

地铁线路 U 型槽区段轨道设置钢支墩的维修方案 及其力学特性研究^{*}

张娅敏^{1,2}

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 铁路轨道安全服役湖北省重点实验室, 430063, 武汉//高级工程师)

摘 要 在地铁实际运营中, 由于列车荷载长期作用等因素, 导致 U 型槽截水沟处的整体道床出现垂向分层及水平位移现象, 进而影响列车正常运营。针对此病害, 提出设置钢支墩结构的临时支承维修方案, 以保证在道床整治更换期间列车的正常运行。为验证所提维修方案的可行性, 通过建立有限元模型对列车静荷载和动荷载作用下, 钢支墩受力变形情况和轨道结构动力响应结果进行分析, 同时对施工流程提出建议。研究表明: 在最不利荷载作用下, 钢支墩结构最大应力为 82.10 MPa, 最大垂向位移为 0.16 mm, 满足正常使用要求; 当列车运行速度分别为 80 km/h 和 25 km/h 时, 钢支墩等效应力最大值分别为 23.24 MPa 和 23.22 MPa, 混凝土底座的主应力最大值分别为 0.68 MPa 和 0.47 MPa, 均满足使用要求。所提维修方案施工作业过程简单, 在减少维修期间对既有线路条件及轨道设备干扰的同时, 保障了列车的正常运营。

关键词 地铁; 轨道; 钢支墩; 维修方案; 力学特性

中图分类号 U231.2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.015

Study on Maintenance Plan and Mechanical Characteristics of Steel Abutment Setting for Metro Line U-shaped Groove Section Track

ZHANG Yamin

Abstract In the actual operation of metro, because of factors such as long-term action of train load, vertical stratification and horizontal displacement of the whole track bed appear at the U-shaped groove cut-off ditch, which affects the normal operation of the train. In response to this disease, a temporary support maintenance plan of setting steel abutment structure is proposed to ensure the normal operation of the train during renovation and replacement of track bed. To verify the feasibility of the proposed maintenance plan, a finite element model of train under static and dynamic loading is established, and the result of steel abutment stress deformation and track structure dynamic response is analyzed. Meanwhile, suggestions are put forward for the

construction process. Research results show that: under the most adverse load action, the maximum stress of steel abutment structure is 82.10 MPa, and the maximum vertical displacement is 0.16 mm, which meets the requirements of normal use. When the train running speeds are 80 km/h and 25 km/h, the maximum equivalent stress of the steel abutment are 23.24 MPa and 23.22 MPa respectively, and the maximum principal stress of the concrete base are 0.68 MPa and 0.47 MPa, both of which meet the requirements of use. Therefore, the proposed maintenance plan is simple in construction process, reducing the interference to existing line conditions and track equipment during maintenance while ensuring normal operation of the train.

Key words metro; track; steel abutment; maintenance plan; mechanics characteristics

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

在城市轨道交通线路的隧道洞口处, 通常设置连接地面线和地下线的 U 型槽敞口地段。为保证雨水随线路坡度从地面线流入地下隧道的雨水泵房, 在 U 型槽位置的整体道床处设置两条横向排水沟, 形成截水沟处双柱一体式整体道床。由于线路在服役过程中列车荷载长期作用等因素, 导致部分截水沟处的整体道床出现与下部隧道结构垂向分层及水平位移现象, 并造成轨道不平顺从而影响乘车舒适度和列车的正常运行。当变形较为严重时, 将会导致轨道几何形位出现重大偏差, 影响列车安全运行, 因此及时对整体道床进行整治更换是非常必要的。

针对目前常用的整体道床无砟轨道结构, 国内外学者对其常见病害类型进行了归纳总结, 主要有道床板裂纹、掉块、上拱和基础变形等, 并提出了针对更换道床的修复方法^[1-5]。在以上修复方法中, 现浇混凝土的养护需要一定时间, 而地铁运行的天

^{*} 中铁第四勘察设计院集团有限公司产品研发项目(2021C12); 中国铁建股份有限公司项目(2019B17、2021A03)

窗时间短,无法实现封闭路线进行集中整治。因此,现有的维修方法难以保证列车的正常运营。

本文参考高铁动车段内的钢支墩结构,针对城市轨道交通 U 型槽位置整体道床出现开裂分层的问题,提出设置钢支墩结构的临时支承维修方案,并通过建立有限元模型对列车静荷载和动荷载作用下,钢支墩的受力变形情况和轨道结构的动力响应结果进行分析,从而使其满足在道床整治更换期间列车正常运营行车的条件。本文研究可为地铁线路 U 型槽地段轨道结构类似病害的整治提供借鉴与参考。

1 钢支墩设计

U 型槽宽度为 4.9 m,高度为 4.4 m,其中,雨水泵房宽度为 4.0 m,高度为 4.0 m。U 形槽地段轨道结构高度设计值为 560 mm,考虑到施工误差及后期精调需要,钢支墩组装完成后的高度为 630 mm。在对 U 型槽位置立柱式整体道床进行整治时,为保证整治期间列车的安全平稳运行,在立柱式整体道床两侧各增加一排钢支墩结构,由于 U 型槽位置宽度为 1 500 mm,结合原道床宽度 450 mm,确定钢支墩间距为 1 000 mm。剩余钢支墩与排水沟之间的高度由聚合物混凝土材料填充,如图 1 所示。

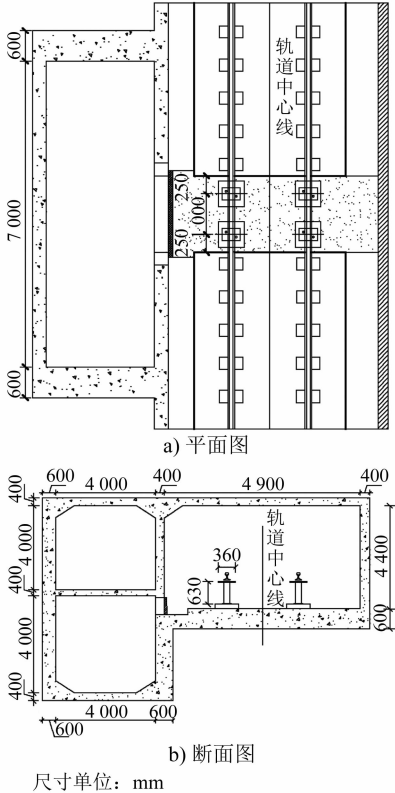


图 1 U 型槽敞口段设计图

Fig. 1 Design drawing of U-shaped groove open section

钢支墩材料为 Q235 钢,使用钢型材和钢板焊接而成,下部通过锚杆与聚合物混凝土材料(通过钢筋锚入 150 mm),上部通过调高垫板调整至设计高度后,安装单趾弹条扣件系统,然后通过高强度螺柱和大六角螺母将扣件系统与支墩牢固连接,其设计图如图 2 所示。

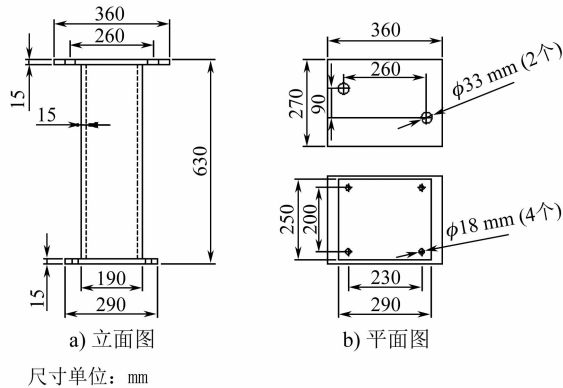


图 2 钢支墩结构设计图
Fig. 2 Design drawing of steel abutment structure

2 力学分析

2.1 静力分析

为研究钢支墩结构的受力特性,通过有限元软件,采用实体单元对钢支墩进行模拟,不考虑钢支墩自身错动,有限元模型如图 3 所示。钢支墩采用线弹性模型进行模拟,其材料参数如表 1 所示。

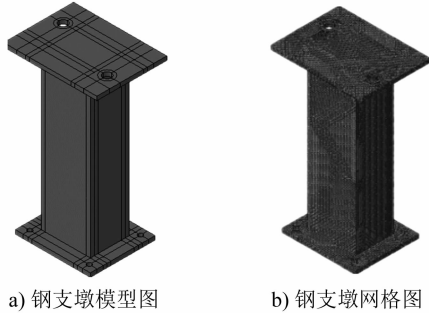


图 3 钢支墩有限元模型
Fig. 3 Finite element model of steel abutment

表 1 钢支墩有限元模型材料参数

材料参数	取值
弹性模量/Pa	2.10×10^{11}
泊松比	0.3
密度/(kg/m^3)	7 850

列车轴重为 14 t,设列车动载系数为 1.5。将钢轨对钢支墩的作用力等效为垂向力和横向力,分别为 105 kN 和 84 kN,并将其换算为均布荷载施加至有限元模型。由钢支墩有限元模型计算得到的垂向位移和等效应力云图分别如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可知:在列车荷载作用下,结构整体应力水平偏低,应力较高处位于钢支墩下部与底板连接处,其值为 82.10 MPa,远小于 Q235 钢的屈服强度 235 MPa;最大垂向位移为 0.16 mm,位于钢轨底部的钢支墩顶板处,均满足使用要求。

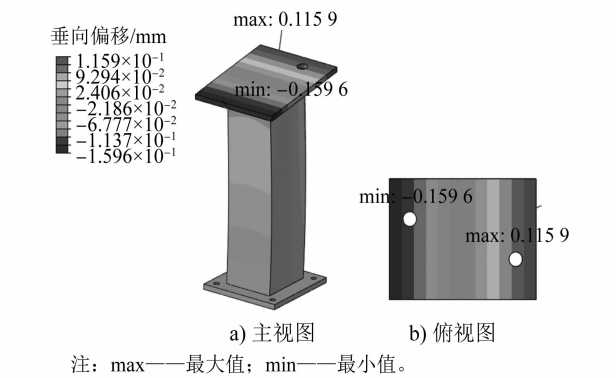


图 4 钢支墩垂向位移云图

Fig. 4 Nephogram of vertical displacement of steel abutment

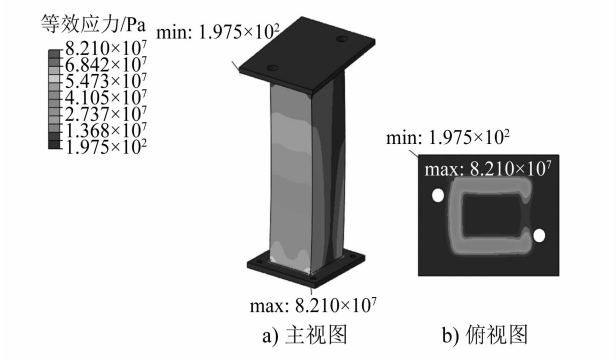


图 5 钢支墩等效应力云图

Fig. 5 Nephogram of equivalent stress of steel abutment

2.2 动力学分析

基于动力学仿真软件将下部基础进行刚度换算,建立车辆-轨道耦合动力学模型,如图 6 所示。计算得到钢轨位移时程曲线,然后将其作为荷载激励导入三维有限元模型,采用动力隐式算法^[6]获得在列车动荷载作用下,钢支墩轨道结构的动力响应结果。为确保计算结果准确,除扣件采用弹簧单元模拟外,其余部件均采用实体单元模拟,主要参数如表 2 所示。

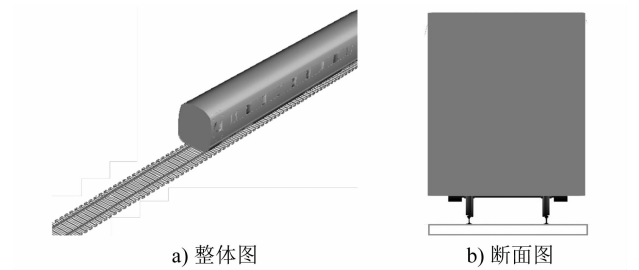


图 6 车辆-轨道耦合动力学模型
Fig. 6 Vehicle-track coupling dynamic model

表 2 轨道结构计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of track structure		
结构	参数	取值
钢轨	弹性模量/ Pa	2.06×10^{11}
	泊松比	0.300
	密度/(kg/m^3)	7 850
扣件	垂向刚度/(kN/mm)	35
	阻尼/($\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m}$)	75
填充层	弹性模量/ Pa	3.00×10^{10}
	泊松比	0.167
	密度/(kg/m^3)	2 500
轨枕	弹性模量/ Pa	3.65×10^{10}
	泊松比	0.167
	密度/(kg/m^3)	2 500
底座/道床	弹性模量/ Pa	3.25×10^{10}
	泊松比	0.167
	密度/(kg/m^3)	2 500
隧道仰拱	刚度/(MPa/m)	1 200

所建立的三维有限元模型如图 7 所示。基于以上模型,根据现场运营情况,列车在经过 U 型槽地

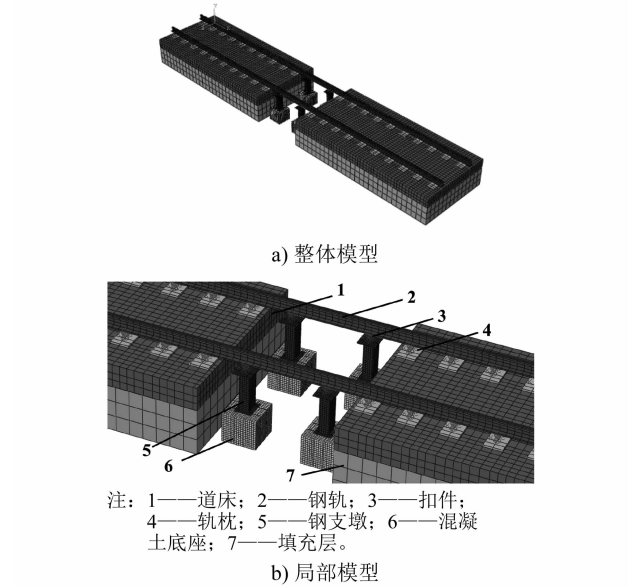


图 7 轨道结构有限元模型
Fig. 7 Finite element model of track structure

段时速度为 25 km/h,同时结合线路设计时速 80 km/h,分别计算当速度为 80 km/h 和 25 km/h 时的轨道结构动力响应结果,如图 8~11 所示。

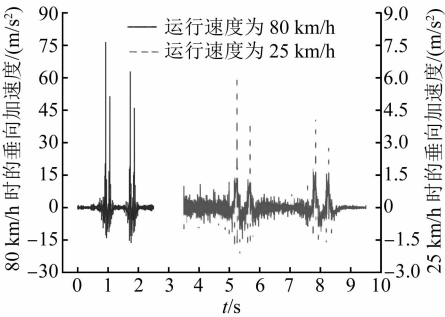


图 8 钢轨垂向加速度时程图

Fig. 8 Time-history diagram of rail vertical acceleration

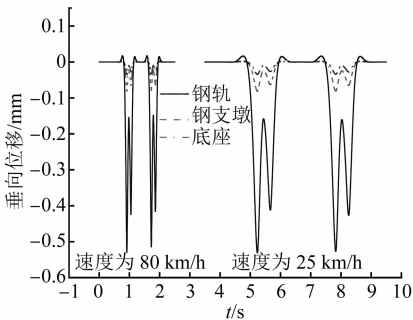


图 9 轨道结构垂向位移时程图

Fig. 9 Time-history diagram of vertical displacement of track structure

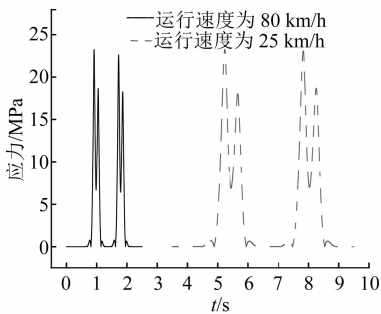


图 10 钢支墩等效应力时程图

Fig. 10 Time-history diagram of equivalent stress of steel abutment

由图 8 和图 9 可知,当列车运行速度分别为 80 km/h 和 25 km/h 时,钢轨垂向加速度最大值分别为 76.25 m/s^2 和 5.88 m/s^2 。由于轨道结构垂向位移主要与轨道结构刚度有关,所以当列车速度变化时,轨道结构垂向位移变化较小,钢轨、钢支墩和底座的垂向位移最大值分别为 0.53 mm、0.08 mm 和 0.03 mm,均满足轨道平顺性的要求。

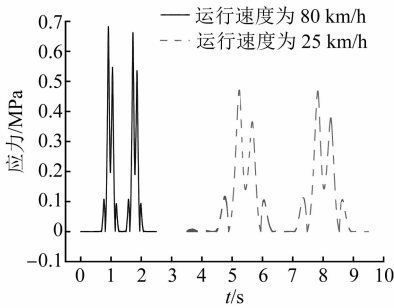


图 11 底座最大主应力时程图

Fig. 11 Time-history diagram of base maximum principal stress

由图 10 和图 11 可知,当列车运行速度分别为 80 km/h 和 25 km/h 时,钢支墩等效应力最大值分别为 23.24 MPa 和 23.22 MPa,相差较小,且远小于 Q235 钢的屈服强度 235.00 MPa;混凝土底座的主应力最大值分别为 0.68 MPa 和 0.47 MPa,均小于 C40 混凝土抗拉强度设计值 1.71MPa。

3 施工流程

在对发生分层及位移病害的截水沟处整体道床进行拆除置换的过程中,将双柱一体式整体道床范围内的道床板全部破除,重新浇筑道床并安装轨枕和扣件。根据既有线改造特点,采用“轨顶标高确定、钢支墩安装、道床板凿除、道床板浇筑”的施工方法,主要施工流程如下:

- 1) 施工前应对施工线路进行现场测量,确定轨顶设计标高后,把既有基标控制桩引测到线路的两侧隧道壁上,作为施工的控制点。
- 2) 排水槽内清理干净后,将钢支墩与钢轨间采用扣件联接,钢支墩通过锚杆与现场浇筑的聚合物混凝土底座进行连接,如图 12 所示。

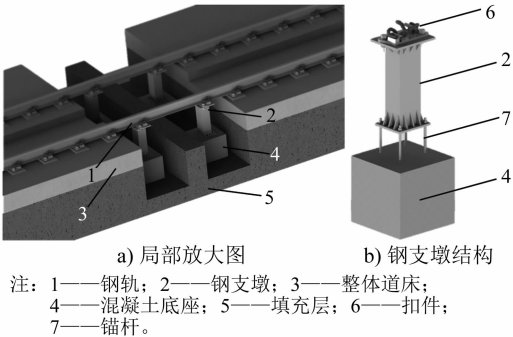


图 12 钢支墩结构设计示意图

Fig. 12 Schematic diagram of steel abutment structure design

- 3) 将立柱式整体道床置换范围两侧各 10 m 范

围内的扣件复紧,然后将中间位置道床板凿除,取出轨枕。

4) 将隧道仰拱回填层表面凿毛,然后对其混凝土碎片冲洗干净,并在仰拱上采取植筋措施。

5) 在凿除后的立柱式整体道床位置铺设纵横向钢筋,然后在两侧支立模板。同时,对钢轨和轨枕进行精调,采用聚合物混凝土浇筑道床板混凝土,灌注之后立即对轨道几何形位进行检查并及时调整。

6) 在立柱式整体道床浇筑达到设计强度并完成轨道精调后,拆除钢支墩及其下方底座。

4 结语

针对城市轨道交通 U 型槽位置整体道床出现开裂分层的问题,提出设置临时支承的钢支墩结构维修方案,并通过建立有限元模型对列车静荷载和动荷载作用下,钢支墩的受力变形情况和轨道结构动力响应结果进行分析,主要获得以下结论:

1) 通过对钢支墩进行静力分析发现,在最不利荷载作用下,钢支墩结构最大应力为 82.10 MPa,最大垂向位移为 0.16 mm。整体应力水平较低,变形较小,均满足正常使用要求。

2) 通过对钢支墩进行动力分析发现,当列车运行速度分别为 80 km/h 和 25 km/h 时,钢轨垂向加速度最大值分别为 76.25 m/s^2 和 5.88 m/s^2 ,钢轨、钢支墩和底座的垂向位移最大值分别为 0.53 mm、0.08 mm 和 0.03 mm,均满足轨道平顺性的要求。

3) 钢支墩等效应力最大值分别为 23.24 MPa 和 23.22 MPa,远小于 Q235 钢的屈服强度 235.00 MPa;混凝土底座的主应力最大值分别为 0.68 MPa 和 0.47 MPa,均小于 C40 混凝土抗拉强度设计值 1.71 MPa,钢支墩和底座的受力均满足使用要求。

4) 该维修方法施工作业过程简单,无需进行钢

轨切割和拆卸作业,减少了维修期间对既有线路条件及轨道设备的干扰,同时为道床的养护提供了充足时间,保障了列车的正常运营。

参考文献

- [1] 林祖东. 纵向承台式整体道床病害机理分析及修复研究 [D]. 成都:西南交通大学,2019.
LIN Zudong. Mechanism analysis and repair of longitudinal track bed diseases [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [2] 张也,楼梁伟,谢蛟,等. 维修天窗期城市轨道交通整体道床拆换技术[J]. 铁道建筑,2020(4):106.
ZHANG Ye, LOU Liangwei, XIE Jiao, et al. Removal and replacement technology of urban rail transit monolithic track bed in maintenance skylight period[J]. Railway Engineering, 2020(4):106.
- [3] 赵振江,乔小雷. 地铁隧道整体道床病害机理及防治措施[J]. 城市轨道交通研究,2014(12):98.
ZHAO Zhenjiang, QIAO Xiaolei. Mechanism and prevention of the monolithic trackbed disease damage in metro tunnels[J]. Urban Mass Transit, 2014(12):98.
- [4] 李艳祥,王普林,张旭. 地铁整体道床脱空破损机理及结构补强措施[J]. 城市轨道交通研究,2020(5):115.
LI Yanxiang, WANG Pulin, ZHANG Xu. Mechanism of subway monolithic track bed void and damage and the structural reinforcement[J]. Urban Mass Transit, 2020(5):115.
- [5] 彭华,梁延科,蔡小培,等. 盾构隧道沉降下整体道床变形及层间脱空分析[J]. 铁道工程学报,2018(1):95.
PENG Hua, LIANG Yanke, CAI Xiaopei, et al. Deformation and interlayer disengaging analysis of monolithic track bed under the shield tunnel settlement[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018(1):95.
- [6] 朱胜阳. 高速铁路无砟轨道结构损伤行为及其对动态性能的影响[D]. 成都:西南交通大学,2015.
ZHU Shengyang. Damage behavior of high-speed railway ballastless track and its effect on structure dynamic performance [J]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

(收稿日期:2022-03-17)

(上接第 73 页)

- [5] DAI C, LUO G, LONG Z. Research on decoupling problem of suspension gap and location of relative position sensor in high speed maglev train[J]. IEEE Access, 2019, 7:29836.
- [6] 德米特里·波戈列洛夫,雷强,根纳季·米克希夫,等. 基于 UM 的磁浮列车-轨道梁耦合振动仿真程序开发[J]. 计算机辅助工程,2019(1):28.

POGORELOV, LEI Qiang, MIKHEEV, et al. Development of dynamics simulation program for coupling vibration of maglev train-track beam based on UM [J]. Computer Aided Engineering, 2019(1):28.

(收稿日期:2021-03-09)