

文章编号:1001-4179(2012)02-0078-05

碾压混凝土重力坝安全度评价方法研究

苏培芳

(长江勘测规划设计研究院 工程技术研发中心 湖北 武汉 430010)

摘要:光照碾压混凝土坝是目前世界上最高的碾压混凝土重力坝之一,坝高库大,其安全稳定性是施工期和运行期中至关重要的技术问题。运用有限单元法,对光照碾压混凝土重力坝施工期和运行期的温度场、渗流场、应力应变场等进行仿真分析,采用超载法和强度折减法相结合的方法模拟坝体(坝基)系统的渐进破坏过程和可能的失稳模式,并根据特征点位移突变、屈服区贯通等方法判断大坝的整体安全度,同时对坝基浅层面进行抗滑稳定计算。研究结果表明,光照碾压混凝土重力坝的整体安全度大于3.0,且坝基浅层面等薄弱部位的安全系数大于2.0,满足工程稳定的需要。

关键词:安全度;超载;强度折减法;碾压混凝土重力坝
中图分类号:TV642 文献标志码:A

稳定安全度分析是碾压混凝土重力坝设计和运行期的重要技术问题。光照碾压混凝土重力坝是目前在建的世界上最高的碾压混凝土重力坝之一,大坝结构的特殊性和工作条件的复杂性,决定了其稳定安全度及应力应变的真实状态与地基、施工和运行期的多种因素相关,因此对其进行整体承载能力和安全度的分析评价是一项非常复杂、难度较高的研究工作。

目前大坝整体安全性评价的主要方法有地质力学模型试验方法和数值分析方法等^[1]。通过模型试验可以得到结构的破坏形态以及损伤破坏过程,确定整体稳定安全度。但其结果与工程现场实际的地质条件、荷载组合等差异较大^[2],同时需消耗大量的人力和物力资源。近年来数值模拟方法在大坝整体安全分析中得到越来越广泛的应用,如有限单元法、离散单元法、不连续变形分析方法、数值流形方法、块体单元法、复合单元法等^[3-4],而其中有限单元法的应用最为普遍和深入,不仅考虑了大坝的各种荷载组合效应,真实模拟大坝的具体施工过程和蓄水过程,而且可以模拟基础的各种软弱结构面。但目前的研究工作尚存在以下不足,如施工期仿真与运行期安全度评价联系不紧密,地基基础与大坝作为结构体系进行整体研究的原

则贯彻不彻底,温度、渗流、应力应变、安全度的耦合研究贯彻不彻底等等。

针对这种现状,本文结合以往相关研究成果^[5],开展了如下研究:①建立三维整体仿真分析模型,对坝基内断层和坝体(坝基)的接触面等软弱结构面进行离散模拟;②按照实际的施工过程和蓄水过程,模拟施工期的温度场、渗流场、徐变应力场等;③在施工期仿真的基础上,利用超载法和强度折减法对坝体(坝基)系统进行渐进破坏计算,对光照碾压混凝土坝体和坝基系统整体安全度作出评价。本文采用的一系列仿真分析过程能更真实地反映大坝的稳定安全度,对合理评价大坝的整体安全度具有重要意义。

1 计算原理与分析方法

1.1 超载法

超载法是用逐步增加上游水荷载来研究坝体(坝基)系统从局部到整体破坏失稳过程的方法,由此得到安全系数叫超载安全系数,在超载分析中,仅超载作用于坝体上游面的水荷载,其他荷载都不超载,可分为超水位和超水容重两种方法^[6],如图1(a)、(b)所示,图中 γ_0 为正常水容重。

收稿日期:2011-11-15

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目“水库大坝除险与溃坝规律研究课题”(2006BAC14B01)

作者简介:苏培芳,女,工程师,博士,主要从事水工结构数值模拟方面的工作。E-mail: pfsu@163.com

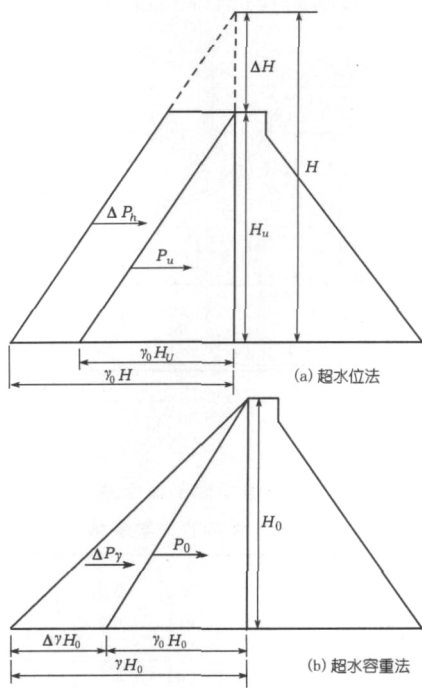


图 1 超载方式示意

1.2 强度折减法^[7-8]

强度折减法是用逐步降低岩体的力学参数研究坝体坝基系统从局部到整体破坏失稳过程的方法,可以反映岩体工程在长期运行过程中,由于库水的浸泡或渗漏使岩体中软弱结构面强度指标逐步弱化的影响。在保持荷载组合值不变的条件下,将岩体强度参数凝聚力 c 和内摩擦角 φ 值按一定的比例 K_1 和 K_2 折减:

$$c' = \frac{c}{K_1} \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{K_2}\right) \quad (2)$$

得到一组新的 c', φ' 值,将其作为新的参数输入,得出在该强度下的位移场、应力场和坝体(坝基)的屈服状况。重复这一步骤,获得多级强度条件下的位移场、应力场以及屈服区。在降低强度的过程中包括对 c, φ 值采用等比例降强度和不等比例降强度两种方法。国内外试验研究的结果证明, φ 值较稳定,波动较小,而 c 值受外界因素影响较大,不够稳定,波动较大,因此把 c, φ 同等看待按等比例降强度,显然是不够合理的,而采用不等比例降强度更符合实际,但存在着两者以何比例降低的问题,这一问题仍值得商榷。因此,本文对于材料的 c, φ 值采用等比例降强度的方法,即取 $K_1 = K_2 = K$ 进行分析。

1.3 综合法

综合法是在分析时综合采用超载法和强度折减法^[8-9],以便综合两种方法的优势,弥补单纯的超载和

降强的不足。这种方法既考虑到工程上可能遇到的突发洪水,又考虑了工程长期运行中岩体及软弱结构面力学参数在水的作用下逐步降低的可能性。

1.4 安全度判断

在进行安全度分析的过程中,需要一个判断标准,即通过何种指标判断坝体(坝基)系统已经破坏或失去承载能力,目前常用的有以下几种收敛判据。

(1) 有限元解收敛性判据。在求解迭代中,当系统的位移增量曲线或者荷载增量曲线达到极值后,在计算上即反应出迭代过程不收敛。因此,若在弹黏塑性分析过程中,排除其他原因之后,发现迭代计算不收敛,即可以作为系统失稳的判据^[4]。

(2) 塑性区贯通。在不断的加载和降低强度的条件下,坝体(坝基)系统出现屈服区,并扩展直到形成连通的屈服区,失去承载能力,作为一种失稳判据。该判别方法比较简单直接。

(3) 位移突变。将超载系数与坝体位移曲线中出现明显拐点所对应的超载系数或强度折减系数作为失稳判据,该判据可以表征整个结构的一种状态变化,比较明确和方便地界定坝体坝基的稳定性。

1.5 建基面的抗剪安全度分析^[10]

坝基浅层面对坝体坝基系统进行稳定性评价需要考虑的关键部位,由于其抗剪强度往往较低,必须对其进行安全度评估分析,通过对这些结构面及其组合的抗剪验算,是评价是否沿建基面发生滑移破坏的一个重要指标。通过有限元分析得出浅层面上的滑动力和抗滑力,根据滑动面是否胶结面,可分为纯剪安全度和抗剪断安全度两种。

$$K_{j1} = \frac{\sum \sigma_i f_{i1} A_i + \sum c_i A_i}{\sum \tau_i A_i} \quad (3)$$

$$K_{j2} = \frac{\sum \sigma_i f_{i2} A_i}{\sum \tau_i A_i} \quad (4)$$

式中, K_{j1} 为抗剪断安全度; K_{j2} 为纯剪安全度; σ_i 为浅层面上的法向应力; τ_i 为面上的剪应力, A_i 为第 i 个单元面的面积, f_{i1} 为抗剪断摩擦系数; f_{i2} 为纯剪摩擦系数; c_i 为内聚力。

1.6 点安全度

点安全度定义为抗力和荷载效应之比^[11],如果采用 Drucker - Prager 准则,点安全度可写为

$$K = \frac{-\alpha I_1 + k}{\sqrt{J_2}} \quad (5)$$

式中, α, k 均为与内摩擦系数 f 和内聚力 c 有关的常数。

2 计算模型与计算参数

2.1 计算模型

光照碾压混凝土重力坝,最大坝高 200.5 m,所建立的光照大坝和基础三维整体仿真模型的模拟范围:左右岸方向分别取约 408 m 和 401 m,上下游方向分别取 300 m 和 500 m,铅直向下取到高程 180 m,模型顶高程左岸取为 870.5 m,右岸取为 881.5 m。坐标系的选取:顺河向为 X 轴,指向下游为正;河床方向为 Y 轴,指向左岸为正;铅直方向为 Z 轴,向上为正,整个坝体和坝基共有 1 034 634 个单元,1 012 042 个节点,其中坝体单元数为 685 687,节点数为 665 763,建基面采用薄层单元。图 2 为三维整体有限元网格模型,图 3 为坝体放大网格模型。

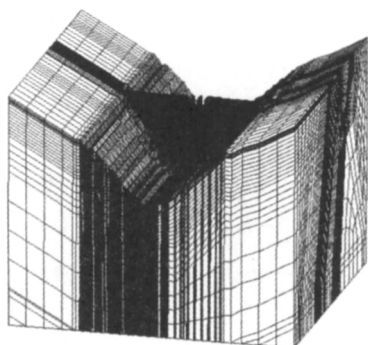


图 2 光照整体网格模型

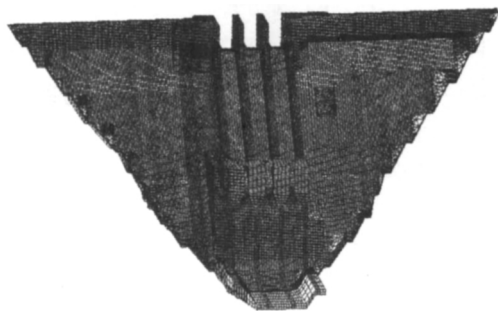


图 3 坝体网格模型

2.2 计算参数

图 4 为典型坝段剖面示意图,坝基岩体和结构面的力学参数取值见表 1。

2.3 计算工况和荷载

安全度评价分析是在大坝全程综合仿真分析的基础上进行的,整个分析过程如下。

(1) 温度计算。针对大坝的实际浇筑过程,真实地模拟各种温控措施包括通冷却水、仓面冷却等,以及真实地模拟当时的气温、水温,考虑分期蓄水,得出坝体真实温度分布情况。

(2) 渗流计算。精确模拟排水孔、防渗帷幕等渗

控措施,对各个蓄水高程进行渗流计算。

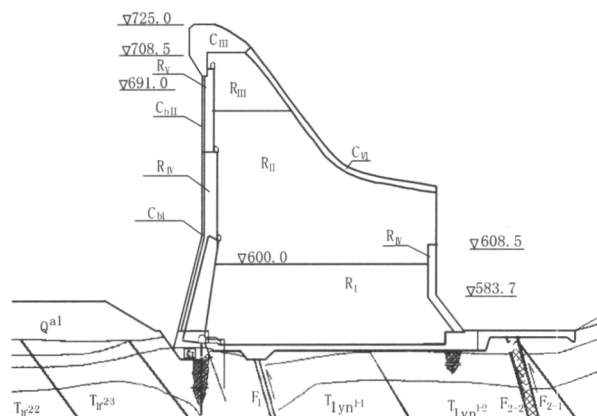


图 4 典型坝段剖面示意

表 1 各类材料的力学参数

材料类型	变形模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)	凝聚力/MPa	摩擦因素	抗压强度(允许承载力)/MPa	抗拉强度/MPa
常态 C1	31.10	0.167	2.45	2.00	1.0	31.2	2.55
R I C25	37.60	0.167	2.46	2.00	1.0	30.5	2.32
R II C20	35.50	0.167	2.44	2.00	1.0	23.6	2.12
R III C15	34.10	0.156	2.44	2.00	1.0	20.2	1.96
R IV C25	37.00	0.167	2.46	2.00	1.0	29.6	2.36
R V C20	35.90	0.167	2.45	2.00	1.0	23.9	2.18
T _{1r2-2}	3.00	0.330	2.75	0.8	0.5	2.5	0.50
T _{1r2-3}	7.75	0.280	2.75	0.8	0.8	3.8	0.70
T _{1yn1-1}	10.50	0.260	2.75	1.05	1.1	5.0	1.30
T _{1yn1-2}	10.75	0.260	2.75	1.0	1.2	5.5	1.10
T _{1yn1-3}	11.75	0.250	2.75	1.0	1.2	6.5	1.20
T _{1yn2}	7.00	0.300	2.750	0.6	0.7	2.5	0.60
T _{1yn3-1}	8.50	0.280	2.75	0.8	1.0	4.5	0.80
F1, F2	1.75	0.35	2.750	0.6	0.6	2.0	

(3) 应力应变计算。同温度计算一样,考虑到坝的浇筑过程和分期蓄水情况,模拟整个施工期的应力应变分布,考虑的荷载有:① 坝体自重;② 作用在坝体上的静水压力;③ 温度荷载;④ 作用于坝基的渗透荷载。

(4) 超载分析。采用超水位法,在应力应变仿真分析的基础上进行弹塑性分析,所选的屈服准则是 Drucker - Prager 准则,超载的倍数分别为 1.0(正常工况),1.25,1.5。

(5) 强度折减法。分别在 1.0,1.25,1.5 倍超载的基础上进行强度折减分析,所选的强度折减系数依次为 1.0,2.0,3.0,3.2,3.5,3.6,3.8,4.0,4.5,5.0 等。

3 计算成果与分析

3.1 位移曲线

碾压混凝土重力坝施工采用通仓碾压,是空间整

体结构,特征点的位移突变可以表征大坝的工作状态是否正常,图 5 是坝顶顺河向位移随降强系数的变化曲线,图 6 是铅直向位移随降强系数的变化曲线,坝体顺河向位移随着超载系数的增大而增大。正常工况下,顺河向位移在降强系数为 3.8 时发生突变,在 1.25 倍超载工况下,降强系数为 3.2 时位移发生突变,在 1.5 倍超载工况下,降强系数为 3.0 时位移发生突变。

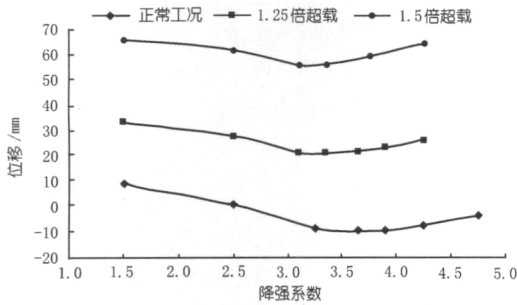


图 5 坝顶顺河向位移变化曲线

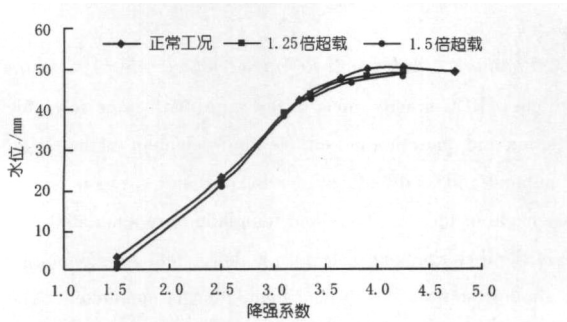


图 6 坝顶铅直向位移变化曲线

3.2 屈服区

图 7 所示为正常水荷载下,大坝屈服区随降强系数的变化过程。

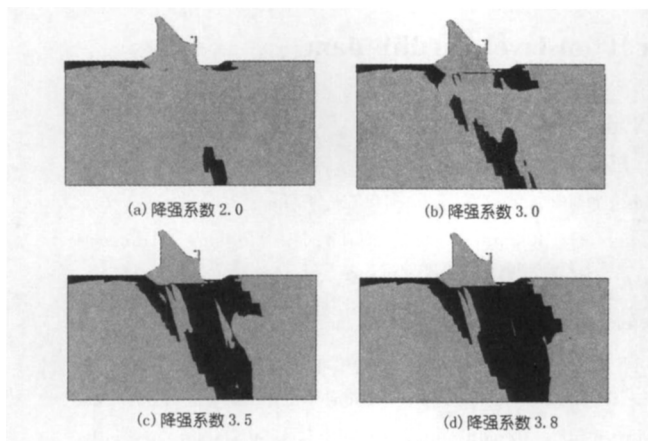


图 7 强度折减法坝基屈服区扩展过程

坝基屈服区随着降强系数的增加而慢慢扩展,从图 7 中可以看出,强度参数降低时基础的破坏类型和破坏过程为:首先在上游坝踵出现拉裂破坏和下游坝

趾处出现压屈服,然后是建基面和断层处出现屈服,到降强系数为 3.5 时屈服范围超过帷幕中心线,降强系数为 3.8 时屈服区基本贯通,在此过程中,下游坝基面屈服区的扩展速度较快,最后达到坝基全面贯通屈服,从而导致坝体坝基系统整体失稳。

3.3 浅层抗滑安全系数

表 2 给出坝基浅层抗滑安全系数,降强系数为 3.0 时,抗剪断安全系数为 1.97,纯剪安全系数为 0.76,不满足《混凝土重力坝设计规范》要求,建基面在降强系数为 3.0 时开始屈服。

表 2 坝基浅层抗滑安全系数

降强系数	正常工况		1.25 倍超载工况		1.5 倍超载工况			
	抗剪断安全系数	纯剪安全系数	抗剪断安全系数	抗剪安全系数	抗剪断安全系数	纯剪安全系数		
1.0	5.77	2.31	1.0	5.30	2.16	1.0	5.03	2.09
2.0	3.20	1.28	2.0	2.91	1.19	2.0	2.71	1.13
3.0	1.97	0.76	3.0	1.74	0.68	3.0	1.59	0.64
3.5	1.38	0.54	3.2	1.50	0.59	3.2	1.38	0.56
3.8	1.20	0.48	3.6	1.20	0.68	3.5	1.16	0.47
4.0	1.11	0.45	3.8	1.09	0.44	4.0	0.94	0.39
4.5	0.94	0.39	4.0	1.01	0.42	4.5	0.80	0.34
5.0	0.85	0.35	4.5	0.86	0.36			

4 结论

为了研究坝体及坝基系统的安全储备能力及可能的破坏模式,本文在对光照碾压混凝土重力坝温度场、渗流场、徐变应力场等进行三维仿真分析的基础上,采用超载和强度折减法相结合的方法,将特征点位移随超载降强的变化曲线,屈服区是否贯通以及建基面的浅层抗滑安全系数等作为安全判据研究坝体(坝基)系统的整体安全度,并得出如下结论:

(1) 正常水荷载下,根据特征点位移曲线突变点位置得出的安全系数为 3.8,超 1.25 倍水荷载工况下,降强系数为 3.6 时坝体(坝基)系统失去承载能力,超 1.5 倍水荷载时,安全系数为 3.2。

(2) 正常水荷载下,坝体大部分区域 D-P 点安全度均大于 3.0,在坝基部位出现 D-P 点安全度为 2.0 的区域,随着降强系数的增加,基础部位的屈服区范围逐渐增加直至连通,降强系数为 3.5 时大坝处于临界状态,安全系数为 3.5~3.8。

(3) 在正常水荷载下得出抗剪断安全系数较大,都大于 5.0,纯剪安全系数约为 3.0,均满足设计规范的要求,当降强系数为 3.0 时,抗剪断安全系数和纯剪安全系数均不满足设计规范的要求。

(4) 由于施工过程、方法以及施工期的变形、应

力、渗流、温度的变化都可能对高碾压混凝土重力坝的安全稳定性产生较大影响,因此开展综合仿真基础上的安全性评估才更具研究价值。

参考文献:

- [1] 董建华,谢和平,张林,等.大岗山双曲拱坝整体稳定三维地质力学模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(10):2027-2033.
- [2] 李同春,王仁坤,游启升,等.高拱坝安全度评价方法研究[J].水利学报,2007,(增):78-83.
- [3] 石根华.数值流形方法与非连续变形分析[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [4] 陈胜宏.计算岩体力学与工程[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] 朱伯芳.混凝土坝安全评估的有限元全程仿真与强度递减法[J].水利水电技术,2007,(1):1-6.
- [6] 段庆伟,耿克勤,吴永平,等.小湾拱坝变形承载力及整体安全度评价与分析[J].岩土力学,2008,29(增):15-20.
- [7] 江权,冯夏庭,向天兵.基于强度折减原理的地下洞室群整体安全系数计算方法探讨[J].岩土力学,2009,30(8):2483-2488.
- [8] 熊莹,何蕴龙,肖伟.桑郎拱坝整体稳定安全度数值分析[J].武汉大学学报:工学版,2007,(8):22-25.
- [9] 余天堂,任青文.锦屏高拱坝整体安全度评估[J].岩石力学与工程学报,2007,26(4):787-794.
- [10] 陈胜宏.水工建筑物[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [11] 宁宇,徐卫亚,郑文棠,等.白鹤滩水电站拱坝及坝肩加固效果分析及整体安全度评价[J].岩石力学与工程学报,2008,27(9):1890-1898.

(编辑:喻伟)

Study on stability evaluation method for RCC gravity dam

SU Peifang

(Engineering Technology Research Center, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The dam of Guangzhao Hydropower Station is one of the highest RCC gravity dams in the world with large reservoir capacity, the dam safety and stability is one of key issues in the construction and operation period. By finite element method, the temperature field, seepage field, stress-strain field of the dam are simulated and analyzed; by overloading and strength reduction methods, the progressive damage process and possible stability loss mode of the dam body and foundation are simulated and the dam integral safety degree is identified according to sudden change of the displacement of feature points, yield zone penetrating condition, and in the meantime, the anti-sliding analysis for the shallow stratum of the dam foundation is conducted. The study result shows the general safety degree of the RCC gravity dam is higher than 3.0, and the safety degree of weak zones such as the shallow stratum of dam foundation is higher than 2.0, which can meet the project stability requirement.

Key words: safety degree; overloading; strength reduction method; RCC gravity dam

(上接第 77 页)

Structural safety analysis of a 100m level hardfill dam

XIONG Kun^{1,2}, HE Yunlong^{2,3}, CHEN Tao⁴

(1. Engineering Development Center, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. State Key Lab. of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Xinglong Hydropower Station Administrative Department of South-to-north Water Diversion in Hubei, Qianjiang 433100, China)

Abstract: Hardfill dam is a new type of dam, and Oyuk Dam is one of the only two Hardfill dams higher than 100m in the world. Based on elastoplastic FEM, the failure modes and structural safety of the dam under static and seismic conditions were studied with overload method by water load and earthquake load. The results show that whole section of dam body is almost compressed under the condition of normal operation and basis earthquake with high strength and anti-sliding safety factors and is basically in an elastic state. Because of engineering measures such as concrete partition at dam bottom and dam heel, high strength hardfill material filling at dam toe, the dam possesses high overload safety margin for water load and earthquake.

Key words: hardfill dam; elastoplastic FEM; structural safety; Oyuk Dam