

文章编号:1005-0523(2020)06-0016-10

基坑开挖引起邻近桩板路基的变形及分区

梁浩毅^{1,2}, 项瑞聪^{1,2}, 狄宏规^{1,2}, 杜伟³, 李厚荣³, 盛灿军³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201814; 2. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201814; 3. 中铁二十四局集团有限公司, 上海 200433)

摘要:针对基坑开挖近接桩板结构路基的桩基变形特性研究不足的问题, 依托上海机场线某深基坑工程, 研究基坑开挖对桩板结构路基的桩基变形控制问题, 采用有限元方法分析得到桩基变形规律, 并基于桩基变形进行影响分区, 提出基于桩基变形控制的围护结构变形允许限值取值方法。研究表明: 距离基坑较远处桩基的水平位移曲线呈弓形, 整个桩身的水平位移均较大, 桩基水平位移最大值为 5.66 mm; 距离基坑较远处桩基的水平位移曲线呈悬臂形, 水平位移最大值发生在桩顶处, 较深处桩身水平位移很小。将开挖深度为 9.5, 17.4, 25.5 m 下的桩基变形影响区划分为 A 区(危险区)、B 区(警戒区)、C 区(安全区), 并对各分区提出工程保护措施。结合《基坑工程技术规范》提出基于桩基变形控制下的围护结构变形允许限值取值方法。

关键词:桩板结构; 基坑开挖; 变形规律; 影响分区

中图分类号: TU473

文献标志码: A

本文引用格式: 梁浩毅, 项瑞聪, 狄宏规, 等. 基坑开挖引起邻近桩板路基的变形及分区[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(6): 16-25.

Citation format: LIANG H Y, XIANG R C, DI H G, et al. Deformation and partition of pile foundation caused by excavation of foundation pit adjacent to pile-plank subgrade[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(6): 16-25.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.06.003

桩板结构路基作为新型复合地基结构形式, 在高速铁路领域具有广泛的应用^[1]。随着我国城市轨道交通的快速发展, 近邻高速铁路进行基坑开挖的工程案例日益频繁^[2-5], 这必然对桩板结构的桩基安全造成影响, 这一问题在我国沿海软土地区更为突出。

基坑开挖改变周围土体应力环境, 使周围的既有结构物桩基产生新的附加应力, 这对桩基的变形控制提出了新的要求。丁勇春^[6]通过数值模拟研究了基坑开挖近邻高架桥桩变形特征, 制定了各类型桥桩的变形控制方法。姜博^[7]结合现场实测与数值模拟, 研究了基坑开挖导致的桥桩应力与变形分布特征。陆志杰^[8]利用数值模拟分析了基坑开挖对邻近建筑物桩基变形的变化规律, 得到了桩基参数与基坑的距离会对建筑物桩基产生的变形影响。目前国内外关于基坑开挖对邻近桩基影响的研究主要针对于桥梁桩基和建筑物桩基, 对桩板结构的研究也仅集中在桩板结构的设计优化方面, 而基坑开挖近邻桩板结构中桩基变形规律的相关研究几乎空白。

依托近接沪杭高铁既有路基的上海机场线 1 号风井深基坑工程, 对近接桩板结构路基的桩基变形规律展开研究, 制定该类型工程下基坑变形限值取值方法, 为今后类似工程设计提供一定的指导意义。

1 工程概况

1.1 工程简介

上海机场线过七宝站后从南线路开始进入明挖和隧道段, 该段线路与沪杭高铁并行, 最近处不到 10 m。

收稿日期: 2020-07-28

基金项目: 上海市科委科研项目(19DZ1201004)

作者简介: 梁浩毅(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通与铁道工程。E-mail: xylhy1005@163.com。

通信作者: 狄宏规(1985—), 男, 助理教授, 硕士生导师, 研究方向为线路工程系统动力学。E-mail: 2012dihonggui@tongji.edu.cn

其中,机场线 1 号风井基坑外侧与沪杭高速铁路路基坡脚的最近距离为 10.7 m,基坑与路基的位置关系见图 1。1 号风井结构平面尺寸为 30 m×25 m,开挖深度 25.5 m。高速铁路基段地基加固采用钻孔灌注桩+C30 混凝土板的桩板形式,桩径 0.5 m,桩间距 2.4 m,桩长 33.0 m,单桩承载力设计值为 1 050 kN,按正方形布置,桩底位于⑦1 粉土层,基本承载力 150 kPa。管桩桩顶刚接于承载板,承载板采用 C30 钢筋混凝土浇筑,板厚 0.5 m,板宽 17.4 m,板纵向节长 15 m,板之间设 0.02 m 宽的伸缩缝,缝内填塞沥青麻筋。桩板结构路基剖面图见图 2。

根据地勘报告,本工程场地土层分布及物理力学指标参数汇总见表 1。

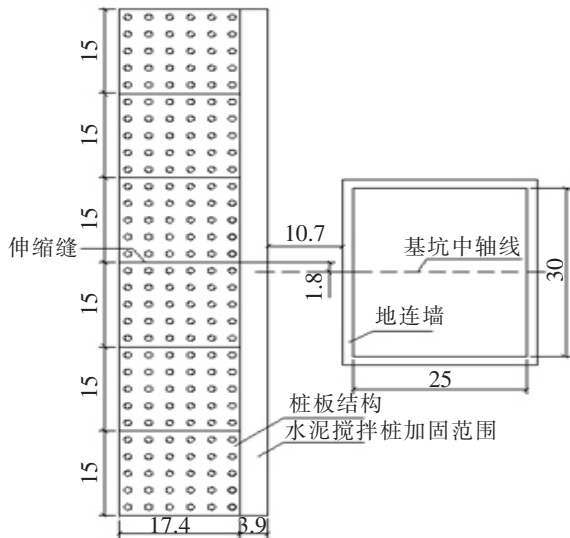


图 1 沪杭高速铁路基和 1 号风井深基坑位置关系示意图
Fig.1 Schematic diagram of the location relationship between the subgrade of Shanghai-Hangzhou high-speed railway and the No. 1 air shaft deep foundation pit

表 1 施工现场岩土参数

Tab.1 Geotechnical parameters at construction site

地层编号	地层名称	层厚/m	天然含水量/%	天然密度/(g/cm ³)	孔隙比	内摩擦角/(°)	凝聚力/kPa	压缩模量/MPa
①1	人工填土	1.6	-	-	-	-	-	-
②1	粉质黏土	2.9	32.14	1.90	0.91	17.15	20.08	4.56
②3	砂质粉土	2.4	29.25	1.93	0.82	28.70	6.80	10.66
③1	淤泥质粉质黏土	2.1	42.55	1.77	1.20	17.93	12.40	3.32
④1	淤泥质黏土	9.0	47.09	1.74	1.33	12.57	13.22	2.55
⑤1	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
⑦1	砂质粉土	11.0	26.95	1.94	0.77	31.38	10.04	10.69
⑦2	粉砂	-	24.56	1.97	0.71	32.52	3.33	13.45

1.2 基坑支护方案

基坑围护结构采用 1.5 m 厚地连墙,由水平支撑和竖向支组成支撑体系。水平方向设置 6 道支撑,其中第 1,3,4,5 道为混凝土支撑,其余为钢支撑(φ=800 mm,壁厚 t=16 mm)。第 1 道混凝土支撑截面尺寸 800 mm×800 mm,第 3,4,5 道混凝土支撑截面尺寸为 1 200 mm×1 200 mm,第 3,4,5 道支撑与混凝土腰梁连接。在地连墙外侧 3 m 处采用钻孔灌注桩隔离。基坑支护方案及工程剖面图见图 2。

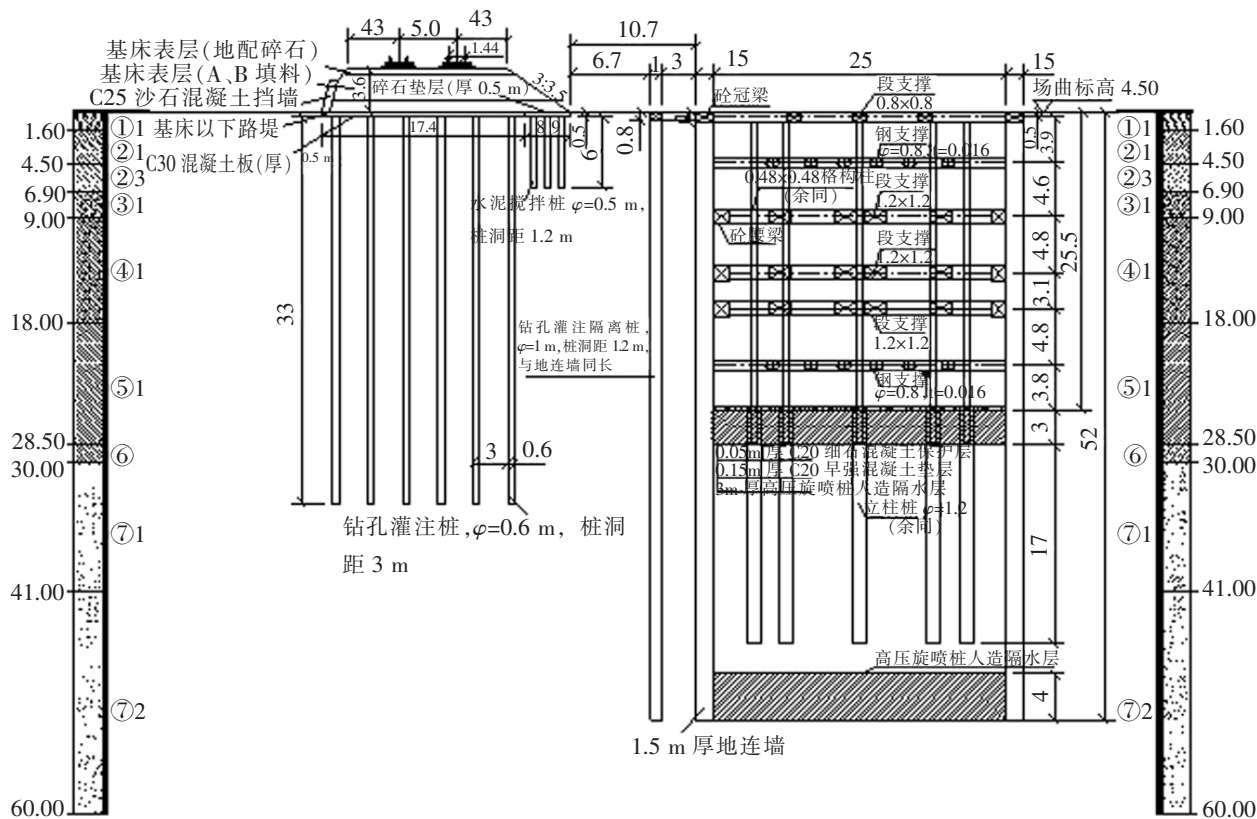


图2 沪杭高铁路基和1号风井深基坑剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of the subgrade of Shanghai-Hangzhou high-speed railway and the No. 1 air shaft deep foundation pit

2 基坑开挖并行桩板结构路基的有限元模型

2.1 模型建立

利用 Plaxis 3D 建立了基坑开挖并行桩板结构路基的三维有限元数值模型。基坑平面开挖尺寸为 30 m×25 m,开挖深度 25.5 m。为消除模型边界效应影响,设置模型平面尺寸为 260 m×200 m,深度为 127.5 m。有限元模型见图 3。

2.2 参数选取

本工程中基坑与高铁路基的距离小于 1 倍的基坑开挖深度,周围土体变形应属于小应变范围;因此土体本构采用小应变土体硬化模型(HSS)。工程区域属于典型软土地区,针对 HSS 模型主要参数的取值,根据王卫东等^[9-10],王浩然^[11]土工试验结果和取值经验,研究得到上海黏性土层参数 $E_{50}^{ref}, E_{ur}^{ref}, E_{oed}^{ref}$ 与压缩模量 E_{s1-2} 间的比例关系建议取: $E_{oed}^{ref}=0.9\sim 1E_{s1-2}, E_{50}^{ref}=1\sim 1.2E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref}=4\sim 9.3E_{oed}^{ref}$, 对第⑦层粉细砂, $E_{oed}^{ref}=E_{s1-2}, E_{50}^{ref}=E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref}=4E_{oed}^{ref}$;加卸载泊松比 ν_{ur} 建议取 0.2;小应变参数 G_0^{ref} ,对于黏性土,建议取 $G_0^{ref}=3.5\sim 5E_{ur}^{ref}$;对于粉土和砂土,建议取 $G_0^{ref}=5E_{ur}^{ref}$;小应变参数 $\gamma_{0.7}$ 建议取 2×10^{-4} 左右。结合地勘报告,制定 HSS 本构模型参数如表 2 所示。

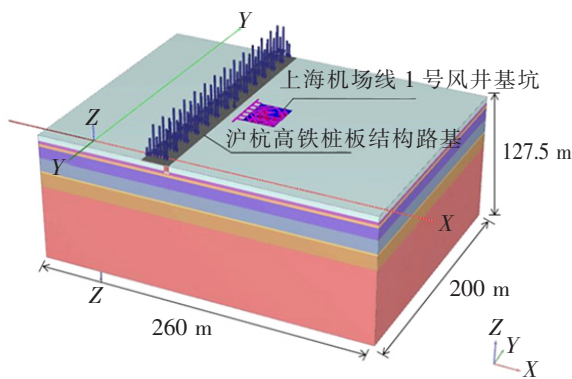


图3 有限元模型
Fig.3 Finite element model

表 2 HSS 本构模型参数
Tab.2 HSS constitutive model parameters

参数	土层							
	①1,②1	②3	③1	④1	⑤1	⑥	⑦1	⑦2
厚度/m	4.5	2.4	2.1	9	10.5	1.5	11	-
c'/kPa	20.1	6.8	12.4	13.2	15.3	42	10	3.3
$\varphi'/(^{\circ})$	17.2	28.7	17.9	12.6	16.2	16	31.4	32.5
$\psi/(^{\circ})$	0	0	0	0	0	0	1.4	2.5
E_{s1-2}/MPa	4.56	10.66	3.32	2.55	3.63	6.98	10.69	13.45
$E_{\text{ed1}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	4.1	10.66	2.99	2.3	3.27	6.28	10.69	13.45
$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	4.92	10.66	3.59	2.75	3.92	7.54	10.69	13.45
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	23.39	42.64	20.92	19.3	22.87	43.97	42.76	53.8
$E_{\text{0}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	81.87	213.2	73.21	67.55	80.04	153.91	213.8	269
$\gamma_{0.7}$	0.2	0.2	0.15	0.19	0.16	0.17	0.2	0.2
v_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$p^{\text{ref}}/\text{kPa}$	100	100	100	100	100	100	100	100
K_0	0.71	0.52	0.69	0.78	0.72	0.72	0.48	0.46
m	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5
R_f	0.9	0.9	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9

地连墙采用板单元模拟,地连墙与周围土之间采用界面单元模拟墙土间的相互作用。桩板结构中钻孔灌注桩采用 Embedded 桩单元进行模拟,通过界面单元模拟桩土间的相互作用;承载板采用线弹性的实体单元模拟,承载板节间的伸缩缝用界面单元模拟。

为了准确模拟出桩基在邻近开挖影响下的变形特征,结合《建筑桩基技术规范》,计算确定桩在各层土体内的极限侧摩阻力和极限桩端阻力,结果如表 3。

表 3 桩基竖向极限承载力表
Tab.3 Vertical ultimate bearing capacity of pile foundation

桩身埋深/m	所在土层	桩周第 i 层土的 极限侧阻力/kPa	极限端阻力 标准值/kPa	依据埋深的 修正系数	极限侧摩 阻力/kN	极限桩端 阻力/kN
0.5~4.5	①1,②1	55	-	0.8	82.9	-
4.5~6.9	砂质粉土	46	-	1	86.7	-
6.9~9	③1 淤泥质粉质黏土	22	-	1	41.4	-
9~18	④1 淤泥质黏土	22	-	1	41.4	-
18~28.5	⑤1 黏土	40	-	1.1	82.9	-
28.5~30	⑥粉质黏土	70	-	1.2	158.3	-
30~33.5	⑦1 砂质粉土	66	3 800	1.2	149.2	1 073.9

2.3 计算工况

在 Plaxis 3D 里建立不同的施工工况来模拟动态基坑开挖过程,根据实际施工过程,设置主要工况如表 4。

表 4 施工工况表
Tab.4 Construction condition

工况	施工步骤
1	初始地应力平衡
2	激活既有高铁路基结构
3	激活基坑的支护结构
4	土体开挖至-1 m,坑内水位线降至-1.5 m
5	激活第 1 道支撑,土体开挖至-4.9 m,坑内水位线降至-1.5 m
6	激活第 2 道支撑,土体开挖至-9.5 m,坑内水位线降至-10 m
7	激活第 3 道支撑,土体开挖至-14.3 m,坑内水位线降至-14.8 m
8	激活第 4 道支撑,土体开挖至-17.4 m,坑内水位线降至-17.9 m
9	激活第 5 道支撑,土体开挖至-22.2 m,坑内水位线降至-22.7 m
10	激活第 6 道支撑,土体开挖至-25.5 m,坑内水位线降至-26 m

3 桩板结构的桩基变形规律

基坑开挖完成后,选取距基坑中轴线最近的一排桩基(1#~6#)和距基坑最近的一列桩基(1#桩、7#~35#桩)为分析对象,图 4 为基坑开挖完成后各桩基的最大水平位移值。其中水平位移最大的桩基为距离基坑和基坑中轴线最近的 1# 桩,水平位移为 5.66 mm。

图 5(a)为各桩基与基坑的相对位置,对与基坑中轴线距离最近的一排桩基(1#~6#)进行分析,距离基坑净距越大,桩基水平位移最大值越小。图 5(b)为该排桩基沿深度变化的水平位移值,水平位移曲线形状均呈弓形,最大值发生在 18 m 深度处。桩顶水平位移均为 2.85 mm,这是因为桩顶与承载板刚接,水平位移协调一致。桩身水平位移在③1,④1 淤泥层处明显大于②3 砂质粉土层处,这是由于土层变形模量差异较大,桩基在淤泥层处变形较大。

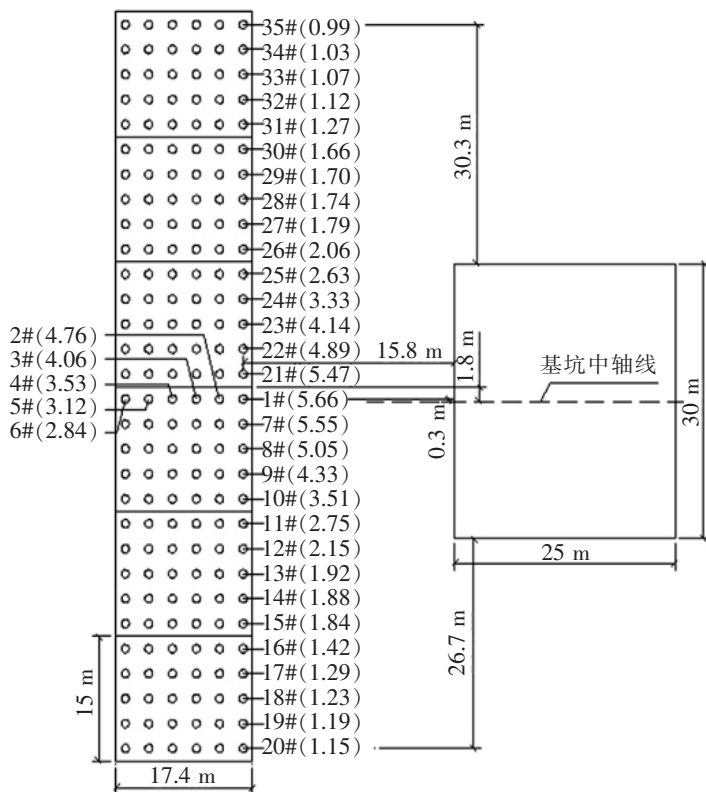


图 4 桩基的水平位移最大值(单位:mm)

Fig.4 Maximum horizontal displacement of pile foundation (Unit: mm).

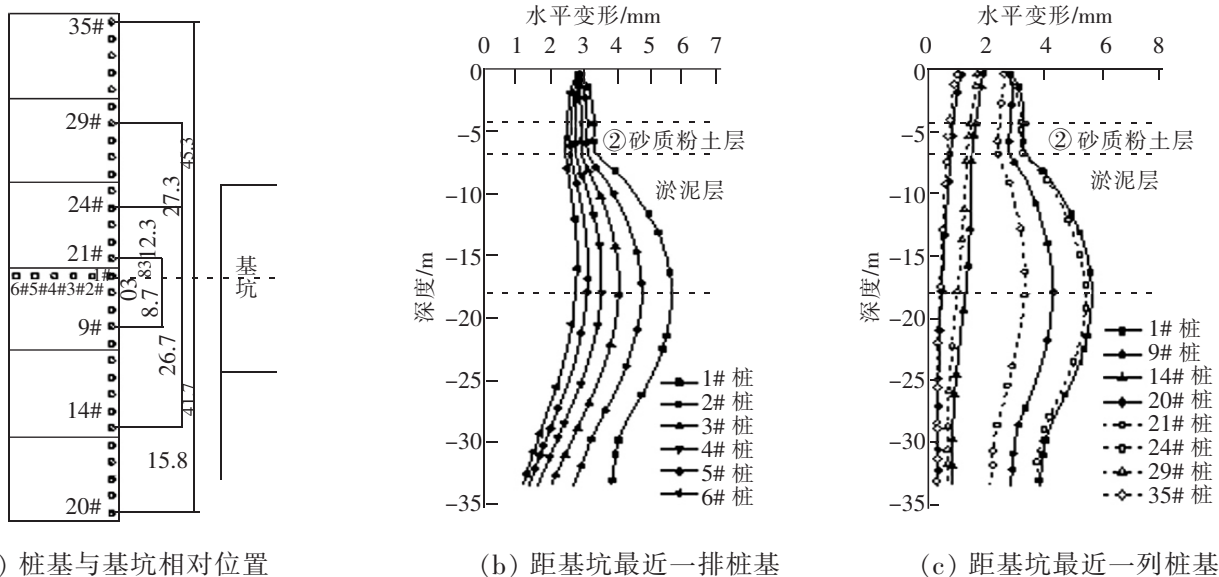


图 5 开挖完成时桩基水平位移

Fig.5 Horizontal displacement of pile foundation when the excavation is completed

对距基坑净距最小的一列桩基(1# 桩、7#~35# 桩)进行分析,距离基坑中轴线越远,桩基水平位移最大值越小。图 5(c)为该列桩基中部分桩基的水平位移值。离基坑中轴线距离较近的 1# 桩、9# 桩、21# 桩及 24# 桩水平位移呈弓形特征,最大值发生在 18 m 深度处;离基坑中轴线距离较远的 14# 桩、20# 桩、29# 桩及 35# 桩的水平位移呈悬臂形特征,最大值发生在桩顶处,较深处桩身水平位移很小。

4 基坑开挖对桩板结构桩基的影响分区

对于基坑开挖邻近既有桩基,桩基变形受基坑开挖深度、基坑与路基净距、支撑刚度、工程地质等因素影响。对于既定工程,无法改变工程地质因素,为制定合理的桩基变形影响分区,需要探究其他人为可控因素对桩基变形的影响。

4.1 计算方案

由于桩基中心线距离路基坡脚距离为 5.1 m,为便于后续过程的数据处理,同时考虑实际施工情况,在上节的有限元模型基础上,设置不同路基坡脚与基坑边缘距离 L 和地连墙厚度 h 组成多种计算方案, L 设置 8 种方案:6,9,12,18,24,33,42,54 m; h 设置 4 种方案:0.4,0.6,1.0,1.5 m。参数两两组合可形成 32 组不同的组合方案以形成不同开挖条件,计算相应的桩基变形。

4.2 不同开挖条件下桩基变形

当开挖深度 H 为 9.5,17.4,25.5 m 时,不同开挖条件下桩基水平位移值如表 5~表 7。

表 5 开挖深度为 9.5 m 时不同开挖条件下的桩基水平位移最大值

Tab.5 The maximum horizontal displacement of pile foundation under different excavation conditions when the excavation depth is 9.5 m

地连墙厚度 h/m	桩板结构路基坡脚与基坑边缘距离 L/m							
	6	9	12	18	24	33	42	54
0.4	5.82	5.18	4.57	3.41	2.52	1.64	1.17	0.71
0.6	4.30	3.88	2.93	2.14	1.56	1.00	0.69	0.45
1.0	2.99	2.30	1.68	1.11	0.80	0.49	0.35	0.21
1.5	2.26	1.56	1.13	0.65	0.47	0.28	0.18	0.13

表6 开挖深度为17.4 m时各开挖条件下的桩基水平位移最大值

Tab.6 The maximum horizontal displacement of pile foundation under different excavation conditions when the excavation depth is 17.4 m

地连墙厚度 h/m	桩板结构路基坡脚与基坑边缘距离 L/m							
	6	9	12	18	24	33	42	54
0.4	15.98	13.48	11.03	7.54	5.63	3.46	2.22	1.50
0.6	11.61	9.77	7.38	4.39	3.38	2.09	1.34	0.88
1.0	7.19	5.34	3.95	2.27	1.64	1.02	0.59	0.37
1.5	4.40	2.96	2.17	1.18	0.82	0.51	0.32	0.21

表7 开挖深度为25.5 m时各开挖条件下的桩基水平位移最大值

Tab.7 The maximum horizontal displacement of pile foundation under different excavation conditions when the excavation depth is 25.5 m

地连墙厚度 h/m	桩板结构路基坡脚与基坑边缘距离 L/m							
	6	9	12	18	24	33	42	54
0.4	22.17	19.67	14.72	10.06	7.53	4.86	3.10	1.85
0.6	20.88	15.23	12.77	7.19	5.74	3.46	2.29	1.30
1.0	14.83	11.23	7.96	4.40	3.46	2.11	1.23	0.76
1.5	9.58	7.22	5.08	2.84	1.88	1.20	0.73	0.42

由表5~表7的计算结果表明,随着开挖深度减小,路基与基坑距离增大,地连墙厚度增大时,桩基变形均显著减小。

4.3 影响区划分

根据《建筑桩基技术规范》^[12],可认为高铁桩板结构路基属于水平变形敏感的结构物,选取6 mm作为桩基水平变形允许值。行业规范中,衡量轨道交通结构安全的控制指标为监测项目实测值与结构安全控制指标值之比 G ,以0.6为警戒值分界线,当 $G < 0.6$ 时,可以正常进行施工;当 $G \geq 0.6$ 应采取施工安全保障措施^[13]。桩基变形监测警戒值设置为允许值的60%,即3.6 mm。据此,制定影响桩基水平变形分区控制标准:允许值6 mm;警戒值3.6 mm。

对表5~表7计算结果数据进行插值处理,分别绘制3种开挖深度下桩基变形允许值和警戒值等值线,如图6。规范规定,既有高铁路基坡脚外3 m范围为施工禁区,图6(a)等值线起点的横坐标为0.32,图6(b)等值线起点的横坐标为0.17,图6(c)等值线起点的横坐标为0.12。

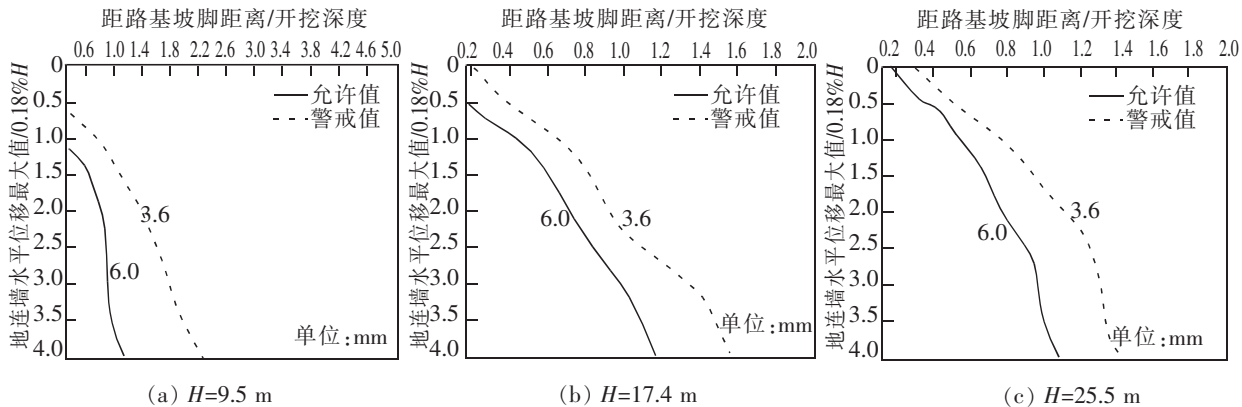


图 6 3 种开挖深度下桩基变形允许值和警戒值等值线

Fig.6 Contours of allowable and warning values of pile foundation deformation under three types of excavation depths

为方便工程应用,根据参考文献[14],绘制两段折线式的包络线,得到各开挖深度下基坑开挖对邻近桩板结构桩基变形影响分区图,如图 7,基坑开挖引起邻近桩板结构桩基变形区域分为 A~C 三区。当桩基水平变形最大值小于警戒值时为 C 区(安全区),无需采取特殊保护措施;当桩基水平变形最大值介于警戒值与允许值之间时为 B 区(警戒区),须加强对桩基变形的监测;当桩基水平变形最大值大于允许值时为 A 区(危险区),必须采取加固保护措施。

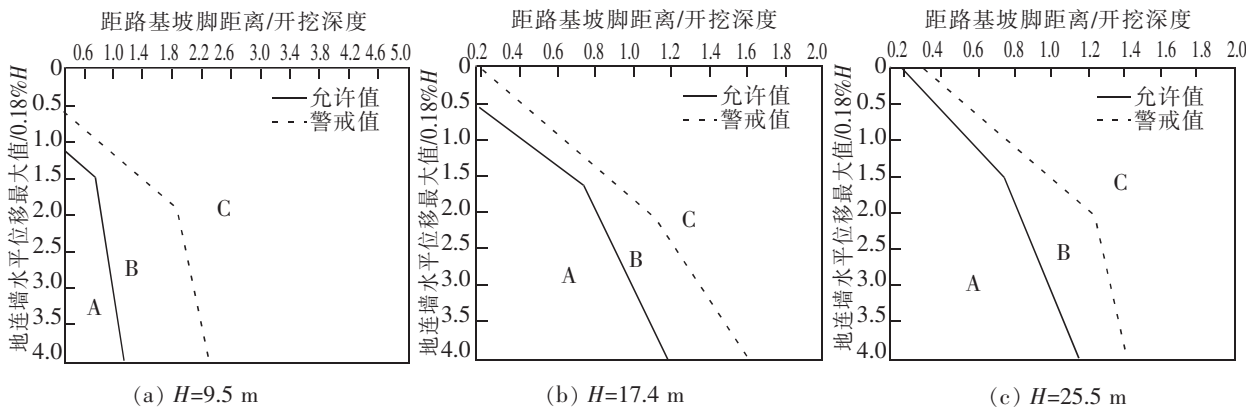


图 7 3 种开挖深度下的桩基变形影响分区

Fig.7 Deformation effect of pile foundation under three types of excavation depths

5 基坑变形允许限值取值方法

《基坑工程技术规范》^[15]规定:根据不同环境保护对象距基坑的距离 s 与基坑开挖深度 H ,确定基坑环境保护等级与基坑围护侧移最大限值。当 $s < H$ 时,为一级基坑,围护结构最大侧移限值为 $0.18\%H$;当 $H < s < 2H$ 时,为二级基坑,围护结构最大侧移限值为 $0.3\%H$ 。但该规范对基坑近邻桩板结构进行开挖的工程案例没有做出明确规定。

为得到基于桩基变形控制要求下的基坑开挖近邻桩板结构的围护结构变形允许限值,将 3 种开挖深度下桩基水平位移控制线绘制在同一张图中,见图 8 所示。图 8 显示,当横坐标大于 0.75 时,3 条水平位移控制线基本重合,可认为

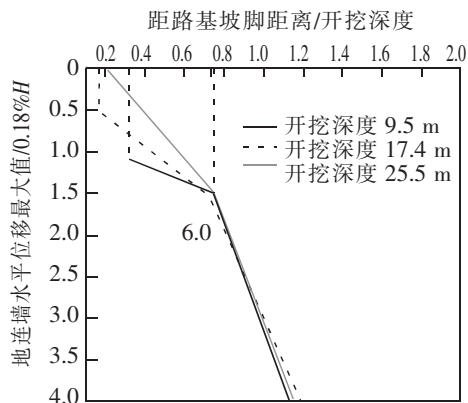


图 8 3 种开挖深度下的桩基水平位移允许值控制线

Fig.8 Control line for allowable value of horizontal displacement of pile foundation under three excavation depths

此时的控制线与基坑开挖深度间相互独立;当横坐标小于 0.75 时,随着开挖深度的增大,水平位移控制线斜率随距离变化的斜率增大,此时相应的 A 区(危险区)的范围也随之增大。

对图 8 进行插值处理,得到不同开挖深度下桩基水平位移控制线如图 9 所示。根据《基坑工程技术规范》,考虑不同环境保护等级的基坑,由图 9 所示,当开挖深度小于 11 m,此时规范中一、二级基坑的围护结构侧移允许限值均小于基于桩基变形控制得到的围护结构侧移允许限值,应采用规范的限值要求。当开挖深度大于 11 m,此时水平位移控制线与规范中一级基坑的变形控制线相交,当基坑与路基坡脚距离小于交点对应的距离时,应采用基于桩基变形控制得到的围护结构侧移允许限值,当基坑与路基坡脚距离大于交点对应的距离时,应采用规范的限值要求。

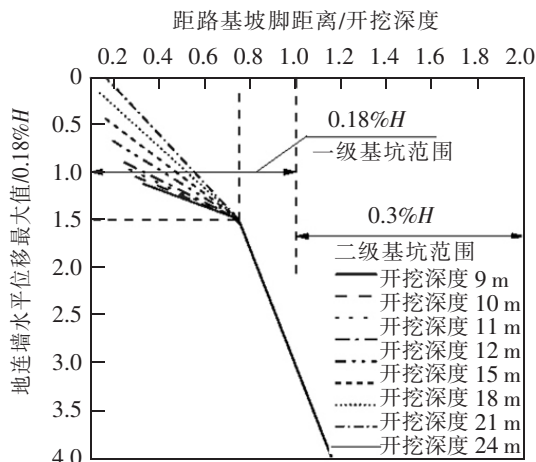


图 9 围护结构变形允许限值取值方法

Fig.9 Method for determining allowable limit value of deformation of envelope

6 结论

1) 近邻桩板结构路基进行基坑开挖时,距离基坑较远处桩基的水平位移曲线呈弓形,整个桩身包括桩底的水平位移均较大,桩基最大变形为 5.66 mm;距离基坑较远处桩基的水平位移曲线呈悬臂形,水平位移最大值发生在桩顶处,较深处桩身水平位移很小。

2) 在邻近既有高铁桩板结构路基开挖基坑时,将基坑开挖深度为 9.5, 17.4, 25.5 m 时桩板结构桩基的变形影响区划分为 A 区(危险区)、B 区(警戒区)、C 区(安全区),并对各分区提出了工程保护措施。

3) 得到了各开挖深度下邻近桩板结构桩基水平位移控制线,并基于此提出了基坑围护结构变形允许限值取值方法:当开挖深度小于 11 m,依据《基坑工程技术规范》,一、二级基坑的围护结构侧移允许限值均小于基于桩基变形控制得到的围护结构侧移允许限值,应采用规范的限值要求。当开挖深度大于 11 m,桩基水平位移控制线与规范关于一级基坑的变形控制线相交,当基坑与路基坡脚距离小于交点对应的距离时,应采用基于桩基变形控制得到的围护结构侧移允许限值,当基坑与路基坡脚距离大于交点对应的距离时,应采用规范的限值要求。

参考文献:

- [1] 王晓玉. 列车荷载作用下桩板路基沉降特性研究[D]. 南昌:华东交通大学,2017.
- [2] 方浩. 软土地区基坑开挖对邻近高速铁路基变形影响及保护距离研究[D]. 南京:东南大学,2017.
- [3] 项瑞聪,杨龙才,王炳龙. 路基填筑引起水泥搅拌桩复合地基变形监测分析[J]. 华东交通大学学报,2020,37(2):38-45.
- [4] 张其冬. 考虑既有铁路影响的深基坑支护设计及变形规律的分析[D]. 合肥:安徽建筑大学,2018.
- [5] 肖广达. 深大基坑开挖分析及对邻近铁路的影响研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2017.
- [6] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [7] 姜博. 深基坑开挖对既有桥梁的影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [8] 陆志杰. 基坑开挖对邻近建筑物桩基础的影响研究[D]. 保定:河北大学,2017.
- [9] 王卫东,王浩然,徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(8):2283-2290.
- [10] 王卫东,王浩然,徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学,2013,34(6):1766-1774.
- [11] 王浩然. 上海软土地区深基坑变形与环境影响预测方法研究[D]. 上海:同济大学,2012.

- [12] 中华人民共和国建设部. JGJ94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [13] 熊聪聪. 基坑开挖对邻近昆山轨道交通高架桥的影响分区[D]. 上海:同济大学,2019.
- [14] 郑刚,杜一鸣,刁钰,等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(4):599-612.
- [15] 上海市勘察设计行业协会. DG/TJ 08-61-2010 基坑工程技术规范[S]. 上海:上海市住房和城乡建设管理委员会,2018.

Deformation and Partition of Pile Foundation Caused by Excavation of Foundation Pit Adjacent to Pile-Plank Subgrade

Liang Haoyi^{1,2}, Xiang Ruicong^{1,2}, Di Honggui^{1,2}, Du Wei³, Li Hourong³, Sheng Canjun³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201814, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201814, China;

3. China Railway 24th Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient research on the deformation characteristics of the pile foundation of the excavation near the pile-plank subgrade, the deformation control of the pile-plate structure pile foundation by the excavation of the foundation pit was studied based on a deep foundation pit project of Shanghai Airport Line. The finite element method was used to analyze the deformation law of the roadbed. Based on the deformation of the pile foundation, the influence zoning was carried out, and a method for calculating the allowable limit value of the deformation of the envelope structure based on the pile deformation control was proposed. The research results show that: The horizontal displacement curve of the pile foundation near the foundation pit is arched, the horizontal displacement of the entire pile body is large, and the maximum horizontal displacement of the pile foundation is 5.66 mm. The horizontal displacement curve of the pile foundation far away from the foundation pit is cantilever-shaped, and the maximum horizontal displacement occurs at the top of the pile, and the horizontal displacement of the deep pile is small. The affected area of pile foundation deformation under excavation depths of 9.5, 17.4 m, and 25.5 m is divided into Zone A (danger zone), Zone B (warning zone), and Zone C (safety zone), and engineering protection measures are proposed for each zone. A method for calculating the allowable limit of the deformation of the envelope structure under the control of pile foundation deformation is proposed in accordance with Technical Code For Foundation Pit Engineering.

Key words: pile-plank structure; foundation pit excavation; deformation law; affected zone