

周边缝、底缝拱坝分析研究综述*

⑥
31-33

杜成斌 任青文 王超

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

TV131.61

TV642.4

摘要 综述了国内外周边缝、底缝拱坝的研究,从一些常规高拱坝的裂缝形式论证了设缝的必要性.对缝的结构型式、形状和接缝模拟的数值方法进行了讨论比较.指出分析研究周边缝、底缝拱坝应首先解决缝单元的形式、本构关系及高效求解方法,研究中应考虑施工期的温度应力等.同时,需对设缝以后拱坝的工作机理和失效机理进行研究,在此基础上,对其安全度需给以合理评估.

关键词 周边缝拱坝;底缝拱坝;裂缝;模型试验;数值分析 杜成斌

拱坝的模型试验^[1]和数值分析^[2]均表明,在坝内垂直方向存在两个拉应力区,即坝的中上部下游侧和坝踵上游侧,尤其是后者数值较大,有可能引起开裂,对于河谷相对较宽的特高拱坝就更为严重^[3].如何降低坝踵附近的过大拉应力,至今坝工界仍有不同的观点,一种认为可采取局部加大拱端和梁底厚度的办法,同时严格控制施工温度^[4].这种方法具有可降低坝底的切应力和主拉应力,施工简单等优点,但缺点是无法为可能产生的裂缝设置止水.另一种认为坝踵附近的过大拉应力是由于坝体受地基固端的约束引起的,只要放松地基的约束,拉应力即可消除.在坝体与地基接触的周边和底部设置预留缝^[5],在正常使用时,这些部位允许其开裂,并采取有效的止水措施,以达到“以缝治缝”的目的.

1 一些常规高拱坝的裂缝形式

瑞士的佐伊齐尔(Zeuier)双曲拱坝,高156m,建于1954~1957年,正常运行21年后,因地基大范围沉陷而导致河谷宽度缩短71mm,坝顶拱冠向上游位移115mm,坝顶沉陷125mm,横缝上游侧张开,坝体严重开裂呈周边缝形式^[6],被迫用了6年进行修补,主要进行环氧灌浆.

奥地利的科恩布赖拱坝,首次蓄水即在上游坝踵出现长160m的水平裂缝.当初奥地利工程师顾虑周边缝(底缝)拱坝会增加造价,结果该坝加固费用相当于再造一座拱坝.

奥地利的席勒格伦德拱坝,因地基有塑性变形,蓄水接近满库时,河床内一个坝段的上游坝踵出现

水平裂缝而发生开裂漏水.

瑞士的圣地·玛利亚拱坝,因地基软弱和岩性不均,引起上游坝基面下浅层岩石内裂隙张开漏水.

以上例子表明,坝踵附近是最易开裂的部位,若未采取有效措施,一旦发生裂缝,会给拱坝正常使用和修复带来较大的困难.由于裂缝呈周边缝或底缝的形状,使人们自然而然地考虑到是否可预先设置周边缝或底缝,以降低甚至消除坝踵的较大拉应力.

2 周边缝、底缝拱坝的工程应用实例

2.1 工程应用

最早开始在拱坝设计中采用周边缝形式的是意大利1939年建成的奥雪兰塔拱坝(Osigeietra)^[1],坝高76.0m.以后各国相继建成一批周边缝拱坝,其中最有代表性的是意大利瓦依昂(Vaiont)拱坝(高261.6m),格鲁吉亚的英古里(Inguri)拱坝(坝高271.5m),以及正在施工的瑞士Katze拱坝(坝高185m).这些拱坝大多已安全运行多年,有的还经历了地震作用和其它超载作用,如瓦依昂拱坝在左岸山体滑坡动力荷载作用下(据分析约相当于设计荷载的8倍),坝体仍屹立不动,仅在左岸坝肩顶部有一段长9m,深1.5m的混凝土略有损坏.这表明周边缝拱坝仍有很高的强度储备和动力作用的较强适用性.这些成功的工程实例对我国在强震区、地质条件复杂的西南地区兴建一批300m级的高拱坝具有较好的借鉴作用.

我国在70~80年代也兴建了一批中小型的周边缝、底缝拱坝,如1976年浙江天台光明双曲底缝

第一作者简介:杜成斌,男,博士,副教授,从事水工结构工程的力学问题研究.

*国家自然科学基金重点项目(59739180)和国家“九五”科技攻关资助项目(96-221-04-02-04(1)).

拱坝(坝高 20.0 m), 1981 年 10 月建成的位于内蒙古自治区赤峰市境内的响水底缝拱坝(坝高 20.0 m), 1974 年我国台湾修建了高 181 m 的德基底缝拱坝, 1981 年建成的浙江马头岭周边缝拱坝, 贵州小沟周边缝拱坝等。

2.2 周边缝、底缝的结构型式

至今为止, 已建成的周边缝拱坝的缝面大都采用圆弧形绞缝的形式, 周边缝使垫座表面为拱坝坝体提供了一种虚假的滚动形式^①, 图 1(a)给出了它的示意图。

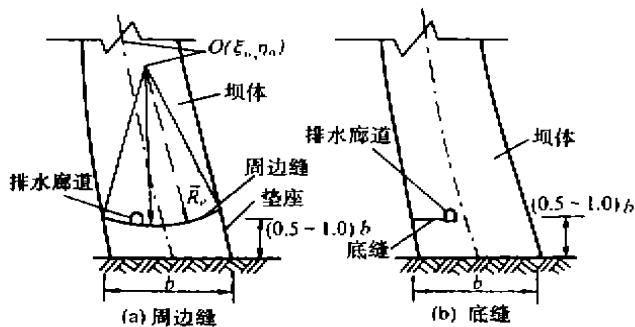


图 1 周边缝、底缝示意图

图中的半径 r 和圆心 $O(\xi_0, \eta_0)$ 根据下列条件确定: ①在计算断面内周边缝和上、下游面正交; ②计算断面内内力的投影 $\bar{R}_p$ 通过圆心, 这可以根据静力分析确定。垫座高度大致为缝面处坝厚的 0.5 ~ 1.0 倍。

这种形式的已建周边缝拱坝有格鲁吉亚的英古里拱坝、意大利的瓦依昂拱坝等。周边缝也有采用平缝的形式, 一般在河床水平段采取设平缝形式, 如希腊拟建的斯旦诺(Sten)拱坝。

相对而言, 底缝形式大多为平缝形式。大部分均将缝设于靠近上游的部分截面(见图 1(b)), 也有全截面贯通的底缝。底缝一般设置于建基面以上一定高度处, 约为缝处坝厚的 0.5 ~ 1.0 倍, 如瑞士 1968 年修

建的 Hongrin 底缝拱坝, 南非 1972 年修建的 Verwoerd 底缝拱坝。但也有将底缝直接建在建基面处的, 如奥地利 1987 年修建的 Zillergründl 拱坝^[5], 见图 2。

3 周边缝、底缝拱坝的试验研究和数值分析

3.1 周边缝、底缝拱坝的试验研究

首次对周边缝拱坝进行的模型试验是意大利工程师在奥兰塔拱坝进行的; 之后, 结合瓦依昂拱坝进行了 1:35 模型试验。最近, 瑞士和葡萄牙坝工专家曾为希腊一座拟修筑在活断层上的斯旦诺(Sten)周边缝拱坝做过模型试验。我国学者也曾对贵州小沟周边缝拱坝^[7]、浙江光明双曲拱坝等进行过模型试验^②。与此同时, 世界各国还修建了一些试验坝对此种坝型进行研究, 如意大利在修建 200 m 以上周边缝高拱坝时, 已积累了一大批中小型周边缝拱坝的设计、施工经验。我国在 70 ~ 80 年代也修建了一批试验拱坝, 如浙江马头岭周边缝拱坝, 贵州小沟周边缝拱坝、福建梅花周边缝拱坝等, 为加深人们对此种坝型的认识, 提供实践经验作出了贡献。

3.2 周边缝、底缝拱坝的数值分析

结合模型试验, 人们提出了多种模拟缝面的数值方法。归纳起来有薄层单元法、缝面单元法和边界元法三种。

所谓薄层单元法, 就是在缝的两侧设置薄层单元, 单元呈各向异性, 一般情况下单元局部坐标系有一轴指向单元的长边, 该单元只能承受压应力而不能承受拉应力。俄罗斯专家曾用薄层单元对英古里拱坝和我国的小湾拱坝进行过三维非线性弹性分析, 任青文等也曾用弹塑性薄层单元对小湾拱坝的周边缝和横缝进行过分析^③。这种单元形式的优点是不需引进特殊单元, 单元劲度、应力和应变矩阵形成同常规单元。通过改变单元参数来调整缝的范围,

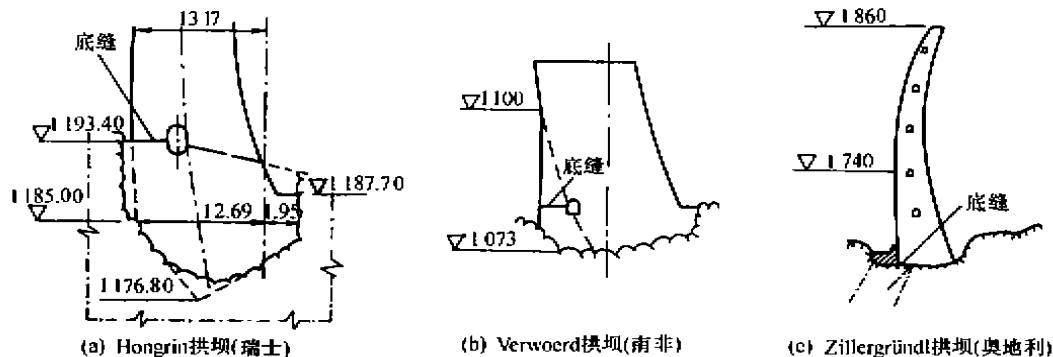


图 2 底缝拱坝的结构型式(单位: m)

①莫斯科水工设计院, 小湾拱坝分析研究报告, 1995。

②浙江省水利科学研究所, 天台光明双曲拱坝模型试验, 1977。

③任青文等, 小湾拱坝周边缝和横缝的非线性分析, 见: 高拱坝学术讨论会论文集, 北京, 1996。

对于拱坝系统的网格剖分及缝的变化较为方便.该单元的不足是一般缝厚只有几毫米,扁平单元的形态会影响结构分析的精度,况且至今为止,还没有考虑滑移非线性和缝的塑性变形等.

相对而言,用缝面单元法模拟各种缝应用较广.缝面单元是一种无厚度的特殊联结单元.O'Connor曾用不抗拉缝面单元对周边缝拱坝进行过数值分析^[8],Fennves^[9]和笔者^[10]曾用此种模型对拱坝的横缝进行了研究,Bolognini^[11]也曾用此种模型对 Ambiesta 拱坝的横缝非线性地震响应进行过研究,研究中考虑了缝的滑移非线性和塑性变形影响等.这种单元优点明显,但存在的问题是缝的参数确定较为困难,缺少相关试验,计算过程中会发生相互侵入现象.近来,国内外已有许多研究者开始对缝面的本构关系进行研究,提出了不少非线性弹塑性的本构模型^[12].

边界元法是 70 年代中期在积分方程基础上借鉴有限元的离散技术提出的数值解法,相对于有限元法,这种方法对缝的模拟所做的工作较少.但由于其只对区域的边界以及塑性区划分单元,使所研究的问题的维数降低,从而大大减少代数方程的数目及原始数据的准备工作量,这对于提高计算效率及精度是十分有益的,将其与有限元杂交或许是一种极有前途的方法.

4 分析研究周边缝、底缝拱坝需要解决的关键问题

对周边缝、底缝拱坝这种结构型式的利与弊,目前学术界和工程界有不同的看法.有部分专家认为由于缝的存在削弱了拱坝的整体性,对拱坝的整体安全度不利,如我国福建梅花周边缝拱坝的失事;另外,有部分专家认为设置底缝的拱坝工作效果并不理想,如我国赤峰市境内的响水拱坝,尽管预设了底缝,但在使用期坝踵附近仍有裂缝出现.但由于周边缝、底缝拱坝可以利用垫座改善坝基不规则或不对称地形,为坝体提供一个连续、平顺、对称的支承面;还可以借助周边缝、底缝的张合消散能量,减少出现拉应力和导致在坝基附近产生不规则裂缝的危险.这些优点对于在复杂地质条件、高烈度地震区修建高拱坝都是很有启迪作用的.为此,对周边缝、底缝拱坝进行系统研究,对安全、经济、合理地设计高拱坝是有重要意义的.分缝拱坝研究需解决以下一些

关键问题:

a. 合适的缝单元和本构关系.高效的非线性求解方法.缝单元不仅能考虑缝的张开非线性,而且还应考虑滑移非线性和缝的塑性变形等.

b. 缝的位置、范围和形状及对拱坝应力应变状态的影响.现已发现缝的位置不同会影响设缝的效果.同时还要选择合适的方法减少分析时网格的剖分工作量,如选用子结构法,固定其出口结点和单元,只改变其内部单元布置.

c. 设缝以后,拱坝的工作机理和失效机理需进一步研究,在此基础上对其安全度需给以合理评估.

d. 研究中还需考虑施工期的温度应力.如何合理、较为准确地反映施工期温度应力对开裂的影响,是十分重要的.

参考文献

- 1 汝乃华.世界拱坝技术史大纲.上海水利水电技术,1996(1):16~33
- 2 许汉铮,杨菊生.混凝土结构三维弹塑性开裂分析.工程力学,1996(增刊):400~404
- 3 李贻.对中国建 200 米以上高拱坝的几点看法.水力发电学报,1993(3):74~84
- 4 朱伯芳.从拱坝的实际裂缝情况来分析边缘缝和底缝的作用.水力发电学报,1997(2):59~66
- 5 Rescher O J. Arch dams with an upstream base joint. International Water Power & Dam Construction, 1993(3):17~25
- 6 Berchtem A R. Repair of the Zeuzier arch dam in Switzerland. In: Pro of the 15th ICLD, Lausanne, Switzerland, 1985. 693~712
- 7 兰振凯,周鸿钧.有缝拱坝的试验分析.实验力学,1989(2):161~167
- 8 O'Connor J P F. The modeling of cracks, potential crack surfaces and construction joints in arch dams by curved surface interface element. In: Pro of the 15th ICOLD. Lausanne, Switzerland, 1985. 389~406
- 9 Fennves G L, Mojtahedi, Reimer R B. Nonlinear earthquake analysis of arch dam-reservoir. In: Tenth Earthquake Engineering World Conference, Madrid, Spain, 1992. 4595~4600
- 10 杜成斌,赵光恒.带横缝拱坝的非线性地震响应.水利学报,1996(5):22~28
- 11 Bolognini L, et al. Arch dams non-linear seismic analysis using a joint finite element. In: Tenth Earthquake Engineering World Conference, Balkema, Rotterdam, 1992. 4705~4710
- 12 Anil Misra, et al. Mechanistic model for contact between rough surfaces. JEM, 1997, 123(5):475~484

(收稿日期:1997-11-25 编辑:张志琴)