DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2019. 01. 29

白鹤滩拱坝底孔应力分析及配筋设计研究

赵兰浩1,钱佳瑜1,李同春2

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 农业工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要:高拱坝孔口周围应力分布复杂,需适当配筋改善孔口结构的受力状态,保证拱坝的安全运行。以白鹤滩拱坝3[#]底孔为例,首先对施工期工况下孔口结构进行三维有限元计算,分析孔口周围的应力分布规律和产生机理,然后依据应力图形法对孔口进行配筋设计,最后采用钢筋混凝土有限元法对完成配筋的孔口进行非线性分析。结果表明:在坝体自重的作用下,混凝土泊松比效应是引起孔口顶、底板出现顺河向拉应力的主要原因;钢筋整体应力不高,配筋设计方案有较大的安全裕度,应力图形法偏于保守。但出于安全考虑,仍应采用应力图形法进行配筋设计。

关键词:高拱坝;底孔;顺河向拉应力;应力图形法;非线性分析;配筋设计;白鹤滩拱坝

中图分类号:TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0191-06

Stress analysis and reinforcement design of bottom orifice of Baihetan Arch Dam

ZHAO Lanhao¹, QIAN Jiayu¹, LI Tongchun²

College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
 College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The stress distribution around the orifice of high arch dam is complex, while proper reinforcements is necessary to improve the stress state of the orifice structure and ensure safe operation of arch dam. Taking the No. 3 bottom orifice of the Baihetan Arch Dam as an example, a 3 – D finite element calculation was firstly made on the orifice structure under construction condition for analyzing the the stress distribution and mechanism around the orifice. Then the stress graph method was used to obtain a reinforcement design of the orifice. Finally, the non – linear calculation of reinforced concrete was carried out for the orifice with reinforcement. The results showed that the Poisson's ratio effect of concrete was the main cause of the tensile stress along the river at the top and bottom of the orifice under the action of gravity of dam body. The overall stress of the reinforcement was not high, and the reinforcement design scheme had a great safety margin, which means the stress graph method is conservative. However, the stress graph method should still be adopted for the reinforcement design in terms of safety.

Key words: high arch dam; bottom outlet; tensile stress along the river direction; the stress graph method; non-linear analysis; reinforcement design; Baihetan Arch Dam

1 研究背景

拱坝为满足泄洪、输水、排沙等要求,需在坝体内部开设各类孔口。已有研究表明^[1],孔口对大坝整体应力影响很小,但在其附近应力会发生显著改变从而导致裂缝的产生。为改善孔口受力状态,限制混凝土裂缝的开展,需适当配置钢筋保证孔口的

结构安全和拱坝的正常运行[2]。

高拱坝孔口周围应力分布较为复杂,在进行配筋设计之前,需对其应力状态进行准确合理地分析研究。传统认为^[3-4]应力集中是造成孔口周围出现较大拉应力的主要原因,但事实上除了应力集中的因素之外,高拱坝的孔口附近应力分布规律有其独特的成因和特点。文献[5]采用子模型法对拱坝泄

收稿日期:2018-10-10; 修回日期:2018-12-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401601)

作者简介:赵兰浩(1980-),男,山东临沂人,博士,教授,博士生导师,研究方向为流固耦合、水工结构数值模拟。

通讯作者:钱佳瑜(1992-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方向为水工结构数值模拟。

水底孔进行了有限元分析,结果表明在拱坝拱推力的作用下,孔口两侧壁发生较为显著的受弯现象,尽管孔道受到内水压力,但无法抵消巨大的拱推力带来的受弯作用,导致孔口侧壁可能出现较大的竖向拉应力。文献[6]通过改变拱坝结构形式对孔口周围应力分布情况进行了研究分析,发现当孔口布置悬臂结构时,其重力会通过周边混凝土传递到坝体,使得靠近进、出口位置的孔道侧壁产生较大的顺河向拉应力。

根据孔口周围的应力分布情况,工程中采用应力图形法^[7-8]对孔口进行配筋,承载力所需的钢筋用量可由弹性理论分析方法求得的弹性应力图形面积确定,从而得到相应的配筋设计方案。对于高拱坝孔口这类重要的非杆件体系结构,混凝土开裂前后孔口周围受力状态差异较大,宜用钢筋混凝土非线性有限元法^[9-10]对配筋方案进行分析与调整。

本文以白鹤滩拱坝 3[#]底孔为例,首先采用子模型法得到孔口在施工期工况下的应力分布情况,并对孔口顶、底板顺河向拉应力的产生机理进行研究分析;然后依据应力图形法确定孔口不同部位的配筋量,得到具体的配筋设计方案;最后对完成配筋的孔口进行钢筋混凝土有限元非线性分析,根据钢筋应力水平对配筋设计方案进行评价,为孔口优化设计和配筋研究提供依据。

2 计算模型及方案

2.1 工程概况

白鹤滩拱坝坝顶高程834.0 m,最大坝高289.0 m。为满足泄洪及输水要求,拱坝采用6个表孔、7个深孔和6个导流底孔的布置方案。其中6个导流底孔中1*~5*底孔孔口尺寸为6 m×10 m,出口高程630 m,上游侧设置封堵闸门,下游自由出流;6*底孔孔口尺寸为5 m×7 m,出口高程665 m,下游设置工作弧门挡水。

2.2 网格模型

依据拱坝真实形态及相应细部结构,建立整体三维有限元模型,如图 1 所示。横河向为 x 轴,向右岸为正;顺河向为 y 轴,向下游为正;竖向为 z 轴,向上为正。整体模型有限元计算时对地基侧面进行法向约束,对底面进行固定约束。本文重点关注坝身各孔口、闸墩等细部结构,因此对孔口及周边范围网格进行适当加密,其他部分网格剖分相对稀疏,在计算中采用局部非协调网格插值算法[11],在切割边界上通过位移插值进行协调。

从整体模型中选取典型孔口作为子模型,进行二次加密,此时网格尺寸能够保证孔口应力及配筋的精度要求。为便于插值运算,子模型建模时应保证其坐标系和单元类型同整体模型完全一致。根据整体模型计算结果,提取出子模型与整体模型其余部分的接触面上的节点位移值,作为约束条件施加在子模型的边界上,再在子模型上施加对应工况的荷载,进行子模型的有限元计算。加密后的3[#]底孔子模型如图2所示。

2.3 计算工况及材料参数

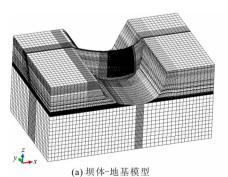
计算工况分为2种:工况1为施工期无水工况,大坝浇筑到顶,上游未蓄水(围堰挡水),此时计算荷载仅为自重;工况2为施工期蓄水工况,大坝浇筑到顶,计算荷载主要有自重、水压力及弧门推力,其中上游水位750.00 m,对应的下游水位606.00 m,1*~5*底孔由上游平板门挡水,6*底孔由下游弧门挡水,弧门正推力为64360 kN,侧推力为3220 kN。

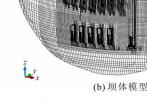
 3^* 底孔孔口及相应闸墩采用 $C_{90}40$ 混凝土,孔口附近区域的坝体采用 $C_{180}35$ 混凝土,结构钢筋采用 HRB400,材料的具体参数如表 1 所示。

3 应力结果及成因分析

3.1 计算结果

采用子模型法对施工期工况下的3[#]底孔进行





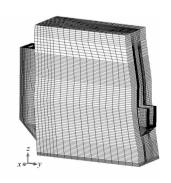


图 1 整体有限元模型

图 2 3 据 底孔有限元模型

有限元计算,切取相应的典型截面,得到施工期各工况孔身段应力分布情况。施工期无水工况下的底孔正应力分布如图 3 所示,其中应力以拉为正,以压为负。由应力结果可知,3[#]底孔孔道侧壁竖向主要受到压应力作用;工况 1(施工期无水工况)孔道顶、底面 x、y 向出现较大的拉应力,x 向最大拉应力为3.86 MPa,出现在孔口断面底板中部,y 向最大拉应力为

1.83 MPa,出现在洞身上游段底板位置,当计入坝体上游水压力后, x 向最大拉应力减小为 1.46 MPa, y 向最大拉应力减小为 1.28 MPa。

上述计算结果表明,结构自重是造成孔口顶、底板出现横河向和顺河向拉应力的主要荷载,而当水库蓄水时,坝体受水压力作用抵消了部分拉应力,应力状态得以改善。

表 1	た ゴ ま	才来!! 奶	理参数
1X I	ハスコレヤ	リイナイツ	生罗奴

材料	容重/ (kN·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	抗压强度标准值/ (N·mm ⁻²)	抗拉强度标准值. (N・mm ⁻²)		线胀系数/ 10 ⁻⁶ /℃
	24	24	0. 167	40	3.2	3.0	6.5
C ₁₈₀ 35 混凝土	24	24 0.167	35	2.8	3.0	0.5	
HRB400 钢筋	78	200	0.230		360		

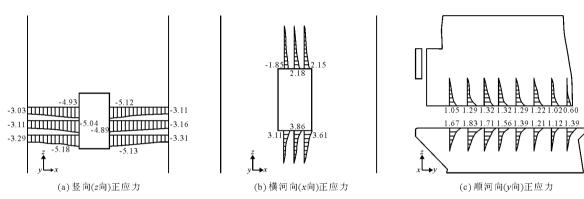


图 3 工况 1 底孔正应力分布(单位: MPa)

(1)

3.2 孔口顺河向拉应力成因分析

由以上应力计算结果可见,3[#]底孔孔身段竖向 及横河向应力分布是符合一般规律的。但底孔顶、 底板出现较大的顺河向拉应力,与传统的顺河向拉 应力小的观点相矛盾。通过多方案对比分析可知, 自重施加方式和进口悬臂结构对孔口顶、底板顺河 向拉应力范围和数值有一定影响,但并不是引起孔 口顺河向拉应力的主要原因。现从弹性力学角度, 对仅受整体自重作用下的孔口周围一点的应力状态 进行求解,探讨其力学特性,从而进一步分析顺河向 拉应力产生的原因,并用有限元计算结果进行验证。

由文献[12]可得带有方形孔洞无限区域孔周 界上的应力为:

$$\sigma_{\theta} = \frac{4(A \cdot C + B \cdot D)}{C^2 + D^2} P_x + \frac{4(A' \cdot C' + B' \cdot D')}{C^{'2} + D'^2} P_z$$

$$\sigma_{\rho} = \tau_{\rho\theta} = 0 \tag{2}$$

其中: $A = 14 - 24\cos 2\theta - 7\cos 4\theta$, $A' = 14 + 24\cos 2\theta$ - $7\cos 4\theta$, $B = -24\cos 2\theta - 7\sin 4\theta$, $B' = 24\cos 2\theta$ - $7\sin 4\theta$, $C = C' = 56 + 28\cos 4\theta$, $D = D' = 28\sin 4\theta$, $P_x = \sigma'_x = \mu\sigma'_z = \mu\sigma'_{z0}/(1 - \mu^2)$, $P_z = \sigma'_z = \sigma'_{z0}/(1 - \mu^2)$

式中: $P_x \ P_z$ 分别为x,z 向均布荷载; σ'_{s0} 为泊松比等于0 时无限远处的竖向应力。

以孔口顶板中心点($\theta = \pi/2$) 为例,则该点横河向应力 $\sigma_x = \sigma_\theta$,竖向应力 $\sigma_z = 0$ 。对于平面问题,由物理方程可知:

$$\varepsilon_{y} = \frac{1}{E} [\sigma_{y} - \mu(\sigma_{x} + \sigma_{z})]$$
 (3)

假设截面上孔口周界 y 方向应变和无限远处相同,由公式(3) 可得:

$$\varepsilon_{y} = -\frac{\mu}{E(1-\mu)}\sigma'_{z0} \tag{4}$$

最后,将公式(1)、(2)和(4)代入公式(3),得 到孔口顶板中心点顺河向应力为:

$$\sigma_y = \sigma'_{.0} \left(\frac{1}{21} \frac{17\mu - 31\mu^2}{1 - \mu^2} + \frac{\mu}{1 - \mu} \right) \tag{5}$$

式中: E 为弹性模量, GPa; μ 为泊松比。

当孔口结构形式一定,所受荷载不变时, σ'_{so} 是一个常量。故顺河向应力仅与泊松比有关,且孔口顶、底板在泊松比效应下顺河向始终受拉。当 $\mu=0$ 时, $\sigma_{y}=0$,因此泊松比效应是孔口产生顺河向拉应力的主要原因。

为了验证孔口顶、底板顺河向拉应力公式的正确性,建立一个具有方形孔洞的无限大厚板模型,假定厚板为普通材料,取泊松比为 0.10、0.15、0.167、0.18 和 0.20,利用有限元方法计算得到孔洞顶部的 y 向拉应力,并与弹性力学解析解进行对比,其结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,有限元计算结果与弹性力学的解析解基本一致,当孔口厚板材料为混凝土时,其泊松比必定大于 0,从而产生较大数值的顺河向拉应力,进一步说明混凝土泊松比效应是产生孔口顺河向拉应力的主要原因。

4 配筋设计及非线性分析

4.1 孔口配筋设计

高拱坝孔口位置的钢筋布置十分复杂,根据经验及工程类比,3[#]底孔可分为进口段闸墩、进口段牛

腿、孔身段、出口段闸墩以及出口段牛腿等部分。不同部位的布筋形式虽有不同,但主要由横河向钢筋、顺河向钢筋和竖向钢筋组成。本文根据底孔应力分布情况截取适量的截面和线,得到孔口不同部位的主拉应力图形^[13],并按照应力图形法,确定各部位的钢筋用量。底孔配筋设计方案见表3。

表 2 不同泊松比下特征点的顺河向拉应力值表

MPa

泊松比	有限元解	弹性力学解析解
0.10	1.72	1.71
0.15	2.57	2.56
0.167	2.86	2.85
0.18	3.08	3.08
0.20	3.44	3.43

通过孔口配筋计算分析可知,底孔进口段牛腿 及孔身段顶底面等部位控制拉应力较大,计算得到 的钢筋用量也较大;进口闸墩处顺河向控制拉应力 较小,但计算配筋量很大,主要是由于该部位拉应力 延伸较深,导致应力图形面积较大(图4)。

表 3 底孔配筋设计方案

W W W W W W W W W W W W W W W W W W W						
部位	位	配筋方向	控制拉应力(MPa)/ 所属工况	计算钢筋量/ mm²	配筋方案	设计配筋量/ mm ²
进口的) 中 D. G. G. G.	顺河向钢筋	0.621/工况 1	18914.67	4 层 C36@ 200	20358.0
进口段闸墩	竖向钢筋	主要为压应力	按构造配筋	1层 C36@200	5089.5	
进口段牛腿	横河向钢筋	2.882/工况 1	11548.33	3 层 C36@ 200	15268.5	
	顺河向钢筋	1.124/工况 1	10598.54	3层 C36@200	15268.5	
	77; ph. 7	横河向钢筋	3.861/工况 1	7822.83	2层 C36@200	10179.0
刀白机	顶底面	顺河向钢筋	1.828/工况 1	10026.78	2层 C36@200	10179.0
孔身段	/5d D>	顺河向钢筋	0.246/工况 1	4808.83	1层 C36@200	5089.5
侧壁	竖向钢筋	主要为压应力	按构造配筋	1层 C36@200	5089.5	
山田郡		竖向钢筋	0.187/工况 1	592.17	1层 C36@ 200	5089.5
出口段闸墩	顺河向钢筋	0.377/工况 1	4853.52	1层 C36@ 200	5089.5	
山口杯		横河向钢筋	1.326/工况 1	1809.40	1层 C36@ 200	5089.5
出口段牛腿	顺河向钢筋	1.341/工况 1	4736.89	1层 C36@ 200	5089.5	

根据实际工程的需要,混凝土保护层厚度取为 200 mm,同时钢筋选用 C36,间距为 200mm,确定底 孔各部位的具体配筋方案(表3)。依据上述钢筋布置方案,建立钢筋的三维有限元模型如图 5 所示。

4.2 钢筋混凝土非线性分析

由上述配筋结果可知,孔口各部位的配筋量在

工况 1 (施工期无水工况)下最大,故在已有的 4 参数损伤模型基础^[14-15] 上,采用单弹簧联结单元法^[16-17]模拟钢筋和混凝土相互作用,对该工况下的 3^{*}底孔进行钢筋混凝土非线性计算,并根据钢筋应力结果,为完善和优化孔口配筋设计方案提供了参考依据。

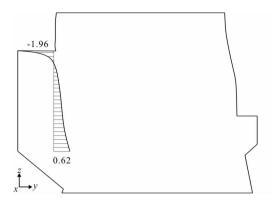


图 4 进口段闸墩剖面应力(单位: MPa)

根据混凝土材料抗拉、抗压强度标准值,推求 4 参数 损 伤 模 型 中 的 4 个 参 数 的 取 值 为: A = 0.01135, B = 0.0759, C = 0.77822, D = 0.24848。

表 4 底孔不同部位钢筋最大应力

部位	配筋方向	最大应力/MPa
进口段闸墩	顺河向钢筋	1.623
近日权闸墩	竖向钢筋	-5.421
讲口段牛腿	横河向钢筋	51.581
近日权干腿	顺河向钢筋	31.547
顶底面	横河向钢筋	47.942
孔身段	顺河向钢筋	28.423
元	顺河向钢筋	7.817
购型	竖向钢筋	-3.549
出口段闸墩	竖向钢筋	1.211
田口权門墩	顺河向钢筋	0.871
出口段牛腿	横河向钢筋	10.472
山口权干贩	顺河向钢筋	11.783

表4为工况1下3[#]底孔不同部位钢筋的最大应力。由表4可知,钢筋拉应力主要出现在孔道顶底面及进口段牛腿处,最大值为51.581 MPa。从整体来看,钢筋应力水平不高,远小于钢筋抗拉强度,主要是由于混凝土未发生损伤开裂时,钢筋和混凝土协调变形,两者应变相同,钢筋应力仅为混凝土的10倍左右。

钢筋承担拉应力较小,钢筋性能未完全发挥,说 明本文采用的配筋设计方案有较大的安全裕度,应 力图形法偏于保守。但在实际工程中,由于施工、温 度等外界因素的影响,混凝土往往会发生开裂。裂 缝一旦出现,裂缝截面的受拉区混凝土大部分退出 工作,拉应力几乎全部由钢筋承担,钢筋应力会突然 增大。因此出于安全考虑,仍应采用应力图形法进 行配筋设计。

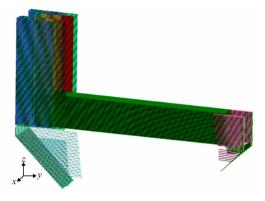


图 5 底孔钢筋有限元模型

5 结 论

- (1)高拱坝孔口周围应力状态较为复杂,传统 认为应力集中导致孔口出现较大的拉应力,但实际 上拱坝拱推力和孔口悬臂结构的存在是造成孔口周 围拉应力较大的主要原因。
- (2)仅自重作用下,3^{*}底孔顶、底面位置出现较大的横河向和顺河向拉应力。当坝体上游蓄水时,内水压力的存在会使得拉应力有所减小,应力状态得以改善。
- (3)从弹性力学角度,推导孔口顶、底板顺河向 拉应力的解析解,并通过有限元方法进行验证,说明 混凝土泊松比效应是引起孔口顶、底板出现顺河向 拉应力的主要原因。
- (4)钢筋整体应力水平不高,配筋设计方案有较大的安全裕度,应力图形法偏于保守。但出于安全考虑,在实际工程中仍应按照应力图形法进行配筋设计。

参考文献:

- [1] 潘永保. 对拱坝开孔一些看法[J]. 东北水利水电, 1987(3):28-32.
- [2] 潘燕芳, 黎满林. 大岗山拱坝泄洪深孔配筋设计研究 [J]. 人民长江, 2014,45(22):65-68.
- [3] 张建海,何江达. 坝身孔口群应力分析的子结构单元法 [J]. 水电站设计,1999,15(2):26-32.
- [4] 谭 林, 郭 原. 开孔有限平板应力集中问题的有限元分析[J]. 重庆理工大学学报, 2015, 29(7):35-39.
- [5] 郭晓晶,徐谨谨. 子模型法在拱坝泄水底孔应力分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(1):205-208+212.
- [6] 李守义,杨 胜,高菊梅. 拱坝泄水孔应力影响因素分析 [J]. 应用基础与工程科学学报,2010,18(1):20-27.
- [7] 韩玉莲, 赵继勋, 高阳,等. 基于有限元单元法的混凝 土结构配筋方法研究[J]. 水科学与工程技术, 2011

(4):87 -89.

- [8] 李鹏冲. 万家口子拱坝冲沙中孔配筋设计[J]. 红水河, 2016, 35(5);30-33.
- [9] 殷鸣,李同春,赵兰浩,等.基于单弹簧联结单元法的白鹤滩拱坝孔口配筋非线性有限元分析[J].水利水电技术,2017,48(1):52-58.
- [10] 赵兰浩, 张梦迪, 张云峰. 表孔闸墩颈部钢筋混凝土 非线性有限元分析[J]. 水电能源科学, 2018,36(1): 120-123+115.
- [11] 李同春,李淼,温召旺,等. 局部非协调网格在高拱坝应力分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(1):42-45.
- [12] 侯化强,王连国,陆银龙,等. 矩形巷道围岩应力分布及其破坏机理研究[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(S2):1625-1629.

- [13] 朱峰林,李同春. 地震作用下某混凝土拱坝表孔孔口 配筋设计[J]. 水电能源科学, 2016,34(6):75 - 79.
- [14] 韦 未,李同春,姚纬明. 建立在应变空间上的混凝土 四参数破坏准则[J]. 水利水电科技进展,2004,24 (5):27-29+68.
- [15] 韦 未, 李同春. 基于四参数等效应变的各向同性损伤模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32 (4):425-429.
- [16] 颜天佑, 李同春, 赵兰浩. 单弹簧联结单元法的改进 算法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2011, 33 (6):23-26+32.
- [17] ZHAO Lanhao, ZHANG Wei, BAI Xin, et al. Single spring joint element based on the mixed coordinate system
 [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015(18):
 1 16.

(上接第190页)

- [11] 何 婷,汪卫明,张 雄,等. 复合接触单元及其在带缝高 拱坝仿真中的应用[J]. 水力发电学报,2012,31(5): 216-222.
- [12] 周 伟,常晓林,解凌飞,等. 模拟高拱坝施工期横缝工作性态的接触-接缝复合单元[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S2);3809-3815.
- [13] 孙 伟,何蕴龙,熊 堃,等. 薄层接缝单元及其在拱坝接缝模拟中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014,46(S2);26-35.
- [14] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [15] 刘莹骏,张运良. 一种薄层接触单元的开发及 FLAC ~ (3D)实现[J]. 水利与建筑工程学报, 2014,12(4):1

-8 + 49.

- [16] 田志斌. 具有诱导缝的碾压混凝土拱坝温度裂缝发展分析[D]. 西安:西安理工大学,2013.
- [17] 马建军,符建云,任 涛. 基于 ANSYS 的大体积混凝土 浇筑过程仿真分析[J]. 水电能源科学, 2013,31(11): 99-101+123.
- [18] CHEN Yaolong, WANG Changjiang, LI Shouyi, et al. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3D finite element relocating mesh method [J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(9): 677-682.
- [19] 张晓飞,王晓平,黄 宇,等. 寒潮条件下碾压混凝土拱 坝温度应力仿真研究[J]. 水资源与水工程学报,2018, 29(1):192-197.