

关于高拱坝建设中若干问题的探讨

Some Problems on the Construction of High Arch Dams

潘家铮

(电力工业部,中国工程院院士 北京 100031)

陈式慧

(国家自然科学基金委员会 北京 100083)

我国水力资源十分丰富,理论蕴藏量约 6.8 亿 kw,其中可开发蕴藏量约 3.7 亿 kw,居世界首位。但现开发程度仅为 10%左右,近期规划开发的水电工程,大多位于西南、西北地区的大江大河的中上游河段。建国以来,我国的拱坝建设有了巨大的发展,拱坝在世界上可能是最多的。80 年代以来,更向 200 米以上的高拱坝进军。与此相应,有关技术如拱坝应力变形计算,拱坝稳定分析,拱坝动力分析和抗震,拱坝温控、灌浆和地基处理,拱坝优化、水力学和泄洪消能,碾压混凝土拱坝,拱坝施工技术,拱坝模型试验等,都取得了长足进步。

由于我国水利水电事业发展的需要,我国还要修建大量拱坝乃至极高的拱坝,如澜沧江的小湾水电站,拱坝坝高 292m,装机容量 420 万 kw,泄洪功率 4 600 万 kw,坝址基本烈度为 8 度,而且有大规模的地下厂房及洞室群;又如金沙江的溪落渡水电站,拱坝坝高 295m,装机容量 1 440 万 kw,泄洪功率近 1 亿 kw,坝址基本烈度为 8 度,其难度又比小湾水电站上了一个台阶。这些工程比世界最高的英古里拱坝(坝高 272m)更高,工程规模更大,泄洪功率也比世界最高水平高出 2~3 倍,而且处于强地震区,其技术难度居于世界前列。其他还有金沙江的白鹤滩、洪门口,澜沧江的糯扎渡等拱坝,坝高都在 300m 左右,也都是现行规范覆盖不了的特高拱坝。另外,还有拉西瓦、构皮滩等也都是 200 米以上的高拱坝。下面,就高拱坝建设中的几个问题谈谈我们的粗浅认识。

对 200 米以上的高拱坝为什么要做专门研究

建国以来修建了大量拱坝,凡是按规范正规设计施工的拱坝都能安全运行,说明我们已掌握一般拱坝的技术。80 年代开始,已在修建 240 米高的二滩拱坝,并正在向 300 米级的高拱坝攻关。那么,我们现在所掌握的技术是否已满足高拱坝的设计要

求?100 米、200 米、300 米高的拱坝在本质上有什么区别,这是个值得探讨的问题。

国际上有些坝工专家认为,超过 200 米的拱坝和百来米高的拱坝有本质的不同,并主张在二滩这类拱坝上,不允许出现拉应力(这实际上是做不到的),我们认为这是有一定道理的。200 米以上的高拱坝与较低的拱坝的本质区别在于:低拱坝总体应力水平较低,应力,特别是压应力的安全储备较大;高拱坝总体应力水平高,压应力的储备较小。一旦拱坝产生局部开裂,应力重分布,低拱坝的调整余地较大,因此,整个坝体仍是安全的;而对于高拱坝,就很可能造成应力普遍超限,从而导致坝体的破坏。另外,高拱坝在温度应力、地震作用以及泄洪消能方面都有高拱坝的特殊问题,如果解决不好,都会造成致命的破坏。

辩证地看待周边缝

拱坝设计中最使人担心的是过分集中的拉应力,尤其在临水面。因为混凝土的抗拉强度不仅低而且不稳定、变异大。但拉应力是避免不了的,特别在几何体型不连续处,拉应力有尖锐的集中,所以有些国家采取周边缝方案,把坝和基础切开,消除奇点和拉应力。总的思路是沿周边缝解放拉应力。

我们认为,设置周边缝的影响是双面性的,有得有失。留缝后消除了缝面上的拉应力,是最大的‘得’;而‘失’的方面,是人为地削弱了拱坝的整体性和刚度,降低了拱坝的超静定度和应力调整的潜力。周边缝是坝体结构体系中强度最低的部位,抗拉强度接近于零,抗剪强度也极大地削弱了,只能承受与缝面正交或接近正交的力。如果这种反力分布不能与外载平衡,坝体就要失稳,或者虽能平衡但安全度会降得很低。因此,不能简单地肯定或否定周边缝,尤其对于高拱坝,必须认真进行具体分析,才能得出正确结论。也可以采取“中间路线”的

做法,即采用局部的人工缝,既消除了拉应力,又不太削弱拱坝的整体性。南非在莱索托建的KATZ拱坝,人工缝设计得十分细致复杂,这一经验值得借鉴。我们认为,“中间路线”值得作进一步深入研究。

拱坝优化的新思路

拱坝优化是个高难度课题,只有在计算机和计算技术高度发展后才能实现。可喜的是,我国的拱坝优化技术已经取得了突破性的进展,进入了实用阶段,在国际上处于领先地位。拱坝优化是在满足某些约束条件下使某一目标函数取极值。对于拱坝来讲,所谓约束条件主要是保证坝的安全,而目标函数则是坝的体积最小或造价最低。因此,拱坝优化的基本思路就是在保证坝体安全的条件下使坝的体积(或造价)取极小值。在进行高拱坝设计时,对其优化问题宜进行更多的思考。首先,约束条件和目标函数的表述有本质上的区别,这两类要求是两套系统,前者是模糊的(例如将拱坝上允许出现的最大拉应力减小或增大 0.1Pa ,究竟对坝体安全度起多大的影响是说不清的);后者(体积或造价)则有十分明确的概念的确定值。其次,在目标函数取极值点的附近区域,“坡度”是平缓的。即偏离理论最优点一定距离,对目标函数的影响不大,对整个工程来讲,甚至是无足轻重的。那么,我们何不增加一点工程量或造价,而让安全度有所提高呢?即何不牺牲一点目标函数(不取极值)而使安全性有相当的提高呢?近来,不少专家倾向于把拱坝优化的问题倒过来提,即在混凝土量不超过某一限制条件下,使坝体具有最高的安全度(这里的混凝土量的限值可以经过初步的常规优化来拟订)。这一思路容易为高拱坝的设计者特别是业主单位所接受,但这种优化的难度比常规优化更高,原因就在于坝体的“安全度”以什么函数来表示。是单纯的最大应力,还是综合的可靠度指标,还是另外的什么特征。对于不同体型和地质、地形条件的拱坝,其破坏机理是不同的,如何选择合理的安全指标,是一个需要做深入研究的课题。总之,在高拱坝建设上,安全与造价两者之间相比,安全更为重要。只要混凝土量不超过某一数量,并且安全性较高,就是较好的方案。

拱坝的动力分析

我国许多高拱坝要修建在强震区,地震作用及抗震设计成为高拱坝研究的重要问题。

大坝的动力分析的发展,大体上经历三个阶段:第一阶段是把地震活动对坝体的影响简单转化为静力表示,按静力分析来进行设计(拟静力法);

第二阶段以动力分析作为设计计算手段,在频域上或时域上作分析,但所考虑的条件比较简单,例如不计地基、水与坝体的耦合作用,不考虑材料的非线性影响等;第三阶段是在动力分析中考虑更多的耦合影响、非线性影响、地基的无限大影响和地震动的合理输入问题等等。

今后在高拱坝抗震研究中除了继续进行理论上的探索(如地震动的合理输入模式;地震活动的随机性和不可重复性;如何评价地震的危害性等)外,还要研究如何将理论成果进行归纳总结,逐步推广应用到设计实践中去,研究缝(包括周边缝、裂缝、施工缝)对抗震性能的影响,研究如何采取主动措施减震防震,逐步由被动核算走向主动控制。

拱坝的“上滑失稳”

对于是否需要核算各坝块沿建基面的稳定性,一直存在两种不同的见解:一种认为,拱坝与重力坝无论是结构型式还是受力条件都完全不同,只要拱坝两岸坝肩基岩不破坏,个别坝块不可能滑动失稳;另一种认为,拱坝沿建基面滑动失稳是可能的,应该验算在水压作用下整个拱坝向下游并沿着岸坡上爬(有人称之为“上滑失稳”)的可能性,这两种意见尚未统一,我们仅谈一点粗浅的认识:

1. 建基面是拱坝结构系统中的一个薄弱面,沿薄弱面进行稳定核算总是有益的,不应反对。但是,拱坝是个空间整体结构,要核算其沿建基面失稳的安全度非常复杂,究竟用什么方法进行验算才更符合实际,是必须深入研究的问题,否则,会给出错误的概念或结论,对决策不利。

2. 对于河谷较宽、曲率半径较大、岸坡较平缓、建基面上的抗剪强度特低或有平行于建基面的连续断裂,以及建基面平滑顺直的拱坝,应对拱坝沿建基面失稳问题进行深入的研究。

3. 要进行深入的研究,就必须弄清这种失稳的机理和发展过程。具体讲,拱坝受载后,在建基面上各点都产生了剪应力,如荷载不断增加(或强度不断降低),有一些点进入屈服状态,产生应力重分布。这些屈服区逐渐发展,连成片,坝体应力分布及工作条件不断恶化,最终导致失稳。失稳时,坝体也将被撕裂成块,不可能是“整体滑动”。所以,“滑动核算”和“应力核算”是分不开的。要真正弄清问题,只能通过仿真的有限元非线性分析,一步步追踪在荷载增大过程中坝体的反应过程,直到坝体破坏。这也是对拱坝最终承载力的研究。条件不同的拱坝其破坏机理和发展过程也不一致。有的从坝体断裂开始,发展为全面破坏;有的从坝肩基岩大变形开始导致破坏;也有的可能从建基面上屈服开始发展成坝体应力的恶化而破坏。我们应针对不同情况,

用不同的方法分别研究它们的破坏机理和破坏轨迹,这里有很多基础性问题值得深入进行研究。

拱坝的模型试验

用结构模型试验来指导拱坝设计,是常用的有效方法。在早期,外国有些拱坝主要依靠模型试验来设计,现在虽然设计和计算技术发展了,但对一些重要工程仍常用模型试验来验证,而且给人以拱坝变形和破坏机理的直观印象。试验技术也有很大的提高,如能在地基内反映一些大的构造面和主要地质条件、寻找更合适的模型材料。测试仪器和分析手段也日益进步和自动化。

但在高拱坝的模型试验中,要使得成果能反映真实情况,就必须考虑各种非线性影响,而这一点是很难实现的。如果拱坝较低,坝体和地基内的应力水平也很低,基本上在弹性范围内,试验就比较方便。但即使对这种情况,如果要做破坏试验,也存在着相似的问题。对于高拱坝,非线性的影响就更为重要,要找到完全符合相似率的模型试验材料是相当困难的,这也是阻碍结构模型试验向前发展的最大障碍。另外,对破坏试验的一些做法,很多专家

也提出了异议,因为水压荷载根本不可能无限提高,材料强度也不可能无限降低,因此这样的超载试验能否给出定性的结论都是值得怀疑的。今后除应继续提高模型试验技术外,利用计算机仿真计算,从可靠度的概念出发,去追踪坝体和地基的破坏轨迹,可能更能说明问题。

关于碾压混凝土拱坝

将碾压混凝土技术用于拱坝建设,可以简化施工、缩短工期。我国已建成 75 米高的普定碾压混凝土拱坝,正在兴建 135 米高的沙牌碾压混凝土拱坝,在这方面的发展是领先的。

但常规的拱坝施工方式(分块浇筑、冷却灌浆,然后蓄水)虽不一定是最优模式,却有它理论上的合理性和成熟的经验。采用碾压混凝土技术后,取消或减少了横缝,实行大面积连续浇筑,在坝体尚未降温时蓄水。如何解决后期的应力变化防止开裂,尚须采取有效对策,作进一步的研究。采取综合措施后,才能推广到高拱坝上去。采用重复灌浆技术或补偿混凝土,可能是合适的措施。

(责任编辑 刘先曙)

(上接第 11 页)

出现新的核,新的核继续长大成岛。当岛在基片上不断扩大时,岛则会相互联系起来,构成岛的通道。当原子继续蒸发,通道的横向也会连续起来,成为连续的薄膜。这种薄膜表面起伏较大,表面粗糙。二是层状生长。当分子覆盖度 θ 小于 1 时,在基片上生成一些分立的单分子层组成的临界核,继续沉积时,就会形成一连续的单分子层,然后在第一层分子层上再生长单分子层的粒子。当覆盖度 θ 大于 2 时,形成两个分子层,并在连续层上再出现分立的单分子层的粒子。继续沉积,将一层一层地生长下去,形成一定厚度的连续薄膜。这种薄膜表面非常光滑,但是只有分子束外延方法才能实现这种生长模式。三是层状加岛状生长。随原子沉积量的增加既有单分子层形成,在连续层上又有岛的生长。

研究薄膜形成过程,用原子力显微镜观察最方便,因薄膜在不同阶段沉积后,样品可不作任何处理便可直接观察。虽然原子力显微镜的分辨率相当高,但仍然看不到临界核,所看到的是临界核生长长大后的粒子或岛。其过程为:岛长大、接合;出现米津结构;随原子沉积增加,通道加宽、空洞减少;形成连续的薄膜。这是普通薄膜形成的过程。

五、薄膜的应用

薄膜无论在工业、农业和人们的日常生活中都

有广泛的应用,下面仅介绍几种工业上的应用。

光学薄膜是被人们最早深入研究的薄膜,随着光学透镜的发展,各种增透膜、减反射膜和滤光膜等被精确地制备出来,进入 70 年代以后,透光材料在建筑方面被广泛应用。电子学的发展促进了新材料和新器件的发展,而薄膜材料是器件的基础。大规模集成电路需要各种薄膜材料,上面已提到的半导体材料,如 Si、Ge、GaAs 等。现在处于研究热门的金刚石薄膜,与 Si、GaAs 相比有较宽的禁带宽度,并且在制备过程中可以掺杂,从而提高了室温热导率,是大规模集成电路理想的导热材料,有可能成为继 Ge、Si、GaAs 以后的新一代半导体材料。

磁性薄膜应用在计算机外存设备的磁带和磁盘上,就是利用在带基和盘基上沉积磁性薄膜来记录信息。在磁记录技术上,目前认为薄膜磁头和记录薄膜是最佳配合,这就是所谓的双膜技术。

高温超导薄膜方面,目前研究得较多的是高温超导微波无源器件,如谐振器、滤波器和延迟线等。由超导薄膜制备的红外探测器也在加紧研究。因它的灵敏度高,而且毒性较小,可用于医院探测人体的肿瘤位置。Y-Ba-Cu-O 薄膜已经用于 Josephson 器件及 SQUID,这是高温超导发现以来应用得最早的薄膜材料。

(责任编辑 肖庆山)