

葛玉宁,王永洪,姜领发,等.微型钢管桩-锚支护受力特性现场试验.吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):199–208.
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240109.
Ge Yuning, Wang Yonghong, Jiang Lingfa, et al. Field Test on Mechanical Performance of Micro-Steel Pipe Piles – Anchor Support in Combined Stratum. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 199 – 208. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240109.

微型钢管桩-锚支护受力特性现场试验

葛玉宁¹,王永洪²,姜领发³,杨 昆⁴,张玉垒⁵,张 东⁶,孙俊亮⁴,
张启军⁷,黄永峰²,张 硕²,王东雷^{8,9}

1. 山东省路桥集团有限公司, 济南 250014
2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071
4. 中青建安建设集团有限公司, 山东 青岛 266023
5. 中建中新建设工程有限公司, 山东 青岛 266109
6. 建华建材(莱阳)有限公司, 山东 烟台 265200
7. 青岛业高建设工程有限公司, 山东 青岛 266011
8. 青岛永元海洋科技有限公司, 山东 青岛 266033
9. 青岛绿色理工岩土工程有限公司, 山东 青岛 266033

摘要: 为了研究微型钢管桩-锚支护在土岩结合地层中的受力特性,以及钢管桩在不同开挖深度和锚索、锚杆施工完毕后的内力变化,在青岛地铁某车站进行现场试验,采用 3 阶微型钢管桩结合锚索、锚杆的方式对基坑进行加固,并对基坑第 1 阶内排两根测试桩进行内力测试。结果表明:开挖面附近与桩顶处弯矩较大,测得弯矩最大值超过 15 kN·m;锚索锁定能有效抑制弯矩发展,桩身内力变化规律与土岩地质条件相关性明显,土岩边界易出现弯矩极值,正弯矩最大值为 32.43 kN·m。

关键词: 微型钢管桩;土岩结合地层;受力特性;基坑;内力;弯矩

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240109

中图分类号:TU473

文献标志码:A

Field Test on Mechanical Performance of Micro-Steel Pipe Piles – Anchor Support in Combined Stratum

Ge Yuning¹, Wang Yonghong², Jiang Lingfa³, Yang Kun⁴, Zhang Yulei⁵, Zhang Dong⁶,
Sun Junliang⁴, Zhang Qijun⁷, Huang Yongfeng², Zhang Shuo², Wang Donglei^{8,9}

1. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan 250014, China

2. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China

收稿日期:2024-05-17

作者简介:葛玉宁(1979—),男,高级工程师,主要从事桩基础方面的研究,E-mail:479119821@qq.com

通信作者:王永洪(1984—),男,副教授,博士,主要从事土力学及桩基础方面的研究,E-mail: hong7986@163.com

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME143)

Supported by the National Natural Science Foundation of Shandong (ZR2022ME143)

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China
4. Zhongqing Jian'an Construction Group Co., Ltd., Qingdao 266023, Shandong, China
5. Zhongxin Construction Engineering Co., Ltd., CSCEC, Shandong Branch, Qingdao 266109, Shandong, China
6. Jianhua Building Materials (Laiyang) Co., Ltd., Yantai 265200, Shandong, China
7. Qingdao Yegao Construction Engineering Co., Ltd., Qingdao 266011, Shandong, China
8. Qingdao Yongyuan Marine Technology Co., Ltd., Qingdao 266033, Shandong, China
9. Qingdao Green Technology Geotechnical Engineering Co., Ltd., Qingdao 266033, Shandong, China

Abstract: In order to study the stress characteristics of micro-steel pipe pile – anchor support in soil-rock-bound stratum, as well as the internal force changes of steel tubular pile at different excavation depths and after the completion of anchor cable and anchor rod construction, a field test was carried out in a subway station in Qingdao. The foundation pit was strengthened by using the third-order micro-steel pipe pile combined with anchor cable and anchor rod, and the internal force test was carried out on two test piles in the first order of the foundation pit. The steel pipe piles in different excavation depth, anchor and anchor cable construction after the completion of the internal force of change. The results show that the bending moment near the excavation surface and the top of the pile is large, the measured bending moment value is up to more than $15 \text{ kN} \cdot \text{m}$. The anchor cable lock can effectively suppress the development of bending moment. The law of the internal force changes in the pile body is obviously related to the earth rock geological conditions, and the maximum positive bending moment is $32.43 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

Key words: micro-steel pipe pile; soil-rock-bound strata; mechanical characteristic; foundation pit; internal force; bending moment

0 引言

微型钢管桩为桩径小于 300 mm 的一种钢桩,是在微型桩和钢管桩技术的基础上发展起来的一种新的加固方法,在工程施工及地基加固中有着广泛的应用。早期微型钢管桩多用于旧房改造、建(构)筑物加固、古建筑加固纠偏、边坡防治等方面,随着科学技术的进步与发展,基坑开挖深度越来越深,微型钢管桩因其材料强度高、穿透能力强、挤土效应小、压桩设备或钻孔设备轻便、连接方便等优点,在边坡加固、基坑支护等方面得到广泛应用^[1-2]。

目前很多学者对岩土体基坑支护工程中微型钢管桩的受力特性进行了研究。白晨光等^[3]、李白等^[4]发现微型钢管桩在土质基坑支护工程中主要起抗弯作用;刘红军等^[5]发现在岩土层基坑支护工程中,将微型钢管桩结合喷锚结构作为支护手段,能大幅度提高岩石基坑支护结构的安全性;黄雪峰等^[6]对深基坑桩锚支护结构桩身内力进行监测,发现实测弯矩与理论计算弯矩在分布规律和变化趋势上存在一定的差异;向波等^[7]对土层中微型钢管排桩进行堆载试验,发现各排桩桩身弯矩分布具有一定的

差异性;骆祖江等^[8]、余莉等^[9]对土质地层基坑中的桩锚支护体系进行内力监测,发现弯矩最大值位于开挖面附近,且反弯点数目与开挖深度有关。

总结发现,微型钢管桩现场试验大多以基坑变形为主,土层选择上大多以黏性土、砂土为主,而对土岩复合地层研究较少,且基坑开挖深度均未超过 30 m。本文以青岛某土岩结合地形的 40 m 深基坑工程为依托,采用双排微型钢管桩支护体系,通过在钢管桩桩身表面安装应变片的方法对不同工况及开挖深度下的桩身应变、受力特点及其变化规律进行监测分析,以期对土岩地层微型钢管桩的设计和相关规定规范的制定提供参考依据。

1 试验设计

1.1 试验概况

本试验为青岛地铁 4 号线某车站工程,该车站地下为 4 层结构,沿东西向布置。车站采用明挖顺筑法施工,基坑深度为 31.1~37.8 m,顶板覆土厚度为 5.4~6.6 m,场区上部为第四系全新统素填土,下部地层以强风化煌斑岩为主,煌斑岩、花岗斑岩等浅成相岩脉穿插其中,与花岗岩岩基组成复合岩体,基

岩面随地形、地貌略有起伏。经勘探及室内试验所得岩土层物理力学性质如表 1 所示。

1.2 试验器材

本试验采用免焊型应变片,为消除温度影响,每次采集数据时将仪器最外侧一排接入与钢管桩同材质的钢片。应变测试仪桥路方式选择外补偿方式,通过 DH3816 静、动态应变采集仪测试桩身应变,弯矩通过采集到的微应变换算得到。

试验前,先在施工场地确定测试桩的安装部位,采用潜孔成孔。然后将安装好传感器的微型钢管桩

放入钻好的孔内,慢慢送达至桩底设计标高。试验所用的微型钢管桩为直径 168 mm、壁厚 8 mm 的无缝钢管,上阶与下阶钢管桩搭接 2 m。因基坑上部存在第四系素填土,故第一阶设计为双排微型钢管桩,桩长 12.30 m,桩顶标高为 19.40 m,水平间距为 1.00 m,1#、4# 对称布设在内排,5#、6# 对称布设在外排。此次试验主要对内排两根测试桩受力特性以及同一根测试桩对不同开挖阶段下的受力特性进行对比分析。施工中的微型钢管桩和应变片传感器的安装如图 1 所示。

表 1 岩土层物理力学性质
Table 1 Physical and mechanical properties of rock and soil layer

层号	土类名称	层厚/ m	深度/ m	天然密度/ (g/cm ³)	内摩擦 角/(°)	重度/ (kN/m ³)	浮重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa
1	素填土	1.81	1.81	1.80	15.00	18.0		10.00
2	粉质黏土	1.40	3.21	2.00	20.00	20.0		20.00
3	粗砂	2.50	5.71	2.05	35.00	20.5	10.5	7.00
4	强风化花岗岩	0.50	6.21	2.50	50.00	25.0	15.0	6.00
5	强风化煌斑岩	2.80	9.01	2.40	42.00	24.0	14.0	6.00



图 1 微型钢管桩(a)和应变片传感器的安装(b)
Fig.1 Micro-steel pipe piles (a) and installation of strain gauge transducers (b)

1.3 微型钢管桩复合锚杆(索)超前支护设计方案

综合考虑工程场地结合结构埋深、周边环境条件、地下水位、地质条件等因素,基坑采用明挖顺筑法施工、钢管桩($\varphi 168\text{ mm}@1000$) + 锚索/锚杆的支护体系,基坑围护结构设计剖面如图 2 所示。围护结构采用三阶钢管桩 + 锚索/锚杆的围护结构形式:第一阶测试桩采用双排钢管桩,钻孔直径 200 mm,钢管桩外径 168 mm,壁厚 8 mm,钢管桩水平间距 1.00 m,钢管桩入岩 1.5 m;第二及第三阶测试桩采用单排钢管桩,两阶钢管桩分界处设错台,台宽 1.0 m。

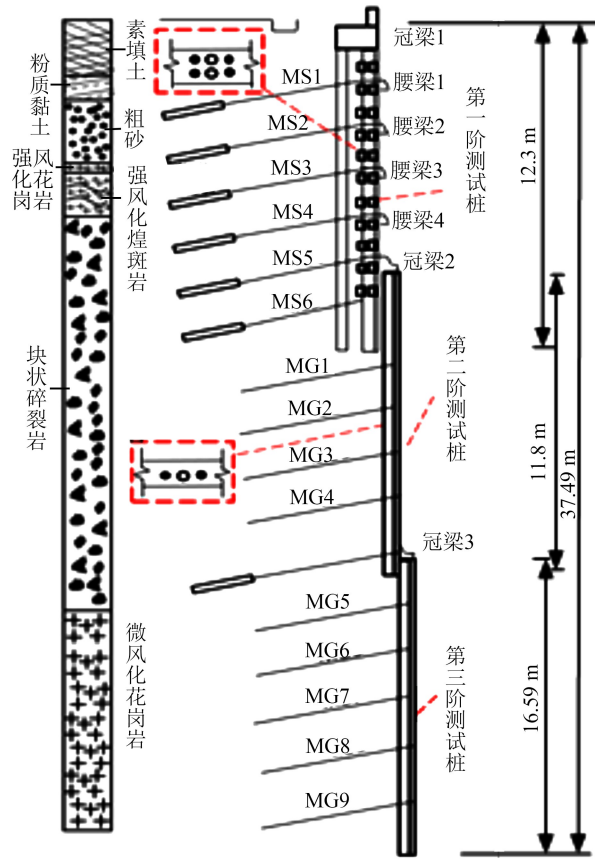


图 2 基坑围护结构设计剖面 and 传感器布设图

Fig.2 Design section of foundation pit enclosure structure and sensor layout

第一阶测试桩采用 6 道预应力锚索(MS),编号为 MS1—MS6,其预应力锁定值分别为 240、270、380、360、298、235 kN,水平间距为 2.00 m,锚杆竖向间距为 2.15 m,倾角为 15°,预应力钢绞线采用 $\varphi 15.2\text{ mm}$ 的钢绞线,强度设计值为 1 320 MPa,截

面积为 139 mm²,松弛率为 2.5%,岩层中使用的锚杆采用 HRB400 级钢筋。第二阶测试桩采用 4 道锚杆(MG),编号分别为 MG1—MG4,其中, MG1 和 MG2 锚杆承载力设计值均为 280 kN, MG3 和 MG4 设计值均为 247 kN。第三阶测试桩采用 5 道锚杆,编号为 MG5—MG9,其承载力设计值分别为 217、217、203、204、190 kN,第二及第三阶测试桩的锚杆间距为 2.50 m。

1.4 试验方案

第一阶测试桩布设两排,内排测试桩(靠近基坑内侧)编号分别为 1#、4#,外排测试桩编号分别为 5#、6#。内排单根测试桩从桩顶至冠梁 2 处分别以间隔 1.10、1.05 m 的方式布设应变片,每一侧布设 11 个应变片,左右对称设置,共 22 个,迎土面与背土面应变片布设方式与位置均相同。第二、三阶为单排钢管桩,其中第三阶为对接焊钢管。测试桩传感器布设如图 2 所示。1#、4#测试桩一侧应变片自上而下分别编号为 A₁—A₁₁、E₁—E₁₁(深度距冠梁底分别为 1.10、2.20、3.30、...,12.10 m),另一侧自桩顶至桩端分别编号为 A₁'—A₁₁'、E₁'—E₁₁'(深度距冠梁底分别为 1.05、2.10、3.15、...,11.55 m)。测试仪器选用 DH3816 应变监测仪,自开挖阶段每周监测一次,持久未挖阶段间隔 15 d 监测一次。

在前人^[5-8]研究基础之上,持续动态监测了第一阶基坑内侧钢管桩在基坑开挖过程桩锚支护结构桩身实际受力状态,对比分析了不同开挖工况下内排测试桩间内力变化的差异性,从第 1 天(2018 - 11 - 16)试验桩沉桩完毕到第 232 天(2019 - 07 - 05) MG7 与 MG8 施工完毕的各具体工况见表 2。重点分析了第一阶基坑开挖 7 种工况下、第二阶 6 种工况下,以及第三阶 8 种工况下微型钢管桩受力特点、变化规律、内力极值位置以及桩-土共同作用下桩身反弯点位置。

2 试验结果及分析

试验采集第一、二、三阶微型钢管桩开挖时内排 1#、4#测试桩在不同开挖工况下不同桩身位置的应变数值,并据此计算出桩身应力和弯矩。

2.1 第一阶开挖时内排 1#测试桩桩身弯矩

从第 1 天试验桩沉桩结束到第一阶钢管桩沉桩之前,对第一阶钢管桩桩身应变进行监测,1#测试桩应变片自上而下分别编号为 A₁—A₁₁、A₁'—A₁₁'。通过桩身应变片的微应变变化量可得到土岩

基坑内排 1# 测试桩各工况下弯矩随深度的变化规律,进而全面分析桩身实际受力状态,据此整理得到 1# 测试桩弯矩随桩身深度的变化曲线^[10],如图 3 所示。

表 2 各测试时间下的开挖工况			
Table 2 Excavation conditions under each test time			
阶数	时间	工 况	开挖工况
第一阶	第 23 天	I-1	开挖至 2.35 m
	第 28 天	I-2	开挖至 4.50 m,MS1 施工完毕
	第 38 天	I-3	开挖至 5.00 m,MS2 施工完毕
	第 42 天	I-4	开挖至 6.75 m
	第 48 天	I-5	MS3 施工完毕
	第 55 天	I-6	开挖至 8.60 m
	第 89 天	I-7	开挖至 10.75 m
第二阶	第 105 天	II-1	MS4、MS5 锁定,第二阶钢管下桩完毕
	第 118 天	II-2	开挖至 12.75 m
	第 134 天	II-3	开挖至 16.65 m, MG1 施工完毕
	第 150 天	II-4	开挖至 19.10 m, MG2 施工完毕
	第 164 天	II-5	开挖至 20.95 m, MG3 施工完毕
	第 166 天	II-6	第三阶钢管下桩完毕, MG4 施工完毕
第三阶	第 178 天	III-1	第二阶锁脚腰梁施工完毕,开挖至 21.4 m
	第 187 天	III-2	开挖至 23.00 m
	第 194 天	III-3	开挖至 25.50 m, MG5 施工完毕
	第 200 天	III-4	MG6 施工完毕
	第 216 天	III-5	开挖至 28.00 m
	第 220 天	III-6	开挖至 28.74 m
	第 226 天	III-7	开挖至 32.25 m
	第 231 天	III-8	MG7、MG8 施工完毕

从图 3 可以看出:随着基坑的开挖,同一截面(桩身深度)处桩身弯矩随开挖深度逐渐增大,在桩身 4.30~8.60 m 深度段弯矩变化最为显著,桩顶 A_1-A_1' 截面位置处出现较大的负弯矩;在基坑开挖至 10.75 m(工况 I-7)时,1# 应变片 A_1-A_1' 截面位置处测得负弯矩最大值超过 15 kN·m。分析认为:桩顶位置承受桩周土体侧向推力作用,开挖过程一直起到悬臂挡土桩作用,故弯矩逐渐增大,同时基坑在开挖过程中,顶部位置钢管桩最先发挥作用,承受较大桩顶及桩周荷载;随着开挖深度的增加,背土面处的弯矩出现较大值,未挖到的桩身位置弯矩出现波动现象,数值很小,且弯矩略微向下移

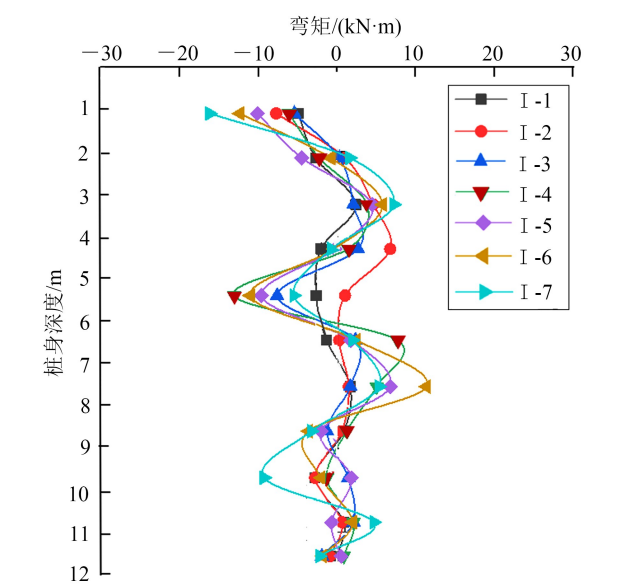


图 3 第一阶开挖时 1# 测试桩弯矩变化曲线

Fig.3 Bending moment diagram of 1# test pile during the first stage excavation

动,数值较为稳定^[10]。因测试桩 MS1 锁定,使得 A_2-A_2' 截面弯矩由负值向正弯矩方向发展,大体趋于 0^[11-12]。

基坑刚开挖且锚杆未锁定时,上部土压力主要依靠下部嵌固段被动土压力平衡,弯矩曲线呈“上部大下部小”的形式,开挖面以下弯矩波动较小;各锚索位置处,随着预应力作用的依次施加,该处弯矩减小^[11],MS2 张拉锁定后,截面 A_4-A_4' 处弯矩从 6.82 kN·m 减小至 2.73 kN·m(工况 I-7);MS3 张拉锁定后,桩身 A_6-A_6' 截面弯矩从 7.73 kN·m 降至 1.80 kN·m(工况 I-6)。分析认为:锚索预应力的施加相当于为微型钢管排桩增加了弹簧支撑,对微型钢管桩的变形起到很大的约束作用,限制了钢管桩变形,故弯矩减小。桩身下部 1/3 范围(8.60~12.00 m)内弯矩数很小,基本控制在 ± 3 kN·m 以内;但基坑挖至 10.75 m(工况 I-7)时,因 MS4、MS5 锚索未及时施加预应力使得下部弯矩增幅明显。分析认为:桩身下段微型钢管桩单独承受桩侧水土侧压作用,锚索锚杆与微型钢管桩未起到联合支护作用。与设计值相比,正弯矩理论值是实测值的 2.31 倍,负弯矩理论值是实测值的 1.46 倍,说明设计值较保守^[13]。本文仅考虑微型钢管桩本身的抗弯性能,若综合考虑桩周水泥浆渗透、填充、挤密岩土体作用对整体抗弯性能的影响,实际工程运用中,钢管桩的抗弯性能远大于设计值,这一

结论亦得到王少杰等^[12]的证实。

2.2 第一阶开挖时内排 4# 测试桩桩身弯矩

对于基坑外侧土体,开挖之前属于静止土压力状态,随着基坑土体逐层开挖,基坑外部土体有逐渐向坑内发生水平位移的趋势,此时静止土压力转变为主动土压力,在基坑外侧设置双排钢管桩起到减小围护结构体系内力变化情况。根据第一阶开挖时 4# 测试桩弯矩监测数据,绘制出的基坑开挖过程桩身弯矩随桩身深度变化曲线。如图 4 所示。

从图 4 可以看出:桩身弯矩表现出“中间大、桩端小,而桩顶有较大负弯矩”的特性,揭示了土岩基坑钢管桩的弯矩分布规律;与同排 1# 测试桩相比,4# 测试桩桩顶负弯矩与 1# 测试桩接近,而桩身 4.30 m 以上的素填土、粉质黏土、粗砂层在第一阶开挖时弯矩变化较大。

由图 4 还可以看出:开挖面附近的弯矩较大,这是由于开挖面附近的应变片测得的微应变较大,换算得到的弯矩也较大;开挖至 6.75 m 时, E_5-E_5' 截面和 E_6-E_6' 截面弯矩均出现极值,分别为 -14.06、6.64 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 。任一开挖面处因锚索预应力的施加,弯矩会减小,开挖至 4.50 m 时,因 MS1 锚索的施加, E_2-E_2' 截面弯矩绝对值由 5.24 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 减小至 2.18 $\text{kN}\cdot\text{m}$,减少幅度超过 1/2,与同排 1# 测试桩相比,弯矩绝对值增加 1.14 $\text{kN}\cdot\text{m}$;MS3 锚索的施加使得 5.40 m 处负弯矩由 14.06 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 减小至 10.79 $\text{kN}\cdot\text{m}$,减小幅

度约 30.30%,与同侧的 1# 测试桩相比,弯矩增加了 11.49%。即随着工况进行,各截面处弯矩逐渐增大,且自上而下逐渐延伸、扩展。弯矩曲线规律明显,符合微型钢管桩与锚索联合支护结构体系的实际受力状态,数值较为稳定,在桩侧土压力、嵌固段土体抵抗力、预应力锚索共同作用下,桩身中部 5.00~8.00 m 位置弯矩较大,在基坑支护结构设计时,应实时监测取各工况下最不利组合的结果作为设计依据^[14]。

2.3 第二阶开挖时内排 1# 测试桩桩身弯矩

第二阶开挖引起第一阶 1# 测试桩弯矩随深度变化曲线如图 5 所示。

第二阶开挖工况下:随着开挖深度逐渐增大,桩身弯矩也逐渐增大;同一截面弯矩不断增大,桩身负弯矩极值略微减小,正弯矩逐渐增大;特别是岩石层部分(深度 7.60 m),弯矩增大现象尤为明显。第一阶开挖时桩身 8.60~12.00 m 范围内弯矩数较小,第二阶开挖过程弯矩数稳定在 $\pm 10.00 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 左右;其中最大正弯矩达到 7.01 $\text{kN}\cdot\text{m}$,最大负弯矩达到 -10.33 $\text{kN}\cdot\text{m}$,说明桩身嵌岩段逐渐改善桩身受力特性^[15]。

此外,弯矩曲线离散性不大,反弯点不止一处且桩身受力特点没有发生较为明显的改变,整体“鼓肚”较第一阶偏大;与第一阶开挖时相比,最大负弯矩位置由桩身 5.40 m 下移至 9.70 m 处,特别是第三

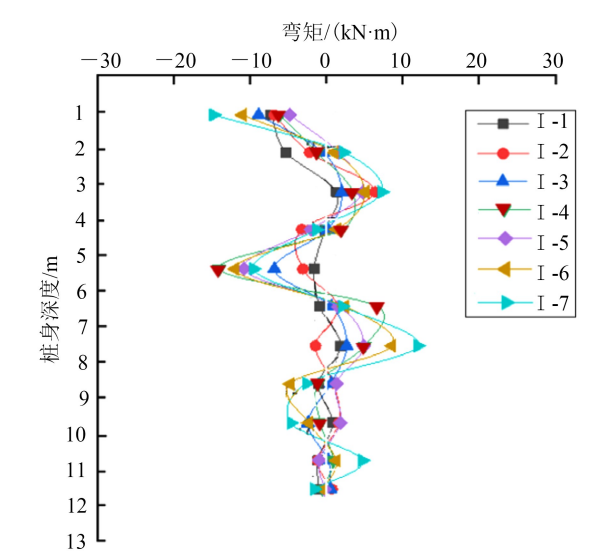


图 4 第一阶开挖时 4# 测试桩弯矩变化曲线
Fig.4 Bending moment diagram of 4# test pile during the first stage excavation

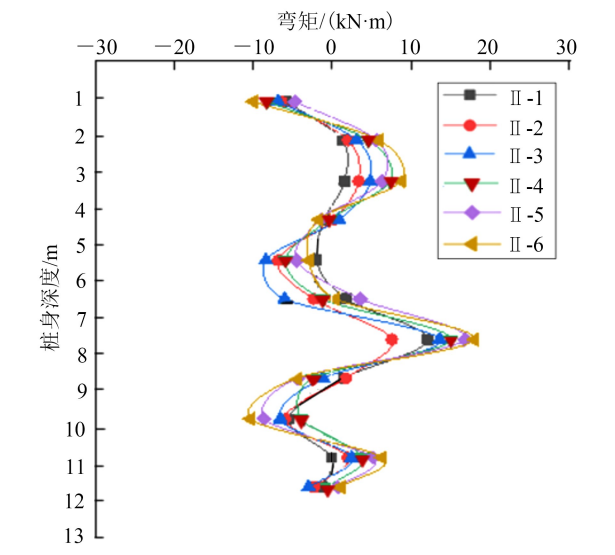


图 5 第二阶开挖时 1# 测试桩弯矩变化曲线
Fig.5 Bending moment diagram of 1# test pile during the second stage excavation

阶微型钢管桩下桩完毕时,A9—A9'截面弯矩数值达到 $-10.33\text{ kN}\cdot\text{m}$,较 A5—A5'截面处 $-8.41\text{ kN}\cdot\text{m}$ 的绝对值高出 22.83%。第二阶微型钢管桩施工时,5 道预应力锚索全部张拉锁定,使得锚索位置处弯矩始终较小,说明锚索预应力的施加有效约束了微型钢管桩变形。5 道锚索相互配合、协调工作,从锚索(锚杆)设计上来看,第一阶设置 5 道预应力锚索,承载能力设计值介于 $145\sim 202\text{ kN}$ 之间,第二阶虽为单排微型钢管桩,但 4 道锚杆承载能力设计值介于 $210\sim 250\text{ kN}$ 之间,锚杆设计值的增加可有效控制住微型钢管桩内力及变形,使得桩身内力较为协调一致。

2.4 第二阶开挖时内排 4# 测试桩桩身弯矩

第二阶开挖时 4# 测试桩弯矩随深度变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可知:桩身中部 5.40 m 深度处最大负弯矩随开挖深度增加逐渐减小,最大值仅比 9.70 m 深度处负弯矩波峰高出 $4.88\text{ kN}\cdot\text{m}$;7.55 m 深度处仍存在正弯矩极值,数值上高达 $26.23\text{ kN}\cdot\text{m}$,特别是基坑开挖深度超过 20.95 m(工况 II-6)时弯矩大幅度增加,增幅达 29.62%,正弯矩极值约为负弯矩极值(绝对值)的 2~3 倍,且开挖深度越大差值越大。桩锚支护锁定阶段,5 道预应力锚索的施加相当于弹簧支座,随着基坑开挖逐渐增大,在较大主动水土压力、锚杆反力共同作用下,桩身弯矩表现为增大趋势。在桩身下部 1/3 范围内出现较小正负弯矩波峰,与第一阶开挖时弯矩基本为 0 相比,9.70 m 位置负弯矩最大值增至 $-6.95\text{ kN}\cdot\text{m}$,10.75 m 位置处正弯矩最大值增至 $13.39\text{ kN}\cdot\text{m}$,负弯矩值约为正弯矩极值的一半;表明深基坑开挖过程桩身弯矩逐步向下移动,岩土层部分弯矩不容小觑。在 2.15、4.13、6.45、8.60 m 深度位置仍出现零点,表明开挖深度小于 20.95 m 时柔性支护结构中预应力锚索起到了很好的约束作用^[16]。

2.5 第三阶开挖时内排 1# 测试桩桩身弯矩

与前两阶开挖时有很大区别,工况 II-6 之后开挖深度超过 30.00 m,利用 DH3816 采集仪得到第一阶 1# 测试桩微应变数据,绘制出第三阶开挖时 1# 测试桩弯矩沿桩身深度分布曲线,如图 7 所示。

由图 7 可看出:第三阶微型钢管桩下桩完毕后,桩身弯矩整体超大幅度增加;随着基坑逐渐向下开挖,桩顶部分负弯矩较第二阶开挖时增加一倍。分

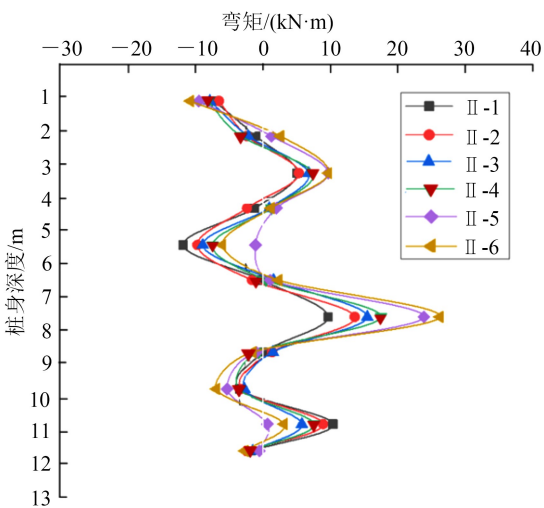


图 6 第二阶开挖时 4# 测试桩弯矩变化曲线

Fig.6 Bending moment diagram of 4# test pile during the second stage excavation

析认为,随着基坑逐渐向下开挖,基坑内排测试桩桩顶受到的主动土压力越大,桩顶位移及变形就越大,桩身上部 1/3 范围内的土层受力状态由迎土面受拉向背土面受拉过渡。其中桩身 3.25 m 深度处正弯矩波峰较第一阶增加 $18.26\text{ kN}\cdot\text{m}$,较第二阶增加 $12.99\text{ kN}\cdot\text{m}$,后经反弯点在土岩结合分界处出现最大负、正弯矩转折,负弯矩极值较一、二阶增长幅度分别为 51.09%、68.38%,正弯矩极值增长幅度仅为 16.80%;说明基坑开挖超过 13.00 m,土岩结合薄

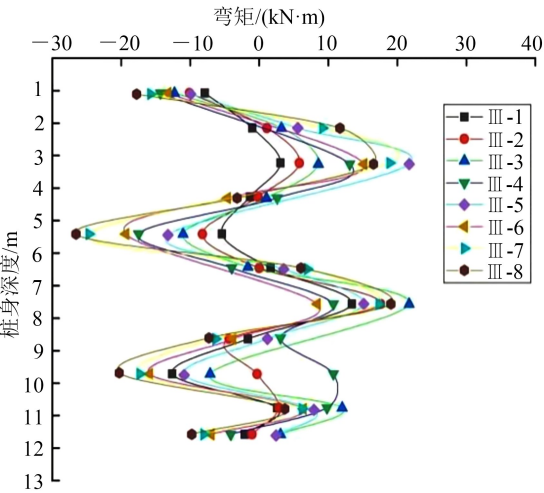


图 7 第三阶开挖时 1# 测试桩弯矩变化曲线

Fig.7 Bending moment diagram of 1# test pile during the third stage excavation

弱层中的 4.13~6.15 m 土层范围内桩身受力及变形较大^[17]。

2.6 第三阶开挖时内排 4# 测试桩桩身弯矩

根据第三阶开挖过程测得 4# 测试桩应力、弯矩数据,绘制出的弯矩随开挖深度变化曲线如图 8 所示。

由图 8 可看出:桩身弯矩随开挖深度增大逐步累积且逐渐向下传递,粗砂和强风化花岗岩下压带接触面上下 1.50 m 左右仍为正、负弯矩最大值处,正弯矩最大为 32.43 kN·m,分别比第一、二阶开挖极值高出 56.64%、19.12%;桩身 5.40 m 处最大负弯矩为-20.55 kN·m,绝对值比第一阶开挖时高出 31.58%,比第二阶施工极值高出 63.45%。可以看出,在一定土层深度范围内随着开挖深度的增加,弯矩数值先减小后增大,逐渐向下传递;同时说明土岩结合分界面容易形成软弱滑动面,如果采用单一支护形式,很难协调两者之间的内力和变形,故预应力锚索选择上 MS3、MS4 承载能力设计值增至 506 kN。

的反弯点,特别是基坑开挖至 32.25 m 之后,桩身弯矩整体增大,在各波峰位置增幅达 28.56%~51.09%;说明基坑开挖超过 30.00 m 时应注意定期监测,特别是锚索位置,预应力锚索起到协调区段内力及变形作用,使桩身受力较为均匀,但此时弯矩较一、二阶开挖时增长幅度较大^[18]。

3 结论与建议

1)第一阶微型钢管桩开挖时,开挖面附近出现较大弯矩数值,而开挖面以下位置测得弯矩数值基本在 0 左右波动。内排 1#、4# 测试桩基坑开挖过程桩顶负弯矩在 0~10 kN·m 范围内波动。强风化花岗岩、强风化煌斑岩薄弱地段桩身内力出现应力集中现象,存在正、负弯矩极值。

2)锚索锁定使得该处弯矩明显减小,MS3 锁定使得内排测试桩预应力锚索位置始终出现反弯点,且桩身反弯点不止一处。随着基坑开挖深度的逐渐增大,第一阶开挖时桩底受力较小,特别是距桩端 2.00 m 的嵌固段几乎不受力。

3)基坑开挖至第二阶时,第一阶内排 2 根测试桩弯矩曲线离散性不大,整体“鼓肚”较第一阶偏大,桩身分别出现两个负弯矩波峰、两个正弯矩波峰,土层极值逐渐下移至桩身 9.70、10.75 m 位置处的岩石地层。

4)第三阶基坑开挖深度为 8.00 m,测试桩桩身弯矩超大幅度增加,出现多个较大正、负弯矩波峰;其中,桩顶悬臂部分表现为迎土面受拉;2.15~4.30 m 土层范围内的测试桩表现为迎土面受拉,与一、二阶开挖时相比弯矩大幅度增加;土岩边界位置仍为正负弯矩极值处,负弯矩极值分别比一、二阶高出 30.00%、60.00% 以上,正弯矩极值分别高出 40.00%、20.00% 左右。

参考文献(References):

[1] 毕孝全,喻良明,赵明伦. 超前钢管桩在深基坑支护中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1756 - 1759.
Bi Xiaoquan, Yu Liangming, Zhao Minglun. Application of Front Steel Tube Stakes in Supporting Deep pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Sup.): 1756 - 1759.
[2] 杨志银,张俊,王凯旭. 复合土钉墙技术的研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 153 - 156.

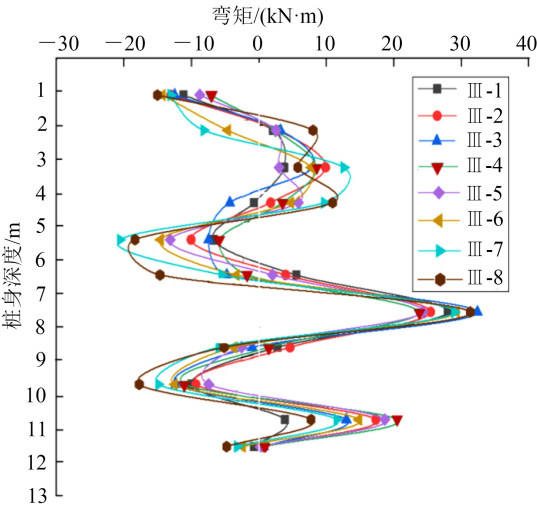


图 8 第三阶开挖时 4# 测试桩弯矩变化曲线
Fig.8 Bending moment diagram of 4# test pile during the third stage excavation

岩石接触面桩身(9.70~12.00 m)处弯矩出现第二个波峰,9# 应变片弯矩增至-17.74 kN·m,分别比一、二阶开挖时高出 61.39%、60.82%,10# 应变片正弯矩达 20.46 kN·m,比第一阶开挖时极值高出 77.03%,比第二阶开挖时高出 34.56%。第三阶与前两阶开挖时内力变化有所不同,没有明确

- Yang Zhiyin, Zhang Jun, Wang Kaixu. Development of Composite Soil Nailing Walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 153-156.
- [3] 白晨光, 贾立宏, 马金普, 等. 抗弯功能微型桩在基坑支护中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1656-1658.
- Bai Chenguang, Jia Lihong, Ma Jinpu, et al. Application of Micropiles with Anti-Bending Function to Retaining and Protection of Foundation Excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Sup.): 1656-1658.
- [4] 李白, 刘小丽, 黄敏. 微型桩在基坑工程中的应用与思考[J]. 工程地质学报, 2011, 19(增刊): 492-497.
- Li Bai, Liu Xiaoli, Huang Min. Application of Micropiles to Foundation Pit Excavation[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(Sup.): 492-497.
- [5] 刘红军, 张庚成, 刘涛. 土岩组合地层基坑工程变形监测分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊2): 550-553.
- Liu Hongjun, Zhang Gengcheng, Liu Tao. Monitoring and Analysis of Deformation of Foundation Pits in Strata with Rock-Soil Combination[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup.2): 550-553.
- [6] 黄雪峰, 陈帅强, 马龙, 等. 桩锚支护结构桩身内力试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(17): 63-68.
- Huang Xuefeng, Chen Shuaiqiang, Ma Long, et al. Experimental Study on Internal Force of Retaining Piles in Pile-Anchor Supporting Structure[J]. Building Structure, 2014, 44(17): 63-68.
- [7] 向波, 马建林, 何云勇, 等. 微型钢管排桩支挡结构原型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2131-2138.
- Xiang Bo, Ma Jianlin, He Yunyong, et al. Prototype Tests on Micro-Steel Pipe Piles as Retaining Structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2131-2138.
- [8] 骆祖江, 成磊, 张兴旺, 等. 悬挂式止水帷幕深基坑降水方案模拟优化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 1946-1956.
- Luo Zujiang, Cheng Lei, Zhang Xingwang, et al. Simulation and Optimization of Dewatering Scheme for Suspended Impervious Curtain in Deep Foundation Pit[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1946-1956.
- [9] 余莉, 张钰, 王维玉, 等. 基坑装配式可回收支护和桩锚支护结构的受力与变形分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1789-1800.
- Yu Li, Zhang Yu, Wang Weiyu, et al. Stress and Deformation Analysis of Assembled Recoverable Support and Pile Anchor Support Structure in Foundation Pit[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(6): 1789-1800.
- [10] 秦胜伍, 张延庆, 张领帅, 等. 基于 Stacking 模型融合的深基坑地面沉降预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1316-1323.
- Qin Shengwu, Zhang Yanqing, Zhang Lingshuai, et al. Prediction of Ground Settlement Around Deep Foundation Pit Based on Stacking Model Fusion[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1316-1323.
- [11] 杨校辉, 朱彦鹏, 郭楠, 等. 地铁车站深基坑桩锚支护结构内力试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2): 185-197.
- Yang Xiaohui, Zhu Yanpeng, Guo Nan, et al. Internal Force Test Research on Pile-Anchor Retaining Structure of Metro Station Deep Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup.2): 185-197.
- [12] 王少杰, 刘福胜, 段绪胜, 等. 抗弯功能微型桩试验研究与应用[J]. 建筑科学, 2009, 25(11): 73-75.
- Wang Shaojie, Liu Fusheng, Duan Xusheng, et al. Experimental Study and Application on Micro Piles with Anti-Bending Function[J]. Building Science, 2009, 25(11): 73-75.
- [13] 王永洪, 银吉超, 张明义, 等. 黏性土中静力沉桩过程桩土界面土压力模型试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 196-206.
- Wang Yonghong, Yin Jichao, Zhang Mingyi, et al. Model Test of Soil Pressure at Pile-Soil Interface During Static Pile Driving in Cohesive Soil[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 196-206.
- [14] 赵一行, 詹刚毅, 石钰锋, 等. 土岩复合地层超深圆形基坑内衬墙作用效果及优化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(2): 526-540.
- Zhao Yixing, Zhan Gangyi, Shi Yufeng, et al. Effect and Optimization Analysis of the Inner Lining Wall of the Ultra-Deep Circular Foundation Pit in the Soil-Rock Composite Stratum[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2): 526-540.

[15] 曾章波,黄华,梅龙喜,等.饱和砾性土不排水动力强度及变形特性试验[J].吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1):207-217.
Zeng Zhangbo, Huang Hua, Mei Longxi, et al. Experiment on Undrained Dynamic Strength and Deformation Characteristics of Saturated Gravelly Soil [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1):207-217.

[16] 邓时容,肖世国. 嵌固段顶部拓宽型抗滑桩计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 84-91.
Deng Shirong, Xiao Shiguo. Calculation Method of Stabilizing Piles with Broadened Top at the Built-in Section[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 84-91.

[17] 张敏,周灵,谭超,等. 复杂地层方形抗滑桩旋挖成孔工艺及工程应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023,34(1): 85-93.
Zhang Min,Zhou Ling,Tan Chao,et al. Techniques of Rotary Hole-Drilling for Square Anti-Slide Piles in Complex Formation and Its Application [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023,34(1): 85-93.

[18] 李寻昌,高凡凡,冉雨童,等. 基于差分法的双排抗滑桩结构内力计算[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 95-104.
Li Xunchang, Gao Fanfan, Ran Yutong, et al. Internal Force Calculation of Double Row Anti-Slide Pile Structure Based on Finite Difference Method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 95-104.