

刘毅, 杨波, 张敬, 等. 基于性态仿真的特高拱坝设计研究与应用之一: 我国拱坝结构分析方法发展现状与展望[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 41-54.

LIU Yi, YANG Bo, ZHANG Jing, et al. Performance simulation-based study on design of super-high arch dam and its application Part I: development status and prospect of structural analysis method for arch dam in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 41-54.

基于性态仿真的特高拱坝设计研究与应用之一 ——我国拱坝结构分析方法发展现状与展望

刘毅^{1,2}, 杨波², 张敬³, 周秋景², 程恒², 张国新^{1,2}

- (1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100038;
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 300 m级拱坝坝高、库大、应力水平高、施工运行期工作性态复杂,《混凝土拱坝设计规范》(DL/T 5346—2006)(以下简称《规范》)的分析方法和安全系数能否涵盖所有安全风险,存在疑问;《规范》要求,坝高大于200 m的拱坝,应对上述有关问题进行专门论证。结合笔者所在团队十余年来跟踪小湾、锦屏一级、溪洛渡、拉西瓦等特高拱坝建设全过程开展的科研工作,对特高拱坝结构研究的经验类比方法、应力分析方法、稳定分析方法、抗震安全分析方法的基本概念、工程应用、主要优缺点和发展趋势进行阐述和分析,结合不同设计阶段的目标和资料细化程度,提出了特高拱坝可行性研究设计、招标设计、施工图设计、蓄水与运行等不同阶段应该开展的分析工作以及建议采用的分析方法,也可为一般拱坝的设计提供参考。

关键词: 特高拱坝; 性态仿真; 设计阶段; 分析方法

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.10.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TV431

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)10-0041-14



Performance simulation-based study on design of super-high arch dam and its application Part I — development status and prospect of structural analysis method for arch dam in China

LIU Yi^{1,2}, YANG Bo², ZHANG Jing³, ZHOU Qiuqing², CHENG Heng², ZHANG Guoxin^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Department of Structure and Materials, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Power China Chengdu Engineering Co., Ltd., Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: As the 300 m-grade arch dams have the characteristics of high dam height, large reservoir size, high stress level, of

收稿日期: 2020-05-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406703); 国家自然科学基金项目(51779277); 中国水科院科研专项(SS0145B612017, SS0145B392016); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SKL2020ZY10); 中国水科院科研专项(EM0145B192019)

作者简介: 刘毅(1979—),男,正高级工程师,水电中心主任,结构材料研究所所长,博士,研究方向为高坝真实工作性态分析、大体积混凝土温控防裂等。Email: liuyi@iwhr.com

which the working performances during their operation periods are complicated, it is still in doubt whether the analysis methods and safety factors specified in "Design Specification for Concrete Arch Dams" (DL/T 5346—2006) can cover all the safety risks or not, and then a special demonstration is made for dealing with the relevant problems mentioned above. In combination with the tracking scientific and technical studies made on the whole construction processes of the super-high arch dams for Xiaowan, Jinping I, Xiluodu, Laxiwa Hydropower Stations, etc., the basic conceptions, engineering applications, main merits and defects and development trends of the method of analogy of experience, stress analysis method, stability analysis method and seismic safety analysis method for the study on super-high arch dam are expounded and analyzed, while the analyses which are necessary to be made during the different phases of super-high arch dam, i. e. design for the feasibility study, bidding design, construction drawing design, impoundment, operation, etc. as well as the suggested analysis methods are put forward herein in accordance with the targets of different design phases and the data refinement degree; which can also provide some references for the design of the common arch dam.

Keywords: super-high arch dam; performance simulation; design phase; analysis method

0 引言

在近十余年来的我国水电开发高峰期中,特高拱坝的建设占据着显著而重要的位置。小湾拱坝(坝高 294.5 m)、拉西瓦拱坝(250 m)、锦屏一级拱坝(305 m)、溪洛渡拱坝(285.5 m)已经建成投产,并接受了正常蓄水位的考验;白鹤滩拱坝(坝高 289 m)、乌东德拱坝(坝高 270 m)浇筑高程已经过半。在上述拱坝建设之前,我国已建成的最高拱坝是 1998 年竣工的二滩拱坝(坝高 240 m),这十余年的特高拱坝建设将我国的拱坝建设实践从 200 m 级提升至 300 m 级。

300 m 级特高拱坝应力水平高,按照《混凝土拱坝设计规范》(DL/T 5346—2006)(以下简称《规范》)方法计算得到的压应力接近或达到 10 MPa,与普通拱坝主要受拉应力控制不同,特高拱坝的拉、压应力均达到《规范》允许应力的临界值,整体安全裕度小于普通拱坝,对拱坝整体性和防裂要求高;其次,混凝土强度等级高,混凝土高强与高抗裂矛盾突出,混凝土绝热温升和后期温度回升较大,且由于特高拱坝坝体较厚、浇筑快尺寸大,低温封拱温差大,同等条件下温控防裂的难度大;再次,出于提前发电的需要,分期浇筑、封拱与蓄水以及在施工过程中的诸多调整使得施工期的工作性态与初始设计状态出现较大差异,施工期拱坝工作性态十分复杂,拱坝施工期悬臂高度等高差增加,可能会导致施工期拱坝工作状态的恶化。为此,文献[1]和文献[2]特别指出:坝高大于 200 m 或有特殊情况的拱坝工程,应进行专门研究。潘家铮院士在为《特高拱坝枢纽分析与重点问题研究》一书的序中指出“应尽可能精确地仿真计算特高(拱)坝在运行后的工作状态”^[3]。

围绕小湾、溪洛渡、锦屏一级等一批 300 m 级特高拱坝的建设需求,科研工作者围绕 300 m 级特高拱坝建设难题开展了大量科研工作。朱伯芳等^[4-5]结合小湾工程围绕高拱坝应力控制标准开展了深入的研究,提出了采用多拱梁法和有限元法进行拱坝应力分析时的控制标准。周维垣等^[6-7]提出了基于有限元方法和地质力学模型试验的高拱坝稳定性设计判据。任青文^[8]在长期研究基础上,总结了高拱坝应力变形分析、破坏分析和安全度评估的各种方法及其准则。张国新等^[9]提出了高拱坝全坝全过程仿真分析方法,开展了考虑真实应力状况的安全度评估研究^[10-11]。实际上,在不同设计阶段,由于目标与资料深度不同,需要采用不同的分析方法来研究特高拱坝的工作性态,依据分析结果不断深化细化设计方案。

笔者所在团队全过程参与了小湾、锦屏一级、溪洛渡、拉西瓦等特高拱坝建设全过程开展的科研工作,本文系统梳理了我国现有特高拱坝分析方法,对不同分析方法的优缺点进行评述,结合不同设计阶段需求,提出了不同设计阶段应该开展的分析工作,可为高拱坝的设计提供参考。

1 经验参数与工程类比分析法

对于拱坝而言,有一些简单的参数可以经验性判断拱坝体形参数是否合适,如有宽高比、厚高比、柔度系数等。其中:宽高比是指坝顶高程处河谷宽度与坝高之比,用来描述河谷形状,一般而言,宽高比大于 4.5 的河谷不适合修建拱坝;厚高比是指拱坝最大高度处的坝底厚度与坝高之比,一般而言,厚高比小于 0.2 的是薄拱坝,厚高比大于 0.2 小于 0.35 的是中厚拱坝,大于 0.35 的是厚拱坝。然而,由于拱坝应力与河谷宽高比、坝体高度及河谷形状等诸多因素

有关,单独用厚高比参数难以判断拱坝厚度是否合适,因此,瑞士著名坝工专家 LOMBARDI 和我国坝工专家汝乃华提出用柔度系数对拱坝厚度进行经验性判断^[12-13]。柔度系数 C 的计算公式如下

$$C = A^2 / (VH) \quad (1)$$

式中, A 为拱坝中面的面积; V 为拱坝体积; H 为最大坝高。

拱坝柔度系数是一无量纲参数,对相同的坝高, C 越小,拱坝越安全。基于当时已建成的工程, Lombardi 建议了破损曲线表达式(称为 Lombardi 曲线)^[14],用于对拱坝是否发生开裂破坏进行经验性判断如下

$$C \leq 25 - 0.05H \quad (2)$$

朱伯芳^[15]基于柔度系数物理内涵的分析,得到了柔度系数相同条件下拱坝应力水平与坝高成正比的结论,并提出了拱坝应力水平系数的概念;按照 Kolnbrein 拱坝的应力水平系数为参照,提出了衡量拱坝体型的表达式(称为朱伯芳曲线)

$$C \leq 3500/H \quad (3)$$

任青文等^[16]从强度控制和屈曲控制两个角度,提出了破损曲线的表达式,指出强度和屈曲两者相比之下,拱坝坝体的安全性一般是由强度控制。

如图 1 所示为国内外典型已建拱坝的柔度系数,

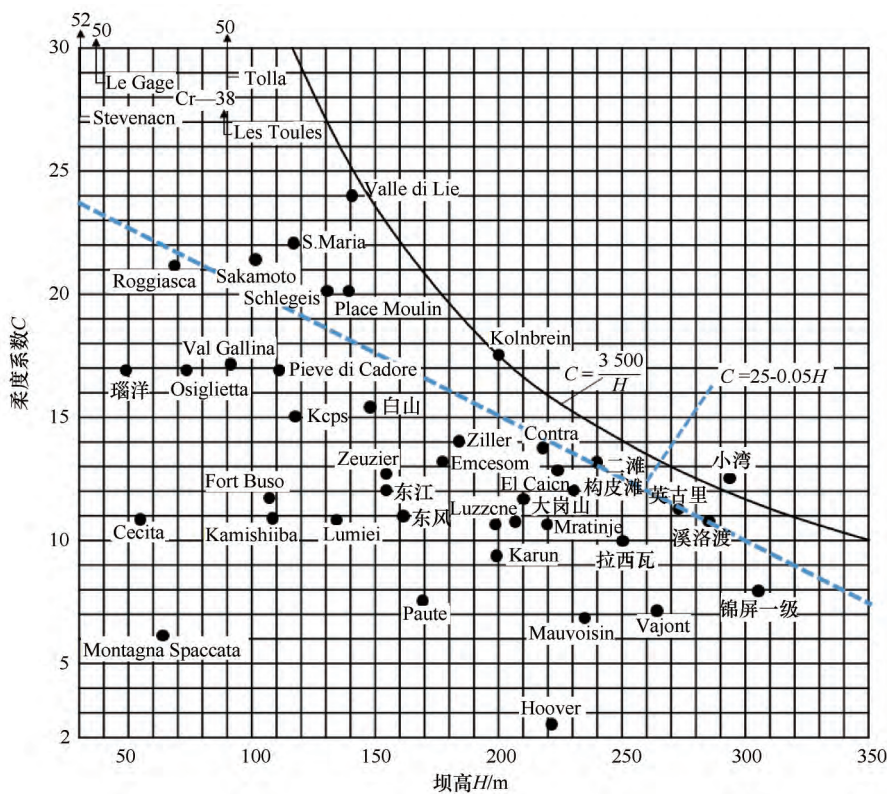


图 1 典型拱坝的高度与柔度系数

其中标出了式(2)和式(3)所表达的 Lombardi 曲线和朱伯芳曲线。由图 1 可知,绝大部分已建工程均位于朱伯芳曲线的下方,可以用柔度系数来初步评估拱坝体型与河谷形状的适配性;位于朱伯芳曲线之上的小湾工程坝高 294.5 m,总水推力 19 000 万 kN,是水推力最大的拱坝,工程于 2009 年蓄水运行至今已有 10 年,大坝运行性能正常,说明用柔度系数判断拱坝的安全性有其局限性。实际上,柔度系数并未考虑坝地质条件、温度荷载等因素,因此,柔度系数也仅能作为拱坝安全定性判断的参考。

2 拱坝应力分析方法

2.1 拱梁分载法

拱梁分载法是将拱坝视为由一系列水平拱圈和铅直梁组成,荷载由拱和梁共同承担,拱和梁各承担多少荷载由拱梁交点处变位协调条件决定;荷载分配后,梁按静定结构计算应力,拱按纯拱法计算应力。

早期的拱坝应力分析将坝体划分为一系列互不干涉的水平拱圈,然后用圆筒和固端拱概念进行二维应力分析。美国工程师在 19 世纪末提出了拱冠梁法的概念,此后经欧美工程师不断研究改进,直至 1917 年,瑞士坝工专家运用多拱梁法设计瑞士第一座拱坝 Montsalvens 拱坝。20 世纪 20—30 年代,为修建胡佛

拱坝,美国工程师对拱梁分载法进行了考虑坝基弹性变形、增加切向变位和扭转角的调整、借助单位荷载变位的辅助表格试算求解等诸多改进,拱梁分载法日趋完善。

我国于 20 世纪 50 年代引入拱梁分载法,在求解方法等方面做了许多改进工作。之后,随着计算机的应用和高拱坝的建设,拱梁分载法在我国得到广泛应用。我国编制了许多拱坝拱梁分载法应力计算分析软件^[17],如中国水科院的 ADA-SO、浙江大学的 ADAO 以及中国电建成都院的 ADSC 等,同时这些软件具有拱坝体形优化功能,已广泛应用于我国实际拱坝设计中。按照我国现行规范规定,压应力按不大于混凝土强度值除以安全系数来控制,基本工况组合下拉应力按不超过 1.2 MPa 控制,非地震工况特殊组合按不超过 1.5 MPa 控制。

拱梁分载法作为我国现行规范中推荐的用于拱坝应力分析的基本方法^[1-2],计算工作量小、计算速度快,国内外数百座拱坝都是以拱梁分载法应力成果为依据进行设计的,是成熟的计算方法。但是,拱梁分载法存在着以下不足:采用Vogt近似方法计算基础变形,在建基面结点上缺乏变形协调条件,不同拱梁分载法程序计算结果相差较大,不能计算坝体孔口影响等等;拱梁分载法计算得到的应力成果,一般也只作为拱坝应力水平的参考,与坝体实际应力状况有较大差异^[9]。随着计算方法和计算技术的发展,采用有限元仿真分析方法计算拱坝应力,更能反映拱坝真实应力状态,是拱坝中应力分析方法的发展方向。

2.2 线弹性有限元及等效应力法

有限单元法通过把计算域划分为若干单元,选择合适节点作为求解函数的插值点,将微分方程中的变量改写成由各变量节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式,将微分方程离散求解。自提出伊始,有限单元法就因其求解复杂问题的能力显示出了强大生命力,目前已经成为结构分析领域的主流方法。

但到目前为止,拱坝体形设计仍以结构力学方法为主要手段,其主要原因是,用三维弹性有限单元法计算拱坝应力时,近基础部位存在着显著的应力集中现象,而且应力数值随着网格加密而急剧增加,尤其是有限元法算出的拉应力有时远远超过了混凝土的抗拉强度。在实际工程中,由于岩体内存在着大小不等的各种裂隙,应力集中现象将有所缓和。用拱梁分载法设计的大量拱坝,至今一直在正常运行,有限单元法计算拱坝所反映的严重应力集中现象并不一定符合实际。

为解决有限元计算拱坝应力存在应力集中,而导致有限元法计算结果无法直接应用于拱坝体型确定的问题,朱伯芳^[18]、傅作新等^[19]提出了有限元等效应力法,根据有限元法计算的应力分量,沿拱梁断面积分,得到内力(集中力和力矩),然后用材料力学方法计算断面上的应力分量,经过这样处理,消除了应力集中的影响。朱伯芳等^[20]采用拱梁分载法和有限元等效应力法对国内外十几座拱坝进行了计算,计算结果表明:有限元等效应力法消除了应力集中的影响,得到的最大主压应力与拱梁分载法接近,最大主拉应力比拱梁分载法略大一些。

目前,拱坝设计规范^[1-2]已将有限元等效应力法作为拱坝应力分析的主要方法,明确提出对于高拱坝和比较复杂的拱坝,应采取有限元等效应力进行计算;并规定了相应的设计准则:基本组合工况的允许

拉应力按照1.5 MPa控制,压应力控制标准与拱梁分载法相当。但是,目前有限元等效应力方法针对计算模型、边界条件对计算结果影响的研究仍不充分,行业内也没有提出统一的可操作性的计算方法与模型标准,有限元等效应力计算软件的标准化仍是有待解决的问题。

2.3 非线性有限元法

多拱梁法和线弹性有限元均依赖于结构是弹性的这一基本假定,但实际工程中,无论混凝土材料还是岩体材料,均具有明显的非线性特征,尤其是应力集中部位,一旦拉应力超标,混凝土或岩体材料产生开裂,应力得到释放,与按《规范》方法计算应力会产生较大差异。同时,由于拱坝是超静定结构,局部开裂后应力会重新调整。为反映结构真实状态,在有限元计算中需要考虑混凝土和岩体材料的材料非线性特征,采用材料非线性模型或接触非线性模型进行分析。

采用非线性有限元对拱坝进行应力分析时,坝踵开裂是研究的焦点问题。傅作新等^[21]采用非线性有限元方法研究了拱坝-岩基开裂区范围以及之后变形的变化与应力重分布情况,提出在拱坝设计中推广非线性分析方案可以导致更经济的设计和更简单的拱坝体型。黄文雄等^[22]的研究也表明,与线弹性应力分析方法相比,考虑非线性开裂能提供更准确和更全面的成果,坝踵的局部开裂使坝体应力分布更为合理,只要控制裂缝深度和渗漏,局部开裂不会造成严重后果。田斌等^[23]运用弹塑性有限元研究了Kolnbrein拱坝的坝踵开裂问题,计算所得开裂区域与实际情况符合较好。周元德等^[24]用工程类比分析法研究了高拱坝坝踵开裂稳定性问题,以已建工程的运行监测资料为依据,采取同一计算程序、等同有限元网格对拟评价工程进行平行计算,从而对拟建工程的坝踵开裂稳定性做出相对评价。

笔者所在团队采用SAPTIS软件中的非线性模块^[25]对小湾、锦屏一级、溪洛渡、二滩等特高拱坝工程进行了系统分析,一般仍采用经典的二参数准则,其中岩体材料多采用DP准则,混凝土材料多采用MC准则。弹塑性模型中本构关系一般采用理想弹塑性模型和脆断模型,少数采用软化模型和强化模型。损伤模型可以有效反映岩石和混凝土材料软化性能,分析效果与弹塑性模型有一定的可比性,在拱坝性态和安全分析中得到应用。实际上,岩体和混凝土材料屈服准则多样,包括1~5参数的屈服准则,典型的如一个参数的抗拉强度准则、二个参数的Drucker-Prager和Mohr-column强度准则、三个参数的WW

准则、四个参数的 HTC 准则等, 屈服准则对拱坝应力计算结果有一定影响, 采用何种屈服准则更合理, 业内也没有统一认识。

在我国现有设计规范中, 水电行业拱坝设计规范^[1]在正文中明确规定“根据工程的重要程度和必要性, 可采用非线性有限元法进行弹塑性分析”, 在条文说明中规定“开裂区以 $0.1B$ 为控制条件, 同时要求在应力重分配后, 压应力仍能满足要求”。水利行业拱坝设计规范^[2]在正文中对于非线性有限元的应用没有明确规定, 但在条文说明中给出了未纳入规范的理由——“难以给出相应的控制指标”。美国陆军工程师兵团拱坝设计规范^[26]指出, 拱坝周边出现超标拉应力是因为未考虑建基面有限的黏结强度以及岩体内部构造, 建议在线弹性有限元计算中减小基岩变形模量以降低应力集中; 美国联邦能源管理委员会水电项目工程审查评估指南^[27]指出建基面无法承受拉应力, 通常需要采用接触单元进行分析, 但具体单元开裂控制范围未明确给出。

笔者认为, 采用非线性有限元进行拱坝应力分析更能符合拱坝作为非静定结构局部破损后应力调整的特点, 对于一般情况而言, 以不拉裂帷幕为原则, 以坝踵开裂区以 $0.1B$ 为控制条件, 总体是合适的; 对于严寒地区, 温降荷载可能导致顶部产生较大拉应力区的问题可以另行规定, 区别对待。考虑到非线性计算结果受网格尺寸影响明显, 本构模型和收敛标准也会对计算结果产生显著影响, 应组织业内科研人员对这些问题进行对比研究, 以期建立统一的计算模型、网格尺寸、本构模型、收敛准则的统一标准, 推动非线性有限元计算在实际工程中的应用。

2.4 全坝全过程仿真分析方法

一般的拱坝线弹性有限元或非线性有限元应力计算中, 不考虑施工期应力的影响, 也较少考虑施工过程、封拱过程、蓄水过程对大坝应力的影响; 特高拱坝与中小型拱坝相比, 存在施工周期长、应力状态复杂、蓄水分期等特点, 施工期真实应力状态与设计应力状态存在显著差异^[28]。以小湾拱坝为例, 小湾拱坝蓄水后, 坝踵应力监测值多为压应力^[29-30], 原本预防坝踵开裂的预设底缝也未张开; 而在设计期间, 几乎所有计算分析都表明, 当蓄水至正常蓄水位时小湾拱坝坝踵存在拉应力, 有开裂风险^[31-33]。二滩、构皮滩等其他拱坝也表现出类似的情况^[34-35]。张国新等^[29]的初步分析表明, 坝踵应力计算值与监测值的差异主要来源于两个方面: 一是实测坝踵应力的局限性; 二是计算模型和荷载简化对应力计算结果的影

响, 如, 未考虑真实的坝体自重施加过程和蓄水过程、未考虑封拱后温度回升影响、库底堆渣导致局部高温的影响、坝基岩体局部裂隙张开影响等。

实际上, 自重等荷载施加过程对大坝应力的影响, 很早就引起坝工研究人员的关注: 潘永保等^[36]研究了分期蓄水和分期施工对高拱坝坝体应力的影响; 刘华丽等^[37]基于多拱梁法研究了封拱过程和蓄水过程对高拱坝应力计算的影响。但在当时, 由于计算方法的局限, 施工期温度应力、浇筑、封拱、蓄水过程等因素很难在一个模型中考虑。有限元仿真分析方法的发展, 为更精确的应力计算提供了条件。基于有限元增量法, 朱伯芳等^[38]建立了混凝土坝温度应力仿真分析的理论方法, 早期多应用于混凝土坝块温度应力计算。张国新等^[39]将非连续介质力学中的接触理论引入有限元计算程序中, 突破了群缝模拟收敛性差的关键难题。在此基础上, 张国新等^[40]发展了混凝土坝全过程仿真分析的理论方法和软件, 可以精细模拟大坝基础开挖过程、回填支护过程、混凝土浇筑过程、横缝灌浆过程、水库蓄水过程、混凝土硬化过程、温度控制过程、时效变形过程、长期运行过程等, 可考虑温度、渗流、应力多场耦合^[40], 已应用于小湾、锦屏一级、溪洛渡、拉西瓦、大岗山、乌东德、白鹤滩等国内几乎所有 200 m 以上特高拱坝性能分析和安全评估中。

笔者所在团队通过对国内已建在建 200 m 以上特高拱坝全坝全过程仿真分析, 对大坝施工-蓄水-运行全过程有了更深的认识。施工期在自重荷载作用下, 大坝应力状态与设计应力状态差异明显, 坝踵部位压应力可达 10 MPa 以上, 而下游面低高程建基面附近往往会出现拉应力, 对于宽河谷、倒悬大的特高拱坝拉应力甚至会超过混凝土抗拉强度导致开裂。因此, 在施工过程中需要控制大坝悬臂高度, 及时成拱, 并在上游基坑堆渣充水。悬臂高度控制、充水时机及高度均应结合仿真成果确定, 避免在水压作用下上部未灌浆横缝产生大的压缩效应, 缝宽减小, 影响接缝灌浆效果。

按照现有拱坝设计规范, 将温度荷载分为两部分: 封拱之前为施工期温度荷载, 通过温度应力分析选择合适的温度控制标准和措施来防止施工期出现温度裂缝; 封拱之后为运行期温度荷载, 纳入设计荷载组合, 温度荷载考虑了平均温差和线性温差, 未考虑非线性温差。对于特高拱坝施工期温控防裂问题, 张国新等^[41]开展了大量的研究, 提出了“九三一”温控防裂模式^[42]。研究表明, 混凝土温度变化速率尤

其在早龄期对温度应力影响十分明显,在智能通水广泛采用的情况下,可以采用基于应力过程优化的理想温控曲线进行温度控制,可在相同温差情况下减小开裂风险,或在相同开裂风险控制条件下放宽温控标准,对于廊道、孔口等特殊仓块和严寒地区混凝土温度应力控制有重要意义^[43]。特高拱坝普遍存在明显的封拱后温度回升现象,主要是混凝土后期发热导致,地温和环境温度影响范围有限,温度回升可能会使大坝在数年甚至数十年内与设计状态不同,在一定程度上会使坝踵区域压应力增大,同时使坝体下游表面开裂风险加大^[44-45];特高拱坝上游淤沙或堆渣高度一般在50 m以上,淤沙高程以下温度普遍比设计采用水库水温偏高,使得大坝真实温度荷载与设计温度荷载存在差异,进而影响大坝温度应力^[46]。

水压荷载中,大坝混凝土渗透性几乎可以忽略不计,静水压力直接作用在大坝上游表面,可采用常规计算方法分析,但基岩条件复杂,刚蓄水时水压直接作用在基岩表面,与表面压力类似,但随着时间延长,水体逐渐向岩体内部渗透,对基岩和大坝性态影响过程复杂。因基岩渗流边界条件非常复杂,目前渗流仿真分析一般用于渗控措施设计复核分析,对基岩和大坝变形与应力影响研究成果较少,张国新等^[47]研究表明渗流会引起一定的基岩变形,在特定水文地质条件下,可能触发岸坡岩体蠕变变形;杨强等^[48]研究表明裂隙水压力会改变岩体平衡状态,使得基岩岩体产生一定变形,进而对大坝性态产生影响。

综上,全坝全过程仿真分析方法能较为细致地分析拱坝施工运行全过程工作性态,理应为拱坝设计提供更多的支撑。但目前限制其应用的因素主要在两个方面:一是计算模型复杂、规模大,计算耗时长,随着高性能计算技术的发展,这一问题将逐步缓解;目前笔者团队正在依托国家十三五“高性能计算”专项,进行复杂工程力学高性能应用软件高效并行研发,目前最大自由度数已突破十亿级。二是缺乏对应的设计准则。目前,仅《混凝土坝温度控制设计规范》(NB/T 35092—2017)给出了与全坝仿真分析方法配套的应力控制标准^[49],即:施工期温度应力按不大于混凝土极限拉伸值与弹性模量的乘积除以安全系数(中、高坝安全系数取1.5~1.8);但是该控制标准仅适用于混凝土施工期温控防裂,针对运行期考虑各种荷载工况的拱坝安全评估,由于重要性差异,需要重新研究制定配套的应力控制标准。

3 拱坝稳定分析方法

拱坝作为一种超静定结构,可能的破坏形式包括

坝体本身的强度破坏、坝体的屈曲破坏、沿建基面的滑移、坝肩岩体的滑移以及基础和坝肩岩体过大的压缩变形破坏等,其中沿建基面的滑移和沿坝肩岩体的滑移可作为局部稳定问题进行分析,基础和坝肩岩体过大的压缩变形破坏可以作为整体稳定问题进行分析。

3.1 局部抗滑稳定分析方法

局部抗滑稳定分析是拱坝设计重要内容,包括建基面和坝肩岩体的抗滑稳定分析,其中建基面是指沿拱坝与地基接触面及建基面以下浅层基岩内由节理、裂隙等形成的薄弱面^[50];坝肩抗滑稳定主要指坝肩岩体沿由断层、节理、裂隙等形成的可能的滑动面的稳定性^[51],常见滑块组合型式有一陡一缓、两陡一缓和阶梯状滑块等。分析方法可大致分为刚体极限平衡法和三维数值分析法。

刚体极限平衡法是根据静力平衡条件确定滑移面上的内力,通过滑移面上可利用的剪切强度和平衡所需要的剪切力得到抗滑稳定系数,根据对滑动面岩体力学参数的选取,计算公式分为抗剪和抗剪断两种,这一方法意义明确,计算简单,得到广泛应用,是设计规范中采用的方法;但该方法不考虑变形协调条件、材料本构关系以及接触面上应力分布,滑移面一般事先假定,是一种宏观平衡的判断方法。关键块体理论是坝肩稳定分析中应用较多的一种方法,其最早由石根华、GOODMAN^[52-53]提出并发展,美国联邦能源管理委员会水电项目工程审查评估导则在坝肩稳定分析中推荐采用块体计算。关键块体理论包括块体可动性分析、运动学分析及稳定性分析三部分,稳定性分析是基于刚体极限平衡法开展的;相对于传统的刚体极限平衡法,关键块体理论的优势在于可以通过几何拓扑分析,排除所有的无限块体和不可动块体,然后通过运动学分析,找出荷载作用下所有可能失稳块体,得到较为直观的岩体稳定情况;但由于关键块体理论是基于几何拓扑理论,也未能考虑块体之间相互作用影响。我国拱坝设计规范^[1-2]规定:拱座抗滑稳定分析以刚体极限平衡法为主。同时也规定了与之相配套的抗剪和抗剪断抗滑稳定安全系数,如:水利行业规范中^[2],对于1级建筑物的基本工况组合,抗剪断稳定安全系数为3.5。

三维数值分析法主要是采用有限元、有限差分等方法,在网格划分时考虑基岩中各种断层、节理、裂隙等构造,采用线弹性本构关系或非线性本构关系,如D-P准则、MC准则等,进行不同荷载工况组合分析,得到坝体及坝基受力状态,尤其是可能滑面的受

力状态,采用点安全度、面安全度和块体安全度进行稳定判断^[54],其中点安全度可以用来判断基岩内任意微小部分是否可能产生应力破坏,了解建基面和坝肩基础应力安全裕度,岩体或断层等构造中低于要求安全度的点越少越安全,但点安全度的大小控制标准以及稳定要求的分布范围标准没有明确。面安全度和块体安全度是在上述不同荷载工况组合分析基础上,通过反力法或应力积分方法等,求出建基面和结构面上的法向力和剪切力,利用抗剪或抗剪断公式计算面或块体安全度,这种计算方法较刚体极限平衡法更接近真实,能够考虑自重、温度、渗流等各种荷载以及岩体-坝体变形协调关系,是重要的发展方向。

3.2 整体稳定分析方法

大坝整体稳定分析主要采用两种方法进行研究,一是地质模型试验方法,二是非线性有限元方法。

地质模型试验属于破坏性试验方法^[6-7,55],主要有超载法、强度储备法以及超载与强度储备相结合的综合法。超载法普遍采用增大上游荷载的方式进行超载,逐渐加大上游水荷载直至结构破坏失稳,得到的安全系数为超载安全系统;强度储备为在一定荷载作用下逐步降低力学参数直至失稳破坏,得到的强度储备系数反映在长期运行过程中,由于渗流作用等结构面强度指标逐渐弱化的影响,这一方法与实际情况更为符合,但何种材料(如良好岩体、断层、裂隙以及坝体混凝土)进行强度折减、折减比例(同比例、不同比例等)如何处理目前为止没有统一的认识;综合法是两者结合,即考虑可能的突发洪水、地震等荷载,也考虑岩体力学参数逐步降低可能性,其中超载法试验条件简单,易实现,应用最为广泛,截止目前,特高拱坝普遍采用超载法进行了整体稳定分析,部分进行了强度储备法试验^[56]。综合法能够定性地反映大坝整体破坏特征、过程,并通过工程类比判断安全性,具有一定的工程意义,但鉴于结构和材料相似性问题,事实上难以量化,主要用于定性分析。

非线性有限元极限分析方法^[6-7,57],是将地质模型试验转变为数值模型试验,采用超载法、强度折减法或两者结合的方法,通过极限加载或力学参数降低,得到不同破坏标准的安全系数,如坝踵起裂、屈服区贯通、结构变形突变或计算无法收敛等,通过工程类比进行整体稳定性评价。非线性有限元分析方法与模型试验相比,能够考虑各种荷载、参数变化,能够适应复杂的破坏路径,具有更精确、更高效、更经济的特点,优势明显,在方案比选时已逐渐替代模型试验方法。但该方法也存在一些关键问题需要进一步

研究,表现在网格模型的剖分、本构关系的选用、失稳准则的选取以及安全系数的确定。拱坝体型及坝基岩体地质构造复杂,网格划分难度大,经常会有畸形单元存在,加之地质缺陷导致相邻单元材料性质差异很大以及高受力水平,使得计算收敛难度大,另外网格剖分尺度也会对结果产生一定影响。整体安全稳定分析中目前仍以弹塑性本构关系为主,但实际工程中可能表现为脆断、软化等特征,损伤本构的采用一定程度上对该方面进行了弥补,但存在模型多、结果差异大的问题,目前没有较为公认的模型。大坝失稳一般指变形突变和计算无法收敛,现实环境中可能难以发生,因此提出了结构起裂、屈服区贯通、变形突变、计算不再收敛等不同状态对应的由小到大不同的安全系数,对大坝整体稳定进行判断,已在小湾及后续高坝工程设计分析中得到全面应用^[6-7,57]。

我国《混凝土拱坝设计规范》(SL 282—2018)^[2]中规定:对1级、2级高拱坝或者地质条件复杂的拱坝,应进行拱坝整体稳定分析,并结合工程类比,综合评价整体稳定性;规范正文中未给出定量的控制标准,但在条文提供了若干工程计算与试验成果,为设计提供参考。

4 拱坝动力分析方法

4.1 拟静力法

20世纪30年代初,美国学者以动力分析理论为基础,对拱坝的抗震特性进行详细研究并加以概括,针对不同情况以静力形式给出地震动力荷载分布,再按常规的拱坝静力分析方法计算出坝体地震响应,这就是拟静力法。拟静力法是一种用静力学方法近似解决动力学问题的简易方法,它在一定程度上考虑了结构动力反应的一些基本特征,且物理概念清晰,计算方法较为简单,计算工作量很小,参数易于确定,并积累了丰富的使用经验,便于设计人员掌握和应用,所以在相当长的时间内在世界各国得到了广泛应用。但是,拟静力法仅仅是对拱坝动力响应的一种粗略估算,既无法考虑坝体混凝土材料的动力特性,也无法考虑地震动的频谱特征和持时影响。

从已有研究文献来看,拱坝的强度计算分析很少采用拟静力法,拟静力法在拱坝坝肩动力稳定性分析、坝坡地震抗滑稳定性分析等方面有所应用,例如,沈兴正^[58]采用拟静力法和动力法对李家峡拱坝抗震性能进行了复核;刘杰等^[59]对拟静力方法进行改进,基于合理的边坡岩体参数、锚固参数和地震动参数,对地震作用下大岗山坝肩边坡的稳定性进行

了计算,通过对坡体在不同地震加速度下的应力、应变、塑性区及锚索应力进行分析,提出了相应滑移模式,为支护提供了依据。

1978年,由中国水利水电科学研究院主编的中国第一部《水工建筑物抗震设计规范》(SDJ 10—78)颁布实施,该规范主要采用了拟静力法求解大坝动力响应。2000年,对上述78规范进行修编,水利水电行业标准《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203—97/DL 5073—2000)颁布实施,该规范实现了分析方法由静力法向动力法的转轨。随着对地震动和拱坝地震响应认识的不断深入,以及地震动输入、材料动力本构模型、数值计算方法等不断发展成熟,影响拱坝地震响应的诸多复杂因素能够得到较好反映。我国于2015年又对《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203—97/DL 5073—2000)进行了修编,颁布实施的《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015)^[60]规定,对工程抗震设防类别为甲类,工程抗震设防类别为乙、丙类但设计烈度Ⅷ度及以上的或坝高大于70 m的拱坝的地震作用效应应采用动力法计算。从历次规范的修编可以看出,规范也随着数值模拟技术与计算方法的不断进步而逐步改进,更能反映实际的动力分析方法将得到更大的发展和更多的应用。

4.2 反应谱法

20世纪40年代,C. W. Housner和H. B. Seed两位美国学者对多条实测地震记录进行了统计,并将实测记录的地面振动分别代入单自由度动力反应方程,计算出各自最大弹性地震反应,从而得到结构最大地震反应与结构自振周期的关系曲线,即反应谱,由此可计算出最大地震作用。与拟静力法相比,反应谱法考虑了地震作用随结构自振周期、阻尼以及场地类别的变化,可以更为真实地模拟结构振动。其中,振型分解反应谱法不需对动力方程做数值积分,计算存储量小,运算时间少,计算过程简便,易于操作,在地震工程中得到了广泛应用,是我国《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015)规定的抗震设计方法之一。

采用振型分解反应谱法计算拱坝地震响应,地震反应谱的确定十分关键。在我国《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015)中,一般大坝工程的水平向和竖向设计反应谱采用标准设计反应谱。标准设计反应谱的特征周期、反应谱最大值等参数根据建筑物类别、场地类别以及所在地区的Ⅱ类场地基本峰值加速度对应的特征周期等确定。对进行专

门的场地地震安全性评价的抗震设防类别为甲类的大坝工程,由于标准设计反应谱无法反映工程所处的特定场地的地震特性,设计反应谱应采用与特定工程场址相关的场地相关反应谱。场地相关反应谱可以考虑各潜在震源区对坝址地质危险性的贡献值,能够给出震级、震中距一定的具体地震以及该地震在工程场址产生的设计地震动加速度^[61]。目前,杨房沟、叶巴滩等在建特高拱坝按现行规范规定进行了场地相关反应谱研究,并进行了拱坝动力分析和抗震安全评价^[62-63]。大岗山、溪洛渡、锦屏一级、小湾等已建特高拱坝也采用场地相关反应谱和相应的地震动时程进行了抗震复核^[64]。

但是,反应谱方法也有局限性,该方法将结构所受的最大地震作用通过反应谱,转化成作用于结构的等效荷载,然后根据这一荷载用静力分析方法求得结构的地震内力和变形,本质上是线性方法,不能反映结构在地震过程中的经历。同时,反应谱法只能应用于结构的弹性分析,当结构在强烈地震下进入非线性阶段时,用此法进行计算将不能得到结构真实地震响应。因此,对于重要拱坝工程,除了采用反应谱法计算拱坝的地震响应外,还应采用时程法分析拱坝的地震响应过程。

4.3 时程分析法

时程分析法是本世纪60年代逐步发展起来的抗震分析方法。它根据选定的地震波和结构恢复力特性曲线,采用逐步积分的方法对结构运动微分方程进行直接积分,从而求得结构在地震过程中每一瞬时的位移、速度和加速度反应。与反应谱法相比,时程法能够计算结构在地震作用下的往复运动,能够分析结构从线弹性、非线性至损伤破坏的全过程,可以更加真实地评价结构的抗震安全性能。时程法已广泛应用于拱坝的抗震设计与分析中,也是现行规范规定的抗震设计方法之一。

采用时程法进行拱坝抗震设计与分析时,合理确定坝址地震动输入方式是大坝工程抗震安全性评价的重要前提。通常的做法是将坝体-库水-地基视为整个开放的波动体系,考虑地基的惯性作用、近域地基岩体中的各类地质构造、远域地基的辐射阻尼效应以及坝基面地震动输入的不均匀性。目前对于在动力模型边界截断处施加无反射边界条件模拟无限地基辐射阻尼效应,以及采用自由场波动输入方法已达成共识,并取得了大量的研究成果^[65]。坝址地震动荷载的确定是目前研究的热点和难点。为反映近场地震特征的面源发震机制替代传统的点源发震机制,有学者

采用半理论、半经验的“随机有限断层法”，将发震断层划分为子断裂点源群，按其破裂模式、时间序列，顺序叠加通过相应传播途径和场地效应，直接生成坝址地震动参数^[66-67]。还有学者考虑震源机制、传播介质和坝址峡谷场地效应等三大要素的影响，建立震源-传播介质-坝址峡谷场地大规模数值模型，采用谱元法模拟地震波从发震断层破裂开始到坝址场地的物理传播过程，生成坝址区的三维地震动参数^[68-69]。

拱坝是分段进行浇筑的，并且横缝进行灌浆。在静载作用下拱坝可视为整体结构，但在强震作用下，由于横缝无抗拉强度，地震时必然往复开合，从而使坝体的整体性有所下降，并引起坝体应力的调整和重新分布。因此，在对拱坝进行地震时程分析时，应考虑横缝的动力接触非线性效应。坝体混凝土和坝基岩体作为准脆性材料，在强震作用下可能发生损伤开裂，建立能够反映混凝土和岩体材料动力特性的非线性本构模型，对研究拱坝在强震下的损伤破坏过程和极限抗震能力十分重要。林皋等^[70]通过能够近似满足动量、动能守恒条件的速度、加速度的修正方法，将非光滑方程组方法推广到动力接触问题的求解中，研究了地震时拱坝中横缝的开合、错动对坝体动力响应的影响；涂劲等^[71]采用动接触力模型模拟坝体横缝、基岩各块体之间的缝面的接触滑移关系，对国内的高拱坝进行了非线性地震反应分析，得出了一些有益的结论；张楚汉等^[72]建立了综合考虑无限地基辐射阻尼、库水可压缩性、横缝几何非线性、混凝土材料损伤开裂等影响因素的高坝-地基-库水非线性动力损伤开裂分析模型，对小湾等 20 多座高坝进行了抗震分析；赵兰浩等^[73]提出了用于求解动接触问题的有限元混合法，并将其应用于有横缝高拱坝的非线性地震反应分析中；陈厚群等^[74]采用动力损伤模型模拟坝体和地基岩体，研究了 Koyna 重力坝的地震损伤破坏过程，认为损伤力学模型能够表述岩体损伤破坏后的刚度和强度降低，考虑坝基岩体损伤后模拟结果与实际震害更为接近。但是，实际岩体包含大量结构面，材料特性表现为各项异性，其动力破坏特性十分复杂，而且目前国内外还未有普遍认可的岩体动力损伤本构模型，还需进一步深入研究。

我国现行规范规定，对于重要拱坝除采用振型分解反应谱法计算外，还应同时按时程法进行比较验算。对于工程抗震设防类别为甲类的拱坝，或结构复杂、地基条件复杂的拱坝，还应增加非线性有限元法的分析评价。当需进行最大可信地震作用设防的重要

拱坝抗震计算分析时，应计入坝体横缝以及构成坝基内控制性滑裂面的接触非线性、近域地基岩体中主要软弱带的材料非线性以及远域地基的辐射阻尼效应等影响。从这些规定可以看出，我国现行规范也在不断突破一些难以反映实际的传统理念和方法，使大坝抗震设计计算方法能够反映实际复杂影响因素。

5 锦屏一级拱坝不同设计阶段设计研究工作综述

锦屏一级拱坝位于中国四川省凉山彝族自治州境内的是雅砻江干流上，水库正常蓄水位 1 880 m，死水位 1 800 m；拦河大坝为混凝土双曲拱坝，坝顶高程 1 885 m，建基面高程 1 580 m，最大坝高 305 m。锦屏一级拱坝具有高山峡谷、高拱坝、高边坡、高地应力、高水头及深部卸荷等“五高一深”特点，工程建设极具挑战性。

锦屏一级拱坝由中国电建集团成都勘测设计研究院承担勘测设计工作。勘测设计始于 20 世纪 50 年代，分为规划、预可行性研究、可行性研究、招标与施工图设计阶段。1962 年完成流域规划，1979 年完成锦屏开发方式研究。1988 年开展卡拉至江口河段的规划，预可行性研究工作始于 1989 年，与河段规划平行开展。2003 年完成可行性研究，2005 年 9 月国家发展和改革委员会核准锦屏一级水电站开工建设。工程于 2004 年 1 月进入筹建期施工，2009 年 10 月开始大坝混凝土浇筑，2013 年 12 月完成大坝混凝土浇筑，2014 年 8 月锦屏一级水库蓄水至正常蓄水位 1 880.00 m。

本节结合锦屏一级工程，阐述不同设计阶段特高拱坝需要开展的分析工作。

5.1 预可行性研究

锦屏一级水电站在预可行性研究阶段对水文站、三滩、解放沟和普斯罗沟等四个坝址，开展勘察设计工作，并进行比选。其重点对三滩坝址和普斯罗沟坝址进行技术经济比较，两个坝址分别适合不同的坝型，三滩坝址适合碎石土心墙堆石坝，普斯罗沟坝址地形地质条件适宜布置混凝土拱坝。

按照设计规范进行了拱坝枢纽布置设计，拱坝应力分析主要采用拱梁分载法(成都院开发的 ADSC 程序)，拱坝拉压应力满足规范要求；拱座抗滑稳定分析采用刚体极限平衡法(成都院开发的 EASA 程序)，按照预可行性研究阶段的地质勘探和试验资料计算，拱座抗滑稳定基本满足规范要求；对左岸坝肩中、上部的地质缺陷，初拟了置换、灌浆等加固处理措施，

采用线弹性有限元方法进行了整体分析,结果表明加固措施能有效地改善建坝条件。

通过综合比较,推荐普斯罗沟坝址混凝土双曲拱坝的枢纽布置作为代表方案,于1999年4月通过了国家经贸委审查。

5.2 可行性研究

可行性研究阶段的工作于1999年底开始,分两个阶段进行,第一阶段是在预可行性研究的基础之上进行选坝勘测设计研究,选定坝址和坝型;第二阶段是在选坝勘测设计研究完成后,开展全面的可行性研究设计。

针对普斯罗沟坝址复杂地质条件,采取“先避让,后布置、再处理”的设计原则,通过线弹性有限元分析,拟对左坝肩采取混凝土置换、混凝土洞塞网格、混凝土传力洞(墙)、固结灌浆、防渗排水以及预应力锚固等综合处理措施进行加固,计算成果表明,经采取有效的基础处理措施后,坝体应力、变位基本满足要求,工程量小。最终推荐普斯罗沟坝址配套混凝土双曲拱坝坝型,并于2002年通过了有关单位的审查。

可行性研究第二阶段,采用多种方法全面开展了保证拱坝结构安全需要的分析工作,包括建基面选择、坝基处理方式研究、拱圈线型选择及体形设计、拱座抗滑稳定分析、整体稳定分析、动力分析、渗控分析、温度控制研究等。

5.2.1 建基面选择

根据坝基地质条件,进行了多条坝线、不同拱端嵌深的比较,主要从拱梁分载法计算的坝体应力、线弹性有限元法计算的坝基综合变形模量、刚体极限平衡法计算的坝肩抗滑稳定、深部裂缝对拱坝的影响分析成果,结合工程量进行综合比较,推荐Ⅱ坝线。

5.2.2 左岸坝基处理方式

对左岸上部的断层、低波速岩体、深部裂缝以及煌斑岩脉等地质缺陷,采用线弹性有限元方法进行了多种处理方式对比研究,推荐在高程1750~1885m段设置高135m的垫座。在此基础上,通过非线性有限元整体分析,确定了混凝土置换网格、传力洞、抗力体固结灌浆的范围以及左岸综合加固处理措施,以解决左右岸地形地质条件严重不对称的问题。

5.2.3 拱圈线型优选

成都院、中国水利水电科学研究院、浙江大学分别采用ADSC、ADASO、ADAO程序,基于拱梁分载法,开展了抛物线、多心圆、椭圆、对数螺线、二次曲线等拱圈线型比选工作,从应力分析成果和工程量

比较,最终确定拱圈线型为抛物线。

5.2.4 拱坝体形优化设计

在设计应力控制标准下,考虑各种荷载工况组合,采用拱梁分载法并结合局部调整建基面,对拱坝体形进行优化设计,还采用线弹性有限元方法进行了计算,通过坝体和坝基的应力、变位分布,分析评价体形设计方案的合理性。

5.2.5 拱座抗滑稳定分析

在深入分析锦屏一级拱坝地形地质状况的基础上,采用组合搜索分析,确定了左岸拱座控制性滑块有5个、右岸控制性滑块有6个,采用刚体极限平衡法计算的拱座抗滑稳定安全系数,左岸满足控制标准要求,右岸部分滑块不满足要求。对右岸的控制性滑块,采用有限元法、刚体弹簧元法进行了补充分析,并结合变形稳定分析成果,综合评判其稳定安全性。

5.2.6 拱坝整体安全度分析

采用非线性有限元及水容重超载法,对天然坝基条件、加固处理两种情况进行整体稳定分析,验证坝基综合加固措施的有效性,探究拱坝与地基系统在极限荷载作用下抵抗变形破坏的能力。结果表明:拱坝起裂超载倍数为2,非线性超载倍数3.5~4.5,极限承载超载倍数7~8。依据拱坝与坝基的破坏过程,重点研究薄弱部位,为设计加固措施提供参考。

5.2.7 拱坝动力分析

依据坝址地震安评成果,确定锦屏一级电站基岩水平峰值加速度为269gal(100年超越概率2%),采用有限元法及规范规定的反应谱法及时程法进行抗震分析,坝体抗压强度满足规范要求且有较大安全裕度,坝体局部抗拉强度不满足规范要求。由于拱坝坝高超过200m,对其动力分析应进行专门研究,从多方面论证了大坝抗震安全性。

5.2.8 拱坝温度应力仿真分析与温控措施研究

以运行期的结构应力和施工期的温控防裂为目标,采用拱梁分载法开展了混凝土双曲拱坝封拱温度场优化,基本确定大坝封拱温度范围。采用规范经验公式方法和有限元仿真分析方法进行了温度应力分析和温控措施研究,提出了拱坝温度控制标准与温控措施。

5.2.9 拱坝-地基系统渗流分析

分析坝址区的工程地质条件及水文地质条件,建立能模拟坝基渗流特性的三维有限元模型,分析计算不同防渗帷幕深度、坝后排水方案下的渗压折减系数,为坝基防渗及排水设计提供技术支撑。

2003年11月,锦屏一级水电站可行性研究设计报告通过。

5.3 招标与施工图设计阶段

锦屏一级工程2004年开始招标和施工图阶段的设计,对拱坝体形、坝基处理、整体稳定、温控防裂、防震抗震等关键工程技术问题,进行了深入的研究和专项设计。

5.3.1 体形优化设计

招标阶段通过深入研究后认为,左右岸地形、地质条件不对称使得拱坝结构不对称、坝体受力状态不对称,拱坝的安全度需留有余地,适当降低坝体的应力水平,拱坝体形设计时容许压应力按8.0 MPa控制。拱梁分载法计算的最大压应力从可行性研究阶段的8.40 MPa降低到7.77 MPa,坝体混凝土方量从435.59万 m^3 增加到476.47万 m^3 。在降低最大应力的同时,进一步改善了拱坝受力的对称性。

5.3.2 坝基加固处理措施

采用整体稳定分析方法对拱坝坝基加固处理措施进行了优化研究,为加大左岸上部的地基刚度,扩大了垫座范围,调整后的垫座布置在高程1730~1885 m之前,垫座高度155 m。采用平面有限元就垫座平面尺寸和固结灌浆范围进行多方案的敏感性分析,以拱端变形为主要控制指标,确定了尺寸范围,再用整体稳定分析方法对加固措施的有效性进行复核,同时对垫座、置换网格、传力洞等加固结构进行受力分析,为结构设计提供依据。

5.3.3 整体稳定分析

采用现场取样和室内试验,研究了高应力与强渗水作用下结构面、软弱岩体、软弱岩带的力学参数,成都院、清华大学、河海大学、中国水科院分别采用非线性有限元方法进行整体稳定分析,清华大学和四川大学还开展了超载法和综合法的地质力学模型试验研究。计算分析和模型试验成果表明,锦屏一级拱坝具有较高的整体安全度。

5.3.4 拱坝防震抗震

“5·12”汶川地震后,经复核锦屏一级水电站工程场地基本烈度为Ⅶ度,坝址区100年超越概率0.02基岩地震动水平向峰值加速度为0.269g,按照《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015)进行了拱坝抗震复核。设计反应谱采用基于概率法和确定性方法相结合的设定地震方法所确定的场地相关反应谱,除规范规定的复核研究内容外,开展了大坝-地基体系非线性地震反应分析,并在最大可信地震的基础上进行了极限抗震能力研究,进行了模

型比尺1:300的拱坝整体动力模型试验研究。综合计算分析和模型试验成果,锦屏一级拱坝在地震作用下整体稳定能够得到保证,满足“设震可修、极震不溃”的抗震要求。

5.3.5 大坝全过程仿真分析

大坝浇筑前,中国水科院团队采用全坝全过程仿真分析方法研究了大坝施工运行全过程工作性态,对难以确定的边界条件进行了包络式分析,研究成果为封拱温度、分缝型式及温控标准与措施的优化设计提供了依据。

大坝浇筑过程中,中国水科院团队建立了拱坝整体精细化仿真模型,采用全坝全过程仿真分析方法,按实际施工过程和既定施工进度计划,结合实际监测资料,跟踪与反演分析大坝施工期的工作性态,及时评价开裂风险,并为固结灌浆方式优化、陡坡坝段冷却方式优化、上游充水时机优化、拱坝同冷区高度优化等20余项设计优化提供了直接依据。

5.4 大坝蓄水和运行阶段

锦屏一级工程拱坝高度和水库库容大,从工程建设时序安排和保证工程安全的角度,蓄水分4个阶段进行:第一阶段2012年11月中下旬导流洞下闸后由导流底孔过流;第二阶段2013年6月中旬水库开始蓄水到死水位1800 m;第三阶段2013年9月底从死水位开始蓄水至1840 m;第四阶段2014年6月1日开始蓄水到正常蓄水位1880 m。蓄水过程和初期运行阶段,围绕大坝安全运行进行了蓄水过程的反馈分析与评价、左岸边坡变形对大坝影响的研究。

5.4.1 初期蓄水安全监测分析与反馈分析

对首次蓄水的各个阶段,在根据监测资料反馈分析混凝土弹性模量、坝基各类岩体变形模量的基础上,进行蓄水过程的坝体变位、应力进行预测预报,指导蓄水过程,保证大坝安全可控。由于采用了全过程仿真分析的方法,预测精度较高,各蓄水阶段实测的坝体变位与预测指标基本吻合。初期运行阶段,坝体温度处于动态调整过程,坝体混凝土、坝基岩体存在少量不可恢复的残余变形,大坝工作性态正常。

5.4.2 左岸坝肩边坡变形稳定及其对大坝安全影响研究

左岸坝肩边坡受施工扰动影响持续变形,根据其变形特征进行了流变参数的反演分析,预测其收敛年限和稳定阶段的变形量,作用在拱端的变形量最大为21.5 mm。采用模型边界加载位移、坝基岩体降强等方式,分析坝肩边坡变形对拱坝结构的影响。计算分析表明,由于边坡的时效变形较小,对大坝的整体稳

定性影响不显著,不会危及到拱坝的安全运行。

截止2020年4月,锦屏一级拱坝蓄水已经历6次正常蓄水位的考验。河床坝基最大径向位移16.56 mm,与库水位相关很好。拱坝径向位移整体以中间坝段为中心,向两岸测值逐渐变小,两岸基本对称。拱坝径向位移最大值为42.00 mm,且与水位有良好的相关性。横缝与垫座缝测缝计变化都较小。帷幕后各测点渗透压力与上游水位有较好的相关性,坝基建基面帷幕后渗压折减系数都小于0.27,坝基排水幕渗压折减系数都小于0.07,均小于设计控制值,坝基廊道实测总渗漏量仅34.59 L/s。监测成果表明,拱坝、坝基及抗力体工作性态正常,拱坝处于准弹性工作状态。

6 结语与展望

一直以来,尽可能精确的仿真计算拱坝在运行后的工作状态进而为拱坝设计提供尽可能准确的依据是坝工技术人员孜孜以求的目标,为此,一大批研究人员深入研究各种拱坝应力、稳定、抗震分析方法,提出各种计算方法、模型和设计准则,并结合工程开展应用研究。早在2006年,朱伯芳院士曾提出建议^[75]:在拱坝应力分析中以有限元等效应力法取代拱梁分载法;在坝体坝基稳定分析中,以有限元强度递减法取代极限平衡法,对重要工程进行非线性有限元全坝全过程仿真分析。在实际工程的设计过程中,受限于不同设计阶段的勘测设计深度、设计资料与参数获取的广度和准确度、工程经验的积累等因素,不同设计阶段采用的设计分析方法是有所差异的,更精确的计算方法替代相对粗糙的计算方法需要勘测设计深度、设计准则等方面与之相配套,因此,可以预见的是,这个替代过程会需要一个相当长的时间。

自上世纪50年代,我国自行设计施工建造第一座混凝土拱坝起,我国拱坝技术领域历经引进-消化-吸收-再创新,逐渐形成了具有我国拱坝设计建造技术体系;世界前三高混凝土拱坝锦屏一级、小湾、溪洛渡陆续在我国建成,标志着我国坝工技术已步入世界先进水平行列。当前,我国水利水电建设企业在大坝建设国际市场的份额超过一半,但是大多数工程仍然采用欧美标准,我国拱坝技术标准走出去越来越迫切。在国际市场设计方案竞标中,在满足安全的前提下,设计方案的经济性就成为是否中标的重要因素。为此,如能在我国设计规范中允许或者鼓励采用更精确的分析方法为主进行拱坝设计,历经拱坝设计-施工-蓄水-反馈的循环,我国设计工程师们必然

会提升拱坝设计水平,增强在国际拱坝设计与咨询市场的竞争力。

本文基于锦屏一级拱坝工程不同阶段设计分析工作的总结,考虑与国际上相关拱坝设计标准的比较,提出相关建议,与同行专家商榷。

(1)建议在拱坝技术规范中允许多种分析方法并存,条件成熟时将更精确的分析方法规定为主要分析方法并规定相应的设计准则,条件不够成熟时可规定为平行分析方法并引入经实践证明成功的工程案例,为设计工程师应用更精确的分析方法创造条件,在工程实践中提升更精确分析方法的成熟度。如在《混凝土拱坝设计规范》(SL 282—2003)中,规定了“拱坝应力分析应以拱梁分载法或有限元法计算成果,作为衡量强度安全的主要标准”,且在条文说明中对于非线性有限元方法的参考性控制标准,这样就为设计工程师采用非线性有限元方法进行拱坝设计创造了条件。

(2)可行性研究是拱坝设计方案确定的重要阶段,也是国际市场竞标中决定设计方案是否中标的关键时期。在这一阶段可采用拱梁分载法、线弹性有限元、非线性有限元、仿真分析方法进行应力分析,采用刚体极限平衡、超载或降强非线性有限元、地质模型试验进行稳定分析,采用反应谱法及时程法进行抗震分析,进而为拱坝体形确定、坝基基础处理、抗震等设计提供依据。总体而言,拱坝体形设计主要由拱梁分载法计算确定;坝基基础处理主要基于有限元分析并结合工程经验类比确定。为增强拱坝设计技术的国际竞争力,建议采用我国现有分析方法对国际典型工程进行分析,研究提出基于有限元方法的应力、稳定等控制标准。

(3)全坝全过程仿真分析考虑因素更为全面,计算模型考虑了大坝整体与基础地质情况,仿真过程按实际施工过程和既定施工进度计划,混凝土的相关参数根据试验检测成果和反馈分析确定,其分析结果与真实性态更为接近。在大坝建设阶段,相关边界条件和参数都以明确,有条件对大坝真实工作性态进行实时评估和预测分析,并给予分析结果进行设计方案的优化。锦屏一级工程的成功经验表明,在现场组建一支科研分析团队,进行实时的跟踪分析研究,可以有效地支撑设计优化与高质量建设。建议重要工程都采用这一模式。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国发展与改革委员会. 混凝土拱坝设计规范: DL/

- T 5346—2006[S],北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 中华人民共和国水利部. 混凝土拱坝设计规范: SL 282—2018 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2018
- [3] 李瓚,陈飞,郑建波. 特高拱坝枢纽分析与重点问题研究[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [4] 朱伯芳. 拱坝应力控制标准研究[J]. 水力发电,2000(12): 39-44.
- [5] 朱伯芳,董福品. 高拱坝应力控制标准研究[J]. 水力发电,2001(8): 57-59.
- [6] 周维垣,杨若琼,剡公瑞. 高拱坝的有限元分析方法和设计判据研究[J]. 水利学报,1997(8): 1-6.
- [7] 周维垣,杨若琼,剡公瑞. 高拱坝稳定性评价的方法与准则[J]. 水电站设计,1997,13(2): 1-7.
- [8] 任青文. 高拱坝安全性研究现状及存在问题分析[J]. 水利学报,2007,38(9): 1023-1031.
- [9] 张国新,刘毅,朱伯芳,等. 高拱坝真实工作性能仿真的理论与方法[J]. 水力发电学报,2012,31(4): 167-174.
- [10] 朱伯芳,张国新,郑瑾莹,等. 混凝土坝运行期安全评估与全坝全过程有限元仿真分析[J]. 大坝与安全,2007(6): 9-12.
- [11] 张国新. SAPTIS: 结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之一)[J]. 水利水电技术,2013,44(1): 31-44.
- [12] LOMBARDI. Kolnrein dam: A unusual solution for an unusual problem[J]. Water Power and Dam Construction. 1991,(6): 31-34.
- [13] 汝乃华,姜忠胜. 大坝事故与安全·拱坝[M]. 北京:中国水利水电出版社,1995.
- [14] 陈宗梁. 世界超级高坝[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 周建平,党林才. 水工设计手册(第二版)(第五卷 混凝土坝)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [18] 朱伯芳. 国际拱坝学术讨论会专题综述[J]. 水力发电,1988(8): 49-52.
- [19] 傅作新,钱向东. 有限单元法在拱坝设计中的应用[J]. 河海大学学报,1991(2): 8-15.
- [20] 朱伯芳. 论混凝土拱坝有限元等效应力[J]. 水利水电技术,2012,43(4): 30-32.
- [21] 傅作新,郑雄. 拱坝的非线性分析[J]. 水电站设计,1992,8(2): 1-6.
- [22] 黄文雄,许庆春,王德信. 拱坝的非线性开裂有限元分析[J]. 河海大学学报,1994,22(5): 100-103.
- [23] 田斌,夏颂佑. 高拱坝坝踵开裂非线性有限元分析[J]. 人民长江,1997,28(5): 32-34.
- [24] 周元德,陈观福,尹显俊,等. 用工程类比分析法研究高拱坝坝踵开裂稳定性[J]. 水力发电学报,2002(1): 19-26.
- [25] 周秋景,张国新. SAPTIS: 结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之二)[J]. 水利水电技术,2013,44(9): 39-48.
- [26] U. S. Army Corps of Engineers. Engineering and design: arch dam design: Manual No. 1110-2-2201 [S]. Washington D. C.: U. S. Army Corps of Engineers, 1994.
- [27] FERC - Federal Energy Regulatory Commission. Engineering guide-
lines for the evaluation of hydropower projects [S]. Washington D. C.: FERC - Federal Energy Regulatory Commission, 2015.
- [28] 刘毅,高阳秋,张国新,等. 锦屏一级特高拱坝工作性能仿真与反演分析[J]. 水利水电技术,2017,48(1): 46-51.
- [29] 张国新,周秋景. 高拱坝坝踵应力实测与弹性计算结果差异原因分析[J]. 水利学报,2013,44(6): 640-646.
- [30] 周建平,杜小凯,张礼兵,等. 高拱坝坝踵应力实测与计算的比较研究[J]. 水力发电学报,2017,36(12): 87-94.
- [31] 杨强,陈英儒,刘耀儒. 基于变形加固理论的高拱坝坝踵开裂分析[J]. 水利学报,2008,39(1): 20-26.
- [32] 陈胜宏,汪卫明,徐明毅,等. 小湾高拱坝坝踵开裂的有限单元法分析[J]. 水利学报,2003,34(1): 66-71.
- [33] 周伟,常晓林,喻建清,等. 小湾高拱坝上游坝踵人工短缝设置效果的深入分析[J]. 水力发电学报,2007,26(6): 17-23.
- [34] 袁琼. 二滩拱坝应力监测分析[J]. 水电站设计,1993,19(3): 37-40.
- [35] 王志宏,胡清义,余昕卉,等. 构皮滩水电站初期蓄水拱坝工作性能分析[J]. 人民长江,2010,41(22): 29-31.
- [36] 潘永保,宋学让. 分期蓄水和分期施工对高拱坝剖面选择的影响[J]. 水利水电技术,1985,16(8): 1-4.
- [37] 刘华丽,彭辉. 基于多拱梁分载法的高拱坝应力分析[J]. 云南水力发电,2009,25(3): 26-29.
- [38] 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,1999.
- [39] ZHANG Guoxin, LIU Yi, ZHENG Cuiying, et al. Simulation of influence of multi-defects on long-term working performance of high arch dam [J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2011, 54 (sup): 1-8.
- [40] 张国新,沙莎. 混凝土坝全过程多场耦合仿真分析[J]. 水利水电技术,2015,46(6): 87-93.
- [41] 张国新,刘有志,刘毅. 特高拱坝温度控制与防裂研究进展[J]. 水利学报,2016,47(3): 382-389.
- [42] 张国新,刘毅,李松辉,等. “九三一”温度控制模式的研究与实践[J]. 水力发电学报,2014,33(2): 179-184.
- [43] 赵泽湖. 拱坝大体积混凝土温控曲线优化研究及其工程应用[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2019.
- [44] 张国新,刘毅,解敏,等. 高掺粉煤灰砗的水化热温升双函数模型及其应用[J]. 水力发电学报,2012,31(4): 201-206.
- [45] 张国新,周秋景. 特高拱坝封拱后温度回升及影响研究[J]. 水利学报,2015,46(9): 5-14.
- [46] 张国新,陈培培,周秋景. 特高拱坝真实温度荷载及对大坝工作性能的影响[J]. 水利学报,2014,45(2): 127-134.
- [47] 张国新,程恒,周秋景,等. 高拱坝蓄水期谷幅时效变形机理分析[J]. 中国科技论文,2019,14(1): 80-87.
- [48] 杨强,潘元伟,程立,等. 高拱坝谷幅变形机制及非饱和裂隙岩体有效应力原理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(11): 2258-2269.
- [49] 国家能源局. 混凝土坝温度控制设计规范: NB/T 35092—2017 [S],北京:中国电力出版社,2017.
- [50] 任青文,钱向东,赵引,等. 高拱坝沿建基面抗滑稳定性的分析方法研究[J]. 水利学报,2002,33(2): 1-7.
- [51] 周维垣. 岩体工程结构的稳定性[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2010, 29(9): 1729-1753.
- [52] SHI G H, GOODMAN R E. A new concept for support of underground and surface excavations in discontinuous rocks based on a keystone principle [C]// Massachusetts Institute of Technology. Proc. 22nd U. S. Symposium on Rock Mechanics, Cambridge, 1981: 290-296.
- [53] GOODMAN R E, SHI G H. Block Theory and Its Application to Rock Engineering [M]. PRENTICE-HALL, INC, 1985.
- [54] 林鹏, 王仁坤, 康绳祖, 等. 特高拱坝基础破坏、加固与稳定关键问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 1945-1958.
- [55] 张林, 范景伟, 何江达, 等. 拱坝坝肩含断续节理岩体破坏机理研究[J]. 工程科学与技术, 2000, 32(1): 7-11.
- [56] 杨宝全, 张林, 徐进, 等. 高拱坝坝肩软岩及结构面强度参数水岩耦合弱化效应试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(2): 21-27.
- [57] 朱伯芳, 张超然. 高拱坝结构安全关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [58] 沈兴正. 李家峡水电站拱坝静、动力计算分析研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [59] 刘杰, 李建林, 张玉灯, 等. 基于拟静力法的大岗山坝边坡地震工况稳定性分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2009, 28(8): 1562-1570.
- [60] 国家能源局. 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB 35047—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [61] 李德玉, 廖建新, 涂劲等. 高拱坝抗震安全研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(8): 77-83.
- [62] 黄熠辉, 徐建军, 殷亮, 等. 基于新抗震规范的杨房沟高拱坝抗震安全分析与评价[J]. 水力发电, 2019, 45(4): 52-55.
- [63] 陈林, 潘燕芳, 刘小强. 叶巴滩高拱坝抗震安全分析与评价[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(6): 1667-1675.
- [64] 杜小凯, 孙保平, 黎满林, 等. 特高拱坝典型工程抗震设计关键技术问题对比及总结[J]. 水力发电, 2018, 44(12): 43-47.
- [65] ZHANG Chuhan, JIN Feng, WANG Jinting, etc. Nonlinear Behavior and Seismic Safety Evaluation of Concrete Dams [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [66] 张翠然, 陈厚群, 李敏. 采用随机有限断层法生成最大可信地震[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 721-728.
- [67] 张翠然, 俞言祥, 陈厚群, 等. 基于汶川和芦山地震的沙牌坝址地震动输入研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 210-215.
- [68] 张楚汉, 金峰, 王进廷, 等. 高混凝土坝抗震安全评价的关键问题与研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 253-264.
- [69] 贺春晖, 王进廷, 张楚汉. 基于震源-河谷波场数值模拟的坝址地震动参数确定方法[J]. 地球物理学报, 2017, 60(2): 585-592.
- [70] 林皋, 胡志强, 陈健云. 考虑横缝影响的拱坝动力分析[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(6): 45-52.
- [71] 涂劲, 陈厚群, 杜修力. 高拱坝非线性地震反应分析中横缝模拟方案研究[J]. 水力发电学报, 2001, 20(2): 18-25.
- [72] 张楚汉, 金峰, 王进廷, 等. 高混凝土坝抗震安全评价的关键问题与研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 253-264.
- [73] 赵兰浩, 李同春, 牛志伟. 有横缝高拱坝非线性地震响应接触模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 91-95.
- [74] 郭胜山, 陈厚群, 李德玉, 等. 重力坝与坝基体系地震损伤破坏分析[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1352-1358.
- [75] 朱伯芳. 混凝土坝计算技术与安全评估展望[J]. 水利水电技术, 2006, 37(10): 24-28.

(责任编辑 陈小敏)