

大型排涝水工隧洞二次混凝土衬砌钢模台车设计和力学计算

忻传奎

上海东华工程咨询有限公司 上海 200434

摘要: 大断面隧洞在近年的水利水电工程日益增多。对大断面水工隧洞的砼衬砌的钢模台车的设计、应用技术也相应提升。对此,本文以大型水工排涝隧洞二次混凝土衬砌钢模台车设计及力学验算安全角度出发,希望能给相关人员带来一定的参考和启示。

关键词: 大型;排涝水工隧洞;衬砌;钢模台车;力学计算

1 工程概况及钢模台车简介

临海市大田平原排涝二期工程建设的任务是以防洪排涝为主,兼顾水资源综合利用。许安村至钓鱼亭2#排涝隧洞洞线与一期已实施隧洞并行布置,相距100m,隧洞长度约2.216km,城门洞型断面。钓鱼亭2#排涝挡潮闸位于钓鱼亭村附近,设计在隧洞出口,闸孔规模为2孔×8m,闸底板高程-3.5m,设计排涝标准20年一遇,挡潮标准50年一遇。

排涝隧洞进口位于许安村西侧,按3级建筑物设计,为城门洞型无压隧洞,隧洞水位为6.07m~5.83m,衬后断面为14.0m×14.0m(宽×高),排涝隧洞总长度2229.91m,隧洞进口底高程为-2.5m,出口底高程为-3.5m,隧洞底纵坡*i* = 0.0451%。其中Ⅲ类围岩长度980m,占隧洞总长度的44%;Ⅳ及Ⅴ类围岩长度1249.91m,占隧洞总长度的56%。整个隧洞洞身采用二次支护形式,一次支护采用锚喷支护(其中Ⅳ及Ⅴ类围岩再加钢拱架支护),二次支护采用钢筋混凝土衬砌。

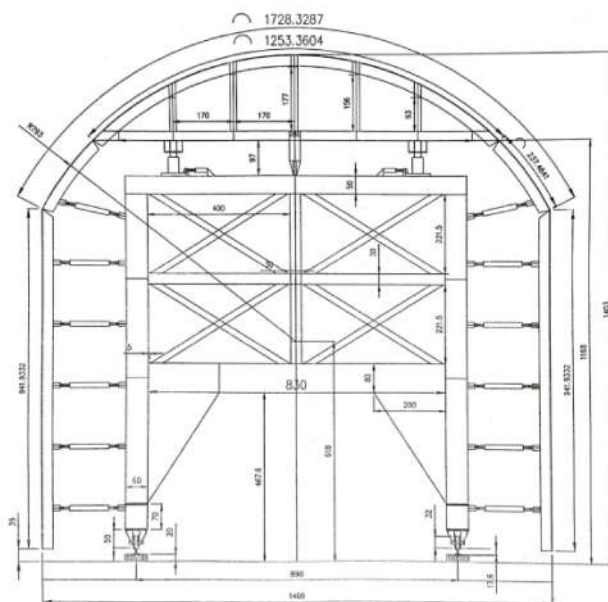
根据隧洞实际情况,采用单段长为9m的钢模台车进行二次支护作业。钢模台车应保证边开挖边衬砌,同时门架净空高度及宽度能保证车辆与设备通行要求;因钢模台车整体较大且重等特点,其行走方式采用电机轨道驱动;支(收)模板形式采用液压操纵,利用液压缸机械锁定支(收)模,保证模板支撑强度。

2 钢模台车的主要技术参数

2.1 钢模台车各技术参数如下:(1)台车模板面板厚度:12mm;(2)台车重量及每延米重量:150.8吨,16.755吨/m;(3)台车类型:液压自行式;(4)台车运行速度:6m/min;(5)驱动电机功率:2*9.5KW;(6)液压电机功率:1*5.5KW,工作压力16MPa;(7)顶升油缸工作行程:250mm;(8)侧向油缸工作行程:

300mm;(9)平移油缸工作行程:±150mm;(10)一次衬砌长度:9.0m;(11)行走方式:轨道自行式。

2.2 钢模台车立面及剖面图



钢模台车立面图

3 钢模台车力学计算

3.1 计算依据

长度为9m,模板面板厚度为12mm,门架采用8300×1300mm,门架腹板厚12mm。针对台车的主要受力构件的强度和刚度进行检算,以验证台车的力学性能能否满足要求。主要根据《路桥施工计算手册》^[1]与《结构力学》^[2],借助结构力学求解器来对台车进行结构检算。

(1) 计算参数:

砼的重力密度24kN/m³;浇筑温度取20℃;浇筑速度2m/h。钢材采用Q235钢,重力密度78.5kN/m³;弹性模量206Gpa,容许拉压应力140Mpa,容许弯曲应

力取181Mpa。有部分钢材采用45#钢，容许拉压应力210Mpa。

(2) 计算载荷：

1) 振动器产生的荷载4.0kN/m²；或倾倒混凝土产生的冲击荷载4.0kN/m²；二者不同时计算。

2) 对侧模产生的压力

砼对侧模产生的压力主要为侧压力，侧压力计算公式为： $P = k\gamma h$

当 $v/T < 0.035$ 时， $h = 0.22 + 24.9v/T$ ；

当 $v/T > 0.035$ 时， $h = 1.53 + 3.8v/T$ ；

式中： P -新浇混凝土对模板产生的最大侧压力(kPa)；

h -有效压头高度(m)；

v -混凝土浇筑速度(m/h)；

T -混凝土入模时的温度(°C)；

γ -混凝土的容重(kN/m³)；

K -外加剂影响修正系数，不掺外加剂时取 $k = 1.0$ ，掺缓凝剂作用的外加剂时 $k = 1.2$ ；

根据前述已知条件：

因为： $v/T = 2/20 = 0.1 > 0.035$ ，

所以： $h = 1.53 + 3.8v/T = 1.91m$

最大侧压力为： $P = k\gamma h = 1.2 \times 24 \times 1.91 = 55kN/m^2$ ；

检算强度时载荷设计值为： $p_a = 1.2 \times 55 + 1.4 \times 4.0 = 71.6kN/m^2$ ；

3) 砼对顶模产生的压力

砼对顶模产生的压力由砼的重力和灌注砼的侧压力组成：

重力 $p_1 = \gamma\delta = 24kN/m^3 \times 0.7m = 16.8kN/m^2$

其中 δ 为浇注砼的厚度。

由于圆弧坡度变小，取灌注为1m/h。

因为： $v/T = 1/20 = 0.05 > 0.035$

所以： $h = 1.53 + 3.8v/T = 1.72m$

侧压力为： $p_2 = k\gamma h = 49.5kN/m^2$

$p_3 = 1.2 \times 49.5 + 1.4 \times 4.0 = 65kN/m^2$

所以顶模受到的压力 $p_b = p_1 + p_3 = 81.8kN/m^2$

可知 $p_b > p_a$ ，顶模和侧模受到的压力相当。

4) 台车结构自重，影响不大，不计入检算载荷。

3.2 台车侧模及顶模检算

台车侧模和顶模面板的支撑结构相同，而顶模面板受砼重力作用产生的压力略大，因而只需检算顶模面板强度和刚度能否满足要求。面板由间距为30cm的槽钢支撑，因此可简化为跨度为0.3m的简支梁，来对面板进行分析。

(1) 面板检算

1) 强度计算

面板为厚度为12mm，面板受到的最大压力为 $p = p_a = 71.6kN/m^2$

面板的抗弯模量 $w = bh^2/6 = 3.6 \times 10^{-5} m^3$

面板所受的最大弯矩为 $M_{max} = ql^2/8 = 8.39kN \cdot m$

面板受到的弯曲应力为 $\sigma = M_{max}/w = 134.2MPa < [\sigma] = 181Mpa$

所以面板强度满足要求。

2) 刚度计算

面板的惯性矩 $I = bh^3/12 = 21.6 \times 10^{-8} m^4$

$f_{max} = (ql^4)/(384EI_x) = 0.117mm < [l/400] = 0.75mm$

所以面板刚度满足要求。

(2) 不等边角钢检算

不等边角钢固支，受均布力 $q_2 = p \times 0.25 = 17.9kN/m$

最大弯矩在跨中， $M = (1/29) \times ql^2 = 1.39kN \cdot m$

不等边角钢采用 90*56*8,抗弯模量查表得 $w = 23.241 \times 10^{-6} m^3$

槽钢所受最大弯曲应力： $\sigma = M_{max}/w = 103.3MPa < [\sigma] = 181Mpa$

惯性矩查表得 $I = 50.786 \times 10^{-8} m^4$

最大挠度： $f_{max} = (ql^4)/(384EI_x) = 2.32mm < [l/400] = 3.75mm$

(3) 弧板检算

弧板宽280mm，材料为 $\delta 12$ 钢板，模板连接梁最大间距1850mm。弧板受力模型可设为受均布力的简支梁，跨距 $l = 1.85m$ 。

均布力 $q_3 = p_a \times 1.5/2 = 49.2kN/m$ (有2片弧板，所以除2)

抗弯模量 $w = bh^2/6 = 1.57 \times 10^{-4} m^3$ ， $M = ql^2/8 = 21kN \cdot m$

$\sigma = M_{max}/w = 133.76MPa < [\sigma] = 181Mpa$

$I = bh^3/12 = 2.2 \times 10^{-5} m^4$

$f_{max} = (5ql^4)/(384EI_x) = 1.66mm < [l/400] = 4.5mm$

3.3 门架检算

除了模板满足受力要求，要保证台车的强度和稳定性，门架也需满足受力要求。因此有必要对门架进行受力分析。门架横梁与门架立柱之间用螺栓紧固，不仅传递集中力而且传递弯矩，因此作为一个整体的分析。

门架所示竖向力是由竖向千斤和油缸传递下来，门架宽8.3m，竖向力也主要由8.3m范围内的模板传递下来。9m台车共传递的竖向力为 $F_{总} = 61.5 \times 12 \times 8.3 = 4944.6kN$ ，共6榀门架，每榀门架有3个竖向受力点，则每个受力点传递的力 $F = 4944.6/15 = 329.64kN$ 。

侧向力由侧模传至千斤，侧模高度4.88m，则 $F = 65.6 \times 12 \times 4.88 = 3841 \text{ kN}$ ，共有千斤数量30件，则每个千斤传递的侧向力 $F = 3841/30 = 128 \text{ kN}$ 。

(1) 强度检算

可知门架最大弯矩发生在横梁中心，对比门架横梁和立柱截面可知，该处也是最危险的点。门架横梁高 $H = 0.8 \text{ m}$ ，宽 $b = 0.4 \text{ m}$ 。其截面特性 $w = (BH^3 - bh^3)/6H = 3.27 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ， $I = (BH^3 - bh^3)/12 = 0.654 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

强度： $\sigma = M/w = 329.64/3.27 = 100.807 \text{ Mpa} < [\sigma] = 181 \text{ Mpa}$

门架横梁的强度满足要求，因此门架的强度满足受力要求。

(2) 刚度检算

可知最大挠度发生在横梁中心处，该处3m范围内无支撑。则以3m简支梁受集中力329.64kN计算：

$$f = (FL^3)/(48EI) = 1.37 \text{ mm} < [L/400] = 7.5 \text{ mm}$$

所以门架横梁刚度满足要求。

3.4 下纵梁的检算

观察台车侧视图可知，下纵梁受门架传递向下的力，同时受到行走和基础千斤的支撑。门架传递的竖向压力 $F = 4944.6/10 = 494.46 \text{ kN}$ 。

基础千斤顶采用的是 $\Phi 114 \times \delta 6$ 的无缝钢管（45#钢），钢管截面积

为 $2.037 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ，能够提供的支撑力为 $F = 2.037 \times 210 = 427.77 \text{ kN}$ 。

下纵梁高0.7m，宽0.6m，截面特性：

$$W = (bH^3 - (b-\delta)h^3)/6H = 4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3, I = (bH^3 - (a-\delta)h^3)/12 = 1.04 \times 10^{-3} \text{ m}^3。$$

下纵梁弯曲应力：

$$\sigma = M/w = 233.69/4.15 = 56.31 \text{ Mpa} < [\sigma] = 181 \text{ Mpa}$$

最大挠度发生在下纵梁中心处，以两个基础千斤间距离3m，受集中力494.46kN计算：

$$f = (FL^3)/(48EI) = 1.29 \text{ mm} < [L/400] = 7.5 \text{ mm}$$

3.5 丝杆千斤的检算

丝杆千斤容易发生的破坏为压杆失稳，即无缝钢管受力弯曲导致丝杆千斤的破坏。本节主要分析无缝钢管压杆的稳定性，来验证丝杆千斤的受力是否满足要求。台车千斤有三种：基础千斤，竖向千斤和侧向千斤。基

础千斤较短，工作长度仅为500mm，不易发生压杆失稳，因此主要分析竖向千斤和侧向千斤的压杆稳定性。

(1) 竖向千斤的稳定性

采用的是 $\Phi 152 \times \delta 6$ 的无缝钢管，工作长度约为1m，每个竖向千斤受力为 $F_1 = 329.64 \text{ kN}$ 。

根据《路桥施工计算手册》第12章1.2节表12-2

轴心受压稳定性计算公式为

$$N/A_m \leq \varphi_1[\sigma]$$

$$N/A_m = 329.64/2.037 = 161.826 \text{ MPa}$$

由长细比 $\lambda = l_0/r$

$$r = (I/A)^{0.5} = [0.0491(114^4 - 102^4)/\pi(0.057^2 - 0.051^2)]^{0.5} = 0.038 \text{ m}$$

$$\lambda = l_0/r = 0.8/0.038 = 21.1, \text{ 查表得 } \varphi_1 = 0.9$$

$$\varphi_1[\sigma] = 0.9 \times 210 = 189, \text{ 可得 } N/A_m \leq \varphi_1[\sigma]$$

因此竖向千斤压杆稳定性满足要求。

(2) 侧向千斤的稳定性

在门架检算时，已得到侧向千斤所受轴力为128kN。采用的是 $\Phi 114 \times \delta 6$ 的无缝钢管，单独受力的侧向千斤最长工作长度为162mm。

$$N/A_m = 128/2.037 = 62.84 \text{ MPa}$$

由长细比 $\lambda = l_0/r$

$$r = (I/A)^{0.5} = [0.0491(114^4 - 102^4)/\pi(0.057^2 - 0.051^2)]^{0.5} = 0.038 \text{ m}$$

$$\lambda = l_0/r = 1.62/0.038 = 42.63, \text{ 查表得 } \varphi_1 = 0.804$$

$$\varphi_1[\sigma] = 0.804 \times 210 = 169, \text{ 可得 } N/A_m \leq \varphi_1[\sigma]$$

因此侧向千斤压杆稳定性满足要求。

结语

台车的所受的混凝土压力是以最大情况来设定的，以上力学分析过程中所采用的受力模型均采用结果偏于安全的简化方法计算。本文分析了台车的主要受力部件和容易破坏的部位，经过以上分析，各个部件均能够满足受力要求，因此本台车能够满足施工的受力要求。

参考文献

[1] 路桥施工计算手册/周水兴,何兆益,邹毅松等编著,人民交通出版社,2001.5; ISBN 978-7-114-03855-6。

[2] 结构力学((第4版)龙驭球,包世华,袁驷主编,高等教育出版社,2018年8月,ISBN 978-7-04-049930-8。