

基于三维建模的面板伸缩缝优化设计方法

邓峰伟

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]面板伸缩缝是混凝土面板堆石坝防渗体系的重要部分,在混凝土面板堆石坝中起到至关重要的作用。本论文以某一水库工程为例,该坝属于钢筋混凝土面板堆石坝类型,最大坝高 70m,坝顶轴线全长 630m,面板厚度由下至上呈递增趋势从 30~50cm 变化。采用邓肯-张 E-B 本构方程建立了坝体-面板系统的三维有限元模型,分别对工程竣工后面板受力特点和温度荷载作用下面板变形反应以及坝体变形对面板的影响、伸缩缝间距对面内应力分布影响进行研究。并提出了伸缩缝间距优化原则、缝型结构及止水系统的设计思路、基于三维模型的缝位调整办法。

[关键词]面板堆石坝; 伸缩缝; 三维建模; 应力变形; 优化设计

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19608

中图分类号: TV642

文献标识码: A

Optimization Design Method for Panel Expansion Joints Based on 3D modeling

DENG Fengwei

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: The expansion joint of the concrete face slab is an important part of the anti-seepage system of the concrete face slab rockfill dam, playing a crucial role in the dam. This paper takes a certain reservoir project as an example, which belongs to the type of reinforced concrete face rockfill dam. The maximum height of the dam is 70m, and the total length of the dam crest axis is 630m. The thickness of the face slab increases from bottom to top, ranging from 30 to 50cm. A 3D finite element model of the dam panel system was established using the Duncan Zhang E-B constitutive equation. The stress characteristics of the panel after completion of the project, the deformation response of the panel under temperature load, the influence of dam deformation on the panel, and the influence of expansion joint spacing on the distribution of internal stress on the panel were studied, and proposed optimization principles for expansion joint spacing, design ideas for joint structure and waterproofing system, and joint position adjustment methods based on 3D models.

Keywords: concrete face rockfill dam; expansion joint; 3D modeling; stress deformation; optimization design

引言

混凝土面板堆石坝(CFRD)由于可以大量利用当地材料、施工进度快等因素,已经被抽水蓄能电站上水库工程所广泛采用的一种坝型。面板是主要防渗结构板,它的完整程度直接关系到整个大坝的安全问题。但是由于温差以及坝体不均匀下沉以及水荷载反复作用,面板受到大的应力以及变形,如果不设置相应的伸缩缝的话就会出现面板开裂的情况以及止水破坏等问题进而造成渗漏隐患,该水电站水库电站总装机 1300MW,属于一等的大型工程,上水库大坝为混凝土面板堆石坝,最大坝高 70m,坝顶轴线长度为 630m,坝顶宽度达 10m,填筑量约为 204.7 万 m³。面板共计 55 仓,其中包含 8m 和 16m 两种长块共存的情况,总占地达 5 万 m²,厚薄为 30~50cm 递增。坝

位地势像一个大的“W”,趾板部位裸露有多条破碎面及裂隙密集带,给伸缩缝的设计带来更大的考验。

1 面板伸缩缝的作用与类型

混凝土面板堆石坝面板伸缩缝是沿着面板长度方向布置的一种构造缝,它的主要作用有以下几点:消除温度应力、收缩应力,使面板不会因为温度的变化及干缩出现无序性的裂缝;适应坝体不均匀沉降及面板挠曲变形引起的变形,避免由于变形过大造成面板破坏;分段设置止水设施,建立完整可靠的防渗体系。

面板伸缩缝依据其受力性质的不同分为张性缝与压性缝两大类。张性缝主要设于面板中间部分及顶部位置处,缝隙宽度为 12~20mm,缝内填充塑性材料,满足的是面板因温度下降以及坝体下沉所产生的张开变形需求;压性

表 1 面板伸缩缝类型与功能

缝类型	设置部位	缝宽/mm	主要功能	止水要求
张性缝	面板中部、上部	12~20	适应张开位移	高抗拉止水
压性缝	面板底部、趾板附近	8~12	适应压缩位移	抗压耐疲劳
周边缝	面板与趾板交接处	15~25	适应多向变形	三道冗余止水

缝主要设置在面板下部接近趾板的位置，其宽度约为 8~12mm，留有足够的压缩余量来承受面板由于温度上升、水压力等因素引起的压力变形。鲁山县抽水蓄能电站地上水库面板使用 8m 跟 16m 两种规格进行搭配，共有 55 块，在坝轴向进行分仓。垂直缝是面板坝防渗系统中非常重要的一部分。一些研究指出周边缝以及垂直缝的变形必须满足止水材料规定的范围之内，经过计算后确定了适用于本工程的设计指标即混凝土面板堆石坝设计参数。表 1 展示了面板伸缩缝主要形式及其用途。

2 三维建模方法与计算理论

2.1 坝体-面板系统三维建模方法

基于某水库抽水蓄能电站上水库面板堆石坝建立三维有限元模型，坝顶最高处达 70m，坝顶轴线长 630m，坝顶宽 10m，上下两端的坝坡都是一比一点四，坝体材料分为五部分：上游铺盖部分、垫层料部分、过渡料部分、主堆石区与次堆石区。面板厚度是根据高度递减，最上面是 30cm，下面 50cm。

堆石体材料本构模型采用邓肯-张 (Duncan-Chang) E-B 非线性弹性模型，其可以很好地体现堆石体材料非线性的应力-应变曲线。在所有面板堆石坝应力变形研究中，该模型也是被广泛使用的一个本构模型。邓肯 E-B 模型对周宁抽水蓄能电站上水库面板堆石坝做了三维非线性有限元分析，在竣工期间的坝体沉降计算值接近沉降测斜

管的最大值，说明模拟结果可信度高。面板与垫层之间的接触方式由 Goodman 接触单元来模拟，以便更好地反映面板与坝体间的相对位移及滑动、分开的行为。

建模过程时，在坝体分区的基础上把堆石体分成若干单元组，在面板使用壳单元离散，坝体底部以及两侧岸边使用固定位移边界条件，建立模型整体网格如图 1 所示，整个模型有大约 12 万个单元，其中面板单元约 8000 个，堆石体单元约 11.2 万个。

2.2 荷载与边界条件模拟

帷幕灌浆孔的设计应兼顾各个荷载组合工况的作用情况。本文重点研究以下几种荷载状态：①自重荷载：根据大坝填筑施工分层加载的方式进行模拟，以逐层填筑、压实时产生的大坝整体下沉作为基准。②水荷载：正常蓄水高程为 946m 处对应水压力约为 76m 水位，死水位 920m 水压力约为 50m 水位。水压力按静水压力分布规律施加于面板迎水面并且考虑到出现水位瞬间下降等特殊情况。③温度荷载：考虑到因季节变化以及昼夜温差引起的大坝混凝土收缩与徐变的作用。④坝体流变变形：堆石坝由于在长时间荷载下存在流变特性的问题所以在竣工之后也会产生相应的时效变形从而影响面板的受力状况。边界条件采用坝基、两岸边坡均是刚性边界。面板与堆石区之间设接触面允许相对滑动而不允许相互穿过，水位随时间的变化过程用水荷载分段施加荷载来模拟蓄水与泄水的过程。

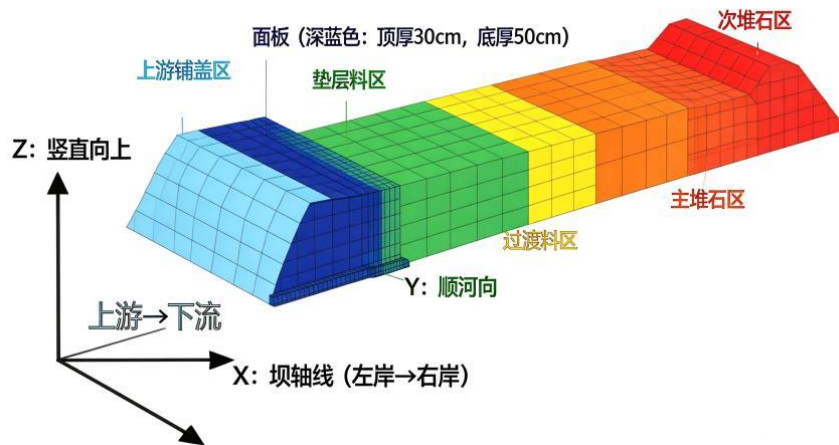


图 1 坝体-面板系统三维有限元网格模型

3 面板应力与变形特性分析

3.1 正常运行期面板受力特征

正常蓄水位工况下，面板顺坡向应力为“上部受压、下部受拉”。最大压应力约为 2.8~3.5MPa，在坝体高程的 1/3~1/2 范围内；最大拉应力约为 1.2~1.6MPa，在坝体高程的 2/3 附近。主轴向应力平缓，两岸坡附近区域应力集中最大挠度为 2.5~3.2cm 在坝体中部高程范围，图 2 给出了顺坡向应力分布沿坝高的走势。

表 2 正常运行期面板主要受力参数

受力参数	最大值	出现位置	允许值
顺坡向压应力/MPa	3.2	坝高 1/3 处	15.0 (C30)
顺坡向拉应力/MPa	1.5	坝高 2/3 处	2.0 (C30)
面板最大挠度/cm	3.0	坝高 1/2 处	5.0
轴向拉应力/MPa	0.8	岸坡附近	2.0

3.2 温度荷载下面板变形响应

温度的变化是造成伸缩缝位移和应力重新分布的主要原因，在温度变化大的情况下，面板上表面温度降低最快，面板上表面以及面板中都产生拉应力，上层的最大主应力比面板中心大得多，都集中在高程约为坝高的一半处；有水库电站在一年之间的温差就达到了 50℃以上，

在低温环境条件下，面板表面上的大约拉应力为 1.8MPa，中间大约为 1.2MPa，集中在 1/2 坝高。温升环境条件下产生最大的压应力约为 2.5MPa。采取保暖措施能够基本克服寒流和夜间温差过大带来的影响。

3.3 坝体变形对面板的影响

堆石坝坝体受自重以及水荷载的影响会发生很大的沉降和平面偏移量，坝体的不均匀沉降是造成面板附加应力以及伸缩缝拉开位移的主要因素，在分析的过程中发现，某水电站水库上库工程坝体竣工时的最大下沉量为 28cm，沉降率为坝高的 0.4%，符合规范规定 (≤1%)。蓄水后坝体继续有 8~12cm 左右的沉降量，总沉降量在 36~40cm 左右。

坝体沉降在坝轴线方向上呈现的是“中间大，两端小”的趋势，最大的坝体沉降出现在河床中心断面上，两侧的岸坡部位沉降量较小。不均匀的沉降使面板产生弯曲变形，造成面板下部及中部出现较大附加拉伸应力。堆石料流变效应对面板长期应力有着较大的影响，考虑高围压效应对应和围压及剪胀性耦合作用的流变模型能够更为精准地预测全周期应力变形情况。图 3 为蓄水过程中坝体的沉降云图分布。

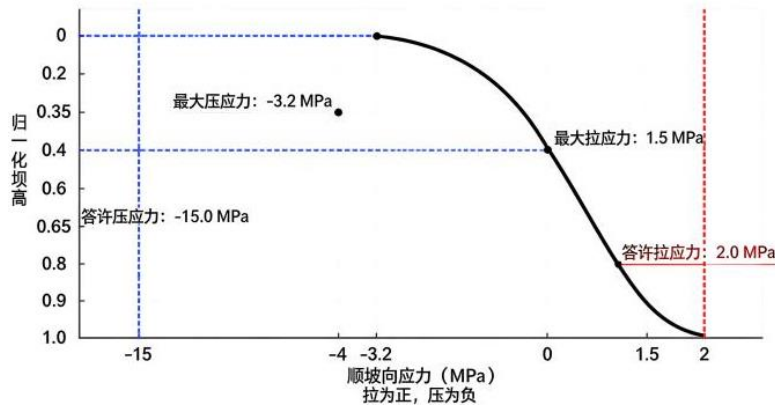


图 2 正常运行期面板顺坡向应力沿坝高分布

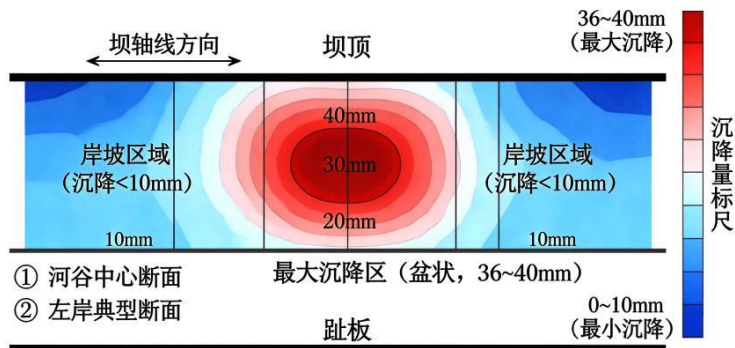


图 3 蓄水期坝体沉降云图分布

3.4 伸缩缝间距对应力分布的影响

比较了 6m、8m、10m、12m、16m、20m 六个不同的缝宽方案。通过比较得出：缝间距 < 10m 时，缝数增加，止水费用大，面板整体性差；缝间距 > 16m 时，面板中部拉应力大于 2.0MPa，会发生裂缝现象；随着面板由于温差引起的滑移动作控制着伸缩缝开口度以及切向位移量，在此基础上可以提出合理的缝面构造以及伸缩缝间距和面板厚度的设计思路。8~16m 组合方案符合抗裂标准。高坝要适当布置一些能适应坝体轴向伸张收缩的压性垂缝。图 4 给出了不同缝间距下面板最大拉应力

的变化。

表 3 不同缝间距方案对比结果

缝间距 /m	最大拉应力 /MPa	最大缝宽 /mm	施工难度	止水造价	综合评价
6	1.1	0.8	高	高	较优
8	1.2	1.2	较低	中	优
10	1.4	1.5	低	中	优
12	1.5	1.8	低	较低	优
16	1.6	2.2	低	较低	优
20	1.9	2.8	低	低	差

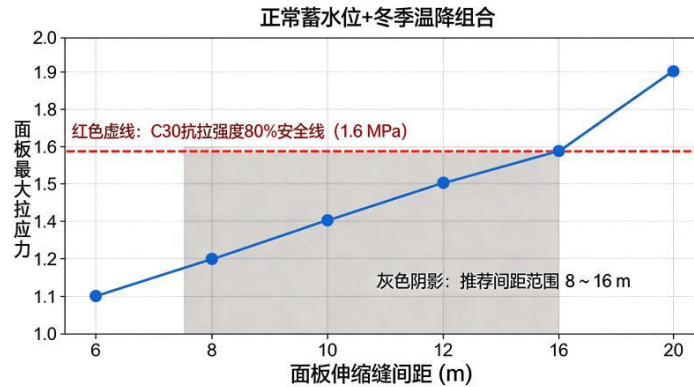


图 4 不同缝间距下面板最大拉应力变化曲线

4 伸缩缝优化设计方法

4.1 伸缩缝间距优化准则

根据第三节的数据计算结果，给出三种主要的伸缩缝间距优化原则。①应力控制原则，即面板最大拉应力不应超过混凝土抗拉强度设计值的 80%（安全系数大于等于 1.25），对于某一水库电站 C30 混凝土，允许的最大拉应力为不大于 2.0MPa，在缝间距不大于 16m 的情况下可以达到要求。②变形协调原则就是指伸缩缝的最大张开位移量不能超过止水系统允许变形幅度的 70%，且最小闭合位移量要保证压性缝不会因此而完全闭合，从而使止水系统能长久有效地发挥其作用。③经济性原则就是在同时符合上述两个条件的基础上尽量加大伸缩缝之间的距离，从而减少缝的数量，节约止水系统的价格以及工程难度。某个水库电站已采取 8m 及 16m 段长复合措施符合上面三个原则，方案可行。

4.2 缝型结构与止水系统设计

水流频繁波动造成伸缩缝宽度改变，止水系统的可靠性是十分重要的。面板坝传统止水结构设置三层防水措施：表面有防水板包裹的塑性嵌缝填充物、中间止水带、底部铜止水。铜止水鼻子越长，则其变形能力越大。某水电站止水设

计如下所示：①底部为 1.2mm 厚 W 型铜止水，鼻子高度为 40mm，宽度 500mm；②中间止水采用 GB 波纹合成橡胶带；③表面为 GB 塑性材料+不锈钢盖板。波纹合成橡胶带可以防止中间止水与混凝土黏结问题。GB 止水材料耐低温、耐盐碱、抗冻融性能已经超越了国外同类产品。

表 4 伸缩缝止水系统配置参数

止水部位	材料类型	规格参数	关键性能指标
底部止水	W 形铜止水	厚 1.2mm，宽 500mm，鼻高 40mm	变形能力 $\geq 30\text{mm}$
中部止水	GB 波形橡胶带	厚 8mm，波形高 15mm	抗水压 $\geq 1.0\text{MPa}$
表层止水	GB 填料+不锈钢盖板	填料深 50mm，盖板厚 3mm	耐低温 -40°C

4.3 三维模型下的缝位调整方法

以三维模型应力分布为基础对缝位精确定位：先提取顺坡向应力 σ_x 及轴向应力 σ_y 分布云图，找出应力最高点的位置，然后根据岸坡地形以及沉降情况来拟定大概的方案，在此基础上再采用参数化的方式进行计算，不断修改，最终选择应力分布最为均衡的一种方式。经过大量的三维有限元分析后可以得到简化后的缝隙模型，在优化过后 16m 长板放置在应力较低的坝体中心处，8m 短板放在靠近岸坡的地方。

4.4 优化方案的对比评价

对经过完善后的伸缩缝方案同初始方案做比较分析。比较参数有面板最大拉应力、最大缝位移量、止水系统适用性及经济性。比较的结果是在总缝间距不变的基础上对缝位进行了细致划分并改进了止水形式,使得面板最大拉应力为 1.6MPa 降低到 1.4MPa,最大缝位移由 2.2mm 下降到 1.8mm 以内,止水系统的应力水平值从 0.45 降到 0.38,提高了止水的的空间。图 5 显示的是改造前后面板受力

情况的区别。

表 5 优化方案与原方案对比

评价指标	原方案	优化方案	改善幅度/%
最大拉应力/MPa	1.6	1.4	12.5
最大缝位移/mm	2.2	1.8	18.2
铜止水应力水平值	0.45	0.38	15.6
止水系统安全裕度	1.15	1.32	14.8
施工缝数量/条	54	54	0

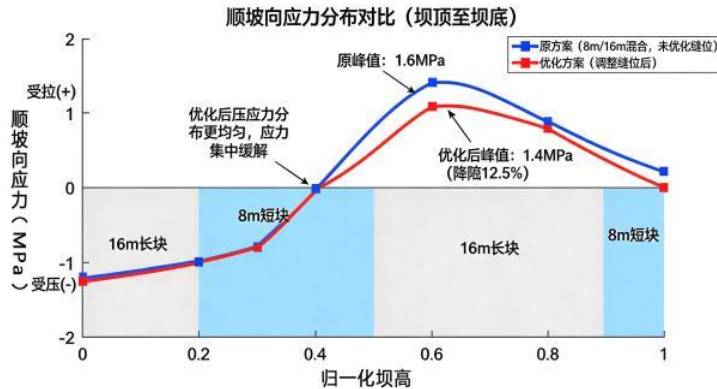


图 5 优化前后面板顺坡向应力分布对比

5 结束语

本文基于河南某水库电站上水库面板堆石坝工程,进行了三维建模面板伸缩缝优化设计方法的研究,结论如下:

①建立了某水库电站上水库坝体-面板系统三维有限元模型,利用邓肯-张 E-B 本构模型对堆石体材料进行模拟, Goodman 单元模拟面板与垫层之间的接触状态。通过计算得出正常运行期面板最大压应力约为 3.2MPa,最大拉应力约为 1.5MPa,面板最大挠度 3.0cm,均满足规范要求。

②温度荷载是引起面板受力情况的重要原因,降温工况下面板表层的最大拉应力达到 1.8MPa,应力集中出现在坝高达 1/2 左右的位置,该位置是设计伸缩缝时需要重点关注的部分。

③通过对 6~20m 共计六种不同间距的伸缩缝进行了比较研究,得到应力控制、变形协调以及经济效益三个方面的选择原则,某一水电站所使用的 8m 与 16m 组合式的伸缩缝间距符合这几个条件,设计较为恰当。

④提出了一种以三维建模应力分布特点为基础进行缝位细化调节的方法,在此基础上的改进设计使得面板的最大拉应力下降了 12.5%,缝位偏移减小了 18.2%,止水系统的可靠性余量增大了 14.8%,说明这种方法是可行的。

研究结果对某水库水电站上水库面板伸缩缝的设计起到了参考作用,同时对于类似抽水蓄能电站面板堆石坝的伸缩缝改进设计也有一定参考意义。

[参考文献]

[1]贾曦超.建筑超宽伸缩缝综合水平防护施工技术[J].产品可靠性报告,2023(3):84-85.
 [2]李栖鹏.面板混凝土止水系统施工工艺[J].价值工程,2022,41(19):65-67.
 [3]袁明道,黄本胜,谭彩,等.基于模型试验的面板伸缩缝破损对海堤沙土流失影响机理研究[J].中国农村水利水电,2020(8):46-50.
 [4]祝志文,钟国琛,丁望星.基于应力监测的梁端正交异性钢桥面板 RD 构造细节疲劳荷载动力效应研究[J].东南大学学报(自然科学版),2025,55(6):1707-1716.
 [5]李宣宣.建筑伸缩缝处剪力墙钢木混合模板抗滑移加固技术应用[J].建筑工人,2021,42(6):30-32.
 [6]王春生,吴庆霖,李璞玉,等.钢桥面顶板与加劲肋焊接细节抗疲劳性能研究进展与数字孪生疲劳试验[J].中国公路学报,2026,39(1):1-19.

作者简介:邓峰伟(1999—),男,毕业于太原理工大学农业水利工程专业,就职于中国水利水电第十二工程局有限公司,项目工程技术部副主任,工程师。