

# 水工隧洞衬砌拆模时间研究

相 昆 山, 孔 科, 张 永 清

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘 要:**大型水工隧洞一般采用定型钢模台车进行混凝土浇筑,混凝土养护拆模时间对工程施工进度及造价都有较大影响,在满足规范要求的拆模强度下,尽量缩短混凝土拆模时间对工程建设具有重要意义。笔者结合某大型工程 5 号导流洞衬砌施工,采用有限元软件进行了衬砌拆模时间分析,主要研究了 24 h、36 h 拆模对混凝土强度的影响,为钢模台车拆除时间提供了科学依据,在保证混凝土结构安全、施工质量、确保合理的台车循环时间、加快施工进度等方面取得了较好的经济效益。计算结果对工程实际施工拆模时间控制具有指导意义。

**关键词:**水工隧洞;拆模时间;有限元计算

**中图分类号:**[TM622];[TV144];TU761.1

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2020)02-0131-03

## Study on the Stripping Time of Formwork for the Lining of Hydraulic Tunnel

XIANG Kunshan, KONG Ke, ZHANG Yongqing

(Chengdu Engineering Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610072)

**Abstract:** In large hydraulic tunnels, the set-shaped steel formwork trolley is generally used for concrete casting. The time of concrete curing and formwork stripping has a great impact on the construction progress and cost. It is of great significance to shorten the time of concrete formwork stripping as far as possible under the strength of formwork stripping required in specification. Combining with the lining construction of No.5 diversion tunnel in a large-scale project, the stripping time analysis of lining formwork is carried out by using the finite element software. The influence of formwork stripping on the concrete strength in 24h and 36h is mainly studied, which provides a scientific basis for the stripping time of steel formwork trolley, and good economic benefits have been achieved in ensuring the safety of concrete structure, construction quality, and reasonable cycle time of trolley, as well as accelerating construction progress. The calculation results have guiding significance for the control of formwork stripping time of the actual project construction.

**Key words:** hydraulic tunnel; formwork stripping time; finite element calculation

### 1 概 述

水工隧洞混凝土拆模时间,特别是顶拱承重模板的拆除时间,对衬砌施工进度甚至整个地下工程的工期都有着重大影响,为保证工期,有必要缩短拆模时间<sup>[1-2]</sup>。王玉孝对拉西瓦水电站尾水洞混凝土拆模时间进行了研究,并经现场拆模证明,龄期 18 h 进行拆模,效果良好<sup>[3]</sup>。

文章对某水电站 5 号导流洞 D52 型(衬砌厚度 0.8 m)衬砌结构进行有限元计算,研究 24 h、36 h 进行拆模的可行性,为钢模台车拆除时间提供了科学依据,对保证施工质量、确保合理的台车循环时间、加快施工进度等方面取得了较好的经

济效益<sup>[4]</sup>。

该水电站坝址控制流域面积 6.57 万 km<sup>2</sup>,坝址处多年平均流量 666 m<sup>3</sup>/s。水库正常蓄水位 2 865 m,相应库容 101.5 亿 m<sup>3</sup>,调节库容 65.6 亿 m<sup>3</sup>,具有多年调节能力。电站装机容量 300 万 kW,多年平均年发电量为 110 亿 kWh。

5 号导流洞由引渠段、闸室段、无压洞段和出口挑流鼻坎组成,设计最大流量 1 790 m<sup>3</sup>/s,最大流速 27.2 m/s。进口引渠长 49 m,引渠底板高程 2 675 m,建基面高程 2 764 m。无压洞段长 1 095.5 m,采用一坡到底的布置型式,坡度  $i=0.045 6$ ,洞身为城门洞型,随着洞身水面线变化断面尺寸分别为 9 m×12.5 m~14 m(宽×高),洞身采用钢筋混凝土衬砌,衬砌厚度分

收稿日期:2020-03-05

别为 1 m、0.8 m、0.6 m。出口采用挑流消能。本计算主要针对 5 号导流洞 D52 型(衬砌厚度 0.8 m)衬砌结构进行有限元计算。

由于 5 号导流洞断面大, 钢模台车顶拱模板为承重模板, 因此边顶拱部位混凝土拆模时间不宜太短, 初拟混凝土的拆模时间(36 h)较长, 直接影响衬砌混凝土施工进度, 因此需要研究确定钢模台车合理拆模时间, 在保证混凝土结构安全的同时, 利于进度安排。

## 2 计算模型

### 2.1 坐标系

全部计算模型采用直角坐标系  $x$  和  $y$  表达模型几何位置。

(1)  $x$  坐标轴正向 = 导流洞左侧指向右侧;

(2)  $y$  坐标轴正向 = 垂直向上,  $y$  坐标关联与高程。

在没有特别声明的情况下, 位移计算成果遵守约定: 与坐标轴正向一致的位移动或变形值为“正值”, “负”值表示与坐标轴正向相反。

类似地, 正应力计算成果遵守约定: 拉应力为“正值”, 压应力为“负值”。有关岩土大小应力规定符合岩土工程习惯。

### 2.2 有限元模型

计算模型取 12 m 长衬砌为计算单位进行有限元计算, 模型左右两侧边墙及边墙底部考虑与基岩接触, 协调变形, 顶拱考虑与基岩脱开。基岩两侧面及底部施加法向约束。计算模型总结点数 6 422 个, 总单元个数为 5 116 个, 采用 8 节点等参实体单元进行模拟, 衬砌混凝土顶拱及边墙顶部采用 C25 混凝土, 底部边墙及底板采用 C40 混凝土。有限元计算模型见图 1。

### 2.3 边顶拱混凝土衬砌荷载

钢模台车拆模时, 顶拱部位的混凝土是最关键部位。由于边顶拱混凝土衬砌是由边墙底部向上浇筑, 顶拱部位的混凝土最晚浇筑, 所以钢模台车拆模时顶拱部位的混凝土龄期最短, 强度最低, 承载能力最弱。此时, 顶拱混凝土衬砌所承受的荷载具有以下特点<sup>[5]</sup>:

(1) 拆模时顶拱结构一般只承受钢筋混凝土的自重荷载;

(2) 锚杆和顶部钢筋的联合作用, 改善了顶拱混凝土的受力条件, 顶部拱的作用减小了混凝土

的拉应力量值和拉应力区的范围。

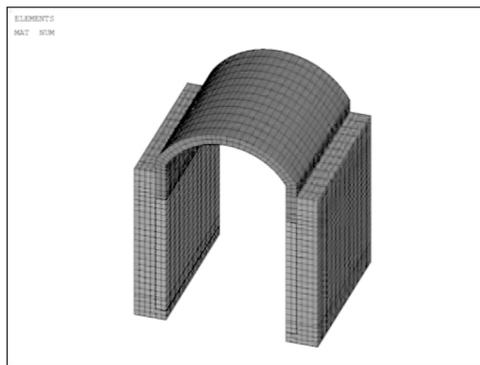


图 1 有限元计算模型

## 3 计算参数

计算中, 混凝土的密度取  $2\,500\text{ kg/m}^3$ , 泊松比  $\gamma$  取 0.167。由于混凝土的弹性模量及抗拉强度具有随着混凝土龄期不同而变化的特点, 且无试验数据, 故在计算不同龄期混凝土的弹性模量时按照下式进行取值:

$$E(t) = Ee(1 - e^{-0.09t}) \quad (1)$$

式中  $E(t)$  为混凝土从浇筑后至计算时的弹性模量 ( $\text{N/mm}^2$ );  $Ee$  为混凝土的最终弹性模量 ( $\text{N/mm}^2$ ), 可近似取 28 d 的弹性模量;  $t$  为混凝土从浇筑后到计算时的天数。

按照式(1)计算出 24 h、36 h 龄期的 C25 混凝土的弹性模量  $E$  分别为 2.41 GPa、2.797 GPa, C40 混凝土的弹性模量  $E$  分别为 3.536 GPa、4.104 GPa。

不同龄期混凝土的抗拉强度由下式进行取值:

$$f_t(t) = 0.8f_t(\lg t)^{2/3} \quad (2)$$

式中  $f_t(t)$  为混凝土从浇筑后至计算时的抗拉强度 ( $\text{N/mm}^2$ );  $f_t$  为混凝土轴心抗拉强度设计值 ( $\text{N/mm}^2$ );  $t$  为混凝土从浇筑后到计算时的天数。

## 4 计算结果

### 4.1 24 h 龄期计算成果

(1) 衬砌变形分析。

根据计算结果可知(图 2、3):

① 在自重作用下, 顶拱衬砌  $X$  向变形向外侧发展,  $X$  向最大位移出现在顶拱两侧与边墙交汇处, 最大位移  $U_x$  为 0.42 mm;

② 在自重作用下, 边顶拱衬砌  $Y$  方向变形竖直向下,  $Y$  方向最大位移出现在顶拱中间位置, 最大位移  $U_y$  为 1.79 mm。

(2) 衬砌应力分析。

根据计算结果(图 4、5)可知:

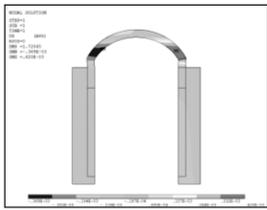


图 2 衬砌水平位移  $U_x$

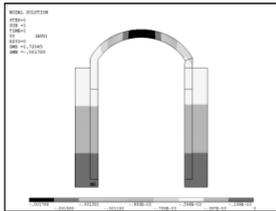


图 3 衬砌竖直位移  $U_y$

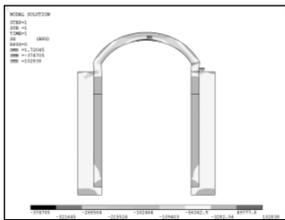


图 4 衬砌水平应力  $S_x$

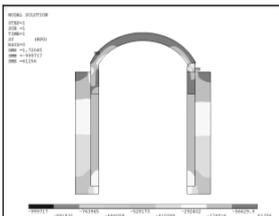


图 5 衬砌竖直应力  $S_y$

①5 号导流洞 D52 型衬砌 X 向最大拉应力发生在衬砌顶拱中间内侧,最大拉应力  $SMX = 0.10 \text{ MPa}$ ,最大压应力出现在衬砌顶拱中间外侧,最大压应力为  $SMN = -0.37 \text{ MPa}$ 。

②5 号导流洞 D52 型衬砌 Y 向最大拉应力发生在衬砌顶拱两侧外侧,最大拉应力  $SMX = 0.06 \text{ MPa}$ ,最大压应力出现在衬砌边墙顶部与顶拱交汇处,最大压应力为  $SMN = -1 \text{ MPa}$ 。

4.2 36 h 龄期计算成果

(1) 衬砌变形分析。

根据计算结果可知(图 6、7):

① 在自重作用下,顶拱衬砌 X 向变形向外侧

发展,X 向最大位移出现在顶拱两侧与边墙交汇处,最大位移位  $U_x$  为  $0.3 \text{ mm}$ ;

② 在自重作用下,边顶拱衬砌 Y 方向变形竖直向下,Y 方向最大位移出现在顶拱中间位置,最大位移位  $U_y$  为  $1.36 \text{ mm}$ 。

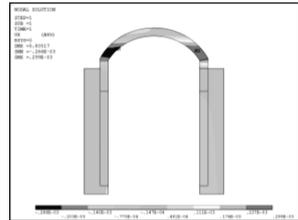


图 6 衬砌水平位移  $U_x$

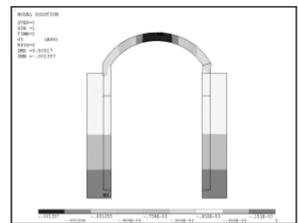


图 7 衬砌竖直位移  $U_y$

(2) 衬砌应力分析。

根据计算结果(图 8、9)可知:

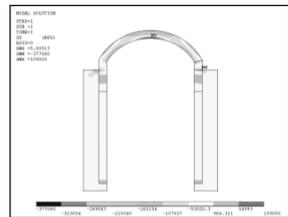


图 8 衬砌水平应力  $S_x$

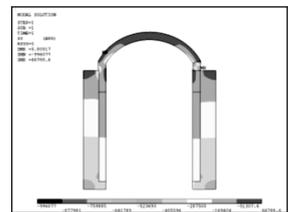


图 9 衬砌竖直应力  $S_y$

① 5 号导流洞 D52 型衬砌 X 向最大拉应力发生在衬砌顶拱中间内侧,最大拉应力  $SMX = 0.11 \text{ MPa}$ ,最大压应力出现在衬砌顶拱中间外侧,最大压应力为  $SMN = -0.38 \text{ MPa}$ ;② 5 号导流洞 D52 型衬砌 Y 向最大拉应力发生在衬砌顶

(下转第 138 页)

由表 1 可知,合同风险额可能会达到 10 617 万元,而标价中考虑的利润与风险为 3 400 万元,相差 7 217 万元,工程实施具有巨大风险,风险主要源于工期罚款条款过于苛刻。鉴于计算中设备价仍是基于投标询价时的报价,未考虑实际订货时各供货商可能降价所带来的折价收益;也未考虑由项目管理所带来的降低总部管理费、集团管理费等效益,因而投标报价风险仍有进一步降低的空间。属基本可控。

表 1 马尔格拉电站投标风险分析表

风险名称	发生概率		风险范围 /万元		风险额 /万元
	最不利	最有利	最不利	最有利	
汇率风险	90%	10%	-2 545	2 545	-2 036
物价上涨风险	50%	50%	-2 352	-961	-1 657
税费风险	10%	90%	-318	1 070	931
质量保证	30%	70%	-1 065	-532	-692
设计风险	20%	80%	-150	1 020	786
工期风险	90%	10%	-8 502	0	-7 652
财务风险	20%	80%	-650	-210	-298
降价风险	0%	0%	0	0	0
合计					-10 617

## 5 结 语

投标价编制完成后,考虑“世行的实质性响应最低价原则”的竞标方式较为激烈,联营体依据对风险全面分析,先后进行了三轮的降价调整,最终投标价格比初次投标降低约 20%,从而以微弱价

(上接第 133 页)

拱两侧外侧,最大拉应力  $SMX=0.06$  MPa,最大压应力出现在衬砌边墙顶部与顶拱交汇处,最大压应力为  $SMN=-1$  MPa。

## 5 结 语

笔者结合某大型工程 5 号导流洞衬砌施工,采用有限元软件进行了衬砌拆模时间分析,主要研究了 24 h、36 h 拆模对混凝土强度的影响。导流洞衬砌混凝土拆模时间由 24 h 增加到 36 h,随着混凝土龄期的增长,弹性模量值增大,混凝土水平方向(X向)和竖直方向(Y向)最大位移有所减小。导流洞衬砌混凝土拆模时间由 24 h 增加到 36 h,混凝土结构应力变化不大,应力量值及分布规律基本一致。衬砌混凝土 24~36 h 龄期内拆模,混凝土变形和应力变化范围很小,且最大应力值小于该龄期下混凝土的抗拉强度。通过以上计算复核,24 h 拆模是可行的。该研究在保证混凝土结构安全、施工质量、确保合理的台车循环时

格优势中标。中标后,由于马里国家政变,项目一直未能开始。约一年后,业主又重新进行合同谈判,最终合同价格又调增约 10%。因而,本案例与大多国外项目具有类似认识,即:任何合同项目都是挑战和机遇并存,需要通过精心组织、策划和运作,科学管理并有效控制和降低成本,努力并全方位挖掘潜力,以此对项目实施保持信心和良好预期。

## 参考文献:

- [1] 世界银行,“货物、工程及非咨询服务采购指南”(PROCUREMENT GUIDELINES OF GOODS, WORKS, AND NON-CONSULTING SERVICES),2004 年 3 月版。
- [2] 世界银行,《厂房设计、供货与安装标准招标文件》(Standard Bidding Document for Procurement of Plant Design, Supply, and Installation & User's Guide),2005 年 5 月法文版。
- [3] Burgess & Niple, 马尔卡拉水电站项目设计报告,2008; GEOENERGY,《尼日尔河的马尔格拉水电站初步报告》2010 年 1 月版。
- [4] 中华人民共和国外交部,2009 年第四季度经济季评,https://www.fmprc.gov.cn/web/.
- [5] 水电水利规划设计总院/可再生能源定额站,《水电工程设计概算编制规定》、《水电工程设计概算费用标准》和《水电建筑工程概算定额》,2008。

## 作者简介:

王 燕(1969-),女,江苏常州人,高级工程师 / 专业总工,从事水利水电工程造价和咨询工作。

(责任编辑:吴永红、卓政昌)

间、加快施工进度等方面取得了较好的经济效益。因此,为钢模台车拆除时间提供了科学依据,且对工程实际施工拆模时间控制具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] 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(37):33-35.
- [2] 胡群勋. 柳坪水电站引水洞边顶拱钢膜台车拆模时间研究[J]. 湖北水力发电,2009,84(4):23-55.
- [3] 王延立,朱方君,谢兰清. 有限元法分析隧洞工程混凝土衬砌拆模时间.
- [4] 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(33):80-81.
- [5] 李春杰. 大跨度洞室拱部衬砌大体积钢筋混凝土施工技术. 现代隧道技术,2004,1(2).

## 作者简介:

相昆山(1988-),男,山东临沂人,硕士,工程师,从事水工结构、岩土工程等工作;

孔 科(1984-),男,四川邻水人,博士,高级工程师,从事水工结构、岩土工程等工作;

张永清(1988-),男,甘肃武威人,硕士,工程师,从事水利水电工程、施工导流等工作。(责任编辑:卓政昌、吴永红)