

新建墩承台施工对邻近既有高铁线路基的影响研究

刘鑫^{1,2}, 张思卿^{1,2}, 龚天昊³, 史云强^{1,2}, 程涛⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 隧道与地下工程研究所, 江苏 南京 210098;

3. 中通服务咨询设计研究院有限公司, 江苏 南京 210098; 4. 安徽省公路桥梁工程有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要: 轨道交通的发展使得轨道线路密度显著提高, 靠近既有高铁线近距离施工情况增多。为了研究新建墩承台对邻近既有高铁线路基的影响, 建立 PLAXIS^{2D} 模型, 计算不同施工工况下邻近既有高铁线路基土体、挡土墙以及桩基水平位移和沉降, 并探究施工距离对路基位移的影响。研究结果表明: 既有高铁线路基段土体和挡土墙有相似的位移趋势, 位移最大值发生在路基靠近基坑一侧最上部顶点, 向基坑方向水平移动并伴随着一定的沉降。在施工工况中, 激活钻孔灌注桩、基坑降水开挖对水平位移和沉降影响较大; 钢板桩插拔以及新建桥墩浇筑加载分别对水平位移和沉降也有明显影响。除此之外, 墩承台施工距离越近, 对既有高铁线的影响越大, 尤其是距离在 1.8 m 以内时影响极大, 60 m 以外则几乎没有影响。

关键词: 墩承台施工; 高铁线路基; 有限元; 位移分析

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)02—0220—09

Influence of Pier Abutment Construction on Existing Adjacent High-speed Railway Subgrade

LIU Xin^{1,2}, ZHANG Siqing^{1,2}, GONG Tianhao³, SHI Yunqiang^{1,2}, CHENG Tao⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Tunnel and Underground Engineering Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Zhongtong Service Consulting Design & Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210098, China;

4. Anhui Road & Bridge Engineering Co., Ltd., Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: The development of rail transit has significantly improved the density of rail lines, and the construction near the existing high-speed rail lines has increased. In order to analyze the impacts of new pier cap on adjacent existing high-speed railway line foundation, PLAXIS^{2D} model is established to calculate the horizontal displacement and settlement of adjacent existing high-speed railway line foundation soil, retaining wall and pile foundation under different construction conditions, and explore the impact of construction distance on subgrade displacement. The research shows that soil mass and retaining wall in the subgrade section of the existing high-speed railway line have similar displacement trends. The maximum displacement occurs at the top vertex of the subgrade near the foundation pit side, moving horizontally towards the foundation pit and accompanied by a certain settlement. In the construction condition, the activation of bored pile and foundation pit dewatering excavation have great influences on horizontal displacement and settlement. The insertion and removal of steel sheet piles and the pouring and loading of new piers also have obvious effects on the horizontal displacement and settlement. In addition, the closer the pier cushion cap is constructed, the greater the impact on the existing high-speed railway line, especially when the distance is within 1.8 m; There is almost no impact beyond 60 m.

Keywords: pier abutment construction; high-speed railway subgrade; finite element; displacement analysis

收稿日期: 2022-11-16

修稿日期: 2022-12-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51609071)

作者简介: 刘鑫(1984—), 男, 副教授, 主要从事软基处理与基础工程研究。E-mail: liuxin100@hhu.edu.cn

通讯作者: 张思卿(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为软基处理与混凝土材料等。E-mail: 1092143271@qq.com

随着我国城市化进程的发展,高速铁路正快速建设并相继投入运营,为了缓解既有运营高铁的运输压力,进一步增大铁路路网的密度与运营效率,与高铁邻近的城际铁路的建设显得十分必要。

同时城际铁路建设中新建墩承台基坑开挖对于邻近既有高铁线的影响不容忽视,国内外许多学者对此做了研究。Liyanapathirana 等^[1]采用三维建模研究了深基坑造成地面位移的单桩行为,研究基坑开挖深度、桩和墙的位置关系、支撑结构的间距和刚度、土体的超固结比和桩头固定条件。Shakeel 等^[2]通过三维耦合固结分析,研究了软土深基坑附近浮桩群的响应,通过验证有限元模型,研究了开挖深度、桩长、开挖引起的群桩位置、支护系统刚度、土体状态和渗透性以及工作荷载的影响。郑刚等^[3]通过有限元法分析了基坑到桩基础距离、桩基础刚度、桩顶荷载和约束条件等参数对桩基础附加弯矩、位移影响,并与现场监测数据对比。王菲等^[4]、苗笛^[5]采用 ABAQUS 软件分析了基坑开挖对既有铁路桥基础位移的影响,得出基坑开挖所导致的邻近桥梁基础的位移量,评估了其安全性并提出相应减小位移的措施。王木群^[6]、高东等^[7]、鲁宇威^[8]、金宏刚等^[9]、陈聪等^[10]采用 midas GTS 软件进行基坑开挖施工对桥桩的影响模拟,探讨了基坑开挖对既有高铁的影响,进行了位移内力以及稳定性的相关分析。陈金祥等^[11]采用二维弹塑性有限元法对软土地区基坑开挖与邻近承台的相互作用进行了整体分析。高立刚等^[12]、罗光财等^[13]采用 FLAC^{3D} 软件,研究了在既有线路单侧以及双侧同时开挖两种不同施工工况下,深度对既有线路位移的影响,得出了每种工况下基坑施工过程中周围土体的位移场云图。胡军^[14]针对在邻近既有高速铁路桥梁基础的少见工况下进行深基坑开挖,结合有限元模型研究,对基坑围护结构与桩基受深基坑开挖影响的规律进行分析,并对比验证了现场实测数据。孟繁增^[15]对两个邻近高铁桥墩的基坑工程实例进行实时监测,研究了基坑开挖过程对邻近高铁桥墩竖向变形的影响,采用基于叠加原理的薄层分层总和法编制高铁桥墩邻近荷载竖向变形影响计算软件 PIAS,对计算结果与监测数据进行对比验证。

目前对于墩承台施工前期阶段基坑开挖深度如何影响邻近既有线的研究已取得一定成果,而对于基坑的邻近距离如何影响邻近既有线的研究较少,

并且对于后续施工阶段如围护结构、支护结构拆除、基坑回填、墩承台浇筑等工况下如何影响邻近既有线路尚不明确。针对上述研究中的不足,本文依托工程实例,借助 PLAXIS 有限元数值计算对某新建墩承台工程对邻近既有高铁线桥梁段的影响开展研究。

1 有限元模型

1.1 工程概况

某新建城际铁路位于长江三角洲平原地区,设计时速为 350 km/h,正线全长 278.53 km,全线与既有沪通高铁并行,部分承台钢板桩围堰位置距离沪通高铁线小于 30 m,属于邻近既有线路,桥梁有 305 个墩承台工程面临邻近高铁线施工。本文选取典型近距离墩承台进行分析,基坑钢板桩距离挡土墙最短距离为 0.5 m,基坑最大开挖深度为 5 m;既有线路路基挡土墙埋置于地下,从底部向上高度为 12 m。

既有沪通高铁为填土路基形式,路基高度设置为 4.5 m,左侧为边坡形式,坡度角的正切值为 2/3,路基下方设置 0.5 m 厚碎石垫层,底部设置钻孔灌注桩,桩径设置为 1.0 m,桩基础长度设置为 70 m,底标高为 -75.5 m。桩间距设置为 2.5 m,路基上部设置六股高铁轨道。路基右侧设置挡土墙,挡土墙厚度设置为 0.5 m,深度 12 m 至地下标高 -4 m 处。围堰钢板桩打入 12 m 深,基坑底标高为 -9 m,在基坑开挖 0.5 m 深度设置围檩,承台底部设置排列为 4×2 钻孔灌注桩,承台底标高为 -1.5 m,承台高度为 2.5 m,桩径设置为 1 m,桩基础长度设置为 68.5 m,底标高为 -70 m。封底采用 0.5 m 厚 C15 混凝土。水位线设置在标高 0 m 处。结合现场工程情况,将既有路基和新建墩承台的工程情况简化,如图 1 所示。

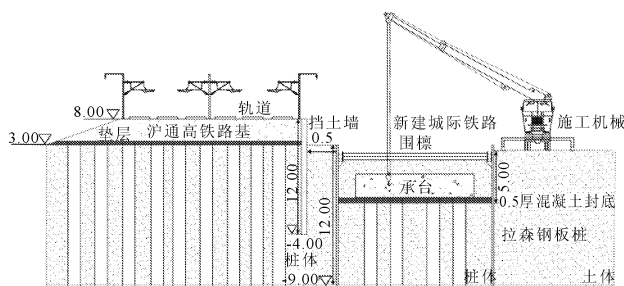


图1 现场工程尺寸图(单位:m)

1.2 参数选择

1.2.1 土体参数

既有高铁线路采用路基填土和碎石垫层形式铺

设,后期基坑采用杂填土回填,新建墩承台处土层以粉质黏土和淤泥质粉质黏土为主,各土层参数如表 1 所示。

墩承台施工的工程涉及基坑开挖,基坑回填等过程,是对土体的卸载和加载过程,且基坑工程应变

属于小应变范畴,土体会产生较大弹性模量,小应变土体硬化模型(HSS 模型)对土体非线性状态和应力路径相关变形特性描述更加全面,更能准确预测基坑开挖对周围环境的影响。采用 HSS 模型模拟土体的参数如表 2 所示。

表 1 土体基本参数表

岩土名称	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	泊松比 μ	弹性模量 E/kPa	厚度 h/m
路基填土	20.5	25.0	28.0	0.30	2.50×10^4	4.5
碎石垫层	25.0	—	36.0	0.25	5.00×10^4	0.5
杂填土	19.5	24.5	21.5	0.30	3.10×10^4	—
粉质黏土	19.0	17.2	15.2	0.35	3.64×10^3	7.0
淤泥质粉质黏土	18.0	10.3	10.5	0.36	2.00×10^3	31.0
黏土	19.0	19.2	26.5	0.32	4.50×10^3	15.0
砂土	20.0	1.0	31.2	0.31	3.00×10^4	30.0

表 2 HSS 模型特有参数表

土体名称	本构模型	排水类型	E_{s1-2}/kPa	三轴加载 刚度 E_{50}/kPa	三轴卸载 刚度 E_{ur}/kPa	固结仪加载 刚度 E_{oed}/kPa	幂指数 m	初始剪切 模量 G_0/kPa	剪切应 变水平 $\gamma_{0.7}$
粉质黏土	HSS 模型	不排水 A	5.84×10^3	5.96×10^3	3.18×10^4	4.73×10^3	0.90	7.00×10^4	3.20×10^{-4}
淤泥质 粉质黏土	HSS 模型	不排水 A	3.36×10^3	3.43×10^3	2.14×10^4	2.72×10^3	0.90	5.50×10^4	3.20×10^{-4}
黏土	HSS 模型	不排水 A	6.44×10^3	6.57×10^3	3.43×10^4	5.22×10^3	1.00	9.00×10^4	3.20×10^{-4}
砂土	HSS 模型	排水	4.16×10^4	4.24×10^4	1.82×10^5	3.37×10^4	0.50	4.00×10^5	3.90×10^{-4}

而混凝土构件材料采用线弹性模型模拟,既有路基填土,碎石垫层以及基坑后期回填土可采用 M-C 模型模拟。根据设计资料,两个新建工程和既有沪通高铁承台与桥墩采用 C30 混凝土,主筋材料为 HRB400 钢筋。

1.2.2 构件参数

PLAXIS 中可采用板单元、梁单元、Embedded 桩单元等对实际工程中的结构进行模拟,界面单元对实际工程中结构相互接触情况进行模拟。

围堰采用拉森Ⅳ型钢板桩,混凝土挡土墙和墩承台下混凝土垫层,模型中均可采用板单元模拟。墩承台支护结构采用梁单元模拟,采用 Q235 材料 H 型钢拼接而成旋转 90°的Ⅱ型。钻孔灌注桩采用 Embedded 桩单元模拟,钻孔灌注桩采用 C30 混凝土,主筋材料为 HRB400 钢筋。具体参数如表 3 所示。

1.2.3 工况设置

整个施工过程从打入钢板桩至激活新建桥墩顶部荷载,在设置模型的分阶段施工时,为了能够精确

地计算和分析每一个施工步骤带来的影响,共分为 12 个步骤。具体施工过程及工况如表 4 所示。

1.3 模型建立

由于路基填土和桩基础布置形式在垂直于沪通铁路断面方向上具有一致性,且其断面为均匀规则几何形状,垂直于断面方向上的应力状态和加载机制相同,同时考虑到计算过程简便性,故可将工程简化为 PLAXIS^{2D}中的平面应变问题,并考虑最不利工况进行计算。

为了更加清晰地分析整个模型计算结果,现在按照建立模型中的笛卡尔坐标系进行规定:以水平方向为 x 方向,竖直方向为 y 方向,从路基至新建墩承台方向为 x 正方向,土体自下而上为 y 正方向。钻孔位置位于坐标 $(0,0)$ 处,模型边界范围 $x \in [-20,50]$ 、 $y \in [-100,20]$,为保证计算精度,土体均采用 15 节点的三角形单元来模拟,根据实际情况确定地下水位位置,水位线设置于在 0 m 处,模型边界限制渗流,共生成 2 835 个单元,25 501 个节点。有限元模型如图 2 所示,网格划分情况如图 3 所示。

表 3 构件参数表

板单元				梁单元		桩单元	
钢板桩	挡土墙	垫层		双拼 H 型钢		钻孔灌注桩	
厚度 d/m	0.17	0.5	0.5	型号	2HW400×400 ×13×21×22	材料	C30 HRB400
截面积 A/m^2	24.25×10^{-3}	6.0	5.9	模型	弹塑性	模型	线弹性
$\gamma_{\text{steel}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	78.5	—	—	材料	Q235 钢	弹性模量 E/kPa	3.0×10^7
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	184.7	25.5	24.5	截面积 A/m^2	43.74×10^{-3}	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	24.5
I_1/m^4	5.17×10^{-3}	0.125	0.120	惯性矩 I_2/m^4	1.31×10^{-3}	直径 D/m	1.0
I_2/m^4	0.26×10^{-3}	—	—	惯性矩 I_3/m^4	14.91×10^{-3}	惯性矩 I/m^4	49.09×10^{-3}
$E_{\text{steel}}/\text{kPa}$	2.06×10^8	—	—	截面模量 W/m^3	4.77×10^{-3}	弹性模量 E/kPa	2.06×10^8
E_1/kPa	2.60×10^9	3.00×10^7	3.00×10^7	弹性模量 E/kPa	2.06×10^8	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	24.5
E_2/kPa	0.13×10^9	—	—	重量 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	76.93	屈服应力 f/kPa	215×10^3
G_{12}/kPa	0.13×10^9	8.64×10^9	1.48×10^7	屈服应力 f/kPa	215×10^3		
G_{13}/kPa	80.7×10^6	—	—				
G_{23}/kPa	24.2×10^6	—	—				
μ_{12}	0.0	0.2	0.2				

表 4 施工步骤表

步骤编号	阶段施工说明	工期/d	步骤编号	阶段施工说明	工期/d
0	激活土层,既有沪通高铁路基、 钻孔灌注桩,挡土墙	0	6	激活承台	5
1	激活新建钻孔灌注桩	10	7	激活新建桥墩	5
2	激活基坑围堰拉森钢板桩	5	8	回填土 3.5 m 至标高 1.5 m 处, 在标高 0.5 m 处拆除第二道支护	2
3	围堰内降水开挖 1.5 m 至标高 1.5 m 处, 在标高 2.5 m 处激活第一道支护	3	9	回填土 1.5 m 至标高 3.0 m 处, 在标高 2.5 m 处拆除第一道支护	2
4	围堰内降水开挖 3.5 m 至标高 -2.0 m 处, 在标高 0.5 m 处激活第二道支护	3	10	拆除基坑围堰拉森钢板桩	1
5	激活 0.5 m 厚 C15 混凝土垫层	1	11	激活新建桥墩顶部荷载	1

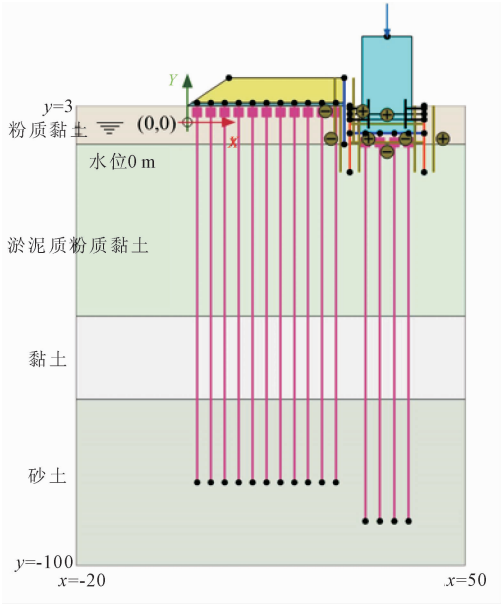


图 2 有限元模型图(单位:m)

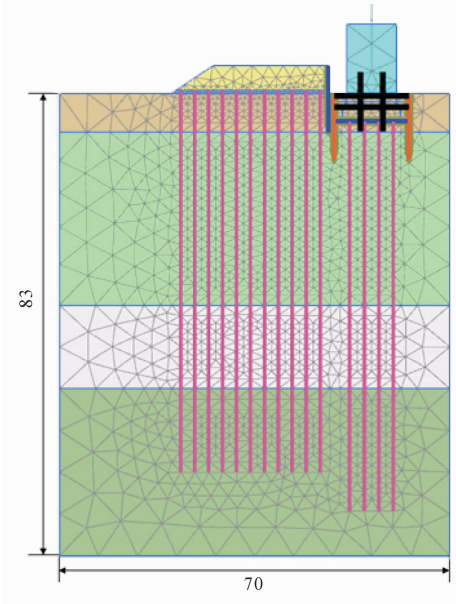


图 3 网格划分图(单位:m)

2 既有高铁线位移分析

对于既有高铁线的位移分析可以从路基土位移、挡土墙位移以及路基桩基础三个角度进行分析,通过各个施工工况下的位移变化能够全面地得到各个部位的位移趋势并给出对应的解释。

2.1 路基土位移

为了更直观地获取既有高铁线路基土体不同位置的变化情况,选取路基表面在不同位移区间的位置节点,记为位置 A—F,位置关系如图 4 所示。

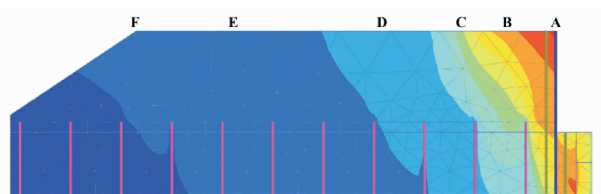


图 4 路基土体节点位置分布图

分别绘制水平和竖直位移曲线,如图 5 所示。从水平位移曲线可以看出,随着路基上位置到基坑距离的增大,对水平位移影响减小,E 和 F 位置已无差别。

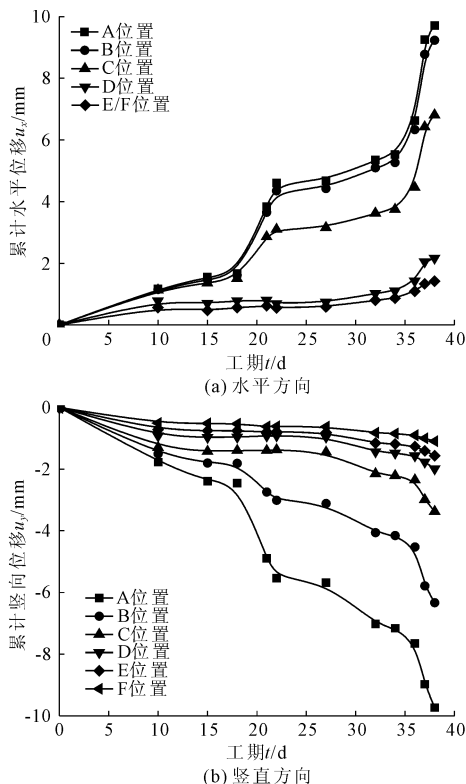


图 5 路基土体累计位移曲线图

图 5 经分析可得如下结论:

(1) 施工前期基坑内降水开挖为卸荷过程,基

坑周围地表土均会产生水平方向向内挤压,而竖向也会因应力释放产生沉降。同时,基坑内降水也是周围土体的沉降的一大因素,降水后地下水位下降,土层中地下水的浮托力作用减弱,由于水头压力的改变产生渗透压力,以上两种原因导致土体孔隙水压力减小,根据太沙基有效应力原理,在假设土层总应力不变的情况下,减小的孔隙水压力转化为有效应力增量,降水过程产生了附加应力导致土层被压缩,表现为基坑周边土体的竖向沉降。因此既有高铁线路基土体向水平正方向位移和向下沉降,最大累计水平位移 9.71 mm,最大累计沉降 9.73 mm,随着与基坑距离的增大,路基土体两个方向位移均减小。

(2) 从图中发现激活基坑内部支护和铺设混凝土垫层时累计水平位移会有轻微减少,这也就意味着距离基坑较远节点产生了由墩承台至路基方向的微小 x 负方向位移,考虑由于内支撑设置方向为横桥方向,在激活内支撑结构时,会使得横桥向土体产生向坑外微小挤压位移,而距离较远的路基土体侧向水平应力较小,故而既有高铁线路地基土体产生向基坑反方向的水平位移。对水平位移影响最大的是拆除钢板桩围堰,最大增量为 3.94 mm,其次为激活第二道支护、激活新建钻孔灌注桩以及拆除第一道支护。

(3) 各施工步骤均使路基土向下沉降。其中激活新建桥墩和其顶部荷载对邻近路基的沉降影响较大。

2.2 挡土墙位移

选取挡土墙结构,如图 6 所示,箭线为挡土墙位移方向,可见挡土墙向右下方偏移。进而选取挡土墙上四个节点 A—D,对应 y 坐标分别为 $y=8$ 、 $y=3.5$ 、 $y=3$ 和 $y=-4$,为挡土墙端点及其所接触土层分界面,绘制挡土墙水平和竖直位移曲线图,如图 7 所示,可见水平方向位移随深度变化,而整体沉降与深度无关。

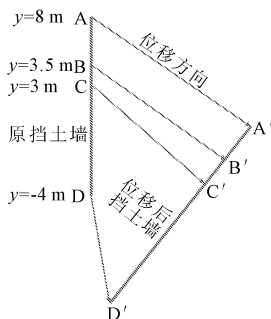


图 6 挡土墙节点分布图

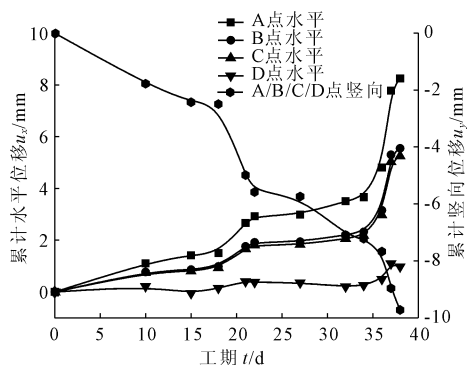


图 7 挡土墙累计位移曲线图

从图 6、图 7 可以得出如下结论:

(1) 挡土墙产生 x 正方向, y 负方向不断增大的位移。既有线路基土产生向基坑方向的水平位移趋势,对挡土墙产生主动土压力,故挡土墙也随之产生水平位移趋势。由于挡土墙对墙后土体的抵挡作用,故挡土墙的位移量相比土体位移量小一些;挡土墙设置于路基土中,因此与路基土体协同产生竖向沉降。水平方向位移受挡土墙深度影响,随着深度增大而减小,且挡土墙深度大于右侧基坑底部,底部土体受到影响较小,位移变化幅度较小,竖直方向位移不受深度影响,各个节点竖向位移量相同。

(2) 对水平位移影响最大为拆除基坑围堰时,达到 4.4 mm,考虑因为基坑钢板桩作为挡土结构承受既有高铁线一侧土体土压力,和既有挡土墙共同作为挡土结构保持相对稳定状态,当钢板桩拆除时,对既有线一侧土体侧向土压力承受能力减弱,从而导致既有挡土墙产生水平朝墩承台方向较大位移,其次激活第二道支护时影响较大。

(3) 竖向位移同样在设置第二道支护时影响最大,最大增量 3.73 mm,其次激活钻孔灌注桩对挡土墙沉降影响较大,增量为 2.67 mm。

2.3 路基桩基础位移

每根桩位移最大的节点为桩顶节点,将 11 根桩按距离基坑由近到远命名为 1—11 号桩,选取各桩顶节点,分别绘制桩水平和竖向位移曲线,如图 8 所示。

从图 8 中可以得出如下结论:

(1) 土体水平方向位移使得桩基础受到弯矩和水平附加应力增大,导致桩产生水平正方向位移和整体沉降,两个方向位移受桩基础到基坑距离的影响,随着距离增大而减小。水平方向虽然各个灌注桩间距相同,但是从图中可以明显看出,对最靠近基坑的 1 号桩影响程度最大,最大累计水平位移 6.08

mm,而相邻的 2 号桩位移仅有 3.24 mm。各个桩竖向位移随着到基坑距离增大而减小,同样对 1 号桩影响程度最大,最大累计竖向沉降为 4.56 mm。

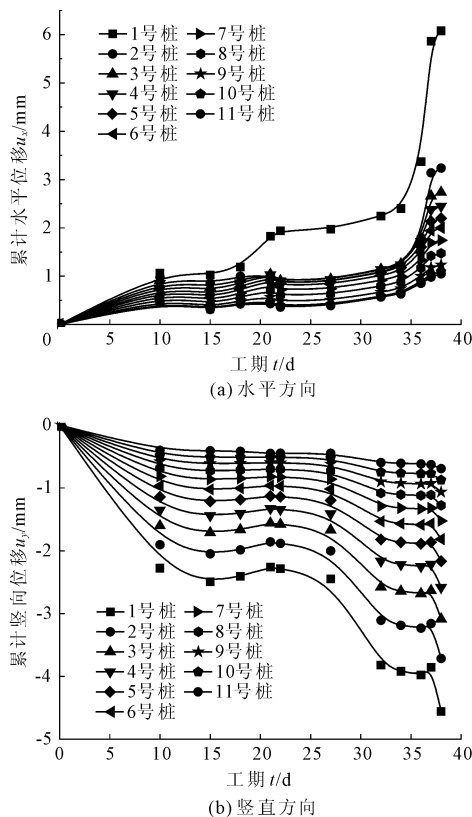


图 8 路基桩基础累计位移曲线图

(2) 拆除钢板桩围堰对水平方向位移影响最大,其余在钻孔、激活第二道支护以及拆除第一道支护时也会产生较大影响,以上四个步骤均使桩产生向基坑方向的水平正位移;钻孔对竖向位移影响最大,其余完成桥墩浇筑和激活桥墩顶部荷载也影响较大,可见基坑如果在上部施加较大荷载时,会对既有高铁线的桩竖向位移产生较大影响。

以上分析只是得到桩顶最大位移节点的位移情况,整根桩位移与深度的关系尚不明确,进而绘制位移最大的 1 号桩在影响较大的六个步骤下随深度变化的位移曲线图,如图 9 所示。

从图 9 中可以得到以下结论:

(1) 桩顶水平位移最大,随着深度增大至 10 m 附近标高处后减小至 0 mm,接着向 x 负方向位移,增大至标高 -25 m 处至负方向水平位移最大值 1 mm 附近。桩身下部至 -50 m 标高处再次向正方向位移,此时位移极大值为 0.2 mm,接下来再次向负方向位移至 -60 m 标高处,此时位移极大值为 0.11 mm,最后向正方向位移至 0 mm 处。可见桩身水平

正向位移主要集中在右侧基坑深度区间内,下部由于弯矩的作用朝水平负方向位移,同样会受到墩承台桩基础的影响但相对较小。

(2) 随着深度的增大,竖向位移逐渐减小,桩顶竖向位移最大值在激活桥墩顶部荷载时为 4.56 mm,桩底产生竖向位移最大值在激活桥墩顶部荷载时为 4.15 mm。

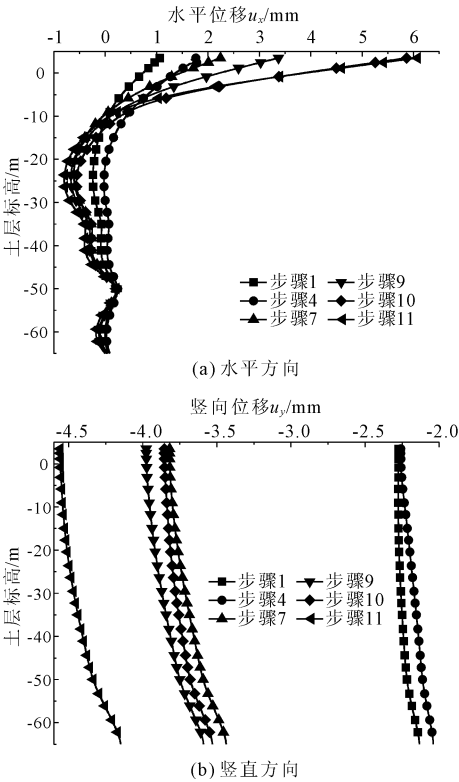


图 9 路基桩基础位移-深度关系曲线图

3 现场监测与有限元计算结果对比分析

有限元计算的结果能比较直观地呈现新建墩承台对邻近既有线路基的影响,但依然需要与实际监测数据对比以验证结果的可靠性。由于模型是以横桥平面进行建立,顺桥方向的位移情况在模型结果中无法展现,所以将有限元计算结果所得的土体水平位移和竖向位移与现场监测数据进行对比,模型计算位移与现场监测对比如图 10 所示。

从对比图中可以看出,水平位移和竖向位移在总体趋势上基本一致,都是逐渐增大趋势。在实际工程中既有线路基土体在水平方向朝着新建墩承台基坑方向移动,竖向也存在沉降。在关键施工节点上的位移趋势两者也比较吻合,证明了有限元计算的可靠性。但两者的结果还存在一定的差异性,现场监测结果总体稍大于模型计算结果,这可能是施

工现场多降水的天气条件造成的影响,总体来说有限元计算的结果可以反应实际的位移情况。

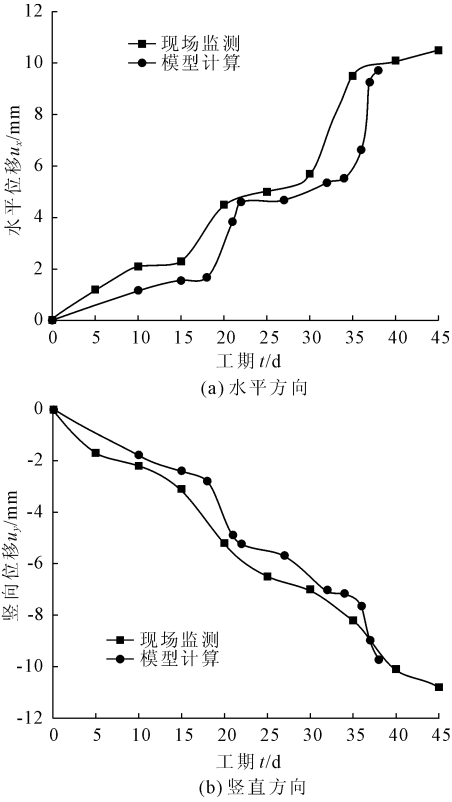


图 10 模型计算位移与现场监测对比图

4 施工距离对既有路基位移的影响

新建墩承台到既有线距离是影响既有线路基土体位移的关键因素,为了研究该距离对土体位移的具体影响,在该有限元模型的基础上,以两线之间距离为因变量,改变此变量的数值,重新计算,得出既有高铁线土体位移和距离的关系。

在原有模型的基础上,设新建墩承台工程到既有高铁线路基土距离设置为 d ,其他条件不变,改变 d 的值分别为 0.25 m、0.5 m、1 m、2 m、4 m、6 m、8 m、10 m、12 m、14 m、16 m、18 m、24 m、32 m、48 m 和 64 m,得出在不同距离下,既有线路基土体在水平和竖向方向位移最大值,且既有线路基土位移最大值点始终为上部填土最高点,该节点两个方向上总累计位移值如表 5 所示。

从表 5 中可知,随着新建墩承台到既有高铁线路基距离的增大,水平位移和竖向位移均呈减小趋势,接下来将对上述数据进行曲线拟合,得出路基填土位移 $u_{x/y}$ 随距离 d 的量化关系。拟合曲线即曲线方程如图 11 所示。

表 5 路基土位移-距离关系表

距离 d/m	水平位移 u_x/mm	竖向位移 u_y/mm	距离 d/m	水平位移 u_x/mm	竖向位移 u_y/mm
0.25	16.49	-16.88	12	5.02	-3.58
0.5	14.57	-14.60	14	4.32	-3.01
1	13.03	-12.84	16	3.76	-2.68
2	10.57	-9.90	18	3.24	-2.34
4	8.68	-7.35	24	2.55	-1.66
6	7.68	-6.07	32	1.70	-1.06
8	6.81	-5.03	48	1.01	-0.48
10	5.77	-4.17	64	0.62	-0.30

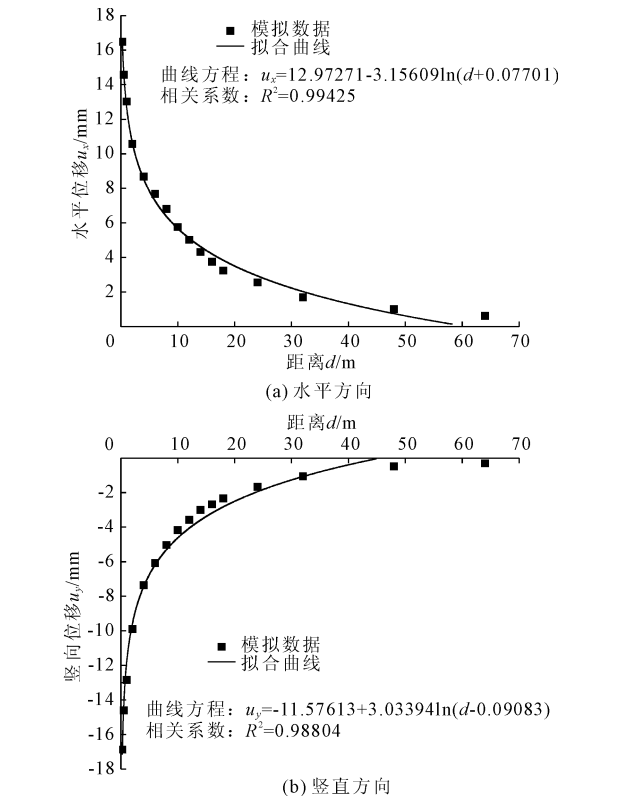


图 11 位移-距离关系拟合曲线图

根据数据散点图变化趋势,选择 $y = a + b\ln(x + c)$ 方程形式曲线进行拟合,拟合结果如下所示:

(1) 水平位移拟合曲线方程为:

$$u_x = 12.97271 - 3.15609\ln(d + 0.07701), R^2 = 0.99425 \tag{1}$$

式中: u_x 为水平方向位移,mm; d 为新建墩承台工程到既有高铁线路基土距离,m; R^2 为相关系数。

(2) 竖向位移拟合曲线方程为:

$$u_y = -11.57613 + 3.03394\ln(d - 0.09083), R^2 = 0.9880 \tag{2}$$

式中: u_y 为竖直方向位移,mm; d 为新建墩承台工程到既有高铁线路基土距离,m; R^2 为相关系数。

通过查阅文献和规范,目前关于邻近既有线墩

承台施工对既有高铁线位移限值和新旧线路安全范围的相关规定较少,在《铁路工程沉降位移观测与评估技术规程》^[16] 中对有砟轨道路基工后沉降在设计时速为 300 km/h~350 km/h 时,工后累计沉降一般路段小于等于 50 mm,过渡段小于等于 30 mm;在《建筑基坑工程监测技术标准》^[17] 中,基坑工程对于临近高速公路、道路主干的累计沉降限值为 10 mm~30 mm,一般城市道路沉降限值为 20 mm~40 mm,位移速率限值为 3 mm/d,在考虑高速铁路运行时速较大,故对于其位移限值的设置比高速公路应更加严格,从上文数值计算中我们得到水平位移和竖向位移在数值上位于相同数量级,故水平位移限定值也可参照竖向位移值,当对其位移限值进行规定后,可通过上文中所拟合的位移曲线计算反求得邻近墩承台施工的安全范围。

式中分别令 $u_x = 10 \text{ mm}$, $d_x = 2.49 \text{ m}$;令 $u_x = 5 \text{ mm}$, $d_x = 12.43 \text{ m}$;令 $u_x = 0$, $d_x = 60.89 \text{ m}$;式中分别令 $u_y = -10 \text{ mm}$, $d_y = 1.77 \text{ m}$;令 $u_y = -5 \text{ mm}$, $d_y = 8.83 \text{ m}$;令 $u_y = 0$, $d_y = 45.49 \text{ m}$ 。

综合考虑水平位移和竖向位移计算结果,当新建墩承台施工基坑深度较小且与邻近既有高铁线路基段施工距离在 60 m 以上时,对既有高铁线路几乎没有影响;在距离为 12 m~60 m 时,影响较小;在距离为 1.8 m~12.0 m 时,影响较大;在距离为 1.8 m 以下时,会产生很大影响。

5 结 论

本文以某软土地区邻近既有高铁线路基段墩承台工程为背景,借助 PLAXIS 有限元建立现场模型,研究了墩承台施工对邻近既有高铁路基段的影响,得出如下结论:

(1) 在基坑工程的有限元模拟中,土体应变属于小应变范畴,传统 M-C 模型具有一定局限性,HSS 模型可给出较为可靠的位移结果,且结果与现场实际监测结果能较好的吻合。

(2) 既有高铁线路基段位移最大值发生在路基靠近基坑一侧最上部顶点,向基坑方向的水平位移最大水平量为 14.6 mm,竖直方向最大沉降量为 14.6 mm;挡土墙也产生相同方向位移,最大水平位移 12.4 mm,最大沉降 14.6 mm;桩基位移主要出现在新建墩承台基坑深度范围内,且位移方向朝向基坑。

(3) 在施工工况中,对水平位移影响较大的为激活钻孔灌注桩、基坑降水开挖、钢板桩的插拔和基坑回填,对沉降影响较大的为激活钻孔灌注桩、基坑

降水开挖、新建桥墩的浇筑与加载。

(4) 当邻近既有高铁线桥梁段施工距离在 60 m 以上时,对既有高铁线几乎没有影响;在距离为 12 m~60 m 时,影响较小;在距离为 1.8 m~12.0 m 时,影响较大;在距离为 1.8 m 以下时,会产生很大影响。

参考文献:

- [1] Liyanapathirana D S, Nishanthan R. Influence of deep excavation induced ground movements on adjacent piles [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016,52:168-181.
- [2] Shakeel M, Ng C W W. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018,96:55-72.
- [3] 郑 刚,颜志雄,雷华阳,等. 基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J]. *岩土工程学报*, 2007,29(5):638-643.
- [4] 王 菲,嵇 一. 基坑开挖对既有铁路桥基础变位的影响分析[J]. *铁道工程学报*, 2012,29(8):28-33.
- [5] 苗 笛. 基坑开挖对邻近桥梁影响的数值模拟[J]. *港工技术*, 2014,51(5):76-79.
- [6] 王木群. 基坑开挖对临近桥桩的影响及基坑稳定性分析[J]. *中外公路*, 2014,34(3):197-200.
- [7] 高 东,汪东林. 基坑开挖对临近高架桥桩的影响[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2017,35(3):

435-438.

- [8] 鲁宇威. 基坑开挖对临近高架桥承台基础的影响数值模拟研究[J]. *甘肃水利水电技术*, 2020,56(8):24-28.
- [9] 金宏刚,蔡连波,胡敏云. 基于有限元模型的深基坑开挖对邻近桥梁的影响分析[J]. *科学技术创新*, 2020(35):140-142.
- [10] 陈 聪,王增吉. 基坑开挖对临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):39-41.
- [11] 陈金祥,於方莹,吴杰良. 基坑开挖对邻近桥梁承台影响的数值分析研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2015,11(8):157-159.
- [12] 高立刚,宁贵霞. 基坑开挖深度对既有铁路线变形的影响分析[J]. *南阳理工学院学报*, 2016,8(2):102-105.
- [13] 罗光财,蒋 彪,汪庆桃,等. 穿越运营地铁车站的基坑开挖及对既有线的影响[J]. *市政技术*, 2017,35(2):158-161,165.
- [14] 胡 军. 深基坑开挖对邻近既有高铁桩基影响研究[J]. *铁道工程学报*, 2017,34(6):12-17,22.
- [15] 孟繁增. 基坑开挖引起邻近高铁桥墩隆起变形实例分析[J]. *铁道标准设计*, 2020,64(4):98-103.
- [16] 铁路工程沉降变形观测与评估技术规程: Q/CR 9230—2016[S]. 北京:中国铁道出版社,2016.
- [17] 建筑基坑工程监测技术规范: GB 50497—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(上接第 120 页)

- [13] Jiang Yanji, Zhang Xiongxiang, Yin Xianqiang, et al. Graphene oxide-facilitated transport of Pb^{2+} and Cd^{2+} in saturated porous media[J]. *Science of The Total Environment*, 2018,631-632:369-376.
- [14] Li Fen, Jiang Xue, Zhao Jijun, et al. Graphene oxide: A promising nanomaterial for energy and environmental applications[J]. *Nano Energy*, 2015,16:488-515.
- [15] Ramesha G K, Kumara A, Muralidhara H B, et al. Graphene and graphene oxide as effective adsorbents toward anionic and cationic dyes[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011,361(1):270-277.
- [16] Bai Bing, Rao Dengyu, Chang Tao, et al. A nonlinear attachment-detachment model with adsorption hysteresis for suspension-colloidal transport in porous media[J]. *Journal of Hydrology*, 2019,578:124080.

- [17] Bai Bing, Jiang Sichen, Liu Lulu, et al. The transport of silica powders and lead ions under unsteady flow and variable injection concentrations[J]. *Powder Technology*, 2021,387:22-30.
- [18] Hu Zhongliang, Qin Shilin, Huang Zhi, et al. Recyclable graphene oxide-covalently encapsulated magnetic composite for highly efficient $Pb(II)$ removal[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2017,5(5):4630-4638.
- [19] Ghosh D, Chakraborty K, Bharti, et al. The effects of pH, ionic strength, and natural organics on the transport properties of carbon nanotubes in saturated porous medium[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022,647:129025.