

高压隧洞的设计及应力分析

陆晓敏 刘启钊

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘要 对高水头大直径钢筋混凝土衬砌压力隧洞的设计准则和结构分析方法进行讨论分析,提出高压隧洞应按不衬砌隧洞进行设计,内压主要由围岩承担,衬砌的主要作用是平整洞壁,防止围岩坍落;外压有可能是衬砌设计的控制情况,增加抗外压圈的厚度能显著提高衬砌抗外压的能力。

关键词 钢筋混凝土 衬砌 压力隧洞 设计准则 有限单元法 水力劈裂

隧洞是水工建筑物引水系统的重要组成部分。在大型水电站的设计中,人们经常会遇到高水头大直径压力隧洞的设计问题,特别是在近年蓬勃发展起来的抽水蓄能电站中。如我国已竣工的广州抽水蓄能电站^[1]的R.C.衬砌高压引水隧洞内径为8.5m,静水头达600m;在建的浙江天荒坪抽水蓄能电站^[1]R.C.衬砌压力隧洞内径为7.0m,最高水头达800m。随着更多的大型水电站和抽水蓄能电站的修建,高水头、大直径R.C.衬砌压力隧洞的设计问题显得越来越重要。本文就高压隧洞设计中的两个重要问题,即岩石覆盖厚度和衬砌围岩应力分析方法进行讨论,同时提出一些新的设计思想。

1 隧洞岩石覆盖厚度设计准则

有压隧洞充水后,衬砌中将产生环向拉应力。如衬砌和围岩的弹性模量相等,把隧洞看成无限大平面中的孔洞问题,则对于圆形断面,在均匀内压 P 作用下,衬砌内壁产生的环向应力 $\sigma_\theta = P$ ^[2]。假设混凝土的抗拉强度为1.6MPa,则水头只有小于160m时,衬砌才不会开裂。对于高水头压力隧洞,水头将

是160m的几倍,所以混凝土衬砌必然开裂,围岩将是内压的主要承担者。故对高压隧洞的设计都应视为不衬砌隧洞来分析。

隧洞在高水头压力作用下,如围岩不出现水力劈裂,且又能有效地控制渗漏,那么隧洞运行是安全的。为了能有效防止水力劈裂,隧洞必须要有一定的埋置深度,即要有一定的岩石覆盖厚度。目前确定压力隧洞岩石覆盖厚度的方法有挪威准则、最小主应力准则和实测地应力法。

1.1 挪威准则

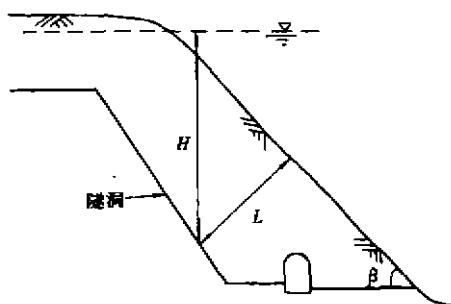
挪威准则属于经验法^[1],它认为水力劈裂和大量漏水与内水压引起岩石“上抬”有关,故人们还常称其为“上抬准则”。目前所说的挪威准则都是指第三挪威准则,其公式为

$$K = \frac{L\gamma_R \cos\beta}{\gamma_w H}$$

式中 K 为安全系数; γ_w , γ_R 分别为水和岩体的密度, H 为该点的静水头; L 为隧洞或斜井某点距地面的最短距离, β 为山坡的平均倾角,见附图。

挪威准则旨在防止平行于谷坡的节理面开裂,也就是防止上抬。在使用时,为安全起

第一作者简介:陆晓敏,男,硕士、讲师,结构力学专业,从事水工结构研究,曾发表《地下隔壁式钢筋混凝土岔管的应力研究》等论文。



附图 覆盖范围的挪威准则

见局部突出地形需削平,其对地应力的影响不考虑。安全系数 K 还没有一个公认的值,不同的工程(地质情况)取值不一样,仍是一个有待继续研究的问题,但一般取值在 1.2~1.3 之间。挪威准则的可靠性在实际工程中得到了充分的证实,满足此准则的工程绝大部分不漏水或少量漏水。在初设阶段完全可以用挪威准则来确定压力隧洞的位置。

1.2 最小主应力准则

最小主应力准则认为水力劈裂的发生与该点的最小主压应力 σ_3 有关。当 $\sigma_3 < H$ 时,岩体有可能发生水力劈裂,所以把 $\sigma_3 > H$ 作为决定岩石覆盖厚度的条件,这就是最小主应力准则。由于岩体主应力大多用有限元法求解,故此准则也称为有限单元法。采用有限单元法求解主应力能考虑不同岩体材料,在一定程度上能模拟断层、节理等结构面,也可以反映河谷形状及坡角对地应力的影响。但目前工程中有限单元法还没有作为设计的依据,仅作为校核和参考。

事实上,岩体不是连续介质,岩体中存在很多断层、节理裂隙等结构面。由于这些结构面的强度与完整岩体相比要弱得多,水力劈裂往往首先发生在这些薄弱结构面上,尤其是那些在法向约束不强的结构面,这些面上的法向应力是水力劈裂的控制条件。因此,在高压隧洞设计时,要特别重视这些结构面及其力学参数。

1.3 实测地应力法

结构面上的应力很难用数值模拟方法求得,实测地应力将是一个比较有效的方法。如果有隧洞区域的地质资料及实测的地应力

资料,则可以求出各结构面上的法向应力 σ_n ,如 $\sigma_n > H$,则可以避免水力劈裂。这就是所谓的实测地应力法,在工程中已得到广泛使用。但受设备和经费的限制,不可能在大范围内进行地应力量测,再加上岩体及地应力的复杂性,地应力量测值存在着较大的波动性,量测的精度及如何用有限个点的地应力值来表征区域内地应力的分布等一些问题还有待人们进一步探讨。现场测试地应力是高压隧洞设计中不可缺少的工作,通过现场量测可以了解该区域地应力的量级以及为其它分析方法提供依据。

水力劈裂法是量测地应力的一种方法。通过高压注水,当水压大于节理面上法向压应力时,节理张开,渗漏增加,从而可测得节理面上的应力。此法直接且有较高的精度,但费用颇高,应结合具体工程的实际地质情况决定是否采用。

以上几种确定岩石覆盖厚度的方法,实质上都是要避免发生水力劈裂。对于高压隧洞,水力劈裂可能会引起严重的漏水,造成水量损失,且还可能会因渗漏引起岩体或边坡的稳定破坏。几种方法在设计时应综合使用,挪威准则可先用来确定隧洞的大体位置,然后用其它方法来校核和修正。如把有限元法和实测地应力方法结合起来能得到更为可靠的结果。对地形地质复杂的工程,最好同时使用这几种方法。不管采用何种方法,高压隧洞应尽可能建在新鲜完整坚硬的岩体中,岩体的完整性直接影响着隧洞的安全。

2 衬砌及围岩的应力分析

隧洞所受的荷载主要是水压力,运行时衬砌和围岩受内水压力作用,引水系统放空时又受外水压力作用。目前在进行结构应力分析和设计时,观点不尽统一,对水压力常有面力和体力两种假设。

2.1 内压情况下的应力分析

尽管由于施工质量及温度应力作用,在充水之前衬砌中就存在微小裂缝,但一般不

会出现贯穿性裂缝。故在刚充水时,水压力可以作为面力分析。在高水头作用下,衬砌中将产生很大的环向拉应力。笔者曾计算一工程实例^[3],衬砌厚60m,弹性模量 2.85×10^4 MPa,围岩弹性模量 5.9×10^4 MPa,内径7m,在800m内压作用下衬砌中产生了4MPa的环向拉应力,远超过了混凝土的抗拉强度,衬砌开裂,同时内水外渗,此时水压已不是面力,而是体力。由于高压隧洞衬砌必然开裂,面力作用只是在短时间内存在,运行过程中结构一直处在体力作用下,因此衬砌设计时应考虑体力为主。

以往衬砌常按限裂设计,即允许开裂,但裂缝宽度不得超过规范值,从而控制钢筋应力。设计时由于衬砌开裂,其刚度不考虑,只计钢筋的抗拉能力,且设其应力已很高(容许应力),内压按面力考虑,根据变形协调来计算配筋量。按此方法,对于高压隧洞其钢筋用量相当大。这种假设与实际情况有很大差异,衬砌开裂后,钢筋应力有所提高,但由于受到围岩的约束,其变形不可能很大,因而,钢筋应力也不会很高,尤其是在新鲜坚硬的岩体中。在上一工程实例中,用非线性有限元方法分析得到钢筋应力水平在50~70MPa之间,钢筋远未发挥作用。可见,衬砌和钢筋都不是内压的主要承担者,衬砌的作用主要是平整洞壁,减低糙率,防止围岩坍落等。因此,在设计时,衬砌不必太厚,钢筋也不必配置过多,按最小配筋率配置即可。钢筋的作用主要是防止衬砌产生集中性裂缝。

另外,衬砌开裂后内水压力不再是面力,而是体力,衬砌承担的压力与衬砌和围岩的相对渗透系数有关。显然围岩渗透系数越小,它将承担更多的内水压力,此时在径向衬砌和围岩间将承受拉力,这一点与面力不同。衬砌和围岩的接触面往往是强度薄弱的地方,对于高压隧洞接触面上的拉应力完全有可能大于其抗拉强度,从而导致衬砌与围岩脱开,钢筋应力反而减小。如广州抽水蓄能电站的充水试验与高压试验洞的实测应力反

映了这些特点。试验发现衬砌大约在1.6~2.5MPa之间开裂,开裂后应力反呈下降,最大内压时钢筋应力与混凝土变形都很小,甚至有些呈受压状态。这再一次说明对于高压隧洞,衬砌不再是内压的主要承担者,围岩决定着隧洞的承载能力,在设计过程中应采用这些新的观点。

2.2 外压情况下的应力分析

当引水系统放空检修时,衬砌和围岩将受到外水压力的作用。目前还没有比较公认的外压分析模型,分析外压时同样有面力和体力两种假设。

面力法认为,在外水压力作用下,衬砌裂缝有所闭合,外水以面力直接作用在衬砌外侧,但水压力值很难估计。故一般都假设单位外压(如100m水头),以此来分析衬砌单独承载外压的能力;另一模型考虑到一些工程措施(如设置锚杆、灌浆等)对提高衬砌抗外压能力的作用,假设一定厚度的围岩与衬砌共同承担外压,外压作用在衬砌围岩复合圈的外侧。同样此模型很难估计围岩厚度和外压值,一般常假设一围岩厚度,以此来分析抵抗某一外压值所需的围岩厚度,为设置锚杆的长度和灌浆孔的深度提供参考数据。以上述工程实例作有限元分析,60cm厚衬砌单独承担100m外压时,衬砌中将产生6.98MPa的压应力,而再加相同厚度的围岩后,衬砌中的压应力降至2.74MPa。由此可见,当衬砌单独承担外压时,衬砌将产生较大的压应力,所以对于高压隧洞外压有可能是衬砌设计的控制情况。另外还可以看到,增加抗外压圈的厚度能显著提高衬砌抗外压的能力。设置锚杆灌浆等工程措施能提高衬砌与围岩的整体性,因而也能增强其抗外压的能力。

外压按体力分析认为衬砌和围岩是透水的。衬砌所受的外压与衬砌和围岩的相对渗透性有关,在形成稳定渗流场之前,渗透压力还将与时间有关。围岩通过灌浆处理,渗透系数减小,它将承担更大部分的外压,这对衬

(下转第45页)

$= |B_{i+1} - B_i| \leq [\Delta B]$, 控制迭代次数, 式中 $[\Delta B]$ 为选定的相邻两次迭代值之差。通过多次设计实践表明, 一般只要迭代 3 次, 其精度即可达到工程设计要求。

3 工程实例

a. 某渠道横断面形状为悬链线形, 其设计通过流量 $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$, 渠道纵坡 $i = \frac{1}{1000}$, 糙率 $n = 0.014$, 经考虑选用 $\eta = 3.21223$ 。由式 (15) 可计算出: $a = 0.6407 \text{ m}$; 于是可求得 $B = a\eta = 2.0638 \text{ m}$; 由式 (10) 计算出 $h_0 = 1.0269 \text{ m}$ 。

b. 某渠道横断面形状为抛物线形, 其形状参数 $p = 0.917$, 通过流量 $Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$, 渠底纵坡 $i = 1/1000$, 糙率 $n = 0.014$ 。取 $[\Delta B] = 0.02 \text{ m}$, 由式 (16) 得

$$B = 2.121 \left[\frac{pB}{2} \sqrt{1 + (pB)^2} + \frac{1}{2} \ln(pB + \sqrt{1 + (pB)^2}) \right]^{2/15}$$

初设 $B_0 = 3.0 \text{ m}$, 依次迭代得: $B_1 = 2.621 \text{ m}$, $B_2 = 2.546 \text{ m}$, $B_3 = 2.530 \text{ m}$, 于是 $\Delta B = |B_3 - B_2| = 0.016 < 0.02 \text{ m}$ 。迭代 3 次后停止, 已满足精度要求。由此可计算出相应的正常水深 $h_0 = pB^2/4 = 1.467 \text{ m}$ 。

4 结 语

a. 抛物线形、悬链线形明渠横断面尺寸设计直接求解公式, 具有结构简单、直接求解一次成功、计算成果准确等特点, 避免了传统试算法要进行反复试算的弊端, 且精度是以往的试算法难以达到的。关于上述两种形式的曲线形横断面尺寸直接求解公式中的 η 值的确定, 应结合具体情况分析确定, 并在可能的情况下, 以采用接近水力最佳断面的 η 值为佳。

b. 本文提出的两种曲线形明渠正常水深迭代公式收敛迅速。实践证明, 即使初始假设值距真值较远, 一般经 3~4 次迭代便迅速逼近真值, 方法极为简捷, 为工程设计者提供了方便。

参考文献

- 1 季国文. 方圆形无压隧洞横断面水力计算. 海河水利, 1995(3): 30~33
- 2 季国文. 圆形无压隧洞水力计算的简化公式. 海河水利, 1994(6): 32~33

(收稿日期: 1996-04-11 编辑: 张志琴)

(上接第 36 页)

砌是有利的。开裂后的衬砌裂缝不可能完全闭合, 岩体也不可能完全不透水, 外压按体力分析与实际情况应更为符合。利用稳定渗流场理论^[4], 按体力分析发现, 衬砌中的压应力比按面力分析的结果小得多。可见延长隧洞放空时间, 衬砌在抗外压方面不存在太大问题, 实际工程的运行也说明了这一点。如在重要部位(如岔管)外设置排水系统, 这对衬砌抗外压更为安全。

参考文献

- 1 曹克明. 高压隧洞设计讨论. 见: 钟秉章主编. 水电站压力管道岔管蜗壳. 杭州: 浙江大学出版社, 1994. 1~7
- 2 徐芝纶. 弹性力学 上册. 北京: 人民教育出版社, 1982. 85~87
- 3 刘启钊, 陆晓敏. 高水头大直径地下钢筋混凝土岔管研究. 水电站压力管道岔管蜗壳. 杭州: 浙江大学出版社 1994. 187~191
- 4 陆晓敏, 黄文雄. 抽水蓄能电站的建筑物. 水利水电科技进展, 1995, 15(2): 15~18

(收稿日期: 1995-12-29 编辑: 熊水斌)

·简 讯·

建于法国布列塔尼半岛的 Rance 潮汐发电站已运行 30 年, 现已决定, 对该电站再投资 7610 万美元, 计划在 10 年内进行整修和设备更新, 整修工程的重点是 24 台水轮机。该电站是法国布列塔尼半岛唯一的大电站, 提供该岛 90% 用电, 每年发电量达 6 亿 kW·h。

(熊莉芸供稿)