

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

鄢双红¹, 张 练², 漆祖芳¹, 崔金鹏¹, 张雨霁²

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010;

2. 长江水利委员会长江科学院水利部岩土力学与工程重点试验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 导流洞封堵体是水利水电工程蓄水后确保过流安全的关键性工程, 目前针对柱形封堵体的计算方法成果较多, 但对工程中应用较多的楔形封堵体, 设计方法尚不多见。以 Karot 电站导流洞封堵体设计方案为例开展理论和数值模拟分析, 通过楔形体受力分析, 提出了楔形封堵体水压承载能力的计算方法, 并采用三维弹性数值模拟方法, 对比分析了扩挖楔形和柱状封堵体, 结果表明扩挖楔形封堵体校核水位下最大变形 0.8 mm, 其超载安全系数是圆柱形封堵体的 1.08 倍。并通过数值模拟结果与公式计算结果的对比, 验证了楔形封堵体承载力计算方法的合理性和准确性, 对于楔形封堵体的设计具有重要的指导作用。

关键词: 导流洞; 封堵体; 楔形; 圆柱形; 数值模拟

中图分类号: TV222

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0119-04

1 引言

导流洞作为河谷山区水电工程的临时建筑, 也是工程建设前期的重要结构, 在其完成施工导流的任务后, 需要在水库蓄水前进行导流洞永久封堵或另作他用。对于导流洞封堵体的设计, 水工设计规范中仅规定了一般要求, 但封堵体纵断面型式推荐选用楔形。已有针对不同工程的导流洞/施工支洞封堵体设计和安全性分析^[1-8]表明, 在水利水电工程封堵体设计中, 需根据不同的洞室建设需求, 设计不同的封堵体型和采用不同的计算方法。对于柱形封堵体, 由于其不扩挖围岩, 即在开挖支护完成后, 不对围岩和初期支护系统构成二次损伤, 节省工期和投资, 是一种比较经济的堵头型式。对于楔形封堵体, 施工过程相对复杂, 但其较好的受力性能使其在工程实践中应用较多, 但目前相关设计和计算方法较少, 且主要通过具体工程的数值模拟来评价。鉴此, 本文结合巴基斯坦 Karot 水电站导流洞的楔形封堵体开展受力分析, 探索楔形封堵体的承载力计算方法, 并

对比不同型式(楔形和柱形)水电站导流洞封堵体的承载性能及其安全性, 对于楔形封堵体的设计具有很好的参考价值。

2 封堵体设计计算方法

2.1 柱形封堵体

对于柱形封堵体的设计, 《水工隧洞设计规范》(DL/T 5195-2004)^[9]给出了详细的规定及计算公式。目前已有丰富的研究成果可供借鉴, 可通过不同方法对其长度进行设计, 并校核其安全性。

2.2 楔形封堵体

《水工隧洞设计规范》(DL/T 5195-2004)^[9]中建议, 封堵体的型式依据水工隧洞的断面形状、施工条件、工程地质条件等因素选定。封堵体纵断面的型式宜优先选用楔形。结合 Karot 电站导流洞封堵体设计方案, 本文针对扩挖楔形封堵体的受力状态进行分析, 并推导其水压承载力的计算方法。楔形封堵体横断面形式采用轴对称方案, 上半圆保持柱状, 仅在下半圆扩挖楔形, 方案

收稿日期: 2022-11-30, **修回日期:** 2023-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979008); 长江科学院创新团队项目(CKSF2021715/YT)

作者简介: 鄢双红(1967-), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为水利水电工程建设管理, E-mail: yanshuanghong@cjwsjy.com.cn

通讯作者: 张雨霁(1984-), 男, 正高级工程师, 研究方向为隧洞围岩稳定与结构安全, E-mail: magicdonkey@163.com

示意如图 1 所示,该方案在已建的水利水电工程封堵体案例中具有一定的代表性,以此作为代表方案进行分析。

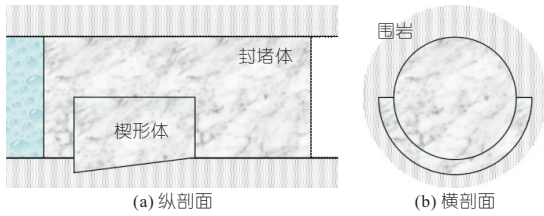


图 1 Karot 电站导流洞扩挖楔形封堵体方案示意

Fig. 1 Illustration of wedge plug of the diversion tunnel at the Karot power station

对于封堵体,关键是分析扩挖楔形段受力,考虑到蓄水后封堵体受水压力较大,为便于受力分析,提出以下假设:①假设封堵体为刚体,其极限状态仅表现在封堵体与围岩的界面达到抗剪强度;②不考虑封堵体上下不对称性引起的弯矩;③不考虑水压力沿垂直方向的分布梯度;④假设应力沿封堵体长度方向均匀分布。

设封堵体楔形段长度为 L_1 (m),圆柱段长度为 L_2 (m),对于圆柱段,其水压承载能力 P_2 为:

$$P_2 = \frac{L_2}{\pi r^2} \left(2\pi r c + \frac{8}{3} r^2 \gamma f \right) \quad (1)$$

式中, r 为封堵体圆柱段半径, m; c 为封堵体与围岩接触面的粘聚力, Pa; γ 为封堵体重度, N/m^3 ; f 为接触面摩擦系数。

式(1)右侧第二项是根据封堵体重力在下半圆接触面不同位置处的垂直分量,可通过积分计算得到。

对于扩挖楔形段的承载能力,暂时不考虑重力影响,对其进行受力分析,受力简图见图 2。其中, P_1 为楔形体水压承载能力, Pa; F_1 、 F_2 分别为楔形体上下两部分与围岩接触面的剪应力, Pa; N_1 、 N_2 分别为楔形体上下两部分与围岩接触面的正应力, Pa。

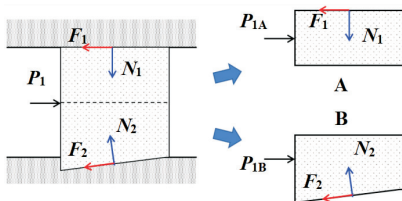


图 2 楔形体受力简图

Fig. 2 Schematic diagram of wedge force

根据假设②,将楔形体拆解为 A、B 两部分进行分析,其中 B 可对称补充上半部分,根据楔形体受力分析,有:

$$\begin{aligned} \pi P_{1B} r^2 &= \pi N_2 (R + r) L_1 \sin\theta + \\ &\pi F_2 (R + r) L_1 \cos\theta \end{aligned} \quad (2)$$

式中, R 为楔形体最大半径, m; θ 为楔形体倾角, $^\circ$ 。

式(2)右边两项分别为扩挖的结构性承载力和摩擦承载力。结构性承载力(即楔形效应),可通过 N_2 达到围岩抗压强度求得;摩擦承载力可通过 F_2 达到接触面抗剪强度求得。通过引入围岩和接触面的摩尔库仑强度准则,可计算得到楔形体的水压承载能力 P_{1B} 为:

$$P_{1B} = \frac{L_1 (R + r) \cos\theta}{r^2} [\sigma'_c (\tan\theta + f) + c] \quad (3)$$

式中, σ'_c 为接触面附近受压围岩的强度, Pa。

在此基础上,补充考虑封堵体重力引起的下半圆接触面摩擦强度,则楔形体的水压承载能力 P_{1B} 为:

$$\begin{aligned} P_{1B} &= \frac{L_1 (R + r) \cos\theta}{r^2} [\sigma'_c (\tan\theta + f) + c] + \\ &4L_1 f \gamma (4r^2 + R^2 + rR) / (9\pi r^2) \end{aligned} \quad (4)$$

通过试算可知,重力引起的接触面摩擦承载力相对很小(小于 1/10),在粗略估算时可忽略重力项,仍采用式(3)进行计算。

同理,根据上半部分未扩挖的圆柱接触面抗剪强度也可算出楔形体上半段的水压承载能力 P_{1A} 为:

$$P_{1A} = \frac{2cL_1 (R + r)}{r (R + r) - 2r^2 f \sin\theta} \quad (5)$$

由此,根据 Karot 电站封堵体的设计方案,楔形体的水压承载能力 $P_1 = (P_{1A} + P_{1B})/2$ 。若考虑楔形体上半部分可能存在灌浆不实等问题,也可忽略上半部分的承载能力,或将其作为安全裕度考虑,则此时全部水压由下半部分的楔形体承担,此时水压承载能力 $P_1 = P_{1B}/2$ 。因此,楔形封堵体整体的水压承载能力为楔形段承载能力与圆柱段承载能力之和,即 $P = P_1 + P_2$ 。

3 Karot 水电站楔形封堵体安全性分析

3.1 Karot 电站导流洞工程概况

Karot 电站导流隧洞位于右岸河湾地块中部,洞径 13.8 m,洞长均为 573.4 m,隧洞中心间距 42 m,共布置 2 条。隧洞区内出露基岩地层主要为上第三系中新统纳格利组 (N_{1na}) 地层,围岩主要为 $N_{1na3-3-2}$ 、 $N_{1na3-3-1}$ 、 $N_{1na3-2-2}$ 层微新中砂岩与泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,多呈互层状,软硬相间,且可能存在层间不连续剪切带,以 IV 类围岩为主, III 类次之,少量 V 类围岩。导流洞封堵体设计方案见图 3。

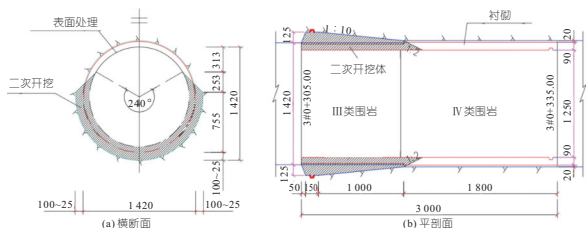


图 3 封堵体设计方案

Fig. 3 Design scheme of the diversion tunnel plug

3.2 模型与参数

根据 Karot 水电站封堵体的设计方案建立三维数值计算模型。计算模型 y 方向沿导流隧洞轴线,指向下流为正; z 方向为铅直方向,向上为正。计算范围为 120 m×110 m×100 m(x×y×z)。

根据 Karot 水电站导流隧洞封堵体布置特点,分别针对扩挖楔形封堵体和圆柱形封堵体进行数值分析,混凝土、围岩本构模型均采用带拉伸破坏的摩尔-库仑模型,采用薄层单元模拟混凝土封堵体和围岩的接触面。计算模型见图 4。

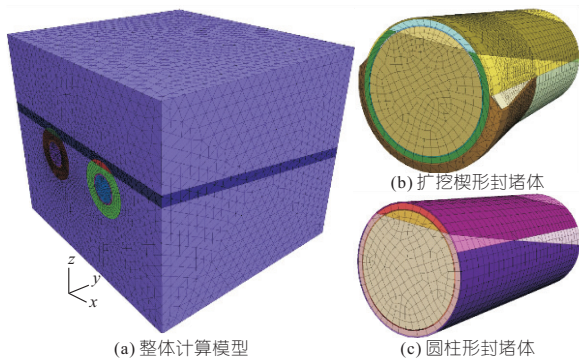


图 4 计算模型

Fig. 4 Numerical calculation model

根据封堵体运行工况,以校核水位(467 m)分析封堵体的受力状态,并采用超载法研究其极限承载能力。计算采用的材料参数见表 1。

表 1 材料计算参数

Tab. 1 Value of numerical simulation parameter

材料参数	重度 γ	变形模量 E/GPa	泊松比	抗剪断强度		抗拉强度 R_t /MPa
				f	c/MPa	
粉砂质泥岩	23.4	2.0~3.0	0.3~0.32	0.50~0.55	0.4~0.5	0.2~0.3
中砂岩	23.0	2.0~2.5	0.26~0.28	0.60~0.65	0.6~0.7	0.2~0.3
混凝土/泥岩				0.45~0.50	0.35~0.45	
混凝土/中砂岩				0.55~0.65	0.6~0.7	
封堵体/衬砌				1.1	1.3	
混凝土堵塞体	24	20	0.167	1.1	1.3	1.5

注:重度 γ 单位为 kN/m^3 。

3.3 封堵体安全性计算结果

校核水位下封堵体和围岩的位移计算结果见图 5.6。由图 5 可看出,在处于迎水面的推力荷载作用下,封堵体沿洞轴线顺水流向的变形量逐渐减小。即当上库水位为校核水位时,对应水头为 467 m,对于扩挖楔形封堵体,最大变形为 0.80 mm,出现在水压力作用面上。沿洞轴线方

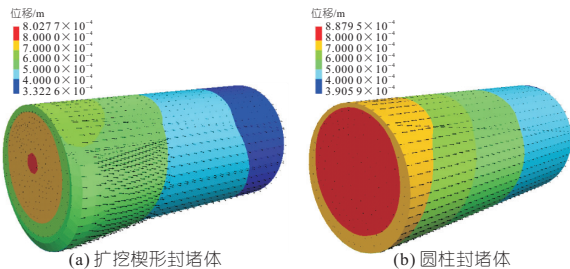


图 5 校核水位下封堵体位移计算结果

Fig. 5 Displacement of the plugs under calibration water level

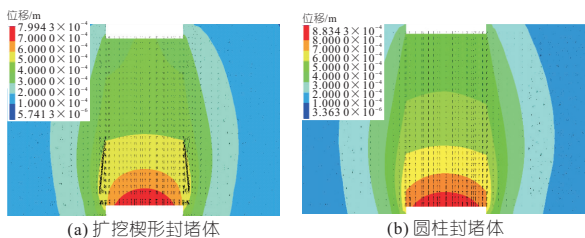


图 6 校核水位下封堵体和围岩位移平切图

Fig. 6 Horizon-slice map of the displacement of the plugs and surrounding rock under calibration water level

向,水压力的压缩变形传递影响范围涵盖整个混凝土封堵体,往下游方向逐渐减小,在混凝土封堵体下游部位变形为 0.40 mm。

由图 6 可看出,封堵体结构的位移分布均呈对称性,两侧边墙位移分布一致。封堵体结构的变形为沿轴向的压缩变形,前端面中部变形最大,往下游和侧墙方向逐渐减小。在洞径方向,水压力引起的变形影响范围约为 1 倍洞径。

对于圆柱形封堵体,封堵体挡水时,封堵体受力特征类似于轴心受压构件,在外水压力作用下,封堵结构在顺水流方向上被压缩,进而在泊松效应作用下,在垂直水流方向呈扩张膨胀趋势,形成对围岩的挤压作用,由此带来混凝土-围岩界面的法向应力增大,形成界面上的附加阻滑力;再加上由于顶拱、侧墙部位接触回填灌浆及底板的直接接触所具有的固有摩阻力和粘聚阻力,能够提供圆柱形封堵体抗滑力的主要有圆柱形封堵体-围岩间的固有摩擦力、粘聚力及泊松效应对围岩挤压作用产生的附加摩阻力等。

楔形封堵体在水压作用下挤压两侧围岩,并将所承担的水压荷载向围岩内部传递。在迎水面的水推力和封堵体-围岩界面阻滑力的综合作用下,封堵体在扩挖形成的楔形区域受到围岩一定的挤压作用。提供扩挖楔形封堵体抗滑力的主要有封堵体-围岩间的固有摩擦力、粘聚力,泊松效应对围岩挤压作用产生的附加摩阻力,以及倒楔形封堵体挤压围岩形成的“夹持效应”所增加的抗滑力。在封堵体-围岩的各种相互作用中,抗剪效应与封堵体混凝土-喷混凝土和喷混凝土-围

岩界面的抗剪性能直接相关;泊松效应则是通过增大作用在界面上的法向力而增加抗滑力;楔形效应则直接利用扩挖范围附近的围岩抗剪性能提供抗滑力。图 7 为扩挖楔形封堵体极限状态下潜在失稳区域示意图,可以看出扩挖楔形封堵体在“夹持效应”作用下,两侧一定范围内的岩体参与了抗滑作用。

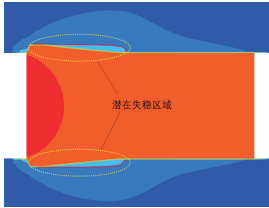


图 7 扩挖楔形封堵体极限状态下潜在失稳区域示意图
Fig. 7 Diagram of potential instability zone of the expansion wedge plug in limit state

在校核水压作用下,主要在靠近上游面边墙处及边墙与顶拱交界处接触面单元产生了剪切屈服(主要由于前端受力变形较大);封堵体仅在迎水面附近出现局部塑性屈服,表明在巨大的迎水面水推力荷载作用下,封堵体不会发生沿封堵体一围岩界面的剪切滑移失稳。可见,封堵体的总体抗滑性能较好,其在运行期的长期抗滑稳定性可以得到保证。

对比圆柱形封堵体,相同水荷载作用下,楔形封堵体位移量相对最小。

3.4 封堵体承载能力分析

由表 1 的计算参数和封堵体设计参数计算封堵体的水压承载能力。其中,考虑到接触面附近围岩在水压作用下处于三向受力状态,以及水压到接触面的传力效率,取围岩围压为 2 MPa,计算可得楔形封堵体设计方案的水压承载力为 16.7 MPa(3.6P),圆柱封堵体设计方案的水压承载力为 6.1 MPa(1.3P)。

为了评价不同型式封堵体的承载能力,以校核水位 467 m 为 P 荷载设计超载水压力,采用超载法,分别计算其封堵体受力变形状态,结果见图 8。

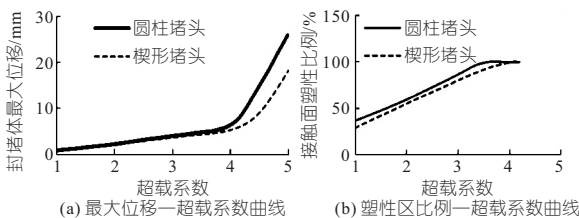


图 8 封堵体受力变形状态

Fig. 8 Stress and deformation of the plug body

由逐渐增大超载系数的计算结果分析封堵体的极限承载能力,可以看出,扩挖楔形封堵体在 3.9P 荷载时塑性区基本贯通,结构失稳,封堵体

可承受的安全荷载为 3.9 倍校核水位荷载(P);圆柱形封堵体可承受的安全荷载为 3.6 倍校核水位荷载,扩挖楔形封堵体超载安全系数是圆柱形封堵体的 1.08 倍。

对比公式计算结果与数值模拟结果,可发现所提出的楔形封堵体承载力计算方法与数值模拟结果基本吻合,表明本文公式对楔形体受力的分析基本合理,可以较好地反映楔形封堵体的受力破坏机制。而柱形封堵体的计算结果与数值模拟结果稍有偏差,主要在于公式计算方法未充分考虑封堵体在水压作用下的侧向膨胀,在较大程度上削弱了接触面的承载能力。

4 结论

结合 Karot 导流洞扩挖楔形封堵体设计方案,进行楔形体受力分析,提出了楔形封堵体水压承载能力的计算方法;针对 Karot 电站导流洞的楔形和柱形封堵体设计方案,采用超载法开展数值对比分析,得到扩挖楔形封堵体校核水位下最大变形 0.8 mm,其超载安全系数是圆柱形封堵体的 1.08 倍。通过对比数值模拟结果与公式计算结果,验证了所提的楔形封堵体承载力计算方法的合理性和准确性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 郅永波.基于渗流—应力耦合的导流洞封堵期结构安全性研究[D].天津:天津大学,2011.
- [3] 魏勇,陈业芹,鲍磊.某水利枢纽工程中导流洞设计的重点与难点分析[J].陕西水利,2019(11):111-114.
- [4] 尚俊伟,杨子江,杨安邦.前坪水库导流洞封堵体综合设计[J].科技推广与应用,2020(9):35-37.
- [5] 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.
- [6] 谭宁.引水系统施工支洞封堵计算方法研究[J].工程建设与设计,2018(21):126-128.
- [7] COGAN J, KINTZER F C. Tunnel plug design at Tyee Lake[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 1987, 24(6):265.
- [8] 汪魁,刘欢,赵明阶.基于抗滑极限状态的水工隧洞堵头可靠性分析[J].水电能源科学,2018,36(1):140-142.
- [9] 水电规划设计标准化技术委员会.水工隧洞设计规范:DL/T 5195-2004[S].北京:中国电力出版社,2004.

Study on Internal Economic Operation of Large Hydropower Station Based on Load Optimal Distribution Table

GAO Ying¹, XU Wei¹, WANG Yan-ling², WEN Xin²

(1. Hydropower Station Remote Centralized Control Center of Guizhou Wujiang Hydropower Development, Guiyang 550002, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Dispatching operation of hydropower station is in face of the large capacity and large units, unit control new scheduling features such as irregular more limits and more complicated operation requirements. To aim at power station safe, stable and economic operation, a model of economic operation inside the station was established to realize optimal load distribution of hydropower station units under various operation conditions. The optimal output range of each unit under different head was analyzed. The optimal load distribution rule of the power station was studied, and the economic operation model of the station was established. Based on the economic operation model of the station, the optimal load distribution table was designed. The optimal load distribution result table of the power station under different loads, different heads, and different unit commitment was proposed to guide the real-time economic scheduling of the power station. Taking Hongjiadu station as an example, the results show that the model can reasonably arrange the start-stop sequence and number of units according to the real-time load instruction, and give real-time start-stop suggestions of units. It can obtain the optimal load distribution combination of the proposed unit under various working conditions, reduce the monthly average water consumption rate by 0.18%, reduce the adverse working conditions such as frequent start-stop and frequent crossing of the vibration zone by 9.5%, ensure the efficiency of the unit operation, and improve the economic benefits of the power station.

Key words: station economic operation; real time scheduling; optimal load distribution; adverse conditions; parallel dynamic programming

(上接第 113 页)

Research on Anti-scouring Characteristics Based on Ecological Slope Protection Jet Test

ZHANG Shi-an¹, LIU Ming-xiao², ZHEN Ying-hong³, LIU Ke⁴

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power,

Zhengzhou 450046, China; 3. School of Architectural Engineering, Kaili University, Kaili 556011, China;

4. River and Reservoir Work Center of Shaanxi Province, Xi'an 710018, China)

Abstract: The mechanical effect of plant roots on soil is an important factor in improving the erosion resistance of slopes, and the relevant research on the impact resistance of plant roots under water flow at home and abroad is in a blank spot. In this paper, the common soil and water conservation plants tall fescue and dogtooth roots were selected as the research objects, and the jet erosion test was carried out on the slope of the plant model, and the erosion failure mechanism of the root slope of different species of plants was compared. The main conclusions are as follows: the variation law of the average erosion depth ΔD_{AE} of high fescue slope, dogtooth root slope and plain soil slope under different working conditions is similar and consistent, and it increases exponentially as a function with the increase of erosion flow velocity and linear function with the increase of erosion angle. The average erosion depth under various working conditions was generally as follows: high fescue < dog tooth root < plain soil; The average erosion depth of high fescue at each flow rate decreased slightly ΔD_{AE} slightly greater than that of dog tooth root. When the scouring angle was fixed, the ΔD_{AE} of each angle was the largest when the flow rate was 1.6 m/s, and the flow rate was higher than 1.6 m/s, and gradually decreased. When the erosion flow rate is constant, there is a decreasing tendency ΔD_{AE} increase with the increase of the scouring angle.

Key words: plant slope protection; model test; water erosion; anti-scour performance

(上接第 122 页)

Structural Safety Analysis and Design Method for Different Types of Tunnel Plug of Large Diversion Tunnel

YAN Shuang-hong¹, ZHANG Lian², QI Zu-fang¹, CUI Jin-peng¹, ZHANG Yu-ting²

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources,

Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The diversion tunnel plug is a key project for the safety of water conservancy and hydropower projects. Wedge-shaped plugs are widely used in engineering. There are many calculation methods for columnar plug, but not so much for the wedge-shaped plug. Based on the design scheme of the diversion tunnel plug in Karot power station, this paper carried out the theoretical and numerical simulation analysis. Through the force analysis of the wedge, the calculation method of the hydraulic pressure bearing capacity of the wedge-shaped plug was proposed. The comparative analysis of wedge and columnar plug safety was carried out by three-dimensional elastoplastic numerical simulation. The result shows that the maximum deformation under the calibration water level of the wedge-shaped plug was 0.8 mm, and its overload safety factor was 1.08 times that of the columnar plug. By comparing the numerical simulation with the formula calculation results, the rationality and accuracy of the calculation method for the bearing capacity of the wedge-shaped plug were verified. The research results have important guiding value for the design of wedge-shaped block.

Key words: diversion tunnel; tunnel plug; wedge-shaped plug; columnar plug; numerical simulation