

现代有轨电车 H 型预制轨道板的性能研究与应用^{*}房 斌¹ 段海滨² 张宏亮² 吴建忠² 傅依莹²

(1. 青岛地铁集团有限公司, 266045, 青岛; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的: 针对目前我国现代有轨电车道床施工速率低的问题, H 型预制轨道板应运而生。需研究其受力性能与抗疲劳性能, 并结合应用效果验证其工程可用性和适用性。方法: 建立有限元仿真模型, 计算分析了 H 型预制轨道板在列车荷载、温度梯度荷载和基础变形三种荷载工况下的内力值, 并对 H 型预制轨道板的配筋和裂缝宽度进行了验算。通过室内静载试验和疲劳试验检验了 H 型预制轨道板的受力性能与抗疲劳性能。通过现场铺设验证了 H 型预制轨道板的实际施工效果及工程可行性。结果及结论: 计算分析结果表明, H 型预制轨道板在各荷载组合下轨道板的内力及裂缝宽度等指标满足相关规范要求。室内静载试验和疲劳试验后轨道板裂缝宽度亦满足相关规范限值要求。现场铺设应用表明, 采用 H 型预制轨道板较传统现浇混凝土整体道床可有效提升施工速率、覆土厚度及绿植成活率、汇水面积及排水效率、施工精度等。H 型预制轨道板结构设计合理可行, 具有足够的强度与耐久性。其具备的施工速度快、施工精度高等特点与现代有轨电车工程的建设需求相匹配。

关键词 现代有轨电车; H 型预制轨道板; 性能研究

中图分类号 U213.3⁺42: U482.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.08.046

Performance Study and Application of H-shaped Precast Track Slab in Modern Tram

FANG Bin, DUAN Haibin, ZHANG Hongliang, WU Jianzhong, FU Yixuan

Abstract Objective: In response to the problem of modern tram track bed low construction rate in China, H-shaped precast track slab (hereinafter referred to as H slab) emerges. It is necessary to study the load-bearing and fatigue resistance performance, and verify the engineering feasibility and applicability through application results. Method: A finite element simulation model is established to calculate and analyze the internal forces of H slab under three load conditions: train load, temperature gradient load, and foundation deformation. The reinforcement and crack width of H slab are calculated, its load-

bearing and fatigue resistance performance is examined through indoor static load tests and fatigue tests, its actual construction effect and engineering feasibility are verified through on-site installation. Result & Conclusion: The calculation and analysis results show that the internal forces and crack width of H slab under various load combinations meet the relevant specifications. The track slab crack width after indoor static load tests and fatigue tests also meets the specified limits. The on-site installation application demonstrates that the use of H slab can effectively improve construction rate, covered soil thickness, vegetation survival rate, water collection area, drainage efficiency, and construction accuracy compared to conventional cast-in-place concrete monolithic track bed. The structural design of H slab is reasonable and feasible, providing sufficient strength and durability. Its characteristics of fast construction speed and high construction accuracy align with the construction requirements of modern tram project.

Key words modern tram; H-shaped precast track slab; performance study

First-author's address Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266045, Qingdao, China

目前,我国有轨电车工程大多采用现浇混凝土整体道床结构^[1],存在施工速度低的问题。部分项目曾做过铺设预制道床的尝试^[2],但均未充分考虑有轨电车的施工速度快及绿化程度高等特点。对此, H 型预制轨道板应运而生,兼顾了施工速度和绿化的要求。本文主要对 H 型预制轨道板的性能进行验算和试验,并对其工程应用进行了介绍。

1 H 型预制轨道板的型式尺寸

H 型预制轨道板的型式如图 1 所示。

^{*} 北京市科技计划项目(Z151100001315008, Z171100002117003); 青岛地铁预制装配建造技术适应性及产业化研究项目(M6-ZH-2019-4)

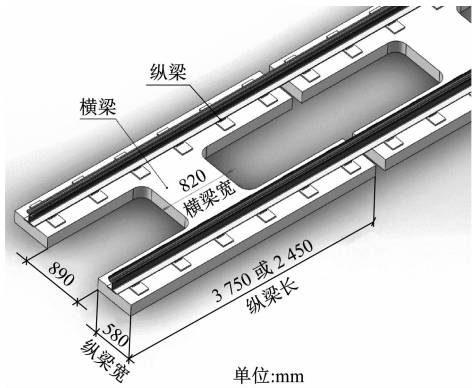


图 1 H 型预制轨道板效果图

Fig. 1 Perspective of H-shaped precast track slabs

针对有轨电车曲线半径较小的特点, H 型预制轨道板有两种板型: I 型板适用于直线段及半径 ≥ 400 m 的曲线段, 尺寸为 3 750 mm(长) \times 2 200 mm(宽) \times 180 mm(厚); II 型板适用于半径 < 400 m 的曲线段, 尺寸为 2 450 mm(长) \times 2 200 mm(宽) \times 180 mm(厚)。两种板型的纵梁宽度均为 580 mm, 横梁宽度均为 820 mm。

2 H 型预制轨道板的建模分析

H 型预制轨道板在路基段、桥梁段及隧道段均可应用。从使用条件上看, 桥梁段与隧道段的轨道下部基础相对较好, 而路基段轨道板受力条件不佳。考虑到 I 型板较长, 故本文以路基段的 I 型板作为最不利条件, 根据《铁路轨道设计规范(极限状态法)》^[3] 中的荷载组合方式, 对 H 型预制轨道板结构进行建模和性能研究。

有轨电车的钢轨为 59R2 槽型轨^[2]。与 H 型预制轨道板配套的扣件竖向刚度为 35 kN/mm, 横向刚度为 50 kN/mm。轨道板采用钢筋混凝土, 混凝土强度等级为 C50, C50 混凝土泊松比取 0.2, 密度为 2 500 kg/m³, 线膨胀系数为 $1 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, C50 混凝土弹性模量为 3.45×10^{10} Pa。

2.1 主要荷载

H 型预制轨道板所受荷载主要有列车荷载、温度梯度荷载及路基不均匀沉降导致的荷载。

2.1.1 列车荷载

由文献[4], 列车最高运行速度为 70 km/h, 轴重为 12.5 t。由文献[3]: 垂向设计荷载 P_d 取静轮重 P_j 的 1.5 倍, 即 $P_d = 92$ kN; 横向荷载 Q_k 取静荷载的 0.8 倍, 即 $Q_k = 49$ kN。

按转向架荷载 P 施加位置有 3 种加载工况: 工

况 1(跨板加载)、工况 2(板端加载)和工况 3(板中加载)。列车荷载的加载工况如图 2 所示。

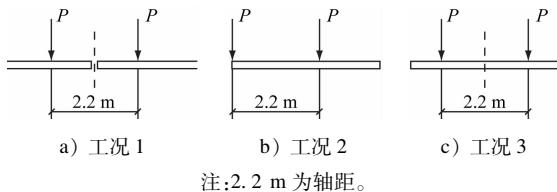


图 2 列车荷载的加载工况示意图

Fig. 2 Loading condition diagram of train load

2.1.2 温度梯度荷载

H 型预制轨道板系统为单元式轨道板, 需考虑温度梯度的影响。温度梯度的厚度修正系数按表 1 取值^[3]。

表 1 温度梯度修正系数

Tab. 1 Correction factor of temperature gradient

厚度/mm	修正系数	厚度/mm	修正系数
160	1.17	240	0.94
180	1.11	260	0.89
200	1.05	280	0.84

I 型板的厚度为 180 mm, 修正系数按表 1 取 1.11。考虑到寒冷地区温差较大, 故轨道板最大正温度梯度取 99.9 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 最大负温度梯度取 55.5 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

2.1.3 路基不均匀沉降导致的荷载

路基不均匀沉降导致的荷载, 以有轨电车最常见的路基为对象进行计算分析。其中, 路基不均匀沉降按文献[3]的无砟轨道线下基础不均匀沉降最大值取值(路基不均匀沉降的形状为沉降幅值限值为 15 mm、沉降长度为 20 m 的半波余弦曲面)。

2.2 有限元模型

采用 ANSYS 有限元软件建立轨道系统的有限元模型。其中, 轨道板采用弹性地基上的板壳模拟, 钢轨采用梁单元模拟, 扣件和路基采用弹簧单元模拟, 轨道板采用壳单元模拟。有限元模型共包括 3 块轨道板, 并通过中间板的计算数据来消除边界效应。I 型板的梁板有限元模型如图 3 所示。

2.3 荷载工况分析及组合

2.3.1 基础变形

由仿真计算结果可知, 板端加载(工况 2)下纵梁弯矩最大, 为 12.61 kNm, 跨板加载(工况 1)下负弯矩最大, 为 -3.88 kNm; H 型预制轨道板的横梁弯矩较小, 在 2.00 kNm 以下。3 种工况下的轨道板

弯矩云图如图 4 所示。

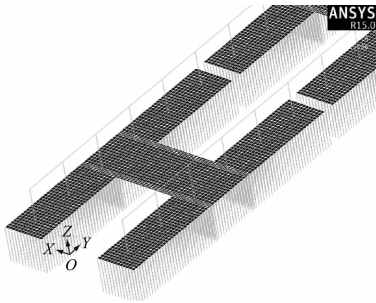


图 3 I 型板的梁板有限元模型

Fig. 3 Finite element model of beam-plate with I-shaped slab

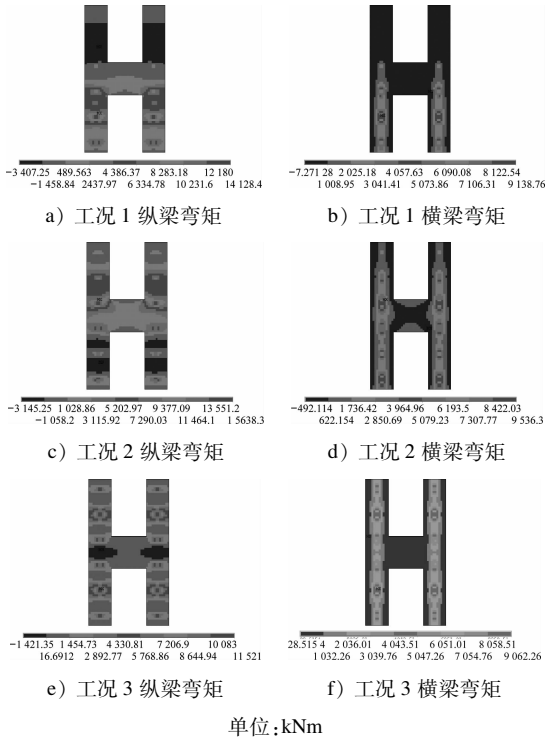


图 4 不同加载工况下的轨道板纵横梁弯矩云图

Fig. 4 Moment diagram of longitudinal and cross beams under different loading working conditions

2.3.2 温度梯度荷载下轨道受力分析

在温度梯度荷载下纵横梁的弯矩云图如图 5 所示。轨道板弯矩以受压为正,受拉为负。由图 5 可知:在正温度梯度下轨道板中部发生上拱变形,在负温度梯度下轨道板中间下凹,板角均翘曲变形;在温度梯度荷载作用下,轨道板弯矩在纵梁和横梁的连接处受弯相对较大,说明结构的连接处需要加强;温度梯度荷载纵梁最大正弯矩为 14. 13 kNm,最大负弯矩为 -10. 35 kNm;横梁最大正弯矩为 3. 64 kNm,最大负弯矩为 -1. 60 kNm。

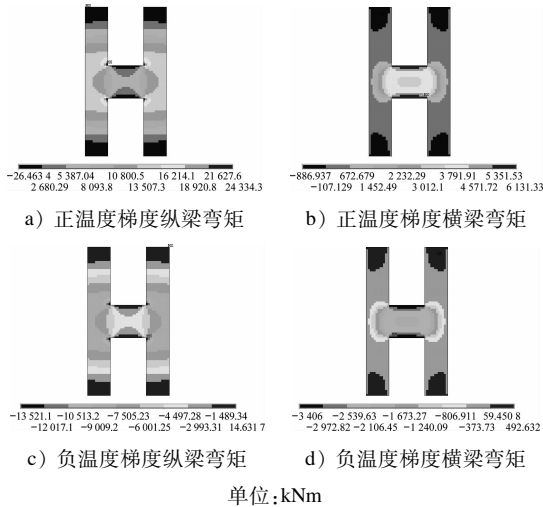


图 5 温度梯度荷载下的轨道板纵横梁弯矩云图

Fig. 5 Moment diagram of track slab longitudinal and cross beams under temperature gradient loads

2.3.3 路基不均匀沉降影响

路基不均匀沉降按文献[3]取值后计算可得,在路基不均匀沉降作用下的 H 型预制轨道板弯矩为 7. 2 kNm。

2.3.4 横向荷载效应

列车横向荷载作用下的横梁弯矩 M_h 为:

$$M_h = 0. 3 Qh \tag{1}$$

式中:

h ——道床顶面到轨面距离,单位 m;

Q ——列车横向荷载,单位 kN。

按照一组扣件的间距计算可得, $M_h = 0. 46 \text{ kNm}$ 。

2.3.5 荷载组合

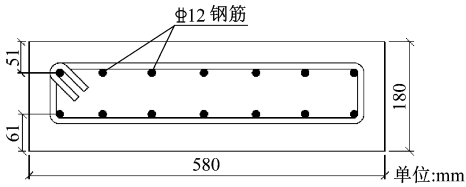
在承载能力极限状态荷载组合中,H 型预制轨道板纵梁弯矩的组合值为 26. 88 kNm,横梁弯矩组合值为 7. 78 kNm。此为 H 型预制板承载力配筋检算的依据^[3]。

在正常使用极限状态荷载组合中,H 型预制轨道板纵梁横截面弯矩的标准组合值为 19. 68 kNm。横梁的纵截面弯矩标准组合值为 2. 43 kNm。此为 H 型预制轨道板截面裂缝检算的依据^[3]。

2.3.6 轨道板结构验算

H 型预制轨道板纵梁和横梁的配筋分别如图 6 及图 7 所示。

对 H 型预制轨道板的纵梁和横梁进行承载能力极限状态及正常使用极限状态结构验算。H 型预制轨道板的结构验算结果如表 2 所示。



注:φ12 钢筋指直径为 12 mm 的三级钢筋。

图 6 轨道板纵梁配筋示意图

Fig. 6 Diagram of track slab longitudinal beam reinforcement

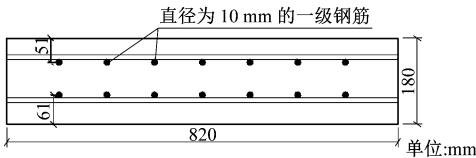


图 7 轨道板横梁配筋示意图

Fig. 7 Diagram of track slab cross beam reinforcement

表 2 H 型预制轨道板结构验算结果

Tab. 2 Results of H-shaped precast track slab structure checking calculation

部位	弯矩值/(kNm)		钢筋拉应力/MPa		裂缝/mm	
	计算值	限值	计算值	限值	计算值	限值
纵梁	26.88	38.78	110.80	360	0.139	0.2
横梁	7.78	17.18	28.39	270	0.044	0.2

结构验算结果表明,H 型预制轨道板各项指标均满足要求。

3 力学性能的试验验证

对 H 型预制轨道板进行静载试验及疲劳试验,以验证其力学性能是否满足工程使用要求。

3.1 静载试验

静载试验包括纵梁加载试验和横梁加载试验。加载试验如图 8 所示。



a) 纵梁加载试验 b) 横梁加载试验

图 8 H 型预制轨道板室内试验加载图

Fig. 8 Pictures of H-shaped precast track slab laboratory test loading

1) 纵梁加载试验。荷载逐级加载,试验荷载为 45 kN。先对轨道板进行预加载;试验荷载达到 45

kN 时,静停 3 min 后,使用放大镜和照明设备观察有无裂缝;之后卸载,并在卸载后再次对裂缝进行观察。

2) 横梁加载试验。荷载逐级加载,试验荷载终值为 20 kN。试验荷载达到 20 kN 时,静停 3 min 后,使用放大镜和照明设备观察有无裂缝;之后卸载,并在卸载后再次对裂缝进行观察。

根据加载试验结果,H 型预制轨道板的静载试验最大裂纹宽度为 0.14 mm,出现在纵梁位置。

3.2 疲劳试验

疲劳试验分为轨道板纵梁疲劳试验和横梁疲劳试验,主要用于评估 H 型预制轨道板的耐久性。

1) 轨道板纵梁疲劳试验。疲劳加载的最大荷载为 45.0 kN,最小荷载为 4.5 kN,加载频率为 4 Hz,循环加载次数为 300 万次。

2) 轨道板横梁疲劳试验。疲劳加载的最大荷载为 20.0 kN,最小荷载为 2.0 kN,加载频率为 4 Hz,循环加载次数为 300 万次。

疲劳试验结果表明,最大裂纹宽度为 0.14 mm,在纵梁出现。裂纹宽度的试验值与有限元计算结果吻合。

4 工程应用

H 型预制轨道板在某市有轨电车工程中得到应用。H 型预制轨道板应用现场的照片见图 9。其中,H 型预制轨道板轨道结构自上而下依次为槽型轨、YG-4 型配套扣件、承轨台、H 型预制轨道板、细石混凝土调整层和路基。



a) 施工现场 b) 施工完成后现场

图 9 H 型预制轨道板应用现场的照片

Fig. 9 Pictures of H-shaped precast track slab construction site

总结实践应用经验可发现,H 型预制轨道板有如下优点:

1) H 型预制轨道板体轻量,便于现场施工组织。根据工程实际数据,H 型预制轨道板的施工速度为 100 m/d,而现浇混凝土整体道床的施工速度仅为 50~60 m/d。

2) H 型预制轨道板纵梁中间部分的覆土厚度较大,有利于绿植的成活,如图 10 所示。与现浇混凝土整体道床相比,覆土厚度较大部分的面积多了 33%。这部分覆土厚度为 327 mm,而现浇混凝土整体道床的覆土厚度仅为 217 mm,覆土厚度差别较大。此外,H 型预制轨道板的中部挖空还减少了预制板用料,减轻了板重。

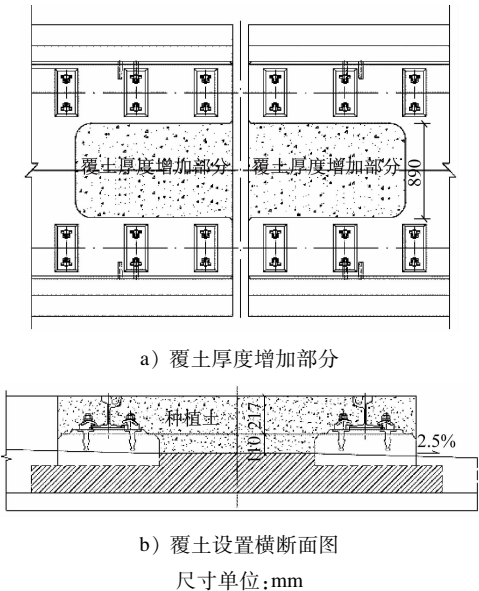


图 10 H 型预制轨道板覆土设置示意图

Fig. 10 Diagram of H-shaped precast track slab soil-cover setting

3) 现浇混凝土整体道床一般采用中部向两侧散排方式排水,效率较低。H 型预制轨道板在两纵梁中部镂空部分设置纵向排水坡,有效增加了汇水面积。现浇混凝土整体道床及 H 型预制轨道板道床排水路径如图 11 所示。

4) 对分别采用现浇混凝土整体道床与 H 型预制轨道板道床的不同项目施工情况进行统计,并对比现浇整体道床与 H 型预制轨道板道床的施工精度见表 3。从对比结果来看,H 型预制轨道板的施工精度更高,施工质量优于普通混凝土整体道床。

5 结语

结合现代有轨电车的工程特点,提出了 H 型预制轨道板的设计,通过建模分析和室内测试验证了其优良的力学性能。并对 H 型预制轨道板在有轨电车工程中的应用情况进行总结。主要有以下结论:

1) 基于不同荷载组合对 H 型预制轨道板受力

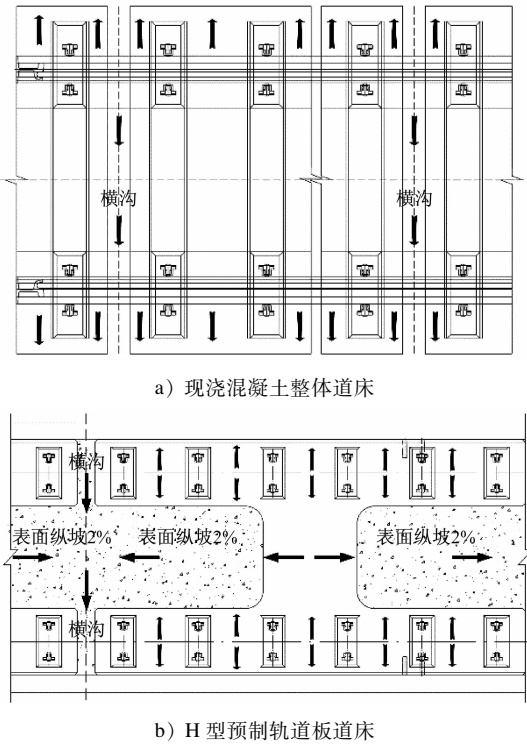


图 11 现浇混凝土道床及 H 型预制轨道板道床排水路径示意图

Fig. 11 Drainage path diagram of cast-in-situ concrete track bed and H-shaped precast slab track bed

表 3 现浇整体道床与 H 型预制轨道板道床的施工精度对比表

Tab. 3 Comparison of construction accuracy of cast-in-situ concrete track bed and H-shaped precast slab track bed

项目	施工精度/mm	
	现浇混凝土整体道床	H 型预制轨道板道床
轨距	-2, +3	±1
水平	±4	±1
轨向	4(直线段, 10 m 弦长)	2(直线段, 10 m 弦长)
高低	4(直线段, 10 m 弦长)	2(直线段, 10 m 弦长)
中线	±10	±3
高程	±10	±3

的影响,进行结构配筋及裂缝验算的结果表明,H 型预制轨道板结构可满足工程使用需求。

2) 通过室内静载试验和疲劳试验,验证了 H 型预制轨道板的强度及耐久性。说明 H 型预制轨道板能满足在线铺设使用的条件。

3) H 型预制轨道板质量轻、制造成本低,便于运输和铺轨。与现浇混凝土整体道床相比,H 型预

(下转第 246 页)

制车站群组消防规模。

此外,建议增设压力传感器、电磁流量计及压力开关,监测管网运行状况,确保消防安全稳定。

参考文献

[1] 刘建华,马旭升,刘小芳. 区域集中消防给水系统的研究与实践[J]. 中国给水排水, 2014, 30(22): 88.
LIU Jianhua, MA Xusheng, LIU Xiaofang. Research and practice of regional centralized fire water supply system[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 88.

[2] 颜强,付金萍,姜佩言,等. 某高校校区集中消防给水系统优化设计[J]. 给水排水, 2017, 43(11): 76.
YAN Qiang, FU Jinping, JIANG Peiyan, et al. Optimal design of centralized fire water supply system in a university campus[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(11): 76.

[3] 宋文波,马淑军. 北京地铁四号线工程消防栓给水系统的设置[J]. 中国给水排水, 2007, 23(18): 43.
SONG Wenbo, MA Shujun. Setting of hydrant water supply system

for Line 4 of Beijing Metro[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(18): 43.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 消防给水及消火栓系统技术规范: GB 50974—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for fire protection water supply and hydrant systems: GB 50974—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计防火标准: GB 51298—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for fire protection design of metro: GB 51298—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.

(收稿日期:2022-06-29)

(上接第 242 页)

制轨道板的施工速率可提升 40% ~ 50%。

4) 在 H 型预制轨道板框架间及顶面覆土可进行地面绿化。与现浇混凝土整体道床相比,H 型预制轨道板的覆土厚度增加了约 50%,有效解决了覆土厚度不足的问题,提升了绿植的成活率,确保了景观绿化效果。

H 型预制轨道板轨道系统的成功研制对于促进我国有轨电车技术的进步、提升有轨电车施工效率及保证工程质量等方面具有重要的意义。

参考文献

[1] 胥燕军,林红松,王健,等. 现代有轨电车轨道结构综述[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(7): 58.
XU Yanjun, LIN Hongsong, WANG Jian, et al. Overview on track structure for modern tramway[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(7): 58.

[2] 陈鹏,刘薇,杨刚. 现代有轨电车嵌入式轨道板的研究与设计[J]. 都市快轨交通, 2018, 31(1): 154.

CHEN Peng, LIU Wei, YANG Gang. Research and design of embedded track structure of modern trams[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018, 31(1): 154.

[3] 中国铁路总公司. 铁路轨道设计规范(极限状态法): Q/CR 9130—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
China State Railway Group Co., Ltd. Code for design of railway track (limit state method): Q/CR 9130—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市有轨电车工程设计标准: CJJ/T 295—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of city tram engineering: CJJ/T 295—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[5] 吴建忠,张宏亮,陈鹏,等. 一种城市轨道交通用 H 型预制轨道板:201620155251.1 [P]. 2016-08-17.
WU Jianzhong, ZHANG Hongliang, CHEN Peng, et al. H-shaped precast track slab for urban rail transit:201620155251.1 [P]. 2016-08-17.

(收稿日期:2022-11-04)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821