

重力坝岩基破坏过程的计算机 动态仿真研究

常晓林 陆述远

(湖北省武汉市·武汉水利电力学院)

摘 要: 本文针对重力坝岩基的受荷变形特征及可能破坏形态,就无量纲分析、破坏准则、破坏后效以及应力场与渗流的耦合进行了分析探讨,提出了模拟坝踵裂缝的“裂缝法”,并利用所研制的坝基破坏全过程动态仿真程序进行了算例计算。

关键词: 坝基,破坏过程,裂缝,仿真

中国图书分类号: TV642

搞清坝基的破坏机制和失稳形态,正确评价大坝的稳定性,首先要解决的一个关键问题就是如何真实地模拟坝—基结构的破坏发展全过程。目前,人们通常从物理模拟(结构模型试验)和数学模拟(主要是有限元计算)两个方面对此进行研究。结构模型试验作为一种直观的方法,为不少实际工程的设计提供了有价值的参考数据^{[1][2]},但到目前为止,还没有找到一种用于进行破坏试验的能满足完全相似条件的模型材料,使得成果的真实性及精度均受到限制,而且,合理模拟地基渗透体积力等特殊荷载比较困难,加之时间长费用高,针对性强而不够灵活,这些都影响到它在一般性研究上的应用。随着计算机技术和计算数学的迅速发展,有限元方法越来越广泛地应用到水工结构分析中,计算的成果也逐渐成为大中型工程的坝基稳定分析的必需内容。但目前的有限元计算多是静态分析,或荷载一次施加,或裂缝瞬间形成,无法真实反映荷载的增长效应和结构应力变形的相应变化规律以及由局部损伤累积发展到整体破坏失稳的全过程,从而影响到对坝基破坏机理的正确认识。鉴于这种情况,本文提出了一套处理方法,在常用的有限元方法基础上针对重力坝坝基特点进行改进,可以较好地对坝体—坝基结构的破坏过程进行计算机动态仿真。

1 无量纲分析

研究表明,坝基系统的位移基本上与坝高 H_d 的二次方成正比,而与基岩弹模 E_R 成反比。在工程实际中,各个坝的高度是不相同的,基岩变形特性也是千差万别,而一般基本剖面的下游坝坡 m 约在 0.7~0.8 左右,变化不大。为了提高计算成果的通用性,尤其为了便于一般性研究分析,很有必要采用无量纲形式表达几何相似的一类问题。

以重力坝的平面应变问题为例,与绝对坐标系 xoy 重合地建立一相对坐标系 x^*oy^* ,且 $x^*=x/H_d$; $y^*=y/H_d$,而将无量纲的当量位移 $\{\delta^*\}$ 写成:

$$\{\delta^*\} = \frac{E_R}{\gamma_w H_d} \cdot \frac{\{\delta\}}{H_d} \quad (1)$$

式中, γ_w 为库水容重, $\{\delta\}$ 为绝对位移。于是, 可以导出有限元的各矩阵的无量纲形式与有量纲形式的关系如下:

$$\text{几何矩阵} \quad [B^*] = H_d [B] \quad (2)$$

$$\text{弹性矩阵} \quad [D^*] = [D] / E_R \quad (3)$$

$$\text{应力矩阵} \quad [S^*] = H_d [S] / E_R \quad (4)$$

$$\text{刚度矩阵} \quad [K^*] = [K] / (E_R \cdot t) \quad (5)$$

$$\text{应变列阵} \quad \{\varepsilon^*\} = E_R \{\varepsilon\} / (\gamma_w H_d) \quad (6)$$

$$\text{应力列阵} \quad \{\sigma^*\} = \{\sigma\} / (\gamma_w H_d) \quad (7)$$

$$\text{等效节点荷载列阵} \quad \{P^*\} = \{P\} / (\gamma_w H_d^2 t) \quad (8)$$

上式中 t 为单位厚度。只要按上述关系对应代换, x 、 y 、 γ 、 E 分别以 x^* 、 y^* 、 $\gamma^* = \gamma / \gamma_w$ 、 $E^* = E / E_R$ 代入, 则得出的无量纲表达式在形式上与有量纲公式完全相同, 最终得到方程组

$$[K^*] \{\delta^*\} = \{P^*\} \quad (9)$$

将上式得出的无量纲解按 (1)、(6)、(7) 式进行逆换算, 即可得到原问题的解。

对于坝基渗流场也可类似考虑。实际上渗透体积分力的分布只与坝基各区域的相对渗透系数有关, 若选取一参考渗透系数 k_0 , 以相对渗透系数 $k_x^* = k_x / k_0$ 、 $k_y^* = k_y / k_0$ 表示, 即可方便地导出形式上完全相同的无量纲公式来。水头函数和流量的换算关系分别为:

$$\left. \begin{aligned} \{\varphi^*\} &= \{\varphi\} / H_d \\ \{q^*\} &= \{q\} / (k_0 t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

相应地, 渗流“刚度”矩阵和渗流“荷载”列阵为

$$\left. \begin{aligned} \{H^*\} &= \{H\} / k_0 \\ \{F^*\} &= \{F\} / (k_0 H_d) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

于是, 解渗流场的方程组变成

$$[H^*] \{\varphi^*\} + \{F^*\} = 0 \quad (12)$$

单元的渗流体积力 $\{g^*\}^e$ 和等效节点渗流力 $\{p^*\}^e$ 为

$$\left. \begin{aligned} \{g^*\}^e &= \{g\}^e / \gamma_w \\ \{P^*\}^e &= \iint [N]^T \{g^*\}^e dx^* dy^* \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中, $[N]$ 为单元形函数。

2 坝基特性的数学模型

2.1 边界条件和加荷过程

坝下地基实际上接近于无限大, 这是水工结构分析的一个特点。计算区域只能截取有限范围, 从而形成一条人为边界。计算比较表明, 地基的深度及上下游延伸长度需取到 5 倍坝高^[3]。岩体不同于其它介质, 其中不可避免地存在节理裂隙, 在受拉和受压时表现出

的变形特性有很大差异。而实际计算所用的变形模量在破坏屈服前是相同的,在这种情况下,为使坝基面附近的位移状况较符合实际,避免坝踵拉应力失真,宜将地基上游长度取得比下游长度大些,深度则可介于二者之间。而且,地基越软弱,所取范围应越大,但上下游长度差别可缩小。

计算中要区分各种荷载对大坝应力和变形的不同效应。地应力只作为坝基最终应力的一部分参与破坏判断及非线性调整。坝体各部位混凝土自重视施工方式的不同而考虑其对应力和变形的影响。库水荷载采取按库水位上升方式分级施加,此外还应考虑可能的超载情况。

2.2 基岩破坏准则

在复杂应力状态下,岩体的可能破坏形式有受拉破裂、脆性剪切破坏和塑性屈服。对重力坝坝基而言,主要的破坏形态是坝踵区的拉裂和坝趾区的剪切屈服。对岩体破坏通常采用莫尔—库仑准则进行判断,其形式可写成

$$\sigma_1 = G\sigma_3 + R_c \quad (14)$$

其中, $G = (f + \sqrt{1 + f^2})^2$, $R_c = 2C\sqrt{G}$, f 、 C 为材料的抗剪强度参数。实验表明,莫尔—库仑准则有两个明显的缺点:一是屈服限随平均应力线性增加,无法反映高压时屈服限会有下降的趋势;二是锥顶尖端是一奇异点,在弹塑性分析中影响收敛速度,难以体现岩体的拉裂特性。由于重力坝坝基内的应力水平一般不高,按照这一应力范围进行现场试验及成果整理,可以近似由图1中直线BC表示,而不考虑高压塑性屈服特性。对于拉裂通常采用不抗拉(或低抗拉)准则。为了保持整个强度曲线的光滑连续性,假定在出现拉应力时破坏准则可用如下抛物线描述:

$$\left(\frac{\sigma_1}{R_t}\right)^2 = \frac{\sigma_3}{R_t} + 1 \quad (15)$$

其中,抗拉强度 R_t 由B点的相切条件可得 $R_t = R_c' / 2\sqrt{G}$ 。由式(14)、(15)组成的复合判据如图1中曲线ABC所示。

2.3 破坏后效

对坝基破坏过程进行仿真计算的主要障碍是材料破坏后效的模拟。目前,常把材料屈服后的塑性变形和材料破坏后的性态合并考虑,进行统一的非线性处理。对于坝趾处的压剪应力集中,假定坝基岩体或坝体混凝土在达到屈服限后将发生塑性变形,按弹塑性分析或应力转移法求出进入塑性状态的区域,一般能够得到基本符合实际的结果。而对于坝踵处的拉应力集中,由于引起脆性破裂,加之坝踵区的荷载条件本来就比较复杂,特别是地基渗流问题,故其破坏后的效应就更加复杂。常用的“无拉分析”法给出一个拉应力松弛区,将拉破裂效应均匀抹平在整个松

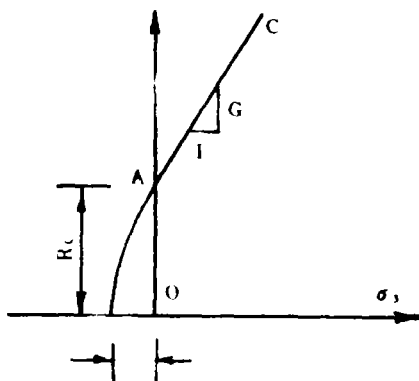


图1 复合破坏准则

弛区域上^[4]。然而岩体的微观变形机制是微裂隙的发生、发展以致贯穿汇合成宏观裂缝,而且由于裂纹形核与应力分布的不均匀性,有些微裂隙或节理总是率先达到临界状态,发生扩展、张开等局部集中化变形,从而使周围其余裂隙因拉应力松弛而不再扩展,最终可能呈现出一种条状主裂缝扩展的宏观破坏状态。这种破坏的结果也许是岩体结构的改组,而非岩石材料本构关系所反映的。鉴于这种考虑,也有人采用在拉力区内引进一条裂缝形成新的边界的“预裂法”,以松弛拉应力,重新加荷计算直到拉应力消失或裂缝上、下表面的变位发生“嵌入”现象,由此估计裂缝可能的发展深度。从理论上讲,总可以通过大量的试算来确定最终的裂缝状况,但“预裂法”的人为性较大,且裂缝引入后荷载从头加起显然与实际不符,不能反映裂缝发展的全过程。为了克服以上不足,本文提出“裂缝法”专门用于跟踪模拟坝趾区裂缝的发展。具体做法是:在加荷过程中,若拉应力达到或超过由抛物线准则给出的抗拉强度,岩体产生裂缝,其方向与主拉应力方向正交,缝端周围则伴随有微裂隙扩张区;当某单元出现裂缝后,在缝面上反向施加拉应力,作为对该局部应力和变形的调整,程序自动对单元和节点重新编号,求出新的结构刚度矩阵和渗流“刚度”矩阵;继续增加荷载,延伸裂缝直至达到稳定状态。“裂缝法”、“预裂法”和“无拉分析”法三种计算结果比较表明,“无拉分析”夸大了坝踵微裂和浅层剪切破坏的危险性,而“预裂法”的结果则掩盖了这种浅层破坏的危险性,分别代表了两种极端情况,相对地,“裂缝法”比较符合实际,而且从概念上分析也是如此。

2.4 坝基渗流场与应力场的耦合

实验表明,岩体渗流与应力状态之间存在着明显的耦合效应,尤其在发生局部破坏后。耦合的实质是应力作用引起岩体中节理裂隙变形,使流动通道状况发生改变,从而导致其水力特性和渗流状态的变化,这一变化反过来又使得岩体中的(有效)应力状态产生相应的改变。变形是影响渗透系数变化的直接因素和媒介。据此,由试验资料导出了等效渗透系数与应变状态的实用关系式,利用之即可将应力计算与渗流计算联系起来,采用反复迭代的方法去逐步逼近耦合解。

3 动态仿真计算

根据上述分析方法和数学模型,作者研制了重力坝岩基破坏全过程动态仿真的计算程序SFMGD。为了检验该程序的合理性和适用性,先对“等效均质坝基”情况进行了一系列计算,

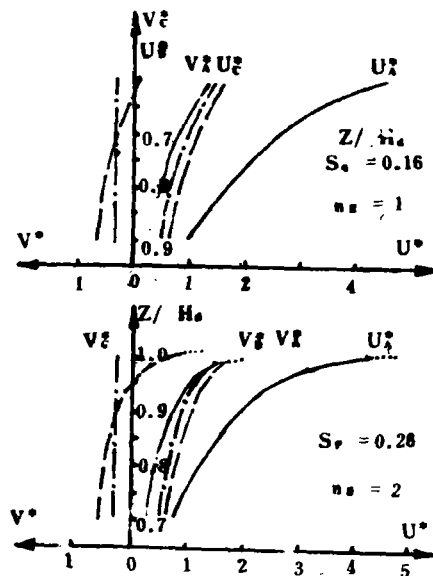


图2 库水位与大坝位移关系曲线

图2、3给出了其中两个算例的部分成果。这里, $u^* = \frac{5E_R}{\gamma_w H_d} \cdot \frac{u}{H_d}$,

$v^* = \frac{5E_R}{\gamma_w H_d} \cdot \frac{v}{H_d}$ 分别表示水平及铅直向当量位移, 脚标 A、B、C 分别代表坝顶、坝踵和坝趾三点, Z 为坝前水深, $n_E = \frac{E_c}{E_R}$ 为坝体与坝基弹模比, f_p 、 c_p 为基岩的抗剪强度参

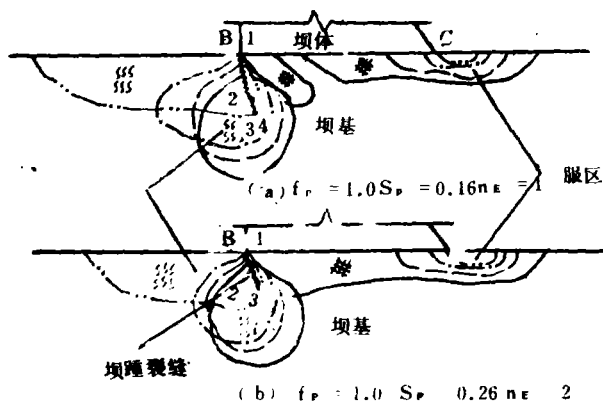
数, $S_p = \frac{C_p}{\gamma_w H_d}$ 。仿真计算所反映出的坝—基结构受荷变形及破坏发展全过程的规律性与

一些结构模型试验结果是一致的, 也符合人们的一般认识, 而且有些位移值也能在相当程度上与原型观测值相吻合。这些表明本文所提的方法和研制的程序是正确的和有效的, 能够迅速和灵活地对重力坝岩基破坏发展全过程进行动态仿真。

一些结构模型试验结果是一致的, 也符合人们的一般认识, 而且有些位移值也能在相当程度上与原型观测值相吻合。这些表明本文所提的方法和研制的程序是正确的和有效的, 能够迅速和灵活地对重力坝岩基破坏发展全过程进行动态仿真。

4 结束语

本文针对重力坝岩基的受荷变形特点及可能破坏形态, 着重就无量纲分析、荷载及边界条件、破坏准则、破坏后效以及应力场与渗流场耦合等问题进行了研究探讨, 提出了能较好跟踪坝踵裂缝发展和反映裂后液固效应的“裂缝法”, 研制出的用于重力坝岩基破坏全过程计算机动态仿真的有限元程序 SFMGD 经算例验证, 说明这种研究探讨是成功的和有效的。



注: 1、2、3、4 和各线标区域分别表示坝踵裂缝和坝基屈服的发展过程。

图3 坝基破坏发展过程

参 考 文 献

- [1] Paes de Barros, F., et al. Itaipu project: the structural safety assessment through physical models, Trans. 14th ICOLD Congress, Riode Janeiro, 1982
- [2] 胡积龄, 刘致彬. 坝基稳定模型试验技术及其应用. 水利水电科学研究院论文集(27), 水利电力出版社, 1987
- [3] 敖麟. 用有限单元法计算重力坝时关于地基边界条件的探讨. 水利学报, 1981, (4)
- [4] O.C.Zienkiewicz, S.Valliapan and I.P.King: Stress analysis of rock as a "no tension" material. Geotechnique (18), 1968
- [5] 常晓林. 岩体稳定渗流与应力状态的耦合分析及其工程应用初探. 第一届全国计算岩土力学研讨会论文集(一). 西南交通大学出版社, 1987

A Research on Automatic Computer Simulation of the Failure Course for Gravity Dam Foundations

Chang XiaoLin

Lu Shuyuan

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering)

Abstract: This paper gives a research and a discuss to the non-dimensional analysis, failure criteria, post-failure effects, and coupling percolation with stresses in accordance with the characteristic of deformation and the possible failure formation of gravity dams on rock foundation. a "crack method" for digital tracking the crack at the dam-heel is put forward. a FEN computer programme in order to simulate the whole failure course of gravity dam of foundations is prepared and used for example calculations.

keywords: dam foundation, failure course, cracks, simulation