

软土深基坑施工对近接铁路桥变形影响分析

胡钟予¹, 刘国买¹, 姚志雄^{1,2}, 吴贵³

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;

3. 中土集团福州勘察设计院有限公司, 福建 福州 351111)

摘要: 为探明软土深基坑开挖及加固施工对近接既有铁路桥梁的影响并评价铁路桥安全性, 以福建滨海地区某涉铁软土深基坑工程为依托, 结合勘察提供的样本数据及工程特点, 构建基于HSS本构的有限元模型, 分析各施工阶段对近接铁路桥变形的影响规律。结果表明: 典型位置变形的模拟值和实测值基本接近, SMW工法围护结构及软基加固桩施工产生的挤土效应使近接桥墩轻微下沉约0.5 mm, 基坑开挖产生的卸载效应使近接桥墩上抬, 特别是对位于基坑内的桥墩影响较明显, 上抬幅度约为0.3 mm, 近桥段开挖使桥墩上抬约为远桥段开挖的两倍, 其变形在U型槽施工后基本趋于稳定, 最终变形值也满足控制要求。研究结果可为类似工程提供借鉴。

关键词: 既有铁路桥; 软土基坑; 桥墩位移; Plaxis 3D; 位移监测

中图分类号: U433

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)06-0523-08

Analysis of influence of soft soil deep foundation pit construction on deformation of adjacent railway bridge

HU Zhongyu¹, LIU Guomai¹, YAO Zhixiong^{1,2}, WU Ben³

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering of Colleges and Universities in Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

3. CCECC Fuzhou Survey and Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 351111, China)

Abstract: In order to investigate the impact of excavation and reinforcement construction of soft soil deep foundation pits on adjacent existing railway bridges and evaluate the safety of railway bridges, a finite element model based on HSS constitutive model was constructed on the basis of an existing railway-bridge-related soft soil deep foundation pit project in the coastal area of Fujian, combined with sample data and engineering characteristics provided by the survey, so as to analyze the impact of each construction stage on the deformation of adjacent railway bridges. Results indicate that the simulated values of deformation at typical locations are basically close to the measured ones. The soil compaction effect caused by the construction of the retaining structure and soft foundation reinforcement piles with the SMW method has caused slight settlement of the adjacent bridge piers by about 0.5 mm. The unloading effect caused by excavation of the foundation pit has caused the adjacent bridge piers to rise up, especially for the piers located within the foundation pit, with an upward displacement of about 0.3 mm. The uplift caused by excavation near the bridge is approximately twice that caused by excavation far from the bridge. However, their deformation tends to stabilize after construction of the U-shaped groove, and the final deformation value also meets the control requirements. The research results can serve as a reference for similar projects.

Keywords: existing railway bridges; soft soil foundation pits; pier displacement; Plaxis 3D; displacement monitoring

收稿日期: 2023-07-27

基金项目: 福建省自然科学基金(2021J011061)

第一作者简介: 胡钟予(1995—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向: 基坑支护、软土本构模型。

通信作者: 刘国买(1966—), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士, 研究方向: 风险管理、技术经济。

国家高铁交通网日益完善,近接既有铁路的基坑工程、下穿铁路桥通道、隧道工程等日益增多,此类工程施工容易导致铁路桥产生较大变形,可能影响铁路安全运营。施工中如工程桩施工、基坑开挖、围护结构施做、降排水等产生的加卸荷效应、地下水渗流往往会破坏土体的原有平衡状态,引起应力重分布,从而使得周边土体及近接铁路桥等产生附加变形并危及安全,尤其在土质松软、压缩模量低、承载力差的滨海软土地区,这种影响更是不可忽视^[1]。

国内外学者对近接工程结构施工力学特性及相互影响机制方面做了一定研究。董亮等^[2]通过有限元模拟分析了地面堆卸载对邻近铁路桥墩沉降的影响。刘永航等^[3]基于湖北荆州某项目,分析了基坑开挖对邻近桥墩的影响。TAN 等^[4]整理了上海多个地铁基坑的监测数据,分析了基坑开挖的时空效应。肖岚心^[5]总结了滨海软土地层特性以及软土基坑的施工问题。张鑫磊等^[6]依托南京某工程,通过对比现场监测数据与数值模拟结果,分析了基坑施工对近邻桥墩变形的影响。但由于基坑工程导致的地质、环境条件各异,且施工方法、支护结构不同,基坑施工与近接工程相互影响机制复杂,滨海软土地区涉铁深基坑工程施工力学特性及影响机制仍需进一步研究。

本文以福州滨海软土地区某下穿高铁桥河道深基坑工程为背景,运用 Plaxis 3D 软件对项目进行建模计算,结合近接铁路桥桥墩的水平及竖向位移的监测数据,研究了软土基坑施工对近接桥梁结构变形的影响情况,评价基坑施工方案的合理性及近接高铁桥的安全性,以期类似涉铁工程安全施工提供借鉴。

1 项目概况

1.1 工程内容及周边环境

南洋六河位于福州滨海地区,河道下穿福平铁路石门特大桥。该工程项目施工包括软基加固工程、基坑开挖、围护结构及 U 型槽施工等。基坑工程长 6 918 cm,宽 5 220 cm,开挖深度约 610 cm,铁路桥垂直跨越河道基坑,17#桥墩位于基坑内,16#桥台和 18#桥墩位于基坑侧壁,桥下净空高度不到 10 m。基坑周边平坦开阔,地面高程 2.0~5.0 m。图 1 为项目基坑平面图。

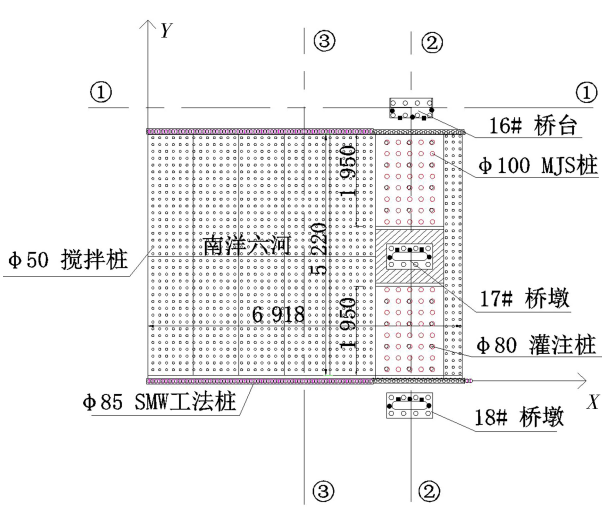


图 1 基坑平面图(单位:cm)

Fig.1 Plan view of foundation pit (unit:cm)

1.2 工程地质条件

场地土层自上而下可分为:0(2)素填土,厚度 2.1 m;1(2-1)淤泥质黏土,厚度 7.4 m;1(6-1)中砂,厚度 4.7 m;1(2-1)淤泥质黏土,厚度 7.5 m;1(10-1)粗砂夹圆砾土,厚度 3.6 m;1(2-1)淤泥质黏土,厚度 9.0 m。具体分布见图 2 地层剖面图。根据勘察资料,各土层的物理力学参数取值如表 1 所示。



图 2 ①—①地层剖面图(单位:m)

Fig.2 ①—① stratigraphic section (unit:m)

1.3 工程设计及测点布置

按照桥下净空和临近铁路桥施工微扰动的要求,桥下软基采用直径 100 cm 的 MJS 工法桩和 80 cm 的灌注桩加固。基坑围护结构采用 SMW 工法桩,工法桩为直径 85 cm 三轴搅拌桩内插 H700×300×13×24 型钢,围护结构未采用内支撑。基坑开挖完成后施做混凝土 U 型槽。依据测点布置的几何分布和对称性原则,分别在 16#桥台和 17#、18#桥墩上选取 5 个具有代表性的测点监测,包括 3 个水平位移测点和 2 个沉降位移测点。项目中各个

结构体的尺寸及测点位置如图 3 所示。

施工步骤:(1)施工 SMW 工法桩和基础加固桩;(2)近桥段基坑开挖至基底标高;(3)远桥段基坑开挖至基底标高;(4)施工混凝土 U 型槽主

体结构。其中,近桥段开挖范围为铁路桥侧面延伸约 15 m 范围,该范围内的开挖对桥墩影响较大,远桥段开挖范围为铁路桥侧面延伸 15 m 以外。

表 1 土体物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil

地层编号	名称	天然密度/ (g·cm ⁻³)	内摩擦角/ (°)	天然 孔隙比	黏聚力/ kPa	液限/%	压缩模量/ MPa	固结 系数	承载力/ kPa
0(2)	素填土	1.70*	20.00*	0.91	/	37.30	2.50*	/	/
1(2-1)	淤泥质黏土	1.74	3.59	1.26	13.22	41.36	2.82	1.54	60
1(6-1)	中砂	1.90*	24.00*	/	/	/	12.00*	/	150
1(10-1)	粗砂夹圆砾土	1.95*	35.00*	/	/	/	13.00*	/	250

注:表中“*”均为经验值。

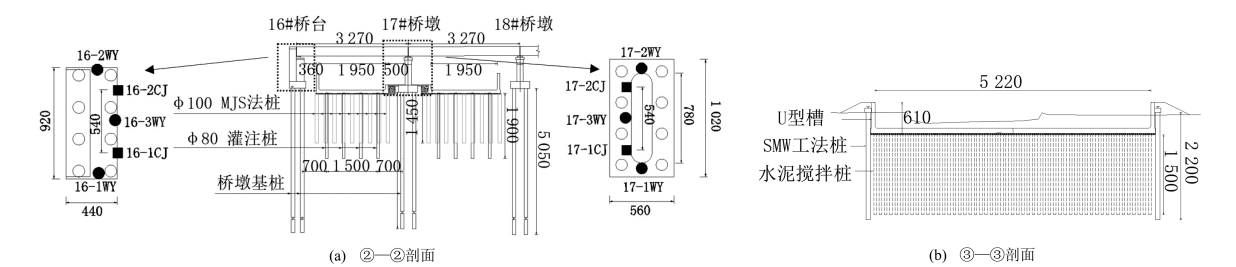


图 3 剖面图及测点布置(单位:cm)

Fig.3 Section and layout of monitoring points(unit:cm)

2 有限元模拟

2.1 模型假设

- (1)各土层质地均匀,土层结构通过两个钻孔确定分布关系,如图 4 所示。
- (2)岩土采用 HSS 本构模型。
- (3)模型中的结构单元均为线弹性本构。
- (4)考虑到边界效应,将岩土实体单元的模式范围设定为实际的 2~3 倍,模型范围为 150 m×70 m×70 m。
- (5)不考虑施工产生的堆载和振动影响。

2.2 岩土本构模型参数选取

HSS 模型主要包含 3 个物理参数、4 个模量参数和 4 个高级参数^[7]。其中,物理参数按表 1 选取,高级参数取软件默认值,不同地区土层的模量参数差异较大,需按照项目中的岩芯样本数据进行相关计算取值^[8]。根据文献[9][10],模量参数 E_{s1-2} 可通过土的液限指标计算,其他模量参数按照一定的比例换算^[11]。对本项目勘察的 29

0(2)	素填土	380	380
1(2-1)	淤泥质黏土	630	520
1(6-1)	中砂	460	760
1(2-1)	淤泥质黏土	810	710
1(10-1)	粗砂夹圆砾土	430	300
1(2-1)	淤泥质黏土	1 110	1 150
1(10-1)	粗砂夹圆砾土	钻孔1	钻孔2

图 4 土层模型剖面图(单位:cm)

Fig.4 Sectional view of soil layer model(unit:cm)

个岩芯样本数据拟合分析,得到如下计算公式:

$$E_{s1-2} = 1.2 / (w_1 - 0.084) \tag{1}$$

式中, E_{s1-2} 为围压 100~200 kPa 时的压缩模量,MPa; w_1 为土体的液限,%。拟合函数的决定系数 R^2 为 0.81,满足置信要求,曲线拟合度较好。

各模量参数之间的比例关系如式(2):

$$E_{s1-2} : E_{50} : E_{oed} : E_{ur} = 1 : 1 : 0.9 : 4.2 \tag{2}$$

式中, E_{50} 为三轴试验参考围压下 50% 强度的割线模量,MPa; E_{oed} 为计算压缩模量,MPa; E_{ur} 为卸载模量,MPa。

根据文献[9]及上述拟合公式,计算各土层的 HSS 模型参数见表 2。表 2 中, G_0 为土的剪切模量,一般取值为 E_{50} 的 10~20 倍; ν_{ur} 为卸载泊松

比; $\gamma_{0.7}$ 为剪切模量衰减至 70% 时的剪应变;应力相关幂指数 m 取 0.5。

表 2 HSS 模型参数取值
Tab.2 Parameter values of HSS model

地层名称	E_{50}/MPa	E_{ocd}/MPa	E_{ur}/MPa	ν_{ur}	G_0/MPa	$\gamma_{0.7}$	m
素填土	2.00	2.40	12.0	0.30	30	0.000 15	0.5
淤泥质黏土	3.64	3.28	15.3	0.30	72	0.000 15	0.5
中砂	20.00	24.00	120.0	0.30	300	0.000 14	0.5
粗砂夹圆砾土	15.00	18.00	9.0	0.28	300	0.000 15	0.5

2.3 模型参数设置

结构单元模型使用了 Plaxis 3D 内置的板单元以及 Embedded 桩单元模型。对基坑支护结构采用板单元建模,主要包括:(1)铁路桥非下穿段两侧的 SMW 工法桩支护;(2)U 型槽结构;(3)桥下 MJS 工法桩和钻孔桩所组成的支护隔水结构。重度参数按照组合材料构成比例计算,水泥土的重度为 18.5 kN/m^3 ,型钢为 78.5 kN/m^3 ,HRB400 钢筋重度为 24.7 kN/m^3 ,C40 混凝土重度为 24 kN/m^3 。板单元刚度 E_1 、厚度 d 和剪切刚度 G_{12} 用下列公式计算:

$$E_1 = E_s I_s (1 + \alpha) \tag{3}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{12B}{E_c(w+t)}} \tag{4}$$

$$G_{12} = \frac{5GAb^2}{h(2h^2 + 5b^2)}$$

式中, α 为水泥土刚度贡献系数,取 0.1; E_s 为型钢的弹性模量,MPa; I_s 为型钢的截面惯性矩, cm^4 ; t 为型钢间距,cm; w 为型钢宽度,cm; E_c 为水泥土的弹性模量,MPa; G 为材料剪切模量,MPa; A 为截面积, cm^2 ; b 、 h 分别为截面宽度和高度,cm。

部分板单元为多种材料和结构的组合,经过换算得到参数见表 3。

对软基支护结构加固采用水泥搅拌桩、MJS 桩和钻孔灌注桩,模型采用 Embedded 桩单元。根据设计方案,选用 C40 混凝土,刚度参数参考《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)确定,搅拌桩的桩侧摩阻力按照 60 kPa 计算,桥下灌注桩和钻孔桩按照 100 kPa 计算,结合桩径参数换

算为单位长度摩阻力,桩端反力取 1 000 kN。得到参数见表 4。

表 3 支护结构计算参数
Tab.3 Calculation parameters of supporting structure

板单元	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	刚度 E_1/MPa	厚度 d/m	剪切刚度 G_{12}/MPa
SMW 工法桩	23.5	28 000	0.9	11 600
U 型槽	28.0	33 000	1.0	8 300
MJS 桩+钻孔桩	35.0	35 000	1.2	14 500

表 4 软土地基加固桩和 U 型槽基础计算参数

Tab.4 Basic calculation parameters for soft soil foundation reinforcement piles and U-shaped groove

桩名	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	刚度 E_1/MPa	直径 d/m	摩阻力 $q_s/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
水泥搅拌桩	18.5	20 000	0.5	110
支护加固桩	20.0	20 000	1.0	250
钻孔灌注桩	25.0	35 000	0.8	250

2.4 计算结果

有限元模型采用四面体网格单元,网格密度设为中等,三维模型及网格划分如图 5 所示。

铁路桥在纵向受到边界约束,其纵向刚度趋于无限大,所以铁路桥墩产生纵向水平位移可以忽略不计,在有限元模拟中仅计算桥墩侧向水平位移和沉降。考虑到结构的对称性,选择位于基坑内侧的 17#桥墩和基坑侧壁的 18#桥墩作为研究主体,计算结果如图 6 和图 7 所示。

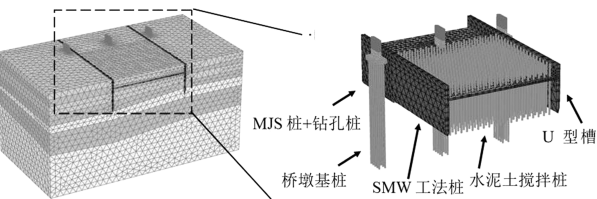


图 5 三维模型及网格划分图

Fig.5 3D model and mesh division diagram

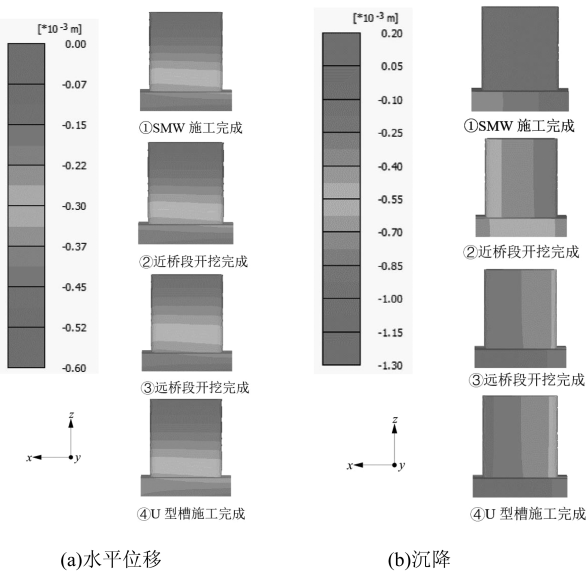


图 6 17#桥墩位移云图

Fig.6 Cloud chart of Pier 17#

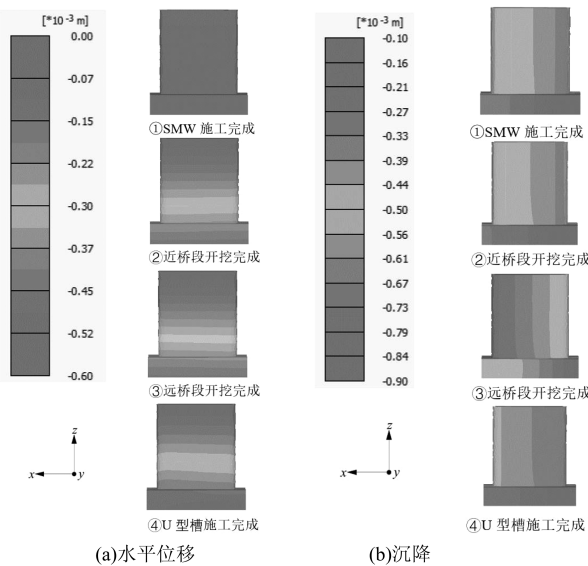


图 7 18#桥墩位移云图

Fig.7 Cloud chart of Pier 18#

由图 6、图 7 可知,两桥墩的整体水平位移在各施工阶段变化幅度较小,同一位置变化幅度在 0.2 mm 以内。而沉降在近桥段和远桥段的开挖阶

段有明显变化,表现为轻微上浮趋势,随着 U 型槽施工完成,这种上浮趋势减弱。17#桥墩在 SMW 施工完成后最大累计沉降量约为 1.3 mm,基坑开挖使得结构整体上升约 1.1 mm,U 型槽施工完成后,桥墩整体沉降约为 0.2 mm,满足控制要求。

3 监测结果与对比分析

3.1 监测结果

对桥墩监测频率为每日一次,共有 298 d 的监测数据,监测结果如图 8 和图 9 所示。水平位移计量方向参照图 1 中的坐标系,初始状态为零点,以 x 轴正向为正;沉降计量值正值为上浮,负值为下沉。

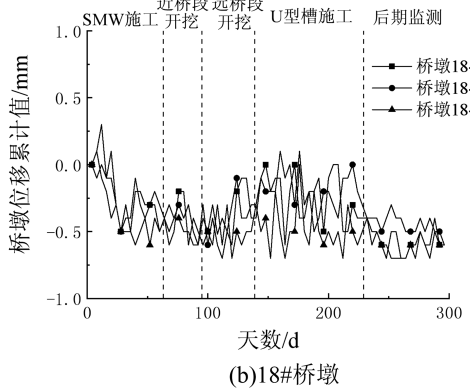
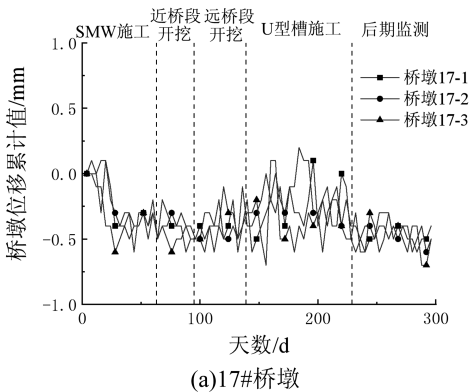


图 8 桥墩水平位移监测曲线

Fig.8 Horizontal displacement monitoring curve of bridge piers

由图 8 可知,施工过程中 17#~18#桥墩的水平位移在 $-0.5\sim0.2$ mm 范围振荡。在 SMW 工法围护结构施工阶段,基坑内施加了大量搅拌桩加固地基,整体扰动较大,桥墩水平位移振荡较剧烈;在近桥段及远桥段基坑开挖时,支护结构已发挥作用,桥墩水平位移呈较均匀振荡且振幅较小,说明开挖对桥墩水平位移的影响较小;在 U 型槽

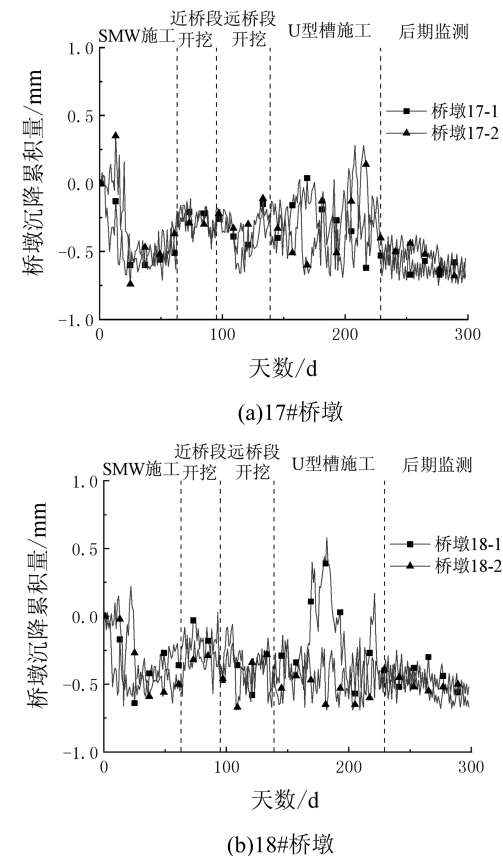


图 9 桥墩竖向位移监测曲线

Fig.9 Vertical displacement monitoring curve of bridge piers

施工阶段其水平位移振荡幅度有所加大,这与该阶段较大的施工扰动有关,随着 U 型槽封闭并与围护结构形成整体受力,桥墩位移基本呈轻微振荡,并稳定在 -0.5 mm 处,可满足规范要求。两个桥墩水平位移变化趋势相似。

由图 9 可知,在 SMW 施工初期,由于轻微挤土效应导致桥墩略微上抬,随着土体应力调整桥墩沉降值稳定于 0.5 mm ;在近桥段开挖阶段,桥墩上抬曲线较为陡峭,在远桥段开挖初期,桥墩有一定回落,之后会再次轻微上抬,位移曲线平缓,桥墩上抬幅度约为近桥段开挖的一半,这说明基坑开挖范围离桥墩越近,影响越明显,而远桥段初期的回落则是因为施工进度停滞及基坑内的堆载,使得土体自然沉降;随着基坑开挖产生卸载效应,桥墩有上浮趋势,位于基坑中间的 17#桥墩上浮趋势更加明显。在 U 型槽施工阶段,桥墩竖向位移振荡幅度加大,位于基坑内的 17#桥墩沉降在 $\pm 0.3\text{ mm}$ 范围振荡,总体满足规范要求。

3.2 比较分析与讨论

实测值参照图 8 和图 9,结合实际工况,选取关键工况的特征位置取值,模拟值选用与实际工况相对应的累计位移变形量。在选取模拟值时,参照图 1 中的测点分布,选择对应节点的累计位移量。分别对 17#、18#桥墩水平位移分析比较,如表 6、表 7 所示。

表 6 17#桥墩水平位移对比分析

Tab.6 Comparative analysis of horizontal displacement for Pier 17#

施工节点	水平位移 1/mm			水平位移 2/mm			水平位移 3/mm		
	实测值	模拟值	误差值	实测值	模拟值	误差值	实测值	模拟值	误差值
初始状态	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMW 施工完成	-0.33	-0.29	0.03	-0.36	-0.15	0.21	-0.40	-0.36	0.04
近桥段开挖完成	-0.44	-0.26	0.18	-0.43	-0.40	0.07	-0.52	-0.38	0.14
远桥段开挖完成	-0.35	-0.26	0.09	-0.42	-0.55	0.13	-0.36	-0.30	0.06
U 型槽施工完成	-0.42	-0.28	0.14	-0.39	-0.35	0.04	-0.33	-0.25	0.08

表 7 18#桥墩水平位移对比分析

Tab.7 Comparative analysis of horizontal displacement for Pier 18#

施工节点	水平位移 1/mm			水平位移 2/mm			水平位移 3/mm		
	实测值	模拟值	误差值	实测值	模拟值	误差值	实测值	模拟值	误差值
初始状态	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SMW 施工完成	-0.29	-0.15	0.14	-0.38	-0.22	0.16	-0.45	-0.20	0.25

续表

施工节点	水平位移 1/mm			水平位移 2/mm			水平位移 3/mm		
	实测值	模拟值	误差值	实测值	模拟值	误差值	实测值	模拟值	误差值
近桥段开挖完成	-0.42	-0.26	0.16	-0.46	-0.28	0.18	-0.55	-0.27	0.28
远桥段开挖完成	-0.35	-0.29	0.06	-0.39	-0.24	0.15	-0.49	-0.19	0.30
U 型槽施工完成	-0.41	-0.26	0.15	-0.42	-0.22	0.20	-0.46	-0.21	0.25

由表 6、表 7 可知,两座桥墩水平位移实测值和模拟值相近,各个施工阶段的误差值总体均小于 0.3 mm,说明计算结果能较准确地反映桥墩的水平位移变化。整个施工阶段,桥墩沿桥面板侧向先向基坑内侧,即 x 负向发生水平位移,在近桥段开挖完成后水平位移达到最大约为 $-0.4 \sim -0.5$ mm,之后远桥段开挖和 U 型槽施工使得桥墩的累计水平位移量逐渐减小,减小至 $-0.2 \sim -0.3$ mm。由图 7 可知,由于受到施工扰动及其他外部因素影响,导致各个测点水平位移有约 0.15 mm 的误差,但实测值和数值模拟结果均满足桥墩水平位移 ± 2.5 mm 的控制值要求^[12]。

17#、18#桥墩沉降对比分析如表 8、表 9 所示。

表 8 17#桥墩沉降对比分析

Tab.8 Comparative analysis of settlement for Pier 17#

施工节点	沉降 1/mm			沉降 2/mm		
	实测值	模拟值	误差值	实测值	模拟值	误差值
初始状态	0	0	0	0	0	0
SMW 施工完成	-0.51	-1.26	0.75	-0.53	-0.95	0.42
近桥段开挖完成	-0.32	-0.13	0.19	-0.26	-0.27	0.01
远桥段开挖完成	-0.30	0.12	0.42	-0.24	-0.11	0.35
U 型槽施工完成	-0.46	-0.18	0.28	-0.46	-0.19	0.27

表 9 18#桥墩沉降对比分析

Tab.9 Comparative analysis of settlement for Pier 18#

施工节点	沉降 1/mm			沉降 2/mm		
	实测值	模拟值	误差值	实测值	模拟值	误差值
初始状态	0	0	0	0	0	0
SMW 施工完成	-0.42	-0.78	0.36	-0.52	-0.91	0.39

续表

施工节点	沉降 1/mm			沉降 2/mm		
	实测值	模拟值	误差值	实测值	模拟值	误差值
近桥段开挖完成	-0.23	-0.52	0.28	-0.28	-0.69	0.41
远桥段开挖完成	-0.45	-0.36	0.09	-0.48	-0.31	0.17
U 型槽施工完成	-0.52	-0.44	0.08	-0.52	-0.18	0.34

由表 8、表 9 可知,两座桥墩的沉降实测值和模拟值误差约 0.2~0.75 mm。从模拟结果可以看出,SMW 施工完成后,两座桥墩会发生 0.9~1.2 mm 的沉降,之后近桥段和远桥段基坑开挖使得桥墩产生上浮,这是由基坑开挖产生的卸载效应导致土体回弹所致。在软土地区,由于软土卸载模量较小,这种卸载效应更加显著。同时,基坑开挖导致的桥墩上浮具有空间效应。近桥段开挖导致的桥墩上浮幅度约为远桥墩开挖的两倍。为了抑制基坑开挖导致的桥墩上浮,在实际施工中通过适当放缓开挖速度并在基坑内堆载反压等方式来解决。由图 9 可知,在近桥段开挖完成后,采用上述措施可保障后续施工中桥墩变形满足控制的要求。

4 结论

1)通过有限元计算可知,围护结构施工、基坑开挖及 U 型槽施工等产生的扰动、卸荷等效应,均对近接铁路桥墩变形产生影响。施工过程中桥墩变形总体呈振荡状态,开挖产生的卸载效应使得影响范围内的桥墩有上升趋势,位于基坑内的桥墩影响较大,但总体位移均满足规范要求。

2)实测表明,施工过程中近接桥墩各个测点水平位移值小于 0.6 mm,竖向位移小于 0.7 mm,说明基坑施工方法、软基加固方式及围护结构形

式可行,基坑工程施工对近接铁路桥影响微小,满足铁路运行安全要求。

3)选取桥墩典型位置的变形模拟值及实测值比较分析。结果表明,变形模拟结果与实测值较接近,误差可满足工程精度要求,且总体变形均小于控制值,铁路桥结构是安全的。施工中可通

过放缓开挖速度、在基坑内部堆载反压等方式来进一步控制近接铁路桥变形,以保障铁路桥安全运营。模型计算结果能较好反映各施工阶段对铁路桥变形的影响情况,理论计算为工程实践提供了指导。

参考文献:

- [1] 金乐文,王琛,梁发云. 城市滨海软土地区深层地下空间开发现状及工程问题[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):178-183.
- [2] 董亮,苏永华,袁磊. 地面堆卸载作用对铁路桥墩沉降的影响分析[J]. 铁道建筑,2019,59(5):51-55.
- [3] 刘永航,黄文雄,秦响,等. 基坑开挖对邻近桥墩桩基的影响分析[J]. 建筑安全,2022,37(9):20-23.
- [4] TAN Y,WEI B,ZHOU X,et al. Lessons learned from construction of Shanghai metro stations:importance of quick excavation,prompt propping,timely casting, and segmented construction[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015,29(4):04014096.
- [5] 肖岚心. 滨海软土地区某基坑变形监测与数值模拟研究[D]. 长春:吉林建筑大学,2022.
- [6] 张鑫磊,纪展鹏,高洪梅,等. 深基坑施工对邻近桥墩变形的影响[J]. 建筑结构,2022,52(24):131-137.
- [7] 梁发云,贾亚杰,丁钰津,等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(2):269-278.
- [8] 谢东武,管飞,丁文其. 小应变硬化土模型参数的确定与敏感性分析[J]. 地震工程学报,2017,39(5):898-906.
- [9] 顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学,2021,42(3):833-845.
- [10] VERMEER P A,NEHER H P. A soft soil model that accounts for creep[M]//Beyond 2000 in Computational Geotechnics. New York:Routledge,2019:249-261.
- [11] 顾晓强,陆路通,李雄威,等. 土体小应变刚度特性的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(3):312-317.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 邻近铁路营业线施工安全监测技术规程:TB10314-2021[S]. 北京:中国计划出版社,2020.

(责任编辑:陈雯)