

明挖隧道移动工厂衬砌施工方法研究与应用

黄灿^{1,2,3}, 孟奎^{1,2,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室;
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心)

摘要:以某北方在建高速铁路明挖隧道工程为背景,研究了在冬季施工时,提高无支撑基坑内的衬砌施工效率的方法。提出一种移动工厂衬砌施工方法,通过移动工厂,将野外施工转变为室内施工,雨雪季可以不停工,增加了有效工期。增加钢筋台车将钢筋绑扎工序从关键路线中解放出来,实现工厂化流水线作业;通过监控养护环境温度和湿度以维持最优养护温度的方法,将每板衬砌的施工周期从12 d缩短为6 d,既满足了工期要求,又保证了衬砌施工质量。

关键词:明挖隧道;移动工厂;冬季施工;衬砌施工

1 工程概况

1.1 工程背景

该文研究的移动工厂施工方法应用于某在建高速铁路的明挖隧道段的一部分。其基坑支护结构形式为土钉墙放坡+双排钻孔灌注桩的形式,为无支撑段,该段基坑最大开挖深度为26.7 m,隧道洞顶最小埋深为8.94 m。基坑冠梁宽度为5 m,冠梁挖侧车行通道宽度为10 m,见图1。

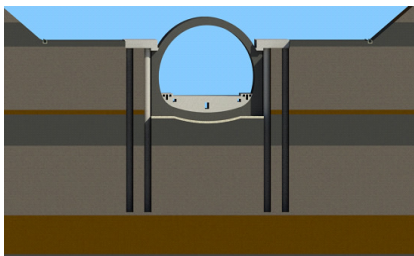


图1 隧道断面

该段隧道的整体施工工艺为:①放坡开挖至地下水位以上0.5 m;②施作降水井;③施作支护结构钻孔桩;④三重管高压旋喷桩基底加固;⑤开挖至冠梁底,施作冠梁;⑥基坑开挖;⑦施作垫层及防水;⑧衬砌施工、养护;⑨覆土回填及隧道内防水与机电安装。

该文研究的移动工厂施工方法是针对步骤⑧,对传统衬砌施工养护工法进行的工厂化智能化升级

改造。

1.2 传统衬砌施工方法

传统衬砌施工是在仰拱施工完成后进行的,其步骤为:①绑扎两侧钢筋,通过固定于冠梁上的拉钩防止内弯;②模板台车完成上一板衬砌养护并脱模,前进至侧筋绑扎区;③两侧钢筋拉钩释放,绑扎拱顶钢筋;④合模、浇筑混凝土并养护。该方法的钢筋绑扎和混凝土浇筑养护均在模板台车上进行,均处于关键路线,钢筋绑扎和养护是制约工效的关键因素;其养护方式在北方冬季效果差、混凝土强度成长慢。为提高工效,该文介绍的移动工厂施工方法,采取的是增加钢筋台车,将钢筋绑扎工序从关键路线中解放出来;通过监控养护混凝土的内部温度和环境温度,控制温差,促使混凝土强度快速达标。

2 移动工厂衬砌施工方法

移动工厂(图2)由移动厂房、钢筋台车、模板台车、养护系统组成,这些设备相对位置固定,随着移动工厂整体移动,形成流水线作业。

2.1 移动厂房

移动厂房(图3)是一个可以沿隧道纵向轴线方向移动的钢结构厂房。在钢结构厂房的基础上,配置铰接式大车行走机构,可跨越0.5 m高的冠梁台阶;内部配置2台10 t单梁起重机。

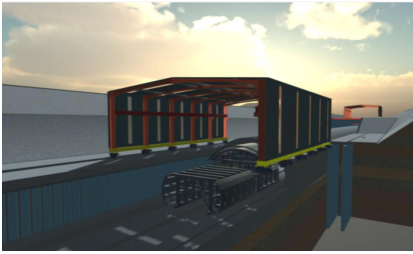


图 2 移动工厂布置

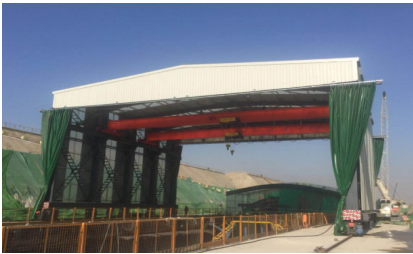


图 3 移动厂房

移动厂房的主要功能是将野外作业转变为室内作业,最大程度减小环境因素的影响,如风雨天气,增加有效作业工时,提高生产效率,改善工人工作环境。冬季施工时,两侧门帘可闭合,维持混凝土所需的环境温度以提高养护效率。同时,所有移动工厂内的所有设备供电与监控均集成于移动厂房电控室,提高现场管理效能。

铰接式大车行走机构跨越冠梁台阶的方式为:沿台阶铺设轨道,移动厂房行至台阶时,厂房内起重机空载并锁止,移动厂房沿台阶轨道行驶至台阶上,然后将台阶下的轨道垫平,与台阶上的轨道同高,移动厂房即可在该阶段工作。

2.2 钢筋台车

钢筋台车可用来绑扎两侧及拱顶钢筋,由主体结构、步履式行走机构、拱形调整伸缩臂、工作平台组成。行走机构纵向单次移动距离为 2 m,横向微调距离为 50 mm。伸缩臂架上设有卡槽,可以精确定位钢筋,然后伸缩臂张开,将钢筋形状撑至目标弧度(图 4)。



图 4 钢筋台车

钢筋台车的行走机构、伸缩臂机构均配置传感器,

其位置信息、拱形信息可接入移动工厂信息化平台。台车通过调整伸缩臂长度和主体结构高度,利用钢筋自身重力弯制成设计弧形,减轻工作劳动强度,节省钢筋绑扎工人 3 名。

2.3 模板台车与养护系统

模板台车(图 5)较普通台车增加了车自动定位系统。以隧道内的已知点作为快速定位控制点,并在此架设高分辨率长焦数字相机以及激光测距仪。模板台车上固定有反光片,作为激光反射靶,激光仪和数字相机所得数据与设计值比对,得出偏移量,反馈到模板台车控制系统,自动调整位置。

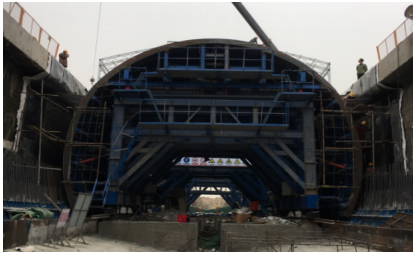


图 5 模板台车

模板台车外模共分为 12 小块,每小块重 2 t,相邻块之间通过锁止装置固定连接。借助移动厂房内的双起重机抬吊,可将外模分为 2 组整体吊运,使得铺设于外模的养护装置无需拆卸,节省了时间。

养护系统配置有监控系统,可实施监控混凝土内部温度、养护区域的温湿度以及周围环境温度,并根据其变化动态调整养护的工艺参数,使混凝土在高温高湿的环境下快速发展强度的同时,混凝土的内部温差始终维持在设计要求的范围内,不会因冬季气温极低水蒸气大量冷凝出现积水或结冰现象。该施工段工期为冬季,每板隧道长度为 9 m,混凝土标号为 C35,混凝土物理热学参数参考经验值(表 1)。

表 1 混凝土物理热学参考参数

| 参数 | 单位 | 数值 |
|------------|--|--------------------|
| 强度等级 | | C35 |
| 弹性模量 | MPa | 4.0×10^4 |
| 水泥 7 d 水化热 | J/g | 298 |
| 热胀系数 | 1/℃ | 8×10^{-6} |
| 导热系数 | $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot \text{℃})$ | 261.6 |
| 比热 | $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$ | 0.98 |
| 绝热温升 | ℃ | 39 |

浇筑温度按照 15 ℃ 计算,由于是带模养护,环境湿度取 70%,模外实际湿度可达 95% 以上。蒸养温度

取(55±5)℃计算。从混凝土浇筑开始,模拟冬期施工混凝土内表1、2、3、5 d的温度发展,以及强度发展情况。从隧道衬砌内部温度包络图(图6)可知:1、2、3、5 d的温度分别为53.1、57.5、56.2、53.2℃,温峰出现时间约为浇筑后第二天左右,最高温度低于铁路

规范设计要求65℃。

通过结构模型的仿真计算可知:采用(55±5)℃范围的蒸气对衬砌混凝土进行养护,混凝土5 d强度可达37 MPa,同时内部最高温度低于65℃,满足规范要求。

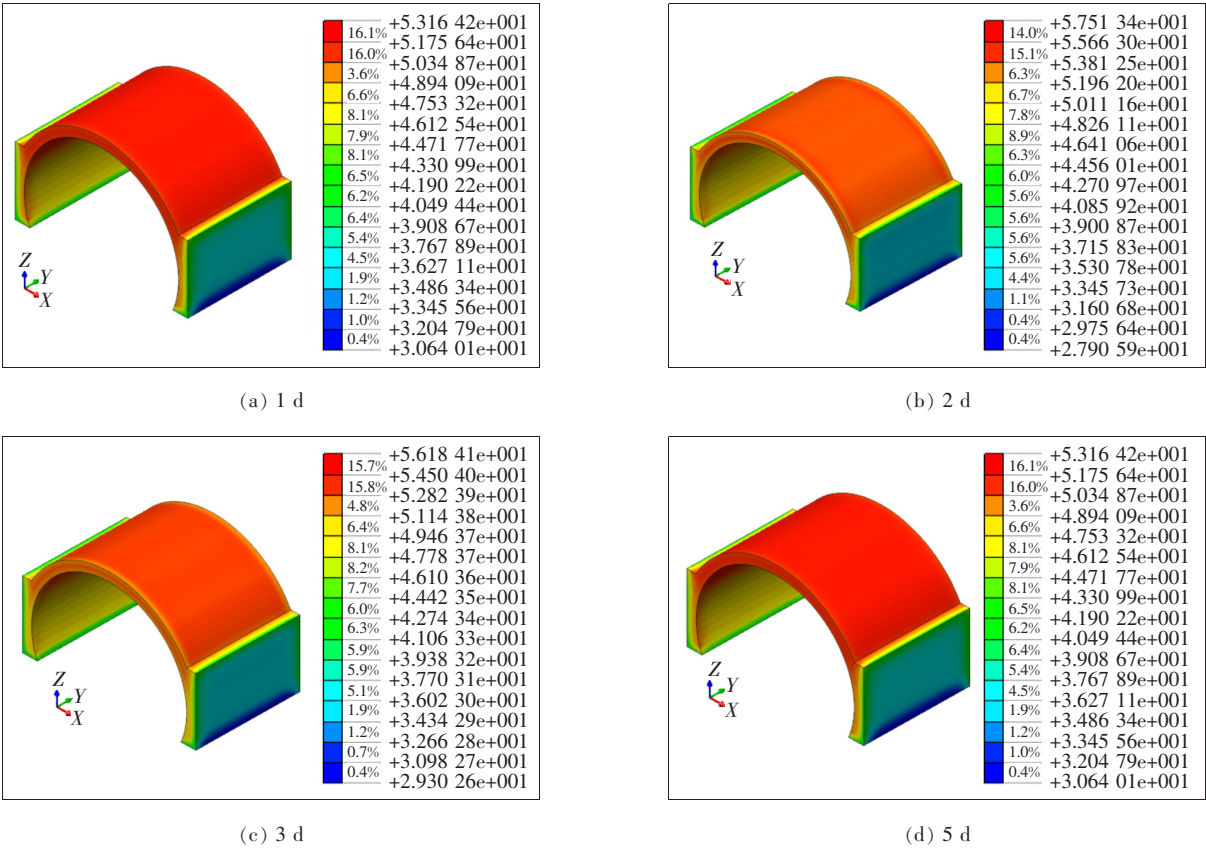


图6 冬季衬砌混凝土内部温度包络图(单位:℃)

通过模型试验,对比了混凝土在监控养护和标准养护条件下,1、2、3、5、7 d的抗压强度和混凝土温度变化数据如表2所示。

表2 不同养护条件抗压强度的对比

| 养护时间/d | 抗压强度/MPa | |
|--------|----------|------|
| | 监控养护 | 标准养护 |
| 1 | 10.3 | 2.7 |
| 2 | 23.7 | 12.5 |
| 3 | 31.1 | 17.9 |
| 5 | 36.4 | 23.8 |
| 7 | 37.1 | 28.7 |
| 环境温度/℃ | 60 | 20 |
| 最高温度/℃ | 63 | 41 |
| 内表温差/℃ | <5 | >21 |

从表2可以明显看出:不同养护条件下,试件抗压强度随养护龄期的延长而增大。智能养护条件下混凝土1、2、3、5、7 d的抗压强度分别达到设计强度的29%、68%、89%、104%、106%,标准条件下分别是8%、36%、51%、68%、82%。由此可知混凝土在智能养护条件下早期强度发展迅速,5 d即可达到设计强度,相较于标准养护,节省了2 d工期。

3 移动工厂工艺

移动工厂施工流程如图7所示,相较于只有模板台车的施工方法,新增了吊拉钢筋笼的工序。该工序是为了防止钢筋台车离开后,钢筋笼因自重下挠变形,导致模板台车无法进入。通过移动厂房内的2台10 t起重机,抬吊配置12个吊点的专用吊具,将钢筋笼提

拉稳定。该工艺通过钢筋台车将钢筋绑扎从关键路线中移除,每板衬砌(9 m)节省钢筋绑扎工期 4 d。通过监控养护提高养护效率,每板节省工期 2 d,共计 6 d。移动工厂通过改善工作条件,提高工人效率,每板减少工人 5 名。

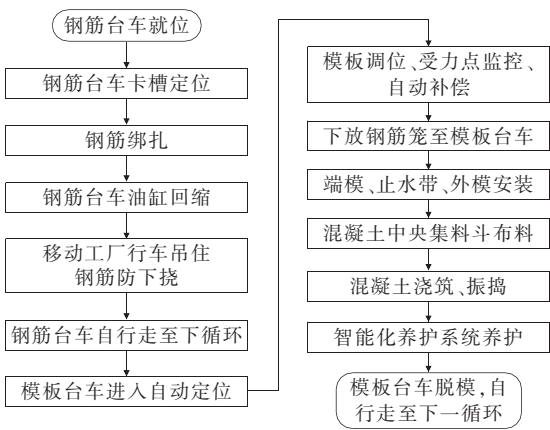


图 7 移动工厂施工流程图

4 经济效益对比分析

在总工期 9 个月的限制条件下,对比分析传统施工方法和移动工厂施工方法在 400 m 隧道分别需要的设备投入、人工情况。传统施工方法,一套班组设备完成 400 m 隧道需 18 个月,因此需配置 2 套。而移动工厂只需 1 套即可在 9 个月内完成 400 m 隧道施工。具体比较见表 3。

通过分析表 3 发现:移动工厂较传统施工方法成本减少 213 万元。每个作业班组作业人员减少 20 人,降低了施工风险。

5 结论

(1) 项目在明挖隧道衬砌施工中,创新性地引入了移动工厂,将野外施工转变为室内施工,通过配置流

表 3 施工方法及经济效益对比

| 施工方法 | 工效 | 主要设备 | 人工 | 费用合计/万元 |
|----------|-------------|--|----------------------------|---------|
| 传统施工方法 | 每板平均工期 12 d | 4 台 25 t 汽车吊(3 万元/月);2 台模板台车(100 万元/台);2 套标准养护系统(50 万元/套);2 台养护棚(5 万元/台) | 2 套常规班组,共 30 人[1 万元/(人·月)] | 688 |
| 移动工厂施工方法 | 每跨平均工期 6 d | 移动厂房(270 万元)摊销 50%(135 万元);钢筋台车(50 万元);模板台车(100 万元);监控养护系统(100 万元) | 1 套精简班组,共 10 人[1 万元/(人·月)] | 475 |

水线化的作业设备,形成相对固定的工序、工位,实现工厂化生产和管理。

(2) 移动工厂通过增加钢筋台车释放了钢筋绑扎所需要的时间,通过模板台车自动定位系统提高定位精度。在减轻了劳动强度的同时,提高了施工效率、保证了施工质量。

(3) 研发的智能温控及养护系统,一方面保障冬季混凝土浇筑正常进行;另一方面,也确保冬季隧道衬砌混凝土养护质量可靠,使隧道衬砌混凝土从浇筑完成到拆模的养护温度均在可控制、可监测的环境下进行,实现整个工艺的智能化。

参考文献:

[1] 中国公路学报编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报,2015(5).
[2] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设,2010(4).
[3] 李晓. 严寒地区预制 T 梁移动式生产厂房设计与应用[J]. 山西建筑,2017(5).
[4] 王强. 浅谈移动模架原位现浇制梁工厂化问题[J]. 桥梁建设,2007(2).
[5] 贺文波. 整体式弧形模板台车在隧道仰拱快速施工中的应用[J]. 交通世界,2016(25).
[6] 张羽,孙合朋,张腾. 寒冷地区隧道冬季施工技术[J]. 公路,2016(6).