

轨宽为 1 250 mm 且跨度为 25 m 时跨座式单轨交通的 预应力钢筋混凝土轨道梁截面跨高比^{*}

赵军伟¹ 申彦利^{1,2,3} 杜 鹏^{1,2,3}

(1. 河北工程大学土木工程学院, 056038, 邯郸; 2. 河北省装配式结构技术创新中心, 056038, 邯郸;

3. 河北工程大学新型单轨交通体系工程研究中心, 056038, 邯郸)

摘 要 [目的] 为适应新型跨座式单轨列车的构造特点, 需对新型预应力钢筋混凝土轨道梁开展力学性能分析及界面优化研究。[方法] 提出了适合该新型列车特点的预应力钢筋混凝土轨道梁, 并采用经验证的数值分析模型, 对 8 根具有不同跨高比的 25 m 跨轨道梁开展了静力分析。[结果及结论] 提出的新型预应力钢筋混凝土轨道梁的力学性能满足规范要求; 25 m 跨度的新型轨道梁在跨高比为 16.6 ~ 18.5 时具有较好的力学性能。

关键词 跨座式单轨; 预应力钢筋混凝土轨道梁; 力学性能; 截面优化; 有限元分析

中图分类号 U232.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.024

Span-height Aspect Ratio of Pre-stressed Reinforced Concrete Track Beams for Straddle Monorail with 1 250 mm Gauge and 25 m Span

ZHAO Junwei¹, SHEN Yanli^{1,2,3}, DU Peng^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, 056038, Handan, China; 2. Hebei Provincial Research Center of Assembly Structural Engineering Technology, 056038, Handan, China; 3. Engineering Research Center of New Monorail System, Hebei University of Engineering, 056038, Handan, China)

Abstract [Objective] To adapt to the building characteristics of a new-model straddle monorail train, mechanical performance analysis and interface optimization research are conducted on a new type of PRCTB (pre-stressed reinforced concrete track beam). [Method] A PRCTB suitable for the characteristics of this new-model train is proposed, and an empirically validated numerical analysis model is used to conduct static analysis on eight 25 m-span track beams with different span-height aspect ratios. [Result & Conclusion] The mechanical performance of the proposed new PRCTB meets the regulatory requirements. The 25 m-span new-model track beam exhibits

favorable mechanical performance when the span-height aspect ratio ranges from 16:6 to 18:5.

Key words straddle monorail; pre-stressed reinforced concrete track beam; mechanical performance; profile optimization; finite element analysis

跨座式单轨交通具有适应陡坡能力强、占地面积少、环境影响小等特点^[1]。自重庆轨道交通 2 号线首次采用跨座式单轨交通制式以来, 我国已有多座城市选择跨座式单轨交通作为主要制式^[2]。轨道梁是单轨交通系统的重要组成部分, 且轨道梁型式与列车构造特点密切相关。

传统跨座式单轨列车采用轮径为 800 ~ 850 mm 的走行轮, 并设有稳定轮以保证列车运行的稳定性。相应的轨道梁宽度与列车走行轮间距均为 800 ~ 850 mm, 梁高 $\geq 1\ 200$ mm。而最近研发的新型跨座式单轨列车, 其导向轮间距增至 1 100 mm, 且取消了稳定轮。该新型列车载客量可达地铁 B 型车的运量, 最高运行速度提升至 100 km/h, 更加适合主城区和周边县区的长距离交通需求, 且降低了轮胎更换的难度。为适应新型跨座式单轨列车的构造特点, 本文研究了相应的新型预应力钢筋混凝土轨道梁(以下简称“新型轨道梁”), 并开展了相应的力学性能分析及截面优化研究, 为该类型轨道梁的进一步研究提供参考。

1 新型轨道梁截面初选和分析方案

1.1 新型轨道梁截面初选

跨座式单轨轨道梁通常采用的 PC(预应力钢筋混凝土)轨道梁截面为闭口箱形截面, 如图 1 a) 所示, 具有抗弯、抗扭刚度大等特点^[3-6]。为适应新型列车的构造特点, 本文研究的新轨道梁跨中截

* 河北省教育厅科学研究项目资助项目(QN2021031)

面如图 1 b) 所示,其初选原则为:①根据新型列车导向轮间距,轨道梁下翼缘宽度取为 1 100 mm;②因新型列车取消了稳定轮,故需通过在轨道梁上翼缘两侧设置 75 mm 宽的外伸段,以保证列车运行的安全性,使轨道梁上翼缘宽度达 1 250 mm;③确定轨道梁的高度 h ,需综合考虑轨道梁刚度、安全及经济等要求,可按 $(1/20 \sim 1/16) l$ (l 为标准跨径) 预估^[7]。

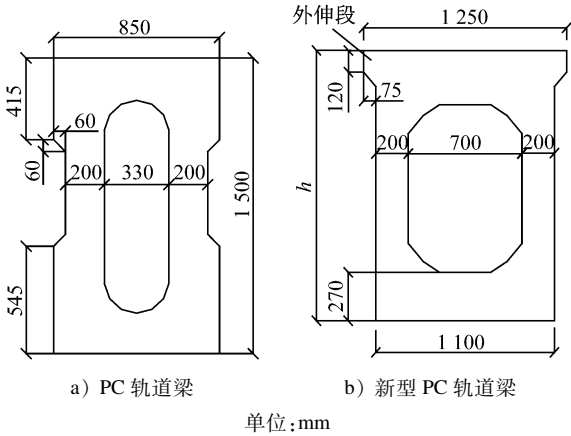


图 1 轨道梁跨中截面尺寸

Fig. 1 Mid-span profile dimensions of track beams

1.2 静力弹塑性力学分析工况

根据 GB 50458—2008《跨座式单轨交通设计规范》^[7] 及文献[3-6],确定新型轨道梁的静力弹塑性力学分析工况为:工况 1(列车静活载),工况 2(恒载 + 列车静活载 + 列车动力作用 + 列车横向摇摆力)。

2 新型轨道梁的材料本构模型

2.1 模型主要设计参数和材料

为研究跨高比 (l/h) 对新型轨道梁受力性能的影响,运用 ABAQUS 软件建立新型轨道梁材料本构有限元模型(以下简称“新型轨道梁模型”)。为验证新型轨道梁模型的准确性,本文选择文献[8]的模型作为比较对象。为此新型轨道梁模型及参数取值均同文献[8]的模型对照。

该计算忽略其他因素如钢筋型号、混凝土型号等对新型轨道梁力学性能的影响,只改变跨高比,不改变配筋、配筋截面积及预应力筋等参数。按一般轨道梁尺寸,并参照文献[8]的模型,建立跨长均为 25 m,而梁高不同的 8 个新型轨道梁模型进行计算。按相关规范的规定,跨高比分别取 15.6、16.1、16.6、17.2、17.8、18.5、19.2、20.0,相应的梁高取值范围为 1 250 ~ 1 600 mm,取值间隔为 50 mm。8 个

不同梁高的新型轨道梁模型编号分别为 YL1、YL2、YL3、YL4、YL5、YL6、YL7、YL8。新型轨道梁模型的主要配筋情况如表 1 所示。其中典型的模型 YL3 配筋设计,如图 2 所示。

表 1 新型轨道梁模型的主要配筋情况

Tab. 1 Main reinforcement conditions of the new-model track beam model

模型	梁高/mm	理论受力筋配置	实际受力筋配置	箍筋配置	配筋比/%
YL1	1 600	24Φ20	28Φ20	φ14	1.36
YL2	1 550	24Φ20	28Φ20	φ14	1.42
YL3	1 500	24Φ20	28Φ20	φ14	1.49
YL4	1 450	24Φ20	28Φ20	φ14	1.58
YL5	1 400	24Φ20	28Φ20	φ14	1.67
YL6	1 350	24Φ20	28Φ20	φ14	1.70
YL7	1 300	24Φ20	28Φ20	φ14	1.74
YL8	1 250	24Φ20	28Φ20	φ14	1.78

注:Φ20—直径为 20 mm 的三级钢筋,24Φ20—24 根直径为 20 mm 的三级钢筋;φ14—直径为 14 mm 的一级钢筋。余类同。

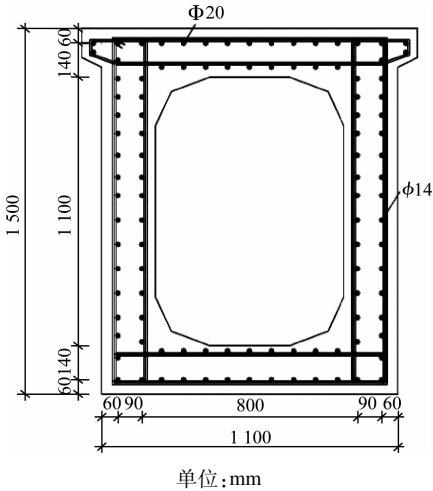


图 2 模型 YL3 的截面配筋设计

Fig. 2 Profile reinforcement design of specimen YL3

在新型轨道梁模型中:纵向受拉非预应力筋材料为 HRB400,箍筋材料为 HPB300;新型轨道梁在纯弯段范围内的箍筋间距为 200 mm,在非纯弯段的箍筋间距为 150 mm,在梁端部的箍筋间距为 100 mm;每组预应力筋束由 3 束预应力钢绞线组成,采用直线布置;预应力钢绞线为 1 束 7 根标准型 φ 15.24 mm 低松弛钢绞线。

根据 TB 10092—2017《铁路桥涵混凝土结构设计规范》^[9] 计算新型轨道梁预应力损失。经计算,预应力的损失应力为 195.0 MPa。又因预应力筋束在新型轨道梁端部锚下的控制应力 σ_{con} 为 1 395

MPa, 故建模时通过降温法^[8] 计算可得, 降温 512.82℃ 能达到有效预应力 1 200.0 MPa 的要求。

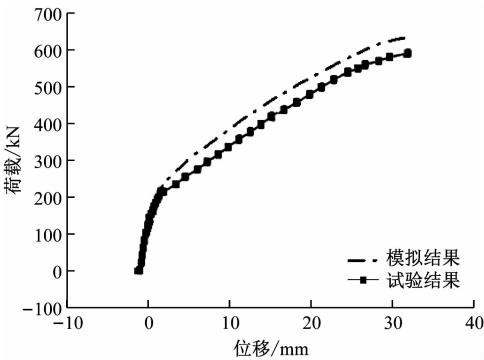
2.2 接触关系与边界条件

在新型轨道梁模型中, 假定忽略混凝土同钢筋及预应力钢绞线之间的粘结滑移, 采用 Embedded Region 约束, 将钢筋骨架和预应力钢绞线嵌入到整个模型中, 并将支座处的垫块与混凝土接触面设置为绑定约束。

新型轨道梁模型的边界条件: 一端选用固定铰支座, 限制 x 、 y 、 z 方向(横向、纵向、竖向)的位移; 另一端选用滚动铰支座, 限制 y 、 z 方向(纵向及竖向)的位移。两端皆不限制 y 、 z 方向的转动自由度。

2.3 新型轨道梁模型的结果验证

在简支梁三分点处加载, 以跨中截面最大位移为计算对象, 得到跨中截面的荷载-位移曲线对比图, 如图 3 所示。由图 3 可知, 模拟结果与试验结果的荷载-位移曲线拟合较好。



注: 试验模型极限荷载 = 580 kN; 模拟模型极限荷载 = 610 kN; 理论计算极限荷载 = 592 kN。

图 3 PC 梁试验和模拟的荷载-位移曲线对比图
Fig. 3 Diagram of PC beam test and simulated load-displacement curve comparison

通过新型轨道梁模型模拟得到轨道梁开裂荷载和极限荷载的模拟值。为验证新型轨道梁模型的计算准确性, 将新型轨道梁模型的模拟值、文献[8]中的试验值及按理论公式计算得到的理论值进行对比, 结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 极限承载力模拟值略高于试验值和理论值, 混凝土开裂点也略晚于试验所测结果。经分析, 出现此现象的原因是: 试验设计材料 C50 混凝土的实际测得混凝土轴心抗压强度为 35.11 MPa, 而在数值模拟中 C50 混凝土的轴心抗压强度取值为 35.50 MPa, 取值存在的误差导致计算结果的误差。但计算结果的最大误差仅为

表 2 不同类型荷载的模拟值、理论值及试验值对比
Tab. 2 Comparison of simulated, theoretical and experimental values with different load types

荷载类型	模拟值/kN	理论值/kN	与理论值的误差率 r_1 /%	试验值/kN	与试验值的误差率 r_2 /%
开裂荷载	226	213	5.70	225	0.44
极限荷载	610	592	2.90	580	4.90

注: $r_1 = [(\text{模拟值} - \text{理论值}) / \text{模拟值}] \times 100\%$; $r_2 = [(\text{模拟值} - \text{试验值}) / \text{模拟值}] \times 100\%$ 。

5.7%, 说明模拟结果、试验结果及理论计算结果均基本吻合。

3 新型轨道梁的受力性能

本文应用新型轨道梁模型对工况 1 下的跨中挠度、工况 2 下的跨中截面应力和刚度进行模拟计算, 进而分析新型轨道梁的受力性能。

3.1 工况 1 下的跨中挠度

在工况 1 下, 不同跨高比新型轨道梁的跨中截面挠度如表 3 所示。由表 3 可知: 在工况 1 荷载作用下, 当跨高比为 20.0 时, 新型轨道梁模型计算所得挠度最大, 为 9.60 mm, 满足《跨座式单轨交通规范》^[7] 中的竖向挠度应不超过 $l/800$ 的要求。跨中挠度随轨道梁跨高比增大而增大, 分析认为轨道梁梁高的下降会引起截面惯性矩的减小, 而惯性矩的减小会导致抗弯刚度的降低, 刚度的降低又会导致挠度的增大, 故跨中挠度随着轨道梁跨高比的增大而增大。

表 3 工况 1 新型轨道梁跨中挠度
Tab. 3 Mid-span deflection of new-model track beam under working condition 1

模型	跨中挠度/mm
YL1	5.22
YL2	5.59
YL3	5.73
YL4	6.53
YL5	7.31
YL6	7.75
YL7	8.59
YL8	9.60

3.2 工况 2 下的跨中截面应力

跨中截面应力选择轨道梁跨中截面四角点(如图 4 中的 A、B、C、D 点)处的应力进行分析。在工

况 2 下,不同跨高比新型轨道梁的跨中截面四角点混凝土应力模拟计算结果,如图 5 所示。

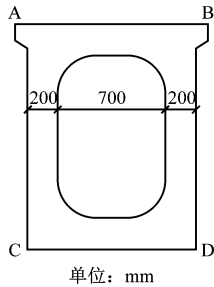


图 4 轨道梁跨中截面的四角点示意图

Fig. 4 Diagram of four corner points of track beam mid-span profile

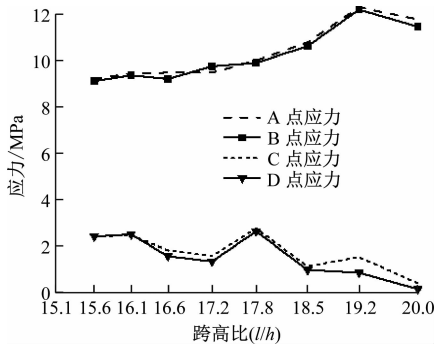


图 5 工况 2 下跨中截面四角点的混凝土应力

Fig. 5 Concrete stress at four corner points of mid-span profile under working condition 2

由图 5 可知,新型轨道梁的跨中截面四角点混凝土压应力最大值位于左上角点(A点), $\sigma_{cp} < 15$ MPa,小于混凝土容许压应力 $\sigma_c = 23.925$ MPa,而且未出现拉应力,满足国家标准 TB 10092—2017《铁路桥涵梁混凝土结构设计规范》^[9]文中关于混凝土容许压应力和容许拉应力的规定。

3.3 工况 2 下的刚度分析

经模拟计算,工况 2 下新型轨道梁的刚度变化情况如表 4 所示,混凝土开裂荷载及跨中截面钢筋应力如表 5 所示。

由表 4 及表 5 可知:当轨道梁宽高比为 15.6 及 16.1 时,刚度变化率约为 10%,刚度变化较小,且混凝土未开裂,说明轨道梁处于弹性阶段,但钢筋屈服,继续加载轨道梁将发生脆性破坏;当轨道梁跨高比为 16.6 及 17.2 时,刚度变化率为 5% 以下,刚度变化较小,并且混凝土未开裂、钢筋未屈服,说明轨道梁处于弹塑性阶段,继续加载轨道梁将延性破坏;当轨道梁跨高比为 17.8 及 18.5 时,刚度变化率

表 4 工况 2 下新型轨道梁的刚度变化情况

Tab. 4 Stiffness changes of new-model track beam under working condition 2

模型	加载初期刚度/ (kN/mm)	加载末期刚度/ (kN/mm)	刚度 变化率/%
YL1	11.98	13.20	10.2
YL2	11.34	12.44	9.7
YL3	10.86	11.05	1.7
YL4	9.62	10.02	4.2
YL5	9.30	9.71	4.4
YL6	8.81	9.01	2.3
YL7	8.13	7.76	-4.9
YL8	7.80	7.15	-8.3

注:刚度变化率 = [(加载末期刚度 - 加载初期刚度) / 加载初期刚度] $\times 100\%$

表 5 工况 2 下的混凝土开裂荷载及跨中截面钢筋应力

Tab. 5 Concrete cracking load and mid-span profile reinforcement stress under working condition 2

模型	混凝土开裂荷载/kN	跨中截面钢筋应力/MPa
YL1	—	440.7
YL2	—	410.5
YL3	—	380.8
YL4	—	372.7
YL5	148.39	365.4
YL6	142.59	360.8
YL7	115.42	335.8
YL8	96.88	334.5

注:—表示混凝土未开裂,故未测出开裂荷载。

为 5% 以下,混凝土开裂,但钢筋未屈服,说明轨道梁处于弹塑性阶段,继续加载轨道梁将延性破坏;当轨道梁跨高比为 19.2 及 20.0 时,刚度变化率为负数,混凝土开裂且钢筋未屈服,但此时的轨道梁截面高度高,相对工程造价高、施工难度较大。

综上所述,当轨道梁跨高比为 16.6 ~ 18.5 时,新型轨道梁的受力性能较好,工程造价相对较低,施工难度适宜。

4 结语

1) 为针对新型跨座式单轨列车的需求而设计的跨度为 25 m 的新型轨道梁,通过静力模拟分析轨道梁的跨中挠度、应力、加载初期刚度与加载结束刚度的变化等结果,验证新型轨道梁的力学性能均满足规范要求。

2) 通过模拟分析不同跨高比下的新型轨道梁在静力荷载下的力学性能,发现跨高比为16.6~18.5时,25 m跨度的新型轨道梁的力学性能较好,且造价适宜、施工难度较低,对于新型跨座式单轨轨道梁的进一步研究具有一定的参考意义。

参考文献

[1] 魏家蓉,董斌杰,张哲宁. 跨座式单轨交通发展现状研究及方向展望[J]. 铁道勘察, 2022, 48(1): 52.
WEI Jiarong, DONG Binjie, ZHANG Zhening. Research on development status and prospect of straddle monorail transit [J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(1): 52.

[2] HE X. Application and prospect of straddle monorail transit system in China[J]. Urban Rail Transit, 2015, 1(1): 26.

[3] 刘永锋. 重庆轻轨较新线一期工程 PC 轨道梁结构设计[J]. 铁道标准设计, 2003, 47(12): 74.
LIU Yongfeng. Structural design of PC track beam for Chongqing light rail[J]. Railway Standard Design, 2003, 47(12): 74.

[4] 韩军,朱尔玉. 韩国跨座式单轨交通预应力混凝土轨道梁设计评价[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(12): 87.
HAN Jun, ZHU Eryu. Evaluation of PC track beam design in Korean straddle monorail transit[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(12): 87.

[5] 马继兵,蒲黔辉,夏招广. 跨座式单轨交通 PC 轨道梁静载及疲劳试验研究[J]. 铁道建筑, 2008, 48(5): 3.
MA Jibing, PU Qianhui, XIA Zhaoguang. Experimental study on static load and fatigue of PC track beam in straddle monorail traffic [J]. Railway Engineering, 2008, 48(5): 3.

[6] GOU H, YANG Y, YANG D, et al. Research on static and dynamic behaviors of PC track beam for straddle monorail transit system[J]. Steel and Composite Structures, 2019, 31: 437.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 跨座式单轨交通设计规范: GB 50458—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of straddle monorail transit: GB 50458—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

[8] 李泽高. 配置 600 MPa 钢筋有粘结部分预应力混凝土梁抗弯性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
LI Zegao. Study on flexural behavior of bonded partially prestressed concrete beams with 600 MPa reinforced bars[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.

[9] 国家铁路局. 铁路桥涵混凝土结构设计规范: TB 10092—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
National Railway Administration of People's Republic of China. Code for design of concrete structures of railway bridge and culvert: TB 10092—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

• 收稿日期:2021-06-22 修回日期:2021-09-11 出版日期:2024-01-10
Received:2021-06-22 Revised:2021-09-11 Published:2024-01-10

• 第一作者:赵军伟,硕士研究生,zhao15030140330@163.com
通信作者:杜鹏,讲师,dupeng@hebeu.edu.cn

• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

~~~~~

(上接第 132 页)

[10] 虞宸晨. 德国近距公共交通系统简介[J]. 交通与运输, 2018, 34(2): 54.  
YU Xiaochen. Brief introduction of short-distance public transport system in Germany[J]. Traffic & Transportation, 2018, 34(2): 54.

[11] Stadt Braunschweig. Präsentation; Mobilität in der wachsenden Großstadt vom 13.01.2017 [EB/OL]. (2017-01-13) [2021-06-26]. [https://www.stadt-bahn-plus.de/fileadmin/media/Download\\_Unterlagen\\_2017/20170112VORLAGE\\_final\\_Stadtbahnausbaukonzept.pdf](https://www.stadt-bahn-plus.de/fileadmin/media/Download_Unterlagen_2017/20170112VORLAGE_final_Stadtbahnausbaukonzept.pdf).

[12] MARTIN A. Standardisierte Bewertung Version 2016[J]. Der Nahverkehr, 2017(9):42.

[13] 安宁. 德国公共交通投资项目标准化评估程序与方法[J]. 城市交通, 2009, 7(4): 83.  
AN Ning. Standardized procedures & methods for evaluation of

transit investment projects in Germany[J]. Urban Transport of China, 2009, 7(4): 83.

[14] Rat der Stadt Braunschweig. Beschlussvorlage: ÖPNV in einer wachsenden Großstadt Stadtbahnausbaukonzept für Braunschweig [EB/OL]. [https://www.stadt-bahn-plus.de/fileadmin/media/Download\\_Unterlagen\\_2017/Praesentation\\_Stadt.Bahn.Plus\\_13.01.2017\\_V100\\_Web\\_sec.pdf](https://www.stadt-bahn-plus.de/fileadmin/media/Download_Unterlagen_2017/Praesentation_Stadt.Bahn.Plus_13.01.2017_V100_Web_sec.pdf).

• 收稿日期:2021-08-27 修回日期:2021-11-04 出版日期:2024-01-10  
Received:2021-08-27 Revised:2021-11-04 Published:2024-01-10

• 作者:梁帅文,工程师,liebeshan@sina.cn

• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license