

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.06.013

导流洞边顶拱拆模时间分析研究

李萌¹, 杨军义², 杨俊峰¹

(1. 陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司, 陕西 礼泉 713208;

2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 东庄水利枢纽工程导流洞成洞尺寸为17 m×19 m, 过流流量大, 边顶拱衬砌浇筑采用钢模台车施工。为了保证隧洞的结构安全和施工效率, 在考虑超挖因素的影响下, 采用有限元数值模拟方法对边顶拱衬砌施工期的荷载进行分析, 通过结构所承受的拉应力与材料试验的抗拉强度相比较, 确定拆模时间为60 h~72 h。实践表明, 导流洞边顶采用的拱拆模时间是合理可行的, 施工进度可控, 模板拆除后无结构性裂缝, 混凝土变形量小, 可为实际工程施工和安全评估提供重要参考。

关键词: 导流洞; 边顶拱; 拆模时间; 三维有限元分析

中图分类号: TV551.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)06-0073-04

Stripping Time of Form Work for the Top Arch and Sidewall of Diversion Tunnel

LI Meng¹, YANG Junyi², YANG Junfeng¹

(1. Shaanxi Dongzhuang Water Control Project Construction Co., Ltd., Liquan, Shaanxi 713208, China;

2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: Steel form work trolley technology is used to the diversion tunnel with over current flow rate for Dongzhuang Water Control Project and the size is 17 m×19 m. In order to ensure the structural safety and construction efficiency of such a large tunnel, a finite element calculation method considering the influence of over cut factor is adopted to analyze the load of the side top arch lining during the construction period. By comparing the tensile stress of the structure with the tensile strength of the material test, the reasonable form work stripping time is determined to be 60~72 hours. The practice shows that the form work stripping time is reasonable and construction schedule is controllable. After the form work is removed, there is no structural crack and the concrete deformation is small. It can provide an important reference to the construction and safety evaluation for practical engineering.

Keywords: diversion tunnel; top arch and sidewall; form work stripping time; three-dimensional finite element analysis

目前水工隧洞边顶拱衬砌施工优先选用模板台车, 随着国内水工隧洞的断面尺寸、过流流量、过流流速和混凝土标号的不断提高, 施工工艺也得到了长足发展^[1-2]。为了提升隧洞的施工效率, 在保证结构安全性的前提下, 研究分析拆模时间显得尤为重要。《水工混凝土施工规范》^[3] (SL 677—2014) 规定, 采用模板台车进行隧洞混凝土衬砌施工, 拆除

模板台车时, 应符合以下要求: 直立混凝土的强度不得小于0.8 MPa; 拆模时混凝土能承受自重, 并且表面和棱角不被破坏。洞径不大于10 m的隧洞顶拱强度可按照达到5.0 MPa控制; 洞径大于10 m的隧洞顶拱混凝土需达到的强度, 应进行专门的论证; 隧洞混凝土衬砌结构承受围岩压力时, 应经计算和试验确定脱模时混凝土需要达到的强度。

目前国内高水头、大流量、大断面的水工隧洞越来越多,许多学者专家开展了混凝土拆模时间研究,赵路^[4]结合三板溪水电站研究了拆模时间对混凝土温度应力的影响;段斌等^[5]采用英国规范对深溪沟水电站导流洞混凝土的拆模时间进行了研究;王玉孝等^[6]采用结构力学方法确定了拉西瓦水电站的拆模时间;何文战等^[7]采用三维有限元方法研究了巴基斯坦的卡洛特水电站导流洞边顶拱衬砌混凝土的拆模时间;相昆山等^[8]研究了衬砌拆模时间为 24 h、36 h 对混凝土强度的影响,为优化台车循环时间、加快施工进度取得了良好的经济效益。但由于每个水工隧洞衬砌受施工环境、施工工艺及混凝土材料性质等因素差异^[9-11],目前还没有统一、明确的脱膜时间节点,特别是对考虑超挖因素的影响下的拆模时间还有待进一步研究,因此十分有必要对超挖的边顶拱衬砌混凝土的拆模时间进行专门的研究。

1 工程实例概况

东庄水利枢纽工程位于黄河的二级支流泾河大峡谷出口段以上 29 km,大坝为混凝土双曲拱坝,最大坝高 230 m,水库总库容 32.76 亿 m^3 ,该工程是黄河水沙调控体系中重要的水库,是渭河流域唯一的防洪减淤控制性骨干工程。东庄水利枢纽工程初期导流采用单一隧洞导流,导流洞设计过流流量 5 300 m^3/s ,导流标准为全年 10 年一遇洪水标准。

导流洞进口高程 593.00 m,出口高程 589.81 m,导流洞全长 912.5 m,隧洞底坡 3.5‰,衬砌后断面尺寸 17 m $\times$ 19 m(顶拱 120°)。导流洞围岩为灰岩,以Ⅱ类和Ⅲ类为主,局部存在Ⅳ类围岩,衬砌厚度主要分为 0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.5 m、2.2 m 和 2.5 m 六种。导流洞洞身结构采用城门洞型,施工时先浇筑底板衬砌混凝土,后浇筑边墙和顶拱;底板采用新型微砂模板,边顶拱采用钢模台车浇筑。洞身衬砌混凝土轴向分缝长度 12 m,底板采用 C₉₀ 40W6F100,边墙和顶拱采用 C₃₀ W6F100,浇筑方式采用混凝土罐车运输,泵送入仓。本文在之前专家学者的研究基础上,采用三维有限元方法,考虑超挖因素的影响下,研究分析东庄导流洞边墙顶拱混凝土的拆模时间。

2 导流洞衬砌的有限元计算

通过建立不同衬砌厚度的三维有限元模型,进行有限元计算,确定出钢模台车拆模时,边顶拱混

土衬砌的位移和应力,结合材料试验的成果,确定拆模时间。

2.1 有限元计算模型

导流洞洞身衬砌混凝土轴向分缝长度 12 m,所以将一个 12 m 的混凝土衬砌段作为整体模型进行有限元分析,图 1、图 2 为衬砌厚度为 0.6 m 的混凝土衬砌三维有限元模型。模型以水平面内垂直于洞轴线方向为 X 轴方向,以铅直方向为 Y 轴,以顺水流方向为 Z 轴方向,X 轴方向以向左为正,Y 轴方向以铅直向上为正,Z 轴方向以顺水流方向为正。模型全部单元均采用 Solid 185 单元,共剖分单元 8 700 个,其中底板部位 3 240 个单元,边墙和顶拱部位 5 460 个单元。

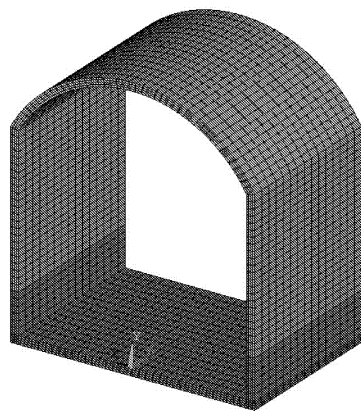


图 1 混凝土衬砌三维有限元模型

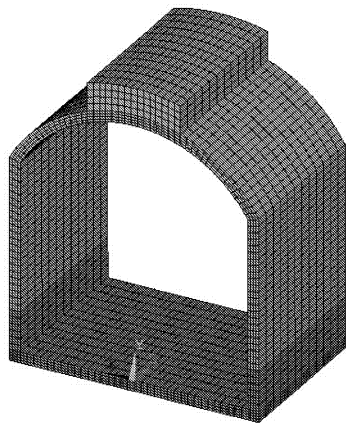


图 2 混凝土衬砌三维有限元模型(考虑顶部超挖)

2.2 计算荷载

由于导流洞围岩地质条件良好,根据监测资料,混凝土衬砌浇筑时,围岩变形早已经收敛,因此不用考虑作用在衬砌上的围岩压力。混凝土浇筑时,从两侧边墙向上部依次分层浇筑边墙混凝土和顶拱混凝土,此时混凝土的自重由钢模台车承担。钢模台

车拆模后,衬砌自重由衬砌结构独立承担,由于顶拱混凝土浇筑最晚,所以钢模台车拆模时,顶拱部位的混凝土龄期也最短,其强度也最低,承载能力也最弱。综合考虑,钢模台车拆模后的衬砌结构的受力状态,考虑顶拱范围内的超挖 1 m~2 m(本次计算取 2 m),衬砌结构独立承受自重,锚杆和顶部钢筋的联合作用作为安全储备,在计算中不再考虑。

2.3 材料参数

根据《大体积混凝土温度应力与温度控制》^[12]中推荐,混凝土的弹性模量采用公式(1)拟合:

$$E(\tau) = E_0(1 - e^{-a\tau^b}) \tag{1}$$

式中: E_0 为混凝土最终的弹性模量; τ 为混凝土龄期; a/b 为常数。

混凝土的抗压强度和抗拉强度采用公式(2)拟合:

$$R_c(\tau) = R_{c28}[1 + m\ln(\tau/28)] \tag{2}$$

式中: R_{c28} 为 28 d 龄期混凝土的抗压强度和抗拉强度; τ 为混凝土龄期; m 为常数。

混凝土的施工配合比见表 1。

表 1 混凝土施工配合比

混凝土 标号	级配	塌落 度/cm	水胶 比	砂率 /%	单位材料用量/(kg·m ⁻³)		
					用水量	水泥	粉煤灰
C30W6F100	二	16~18	0.41	40	152	297	74

根据材料试验结果,整理试验数据之后进行参数拟合,本次有限元计算过程中衬砌混凝土的材料参数见表 2。

表 2 东庄导流洞边墙和顶拱混凝土材料参数

龄期/h	24	36	48	60	72
弹性模量 E/GPa	7.77	9.04	10.03	10.85	11.50
抗压强度/MPa	7.74	10.45	12.37	13.86	15.08
抗拉强度/MPa	0.47	0.61	0.71	0.79	0.86

备注:混凝土材料参数是由实验室标准养护条件下获得,即温度 20℃±2℃,相对湿度 95%,表中部分参数由试验参数拟合后推导而来。

2.4 计算结果

在导流洞边顶拱衬砌混凝土浇筑 48 h 的情况下,边墙和顶拱部位的铅直方向的位移 U_y ,第一主应力 S_1 和第三主应力 S_3 的位移云图见图 3—图 5。不同拆模龄期下,应力和位移的计算结果见表 3,从计算结果可知:

(1) 在衬砌结构的自重作用下,整体呈现出铅直向下的变形,顶拱部位变形最大,铅直位移达 2.14

mm,从拱顶到边墙底部铅直位移逐渐减小。

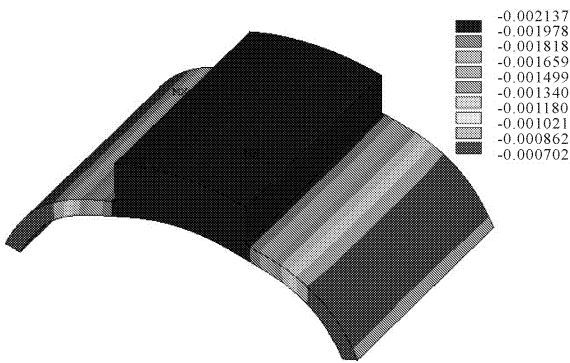


图 3 铅直方向位移 U_y (单位:m)

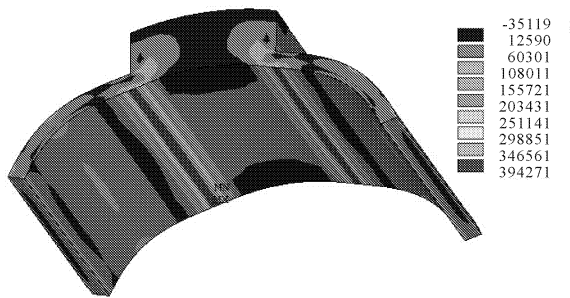


图 4 第一主应力 S_1 (单位:Pa)

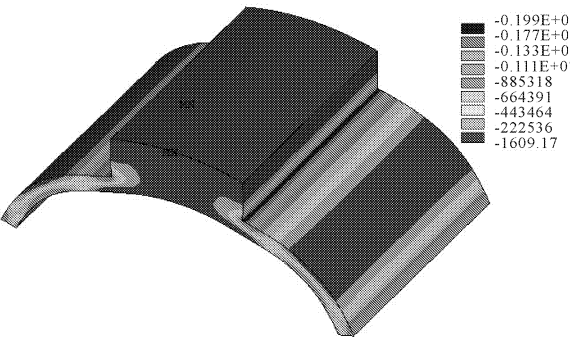


图 5 第三主应力 S_3 (单位:Pa)

(2) 第一主应力以压应力为主,有些部位第一主应力为拉应力,最大拉应力的位置发生在顶拱超挖范围的垂直正下方的衬砌外侧,最大拉应力为 0.39 MPa,在边墙和顶拱交接的部位拉应力也相对较大。

(3) 第三主应力全部为压应力,压应力最大位置发生在顶拱超挖部分与顶拱交接部位的内侧,最大压应力值为 1.99 MPa。

(4) 随着拆模龄期的增加,衬砌混凝土的弹性模型的增长,衬砌的位移会随之减小,但是应力的变化不大。

表 3 不同龄期拆模顶拱衬砌结构的位移和应力

拆模龄期 /h	最大位移 /mm	最大位移部位	最大拉应力 /MPa	最大拉应力 /部位	最大压应力 /MPa	最大压应力 部位
24	2.73	拱顶	0.39		1.99	
36	2.36	拱顶	0.39	超挖部位	1.99	超挖部位
48	2.14	拱顶	0.39	与顶拱交	1.99	与顶拱交
60	1.98	拱顶	0.39	界处衬砌	1.99	界处衬砌
72	1.88	拱顶	0.39	外侧	1.99	内侧

3 边顶拱拆模时间的分析

根据计算结果可知龄期 24 h ~ 72 h 混凝土拆模的位移变化都很小,能满足安全性要求,因而下面只讨论应力的计算结果。参照英国的规定^[5],当混凝土强度达到足以抵抗结构拆模时的应力的两倍以上时,模板可以拆除,本次计算安全系数 $K = 2.0$ 。根据有限元计算结果可知,模板拆除时,在顶拱部位产生的最大拉应力为 0.39 MPa,按照两倍的安全系数计算,顶拱衬砌混凝土的抗拉强度应该大于 0.78 MPa;模板拆除时,顶拱部位最大压应力 1.99 MPa,按照两倍的安全系数计算,顶拱衬砌混凝土的抗压强度应该大于 3.98 MPa。对比表 2 中导流洞边墙和顶拱混凝土 24 h ~ 72 h 的材料参数可知,混凝土的抗压强度都能满足要求,混凝土的抗拉强度控制拆模时间,60 h ~ 72 h 龄期的混凝土的抗拉强度和抗压强度都能满足要求。

在计算过程中,没有考虑混凝土的温度应力、干缩变形、自身体积变形和顶部锚杆对衬砌的锚拉作用,因而在上述有限元计算结果的基础上,还应该预留一定的安全裕度^[13-14]。对比国内类似工程(见表 4),乌东德水电站导流洞顶拱拆模时间最长达 3 d,小湾水电站导流洞顶拱拆模时间最短仅 1 d。但由于这些工程的混凝土材料性质、施工环境、施工工艺、衬砌厚度^[15-16]等一系列因素都与东庄水利枢纽导流洞存在差异,虽然对该导流洞顶拱拆模时间具有参照意义,但不能直接借鉴,因此推荐该导流洞边顶拱混凝土的拆模时间取为 60 h ~ 72 h。

表 4 国内类似工程的隧洞边墙和顶拱拆模时间

工程	隧洞类型	隧洞尺寸/m	拆模时间
乌东德	导流洞	城门洞 16.5 × 24.0	一般顶拱拆模时间为 48 h ~ 72 h
溪洛渡	导流洞	城门洞 18.0 × 20.0	顶拱模板拆除时间 36 h
小湾	导流洞	城门洞 16.0 × 19.0	边墙 20 h,顶拱 24 h
白鹤滩	导流洞	城门洞 17.5 × 22.0	顶拱拆模时间 36 h
深溪沟	导流洞	城门洞 15.5 × 18.0	顶拱拆模时间 24 h ~ 30 h
拉西瓦	尾水洞	圆形 内径 18.3	拆模时间 18 h

4 结 语

东庄水利枢纽工程边顶拱混凝土浇筑在现已施工完成 40%,混凝土衬砌拆模时间按照 60 h ~ 72 h 控制,模板拆除后对衬砌结构的变形情况进行监测,结果表明:考虑超挖影响的混凝土衬砌龄期为 60 h ~ 72 h 时拆模,衬砌混凝土变形和应力变化范围很小,拆模时间是合理可行的,施工进度高效可控。该研究对工程施工拆模时间控制具有指导意义。

参考文献:

[1] 白云猛,谢 力,邓作文. 钢模台车在老挝南俄 3 水电站导流洞衬砌施工中的应用[J]. 四川水力发电, 2019,38(S1):81-83.

[2] 张瑞萍,卢 刚,付永春. 中断面圆形隧洞混凝土衬砌快速施工方法[J]. 水利与建筑工程学报,2008,6(1): 91-94.

[3] 水工混凝土施工规范:SL 677—2014[S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.

[4] 赵 路. 三板溪水电站泄洪洞衬砌混凝土温度应力影响因素分析[J]. 水力发电,2013,39(11):88-90,99.

[5] 段 斌,李 楠. 深溪沟水电站导流洞混凝土衬砌拆模时间研究[J]. 水利水电施工,2009(3):33-36.

[6] 王玉孝,王秀明,张刚平. 拉西瓦水电站尾水洞混凝土拆模时间研究[J]. 水力发电,2007(11):80-81.

[7] 何文战,陈伟民,周万昌,等. 导流洞边顶拱衬砌混凝土拆模时间研究[J]. 人民长江,2018,49(S2):161-163.

[8] 相昆山,孔 科,张永清. 水工隧洞衬砌拆模时间研究[J]. 四川水利发电,2020,39(2):131-133,138.

[9] 蔡启龙,袁宝义,张振华. 地下工程衬砌拆模时间研究[J]. 人民长江,2006(11):35-37,132.

[10] 蒋吉芳,罗 平,张 宇. 乌东德水电站引水隧洞刚衬砌段混凝土施工技术[J]. 人民黄河,2019,41(S2):239-241.

[11] 樊启祥,殷亚辉. 水工隧洞衬砌混凝土防裂技术创新与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.

[12] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[13] 钟乐毅,杨选富. 水工隧洞衬砌厚度不足的承力影响有限元分析[J]. 水利科技与经济,2019,25(10):51-61.

[14] 李 新,杨兴国,周家文,等. 复杂地质条件下引水隧洞围岩稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(6):113-116.

[15] 韩 峰,徐 磊,金永苗. 输水隧洞内压作用下衬砌结构破坏分析[J]. 人民长江,2020,51(S1):149-152.

[16] 郑汉种,魏海云,李 丹,等. 典型不良地质条件下输水隧洞安全分析[J]. 水力发电,2020,46(9):93-97,110.