

文章编号: 1000-7598 (2009) 06-1769-06

碾压混凝土重力坝全程综合仿真分析与安全评估

苏培芳, 汪卫明, 何 吉, 陈胜宏

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 运用有限元方法对光照碾压混凝土重力坝进行施工期温度、渗流、应力应变的综合仿真分析, 得出了温度场、渗流场及应力场的分布规律, 在此基础上评价整个坝体与坝基系统稳定性的安全度, 为坝体与坝基系统的温控、渗控和安全性评价提供参考依据。同时对光照碾压混凝土重力坝进行了不考虑温度、徐变、浇筑过程和蓄水过程的应力-应变和安全度计算, 并对两种计算的结果进行了比较, 结果表明: 对碾压混凝土重力坝而言两者的位移相差最大, 达 70 mm; 应力差别其次, 达 1.5 MPa; 而整体稳定超载安全系数则没有本质区别。由于变形、应力和稳定安全系数在碾压混凝土重力坝设计中都是重要指标, 所以综合仿真分析具有意义。

关 键 词: 碾压混凝土重力坝; 温度; 渗流; 安全度; 全程综合仿真

中图分类号: TV 642.3

文献标识码: A

Integrated simulation and safety assessment for RCC gravity dam on rock foundation during whole process of construction

SU Pei-fang, WANG Wei-ming, HE Ji, CHEN Sheng-hong

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: By using finite element method, integrated simulation of whole process including temperature, seepage, stress and strain is carried out for Guangzhao RCC gravity dam. The results reveal the distribution laws of temperature field, seepage field and stress field. Based on the integrated simulation of whole process, the global safety degree of the dam-foundation system, which is important for the safety evaluation as well as the corresponding control measures of the temperature and seepage fields during the dam construction, is evaluated. The results are also compared by the conventional method and the integrated simulation of whole process for the Guangzhao RCC gravity dam, from which it is found that the largest displacement difference is 70 mm; the largest stress difference is 1.5 MPa; and there is no substantial difference in global safety degree. Since the deformation, stress and global safety degree are important indices in designing RCC gravity dam, the necessity of integrated simulation of whole process for RCC gravity dam is emphasized.

Key words: RCC gravity dam; temperature; seepage; safety degree; integrated simulation of whole process

1 引 言

大坝失效破坏的原因很复杂: 干缩、温度变化、超常荷载、水力劈裂、材质恶化、地基异常变形等, 都是可能引起破坏的因素。

温度作用是引起大坝混凝土开裂的重要原因。根据 ICOLD1988 年统计, 243 座毁灭性破坏的混凝土坝, 有 30 座主要由温度应力引起。混凝土温控防裂的理论框架, 在 20 世纪 50 年代已基本形成。改

革开放后, 中国一批大中型水利工程相继上马, 基本完善了大体积混凝土施工的温控技术, 避免了危害性的基础贯穿裂缝和严重的深层裂缝的发生, 表明中国的筑坝技术和温控防裂技术都处于世界先进水平。

地基失稳是引起大坝破坏的另一重要原因。据统计, 至 1985 年, 全世界在册的混凝土高坝 6261 座, 失事 0.24 %, 大部分与地基有关。世界各国对坝基的应力应变和稳定问题都非常重视。

收稿日期: 2008-07-28

第一作者简介: 苏培芳, 女, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事水工结构数值模拟方面的研究。E-mail: pfsu@163.com

通讯作者: 汪卫明, 男, 1975 年生, 副教授, 主要从事水工结构及岩土工程数值仿真分析的研究工作。E-mail: wmwang@whu.edu.cn。

岩石力学界针对结构面等地质缺陷模拟的问题提出了各种方法,除传统的有限单元法外,离散单元法、不连续变形分析方法^[1]、数值流形方法^[1]、块体单元法、复合单元法^[2]等都在快速发展并走向实用。

由于理论水平的提高和大量工程经验的积累,可以说在地质、施工、运行环境等条件明确的前提下,只要精心设计、认真施工就可以控制大坝的危害性裂缝的产生和整体失稳。但随着水电能源开发布局进一步向西南和西北的大江大河、高山峡谷转移,工程规模进一步加大,面临的技术问题多且较复杂,其真实的稳定安全度及应力-应变状态与地基、施工和运行期的多种因素相关,也都是同行专家关心而又很难在前期设计阶段解重要技术问题。总体而言,目前的研究尚有以下不足:

(1) 施工期仿真与运行期安全度评价联系不紧密;

(2) 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;

(3) 温度、渗流、应力-应变、安全度的耦合研究贯彻不彻底。

针对这种现状,朱伯芳提出了一种混凝土坝安全评估的有限元仿真与强度递减法(通过有限元全程仿真求出混凝土坝的真实应力状态,以及通过有限元强度递减法求得合理的安全系数)的思想^[3]。本文以光照碾压混凝土重力坝为例,实现了有限元仿真与与超载法的结合,研究考虑温度、渗流和应力-应变相互作用的施工期和运行期仿真分析及安全度评价方法等关键技术问题。文中分析比较了施工期仿真分析和不仿真分析2种计算方案,得出了一些有益的结论,可以为类似工程提供参考。

2 计算原理与分析方法

2.1 温度场计算的基本原理^[4]

根据热传导理论,三维非稳定温度场 $T(x, y, z, t)$ 应满足下列偏微分方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中: a 为导温系数; ρ 为密度; c 为比热; τ 为时间; T 为温度。

2.2 温度徐变应力计算的基本公式^[5]

在时段 $\Delta \tau_n$ 内产生的应变增量为

$$\{\Delta \varepsilon_n\} = \{\Delta \varepsilon_n^e\} + \{\Delta \varepsilon_n^c\} + \{\Delta \varepsilon_n^T\} + \{\Delta \varepsilon_n^g\} + \{\Delta \varepsilon_n^s\} \quad (2)$$

式中: $\{\Delta \varepsilon_n^e\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_n^c\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_n^T\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_n^g\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_n^s\}$ 分别为弹性、徐变、温度、自生体积、干缩应变增量。

应力增量和应变增量关系为

$$\{\Delta \sigma_n\} = [\bar{D}_n] \left(\{\Delta \varepsilon_n\} - \{\eta_n\} - \{\Delta \varepsilon_n^T\} - \{\Delta \varepsilon_n^g\} - \{\Delta \varepsilon_n^s\} \right) \quad (3)$$

计算的平衡方程为

$$[K] \{\Delta \delta_n\} = \{\Delta P_n\}^L + \{\Delta P_n\}^c + \{\Delta P_n\}^T + \{\Delta P_n\}^g + \{\Delta P_n\}^s \quad (4)$$

式中: $\{\Delta P_n\}^L$ 、 $\{\Delta P_n\}^c$ 、 $\{\Delta P_n\}^T$ 、 $\{\Delta P_n\}^g$ 、 $\{\Delta P_n\}^s$ 分别为外载荷、徐变、温度、自身体积变形和干缩引起的节点载荷增量

在计算应力时,将求得的节点温度作为载荷,同时考虑徐变的影响,根据混凝土实际的浇筑情况设置荷载步,读取相应的温度荷载,徐变度的拟合公式^[4]为

$$C(t, \tau) = (A_1 + B_1 \tau^{-C_1}) [1 - e^{-D_1(t-\tau)}] + (A_2 + B_2 \tau^{-C_2}) [1 - e^{-D_2(t-\tau)}] \quad (5)$$

式中: τ 为加载龄期(d); $t - \tau$ 为持载时间(d)。

目前一般采用超载法或强度储备法确定坝体与坝基系统的整体安全度。本文采用超载法,超载系数定义为重力坝相对于水荷载的极限承载力^[6]。计算超载系数时,每次增加的荷载为某一组合荷载的一个百分数,进行非线性迭代计算,直至收敛,然后施加下一个增量步,直到迭代计算不能收敛,或者变位达到不容许的程度,从而确定超载系数。

3 计算模型与计算工况

3.1 工程简介和计算模型

光照水电站碾压混凝土重力坝最大坝高达 200.50 m,最大底宽 159.05 m,顶宽 12 m,坝顶长 410 m。大坝由左、右岸挡水坝段及溢流坝段组成,正常蓄水位为 745 m。对溢流坝段进行分析,计算模型取 3 m 一个浇筑层,每个浇筑层沿高度方向分 6 层网格。基础向底部延伸 300 m,向上下游各延伸 200 m,模拟 F1 和 F2 两个断层;渗流计算时重点考虑了排水孔、帷幕、断层 F1 和 F2。图 1 为溢流坝段断面示意图,图 2 为溢流坝段有限元网格模型。

出了混凝土和基岩的渗透系数, 各类材料的力学参数取值见表 3。

表 1 列出了混凝土材料的热力学参数, 表 2 列

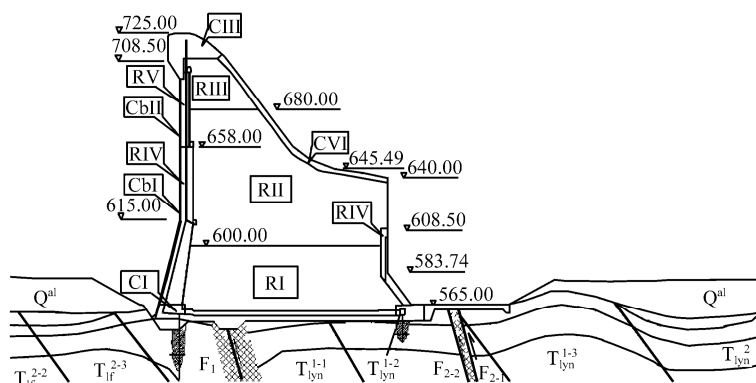


Fig.1 Profile of overflow dam section (unit: m)

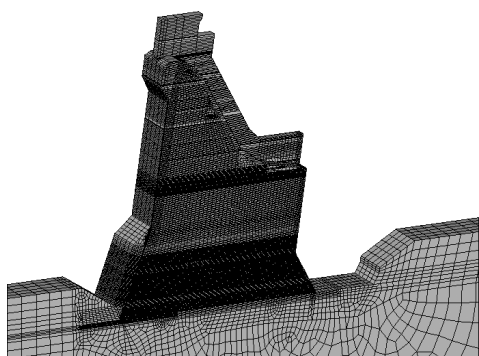


Fig.2 FEM mesh figure of the overflow dam section

Table 1 Thermal parameters of concrete materials

配合比 编号	比热 /(KJ/kg·°C)	重度 /(kN/m ²)	导热系数 /(KJ/m·h·°C)	绝热温升/°C
常态 C1	0.970	24.50	8.38	22.4 τ/(τ+2.80)
R I C25 三级配	0.956	24.45	8.29	20.2 τ/(τ+3.02)
R II C20 三级配	0.935	24.38	8.14	17.0 τ/(τ+3.25)
R III C15 三级配	0.917	24.64	8.11	16.5 τ/(τ+3.50)
R IV C25 二级配	0.973	24.52	8.42	22.0 τ/(τ+2.89)
R V C20 二级配	0.964	24.50	8.25	19.6 τ/(τ+2.91)

注: τ 为龄期, 单位为 d。

Table 2 Seepage parameters of materials

配合比	渗透系数/(cm/s)		地层	渗透系数/(cm/s)	
	层面法向	层面切向		弱风化	微风化
常态 C1	1.77×10^{-9}	1.77×10^{-9}	T ₁ yn ²	3.54×10^{-5}	1.08×10^{-5}
R I C25	2.81×10^{-9}	2.81×10^{-8}	T ₁ yn ¹⁻³	5.20×10^{-5}	2.05×10^{-5}
R II C20	4.73×10^{-9}	4.73×10^{-8}	T ₁ yn ¹⁻²	5.20×10^{-5}	1.72×10^{-5}
R III C15	4.52×10^{-9}	4.52×10^{-8}	T ₁ yn ¹⁻¹	4.63×10^{-5}	2.34×10^{-5}
R IV C25	1.24×10^{-9}	1.24×10^{-8}	T ₁ f ²⁻³	8.18×10^{-5}	8.18×10^{-5}
R V C20	1.87×10^{-9}	1.87×10^{-8}	F1、F2	6.50×10^{-5}	6.50×10^{-5}

Tab.3 Mechanical parameters of materials

材料 类型	变形 模量 /MPa	泊松比	重度 /(kN/m ³)	黏聚力 /MPa	摩擦 因素	抗压强度 (允许承载力) /MPa	抗拉强度 /MPa
常态 C1	31.1	0.167	2.45	2.0	1.0	31.2	2.55
R I C25	37.6	0.167	2.46	2.0	1.0	30.5	2.32
R II C20	35.5	0.167	2.44	2.0	1.0	23.6	2.12
R IIIC15	34.1	0.156	2.44	2.0	1.0	20.2	1.96
R IVC25	37.0	0.167	2.46	2.0	1.0	29.6	2.36
R V C20	35.9	0.167	2.45	2.0	1.0	23.9	2.18
T _{1f} ²⁻²	3.00	0.33	2.75	0.8	0.5	2.50	0.50
T _{1f} ²⁻³	7.75	0.28	2.75	0.8	0.8	3.80	0.70
T _{1yn} ¹⁻¹	10.5	0.26	2.75	1.05	1.1	5.00	1.30
T _{1yn} ¹⁻²	10.75	0.26	2.75	1.0	1.2	5.50	1.10
T _{1yn} ¹⁻³	11.75	0.25	2.75	1.0	1.2	6.50	1.20
T _{1yn} ²	7.0	0.3	2.75	0.6	0.7	2.50	0.60
T _{1yn} ³⁻¹	8.5	0.28	2.75	0.8	1.0	4.50	0.80
F1、F2	1.75	0.35	2.75	0.6	0.6	2	

注: 抗压强度一栏, 坝体是抗压强度, 基岩材料所列是允许承载力。

光照碾压混凝土坝采用薄层浇筑, 0.3 m 一个浇筑层, 连续上升 8~10 层后间歇 6~10 d, 2005 年 5 月开始浇筑, 6 月至 12 月基坑过水, 大坝混凝土浇筑停工, 计划拟定到 2008 年 6 月浇筑完工, 历时 38 个月。

拟定的水库蓄水过程为 2007 年 9 月库水位为 590 m, 10 月蓄水到达 668.34 m, 11 月至 678.35 m, 12 月至 683.7 m, 2008 年 1 月蓄水至 687.18 m, 2 月至 689.96 m, 4 月蓄至 692 m。

在混凝土坝从设计、施工到运行的各个阶段,

安全评估始终是一个关键问题,目前混凝土坝安全评估方法存在不少缺陷,如:坝体分析和基础分析往往分开进行,但实际上坝体和坝基是一个整体;应力和滑动稳定分析往往分开进行,但实际上滑动就是剪切破坏,与应力状态密切相关;安全评估中往往忽略施工过程对坝体和坝基应力状态的影响^[3]。针对上述问题,本文对光照水电站进行了温度、渗流、应力应变的综合仿真分析,并分析坝体、坝基系统的整体安全度。计算方案列述如下:

(1) 方案 1: 考虑坝体实际浇筑过程和分期蓄水过程,对整个坝体/坝基系统进行温度和渗流场的仿真分析,然后分别进行弹性和弹塑性分析,研究关键部位的应力、变形、屈服及抗剪断安全度^[7]。同时进行超载计算,对坝体/坝基系统进行安全度评价。

(2) 方案 2: 与计算方案 1 比较,不考虑温度和徐变作用,不考虑坝体浇筑的施工过程和分期蓄水过程。考虑的荷载有坝体自重、渗透荷载及作用在坝体上的静水压力。然后分别进行弹性和弹塑性分析,研究关键部位的应力、变形、屈服及抗剪断安全度。同时进行超载计算,对坝体与坝基系统进行安全度评价。

4 计算成果与分析

4.1 温度场分析

在计算的过程中按照实际的施工进度模拟出了任何一个时段的温度分布规律,限于篇幅,文中列出了几个有代表性的结果进行分析,表4是各个时段的坝体的最高温度表和内外温差表,施工期间最高温度维持在680 m高程附近,最高温度为38.24℃,最大温升值为17.7℃。

表 4 不同时刻坝体的最高温度和内外温差表
Table 4 Highest temperature and interior-exterior temperature difference of dam-body at various times

日期 /年-月-日	龄期 /d	X 坐标	Z 坐标	最高温度 /℃	浇筑温度 /℃	最大温升 /℃
2006-04-20	102	-4.00	567	34.2	30	4.160
2006-08-27	231	-2.60	584	35.7	29.6	6.100
2006-12-25	351	4.90	585	35.4	18	17.37
2007-04-20	467	10.4	585	35.1	28.5	6.600
2007-06-25	533	48.0	678	38.2	31.5	6.740
2007-08-30	599	4.60	686	36.1	30.5	5.610
2008-01-31	753	15.1	680	35.7	18	17.70

4.2 渗流场分析

图 3 是扬压力分布图,坝底扬压力在上游面附近迅速下降,到帷幕附近时几乎降至最低,而后平

缓延伸至下游,中途会在布置有排水孔处产生向下波动。计算得出的结果与设计值较为接近,可得按照规范设计的扬压力图较为合理,与实际的结果较为吻合。

上游帷幕处最大水力坡降值为 5.26,满足设计允许的水力坡降值 15,满足稳定性要求。

图 4 是坝段的等水头线分布,由图中可得等水头线在坝体上游面分布异常密集,这与浸润线在坝体上游面迅速下降的情况一致,说明坝体上游变态混凝土的防渗作用与坝体排水孔的排水效果非常显著。同时等水头线在坝基上游主排水孔、上游帷幕附近分布也非常密集,说明上游主排水孔和上游帷幕的排水防渗作用也非常明显。

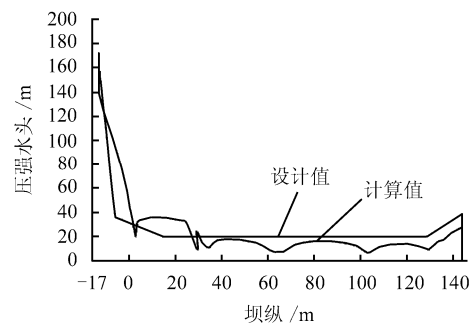


图 3 坝底扬压力分布图

Fig.3 Distribution of uplift pressure of dam foundation

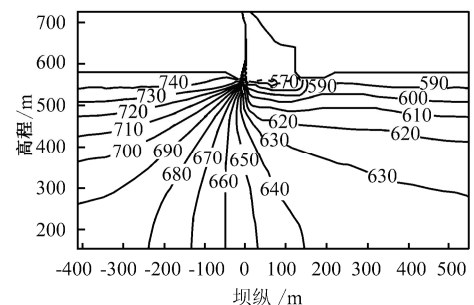


图 4 等水头线分布图

Fig.4 Distribution of equal head lines

4.3 应力-应变场

4.3.1 位移分析

在这 2 种计算工况中位移分布有较大的不同,方案 1 计算工况下坝体向下游倾倒,顺河向位移指向下游,铅直向位移在坝顶微微向上,位移逐渐减小到 0,然后逐渐增大,并且方向向下,由于其考虑分层浇筑,每层浇筑块在浇筑前位移为 0,其位移是其在浇筑过程中的实际位移,在静水压力的作用下,会沿着水压力作用点发生扭转,因而上部混凝土浇筑块的位移向上,在图 5 中表现的很明显。

而方案2计算中,顺河向位移指向下游,铅直向位移向下,坝顶位移最大。2种计算工况下特征点的位移对比见表5,2种工况下最大的不同之处在坝顶,差别可达70 mm。在坝踵和坝趾二者相差很小,仅为4 mm。

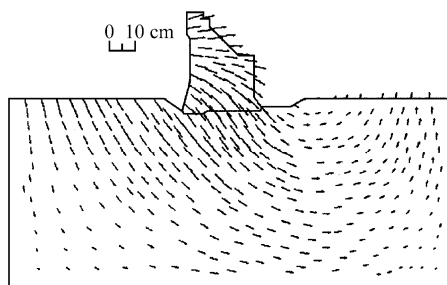


图5 方案一工况下位移矢量图

Fig.5 Displacement vectorgraph in case (1)

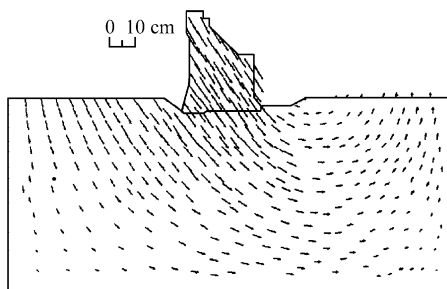


图6 方案二工况下位移矢量图

Fig.6 Displacement vectorgraph in case (2)

表5 两种方案下断面特征点位移比较 (单位: mm)

Table 5 Comparison of the displacements of the key points in two cases (unit: mm)

工况	特征点位置	坝顶	坝踵	坝趾
仿真	铅直向	16.8	-47.8	-43.67
	顺河向	51.3	38.0	33.7
不仿真	铅直向	-61.8	-52.0	-45.0
	顺河向	33.6	36.9	32.9

注: 顺河向位移指向下游为正, 铅直向位移以向上为正。

4.3.2 应力分析

图7、8为2种工况下第3主应力等值线图, 两种计算工况下, 应力的分布规律总体趋势是相似的, 由于方案一中考虑了温度荷载, 因而应力在层间产生了锯齿状的变化, 坝体表面温度影响较大, 温度应力分布明显, 但量值均较小, 在基础约束束区的温度影响较大。

表6列出了特征点位置的应力值, 方案1坝踵处出现了拉应力为0.76 MPa, 常态混凝土的抗拉强度为2.55 MPa, 满足设计的要求, 且拉应力区远小

于帷幕中心线的位置, 不会出现开裂现象^[8]。方案2坝踵位置拉应力为1.08 MPa, 其余部位的应力值方向相同, 量值的差别均在1.5 MPa以内。

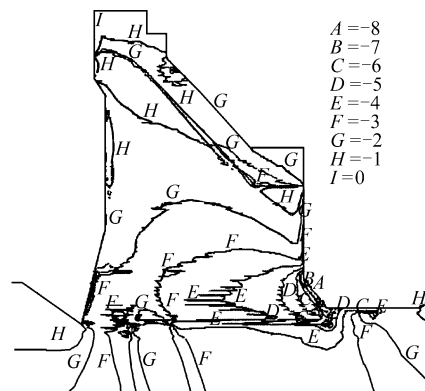
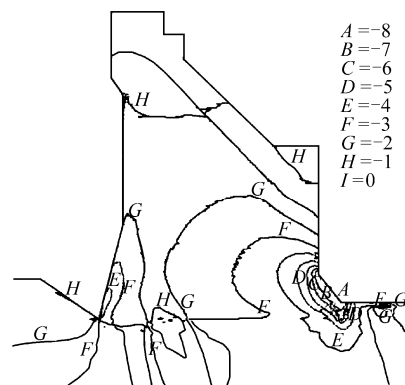


图7 方案1工况下第3主应力等值线图 (单位: MPa)

Fig.7 Contours of the third principal stress in case (1) (unit: MPa)



注: 图中所示应力的单位均为 MPa。

图8 方案2工况下第3主应力等值线图

Fig.8 Contours of the third principal stress in case (2)

表6 两种方案下断面特征点应力比较 (单位: MPa)

Table 6 Comparison of the stresses of the key points in two cases (unit: MPa)

工况	位置	顺河向应力	铅直向应力	第1主应力	第3主应力
仿真	坝踵	0.76	0.36	1.22	-0.62
	坝趾	-4.52	-3.62	0.23	-8.04
不仿真	坝踵	1.08	-1.04	1.16	-1.19
	坝趾	-5.92	-4.98	-0.15	-9.28

注: 拉应力为正, 压应力为负。

4.3.3 超载分析

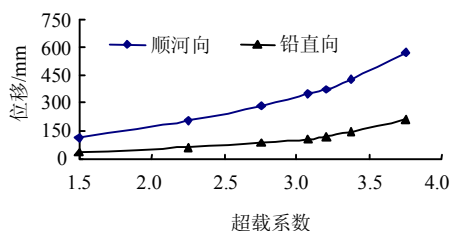
本文在综合仿真的基础上对碾压混凝土重力坝坝体与坝基系统进行了安全度评价, 将应力分析和稳定分析结合起来, 并且与传统的计算工况的结果进行了比较分析, 表7为不同方案坝基浅层面抗滑稳定安全系数, 图9、图10为这2种计算工况的超

载位移变化率曲线,可看出:① 2 种计算工况的整体稳定超载安全系数相差不大,均为 3.2。② 2 种计算工况的抗剪断、抗剪安全系数随超载系数的变化规律相同,2 种工况在量值上相差 0.1。

表 7 不同方案坝基层面抗滑稳定安全系数

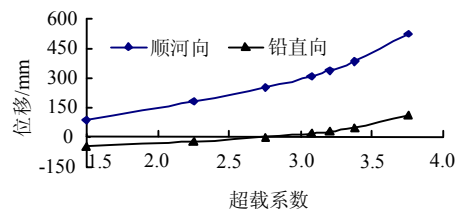
Table 7 Shallow sliding safety factors of dam foundation in two cases

方案	抗滑安全系数	1.0	2.0	2.5	3.0	3.15	3.25	3.5	4.0
仿真	抗剪断安全系数	4.69	2.44	2.04	1.87	1.81	1.77	1.68	1.55
方案	纯剪安全系数	1.89	1.00	0.87	0.81	0.79	0.77	0.73	0.68
不仿真	抗剪断安全系数	4.62	2.55	2.12	1.88	1.82	1.79	1.70	1.56
方案	纯剪安全系数	1.85	1.04	0.88	0.81	0.79	0.77	0.74	0.69



注:顺河向位移指向下游为正,铅直向位移向上为正。

图 9 方案 1 工况下坝顶特征点超载位移变化率
Fig.9 Variable curves of displacement of dam crest along overloading coefficient in case (1)



注:顺河向位移指向下游为正,铅直向位移向上为正。

图 10 方案 2 工况下坝顶特征点超载位移变化率
Fig.10 Variable curves of displacement of dam crest along overloading coefficient in case (2)

5 结 论

(1) 2 种计算工况中,重力坝坝体/坝基系统的位移规律有明显的不同,方案 2 计算工况下坝顶铅直向位移向下,方案 1 工况下由于分层浇筑,分次蓄水的影响,坝顶铅直向位移向上。

(2) 在这 2 种工况下,应力值相差约为 1.5 MPa。在方案 1 计算中坝体下部基础强约束区和坝体的上下游边缘的温度应力较大,由于温度影响,层间应力呈现锯齿状。

(3) 超载分析中,如果破坏主要发生于坝基岩

体,则 2 种计算工况得出的整体稳定超载安全系数基本一致。

(4) 由于变形、应力和稳定安全系数在高碾压混凝土重力坝设计中都是重要指标,所以综合仿真分析具有意义。

(5) 本文尚未考虑应力和渗流的耦合作用^[9]。有证据表明这种耦合作用对坝基岩体和成层碾压混凝土的影响较大,下一步研究将给予考虑。

(6) 本文的结果主要适用于重力坝,对拱坝结构,由于其复杂性,尚需进行专题研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
ZHU Bo-fang. Finite element whole course simulation and sequential strength reduction method for safety appraisal of concrete dams[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2007, (1): 1—6.
- [4] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [5] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [6] 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.
YU Tian-tang, REN Qing-wen. Evaluation of global safety degree of Jinping high arch dam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(4): 787—794.
- [7] 冯学敏, 汪卫明, 陈胜宏. 小湾拱坝右岸缆机基础开挖边坡的优化分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 289—295.
FENG Xue-ming, WANG Wei-ming, CHEN Sheng-hong. Optimization analysis of cable-machine foundation slope in right abutment of Xiaowan arch dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.2): 289—295.
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组. SL319—2005混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [9] 吉小明, 杨春和, 白世伟. 岩体结构与岩体力学耦合计算模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 763—768.
JI Xiao-ming, YANG Chun-he, BAI Shi-wei. Structure and hydro-mechanical coupled calculation model for rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 763—768.