

新建道路下穿桥梁开挖对桥墩的影响分析

庄志福

(福州市规划设计研究院集团有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 为研究新建道路下穿桥梁时基坑开挖对桥墩和基桩的影响,以福州市马尾区某下穿高速桥梁的U槽工程为背景,采用MIDAS/GTS软件建立三维弹塑性有限元模型,模拟基坑开挖全过程(含支护施工、U槽浇筑等工况)。分析表明:基坑开挖导致桥墩和基桩产生顺桥向偏位,且变形随基坑与桥墩距离减小而增大;U槽主体结构施工后,土体反压效应使墩柱偏位值显著降低;基桩最大弯矩与剪力集中于淤泥层中部和底部,内力值随着与基坑距离的减小而增加;采用支护桩+临时支撑方案后,墩柱和基桩变形有较大减少,验证了支护措施的有效性。现场监测结果与模拟结果趋势一致,各桥墩位移值均低于规范限值。工程建议:U槽选址宜远离桥墩或位于桥梁跨中;软弱土层开挖需结合支护措施(如旋喷桩加固+钢支撑)以控制变形。所作研究为类似下穿工程的设计和施工提供了理论依据和技术参考。

关键词: 基坑开挖;桥墩变形;基桩内力;数值模拟;支护措施。

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0320-07

Analysis on Impact of Excavation of Newly Built Roads Underneath Bridge on Piers

ZHUANG Zhifu

(Fuzhou Planning and Design Research Institute Group Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: To study the impact of foundation pit excavation on bridge piers and piles during the construction of new roads under the existing bridges, taking the U-groove project under an expressway bridge in Mawei District of Fuzhou as the background, a 3D elastoplastic finite element model is established by using the MIDAS/GTS software to simulate the whole process (including support construction and U-groove grouting) of foundation pit excavation. The analysis shows that the excavation of foundation pit causes the bridge piers and foundation piles to deviate along the bridge direction, and the deformation increases with the decrease of the distance between the foundation pit and the bridge pier. After the construction of U-groove structure, the soil reverse pressure effect significantly reduces the deviation value of the pier column. The maximum bending moments and shear forces of foundation piles concentrate at the middle and bottom of silt layers, and the internal force value increases with the decrease of distance from foundation pit. After the supporting piles + temporary bracing scheme is used, the deformations of pier columns and foundation piles are substantially reduced, which validates the effectiveness of the support measures. The on-site monitoring results align with simulation results, and the displacement values of piers are all below the standard limits. The engineering suggestions are that the U-shaped grooves should be located far from bridge piers or in the middle of the bridge span. The excavation in the weak soil layer should be combined with the supporting measures (i. e, jet grouting pile reinforcement + steel bracing) to control the deformation, which provides the theoretical basis and technical references for the design and construction of similar underpass projects.

Keywords: excavation of foundation pit; bridge pier deformation; internal force of foundation pile; numerical simulation; support measures

0 引言

随着交通基础设施的发展,道路下穿既有桥梁的情况日益增多。受限于净空高度,下穿地道通常

需要采用U形槽结构,而这必然涉及基坑开挖工程。基坑变形受到多种复杂因素的影响,如土体性质、支护结构形式、开挖方式、地下水条件及周边环境等^[1]。在软土地区进行基坑开挖时,如何有效控制变形、减少对邻近建筑物和构筑物的影响,从而实现基坑工程的安全性及经济性,是一项关键的工程课题。

收稿日期: 2024-12-25

作者简介: 庄志福(1982—),男,硕士在读,高级工程师,注册道路工程师,从事路桥和岩土设计工作。

国内外学者针对基坑开挖作了大量研究,杨小康等^[2]、郑刚等^[3]、胡敏云等^[4]利用数值模拟与现场实测地表沉降、管线沉降及建筑沉降等监测数据进行对比分析,明确了围护结构受邻近基坑开挖施工影响受力变形的发展特征。陈江等^[5]对软土地区的某内支撑体系深基坑工程进行研究,建立了完整的支护方案优化评估体系,将数值模拟、实测验证与经济性分析相结合。张楠^[6]结合工程监测数据进行分析研究,阐述了深基坑开挖对周围环境变形的影响,创新性地完全依赖现场监测数据进行分析,避免了数值模拟中参数假设和模型简化带来的误差。刘性锋等^[7]对地铁站深基坑桩撑支护开挖变形进行分析,实现了地铁深基坑开挖全过程的三维模拟,并考虑了材料非线性的影响。蔡纪锋^[8]采用土体摩尔-库伦模型,研究了下穿特大桥的新建道路填方对桥墩和基桩的影响,证明了传统模型在特定工况下的适用性。然而,现有研究多集中于常规基坑或特定结构,针对沿海深厚软基条件下,采用U形槽结构地道下穿既有高速公路桥梁的工程案例及相关变形研究相对匮乏。因此,本文依托拟建的福州市马尾区某市政道路,针对沿海软基段道路下穿高速桥梁时,U槽开挖对桥墩变形的影响开展研究。

1 概 况

1.1 项目位置

拟建的福州市马尾区某市政道路起于现状G104国道,下穿沈海高速罗长段山兜高架桥,终于某产业

园区。道路宽度16 m,下穿U槽宽度8.1 m,道路等级为城市次干道(见图1)。

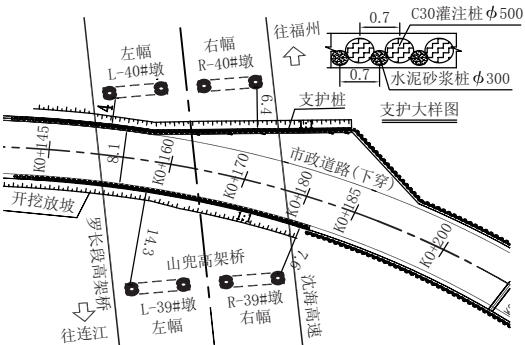


图1 道路下穿沈海高速山兜高架桥平面图(单位:m)

受桥梁净空限制,道路中心基坑最大开挖深度为3.87 m。山兜高架桥采用7×30 m预应力混凝土T梁结构,下部结构为柱式墩(墩径1.4 m),基础采用直径1.5 m、桩长35.3 m的端承桩,桩端持力层为中风化岩层。具体参数见表1。

表1 桥墩和基桩参数

墩柱编号	桩径/m	桩长/m	墩柱直径/m	墩柱高/m	混凝土强度
L-39#墩	1.5	35.3	1.4	4.7	C30
L-40#墩	1.5	35.3	1.4	4.7	
R-39#墩	1.5	35.3	1.4	4.7	
R-40#墩	1.5	35.3	1.4	4.7	

1.2 地质情况

下穿点道路沿线从上到下的地质情况为:杂填土层,厚度1.3 m;淤泥层,厚度15 m;粉质黏土层,厚度9.0 m;砂土状强风化花岗岩层,厚度8.5 m;中风化花岗岩层,厚度大于20 m。土层参数见表2。

表2 土层计算参数

岩土名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	压缩模量 E/MPa	泊松比 ν	地基承载力 kPa
杂填土	18.5	8.00	12.00	3.80	0.35	80
淤泥	15.6	4.62	3.18	1.88	0.40	45
粉质黏土	19.0	24.67	14.16	5.58	0.32	130
强风化岩	21.5	30.00	30.00	30.00	0.25	450
中风化岩	25.5	40.00	40.00	50.00	0.20	2 500

2 开挖和加固方案

基坑采用基坑顶部临时放坡,两侧单排桩支护,基坑底下厚度为3 m的土体采用高压旋喷桩加固,配合临时支撑进行支护的方案。支护桩采用C30混凝土灌注桩,支护桩实施后,开始土体开挖并及时进行临时支撑,开挖到位后再浇筑C35钢筋混凝土U槽,待U槽强度达到要求以后拆除临时支撑。临时支撑采用 $\phi 600$ 钢管,间距4 m。土体开挖左、右幅横断面见图2、图3。

3 计算模型

3.1 结构模型

根据沈海高速罗长段山兜高架桥与基坑的位置关系,采用MIDAS GTS软件,建立三维弹塑性有限元模型进行分析。模型尺寸为41 m(桥梁横向 X)×62 m(桥梁纵向 Y)×45 m(土层厚度 Z),模型取最不利代表断面设置土层组成及分布,见图4。

3.2 计算参数

采用MIDAS GTS NX有限元软件进行数值分析,

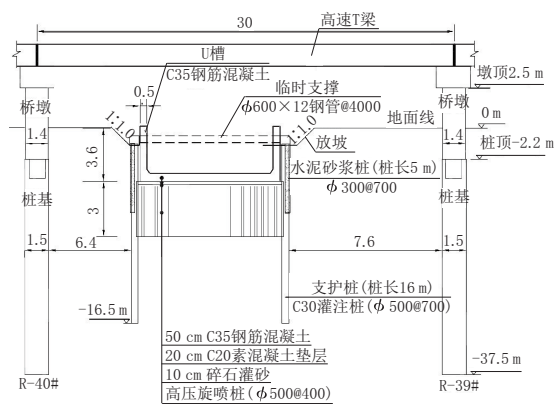


图2 左幅开挖横断面图(单位:m)

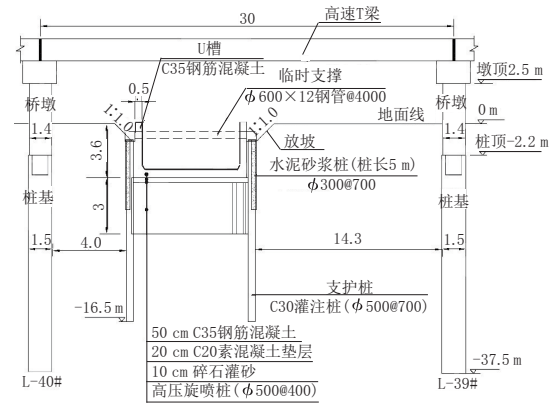


图3 右幅开挖横断面图(单位:m)

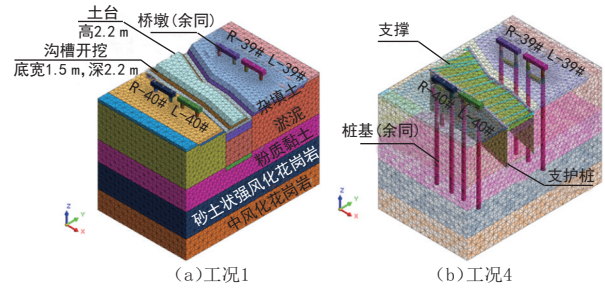


图4 有限元模型

模拟内容包括土体沉降位移、支护结构响应、结构内力分布及施工全过程。该软件基于累计算法进行施工阶段分析,即每个阶段的分析结果继承并累加至上一阶段结果之上。桥梁实体结构采用弹性本构模型。土体采用摩尔-库伦本构模型。桥梁桩基、系梁、基坑冠梁、基坑支撑采用梁单元,支护桩(经刚度等效换算为厚度0.375 m的板)、U槽结构采用板单元,各类土层、桥墩、盖梁、坑底加固区采用实体单元。模型底部及侧面施加法向位移约束,地表设为自由边界。考虑上部桥梁对墩柱的约束作用,在墩柱顶部设置点弹簧模拟支座的侧向约束。结构与土体采用界面单元,内支撑与支护桩采用弹性连接,桥墩与桩基采用刚性连接。

3.3 支护桩板单元刚度换算

3.3.1 抗弯刚度等效

支护桩为 $d_1=500$ mm的圆形截面,其截面惯性矩 I_1 为: $I_1 = \frac{\pi d_1^4}{64} = \frac{\pi 0.5^4}{64} = 3.07 \times 10^{-3} \text{ m}^4$ 。

C30混凝土的弹性模量 $E_1 = 3.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,因此C30混凝土支护桩的抗弯刚度为: $E_1 I_1 = 3.0 \times 10^{10} \times 3.07 \times 10^{-3} = 9.21 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。

设板单元宽度 $b=0.7$ m,厚度为 h ,其截面惯性矩 $I_{\text{板}}$ 为: $I_{\text{板}} = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.7h^3}{12}$ 。

抗弯刚度等效: $E_1 I_1 = E_1 I_{\text{板}}$,即: $9.21 \times 10^7 = 3.0 \times 10^{10} \times \frac{0.7h^3}{12}$;由此解得: $h=0.375$ m。

3.3.2 抗剪刚度等效

C30混凝土抗剪模量 G_1 为: $G_1 = \frac{E_1}{2(1+V)} = \frac{3.0 \times 10^{10}}{2(1+0.2)} = 1.25 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 。

受剪截面积 A_1 为: $A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi 0.5^2}{4} = 0.196 \text{ m}^2$ 。

C30混凝土支护桩的抗剪刚度为: $G_1 A_1 = 1.25 \times 10^{10} \times 0.196 = 2.45 \times 10^9 \text{ N/m}$ 。

抗剪刚度等效: $G_1 A_{\text{板}} = G_1 A_1$,即: $1.25 \times 10^{10} \times 0.7 \times h = 2.45 \times 10^9$;由此解得: $h=0.28$ m。

3.4 模拟工况

根据基坑施工方案设置模拟工况,初始工况为建立土层,施加重力荷载,形成初始地应力,并清除位移;建立桩基、墩柱和墩顶弹簧模型,并施加墩顶恒载和活载。其余工况如下:

- (1)工况1:支护桩位置沟槽开挖,土体单元被移除。
- (2)工况2:支护桩施工,坑底土体加固。激活支护结构。坑底土体加固提供刚度和支撑力。
- (3)工况3:开挖坑内土台,土台单元被移除,钝化土台结构组。
- (4)工况4:冠梁和支撑施工,开挖至坑底。激活与支护结构相关的边界条件,激活并施加支撑预加轴力荷载组。剩余土体移除,钝化该土体结构组。
- (5)工况5:底板和U槽浇筑,拆除支撑。激活浇筑结构的结构组并产生结构自重。支撑拆除阶段,钝

化支撑两端约束的边界组,支撑荷载转移到支护桩。

4 计算结果分析

4.1 墩柱和基桩偏位分析

为研究基坑开挖和支护对既有桥梁基桩与墩

柱变形的影响,选取工况 1~5 进行分析。基桩和墩柱偏位情况见图 5;各工况下基桩顶(标高-2.2 m)与墩柱顶(标高 2.5 m)的偏位值见表 3。模型中,Y 轴正方向偏移定义为正值,负方向偏移定义为负值。

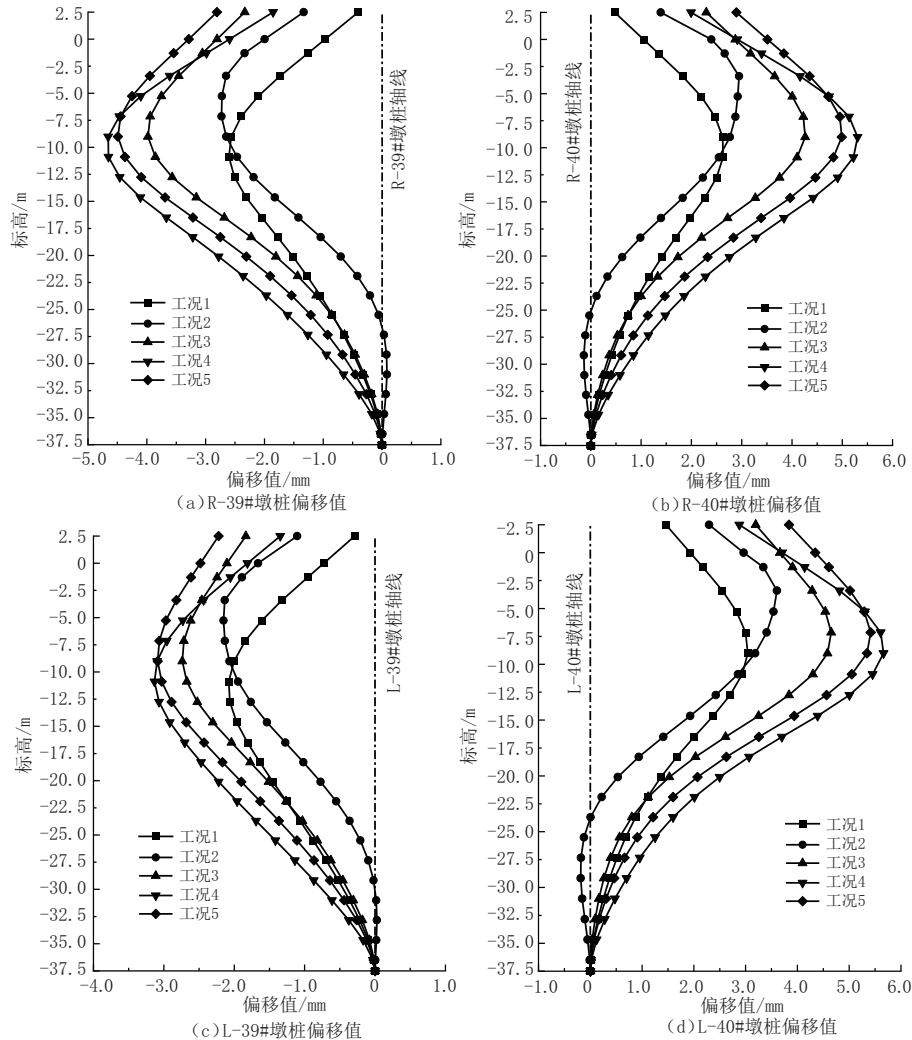


图5 墩柱和基桩偏位曲线

施工 工况	桩顶偏位				墩柱顶偏位			
	R-39#	L-39#	R-40#	L-40#	R-39#	L-39#	R-40#	L-40#
工况 1	-1.462	-1.112	1.551	2.335	-0.404	-0.289	0.476	1.461
工况 2	-2.473	-1.995	2.784	3.456	-1.332	-1.106	1.390	2.295
工况 3	-3.227	-2.337	3.381	4.068	-2.332	-1.836	2.297	3.195
工况 4	-3.252	-2.217	3.724	4.428	-1.852	-1.347	1.994	2.880
工况 5	-3.717	-2.703	4.056	4.783	-2.808	-2.223	2.894	3.838

根据图 5 和表 3 所示的 U 槽基坑开挖支护过程分析:在初期施工阶段(支护桩沟槽开挖、支护桩施工、坑内土体加固),基桩发生较小偏位,整体位移趋于稳定;在关键开挖阶段(坑内土台开挖),基坑产生位移;后续施工阶段(冠梁及支撑施工、土体开挖至坑底),桥梁基桩产生较大偏位。

在周边土体侧压力作用下,桥墩和基桩均产生顺桥向偏位,具体表现为:R-39#基桩顶偏位值为-3.717 mm,L-39#基桩顶偏位值为-2.703 mm,R-40#基桩顶偏位值为 4.056 mm,L-40#基桩顶偏位值为 4.783 mm。以上分析表明。

- (1)距离效应:在软基厚度相近条件下,基坑与基桩距离越大,基坑开挖引起的墩/桩偏位越小,基坑-基桩间距是影响基桩稳定性的关键因素。
- (2)深度效应:基桩在基坑底部标高位置处的偏位达到较大值,在淤泥层中偏位达到最大值。
- (3)约束效应:受上部结构约束,桥墩位移沿墩高自下而上呈递减趋势。

4.2 桩基弯矩与剪力

为探讨基坑开挖和支护等对既有桥梁桩基内力的影响,选取工况1~5进行分析。各桩基弯矩和剪力见图6至图9和表4。

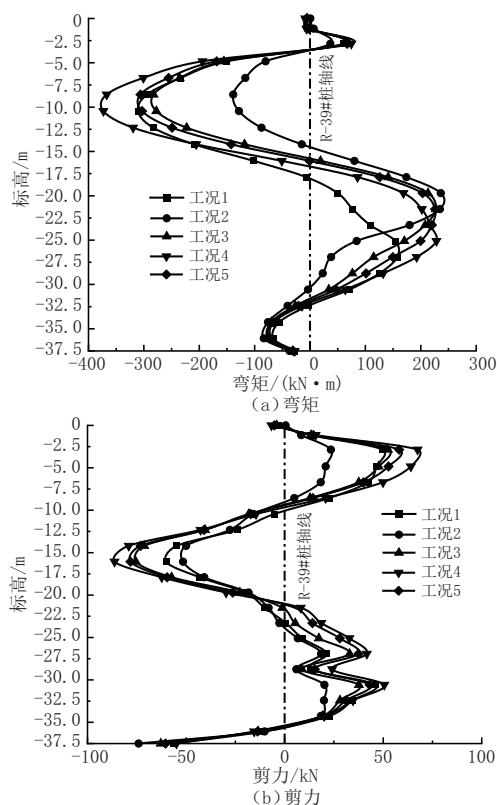


图6 R-39#桩基内力分布曲线

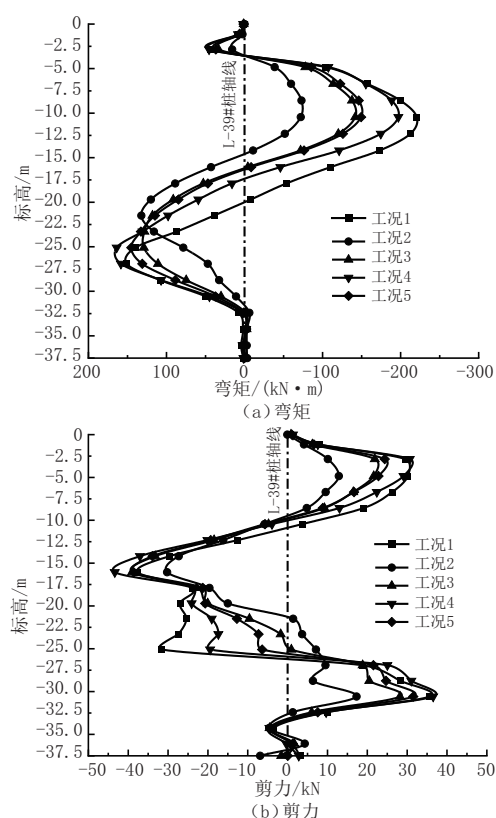


图7 L-39#桩基内力分布曲线

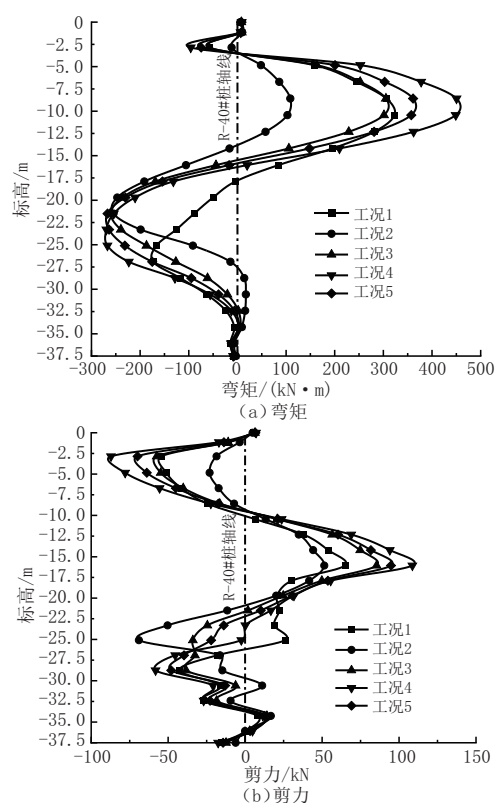


图8 R-40#桩基内力分布曲线

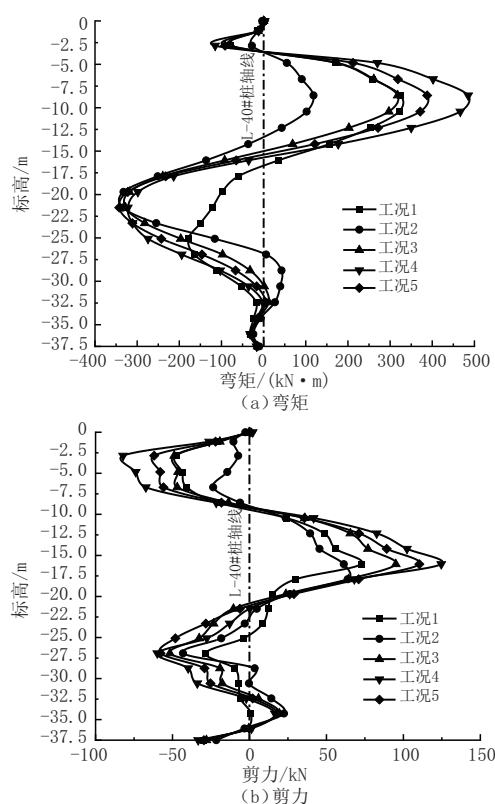


图9 L-40#桩基内力分布曲线

分析图6至图9和表4可知:

(1) 基坑开挖后,在周边土体的侧压力作用下,L-39#桩身产生的弯矩最小,弯矩值为221 kN·m,位于淤泥层中间位置。上部结构对桩基的位移约束在

表 4 各基桩内力值

基桩编号	弯矩最大值/ (kN·m)	最大值 位置	剪力最大值/ kN	最大值 位置
R-39#	373	淤泥层中间	86	淤泥层底
L-39#	221	淤泥层中间	43	淤泥层底
R-40#	450	淤泥层中间	108	淤泥层底
L-40#	485	淤泥层中间	125	淤泥层底

桩顶产生了一定的弯矩;此外,在基坑周边土体的侧压力作用下,L-39#桩身亦产生了较小的附加剪力。

(2)在基坑开挖和周边土体的侧压力作用下,L-40#桩身产生了较大弯矩,弯矩值为485 kN·m,位于淤泥层中间位置。上部结构对基桩的位移约束在桩顶产生了一定的弯矩;此外,在基坑周边土体的侧压力作用下,L-40#桩身亦产生了较大的附加剪力。

(3)在土体推力的影响下,基桩的剪力主要集中在淤泥层底部,随着深度的增加,基桩在其他各层的剪力值均较小。

4.3 开挖支护效果分析

为最大限度地减小挖方路基施工对两侧桥梁基桩的影响,本文提出采用临时放坡结合支护桩和临时支撑的综合支护方案。鉴于桥梁基桩坐落于中风化岩层,基坑开挖对其竖向变形影响有限,故分析重点集中于基桩偏位和抗弯承载力。模型计算表明:桥墩最大变形发生在L-40#墩,偏位值为3.838 mm;最小变形发生在L-39#墩,偏位值为-2.223 mm。基桩变形图显示:桥墩/基桩位移随其与基坑距离增大而减小。根据规范^[9]要求,墩台水平位移限值为墩台高度的0.1%且不小于20 mm。该项目桥墩高4.7 m,墩顶水平位移允许值为4.7 mm。计算结果表明,各桥墩位移均小于此限值,满足规范要求,验证了支护措施的有效性。

施工过程变形分析如下:

(1)杂填土层开挖:采用放坡开挖支护桩沟槽,可保障边坡稳定,减小桥墩和基桩变形。

(2)淤泥层开挖(基坑中部):该软基稳定性差,开挖时设置用以控制基坑两侧土体滑移并减小基桩变形的支护措施至关重要。

(3)支护桩施工:对桥墩变形影响甚微。

(4)坑内土台开挖:周边土体压力增大,导致桥墩和基桩出现明显变形。

(5)第1道支撑设置:可有效约束基坑变形,使墩顶偏位显著减小。

(6)第2次基坑开挖(至坑底):基坑承受了最大土压力,基桩变形增大。

(7)U槽浇筑完成和临时支撑拆除:基桩变形逐渐减小,桥墩位移最终趋于稳定。

为监测桥墩变形,在39#、40#墩顶各布设1个位移监测点,采用全站仪极坐标法配合小棱镜监测其水平位移变化(见图10)。观测周期为200 d,从进场准备持续至U槽浇筑及拆撑完成。



图 10 L-40#墩顶水平位移监测

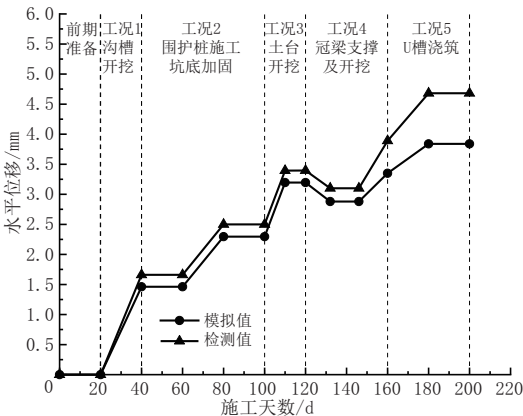


图 11 L-40#墩顶水平位移曲线

由图11可见:在围护桩施工以及冠梁和支撑施工阶段,墩顶位移较小;在沟槽开挖及土台、基坑内土体开挖阶段,墩顶位移显著增大。

对比分析表明,基坑支护桩和支撑体系能有效控制土体变形,显著减小两侧桥墩的位移。现场监测与数值模拟的变形趋势基本一致,但最大墩顶水平位移实测值比模拟值大0.84 mm。该差异主要源于数值模拟难以精确反映复杂现场条件(如地下水影响)以及施工荷载(如基坑侧壁运土车辆荷载),导致模拟精度受限。

5 结 语

(1)基坑开挖诱发土体侧向位移,导致邻近桥梁桩基产生附加应力、附加位移及弯矩。

(2)基坑开挖会引起周边土体变形,影响桥墩和桩基稳定性;此影响随基坑与桥墩距离增大而显著减弱。

(3) 支护桩与支撑可有效控制邻近桥梁基桩变形。因此,开挖前实施有效的基坑支护至关重要。

(4) U槽底板及侧壁结构形成后,桥梁基桩变形明显减小,表明U槽对周边土体具有显著的支撑作用。

(5) 现场监测数据与数值模拟结果高度吻合,证实有限元软件能有效模拟基坑开挖过程。对于类似工程,有限元技术可为设计和施工提供可靠依据。

(6) 新建下穿道路的U槽选址应优先远离桥墩;不可避免时,宜沿桥梁跨中轴线穿越,以减轻对两侧桥墩的影响。在稳定土层中,浅层放坡开挖对周边构筑物影响较小。软弱土层开挖时,必须采用支护桩结合支撑等强支护措施,以有效控制基坑变形、增强土体稳定性,从而最大限度地减少对周边构筑物的不利影响。

参考文献:

- [1] 白永学. 软土地铁车站深基坑变形的影响因素及其控制措施[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [2] 杨小康, 郑良锋, 周铭嘹, 等. 深基坑支护设计及对周边环境的影响分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊2): 1514-1518.
- [3] 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 1-36.
- [4] 胡敏云, 寿树德, 袁静, 等. 软土相邻基坑支护结构受力影响特征及机理研究[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(1): 111-118.
- [5] 陈江, 孙志浩, 徐长节. 软土地区深大基坑支护方案优化三维数值模拟分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 319-326.
- [6] 张楠. 土岩组合地层深基坑变形规律研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(7): 1-5; 59.
- [7] 刘性锋, 刘禹, 李辉, 等. 地铁站深基坑桩撑支护开挖变形特性分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14332-14341.
- [8] 蔡纪锋. 新建道路下穿特大桥对桥墩和基桩的影响分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 85-90.
- [9] JTG F80/1—2017, 公路工程质量检验评定标准[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

