

# 上海市域铁路机场联络线大盾构隧道结构在 列车荷载下的动力响应分析<sup>\*</sup>

陈扬勋<sup>1,2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉;

2. 上海地下基础设施安全检测与养护装备工程技术研究中心, 200092, 上海)

**摘要** [目的] 装配式单线双洞大直径盾构隧道越来越频繁地应用于地下轨道交通线路中, 提高了地下空间的使用效率。但其中隔墙与隧道结构的连接较为薄弱, 会对运营安全产生影响, 故需要研究装配式大盾构隧道中隔墙及其顶部节点在列车动力荷载作用下的动力响应。[方法] 以上海市域铁路机场联络线单洞双线大直径盾构隧道工程为依托, 采用数值模拟方法, 研究了列车荷载作用下装配式隧道内部结构的动力响应, 对中隔墙和顶部薄弱节点的安全性能进行了验算分析, 并对比了单车工况、对向列车荷载动力响应的差异情况。[结果及结论] 在列车竖向荷载的作用下, 管片变形有由横鸭蛋形向竖鸭蛋形变化的趋势, 并在列车荷载经过后恢复初始的横鸭蛋形状态; 会车工况下衬砌收敛减小值是单车工况下衬砌收敛减小值的2倍; 顶部螺栓承载符合规范要求, 在列车动荷载影响下, 可至少正常工作114年; 在列车风荷载作用下, 中隔墙顶部节点水平位移增大, 会车工况下水水平位移是单车工况下水水平位移的2.8倍; 隧道结构无共振风险。

**关键词** 市域铁路; 大直径盾构隧道; 动力响应; 列车荷载  
**中图分类号** U451<sup>+.3</sup>

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.023

## Dynamic Response Analysis of Large Shield Tunnel Structure of Shanghai Urban Railway Airport Link under Train Load

CHEN Yangxun<sup>1,2</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Underground Infrastructure Detection and Maintenance Equipment, 200092, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] The prefabricated single hole double track large-diameter shield tunnels are more frequently applied in underground rail transit lines, improving the efficiency of underground space utilization. However, the weak connection between the middle partition wall and the tunnel structure af-

fects the operation safety. Therefore, it is necessary to study the dynamic response of the middle partition wall and its top nodes in prefabricated shield tunnels under train dynamic loads.

[Method] Based on the single hole double track large-diameter shield tunnel project of Shanghai Municipal Railway Airport Link, the dynamic response of the internal structure of the prefabricated tunnel under train load is studied by numerical simulation. The safety performance of the middle partition wall and the weak top nodes is verified and analyzed, and the difference between the dynamic responses under single train load and opposite train load are compared. [Result & Conclusion] Under the action of vertical train load, the segment deformation presents a tendency of change from horizontal duck egg to vertical duck egg, and resumes the initial state of horizontal duck egg after the train load passes by. The convergence reduction value of the lining under the train meeting condition is twice that under the single train condition. The bearing capacity of the top bolt meets the requirements of the standard and can work normally for at least 114 years under the effect of the train dynamic load. Under the action of the train wind load, the horizontal displacement of the top node on the middle partition wall increases, and under the train meeting condition is 2.8 times that under single train condition. The tunnel structure has no resonance risk.

**Key words** suburban railway; large diameter shield tunnel; dynamic response; train load

近年来, 为了提高大直径隧道的断面利用率, 装配式单线双洞大直径盾构隧道越来越频繁地应用于地下轨道交通线路中。出于防灾疏散的需要<sup>[1]</sup>, 此类隧道中部常设置中隔墙。由于中隔墙一般为预制构件, 其与隧道结构的连接较为薄弱, 在列车等荷载作用下易发生较大变形, 导致内部结构失效, 影响运营安全。文献[2]推导和建立了基于

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金面上项目(51878497); 上海市人才发展资金资助项目(2021051)

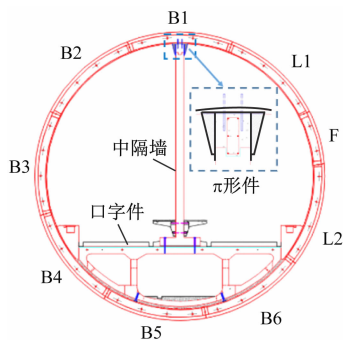
偏压与风压的复合稳定性测定方法,提出确定中隔墙稳定性的抗覆稳定性系数、抗滑稳定性系数,以及中隔墙容许承载力限值。文献[3]采用弹性铰圆环法、弹性地基梁法和连续介质有限元法对隧道在不同荷载组合情况下的竖向变形进行分析,得出了衬砌与中隔墙之间的最佳间隙及相应的连接构造。

上海市域铁路机场联络线(以下简称“机场线”)隧道创新性地提出了韧性接头方案,减小了在隧道竖向压缩变形情况下中隔墙的压应力集中程度。但韧性接头方案在列车荷载作用下的安全性尚需要进一步研究分析。本文针对这一问题,建立三维有限元数值模型,对列车荷载作用下的盾构隧道结构动力响应进行仿真分析,以验证内部结构的可靠性并对结构共振现象进行探讨。

## 1 工程概况与分析方法

### 1.1 工程概况与断面选择

机场线为虹桥站至上海东站,全长 68.627 km。机场线隧道断面如图 1 所示。机场线隧道为单洞双线盾构区间,采用拼装式混凝土衬砌管片,管片外径为 13.6 m,内径为 12.5 m,采用 6+2+1 的分块形式。管片厚度为 0.55 m,环宽 2 m,管片采用 C60 混凝土。环与环之间采用 34 根 8.8 级 M36 螺栓连接。管片内设置双层钢筋,主筋采用 HRB400E 型钢筋,主筋平均间距为 100 mm。口字件、中隔墙均采用预制结构,中隔墙与口字件之间采用 M36 螺栓连接。顶部采用韧性节点方案:以钢板和牛腿组成的  $\pi$  形件,采用 M20 螺栓与衬砌连接,中隔墙夹在两侧牛腿之间;待管片变形基本稳定后,再使用 C30 混凝土填充中隔墙与  $\pi$  形件间的空隙;填充层上方添加一层 6 cm 厚度的 EVA 海绵垫。



注: B1—B6、L1、L2、F 为管片分块编号。

图 1 机场线隧道断面

Fig. 1 Cross-section of the airport link tunnel

本文以软黏土分布较广的七宝站—华泾站区间(以下简为“七华区间”)为研究对象。七华区间隧道平均埋深为 16.5 m, 穿越⑤<sub>1-1</sub>和⑤<sub>3-1</sub>土层。具体土层参数如表 1 所示。

表 1 土层参数表

Tab. 1 Parameters of soil layers

土层	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	弹性模量/ MPa
②1	1 870	17.8	14.4	50.0
③1	1 730	10.3	12.1	30.0
④	1 680	10.3	10.8	40.0
⑤1-1	1 750	13.7	13.5	67.0
⑤3-1	1 760	5.1	23.2	90.0
⑦2	1 860	2.6	32.2	143.3

### 1.2 列车荷载

列车竖向荷载常采用激振力函数法<sup>[4]</sup>。机场线采用的 CRH6F 型动车组,轴重为 17 t。计算可知,单个车轮竖向荷载  $P_0 = 85$  kN。列车最高运行速度  $v_m = 160$  km/h, 则激励函数法计算  $t$  时刻的地铁列车荷载  $F(t)$  为:

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega_1 t) + P_2 \sin(\omega_2 t) + P_3 \sin(\omega_3 t) \quad (1)$$

式中:

$P_i$ ——控制条件  $i$  下的竖向振动荷载,按表 2 取值,  $i = 1, 2, 3$ ;

$\omega_i$ ——控制条件  $i$  下的圆频率,按表 2 取值。

其中,控制条件  $i$  的计算参数取值见表 2。

表 2 激振力函数法不同控制条件的计算参数取值

Tab. 2 Calculation parameters of excitation force function method under different control conditions

$i$	波长 $L/m$	矢高 $a/mm$	$\omega_i/$ (rad/s)	$P_i/N$
1	10.0	3.50	27.91	4 635.23
2	2.0	0.40	139.54	13 240.86
3	0.5	0.08	558.17	42 370.76

列车荷载采用 ABAQUS 动力隐式算法中的 DLOAD 子程序控制荷载移动。考虑到列车前行穿过隧道过程中产生的活塞风压,根据 TB 10002—2017《铁路桥涵设计规范》<sup>[5]</sup>,设置由单车工况产生所作用在中隔墙上的风压荷载为 3 kPa,双向叠合风压为 6 kPa。

### 1.3 三维仿真分析方法

#### 1.3.1 数值模型的构成

考虑列车激励下的振动规律及消除边界效应的需要,最终确定模型尺寸为  $110\text{ m} \times 70\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。隧道模型仅考虑一次性开挖,不考虑开挖过程。七华区间三维模型如图2所示。

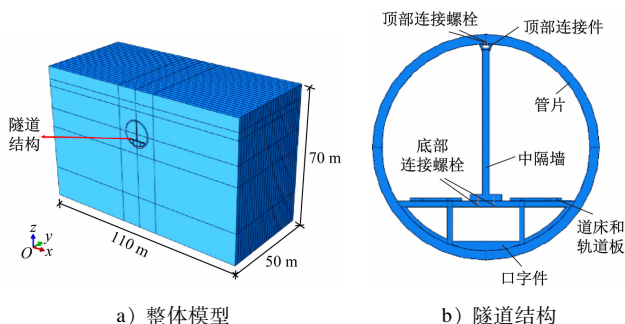


图2 七华区间三维模型

Fig.2 3D model of Qihua section

模型中:衬砌管片不考虑拼装分块,仅考虑环间螺栓影响;对电缆沟槽等附属结构进行简化;土体、衬砌、中隔墙及口字件采用实体单元,螺栓采用梁单元。

#### 1.3.2 材料参数与接触设置

参考文献[6]的数据,在振动荷载作用下,C60、C40混凝土的动弹性模量分别取  $37.96\text{ GPa}$ 、 $33.8\text{ GPa}$ 。螺栓、顶部件、钢筋材料均按照线弹性本构关系选取。土体采用摩尔-库伦弹塑性模型,土体参数按表1取值。其他材料参数取值见表3。

表3 其他材料参数取值表

Tab.3 Parameters of other materials

材料	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	动弹性 模量/ $\text{GPa}$	泊松比
C60 混凝土(管片)	2 500	37.96	0.200
C40 混凝土(车道板、中隔板)	2 500	33.80	0.200
M36、M16 螺栓	7 850	206.00	0.175
顶部件	7 850	206.00	0.175
衬砌钢筋	7 850	206.00	0.175

#### 1.3.3 动力边界条件及其他设置

动力边界采用人工黏弹性边界。根据文献[7]的研究,黏弹性人工边界法向弹簧和切向弹簧-阻尼参数见表4。其中, $R$ 为边界到荷载所处位置的平均距离, $K_N$ 及 $c_N$ 为法向弹簧的刚度及阻尼, $K_T$ 及 $c_T$ 为切向弹簧的刚度及阻尼。

表4 黏弹性人工边界法向弹簧和切向弹簧的刚度及阻尼

Tab.4 Stiffness and damping parameters of normal and tangential springs at viscoelastic artificial boundary

边界	$R/\text{m}$	$K_N/10^6$	$c_N/10^5$	$K_T/10^6$	$c_T/10^5$
左右面	55	1.395	6.194	0.703	3.31
前后面	25	3.069	6.194	1.546	3.31
底面	20	3.802	6.194	1.915	3.31

对三维结构进行振型分析。土层的前两阶圆频率分别为  $3.833\text{ rad/s}$ 、 $6.600\text{ rad/s}$ 。土体采用瑞利阻尼系数,瑞利阻尼系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别取0.24和0.009 58。按 $v_m = 160\text{ km/h}$ ,则通过模型时间为2 s,积分步长取0.01 s。

## 2 不同行车工况下隧道动力响应特征

为了较为全面地反映列车荷载对装配式隧道内部结构的影响,本文以单车工况和会车工况进行分析,重点研究衬砌收敛以及内部结构薄弱点的受力变形情况(见图3)。隧道中部衬砌环位置(断面1)可以较为完整地表现列车荷载经过对衬砌的影响,故本研究以断面1为对象进行研究。

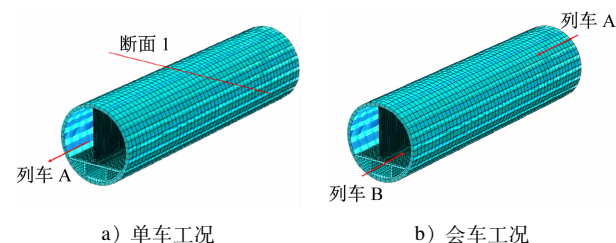


图3 列车行驶工况示意图

Fig.3 Schematic diagram of double-train

### 2.1 隧道收敛

仿真计算可得,断面1处单车工况和会车工况下的衬砌收敛变形时程曲线如图4所示。

由图4可知,隧道水平收敛初始值约为  $24.20\text{ mm}$ ,竖向收敛初始值为  $26.70\text{ mm}$ 。由 $v_m = 160\text{ km/h}$ 可知,当 $t = 0.56\text{ s}$ 时,列车第一对轮对进入断面1,此时断面1衬砌的水平收敛和竖向收敛均有较大变化:单车工况下衬砌水平收敛减小  $0.14\text{ mm}$ ,竖向收敛减小  $0.15\text{ mm}$ ;会车工况下衬砌水平收敛减小  $0.30\text{ mm}$ ,竖向收敛减小  $0.29\text{ mm}$ ;会车工况衬砌收敛减小值是单车工况衬砌收敛减小值的2倍。经分析,隧道衬砌发生这种变化是因为受到列车竖向荷载的作用,隧道底部土体隆起作用被抑制,管片的横鸭蛋形变形情况减弱,有向竖鸭蛋形变形的

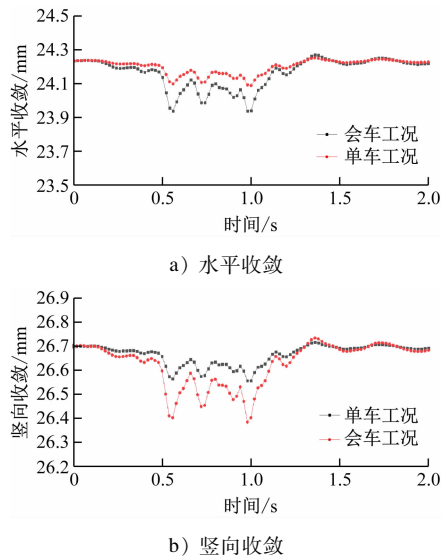


图4 断面1处单车工况和会车工况下的衬砌收敛变形时程曲线

Fig.4 Time history curve of tunnel lining convergence deformation of section 1

转变趋势,而会车工况竖向荷载是单车工况竖向荷载的2倍,因此会车工况下的隧道收敛变化更大。当 $t=1.16\text{ s}$ 时,列车最后一对轮对驶出断面1,随后隧道收敛变形恢复至初始状态。

## 2.2 中隔墙顶底部螺栓内力

以断面1为研究对象,仿真计算无行车、单车及会车工况下顶部螺栓和底部螺栓的轴力和剪力,结果如表5所示。

表5 不同工况下顶部螺栓和底部螺栓的轴力和剪力仿真计算结果

Tab.5 Simulation calculation results of axial force and shear force for top and bottom bolts

工况	轴力/kN		剪力/kN	
	顶部螺栓	底部螺栓	顶部螺栓	底部螺栓
无行车	5.74	7.11	0.16	0.09
单车	10.97	7.71	0.92	0.10
会车	15.37	7.93	2.15	0.12

与无行车工况相比,会车工况下螺栓受力变化大于单车工况螺栓受力变化,因此仅进行会车工况下螺栓的承载能力计算和疲劳验算。经计算,顶部螺栓的承载能力系数为0.11,小于1,满足GB 50017—2017《钢结构设计标准》<sup>[8]</sup>对螺栓承载能力的要求。

由于隧道中列车荷载为动力重复荷载,顶部节点螺栓在动力荷载的重复作用下会产生疲劳,因此需要对顶部螺栓的疲劳强度进行验算。

经仿真计算,在结构使用寿命期间,在1个动力循环作用下,顶部螺栓能承受的最大正应力 $\sigma_{\max}=60.27\text{ MPa}$ ,最小正应力 $\sigma_{\min}=22.57\text{ MPa}$ ,则计算部位1个8.8级M20普通螺栓的正应力幅值为44.47 MPa,即顶部螺栓至少能够承受 $2\times 10^6$ 次的疲劳往复荷载作用,满足使用要求。

经仿真计算,在结构使用寿命期间,在1个动力循环作用下,顶部螺栓所承受的最大剪应力 $\tau_{\max}=8.49\text{ MPa}$ 、最小剪应力 $\tau_{\min}=0.67\text{ MPa}$ ,则计算部位1个8.8级M20普通螺栓的剪应力幅值为8.02 MPa。由此可得,顶部螺栓通过了剪应力疲劳验算。

同样可知,底部螺栓的正应力和剪应力也均满足疲劳强度要求。

## 2.3 中隔墙水平变形

仿真计算可得,单车工况与会车工况(一侧车头与对向车尾交会时刻)下的中隔墙变形,如图5所示。

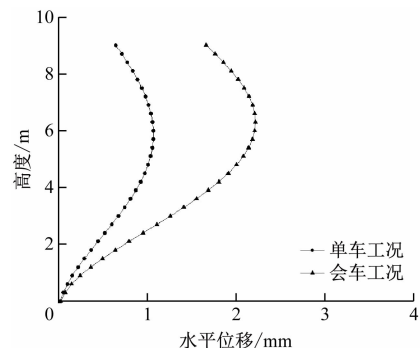


图5 不同工况下中隔墙水平位移

Fig.5 Horizontal displacement of separation wall under different working conditions

由图5可知,单车工况与会车工况下列车荷载所形成的中隔墙的水平位移规律相同:水平位移沿中隔墙顶部向下先增大后减小,直到中隔墙底部变为0;中隔墙顶部存在水平位移,随列车荷载的增大而增大。经分析,造成这种分布情况的原因是中隔墙顶部与底部的连接方式不同。中隔墙顶部受顶部 $\pi$ 形件约束,与衬砌螺栓连接,该连接近似于铰接;而中隔墙底部与口字件近似于固定连接。因此,在列车风荷载作用下,顶部节点有失效的危险。经过验算,顶部节点水平位移最大的时刻为双向列车会车时刻,最大值为1.664 mm。

## 2.4 列车荷载的共振响应

以会车工况为例,提取轨道板顶部列车荷载加载点(D点)的加速度时程,并进行加速度频谱分

析,得到D点的加速度功率频谱如图6所示。

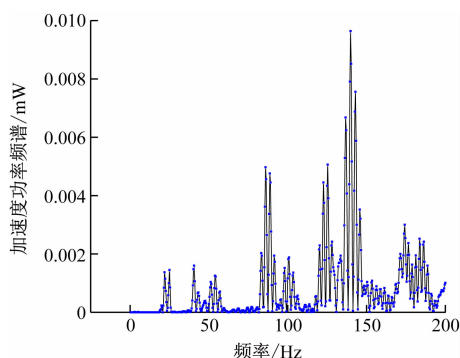


图6 D点的加速度功率频谱

Fig.6 Acceleration spectrum at D point

由于D点直接承受列车荷载,因此以该点的振动频率来等效列车荷载本身的激励频率。由图6可知,列车荷载的优势频率为150 Hz左右。根据文献[9]的研究,列车振动荷载为宽频振动,频率主要集中在0~250 Hz范围内,与本文计算所得区间基本一致。由仿真计算结果可得,整个模型的自振频率为0.61 Hz,由此可得,列车激励频率与自振频率之比 $\beta=250$ 。由图6可知,列车荷载不会产生共振现象。

### 3 结语

本文以机场线为依托,建立数值仿真模型,对无行车工况、单车工况、会车工况下管片、顶部螺栓及中隔墙的受力变形进行仿真分析,得到研究结论如下:

1) 在列车荷载的作用下,隧道底部土体隆起受到抑制,隧道的收敛变形会从“横鸭蛋”形向“竖鸭蛋”形变化;列车离开后,隧道收敛恢复初始状态。相较于单车工况,会车工况的隧道结构动力响应更大。

2) 会车工况下,隧道顶部节点螺栓轴力为15.37 kN,剪力为2.15 kN,承载力均符合规范。经过螺栓的疲劳验算可知,在结构使用寿命期间,螺栓无疲劳破坏风险。

3) 中隔墙顶部节点类似于铰接点,在列车经过时其水平位移会明显增大,会车工况下顶部位移是单车工况下顶部位移的2.8倍。由于中隔墙底部和口子件为固定连接,其稳定性较强,基本不产生水平位移。因此设计时需要着重考虑顶部节点的安全性能。

4) 隧道结构在列车荷载的影响下无共振风险。

本文主要采用了数值仿真分析的方法进行研究,后续应结合工程建设进度,及时开展施工监测与运营监测工作,收集隧道结构变形、顶部节点位移及应力等数据,为类似的工程提供指导。

### 参考文献

- [1] 苟长飞,蒋颖,杜运国,等. 市域快速轨道交通水底盾构隧道防灾救援实例分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(1): 111.  
GOU Changfei, JIANG Ying, DU Yunguo, et al. Case study of disaster prevention and rescue system at under-river tunnel of metropolitan rapid rail transit[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(1): 111.
- [2] 王盛,张拥军,王观群,等. 运营地铁隧道中隔墙稳定性研究[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(10): 60.  
WANG Sheng, ZHANG Yongjun, WANG Guanqun, et al. Study on stability method of middle partition wall of metro tunnel in operation[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(10): 60.
- [3] 张中杰,叶冠林,汤翔. 中隔墙对上海轨道交通16号线大断面盾构隧道的变形影响分析[J]. 隧道建设, 2014, 34(10): 953.  
ZHANG Zhongjie, YE Guanlin, TANG Xiang. Case study on influence of separation wall on deformation of large cross-section shield-bored tunnel on No. 16 line of Shanghai metro[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(10): 953.
- [4] 李亮,张丙强,杨小礼. 高速列车振动荷载下大断面隧道结构动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4259.  
LI Liang, ZHANG Bingqiang, YANG Xiaoli. Analysis of dynamic response of large cross-section tunnel under vibrating load induced by high speed train[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4259.
- [5] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路桥涵设计规范: TB 10002—2017[S]. 北京:中国铁道出版社, 2017.  
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design on railway bridge and culvert: TB 10002—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [6] 王田友. 地铁运行所致环境振动与建筑物隔振方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
WANG Tianyou. Study on subway-induced environmental vibration and isolation method of building from it[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [7] 张啟乐,冯立力,王建立,等. 类矩形盾构隧道与圆形盾构隧道振动特性对比分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(3): 41.  
ZHANG Qile, FENG Lili, WANG Jianli, et al. Comparative analysis of the vibration characteristics for quasi-rectangular shield tunnel and circular shield tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(3): 41.

(下转第130页)

## 参考文献

- [1] 王培鑫,周顺华,狄宏规,等. 基坑开挖对邻近铁路路基变形影响与控制[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊1): 469.  
WANG Peixin, ZHOU Shunhua, DI Honggui, et al. Influence and control of foundation pit excavation on deformation of adjacent railway subgrade [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (SI): 469.
- [2] 苟凌云. 盾构法隧道施工引起地表沉降规律研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.  
GOU Lingyun. Study on the subsidence caused by shield tunnel construction[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [3] 袁竹. 矿山法隧道下穿铁路沉降影响分区研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
YUAN Zhu. A study on influence zoning of railway settlement during tunnel construction underpassing by conventional method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [4] 何卫. 暗挖地铁隧道下穿高速铁路路基沉降规律与控制措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.  
HE Wei. Research on the subgrade settlement and controlling measures of high-speed railway during the under-passing of shallow metro tunnel construction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [5] 林志军. 地铁盾构隧道下穿既有高铁隧道施工影响及控制技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.  
LIN Zhijun. Study on the effect of construction of undercrossing shield tunnel on the existing high-speed railway tunnel and its control technology[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [6] 谭勇, 康志军, 卫彬, 等. 上海软土地区某地铁风井深基坑案例分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(6): 1048.  
TAN Yong, KANG Zhijun, WEI Bin, et al. Case study on deep excavation for metro ventilation shaft in Shanghai soft clay [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50 (6): 1048.
- [7] 冯祖国. 隧道施工引起地表沉降的 Peck 公式预测概述[J]. 价值工程, 2020, 39(17): 133.  
FENG Zuguo. Summary of Peck formula prediction of ground subsidence caused by tunnel construction [J]. Value Engineering, 2020, 39(17): 133.
- [8] 中华人民共和国国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.  
State Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.
- [9] 中华人民共和国国家铁路局. 邻近铁路营业线施工安全监测技术规程: TB 10314—2021[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2021: 24.  
National Railway Administration of People's Republic of China. Technical specification for safety monitoring of operating railway infrastructures with adjacent constructions: TB 10314—2021 [S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2021: 24.
- 收稿日期: 2023-08-28 修回日期: 2023-09-05 出版日期: 2024-06-10  
Received: 2023-08-28 Revised: 2023-09-05 Published: 2024-06-10  
· 作者: 陈利民, 高级工程师, 13913923816@139.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
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [9] 周扬, 杨文波, 杨林霖, 等. 车致振动荷载作用下富水软弱地层中盾构隧道动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 1067.  
ZHOU Yang, YANG Wenbo, YANG Linlin, et al. Analysis of dynamic response characteristics of shield tunnel under train load in water-rich soft stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(5): 1067.
- 收稿日期: 2021-12-13 修回日期: 2022-04-01 出版日期: 2024-06-10  
Received: 2021-12-13 Revised: 2022-04-01 Published: 2024-06-10  
· 作者: 陈扬勋, 高级工程师, 921291423@qq.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

## (上接第 125 页)

## 《城市轨道交通研究》入选上海市高校优秀科技期刊案例库

第五届上海市高校精品·优秀·特色科技期刊案例库遴选工作日前已经结束。按照遴选方案, 遴选工作委员会遴选出 26 种“精品科技期刊”、26 种“优秀科技期刊”和 26 种“特色科技期刊”。《城市轨道交通研究》入选“优秀科技期刊”案例库。

(供稿:《城市轨道交通研究》编辑部)