

# 非平衡荷载下城市轨道交通车站深基坑 变形特性分析\*

刘 涛 姜 磊 王 申 彭红国 李 岩

(中铁七局集团第三工程有限公司, 710032, 西安)

**摘 要** [目的] 目前城市轨道交通非平衡荷载作用导致的地下工程病害、事故逐渐增多。为了解非平衡荷载对城市轨道交通车站深基坑变形的不利影响,减小施工风险,需要对该类型荷载作用下车站深基坑变形特性进行分析。[方法] 基于理论分析和现场监测数据,研究了非平衡荷载下城市轨道交通车站深基坑的变形特性,分析了围护桩变形、深层土体水平位移及地面沉降的变化规律,探讨了围护桩变形同深层土体水平位移、地面沉降及开挖深度之间的关系。[结果及结论] 围护桩水平位移曲线呈鱼腹状,且地层条件对围护桩变形影响明显;围护桩变形和深层土体水平位移大致呈线性关系,其中经验系数取 1.30;由于偏载作用,深基坑周边地面沉降较大,围护桩最大水平位移  $\delta_{hm}$  与地面最大沉降  $\delta_{vm}$  存在  $\delta_{vm} = (0.9 \sim 3.0) \delta_{hm}$  的关系,且两者之间的比例系数大于对称荷载作用下的数值;岩层较强的抵抗变形能力限制了围护桩变形,  $\delta_{hm}$  与  $H_e$  存在  $\delta_{hm} = (0.009\% \sim 0.060\%) H_e$  的关系,且两者之间的比例系数小于对称荷载作用下的数值;深基坑施工对周边环境的影响区域主要划分为 1 区(主要影响区)、2 区(次要影响区)和 3 区(无影响区),基坑施工影响区域约为  $(0 \sim 2.5) H_e$ 。

**关键词** 城市轨道交通; 车站; 深基坑; 变形特性; 非平衡荷载

**中图分类号** U231.3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.03.011

## Analysis of Deformation Characteristics of Deep Foundation Pit in Urban Rail Transit Station under Unbalanced Load

LIU Tao, JIANG Lei, WANG Shen, PENG Hong-guo, LI Yan

(The Third Engineering Co., Ltd. of China Railway Seventh Group, 710032, Xi'an, China)

**Abstract** [Objective] At present, the underground engineering diseases and accidents caused by unbalanced load in urban rail transit are increasing gradually. In order to understand the adverse effect of unbalanced load on the deformation of

deep foundation pit in urban rail transit station and reduce the construction risk, it is necessary to analyze the deformation characteristics of station deep foundation pit under unbalanced load. [Method] Based on theoretical analysis and on-site monitoring data, the aforementioned deformation characteristics are studied, the changing law regarding the retaining pile deformation, the horizontal displacement of the deep soil and ground settlement is analyzed, and the interrelation between the retaining pile deformation and the deep soil horizontal displacement, the ground settlement and excavation depth is discussed.

[Result & Conclusion] The horizontal displacement curve of the retaining pile is fish-belly shaped, and the formation condition has obvious influence on the deformation of the retaining pile. There is a roughly linear relationship between the deformation of the retaining pile and the horizontal displacement of deep soil, and the empirical coefficient is proposed to be 1.30. Due to partial load, the ground settlement around the deep foundation pit is larger, and the relationship between the maximum horizontal displacement  $\delta_{hm}$  of the retaining pile and the maximum ground settlement  $\delta_{vm}$  is  $\delta_{vm} = (0.9 \sim 3.0) \delta_{hm}$ , and the proportional coefficient between them is greater than the value under symmetric load. The strong deformation resistance of rock strata limits the deformation of the retaining pile. There is a relationship of  $\delta_{hm} = (0.009\% \sim 0.060\%) H_e$  between  $\delta_{hm}$  and  $H_e$ , and the proportional coefficient between them is smaller than the value under symmetric load. The impact area of deep foundation pit construction on the surrounding environment is mainly divided into Zone 1 (main impact zone), Zone 2 (secondary impact zone) and Zone 3 (no impact zone), and the impact area of foundation pit construction is about  $(0 \sim 2.5) H_e$ .

**Key words** urban rail transit; station; deep foundation pit; deformation characteristics; unbalanced load

城市轨道交通基坑通常紧邻既有建(构)筑物、

\* 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2019014)

公路、铁路等设施,受到结构自重及上覆荷载的共同作用,在基坑两侧形成非平衡荷载。国内外对基坑工程的研究主要是针对对称荷载条件下展开的,对于偏压基坑还未形成一套完整的设计、计算与安全控制体系,且近年来由于偏压导致的地下工程病害、事故多次见诸报端。因此,开展非平衡荷载下城市轨道交通车站深基坑变形特性分析具有一定的理论与现实意义。

文献[1]认为基坑偏压侧围护结构水平位移、坑底隆起、地面沉降均大于非偏压侧,且偏压侧地面沉降为非偏压侧的 2 倍;文献[2]认为基坑偏压侧受力变形大于非偏压侧,当偏压荷载达到一定数值后,基坑会整体向非偏压侧偏移;文献[3]认为偏压荷载会引起基坑水平位移增加;文献[4]认为基坑偏压侧围护结构水平位移为非偏压侧的 3 倍,偏压侧路基沉降为非偏压侧的 2 倍。

综上,国内外学者对偏压作用下基坑围护结构变形、地面沉降及坑底隆起等特性进行了研究,但对于上软下硬地层非平衡荷载作用下围护结构变形特性,以及围护结构变形同土体水平位移和地面

沉降关系等的研究较少。本文以杭州某地铁车站深基坑为研究对象,基于现场监测数据,研究了上软下硬地层非平衡荷载作用下围护结构变形、地面沉降及土体水平位移变化规律,探讨了上软下硬地层非平衡荷载作用下围护结构变形同土体水平位移、地面沉降及开挖深度之间的关系,揭示了非平衡荷载作用下围护结构的变形机理。

## 1 杭州某地铁车站深基坑概况

### 1.1 工程概况

杭州某地铁车站深基坑周边环境较复杂,南侧为海鹏驾校、杭州之江专修学院,以及修建里东路时挖除山体后的留设边坡。边坡坡长约 178 m,坡脚距车站基坑边线约 3 ~ 12 m,坡顶距路面最大高差约 32 m。这样的地形不但使基坑存在较大偏压,而且车站主体结构开挖后,将形成较高的临空面。车站北侧西段临近上埠河和云秀水小区,北侧东段为拆迁地,周边环境与工程相互影响较大,对工程的安全施工和运营提出了挑战。基坑平面布置如图 1 所示。基坑支护设计剖面图如图 2 所示。

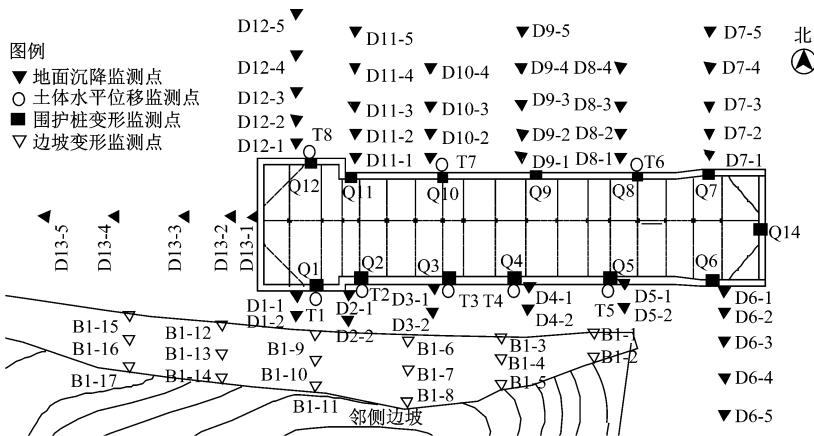


图 1 杭州某地铁车站基坑平面布置图

Fig. 1 Foundation pit layout plan of a metro station in Hangzhou

### 1.2 工程地质条件

根据勘察报告,基坑开挖范围内主要由填土、碎石夹黏性土、强风化泥岩、中风化上段泥岩和 中风化钙质泥岩等组成,分布较稳定。岩土层主要物理力学参数见表 1。

### 1.3 水文地质条件

地下水类型主要是第四纪松散岩类孔隙水。根据地下水的含水介质、赋存条件、水理性质和水力特征,可划分为孔隙潜水和基岩裂隙水。其中:孔隙潜水主要赋存于表层填土和碎石夹黏性土中,

由大气降水径流补给,排泄主要通过蒸发形式,水位一般为 1.65 ~ 4.80 m;基岩裂隙水水量受地形地貌、岩性、构造、风化影响较大,补给来源主要为上部第四系松散岩类孔隙潜水,其次为基岩风化层侧向径流,基岩裂隙较发育,有一定的赋水量,且径流缓慢。

### 1.4 支护方案设计

基坑开挖深度为 18.843 m。围护结构采用钻孔灌注桩 + 内支撑 + 吊脚桩的形式;钻孔灌注桩直径为 1.0 m;靠山侧围护桩长度为 13.370 m,远离山

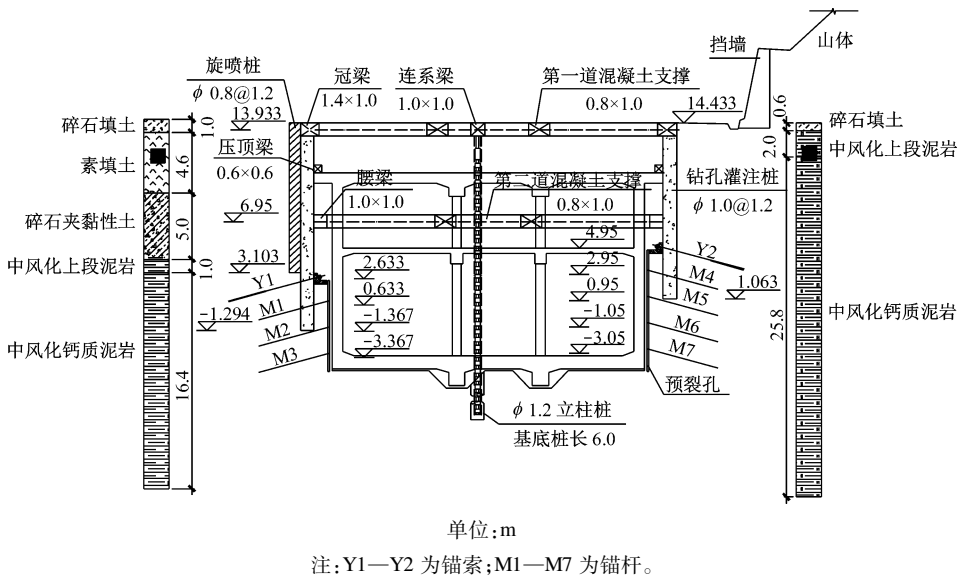


图2 基坑支护设计剖面图

Fig. 2 Profile of foundation pit support design

表1 岩土层主要物理力学参数

名称	天然重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa
碎石填土	18.7	3	16	2.65
素填土	18.5	17	10	2.60
碎石夹黏性土	20.2	3	33	18.00
中风化上段泥岩	24.0	150	33	不可压缩
中风化钙质泥岩	25.0	500	42	不可压缩

侧围护桩长度为15.727 m。靠山侧吊脚桩长度为9.233 m,远离山侧吊脚桩长度为6.916 m。支撑系

统采用钢筋混凝土支撑、预应力锚索和锚杆的形式,两道混凝土支撑截面尺寸均为0.8 m×1.0 m,第1道支撑中心线位于地面下0.5 m,第2道支撑中心线位于地面下7.483 m。基坑支护设计方案见图2。

2 深基坑监测结果与分析

2.1 围护桩水平位移

选取靠山侧与远离山侧围护桩水平位移监测点Q2、Q3、Q4、Q9、Q10和Q11进行研究。基坑开挖至坑底后的围护桩水平位移曲线见图3。

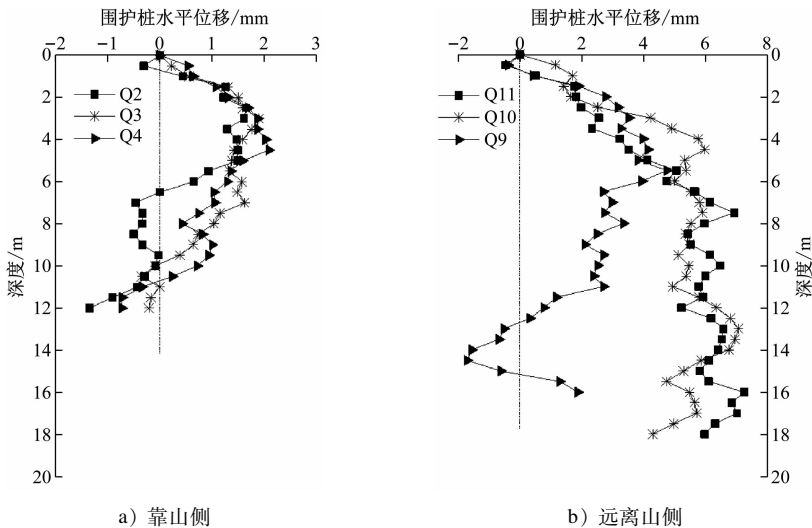


图3 基坑开挖至坑底后的围护桩水平位移曲线

Fig. 3 Horizontal displacement curve of retaining pile after the foundation pit excavation to the bottom

由图 3 可见:

1) 围护桩水平位移呈鱼腹状,即围护桩中部向基坑内凸出,顶部和底部变形相对较小。由于靠山侧地层主要为岩层,抵抗变形能力较好,故围护桩水平位移较小。

2) 靠山侧与远离山侧围护桩水平位移规律一致,靠山侧围护桩最大水平位移位于距地面 4 m ( $0.22H_e$ ,  $H_e$  为开挖深度)埋深处;远离山侧围护桩

最大水平位移位于距地面 7 m ( $0.38H_e$ )埋深处。究其原因因为基坑中下部为岩层,抵抗变形能力较好,造成围护结构产生最大水平位移的位置上移。

## 2.2 深层土体水平位移

选取靠山侧与远离山侧部分深层土体水平位移监测点 T2、T4、T6 和 T7 进行研究。基坑开挖至坑底后的深层土体水平位移曲线见图 4。

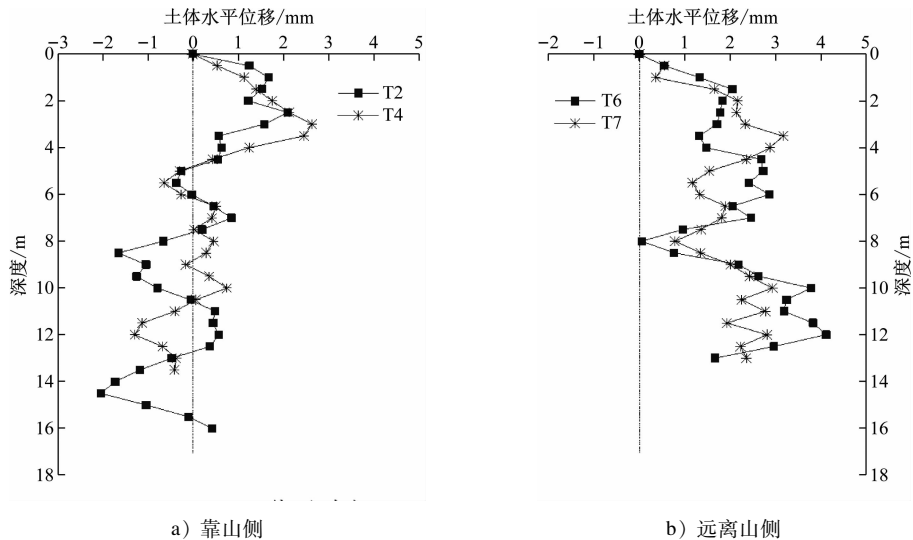


图 4 基坑开挖至坑底后的深层土体水平位移曲线

Fig. 4 Horizontal displacement curve of deep soil after the foundation pit excavation to the bottom

由图 4 可见:深层土体水平位移大致呈鱼腹状;由于靠山侧地层主要为岩层,抵抗变形能力强,故靠山侧土体深层水平位移较小;远离山侧中间段土体侧向变形较小,下段侧向变形较大,究其原因因为基坑下段锚杆为柔性支撑,相较于混凝土刚性支撑,其控制变形能力较差,故基坑下段土体侧向位移出现突变。

## 2.3 围护桩水平位移与深层土体水平位移的关系

为了解土体水平位移与围护桩水平位移之间的关系,选取围护桩水平位移监测点 Q2 和土体水平位移监测点 T2 进行研究。围护桩水平位移和土体水平位移的关系见图 5。

由图 5 可见:围护桩水平位移  $x$  和土体水平位移  $y$  大致呈线性关系,整条曲线大致可用  $y = kx$  ( $k$  为经验系数)来拟合,提出  $k = 1.30$ 。

对比实测数据,基坑开挖至坑底后围护桩水平位移最大值  $\delta_{hm}$  和土体水平位移最大值的关系,如图 6 所示。

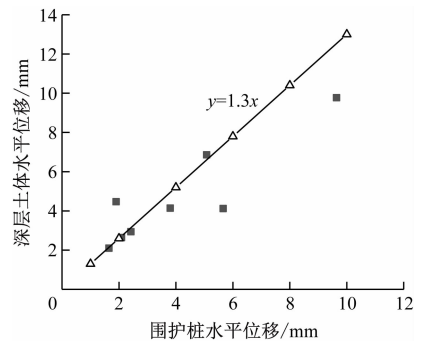


图 5 围护桩水平位移和深层土体水平位移关系曲线  
Fig. 5 Relation curve between the horizontal displacement of the retaining pile and deep soil

由图 6 可见: $\delta_{hm}$  和土体水平位移最大值的监测值分布于拟合曲线附近,说明拟合曲线较好地反映了围护桩水平位移与土体水平位移的关系,验证了该拟合曲线的准确性。由此可见,实际工程在与本工程地质条件相近的情况下,通过围护结构水平位移,可以预估基坑外土体水平位移。

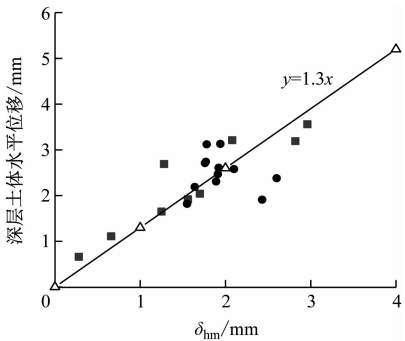


图6  $\delta_{hm}$ 和深层土体水平位移最大值拟合曲线  
Fig. 6 Fitting curve of the maximum horizontal displacement of the retaining pile and deep soil mass

2.4 围护桩水平位移和地面沉降的关系

基坑工程中围护桩水平位移与其周边地面沉降受到众多因素影响,基于监测数据总结两者之间的关系。基坑 $\delta_{hm}$ 与地面沉降最大值 $\delta_{vm}$ 的关系曲线见图7。

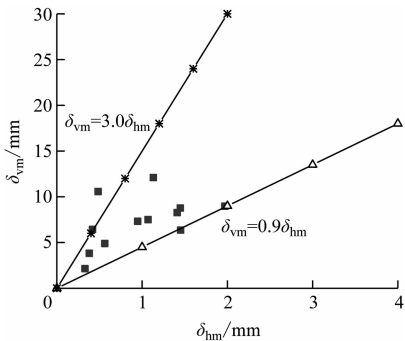


图7 基坑 $\delta_{hm}$ 与 $\delta_{vm}$ 关系曲线  
Fig. 7 Relation curve between the horizontal displacement of the retaining pile and maximum ground settlement

由图7可知: $\delta_{hm}$ 与 $\delta_{vm}$ 存在 $\delta_{vm} = (0.9 \sim 3.0)$

$\delta_{hm}$ 的关系。相较于文献[5]研究得出的 $\delta_{vm} = (0.5 \sim 1.0) \delta_{hm}$ ,以及文献[6]研究得出的 $\delta_{vm} = (0.2 \sim 0.6) \delta_{hm}$ ,本文分析得到的 $\delta_{vm}$ 与 $\delta_{hm}$ 的比值较大,导致此差异的主要原因为偏压荷载引起的地面沉降增大。

2.5  $\delta_{hm}$ 和 $H_e$ 的关系

$\delta_{hm}$ 与 $H_e$ 的关系曲线见图8。

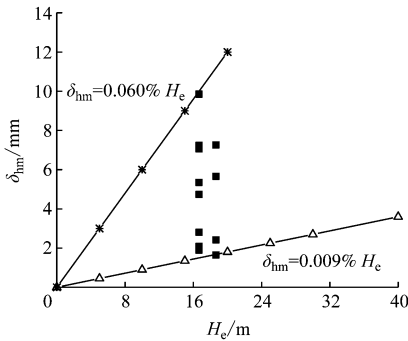


图8  $\delta_{hm}$ 与 $H_e$ 关系曲线  
Fig. 8 Relation curve between the maximum horizontal displacement of the retaining pile and excavation depth

由图8可知: $\delta_{hm}$ 与 $H_e$ 存在 $\delta_{hm} = (0.009\% \sim 0.060\%) H_e$ 的关系。相较于文献[7]研究得出的 $\delta_{hm} = 0.16\% H_e$ 及文献[8]研究得出的 $\delta_{hm} = 0.20\% H_e$ ,本文分析得到的 $\delta_{hm}$ 与 $H_e$ 的比值较小,导致此差异的主要原因在于基坑施工范围内的地层主要为岩层,其抵抗变形能力较强。

2.6 基坑外地面沉降

选取靠山侧与远离山侧地面沉降监测点D4、D5、D8和D9进行研究。基坑开挖至坑底后周边地面沉降曲线见图9。

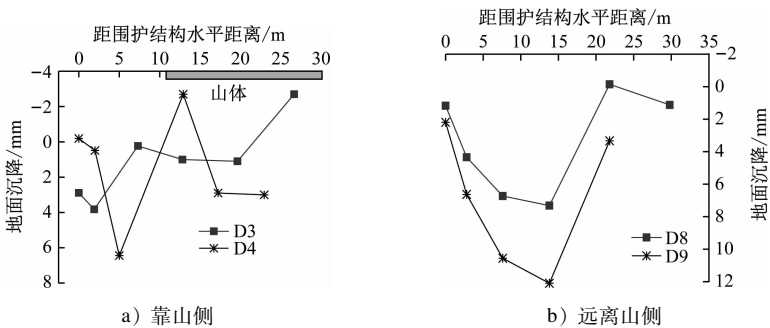


图9 基坑开挖至坑底后周边地面沉降  
Fig. 9 Surrounding ground settlement after the foundation pit excavation to the bottom

由图9可知:基坑周边地面沉降大致呈漏斗状;靠山侧距围护结构约5 m处,地面沉降达到最大值,随着距围护结构的距离增大,地面沉降逐渐减

小,甚至出现了隆起现象;远离山侧距离围护结构约13 m处,地面沉降达到最大值,随着距围护结构的距离增大,地面沉降逐渐减小。



## 2.7 基坑施工对周边土体的影响

目前对基坑施工过程中其周边土体变形,以及土体深处影响范围的相关研究较少。基坑周边土体主要分为3个影响区域:主影响区域、次影响区域和无影响区域。基坑施工对周边土体的影响范围如图10所示。

图10中,GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》将基坑施工对周边环境的扰动区域划分为:①区(主要影响区)、②区(次要影响区)和③区(无影响区)。其中:①区和②区的分界点距基坑边缘的距离为 $0.70H_e$ ,②区和③区的分界点距基坑边缘的距离为 $2.00H_e$ 。文献[9]以上海软土地区为例,认为基坑施工对周边环境的影响区域主要分为:I区(主要影响区)、II区(次要影响区)和III区(无影响区)。其中:I区和II区的分界点距基坑边缘的距离为 $0.75H_e$ ,II区和III区的分界点距基坑边缘的距离为 $2.00H_e$ 。本文根据实测结果,将基坑施工对周边环境的影响区域划分为1区(主要影响区)、2区(次要影响区)和3区(无影响区)。其中:1区根据0.3倍土体最大变形等值线简化而得,当其超过2区后,基坑施工对周边环境几乎无影响。本工程中1区和2区的分界点距基坑边缘的距离为 $0.75H_e$ ,2区和3区的分界点距基坑边缘的距离为 $2.50H_e$ ,且2区和3区的分界点距基坑边缘的距离大于GB 50911—2013和文献[9]研究的最大影响区域( $2.00H_e$ ),究其原因为桩锚围护结构加大了锚索、锚杆对周边土体的影响,以及山体严重偏压作用增大了基坑施工的影响区域。

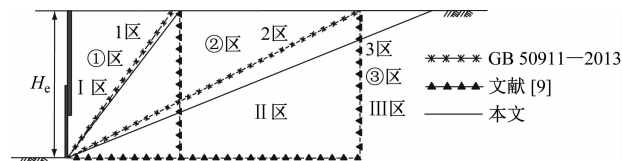


图10 基坑施工对周边土体的影响范围

Fig. 10 Impact area of foundation pit excavation on surrounding soil mass

## 3 结论

1) 针对上软下硬地层,围护桩与土体水平位移曲线大致呈鱼腹状,靠山侧围护桩最大水平位移位于距地面 $4\text{ m}$ ( $0.22H_e$ )埋深处,远离山侧围护桩最大水平位移位于距地面 $7\text{ m}$ ( $0.38H_e$ )埋深处。究其原因为基坑中下部为岩层,抵抗变形能力较好,且

柔性支撑控制变形弱于刚性支撑。

2) 围护桩水平位移和土体水平位移大致呈线性关系,其关系曲线可采用 $y = kx$ ( $k$ 取1.30)来拟合。

3) 基坑周边地面沉降大致呈漏斗状;靠山侧距围护结构约 $5\text{ m}$ 处,地面沉降达到最大值,随着距围护结构的距离增大,地面沉降逐渐减小,甚至出现隆起现象;远离山侧距围护结构约 $13\text{ m}$ 处,地面沉降达到最大值,随着距围护结构的距离增大,地面沉降逐渐减小。

4) 基坑施工对周边环境影响主要划分为1区(主要影响区)、2区(次要影响区域)和3区(无影响区),其中,1区和2区的分界点距基坑边缘的距离为 $0.75H_e$ ,2区和3区的分界点距基坑边缘的距离为 $2.50H_e$ 。

## 参考文献

- [1] 马俊. 偏压荷载非等深基坑开挖的变形规律[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(11): 99.  
MA Jun. Study on the deformation law of bias load foundation pit with unequal depths [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(11): 99.
- [2] 刘波, 章定文, 席培胜. 偏压基坑工程设计、施工与受力变形特性研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 791.  
LIU Bo, ZHANG Dingwen, XI Peisheng. Review on design, construction, stress and deformation characteristics of asymmetrically loaded deep excavation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 791.
- [3] 张杰, 张礼仁, 张绍华. 徐州地铁1号线临河车站基坑的变形特性研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊2): 113.  
ZHANG Jie, ZHANG Liren, ZHANG Shaohua. A study on deformation characteristics of foundation pit for Xuzhou metro station near the river [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 113.
- [4] 汪东林, 汪磊. 紧邻既有高速公路偏压地铁深基坑围护结构变形监测与数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(11): 91.  
WANG Donglin, WANG Lei. Study on field monitoring and numerical simulation of deformation of deep foundation pit retaining structure under unsymmetrical load condition adjacent to existing highway [J]. Building Structure, 2015, 45(11): 91.
- [5] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ wall [J]. Geotechnical Special Publication, 1990 (25): 439.
- [6] WANG Z W, NG C W, LIU G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1243.

(下转第69页)

# 导轨式胶轮车辆传动轴失效原因分析与优化设计

杨 怡 谭志成 康 飞 张 鑫 刘赛武

(比亚迪机电设备有限公司, 518118, 深圳)

**摘 要** [目的] 导轨式胶轮车辆传动轴的结构可靠性对列车运行安全性至关重要。该车辆在某条城市轨道交通线路上进行冰雪试验时, 多次出现传动轴断裂现象而导致失效。因此需分析传动轴失效原因, 并对其进行优化设计。[方法] 从传动轴失效断面宏观检测及失效件材料理化检测两方面分析了传动轴断裂的原因。采用无线扭矩测试系统对该条线路五号站—六号站、五号站—七号站区间传动轴的实时载荷进行了测试, 并分析其测试结果。优化了传动轴结构设计。对优化后的传动轴台架进行了强度测试, 以及对优化后的传动轴进行了疲劳试验。[结果及结论] 传动轴断裂的原因为: 十字轴的过载脆性断裂和双联轴套的疲劳断裂。两个区间的测试结果显示: 传动轴的最大扭矩均出现在车辆打滑状态下, 其实际扭矩虽小于设计的最大工作扭矩, 但由于扭矩短时间内发生变化时, 其受到的冲击能量远大于正常工况下的扭矩变化值。传动轴结构的优化措施为: 增大十字轴的轴径, 在十字轴圆弧过渡处增大倒圆角, 进一步减小应力集中; 通过在双联轴套上增加加强筋, 提高双联轴套轴肩部的强度。优化后的传动轴台架强度测试表明, 满足设计要求; 优化后的传动轴疲劳试验表明, 试验合格。

**关键词** 导轨式胶轮车辆; 传动轴; 失效原因; 优化设计

**中图分类号** U270.332

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.03.012

## Failure Cause Analysis and Optimization Design of the Transmission Shaft for Guideway Rubber-tyred Vehicle

YANG Yi, TAN Zhicheng, KANG Fei, ZHANG Xin, LIU Saiwu

(BYD Electro-Mechanical Equipment Co., Ltd., 518118, Shenzhen, China)

**Abstract** [Objective] The structural reliability of the transmission shaft of guideway rubber-tyred train is crucial to the safety of train operation. During the ice and snow test on a certain urban rail transit line, the guideway rubber-tyred train failed several times resulting from the fracture of the transmission shaft. Therefore, it is necessary to analyze the fracture causes of the transmission shaft and optimize its design.

[Method] The causes of the fracture of the transmission shaft are analyzed from two aspects: macroscopic detection of the

failure shaft section, physical and chemical detection of the failure material. A wireless torque test system is used to test the real-time load of the transmission shaft between stations 5-6 and stations 5-7 on the line. The test results are analyzed, and the structure of the transmission shaft is optimized. The strength test on the optimized transmission shaft bench and the fatigue test on the optimized transmission shaft are carried out respectively. [Result & Conclusion] The causes of transmission shaft fracture are identified as the overload brittle fracture of cross shaft and fatigue fracture of double coupling bushing. The test results from the above two line sections show that all the maximum torques of the shaft occur when the vehicle is slipping. Though the actual torque of transmission shaft is less than the designed maximum working torque, the impact energy on the shaft is much larger than the torque change value under normal working conditions because the torque changes within a very short time. The measures that are taken to optimize the transmission shaft structure are as follows: increasing the shaft diameter of the cross shaft, increasing the chamfer angle of the cross shaft arc transition, and further reducing the stress concentration. The strength of the shaft shoulder of the double coupling bushing is increased by adding the reinforcing rib on it. The strength test on the optimized transmission shaft bench shows that it meets the design requirements and passes its fatigue test.

**Key words** guideway rubber-tyred vehicle; transmission shaft; failure cause; optimization design

导轨式胶轮车辆(见图1)是一种新型的低运量轨道交通车辆,已在重庆、深圳、长沙等多个城市投入运营。车辆走行轮和导向轮均采用橡胶轮胎,轨道为双列布置的混凝土梁或钢梁,两轨道中间设置导向系统。导轨式胶轮车辆传动轴是传动系统的主要部件,主要用于将牵引电机产生的牵引力或电制动力经变速箱传递至左右车轮,以保证整车动力系统正常运行。传动轴采用双联式胡克万向节(见图2)。目前,导轨式胶轮车辆传动轴尚无成熟的受

2) 通过在双联轴套上增加加强筋,以提高双联轴套轴肩部的强度。对双联轴套进行疲劳寿命仿真分析。优化后的双联轴套应力云图见图7。由图7可见:双联轴套的最大应力为275.2 MPa,满足设计要求。

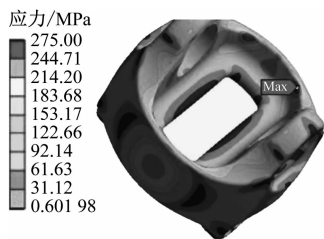


图7 优化后的双联轴套应力云图

Fig. 7 Stress cloud diagram of optimized double coupling bushing

### 4.3 台架测试

按照第4.1节中的方法,对优化后的传动轴台架进行了强度测试,满足设计要求。对优化后的传动轴进行疲劳试验,在完成两阶段测试后台架未出现损坏,表明试验合格。

## 5 结语

通过上述分析,确定了传动轴失效的主要原因因为疲劳断裂。运用无线扭矩测试方法研究了传动轴在不同工况下的载荷动态特性。试验结果表明,在车辆发生打滑时,传动轴受到较大冲击,影响了传动轴寿命。

通过传动轴受力分析,对其设计载荷参数进行了修正,并对设计工况进行了完善。对传动轴结构进行了优化,对存在应力集中的部位进行了加强,提升了传动轴的强度和耐久寿命。针对车辆打滑问题,对轨道梁结构进行了优化,同时对车辆增加

了防滑设计。

## 参考文献

- [1] 徐衡. 汽车传动轴断裂分析及其改进[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(2): 98.  
XU Heng. Fracture analysis and improvement of automobile transmission shaft [J]. Machine Design & Research, 2017, 33(2): 98.
- [2] 孟林昆, 李鹏. 载货汽车传动轴最大工作扭矩计算方法[J]. 汽车实用技术, 2016(4): 26.  
MENG Linkun, LI Peng. Truck drive shaft maximum torque calculation method [J]. Automobile Applied Technology, 2016(4): 26.
- [3] 范童柏, 任尊松, 王文静, 等. 动车组制动盘螺栓载荷测试及疲劳损伤研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(14): 80.  
FAN Tongbai, REN Zunsong, WANG Wenjing, et al. Study on bolt load test and fatigue damage of brake discs of EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(14): 80.
- [4] 杨震立, 蓝盈照. 大型货车传动轴总成的强度分析及改进[J]. 机械设计与制造, 2013(4): 56.  
YANG Zhenli, LAN Yingzhao. Strength analysis and improvement of large trucks drive shaft assembly [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(4): 56.
- [5] 张冰战, 牛占占, 邵丽君. 实测载荷谱下传动轴疲劳寿命研究[J]. 机械设计与制造, 2020(10): 119.  
ZHANG Bingzhan, NIU Zhanzhan, TAI Lijun. Fatigue life research of transmission shaft based on testing load [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(10): 119.

· 收稿日期:2023-05-22 修回日期:2023-06-28 出版日期:2024-03-10  
Received:2023-05-22 Revised:2023-06-28 Published:2024-03-10  
· 通信作者:杨怡,工程师,894628748@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64页)

- [7] YOO C. Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3): 225.
- [8] LEUNG E H Y, NG C W W. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(2): 129.
- [9] 丁勇春, 王建华. 深基坑施工对高架基础的变形影响及控制研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 155.

DING Yongchun, WANG Jianhua. Influence of deep excavation on deformation of elevated bridge foundations and countermeasures [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 155.

· 收稿日期:2021-09-15 修回日期:2021-10-26 出版日期:2024-03-10  
Received:2021-09-15 Revised:2021-10-26 Published:2024-03-10  
· 通信作者:刘涛,工程师,lc0230@126.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