5 m开始，见图 1)在掺适量 MgO后，坝体应力基本满足应力控制的要求。



(1) 分缝平面图

(2) 分缝立视图

图 1　马槽河水电站拱坝诱导缝设置示意图

实测结果表明 MgO(90 d龄期)的膨胀量为 80με，修正 MgO膨胀量的仿真计算结果表明，坝体除周边与基础接触的上下游面奇异部位外，最大拉

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

应力不超过 1.2MPa，坝体与基岩接触的第 1层单元上下游处拉应力偏大，此为奇异点应力集中所致，不影响坝体的强度安全。

大坝初次蓄水后等效应力计算结果表明，拱坝从初次蓄水开始至蓄水到正常蓄水位后的 1年内，坝体上下游面等效应力中最大拉应力值小于 1.5MPa，满足要求。

4 坝肩稳定分析

马槽河水电站拱坝坝址处为横向河谷，坝肩岩体主要为寒武系下统清虚洞组（$\in_1 q^2$）灰白色中厚层状细晶白云岩及白云质灰岩，岩层倾向上游（倾角 35°~ 60°）。坝肩岩体发育有多条断层（f_4、f_5、f_8、f_9、f_{10}），地表分布高程 405.0~ 530.0m，倾角一般为 50°~ 65°，与裂隙成相互切割或交接关系，破裂面在左岸倾向山内至右岸又倾向河床，反之从右岸倾向山内至左岸又倾向河床。岩体中裂隙多以陡倾角为主，未发现缓倾角结构面。通过大坝开挖及洞室开挖揭露，断层闭合较好，岩溶不发育，两坝肩地质条件明显好于初设阶段勘察成果。

右岸山体地形为深凹的负地形，坝肩山脊单薄，设计时不作为右坝肩抗滑岩体，故将坝肩嵌深加大（最深处达 24m）。左右坝肩均通过最不利结构面及其组合进行抗滑岩体分析计算。

4.1 计算方法

根据规范的要求，采用刚体极限平衡法进行左右坝肩岩体稳定计算。参照王毓泰、周维垣等编著的《拱坝坝肩岩体稳定分析》[5]第 3章的内容，具体来说，即是应用矢量代数工具，解决空间稳定分析中的合力、滑移类型及安全系数的计算方法。

实际空间稳定分析中，坝肩岩体最常见的滑移类型有 2类，即沿底部结构面的单面滑移以及沿侧向结构面与底部结构面的双面滑移。单面滑移时滑移体沿作用在滑移体上的总合力在底部结构面上的投影方向滑动，双面滑移时滑移体沿侧向结构面与底部结构面的交线方向滑动。

求解滑移体的合力时将作用在滑移体上的拱端力系、滑移体自重、侧向结构面和底部结构面的渗透力、横向结构面的水压力用矢量表示，用矢量叠加方法求出作用在滑移体上的总合力矢量。当总合力矢量在侧向结构面法线的分量使侧向面受压时，滑移体滑移类型为双面滑移，反之为单面滑移，从而确定滑移体的滑移方向。

抗滑稳定安全系数按下式计算：

$$K_1 = \frac{\sum (Nf_1 + C_1A)}{\sum T}$$

式中：K_1为抗滑稳定安全系数；N为滑移体总合力在滑裂面法向的分力（压力）；T为滑移体总合力在滑移方向的分力；A为计算滑裂面的面积；f_1为抗剪断摩擦系数；C_1为抗剪断凝聚力。

4.2 计算结果

经过计算，马槽河水电站拱坝坝肩岩体在“正常蓄水位 + 温降”和“校核洪水位 + 温升”荷载组合下，左岸最小抗滑稳定安全系数均大于 10.0，右岸最小抗滑稳定安全系数为 4.68，满足设计规范要求。

需要说明的是大坝在设计时充分考虑了众多不利地质条件的影响因素，以最不利的结构面及其组合进行稳定设计，而坝基（肩）开挖揭露的地质条件要好于初步设计阶段地质勘察的成果，没有出现重大的地质条件改变；另一方面，地质上提供的坝肩稳定设计参数略偏于安全，大坝设计没有因施工开挖地质条件改变而作修改和调整。综上所述，马槽河水电站拱坝坝肩抗滑稳定是满足要求的。

5 结束语

（1）马槽河水电站拱坝坝轴线的选择是恰当的，使地形地质条件更优越，坝体方量及断层处理工程量减少。

（2）统一二次曲线的体形能更好的适应坝址地形地质条件，坝体应力状态更趋合理，坝肩岩体更加稳定，坝体工程量和基岩开挖量明显减少，达到了节约投资、缩短工期的目的。

（3）坝肩岩体的稳定重要的是合理的坝址选择、详细的地质勘察、完善的基础处理。经过本工程三维刚体极限平衡法的计算，说明拱坝拱圈曲率半径的增减对拱肩的抗滑稳定无影响。

（4）采用 MgO筑坝技术可简化施工工艺、降低施工难度、缩短施工工期，具有很好的实用价值，可在有条件的混凝土拱坝工程中予以推广。

参考文献：

[1] 厉易生，陈玉夫，杨波，贾金生. 江口椭圆拱坝优化设计 [J]. 中国水利水电科学研究院学报，2003，(3)：223.

[2] 陈丽萍. 沙牌碾压混凝土拱坝体形设计 [J]. 水电站设计，2004，(2)：36.

[3] 曹去修，班红艳，王志宏. 江口水电站拱坝体形设计 [J]. 人民长江，2001，(3)：25

[4] 朱伯芳，厉易生，贾金生. 拱坝优化程序 ADASO原理和方法 [M].

[5] 王毓泰，周维垣，毛健全，顾悦. 拱坝坝肩岩体稳定分析 [M]. 贵阳：贵州人民出版社，1982.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net