文章编号:1005-0523(2023)01-0118-10

# 有轨电车平交路口过渡段路面病害机理与对策

高铂舜[1],肖 鑫[1],姚 青[2],江礼高[2]

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804; 2. 上海城建市政工程(集团)有限公司,上海 200065)

**摘要**:现代有轨电车平交路口段市政路面承受社会车辆和有轨电车两种荷载作用,在道路与钢轨过渡段路面区域受力特征复杂,病害频发,成为市政道路上的薄弱部位。为探究平交路口过渡段路面的病害机理,在现场病害调研的基础上,对病害类型进行了统计与分类,同时建立了路-轨过渡区三维有限元模型,考虑社会汽车和有轨电车双重荷载,分析了轨侧路面结构的力学响应。现场调研结果表明,过渡区病害主要分布在轨侧 30 cm 范围,轨道附近路面沉降值大多分布在 0~10 mm 范围,裂缝和轨道周边材料剥落是主要的病害类型。力学分析结果表明,路面结构的承载力和强度不足、路面结构变形不协调、路面沉降下车辆荷载的冲击作用,是造成路-轨过渡区发生破坏的重要内在机理。针对病害产生机理,提出在路面结构下方铺设高模量混凝土以及在道路与轨道之间增设过渡区材料的处治对策。

**关键词**:有轨电车;平交路口;力学机理;有限元分析

**中图分类号**:U418 **文献标志码**:A

**本文引用格式**:高铂舜,肖鑫,姚青,等. 有轨电车平交路口过渡段路面病害机理与对策[J]. 华东交通大学学报,2023,40(1):117-126.

# Mechanism and Countermeasure of Pavement Distresses Occurring at Tramway Grade Crossings

Gao Boshun[1], Xiao Xin[1], Yao Qing[2], Jiang Ligao[2]

(1.Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200065, China)

**Abstract**: The road surface at tram grade crossings has borne combined loads of passing vehicles and trams. The load conditions and distresses of this area are complicated and varied, which becomes relatively weak spots on municipal roads. In order to clarify the distress mechanism of this transition pavement at grade crossings, on the basis of field investigation, the statistics and classification of the distresses were carried out, and a 3D finite element model was established to analyze the mechanical response of the road-rail pavement structure, in which combined vehicle and tram loads were conducted. The field investigation results show that the distresses in this transition area are mainly distributed within 30 cm of the track side, and the settlement of pavement near the track is mostly distributed within 0~10 mm. The numerical results show that the poor bearing capacity and strength and the disharmony deformation of pavement structure are the main reasons for the failure of the road-rail transition pavement. Focusing on the mechanism of the distress, the countermeasures of laying high modulus concrete under the pavement structure and adding transitional pavement materials between the road and the track are put forward.

**收稿日期**:2022-04-21
**基金项目**:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51861145402)

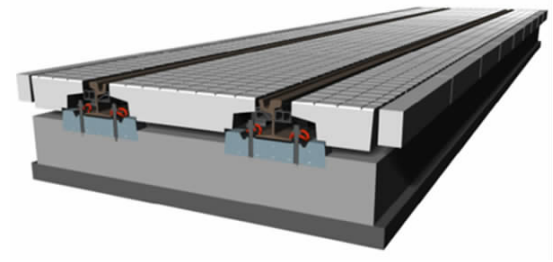
**Key words**: tram; grade crossings; road-track transition; Finite Element Analysis
**Citation format**: GAO B S, XIAO X, YAO Q, et al. Mechanism and countermeasure of pavement distresses occurring at tramway grade crossings[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(1): 117-126.

由于有轨电车和市政道路通常共享路权，因而在平交路口段，有轨电车轨道不可避免地与城市道路衔接，成为市政道路上的薄弱部位[1]。在车辆荷载反复作用下，在道路与钢轨过渡段的路面区域(简称路-轨过渡区)，由于模量差异、振动荷载、水分侵入等原因，极易产生开裂、沉陷、脱落等早期病害。此外，由于路-轨过渡段结构和位置的特殊性，导致其承受反复荷载，且养护困难，因而耐久性差，病害频发(图1(a))。同时，由于市政道路路基和有轨电车路基对沉降控制的要求不同，路-轨过渡段两侧经常发生不均匀沉降[2]，导致错台等病害，车辆通过时将产生较大的冲击荷载，加速路面结构的破坏，形成恶性循环。

图1(b)表示了路-轨过渡区的三维结构图，在路-轨过渡区存在几种不同形式的荷载，在结构上又存在模量和高差方面的差异。特别是在共有路权的平交路口位置，为了使钢轨顶面与路面尽量平齐，在曲线地段易导致外轨超高设置不合理[3]。黄大维等[4]认为轨道两侧沥青混凝土路面反复开裂、脱落的重要原因是，由于轨道两侧的弹性橡胶材料不能给轨道两侧沥青混凝土路面提供牢固、稳定的约束边界，沥青混凝路面受温度、振动、雨水和潮湿影响而产生开裂、脱落的可能性大大增加。由于平交路口等共有路权段钢轨与道路结合处受力情况过于复杂，其病害原因尚无统一定论。



(a) Serious damage of tram track



(b) Tram track 3D model

**图1 有轨电车嵌入式轨道示意图**
**Fig.1 Diagram of embedded tram track**

为了阐明有轨电车路-轨过渡段路面的破坏机理，提高路面结构耐久性，国内外学者主要从力学计算、数值模拟、材料设计3个方面进行研究。有学者[5-6]采用力学解析表达式，计算了在车辆、振动等荷载影响下，有轨电车轨道周边包括轨腰护垫、轨侧填充材料、空腔率等结构参数的取值范围。一些学者[7-9]采用车辆—轨道动力学耦合模型，通过有限元建模方法，得到了有轨电车嵌入式轨道的动力学响应，包括轮轨力、振动幅值、轨道损伤等参数。还有一些学者[10-11]从材料设计的角度入手，发明了钢纤维混凝土、聚氨酯复合材料等以提高轨道周边路面耐久性，延缓病害的发展。虽然这些研究取得了成果，但仍有一些问题亟待解决，如：缺乏较多的现场调研数据以反映轨道周边的实际病害特征；关于“路-轨过渡区”范围还没有明确的几何定义；轨道周边发生病害的力学机理仍需进一步研究。因此，本文在有轨电车轨道周边路面现场调研的基础上，对病害类型进行了总结和分类，结合平交路口段的结构和荷载特征，建立了路-轨过渡区三维有限元模型，研究车辆荷载作用下过渡区的力学响应，以揭示破坏发生的力学机理。

## 1 道路与钢轨过渡区常见病害调研

为了研究有轨电车钢轨周边的病害特征，首先必须明确“路-轨过渡区”的定义，即车辆荷载影响下有轨电车钢轨周边易损路面的宽度范围。为此，重点选取了松江有轨电车2号线4个平交路口作为调研对象，分别为松卫北路—荣乐东路口、谷阳北路—荣乐中路口、沪松北路—广富林路口和嘉松南路—广富林路口，调研内容包括病害范围、病害

类型、路面沉降情况 3 个方面。

### 1.1　病害范围调研

为了探究车辆荷载对路–轨过渡区造成破坏的范围，选取松—荣、谷—荣、沪—广、嘉—广 4 个路口作为调研对象，分别测量 20、20、20、40 处过渡区病害的面积范围。由于不同病害类型的形状和大小是不同的，为了统一表征过渡区病害范围参数，采用等效病害宽度 $d$ 定义过渡区病害沿路幅方向的宽度。首先测量病害的面积 $S$，将其等效为矩形后，用病害面积 $S$ 除以病害沿轨道方向的长度 $l$，即可计算等效病害宽度。

由表 1 可知，对于病害宽度分布区间，松—荣路口 90%分布于 0~20 cm，谷—荣路口 90%分布于 0~25 cm，沪—广路口 100%分布于 0~25 cm，嘉—广路口 95%分布于 0~25 cm。经调研，嘉—广路口路面使用年限长，松—荣路口路面使用年限最短，在新建路面过渡区病害的宽度范围主要集中于 0~25 cm；随着路面使用年限的增加，刚轨周边病害逐渐外延，过渡区病害宽度可达 30 cm 及以上。认为钢轨周边路面受车辆荷载影响的最大宽度值为 30 cm，定义为道路与钢轨过渡区铺面。

### 1.2　病害类型调研

为统计过渡区病害类型，以 1 m 为间隔取样，通过病害外观状况（图 3），将病害类型分为 4 类，分别为裂缝类、沉降类、剥落类和相对完好。过渡区路面病害造成的最直接影响是使车辆产生动荷载（颠簸），路面不平整是路面性能劣化的最直接反映。因此，为了区分不同类型病害的严重程度，采用路面平整度进行定义，用三米直尺法测量过渡区路面的平整度，测量时，取轨侧左右各 0.5 m 范围作为测量区域，每隔 10 cm 用塞尺测量高程差。按照《公路工程质量检验评定标准》，对路面平整度的评价主要包括 3 个指标：平整度标准差 $\sigma$、国际平整度指数（按式 $\sigma$=0.6IRI 进行计算）、最大间隙值 $\Delta h$，平整度测试结果见表 2。将平整度测试结果按照从小到大排列，参考标准中的要求，结合轨侧路面的实测结果，以三米直尺测得的最大间隙值 $\Delta h$ 的范围为参考，$\Delta h$<10 mm 时视为“相对完好”，并将病害严重程度分为 3 类：轻微（10 mm<$\Delta h$<20 mm）、中等（20 mm<$\Delta h$<30 mm）和严重（$\Delta h$>30 mm）。

**表 1　轨道周边路面病害范围调研结果**

**Tab.1　Survey results of pavement damage width range around tracks**

| $d$/cm | Quantity | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Song—Rong crossing | Gu—Rong crossing | Hu—Guang crossing | Jia—Guang crossing |
| 0~5 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 5~10 | 7 | 2 | 8 | 5 |
| 10~15 | 6 | 5 | 3 | 8 |
| 15~20 | 3 | 6 | 5 | 11 |
| 20~25 | 2 | 3 | 1 | 6 |
| 25~30 | 0 | 2 | 0 | 5 |
| >30 | 0 | 0 | 0 | 2 |

**表 2　轨道周边路面平整度指标测试结果**

**Tab.2　Test results of roughness indicators around tracks**

| Nnmber | $\sigma$/mm | IRI/(m/km) | $\Delta h$/mm | Range of $\Delta h$/mm | Distress severity |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.5 | 0.76 | 3.2 | 0~10 | Relatively intact |
| 2 | 0.8 | 1.30 | 4.6 | | |
| 3 | 1.1 | 1.83 | 6.0 | | |
| 4 | 1.8 | 3.04 | 9.2 | 10~20 | Slight |
| 5 | 2.1 | 3.50 | 10.4 | | |
| 6 | 2.2 | 3.73 | 11.0 | | |
| 7 | 3.6 | 6.00 | 17.0 | 20~30 | Moderate |
| 8 | 4.9 | 8.13 | 22.6 | | |
| 9 | 5.4 | 9.05 | 25.0 | | |
| 10 | 5.5 | 9.12 | 25.2 | >30 | Serious |
| 11 | 6.7 | 11.1 | 30.4 | | |
| 12 | 7.7 | 12.8 | 35.0 | | |

过渡区病害类型和病害严重程度的统计结果如图 2 所示。在现场勘测中发现，在全部调研路段中，有 57%的过渡区路面一些路段轨道周边路面出现了不同程度的病害，但不足以造成结构上的破坏和失稳。由图 2 可知，钢轨周边路面裂缝、钢轨周边集料松散和剥落是主要的病害类型，分别占取样段总数的 19%和 21%，其破坏程度较为轻微；较少一部分路面出现了路面明显沉降，但其破坏程度往往较为严重，沉降类病害的路面平整度指标往往偏大，路面平整度差。因此，轨周路面沉降对路面平整

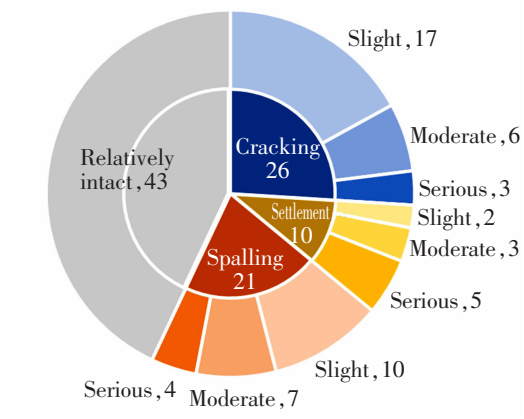



图2 过渡区病害类型分布图

**Fig.2 Distribution map of distress types in transition pavement**

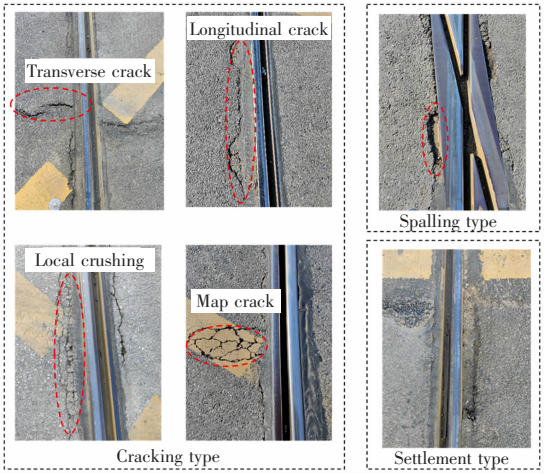



图3 路–轨过渡段病害外观图

**Fig.3 Diagram of damage appearance in road–track transition pavement**

性和行车平稳性具有较大的不利影响。

### 1.3 沉降情况调研

钢轨周边路面的不均匀沉降是造成车辆冲击和振动荷载,引起路面破坏的重要原因。为调研实际路面的沉降情况，选取4个路口各50个取样点作为调研对象,统计其路面较钢轨的沉降值,如图4所示。由图4可知,大多数发生沉降的路面沉降值分布于0~10 mm范围内，而大于10 mm的沉降值相对较少。沪—广、嘉—广两路口的路面沉降值较大,而松—荣、谷—荣两路口沉降值较小。经调研发现,虽然荣乐路的运营年限较广富林路更长,但是其路口沉降量反而较小,其主要是因为较多路面错台等病害已被处治(荣乐路经多次养护)。

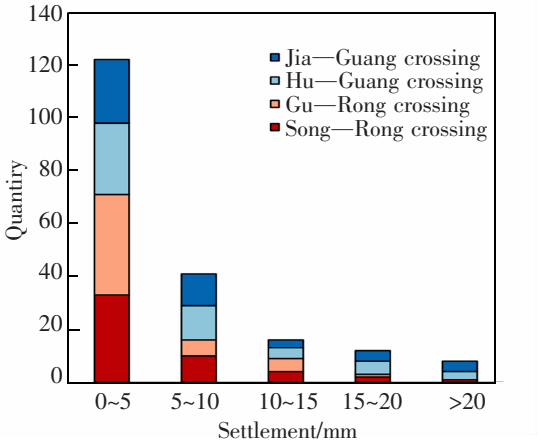



图4 过渡区路面沉降量分布情况

**Fig.4 Distribution of settlement in transition pavement**

## 2 钢轨与道路过渡区结构和荷载特征

如图5所示,在结构特征方面,现代有轨电车多采用嵌入式无砟轨道结构,这种轨道结构最大的优势是可以与其他路面交通工具共享路权,有利于社会车辆顺利通过。但是其轨道断面形式、轨道固定方式等都与常规的轨道交通有所区别,且常采用的槽型轨与路面往往不平齐，在轨道结构强度、耐久性、易维修性等方面都提出了更高的要求[3]。不同于常规市政路面,有轨电车钢轨与道路过渡区的结构特征可以概况为以下几方面。

1）模量变化:在过渡区范围内,路面结构物存在一个由刚性钢轨（210 000 MPa）到柔性路面(800~1 600 MPa)的模量突变。

2）高差变化：由于槽型轨轨头略高于路面,车辆通过时存在高差不一致而产生冲击。

3）钢轨与路面存在接缝:由于粘结性能不足以及施工面不平整等原因,钢轨与路面结构易存在接缝而发生水损害和破坏。

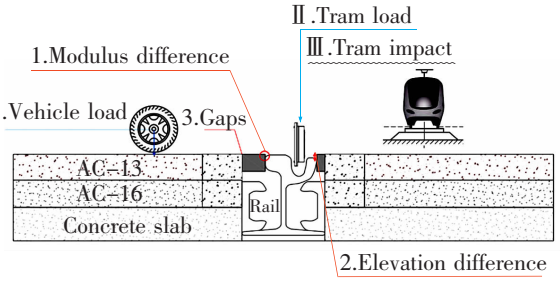



图5 路–轨过渡区结构和荷载特性

**Fig.5 Structure and load characteristics of road–track transition pavement**

在荷载特征方面，轨道周围的路基与路面同时承受有轨电车与汽车两种形式完全不同的荷载，其中有轨电车荷载为集中荷载作用在轨面上，而汽车荷载为均布荷载作用在路面或路面与轨面上。社会车辆荷载作用在钢轨与道路过渡区会造成过渡区铺面强度破坏。此外，在电车荷载和社会车辆荷载的共同作用下，轨道和周围地面发生冲击和振动，导致过渡区材料与钢轨及沥青铺面粘结性及密封性受损，并进一步在水和冲击荷载的作用下发生破碎和剥落，从而降低服役寿命。作用于钢轨与道路过渡区的不同荷载类型可归结为表 3。

**表 3　钢轨与道路过渡区的荷载类型**

**Tab.3　Load type of road-track transition pavement**

| Load type | Stress type | Damage type |
|---|---|---|
| Vehicle load | Compressive stress, shearing stress, etc. | Strength failure |
| Tram impact load | Repeated impact stress | Brittle failure, fatigue |
| Tram vibration load | Periodic dynamic stress | Aggregate spalling, fatigue |
| Ambient load | Temperature stress, pore water stress | Rutting, moisture damage |

## 3　道路与钢轨过渡区破坏机理分析

### 3.1　有限元模型的建立

考虑到轨道结构的对称性，取一半结构进行分析，采用 ABAQUS 有限元软件建立三维实体有限元计算模型，模型如图 6 所示。模型长度为 5 m，宽度为 2 m，凹槽宽 0.19 m，深度 0.18 m。根据调研，取钢轨轨槽两侧 30 cm 宽度范围为路-轨过渡区，对其在车辆荷载下的力学响应进行分析。模型由路面、钢轨、轨侧填充材料和轨顶密封材料 4 部分结构组成，各部分材料参数如表 4 所示。由于路面底部设有模量较大的支承层，不考虑结构底部的下沉，边角条件中采用底部固定。

**表 4　有限元模型材料参数**

**Tab.4　Material parameters in FEM**

| Structure | Materials | Elastic modulus/MPa | Poisson's ratio |
|---|---|---|---|
| Upper layer | AC-13 | 1 400 | 0.3 |
| Bottom layer | AC-20 | 1 200 | 0.3 |
| Supporting course | C25 | 28 000 | 0.25 |
| Rail | Steel | 210 000 | 0.3 |
| Top sealant | Rubber | 1.2 | 0.35 |
| Bottom pad | Polymer | 15 | 0.4 |
| Filler | Foaming materials | 8.5 | 0.5 |

根据《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)，采用城-A 级车辆荷载用于有限元模型中，其最大轴重为 200 kN，荷载作用面积为 0.6 m×0.25 m，轮距 1.8 m。参考文献[12-13]表明，路面不平整度对动荷载的大小有显著影响，当路面发生损坏时，动载增

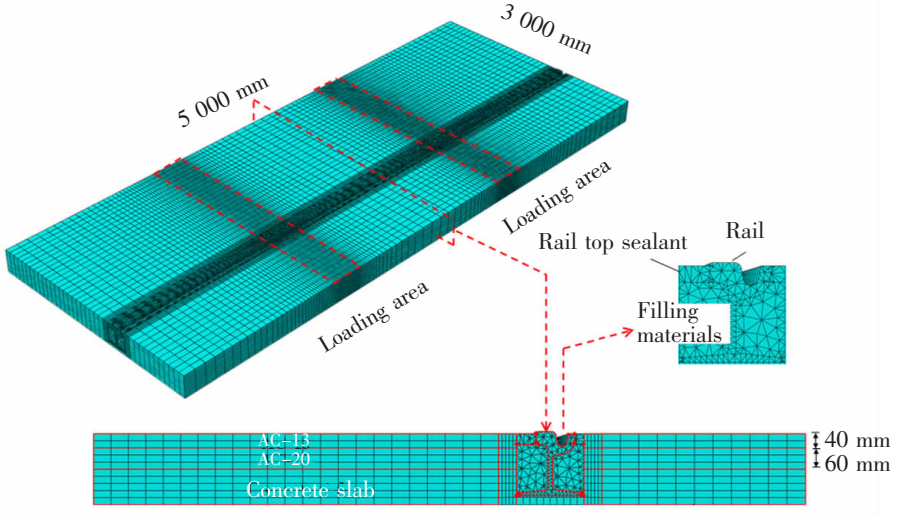



**图 6　路-轨过渡区有限元分析模型**

**Fig.6　FEM model of road-track transition pavement**

大，用动荷载与静荷载的比值表示动荷载系数 $K_d$，取 $K_d$ 为 1.4，则考虑动载作用下实际计算荷载为 140 kN。车辆荷载作用位置如图 7 所示，车辆从 −500 mm 位置驶入，沿坐标轴方向向前行驶，经过路−轨过渡区后从+500 mm 驶出，计算车辆荷载分别作用在 11 个位置点处的力学响应。

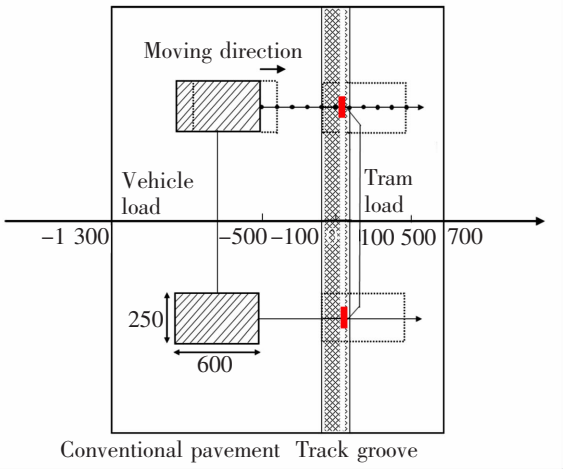



**图 7 车辆荷载作用位置示意图(单位:mm)**

**Fig.7 Schematic diagram of vehicle loading position (Unit:mm)**

现代有轨电车机车形式通常为三模块编组的电力牵引模式，行驶速度 $v$ 通常小于 70 km/h，其中静轮载 $P_0$=125 kN。参照 TB 10082−2017《铁路轨道设计规范》，当车辆最大运行速度 $v_{max}\leqslant$120 km/h 时，列车竖向载荷取值为

$$P=P_0(1+\alpha) \tag{1}$$

式中：$P$ 为竖向荷载，kN；$P_0$ 为静荷载，kN；$\alpha$ 为动载系数。

式(1)中，若列车为电力牵引，则

$$\alpha=0.6\ v/100 \tag{2}$$

式中：$v$ 为车辆实际运行速度，km/h。

取有轨电车实际运行速度为 50 km/h，可得有轨电车竖向荷载 $P$=162.5 kN，由于模型为对称结构，竖向荷载平均到两侧钢轨，则有轨电车对每侧钢轨施加 81.25 kN 的集中荷载(图 7)。

在车辆通过路−轨过渡区的过程中，选取 8 个点位(图 8)的应力变化情况进行分析。A,B,C,D 为轨道外侧不同层位的 4 个点；C,D,E,F 为轨道内侧不同层位的两点，对路−轨过渡区路面不同层位的应力响应进行对比分析。

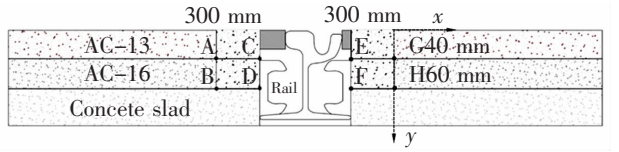



**图 8 受力分析点位示意图**

**Fig.8 Schematic diagram of mechanical analysis points**

### 3.2 路−轨过渡区破坏机理分析

为了揭示路−轨过渡区路面的破坏机理，选取图 7 所示的 11 种汽车荷载工况以及 1 种电车荷载工况对模型进行加载。本文主要针对过渡区在车辆荷载下的压应力、剪切力以及路面形变 3 个内在力学响应进行分析。

#### 3.2.1 压应力的影响

汽车荷载和电车荷载作用下 12 种荷载工况下路−轨过渡区的最大压应力 $\sigma_{cmax}$ 计算结果见表 5，最大压应力云图见图 9。从云图可以看出，汽车荷载作用下的最大压应力达到了 2.18 MPa，当汽车荷载中点位于轨道上方时达到最大值，有轨电车荷载作用下的压应力相对较小，为 1.65 MPa，最大压应力位置出现在路−轨过渡区外侧（远离轨道位置），这表明轨道两侧距轨道一定距离的路面是主要的受

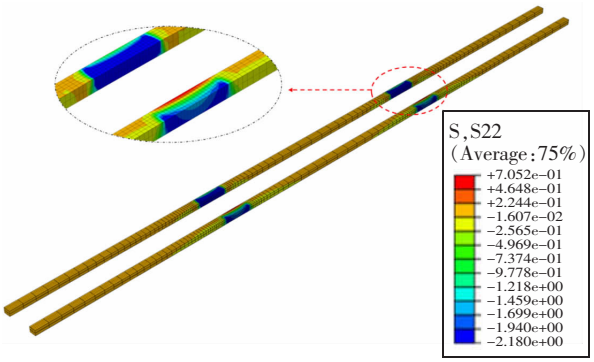



**图 9 过渡区最大压应力云图**

**Fig.9 Stress nephogram of maximum compressive stress in transitional pavement**

**表 5 不同荷载工况下过渡区最大压应力结果**

**Tab.5 Results of maximum compressive stress in transition pavement under different load conditions**

| Vehicle load condition | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_{c,max}$/MPa | 0.13 | 0.18 | 0.34 | 0.97 | 1.12 | 2.18 | 1.05 | 0.77 | 0.20 | 0.12 | 0.10 |

压部位。

图 10 反映了车辆荷载从驶入到驶出过渡区的过程中，路面结构不同位置（A，B，G，H 点）的压应力变化情况。由图 10 可见，车辆通过过程中，不同位置点的压应力先增大到一个最大值，然后逐渐减小，当荷载作用于位置点正上方时，压应力达到峰值。轨侧路面的压应力值与汽车荷载距离轨道的远近有关，汽车荷载距离轨道越近，路面的压应力值越大。为探究路–轨过渡区最大压应力 $\sigma_c$ 与车辆荷载距离轨道的距离 $x$ 的关系，采用 SPSS Statistics 数据统计软件对图 9 的数据点进行曲线拟合，拟合结果表明 $\sigma_c$ 与 $x$ 近似符合二次函数关系，相关系数 $R^2>9$，如式（3）所示。由图 10 变化趋势和式（3）可以看出，当车辆驶入路–轨过渡区时，最大的压应力出现在轨道外侧（A 点），大小为 2.18 MPa；而当车辆驶出路–轨过渡区时，各点的压应力较小，均小于 2.18 MPa。

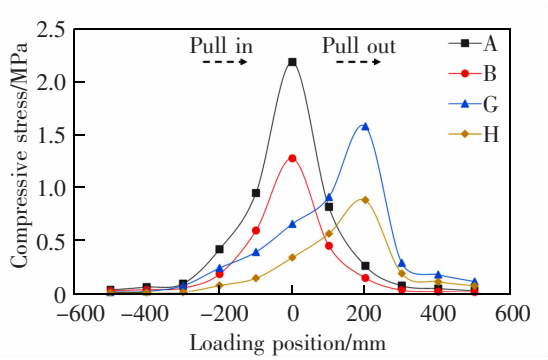



**图 10　不同荷载作用位置下过渡区压应力分布图**

**Fig.10　Distribution diagram of compressive stress in transition pavement under different load positions**

$$\sigma_c=\begin{cases}2.1-11.1x+14.4x^2\ (R^2=0.982)\text{，当驶入时}\\ 1.5-13.7x+30.6x^2\ (R^2=0.956)\text{，当驶出时}\end{cases}\quad(3)$$

式中：$\sigma_c$ 为路面上面层底部最大压应力，MPa；$x$ 为车辆荷载距离轨道中面的距离，m。

虽然常规沥青混凝土面层的抗压强度尚可，能够承受抵抗一部分车辆荷载产生的变形，但是由于轨侧的柔性包裹材料的抗压强度通常为 1~2 MPa，抗压承载力较低。在车辆荷载的反复作用下，轨侧的柔性材料容易发生因抗压强度不足导致的破碎，产生沉陷、坑槽等病害，在过渡区造成路面不平整和高差，导致车辆通过时容易产生振动和冲击。在冲击荷载的进一步作用下，路面性能继续发生劣化，造成局部的网裂和强度破坏。

### 3.2.2　剪应力的影响

汽车荷载和电车荷载下 12 种荷载工况下路–轨过渡区的最大剪切应力 $\tau_{max}$ 计算结果见表 6，最大压应力云图见图 11。从表中的数据可以看出，不同荷载工况下的剪应力存在正值和负值，即存在两个方向相反的剪应力。从云图可以看出，汽车荷载作用下的最大剪应力为 0.23 MPa，而有轨电车荷载作用下的剪应力值则大得多，为 1.73 MPa，说明有轨电车车轮荷载会对路面结构造成较大的剪切应力。最大剪应力位置均出现在路–轨过渡区内侧（靠近轨道位置），这表明靠近轨道的路面结构容易发生剪切破坏。

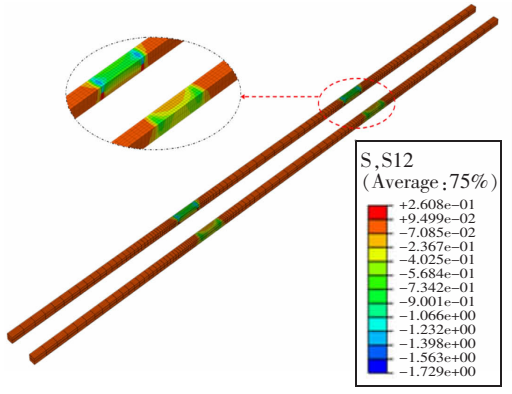



**图 11　过渡区最大剪应力云图**

**Fig.11　Stress nephogram of maximum shearing stress in transitional pavement**

图 12 反映了车辆荷载从驶入到驶出过渡区的过程中，路面结构不同位置（C，D，E，F 点）的剪应力变化情况。由图 12 可见，在车辆通过过程中，路–轨过渡区经历了两次剪切作用，第一次为车辆驶入时，第二次为车辆驶出时。两次剪切力的方向相反，且车辆驶出状态下的剪应力幅值较大，当车辆驶出路–轨过渡区时，最大的剪应力出现在轨道内侧（E点）。

**表 6　不同荷载工况下过渡区最大剪应力结果**

**Tab.6　Results of maximum shearing stress in transition pavement under different load conditions**

| Vehicle load condition | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\tau_{max}$/MPa | 0.01 | 0.01 | 0.05 | −0.15 | −0.23 | −0.04 | 0.31 | 0.19 | 0.15 | 0.08 | 0.07 |

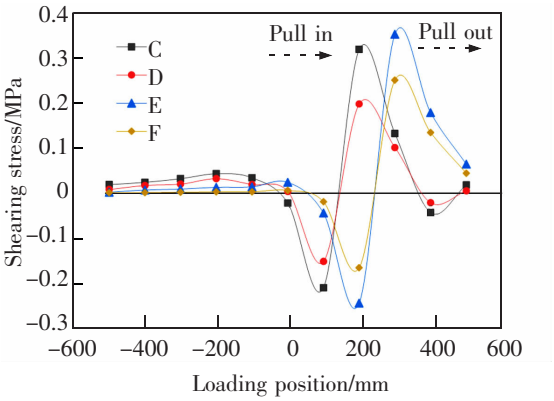



**图 12 不同荷载作用位置下过渡区剪应力分布图**

**Fig.12 Distribution diagram of shearing stress in transition pavement under different load positions**

由于轨侧柔性材料的抗剪强度和粘结强度不足,在反复剪切力的作用下,路面与轨道结构之间容易发生脱粘或错台。此时,路面处于悬臂梁状态,导致路面面层顶部出现较大的弯拉应力;此外,由于路-轨模量和沉降差异导致应力集中,使得靠近轨道结构附近的沥青路面应力变化显著,导致路-轨结合处容易产生横向裂缝。

3.2.3 路面形变的影响

如前所述,路-轨过渡区处于一个模量突变的范围,沥青路面的模量值较小,为一定程度上的"柔性",而钢轨结构的模量值较大,这是路面形变造成影响的内因。表7和表8分别为汽车荷载和电车荷载作用下不同位置应变值计算结果。由表7中数据可以看出,汽车荷载作用下远离轨道处(A,B,G,H点)路面结构中横向拉应变较大,而靠近轨道处(C,D,E,F点)的横向拉应变较小,远离轨道处路面的拉应变值约为轨道附近的3倍;远离轨道处路面的竖向压应力,约为轨道附近的2倍。由表8的数据可以看出,在电车荷载作用下,靠近轨道处路面的拉应变值约为远离轨道处的3倍。这表明,在路-轨过渡段,受距离轨道远近的影响,路面的横向变形量具有较大差异。同时可以证明,远离轨道的路面基层相对于轨侧路面具有更大的竖向应变值,倾向于发生较大的沉降。

然而,沥青混凝土面层在常温和低温下的变形和延展能力较差,在较大横向拉应变的作用下容易产生疲劳开裂,由于内侧和外侧横向应变的差异,在路面结构中会产生更大的横向拉应力;另外,过渡区路面外侧和内侧基层较大的竖向位移(沉降),会导致路面结构错位,在车辆通过时产生更大的冲击荷载。因此,过渡区外侧和内侧的形变不协调,是造成路-轨过渡区路面开裂的重要原因。

值得注意的是,影响过渡区路面破坏的几种力学机理,以及不同的破坏形式不是单独发生的,而往往是相互伴随、互相促进的。多数情况下,过渡区的损

**表 7 汽车荷载作用下应变响应计算结果**

**Tab.7 Calculation results of strain response of each position under vehicle loads**

| Position | Bottom tensile strain/με | | Vertical compressive strain/με | | Vertical strain of base/με |
|---|---|---|---|---|---|
| | Upper layer | Lower layer | Upper layer | Lower layer | |
| Away from track(A-B) | 13.64 | 11.37 | 248.1 | 229.3 | 207.6 |
| Near the track(C-D) | 4.45 | 3.71 | 145.4 | 112.7 | 101.9 |
| Near the track(E-F) | 3.22 | 2.81 | 133.1 | 106.6 | 97.4 |
| Away from track(G-H) | 10.68 | 9.25 | 227.0 | 203.4 | 186.6 |

**表 8 电车荷载作用下各位置应变响应计算结果**

**Tab.8 Calculation results of strain response of each position under tram loads**

| Position | Bottom tensile strain/με | | Vertical compressive strain/με | | Vertical strain of base/με |
|---|---|---|---|---|---|
| | Upper layer | Lower layer | Upper layer | Lower layer | |
| Away from track(A-B) | 17.18 | 22.32 | 12.53 | 11.04 | 8.07 |
| Near the track(C-D) | 45.35 | 60.13 | 13.89 | 10.82 | 10.23 |
| Near the track(E-F) | 57.40 | 72.17 | 13.92 | 11.01 | 10.58 |
| Away from track(G-H) | 19.22 | 26.39 | 12.78 | 10.94 | 8.35 |

坏多是由于早期的沉陷和错台，在车辆冲击荷载的作用下，进一步劣化而演变成后期病害的表现形式。与此同时，当路面结构发生裂缝后，水分容易渗入路面结构中造成水损害和路面承载力的降低，在各种环境因素的耦合作用下，进一步加剧路面结构的损坏。

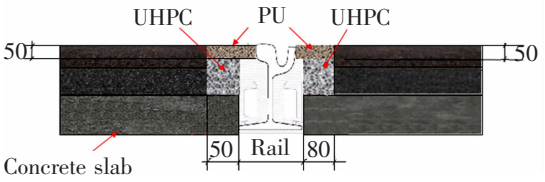
## 4　病害处治对策

根据有限元模拟分析，路–轨过渡区病害主要是由路面材料强度不足导致的沉陷、坑槽，以及轨道周边路面材料变形不协调两方面原因导致的。针对病害产生机理，可采用如下措施进行治理。

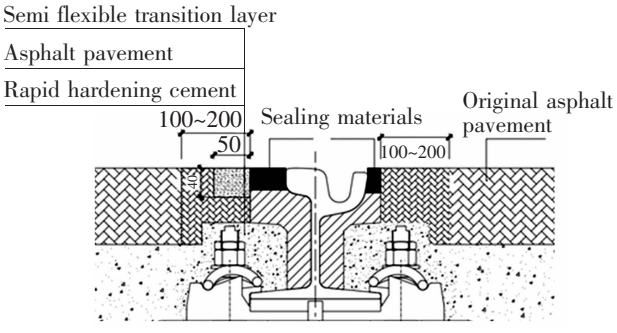
1）针对路面整体强度不足而造成的沉陷，需要在施工过程中保证路面压实质量，提高压实度；在路面结构层下方采用模量较大的高性能混凝土（UHPC），可以起到承载作用，抵抗车辆荷载作用下的变形。

2）针对轨道周边路面材料变形不协调的问题，采取在路–轨过渡区增设过渡材料的措施。所采用的过渡区材料模量应介于沥青混凝土和钢轨模量之间，以缓冲过渡区模量的突变，此外应兼具良好的“柔性”，具有一定的弹性和形变能力以减少裂缝的产生，同时缓冲车辆的冲击荷载。可以采用黑色的聚氨酯弹性混凝土、环氧树脂混凝土等材料，不仅具有优异的力学特性，而且与原有路面之间美观协调。

图 13 为路–轨过渡区病害处治方法的示意图。




（a）Application of UHPC




（b）Application of transition materials

**图 13　病害处治方案示意图（单位：mm）**

**Fig.13　Schematic diagram of distress treatment scheme (Unit: mm)**

首先要对轨道周边沥青层进行切割与凿除，应保证施工面的平整、整洁；之后按施工图所示在下方填充双快混凝土，再按照规定的尺寸填充 UHPC 层或半柔性过渡层，浇筑过程中应保证浇筑范围内无灰尘、无杂质、无残留水；最后进行施工面的整平，并振捣密实。

## 5　结论

1）通过对有轨电车轨道周边路面病害调研，发现大部分病害发生于轨侧 30 cm 宽度范围内，定义为“路–轨过渡区”范围；路面较钢轨的沉降值大多分布在 0~10 mm 范围内。路面裂缝、钢轨周边的剥落和坑槽是主要的病害类型。

2）数值模拟结果表明，在有轨电车路–轨过渡段，较大的压应力主要由汽车荷载引起，而剪应力主要由有轨电车荷载引起。汽车荷载通过路–轨过渡段时，压应力出现一次峰值，且在汽车驶入时达到最大值 2.18 MPa；剪应力出现了两次峰值，在汽车驶出时达到最大值 0.35 MPa。远离钢轨处的路面横向拉应变值与钢轨附近处具有明显差异，远离钢轨处的路面结构更倾向于发生较大的竖向变形（沉降）。

3）路–轨过渡区发生破坏的内在机理主要有 3 方面：路面材料强度和承载力不足，路面材料变形不协调，以及路面沉降下车辆的冲击作用。由于沥青混合料不具有足够的抗压、抗剪切和形变能力，在这 3 方面因素影响下，路面结构发生早期破坏。此后，压实度不足、车辆冲击荷载、环境荷载等因素综合作用下路面发生进一步劣化，是造成路面病害加剧的主要原因。

4）针对病害产生的机理，提出在路面层底采用高模量的混凝土，或平交路口过渡段路面加铺“半柔性过渡层”的处治方案，可以有效提高有轨电车平交路口路面的耐久性。

**参考文献：**

[1] 崔诚靓. 有轨电车与道路交通系统的衔接问题及应对措施[J]. 城市轨道交通研究，2020，23（S1）：67–70.
CUI C L. Connection problems between tramcar and road transportation system and countermeasures[J]. Urban Mass Transit，2020，23（S1）：67–70.

[2] 李晖. 松江现代有轨电车市政配套道路设计要点解析[J].

城市道桥与防洪,2018(3):54-69.
LI H. Analysis on design gist of municipal supporting road for modern tram in Songjiang[J]. Urban Roads Bridges and Flood Control,2018(3):54-69.

[3] 吴师. 现代有轨电车轨道结构力学分析方法及设计关键技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
WU S. Research on the mechanical analysis and key technology of modern tramcar track structure[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2014.

[4] 黄大维,冯青松,罗信伟,等. 有轨电车轨道病害现场调研与分析[J]. 华东交通大学学报,2019,36(1):12-17.
HUANG D W,FENG Q S,LUO X W,et al. Site investigation and analysis of the tramway diseases[J]. Journal of East China Jiaotong University,2019,36(1):12-17.

[5] REAL J,MARTíNEZ P,MONTALBáN L,et al. Modelling vibrations caused by tram movement on slab track line[J]. Mathematical & Computer Modelling an International Journal,2011,54(1/2):280-291.

[6] 朱金晏,张晚晴,侍荣春. 基于力学计算的现代有轨电车轨道轨腰包裹柔性材料结构设计[J]. 城市轨道交通研究,2019,22(S1):82-84.
ZHU J Y,ZHANG W Q,SHI R C. Structure design of flexible materials for tram rail waist block based on mechanical calculation[J]. Urban Mass Transit,2019,22(S1):82-84.

[7] MA Y,MARKINE V L,MASHAL A A,et al. Improving the performance of finite element simulations on the wheel-rail interaction by using a coupling strategy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail & Rapid Transit,2018:095440971774598.

[8] 邓永权. 有轨电车列车—嵌入式轨道动态相互作用研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
DENG Y Q. Study on dynamic interaction of tram train-embedded rail track[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2014.

[9] LING L,HAN J,XIAO X B,et al. Dynamic behavior of an embedded rail track coupled with a tram vehicle[J]. Journal of Vibration and Control:JVC,2017,23(14):2355-2372.

[10] 陆慧峰,龙厚全,莫吕群,等. 一种有轨电车与道路平交口的钢纤维砼路面及其施工工艺:中国,CN107558324A[P]. 2018-01-09.
LU H F,LONG H Q,MO L Q,et al. The utility model relates to a steel fiber concrete road surface at the level intersection of streetcar and road and its construction technology: China,CN107558324A[P]. 2018-01-09.

[11] 冯克敏,焦洪林,费学梅,等. 用于嵌入式轨道系统的高分子复合材料:中国,CN103351579A[P]. 2013-10-16.
FENG K M,JIAO H L,FEI X M,et al. Polymer composites for embedded rail systems: China,CN103351579A[P]. 2013-10-16.

[12] 曹源文,王冬,王建文,等. 水泥混凝土凹坑路面破损对重载车辆动荷载影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(8):95-100.
CAO Y W,WANG D,WANG J W,et al. Influence analysis of the damage of the cement concrete pit pavement on dynamic load of heavy-load vehicles[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2020,39(8):95-100.

[13] 曹源文,王冬,王建文,等. 水泥混凝土路面破损状况对重载车辆动荷载的影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(7):86-91.
CAO Y W,WANG D,WANG J W,et al. Influence analysis of cement concrete pavement damage on dynamic load of heavy-load vehicle[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science),2020,39(7):86-91.



**第一作者**:高铂舜(1997—),男,硕士研究生,研究方向为道路工程材料。E-mail:gbs@tongji.edu.cn。



**通信作者**:肖鑫,男,工学博士研究生,研究方向为道路材料。Email: xinxiao_xx@qq.com。

(责任编辑:吴海燕　刘棉玲)