

导流洞堵头结构稳定性分析及优化设计

韩燕华

(湖北工程学院 土木工程学院, 湖北 孝感 432000)

摘 要:常规的水工导流洞堵头设计中堵头长度偏于保守,以孟底沟水电站工程为依托,采用非线性三维有限元分析方法对导流洞堵头段结构在运行期的应力、变形和稳定性进行了计算分析,提出堵头段结构的推荐设计。堵头长度敏感性分析表明,堵头前 20 m 分担了总水压力的 90% 左右,堵头分担水压力的规律与原推荐方案完全一致,且完全能够满足承载的要求。

关键词:导流洞;堵头长度;稳定性;敏感性分析;优化设计

中图分类号:TV551 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-4824(2020)06-0124-04

在水库蓄水前,水利水电工程的施工导流洞需要用混凝土堵头进行封堵。堵头封堵工程量虽不大,但其施工质量和工期要求对电站蓄水期、运行期的安全运行和工程效益有至关重要的意义^[1-4]。然而,关于堵头长度和结构形式,水工设计规范尚未给出明确的规定,国内外已建工程所采用的堵头也暂无统一标准^[5-8],其设计多采用经验类比法或根据极限抗滑、抗冲剪解析公式计算校核^[9-10],所得设计长度大多过分偏安全^[11],不利于施工工期和施工质量的控制。

本文以孟底沟水电站工程为依托,采用非线性三维有限元分析方法对初期导流洞堵头段结构在运行期的应力、变形和稳定性进行了计算分析,对堵头段结构的设计提出推荐意见,通过堵头长度敏感性分析,进一步优化了该导流洞堵头长度。

1 工程实例

1.1 计算条件

孟底沟水电站是雅砻江中游七级开发方案中的第五个梯级,枢纽工程由高 200 m 的混凝土双曲拱坝、下游水垫塘二道坝、左岸引水发电系统和右岸两条导流洞构成。右岸的两条导流洞间距约 50 m,导流洞进口底板高程 2091 m,出口底板高程 2080 m,导流洞断面为城门洞形,Ⅱ类围岩断

面为 14.2 m 宽×15.4 m 高,Ⅳ类围岩断面为 15 m 宽×16 m 高,洞轴线方向 S57° W,1#导流洞洞身全长 922.85 m,2#导流洞洞身全长 1070 m,堵头段断面为 16 m 宽×17 m 高。堵头位于坝区 f4、f5 两条较大断层及影响带相交地段。

1.2 计算模型

三维非线性有限单元算法在堵头设计中已有较广泛的应用,本文采用该算法进行堵头段围岩稳定性研究,并进一步提出堵头的形状和长度优化设计。建立的模型计算范围为:1)上下游方向:上游方向以 2#导流洞堵头上游面向上游延伸 100 m,下游方向以 1#导流洞堵头下游面向下游延伸 100 m。2)左右岸方向:以 1#导流洞的轴线向河谷横向扩展 60 m,以 2#导流洞的轴线向山里横向扩展 60 m。3)铅直方向:以堵头开挖底板向下延伸至 60 m(大约最大洞径的 3 倍),向上至坡面。

在有限元网格模型建立的过程中,开挖区及衬砌混凝土单元尺寸控制在 1.5 m 范围内;模型边界距开挖区距离近的边单元尺寸控制在 15 m 范围内,模型边界距开挖区距离远的边单元尺寸控制在 20 m 范围内。从锚固区到模型边界,单元尺寸渐进过渡。依照上述单元尺寸控制标准,堵头段建立的三维有限元网格模型见图1,总共划

收稿日期:2020-09-11

作者简介:韩燕华(1978-),女,山西霍州人,湖北工程学院土木工程学院副教授,博士。

分 607057 个单元, 119661 个节点。图 2 为堵头局部网格。

模型边界条件: 在左右两侧、上下游侧和底部施加法向约束, 顶面自由。

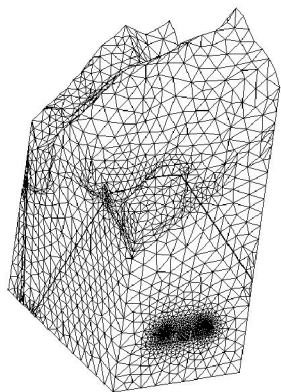


图 1 堵头段有限元模型

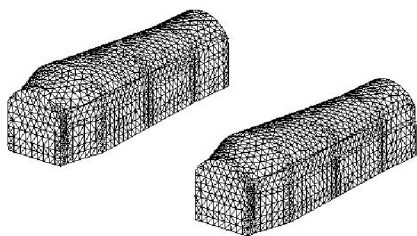


图 2 堵头局部网格

1.3 计算参数

堵头混凝土采用峨胜 P.MH42.5 水泥、珞璜 I 级粉煤灰、杨家坪花岗岩骨料并掺加缓凝型高效减水剂配制而成。C25 混凝土 28 d 抗压强度为 32.3 MPa, 劈裂强度为 1.75 MPa。堵头混凝土的弹性模量按双曲线形式计算, 见公式(1):

$$E = \frac{28t}{3.738 + t} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量(单位, GPa); t 为龄期(单位, d)。

衬砌混凝土的物理力学参数按 DL/T5057—2009《水工混凝土结构设计规范》选取, 计算中未考虑混凝土的徐变。

2 堵头应力与稳定性分析

2.1 初步设计堵头应力分析

本文中堵头的计算主要考虑永久运行工况, 荷载主要为水荷载, 计算渗流场及渗透力后, 作为荷载施加在应力应变有限元模型。

1) 堵头应力分析。堵头段衬砌的压应力水平

较低, 最大主压应力约为 1.01 MPa, 远低于混凝土的抗压强度 11.9 MPa, 满足抗压强度要求。堵头段上游过渡段边墙和底板连接处内壁有少量区域的最大主拉应力达到 1.44 MPa, 略大于抗拉强度设计值 1.27 MPa, 主要是因为应力集中, 需要在此处适当加强配筋。下游部分衬砌拉应力不超过 0.7 MPa。

2) 堵头位移分析。对运行期导流洞堵头沿水流方向位移进行分析, 得出 1#、2# 导流洞关键部位的特征位移, 规定径向变形以指向洞外为正, 轴向(顺河向)变形指向下游。1# 导流洞顶拱最大拱起量约为 1.15 mm, 底板最大下沉量约为 1.15 mm, 边墙向洞外最大水平变形约为 1.66 mm, 顺河最大位移约为 0.56 mm。2# 导流洞顶拱最大拱起量约为 1.38 mm, 底板最大下沉量约为 2.48 mm, 边墙向洞外最大水平变形约为 2.32 mm, 顺河最大位移约为 0.52 mm。综合可知: 永久运行期, 围岩及结构的变形主要集中在堵头上游面向上游部分的结构中, 以导流洞的径向变形为主, 2# 导流洞结构的径向变形较 1# 导流洞大, 主要是因为其内水压所在的区域位于 f4 断层部位, 但最大变形量不超过 2.5 mm。

2.2 初步设计堵头稳定性分析

堵头的稳定性计算采用有限元数值分析的点安全系数法, 该参数可表征某区域的安全储备能力, 数值越大说明该点的安全储备越高, 如果所有的局部区域都处于安全稳定状态, 则可判定结构的整体也处于安全状态。

研究中, 围岩的屈服准则取 D-P 准则^[12], 表达式为公式(2):

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (2)$$

式中: I_1 为应力张量第一不变量, $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$,

J_2 为应力偏量第二不变量, $J_2 =$

$$\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{3} \sin \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}, \quad k = \frac{\sqrt{3} c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$$

式中: φ 为内摩擦角, c 为粘结力, σ_T 为抗拉强度。

若 $\sigma_1 < \sigma_T$, 则岩体的点安全系数 K 计算式采用公式(3):

$$K = (k - \alpha I_1) / \sqrt{J_2} \quad (3)$$

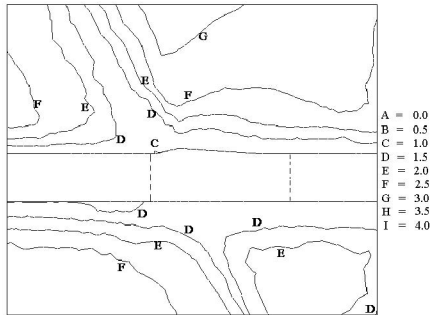
若 $\sigma_1 \geq \sigma_T$, 则 K 采用公式(4)计算:

$$K = \sigma_T / \sigma_1 \quad (4)$$

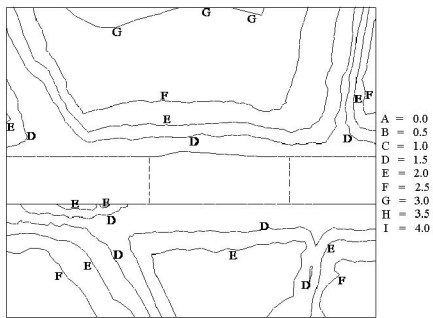
当 $K > 1.0$ 时, 该处为弹性状态; 当 $K = 1.0$

时,该处为临界屈服状态; $K < 1.0$ 时,表明该处处于屈服状态或计算不收敛。

图3为1#、2#导流洞纵剖面围岩点安全系数等值线图,图4为1#、2#导流洞最大断面处横剖面围岩点安全系数等值线图。

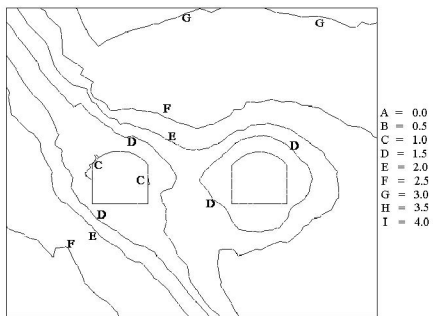


(a) 1#导流洞

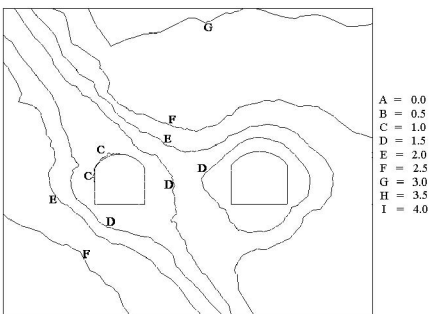


(b) 2#导流洞

图3 导流洞纵剖面围岩点安全系数等值线图



(a) 1#导流洞



(b) 2#导流洞

图4 最大断面处横剖面围岩点安全系数等值线图

可以看出:2个导流洞的围岩点安全系数均大于等于1,结合结构计算的收敛特性,可知运行期导流洞堵头段围岩整体上稳定。但在施工期间,应加强对断层及其附近IV级围岩的监测,以便出现局部失稳前及时进行支护,确保工程安全。

图5给出了堵头与衬砌接触面的屈服区分布(洞口颜色较浅处为屈服区)。从中可以看出:堵头与衬砌接触面屈服区分布在上游面附近不到2m的范围,屈服区未见扩展,堵头整体稳定。

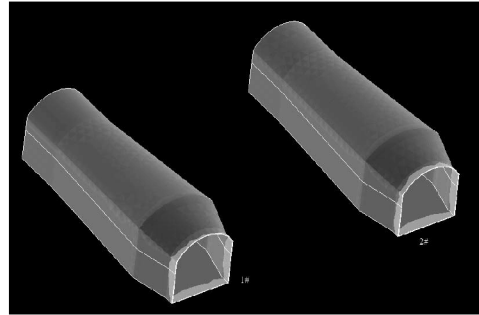


图5 堵头与衬砌接触面的屈服区分布

2.3 优化后堵头应力与稳定分析

根据有限元计算结果,可以得出:导流洞初步设计的支护形式满足封堵段正常运行期围岩的稳定要求,堵头设计合理,长度满足稳定要求,且推荐方案的堵头长度偏安全。现将堵头长度减少10m,即长度设计为40m,并保持其横断面及结构形式不变,进行堵头的优化设计。

优化前后两种方案的计算工况、荷载组合、有限元分析的计算步骤一致;坐标系、计算范围、边界条件、单元类型选择、计算结果整理等设定也与初步设计方案完全一致。

图6为缩短长度堵头与衬砌接触面的屈服区分布图(洞口颜色较浅处为屈服区)。可以看出,堵头长度为50m和长度为40m接触面的屈服区差别不明显。

图7为堵头节段分担力占总水推力的比值与堵头节段长度的关系曲线图。可以看出:50m堵头段上游端30m长节段堵头分担94.8%的总水推力。当堵头缩短到40m时,上游端30m长节段堵头分担95.5%的总水推力,增长幅度不到1%。因此,当堵头长度达到40m,再继续增加堵头的长度,对增加堵头稳定性效果不明显,且40m的堵头完全能够满足承载的要求,因此堵头长度为40m是一个较合适的长度。进一步分析可知,堵头长度优化前后,堵头的前20m分担了总水压

力约 90%，因此该段导流洞开挖后，应重视实际揭露的地质条件，并分析是否应采取合适的工程处治措施，防止在前 20 m 范围出现围岩局部挤碎、浅层滑动等失稳破坏。

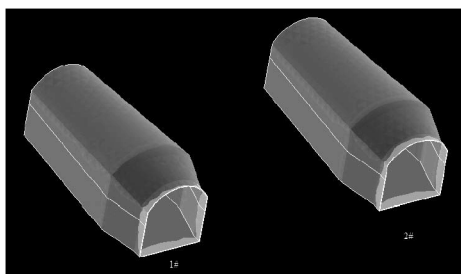


图 6 缩短长度后堵头与衬砌接触面的屈服区分布

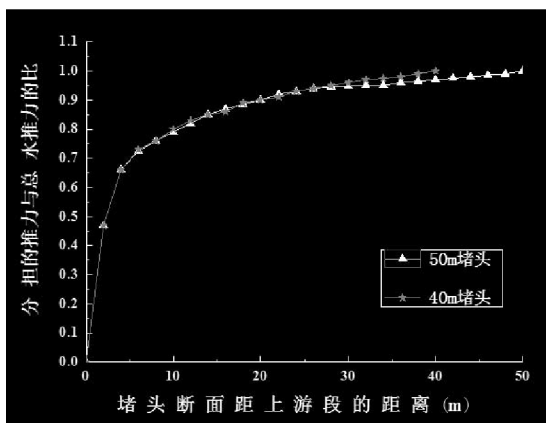


图 7 堵头节段分担的水推力与其长度的关系曲线

3 结语

以孟底沟水电站工程为例，采用有限元方法分析了堵头结构在正常蓄水工况下的工作状态，结合计算结果，进一步进行堵头长度敏感性分析，提出堵头长度优化设计方案，得出以下结论和建议：

- 1) 孟底沟水电站导流洞结构的变形以径向变形为主，最大变形量不超过 2.5 mm。
- 2) 运行期内堵头及围岩整体稳定，但在施工

区间应加强对断层及其附近 IV 级围岩的监测。

3) 导流洞堵头长度可在原设计方案基础上缩短 10 m，不影响导流洞的稳定性和承载能力。

4) 建议将堵头长度敏感性分析作为导流洞设计中的一重要工作，以尽可能地减少堵头长度，缩短工期，降低工程造价。

[参 考 文 献]

- [1] 汪魁,刘欢,罗盈.基于可靠性的导流洞堵头设计优化分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(11):52-57.
- [2] 周小丽.水工隧洞堵头设计中的参数优化探讨[J].工程技术研究,2019,4(17):28-30.
- [3] 周冠荣,金薇,吴栋.特殊地质条件下导流隧洞堵头封堵技术[J].施工技术,2013,42(12):48-50.
- [4] 杨阳,肖明.考虑接触面损伤及连续脱开的堵头稳定计算[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(S1):86-91.
- [5] 马高.云南万家口子水电站导流隧洞封堵设计[J].红水河,2020,39(3):97-100.
- [6] 董志宏,丁秀丽,叶三元,等.大型水电工程导流洞封堵体稳定性分析[J].长江科学院院报,2011(2):50-55.
- [7] 张超,雷运华,张有山,等.叶巴滩水电站导流洞布置方案优选研究[J].水利水电技术,2016,47(10):15-19.
- [8] 赵芹,何江达,梁照江.导流洞堵头常规设计方法的修正[J].岩石力学与工程学报,2004(7):1336-1338.
- [9] 混凝土重力坝设计规范:SL 319—2018[S].北京:中国水利水电出版社,2018.
- [10] 蔡耀军,徐福兴.大坝建基岩体抗剪强度取值[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):1040-1044.
- [11] 殷德胜,汪卫明,王书法.水布垭导流隧洞堵头体型的优化[J].武汉大学学报(工学版),2008(3):68-70.
- [12] 郑颖人,孔亮.岩石塑性力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.

(责任编辑:熊文涛)