

文章编号: 2095-2163(2023)04-0104-07

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

# 基于 ABAQUS 的有轨电车不同厚度道床力学响应分析

黄崇伟, 朱美宣, 孙 瑜, 李巍道

(上海理工大学 交通运输工程系, 上海 200093)

**摘要:** 基于 ABAQUS 有限元分析软件, 建立了不同结构层厚度下有轨电车道床板三维有限元模型, 分析板中、板端荷载作用下整体道床板底水平拉应力、板顶弯沉、土基顶面压应力, 以及弯沉随不同道床板厚度、支撑板厚度的力学响应规律。研究表明: 在板中荷载作用下, 道床板表面呈“盆地状”下压, 其弯沉值随着道床板厚度的增大而减小, 板底水平拉应力随着道床板厚度的增大而减小, 土基顶面的压应力可达 14.020 kPa, 路基顶面弯沉约为 1.543 mm; 在板端荷载作用下, 受荷道床板拉应力随着道床板厚度的增加逐渐减小; 未受荷道床板的板顶弯沉和土基顶面压应力及弯沉等力学响应参数, 随着离接缝距离的增大而递减。因此, 20 cm 的道床板, 12 cm 的支撑层更有利于有轨电车的安全与质量保障。

**关键词:** 有轨电车; 整体道床; 有限元; 结构层厚度; 力学响应分析

## Mechanical analysis of monolithic track bed of the tram under different structural layer thickness based on ABAQUS

HAUNG Chongwei, ZHU Meixuan, SUN Yu, LI Weixiao

(Department of Transportation Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**[Abstract]** Based on finite element analysis software, the paper establishes the three-dimensional finite element model under different structural layer thickness. Its goal is to analyze the mechanical response laws of the horizontal tensile stress at the bottom of the monolithic track bed, the deflection at the top of the slab, the compressive stress and deflection at the top of the soil foundation with different thickness of the track bed slab and the thickness of the support slab under the load at the middle and end of the slab. Research shows that: The surface of the track bed slab is pressed down in a "basin shape", its deflection and horizontal tensile stress at the bottom of the plate decrease with the increase of thickness. The compressive stress on the top surface of the soil foundation can reach 14.020 kPa, and the deflection of the top surface of the subgrade is about 1.543 mm under the load of the slab. The tensile stress of the loaded bed plate decreases with the increase of the thickness. As the distance from the joint increases, the mechanical response parameters such as the top bending of the unloaded track bed plate and the compressive stress and bending of the top surface of the soil foundation decrease. Therefore, 20 cm track bed plate and 12 cm support layer are more conducive to the safety and quality assurance of the tram.

**[Key words]** tram; monolithic track bed; finite element model; structural layer thickness; mechanical analysis

## 0 引言

有轨电车作为城市公共交通系统的一部分, 其轨道结构大致可分为有线普通轨道结构、宽轨枕轨道结构、板式轨道结构与整体道床轨道结构<sup>[1-2]</sup>。目前, 在实际工程案例中, 已凭借出色性能表现获得了广泛认可。在其力学行为研究上, Xiao 等学者<sup>[3]</sup>探讨了砂石等材料参数对轨道结构力学特性的影

响。Cui 等学者<sup>[4-5]</sup>分析了路基差异沉降对板式轨道界面力学性能和损伤行为的影响。此后, 成伟<sup>[6]</sup>对荷载作用下嵌入式轨道挠曲变形规律展开了研究。周亚明<sup>[7]</sup>、何雨<sup>[8]</sup>对荷载扩散至路基顶面纵向的分布规律进行研究, 发现有轨电车路基面的荷载沿纵向分布长度为 7.231~9.410 m。王浩然<sup>[9]</sup>、张明<sup>[10]</sup>也通过建立有限元模型, 得出了荷载作用下有轨电铁路基的力学响应规律。胥燕军等学者<sup>[11]</sup>基

**基金项目:** 上海市青年科技英才扬帆计划资助项目(20YF1431900)。

**作者简介:** 黄崇伟(1983-), 男, 副教授, 主要研究方向: 道路与机场工程; 朱美宣(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 道路与机场工程; 孙 瑜(1989-), 女, 讲师, 主要研究方向: 道路工程材料; 李巍道(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 道路与机场工程。

**通讯作者:** 孙 瑜 Email: ysun@usst.edu.cn

**收稿日期:** 2022-05-07

于有限元分析,探讨了道床板的模量对结构受力的影响。秦晓光<sup>[12]</sup>利用支承层弹性模量对整体道床进行力学分析,得到了应力分布规律。李骏鹏<sup>[13]</sup>主要得到了不同材料弹性模量下的受力与变形规律。

综上,诸多学者已经对荷载、材料模量上展开了有轨电车的广泛研究,但缺少不同荷载、不同结构层厚度对整体路基的力学响应分析。本文通过建立有限元模型,调整不同的结构层厚度、支撑层厚度,对板中荷载、板端荷载作用下的道床板底水平拉应力、板顶弯沉、土基顶面压应力及弯沉进行了分析与讨论。研究结果可为整体路基设计提供技术参考。

## 1 有限元模型

### 1.1 结构层力学模型

板式轨道力学计算模型如图1所示。

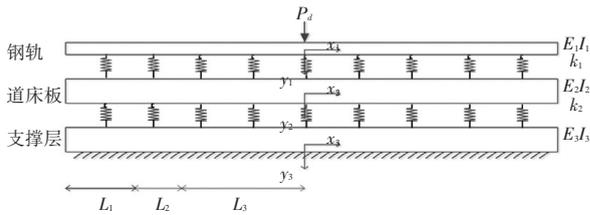


图1 轨道纵向三重叠合梁模型

Fig. 1 The longitudinal three-layer composite beam model of the track

通过建立的坐标系,由静力平衡条件可得以下方程组为:

$$\begin{cases} E_1 I_1 y_{11}^{(4)} + k_1 (y_{11} - y_{21}) = 0 \\ E_1 I_1 y_{12}^{(4)} + k_1 (y_{12} - y_{22}) = 0 \\ E_1 I_1 y_{13}^{(4)} + k_1 (y_{13} - y_{23}) = 0 \\ E_2 I_2 y_{21}^{(4)} + k_2 (y_{21} - y_{31}) - k_1 (y_{11} - y_{21}) = 0 \\ E_2 I_2 y_{22}^{(4)} + k_2 (y_{22} - y_{32}) - k_1 (y_{12} - y_{22}) = 0 \\ E_2 I_2 y_{23}^{(4)} + k_2 (y_{23} - y_{33}) - k_1 (y_{13} - y_{23}) = 0 \\ E_3 I_3 y_{31}^{(4)} + k_3 y_{31} - k_2 (y_{21} - y_{31}) = 0 \\ E_3 I_3 y_{32}^{(4)} + k_3 y_{32} - k_2 (y_{22} - y_{32}) = 0 \\ E_3 I_3 y_{33}^{(4)} + k_3 y_{33} - k_2 (y_{23} - y_{33}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $E_1 I_1$ 、 $E_2 I_2$ 、 $E_3 I_3$  分别表示钢轨、整体道床板、支撑层的纵向抗弯刚度,单位为  $N/m$ ;  $y_{11}$ 、 $y_{12}$ 、 $y_{13}$  分别表示  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  区段内钢轨的挠度,单位是  $mm$ ;  $y_{21}$ 、 $y_{22}$ 、 $y_{23}$  分别表示  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  区段内整体道床板的挠度,单位是  $mm$ ;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  分别表示钢轨、整体道床板、支撑层的单位长度支承弹性系数,单位是  $Pa$ 。

齐春雨<sup>[14]</sup>通过数学分析求得  $\mu_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )、 $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, 12$ ),一元三次代数方程以  $\mu$  为未

知量,其一般解为:

$$\begin{cases} y_{11} = A_j e^{\lambda_j x}, y_{12} = B_j e^{\lambda_j x}, y_{13} = C_j e^{\lambda_j x} \\ y_{21} = D_j e^{\lambda_j x}, y_{22} = E_j e^{\lambda_j x}, y_{23} = F_j e^{\lambda_j x} \\ y_{31} = G_j e^{\lambda_j x}, y_{32} = H_j e^{\lambda_j x}, y_{33} = I_j e^{\lambda_j x} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $A_1 \sim A_{12}$ 、 $B_1 \sim B_{12}$ 、 $C_1 \sim C_{12}$ 、 $\dots$ 、 $I_1 \sim I_{12}$  为待定常数,是由结构受力边界条件决定的。最大钢轨压力、纵向最大板底应力、纵向最大底座下应力可分别由式(3)~式(5)来进行描述:

$$R_{\max} = \int_{-a/2}^{a/2} k_1 (y_{11} - y_{21}) dx \quad (3)$$

$$\sigma_{2\max} = \frac{k_2 y_{21}(0)}{B_2} \quad (4)$$

$$\sigma_{3\max} = \frac{k_3 y_{31}(0)}{B_3} \quad (5)$$

其中,  $a$  表示扣件间距;  $B_2$  表示轨道板(或道床板)半宽;  $B_3$  表示支承层(或底座)半宽。

### 1.2 荷载与材料模型

#### 1.2.1 车辆计算模型

由于车体、转向架框架与轮对等基本部件之间存在相对运动与弹性、刚性约束,因此,车辆计算模型被认为是具有多个自由度的多刚体系统。具体可分为:车轮、多轮、转向架和整车模型四种,如图2所示。表1为其他3种模型与整车模型计算结果中轮轨力与道床加速度的对比。

由表1分析可知,转向架模型动力响应值比整车模型静力响应值要小,轮轨作用力相差0.282%,比单轮对模型静力响应值要大,相差15.738%,因此,本文采用转向架模型作为计算基础。

表1 车辆模型计算结果

Tab. 1 Vehicle model calculation results

比较指标	整车模型		转向架模型	单轮对模型	
	数值	偏差	数值	数值	偏差
道床板拉应力/ MPa	1.062	0.282	1.059	0.915	15.738
道床板位移/ mm	2.116	0.142	2.113	0.858	146.270

#### 1.2.2 轨道结构材料模型

有轨电车轨道结构是由水泥混凝土、钢筋、无机结合料稳定类材料、级配碎石等多种材料构成的多层的结构体系。由于道床板与板下各结构层材料处于线弹性工作状态。因此,本文选用的弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$ ,见表2。

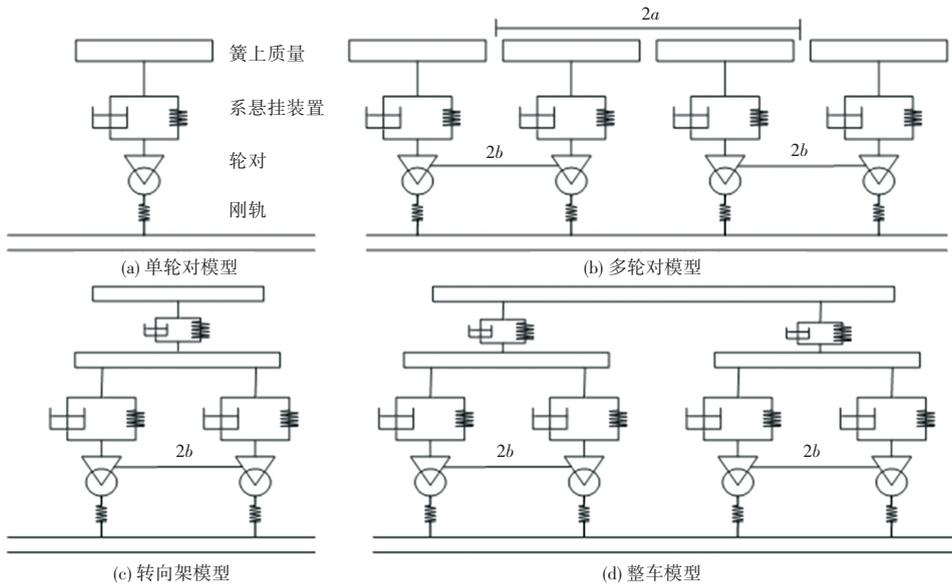


图2 车辆模型

Fig. 2 The model of the vehicle

表2 材料参数

Tab. 2 Material parameters

结构层	材料类型	层厚/m	弹性模量/MPa	泊松比
整体道床板	钢筋混凝土	0.25	$3.5 \times 10^4$	0.15
钢筋	钢筋	$\Phi = 0.1$	$2.05 \times 10^5$	0.15
支承层	素混凝土	0.10	$1.5 \times 10^4$	0.20
碎石层	级配碎石	0.40	1 500	0.30
石灰土	石灰拌合土	0.60	120	0.35
土基	粘性土	7.00	30	0.40

### 1.3 层间接触条件

在 AASHTO 设计指南中,根据基础层的不同材料,推荐的混凝土和基础层之间的摩擦系数见表 3。

表3 板下材料与摩擦系数

Tab. 3 Material and friction coefficient under the plate

材料	系数	材料	系数
表面处治	2.2	砾石和碎石	1.5
石灰、水泥稳定	1.8	砂岩	1.2
沥青稳定	1.8	天然路基	0.9

利用 ABAQUS 有限元软件进行分析发现,当道床板与支承层之间的摩擦系数在 0~2 范围内变化时,对路基路面荷载响应量的影响很小。因此,在本文研究中,将这一参数取为 1.5。

## 2 试验方案与结果

### 2.1 试验方案

基于 ABAQUS 软件,选取不同的道床板、支撑层厚度建立三维有限元分析模型,研究其对强度、挠度的影响。板中分析区域为单个转向架所对应的整体道床板板底的局部范围,板端分析区域也是接缝两侧 800~600 mm 的局部范围。分析中,调整某一结构层厚度,其他参数不变,计算各项力学指标,具体试验方案汇总见表 4。

表4 试验参数设计表

Tab. 4 Design table of experimental parameters

	整体道床板中部	整体道床板端部
道床板 厚度/cm	20、22、24、26、28	
支撑层 厚度/cm	12、14、16、18、20	
计算指标	板底拉应力、板顶弯沉、土基顶面压应力、土基顶面弯沉	

### 2.2 试验结果

整体道床板板底、路基顶面的力学行为极值特征点随不同的道床板厚度、支撑层厚度变化的统计结果见表 5。

表 5 整体道床板力学响应统计结果

Tab. 5 Statistical results of mechanical response of the overall track bed slab

		力学行为极值特征点				
		厚度/cm	板底拉应力/ MPa	板顶弯沉/ mm	路基顶面压应力/ kPa	路基顶面弯沉/ mm
板中荷载	道床板	20	1.128	1.584	13.606	1.525
		22	1.072	1.546	13.156	1.490
		24	1.020	1.506	12.696	1.453
		26	1.151	1.436	11.898	1.386
		28	1.089	1.392	11.419	1.345
	支撑层	12	1.008	1.493	12.545	1.440
		14	1.002	1.489	12.493	1.436
		16	0.985	1.483	12.431	1.431
		18	0.972	1.477	12.355	1.425
		20	0.953	1.469	12.266	1.418
板端荷载	道床板	20	1.103	1.595	13.662	1.538
		22	1.042	1.560	13.236	1.505
		24	0.985	1.523	12.798	1.471
		26	1.098	1.457	12.038	1.409
		28	1.031	1.416	11.581	1.370
	支撑层	12	0.970	1.511	12.672	1.460
		14	0.965	1.506	12.610	1.455
		16	0.949	1.502	12.548	1.451
		18	0.936	1.495	12.460	1.444
		20	0.918	1.487	12.364	1.436

### 3 道床力学行为分析

#### 3.1 板中荷载作用下的影响

##### 3.1.1 道床板厚度

在板端荷载作用下道床板的力学响应规律如图 3 所示。

道床板板底拉应力在转向架轮迹底部有明显的应力集中现象,道床板厚度为 20 cm 时,钢轮底部对应位置达到最大值、即 1.128 MPa,且随着道床板厚度的增加略有减小;当厚度为 28 cm 时,道床板板底拉应力为 1.089 MPa,可见道床板在轴向方向更偏于梁体结构。另一方面,厚度为 20 cm 时,道床板弯沉在转向架轴向中心达到最大值 1.584 mm,在偏离转向架 1.4 m 处达到最小值 1.322 mm;当厚度为 28 cm 时,道床板弯沉在转向架轴向中心达到最大值 1.392 mm,在偏离转向架 1.4 m 处达到最小值 1.200 mm。在道床板轴向,相同道床板厚度条件下土基顶面应力盆“上凸”,弯沉盆“下凹”,且在转向架之外道床板轴向力

学响应急剧减小。当道床板厚度从 20 cm 增加到 28 cm 时,土基顶面压应力及土基弯沉减小值达 20%~30%。

##### 3.1.2 支撑层厚度

在板中荷载作用下,道床板的力学响应变化规律分别如图 4 所示。

道床板板底拉应力在转向架轮迹底部有明显的应力集中现象,当支撑层厚度为 12 cm 时,钢轮底部对应位置达到最大值、即 1.008 MPa,且随着厚度的增加略有减小;当厚度为 20 cm 时,板底水平拉应力为 0.953 MPa,可见道床板轴向方向的拉应力起着主要控制作用。另一方面,当支撑层厚度为 12 cm 时,道床板弯沉在转向架轴向中心达到最大值 1.493 mm,在偏离转向架 1.4 m 处达到最小值 1.265 mm;当厚度为 20 cm 时,道床板弯沉在转向架轴向中心达到最大值 1.469 mm,在偏离转向架 1.4 m 处达到最小值 1.250 mm。在道床板轴向,相同支撑层厚度条件下土基顶面应力盆“上凸”,弯沉

盆“下凹”,且在转向架之外道床板轴向力学响应急剧减小。当支承层厚度从 12 cm 增加到 20 cm 时,

土基顶面压应力及土基弯沉减小值较小,减小幅度在 3% 以内。

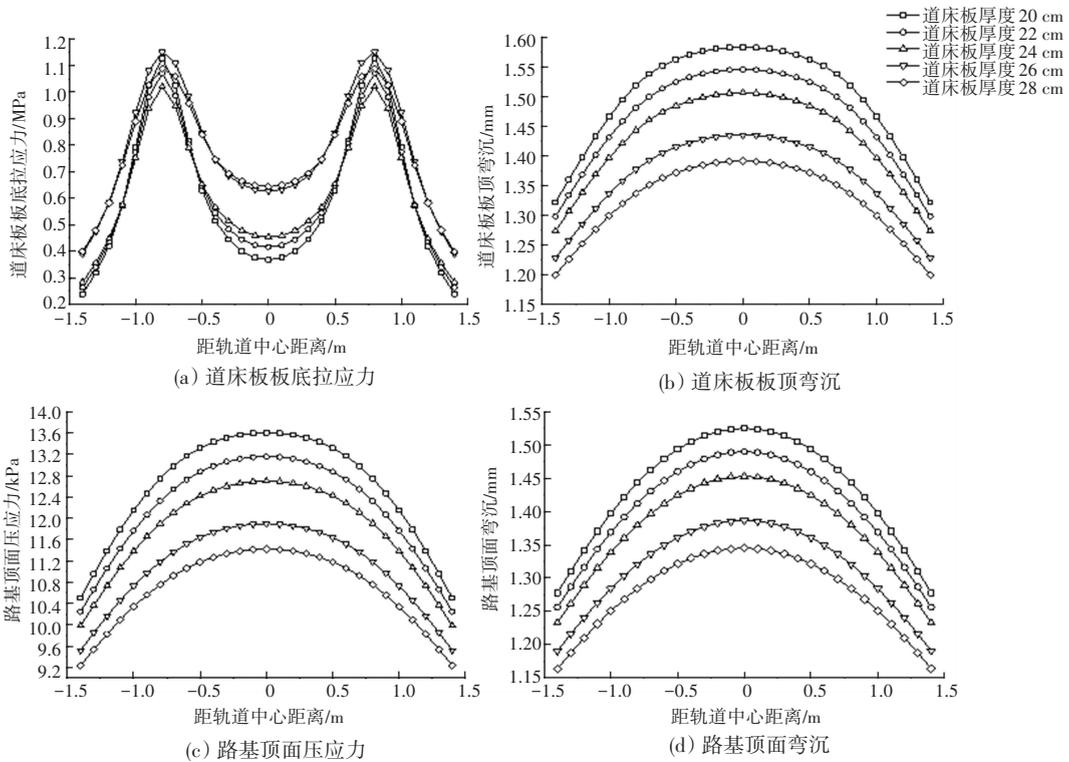


图 3 板中不同道床板厚度的力学规律

Fig. 3 Mechanical law of different track bed slab thicknesses in the slab

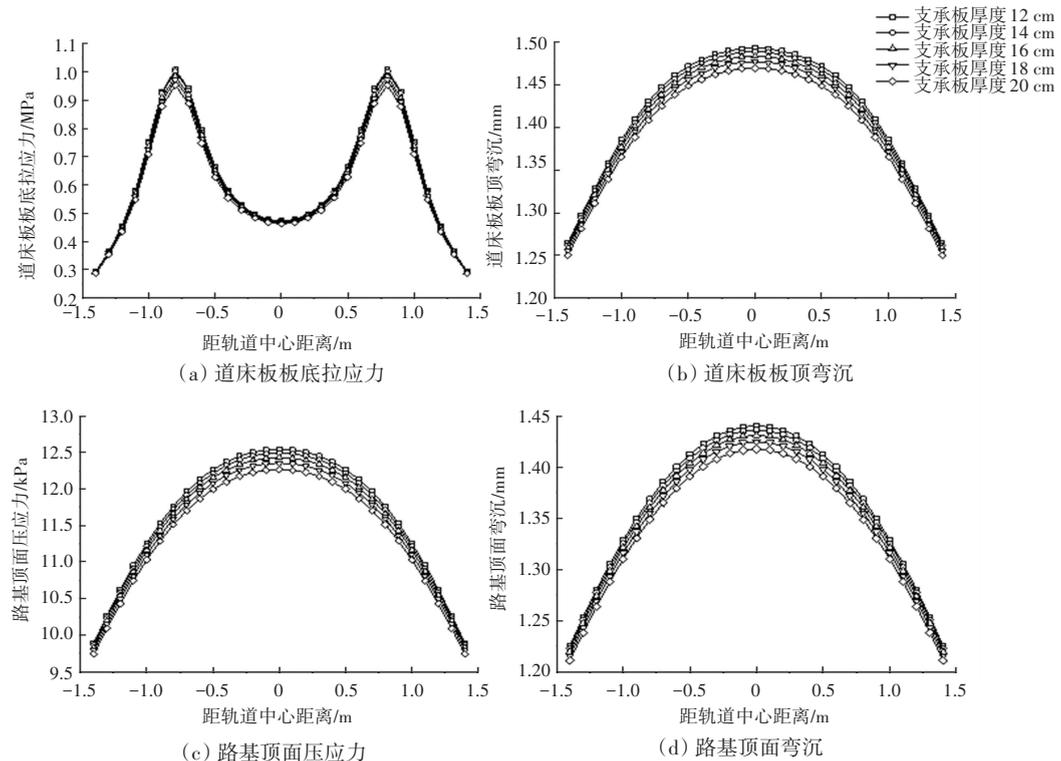


图 4 板中不同支撑层厚度的力学规律

Fig. 4 Mechanical laws of different support layer thicknesses in the slab

### 3.2 板端荷载作用下的影响

#### 3.2.1 道床板厚度

在板端荷载作用下, 整体道床板的力学响应变化规律如图 5 所示。

道床板纵向拉应力在受荷板和未受荷板在接缝处存在应力突变现象, 当道床板厚度在 20~28 cm 时, 未受荷板板拉应力仅为受荷板的 76.17%~90.03%, 且随厚度的增加逐渐减小; 受荷板最大水平拉应力并不是出现在板边缘的接缝位置, 而是在钢轮作用点处, 未受荷板的最大水平拉应力在板边缘接缝处。在未受荷道床板的纵向, 板顶弯沉、土基

顶面压应力及弯沉等力学响应参数, 随着离接缝距离的增大近似呈线性递减, 厚度越小, 弯沉递减速率越大, 最大弯沉均出现在接缝边缘; 在受荷板上, 板顶弯沉、土基顶面压应力及弯沉等力学响应参数的最大值均出现在前后两轮中心位置。在受荷道床板的纵向, 板底最大水平拉应力出现在远离接缝的钢轮下方, 且随着道床板厚度的减小而逐渐减小。当厚度为 28 cm 时, 后轮轮底道床板最大水平拉应力为 1.103 MPa, 前轮轮底道床板最大水平拉应力为 0.918 MPa, 前后轮最大水平拉应力之比为 1.202。

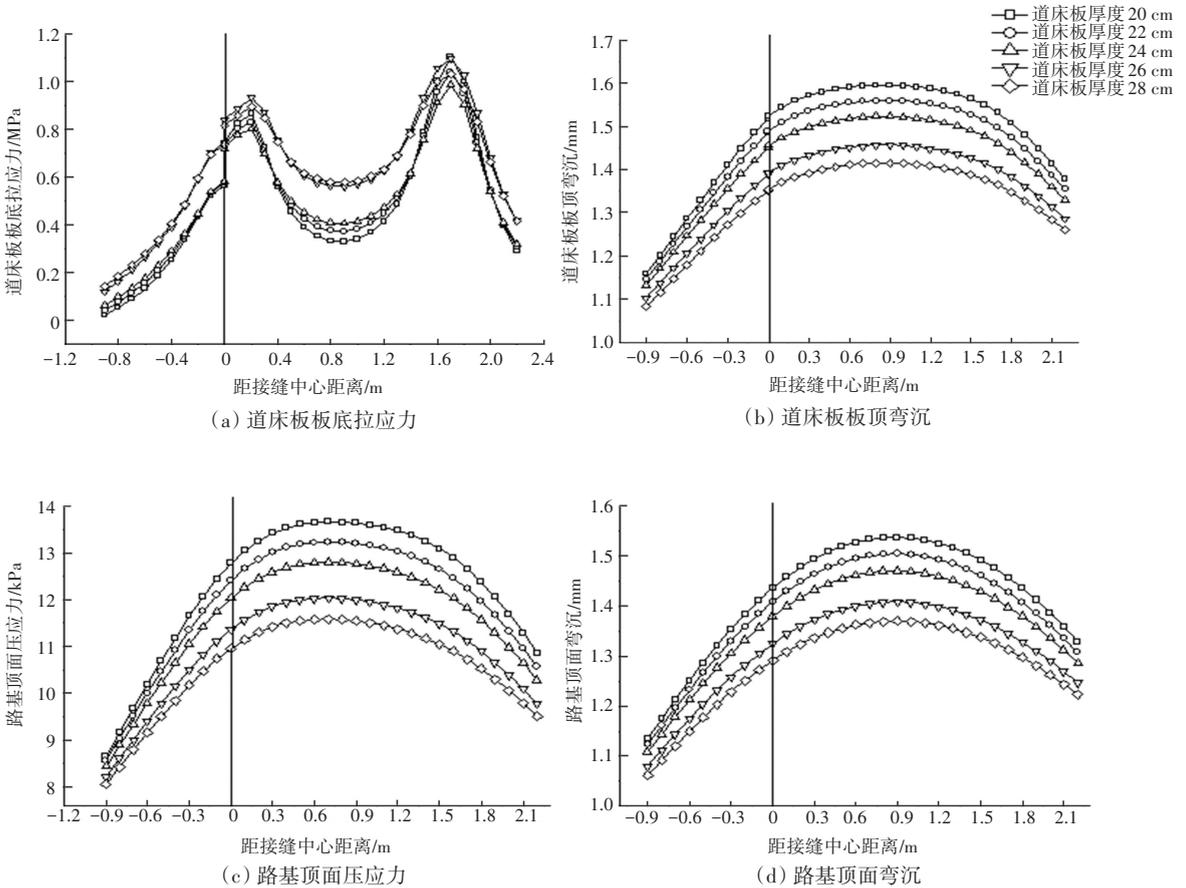


图 5 板端不同道床板厚度的力学规律

Fig. 5 Mechanical law of different track bed slab thickness at the slab end

#### 3.2.2 支撑层厚度

在板端荷载作用下, 整体道床板的力学响应变化规律如图 6 所示。

道床板纵向拉应力在受荷板与未受荷板的接缝处存在应力突变现象, 当支撑层厚度在 12~20 cm 时, 未受荷板板底拉应力仅为受荷板的 80% 左右, 其变化幅度较小; 受荷板最大水平拉应力并不是出现在板边缘的接缝位置, 而是在钢轮作用点处, 未受

荷板的最大水平拉应力出现在板边缘接缝处。在未受荷载道床板的纵向, 板顶弯沉、土基顶面压应力及弯沉等力学响应参数, 随着离接缝距离的增大近似呈线性递减, 道床板厚度越小, 弯沉递减速率越大, 最大弯沉均出现在接缝边缘; 在受荷板上, 板顶弯沉、土基顶面压应力及弯沉等力学响应参数的最大值均出现在前后两轮中心位置; 板底最大水平拉应力出现在远离接缝的钢轮下方。

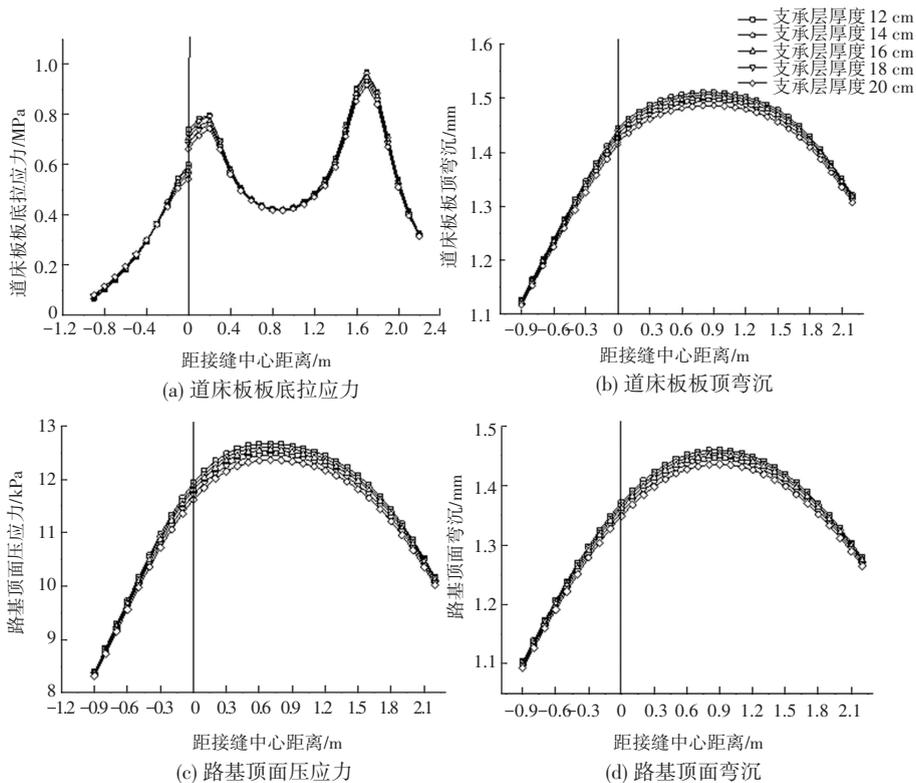


图6 板端不同支撑层厚度的力学规律

Fig. 6 Mechanical laws of different support layer thicknesses at the plate end

## 4 结束语

通过建立有限元分析模型,模拟板中、板端荷载作用下,道床板厚度、支撑层厚度对整体道床纵向力学行为的影响。在板中荷载作用下,道床板表面呈“盆地状”下压,其弯沉值随着道床板厚度的增大而减小,板底水平拉应力随着道床板厚度的增大而减小,土基顶面的压应力可达 14.020 kPa,路基顶面弯沉约为 1.543 mm;在板端荷载作用下,道床板纵向拉应力在受荷板和未受荷板的接缝处存在应力突变现象,当道床板厚度在 20~28 cm 时,未受荷板板底拉应力仅为受荷板的 76.17%~90.03%,且随着道床板厚度的增加逐渐减小;在未受荷道床板的纵向,板顶弯沉和土基顶面压应力及弯沉等力学响应参数,随着与接缝距离的增大呈线性递减。

因此,无论板中、还是板端荷载作用下,选取 20 cm 的道床板与 12 cm 的支撑层厚度,都能更好地降低建设难度、成本、经济,保障使用寿命与安全,对实际工程具有指导意义。

## 参考文献

[1] DIEMER M J, CURRIE G, De GRUYTER C, et al. A streetcar to be desired? The development of a new approach to measure perception of place quality in the context of tram network modernisation[J]. Journal

of Transport Geography, 2021, 94: 103109.  
 [2] WANG Hongbo, ZUO Jianyong. Study on key construction technology for sleeperless concrete monolithic track Bed of modern tram and asphalt pavement [J]. Subgrade Engineering, 2015(05): 153-159.  
 [3] XIAO Hong, ZHANG Zhihai, CUI Xuhao, et al. Experimental study and discrete element analysis of ballast bed with various sand content [J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121869.  
 [4] CUI Xuhao, LING Xing. Effects of differential subgrade settlement on damage distribution and mechanical properties of CRTS II slab track[J]. Construction and Building Materials, 2021, 271(1): 121821.  
 [5] CUI X H, XIAO H J. Interface mechanical properties and damage behavior of CRTS II slab track considering differential subgrade settlement[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021(2): 2036-2045.  
 [6] 成伟. 嵌入式轨道纵向变形及振动特性分析[D]. 南昌:华东交通大学, 2019.  
 [7] 周亚明. 有轨电车嵌入式轨道线下基础受荷特征及换填强化技术研究[D]. 成都:西华大学, 2019.  
 [8] 何雨. 有轨电车路基荷载特征与结构设计[D]. 成都:西南交通大学, 2016.  
 [9] 王浩然. 有轨电车荷载作用下路基应力响应分析[J]. 结构工程师, 2018, 34(01): 64-68.  
 [10] 张明. 有轨电车路基段纵向轨枕轨道结构受力特性及优化研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.  
 [11] 胥燕军, 林红松, 王健, 等. 现代有轨电车轨道结构关键参数研究[J]. 铁道建筑, 2014(11): 174-177.  
 [12] 秦晓光. 现代有轨电车支撑层弹性模量取值分析[J]. 中国市政工程, 2014(04): 72-74, 111.  
 [13] 李骏鹏. 现代有轨电车列车—嵌入式轨道动力学性能分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2019.  
 [14] 齐春雨. 土质路基板式轨道结构强度计算研究[J]. 铁道标准设计, 2006(02): 26-28.