

数值方法在大坝破坏分析中的应用

陈在铁¹,任青文²

(1.沙洲工学院,江苏 张家港 215600;2.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 论述在大坝破坏分析中数值计算方法的发展过程和现状,简述目前广泛使用的结构力学分析法、连续变形分析法、非连续变形分析法、整体稳定分析法的基本原理和单元剖分思路,逐个分析它们的适用范围和存在的不足之处,指出数值计算方法亟待解决计算结果对单元网络剖分的依赖性等有关键和基础性问题以及进一步努力的方向。

关键词 大坝;安全分析;数值计算方法;连续变形分析;非连续变形分析;稳定分析

中图分类号 TV64;TU352 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2005)03-0296-05

据不完全统计,截止 2000 年,我国已建大坝超过 24 000 座^[1],其中坝高 100 m 以上的大坝近 70 座。大坝一般都有大型水库,一旦出现溃坝,后果特别严重,不仅国民经济受到重大损失,而且危及人民的生命财产安全。1959 年法国的 Malpasset 拱坝因坝体连同岩基发生深层滑动而溃坝,导致 400 多人死亡和重大经济损失^[2]。巨大的政治影响和经济损失迫使国际坝工界高度重视对大坝的安全性评价的研究,探索大坝的破坏机理。

面对大坝地质条件复杂、环境条件恶劣、物理力学参数具有随机性,且多处于高烈度地震多发区等因素,大坝破坏的研究远未成熟。除了小比例的模型试验外,研究大坝破坏的数值方法主要是在各种复杂条件下大坝坝身的应力与变形计算、大坝整体稳定分析等。

1 大坝的应力与变形分析方法

大坝的应力、变形计算有传统的结构力学、材料力学方法,目前还发展了连续变形数值计算方法和非连续变形数值计算方法^[3]。

1.1 传统的结构力学和材料力学方法

20 世纪 70 年代前后,大多利用结构力学、材料力学方法计算坝体的内力、应力。例如,对于混凝土重力坝,采用材料力学梁的偏心受压公式计算坝体应力,拱坝则采用结构力学的拱梁分载法分析坝体应力。

传统的结构力学、材料力学方法的优点在于其意义明确、计算简单,有多年的坝工实践经验,为广大的工程科技人员所熟悉,且许多国家规范内有与之配套的容许安全系数。因此,它们仍然是目前坝工规范建议的主要分析方法。存在的主要问题是它们都不能考虑或者是极其简单地考虑坝体和地基的相互作用,这对高坝或具有软弱地基的坝来说,是不合适的,而且,传统方法属于弹性分析方法,不能研究坝体和地基材料进入屈服破坏以后应力重分配过程,更不能进行结构的破坏分析。此外,它们也无法精确模拟复杂的坝体形状和地质结构,导致计算精度不足^[4]。

1.2 基于弹性力学理论的大坝应力与变形分析方法

近年来,基于弹性力学理论,能够满足平衡方程、变形协调的几何方程和考虑应力应变关系的物理方程,以及应力和位移边界条件的数值分析方法得到极大的发展,它们包括以有限单元法、边界元法等为代表的连续变形数值分析方法和以刚体弹簧元、块体单元法、界面元法等为代表的非连续变形分析方法,这些方法已成为大坝应力、变形分析的有力工具。

1.2.1 连续变形分析法

连续变形分析法可以有效处理各类复杂的非均匀、各向异性连续介质问题,能够解决材料线弹性和非线性

性、流变、大变形与接触问题,还能进行损伤、断裂和动力分析,可以对结构进行仿真,模拟施工加载过程,也能处理非力场问题,如温度场和渗流场等。目前普遍使用的主要有有限元法、边界元法等。

有限元法将连续介质离散成有限个单元来进行数值计算。对于位移有限元方法,通过对连续体的离散化,在每个单元上建立分片的位移模式,根据弹性力学的变分原理建立有限元的支配方程,求解得到结点位移,然后求出单元的应变和应力。有限元法实现了统一的计算模型、离散方法、数值求解和程序设计方法,是目前进行大坝应力、变形分析最主要的一种数值方法^[5]。由于大坝存在裂纹,一般采用奇异单元反映裂纹的奇异性^[6,7],用分离裂纹模型(Discrete-Cracking Model)和分散裂纹模型(Smere-Cracking Model)^[8]来模拟开裂过程。为了判断有限元解的可靠性,人们提出自适应有限元法^[9]。一些学者还研究了自适应有限元模拟裂纹扩展的网格生成技术,通过修改裂纹周围单元的形状及单元间的邻接关系,实现网格动态划分,对裂纹扩展进行跟踪^[10]。

边界元法是继有限元法之后发展起来的一种求解力学问题的数值方法^[11]。它将求解问题转化为边界积分方程,再通过边界离散手段,将边界划分为有限个边界单元,将边界积分方程化为代数方程组求解。边界元法的优点是应用 Gauss 定理使问题降阶,该解法需要处理的空间维数少,使得输入数据的准备上大为简化,网格的划分和重新调整更为方便,最后形成的代数方程组的规模也小得多,因此能够大大缩短计算时间和减少计算工作量。这一方法也在大坝分析中得到应用^[12]。对大坝裂纹扩展问题,边界元法只需在包括裂纹在内的边界上划分单元,当裂纹扩展时,仅需在裂纹尖端处加上新的单元。边界元法的缺点是必须求问题的基本解,尤其对于非线性问题,基本解的求出十分困难^[13]。

1.2.2 非连续变形分析法

大坝-地基系统的分析存在大量的非连续变形问题,例如坝基岩体内的各类结构面、大坝建基面、混凝土坝坝体分缝等都出现非连续变形现象,因此非连续变形分析方法在大坝的应力、变形计算中得到迅速的发展^[14]。非连续变形方法能够更好地反映结构和介质内非连续面的变形特性,因而更适用于分缝结构和地基的分析。

刚体弹簧元、块体单元法、界面元法均以块体单元的刚体位移为基本未知量,根据单元的平衡条件、单元之间的位移协调和物理方程,求出相邻单元之间分界面处的相对位移和应力。

刚体弹簧元法假定单元的变形积累在边界层,单元本身视为刚体,采用分片刚体位移模式构造结构的位移场,使其逼近真实的位移场。它适宜于分析不连续介质,但由于界面位移不连续,难以反映坝内横缝或坝肩岩体可能滑动块边界面的实际接触条件,又由于界面的张开度系从相邻单元形心位移差值给出,且包含了相邻单元的变形在内,这与实际存在着差距^[15]。

块体单元法以块体形心处的刚体位移作为基本未知量,用分片的刚体位移模式逼近实际位移场,在块体单元之间设“缝”单元,反映结构的弹塑性。根据虚功原理求出各块体形心处的刚体位移后,由缝单元两侧块体的相对位移确定缝的变形和应力^[16]。该方法在分析大坝的稳定性等方面得到广泛的应用^[17]。

界面应力元法是在 Kawai 求解均质、线性静力问题的刚体弹簧元的基础上,以反映变形特性的界面元件(如弹性元件、塑性元件等)取代弹簧而建立的适用于求解非均匀、各向异性、非线性的不连续介质静动力问题的一种计算模型。该模式实质上为基于分片的刚体位移场、积累变形于单元界面的非协调位移元,以分块单元交界面上的界面应力表征结构的应力场,由相邻单元的相对变形和不同材料特性得出界面应力公式,根据广义变分原理导出求解结构位移场的支配方程,最终得到结构的变形和众多离散界面的应力以及单元内的表征应力^[18]。该方法能较好地研究大坝渗流问题^[19]。

离散单元法、DDA、数值流形方法也是近年来发展起来的非连续变形分析方法,它们也是以单元之间的分界面为主要研究对象,但应用了运动定律来研究块体单元的运动变形过程。这些方法被用于分析大坝的稳定、分缝等问题^[20,21]。

离散单元法假定单元之间的作用力与它们之间的相对位移量成正比,然后应用牛顿力学建立单元的运动方程,最后利用显式时间差分解法(动态松弛法)求解动力平衡方程^[22]。离散单元法的计算原理简单,适合计算岩体和坝体内部的变形与应力分布,也适合求解动力稳定问题,但选择接触刚度、黏性阻尼系数等参数比较困难,且在计算中没有考虑可能滑动块的动力放大效应等因素的影响。

非连续变形分析法(DDA)由石根华^[23]提出,主要用于分析裂隙岩体的安全稳定性。该方法将每一个完

整的块体作为一个单元,将节理、裂隙、断层等构造面 and 不同材料的分界面作为块体的边界,块体系统是通过裂隙结构面的接触连成整体.这种方法的计算网格与岩体的物理网络相一致,每一个计算网格覆盖一块被裂隙切割的块体,各块体相互独立,计算上是不连续的,而块体之间在力学上的连续性则取决于裂隙的变形条件:当裂隙滑动或开裂时为不连续,当裂隙不错位及闭合时为连续.因此,用这种方法来模拟岩体可以反映岩体的连续或不连续的具体部位.非连续变形分析方法特点是变形的不连续和考虑了时间因素.

数值流形方法以流形分析中的有限覆盖技术为基础,统一解决了连续与非连续变形的力学问题.该法的网格就是数学覆盖,数学覆盖互相重叠且覆盖了整个计算区域,在每个数学覆盖上定义互相独立的位移近似函数,这些数学覆盖被物理边界切割而形成物理覆盖,物理覆盖的重叠区域即形成单元,将这些覆盖上的位移函数结合起来形成计算域上的全域位移近似函数,在每个单元上的近似函数就是形成该单元的若干个互相重叠的、覆盖上的、近似函数的加权平均值,利用最小势能原理形成整体平衡方程^[24].运用数值流形方法进行拱坝坝肩岩体动力稳定性分析时,可以考虑可能滑动块与坝体、周围岩体的相互作用,且可模拟接触面的开合与滑移,但该方法在实际拱坝坝肩岩体动力稳定性分析中的应用仍有待研究.

2 大坝与地基的稳定性分析

大坝与地基稳定性分析的传统方法是刚体极限平衡法,认为大坝的破坏是强度破坏,一般不存在稳定性问题.但根据运动稳定性定义,任何状态或事物的变化都是一种运动,都存在是否稳定的问题.当大坝整体由于各种原因处于极限平衡状态时,此时只要有一个小的扰动,它将偏离原平衡状态而产生无法恢复的破坏.鉴于大坝整体破坏时状态从静止向可动状态转变,任青文^[25]从研究系统“状态”改变的角度提出:可以将大坝的整体破坏归结为稳定性问题,但这种失稳不同于屈曲失稳,而是属于极值点失稳类型.衡量大坝稳定安全性的指标是整体安全度,但是,基于这一理论的大坝整体失稳破坏分析,至今仍缺乏一种理论严密且简单实用的方法,目前主要有直接法和间接法^[26].

2.1 传统方法

刚体极限平衡方法利用静力平衡条件,求出给定滑移面上的内力,再计算抗滑力和滑动力之比,求得抗滑稳定安全系数 K ^[27]:

$$K = \frac{fN + cA}{P} \quad (1)$$

式中: f, c ——滑移面材料的摩擦系数和黏结力; N ——滑移面上的正压力; A ——滑动面的面积.

2.2 直接法

直接法就是将数值分析方法得到的应力成果,转化为破坏面上的滑动力和抗滑力,得到抗滑稳定安全系数 K_S ^[28]:

$$K_S = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i f_i + c_i) A_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n A_i \tau_i \cos \beta_i} \quad (2)$$

式中: n ——滑面所经过的缝单元数; A_i ——第 i 缝单元的面积; f_i, c_i ——第 i 缝单元的抗剪强度; α_i ——第 i 缝面切线与滑移方向的夹角; β_i ——第 i 缝面剪应力与滑移方向的夹角; σ_i, τ_i ——第 i 缝单元的正应力和切应力.

2.3 间接法

间接法利用数值分析得到的应力场和位移场,根据大坝地基系统达到极限平衡状态时状态参量的变化来确定系统的安全度.目前常用的间接法有超载法、强度储备法、超载和强度储备相结合的综合法.用来表征系统加入极限平衡状态的失稳判据有收敛性判据和突变性判据^[26].

2.3.1 超载法

超载法是假定材料强度参数不变,通过逐渐增大上游水荷载的方法,使大坝和地基处于极限平衡状态,此时的荷载与正常荷载的比值即为超载安全度 K_p .超载安全度还可以利用地质力学模型等验证^[29,30].但大坝运行时,过度超载是不现实的,而且它没有考虑由于上游水位变化引起的其他荷载的变化,也难以考虑基岩软弱带、建筑材料由于河水侵蚀、渗流、碱化反应等因素对强度的影响^[31],不能反映大坝真实的失稳破坏模式.

2.3.2 强度储备法

强度储备法就是在保持正常载荷不变的情况下逐渐改变坝体和基岩的强度,直至大坝和地基处于极限平衡状态,强度改变的倍数即为强度储备安全度 K_f 。考虑到材料强度参数的离散性,特别是黏结力 c 的值变化太大,强度储备法虽然在一定程度上能够较好地反映大坝和地基的破坏模式,但是要想通过模型试验来验证安全度比较困难,因为它需要制作若干个模型才能实现,这在人力、物力上不容许,制作精度和质量也难以保证。这就需要研制能反映坝基软弱结构面或岩体抗剪强度逐渐变化的新型材料和相应的试验技术。李朝国^[32]经过多年的探索,研制出分别适用于断夹层和岩体模型的“变温相似材料”,它由重晶石粉、机油、可熔性高分子材料及掺和料按一定的比例制成,试验过程中通过升温来逐步降低材料的强度,可以在同一个模型上进行多个强度试验。

强度储备安全度虽然比较接近实际情况,但强度降低也不是大坝破坏的全部原因,而且材料摩擦系数 f 值降到残余值后,再很难下降,而黏结力 c 可以完全消失。因此,两者采用不等比例降低较为合理,有人采用等保证率的方法改变强度^[33]。

2.3.3 综合法

大坝的失稳破坏并不是由于超载或材料强度降低等单个因素造成的,比较可能是由于荷载和材料强度同时发生变化造成的。超载和强度储备相结合的综合法是在大坝达到一定超载倍数 K_p 的基础上,将强度降低 K_f 倍,致使大坝进入极限平衡状态,因此,综合法的安全度为 $K = K_p K_f$ ^[34]。

综合法理论上虽然更加合理,但实际操作比较复杂,特别是超载到何种程度再降低材料强度没有统一的标准。

3 结 语

大坝是一个形状复杂的三维结构,存在着坝体与地基、地震作用下坝体与库水、应力场与渗流场和温度场等多种耦合问题,具有物理非线性、几何非线性、接触非线性、耦合非线性等非线性特征。大坝大多地形地质条件复杂、环境恶劣,不确定的影响因素多,岩土体的物理力学参数的随机性强,地质结构具有不可知性。大坝应力和变形计算、破坏机理及安全性研究的主要方法是数值分析和室内模型试验。对于运行中的大坝,还可以根据观测资料进行研究。然而,与坝工技术的发展相比,深入的理论研究相差甚远,有不少问题需要进一步探索。

以有限元为代表的数值分析得到的应力成果对剖分网络存在依赖性,使得误差估计与评价存在困难,将合理剖分单元网络和评估其相应的离散误差相结合则更加困难。如何解决计算结果对网络大小的依赖性在今后研究的重点。

目前,通用程序的数据准备工作相当繁重,多功能、高效、快速、自动化程度更高的离散理论和技术将得到进一步的研究,多变量有限元理论以及新型单元的研究将得到重视。

运用非线性稳定性理论有利于研究大坝从局部破坏向整体破坏的发展规律,不少学者对此进行了有益的探索。大坝的破坏失效机理和整体破坏分析将是力学界和坝工界的重点研究方向。

混凝土、岩体等材料初始微观、宏观微裂纹的存在及对本构关系的影响,裂纹的分散性、随机性等特性所带来的破坏效应都促使计算力学有重大的发展,采取细观和宏观相结合的方法是一个合理的途径。

参考文献:

- [1] CHEN Zai-tie. Overview on arch dam safety research[A]. In: MARTIN W, REN Qing-wen, JOHN S Y T. New Developments in Dam Engineering[C]. London: A A Balkema Publishers, 2004. 255—262.
- [2] 田彬, 夏颂佑. 高拱坝坝踵开裂机理研究进展[J]. 水电站设计, 1997, 13(4): 1—6.
- [3] 任青文. 大型水利水电工程中的力学问题[A]. 见: 赵光恒. 力学——现代工程技术的支柱[C]. 南京: 河海大学出版社, 2001. 258—282.
- [4] REN Qing-wen. Development of theory and methods on high dam structural analysis[A]. In: MARTIN W, REN Qing-wen, JOHN S Y T. New Developments in Dam Engineering[C]. London: A A Balkema Publishers, 2004. 63—74.
- [5] 唐洪祥, 邵龙潭. 地震动力作用下有限元土石坝边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1218—1224.

- [6] 杨庆生, 杨卫. 断裂过程的有限元模拟[J]. 计算力学学报, 1997, 14(4): 407—412.
- [7] MURTHY K S R K, MUKHOPADHYAY M. A daptive finite element analysis of mixed-mode fracture problems containing multiple crack-tips with an automatic mesh generato[J]. International Journal of Fracture, 2001, 108: 251—274.
- [8] 朱万成, 唐春安. 混凝土断裂过程的力学模型与数值计算[J]. 力学进展, 2002(4): 1—20.
- [9] 刘欣. 平面裂纹问题的 hp 型自适应无网格方法的研究[J]. 力学学报, 2000, 32(3): 308—318.
- [10] 黄向平, 王建华. 裂纹跟踪的网络生成技术[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(4): 493—495.
- [11] 崔海涛, 温卫东. 随机有限元及其工程应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(1): 91—98.
- [12] 吴清高, 张明, 姚振汉. 混凝土重力坝边界元可靠度计算[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(6): 70—73.
- [13] 冒小萍. 断裂力学的数值计算方法的研究现状与展望[J]. 商丘师范学院学报, 2004(2): 21—24.
- [14] 栾茂田, 黎勇, 林皋. 非连续变形计算力学模型及其在有缝重力坝静力分析中的应用[J]. 水利学报, 2001(4): 40—46.
- [15] 潘一山, 章梦涛. 洞室岩爆的尖角突变模型[J]. 应用数学和力学, 1994, 15(10): 893—900.
- [16] 任青文, 余天堂. 块体单元法的理论和计算模型[J]. 工程力学, 1999, 16(1): 67—77.
- [17] 王瑞骏, 陈尧隆, 王新宏. 重力坝深层抗滑稳定分析的块体单元法[J]. 水利学报, 1998(1): 91—93.
- [18] 卓家寿, 章青. 不连续介质力学问题的界面元法[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 20—24.
- [19] 詹美礼, 速宝玉, 刘俊勇. 碾压混凝土坝层(缝)面渗流分析的界面元方法[J]. 水电站设计, 1999, 15(2): 33—37.
- [20] 张玉军, 朱维申. 小湾水电站左岸坝前堆积体在自然状态下稳定性的平面离散元与有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497—502.
- [21] 刘君, 孔宪京. DDA 与 FEM 耦合法在分缝重力坝非线性分析中的应用[J]. 计算力学学报, 2004, 21(5): 585—591.
- [22] HART R, CUNDALL P A, LEMOS J. Formulations of three-dimensional distinct element model, part II, mechanical calculation of a system composed of many polyhedral block[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1988, 25(3): 117—125.
- [23] SHI G H, GOODMAN R E. Two dimensional discontinuous analysis[J]. Int J Numer Anal Methods Geomech, 1985, 9(7): 541—556.
- [24] 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. 36—39.
- [25] 任青文, 傅树红. 高拱坝沿建基面抗滑稳定性的分析方法研究[J]. 水利学报, 2002(2): 1—7.
- [26] 任青文. 岩体破坏分析方法的研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 1303—1309.
- [27] 任青文, 钱向东. 高拱坝沿建基面的破坏和安全度研究[J]. 水力发电, 2002(12): 10—13.
- [28] 任青文, 余天堂. 边坡稳定的块体单元法分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 20—24.
- [29] 姜小兰, 赖跃强. 构皮滩双曲拱坝三维地质力学模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 27—30.
- [30] 林明森, 陶建华. 三维拱坝问题的数值模拟研究[J]. 水利学报, 1996(7): 67—74.
- [31] 杨令强, 练继建. 拱坝的破坏分析及超载问题探讨[J]. 水利学报, 2003(3): 55—62.
- [32] 李朝国, 陆金池. 综合法与超载法在沙牌 RCC 拱坝坝肩稳定分析中的应用[J]. 四川联合大学学报, 1997, 1(3): 64—71.
- [33] 陆述远. 岩基重力坝抗滑稳定分析[A]. 见: 李瓛. 水工结构专题[C]. 北京: 水利电力出版社, 1995. 16—78.
- [34] 陈进, 黄薇. 混凝土重力坝抗滑稳定安全系数与安全度探讨[J]. 长江科学院院报, 1995(3): 1—7.

Review of the application of numerical methods to dam failure analysis

CHEN Zai-tie¹, REN Qing-wen²

(1. Shazhou Institute of Technology, Zhangjiagang 215600, China;

2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :An introduction was given to the development process and current situation of the numerical methods applied to dam failure analysis. A comparative analysis was made of the basic principle and idea of element division of some methods widely used at present, including the structural mechanics analytical method, continuous deformation analytical method, discontinuous deformation analytical method, and the monolithic stability analytical method, together with their advantages and suitable scope of application. Finally, some key problems to be solved urgently, such as the dependence of the calculated results on element division, etc. and the direction for further research were pointed out.

Key words :dam; safety analysis; numerical calculation method; continuous deformation analysis; discontinuous deformation analysis; stability analysis