

文章编号: 1674—8247(2020)05—0051—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.010

藏东南砂层路堑分层开挖下钻孔桩响应研究

郭在旭 向俐蓉 刘会娟 孙 晓

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:为研究砂层路堑分层开挖条件下,钻孔桩植筋挡墙的力学响应特征,本文结合拉萨至林芝铁路建设,开展了设置钻孔桩植筋挡土墙支挡的路堑的分层开挖模拟。结果表明:(1)在分层开挖条件下,桩后边坡产生了一定程度的下滑,桩前地基也出现了不同程度的隆起变形,但此类隆起变形属于砂层的卸荷回弹,对工程正常使用影响小;(2)各工况下,钻孔桩桩身弯矩沿桩深方向均呈单峰曲线变化,且随着砂层的开挖,桩身弯矩峰值点由浅层逐渐向地基深层方向发展;桩身剪力沿桩深方向均呈反“S”型变化,且随着砂层的开挖,桩身剪力正、负峰值点均向地基深处发展;(3)土层开挖造成钻孔桩向路堑临空面发生挠曲变形,且变形量逐渐增大,向临空侧的水平位移最大值位于桩顶;(4)挡土墙与钻孔桩通过钢筋连接后,挡土墙的水平位移一般都大于钻孔桩的水平位移,连接钢筋以受拉为主。本文研究成果可为高原砂层铁路路堑的设计与施工提供参考。

关键词:藏东南;砂层路堑;分层开挖;钻孔桩;响应

中图分类号:U 416.1⁺3 文献标志码:A

Research on Response of Bored Pile under Stratified Excavation of Sand Layer Cutting in Southeastern Tibet

GUO Zaixu XIANG Lirong LIU Huijuan SUN Xiao

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to research the mechanical response characteristics of bored pile planting-bar retaining wall under the condition of stratified excavation of sand layer cutting, in combination with the construction of the Lhasa-Nyingchi railway, the stratified excavation simulation of cutting with bored pile planting-bar retaining wall support is simulated in the paper. The results show that: (1) Under the condition of stratified excavation, the slope behind the pile slides to a certain extent, and the foundation in front of the pile also heaves and deforms in different levels, but the heave and deformation belong to unloading rebound of sand layer and have little influence on the normal use of the construction. (2) Under all working conditions, the bending moment of bored pile body changes in a unimodal curve along the pile depth direction, and with the excavation of sand layer, the peak point of bending moment of pile body gradually develops from shallow layer to deep layer of foundation; the shear force of pile body changes in reverse "S" shape along the direction of pile depth, and with the excavation of sand layer, the positive and negative peak points of shear force of pile body develop to the deep layer of foundation. (3) The excavation of soil layer causes the flexural deflection of the bored pile to the free face of cutting, and the deformation gradually increases. The deformation of maximum horizontal displacement to the free face is located at the top of the pile. (4) After the retaining wall and the bored pile are

收稿日期:2019-12-30

作者简介:郭在旭(1983-),男,高级工程师。

基金项目:四川省科技计划(2019YFG0460)

引文格式:郭在旭,向俐蓉,刘会娟,等.藏东南砂层路堑分层开挖下钻孔桩响应研究[J].高速铁路技术,2020,11(5):51-56.

GUO Zaixu, XIANG Lirong, LIU Huijuan, et al. Research on Response of Bored Pile under Stratified Excavation of Sand Layer Cutting in Southeastern Tibet [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5):51-56.

connected by steel bars, the horizontal displacement of the retaining wall is generally greater than that of the bored pile, and the connecting steel bars are mainly in tension. The research results in the paper can provide a reference for the design and construction of railway cutting in plateau sand layer.

Key words: southeastern Tibet; sand layer cutting; stratified excavation; bored pile; response

钻孔桩主要通过机械钻孔成桩,可明显减少人工作业量,有利于组织施工,往往可达到其它支护形式难以达到的效果^[1]。与预制桩、人工挖孔桩相比,钻孔桩受季节气候、现场地质条件等影响较小,成本低,不需浇筑模板且配筋比较灵活。

钻孔桩在建筑基坑挡护、桥墩基础设置、边坡支挡、地基承载与沉降控制等领域应用广泛。Cui^[2]等人通过案例分析和数值模拟,研究了钻孔桩和倾斜钢支撑组合结构加固基坑的力学位移响应规律;刘军^[3]等人依托桥台桩基托换工程基坑支护,提出了一种土钉墙喷锚、钻孔桩和内支撑相结合的复合支护结构,并通过实时监测验证了施工方案的合理性;焦瑞玲^[4]等人通过与常规挡墙方案比较,提出了一种永临结合的钻孔灌注排桩挡土墙方案,用于既有线切挖边坡的设挡收坡;黄丽娟^[5]等人通过现场试验及作用机制研究,验证了钻孔桩后注浆技术的应用可有效地提高钻孔桩的单桩承载力,明显减少桩顶沉降。

雅鲁藏布江沿岸大量分布河谷风积沙,形成的斜坡砂层具有松散、挖孔易坍塌、成孔困难等特征,同时高原气候恶劣、高寒缺氧,在此条件下,路堑挡护桩采用人工挖孔成桩困难,宜采用机械化施工的钻孔桩^[6]。目前,关于路堑分层开挖条件下砂层钻孔桩受力位移的研究尚不多见,因此本文结合拉萨至林芝铁路(简称“拉林铁路”)建设,通过数值仿真,研究分层开挖条件下钻孔桩植筋挡墙的受力位移响应。

1 工程概况

拉林铁路位于西藏自治区东南部,冈底斯山与喜

马拉雅山之间的藏南谷地。沿线山高谷深,气候极端恶劣。山脉呈东西向纵贯延展,谷岭相间,地势起伏跌宕。拉林铁路全线长 403 km,为国铁 I 级、单线电气化铁路,设计行车速度 160 km/h。风积沙主要分布于拉萨至协荣段,协荣车站一带尤为严重,发育有半固定沙丘、沙垄等。

拉林铁路 DK 39 + 602. 25 ~ DK 39 + 653. 75 为风积沙路堑段落,长 51. 5 m,小里程端与嘎拉山隧道相连接,大里程端接嘎拉山大桥,该段属于雅鲁藏布江第四系冲洪积堆积高山宽谷区,路堑支挡结构采用钻孔桩植筋挡墙,典型设计断面(DK 39 + 625)如图 1 所示,各土层的主要物理力学参数如表 1 所示。

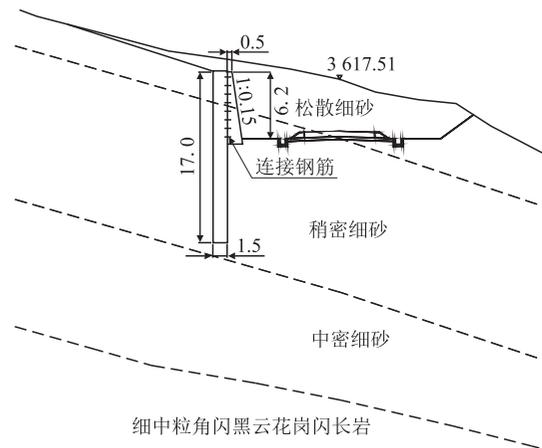


图 1 DK 39 + 625 典型设计断面图(m)

该段施工主要流程为:

- (1) 钻孔桩桩身定位,隔桩施作桩井,桩井施作完毕后,放入钢筋笼并打入预留连接钢筋,灌注混凝土。

表 1 各土层物理力学指标表

土层	地层类型	坡度/(°)	厚度/m	密度/(g/cm ³)	内摩擦角/(°)	含水率/%	相对密实度	孔隙比
①	松散细砂	17(坡面)	6.3	1.81	22	1~2	0~0.33	0.54
②	稍密细砂	18(①与②层分界面)	16.2	1.95	25	2	0.33~0.45	0.49
③	中密细砂	18(②与③层分界面)	11.4	2.01	32	<8	0.45~0.67	0.48
④	闪长岩	14~26(③与④层分界面)	-	2.63	-	-	-	-

- (2) 待桩身达到设计强度 80%,从上至下分层开挖墙前土体。

- (3) 在同一分层内,喷射 C25 混凝土对桩前进行找平。

- (4) 喷射混凝土完成后,按要求采用机械接长连接钢筋。

- (5) 待上一层施作完成,按要求开挖下一层岩土体,施工工序同上一层,直至路堑基底。

2 数值模拟

2.1 基本假定

为研究砂层路堑分层开挖条件下,钻孔桩支挡结

构的力学响应,在模型建立前作出 4 点假设:

(1)施工期间暂时不考虑地震作用,只在静力条件下进行计算。

(2)初始地应力平衡只考虑模型岩土体自重,不考虑地下水及其影响,忽略岩土体构造应力。

(3)模拟计算过程中考虑岩土体参数变化,仅在稳定性分析时,土体抗剪能力进行折减。

(4)假定钢筋混凝土结构为理想弹性材料。

2.2 模型建立

结合现场实际工况,数值模型计算比例设置为 1:1,将岩土体考虑为弹塑性材料,采用摩尔-库伦本构模型。挡土墙按弹性材料考虑,采用各项同性弹性模型进行模拟,钻孔桩按结构单元予以模拟,钻孔桩与挡土墙之间的连接钢筋采用结构单元模拟。各土层实体模型通过 FLAC3D 内置的楔形网格(Wedge)和矩形网格(Brick)建立。

数值模型边界条件为:固定下边界的 x,y,z 向位移,固定模型左右边界的 x 向位移,固定模型前后边界的 y 向位移。基本模型长 148.5 m,高 60.0 m,宽 8.5 m。为避免边桩影响,共设置 3 根桩,单排布置,桩长 17.0 m,桩径 1.5 m,桩间距 2.0 m。挡土墙与周围土体之间建立接触面。

2.3 计算参数及工况

数值模拟各土层、钻孔桩及挡土墙的计算参数如表 2 所示,钻孔桩力学及尺寸参数如表 3 所示。

基于初始地应力计算,设置结构单元模拟钻孔桩,

然后模拟桩前土体的分层开挖。桩前土体开挖深度 6.2 m,分三次开挖,具体工况如表 4 所示。

表 2 各土层及结构计算参数表

土层及结构	密度/(g/cm ³)	弹性模量/MPa	泊松比
松散细砂	1.81	24	0.25
稍密细砂	1.95	28	0.25
中密细砂	2.01	40	0.24
基岩	2.63	7.0 × 10 ⁴	0.20
钻孔灌注排桩	2.40	3.4 × 10 ⁴	0.20
挡土墙	2.40	3.3 × 10 ⁴	0.20

表 3 钻孔桩力学及尺寸参数表

桩长/m	杨氏模量/MPa	桩径/m	横截面积/m ²	惯性矩/m ⁴	极惯性矩/m ⁴	截面周长/m
17	31.5	1.5	1.767	0.248	0.497	4.71

表 4 数值计算工况表

序号	工况代号	工况说明
1	I-0	钻孔桩设置完成,未开挖桩前土
2	E-1	开挖桩前土体,厚 2.0 m
3	E-2	继续开挖桩前土体,厚 2.0 m
4	E-3	开挖桩前土体至路堑基底,厚 2.2 m
5	F-4	施作桩前挡土墙并与钻孔桩连接

3 计算结果分析

3.1 边坡位移响应

桩前土体分层开挖过程中的边坡位移云图如图 2 所示,路堑开挖完成和基底碾压后的位移云图如图 3 所示。

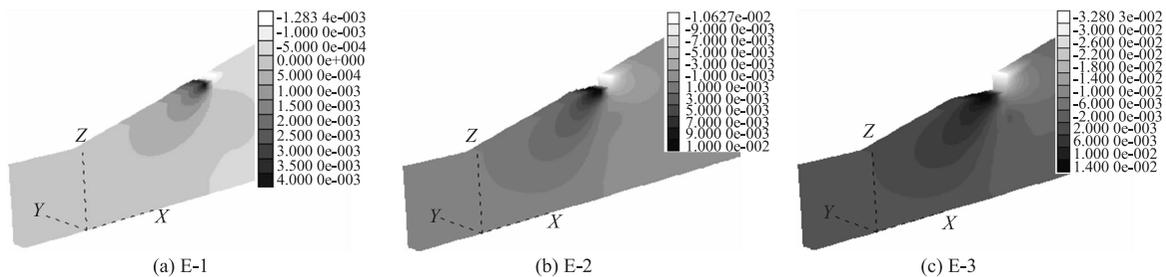


图 2 路堑分层开挖过程中的边坡位移云图(m)

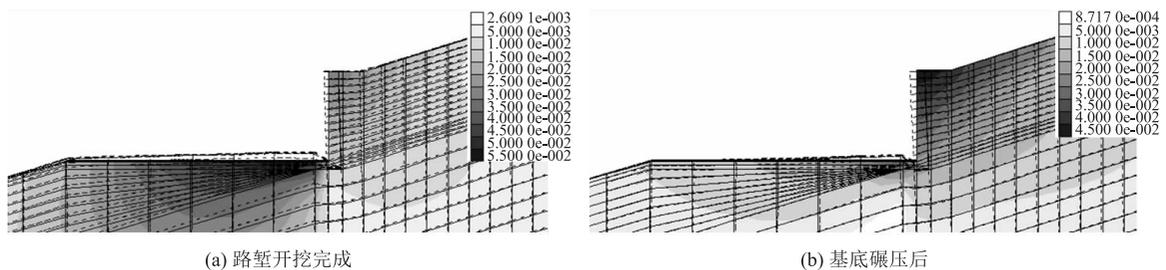


图 3 路堑开挖完成和基底碾压后的位移云图(m)

从图 2 可以看出,随着桩前土体的逐步开挖,桩后边坡下滑,下滑量随土层开挖厚度的增加而增大。由于砂层路堑的开挖卸荷效应,桩前土体出现不同程度的隆起现象,这与砂层土体的应力释放有关。在路堑基底,最大隆起位移与钻孔桩的距离约 4.0 cm,至路堑开挖完成,该点最大隆起位移为 5.87 cm。

对比图 3(a)与(b)可以发现:(1)路堑开挖完成时,基底隆起量达到最大值,但基底碾压密实后,土体隆起量有所减小,由 5.87 cm 降低至 3.49 cm;(2)桩后土体水平位移逐渐增大,但其沿深度方向却逐渐减小。

3.2 钻孔桩受力响应

为便于分析,本文以钻孔桩桩顶作为 0 点,靠近路堑侧(即临空侧)为桩前,远离路堑侧为桩后,桩身弯

矩、剪力及水平位移正值按图 4 指定方向确定。

3.2.1 钻孔桩桩身弯矩

分层开挖条件下,路堑钻孔桩桩身弯矩的分布如图 5 所示。其中,图 5(b)为图 5(a)中各工况相较于工况 I-0 的弯矩峰值增幅,钻孔桩桩身弯矩现场实测值也纳入图 5 中。

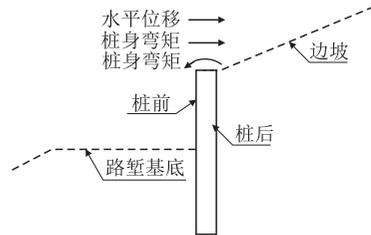


图 4 桩身内力及位移正值确定图

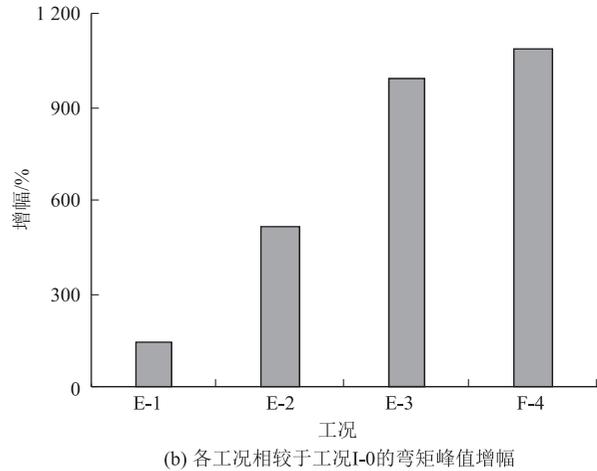
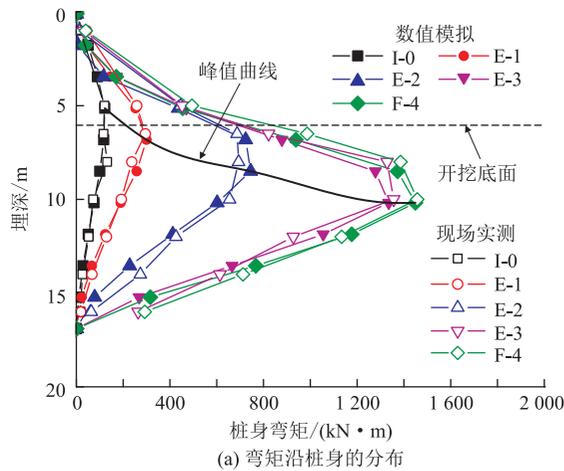


图 5 钻孔桩桩身弯矩分布特征图

从图 5(a)可以看出,5 种模拟工况的桩身弯矩均沿桩深呈单峰曲线变化,即桩身弯矩从桩顶向桩深方向先增大至最大值(弯矩峰值点),而后逐渐减小至零弯矩(桩底)。由量值和分布规律对比可知,数值模拟结果与现场实测值基本吻合。从图 5(a)还可以看出,桩身弯矩峰值点由浅层(5.1 m)向地基深层方向逐渐发展延伸,分层开挖完成后,弯矩峰值点深度也趋于稳定,即工况 E-3 和工况 F-4 的弯矩峰值点深度均为 11.2 m(开挖底面以下 5 m)。此外,除工况 I-0 桩身弯矩峰值点深度位于开挖底面以上外,其余工况的桩身弯矩峰值点深度均位于开挖底面以下。其主要原因在于:随着砂层逐渐被分层开挖,桩身悬臂段增长,桩后侧向土压力也不断增大,桩身抵抗侧压的锚固作用不断增加,锚固点逐渐向桩深方向发展。

从图 5(b)可以看出,相比工况 I-0,工况 F-4 弯矩峰值增幅最大,但工况 F-4 的大部分弯矩增幅主要是

由工况 E-2 和工况 E-3 贡献的,两者弯矩峰值增幅在工况 F-4 中的贡献比分别为 33.5% 和 44.4%。由此可见,工况 E-2 和工况 E-3 的桩身弯矩增加显著,也就是说,在路堑分层开挖过程中,桩身弯矩及其峰值点极易快速增长,因此,工况 E-2 和工况 E-3 是砂层路堑分层开挖的重点监测阶段。

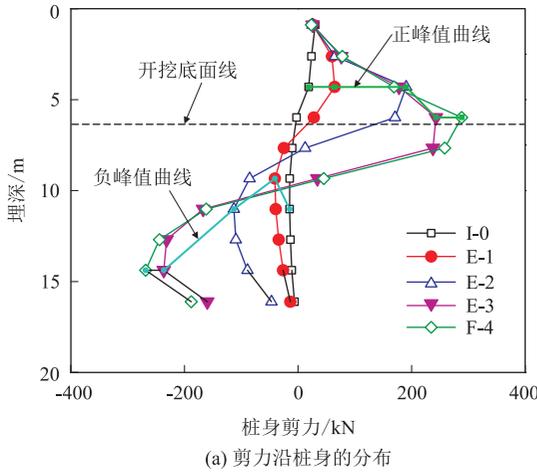
3.2.2 钻孔桩桩身剪力

分层开挖条件下,路堑钻孔桩桩身剪力的分布如图 6 所示。其中,图 6(b)为图 6(a)中各工况相较于工况 I-0 的剪力峰值增幅。

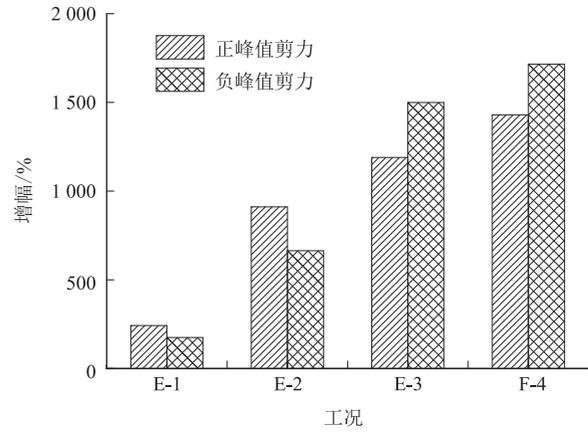
由图 6(a)可知,在不同的模拟工况下,桩身剪力沿桩深均呈反“S”型曲线分布,即桩身剪力沿桩深先向正值方向增大至正峰值点,再向负值方向逐渐减小并越过零点达到负峰值点,最后剪力负值向正值方向逐渐衰减至桩底。工况 I-0 ~ F-4 的剪力拐点(即剪力由正值过渡至负值的分界点)深度分别为 6.0 m、

6.9 m、7.9 m、9.6 m 和 9.7 m。这表明随着开挖深度的加大,桩后土压力不断增大,而桩前土压力则呈降低趋势。从图 6(a)还可看出,工况 I-0、工况 E-1 和工况 E-2 的剪力正峰值深度均为 4.3 m,当路堑开挖完成时

(工况 E-3 和工况 F-4),剪力正峰值深度发展至 6.0 m。工况 I-0 的剪力负峰值深度为 11.0 m,工况 E-1 略增加至 9.3 m,而后向深处线性增大至 14.4 m (工况 E-3 和工况 F-4)。



(a) 剪力沿桩身的分布



(b) 各工况相较于工况I-0的剪力峰值增幅

图6 钻孔桩桩身剪力分布特征图

从图 6(b)可以看出,相较于工况 I-0,工况 F-4 的剪力正、负峰值增幅均达到最大。其中,工况 F-4 的正峰值剪力增幅主要是由工况 E-2 贡献的,工况 E-2 的剪力正峰值增幅在工况 F-4 中的贡献比达到 46.8%; 工况 F-4 的负峰值剪力增幅主要是由工况 E-2 和工况 E-3 贡献的,二者的剪力负峰值增幅在工况 F-4 中的贡献比分别为 28.5% 和 48.7%。由此可见,与桩身弯矩类似,工况 E-2 和工况 E-3 的桩身剪力也极易显著增加,在路堑分层开挖施工中也应予以重点关注。

3.3 钻孔桩植筋挡墙位移响应

分层开挖条件下,路堑钻孔桩植筋挡墙位移及轴力分布特征如图 7 所示。其中,图 7(a)为水平位移沿桩身的分布情况(现场实测数据也列入其中),图 7(b)为挡土墙施工完成后(工况 F-4),桩-墙(钻孔桩-挡土墙)水平位移差沿深度的分布情况,图 7(c)为挡土墙施工完成后,桩-墙连接钢筋轴力沿深度的分布情况。

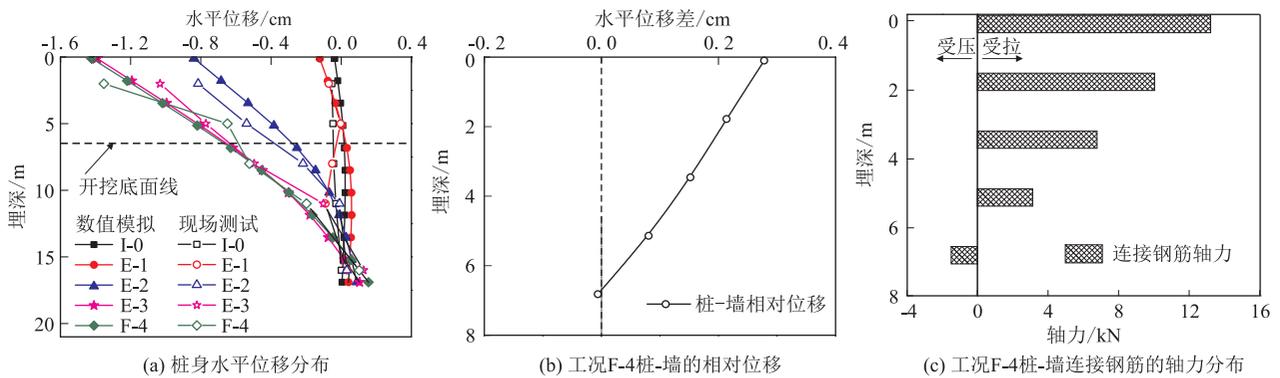


图7 钻孔桩植筋挡墙位移及轴力分布特征图

从图 7(a)可以看出,随着土层的开挖,钻孔桩向路堑临空面发生挠曲变形,变形量逐渐增大。各工况下,水平位移均沿桩深方向逐渐衰减至零点,而后向坡体方向发展并逐渐增大至桩底,工况 I-0 ~ F-4 的零点水平位移深度分别为 3.5 m、5.2 m、12.4 m、14.2 m 和 14.9 m。上述现象主要是由桩后土压力作用下,桩体

发生了一定的扭转位移和弯曲变形引起的。由图 7(a)还可知,各种工况下,临空侧的水平位移最大值均位于桩顶,水平位移最大值分别为 -0.03 cm、-0.12 cm、-0.84 cm、-1.40 cm 和 -1.42 cm;向坡体侧的水平位移最大值均位于桩底,水平位移最大值分别为 0.01 cm、0.04 cm、0.09 cm、0.10 cm 和

0.15 cm。由量值和分布规律对比可知,数值模拟与现场实测结果吻合较好。

由图7(b)可知,在桩深6.4 m以上,水平位移差为正值(即挡土墙水平位移大于钻孔桩),桩深在6.4~6.8 m范围时,水平位移差为负值(即挡土墙水平位移小于钻孔桩)。由此可见,挡土墙与钻孔桩连接后,挡土墙的水平位移一般都大于钻孔桩的水平位移,仅在墙底处出现有挡土墙水平位移小于钻孔桩水平位移的现象。另一方面,从变化趋势上看,从桩顶至桩深6.4 m处,水平位移差呈衰减变化。

从图7(c)可以看出,钻孔桩与挡土墙之间的连接钢筋以受拉为主(正值),仅在墙底处出现轻微的受压(负值);连接钢筋拉力的最大值位于桩顶,且沿桩深方向逐渐衰减,至在墙底处发展为受压状态。

上述结果表明,钻孔桩植筋挡墙各构件应力变形协调良好,连接钢筋将钻孔桩和挡土墙紧密联系为一个整体。

4 结论

本文通过数值模拟,揭示了分层开挖条件下砂层路堑钻孔桩的力学响应,得出以下主要结论:

(1)在分层开挖条件下,桩后边坡发生下滑,并随开挖深度的增加逐步增大,开挖卸荷易造成桩前地基出现不同程度的隆起变形,此类隆起变形属于砂层的卸荷回弹,时效性不明显,对工程正常使用影响小。

(2)各工况下,钻孔桩桩身弯矩沿桩深方向均呈单峰曲线变化,且随着砂层的开挖,桩身弯矩峰值点由浅层逐渐向地基深层方向发展;桩身剪力沿桩深方向均呈反“S”型变化,且随着砂层的开挖,桩身剪力正、负峰值点均向地基深处发展。

(3)土层开挖造成钻孔桩向路堑临空面发生挠曲变形,且变形量逐渐增大,向临空侧的水平位移最大值

位于桩顶,向坡体侧的水平位移最大值位于桩底,挠曲点靠近桩底。

(4)挡土墙与钻孔桩通过钢筋连接后,挡土墙的水平位移一般都大于钻孔桩的水平位移,连接钢筋以受拉为主。施工完成后,钻孔桩植筋挡墙各构件应力、变形协调良好。

参考文献:

- [1] WAN Zhihui, DAI Guoliang, GONG Weiming. Field Study on Post-grouting Effects of Cast-in-place Bored Piles in Extra-thick Fine Sand Layers[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(5):1357-1377.
- [2] CUI Xiaoyan, YE Mingge, ZHUANG Yan. Performance of a Foundation Pit Supported by Bored Piles and Steel Struts: a Case Study[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(4):1016-1027.
- [3] 刘军,徐志军,原方,等.立交桥桥台桩基托换基坑支护设计与监测[J].岩土工程学报,2019,41(S2):217-220.
LIU Jun, XUN Zhijun, YUAN Fang, et al. Design and Monitoring of Foundation Pit Support Project for Pile Foundation Underpinning of Abutment of Interchange Bridges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2):217-220.
- [4] 焦瑞玲,吴连海.永临结合的钻孔灌注桩排桩挡土墙在既有线边坡支挡工程中的应用[J].铁道标准设计,2013,57(5):41-43.
JIAO Ruiling, WU Lianhai. Application of Bored Cast-in-situ Soldier-Pile Retaining Wall with Permanent-Temporary Dual Purpose in Slope Retaining Project of Existing Line[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(5):41-43.
- [5] 黄丽娟,高兰芳.不同地质后注浆钻孔灌注桩承载力试验研究[J].公路交通科技,2017,34(10):74-82.
HUANG Lijuan, GAO Lanfang. Experimental Study on Bearing Capacity of Post-grouted Bored Piles under Different Geological Conditions[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(10):74-82.
- [6] 孙圣杰.川藏铁路高边坡钻孔灌注桩支挡结构现场试验与研究[D].成都:西南交通大学,2018.
SUN Shengjie. Field test and Research on Retaining Structure of Cast-in-situ Bored Pile in High Slope of Sichuan-Tibet Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.