

一种关于楔形封堵体承载能力计算方法研究

米云彤, 张芳, 秦晓亮, 刘曜

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要:导流洞作为水电工程中高水头的有压隧洞,其封堵措施是保证水电工程蓄水及正常运行的重要一环,其结构设计内容至关重要。目前关于封堵体的计算方法多针对于柱状封堵体,关于工程实用性较大及应用较多的楔形封堵体的计算方法较少。因此,基于规范推荐的柱状封堵体抗滑稳定计算公式,从楔形封堵体的受力分析出发,推导出适用于楔形封堵体承载力计算方法。将其计算结果与柱状封堵体计算结果对比,结果表明:相较于柱状封堵体,楔形封堵体更好地利用了围岩的特性,在泊松效应的加持下,极大程度地增强了封堵体对于水压的承载能力,该公式对于楔形封堵体的设计具有一定的参考作用。

关键词:导流洞; 封堵体; 楔形封堵体; 抗滑稳定计算

中图分类号:TV222

文献标志码:A

文章编号:1001-2184(2024)04-0121-04

Study on the Calculation Method the Bearing Capacity of Wedge-shaped Plugging Body

MI Yuntong, ZHANG Fang, QIN Xiaoliang, LIU Yao

(PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang Guizhou 550081)

Abstract: Diversion tunnel is a high-pressure tunnel with high water head in hydropower project. Its plugging measures are an important part to ensure water storage and normal operation of hydropower project, and its structural design is very important. At present, the calculation methods about plugging body are mainly aimed at cylindrical plugging body, and the calculation methods about wedge plugging body which is more practical and widely used in engineering are few. Based on the sliding stability calculation formula recommended by the code, this paper deduces the bearing capacity calculation method suitable for wedge-shaped plugging body from the force analysis. The calculated results are compared with those of cylindrical plugging body. The results show that, compared with cylindrical plugging body, wedge-shaped plugging body makes better use of the characteristics of surrounding rock, and greatly enhances the bearing capacity of the plugging body to the water pressure under the support of Poisson effect. The formula has a certain reference for the design of wedge-shaped plugging body.

Keywords: Diversion tunnel; Block; Wedge-shaped plugging body; Anti-sliding stability calculation

0 引言

导流洞封堵体作为水电工程蓄水与正常运行的重要临时结构,其结构设计至关重要,如何通过设计保证其布置及形式可靠且保证其安全性和稳定性达到使用要求至关重要。

目前关于封堵体的设计,规范中并未对封堵体的结构形式和封堵计算公式做明确要求,无统一标准,但推荐使用的方法包括抗剪断强度公式、抗滑稳定公式、三维有限元法等^[1]。规范推荐使用的方法是基于柱状封堵体的受力模式进行的分析及计算,程龙等^[2]在文得根水利工程导流洞

封堵体设计中运用此法提出了封堵体设计方案。

理论上,封堵体的形式应根据隧洞的形式、尺寸及用途等方面进行选择,针对高水头的水工隧洞,规范推荐使用楔形封堵体的形式进行计算,但又无明确的计算公式,所以国内部分工程封堵体的设计也在计算中使用柱状封堵体的计算公式,而实际的工程封堵形式选择楔形封堵体^[3]。除此之外,国内部分学者还针对楔形封堵体通过三维弹塑性数值分析方法研究堵头及堵头与围岩接触面从局部到整体破坏的渐进失稳过程,对不同形式的封堵体的应力、变形和稳定性进行了计算分析^[4-5]。但总的来说,针对楔形封堵体的设计和

收稿日期:2024-05-15

计算方法数值模拟的成果较多,而理论计算相对较少,故笔者从常见的楔形封堵体的受力分析出发,推导适用的楔形封堵体承载力计算方法,为今后相关工程楔形封堵体的设计提供一定的参考。

1 柱状封堵体计算方法

目前关于柱状封堵体的计算方法和工程实际应用已相当成熟,使用较广泛方法之一是根据《[《](#)水利隧洞设计规范》NB/T 10391—2020》的规定,采用柱状体抗滑稳定计算方法,考虑水头作用下的效应函数与摩擦力和黏聚力作用下的结构抗力进行柱状封堵体的长度及尺寸进行设计,其中抗滑稳定计算下式如下:

$$S(\cdot) = \sum P_R \tag{1}$$

$$R(\cdot) = f_R \sum W_R + C_R (A_{R1} + \lambda A_{R2}) \tag{2}$$

式中: $S(\cdot)$ 为作用效应函数; $R(\cdot)$ 为抗力函数; $\sum P_R$ 为封堵体沿滑动面上全部切向作用之和,kN; $\sum W_R$ 为封堵体滑动面上全部法向作用之和,kN; f_R 为混凝土与围岩或混凝土与混凝土的摩擦系数; C_R 为混凝土与围岩或混凝土与混凝土的凝聚力,kPa; A_{R1} 为封堵体底部与围岩接触面面积, m^2 ; A_{R2} 为封堵体侧面与围岩接触面面积, m^2 ; λ 为封堵体侧面与围岩有效接触面面积系数,根据工程具体情况采用0.3~0.8。

2 楔形封堵体计算公式推导

2.1 基本假定

受力分析前根据楔形封堵体的力学特性,假设:(1)堵头段围岩中不存在内部软弱结构面,其极限承载力为围岩的抗压强度或抗剪强度;(2)堵头段内力沿长度方向均匀分布;(3)封堵体完全几何形式及受力情况完全对称,且完全处于轴压受力状态。

2.2 几何参数

封堵体的形式应根据隧洞的形式、尺寸及用途等方面进行选择,尤其是对于高水头的水工隧洞,如导流洞或引水隧洞等,按照《[《](#)水利隧洞设计规范》NB/T 10391—2020》的要求,宜优先采用楔形封堵体,但规范对于楔形封堵体计算无推荐公式,故拟从受力分析的角度出发,推导其计算公式。典型断面综合大断面尺寸及高水头的因素,选取有压隧洞中最为常见的城门洞形作为计算断面,楔形封堵体轴侧示意图见图1,横断面示意图

见图2。适用于不同封堵长度和不同形式的纵断面示意图见图3。其中, L_A 和 L_B 分别为楔形封堵体顶拱左右两侧封堵体水平长度,m; b 为封堵体的宽度,m; h_A 和 h_B 分别为楔形封堵体顶拱左右两侧封堵体等效计算高度,m; θ_A 和 θ_B 分别为楔形封堵体顶拱左右两侧封堵体楔形起坡角度,°。

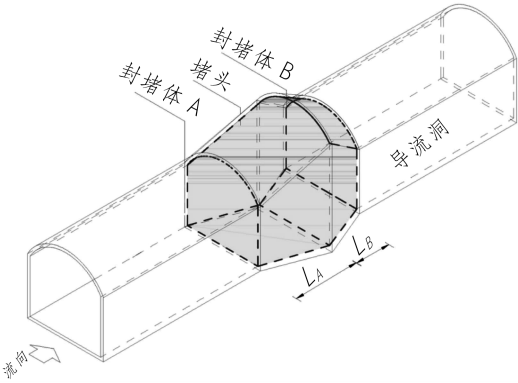


图1 楔形封堵体轴侧示意图

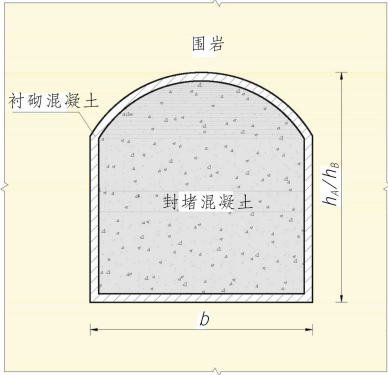


图2 横断面示意图

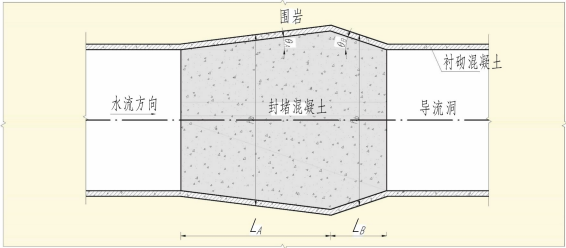


图3 纵断面示意图

2.3 受力情况分析

将楔形封堵体按照开挖顶拱处分为封堵体A和封堵体B两个部分进单独受力分析,封堵体受力简图见图4,图中 P 为外水压的合力,kN; P' 为顶拱处断面水平内力,kN; G_A 和 G_B 分别为封堵体A和封堵体B的自重,kN; N_A 、 N_{B1} 和 N_{B2} 分

别为封堵体 A 和封堵体 B 围岩产生的支反力, kN; f_A 、 f_{B1} 和 f_{B2} 为封堵体 A 和封堵体 B 的混凝土与围岩之间摩擦力的合力, kN; F_{CA} 和 F_{CB} 为封堵体 A 和封堵体 B 的混凝土与围岩之间黏聚力合力, kN;

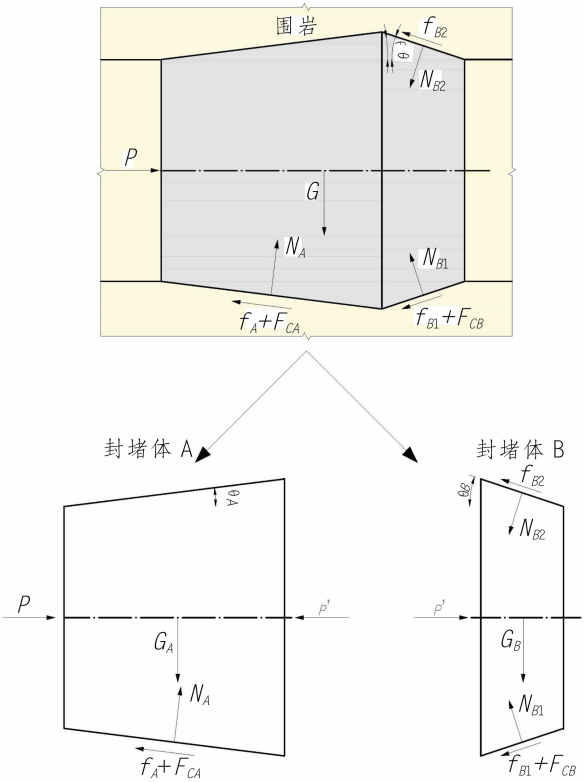


图 4 封堵体受力简图

2.4 公式推导

由 $\sum x_A = 0$:

$$P = P' + f_A \cos \theta_A - N_A \sin \theta_A + F_{CA} \tag{3}$$

由 $\sum x_B = 0$:

$$P' = N_{B1} \sin \theta_A + N_{B2} \sin \theta_B + f_{B1} \cos \theta_B + f_{B2} \cos \theta_B + F_{CB} \tag{4}$$

其中,

$$N_{B1} = N_{B2} = \frac{[\sigma] b L_B}{\cos \theta_B} \tag{5}$$
$$f_{B1} = f_{B2} = \frac{[\sigma] b L_B f}{\cos \theta_B} \tag{6}$$
$$F_{CB} = C_R (A_{RB1} \cos \theta_B + \lambda A_{RB2}) \tag{7}$$
$$N_A = \sum W_A = \frac{\gamma b h_A L_A}{\cos \theta_A} \tag{8}$$
$$f_A = f \sum W_A \tag{9}$$
$$F_{CA} = C_R (A_{RA1} \cos \theta_A + \lambda A_{RA2}) \tag{10}$$

式(5)和式(8)中, $[\sigma]$ 为围岩或混凝土的抗压强度, N/m^2 ; b 为封堵体计算宽度, m ; f 为混凝土与围岩的摩擦系数; γ 为混凝土容重, kN/m^3 。
式(6)和式(9)中: A_{RA1} 和 A_{RB1} 分别为封堵体 A 和封堵体 B 底部与围岩接触面面积, m^2 ; A_{RA2} 和 A_{RB2} 分别为封堵体侧面与围岩接触面面积, m^2 。
联立式(3)~式(10)可得:

$$R(\cdot) = \gamma b h_A L_A (f - \sin \theta_A) + 2[\sigma] b L_B (\tan \theta_B + f) + C_R b [L_A + L_B + 2\lambda (h_A + h_B)] \tag{11}$$

3 计算承载力对比

根据拟定的断面尺寸参数及规范中常见的材料及地质参数, 利用公式(2)和公式(11)对相同长度的柱状封堵体和楔形封堵体极限承载能力进行计算, 材料参数和几何参数见表 1、2, 计算成果见表 3。

根据计算成果, 可发现相同长度的柱形封堵体和楔形封堵体承载力分别为 3.90 MPa 和 16.34 MPa, 出现这种结果的原因是柱形封堵体承载力仅源自灌浆措施产生洞壁四周产生的混凝土与围岩之间黏聚力与底部与围岩产生的摩擦力, 而楔形封堵体在受到洞壁四周黏聚力的同时, 因楔形混凝土块的存在, 会受到摩擦力和支反力的共同作用, 并在楔形封堵体轴线方向的两股相反水平力的加持下, 产生强烈的泊松效应。由于泊松效应, 向岩壁两侧膨胀的楔形封堵体会得到更多岩壁提供的支反力与摩擦力, 进而增强楔形封堵体整体的承载能力。在计算中, 承载能力极限状态下封堵体 B 摩擦力为 2 524 560 kN, 而封堵体 A 和柱形封堵体的摩擦力很好地体现了这一规律。

值得注意的是, 封堵体 A 的黏聚力项与摩擦力项对承载力的影响和柱形封堵体的承载能力计算方法及结果虽是相似的, 但封堵体 A 由于支反力的存在, 反而会对封堵体 A 的承载力进行一定的削弱。

4 结语

根据规范推荐适用于柱形封堵体的抗滑稳定公式, 从楔形封堵体的受力分析出发, 推导出适用于楔形封堵体的承载力计算公式, 在计算中对比分析各力作用效应及结果以验证其合理性, 从而为楔形封堵体的承载力计算提供一种具有参考价

表 1 材料参数表

混凝土重度 /(kN·m ⁻³)	混凝土抗压 强度 /MPa	围岩抗压 强度 /MPa	岩抗剪断强度 /MPa		混凝土岩抗剪断强度 /MPa		混凝土抗剪断强度 /MPa	
			f	c	f	c	f	c
24	13.4	50.0	1.1	0.9	1.0	1.0	1.1	1.3

表 2 几何参数表

封堵形式	柱形封堵体			封堵体 A				封堵体 B				有效接触 面积系数
项目	长度 /m	宽度 /m	高度 /m	长度 /m	宽度 /m	有效高度 /m	角度 /°	长度 /m	宽度 /m	高度 /m	角度 /°	
数量	22.00	15.70	16.20	16.00	15.70	18.22	7.13	6.00	15.70	18.22	18.43	0.7

表 3 计算成果表

封堵形式	柱形封堵体			封堵体 A			封堵体 B			楔形封堵体
项目	黏聚力 /kN	摩擦力 /kN	承载力 /MPa	黏聚力 /kN	摩擦力 /kN	支反力 /kN	黏聚力 /kN	摩擦力 /kN	支反力 /kN	承载力 /MPa
数量	844 360	134 292	3.85	716 843	109 845	—13 634	495 304	252 4560	841 278	16.34

值的计算公式。

关于楔形封堵体的承载能力,楔形体的存在更好地利用了围岩及混凝土自身的抗压能力,提供额外的支反力,并且在泊松效应的加持下,显著提升摩擦力的作用效应,使楔形封堵体的承载能力相较于柱状封堵体的承载能力提升数倍,在数值计算方面主要承载能力的贡献体现在摩擦力项和支反力项。其中,该公式基于楔形封堵体应力状态均处于完全轴压受力状态,因此可能计算承载能力实际承载能力偏大,存在局限性,但整体而言可以为楔形封堵体的设计提供很好的参考价值。

参考文献:

[1] 谭宁.引水系统施工支洞封堵计算方法研究[J].工程设计与设计,2018(21):126-128.

[2] 程龙,赵亮,张赛,等.文得根水利枢纽工程导流洞封堵体设计[J].东北水利水电,2021,39(6):9-11,71.

[3] 宋思谕,张栋.贵州省安顺市石朱桥水库导流洞堵头设计[J].陕西水利,2023(1):140-141,145.

[4] 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,2011,28(2):50-55.

[5] 鄢双红,张练,漆祖芳,等.大型导流隧洞不同体型封堵体的设计方法及结构安全性分析[J].水电能源科学,2023,41(6):119-122,201.

[6] 水工隧洞设计规范:NB/T 10391-2020[S].北京:中国水利水电出版社,2020.

作者简介:

米云彤(1996-),男,四川德阳人,助理工程师,硕士,从事施工组织设计工作;

张芳(1998-),女,河南商丘人,助理工程师,硕士,从事水工专业设计工作;

秦晓亮(1981-),男,河南新乡人,高级工程师,学士,从事施工组织设计工作;

刘曜(1982-),男,青海西宁人,高级工程师,硕士,从事水工专业设计工作.

(编辑:吴永红)

(上接第 120 页)

[2] 杨浩动. 文县小水电站生态流量环境保护探析[J]. 科技资讯, 2021, 19 (33): 89-91.

[3] 魏永键. 生态修复在小水电站建设中的应用[J]. 绿色环保建材, 2021(6): 174-175.

[4] 陈林, 曹伟伟, 张鹏伟, 等. 小型水电站开发和生态环境保护协调发展的问题探讨——以叶尔羌河小水电站为例[J]. 地质论评, 2024, 70 (增 1): 333-334.

[5] 王洁瑜, 刘爱环, 文剑然, 等. 水电站退出生态修复研

究——以桐梓河金阳电站为例[J]. 吉林水利, 2023(12): 26-30.

作者简介:

舒伟奇(1991-),男,四川眉山人,助理工程师,本科,从事水利水电工程建设环保管理工作;

陈泽善(1976-),男,甘肃金昌人,学士,高级工程师,从事水利水电工程建设安全环保管理工作.

(编辑:吴永红)