

# 双层车辆荷载作用下地下空间半悬挂车道动力响应仿真分析\*

章新生

(中铁四局集团第五工程有限公司, 332005, 九江)

**摘要** [目的] 新型地下综合体预应力吊墙半悬挂式行车道结构具有美观、净空大的优点, 但对该新型结构的力学性能的研究尚处于起始阶段, 需要对该半悬挂式车道板结构的动力特性进行深入研究。[方法] 以深圳市黄木岗地下综合交通枢纽某区间半悬挂式车道板隧道为背景, 采用 Midas/GTS 软件建立地下综合体半悬挂车道板三维有限元模型, 研究了双层车辆荷载作用下半悬挂车道板的位移、加速度、应力的动态响应规律。[结果及结论] 车辆动荷载作用下, 车道板中部位移及加速度响应最大, 沿车道板中部至侧墙连接处位移与加速度响应逐渐减弱, 车道板位移响应峰值约为吊墙、顶板与侧墙的 4.6~12.3 倍, 吊墙、顶板与侧墙的加速度响应峰值约为车道板中部的 4.0%~21.6%; 动荷载作用下, 车道板中部以及与侧墙的连接部位应力响应明显, 在车道板与侧墙的连接处出现了应力集中现象, 并表现为轻微的不对称变形特征; 上层车辆荷载对吊墙的位移与加速度响应幅值影响相对较大, 增长幅度明显高于其他区域。

**关键词** 综合交通枢纽; 半悬挂车道板; 预应力吊墙; 双层车辆荷载; 动力响应

中图分类号 TU93+2:U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.034

## Dynamics Response Simulation Analysis of Underground Space Semi-suspended Lanes under Double-decker Vehicle Loads

ZHANG Xinsheng

(The Fifth Engineering Co., Ltd., CREC No. 4 Group, 332005, Jiujiang, China)

**Abstract** [Objective] The new prestressed hanging wall semi-suspended lane structure in underground complex offers advantages of aesthetic appearance and large clearance. However, the research on the mechanical properties of the new structure is still in the initial stage, necessitating an in-depth study on the mechanical characteristics of this semi-suspended lane structure. [Method] Based on an interval of the semi-suspended lane slab tunnel in Shenzhen Huangmugang Under-

ground Comprehensive Transportation Hub, a 3D finite element model of the underground complex semi-suspended lane slab is established using Midas/GTS software. The dynamics response laws of displacement, acceleration, and stress under the influence of double-decker vehicle loads are analyzed.

[Result & Conclusion] The results indicate that under vehicle dynamic loads, the displacement and acceleration response are the highest at lane slab center and gradually decrease towards the side wall connections. The peak displacement response of the lane slab is approximately 4.6 to 12.3 times greater than that of the hanging wall, roof slab and side wall, while the peak acceleration response of the above three places is about 4.0% to 21.6% of that of the lane slab center. Under dynamic loads, significant stress response occurs at the lane slab center and its connection to side wall, with a stress concentration observed at these connection points, showing slight asymmetrical deformation characteristics. The displacement and acceleration response amplitude of the hanging wall are notably affected by the top-decker vehicle loads, with increasing amplitudes significantly higher than in other areas.

**Key words** comprehensive transportation hub; semi-suspended lane slab; prestressed hanging wall; double-decker vehicle load; dynamic response

深圳黄木岗地下综合交通枢纽通过在车道板一侧侧墙内部设置预应力锚索施加预应力, 形成一种预应力吊墙半悬挂式行车道结构, 具有美观、净空大的优点, 然而实现开敞空间效果的同时也对其力学性能提出了挑战, 需对该结构的动力特性进行深入研究。

近年来, 已有不少学者关注地下隧道结构的动力响应问题。文献[1-2]基于有限元分析, 研究列车振动荷载作用下运营期间隧道结构的动力响应。文献[3]通过数值模拟方法, 对不同的立体交叉形

\* 国家自然科学基金项目(51868021)

式下隧道结构进行列车动力荷载分析。文献[4]等以武汉市轨道交通工程为背景,建立三维模型分析了多线交叠隧道在不同净距、埋深以及不同列车数量作用下的环境振动及其频谱特性。文献[5-6]采用岩土离心机试验,研究了钢筋混凝土管受机动车荷载作用下的动力响应特性。文献[7]采用理论分析与数值模拟,研究了二维平面应变情况下隧道受地面振动荷载的影响。文献[8]等研究了地层纵向位移模型,并根据此模型对不同列车振动荷载作用下隧道结构的动力响应进行分析。文献[9-10]分别采用现场试验与有限元法对机动车荷载作用下装配式综合管廊的力学特性及其损伤进行分析。以上研究大多针对综合体整体结构或盾构隧道、管道以及相关支护结构的动力响应分析,鲜有对于地下

综合体中半悬挂车道动力特性的相关研究。

本文依托深圳黄木岗地下综合交通枢纽工程,采用 Midas/GTS 有限元软件建立地下综合体中半悬挂车道结构三维实体模型,研究上下双层车辆荷载作用下半悬挂车道竖向位移、加速度及应力的动力响应规律。

## 1 工程概况

深圳黄木岗地下综合交通枢纽工程采用了预应力吊墙半悬挂式行车道结构,横断面布置如图1所示。半悬挂车道板隧道断面高 5.2 m,宽 12.75 m,顶板厚 1.8 m,车道板厚 0.9 m,吊墙厚 0.5 m。吊墙内沿车道方向按间距 500 mm 布置 7 根  $\phi 15.2$  mm、强度 1 860 MPa 的预应力钢绞线。

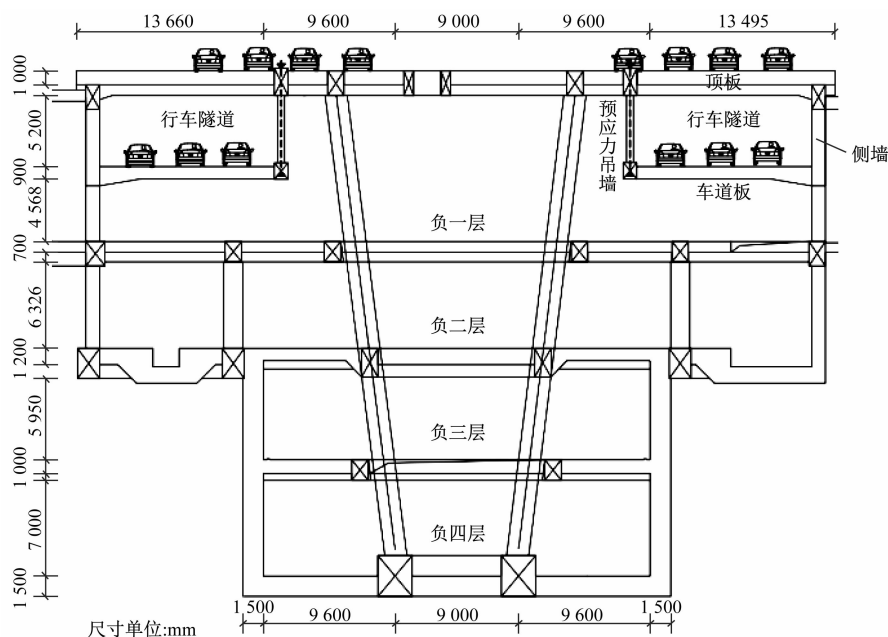


图1 地下综合体横断面

Fig. 1 Cross-section of underground complex

## 2 模型建立及测点布置

### 2.1 模型建立及测点布置

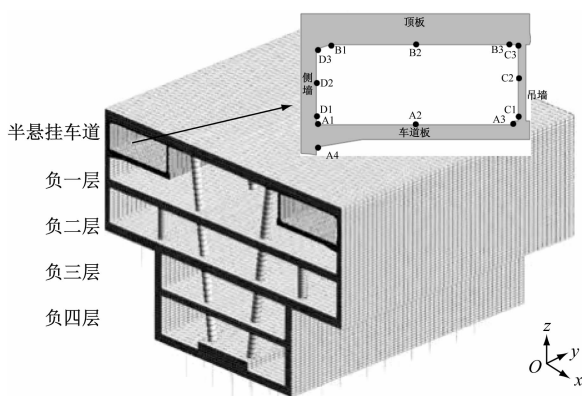
利用 Midas/GTS 有限元软件建立地下综合体三维模型。三维模型尺寸为 140 m (宽) × 40 m (深) × 52 m (长)。土体采用摩尔-库伦单元,顶板、地下一层至四层、侧墙、行车道均采用实体单元。纵、横梁、V 形柱、抗拔桩等采用梁单元模拟。预应力锚索采用植入式桁架单元模拟。在动力分析时,

采用黏性边界条件。车辆运行的时间设置为 3 s,积分步时长为 0.03 s。综合体模型示意图及测点布置如图2所示。

考虑到模型中两边车道对称布置且承受荷载基本相同,因此本文取一侧车道进行分析。按图2提取模型纵向跨中车道横断面数据,车道板4个点,顶板、侧墙与吊墙各3个点,共13个数据点。

### 2.2 材料参数

模型各物理材料参数如表1所示。



注: A1—A4、B1—B3、C1—C3、D3 为半悬挂车道监测点。

图2 模型示意图及测点布置图

Fig. 2 Diagram of layout of model and measuring points

表1 模型材料参数表

Tab. 1 Table of model material parameters

材料类型	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
素填土	12.6	0.20	1 930	16.0	15
粉质黏土	20.8	0.30	1 800	18.4	20
砾质黏性土	25.0	0.30	1 870	26.0	21
全风化花岗岩	50.0	0.28	1 850	27.0	24
强风化花岗岩	75.0	0.25	1 840	30.0	26
微风化花岗岩	5 500.0	0.18	2 700	2 000.0	42
板、墙	32 500.0	0.20	2 400		
支撑柱	36 000.0	0.20	2 400		
锚索	196 000.0	0.28	7 850		

### 2.3 车辆荷载与锚索张力

地下综合体中除半悬挂车道为双向 6 车道承受车辆荷载外,顶板地面车道设置为双向 8 车道。车辆荷载一般为简谐波荷载,本文选用简化的正弦荷载公式<sup>[11]</sup>,荷载  $P(t)$  表达式为:

$$P(t) = p + 0.4p\sin^2\left(\frac{\pi tv}{12L}\right)$$

式中:

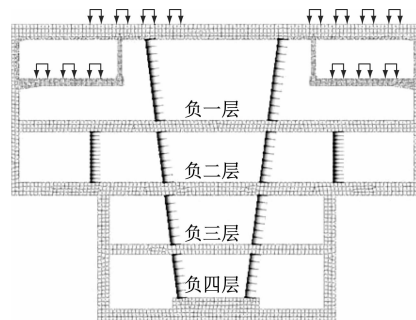
$p$ ——车辆恒载,这里大小为标准单轴双轮轴载 100 kN;

$L$ ——轮胎接触面当量圆半径,一般取 15 cm;

$v$ ——车辆行驶速度,取 60 km/h;

$t$ ——时间。

本文使用移动的车辆荷载对机动车进行模拟,单轮轴载  $P_{\text{汽}} = 70$  kN,车辆荷载布置如图 3 所示。根据  $\phi 15.2$  mm 单根 7 丝钢绞线张力计算公式,可得锚索预应力平均张拉力为 1 367 kN。



注:  $\downarrow$  为单轮轴载 70 kN。

图3 车辆荷载布置

Fig. 3 Vehicle load arrangement

### 3 半悬挂车道板动力分析

本文对车辆荷载作用下半悬挂车道板动力特性分为单层荷载、双层荷载两组工况进行对比分析,单组为仅受行车隧道内车辆荷载,双组为隧道与顶板车辆荷载共同作用。

#### 3.1 半悬挂车道板竖向位移时程响应分析

车道纵向跨中横断面各点竖向位移时程曲线如图 4 所示。随运行时间的推移,半悬挂车道各点变形值迅速发展,至 1.5 s 时各点变形达到峰值后随轴载远离又逐渐减小。

由图 4 a) 可知,1.5 s 时,车道板中部 A2 点产生最大竖向位移峰值(0.37 mm)。车道板与侧墙连接处 A1、A3 与 A4 各点位移峰值较小,对比单层荷载、双层荷载各点位移可知,顶部车辆荷载对其影响较小。由图 4 b) 可知,隧道内车辆荷载作用下车道板位移峰值约为顶板位移峰值(0.06 mm)的 4.6 倍,双层荷载作用下顶板 B2、B3 点位移明显增大且峰值为 0.2 mm。由图 4 c) 可知,双层荷载作用下吊墙 C1、C2、C3 各点竖向位移峰值均达 0.21 mm,变形整体增大约 3 倍且波动幅值远大于其他区域,顶部车辆荷载对吊墙影响最为显著。由图 4 d) 可知,侧墙受车辆荷载的位移影响最小,车道板位移峰值约为侧墙位移峰值的 12.3 倍。

总体来看,隧道内车辆荷载作用下,半悬挂车道的车道板位移响应最为显著,位移响应峰值约为吊墙、顶板与侧墙的 4.6~12.3 倍,顶部车辆荷载对吊墙位移影响最大,其位移增大约 3 倍。

#### 3.2 半悬挂车道竖向加速度响应分析

半悬挂车道相应各点竖向加速度时程曲线如图 5 所示。1.0 s 时半悬挂车道相应各点竖向加速度幅值开始迅速发展,1.5 s 时达响应峰值。

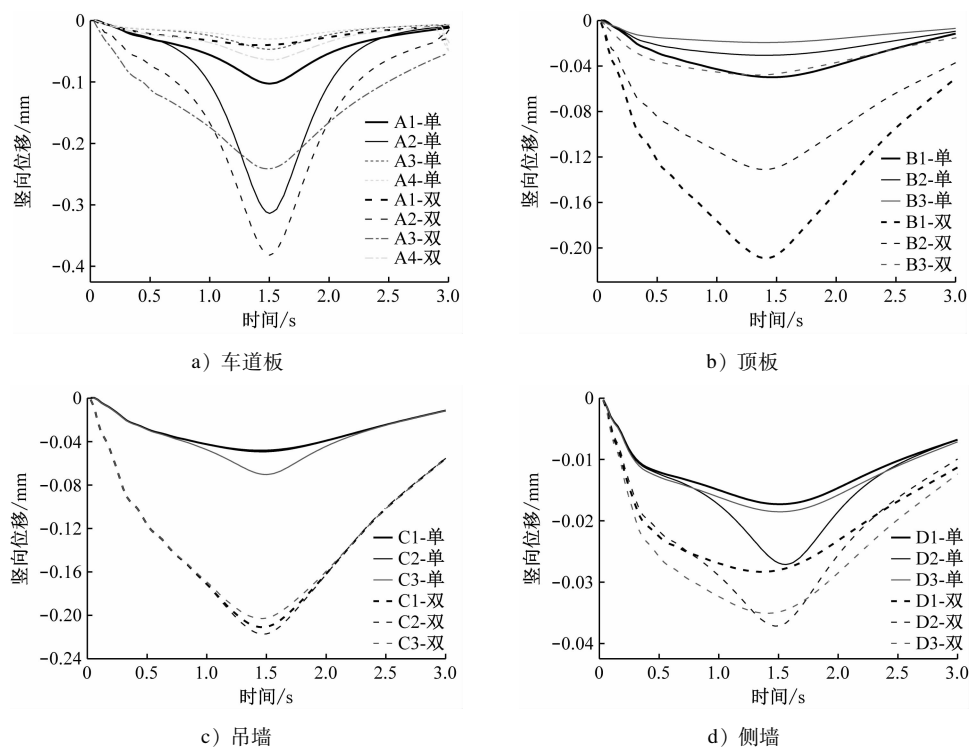


图4 半悬挂车道纵向跨中横断面各点竖向位移时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of vertical displacement at each point in semi-suspended lane longitudinal mid-span cross-section

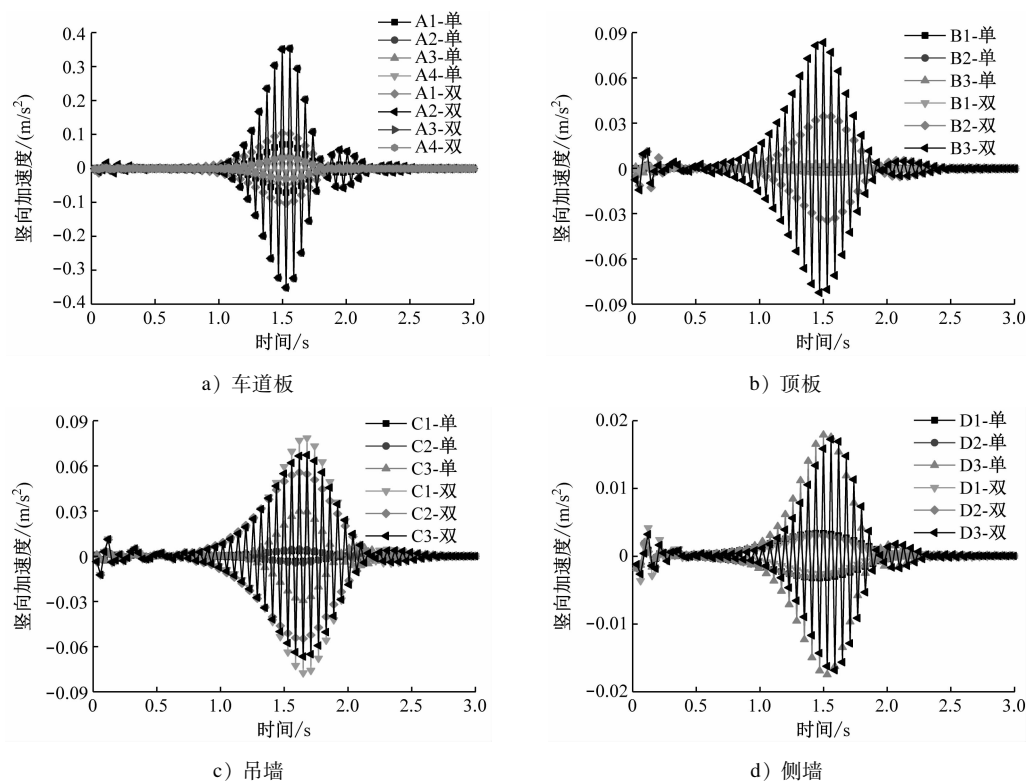


图5 半悬挂车道纵向跨中横断面各点竖向加速度时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of vertical acceleration at each point in semi-suspension lane longitudinal mid-span cross-section



由图 5 a) 可知, 1.5 s 时, 车道板 A2 点产生最大加速度峰值  $0.37 \text{ m/s}^2$ , 从车道板中部至侧墙连接处各点 A1、A3、A4 加速度峰值逐渐减小至  $0.03 \text{ m/s}^2$ , 对比单双层荷载作用, 顶部车辆荷载对车道板加速度幅值影响较小。由图 5 b) 可知, 顶板加速度最大峰值仅达到车道板 21.6%, 整体响应较小, 双层荷载下顶板 B3 点 (顶板与吊墙连接处) 加速度增长幅度较大。由图 5 c) 可知, 相比于单层车辆荷载作用, 双层荷载作用下吊墙各点加速度峰值均提高  $0.05 \text{ m/s}^2$ , 增长约 3 倍, 增长幅度明显高于其他区域。由图 5 d) 可知, 侧墙 D3 点 (侧墙与车道板连接处) 最大加速度峰值为  $0.015 \text{ m/s}^2$  仅达到车道板

的 4%, 加速度响应较小, 且由两层荷载对比可知顶部车辆荷载对其加速度幅值影响较小。总体来看, 车辆荷载作用下, 半悬挂车道结构车道板中部加速度响应最为显著, 吊墙、顶板与侧墙的加速度响应峰值约为车道板中部的 4.0% ~ 21.6%, 顶部车辆荷载对吊墙影响最大, 其加速度增大约 3 倍。

### 3.3 半悬挂车道应力响应分析

半悬挂车道各相应点应力时程曲线如图 6 所示。随着时间的推移, 0 ~ 0.5 s 车辆荷载刚施加时, 车道板竖向应力波动较大, 1.5 s 时各点均达到应力变化峰值。

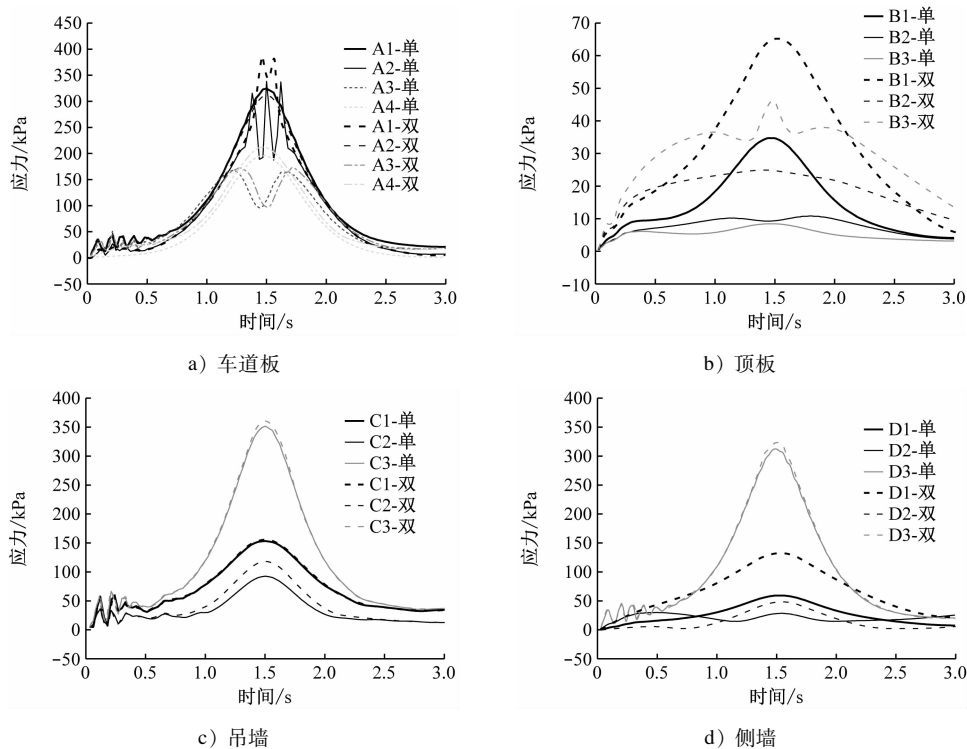


图 6 半悬挂车道纵向跨中横断面各点应力时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of stress at each point in semi-suspension lane longitudinal mid-span cross-section

由图 6 a) 可知, 1.5 s 时, A1 (车道板与侧墙连接处)、A2 (车道板中部) 应力响应最为显著, 其中 A2 点产生最大应力峰值为 383 kPa, 对比单、双层荷载可知, 车道板应力变化较小。由图 6 b) 可知, 相比车道板, 顶板应力变化较小其应力峰值位于 B1 (顶板与侧墙连接处) 为 66 kPa, 仅为车道板的 17%。双层荷载作用下顶板各点应力均有所增大。由图 6 c) 可知, 吊墙 C3 点 (吊墙与车道板连接处) 应力变化明显大于吊墙其他区域, 最大应力峰值达 358 kPa, 单、双层荷载对比下其应力无较大波动。

由图 6 d) 可知应力变化最大位于 D3 (侧墙与车道板连接处), 双层荷载作用下应力波动最大位于 D1 (侧墙与顶板连接处)。总体来看, 车辆动荷载作用下, 车道板中部以及与墙体的连接部位应力响应明显, 在车道板与墙体的连接处出现了一定的应力集中现象, 并表现为轻微的不对称变形特征。

## 4 结论

1) 车辆动荷载作用下, 半悬挂车道竖向位移较大值 (位移值  $> 0.2 \text{ mm}$ ) 主要分布于车道板, 位移响

应峰值位于车道板中部,同一时刻下,半悬挂车道板位移响应峰值约为吊墙、顶板与侧墙的4.6~12.3倍。

2) 竖向加速度响应与位移类似。半悬挂车道最大竖向加速度响应幅值位于车道板中部,同一时刻,吊墙、顶板与侧墙的加速度响应峰值约为车道板中部的4.0%~21.6%。

3) 车辆动荷载作用下,车道板中部以及车道板与吊墙、侧墙的连接处应力响应显著,响应最大处位于吊墙与车道板连接区域。在车道板与墙体的连接处出现了一定的应力集中现象,并表现出轻微的不对称变形特征。

4) 相较其他区域,顶部车辆荷载作用对半悬挂车道吊墙位移、加速度波动幅值的影响最大。

## 参考文献

- [1] 林志鹏. 列车荷载作用下重叠隧道结构动力响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(9): 1789.  
LIN Zhipeng. Analysis on dynamic response of overlapped tunnel structure under vibration load[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(9): 1789.
- [2] 白冰, 李春峰. 地铁列车振动作用下交叠隧道的三维动力响应[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊1): 715.  
BAI Bing, LI Chunfeng. Three-dimensional elastic dynamic response of close crisscross tunnels subjected to subway loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 715.
- [3] 于鹤然, 周晓军. 高速列车动荷载作用下立体交叉铁路隧道动力响应研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(6): 103.  
YU Heran, ZHOU Xiaojun. Study on dynamic response of grade-separated railway tunnels under high-speed train induced dynamic load[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(6): 103.
- [4] 于艳丽, 徐海清, 李振伟, 等. 列车荷载作用下紧邻平行多孔隧道的环境振动分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1801.  
YU Yanli, XU Haiqing, LI Zhenwei, et al. Ambient vibration analysis of adjacent parallel multi-tunnels under train loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1801.
- [5] RAKITIN B, XU M. Centrifuge modeling of large-diameter underground pipes subjected to heavy traffic loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 51(4): 353.
- [6] RAKITIN B, XU M. Centrifuge testing to simulate buried reinforced concrete pipe joints subjected to traffic loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11): 1762.
- [7] YAMAMOTO K, LYAMINANDREI V, WILSONDANIEL W, et al. Stability of dual square tunnels in cohesive-frictional soil subjected to surcharge loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(8): 829.
- [8] PARK D, SAGONG M, KWAK D Y, et al. Simulation of tunnel response under spatially varying ground motion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(11/12): 1417.
- [9] 段旭, 刘武超, 邹愈, 等. 车辆动荷载作用下黄土地区浅埋综合管廊动力响应试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(6): 1716.  
DUAN Xu, LIU Wuchao, ZOU Yu, et al. Experimental study on dynamic responses of shallow buried utility tunnel under dynamic vehicular load[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(6): 1716.
- [10] 张福麟. 机动车荷载作用下装配式综合管廊力学特性及疲劳损伤分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
ZHANG Fulin. Analysis of mechanical properties and fatigue damage of fabricated utility tunnel under vehicle load[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [11] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 余定选, 齐诚, 译. 北京: 人民交通出版社, 1998.  
HUANG Yangxian. Pavement analysis and design[M]. YU Dingxuan, QI Cheng, trans. Beijing: China Communications Press, 1998.

· 收稿日期:2022-04-09 修回日期:2022-05-05 出版日期:2024-08-10  
Received:2022-04-09 Revised:2022-05-05 Published:2024-08-10  
· 作者:章新生,高级工程师,tccejtu@163.com  
· ©《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

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com