

基于 CATIA 的拱坝坝肩复杂块体抗滑稳定分析

张 燕, 周 围, 唐 忠 敏

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 本文结合实际拱坝工程坝肩抗滑稳定分析中“一陡一中一缓、两陡一中一缓”等复杂块体组合滑移模式, 研究了利用先进辅助设计工具CATIA三维软件进行拱坝坝肩抗滑稳定安全分析的方法和步骤, 并成功应用上述方法分析了锦屏一级和大岗山水电站坝肩复杂块体的稳定。该方法具有直观、简单实用、快速高效和适应性强等优点。三维CATIA软件在拱坝坝肩抗滑稳定中的成功应用, 适应了当前水电三维数字化设计的大趋势, 丰富了拱坝坝肩抗滑稳定分析的手段。

关键词: CATIA; 拱坝坝肩抗滑稳定; 刚体极限平衡; 三维数字化设计

中图分类号: TV642.45

文献标识码: B

文章编号: 1003-9805 (2011) 03-0018-04

Application of CATIA in analysis of arch dam abutment stability

ZhangYan TangZhongMin ZhouWei PangMingLiang

(HYDROCHINA CHENGDU ENGINEERING CORPORATION, Chengdu 610072, China)

Abstract: Based on engineering practice, the methods and steps of applying CATIA to analyzing the stability of arch dam abutment is studied in this paper. It has been applied to dam-abutment stability analysis of Jinping and Dagangshan Power Station successfully. This method is simple, efficient and adaptability. It adapts to the trend of 3d digitizing design.

Key words: CATIA; arch dam abutment stability; rigid body limit equilibrium method; 3d digitizing design

1 前 言

正在建设中的锦屏一级、溪洛渡、大岗山水电站均为世界之最, 这些工程坝高库大、地质条件复杂、设计难度大, 所面临的工程问题有些非规范和经验所能解决, 在此背景下要求设计人员在现有设计理论上改进设计方法, 利用先进的设计工具和设计手段以满足现代工程建设的需要。

拱坝所承受的荷载大部分通过拱的作用传到两岸拱座岩体, 拱坝坝肩抗滑稳定是关系拱坝安全的关键所在。长时间以来, 拱坝工程中分析坝肩抗滑稳定时主要考虑的有一陡一缓、两陡一缓和阶梯滑块三种块体组合模式, 但在锦屏一级和大岗山工程实际应用中发现, 由于中、缓倾角裂隙、断层或岩层的存在, 拱坝坝肩稳定块体除了上述三种组合模式外还存在一陡一中一缓和两陡一中一缓的复杂块体组合模式。

目前, 国内大多设计院分析坝肩抗滑稳定时, 广泛采用的是结合CAD软件开发的刚体极限平衡法稳定分析程序。基于CAD的坝肩抗滑稳定计算程序虽然提高了工作效率, 但是由于受到程序块体组合模式固定化和CAD软件功能的限制, 使得程序在复杂滑块切割、块体自重求解和渗压计算方面遇到了诸多困难, 特别是地形复杂、块体组合复杂的情况下程序有时将无法切割出滑动块体, 给坝肩抗滑稳定分析工作带来了极大困

难。

本文将CATIA三维软件与刚体极限平衡计算方法相结合, 进行了拱坝坝肩复杂块体稳定分析的有益尝试工作。

2 基于 CATIA 的坝肩抗滑稳定分析方法

2.1 基本理论

拱坝坝肩抗滑稳定分析有多种方法, 经常使用的有刚体极限平衡法、有限元计算法和地质力学模型试验法。

《混凝土拱坝设计规范》(DL/T 5346—2006)规定, 拱坝坝肩抗滑稳定分析以刚体极限平衡法为主, 当采用刚体极限平衡法分析拱座稳定时, 假设块体在外荷载作用下处于极限平衡状态, 且应满足承载能力极限状态设计表达式(1)、(2)的要求:

$$\gamma_0 \psi \sum T \leq \frac{1}{\gamma_{d1}} \left(\frac{\sum f_1 N}{\gamma_{m1f}} + \frac{\sum C_1 A}{\gamma_{m1c}} \right) \quad (1)$$

$$\gamma_0 \psi \sum T \leq \frac{1}{\gamma_{d2}} \frac{\sum f_2 N}{\gamma_{m2f}} \quad (2)$$

为得出习惯意义上的安全系数, 将式(1)、式(2)变换可得到式(3)、式(4):

$$SF_1 = \frac{1}{\gamma_{d1}} \left(\frac{\sum f_1 N}{\gamma_{m1f}} + \frac{\sum C_1 A}{\gamma_{m1c}} \right) / \gamma_0 \psi \sum T \geq 1.0 \quad (3)$$

$$SF_2 = \frac{1}{\gamma_{d2}} \frac{\sum f_2 N}{\gamma_{m2f}} / \gamma_0 \psi \sum T \geq 1.0 \quad (4)$$

式中：

SF1一式(1)中抗力项与作用项的比值，即按分项系数形式计算分析拱座抗滑稳定(剪摩)时的抗滑稳定安全系数，安全系数大于或等于1.0即满足现行规范要求；

SF2一式(2)中抗力项与作用项的比值，即按分项系数形式计算分析拱座抗滑稳定(纯摩)时的抗滑稳定安全系数，安全系数大于或等于1.0即满足现行规范要求。

由基本原理可知，利用刚体极限平衡法分析坝肩抗滑稳定的求解工作主要涵盖三个方面：①利用软弱结构面构造影响坝肩抗滑稳定的不利滑块；②求解滑块自重及各滑移面面积，并根据渗压作用原理求解作用于各滑移面的渗压；③矢量分解，判断滑移模式和滑动方向，求解安全系数。其中第①和第②项主要是空间图解工作，而这正是CATIA三维软件的强项，利用CATIA软件自身功能辅以简单的二次开发便可以快速完成上述两项工作。

2.2 基于 CATIA 的坝肩抗滑稳定分析流程

CATIA软件是法国Dassault System公司的CAD/CAE/CAM一体化软件，它拥有强大的三维造型功能。近几年来CATIA三维软件在水电行业得到越来越多的应用并取得了显著成绩。

经多次摸索，本文总结出利用CATIA分析拱坝坝肩稳定的主要技术流程如下：

2.2.1 建立三维地形网格文件 三维地形网格(如图1所示)是坝肩抗滑稳定分析的基础。构建CATIA三维地形网格有两种方式，一种是通过GOCAD直接将地形测绘数据导入CATIA建立地形网格，另一种是通过二次开发利用CAD数据建立三维地形网格。在三维模式下，我们可以方便的考虑坝基开挖和水垫塘开挖，还可以直接利用实际开挖后的地形构建稳定分析的三维地形网格，从而省略掉传统计算中的开挖计算工作。

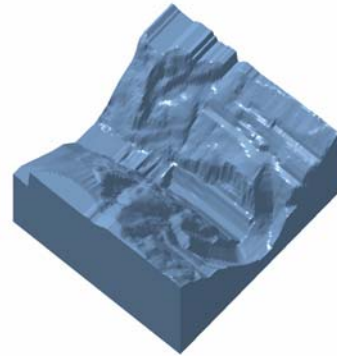


图1 三维地形网格

2.2.2 建立软弱结构面三维模型 根据岩脉、断层、裂隙等软弱结构面的产状及出露点，利用CATIA软件的曲面造型功能快速建立结构面三维概化模型(如图2所示)。

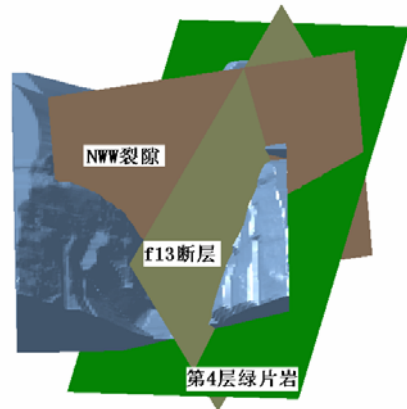


图2 软弱结构面

2.2.3 构造滑移块体 滑移块体的构造是一个综合分析问题，设计者需要根据地形地质资料和软弱结构面的空间展布，并结合拱坝坝肩受力情况分析可能的块体组合。该步以步骤1和步骤2的成果为基础资料，通过综合分析，利用不同软弱结构面组合切割三维地形网格即可构造坝肩稳定分析计算块体(如图3所示)。

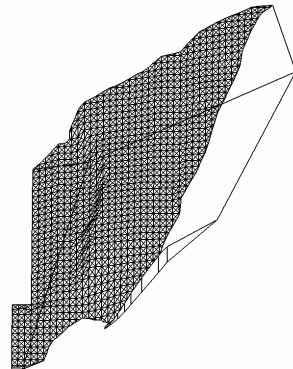


图3 三维滑移块体

2.2.4 渗压求解 可采用两种方式求解滑面上的渗压,一是直接考虑全水头求解,另一种是利用三维渗流场求解。利用全水头计算渗压时应根据渗径长度以及防渗帷幕、排水孔的影响来拟定渗压分布。本文计算中,滑块上游拉裂面渗压取全水头,滑块末端出露点高于下游尾水位时渗压取零,在上游拉裂面至滑块末端之间的渗压假定为线性变化,在防渗帷幕及排水孔所在位置分别对扬压力进行适当折减,由此分别确定作用于各滑面上的总渗透压力,计算过程详见锦屏一级水电站算例。

将CATIA引入坝肩稳定分析后,还可根据三维渗流场结果计算求解各滑面渗压,详见大岗山水电站算例。



图4 作用于结构面上的渗压

2.2.5 知识工程分析 该步利用CATIA软件的查询功能快速统计块体体积和滑移面面积,在此基础上利用CATIA知识工程模块完成力的求解工作以得到矢量分解的输入数据(如图5所示)。



图5 块体参数统计及计算

2.2.6 安全系数计算 将基于CATIA软件求解的块体分析前处理结果和拱推力代入矢量分解程序,计算块体安全系数。

2.3 优点分析

与传统的手工图解法和基于CAD软件的拱坝坝肩抗滑稳定计算分析程序相比,本文所采用的方法具有以下优点:

2.3.1 直观 CATIA能形象、直观的展现出拱坝、软弱结构面以及地形的三维关系,可以方便快捷的分析、组合出坝肩抗滑稳定计算块体,并能直接查看块体各结构面的关系,从而对块体的滑移模式做出初步判断。

2.3.2 快速、高效 利用CATIA可以快速获得块体的重量和各滑面所承受的渗压,从而可以省略掉传统程序繁琐的块体自重和渗压求解工作。除此之外在进行坝肩抗滑稳定分析计算时,构成块体的软弱结构面中通常包含某一组或两组优势裂隙,在构造块体时需要在不同位置组合下搜索最不利块体。CATIA的参数化设计功能使得搜索工作变得非常快捷。滑动面组合情况越多,利用CATIA分析坝肩抗滑稳定的优势越明显。

2.3.3 简单、实用 一些传统计算程序很棘手甚至无法解决的问题在CATIA软件中变得非常简单。例如我院基于CAD开发编制的拱坝坝肩抗滑稳定程序无法计算一陡一中一缓 and 两陡一中一缓的复杂滑块组合,而利用CATIA软件可以方便的切割各种滑块组合,解决上述问题。另外,本文方法理论成熟,计算步骤简洁,能被广大设计者所掌握,拥有较大的实用价值。

3 工程应用

3.1 锦屏一级坝肩抗滑稳定分析

锦屏一级混凝土双曲拱坝坝高305m,坝顶高程1885m,正常蓄水位1880m。本文以右岸断层 f_{13} ($N58^\circ E, SE \angle 72^\circ$) + 第四层绿片岩($N45^\circ E, NW \angle 35^\circ$) + NWW裂隙($N70^\circ W, SW \angle 70^\circ$) + 水平剪出面构成的两陡一中一缓块体(以下简称R1)为例,介绍利用CATIA直接考虑全水头计算各滑移面上渗压,从而分析坝肩抗滑稳定安全系数的方法。

直接考虑全水头计算各滑移面上渗压时,滑块上游拉裂面与库水连通,其上各结点水头值为结点高程与正常蓄水位之差。假设A点为上游拉裂面和侧滑面交棱线上的最低点, B点为侧滑面与下游滑面交棱线上的最低点,则侧滑面渗压由A、B两点处水头值和正常蓄水位水面线确定。求

出A点高程便可以计算出A点水头值，A、B之间水头按线性变化，根据渗径对A点水头进行折减计算可求出B点水头值；下游滑面渗压求解和侧滑面渗压求解相似，其上各结点水头均由A点水头按渗径折减计算得出，值得强调的是下游滑面

滑块末端出露点高于下游尾水位时出露点渗压取为零（如图6所示）。

R1块体计算结果见表1，由计算结果知该块体纯摩安全系数、剪摩安全系数均超过规范要求，R1块体稳定。

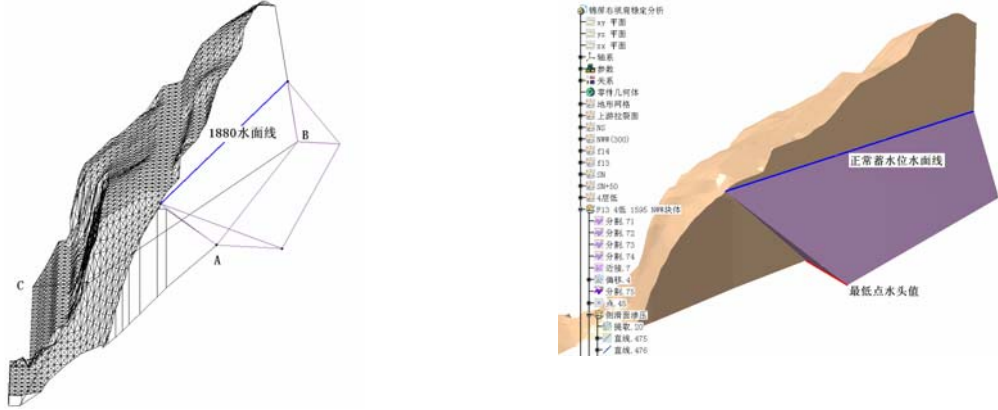


图6 由全水头求解渗压

R1 块体稳定分析成果

表 1

拱推力 10 ³ KN		块体自重 10 ³ KN	渗压 10 ³ KN		面积 10 ³ m ²	安全系数 SF _i		备注
Fx	22306.15	/	侧滑面	18689.62	66.84	纯摩安全系数	10.07	上游拉裂面面积以 1.0 占位；拱推力由拱梁分载结果求出；
Fy	52710.45	/	中滑面	116175.6	87.94			
Fz	-33480.09	370060.38	底滑面	17333.10	14.75			
			下游滑面	16096.62	81.18	剪摩安全系数	6.73	
			上游拉裂面	23832.28	1.00			

注：表中为排水帷幕部分失效的安全系数。

3.2 大岗山坝肩抗滑稳定分析

大岗山混凝土双曲拱坝坝高210m，坝顶高程1135.00m，正常蓄水位1130.00m。以f₂₃₁为中滑面，陡倾岩脉β₄、β₆₂、β₆₈等作为侧滑面，裂隙⑥作为底滑面形成的一陡一中一缓块体的稳定性是工程关注的重点。

本文以右岸岩脉β₄ (N24° W/SW∠68°) + 断层f₂₃₁ (SN/E∠40°) + 裂隙⑥低高程 (N9° W/NE∠19°) 构成的一陡一中一缓块体 (以下简称R2)

为例，介绍在CATIA中利用渗流场结果计算渗压，从而分析坝肩抗滑稳定的方法。

利用三维渗流场计算各滑移面上的渗压，需利用滑面和渗流场构成三维空间封闭体（如图7所示），由于渗流场是由一系列水平等势线组成，渗流场和滑移面构成的渗压分布还应根据结构面自身倾角换算为垂直于滑移面的渗压。

R2块体计算结果见表2，由计算结果可以知R2块体稳定。

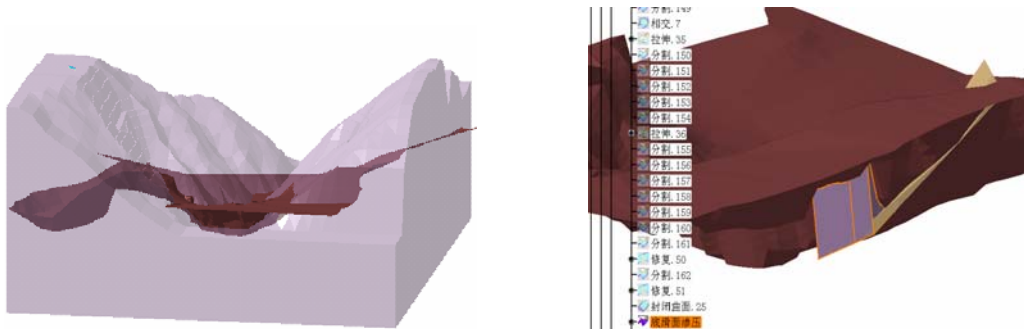


图 7 由渗流场计算的渗压

表 2

R2 块体稳定分析成果

	拱推力 10 ³ KN	块体自重 10 ³ KN	渗压 10 ³ KN		面积 10 ³ m ²	安全系数 SF _i		备注
F _x	-6731.87	/	侧滑面	0.71	4.92	纯摩安全系数	1.38	上游拉裂面面积以 1.0 占位; 拱推力由拱梁分载结果求出;
F _y	-19954.66	/	中滑面	746.90	30.99			
F _z	-16010.21	18899.54	底滑面	882.74	14.97	剪摩安全系数	1.13	
			上游拉裂面	1904.75	1.000			

注：计算成果为排水帷幕正常工作时的安全系数。

4 结语

本文结合工程实践中拱坝坝肩复杂块体的抗滑稳定分析，从坝肩抗滑稳定块体切割、块体重量、滑面面积、滑面渗压计算等方面详细介绍了基于CATIA软件进行拱坝坝肩抗滑稳定复杂块体安全系数计算的方法和步骤，并将该方法成功应用于锦屏一级水电站两陡一中一缓块体组合和大岗山水电站一陡一中一缓块体组合的稳定

分析，其分析计算结果合理可靠。

实践证明本文采用的基于CATIA的拱坝坝肩抗滑稳定方法能适应各种块体组合的计算，并能大大提高拱坝坝肩抗滑稳定分析计算精度和效率，进一步丰富了拱坝坝肩抗滑稳定分析的手段。

参考文献:

- [1] 张伯艳, 陈厚群. 用有限元和刚体极限平衡方法分析坝肩抗震稳定[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5):665-670.
- [2] 顾冲时. 有限元法在分析拱坝坝肩抗滑稳定中的应用[J]. 大坝观测与土工测试, 1996, 20(3):36-39.
- [3] 张林, 范景伟, 何江达. 拱坝坝肩含断续节理岩体破坏机理研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2000, 32(1):7011.
- [4] 周秋景, 李同春. 混凝土拱坝坝肩的安全评价问题综述[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3):81-85.
- [5] 徐明毅, 汪卫明, 陈胜宏. 三维刚体极限平衡法中荷载的计算方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(5):755-758.
- [6] 杨庚鑫, 吕文龙, 张林, 陈媛. 唐坝高拱坝坝肩稳定三维地质力学模型破坏试验研究[J]. 水力发电学报, 2010.

备注：申请参加本届汪院士青年优秀论文评选的论文题目为《基于 CATIA 的拱坝坝肩复杂块体抗滑稳定分析》，该篇论文是以在《水电站设计》上发表的《基于 CATIA 三维设计软件的拱坝坝肩抗滑稳定分析》为基础，按新版拱坝规范要求的分项系数法完善、修改而来。

《基于 CATIA 的拱坝坝肩复杂块体抗滑稳定分析》参加 2011 年度集团公司青年科技论文评选，并获得一等奖。