

高拱坝稳定安全度研究综述

董玉文, 任青文

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 针对我国西部兴起的高拱坝建设热潮, 对目前高拱坝稳定安全度的分析方法进行了总结, 主要方法有柔度系数法、安全系数法、可靠度方法和模型试验法。总结了拱坝的失效模式和失稳判据, 对工程中最常用的安全系数法, 系统阐述了计算安全度的数值方法和最新进展, 得出拱坝安全度控制标准由局部安全度向整体安全度转变、安全度分析方法由确定性方法向不确定性方法发展的结论, 另外常规的拱坝稳定数值分析方法如刚体极限平衡法和有限元法得到不断完善, 新型数值方法在拱坝稳定分析中也有很好的应用前景。

关键词 高拱坝 稳定安全度 安全系数 综述

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2006)05-0078-05

Review on safety degree for stability of high arch dams//DONG Yu-wen, REN Qing-wen(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Aiming at the extensive construction of arch dams in west China, a review was made on some methods currently used for safety degree analysis of arch dams, the methods including the flexibility coefficient method, the safety factor method, the reliability analysis method, and the model test method. The failure modes and instability criteria for arch dams were also summarized. A systematic analysis of the numerical methods as well as their recent development for safety degree calculation shows that the control standard of the safety degree is being changed from the local safety degree to the global safety degree, and that deterministic method for safety factor analysis is being developed to uncertainty one. In addition, the conventional methods for numerical analysis of arch dam stability, such as rigid body limit equilibrium method and FEM, are successively developed, and new numerical methods are of wide scope of application in arch dam stability analysis.

Key words : high arch dam; safety degree for stability; safety factor; review

拱坝是一种重要的坝型, 以其材料强度发挥充分、承载能力大、体积小、泄洪布置方便、潜在安全度高及抗震性能好等优点而受到国内外坝工界的青睐。随着国家西部大开发战略的逐步实施以及国家电力能源结构的调整, 我国西部(特别是西南地区) 涌现出一大批已建和待建的高拱坝, 如已建成的二滩拱坝(高 240 m)、在建的澜沧江小湾拱坝(高 292 m)、拟建中的黄河拉西瓦拱坝(高 250 m)、金沙江溪洛渡拱坝(高 278 m) 及雅砻江锦屏一级拱坝(高 305 m)。这些工程地质条件和地质构造相当复杂, 如非均质、不连续结构面、软弱夹层、断层、裂隙及层间错动带、岩体渗流、地震烈度高等, 一旦失事, 不但严重影响工农业生产, 而且会使人民生命财产遭受极大损失。因此, 复杂地基上高拱坝在高水压、温度荷载、地震荷载等作用下能否保持稳定, 其潜在安全度究竟有多高是值得认真

研究的问题。本文阐述和总结了高拱坝稳定性评价的关键指标——安全度的分析理论和方法, 并介绍了高拱坝安全度研究的最新进展。

1 拱坝安全度的分析方法

大坝的安全度可定义为大坝实际设计状态到破坏状态之间的最小“距离”^[1]。目前, 拱坝安全度的分析方法主要有柔度系数法、安全系数法、可靠度方法和模型试验法。

1.1 柔度系数法

瑞士著名坝工专家 Lombardi 最早提出拱坝柔度系数 C 的概念并认为对相同的坝高, C 越小, 坝越安全。此后许多坝工专家对此进行了研究, 并总结出一条用来区分拱坝是否能够安全运行的分界线, 称之为 Lombardi 破损曲线。对于这条破损曲线的形

状和合理性,研究的成果不多,实际上拱坝的破坏应与坝体混凝土的强度有关,即使强度没有问题,也存在屈曲失稳的可能性。对此,任青文等^[2]指出 Lombardi 破损曲线是只与坝高有关的直线,没有与拱坝的安全性指标直接联系起来,并从混凝土坝体的强度和屈曲稳定出发,得出两类曲线:一类与坝体混凝土的强度有关,是一簇以坝体混凝土强度为参数的双曲线;另一类与坝体的屈曲稳定有关,是一条指数曲线。同时指出拱坝坝体的安全性一般由强度控制,只有当坝体采用高强度混凝土,坝体过于单薄,从而使强度破损线抬高并接近或超过稳定破损线的情况下,才由屈曲稳定控制。为了反映坝高的影响,朱伯芳^[3]提出拱坝应力水平系数 D ($D = CH$) 的概念,认为 D 越小,坝越安全,并以奥地利 Kolnbrein 拱坝^[4]的应力水平系数 $D_0 = 3\ 500$ 为破坏的临界点。为了进一步反映坝体及坝基强度的影响,朱伯芳^[3,5]又提出一个拱坝安全水平系数 J ($J = 100R/D$,其中 R 为反映坝体及坝基强度的一个综合指标)的概念,认为 J 越大,坝越安全。

实际上,这些曲线及指标只能大体上作为拱坝能否安全运行的经验判据,是从几何尺寸角度衡量拱坝安全度的,只能作为拱坝设计时体形优化参数,不能反映拱坝运行时应力、变形及稳定性,而且也只能衡量拱坝坝身的安全,不能判断拱坝坝肩岩体和拱坝沿建基面的稳定性。

1.2 安全系数法

目前,结构稳定安全度最常用的评价指标是安全系数。常规的拱坝安全分析,分为坝体强度安全与拱座稳定安全两部分,并采用不同的分析方法和带有一定经验的安全系数和材料参数来控制。按照控制标准的不同,可以分为点安全系数、面安全系数和整体安全度。

1.2.1 点安全系数

在设计中,坝体强度以点安全度作为控制条件。坝体强度按容许应力法设计,而坝体应力则按拱梁分载法的计算结果取值。实际上,拱坝是一个受基础强约束的高次超静定结构,整体作用很强。当坝体内任一点或某一局部区域的应力超过容许值,并不意味着拱坝丧失正常工作能力,而是可以通过材料的非线性特性以及拱坝的自平衡体系使应力得到调整,拱坝仍然维持稳定。因此,这种以点安全系数作为控制条件的设计方法,尽管简便、概念明确,并有长期工程实践的经验,但不能充分利用高次超静定的拱坝结构可以使局部应力超限并通过变形协调得以调整和均匀化的受力特性。

1.2.2 面安全系数

在拱座稳定分析中,由于坝肩岩体构造的复杂性以及影响拱座稳定条件的诸因素难以正确估计,导致一直沿用刚体极限平衡理论,以最薄弱的结构面及其组合来控制滑动稳定条件,即以面安全系数作为评价标准。这种分析方法既简便,又经受了长期工程实践的考验,但对于坝肩岩体的压缩变形、裂缝开展以及转动等实际可能发生的破坏现象不能合理反映,采用的一系列假定也未能完全反映坝肩岩体实际的工作状态。

1.2.3 整体安全度

由于坝体强度分析与拱座稳定分析方法及其控制指标的不一致,两者安全度必然不协调。事实上,拱坝与拱座属于一个整体挡水体系,人为地将它们划分为两个独立的工作体系进行安全分析是不恰当的。数值分析和模型试验也表明,由于拱坝是一个三维结构,建基面是复杂的空间曲面,拱坝的局部破坏不能代表它的整体破坏,工程师们想了解的是拱坝的整体安全度,应当要进行拱坝-地基系统的整体安全度分析。

按拱坝破坏产生的原因,整体安全度可分为超载安全度、强度储备安全度和混合安全度^[1]。

超载安全度可模拟作用荷载的不确定性和评价大坝承受超载作用的能力,但是在拱坝的正常运行中,超载是不现实的,并且拱坝的真正危险不是荷载的成倍增加,而是材料强度的不足。因此,用这个指标来衡量正常运行拱坝的安全度不能反映实际情况,并且也不能反映随机性。强度储备安全度可以模拟材料强度参数的不确定性和可能的弱化效应^[6],但它不是大坝失稳的全部原因,而且摩擦系数 f 降低太多也不符合实际,因为降到残余强度后, f 再很难下降,而黏聚力 c 可以完全丧失,因此如何降低强度指标仍然是一个值得研究的问题。此外模拟破坏的方法(强度储备系数法、超载系数法和能量法等)不同,其渐进破坏过程和失稳模式不同,相应强度储备安全度和超载安全度也不同^[7-8],究竟哪一个更能反映拱坝真正的安全度目前尚无定论。

实际上大坝的安全度是由超载安全度和强度储备安全度共同组成的,因此,有人指出应采用混合安全度 $K = K_p K_f$,其中 K_p 为超载系数, K_f 为强度储备系数。在实际应用时,两者分步增加,先增加 K_p ,当 K_p 达到最大值(1.3 ~ 1.5)时, K_p 不动,再增加 K_f ,直至大坝失稳。另外,由于 f 和 c 的变异性相差较大, c 的强度储备应当更大些,强度储备系数 K_f 还可以分别取值。这样的混合安全度虽然在理论上更合理,但实际操作起来很复杂,已类似于可靠度理论

中的分项系数法。

对于大坝抗滑稳定问题,由于存在许多不易确定的因素和可能破坏模式,不应简单按照某一种安全系数作为评价或判别稳定的标准,许多学者建议多种安全系数结合运用。周维垣等^[8]提出多安全系数法,即同时考虑拉裂安全度 K_t 、压裂安全度 K_{mN} 和极限安全度 K_{li} ;周维垣等^[8]、王均星等^[9]建议按高拱坝的弹性状态、开裂状态和极限状态分别给出稳定安全度,并指出对于更高的拱坝,还可进一步分等级列出安全度值。采用这种方式来描述高拱坝的工作状态能够清楚地说明高拱坝的渐进破坏过程,可以在实际工程运用中为到底选用多大的安全指标给出参考依据。

1.3 可靠度方法

引进安全度的原因就是由于荷载和抗力等方面的不确定因素,但安全系数只能笼统地考虑这些不确定因素,而采用混合系数则十分复杂。结构可靠度理论可将作用的荷载、荷载效应以及抗力和物理力学参数都当作随机变量,通过统计特性的分析和检验,确定分布类型,然后用结构分析法建立大坝的极限状态方程,从中求得坝肩的失效概率 P_f 和可靠度指标 β 。

拱坝的失效模式一般有坝肩失稳和坝体强度不够两种,选取主要失效模式及对应的基本随机变量,建立结构功能函数(极限状态方程),即可求出结构失效概率 P_f 或可靠度指标 β 。

例如,假定结构的抗力随机变量为 R ,荷载随机变量为 S ,其相应的概率密度函数为 $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$,概率分布函数为 $F_R(r)$ 和 $F_S(s)$,且 R 和 S 相互独立,结构功能函数为

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1)$$

则结构的失效概率为

$$P_f = P(Z < 0) = \int_0^\infty F_R(s) f_S(s) ds = \int_0^\infty (1 - F_S(r)) f_R(r) dr \quad (2)$$

由于实际工程基本随机变量较多,功能函数复杂,采用数值积分计算失效概率往往难以实现,目前多采用可靠度指标 $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$ 结构功能函数均值与方差的比值,衡量结构可靠度。

可靠度理论既可考虑各种荷载和抗力参数变异性,又能反映各随机变量自身的特点,比安全系数法更能反映实际情况。许多学者已经将可靠度理论成功应用于坝肩边坡及地下洞室稳定分析,并证实了参数的不确定性对安全度的影响,这对拱坝安全度分析有一定的借鉴意义。如文献^[10]通过地下开挖

稳定问题的可靠性分析,表明随机参数的均值、标准差以及分布形式对结构的安全系数和可靠度有明显影响,文献^[11]分别提出了运动稳定和运动不稳定的可靠度估计,来合理模拟楔形岩体的破坏过程;Liang等^[12]、程心恕等^[13]、杨海霞等^[14]也用可靠性理论对拱坝可靠度进行过探讨。

我国 GB 50199—94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[15]已采用了基于可靠度理论的概率极限状态设计法。根据该标准的规定与要求,在坝肩岩体稳定中应采用概率极限状态设计法,用可靠指标来度量可靠性,采用分项系数设计表达式进行设计,以代替单一的安全系数设计。但可靠度方法是基于概率论与数理统计理论的数学方法,要求有完整的观测资料和试验资料,这对尚未竣工或蓄水初期的工程来说,往往无法达到,从而用此法评价安全度时,精度不高,甚至无法使用。另一个关键原因是没有安全度标准,或者是对允许破坏概率大小还缺乏了解和一致的意见^[16]。因此,将可靠度理论应用于拱坝安全度评估,应用经验不足,随机变量的统计还存在一些困难,目前尚属研究阶段。

1.4 模型试验法

安全系数法和可靠度方法是数学力学分析法,而对于某些重要工程来说,除此以外,往往还需用模型试验进行分析论证。20世纪70年代末、80年代初发展起来的地质力学模型试验技术,可以做到原型的几何尺寸、边界条件、作用荷载、地质构造产状和材料的容重、强度和变形特性等相似,从而可以在模型中找出破坏机理和工程的薄弱部位,并根据荷载与变形关系曲线初步估计大坝和坝基的稳定安全度。

李朝国等^[17]、李天斌^[18]、姜小兰等^[19]分别通过地质力学模型试验研究了小湾、构皮滩等双曲拱坝的整体稳定性。这些试验结果都证明地质力学模型试验是一种分析拱坝破坏机理、获取整体稳定安全度的有效方法。虽然试验中的一些技术问题还未全部解决,如地震、扬压力和温度等荷载的模拟问题以及分析成果的定量估计和安全度确定等问题,但是模型试验结果可以与安全系数法的分析成果相互检验和补充,使对大坝的稳定安全度估计更符合实际。

2 拱坝稳定安全度研究进展

2.1 失效模式研究

高拱坝可能的破坏形式有:①坝体本身的强度破坏;②拱坝坝体的屈曲;③拱坝沿建基面的滑移;④坝肩岩体的滑移;⑤坝肩岩体过大的压缩变形。拱坝是一种高次超静定整体结构,一般认为只要坝肩岩体稳定可靠,不产生沿软弱结构面的滑移和过

大的压缩变形,拱坝就不会失稳,因此目前分析坝肩岩体抗滑稳定性的研究较多。近年来,汝乃华^①、陈正作^②、任青文等^[20]先后提出拱坝也存在沿建基面上滑失稳的可能性,并分析了滑动模式和分析方法,认为当河谷较宽、岸坡较缓、坝体较薄时,拱坝有可能像重力坝那样沿建基面或建基面下的浅层裂隙发生滑移破坏。

2.2 稳定分析方法研究

安全系数法是目前国内外工程设计中最常用的拱坝稳定分析方法,拱坝稳定安全系数分析方法的研究进展主要表现在以下两个方面:刚体极限平衡法的改进和变形体方法的推广应用。

2.2.1 刚体极限平衡法的改进

拱坝的稳定关键在于坝肩岩体的稳定,特别是坝肩岩体沿软弱结构面的剪切破坏,对拱坝的稳定威胁极大,刚体极限平衡法(也叫刚性体方法)是最经典的分析坝肩岩体稳定的确定性分析方法。该理论将由结构面构成的岩体视为刚体,不考虑其变形,作用在滑移面上的力系只计法向力和剪力,而不考虑弯矩作用,根据极限平衡状态下作用于岩体上的平衡条件,直接求出岩块沿某个面滑移的稳定安全系数,然后通过一定数量的试算或采用优化的方法,找出最危险的滑移面及相应的最小稳定安全系数。由于该方法具有模型简单、计算公式简洁、可以解决各种复杂剖面形状、能考虑各种加载形式的优点,已被广泛应用于估计拱坝坝肩稳定安全系数。然而此法比较粗略,忽略因素较多,也存在着危险滑动面确定困难、计算模型过于简化的缺点。近年来极限平衡法在计算模型、滑动面确定、边坡类型等方面都得到了进一步的完善。传统的极限平衡法认为滑动面沿长度方向是不变的,这与实际边坡有些不符,郭汉荣^[21]在极限平衡公式中引入一个几何参数,将单位走向边坡长度块段分析改为扇形块段分析,用于锥形边坡分析中,Stark等^[22]建立了极限平衡三维分析方法,将极限平衡二维分析推广到三维分析,更能反映实际边坡;肖专文等^[23]仍假设滑动面为圆弧形,用遗传进化算法确定边坡最危险滑动面及其对应的最小安全系数,将该算法应用到边坡稳定分析中克服了传统分析方法容易进入局部极小化的缺点。

2.2.2 变形体方法的推广应用

变形体方法是将对分析的对象包括岩体和相关的工程结构作为一个系统,计算其真实的位移场和应

力场,然后直接计算安全系数(称为直接法)或按照一定的评判准则确定其安全度(称为间接法)。直接法即根据应力场和位移场,假定某个滑移面,由以下的极限平衡公式直接计算稳定安全系数:

$$K = \frac{\int (\sigma_n + c) \cos \alpha ds}{\int \tau_t \cos \beta ds} \quad (3)$$

式中: σ_n 、 τ_t 分别为破坏面上某点的正应力和切向剪应力; α 、 β 分别为该点运动方向和剪应力方向与整体滑移方向的夹角; f 、 c 为该点的抗剪强度参数。间接法即采用超载或强度储备的方法,使系统进入极限平衡状态,超载或强度改变的倍数即为系统整体安全度,前者称为超载安全度,后者称为强度储备安全度。间接法要根据某种破坏判据人为判定系统是否进入极限平衡状态,具有一定的任意性。

变形体方法包括两部分内容:应力应变分析和安全度分析。以有限元为代表的数值方法是应力应变分析强有力的工具,自20世纪70年代提出至今,已经从二维有限元发展到三维有限元、从线弹性有限元发展到非线性(弹塑性、黏塑性)有限元,可以说已经相当成熟。近年来,随着计算机科学技术的迅速发展,又涌现出许多新的数值方法,如边界元法、界面元法、离散元法、刚体弹簧元法、拉格朗日不连续变形分析方法、块体理论、数值流形方法等,许多学者^[6-7, 24-28]已经将这些新的数值方法应用于拱坝稳定安全度的研究,并取得了显著的成果,尤其是结合二滩、李家峡高拱坝的设计,开展了复杂地基上混凝土拱坝的三维非线性有限元的计算分析,这不仅为高拱坝的设计提供了先进的设计理论与计算方法,而且为拱坝整体安全度的研究提供了重要依据。

2.3 失稳判据研究

目前采用的失稳判据主要有收敛性判据、突发性判据^[29]以及塑性区贯通判据^[30]3种。对于三维问题还没有统一的、具有理论基础的判据,而且采用不同的方式(如超载、强度储备)使系统达到极限平衡状态或采用不同的失稳判据得到的稳定安全度一般是不同的,这就给安全度的确定带来了一定的困难,因此建立统一的、具有力学理论基础的、可得到唯一解的失稳判据是一个急需解决的问题。

3 结 语

综上所述,关于高拱坝稳定安全度分析的理论和方法还不够完善,与我国高拱坝建设的实际工程

①Ru Nai-hua. Arch dam upside failure & safety criterion. Proceeding of International Workshop on Arch Dams, Colombia, Portugal, 1987.

②陈正作. 拱坝沿地基面滑动的模式及其应力分析方法. 拱坝学术讨论会论文集. 北京, 1996. 327-335.

需求尚有很大差距。近年来国内外学者在这方面的研究已经取得了巨大进展,其发展趋势主要表现在以下几个方面:

a. 拱坝安全度的控制标准由局部安全度向整体安全度转变,从单个安全系数向多安全系数综合评价发展,从而可以考虑整个系统的整体性强的特点和众多不确定因素。

b. 为考虑荷载、地质构造、材料参数等不确定因素,拱坝安全度分析理论由确定性理论向不确定性理论发展,应用可靠性理论分析拱坝稳定安全度越来越受到工程界的重视。

c. 应用新的数值方法分析拱坝稳定安全度及多种方法结合应用,弥补常规的极限平衡分析和有限元法的不足,使计算成果更加合理,也是今后的一个发展方向。

参考文献:

[1] 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,1995,12(3):1-7.

[2] 任青文,王柏乐.关于拱坝柔度系数的讨论[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(1):1-4.

[3] 朱伯芳.混凝土拱坝的应力水平系数与安全水平系数[J].水利水电技术,2000,31(8):1-3.

[4] LOMBARDI. Kolnbrein dam: an unusual solution for an unusual problem[J]. Water Power and Dam Construction, 1991(6):31-34.

[5] ZHU Bo-fang. Stress level coefficient and safety level coefficient for arch dam[J]. Dam Engineering, 2000, 11(3):133-142.

[6] 周伟,常晓林,唐忠敏.溪洛渡高拱坝渐进破坏过程仿真分析与稳定安全度研究[J].四川大学学报:工程科学版,2002,34(4):46-50.

[7] 杜成斌.设缝高拱坝的整体安全度和破坏机理研究[J].水力发电,2000(7):24-28.

[8] 周维垣,杨若琼,佻公瑞.高拱坝稳定性评价的方法和准则[J].水电站设计,1997,13(2):1-7.

[9] 王均星,张优秀,王汉辉.高拱坝承载能力研究[J].武汉大学学报:工学版,2004,37(1):27-31.

[10] CHEN Gang, JIA Zhi-zhong, KE Jin-chuan. Probabilistic analysis of underground excavation stability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3):665-672.

[11] PARK H, WEST T R. Development of a probabilistic approach for rock wedge failure[J]. Engineering Geology, 2001(59):233-251.

[12] LIANG R Y, NUSIER O K, MALKAWI A H. A reliability based approach for evaluating the slope stability of embankment dam[J]. Engineering Geology, 1999(54):271-285.

[13] 程心恕,封伯昊.拱坝可靠度分析方法探讨[J].福州大学学报,1997,25(5):78-83.

[14] 杨海霞.基于分载法的拱坝可靠度分析[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(6):23-26.

[15] GB 50199—94 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S].

[16] 刘汉东.水电工程岩质高边坡安全度标准研究[J].华北水利水电学院学报,1998,19(1):40-44.

[17] 李朝国,张林.拱坝坝肩稳定的三维地质力学模型试验研究[J].成都科技大学学报,1994(3):73-83.

[18] 李天斌.拱坝坝肩稳定性的地质力学模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):1670-1676.

[19] 姜小兰,操建国,孙绍文.构皮滩双曲拱坝整体稳定地质力学模型试验研究[J].长江科学院院报,2002,19(6):21-24.

[20] 任青文,钱向东,赵引.等.高拱坝沿建基面稳定性的分析方法研究[J].水利学报,2000(2):1-7.

[21] 郭汉荣.锥形边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,1998,17(2):123-128.

[22] STARK T D, HISHAM T. Performance of three-dimensional slope stability methods in practice[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, 1998, 124(11):1049-1060.

[23] 肖专文,张奇志.遗传进化算法在边坡稳定性分析中的应用[J].岩土工程学报,1998,20(1):44-46.

[24] 何江达,林正伟,王启智.锦屏一级高拱坝结构特性及坝肩稳定性研究[J].四川大学学报:工程科学版,2004,36(2):12-16.

[25] 黄岩松,周维垣,陈欣.等.拉西瓦双曲拱坝整体稳定分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(增刊2):2413-2417.

[26] 汪卫明,徐明毅,陈胜宏.小湾拱坝坝肩稳定的弹粘塑性块体理论分析[J].武汉大学学报:工学版,2001,34(3):42-46.

[27] 寇晓东,周维垣,杨若琼.三维快速拉格朗日法进行小湾拱坝稳定分析[J].水利学报,2000(9):8-14.

[28] 崔玉柱,张楚汉,徐艳杰.等.用刚体弹簧元研究梅花拱坝的破坏机理[J].清华大学学报:自然科学版,2002,42(1):88-92.

[29] 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(增刊2):1303-1309.

[30] 栾茂田,武亚军,年廷凯.强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J].防灾减灾工程学报,2003,23(3):1-8.

(收稿日期:2005-06-23 编辑:熊水斌)

