文章编号:1005-0523(2023)04-0009-07

重载铁路货车轴载作用下嵌入式轨道受力变形分析

龚 凯[1,2],王 成[2],杨强强[2],刘林芽[1,2],卞文君[2],刘保臣[3]

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室,江西 南昌 330013;
2. 华东交通大学交通运输工程学院,江西 南昌 330013;3. 中国铁道科学研究院机车车辆研究所,北京 100081)

摘要:为研究嵌入式轨道在重载铁路中的适用性,采用有限元法,建立嵌入式轨道有限元模型,从钢轨应力、钢轨位移、轨道板位移的角度分析货车轴载对嵌入式轨道结构受力及变形的影响,并针对现有嵌入式轨道结构进行优化研究。研究结果表明:货车轴载对嵌入式轨道轨头应力、轨底应力、钢轨横向及竖向位移影响显著,其中,轨头应力、钢轨横向位移均超过限值要求,但其对轨道板位移影响较小;采用75 kg/m钢轨替换60 kg/m钢轨后,轨头应力显著减小,但钢轨横向位移仍然超过限值要求;在此基础上,随着填充材料弹性模量的增大,钢轨应力及位移均显著减小,且均在规范限值内,填充材料弹性模量建议取为400 MPa。

关键词:铁道工程;重载铁路;货车轴载;嵌入式轨道;有限元;受力变形

中图分类号:U213.2 **文献标志码**:A

本文引用格式:龚凯,王成,杨强强,等. 重载铁路货车轴载作用下嵌入式轨道受力变形分析[J]. 华东交通大学学报,2023,40(4):9-15.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.04.008

Analysis of Force and Deformation of Embedded Track Under Axle Load of Heavy-Haul Railway Wagons

Gong Kai[1,2], Wang Cheng[2], Yang Qiangqiang[2], Liu Linya[1,2], Bian Wenjun[2], Liu Baocheng[3]

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co, Ltd. Beijing 100081, China)

Abstract: The finite element approach is used to create an embedded track finite element model in order to investigate the applicability of embedded track in heavy-haul railway. From the perspective of rail stress, rail displacement, and track slab displacement, the influence of truck axle load on the stress and deformation of embedded track structure are studied, and the existing embedded track structure is adjusted. According to the findings, the truck axle load has a substantial impact on the stress at the head of the rail, the stress at the bottom of the rail, and the lateral and vertical displacement of the rail. Among them, rail head stress and rail lateral displacement all exceed the regulatory requirements, but have no effect on track slab displacement. Following the replacement of 60 kg/m rail with 75 kg/m rail, the stress in the rail head was significantly reduced, but the transverse displacement of the rail still exceeded the limit value. On this basis, as the elastic modulus of filling mate-

收稿日期:2022-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52068028,51968025);江西省自然科学基金重点项目(20192ACBL20009);江西省自然科学基金面上项目(20224BAB204065);江西省教育厅科学技术项目(GJJ210621);江西省研究生创新资金项目(YC2022-s556);中国铁道科学研究院集团有限公司重点课题(2021YJ273)

rials increases, the stress and displacement of rails are greatly decreased, and they are all within the code limitations. It is advised that the elastic modulus of filler materials be 400 MPa.

Key words: railroad engineering; heavy-haul railway; axle load of wagon; embedded track; finite element; force and deformation analysis

Citation format:GONG K,WANG C,YANG Q Q,et al. Analysis of force and deformation of embedded track under axle load of heavy-haul railway wagons[J]. Journal of East China Jiaotong University,2023,40(4):9-15.

近年来,重载铁路发展迅猛,自我国既有线大面积提速以来 5 000 t 列车已开行各大繁忙干线,实现了提速重载的国际首例;大秦铁路、朔黄铁路分别完成了扩能改造,瓦日铁路、浩吉铁路等以 30 t 轴重设计、施工的铁路通道相继贯通[1]。重载铁路轨道大多为有砟轨道,是以扣件支承为主的轨下点支承式结构,随着货车轴重及行车密度的增大,钢轨波磨、扣件断裂及轨道振动大等问题仍难以避免。针对上述问题,一种具有克服钢轨波磨、减小轨道振动功能的嵌入式轨道被国内外学者关注,其特点在于轨下支承形式采用连续支承[2-4]。

目前,嵌入式轨道大多应用于有轨电车运输,国内外学者针对轨道结构开展了一些研究。Lakusic 等[5]对有轨电车通过嵌入式轨道时轨道结构的振动响应和噪声水平进行了测试,并与传统离散支撑式轨道结构的振动响应和噪声水平进行对比,发现嵌入式轨道振动响应和噪声水平都有所减小。Ling 等[6]建立了有轨电车和嵌入式轨道相互作用模型,得出有轨电车嵌入式轨道系统与有轨电车扣件式轨道系统相比,嵌入式轨道可以减少动态轮轨力和轨道部件的水平振动的结论。Zhao 等[7]采用有限元法和边界元法对有轨电车使用的嵌入式轨道的振动声辐射特性进行了预测,开展了有轨电车嵌入式轨道的振动噪声特性分析,对嵌入式轨道槽内结构进一步优化,结果表明:“I”型的槽内结构能够实现轨道声辐射降低效果达到 3 dB,在“I”型槽的基础上增大垫板的弹性模量可以降低嵌入式轨道噪声 4 dB。康晨曦等[8]用聚氨酯填充材料取代传统的轨道扣件,使嵌入式轨道结构不再有明显的周期性约束,并实现了轨道连续弹性支撑,同时建议在保证轨道力学性能的前提下,采用拓扑优化的截面。胥燕君[9]建立了有轨电车和嵌入式轨道的相互作用模型,分析了刚度对嵌入式轨道动态特性的影响,得到刚度变化对道床板垂向位移比钢轨垂向位移的影响更大的结论。秦超红[10]采用有限元法分析了列车荷载和温度荷载对嵌入式轨道倾覆性和稳定性的影响。汪力等[11]设计了 4 种应用于地铁线路的嵌入式轨道方案。上述研究表明嵌入式轨道在克服钢轨波磨、减小轨道振动方面效果显著。那么,这一轨道结构是否能够适用于重载铁路呢?

为此,本文以适用于有轨电车运输的嵌入式轨道为基础,采用有限元法,建立嵌入式轨道有限元模型,验证模型的可靠性;接着,从钢轨应力、钢轨位移、轨道板位移的角度分析货车轴载对嵌入式轨道结构受力及变形的影响;最后,针对现有嵌入式轨道结构进行优化研究,为适用于重载铁路运输要求的嵌入式轨道结构设计提供参考。

1 嵌入式轨道有限元模型建立

1.1 有限元模型

嵌入式轨道由钢轨、填充材料、轨道板、自密实混凝土和底座板等组成,如图 1 所示。其特点在于采用浇筑于承轨槽中的高分子填充材料替代了传统扣件系统,使轨下结构处于连续支承。

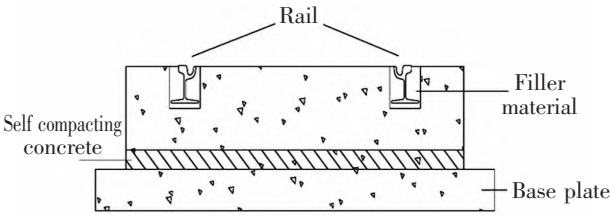


图 1 嵌入式轨道结构图

Fig.1 Embedded track structure diagram

针对嵌入式轨道结构特点,建立有限元分析模型,如图 2 所示。建模过程:

1) 钢轨、填充材料、轨道板、自密实混凝土和底座板均采用实体单元 SOLID45 单元模拟;

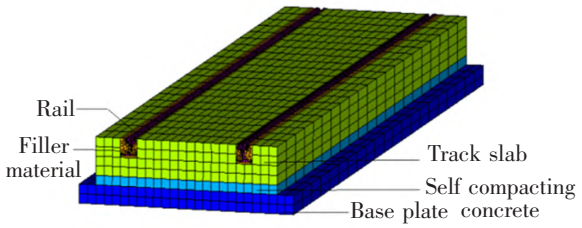


图 2　嵌入式轨道有限元模型

Fig.2　Finite element model of embedded rail

2）钢轨和填充材料之间、填充材料和轨道板之间、轨道板和自密实混凝土之间、自密实混凝土与底座板之间均为绑定约束,不考虑彼此之间的法向分离和切向滑移;

3）为消除边界条件对计算结果的影响,建立 3 块轨道板模型，取中间的轨道板进行受力分析,并在轨道板中间位置进行加载。

1.2　模型参数及验证

嵌入式轨道主要计算参数如表 1 所示。

表 1　嵌入式轨道计算参数

Tab.1　Calculation parameters of embedded track

Name	Material properties	Parameter value
Rail(59R2)	Elastic modulus/Pa	2.06×10^{11}
	Poisson's ratio	0.3
Polyurethane material	Elastic modulus/Pa	1.6×10^{8}
	Poisson's ratio	0.45
Track slab	Elastic modulus/Pa	3.6×10^{10}
	Poisson's ratio	0.16
	Length/m	4.8
	Width/m	2.2
	Thickness/m	0.4
Self compacting concrete adjusting layer	Elastic modulus/Pa	4×10^{8}
	Poisson's ratio	0.3
	Width/m	2.2
	Thickness/m	0.094
Base plate	Elastic modulus/Pa	3.3×10^{10}
	Poisson's ratio	0.167
	Width/m	2.6
	Thickness/m	0.2

为验证嵌入式轨道有限元模型的正确性,在钢轨顶部施加横向荷载,荷载范围为 10~100 kN。通过计算得到了不同荷载作用下钢轨轨头横向位移,并与文献[12]中的计算结果进行对比,如表 2 所示。由表 2 表明,由有限元模型计算得到轨头横移最大位移与文献中的结果基本吻合。可见,本文建立的有限元模型合理、可靠。

表 2　钢轨轨头横向位移最大值对比

Tab.2　Comparison of the maximum value of transverse displacement of rail head

Lateral load/kN	The maximum transverse displacement of the model rail head in this paper/mm	Reference[12] maximum lateral displacement of rail head/mm
10	0.219	0.21
20	0.439	0.45
30	0.658	0.65
40	0.878	0.85
50	1.097	1.15
60	1.317	1.33
70	1.536	1.51
80	1.750	1.75
90	1.975	1.96
100	2.194	2.24

2　货车轴载对嵌入式轨道受力及变形的影响

2.1　货车轴载

根据重载铁路运输要求,我国货车轴载主要为 21,23,25,27 t。同时，基于《重载铁路设计规范》(TB 10625—2017),并考虑动力因素的影响。设计荷载分别按式(1),式(2)进行计算

$$P_d=\alpha\times P_j \tag{1}$$

式中:P_d 为竖向动荷载;P_j 为竖向静荷载;α 为动载系数，当设计轴重为 250 kN 时的特种三级线路取 2.5,其它情况取 3.0。

$$Q=0.8\times P_j \tag{2}$$

式中:Q 为横向设计荷载。

通过计算得到不同轴重下的荷载工况，如表 3 所示。

表 3 荷载工况

Tab.3 Load conditions

kN

Load/kN	Lateral load	Vertical load
210	252	315
230	276	345
250	300	375
270	324	405

2.2 嵌入式轨道结构受力分析

为验证上文的有限元模型,嵌入式轨道的钢轨采用的是适用于有轨电车运输要求的 59R2 型钢轨。而我国铁路运输一般采用的钢轨是 60 kg/m 型钢轨。将 60 kg/m 型钢轨截面参数[13]输入模型中,计算货车轴载作用下嵌入式轨道受力及变形,轴载作用位置如图 3 所示。

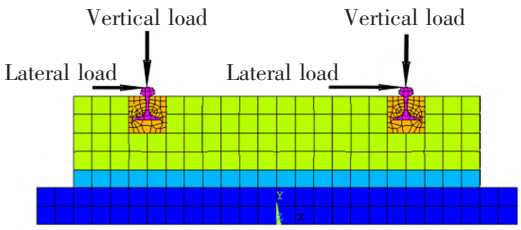
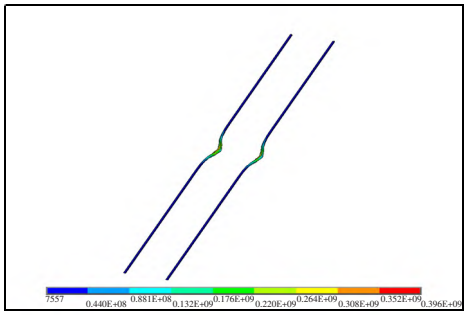


图 3 货车轴载作用位置

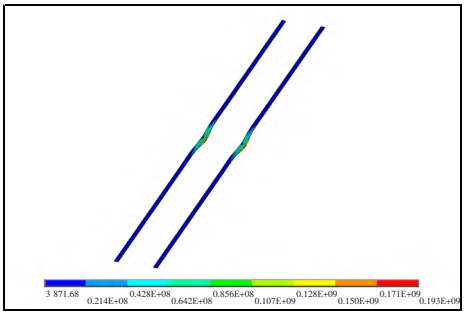
Fig.3 Location of wagon axle load

限于篇幅, 这里列出了货车轴载 21 t 时轨头应力、轨底应力、钢轨横向及竖向位移、轨道板横向及竖向位移等嵌入式轨道受力及变形云图,如图 4 所示。

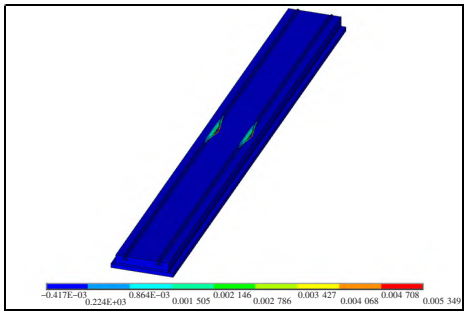
通过计算得到货车轴载 21,23,25,27 t 时嵌入式轨道受力及变形结果,如表 4 所示。



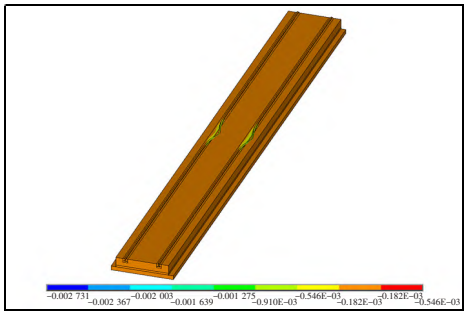
(a) Rail head stress



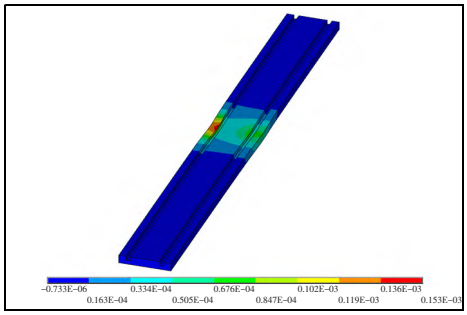
(b) Rail base stress



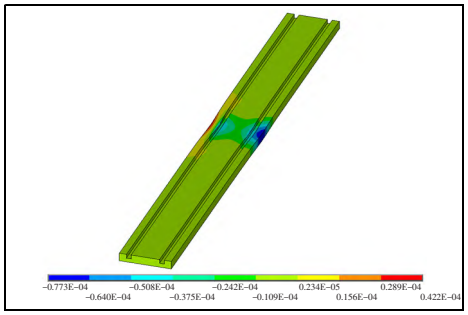
(c) Lateral displacement of rail



(d) Vertical displacement of rail



(e) Lateral displacement of track slab



(f) Vertical displacement of track slab

图 4 嵌入式轨道受力及变形计算结果

Fig.4 Calculated results of force and deformation of embedded track

表4　货车轴载作用下嵌入式轨道结构受力及变形结果

Tab.4　Stress and deformation results of wagon axle load on embedded track structure

Axle load/t	Rail head stress/MPa	Bottom rail stress/MPa	Displacement of rail/mm		Displacement of track plate/mm	
			Lateral	Vertical	Lateral	Vertical
21	396	193	5.35	2.73	0.15	0.08
23	434	207	5.85	2.98	0.17	0.09
25	472	225	6.36	3.24	0.18	0.09
27	509	243	6.87	3.50	0.20	0.10

由表 4 表明,随着轴载的增大,嵌入式轨道轨头应力、轨底应力、钢轨横向及竖向位移均增幅较大。根据文献[13]可知,60 kg/m 型钢轨允许应力 σ_s 为 352 MPa,轨头应力均大于 σ_s,而轨底应力均小于 σ_s。同时,根据文献[12,14]可知,为避免钢轨发生横向倾覆钢轨横向位移限值取 4 mm, 钢轨垂向位移限值取 4 mm。这样,由表 4 表明,货车轴载 21~27 t 时钢轨横向位移均超限,轴载 27 t 时钢轨竖向位移基本满足要求。可见,现有嵌入式轨道结构难以满足重载铁路运输需求,有必要对轨道结构进行优化分析。

2.3　嵌入式轨道结构优化分析

2.3.1　钢轨类型

随着重载铁路货车轴载的增大,部分铁路干线采用了 75 kg/m 型钢轨替代 60 kg/m。因此,本节针对钢轨为 60 kg/m 和 75 kg/m 时的嵌入式轨道受力及变形规律进行分析。通过计算得到嵌入式轨道受力及变形结果, 考虑到 2.2 节中轴载对轨道板位移影响较小,故本节主要针对轨头应力、轨底应力、钢轨横向及竖向位移开展分析,计算结果如表 5 所示。

由表 5 表明,以轴重 27 t 为例,轨头应力最大值小于限值要求 σ_s,其比 60 kg/m 时减小了 31.2%;轨底应力最大值小于限值要求 σ_s, 其比 60 kg/m 时减小了 7.8%;钢轨横向位移仍全部超过限值 4 mm,其最大值比 60 kg/m 时减小了 13.4%; 钢轨竖向位移最大值满足限值 4 mm 要求, 其比 60 kg/m 时减小了 14.0%。可见,采用 75 kg/m 型钢轨,轨头应力大幅度减小且满足限值要求,轨底应力、钢轨横向及竖向位移也有一定程度的减小, 但钢轨横向位移仍然超过限值要求,有必要对轨道结构开展进一步优化。

2.3.2　填充材料强度

填充材料是嵌入式轨道结构的重要组成部分,通过包裹钢轨轨底及轨腰起到固定钢轨的作用,与传统轨道中扣件系统类似, 不同的是采用填充材料固定钢轨,使得轨下处于连续支撑状态。弹性模量是反映填充材料强度的重要指标,在轨道结构优化的基础上(即采用 75 kg/m 型钢轨),通过增大填充材料弹性模量进一步优化轨道结构, 填充材料弹性模量分别取 200,300,400,500 MPa,将其输入模型中,通过计算得到不同填充材料强度条件下嵌入轨道结构受力及变形计算结果,如表 6 所示。

为直观分析轨道结构受力及变形随填充材料弹性模量的变化规律,采用点线图反映,如图 5 所示。由图 5~图 8 表明,当轴载条件一致时,弹性模量由 200 MPa 增至 300 MPa 时,轨头应力、轨底应力、钢轨横向及竖向位移减幅最大;随着弹性模量进一

表 5　不同钢轨类型条件下嵌入轨道结构受力及变形计算结果

Tab.5　Calculation results of force and deformation of embedded track structure for different rail types

Axle load/t	Rail head stress/MPa		Bottom rail stress/MPa		Lateral displacement of rail/mm		Vertical displacement of rail/mm	
	60 kg/m	75 kg/m	60 kg/m	75 kg/m	60 kg/m	75 kg/m	60 kg/m	75 kg/m
21	396	274	189	174	5.34	4.62	2.72	2.36
23	434	301	207	191	5.85	5.06	2.98	2.58
25	472	327	225	207	6.36	5.50	3.24	2.81
27	509	350	243	224	6.87	5.95	3.50	3.01

表6 不同填充材料强度条件下嵌入轨道结构受力及变形计算结果

Tab.6 Calculation results of force and deformation of embedded track structure caused by different strength of filling materials

Axle load/t	Rail head stress/MPa				Bottom rail stress/MPa			
	200 MPa	300 MPa	400 MPa	500 MPa	200 MPa	300 MPa	400 MPa	500 MPa
21	264	248	234	225	163	143	129	124
23	290	271	258	247	178	159	141	136
25	315	295	279	269	194	170	153	148
27	340	317	303	289	209	183	169	165

Axle load/t	Lateral displacement of rail/mm				Vertical displacement of rail/mm			
	200 MPa	300 MPa	400 MPa	500 MPa	200 MPa	300 MPa	400 MPa	500 MPa
21	4.07	3.26	2.80	2.49	2.03	1.53	1.32	1.18
23	4.46	3.57	3.06	2.73	2.22	1.68	1.44	1.29
25	4.85	3.88	3.33	2.96	2.41	1.83	1.57	1.41
27	5.23	4.19	3.59	3.20	2.61	1.97	1.69	1.52

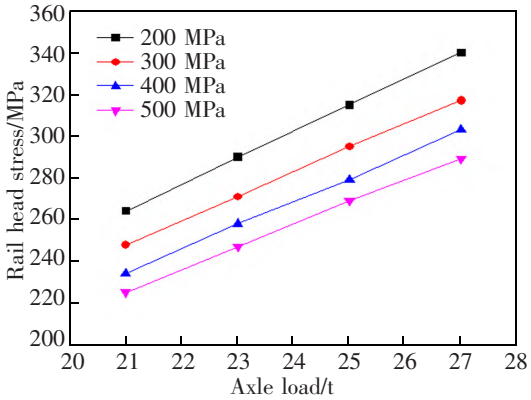


图 5 轨头应力随弹性模量及轴载的变化

Fig.5 Variation of rail head stress with elastic modulus and axle load

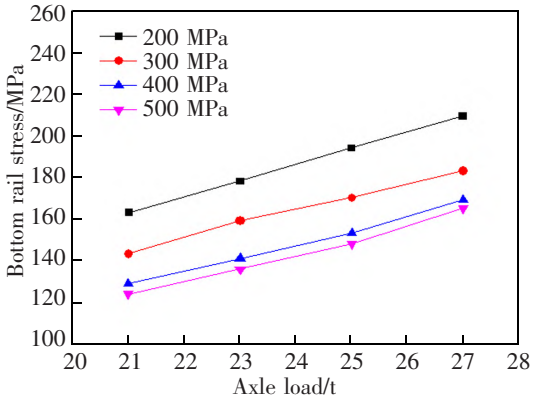


图 6 轨底应力随弹性模量及轴载的变化

Fig.6 Variation of bottom rail stress with elastic modulus and axle load

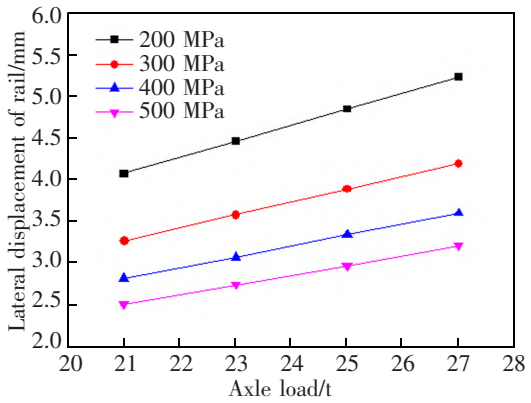


图 7 钢轨横向位移随弹性模量及轴载的变化

Fig.7 Variation of rail lateral displacement with elastic modulus and axle load

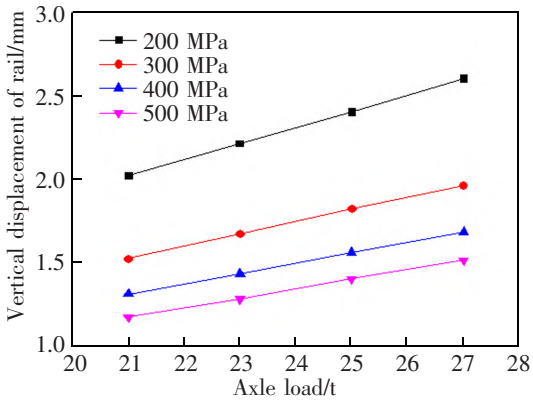


图 8 钢轨竖向位移随弹性模量及轴载的变化

Fig.8 Variation of rail vertical displacement with elastic modulus and axle load

步增大,上述减幅平缓;弹性模量由 400 MPa 增至 500 MPa 时,上述指标减幅较小,尤其是轨底应力。当填充材料弹性模量一致时,随着轴载的增大,轨头应力、轨底应力、钢轨横向及竖向位移增大依然显著,其中,轨头应力、轨底应力、钢轨竖向位移最大值均满足限值要求;而钢轨横向位移在弹性模量≥300 MPa 时满足限值要求。

3　结论

1)随着货车轴载的增大,嵌入式轨道轨头应力、轨底应力、钢轨横向及竖向位移均增幅较大,其中,轨头应力、钢轨横向位移均超过限值要求。而货车轴载对轨道板横向及竖向位移影响较小。

2)采用 75 kg/m 型钢轨替换 60 kg/m 型钢轨后,轨头应力大幅度减小且满足限值要求,轨底应力、钢轨横向及竖向位移也有一定程度的减小,但钢轨横向位移仍然超过限值要求。

3)当轴载条件一致,弹性模量由 200 MPa 增至 300 MPa 时轨头应力、轨底应力、钢轨横向及竖向位移减幅最大;弹性模量由 400 MPa 增至 500 MPa 时上述指标减幅平缓;同时,当填充材料弹性模量≥300 MPa 时上述指标基本满足限值要求。因此,从轨道结构受力及变形要求的角度出发,建议将填充材料弹性模量取为 400 MPa。

参考文献:

[1] 邓立红. 我国重载铁路运输通道发展研究[J]. 中国铁路,2020(8):70-75.
DENG L H. Development research on transportation corridors of heavy-haul railways in china[J]. China Railway,2020(8):70-75.

[2] GRASSIE SL, KALOUSEK J. Rail corrugation:characteristics, causes and treatments[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part F:Journal of Rail and Rapid Transit, 1993,207(1):57-68.

[3] SATO Y,MATSUMOTO A,KNOTHE K. Review on rail corrugation studies[J]. Wear,2002,253(1):130-139.

[4] OOSTERMEIJER K H. Review on short pitch rail corrugation studies[J]. Wear,2008,265(9):1231-1237.

[5] LAKUSIC S,BOGUT M,LAKUSIC V T. Noise and vibrations at tram track intersection[J]. Journal of the Acoustical Society of America,2008,123(5):3259.

[6] LING L,HAN J,XIAO X,et al. Dynamic behavior of an embedded rail track coupled with a tram vehicle[J]. Journal of Vibration and Control,2017,23:2355-2372.

[7] ZHAO Y,LI X,LV Q,et al. Measuring,modelling and optimising an embedded rail track[J]. Applied Acoustics,2017,116:70-81.

[8] 康晨曦,雷晓燕. 嵌入式轨道槽内结构刚度匹配及拓扑优化研究[J]. 噪声与振动控制,2020,40(2):134-136.
KANG C X,LEI X Y,et al. Study on structural stiffness matching and topology optimization in the embedded orbital groove[J]. Noise and Vibration Control,2020,40(2):134-136.

[9] 胥燕军. 现代有轨电车埋入式轨道结构参数优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
XU Y J. Research on the parameter optimization of the embedded track structure of the modern tram[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2016.

[10] 秦超红. 嵌入式轨道结构几何参数优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
QIN C H. Study on the seometry optimization of embedded track[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2014.

[11] 汪力,肖杰灵,等. 适用于地铁线路的嵌入式轨道结构方案研究[J]. 地下工程学报,2019,15(4):1181-1183.
WANG L,XIAO J L,et al. Research on the embedded track structure scheme suitable for subway lines[J]. Journal of Underground Engineering,2019,15(4):1181-1183.

[12] 罗炯,陈攀,秦超红,等. 有轨电车新型嵌入式轨道钢轨抗倾覆性能分析[J].铁道标准设计,2016,60(4):8-12.
LUO J,CHEN P,QIN C H,et al. Analysis of rail anti-turnover[J]. Railway Standard Design,2016,60(4):8-12.

[13] 高亮. 轨道工程[M]. 北京:中国铁道出版社,2015.
GAO L. Track engineering[M]. Beijing:China Railway Press,2015.

[14] 陈代秀,王根平,李成辉,等. 隧道内支承块空吊对钢轨竖向位移影响[J]. 铁道标准设计,2017,61(4):59-63.
CHEN D X,WANG G P,LI C H,et al. Influence of empty crane in tunnel on vertical displacement of rail[J]. Railway Standard Design,2017,61(4):59-63.

通信作者:龚凯(1986—),男,讲师,博士,硕士生导师,研究方向为列车脱轨控制,列车-轨道(桥梁)系统振动及铁路轨道结构。E-mail:gongkai1986@126.com。

(责任编辑:姜红贵)