

喀斯特山地城市大断面地铁车站暗挖施工模板支撑 力学分析——以贵阳轨道交通 3 号线 黔灵山公园站为例¹⁾

赵世新^{*,2)} 刘灯凯^{†,3)} 余玉华^{*} 王 勇^{*} 饶军应^{**,††)}

^{*}(中铁五局集团贵州工程有限公司, 贵阳 550001)

[†](贵州财经大学管理科学与工程学院, 贵阳 550025)

^{**}(贵州大学空间结构研究中心, 贵阳 550025)

^{††}(贵州大学绿色建筑与智能建造全省重点实验室, 贵阳 550025)

摘要 为解决在多岩溶、多断层的喀斯特地质条件下大断面地铁车站暗挖施工面临的模板支撑稳定性问题, 以贵阳轨道交通 3 号线黔灵山公园站为例, 提出结合台车浇筑、盘扣式模板支架施工的支撑体系, 给出了其施工方案, 并分析了模板支架的受力特性以及安全保证措施。该工程的顺利实施表明该模板支撑技术体系有效抑制了喀斯特地质中大跨地下工程施工致灾风险, 达到了安全、高质、高效的施工效果, 可供类似工程参考。

关键词 喀斯特, 大断面车站, 暗挖施工, 模板支撑

中图分类号: U231^{†.4} DOI: 10.6052/1000-0879-24-415

文献标识码: A CSTR: 32047.14.1000-0879-24-415

MECHANICAL ANALYSIS OF FORMWORK SUPPORT IN UNDERGROUND EXCAVATION CONSTRUCTION OF LARGE SECTION METRO STATIONS IN KARST MOUNTAIN CITIES: A CASE OF QIANLINGSHAN PARK STATION IN GUIYANG METRO LINE 3¹⁾

ZHAO Shixin^{*,2)} LIU Dengkai^{†,3)} SHE Yuhua^{*} WANG Yong^{*} RAO Junying^{**,††)}

^{*}(China Railway Fifth Engineering Group Guizhou Engineering Company Limited, Guiyang 550001, China)

[†](School of Management Science and Engineering, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China)

^{**}(Spatial Structure Research Center of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

^{††}(Provincial Key Laboratory of Green Building and Intelligent Construction, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract To address the formwork support stability challenges encountered during the underground excavation of large-section metro stations in karst geological conditions characterized by multiple karst caves and faults, this paper takes Qianlingshan Park Station of Guiyang Metro Line 3 as a case study. A novel support

2024-10-15 收到第 1 稿, 2025-03-11 收到修改稿。

1) 黔科合基础项目 (ZK[2023] 一般 080) 和贵州省科技计划项目 (黔科合平台 ZSYS[2025]009) 资助。

2) 赵世新, 高级工程师, 主要从事地下工厂施工管理及研究工作。E-mail: 724829484@qq.com

3) 通讯作者: 刘灯凯, 博士, 讲师, 主要从事土木工程及管理方面的教学与科研工作。E-mail: liudk@mail.gufe.edu.cn

引用格式: 赵世新, 刘灯凯, 余玉华等. 喀斯特山地城市大断面地铁车站暗挖施工模板支撑力学分析——以贵阳轨道交通 3 号线黔灵山公园站为例. 力学与实践, 2026, 48(1): 85-95

Zhao Shixin, Liu Dengkai, She Yuhua, et al. Mechanical analysis of formwork support in underground excavation construction of large section metro stations in karst mountain cities: a case of Qianlingshan Park Station in Guiyang Metro Line 3. *Mechanics in Engineering*, 2026, 48(1): 85-95

system integrating trolley-based concrete casting and disk-lock formwork scaffolding is proposed. The construction scheme of this system is detailed, and its mechanical characteristics, including stress distribution in both the trolley formwork and scaffolding structure, are analyzed alongside safety assurance measures. The successful implementation of this project demonstrates that the proposed technical system effectively mitigates disaster risks in large-span underground engineering within karst geology. It achieves safe, high-quality, and efficient construction outcomes, providing a valuable reference for similar engineering projects in comparable geological environments.

Keywords Karst geology, large section station, underground excavation construction, formwork support

在复杂地质条件下的地铁车站暗挖施工中,其模板支撑体系安全风险高、管控难、关键技术复杂,国内外学者对此展开了系列研究。例如,以深圳地铁5号线黄贝岭站为例,王威^[1]介绍了侧墙组拼式大模板施工技术,以解决大相邻模板版面拼接缝隙错差过大、大面墙组装后对角线差值大等问题;田德森^[2]和何成滔等^[3]则分析了天津地铁和平站混凝土施工中模板关键节点技术、结构计算、主要施工步骤等,并提出了处理措施;周宁等^[4]研发了一种可整体移动的侧模板,该模板组装后随工作面整体移动,解决了顶纵梁侧模反复拼装、拆卸及转运的难题。以南京地铁句容站明挖区间为例,何文凯^[5]研究了明挖区间盘扣式模板及支撑体系相关问题;陆征然等^[6]运用Abaqus分析了不同数量立杆在不同程度性能缺陷因素作用下的承载性能,认为缺陷构配件应搭配、分散间隔使用;李宇周^[7]基于模糊综合评价法构建了三标度评价模型,评估了模板支撑体系的稳定性影响因素,认为构件质量尤其是扣件质量最为重要;陈桂香等^[8]设计了一种三角形稳定支撑结构,并基于Ansys开展了模板支撑结构特征值屈曲分析和非线性屈曲分析,发现三角形稳定支撑结构设计可有效提高混凝土梁模板支撑结构的稳定性。既有研究成果为模板支撑体系的设计、施工安全奠定了坚实基础。

然而,既有研究仍存在一定局限性:其一,现有技术体系多针对常规地质条件,对喀斯特地貌中存在的地质问题考虑不足;其二,既有模板支撑体系的优化多聚焦于单一构件强度或节点连接可靠性,对岩溶区暗挖施工引发的三维空间变形问题考虑不足;其三,现有施工工法虽已实现机械化改进,但针对溶腔群发育区段模板快速调

姿定位等关键技术尚未形成系统性解决方案。这些不足会导致传统模板支撑体系在喀斯特地质应用中拼装累计误差超标、支架地基突变失稳等工程风险。

贵阳是国内喀斯特地貌最为集中的省会城市,具有地貌变化大、岩溶分布范围广、岩溶类型齐全、软弱夹层分布无规律、地下水分布复杂等特点^[9]。黔灵山公园站为贵阳市轨道交通3号线工程的中间车站,采用暗挖施工,钻孔遇溶率16.3%,是典型的喀斯特地貌,施工难度大。为此,本文提出结合台车浇筑、盘扣式模板支架施工的支撑体系,以期为喀斯特地质中大跨地下工程施工提供参考。

1 工程简介

黔灵山公园站(见图1)为贵阳市轨道交通3号线工程的中间车站,位于北京西路与枣山路十字路口下方,车站沿枣山路呈南北方向布置,车站起讫里程YDK32+742.266~YDK32+962.204,总长220 m,标准段净宽19.4 m,埋深8.0~11.8 m,站台中心处车站顶板覆土约10.3 m,轨面埋深约25.2 m。共设置4个出入口,2个安全出口,2组风亭,车站围岩等级为V级,主体结构采用双侧壁导坑(9部)暗挖法施工。

钻探揭露车站场地范围内主要不良地质有岩溶和断层,岩溶形态主要以溶洞、溶沟(槽)、裂隙为主,岩体内主要为溶孔、垂直溶洞(隙)等。勘察共施钻49个钻孔,经钻探揭露,遇溶洞(隙)钻孔8个,钻孔遇溶率16.3%。场地内有一断层通过(F4断层,为非活动断层),位于黔灵山公园站内,为走向平移断层,地质情况如图2所示。

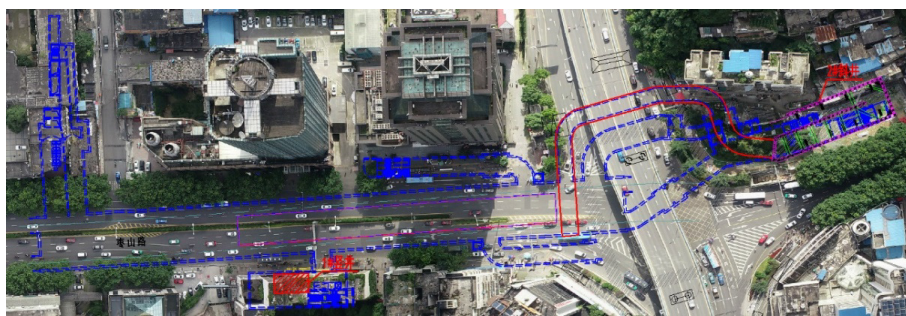


图 1 黔灵山公园站平面图

Fig. 1 Plan view of Qianlingshan park station

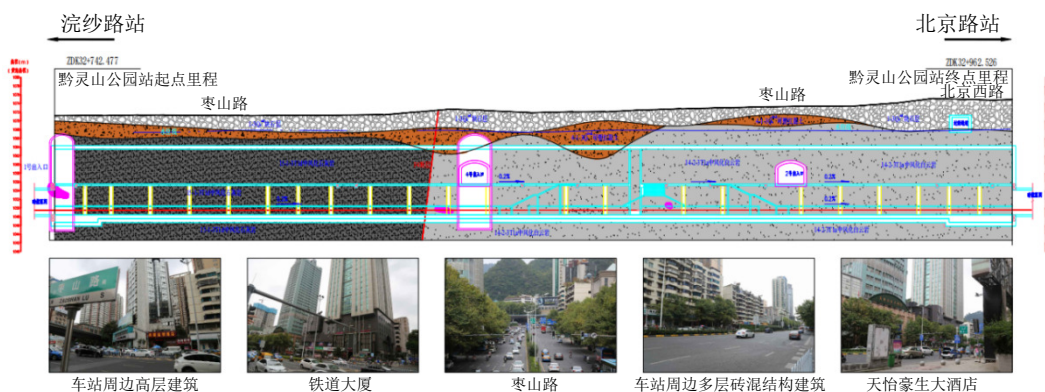


图 2 黔灵山公园站地质纵断面图

Fig. 2 Geological profile of Qianlingshan park station

2 施工关键技术

2.1 车站结构相关参数

黔灵山公园站二衬厚度 900 mm，采用 C35 P10 混凝土；仰拱填充中心厚度 1300 mm，采用 C30 混凝土。仰拱采用 50 mm 厚细石混凝土作为保护层。I 部小边墙距仰拱填充面 650 mm，II 部顶面距中板牛腿上 1000 mm，III 部浇筑至中隔壁侧墙位置。车站衬砌施工方案见图 3，衬砌结构参数如表 1 所示。

2.2 衬砌施工方案

本工程主体结构断面形式采用拱形断面，组合钢模板自重较大，对模板的拼装精度及支撑的加固要求较高；地铁车站限界精度要求高，因此对侧墙及楼板的支模架体系的搭设精度及强度要求较高。III 部衬砌浇筑完成，立即施作格构柱换撑，混凝土强度满足要求且支撑体系转换完成后才能拆除模板支架。基于上述工程特点，通过各方细致研判，施工过程中决定采用结合台车浇筑、盘扣式模板支架施工的支撑体系，以保证施工安

全、质量和进度。

根据施工组织安排，车站 IV 部衬砌及大里程端 III 部衬砌（33~37 段）采用盘扣式模板支架体系施工，车站其余段落（1~32 段）拱墙衬砌采用台车浇筑。车站衬砌纵向分段平面图见图 4。

针对“拱墙台车体系”“拱墙盘扣支架体系”两种支撑体系，分别设置车站主体结构二次衬砌混凝土施工试验段（首段），通过监控量测及混凝土质量检测，收集整理衬砌台车、钢管支架变形及混凝土质量控制相关参数，指导后续施工。车站衬砌施工总方案如下。

(1) ⑤部、⑥部初支封闭成环一定距离后，施作 I 部矮边墙钢筋混凝土及仰拱填充，矮边墙距填充面 0.65 m，在中隔壁位置预留仰拱接驳器（见图 3(a)）。仰拱施工工艺流程为：基面处理→铺设防水板→钢筋施工→施工缝防水→模板安装→混凝土浇筑→拆模→养护。

(2) II 部衬砌（1~32 段）浇筑，拆除③部、④部中隔板，一次拆除长度 6 m，采用自行式台

车(6 m)浇筑Ⅱ部钢筋混凝土(见图3(b))。在已浇筑混凝土且无法立即回填的边墙段,在中板标高位置加设I20b临时横撑,间距3 m一道。

Ⅱ部钢筋混凝土左右侧错开施工,错开距离不小于35 m。

(3)待边墙混凝土浇筑20 m后开始采用渣

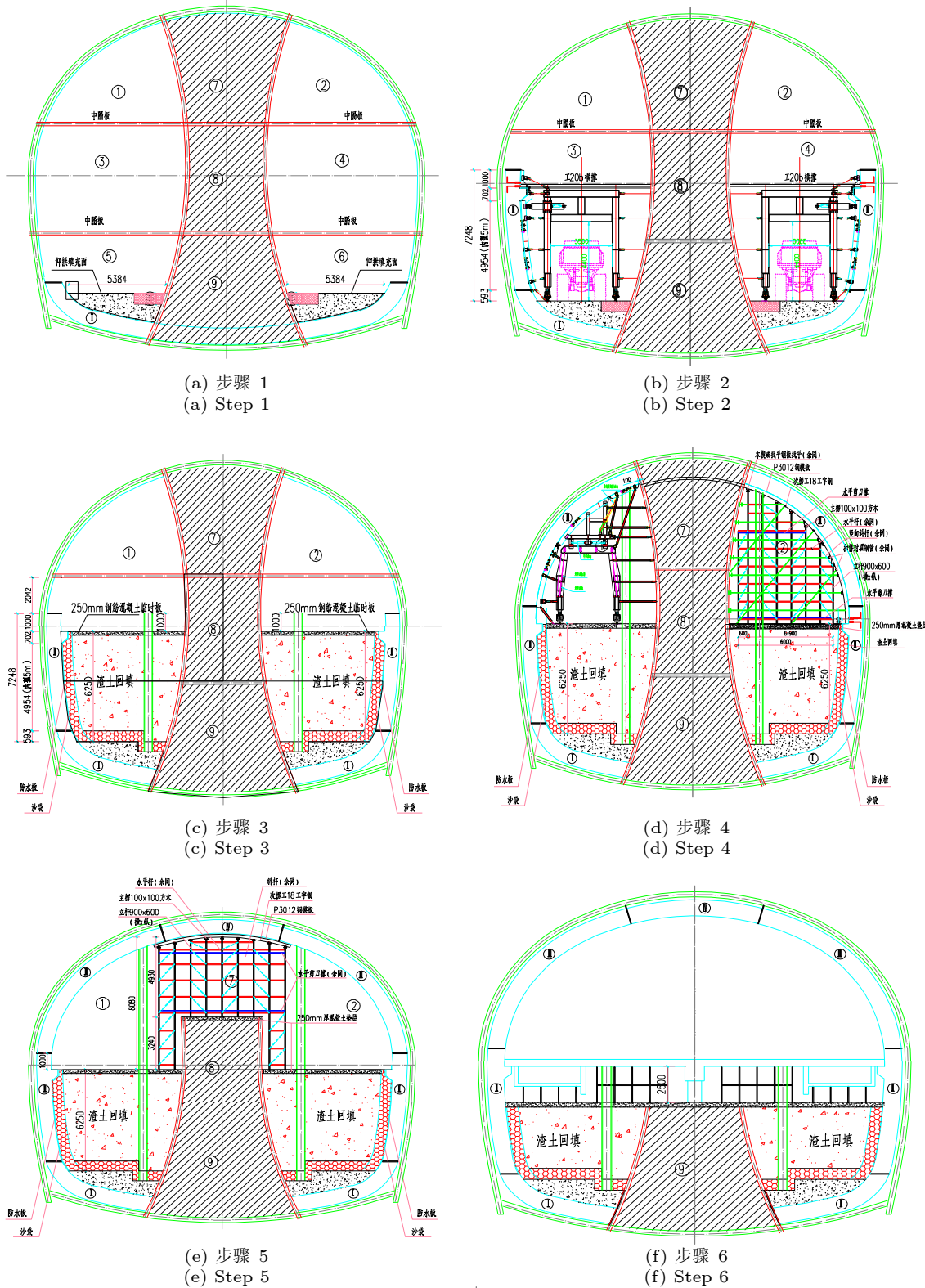
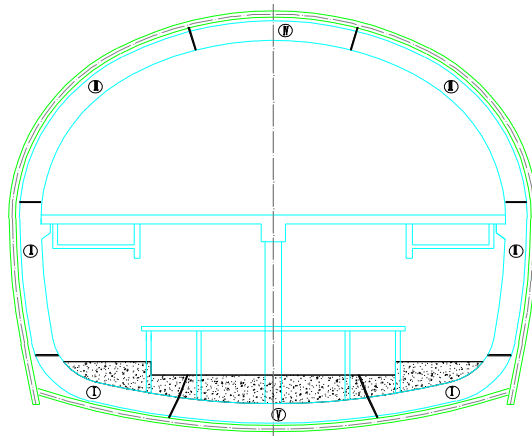


图3 车站衬砌施工总方案(单位: mm)

Fig. 3 Overall construction plan for the lining of Qianlingshan park station (unit: mm)



(g) 步骤 7
(g) Step 7

图 3 车站衬砌施工总方案 (单位: mm) (续)

Fig. 3 Overall construction plan for the lining of Qianlingshan park station (unit: mm) (continue)

表 1 黔灵山公园站衬砌结构参数表

Table 1 Table of lining structure parameters for Qianlingshan park station

主要施工部位	构件	构件尺寸/mm	工程材料	保护层/mm
主体结构	仰拱	900	C35, P10防水砼	45/35
	仰拱填充	1300 (最大)	C30	—
	边墙	900	C35, P10防水砼	45/35
	拱部	900	C35, P10防水砼	45/35
	中板	400	C35砼	30

土逐步回填。回填前安装格构柱，格构柱随回填高度逐步接长，格构柱纵向间距 4 m。回填至牛腿高度施作钢筋混凝土临时中隔板（见图 3(c)）。施工衬砌结构保护措施：沿浇筑完成的侧墙铺设一层防水板+0.5 m 厚沙袋隔离。

(4) 拆除①部、②部中隔板，一次拆除长

度 6 m，采用“盘扣式支撑架+型钢背带模板支架体系（33~37 段）”或“整体衬砌台车（1~32 段）”浇筑 III 部钢筋混凝土，待已浇筑混凝土达到强度后，拆除模板支架的同时接长竖向格构柱，然后浇筑下一施工段（见图 3(d)）。

(5) 待 III 部混凝土纵向全部浇筑完成且达到

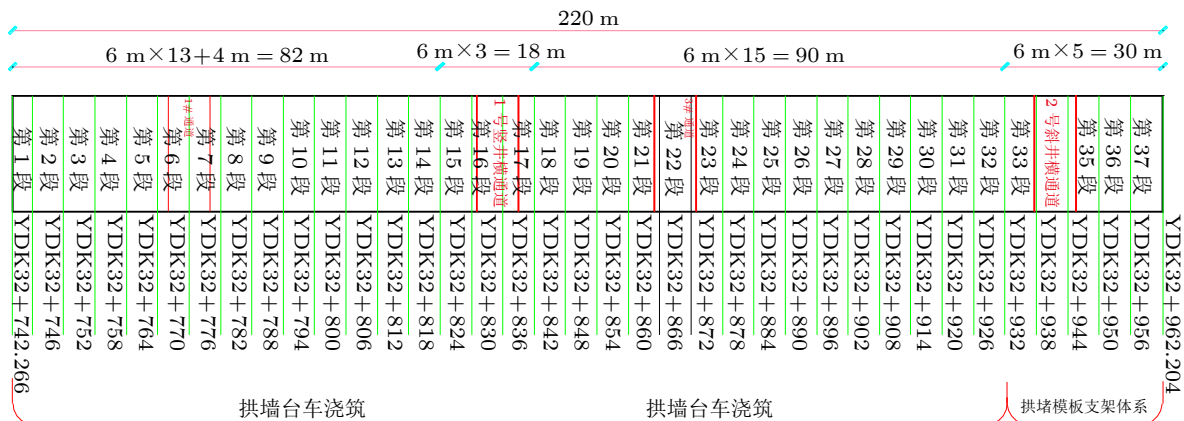


图 4 黔灵山公园站衬砌纵向分段平面图

Fig. 4 Plan view of longitudinal segmentation for the lining of Qianlingshan park station

设计强度后,回填渣土至⑦部底标高,施作⑦部开挖及支护,初支拱架闭合后才能拆除中隔壁支撑,拆除长度不大于9 m。紧跟掌子面浇筑IV部拱顶钢筋混凝土(见图3(e))。IV部拱顶钢筋混凝土距⑦部掌子面的长度不大于9 m。待已浇筑二衬混凝土达到设计强度后,才能进行下一循环的开挖和浇筑。

(6) 开挖⑧部并挖除回填渣土(即开挖至中板以下2.5 m),随开挖逐步拆除中板上部格构柱,保留中板下部格构柱作为中板临时支撑柱结构,搭设盘扣支架浇筑中板、中板梁及轨顶风道,预留永久结构柱子钢筋接驳器,永久钢筋混凝土结构柱采用顺做的方式,待车站整体开挖完成二衬封闭成环后施作(见图3(f))。

(7) 开挖⑨部,并完成⑨部仰拱初支封闭,浇筑V部二衬钢筋混凝土(见图3(g))。V部钢筋混凝土距⑨部掌子面的长度不大于9 m,同步跟进施作中柱。待混凝土达到设计强度后拆除格构柱,同步跟进施作站台板、楼梯等内部结构。

3 模板支撑体系重难点分析

模板台车作为混凝土浇筑的核心成型设备,其架体需同时应对侧向压力传递与几何精度控制的双重挑战。若力学设计不足,可能导致衬砌结构开裂、几何偏差超限,进而直接影响隧道耐久性与运营安全。而模板支架作为临时支撑体系,需在复杂地质条件下同时满足强度、刚度及稳定性要求,其受力特性直接关系到施工安全:支架变形过大会引发模板位移,导致混凝土浇筑质量缺陷;支架失稳则可能造成整体坍塌,威胁作业人员安全。因此,通过力学分析明确模板台车与支架的受力特性、变形规律及破坏模式,是优化设计参数、提升施工安全系数及控制工程成本的关键前提。

3.1 台车受力分析

台车受力按照架体和模板分别计算。台车长度为6.1 m,面板为 $\delta 8 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$,二衬混凝土最大灌注厚度0.9 m(侧向),一次浇筑成型(侧向)。计算参照《建筑结构荷载规范》(GB5009—2012)、《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB50204—2018)、《水工混凝土

施工规范》(DL/T5144—2001)及《钢结构设计规范》(GB50017—2017)。

3.1.1 架体部分受力分析

(1) 边模板荷载分析

台车边模板单侧受力,不对称,另外一侧由丝杆传递侧压力到中隔墙,所以按照左右对称受力校验。由于模板下部向里靠拢,不承受混凝土自重,因此自重荷载不必考虑,只考虑浇筑时的侧压力对其影响。

边墙的侧压力取 47 kN/m^2 ,该值取自日本岐阜工业公司12 m液压台车的计算值,较目前国内边模板的侧压力计算大些,偏于安全。目前国内台车边模板的侧压力计算有如下两种方法。

第一种方法。新浇混凝土对钢模板的最大侧压力 q 计算公式为

$$q = r_h R' + C \quad (1)$$

式中, R' 为内部插入振捣器的影响半径,取0.75; r_h 为混凝土的容重, 24.5 kN/m^3 ; C 为混凝土入仓对模板的冲击力,取 2 kN/m^2 。代入上式,得到 $q = 20.4 \text{ kN/m}^2$ 。

第二种方法。采用内部振捣器时,新浇混凝土对钢模板的最大侧压力 F 计算公式为

$$F = 0.22 r t_0 \beta_1 \beta_2 V_1 / 2 \quad (2)$$

式中, r 为混凝土的密度, 24.5 kN/m^3 ; t_0 为新浇混凝土的初凝时间,根据公式 $t_0 = 200 / (T + 15) = 4.44 \text{ h}$ (T 为混凝土温度 $= 30^\circ\text{C}$),取为4 h; β_1 为外加剂影响系数,不加外加剂时取1.0,掺具有缓凝作用的外加剂时取1.2; β_2 为混凝土坍落度影响修正系数,当坍落度小于3 cm时取0.85,当坍落度为5~9 cm时取1.0,当坍落度为11~15 cm时取1.15; V 为混凝土的浇筑速度,取 1.5 m/h 。将上述各值代入式(2),得到 $F = 36.4 \text{ kN/m}^2$ 。

对II部台车来说,边模上部通过销轴与上模板相连,底部靠基脚千斤支承于地面,中间通过5根千斤联接梁支承。每边支承千斤5排共25个支承点承担侧压力引起的水平荷载,而侧压力引起的竖向荷载(浮力)通过台车的自重或加抗浮千斤来稳定。出于安全考虑,上部及下部假设不承受约束,整个水平方向上的荷载靠支承千斤承

受。实际上，在浇灌靠近上部的中间边模板时，下部模板应已达到初凝。

对 III 部台车来说，边模上部通过销轴与上模板相连，底部靠基脚千斤支承于地面，中间通过 4 根千斤联接梁支承。每边支承千斤 3 排共 12 个支承点承担侧压力引起的水平载荷，而侧压力引起的竖向载荷（浮力）通过台车的自重或加抗浮千斤来稳定。出于安全考虑，上部及下部假设不承受约束，整个水平方向上的载荷靠支承千斤承受。实际上，在浇灌靠近上部的中间边模板时，下部模板应已达到初凝。

1) 边模板水平载荷及千斤轴向载荷

对 II 部台车来说，由于衬砌长度为 6.1 m，边模板竖直高度为 6 m，则边模板水平载荷 $W=1720.2$ kN。假设 5 排千斤平均受力，则中间每排千斤承受的力为 344 kN。每组载荷下部两排为 6 个千斤平均承担，上部两排为 5 个千斤平均承担，假设只有 5 个千斤平均承担载荷，则每个千斤的轴向载荷为 $F_2=68.8$ kN（实际情况由于载荷的变化，应是下大上小）。但假设边模全部浇筑完时为模板的最大受力情况，所以各千斤受力变化不致太大。

对 III 部台车来说，由于衬砌长度为 6.1 m，边模板竖直高度为 3.571 m，则边模板水平载荷为 $W=1023.8$ kN。假设 4 排千斤平均受力，则中间每排千斤承受的力为 341.3 kN。每组载荷下部两排为 5 个千斤平均承担，上部两排为 4 个千斤平均承担，假设只有 4 个千斤平均承担载荷，则每个千斤的轴向载荷为 $F_2=85.3$ kN（实际情况由于载荷的变化，应是下大上小）。但假设边模全部浇筑完时为模板的最大受力情况，所以各千斤受力变化不致太大。

2) 水平千斤的强度校核

II 部和 III 部台车水平千斤采用梯形螺纹 Tr65×10，螺母高度 $H=80$ mm，螺距 $P=10$ mm，则螺杆的弯曲及剪切强度为

$$\delta b = 3FH_1 / (\pi d_3 b^2 n) \leq [\delta b] \quad (3)$$

$$\tau = F / (\pi d_3 b n) \leq [\tau] \quad (4)$$

式中， F 为轴向载荷， $F=127.8$ kN； H_1 为基本牙型高度， $H_1=0.5P=5$ mm； d_3 为外螺纹小径， d_3

$=55$ mm； b 为螺纹牙根部的宽度，对梯形螺纹 $b=0.65P$ ，即 b 为 6.5 mm； n 为旋合圈数， $n=H/P=80/10=8$ 。将各值代入式 (3) 和式 (4)，则 $\delta b=32.8$ MPa $< [\delta b]$ ， $\tau=14.23$ MPa $< [\tau]$ 。因此，水平方向支承千斤强度通过。

(2) 门架结构的受力分析及强度校核

台车门架是一个空间的整体框架结构。其主要水平及垂直方向的载荷靠五榀门架承受。门架整体框架结构的受力分析分两种工况：其一是水平载荷作用下的门架受力；其二是垂直载荷作用下的门架受力（单侧模板，垂直方向不做校核）。为了保证整体结构的稳定性，II 部和 III 部台车门架横梁之间通过 1 根 H390×300 型钢连接，各立柱之间通过 18 槽钢及 16 槽钢斜拉连成整体。在五榀门架中，中间的门架受力最大，其受力简图见图 5。主横梁横截面及立柱横截面见图 6。

台车门架使用 Autodesk Inventor Professional 9.0 和 Ansys 软件创建和受力分析。分析采用材料的基本参数见表 2。

模型分析结果表明，模型最大等效应力为 297.2 MPa。通过采用最大等效应力失效准则对

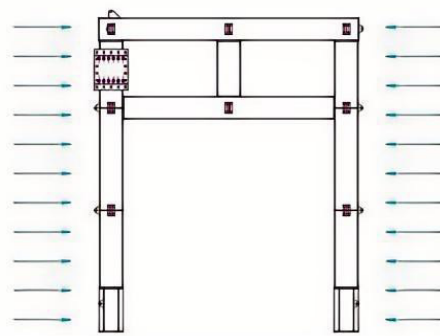


图 5 门架结构受力简图

Fig. 5 Stress diagram of gantry structure

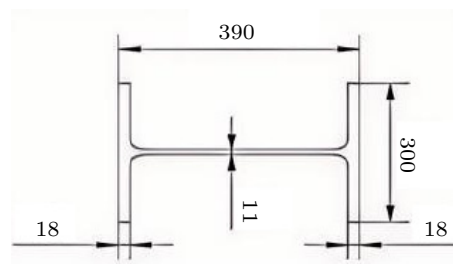


图 6 立柱及主横梁横截面（单位：mm）

Fig. 6 Cross section of column and main crossbeam (unit: mm)

表2 材料参数
Table 2 Material parameters

参数	数值
杨氏模量/MPa	2×10^5
泊松比	0.29
密度/($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$)	7.87×10^{-6}
屈服拉伸强度/MPa	350
极限拉伸强度/MPa	420

延性材料进行计算，得出安全系数为 1.41。说明选用的台车门架符合要求。

3.1.2 台车模板受力分析

台车模板分顶模和左右边模（结构图见图7）。顶模受混凝土自重、施工载荷及注浆口封口时的挤压力等载荷的作用，其受力条件比其他部位的模板更复杂；边模与顶模的结构构造一样，边模不受砼自重，载荷较小。由于是单侧台车，台车行走时会发生侧翻，所以需要另外无侧模板一侧配重。在此，只对台车的配重做计算。

台车门架为对称制作，所以计算配重时只考虑门架增加部分、模板及通梁质量的影响。丝杆

影响极小，视为左右对称，计算时不考虑。对II部台车来说，A点和B点门架部分为对称设计，相同部分质量抵消，只考虑B点多出A点质量部分（配重X1），行走时A点和B点要分别与路面接触，理论上在同一水平点上，重心点位于A点和B点之间的中点（O点），根据杠杆原理力矩计算简图见图8。

根据杠杆原理得：对II部台车来说，C点模板的质量为 8418.4 kg (X4)，B点架体质量超过A点架体的质量(X3)为 1107 kg，由于AO=BO，所以X1=X3=1107 kg。对III部台车来说，C点模板质量为 4362.8 kg (X)，由于AO=BO，所以X2=X3= 1884.2 kg。

对II部台车来说，由于行走时侧模板已经脱模，模板回收约 200 mm，所以实际行走时C点和O点之间的距离为 3245 mm，故X2应为 14038 kg，配重总和为 15145 kg。由于实际操作中会出现不可预见的因素，比如，收侧模不到位，建议准备配重 15 t 以上，根据实际操作情况增加或者减少配重。配重在无侧模板一侧的底纵梁上，

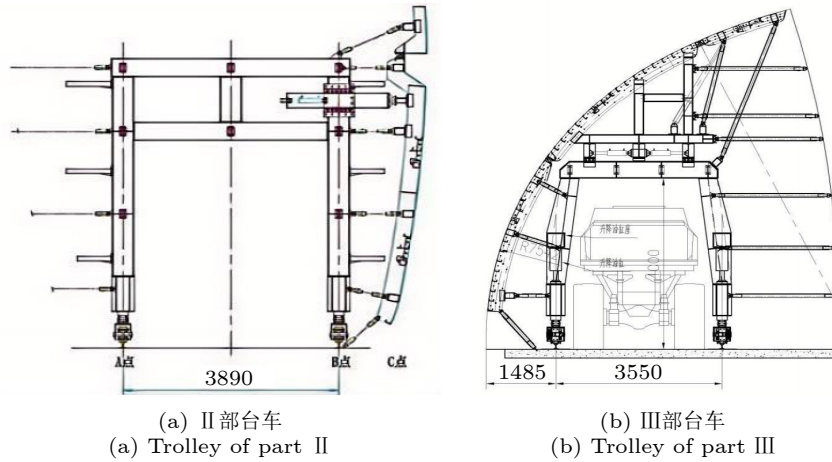


图7 台车及模板结构图（单位：mm）

Fig. 7 Structure diagram of trolley and template (unit: mm)

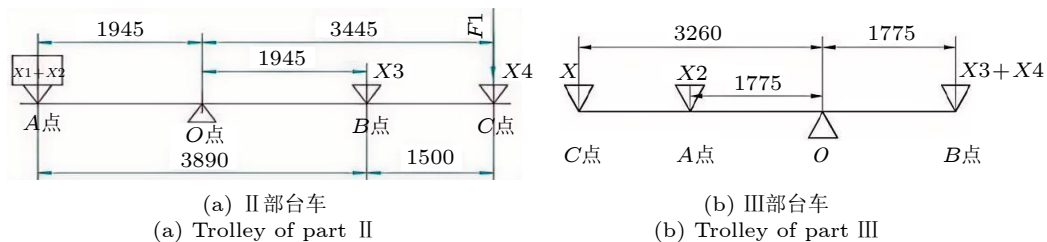


图8 力矩计算简图（单位：mm）

Fig. 8 Torque calculation diagram (unit: mm)

用水泥块均匀分布。对 III 部台车来说，实际行走时 C 点和 O 点之间的距离为 3060 mm，故 X2 应为 1884.2 kg，配重总和为 7521.2 kg。由于实际操作中会出现不可预见的因素，建议准备配重 7 t 以上。

3.2 模板支架受力计算

3.2.1 支架方案

支架模板系统采用 P3012 钢模板。钢模下方设置 I18 工字钢分配梁，分配梁下为盘扣式钢管支架。支架布置原则为：板下支架立杆间距为 90 cm×60 cm，梁下支架间距加密为 60 cm×90 cm，标准步距为 100 cm，局部步距调整为 50 cm。

3.2.2 支架计算

本支架体系为隧道内施工，不考虑风载荷，采用桥梁结构分析软件 Midas Civil 建立模型（一榀）。模型参数的选取见表 3。

混凝土产生的最大侧向载荷取 $F=92.9 \text{ kN/m}^2$ ，一榀支架线载荷 $Q=55.740 \text{ kN/m}$ 。永久荷载分项系数取 1.30；可变荷载分项系数取 1.50。模型计算结果显示钢管支架最大应力 $\sigma=231.9 \text{ MPa} < [\sigma]=300 \text{ MPa}$ ，满足要求；支撑台架最大应力

$\sigma=87.4 \text{ MPa} < [\sigma]=205 \text{ MPa}$ ，满足要求。

3.3 模板支架参数的确定

(1) 衬砌模板支架参数

车站 IV 部衬砌及大里程端 III 衬砌（33~37 段）采用承插型盘扣式钢管支撑架+型钢背带作为模板支撑架体。盘扣采用 $\Phi 60 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ 立杆，采用 $\Phi 48 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 横杆，盘扣支架标准间距 $900 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ （横×纵），标准步距 1.0 m；水平剪刀撑采用扣件式脚手架钢管，由于搭设总高度不超过 8 m，在顶层及底层各布置一道水平剪刀撑；竖向斜杆采取间隔一跨布置；模板采用 5 mm 厚 P3012 钢模板，弧形龙骨使用 I18 型钢背带，具体参数见表 4。

(2) 作业架参数

车站 II 部衬砌钢筋防水台架采用盘扣式支架。如图 9 所示，盘扣采用 $\Phi 60 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ 立杆和 $\Phi 48 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 横杆，盘扣支架标准间距 $900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ （横×纵），步距 1 m，竖向剪刀撑采用盘扣斜拉杆，间隔 1 跨布置。支架外侧每 2 个步距设一作业平台，骨架采用 $\Phi 48 \text{ mm}$ 钢管，一端顶紧初支结构面，另一端采用扣件与盘扣支架固定，作业平台采用方木，纵向间隔 1.8 m，采用铁丝固定。

表 3 模型参数的选取

Table 3 Selection of model parameters

参数	说明
$h=5 \text{ mm}$	h 为面板厚
$W=240.0 \text{ mm}^3$	W 为截面抵抗矩，取 1 cm 宽板带计算
$E=9000 \text{ N/mm}^2$	E 为竹胶板弹性模量
$\gamma_c=25.5 \text{ kN/m}^3$	γ_c 为混凝土容重
$I=0.144 \text{ cm}^4$	I 为截面惯性矩，取 1 cm 宽板带计算
$H=7.81 \text{ m}$	H 为混凝土侧压力计算位置处至新浇混凝土顶面的总高度
$t_0=8 \text{ h}$	t_0 为混凝土初凝时间
$\beta_1=1$	β_1 为外加剂影响修正系数
$\beta_2=1.15$	β_2 为坍落度影响修正系数
$V=3 \text{ m/h}$	V 为混凝土浇筑速度，相对于梁高

表 4 模板支架参数表

Table 4 Parameters of formwork support

部位	面板	次楞/mm	主楞/mm	支撑/mm
III 部衬砌（33~37 段）、IV 部衬砌	P3012 钢模板	I18 工字钢背带，间距 600	100×100 方木，间距 600	盘扣支架，间距 900×600（环×纵），步距 1000

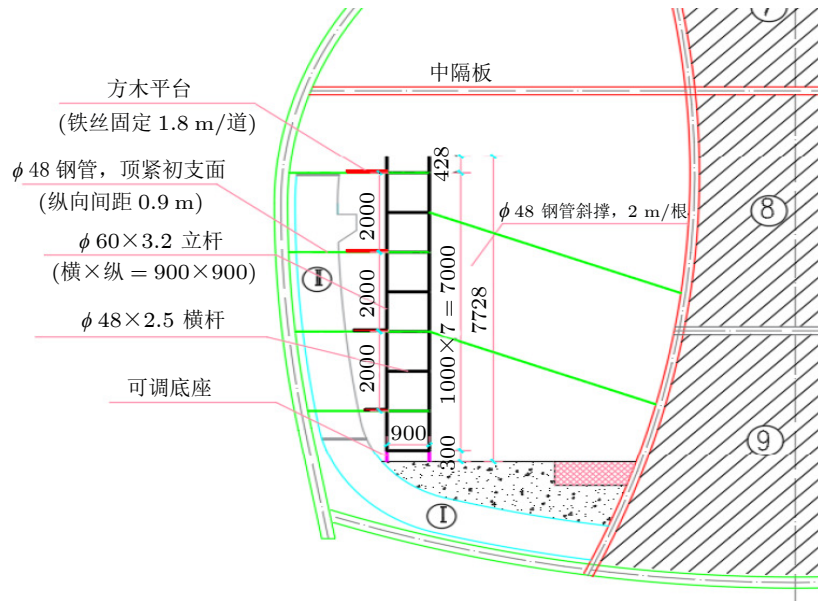


图9 作业架参数图(单位: mm)

Fig. 9 Parameter of support (unit: mm)

3.4 安全保证措施

为预防支架坍塌,根据住建部37号令^[10]及建质办31号文^[11]要求,为保证模板支撑系统的稳定,采取的安全措施有如下。(1)材料控制:所进扣件、钢管必须按规定进行抽检试验。(2)设计控制:扣件式钢管模板支撑体系必须有设计计算和搭设方案,包括立杆的强度、刚度、稳定性,扣件的抗滑力,水平杆的强度和挠度验算,立杆地基承载力或支撑立杆的楼面承载力。(3)施工管理:应先设计后施工,要进行技术交底,责任到人,严格按照模板设计技术方案进行操作,搭设过程中要加强监督与检查。(4)强度控制:模板拆除时应报批,且混凝土强度必须达到规定要求。(5)建立模板支撑系统的验收制度。

4 结论

以贵阳轨道交通3号线黔灵山公园站为工程背景,针对喀斯特山地城市大断面地铁车站暗挖施工中模板支撑稳定性难题,提出了结合台车浇筑、盘扣式模板支架施工的支撑体系,并系统研究了其施工方案、受力特性及安全保障措施。主要结论如下。

(1)基于理论计算及数值分析的方法,对台车千斤及门架结构、钢管支架及支撑台架等关键位置的强度进行了校核,建议II部台车配重15145 kg

以上,III部台车配重7521.2 kg以上。

(2)通过对模板支撑体系制定材料、设计、施工及强度控制等系列安全保证措施,工程期间实现“零事故”施工目标,验证了该技术体系、受力分析在复杂地质条件下的安全可靠。

(3)提出的模板支撑技术体系及其力学分析方法为喀斯特山地城市地铁建设提供了可复制的解决方案,未来可进一步探索智能监测系统与模板支撑体系的集成应用,实现施工过程的实时动态调控。

参 考 文 献

- 王威. 组拼式大模板施工技术. 隧道建设, 2012, 32(S2): 153-156
Wang Wei. Construction technology for assembling large-area formwork. *Tunnel Construction*, 2012, 32(S2): 153-156 (in Chinese)
- 田德森. 盖挖逆作法施工关键技术研究——以天津地铁车站工程为例.[硕士学位论文]. 中国地质大学(北京), 2010
Tian Desen. Analysis on covered top-down excavation technique adopted impractical —— take the Tianjin metro station engineering as example. [Master Thesis]. Beijing: China University of Geosciences, 2010 (in Chinese)
- 何成滔, 王小林, 王辉. 天津地铁和平站逆作法模板设计与施工. 铁道建筑, 2010(8): 73-76
He Chengtao, Wang Xiaolin, Wang Hui. Design and construction of top-down method formwork for Tianjin metro Heping station. *Railway Engineering*, 2010(8): 73-76 (in Chinese)

- 4 周宁, 赵伟. PBA 法地铁车站顶纵梁移动模板施工技术. *现代隧道技术*, 2022, 59(S2): 161-166
Zhou Ning, Zhao Wei. Construction technology of movable formwork for top longitudinal beam of subway station by PBA method. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(S2): 161-166 (in Chinese)
- 5 何文凯. 南京地铁明挖区间盘扣式模板及支撑体系研究.[硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2020
He Wenkai. Study on formwork and support system of open cut section of Nanjing Metro. [Master Thesis]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020 (in Chinese)
- 6 陆征然, 林志浩, 张磊等. 构配件性能缺陷对模板支撑体系承载性能的影响. *沈阳建筑大学学报 (自然科学版)*, 2022, 38(5): 862-870
Lu Zhengran, Lin Zhihao, Zhang Lei, et al. Study on the performance defects influence of components and fittings on the bearing performance of formwork support system. *Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)*, 2022, 38(5): 862-870 (in Chinese)
- 7 李宇周. 基于模糊综合评价法的模板支撑体系稳定性分析与评价. *现代隧道技术*, 2022, 59(S2): 22-30
Li Yuzhou. Analysis and evaluation of formwork support system based on fuzzy comprehensive evaluation method. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(S2): 22-30 (in Chinese)
- 8 陈桂香, 徐晨, 张文萃等. 地铁车站高大梁模板支撑设计及稳定性研究. *河南理工大学学报 (自然科学版)*, 2019, 38(6): 134-139
Chen Guixiang, Xu Chen, Zhang Wencui, et al. Design and stability study of high beam formwork support of metro station. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2019, 38(6): 134-139 (in Chinese)
- 9 莫伟平. 贵阳喀斯特地区地铁盾构施工风险及防范措施. *铁道建筑*, 2021, 61(4): 67-70
Mo Weiping. Construction risk and preventive measures for subway shield in Guiyang's karst area. *Railway Engineering*, 2021, 61(4): 67-70 (in Chinese)
- 10 中华人民共和国住房和城乡建设部. 危险性较大的分部分项工程安全管理规定. [2018-03-08], 2018. https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5294422.htm
- 11 中华人民共和国住房和城乡建设部办公厅. 住房城乡建设部办公厅关于实施《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》有关问题的通知. [2018-05-17], 2018. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2018/art_17339_236168.html

(责任编辑: 胡 漫)