

文章编号:1005-0523(2015)03-0036-06

重载铁路轨道结构受力特性仿真分析

丁荣¹, 沈坚锋¹, 肖鑫², 许玉德¹

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2.中国铁道科学研究院研修学院,北京 100081)

摘要:重载铁路朝大轴重、高运量、高密度的方向发展,对轨道结构提出了更高的要求。轨道结构在列车荷载作用下的受力特性与轨道部件尺寸、材料参数等有关。在已有研究基础上,充分结合朔黄铁路现场实测数据,采用有限元方法建立重载铁路轨道结构仿真模型,计算分析了不同轴重及不同轨道参数下的重载铁路轨道结构的受力特性(包括钢轨、轨枕、道床、路基面的弯矩、应力、变形等)。研究表明:列车轴重对钢轨位移与应力影响最大;采用Ⅲ型轨枕、减小轨枕间距有利于减小轨道结构受力;道床弹性模量对钢轨位移影响较大,而道床厚度对受力特性影响较小。

关键词:重载铁路;轨道结构;受力特性;有限元分析

中图分类号:U213.212

文献标志码:A

轨道是铁路的行车基础,其作用是引导机车车辆运行,直接承受列车荷载作用,并把荷载分布传递给路基或桥隧建筑物。轨道结构力的传递和分布非常复杂,具有很强的随机性和重复性^[1]。随着重载铁路向大轴重、高运量、高密度的方向发展,都将对轨道结构提出更高的要求。运量越大,轮轨之间的动力作用越强,对轨道结构的破坏作用也越严重^[2-4],为保证轨道运行的安全,必须采用强度更高的轨道结构。

轨道结构在列车荷载作用下的受力特性和轨道部件尺寸、材料参数等有关^[4]。在针对重载铁路轨道结构受力特性的研究中,目前大多以理论计算为主,借助有限元方法建立轨道耦合模型进行分析,得到了一些结论^[5],但均缺少重载铁路的现场实测数据来完善建模。本文结合朔黄铁路现场实测数据,采用有限元分析方法对重载铁路轨道结构进行仿真建模,计算分析不同轴重以及不同轨道参数(包括轨枕类型、轨枕间距、道床弹性模量、道床厚度、轨下垫板刚度等^[5-6])下的重载铁路轨道结构的受力特性。

1 重载铁路轨道结构仿真模型

1.1 模型建立

采用有限元分析方法,首先需建立合适的有限元模型。在有砟轨道结构中,主要包括车辆及轨道结构,而车辆在轨道中主要提供荷载,因此,在建立模型时将列车简化为荷载直接作用于钢轨上;而轨道结构主要包括钢轨、轨枕、道床、联结零件,在建立模型时可对各部分组成进行简化,选取合适的材料特性等,最后建立有限元模型^[7-9]。

模型中,钢轨与轨枕的连接、轨枕与道床的连接均简化为弹簧连接。钢轨、轨枕模拟成梁单元,道砟采用连续介质进行模拟。由于道砟的散粒体特性,采用连续介质模拟时会产生一定误差,但研究^[10]认为传统的有限元模拟道砟,会使其计算结果偏大,这对于轨道结构设计来说是偏于安全的。路基与道床的连接采用单元粘接方式,轨枕与道床的连接采用弹簧单元,轨下垫板以及扣件也模拟成为弹簧单元。利用 ANSYS

收稿日期:2015-03-28

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(201313AG20B00)

作者简介:丁荣(1990—),男,硕士研究生,研究方向为铁道工程;许玉德(1964—),男,教授,博士生导师,研究方向为铁道工程、工务管理。

有限元分析软件,建立的三维有限元模型如图1所示。模型长度取30 m。

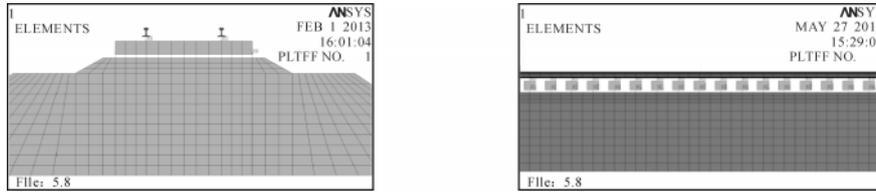


图1 轨道结构有限元模型

Fig.1 Track structural finite element model

1.2 作用荷载

列车荷载的传递是通过钢轨传给轨枕,然后作用于道床表面,可采用一个反映周期特点类似激振形式的力来表示,其中包括静荷载和一系列正弦函数叠加而成的动荷载^[11]。

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t \quad (\text{kN})$$

式中: P_0 为列车静荷载, P_1, P_2, P_3 分别是低、中、高频所产生的振动荷载。

若列车轴重为 25 t,速度取 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,不考虑轨道的随机不平顺,根据相关资料计算^[5],作用荷载可用下式表示。

$$F(t) = 125 + 1.71 \sin 9.96t + 4.87 \sin 51.8t + 15.6 \sin 279.25t \quad (\text{kN})$$

在有限元模型中,采用上述形式将列车简化为荷载直接作用于钢轨上。

1.3 模型验证

采用现场实测数据验证轨道结构有限元模型的可靠性。在朔黄重载铁路上进行了现场测试,利用该重载铁路相关轨道结构参数,建立有限元模型并进行计算,主要计算参数如表1所示。

表1 有限元模型主要计算参数

Tab.1 Main parameters of FEM model

部件	项目	单位	数值
钢轨(P75)	弹性模量	MPa	2.1×10^5
	钢轨质量	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	74.414
	泊松比	—	0.3
	轨头断面系数	m^3	4.32×10^{-4}
	轨底断面系数	m^3	5.09×10^{-4}
扣件	垂向刚度	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	7×10^7
	横向刚度	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	2.4×10^7
	垂向阻尼	$\text{kN} \times (\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	75
	横向阻尼	$\text{kN} \times (\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	60
轨枕(Ⅲ型)	弹性模量	MPa	3.75×10^4
	轨枕间距	m	0.600
	泊松比	—	0.3
道床	弹性模量	MPa	150
	道床厚度	m	0.30
	泊松比	—	0.27
	道床密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 400
路基	弹性模量	MPa	60
	泊松比	—	0.35
	路基密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 000

将计算结果与现场实测数据进行对比,如表2所示。

表2 模型计算与实测数据对比

项目	模型计算	实测数据
钢轨垂向位移/mm	2.11	2.01
轨枕垂向位移/mm	1.55	1.54
钢轨振动加速度/($m \cdot s^{-2}$)	77.36	82.72
道床振动加速度/($m \cdot s^{-2}$)	4.36	1.31

采用重载铁路轨道结构有限元模型进行分析计算,计算结果与现场实测数据进行比较,差异不大,即重载铁路轨道结构有限元模型能较好的模拟重载铁路轨道结构的受力特性。

2 受力特性分析

2.1 轴重

随着重载铁路的发展,轴重已经逐步提高到了30 t,轴重的提高直接反应在列车荷载作用下,对轨道结构的受力将产生直接的影响,分别针对25 t、27 t以及30 t轴重3种工况下轨道结构的受力特性进行分析。轨枕为Ⅲ型混凝土轨枕,轨枕间距取1 667根/km,利用有限元模型计算,可以得到不同轴重下轨道结构的受力特性,如表3所示。

当轴重由25 t增加到30 t时,轨道结构的受力和变形均有所增加,其中钢轨应力和位移增加约20%。随着轴重不断的提高,钢轨的应力和位移是必须注意的问题,必须采用重型钢轨,且需强化轨道结构的整体连接。同时,道床的受力增加也较大,为减小道床的受力情况,可采用级配良好的碎石道床以及增加道床厚度来减小其受力性能。而轨枕的受力增加明显,可通过减小轨枕间距或增大轨枕与道床的接触宽度来改善受力性能。

2.2 轨枕类型

不同类型的轨枕对轨道结构的传力有着不同的效应,轨枕是保持钢轨稳定的重要部件,轨枕的布置需要考虑运量行车条件等。重载铁路多采用Ⅱ型和Ⅲ型混凝土枕。轨枕间距取1 667根/km,轴重取27 t,利用有限元模型计算,可以得到不同轨枕类型下轨道结构的受力特性,如表4所示。

在重载铁路上采用不同轨枕时,采用刚度较大的Ⅲ型混凝土轨枕对减小钢轨位移和钢轨应力都有一定的效果,当采用Ⅲ型混凝土轨枕时,比采用Ⅱ型混凝土轨枕钢轨应力减小0.3%,轨枕弯矩增大8.1%,钢轨位移减小1.7%,道床应力减小1.6%,道床位移减小1.7%,路基面应力减小3.0%,即采用Ⅲ型混凝土轨枕有利于减小轨道结构受力,但会增加轨枕弯矩。

表3 不同轴重下轨道结构的受力特性

不同轴重	25 t	27 t	30 t
钢轨最大弯矩/($kN \cdot m$)	23.82	25.73	28.59
钢轨轨头压应力/MPa	68.93	74.44	82.72
钢轨轨底拉应力/MPa	58.50	63.18	70.20
钢轨最大垂向位移/mm	2.11	2.28	2.54
轨枕最大弯矩/($kN \cdot m$)	9.00	9.72	10.80
道床最大应力/kPa	176.32	190.44	211.62
道床位移/mm	1.55	1.68	1.86
路基面应力/kPa	66.21	71.51	79.46

表4 不同轨枕类型下轨道结构的受力特性

不同轨枕	Ⅱ型混凝土枕	Ⅲ型混凝土枕
钢轨最大弯矩/($kN \cdot m$)	25.80	25.73
钢轨轨头压应力/MPa	74.65	74.44
钢轨轨底拉应力/MPa	63.36	63.18
钢轨最大垂向位移/mm	2.32	2.28
轨枕最大弯矩/($kN \cdot m$)	8.99	9.72
道床最大应力/kPa	193.64	190.43
道床位移/mm	1.71	1.68
路基面应力/kPa	73.69	71.51

2.3 轨枕间距

轨枕是保持钢轨稳定的重要基础,较密的铺设能减小道床表面受力,但同时增大了成本,相反,稀疏的布置又不能满足轨道结构受力要求。分别考虑每千米铺设1 667,1 760,1 840根轨枕的布置。轨枕为Ⅲ型混凝土枕,轴重取27 t,利用有限元模型计算,可以得出不同轨枕间距下轨道结构的受力特性,如表5所示。

表5 不同轨枕间距下轨道结构的受力特性

Tab.5 Mechanical characteristics under different sleeper spacing

不同轨枕间距	1667根/km	1760根/km	1840根/km
钢轨最大弯矩/(kN·m)	25.73	24.03	23.25
钢轨轨头压应力/MPa	74.44	69.54	67.27
钢轨轨底拉应力/MPa	63.18	59.02	57.09
钢轨最大垂向位移/mm	2.28	2.15	2.11
轨枕最大弯矩/(kN·m)	9.72	9.29	8.97
道床最大应力/kPa	190.44	186.48	183.56
道床位移/mm	1.68	1.63	1.58
路基面应力/kPa	71.51	68.76	67.44

轨枕间距对轨道受力、变形的影响程度不同,总的来说,减小轨枕间距能减小轨道结构受力状况。轨枕间距从1 667根/km减小到1 840根/km时,钢轨应力减小9.6%,轨枕弯矩减小7.7%,道床应力减小3.6%,道床位移减小5.7%,路基面应力减小5.7%。通过增加轨枕铺设根数,能减小轨道结构受力与变形。

3.4 道床弹性模量

道床需要采用级配良好的碎石道砟,且需具有一定的弹性,若道床的刚度过大,会增加列车的冲击荷载,使轨枕和钢轨受力性能增加,若果道床的刚度过小,会增加轨道结构的整体下沉。分别考虑道床弹性模量为70,90,110,1300,150 MPa下轨道的受力特性,轨枕为Ⅲ型混凝土轨枕,轨枕间距取1 667根/km,轴重取27 t。利用有限元模型计算,可以得出在不同道床弹性模量下轨道结构的受力特性,如表6所示。

表6 不同道床弹性模量下轨道结构的受力特性

Tab.6 Mechanical characteristics under different elastic modulus

不同道床弹性模量	70 MPa	90 MPa	110 MPa	130 MPa	150 MPa
钢轨最大弯矩/(kN·m)	26.46	26.18	25.99	25.84	25.73
钢轨轨头压应力/MPa	76.57	75.76	75.19	74.77	74.44
钢轨轨底拉应力/MPa	64.99	64.30	63.82	63.46	63.18
钢轨最大垂向位移/mm	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28
轨枕最大弯矩/(kN·m)	9.36	9.48	9.58	9.66	9.72
道床最大应力/kPa	175.15	180.06	184.09	187.50	190.44
道床位移/mm	2.00	1.87	1.78	1.72	1.68
路基面应力/kPa	77.02	75.17	73.70	72.51	71.51

道床弹性模量从70 MPa增加到150 MPa时,对轨枕、道床应力以及道床位移影响较大,且对钢轨垂向位移影响明显,当道床弹性模量增加时,道床应力和轨枕弯矩增大,而钢轨的位移和应力、道床位移以及路基面应力都相应减小。钢轨垂向位移减小约12.6%,轨枕弯矩增大3.9%,道床应力增加8.7%,道床位移减小16.3%,路基面应力减小7.1%。

较大的道床弹性模量可减小轨道结构下沉,但会增加道床应力以及轨枕弯矩,对轨道结构有一定影响。较小的道床弹性模量会增大轨道结构下沉,对轨道结构平顺性是不利的。道床的弹性模量需在合理的范围内,需要选用级配良好的道砟,同时在运营中及时清筛道床,使道床的级配合理,保持良好的道床弹性。

2.5 道床厚度

道床的作用在于分散荷载,并传递给路基,这就需要道床具有一定的厚度,保证荷载的有效传递,重载铁路路基段道床厚度可取为30 cm,35 cm以及40 cm,分别针对这3种工况下轨道结构的受力特性进行分析,轨枕为Ⅲ型混凝土轨枕,轨枕间距取1 667根/km,轴重取27 t。利用有限元模型计算,可以得出在不同道床厚度下轨道结构的受力特性,如表7所示。

表7 不同道床厚度下轨道结构的受力特性

Tab.7 Mechanical characteristics under different ballast bed thickness

参数	不同道床厚度		
	30 cm	35 cm	40 cm
钢轨最大弯矩/(kN·m)	25.73	25.43	25.38
钢轨轨头压应力/MPa	74.44	73.59	73.45
钢轨轨底拉应力/MPa	63.18	62.45	62.34
钢轨最大垂向位移/mm	2.28	2.28	2.27
轨枕最大弯矩/(kN·m)	9.72	9.61	9.53
道床最大应力/kPa	190.44	188.29	187.32
道床位移/mm	1.68	1.56	1.51
路基面应力/kPa	71.51	70.49	69.59

道床厚度的增加能减小轨道结构部件受力与变形,但影响较小,特别是对钢轨应力,但对道床应力和位移有一定影响。在重载铁路上,增加道床厚度来减小轨道各部件受力效果不明显,并且随着道床厚度的增加,这种影响越来越小。较高的道床能分散列车荷载,但同时也增加了养护维修工作量,提高了养护成本。

2.6 轨下垫板刚度

轨下垫板能有效地保持钢轨与轨枕的可靠连接,并能在动力作用下发挥缓冲减震性能,延缓其残余变形,因此,要求轨下垫板应具有足够大的强度和耐久性。分别取轨下垫板刚度为 9×10^7 , 10×10^7 , 11×10^7 , 12×10^7 , 13×10^7 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$,分析轨道结构受力特性。轨枕为Ⅲ型混凝土轨枕,轨枕间距取1 667根/km,轴重取27 t。利用有限元模型计算,可以得出在不同轨下垫板刚度下轨道结构的受力变化,如表8所示。

表8 不同轨下垫板刚度下轨道结构的受力特性

Table 8 Mechanical characteristics under different pad stiffness

参数	不同道床厚度/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)				
	9×10^7	10×10^7	11×10^7	12×10^7	13×10^7
钢轨最大弯矩/(kN·m)	25.73	25.59	25.47	25.37	25.29
钢轨轨头压应力/MPa	74.44	74.04	73.71	73.42	73.167
钢轨轨底拉应力/MPa	63.18	62.84	62.56	62.31	62.10
钢轨最大垂向位移/mm	2.28	2.22	2.18	2.13	2.10
轨枕最大弯矩/(kN·m)	9.72	9.75	9.77	9.79	9.81
道床最大应力/kPa	190.44	190.79	191.12	191.42	191.69
道床位移/mm	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
路基面应力/kPa	71.51	71.63	71.84	71.98	72.11

轨下垫板刚度增大时,钢轨应力和钢轨位移相应减少,轨枕弯矩、道床应力和位移以及路基面应力相应增加,其中,当轨下垫板刚度从 9×10^7 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 增加到 13×10^7 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,钢轨应力减少1.7%,钢轨位移减少8.0%。对轨枕弯矩、道床应力影响不大。

轨下垫板刚度过低会增加轨道结构的变形,而过大则会增加道床应力和位移,我国重载铁路轨下胶垫

刚度普遍较小,这将加大轨道结构变形,因此,需对轨下胶垫的刚度进行合理的选择。

3 结论

结合朔黄铁路现场实测数据,采用有限元方法对重载铁路轨道结构进行仿真建模,计算分析不同轴重及不同轨道参数下的重载铁路轨道结构的受力特性,得到结论如下:

1) 重载铁路轨道结构的受力特性受列车轴重影响最大,从25 t增加到30 t时,钢轨位移与应力增加约20%。

2) 采用Ⅲ型混凝土轨枕有利于减小轨道结构受力,但会增加轨枕弯矩;增加轨枕铺设根数有利于减小轨道结构受力与变形,但会增加维修成本。

3) 道床弹性模量的增加对钢轨位移影响较大,从70 MPa增加到150 MPa时,钢轨位移减小12.6%;道床厚度对重载铁路轨道结构的受力特性影响较小。

参考文献:

- [1] 雷晓燕. 铁路轨道结构数值分析方法[M]. 北京:中国铁道出版社,1998:4-8.
- [2] 王其昌. 铁路线路大修工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1994:1-2.
- [3] 雷晓燕. 轨道动力学模型与数值方法研究进展[J]. 华东交通大学学报,2011,28(3):1-2.
- [4] 陈睿颖,许玉德,程建平. 重载铁路复合不平顺的仿真计算及安全限值研究[J]. 华东交通大学学报,2014,31(4):33-37.
- [5] 常卫华. 30吨轴重重载铁路轨道结构力学特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [6] 薛丽萍. 重载铁路轨道受力分析与养护方法探讨[J]. 太原科技,2007(3):58-59.
- [7] 郜永杰,翟婉明. 轨道结构强度有限元分析[J]. 交通运输工程学报,2004,4(2):36-39.
- [8] 雷晓燕,张斌,刘庆杰. 列车—轨道系统竖向动力分析的车辆轨道单元模型[J]. 振动与冲击,2010,29(3):168-173.
- [9] 张宏亮,谷爱军,马春艳. 提速线路参数对轨道结构振动动力响应分析[J]. 华东交通大学学报,2008,25(1):20-23.
- [10] 雷晓燕,圣小珍. 现代轨道理论研究[M]. 2版.北京:中国铁道出版社,2008:98-102.
- [11] 梁波,蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报,1999,21(2):84-88.

Simulation Analysis on Mechanical Characteristics of Heavy Haul Railway Track Structure

Ding Rong¹, Shen Jianfeng¹, Xiao Xin², Xu Yude¹

(1.Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2.Institute of Study and Research, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: With the development of heavy axle load, high volume and high density for heavy haul railways, there are higher demands on track structure. The mechanical characteristics of track structure under train loads are related to track dimensions and material parameters. Combined with field data of Shuohuang Railway, this study uses finite element analysis method to make modeling and simulation of heavy haul railway track structure. The mechanical characteristics (including moment, stress and displacement) of heavy haul railway track structure under different axle loads and different track parameters are calculated and analyzed. Results show that axle load has a huge influence on the displacement and stress of rail, the use of III -type sleeper and smaller sleeper spacing can help reduce the stress of track structure and elastic modulus has great impact on displacement of rails while ballast bed thickness has little impact on mechanical characteristics.

Key words: heavy haul railway; track structure; mechanical characteristics; finite element analysis

(责任编辑 王建华)