

用结构分析法拟定混凝土坝变形三级监控指标

顾冲时, 吴中如, 阳 武

(淮海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 将力学模型引入大坝安全监测领域, 结合变形监测资料, 提出利用三维粘弹塑性大变形理论拟定混凝土坝三级监控指标的原理和方法, 并拟定了龙羊峡大坝变形三级监控指标, 取得了安全监控大坝的实效.

关键词 混凝土坝 变形 安全监测 结构分析法 三级监控指标

中图分类号 TV698.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2000)05-0007-04

大坝变形是监控大坝安全的最主要监测量. 目前, 为了正确综合分析和评价大坝的安全状况, 已从单因素发展到多因素, 从单项分析发展到多项综合分析, 如淮海大学开发的大坝安全综合评价专家系统, 对大坝安全评价设有时空评判准则、力学规律评判准则、数学模型评判准则、监控指标评判准则、日常巡查评判准则和关键问题评判准则. 在这六大评判准则中, 监控指标是最主要的评判准则. 其中, 应力、扬压力或渗压系数可采用设计规范或设计单位的拟定值, 而变形监控指标比较复杂, 因为大坝的坝高、筑坝材料、地形地质情况以及运行方式各不相同, 各座大坝和各个坝段的监控指标也不同, 其拟定比较复杂. 以实测数据为依据、各类设计规范为准则, 将强度和稳定等作为控制条件, 通过复杂的力学分析和反分析, 或者由设计、运行单位根据长期运行的经验确定控制值, 能充分反映大坝的结构性态. 因此, 可将变形监控指标作为综合分析、综合评价和监控大坝安全运行的主要依据. 与此同时, 当监测量在监控指标的某一范围时, 立即可以判断大坝的安全状况, 这给运行单位带来极大的方便. 淮海大学先后给佛子岭、丹江口、陈村、龙羊峡等工程拟定了变形和扬压力的监控指标^[1,2], 在监控这些大坝的运行中发挥了重大的作用. 如佛子岭连拱坝, 依据 1984 年以前的变形资料, 拟定关键坝段(13 号垛)的坝顶水平位移为 5.28 mm, 并将低温高水位控制在 122 m. 当 1989 年 11 月下旬库水位上升到 125.56 m 时, 又遇强寒流冲击, 大坝坝顶水平位移普遍超过历史最大值 20% ~ 54%, 13 号垛坝顶水平位移达 5.81 mm, 坝体出现裂缝再生和发展现象, 于是立即降低水位至 122 m 运行, 并进行特种检查, 避免了一次重大事故. 又如陈村拱坝, 1989 年定为病坝, 在对 1989 年以前的变形监测资料进行全面分析和反分析后得出关键坝段(8 号坝段)的坝顶水平位移控制值为 8.76 mm, 根据 1990 ~ 1993 年的实测资料, 位移值均小于监控值, 因此报经电力部批准后将其实定为正常坝. 从上述例子看出, 拟定合理的监控指标对监控大坝的安全运行并使其充分发挥工程效益, 具有重大的社会效益和科学价值. 本文重点研究混凝土坝变形三级监控指标的力学定义和划分标准, 给出了运用三维粘弹塑性大变形理论拟定混凝土坝变形三级监控指标的原理和方法, 并拟定了龙羊峡大坝关键坝段的三级监控指标.

1 变形三级监控的力学定义

大量工程经验和实验成果分析表明, 混凝土大坝的结构性态可分为线弹性(或粘弹性)、弹塑性和失稳破坏三个阶段. 此外, 根据混凝土坝安全实施细则和监测规范, 大坝的安全状况可分为正常、异常和险情三种. 因此, 监控指标分为一、二、三级, 对应失稳状态时的监控指标即为大坝三级监控指标. 以拱坝为例, 三级变形监控指标的力学定义为: 随着荷载的增加或参数的变化, 当荷载超过屈服变形所对应的荷载 P_c 后(图 1), 大坝变形急剧增加, 大坝开裂范围广泛扩展, 屈服区、压碎区也急剧扩展, 大坝呈大变形状态; 当荷载达到极限状态 D 处时, 结构完全破坏, 从而大坝丧失继续承载的能力. 上述整个阶段对应极限状态的变形值为变形三

收稿日期: 1999-08-24

基金项目: 国家“九五”攻关项目(96-220-02-05-02) 高等学校骨干教师资助计划资助

作者简介: 顾冲时(1962—), 男, 江苏启东人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构和岩土工程安全监控理论及其应用研究.

级监控指标. 这里应特别指出的是, 三级监控状态在大坝运行中决不允许出现.

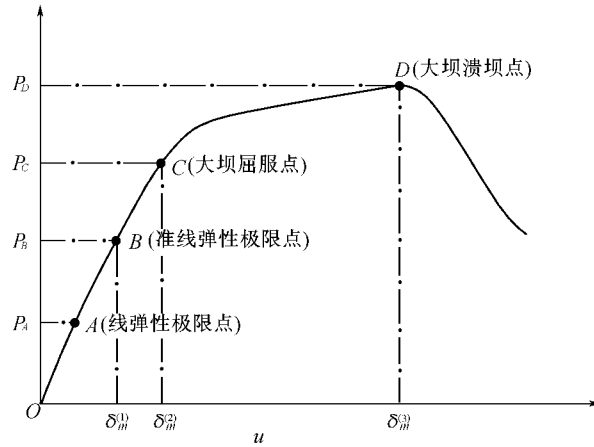


图 1 拱坝变形过程及转异特征

Fig.1 Deformation process and transfer characteristic of arch dam

2 拟定三级监控指标的原理和方法

2.1 基本原理

根据上述对大坝工作阶段的分析可知, 结构分析法拟定监控指标时主要以强度和稳定等作为约束条件, 即

$$R - F \geqslant 0 \tag{1}$$

式中: R ——不同工作阶段的抗力, 对于强度条件, 为不同工作阶段的抗拉、抗压强度, 对于稳定条件, 为不同工作阶段的抗滑力; F ——不同荷载组合下的效应量, 对于强度条件, 为拉应力和压应力, 对于稳定条件, 为滑动力.

满足上述不同工作阶段的极限状态方程的变形值即为大坝变形的各级监控指标.

在式(1)中, 令 $R - F = f(X)$, 则

$$f(X) = f(\sigma_m^t, \sigma_m^s, [K_c], c, f, \sigma^t, \sigma^s, K_c) = f(\Omega_p) \tag{2}$$

式中: σ_m^t, σ_m^s ——不同工作阶段的允许抗拉、抗压强度; $[K_c]$ ——不同荷载组合的允许抗滑稳定安全系数; c, f ——不同工作阶段的允许凝聚力和摩擦系数; σ^t, σ^s ——不同荷载组合的拉应力和压应力; K_c ——不同荷载组合的稳定安全系数计算值; Ω_p ——不同荷载组合工况.

由式(2), 通过 Ω_p 即可求得对应的变形三级监控指标.

2.2 拟定变形三级监控指标的标准

a. 强度条件

$$\sigma_{tF} \leqslant \sigma_{tR} \quad \sigma_{sF} \leqslant \sigma_{sR} \tag{3}$$

b. 稳定条件

$$F \leqslant R \tag{4}$$

式中: σ_{tR}, σ_{sR} ——90 d 龄期标准试块的抗压、抗拉极限强度; σ_{tF}, σ_{sF} ——不同荷载作用下的拉应力和压应力; R ——抗滑力, 计算时, c, f 用现场试验的峰值平均值, 并由专家确定.

在计算 F 时, 荷载工况采用遇合几率极小而又可能发生的极限荷载组合工况.

2.3 粘弹塑性大变形本构关系

根据三级监控指标的力学定义可知, 三级监控状态属于三维粘弹塑性大应变问题. 对于大应变问题^[3], Prandle-Reuss 理论关于总应变增量等于弹性与塑性应变增量之和的假定不能成立, 但对于混凝土和岩石之类材料仍可近似地采用 Prandle-Reuss 理论, 即

$$d = d^e + d^{ve} + d^{vp} \tag{5}$$

式中: d ——大变形下的总应变; d^e ——大变形下的弹性应变; d^{ve} ——大变形下的粘弹性应变; d^{vp} ——大变

形下的粘塑性应变.

大变形粘弹塑性的屈服准则、破坏准则、加-卸载准则与小变形粘弹塑性的对应准则形式上相同,只要把其中的应力采用 Cauchy 应力即可.

大变形粘弹塑性增量本构方程也与小变形粘弹塑性本构方程形式上类似,只要把其中的应力和应变分别改用 Cauchy 应力的 Jaumann 导数和变形率,应力偏量和等效应力分别改用 Cauchy 应力偏量和等效的 Cauchy 应力即可.

因此,大变形下的粘弹塑性本构方程可采用下列表达式:

$$\{\dot{\epsilon}^{ve}\}_t = \frac{1}{\eta_B} \left\langle \frac{\bar{F}}{F_0} \right\rangle \left[\frac{\alpha}{3} \frac{\partial \bar{I}_1}{\partial \{\epsilon\}} + \frac{1}{2\sqrt{J_2}} \frac{\partial \bar{J}_2}{\partial \{\epsilon\}} \right] \Delta t \tag{6}$$

$$\{\dot{\epsilon}^{vp}\}_t = \left[1 - \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K}\right) \right] \left[\frac{1}{E_K} [C] \{\dot{\epsilon}\} - \{\dot{\epsilon}_K^{ve}\}_{t_0} \right] + \frac{\Delta t}{\eta_M} [C] \{\dot{\epsilon}\} \tag{7}$$

式中: $\{\dot{\epsilon}^{ve}\}_t - \{\dot{\epsilon}^{vp}\}_t$ —— t 时刻大变形下的粘弹性应变和粘塑性应变; $\bar{F}$ ——大变形下的屈服函数; F_0 ——使系数无因次的值; $\bar{I}_1, \bar{J}_2$ ——大变形下 Cauchy 应力的第一应力不变量和 Cauchy 应力的应力偏量; $\{\epsilon\}$ ——Cauchy 应力.

从以上分析得,总粘性应变为

$$\{\dot{\epsilon}^v\}_t = \begin{cases} \{\dot{\epsilon}^{ve}\}_t & F < 0 \text{ 或 } F = 0, dF < 0 \\ \{\dot{\epsilon}^{ve}\}_t + \{\dot{\epsilon}^{vp}\}_t & F = 0 \text{ 或 } dF \geq 0 \end{cases} \tag{8}$$

2.4 变形三级监控指标的拟定

在混凝土坝设计过程中,所采用的设计参数(如混凝土、基岩的强度)常有一定的安全裕度,而且大坝的抗滑稳定安全系数较大.如对某坝进行稳定复核时,在水压荷载加到校核洪水位以上 20 m 时大坝仍安全.因此,如果仅以大坝的最不利荷载作为计算工况,按设计参数进行模拟分析,将难以求得变形三级监控指标.因此本文将通过参数敏感性分析模拟大坝的破坏机理,以获得三级监控指标.即把各种参数值(如抗剪强度、滑裂面产状,各种断层和地质构造中的参数等)在一定范围内降低,进行大变形粘弹塑性分析,并比较各种参数对应力强度的影响,最后选择影响最大的参数,再进行大变形粘弹塑性有限元分析,以拟定变形三级监控指标.采用这种方法处理是基于随着时间的增长,大坝及坝基材料将发生变化,其材料参数降低.因此,采用降低参数进行参数敏感性分析是合理的.

由上述分析得,变形三级监控指标的拟定首先需进行敏感性分析,选择最不利荷载组合(最不利荷载的选择不能仅根据规范,而应该考虑所有可能荷载,包括水荷载、温度荷载、风荷载、泥沙压力、扬压力、地震等),而材料参数在合理范围内取下限值,并根据极限状态方程求得位移,所求位移即为三级监控指标.

3 实例——龙羊峡拱坝三级监控指标的拟定

龙羊峡水电站^[3]坝高库大,工程地质条件十分复杂,水库水位降低十分缓慢,一旦出现不安全因素,将难以快速降低水位,以致贻误时机,造成重大损失.因此,除了拟定一、二级监控指标外,尚需拟定三级监控指标,以便对龙羊峡大坝进行全面监控.

3.1 有限元模型及计算条件

3.1.1 有限元模型

计算范围为上游 240 m 处至下游南北大山水沟,断层重点模拟了复杂的地质构造,如一级构造 $F_7, F_{73}, F_{71}, F_{18}$ 和二级构造 F_{67}, F_{32} 以及三级构造 $T_{25}, T_{66}, F_{49}, F_{215}, F_{314}$ 等.共划分了 1 531 个单元,节点数为 2 645.

3.1.2 荷载工况

水位高程 2 600 m 9 级地震烈度;上游 7 号地段峡口滑坡(离坝最近 2.4 km)产生的壅浪(17.5 m);温度,一是对稳定不利的最大温升,二是对变形和应力不利的最大温降.

3.1.3 材料参数

材料参数按下限值选择,见表 1.

表 1 龙羊峡大坝坝体及坝基粘弹性参数

Table 1 Visco-elastic parameters of Longyongxia dam body and foundation

材料	密度 /(kg·m ⁻³)	弹性常数			粘性常数		
		模量 /GPa	泊松比	$E_1(E_k)$ /GPa	$\eta_1(\eta_k)$ /GPa	$E_2(E_M)$ /GPa	$\eta_2(\eta_M)$ /GPa
坝体	2450	20	0.167	80	2.40×10^7	67.0	1.2×10^9
坝基		22	0.230	300	7.00×10^5	30.0	4.8×10^9

3.2 成果分析

根据上述条件,通过对龙羊峡拱坝的粘弹性大变形分析,发现 :最大温降时,拱坝的横缝、纵缝已开始出现开裂,大坝典型坝段——9 号坝段坝顶径向位移达 112.4 mm 最大温升时,左岸坝肩出现较大的滑动,大坝典型坝段——9 号坝段坝顶径向位移达 99.8 mm. 这两种位移即为龙羊峡重力拱坝三级监控指标.

4 结 语

- a. 根据大坝变形规律,将力学模型引入大坝安全监测领域,从而可对拟定的监控指标的级别和重要性进行深入分析,弥补了常规分析法的缺陷.
- b. 本文给出的拟定变形监控指标的原理和方法可用于碾压混凝土坝.
- c. 大坝变形三级监控指标,在实际工程中绝不允许发生.但是,对库大坝高以及重大工程拟定其变形三级监控指标,也非常重要,这对决策坝的安全,评估大坝的极限承载能力可提供理论依据.

参考文献：

[1] 吴中如,沈长松,阮焕祥.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].南京 河海大学出版社,1990.340~348.
[2] 吴中如,顾冲时.大坝安全综合评判专家系统[M].北京 北京科学技术出版社,1997.67~75.
[3] 吴中如,朱伯芳.三峡水工建筑物安全监测与反馈设计[M].北京 中国水利水电出版社.1999.98~106.

Determining Grade Three Monitoring Indicator
of Dam Deformation with Structural Analysis Method

GU Chong-shi, WU Zhong-ru, YANG Wu

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098,China)

Abstract :On the basis of deformation observation data and the application of mechanical models in the field of dam safety monitoring,presented in this paper are the theory and method of determining grade three monitoring indicator for concrete dams with the three dimensional visco-elastic-plastic large deformation theory. By use of the theory and method, the grade three indicator of Longyangxia dam is successfully determined.Example shows that the results are satisfactory.

Key words :concrete dam ;deformation ;safety monitoring ;structural analysis method ;grade three monitoring indicator