

# 深基坑开挖对邻近高铁路基变形的影响及隔离桩加固效果分析<sup>\*</sup>

宋福贵

(上海同济工程咨询有限公司, 200092, 上海//工程师)

**摘 要** 针对深基坑开挖对邻近铁路路基产生的较大影响, 以上海轨道交通机场联络线 1 号风井基坑为例, 采用数值模拟方法, 研究基坑开挖对邻近沪杭高铁无砟轨道桩板结构路基变形的影响, 提出施作隔离桩的防护加固方案。数值分析结果表明: 高铁无砟轨道桩板结构路基桩基水平变形模式随其与基坑距离的增加由弓形变为悬臂形; 施作隔离桩后, 基坑开挖引起的高铁无砟轨道桩板结构路基桩基和承载板变形量显著减小。结合实测数据, 1 号风井基坑实际开挖完成后路基竖向变形控制在  $\pm 2$  mm 以内, 部分测点的路基水平变形略超过工程报警值, 最大值为  $-3.3$  mm, 但在开挖期间相应高铁区段限速 120 km/h 条件下, 仍能满足高铁路基结构安全运营的变形要求。

**关键词** 高铁; 路基变形; 深基坑开挖; 隔离桩; 加固效果  
**中图分类号** U213.1<sup>+</sup>5; U238

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.022

## Influence of Deep Foundation Pit Excavation on Deformation of Adjacent High-speed Railway Subgrade and Isolation Pile Reinforcement Performance Analysis

SONG Fugui

**Abstract** Aiming at the problem that the deep foundation pit excavation has a great impact on the adjacent high-speed railway subgrade, taking Shanghai Rail Transit Airport Link Line No. 1 shaft foundation pit as example, numerical simulation is adopted to study the influence of foundation pit excavation on the deformation of adjacent Shanghai-Hangzhou high-speed railway ballastless track pile-slab structure subgrade. Protection reinforcement scheme of isolation pile construction is proposed. Numerical analysis results show that: the horizontal deformation of pile foundation of high-speed railway ballastless track pile-slab structure subgrade changes from bow shape to cantilever shape with the increase of distance from foundation pit; when the isolation piles are used, the excavation of foundation

pit causes significant reduction in the deformation of pile foundation and bearing plate of the high-speed railway ballastless track pile-slab structure. With the field measured data, the vertical deformation of the subgrade is controlled within  $\pm 2$  mm after the actual excavation of No. 1 air shaft foundation pit. The horizontal deformation of the subgrade at some measuring points slightly exceeds the engineering alarm value, and the maximum value is  $-3.3$  mm. However, under the condition that the speed limit of the corresponding high-speed rail section is 120 km/h during the excavation, the deformation requirements for the safe operation of the high-speed railway subgrade structure can still be met.

**Key words** high-speed railway; subgrade deformation; deep foundation pit excavation; isolation pile; reinforcement performance

**Author's address** Shanghai Tongji Engineering Consulting Co., Ltd., 200092, Shanghai, China

当前, 由于城市土地资源的紧张和地下空间综合开发利用的需要, 一些基坑工程常邻近铁路营业线设置<sup>[1-5]</sup>。基坑开挖会造成周围土体应力环境变化, 进而引发邻近铁路轨下基础结构变形<sup>[2]</sup>。如何有效地控制邻近工程对铁路线下结构及行车安全的影响, 正受到越来越多的关注。

文献[6]采用有限元方法研究了基坑开挖对邻近铁路路基变形的影响, 得到基坑开挖引起周围土体沉降的主要范围为开挖深度的 0.5 ~ 2.0 倍。文献[7]通过数值模拟, 分析了锚桩加固下基坑开挖引起的邻近高铁结构的变形规律。文献[8]依托实际工程结合数值分析研究了钢板桩围堰支撑方式对既有高铁路基变形的控制效果。文献[9]通过在基坑外设置钻孔灌注桩与旋喷止水桩, 以减少地铁车站基坑开挖对既有铁路的变形影响。但目前国

<sup>\*</sup> 上海市科委重点支撑项目(19DZ1201000)

内外针对小净距邻近既有高速铁路无砟轨道的深基坑工程的研究鲜见报道。

本文依托小净距并行沪杭高铁的上海轨道交通机场联络线(以下简称“机场线”)1号风井深基坑工程,采用Plaxis 3D有限元软件分析了基坑开挖对邻近高铁路基的变形影响,并提出了防护加固方案。结合现场实测数据,研究隔离桩加固下基坑开挖对邻近高铁路基的实际变形控制效果,可为类似工程提供参考与借鉴。

### 1 工程概况

机场线连接上海虹桥国际机场与上海浦东国际机场,是实现城郊机场与市中心区交通的快速换乘重点工程。1号风井深基坑作为机场线明挖过渡段的关键节点,其开挖深度为25.5 m,平面尺寸为30 m×25 m,基坑与沪杭高铁路基坡脚最近距离为10.7 m。1号风井基坑与沪杭高铁的平面位置关系如图1所示。沪杭高铁为无砟轨道路基,采用的桩板结构为0.5 m厚C30混凝土板,板底远离基坑侧采用 $\phi$  0.6 m@3 m钻孔桩加固,桩长约33 m;基坑另一侧3.9 m宽范围内采用 $\phi$  0.5 m@1.2 m水泥搅拌桩+厚0.50 m碎石垫层加固,桩长6.0 m,均按正方形布置。

1号风井基坑支护结构采用C35地连墙+内支撑的形式,地连墙厚1.5 m、深52 m;竖向设置6道支撑,其中第1、3、4、5道为混凝土支撑,其余为钢支撑。第1道支撑横截面尺寸为0.8 m×0.8 m,第3、4、5道支撑横截面尺寸均为1.2 m×1.2 m;钢支撑为 $\phi$  0.8 m,壁厚16 mm。围护结构底部设置1层

厚5 m的N-Jet(大直径高压旋喷桩)人造隔水层,同时在坑底设置厚4 m的RJP(大直径旋喷桩)人造隔水层兼作坑底加固。1号风井基坑与沪杭高铁剖面关系如图1 b)所示。基坑各土层力学指标见表1。其中:③<sub>1</sub>、④<sub>1</sub>淤泥质黏土具有渗透性低、高

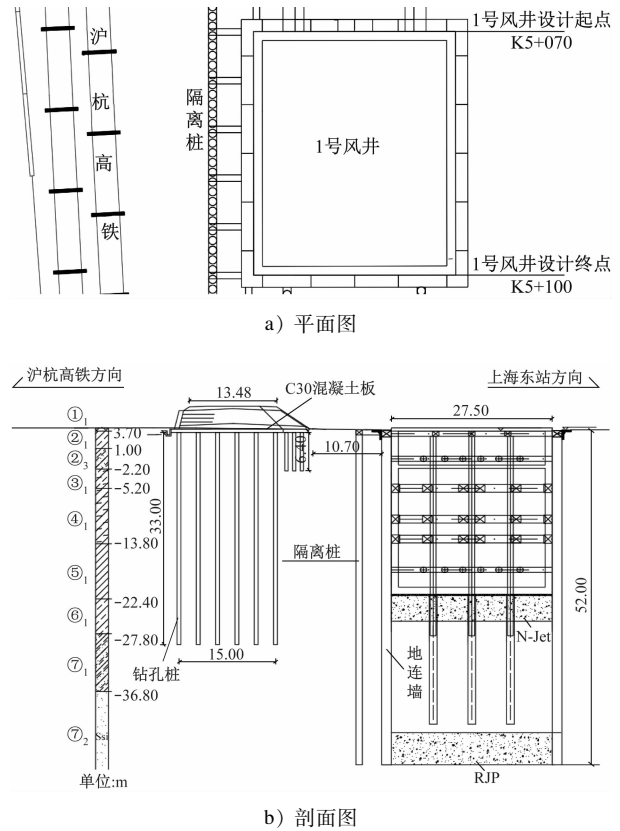


图1 1号风井基坑与沪杭高铁路基位置关系示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of position relation between foundation pit of No. 1 air shaft and subgrade of Shanghai-Hangzhou High-speed railway

表1 1号风井基坑与沪杭高铁路基工程场地土层分布及物理力学参数

Tab. 1 Soil layer distribution and physical and mechanical parameters of engineering site of No. 1 air shaft and subgrade of Shanghai-Hangzhou High-speed railway

地层编号	名称	层厚/m	天然含水量/%	体积质量/(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	压缩模量/MPa
① <sub>1</sub>	人工填土	1.6						
② <sub>1</sub>	粉质黏土	2.9	32.14	1.90	0.91	17.15	20.08	4.56
② <sub>3</sub>	砂质粉土	2.4	29.25	1.93	0.82	28.70	6.80	10.66
③ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土	2.1	42.55	1.77	1.20	17.93	12.40	3.32
④ <sub>1</sub>	淤泥质黏土	9.0	47.09	1.74	1.33	12.57	13.22	2.55
⑤ <sub>1</sub>	黏土	10.5	38.21	1.80	1.10	16.23	15.33	3.63
⑥	粉质黏土	1.5	25.32	1.98	0.73	16.00	42.00	6.98
⑦ <sub>1</sub>	砂质粉土	11.0	26.95	1.94	0.77	31.38	10.04	10.69
⑦ <sub>2</sub>	粉砂		24.56	1.97	0.71	32.52	3.33	13.45

灵敏度、高压缩性、低强度等特点,且在基坑开挖过程中易出现较大变形。

为减小基坑开挖对邻近高铁线路的影响,采用隔离桩加固方案,在地连墙外侧 3 m 位置施作 1 排  $\phi$  1.0 m@1.2 m、长 52 m 的 C30 钻孔隔离桩。隔离桩桩顶设置宽 1 m、高 0.8 m 的冠梁,并与地连墙的顶冠梁采用连系梁连接;连系梁横截面尺寸为 0.8 m×0.8 m,水平间距为 6 m。

## 2 1 号风井基坑开挖对邻近沪杭高铁路基变形的影响

### 2.1 基坑三维有限元数值模型

利用有限元软件 Plaxis 3D 建立邻近沪杭高铁路基的机场线 1 号风井基坑的三维有限元数值模型,包括土层、基坑支护结构、高铁桩板结构路基。1 号风井基坑平面尺寸为 30 m×25 m,开挖深度为 25.5 m。为尽量消除模型边界效应的影响,模型的平面尺寸取 240 m×200 m,深度方向取约 5 倍的基坑开挖深度,有限元模型示意如图 2 所示。

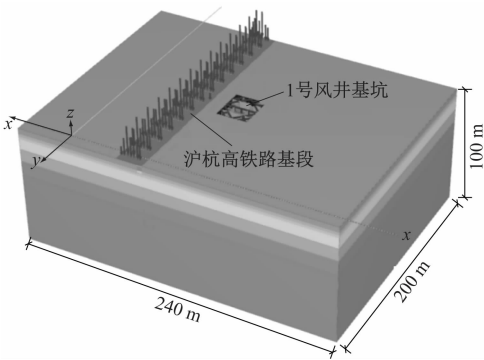


图2 1 号风井基坑并行沪杭高铁有限元模型示意图  
Fig.2 Schematic diagram of finite element model of No. 1 air shaft foundation pit parallel Shanghai-Hangzhou High-speed Railway

1 号风井基坑三维有限元模型中结构尺寸及参数按照工程实际情况选取。其中,地连墙采用板单元和线弹性本构模型进行模拟,地连墙与周围土体之间添加界面单元以模拟墙土间的相互作用;支撑、格构柱、立柱桩、隔离桩及连系梁均采用线弹性本构模拟;高铁路基底部的钻孔灌注桩采用线弹性本构模拟,路基承载板采用线弹性实体单元模拟。上述结构均采用 C30 混凝土。路基基床表层为级配碎石,基床底层及基床以下路堤采用 A、B 组填料。其中,A、B 组填料参数按照设计值取值为:重

度 20 kN/m<sup>3</sup>,黏聚力 10 kPa,内摩擦角 30°。  
土体选用 HSS(小应变土体硬化)本构模型。结合岩土工程勘察报告,土体的本构模型部分计算参数如表 2 所示。

表2 1 号风井基坑土层 HSS 本构模型计算参数  
Tab.2 Partial calculation parameters of HSS constitutive model

土层	厚度/ m	$c_e$ / kPa	$\phi_e$ / (°)	压缩模量/ MPa	$G_{0,ref}$ / MPa	$\gamma_{0.7}$
② <sub>3</sub>	2.4	6.8	28.7	10.66	213.20	0.20
③ <sub>1</sub>	2.1	12.4	17.9	3.32	73.21	0.15
④ <sub>1</sub>	9.0	13.2	12.6	2.55	67.55	0.19
⑤ <sub>1</sub>	10.5	15.3	16.2	3.63	80.04	0.16
⑥	1.5	42.0	16.0	6.98	153.91	0.17
⑦ <sub>1</sub>	11.0	10.0	31.4	10.69	213.80	0.20
⑦ <sub>2</sub>		3.3	32.5	13.45	269.00	0.20

注: $C_e$  为土体的有效黏聚力; $\phi_e$  为土体的有效内摩擦角; $G_{0,ref}$  为小应变刚度试验的参考初始剪切模量; $\gamma_{0.7}$  为小应变刚度试验中,当割线剪切模量衰减为 0.7 倍的初始剪切模量时对应的剪应变。

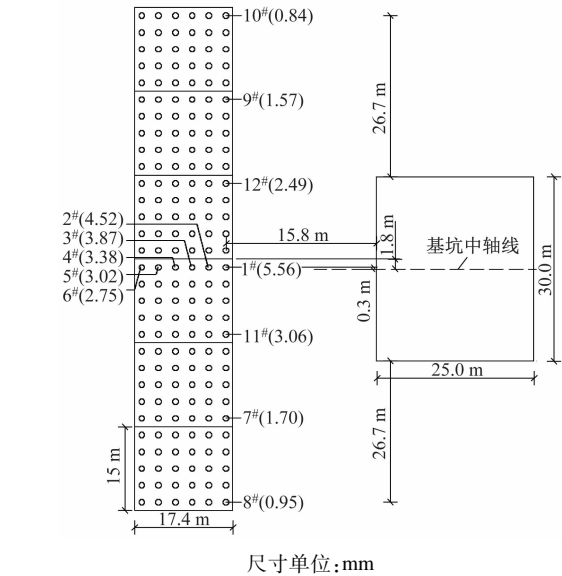
通过冻结与激活单元模拟基坑开挖与各结构施工,并在基坑内设置水位线来模拟基坑降水过程。数值模拟仅考虑基坑开挖阶段中基坑发生的变形及其对沪杭高铁路基的影响。针对 1 号风井基坑开挖阶段,数值模拟中设置了 10 个分析步骤:①初始地应力平衡;②施作既有高铁路基,包括桩基、承载板、路基及轨道列车等效面荷载、搅拌桩加固区及碎石垫层等;③施作地连墙、立柱桩等,并进行坑内土体加固(若为隔离桩加固工况,在此步施作隔离桩);④土体开挖至 -1.0 m,坑内水位线降至 -1.5 m;⑤施作第 1 道支撑,土体开挖至 -4.9 m,坑内水位线降至 -5.4 m;⑥施作第 2 道支撑,土体开挖至 -9.5 m,坑内水位线降至 -10 m;⑦施作第 3 道支撑,土体开挖至 -14.3 m,坑内水位线降至 -14.8 m;⑧施作第 4 道支撑,土体开挖至 -17.4 m,坑内水位线降至 -17.9 m;⑨施作第 5 道支撑,土体开挖至 -22.2 m,坑内水位线降至 -22.7 m;⑩施作第 6 道支撑,土体开挖至 -25.5 m,坑内水位线降至 -26 m。

### 2.2 基坑开挖引起的高铁路基变形规律

根据本工程设计文件及文献[10-11],针对沪杭高铁桩板结构路基,选取桩基(钻孔桩)水平变形  $\pm 6$  mm 作为基坑开挖引起桩基水平变形的控制指

标;选取  $\pm 2\text{ mm}$  作为基坑开挖引起路基(含承载板)变形的工程报警指标。除此之外,约定桩基或路基发生指向基坑方向的变形为正,反之为负;路基发生沉降为负,隆起为正。

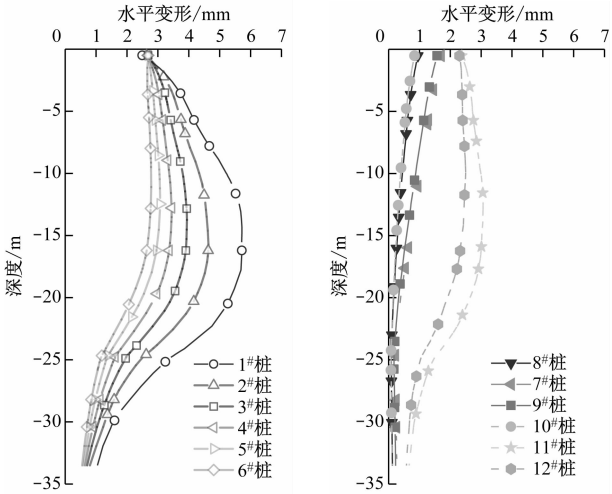
分析无隔离桩加固下基坑施工引起的高铁桩板结构路基变形规律。1号风井基坑开挖过程中,路基桩基发生朝向基坑方向的水平变形。基坑开挖完成后,选取距基坑中轴线最近的1排桩基(编号为1<sup>#</sup>—6<sup>#</sup>)和1列桩基(编号为1<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>—12<sup>#</sup>)为分析对象,统计各桩基的最大水平变形(见图3),并选取典型桩基绘制其随深度的变形规律(见图4)。由图3~4可知,桩基水平变形模式随着与基坑距离的增加由弓形变为悬臂形;水平变形最大的桩基为距离基坑外边缘和中轴线最近的1<sup>#</sup>桩基,其距基坑地连墙外侧15.8 m,距基坑中轴线0.3 m。1<sup>#</sup>桩基水平变形最大值为5.56 mm,满足高铁路基桩基水平变形允许限值。



注:括号内的数字为桩基水平变形最大值。

图3 桩板结构路基桩基水平变形最大值统计  
Fig. 3 Maximum horizontal deformation of pile-slab structure foundation subgrade and deformation law with depth

图5和图6分别为靠近基坑一侧的承载板边缘在各开挖深度 $H$ 下的水平和竖向变形分布。本研究认为路基同承载板协调变形。由图5~6可知,承载板在邻近基坑开挖影响下的水平变形与距基坑中轴线距离呈负相关,且该变形随开挖深度增加而增加;基坑开挖完成时(即 $H=25.5\text{ m}$ ),路基承载板水平变形最大值为3.10 mm,该变形位于距基坑



a) 离基坑中轴线最近的1排桩基      b) 远离基坑中轴线的桩基  
图4 桩板结构路基桩基水平变形随深度变化曲线

Fig. 4 Curve of maximum horizontal deformation of pile-slab structure foundation subgrade and deformation law with depth

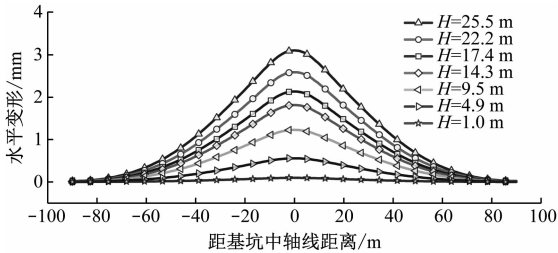


图5 不同开挖深度下路基承载板的水平变形  
Fig. 5 Horizontal deformation of subgrade bearing plate at different excavation depths

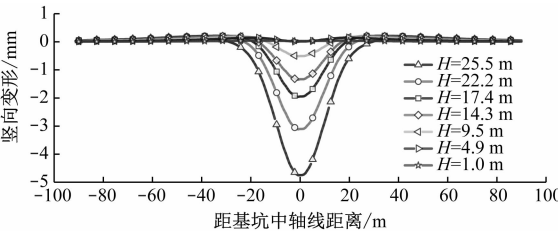


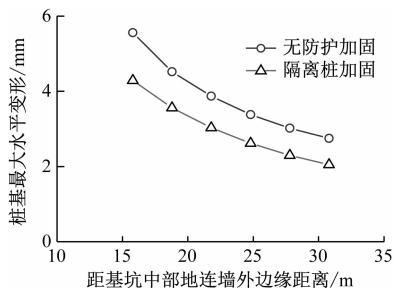
图6 不同开挖深度下路基承载板的竖向变形  
Fig. 6 Vertical deformation of subgrade bearing plate at different excavation depths

中轴线最近的承载板的边缘处;承载板沉降值随着开挖深度的增大而增大,其竖向变形最大值为 $-4.75\text{ mm}$ ,位于距基坑中轴线最近的承载板边缘处。

### 3 隔离桩加固后高铁路基变形控制效果分析

由以上计算结果可知,1号风井基坑在不施作

隔离桩加固时,由开挖引起的高铁桩板结构路基承载板水平与竖向变形均超过了工程报警值,因此需要采取加固措施使结构变形满足要求。本工程采用隔离桩加固措施对其进行数值分析,并与未施作隔离桩加固措施的工况进行比较,如图 7~9 所示。



注:路基桩基离基坑中轴线最近,其距离为 0.3 m。

图 7 有隔离桩下路基桩基最大水平变形对比曲线

Fig. 7 Curve comparison of maximum horizontal deformation of the pile foundation of subgrade with or without isolation pile

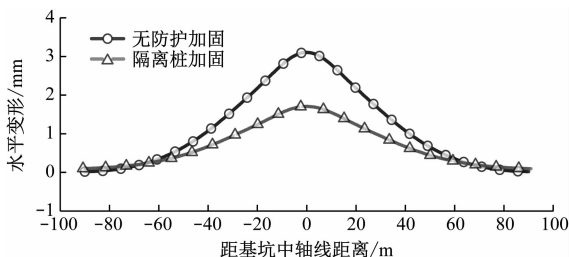


图 8 有隔离桩下承载板水平变形对比曲线

Fig. 8 Curve comparison of horizontal deformation of the bearing plate with or without isolation pile

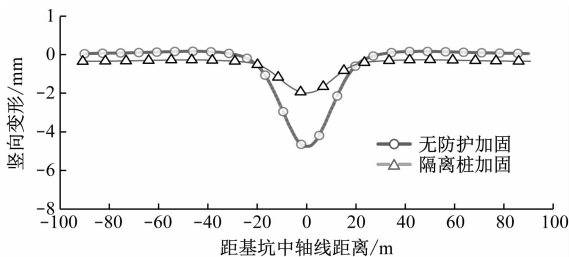


图 9 有隔离桩下承载板竖向变形对比曲线

Fig. 9 Curve comparison of vertical deformation of the bearing plate with or without isolation pile

由图 7 可知,开挖完成后距基坑中轴线最近的 1 列高铁桩基水平变形最大值与距基坑外边缘距离呈负相关;而施作与未施作隔离桩工况下,距基坑中部地连墙外边缘距离最近的高铁桩基水平变形最大值分别为 4.29 mm 和 5.56 mm,均未超过 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》规定的变形允许限

值,但施作隔离桩工况下高铁桩基水平变形总体有较为明显的改善。由图 8~9 可知,未施作隔离桩时,开挖完成后路基承载板水平变形最大值为 3.10 mm,承载板竖向变形最大值为 -4.75 mm,基坑开挖引起高铁路基承载板的变形超过了工程报警值。施作隔离桩时,路基承载板水平变形最大值为 1.71 mm,承载板竖向变形最大值为 -1.99 mm,均未超过工程报警限值。因此,深基坑开挖过程中,施作隔离桩防护加固对高铁路基桩基与承载板最大变形均有较大幅度的改善,且均满足限值规定。

取沪杭高铁下行线中对应 1 号风井基坑周边 6 个路基监测点的实测数据,绘制基坑开挖完成后桩板结构路基实测变形图,如图 10 所示。由图 10 可以看出,1 号风井基坑开挖完成后路基竖向变形控制在  $\pm 2$  mm 以内,而部分测点处的路基水平变形略超过工程报警值,最大值为 -3.3 mm;基坑开挖至 6 m,相应高铁区段进行了限速(120 km/h)后,仍然能够满足高铁路基结构线下变形要求,高铁运营安全得到了保障。

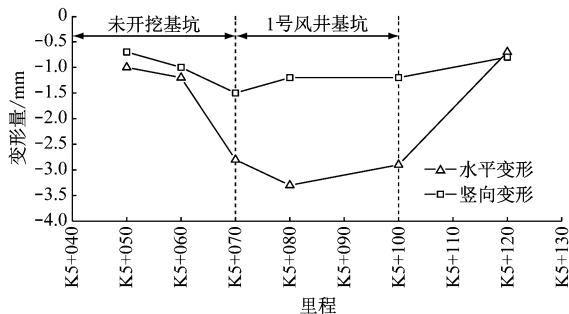


图 10 基坑开挖完成后桩板结构路基实测变形曲线

Fig. 10 Curve of measured deformation of the pile-slab subgrade after excavation

## 4 结论

1) 1 号风井基坑开挖引起既有高铁桩板结构路基产生变形,其中桩基水平变形模式随距基坑距离的增加由弓形变为悬臂形。承载板各方向上的变形大小与距基坑外边缘距离呈负相关,且变形随开挖深度增加而增加。

2) 数值计算结果表明,若不采取辅助防护加固措施,基坑开挖完成后,高铁桩板结构路基桩基水平变形最大值为 5.56 mm,承载板水平变形最大值为 3.10 mm,承载板竖向变形最大值为 -4.75 mm。由此可见,基坑开挖引起的既有高铁路基承载板变形超过了工程报警值,而下部桩基水平变形则满足



变形控制要求。

3) 实际施作中,采取隔离桩防护加固后,基坑开挖引起的高铁桩板结构路基桩基和承载板变形均显著变小。1号风井基坑开挖完成后路基竖向变形控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内;部分测点路基水平变形在基坑开挖完成后略超过工程报警值,最大值为 $-3.3\text{ mm}$ ,但在开挖期间相应高铁区段限速 $120\text{ km/h}$ 的条件下,仍能满足高铁路基结构安全运营的变形要求。

## 参考文献

- [1] 康蒙. 某下穿工程基坑开挖对高速铁路桥墩变形影响分析[D]. 南昌:华东交通大学,2020.  
KANG Meng. Impact analysis of foundation pit excavation on deformation of high-speed railway bridge pier[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.
- [2] 方浩. 软土地区基坑开挖对邻近高铁路基变形影响及保护距离研究[D]. 南京:东南大学,2017.  
FANG Hao. Study on the influence of excavation on deformation of adjacent high-speed railway subgrade in soft soil area and the protection distance[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [3] 宗晶瑶,丰土根. 明挖基坑对邻近高铁桥梁变形影响因素分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2019(2):47.  
ZONG Jingyao, Feng Tugen. Numerical analysis on effect factors of high-speed railway bridge pier deformation near foundation pit[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2019(2):47.
- [4] 陈聪,王增吉. 基坑开挖对邻近市域铁路高架桥影响的有限元分析[J]. 工程建设与设计,2021(7):39.  
CHEN Cong, WANG Zengji. Finite element analysis of the influence of foundation pit excavation on railway viaducts in adjacent city[J]. Construction & Design for Project, 2021(7):39.
- [5] YE S, ZHAO Z, WANG D. Deformation analysis and safety as-

essment of existing metro tunnels affected by excavation of a foundation pit[J]. Underground Space, 2021,6(4):421.

- [6] 徐俊. 深基坑开挖对邻近高速铁路路基影响研究[J]. 铁道建筑技术,2020(10):42.  
XU Jun. Research on the influence of deep foundation pit excavation on adjacent high-speed railway subgrade[J]. Railway Construction Technology, 2020(10):42.
- [7] 马宁. 软土地区临近运营高铁路基建筑基坑防护方案研究[J]. 铁道标准设计,2017(4):50.  
MA Ning. Analysis on protection scheme for foundation pit in soft soil area adjacent to existing high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2017(4):50.
- [8] ZHOU A, XU J, HAN X. Research on protection technology of foundation pit excavation adjacent to existing railway[C]//IEEE. Proceedings-2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing. New York: IEEE, 2010: 270-273.
- [9] 詹涛,胡长明,钱伟丰,等. 深基坑开挖对邻近运营铁路的变形影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2019(7):66.  
ZHAN Tao, Hu Changming, QIAN Weifeng, et al. Influence of deep excavation construction on the deformation of adjacent railway in operation[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019(7):66.
- [10] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008:36.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008:36.
- [11] 上海铁路局. 上海铁路局工务安全管理办法:SHG/GW 280—2017[Z]. 上海:上海铁路局,2017:48.  
Shanghai Railway Administration. Shanghai Railway Administration engineering safety management measures: SHG/GW 280—2017 [Z]. Shanghai: Shanghai Railway Administration, 2017: 48.

(收稿日期:2021-12-08)

## 5月份全国城市轨道交通客运量13.3亿人次

2022年5月,我国31个省(区、市)和新疆生产建设兵团共有51个城市开通运营城市轨道交通线路275条,运营里程8 917 km,实际开行列车250万列次,完成客运量13.3亿人次。51个城市的轨道交通完成客运量环比增加0.38亿人次、增长2.9%,同比减少8.5亿人次、下降39%。新开通了广州地铁7号线西延段,新增运营里程13.4 km。按照疫情防控要求,部分城市不同程度暂停轨道交通运营服务。其中,哈尔滨、昆山等城市暂停全线网轨道交通运营服务,上海、南京、郑州等城市暂停部分线路运营服务,北京、天津、广州、宁波、南昌等城市暂停部分车站运营服务。

(摘编自:20220608 中国交通新闻网)