

文章编号:1001-4179(2001)05-0034-03

水工隧洞堵头设计探讨

甘文喜

(福建省水利水电勘测设计研究院, 福建 福州 350001)

摘要:水工隧洞堵头工程量相对很小,但其作用极为重要,在现行规范中又缺少堵头的设计条款,致使各工程堵头的设计准则和方法不尽相同。通过对应用较多的设计方法进行介绍和分析,结合一部分大型工程采用先进的计算手段对堵头进行三维有限元计算结果表明,用传统设计方法建成的堵头过分偏于安全,为确保堵头的合理设计和安全运行,应积极改进堵头设计和施工时所采用的相应措施,推广先进的计算方法和施工措施,使工程尽快发挥效益。

关键词:堵头设计;水工隧洞;计算方法;施工措施

中图分类号:TV554 **文献标识码:**A

水利水电工程的引水系统施工支洞和导流隧洞在完成使命后,都要用永久性混凝土堵头进行封堵。在运行过程中堵头同周围岩石或混凝土连成整体,共同承担由作用水头产生的水压力。虽然堵头的工程量相对较小,但对水利水电工程的运行安全和工程效益有着极其重要的作用,故将堵头设计等级和相应的水工建筑物的等级等同对待。由于堵头的重要性和所占的投资比重较小,加上直到目前的水工建筑物规范中还没有堵头设计的条款可循以及在多数情况下工期较紧等多种原因,造成多数堵头设计过分偏于安全,不仅毫无必要地增加了工程造价,也使本来相对短暂的工期更趋紧张。本人根据设计经验及掌握的部分资料,对堵头的设计原则、合理长度、体形和相应措施等方面进行了分析和探讨。

1 堵头的设计原则和假定条件

由于堵头设计在水工建筑物设计规范中没有相应条款可循,设计者往往根据各工程的具体情况,拟定出堵头的设计原则,并作出相应的假定进行计算。多数设计者采用的原则和假定如下:①堵头属于永久建筑物,设计和校核标准与相应的水工建筑物相同;②堵头应安全可靠,稳定性和防渗性必须满足使用要求,导流洞的堵头应与大坝的防渗帷幕连成整体;③水头产生的压力(必要时再计入浮托力)是作用于堵头上的唯一外荷载;④堵头是水荷载沿周界产生静剪力的刚性体,剪应力沿周边均匀分布;⑤堵头混凝土的抗压强度是安全的,只作抗滑稳定计算;⑥实际存在的地应力、灌浆压力、围岩高低不平形成的嵌槽抗剪力等作为额外安全储备,不参与计算。

通过对已运行堵头的观测和分析,这些假定基本上满足了堵头的使用要求。近年来,采用有限元对一部分大型工程堵头和周围一定范围内的岩体进行分析计算,也证明了按上述原则和假定设计的堵头是完全能够长期安全运行的。二滩导流洞堵头的模型试验结果也说明刚体假定基本符合实际,堵头在水压

力作用下,周界上产生的抗剪断力,在有效长度内大体上是均匀分布;在水压力作用下产生的剪断力超过抗剪断力,堵头失稳,是沿周界发生脆性破坏。

2 计算方法

大多数设计者对堵头结构的内力只进行定性分析,不作定量计算,按照前述的假定通过稳定计算来确定其长度,满足工程的实际需要。确定堵头长度的方法比较多,对较常用的作如下简要介绍。

2.1 按洞径倍数确定堵头长度

20年前,水工隧洞堵头常用3倍洞径(当时国外有的采用1.5倍洞径)或更大倍数。随着工程实践的增加,其长度逐渐减小。目前采用该种办法确定堵头长度时(多用于水头小的中小型工程)多采用2~2.5倍洞径。这种单一按洞径因素的纯经验方法的最大缺陷是只考虑洞径的影响,没有将堵头长度与作用其上的水头荷载联系在一起,这样就使堵头受力在概念上比较含糊,缺少科学性。

2.2 按经验公式计算堵头长度

通过工程实践,多数设计者通过对投入运行的堵头长度分析,总结出一些经验公式,用得比较多的经验公式有以下两种。

2.2.1 按 $L = (3 \sim 5)H/100$ 选择堵头长度

式中 H 为作用水头, L 为堵头长度。挪威已建的80多个水工隧洞堵头(作用水头150~965m),多用此式去选择(早期个别工程的系数达到11%)其长度,虽然按照这种方法设计的堵头至今都在安全运行,但缺陷较大,不考虑洞径大小(即承受的外荷载),仅按水头大小选择堵头长度,其稳定安全系数差异太大。

2.2.2 按 $L = mHD$ 计算堵头长度

该公式中 D 为堵头的直径,有的设计者建议系数 m 取

收稿日期:2000-06-29

作者简介:甘文喜,男,福建省水利水电勘测设计研究院,高级工程师。

0.012 5,也有的建议取 $m = 0.02$ 。当堵头面积是非圆形时可根据堵头的横断面面积 A 按公式 $D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$ 换算出堵头的等效直径。该计算公式的合理性有了较大的进步,它将堵头的长度 L 表示为作用水头 H 和堵头直径 D 的函数,比较符合实际情况。其缺陷是没有考虑与堵头联合起作用的围岩影响。

经过对大量投入运行堵头的计算和分析,按经验公式 $L = mHD$ 确定的堵头长度,中低水头的抗滑稳定安全系数基本合理,高水头的计算结果太偏于安全。在设计初期和缺乏地质资料时,可用该经验公式来初拟堵头长度和估算工程量。

2.3 用力学各式计算堵头长度

2.3.1 修正的圆柱冲压剪切公式

该公式的表达形式为:

$$L = \frac{A \cdot H \cdot \gamma_1}{aS \cdot [\tau]} \quad (1)$$

式中 A 为堵头横断面面积; H 为作用水头; γ_1 为水的密度; $[\tau]$ 为堵头周界接触面上的允许剪应力; a 为有效接触系数(多数工程取 $a = 0.8 \sim 0.85$); S 为堵头横断面周长。

修正的圆柱冲压剪切公式的表达形式比较简洁、概念明确,应用起来较方便,对于既定工程,决定堵头长度的唯一变量是 $[\tau]$,只要 $[\tau]$ 值选择恰当,就有较好的实用性。

2.3.2 修正的抗剪断公式

修正的抗剪断公式表达形式如下:

$$L = \frac{K \cdot A \cdot H \cdot \gamma_1}{A \cdot \gamma_2 \cdot f' + c' \cdot \sum a_i \cdot S_i} \quad (2)$$

若考虑浮托力作用时,修正的抗剪断公式表达形式为:

$$L = \frac{K \cdot A \cdot H \cdot \gamma_1}{A(\gamma_2 + \gamma_1)f' + c' \cdot \sum a_i \cdot S_i} \quad (3)$$

式中 K 为安全系数(设计 $K = 3.0$ 、校核 $K = 2.5$); γ_2 为混凝土的密度; f' 为堵头抗剪断摩擦系数; c' 为堵头周界接触面的抗剪断凝聚力; S_i 为堵头横断面 i 部位的界长; a_i 为 i 部位界长上有效接触系数(顶部 100° 范围取 0,底部取 1,其它部位取 0.8);其它符号意义同前。

公式(3)较全面地体现了影响堵头长度的各有关要素,受力概念明确,计算结果比较符合客观实践,也与有限元计算结果拟合得较好。

2.4 通过三维有限元计算确定堵头长度

随着计算理论、计算方法的发展和计算手段的不断更新,应用大型电子计算机和大型结构分析程序,对一些大型工程堵头及一定范围的围岩进行三维有限元应力分析计算所需堵头的长度,在一些工程已经得到应用。

如鲁布革导流洞堵头长 23 m(约为洞径的 1.5 倍),通过三维有限元计算表明,13 m 长的第 1 段即可满足安全运行需要;二滩水电站导流洞堵头计算时得出,当堵头长 49 m(相当洞径 2.15 倍)时,可承受的安全荷载在 5 倍设计水头左右;澳大利亚歌登坝的导流洞堵头长度原为 14.6 m(为洞径的 15 倍),经三维有限元分析计算后,实际采用的长度为 6.5 m(约为洞径的 0.6 倍)。这些都说明应用三维有限元对堵头的应力进行分析计算后来确定其长度是完全可行的。天荒坪抽水蓄能电站的 6 号施工支洞堵头承受 680 m 水头压力,选用 Super SAP91 版程序分析后,无论是堵头内轴向应力 σ_x 、沿隧洞环向应力 σ_θ ,还是传向岩石的

应力 σ_r ,影响值较大的范围均约为 1 倍洞径的长度,堵头长度超过 1.5 倍洞径后, σ_θ 、 σ_r 的值已非常小。天生桥一级水电站导流洞的堵头长度,通过三维有限元分析计算后,由原设计的 40 m 缩短为 21 m(约为洞径的 1.5 倍),两条导流洞共节约堵头混凝土 7 156 m^3 。

应用三维有限元分析计算,确定堵头长度及其周围不良岩体应采用的加固措施,是水工隧洞堵头设计的发展方向,它不仅可以减少工程量、节省投资,而且缩短堵头的施工时间,使工程提前运行并尽快产生效益,值得推广和应用。

3 堵头的体型和防渗

为了增加水工隧洞堵头的抗滑稳定,设计者往往在计算时按柱形考虑,实施时再增设抗剪键槽。如澳大利亚的马肯托斯、马奇圣和里斯电站的导流洞堵头;乌江渡水电站导流洞堵头,不仅设有抗剪键槽,而且还将前端浇成拱形(拱座伸入侧壁)。在导流洞堵头上设抗剪键槽不仅对过流有一定影响(过水前将键槽处的岩石先行开挖),而且容易发生气蚀。若在下闸蓄水后进行键槽开挖,不仅难度大(特别是洞径较大时),而且很难满足完成堵头混凝土浇筑时间要求。为了简化施工程序,从 80 年代起堵头的抗剪键槽从多个演变到 1 个,从矩形演变到齿形,并逐渐由全周界过渡到仅在边墙或底部设抗剪键槽。近 10 年许多工程,如漫湾、二滩、天生桥一级等特大型水电站都将导流洞堵头设计成“瓶塞”形。随着科学技术的不断发展,工程实践的增加和施工技术的提高,堵头体型必将继续简化,将承受高水头的堵头体型设计成柱形(不设抗剪槽),这在芹山水电站导流洞封堵中已有应用。天荒坪电站施工支洞堵头体型优化设计时,通过有限元对堵头界面上的正应力 σ_n 和剪应力 τ_n 的分析计算表明,体型较复杂的堵头其应力状况并不理想,对于前端略大于后端的堵头,其界面上的应力比较理想。

水工隧洞封堵后的渗漏有 3 方面原因造成,① 地质情况复杂,堵头周围的岩体存有漏水通道和较发育的渗水裂隙;② 堵头周界(特别是顶部)存在有贯通的缝面;③ 在压力水头作用下堵头本身和其一定范围内围岩的渗水。通常由前面两个原因引起的渗漏量比较大,必须通过工程措施进行处理。将导流洞堵头布置在防渗帷幕处,就是为了防止由于地质情况没有查明引起渗漏量大时,可以通过加深帷幕来封堵裂隙。对于堵头周界的缝面,经过回填灌浆和接触(缝)灌浆后,一般都不会产生漏水。至于压力水头作用形成的渗流,其流量通常较小,对堵头和周围的岩石不会引起失稳破坏,故通常是根据水力梯度的大小,对堵头混凝土提出一定的抗渗要求。堵头的洞室若有特殊用途,需要估算渗水量时,可将渗流场简化并假定为符合达西定律的问题来处理,估算渗水量公式如下:

$$Q = KA \frac{H}{L} \quad (4)$$

式中 Q 为渗水量; K 为渗透系数; A 为渗流断面面积; H 为作用水头; L 为渗径长度。

计算时对堵头和围岩的渗水量分别计算再叠加。围岩的渗水量计算时,渗流影响区的半径可取堵头等效半径的 3~5 倍。

4 灌浆和温控措施

4.1 灌浆压力设计

为使堵头周界能够和围岩或衬砌混凝土紧密结合,确保接触面上所提供的抗剪断凝聚力和产生沿堵头周界渗漏,通常

对堵头顶部必须进行回填灌浆;并对侧墙和顶部进行接触(缝)灌浆。当堵头所在位置的围岩不良时,还应 对岩体进行固结灌浆。在以往的设计中回填灌浆压力一般都没有超过 0.5 MPa,接触(缝)灌浆压力多数采用 0.5~0.8 MPa,随着施工设备性能的提高和施工技术的改进,宜将堵头顶部约 90°~120°范围内的回填灌浆压力提高到 0.8~1.0 MPa(有的设计者建议为 0.8 倍堵头上的作用水头);接触(缝)灌浆压力提高到 1.0~1.5 MPa(有人建议取 1.2~1.5 倍堵头上的作用水头),使堵头周界上产生附加径向应力,同周围岩体间出现相互作用的弹性抗力,使设计假定得到保证和加强。对于接触(缝)灌浆,可推广东风电站的经验,在堵头混凝土中掺入复合膨胀剂或氧化镁,对堵头混凝土的膨胀量进行有效控制,以便取消接触(缝)灌浆。

4.2 温度控制措施

堵头属大体积混凝土,通常都要进行堵头温度控制措施设计,其目的是为了防止堵头产生裂缝和确定达到接触(缝)灌浆温度时所需要的时间。由于堵头所处的环境比较特殊,大量的

温度和温度应力分析成果以及堵头运行实践说明,采取一定的温控措施后(没有必要对每一个堵头都进行温度应力分析计算),堵头不会产生沿洞轴线的纵向贯穿裂缝,也不会发生横向贯穿裂缝。

对堵头温控问题所采用的比较普遍的措施主要有:① 采用水化热比较低的水泥,并限制每方混凝土中的水泥用量,适当掺加粉煤灰;② 选择低温时段浇筑堵头混凝土;③ 在堵头内埋设冷却水管通水冷却;④ 在堵头内埋入温度计和测温计。

随着科学技术的发展和新技术的推广应用,可采取对堵头施工速度有较大影响的温控措施,如在堵头混凝土内掺入氧化镁,利用氧化镁延迟性微膨胀与大体积混凝土降温收缩变形大体协调的特性来防止堵头产生裂缝和提高堵头与围岩的相互接触,并取消冷却水管,为加快堵头施工和减少部分灌浆工程量创造条件。

(编辑:喻伟)

(上接第 16 页)

形试验。另外,对这两种代表性层位的防渗墙体各进行了一组试样的抗渗试验。

两组水泥土样品的抗压强度和变形模量都比较接近。抗压强度分别为 0.87~1.33 MPa 和 0.85~1.53 MPa;变形模量分别为 0.79~1.21 GPa 和 0.76~0.96 GPa。素混凝土墙部位样品的抗压强度为 20.9~36.6 MPa,变形模量 7.55~11.4 GPa。根据抗渗试验,渗透系数均小于 10^{-7} cm/s,抗渗比降均大于 50。所以,全部试验结果均满足设计要求(见表 1、表 2)。

5.2 防渗加固处理效果初步检验

1999 年汛前,在主泡泉区完成了 300 m 长的防渗墙施工。1999 年 7 月,堤外鄱阳湖水水位仅比 1998 年的最高水位低约 0.6 m,而已做防渗墙的堤段内原有的泡泉群已不再现,表明用此工法所造的防渗墙能有效地解决堤基深部的渗漏问题。

6 关于钻孔压浆成墙施工法的讨论

钻孔压浆成墙法与现有的其它堤防加固工法比较,归纳起来有以下特点:

(1) 对地层的适应性较强。根据该工法已有的工程实例看,此工法可适用于填土、淤泥、流沙、砂砾石等各种堤基,对软岩也有成功的实例。

(2) 施工过程中不需要进行泥浆护壁,且不受地下水位影响。

(3) 防渗墙连续性好。该工法除保证钻具在地上的倾斜度 $<0.1\%$ 以外,地下墙体连续性主要靠两方面控制:① 3 个在钻头部位互相连接的 $\Phi 168$ mm 钻杆组成的钻具,刚度明显比其它深层搅拌工法高;② 槽孔之间搭接施工,搭接部位土层已经注浆搅松,钻具自然有向上一槽孔倾斜的趋势(实际观察也如此)。

(4) 防渗墙深度在 20~30 m 范围时,该工法具有明显的优势。当防渗墙深度在 20 m 以内时,已有多种工法在经济指标及质量上能满足要求,如多头小口径深层搅拌工法等。但当防渗墙深度达到 30 m 或更深,则经济可靠的施工工法非常有限。从

防渗质量及经济指标方面看,钻孔压浆成墙法应该具有很好的应用前景。

(5) 施工过程中材料浪费少。钻孔压浆成墙法是利用螺旋钻成槽,并向孔内注入水泥浆,利用钻杆上的螺旋叶片将水泥浆与粘土和砂土就地搅拌均匀形成墙体。各槽孔连续作业,基本上无水泥浆从孔口流失,这比高喷工法优越。

(6) 施工效率高。根据绵牛墩堤段的施工效率统计,平均每台班可完成防渗墙 200~240 m^2 。如果钻机钻进过程顺利,则工作效率可提高到 300 m^2 /台班或更快。

通过本次施工,也发现该工法有值得改进的地方,主要是解决卡钻问题以提高工效。在绵牛墩堤段的施工过程中,曾发生了几次严重的卡钻现象。其中二次卡钻,不得不将埋入堤基下部的钻具部分丢弃。卡钻也影响施工进度。通过现场施工,已总结出一些解决办法:

(1) 尽量提高钻具的动力扭矩。对一定功率的钻机而言,钻具动力头的扭矩愈大,转速愈小。根据不同的地层特点,应选择好合适的变速箱与动力头扭矩。

(2) 改进设备结构,利于槽孔侧壁稳定。现在的施工工法中,防渗墙槽孔位于履带式钻机的一侧,钻机重达 100 t,加上钻具上拔的巨大反力,都作用在防渗墙槽孔一侧,不利于槽孔的稳定,容易造成在槽孔内的钻具受挤压而卡钻。应采取措施,改进设备机座结构和优化钻具位置,以减小槽孔周围压力分布的不均匀性。

总之,将该工法用于堤防的防渗墙施工,潜力很大。另一方面,该工法应在实践中不断得到改进,以减少故障,提高施工的工效。

致谢

参加此项目施工组织的有:长江科学院陈芙蓉、张奇华、李飞、孙厚才、田开圣、吴相超,威海建筑集团公司周建威、石午江、刘昌等。余干县水利局苏进鹏、黄英仁对此项目的实施给予了极大支持,在此表示感谢。

(编辑:徐诗银)