

文章编号:0559-9350(2020)10-1307-08

整体浇筑堆石混凝土拱坝拱梁分载法分析研究

金峰¹, 张国新², 娄诗建³, 何涛洪³, 张全意³

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100038;

3. 遵义水利水电勘测设计研究院, 贵州 遵义 563002)

摘要: 贵州省遵义市地处气候温和地区, 为了充分发挥堆石混凝土拱坝的优势, 在取消振捣/碾压和冷却水管温控措施的基础上, 简化坝体构造与施工、加快施工进度, 在保障工程建设质量和安全的前提下, 提出了不分横缝, 整体浇筑的堆石混凝土拱坝。本文针对绿塘、龙洞湾、沙千和风光4座整体浇筑堆石混凝土拱坝, 采用拱梁分载法进行应力分析, 对拱圈封拱温度的选取, 自重荷载处理方式, 坝体与地基材料参数对拱坝应力的影响等开展研究, 对4座拱坝的安全性进行论证, 建议了辅助温控措施, 并提出了整体浇筑堆石混凝土拱坝拱梁分载法应力复核方法及其控制标准: 应根据拱坝实际浇筑温度估算拱坝每个拱圈的计算封拱温度, 参照混凝土拱坝设计对坝体与地基材料参数进行取值, 采用拱梁分载法进行拱坝应力复核, 相应的允许应力标准初步可按照1.5~2.0 MPa控制。本文提出的分析方法除可以应用于整体浇筑堆石混凝土拱坝以外, 对整体浇筑的碾压混凝土拱坝和砌石拱坝也有重要参考价值。

关键词: 堆石混凝土; 拱坝; 拱梁分载法; 整体浇筑**中图分类号:** TV315**文献标识码:** A**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20200301

1 研究背景

拱梁分载法历史悠久, 积累了丰富的经验, 目前仍然是拱坝体型设计和计算分析的主要方法, 也是我国混凝土拱坝、碾压混凝土拱坝及砌石拱坝设计规范推荐的主要方法^[1-3]。传统的拱梁分载法是建立在坝体设置横缝和封拱灌浆条件下的拱坝计算方法, 该方法假定封拱灌浆时拱坝温度应力为零, 封拱灌浆前的自重等荷载由悬臂梁承担, 封拱灌浆以后的荷载, 如水压力、温度荷载等由拱梁共同承担。需要说明的是, 封拱时拱坝温度应力为零的假设对于横缝、纵缝间距较短的传统拱坝是合理的, 而对于不设纵缝、横缝间距较大的现代拱坝而言, 封拱时拱坝坝体残留的温度应力较大, 其影响应予以重视。对于不设横缝、整体浇筑的砌石拱坝和碾压混凝土拱坝, 如何选择合理的封拱温度, 我国各个时期的拱坝设计规范并未提出明确方法, 已有研究成果表明拱圈封拱温度对整体浇筑拱坝的应力有重要影响, 值得高度重视^[4]。

堆石混凝土水化热温升低^[5-7], 抗裂性能好^[8], 环境友好^[9], 已建成了超过70座堆石混凝土大坝, 现有30余座堆石混凝土大坝正在施工。建成的佰佳堆石混凝土拱坝, 坝高69.5 m, 已正常运行4年。众多研究人员针对堆石混凝土坝开展了温度应力仿真分析研究, 证明堆石混凝土坝可以取消或者简化温控措施^[10-12]。贵州省遵义市地处气候温和地区, 为了充分发挥堆石混凝土拱坝的优势, 在取消振捣/碾压和冷却水管温控措施的基础上, 进一步简化坝体构造与施工、加快施工进度, 提出了不分横缝、整体浇筑的堆石混凝土拱坝方案。其中, 绿塘堆石混凝土拱坝坝高53.5 m, 已通过验收,

收稿日期: 2020-05-03; 网络首发时间: 2020-09-18

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200917.0942.001.html>

基金项目: 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室项目(2019-KY-02); 中国电建集团科研项目(DJ-ZDXM-2017-03)

作者简介: 金峰(1966-), 博士, 教授, 主要从事水工结构研究。E-mail: jinfeng@tsinghua.edu.cn

即将蓄水。正在建设的龙洞湾、沙千、风光3座堆石混凝土拱坝也以同样方式建设。在堆石混凝土拱坝工程设计中,设计人员碰到的关键技术问题有:(1)材料参数取值参照混凝土拱坝还是砌石拱坝;(2)整体浇筑拱坝计算时,封拱温度如何选取;(3)堆石混凝土拱坝的应力控制标准如何选取。为解决这些技术问题,本文在绿塘工程实际监测资料分析的基础上,结合绿塘、龙洞湾、沙千和风光堆石混凝土拱坝,采用拱梁分载法进行应力分析,对拱圈封拱温度的选取、自重荷载处理方式、坝体与地基材料参数对拱坝应力的影响等开展研究,以为整体浇筑堆石混凝土拱坝设计提供完整的拱梁分载法应力复核方法及其控制标准^[13]。

2 计算方法

2.1 基本工况 本文分析4个堆石混凝土拱坝基本情况见表1。从表1可知,拱坝的坝高为48~66 m,均属中坝。本文采用拱梁分载法,软件使用浙江大学刘国华教授开发的ADAO拱坝分析软件^[14]。所有温度荷载都采用混凝土拱坝^[1]或砌石拱坝设计规范^[2]规定的温升、温降荷载计算公式,不同温度荷载计算方法不同之处仅为封拱温度的选择。平均气温最高为7月,平均气温最低为1月,分别对应温升和温降荷载。日照影响按2℃考虑,表面水温年变幅按气温年变幅的一半考虑。

在拱坝体型分析时,基本工况有:(1)基本组合1(温降):正常蓄水位与相应下游水位水压力+泥沙压力+自重+扬压力+设计正常温降。(2)基本组合2(温升):设计洪水位与相应下游水位水压力+泥沙压力+自重+扬压力+设计正常温升。(3)特殊组合1(校核):校核洪水位与相应下游水位水压力+泥沙压力+自重+扬压力+设计正常温升。坝体堆石混凝土计算参数为:容重24.5 kN/m³,线膨胀系数为7×10⁻⁶℃⁻¹,泊松比为0.2。

表1 堆石混凝土拱坝基本情况

| 大坝名称 | 大坝类型 | 坝高/m | 顶拱中心角/(°) | 顶拱厚/m | 底厚/m | 计算拱数 |
|------|------|------|-----------|-------|------|------|
| 绿塘 | 单曲 | 53.5 | 90.36 | 6 | 16.0 | 8 |
| 龙洞湾 | 单曲 | 48.0 | 91.00 | 5 | 13.5 | 7 |
| 沙千 | 单曲 | 66.0 | 95.69 | 6 | 23.0 | 8 |
| 风光 | 双曲 | 48.5 | 91.69 | 5 | 12.5 | 11 |

2.2 坝体与坝基弹性参数选择 目前的堆石混凝土拱坝设计主要有两类思路,一类是按照混凝土拱坝设计,另外一类是按照砌石拱坝设计,两种方法在坝体、坝基参数取值以及允许应力方面均存在差异,本文分别采用混凝土拱坝和砌石拱坝的参数取值进行对比计算。

按照砌石拱坝进行计算时,参照砌石拱坝的取值,堆石混凝土坝体弹性模量取7.0 GPa,岩体变形模量参照砌石拱坝取值方法,平均变形模量为4.0~5.0 GPa;按照混凝土拱坝进行计算时,参照混凝土拱坝的取值,考虑徐变效应,将堆石混凝土绿塘拱坝超大试件试验的弹性模量乘以0.6~0.7倍,坝体计算弹性模量值取为20 GPa,岩体变形模量根据各工程的地质试验值,参照混凝土拱坝取值方法,计算地基弹性模量取8.0~11.0 GPa;4个计算案例的坝体弹性模量汇总见表2。从表2可以看到,参照砌石拱坝参数取值,堆石混凝土拱坝与地基弹性模量均明显偏小。

表2 堆石混凝土拱坝参照砌石拱坝或混凝土拱坝参数取值时的弹性模量 (单位:GPa)

| | 绿塘 | | 龙洞湾 | | 沙千 | | 风光 | |
|---------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| | 坝体 | 地基 | 坝体 | 地基 | 坝体 | 地基 | 坝体 | 地基 |
| 砌石拱坝参数 | 7.6 | 4.0 | 7.0 | 4.0 | 6.9 | 4.5 | 6.9 | 5.0 |
| 混凝土拱坝参数 | 20.0 | 10.0 | 20.0 | 10.0 | 20.0 | 8.0 | 20.0 | 11.0 |

2.3 自重荷载处理 整体浇筑拱坝应考虑浇筑过程同步封拱,上部坝体自重将由下部拱坝拱梁分载(自重拱梁分载),其自重应力分布应介于自重仅由悬臂梁承担(分缝自重)和自重一次施加、全部由拱梁分载两种计算方法之间,为此,采用表2中混凝土拱坝计算参数,进行了单独自重荷载作用的主

表3 分缝自重与自重拱梁分载两种方法计算主应力的对比 (单位: MPa, 以压为正)

| 分缝自重(自重全部由悬臂梁承担) | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 高程/m | 左拱端 | | | | 拱冠梁 | | | | 右拱端 | | | |
| | 上游面 | | 下游面 | | 上游面 | | 下游面 | | 上游面 | | 下游面 | |
| | σ_1 | σ_3 |
| 829.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 820.00 | 0.00 | 0.27 | 0.00 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.27 | 0.00 | 0.14 |
| 812.50 | 0.00 | 0.51 | 0.00 | 0.18 | 0.00 | 0.21 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 0.51 | 0.00 | 0.18 |
| 805.00 | 0.00 | 0.74 | 0.00 | 0.19 | 0.00 | 0.44 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.75 | 0.00 | 0.19 |
| 797.50 | 0.00 | 0.98 | 0.00 | 0.19 | 0.00 | 0.67 | 0.00 | 0.23 | 0.00 | 0.98 | 0.00 | 0.19 |
| 790.00 | 0.00 | 1.20 | 0.00 | 0.19 | 0.00 | 0.91 | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 1.20 | 0.00 | 0.19 |
| 782.50 | 0.00 | 1.42 | 0.00 | 0.18 | 0.00 | 1.14 | 0.00 | 0.26 | 0.00 | 1.41 | 0.00 | 0.18 |
| 776.00 | 0.00 | 1.59 | 0.00 | 0.18 | 0.00 | 1.33 | 0.00 | 0.26 | 0.00 | 1.60 | 0.00 | 0.18 |

| 自重拱梁分载(按照拱圈计算上部坝体自重由下部拱坝坝体拱梁分载) | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 高程/m | 左拱端 | | | | 拱冠梁 | | | | 右拱端 | | | |
| | 上游面 | | 下游面 | | 上游面 | | 下游面 | | 上游面 | | 下游面 | |
| | σ_1 | σ_3 |
| 829.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 820.00 | 0.02 | 0.27 | -0.10 | 0.14 | -0.02 | 0.00 | -0.12 | 0.00 | 0.03 | 0.27 | -0.11 | 0.14 |
| 812.50 | 0.03 | 0.50 | -0.14 | 0.21 | -0.12 | 0.23 | -0.14 | 0.12 | 0.03 | 0.49 | -0.15 | 0.22 |
| 805.00 | 0.05 | 0.69 | -0.17 | 0.28 | -0.13 | 0.45 | -0.05 | 0.17 | 0.02 | 0.66 | -0.10 | 0.30 |
| 797.50 | 0.07 | 0.86 | -0.17 | 0.37 | -0.12 | 0.65 | -0.01 | 0.23 | 0.08 | 0.82 | -0.18 | 0.31 |
| 790.00 | 0.07 | 1.00 | -0.12 | 0.46 | -0.09 | 0.84 | 0.05 | 0.28 | 0.04 | 1.01 | -0.12 | 0.41 |
| 782.50 | 0.07 | 1.13 | -0.04 | 0.55 | -0.02 | 1.02 | 0.10 | 0.34 | 0.06 | 1.13 | -0.03 | 0.51 |
| 776.00 | 0.03 | 1.23 | 0.03 | 0.58 | 0.03 | 1.17 | 0.03 | 0.38 | 0.03 | 1.19 | 0.03 | 0.53 |

应力对比分析, 见表3。从表3可以看到, 上部坝体的自重应力几乎相同, 考虑自重拱梁分载以后, 底部坝体的压应力有所减少, 最多减少0.4 MPa, 拉应力略有增加。对于中低拱坝, 简化采用分缝自重计算, 其精度可以接受。

2.4 封拱温度选择 传统混凝土拱坝采用柱状法施工, 设有横缝和冷却水管, 可以按照设计要求在给定封拱温度进行封拱灌浆。因此, 在拱梁分载法计算时, 拱坝温度荷载可以从封拱温度起算, 假定封拱时, 大坝温度应力为零。对于整体浇筑而不设横缝的拱坝, 坝体混凝土由于水泥水化作用, 早期温度上升, 后期温度下降。为了估计合理的封拱温度, 假设从堆石混凝土入仓到最高温升的上升期混凝土平均弹性模量为 E_1 , 从最高温升下降到计算封拱灌浆温度的下降期混凝土平均弹性模量为 E_2 。以大体积混凝土达到计算封拱温度时的温度应力为零为条件, 可以推导得到计算封拱温度 T_a , T_a 按下式计算:

$$T_a = T_p + \left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right) \Delta T \quad (1)$$

式中: T_p 为堆石混凝土入仓温度; ΔT 为堆石混凝土水化热温升。

考虑到堆石混凝土含有55%左右的大块石, 前期弹性模量偏高, 当 $E_1 = \frac{2}{3}E_2$ 或者 $E_1 = \frac{3}{4}E_2$ 时, 拱圈的计算封拱温度等于堆石混凝土入仓温度与1/3或1/4堆石混凝土水化热温升之和。根据绿塘拱坝实际施工期温度监测成果^[15], 堆石入仓温度与平均气温接近, 考虑到堆石与高自密实性能混凝土比热差异和堆石率大于50%, 堆石混凝土入仓温度可取平均气温与高自密实性能混凝土入仓温度的平均值。

采用式(1)计算封拱温度, 进行拱梁分载法计算, 计入了部分施工期温度应力, 与传统拱梁分载法稳定温度场附近封拱且封拱时温度应力为零的假设相比, 计算应力会明显偏大, 仍然采用现有设

计规范的允许拉应力标准将过于保守，本文将根据计算成果建议相应的允许应力标准。需要说明的是，本文建议的方法是在拱坝已满足现有设计规范要求基础上增加的复核计算，采用本文方法复核的堆石混凝土拱坝实际上提高了拱坝安全裕度。

绿塘拱坝已经实际浇筑完成，按照上述假设确定的各拱圈计算封拱温度见表4。为了研究采用适当措施降低混凝土入仓温度的效果，表4还给出了考虑降低混凝土入仓温度后，将拱圈封拱温度取为与拱圈浇筑时月平均气温接近，称为月均封拱温度。

表4 绿塘拱坝拱圈浇筑时段及计算封拱温度

| 浇筑高程/m | 777~782.5 | 782.5~790 | 790~797.5 | 797.5~805 | 805~812.5 | 812.5~820 | 820~829.5 |
|----------|--------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 实际浇筑时段 | 2017.12.21 —2018.3.12 | 2018.3.16 —2018.4.10 | 2018.4.13 —2018.5.5 | 2018.5.10 —2018.7.1 | 2018.7.11 —2018.8.9 | 2018.8.16— 2018.10.3 | 2018.10.5— 2018.11.28 |
| 平均气温/℃ | 5.9 | 15.6 | 18.2 | 21.8 | 27.2 | 23.3 | 16.2 |
| 计算封拱温度/℃ | 15.0 | 19.0 | 22.0 | 26.0 | 30.0 | 27.0 | 18.0 |
| 月均封拱温度/℃ | 6.0 | 16.0 | 18.5 | 22.0 | 27.5 | 23.5 | 16.5 |

另外3座拱坝还在浇筑或即将浇筑堆石混凝土，考虑到这几座大坝气候条件相近，采用了类似的计算方法，计算封拱温度见表5—表7。

表5 龙洞湾拱坝拱圈预计浇筑时段及计算封拱温度

| 浇筑高程/m | 870~878 | 878~885 | 885~892 | 892~899 | 899~906 | 906~913 | 913~916 |
|----------|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 设计浇筑时段 | 2019.4.20— 2019.6.30 | 2019.7.5— 2019.8.30 | 2019.9.5— 2019.11.5 | 2019.11.10 —2020.1.10 | 2020.2.25— 2020.4.10 | 2020.4.15— 2020.6.10 | 2020.6.15— 2020.7.15 |
| 平均气温/℃ | 20.50 | 25.78 | 18.08 | 7.82 | 11.01 | 19.23 | 24.40 |
| 计算封拱温度/℃ | 24.0 | 29.0 | 21.5 | 16.0 | 17.0 | 23.0 | 28.0 |
| 月均封拱温度/℃ | 21.0 | 26.0 | 18.5 | 8.0 | 11.0 | 19.5 | 25.0 |

表6 沙千拱坝拱圈预计浇筑时段及计算封拱温度

| 浇筑高程/m | 392~400 | 400~410 | 410~420 | 420~430 | 430~440 | 440~452 | 452~458 |
|----------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 设计浇筑时段 | 2021.1.1— 2021.2.28 | 2021.3.1— 2021.5.10 | 2021.5.10— 2021.7.15 | 2021.7.15— 2021.9.20 | 2021.9.20— 2021.11.20 | 2021.11.20 —2022.2.15 | 2022.2.15— 2022.3.30 |
| 平均气温/℃ | 8.91 | 16.96 | 24.34 | 25.95 | 17.65 | 9.45 | 12.47 |
| 计算封拱温度/℃ | 14.91 | 21.46 | 28.84 | 30.45 | 22.15 | 15.45 | 17.47 |
| 月均封拱温度/℃ | 12.9 | 17.0 | 24.4 | 26.0 | 17.7 | 11.5 | 12.5 |

表7 风光拱坝拱圈预计浇筑时段及计算封拱温度

| 浇筑高程/m | 642.50 ~647.35 | 647.35~ 652.20 | 652.20~ 657.05 | 657.05~ 661.90 | 661.90~ 666.75 | 666.75~ 671.60 | 671.60~ 676.45 | 676.45~ 681.30 | 681.30~ 686.15 | 686.15~ 691.00 |
|----------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 设计浇筑时段 | 2020.4. 10—5.1 | 2020.5.1— 5.22 | 2020.5.22 —6.11 | 2020.6.11 —6.30 | 2020.6.30 —7.21 | 2020.7.21 —8.10 | 2020.8.10 —9.1 | 2020.9.1 —9.22 | 2020.9. 22—10.10 | 2020.10. 10—11.1 |
| 平均气温/℃ | 16.4 | 20.5 | 23.4 | 23.4 | 26.2 | 26.2 | 25.9 | 22.3 | 16.8 | 16.8 |
| 计算封拱温度/℃ | 23.4 | 24.0 | 26.9 | 26.9 | 29.7 | 29.7 | 29.4 | 25.8 | 20.3 | 20.3 |
| 月均封拱温度/℃ | 16.5 | 20.5 | 23.5 | 23.5 | 26.5 | 26.5 | 26.0 | 22.5 | 17.0 | 17.0 |

3 主要计算成果分析

3.1 不同弹性模量取值方法对比 考虑到实际堆石混凝土拱坝设计中，部分拱坝参考砌石拱坝进行设计，分别采用表2中砌石拱坝和混凝土拱坝参数取值进行了对比计算，表8给出了绿塘拱坝按年平

表8 绿塘参照砌石拱坝或混凝土拱坝参数计算主应力的对比 (单位: MPa, 以压为正)

| 以砌石拱坝计算参数计算 | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 高程/m | 左拱端 | | | | 拱冠梁 | | | | 右拱端 | | | |
| | 上游面 | | 下游面 | | 上游面 | | 下游面 | | 上游面 | | 下游面 | |
| | σ_1 | σ_3 |
| 829.50 | 0.00 | 0.23 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 0.00 | 0.49 |
| 820.00 | 0.04 | 0.31 | 0.19 | 1.07 | 0.15 | 2.61 | -0.16 | 0.93 | -0.06 | 0.30 | 0.21 | 1.32 |
| 812.50 | -0.21 | 0.33 | 0.36 | 1.58 | 0.63 | 2.16 | -0.31 | 0.42 | -0.32 | 0.37 | 0.34 | 1.82 |
| 805.00 | -0.49 | 0.43 | 0.38 | 1.98 | 0.96 | 1.84 | -0.37 | 0.09 | -0.54 | 0.50 | 0.37 | 2.27 |
| 797.50 | -0.67 | 0.57 | 0.28 | 2.18 | 1.02 | 1.49 | -0.27 | -0.08 | -0.41 | 0.79 | 0.25 | 1.58 |
| 790.00 | -0.46 | 0.92 | -0.16 | 1.74 | 0.77 | 1.09 | -0.41 | 0.41 | -0.34 | 0.90 | -0.28 | 1.60 |
| 782.50 | -0.28 | 0.96 | -0.55 | 1.68 | 0.19 | 0.62 | -0.61 | 1.29 | -0.17 | 0.93 | -0.64 | 1.56 |
| 776.00 | -0.11 | 0.51 | -0.17 | 1.79 | -0.57 | 0.04 | 0.03 | 2.32 | -0.16 | 0.35 | -0.16 | 1.92 |
| 以混凝土拱坝计算参数计算 | | | | | | | | | | | | |
| 高程/m | 左拱端 | | | | 拱冠梁 | | | | 右拱端 | | | |
| | 上游面 | | 下游面 | | 上游面 | | 下游面 | | 上游面 | | 下游面 | |
| | σ_1 | σ_3 |
| 829.50 | -0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.23 | 0.00 | 0.00 | 0.39 |
| 820.00 | -0.14 | 0.38 | 0.22 | 1.07 | 0.13 | 2.39 | -0.14 | 0.65 | -0.26 | 0.41 | 0.24 | 1.24 |
| 812.50 | -0.28 | 0.42 | 0.33 | 1.61 | 0.53 | 2.20 | -0.22 | 0.26 | -0.32 | 0.49 | 0.26 | 1.59 |
| 805.00 | -0.45 | 0.51 | 0.26 | 1.95 | 0.83 | 1.96 | -0.25 | -0.07 | -0.33 | 0.62 | 0.13 | 1.78 |
| 797.50 | -0.57 | 0.65 | 0.08 | 2.10 | 0.90 | 1.63 | -0.42 | 0.00 | -0.48 | 0.59 | 0.10 | 2.04 |
| 790.00 | -0.54 | 0.82 | -0.16 | 2.07 | 0.72 | 1.26 | -0.53 | 0.46 | -0.52 | 0.72 | -0.09 | 2.07 |
| 782.50 | -0.38 | 0.87 | -0.46 | 1.94 | 0.26 | 0.73 | -0.71 | 1.21 | -0.39 | 0.76 | -0.41 | 1.97 |
| 776.00 | -0.09 | 0.60 | -0.16 | 1.73 | -0.36 | 0.04 | 0.03 | 2.09 | -0.11 | 0.53 | -0.14 | 1.78 |

均温度(加辐射热)封拱、基本组合(1)的计算主应力 σ_1 和 σ_3 的对比。

从表8可以看出,分别采用砌石拱坝与混凝土拱坝参数计算得到的应力分布规律相近,采用砌石拱坝参数与混凝土拱坝参数计算的最大主拉应力分别为-0.67和-0.57 MPa,均发生在797.50 m高程左拱端;最大主压应力分别为2.61和2.39 MPa,均发生在820.00 m高程拱冠梁。两种参数计算的拱坝应力成果大致相当,说明年平均温度封拱时拱坝和基础弹性模量的取值对计算结果影响较小。

表9给出了4座拱坝3个荷载组合的最大主应力计算结果。从表9可以看到,两种弹性模量取值的应力分布规律相近,按混凝土坝参数取值,温降、温升荷载对应的最大主拉、主压应力均有一定幅度放大。由于中、低坝高的堆石混凝土拱坝,压应力较小,不是控制应力,而混凝土拱坝允许应力为1.2 MPa,比砌石拱坝允许拉应力1.0 MPa略高,因此参照混凝土拱坝还是砌石拱坝参数取值,计算结果对设计体型影响不大。考虑到混凝土拱坝取值接近拱坝坝体和地基的实际试验参数,所以本文建议堆石混凝土拱坝设计计算参数参照混凝土拱坝设计规范取值。

3.2 计算封拱温度计算成果 整体浇筑拱坝应该根据拱圈的实际浇筑温度和水化热温升与弹模增长过程确定合理的计算封拱温度。本文采用表4—表7给出的计算封拱温度进行计算,得到了4座拱坝3个荷载组合的最大主应力计算成果,见表10。

比较表9采用年平均气温作为设计封拱温度的计算结果,可以看到:(1)整体浇筑拱坝由于总体的计算封拱温度显著高于年平均气温,增大了温降荷载,无论是采用砌石拱坝参数还是混凝土拱坝参数,温降工况的最大拉应力都有明显上升;(2)计算封拱温度明显高于年平均气温,相应的温升荷载应有所减小,绿塘和风光两座拱坝符合这个规律;但龙洞湾和沙千两座拱坝温升工况的最大拉、压应力有较大幅度增加,进一步分析发现最大应力发生部位有所变化,温升荷载造成应力分布有所变化,与两座拱坝的体型有关;(3)拱坝坝体和基础的弹性模量对温度荷载有较大影响,采用计算封

表9 年平均气温封拱的最大主应力计算结果

(单位: MPa, 以压为正)

| | | 绿塘 | | | 龙洞湾 | | | 沙千 | | | 风光 | | |
|----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 温降 | 温升 | 校核 |
| 砌石 | σ_1 | -0.67 | -0.53 | -0.63 | -0.49 | -0.40 | -0.42 | -0.57 | -0.79 | -0.83 | -0.49 | -0.18 | -0.18 |
| 拱坝 | σ_3 | 2.61 | 2.76 | 3.12 | 1.91 | 2.53 | 2.62 | 1.86 | 2.33 | 2.50 | 1.70 | 1.43 | 1.46 |
| 混凝 | σ_1 | -0.57 | -0.42 | -0.50 | -0.73 | -0.55 | -0.54 | -1.00 | -1.21 | -1.25 | -0.90 | -0.39 | -0.38 |
| 土坝 | σ_3 | 2.39 | 2.69 | 2.98 | 1.91 | 2.93 | 3.03 | 2.16 | 2.63 | 2.74 | 1.90 | 2.01 | 2.01 |

表10 计算封拱温度的最大主应力计算结果

(单位: MPa, 以压为正)

| | | 绿塘 | | | 龙洞湾 | | | 沙千 | | | 风光 | | |
|----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 温降 | 温升 | 校核 |
| 砌石 | σ_1 | -0.93 | -0.77 | -0.88 | -0.84 | -0.79 | -0.81 | -0.94 | -1.06 | -1.10 | -0.82 | -0.37 | -0.38 |
| 拱坝 | σ_3 | 2.43 | 2.56 | 2.88 | 2.07 | 2.28 | 2.38 | 2.11 | 2.77 | 2.94 | 2.00 | 1.73 | 1.76 |
| 混凝 | σ_1 | -1.65 | -0.98 | -1.10 | -2.05 | -1.60 | -1.62 | -2.13 | -2.32 | -2.38 | -2.10 | -0.66 | -0.67 |
| 土坝 | σ_3 | 2.84 | 2.89 | 3.18 | 2.33 | 2.41 | 2.48 | 2.85 | 3.98 | 4.09 | 2.73 | 2.40 | 2.44 |

拱温度计算时, 4座拱坝采用混凝土坝参数与砌石坝参数相比, 有3座拱坝的最大拉应力增量超过1.0 MPa, 有1座拱坝最大压应力增量超过1.0 MPa。对于中低坝而言, 压应力不是控制指标, 但按照混凝土坝参数计算的最大拉应力会超过目前国内混凝土拱坝设计规范的控制标准; (4)本文的封拱温度计算方法中, 温度荷载计入了施工期温度影响, 更能反映整体浇筑拱坝的实际情况, 而实际绿塘工程并未见裂缝产生, 因此抗拉强度控制标准应该适当放宽。

3.3 采用月均封拱温度计算成果 绿塘拱坝施工过程中未采取温控措施, 夏季自密实混凝土入仓温度很高, 根据绿塘实际施工情况分析得到的夏季施工的拱圈计算封拱温度会达到30℃, 采用类似方法估算的其他3座拱坝, 计算封拱温度最高也在30℃左右, 比年平均气温高出10℃以上, 相应的拉应力水平较高, 如绿塘为1.65 MPa, 龙洞湾达到2.05 MPa, 沙千达到2.13 MPa(温降工况)和2.32 MPa(温升工况), 风光达到2.10 MPa。3座在建的堆石混凝土整体浇筑拱坝应力水平比绿塘有明显增加, 本文建议在夏季高温时段应采取适当措施, 如水泥罐遮阳或喷水降温、盛夏季节避开中午和下午高温时段浇筑、仓面堆石后铺布避免太阳直射、仓面喷雾等简易温控措施; 还可以优化配合比, 堆石入仓时保证堆石率等措施控制水化热温升。假设措施有效, 封拱温度有望降至仅略高于月平均气温, 称为月均封拱温度(见表4—表7), 参照混凝土坝计算参数取值, 重新计算的结果见表11。

表11 月均封拱温度的最大主应力计算结果

(单位: MPa, 以压为正)

| | | 绿塘 | | | 龙洞湾 | | | 沙千 | | | 风光 | | |
|----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 温降 | 温升 | 校核 |
| 混凝 | σ_1 | -1.25 | -0.63 | -0.77 | -1.71 | -1.28 | -1.30 | -1.75 | -1.60 | -1.66 | -1.48 | -0.53 | -0.54 |
| 土坝 | σ_3 | 2.62 | 2.86 | 3.15 | 2.78 | 2.72 | 2.76 | 2.57 | 3.68 | 3.79 | 2.27 | 2.21 | 2.24 |

从表11可以看到, 各个拱坝的最大拉应力均有明显降低, 最大拉应力分别下降到1.25、1.71、1.75和1.48 MPa。在建的龙洞湾、沙千、风光拱坝的拉应力水平与完全不采取温控措施的绿塘拱坝在计算封拱温度条件下的应力水平相当。

这些计算结果再次说明, 对于整体浇筑拱坝, 包括整体浇筑的碾压混凝土拱坝和砌石拱坝, 进行计算封拱温度复核非常必要。但目前工程经验较少, 其应力控制标准仍然需要进一步深入研究, 本文建议按照1.5~2.0 MPa控制^[13]。

3.4 坝基变性模量影响 为了进一步研究坝基变性模量对计算结果的影响, 绿塘拱坝还采用混凝土坝计算参数, 在月均封拱温度条件下, 对坝基变性模量进行了参数敏感分析(表12)。

从表12可以看到, 地基变形模量的变化对应力水平有一定影响, 但影响不大。地基变模从

表 12 绿塘拱坝不同地基变形模量的应力计算结果 (单位: MPa, 以压为正)

| | | 地基变性模量/GPa | | | | | | | | |
|-----|------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 10 | | | 12 | | | 14 | | |
| | | 温降 | 温升 | 校核 | 温降 | 温升 | 校核 | 温降 | 温升 | 校核 |
| 混凝土 | σ_1 | -1.25 | -0.63 | -0.77 | -1.34 | -0.68 | -0.82 | -1.41 | -0.72 | -0.88 |
| 坝参数 | σ_3 | 2.62 | 2.86 | 3.15 | 2.74 | 2.76 | 3.05 | 2.84 | 2.69 | 2.97 |

10 GPa 升高到 14 GPa, 增幅最大的是温降工况的最大拉应力, 从 1.25 MPa 升高到 1.41 MPa。

3.5 堆石混凝土热膨胀系数的影响 堆石混凝土热膨胀系数与堆石的岩性密切相关, 前述计算中, 堆石混凝土热膨胀系数取为 $7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 考虑 4 个计算案例工程的骨料均为灰岩, 线膨胀系数应小于 $7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 取不同的线膨胀系数, 计算绿塘拱坝按月均温度封拱的应力(见表 13)。

表 13 绿塘拱坝不同线膨胀系数的应力计算结果 (单位: MPa, 以压为正)

| | | 热膨胀系数 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}^{-1}$ | | | | | | | | |
|-----|------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 7 | | | 6 | | | 5 | | |
| | | 温降 | 温升 | 校核 | 温降 | 温升 | 校核 | 温降 | 温升 | 校核 |
| 混凝土 | σ_1 | -1.25 | -0.63 | -0.77 | -1.09 | -0.62 | -0.75 | -0.94 | -0.61 | -0.74 |
| 数 | σ_3 | 2.62 | 2.86 | 3.15 | 2.54 | 2.79 | 3.09 | 2.51 | 2.73 | 3.04 |

从表 13 可以看到, 热膨胀系数对应力水平有一定影响, 特别是对温降工况, 当热膨胀系数从 $7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 下降到 $5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 时, 最大拉应力从 1.25 MPa 下降到 0.94 MPa, 拉应力减小幅度与线膨胀系数的减小幅度接近。

4 结语

本文结合绿塘、龙洞湾和沙千 3 座单曲堆石混凝土整体浇筑拱坝以及风光双曲堆石混凝土整体浇筑拱坝设计, 采用多种计算条件进行了拱梁分载法应力分析, 得到的主要结论和建议如下: (1) 4 个工程的各工况压应力水平均较低, 中、低高度的堆石混凝土拱坝应力主要受拉应力控制。(2) 参照混凝土拱坝或者砌石拱坝参数取值的计算结果对设计体型影响不大。考虑到参照混凝土拱坝参数取值更接近于堆石混凝土拱坝实际, 建议堆石混凝土拱坝体型设计时, 拱梁分载法计算可参考混凝土拱坝设计规范取值, 堆石混凝土计算弹性模量取弹性模量试验值的 0.6~0.7 倍。无试验参数时, 可取 20 GPa; 地基变性模量根据现场试验成果和地质情况参照工程经验取值。(3) 如果采取砌石拱坝计算参数, 即使完全不采取温控措施, 4 个工程的计算封拱温度工况的最大拉应力也均小于 1.0 MPa, 满足砌石拱坝标准要求。(4) 如果采用混凝土拱坝计算参数, 在完全不采取温控措施情况下, 计算封拱温度工况时 4 座拱坝的最大拉应力达到 1.65~2.13 MPa, 说明贵州地区堆石混凝土整体浇筑拱坝完全不采取温控措施, 拉应力水平偏高, 可能存在开裂风险, 需要引起重视。(5) 在夏天采取适当的温控措施, 将堆石混凝土拱坝封拱温度控制到月平均气温的水平, 则 4 座拱坝的最大拉应力会明显下降, 下降幅度为 0.4~0.8 MPa。因此, 对于贵州地区的整体浇筑堆石混凝土拱坝推荐采用适当的辅助温控措施。(6) 坝基变性模量、堆石混凝土热膨胀系数等参数对拱坝应力均有一定影响, 但总体影响程度在合理范围。建议坝基变性模量参照混凝土拱坝设计规范, 根据地质工程师的建议取值。堆石混凝土热膨胀系数可根据堆石岩性和自密实混凝土热膨胀系数, 按照贵州地方标准^[13]附录 C.1.2 条进行计算。(7) 按照本文建议的参数取值、拱圈封拱温度, 进行整体浇筑堆石混凝土拱坝拱梁分载法计算, 建议最大拉应力按照 1.5~2.0 MPa 控制^[13]。大型工程可以采用偏低值, 中小工程采用偏高值。将来在不断积累实际工程经验和数据的基础上, 可以提出更合理的控制标准, 并推广到整体浇筑的碾压混凝土拱坝和砌石拱坝工程。

致谢：本文得到了贵州省地方标准《堆石混凝土拱坝技术规范》编写组诸多同仁的大力协助和有益讨论，特此表示感谢！

参 考 文 献：

- [1] 中华人民共和国水利部 . SL 282—2018 混凝土拱坝设计规范[S] . 北京：中国水利水电出版社，2018 .
- [2] 中华人民共和国水利部 . SL 25—2006 砌石拱坝设计规范[S] . 北京：中国水利水电出版社，2006 .
- [3] 中华人民共和国水利部 . SL 314 —2018 碾压混凝土坝设计规范[S] . 北京：中国水利水电出版社，2018 .
- [4] 张国新，杨波，张景华 . RCC 拱坝的封拱温度与温度荷载研究[J] . 水利学报，2011，42(7)：812-818 .
- [5] 金峰，安雪晖，石建军，等 . 堆石混凝土与堆石混凝土大坝[J] . 水利学报，2005，36(11)：1347-1352 .
- [6] 金峰，李乐，周虎，等 . 堆石混凝土绝热温升性能初步研究[J] . 水利水电学报，2008，39(5)：59-63 .
- [7] ZHANG X F, LIU Q, ZHANG X, et al . A study on adiabatic temperature rise test and temperature stress simulation of rock-fill concrete[J] . Mathematical Problems in Engineering, 2018 . doi:10.1155/2018/3964926 .
- [8] JIN F, ZHOU H, AN X H . Research on rock-filled concrete dam[J] . International Journal of Civil Engineering, 2019, 17: 495-500 .
- [9] LIU C N, CHANGBUM R A, AN X H, et al . Life-Cycle Assessment of concrete dam construction: Comparison of environmental impact of rock-filled and conventional concrete[J] . Journal of Construction Engineering and Management, 2013, 139(12): A4013009 .
- [10] 张广泰，潘定才，刘清 . 大体积堆石（卵石）混凝土内部温度的试验研究[J] . 建筑科学，2009，25(9)：34-37 .
- [11] 高继阳，张国新，杨波 . 堆石混凝土坝温度应力仿真分析及温控措施研究[J] . 水利水电技术，2016，47(1)：31-35 .
- [12] 赵运天，解宏伟，周虎 . 堆石混凝土拱坝温度应力仿真及温控措施研究[J] . 水利水电技术，2019，50(1)：90-97 .
- [13] 贵州省地方标准 . 堆石混凝土拱坝技术规范[Z] . 2020 .
- [14] 刘国华 . 拱坝分析与优化软件系统 ADAO 使用说明书[Z] . 2008 .
- [15] 金峰，张国新，张全意 . 绿塘堆石混凝土拱坝施工期温度监测分析[J] . 水利学报，2020，51(6)：749-756 .

Trial load analysis for integral casting RFC arch dams

JIN Feng¹, ZHANG Guoxin², LOU Shijian³, HE Taohong³, ZHANG Quanyi³

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Zunyi Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Zunyi 563002, China)

Abstract: In order to give full play to the advantages of rock-filled concrete (RFC) arch dams, further simplify the construction and speed up the construction progress on the basis of canceling vibration/rolling compaction and cooling pipe, RFC arch dams without transverse joints and casted integrally have been constructed in Zunyi, Guizhou Province, where is a mild climate area. In this paper, the stress analysis and safety evaluation on Lyutang, Longdongwan, Shaqian and Fengguang RFC arch dams is conducted under different calculation conditions by the trial load method. The closure temperature of each arch, dead load, calculation material parameters are studied. Suggestions for the trial load method of the integral casting RFC arch dams are presented, i.e., the stresses of an arch dam shall be checked by the trial load method where the calculated closure temperature for each arch shall be estimated according to the actual casting temperature of the arch, the calculation material parameters could be selected referring to concrete arch dams, and the allowable stress could be set as 1.5 MPa ~ 2.0 MPa. The method can be applied to not only integrated RFC arch dams, but also integral casting RCC or masonry arch dams.

Keywords: rock-filled concrete; arch dam; trial load method; integral casting

(责任编辑：王冰伟)