

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.02.002

二次衬砌台车荷载计算及数值模拟

刘思远¹, 张华雨¹, 祝方才¹, 罗睿¹, 周正茂²

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 中铁北京工程局集团第二工程有限公司, 湖南 长沙 410116)

摘要: 为保证隧道衬砌模板台车的施工安全, 以某高速公路分岔式长隧道为例, 根据给出衬砌台车的尺寸, 对隧道二次衬砌台车模板系统进行了设计, 计算了其纵肋和环向肋内力和变形, 并基于 ANSYS 分析软件, 计算了台车门型结构内力和变形。结果表明, 模板系统、台车结构的强度与刚度均满足设计要求。根据计算结果, 建议浇筑二次衬砌混凝土时应注意对称浇筑, 保持台车受力对称, 且在门架的底纵梁处纵向每隔 1 m 加设 1 道 I20a 工字钢水平支撑, 在两主肋之间增加环向次肋角钢。

关键词: 二次衬砌台车; 隧道台车; 内力分析; 变形

中图分类号: U455.3⁺9

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)02-0007-08

引文格式: 刘思远, 张华雨, 祝方才, 等. 二次衬砌台车荷载计算及数值模拟[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(2): 7-14.

Load Calculation of Secondary Tunnel Lining Trolley with Its Numerical Calculation

LIU Siyuan¹, ZHANG Huayu¹, ZHU Fangcai¹, LUO Rui¹, ZHOU Zhengmao²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. 2nd Engineering Co. Ltd., China Railway Beijing Group Engineering Co. Ltd., Changsha 410116, China)

Abstract: In view of the safety of the tunnel lining formwork trolley, with a case study of bifurcated long highway tunnel, a secondary lining trolley formwork system of the tunnel has been designed according to the size of the lining trolley, with a calculation made of the internal force and deformation of the longitudinal and circumferential ribs, followed by a further calculation of the internal force and deformation of the trolley door structure based on ANSYS software. The results show that the strength and rigidity of the formwork system and the trolley structure meet the design requirements; according to the calculation results, it is recommended that the secondary lining concrete should be poured symmetrically to keep the trolley stress symmetrical, with a horizontal support of I20a I-steel be added at the longitudinal interval of 1 m at the bottom longitudinal beam of the portal frame, and the circumferential secondary rib angle steel should be added between the two main ribs as well.

Keywords: secondary lining trolley; tunnel lining trolley; internal force; deformation

收稿日期: 2021-01-02

基金项目: 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目(2018JJ4007)

作者简介: 刘思远(1995-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为洞室群稳定,

E-mail: 2239595422@qq.com

通信作者: 祝方才(1972-), 男, 湖北公安人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事边坡与隧道的教学和研究,

E-mail: zhufangcai@163.com

0 引言

二次衬砌台车是隧道施工中不可缺少的设备之一,具有施工效率高、表面成形质量好等优点,可以有效提高混凝土的浇筑速度和浇筑质量^[1]。二次衬砌台车需要依据现场测量的隧道截面尺寸来进行设计,了解台车的受力情况会有利于台车的设计优化,国内较多学者对其进行了研究^[2]。如蔡明慧^[3]通过对衬砌台车在大断面隧道使用过程中的受力情况进行分析,提出了适用于衬砌台车的强度设计计算要点。刘晓宏等^[4]使用有限元计算分析方法,对衬砌台车的模板纵向和竖向加筋两种方案进行了受力分析,得到了最佳的加筋方案。陈文琛等^[5]以乌东德水电站左岸高线路隧道衬砌钢模台车位为研究对象,使用 ANSYS 有限元分析软件,建立了钢模台车的整体模型,并且在工作情况下对其进行了静力学分析,得到了台车的整体应力和变形云图,并把分析结果应用到实际工程中去。

本研究拟以某工程隧道为依托,结合台车的尺寸,计算模板台车的顶模、侧模受力情况,并使用 ANSYS 有限元分析软件分析台车门架的受力情况,判断衬砌台车的刚度、强度及稳定性是否满足要求,以期二次衬砌台车的设计提供理论参考。

1 工程概况

本研究的工程隧道为分岔式长隧道,隧道的右幅全长为 2 134 m,最大埋深约为 297.3 m;左幅全长为 2 112.2 m,最大埋深约为 296 m。隧道进口处的左右幅进口线间距约为 28 m;中间段左右幅间距约为 20~43 m;隧道出口段为渐变段,由小间距逐渐变为连拱隧道,出口处的线间距为 2.5 m。部分围岩等级为四级,另有部分为五级。隧道衬砌分初期支护和二次衬砌,二次混凝土衬砌采用衬砌台车施工,使用 50 cm 厚 C30 钢筋混凝土。主线分离式隧道衬砌内轮廓均采用半径为 5.90 m 的单心圆,内轮廓设计高程距拱顶高度为 7.43 m,净宽为 11.8 m。人行横通道采用拱顶为 $R_1=1.20$ m 的半圆、边墙为直墙的衬砌断面,内轮廓净空宽度为 2.40 m、净空高度为 3.15 m。

2 衬砌台车结构设计受力计算

2.1 台车结构

二次衬砌台车主要由模板、支撑、门架、行走装置、液压与电气控制系统和其他附属装置组成。本研究中,设计台车的最大轮廓半径为 5 950 mm,长度为 12.1 m。工作窗的数量为 24 个,尺寸为 500

mm × 500 mm;浇筑口数量为 3 个,直径为 125 mm。隧道模板台车的实景如图 1 所示。



图 1 隧道模板台车实景图

Fig. 1 Real view of tunnel formwork trolley

2.1.1 模板

隧道二次衬砌的模板由 1 顶模、2 侧模组成,模板均由 12 mm 钢板按照二次衬砌外轮廓线卷制而成,模板之间通过螺栓进行连接。模板拱架环向的主肋采用 1.5 cm 钢板,间距为 1.5 m。拱架纵肋采用 8 cm 槽钢,间距为 27 cm。模板及台车构件均采用 Q235 普通型钢,具体布置见图 2 和 3。

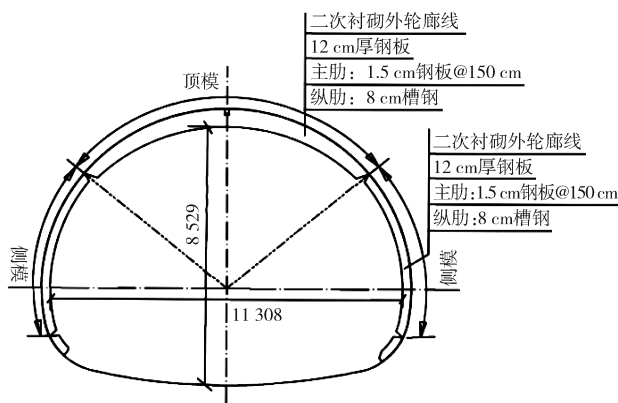


图 2 隧道二次衬砌模板布置图

Fig. 2 Layout of secondary lining formwork of tunnel

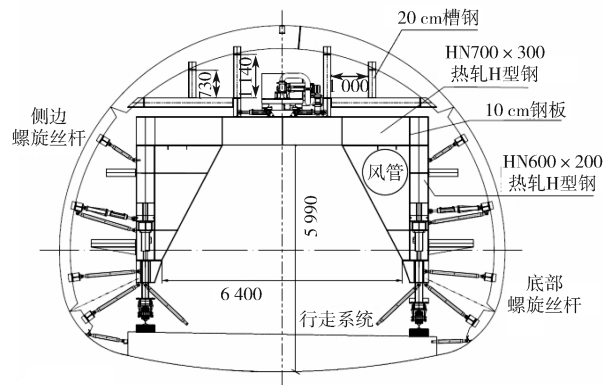


图 3 隧道二次衬砌台车布置图

Fig. 3 Layout of secondary lining trolley of tunnel

2.1.2 支撑

二次衬砌的顶拱支撑采用 20 cm 槽钢立柱,纵向焊接通长为 25 cm 的槽钢组成钢桁架,再焊接于台车门式框架主横梁上,支撑顶模。侧模支撑系统中设置螺旋丝杆,每断面设置 8 个,下部 2 个螺旋丝杆支承于台车的 HN700×300 热轧 H 型钢纵梁上,上部 2 个螺旋丝杆支撑于台车的 HN500×200 热轧 H 型钢立柱上。

2.1.3 门架

门架是台车的主要承重构件,它由主横梁、立柱和底纵梁通过螺栓连接而成。门架的立柱采用 HN500×200 热轧 H 型钢,横梁、纵梁均采用 HN700×300 热轧 H 型钢,经焊接组成门架,且其节点处焊接 12 cm 厚的三角连接钢板片进行加固,立柱与横梁之间用 12 cm 厚的钢板做斜撑。本衬砌台车与顶拱支撑焊接为一个整体。三角板与构件之间的焊接为满焊,焊脚高度为 10 mm;焊缝不允许出现咬边、未焊透、裂纹等缺陷。

2.1.4 行走装置

行走装置安装在门架底纵梁下部,采用轨行式自动行走,该装置适用于坡度小于 4% 的隧道衬砌。

2.1.5 液压与电气控制系统

液压系统是使台车完成立模和拆模工作的动力源,除台车行走外,其余动作均由液压缸驱动。液压与电气控制系统主要由电动机和液压缸组成^[6]。

2.2 衬砌台车受力分析

二次衬砌台车未工作时只承受自身重力,因而结构受力很小,这种情况不用做强度分析。浇筑混凝土时,二次衬砌台车除受到自身重力作用外,还受到混凝土重力、振捣产生的力和施工人员及机具重力等的作用。门架承受了台车工作时的绝大多数荷载,因此其必须要有足够的强度、刚度和稳定性^[6-7]。

2.3 衬砌台车的荷载计算

二次衬砌台车所受荷载包括混凝土自身重力、新浇混凝土对模板侧面的压力、振捣混凝土荷载和施工人员及机具荷载^[8-9]。

1) 二次衬砌混凝土自身重力荷载

二次衬砌混凝土自身重力荷载计算如下:

$$P_1 = \gamma h = 26 \text{ kN/m}^3 \times 0.5 \text{ m} = 13 \text{ kN/m}^2。$$

式中: γ 为混凝土重度,此处取 26 kN/m³;

h 为混凝土厚度,此处取 0.5 m。

2) 新浇混凝土对模板侧面的压力

新浇混凝土对模板侧面的压力计算式为

$$P_{\max} = 0.22 \gamma t \beta_1 \beta_2 V^{0.5},$$

式中: β_1 为外加剂影响修正系数,取 1.0;

β_2 为混凝土塌落度影响系数,取 1.15;

t 为混凝土初凝时间,一般 $t = 200 / (T + 15)$,其中 T 为混凝土入模时的温度,实际施工中混凝土初凝时间约为 5 h;

V 为混凝土的浇筑速度,取 0.8 m/h。

代入数值后计算可得, $P_{\max} = 29.42 \text{ kN/m}^2$ 。

3) 振捣混凝土荷载

振捣混凝土荷载 $P_3 = 2 \text{ kN/m}^2$ 。

4) 施工人员及机具荷载

本文设定施工人员及机具荷载 $P_2 = 2 \text{ kN/m}^2$ 。

3 二次衬砌模板、衬砌台车强度、刚度验算

3.1 二次衬砌模板计算

3.1.1 12 mm 钢板

二次衬砌模板采用 12 mm 的钢板,其纵肋间距为 27 cm,主肋间距为 1.5 m,两主肋之间加了环向次肋角钢,可简化为跨度 750 mm 的矩形平板进行分析,周界固定。

则拱顶面板所受面荷载为

$$\begin{aligned} q &= 1.0 \times q_d + 1.2 \times q_l = \\ & (1.0 \times 26 \text{ kN/m}^3 \times 0.5 \text{ m} + 78.5 \text{ kN/m}^3 \times \\ & 0.012 \text{ m}) + 1.2 \times (2 \text{ kN/m}^2 + 2 \text{ kN/m}^2) = \\ & 18.74 \text{ kN/m}^2。 \end{aligned}$$

式中: q_d 为恒载,包括混凝土自重和钢板自重;

q_l 为活载,包括振捣混凝土荷载和施工人员的荷载。

挠度为

$$f = c_3 \frac{q b^4}{E h^3} = 0.028 \times \frac{18.74 \text{ kN/m}^2 \times (0.27 \text{ m})^4}{2.06 \times 10^5 \text{ MPa} \times (0.012 \text{ m})^3} = 0.008 \text{ mm}。$$

式中: f 为面板中心挠度;

c_3 为矩形平板系数,可查表取 0.028;

E 为弹性模量, Q235 钢的弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ ^[10];

b 为面板长度,取 0.27 m;

h 为面板厚度,取 0.012 m。

求得拱顶面板最大中心挠度 $f = 0.008 \text{ mm}$, 小于 $L/250 = 3 \text{ mm}$, 故顶模面板刚度满足要求。

顶模面板长边中心应力为

$$\sigma = c_6 q \left(\frac{b}{h} \right)^2 =$$

$$0.498 \times 18.74 \text{ kN/m}^2 \times \left(\frac{0.27 \text{ m}}{0.012 \text{ m}} \right)^2 = 4.72 \text{ MPa}。$$

式中： σ 为面板长边中心应力；

C_6 为矩形平板系数，可查表取0.498。

求得长边中心应力 $\sigma = 4.72 \text{ MPa}$ ，小于许用应力 $[\sigma] = 215 \text{ MPa}$ ，故顶模面板强度也满足要求。

侧墙面板所受面荷载为

$$\begin{aligned} q &= 1.0 \times q_d + 1.2 \times q_l = \\ &1.0 \times 29.42 \text{ kN/m}^2 + \\ &1.2 \times (2 \text{ kN/m}^2 + 2 \text{ kN/m}^2) = 34.22 \text{ kN/m}^2。 \end{aligned}$$

此处恒载 q_d 为混凝土对侧墙面板的压力。

按矩形平板计算，面板最大中心挠度为

$$\begin{aligned} f &= c_3 \frac{q b^4}{E h^3} = \\ &0.028 \times \frac{34.22 \text{ kN/m}^2 \times (0.27 \text{ m})^4}{2.06 \times 10^5 \text{ MPa} \times (0.012 \text{ m})^3} = 0.014 \text{ mm}。 \end{aligned}$$

小于 $L/250 = 3 \text{ mm}$ ，故侧模面板刚度满足要求。

其应力为

$$\begin{aligned} \sigma &= c_6 q \left(\frac{b}{h} \right)^2 = \\ &0.498 \times 34.22 \text{ kN/m}^2 \times \left(\frac{0.27 \text{ m}}{0.012 \text{ m}} \right)^2 = 8.63 \text{ MPa}。 \end{aligned}$$

显然，其应力小于许用应力 $[\sigma] = 215 \text{ MPa}$ ，故侧模面板强度也满足要求。

由以上计算结果与分析可知，12 mm 钢板满足二次衬砌模板设计要求

3.1.2 纵肋 8 cm 槽钢

纵肋 8 cm 槽钢间距为 27 cm，其支撑拱圈主肋间距为 0.75 m。

8 cm 槽钢的截面特性系数如下：

$$W = 25.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3；$$

$$I = 101.3 \times 10^{-8} \text{ m}^4；$$

$$\begin{aligned} q_{\max} &= 1.0 \times q_d + 1.2 \times q_l \\ &1.0 \times 29.42 \text{ kN/m}^2 \times 0.27 \text{ m} + \\ &1.2 \times (2 \text{ kN/m}^2 + 2 \text{ kN/m}^2) \times 0.27 \text{ m} = 9.24 \text{ kN/m}。 \end{aligned}$$

式中： W 为截面抵抗矩；

I 为截面惯性矩；

q 为槽钢所受线荷载。

此时恒载为混凝土对侧墙面板的压力，活载为振捣荷载和人员机具荷载。

按简支梁计算，槽钢的弯矩为^[11]

$$M_{\max} = \frac{1}{8} q l^2 = \frac{1}{8} \times 9.24 \text{ kN/m} \times (0.75 \text{ m})^2 = 0.65 \text{ kN} \cdot \text{m}。$$

则其正应力为

$$\sigma_w = \frac{M}{W} = \frac{0.65 \text{ kN} \cdot \text{m}}{25.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 25.7 \text{ MPa}，$$

挠度为

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{5 q l^4}{384 E I} = \frac{5 \times 9.24 \text{ kN/m} \times (0.75 \text{ m})^4}{384 \times 2.06 \times 10^5 \text{ MPa} \times 101.3 \times 10^{-8} \text{ m}^4} = \\ &0.18 \text{ mm}。 \end{aligned}$$

根据设计，纵肋的许用应力 $[\sigma] = 215 \text{ MPa}$ ，许可挠度为 $L/250 = 3 \text{ mm}$ ，显然，纵肋选用 8 cm 槽钢满足二次衬砌模板设计要求。

3.1.3 顶模拱圈主肋 1.5 cm 钢板

顶模拱圈主肋 1.5 cm 钢板的截面系数如下：

$$W = \frac{1}{6} \times b \times h^2 = \frac{1}{6} \times 0.27 \text{ m} \times (0.3 \text{ m})^2 = 4.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3，$$

$$I = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = \frac{1}{12} \times 0.27 \text{ m} \times (0.3 \text{ m})^3 = 6.08 \times 10^{-4} \text{ m}^4。$$

其荷载计算考虑二次衬砌混凝土自身重力、模板、纵向槽钢、1.5 cm 钢板的自重以及浇筑混凝土的侧压力（由于顶板处于隧道腰线以上，而侧压力与浇筑高度有关，因此顶板计算时可以按照 0.5 倍最大侧压力计算）。顶板下四立柱支撑间距分别为 1.17, 1.00, 2.20, 1.00, 1.17 m，则顶模拱圈主肋荷载为^[6]

$$\begin{aligned} q &= 1.0 \times q_d + 1.2 \times q_l = \\ &1.0 \times (26 \text{ kN/m}^3 \times 0.5 \text{ m} \times 2.28 \text{ m} + \\ &78.5 \text{ kN/m}^3 \times 0.012 \text{ m} \times 2.28 \text{ m} + \\ &8.04 \text{ kN/m} \times 0.08 \text{ m} / 0.27 \text{ m} + 0.353 \text{ kN/m}) + \\ &0.015 \text{ m} / 2.28 \text{ m} + 0.5 \times 29.42 \text{ kN/m}^2 \times 2.28 \text{ m} + \\ &1.2 \times (2 \text{ kN/m}^2 + 2 \text{ kN/m}^2) \times 1.5 \text{ m} = 74.91 \text{ kN/m}。 \end{aligned}$$

式中：26 kN/m³为混凝土重度；

0.5 m 为混凝土厚度；

78.5 kN/m³为单位钢模板重度；

8.04 kN/m 为槽钢单位荷载；

35.33 × 10⁻² kN/m 为每米钢拱架荷载；

0.5 为系数。

按简支梁计算，其弯矩为

$$M_{\max} = \frac{1}{8} q l^2 = \frac{1}{8} \times 74.91 \text{ kN/m} \times (2.2 \text{ m})^2 = 45.32 \text{ kN} \cdot \text{m}。$$

其支点反力为

$$F = \frac{1}{2} q l = \frac{1}{2} \times 74.91 \text{ kN/m} \times 2.2 \text{ m} = 82.40 \text{ kN}。$$

则最大正应力为

$$\sigma_w = \frac{M}{W} = \frac{45.32 \text{ kN} \cdot \text{m}}{4.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3} = 11.19 \text{ MPa} < 205 \text{ MPa}；$$

最大挠度为

$$\omega = \frac{5ql^4}{384EI} = \frac{5 \times 75.14 \text{ kN/m} \times (2.2 \text{ m})^4}{384 \times 2.06 \times 10^5 \text{ MPa} \times 6.08 \times 10^{-4} \text{ m}^4} = 0.18 \text{ mm}。$$

设计要求主肋挠度应小于 $l/250=8.8 \text{ mm}$, 显然达到要求。

可见, 顶模拱圈主肋 1.5 cm 钢板满足二次衬砌模板设计要求。

3.1.4 侧模拱圈主肋 1.5 cm 钢板

侧模拱圈主肋 1.5 cm 钢板的截面系数如下:

$$W=4.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3;$$

$$I=6.08 \times 10^{-4} \text{ m}^4。$$

侧模拱圈主肋所受的荷载主要为混凝土的侧压力, 故按照最大侧压力考虑, 并考虑 1.2 倍的胀模系数^[8], 则其荷载为

$$q=1.0 \times 1.2 \times q_d + 1.2 \times q_l = 1.0 \times 1.2 \times 29.42 \text{ kN/m}^2 \times 2.28 \text{ m} +$$

$$1.2 \times (2 \text{ kN/m}^2 + 2 \text{ kN/m}^2) \times 2.28 \text{ m} = 91.44 \text{ kN/m},$$

式中: 恒载为混凝土对侧墙面板的压力, 活载为振捣荷载和人员机具荷载;

2.28 m 为台车门架纵向间距。

侧模拱圈主肋由 3 个螺旋丝杆支撑于台车门架上, 3 个螺旋丝杆间距为 $1.47, 1.47 \text{ m}$, 建立的悬挑梁模型如图 4 所示。

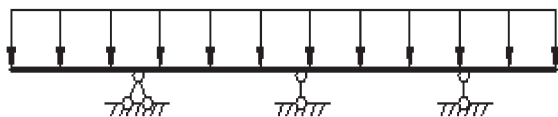


图 4 侧模拱圈主肋计算模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of calculation model for main rib of the side form arch ring

经软件求解, 得到侧模拱圈主肋的弯矩及支点的反力如图 5 所示。具体取值如下: $F_1=212.33 \text{ kN}$, $F_2=74.18 \text{ kN}$, $F_3=163.36 \text{ kN}$; 最大弯矩 $M_{\max}=60.46 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

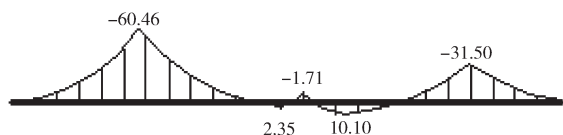


图 5 侧模拱圈主肋弯矩及支点反力图

Fig. 5 Bending moment and fulcrum reaction diagram of the main rib of side form arch ring

则侧模拱圈主肋的最大正应力为

$$\sigma_w = \frac{M}{W} = \frac{60.46 \text{ kN}\cdot\text{m}}{4.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3} = 14.93 \text{ MPa} < 205 \text{ MPa}。$$

最大挠度为

$$\omega = \frac{5ql^4}{384EI} = \frac{5 \times 91.44 \text{ kN/m} \times (1.47 \text{ m})^4}{384 \times 2.06 \times 10^5 \text{ MPa} \times 6.08 \times 10^{-4} \text{ m}^4} = 0.04 \text{ mm}。$$

设计要求的侧模拱圈主肋钢板的最大挠度为 $l/250=5.9 \text{ mm}$, 0.04 mm 显然符合要求。可见, 侧模拱圈主肋选用 1.5 cm 钢板满足二次衬砌模板设计的要求。

3.2 台车结构计算

本部分内容主要对顶模支撑、台车门架进行结构受力计算。

顶模支撑立柱承受顶模部分二次衬砌混凝土重力、模板、拱架、浇筑时的侧压力等。以纵向 2.28 m 长度为计算单位, 荷载总量如下^[6]:

$$F=26 \text{ kN/m}^3 \times 0.5 \text{ m} \times 10.44 \text{ m} \times 2.28 \text{ m} +$$

$$78.5 \text{ kN/m}^3 \times 0.012 \text{ m} \times 10.44 \text{ m} \times 2.28 \text{ m} +$$

$$35.33 \times 10^{-2} \text{ kN/m} \times 10.44 \text{ m} + 0.5 \times$$

$$29.42 \text{ kN/m}^2 \times 10.44 \text{ m} \times 2.28 \text{ m} = 685.7 \text{ kN}。$$

顶模由 4 根 20 cm 槽钢立柱支撑, 则每根立柱平均受力为 171.42 kN ; 顶模支撑立柱长度分别为 $0.73, 1.14, 0.73, 1.14 \text{ m}$ 。 20 cm 槽钢的截面系数^[10] 如下:

$$W=191.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3;$$

$$I=1913.7 \times 10^{-8} \text{ m}^4;$$

$$A=32.83 \text{ cm}^2$$

$$i_x=7.64 \text{ cm};$$

则长、短立柱的长细比为

$$\lambda_1 = \frac{l_1}{i_x} = \frac{1.14 \times 10^2 \text{ cm}}{7.64 \text{ cm}} = 14.92,$$

$$\lambda_2 = \frac{l_2}{i_x} = \frac{0.73 \times 10^2 \text{ cm}}{7.64 \text{ cm}} = 9.55;$$

查表得轴心受压构件稳定系数 $\psi=0.998$ ^[10], 则

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{171.42 \times 10^3 \text{ N}}{32.83 \text{ cm}^2} = 52.21 \text{ MPa},$$

$$\sigma_b = \frac{F}{\psi A} = \frac{171.42 \times 10^3 \text{ N}}{0.998 \times 32.83 \text{ cm}^2} = 52.32 \text{ MPa}。$$

应力均小于许用应力 $[\sigma]=215 \text{ MPa}$, 可见, 20 cm 槽钢顶模支撑立柱的强度及稳定性满足设计要求。

台车门架主横梁采用 $\text{HN}700 \times 300$ 热轧 H 型钢, 长度为 7.8 m 。主横梁主要受力为顶模支撑 4 根立柱传递的竖向轴力以及立柱的自身重力, 故其荷载计算如下:

$$F_1=F_4=171.42 \text{ kN} +$$

$$25.77 \text{ kg/m} \times 1.14 \text{ m} \times 9.8 \text{ N/kg} = 171.71 \text{ kN},$$

$$F_2=F_3=171.42 \text{ kN} +$$

$$25.77 \text{ kg/m} \times 0.73 \text{ m} \times 9.8 \text{ N/kg} = 171.60 \text{ kN}。$$

台车门架立柱采用 $\text{HN}500 \times 200$ 热轧 H 型钢,

其受力包括由门架主横梁传递的竖向力荷载, 以及由上部侧模支撑丝杆传递的水平力 $F_5=F_7=212.33$ kN、 $F_6=F_8=74.18$ kN, 门架受力简图如图 6^[12] 所示。

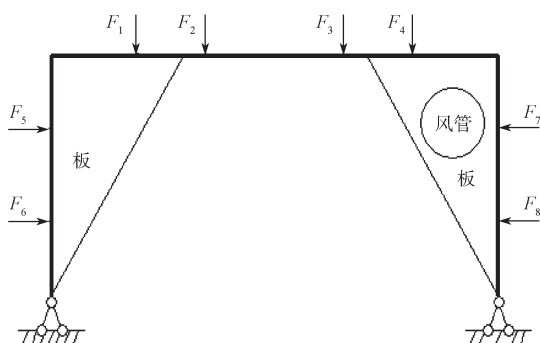


图 6 台车门架受力简图

Fig. 6 Force diagram of the trolley gantry

3.3 有限元分析

在用 ANSYS 有限元分析前, 需要定义材料的属性, 本工程使用的隧道衬砌台车门架为 Q235 钢, 材料密度 $\rho=7850$ kg/m³, 弹性模量 $E=2.06 \times 10^5$ MPa, 泊松比 $\mu=0.3$ ^[6], 具体的材料参数如图 7 所示。

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
5	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C ⁻¹		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's...			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	Derive from	0.3		
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		
12	Strain-Life Parameters				
20	S-N Curve	Tabular			

图 7 隧道衬砌台车门架材料参数

Fig. 7 Material parameters of the gantry tunnel lining

采用 ANSYS 有限元分析软件对梁单元和板单元建立台车门架模型, 如图 8 和 9 所示。

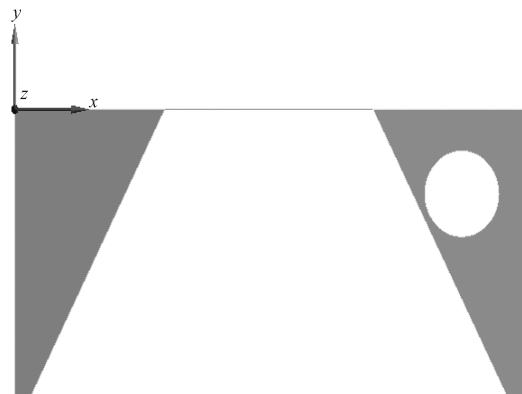


图 8 台车门架有限元模型

Fig. 8 Finite element model of the trolley mast

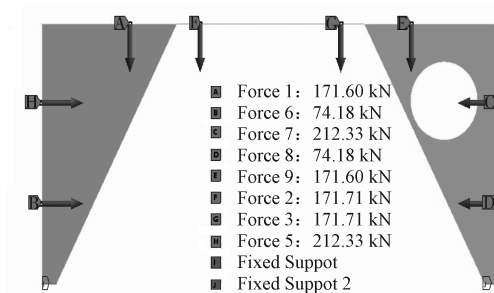


图 9 台车门架的约束和荷载分布图

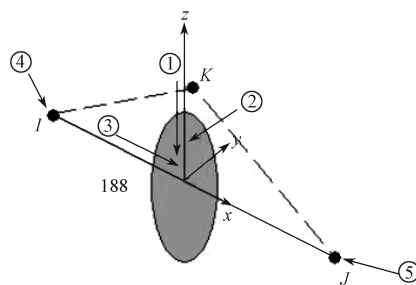
Fig. 9 Constraints and load distribution diagram of the trolley gantry

使用 mesh 模块对台车门架进行网格划分, 梁单元使用 Beam188 单元, 该单元基于 Timoshenko 梁理论, 且适用于分析细长的梁^[6]。

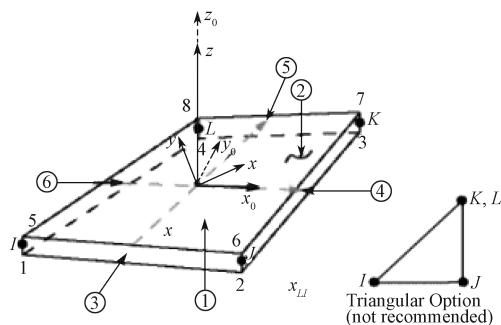
Beam188 是一个二节点的三维线性梁, 在每个节点上有 6 个或 7 个自由度, 自由度数目的改变是通过 KEYPT(1) 来控制的, 当 KEYPT(1) 为 0 时, 每个节点有 6 个自由度, 为 x 、 y 、 z 方向的位移和绕其的转动; 当 KEYPT(1) 为 1 时, 会增加第 7 个自由度^[6]。

板单元使用 Shell181 单元, 它是一个 4 节点单元, 每个节点具有 6 个自由度, 为 x 、 y 、 z 方向的位移和绕其的转动。Shell181 单元适合对具有一定厚度的壳体结构进行分析。

Beam188 单元和 Shell181 单元的几何示意图如图 10 所示。



a) Beam188 单元



b) Shell181 单元

图 10 Beam188 单元和 Shell181 单元的几何示意图

Fig. 10 Beam188 unit and Shell181 unit geometry diagram

二次衬砌台车各部位经 ANSYS 分析处理后, 得到如图 11~15 所示结果。

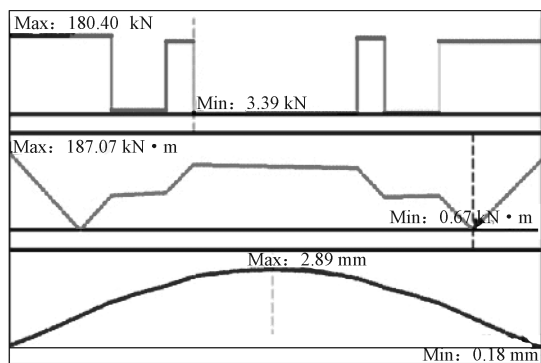


图 11 主横梁弯矩 - 剪力 - 位移图

Fig. 11 Moment-shear-displacement of the main beam

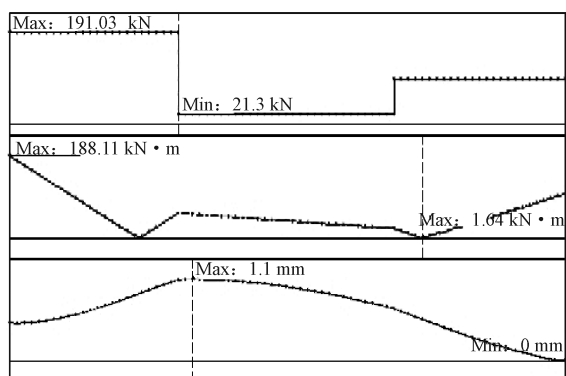


图 12 左立柱弯矩 - 剪力 - 位移图

Fig. 12 Moment-shear-displacement diagram of the left column

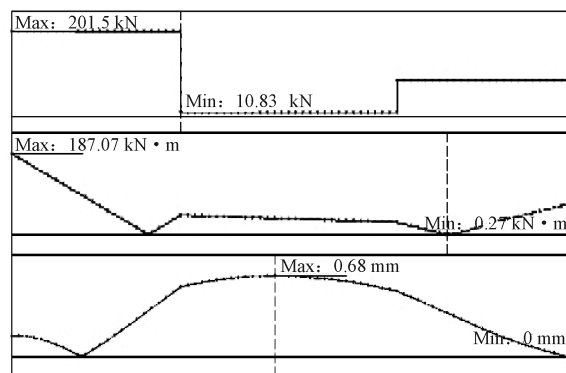


图 13 右立柱弯矩 - 剪力 - 位移图

Fig. 13 Moment-shear-displacement diagram of the right column

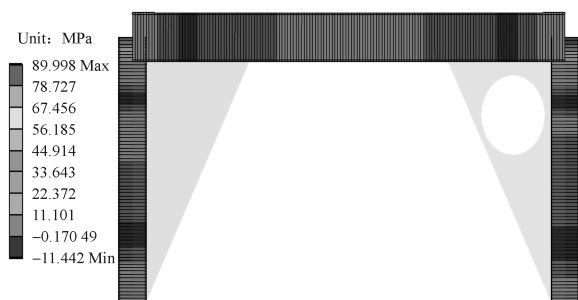


图 14 台车门架最大组合应力云图

Fig. 14 Maximum combined stress nephogram of the trolley gantry

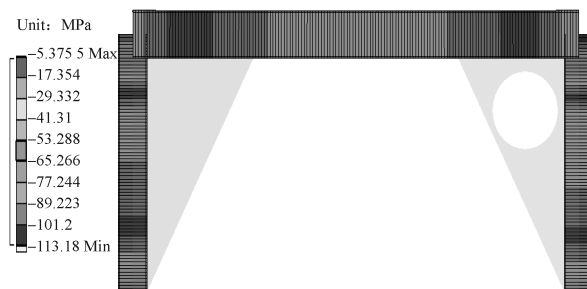


图 15 台车门架最小组合应力云图

Fig. 15 Minimal combined stress nephogram of the trolley gantry

由图 11~15 所示结果可知, 台车门架受到的最大应力为 113.18 MPa, 小于许用应力 $[\sigma]=215$ MPa, 故满足强度要求。门架最大变形量为 2.9 mm, 满足 $L/400=9.5$ mm 的容许变形要求^[8-9]。

台车底部纵梁承受底部丝杆传递的水平向侧压力 $F_2=163.36$ kN, 以门架底部滑轮处为支点, 台车门架底纵梁计算模型见图 16。



图 16 台车门架底纵梁计算模型

Fig. 16 Calculation model of bottom longitudinal beam of the trolley mast

由图 16 可知, 压力作用在支点上。故门架底纵梁用 HN600 × 200 热轧 H 型钢满足要求。

4 结论及建议

通过对隧道二次衬砌台车模板系统设计及对台车系统的强度、刚度进行验算, 可得出如下结论:

1) 隧道二次衬砌台车的模板系统(顶模、侧模结构的模板、纵肋槽钢、环向主肋)、台车结构(顶模支撑立柱、台车门架主横梁、门架立柱、台车底纵梁)的强度、刚度均满足要求。

2) 浇筑二次衬砌混凝土时应注意对称浇筑, 保持台车受力对称, 并随时检查支撑的稳定性。

3) 经计算, 二次衬砌台车底纵梁支点处(车轮)承受了底部丝杆传递的水平向侧压力 163.36 kN。为保证结构安全, 建议在浇筑二次衬砌混凝土时, 在门架的底纵梁处纵向每隔 1 m 加设 1 道 I20a 工字钢水平支撑, 待混凝土初凝后可拆除该水平支撑。

4) 侧模考虑混凝土随高度变化而产生的流体压力, 底部模板承受较大荷载, 建议在两主肋之间增加环向 L 45 × 6 次肋角钢。

参考文献:

- [1] 孙丽英. 隧道衬砌台车结构受力与位移分析[J]. 工程机械与维修, 2019(6): 102-103.
SUN Liying. Analysis of Force and Displacement of Tunnel Lining Trolley Structure[J]. Construction Machinery and Maintenance, 2019(6): 102-103.
- [2] 龙 顺. 新型无门架衬砌台车有限元分析及优化设计[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020.
LONG Shun. Finite Element Analysis and Optimal Design of a New Mastless Lining Trolley[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2020.
- [3] 蔡明慧. 衬砌台车关键受力部位的确定及强度计算[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2007, 6(1): 65-68.
CAI Minghui. The Determination of Key Force-Bearing Parts and the Calculation of the Strength of Lining Trolley[J]. Journal of Shijiazhuang Institute of Railway Technology, 2007, 6(1): 65-68.
- [4] 刘晓宏, 黄高飞, 程朝亮. 隧道衬砌台车模板结构优化分析[J]. 建筑机械, 2019(10): 37-39.
LIU Xiaohong, HUANG Gaofei, CHENG Chaoliang. Optimization Analysis of Formwork Structure for Tunnel Lining Trolley[J]. Construction Machinery, 2019(10): 37-39.
- [5] 陈文琛, 宋远卓, 金 龙, 等. 公路隧道钢模台车数值计算与分析[J]. 机械研究与应用, 2014, 27(1): 105-106, 110.
CHEN Wenchen, SONG Yuanzhuo, JIN Long, et al. Numerical Calculation and Analysis of Steel Trolley of Highway Tunnel[J]. Mechanical Research and Application, 2014, 27(1): 105-106, 110.
- [6] 王 云. 基于 Ansys 的隧道衬砌台车结构的分析及优化[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
WANG Yun. Design of Based on ANSYS Tunnel Lining Trolley Structure Analysis and Design Optimization[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.
- [7] 曹小林. 隧道混凝土衬砌施工中衬砌台车受力分析[J]. 铁道工程学报, 2002(3): 51-53.
CAO Xiaolin. Loading Analysis of Lining Jumbo During Construction of Concrete Tunnel Lining[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002(3): 51-53.
- [8] 雍金柱. 扁平特大断面隧道模板台车设计及施工[J]. 铁道勘察, 2018, 44(6): 111-117.
YONG Jinzhu. Design and Construction of Formwork Trolley for Flat Super Larger Section Tunnel[J]. Railway Investigation and Surveying, 2018, 44(6): 111-117.
- [9] 朱高云, 李金雷, 常春辉. 自制人行横洞衬砌台车在何家寨隧道中的应用[J]. 施工技术, 2020, 49(增刊1): 606-613.
ZHU Gaoyun, LI Jinlei, CHANG Chunhui. Application of Self-Made Crosswise Tunnel Lining Trolley in Hejiashai Tunnel[J]. Construction Thchnology, 2020, 49(S1): 606-613.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计规范: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 19-50, 209-213.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD), General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 19-50, 209-213.
- [11] 朱慈勉. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 31-35.
ZHU Cimian. Structural Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 31-35.
- [12] 张 科. 全液压自动行走混凝土衬砌台车结构受力计算[J]. 工程建设与设计, 2008(11): 81-85.
ZHANG Ke. Structural Force Calculation of Fully Hydraulic Automatic Walking Concrete Lining Trolley[J]. Engineering Construction and Design, 2008(11): 81-85.

(责任编辑: 廖友媛)