

引用本文:朱彦鹏,吕向向,杨奎斌,等.微型钢管桩托换已有建筑物桩筏基础的应用研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(4):171-178.
ZHU Yanpeng,LYU Xiangxiang,YANG Kuibin,et al. Research on application of micro-steel pipe pile underpinning piled raft foundation of existing building[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2023,40(4):171-178.

DOI:10.19815/j.jace.2021.11114

微型钢管桩托换已有建筑物桩筏基础的应用研究

朱彦鹏^{1,2},吕向向^{1,2},杨奎斌^{1,2},吴林平^{1,2},韦正德^{1,2},施多邦^{1,2}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,甘肃 兰州 730050)

摘要:为了研究微型钢管桩托换加固已有桩筏基础建筑的实际应用,以三门峡市某已有桩筏基础建筑物的基础托换工程为例,对已经产生倾斜的 16 层已有建筑物进行事故原因分析,结合以往实际工程案例经验以及各加固方法优缺点对比,最后采用微型钢管桩托换基础和外扩筏板基础相结合的加固方案。通过单桩竖向承载力计算、稳定性计算以及现场原位试桩,确定微型钢管桩施工工艺以及控制参数,利用现场沉降位移监测,对托换加固方案效果进行评价。结果表明:微型钢管桩托换和外扩筏板基础相结合的加固方案不仅施工工期短,加固机理明确,而且施工期间对建筑物扰动较小,综合加固效果显著;根据监测数据,测点 DX1、DX2 和 DX7 处累计沉降量相对较大,其中测点 DX1 处最大累计沉降位移为-81.1 mm,测点 DX7 处最大日均沉降为-1.23 mm;被加固的已有建筑物在施工完微型钢管桩大约 15 d 以后,日均沉降位移稳定控制在 0~0.05 mm·d⁻¹之间;研究成果可为填方区地基不均匀沉降加固设计提供一定的参考。

关键词:已有建筑;托换技术;微型钢管桩;施工监测;加固效果

中图分类号:TU929

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)04-0171-08

Research on application of micro-steel pipe pile underpinning piled raft foundation of existing building

ZHU Yanpeng^{1,2}, LYU Xiangxiang^{1,2}, YANG Kuibin^{1,2}, WU Linping^{1,2},
WEI Zhengde^{1,2}, SHI Duobang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In order to study the practical application of micro-steel pipe pile underpinning piled raft foundation of existing building, a foundation underpinning project of an existing piled raft foundation building in Sanmenxia city was taken as an example. The cause of the accident of the existing 16-story building that has been inclined was analyzed. Combined with the previous actual engineering case experience and the comparison of the advantages and disadvantages of each reinforcement method, and finally a reinforcement plan combining the underpinning of micro-steel pipe pile underpinning and the externally expanded raft foundation was adopted. Through the

收稿日期:2021-11-15

基金项目:教育部长江学者创新团队支持计划项目(IRT_17R51)

作者简介:朱彦鹏(1960-),男,教授,博士生导师,E-mail:zhuyp@lut.cn.

calculation of vertical bearing capacity of single pile, stability calculation and field test pile, the construction technology and control parameters of micro-steel pipe pile were determined, and the field settlement monitoring was used to evaluate the effect of the underpinning reinforcement scheme. The results show that the reinforcement scheme combining micro-steel pipe pile underpinning and externally expanded raft foundation not only has short construction period and clear reinforcement mechanism, but also has less disturbance to buildings during construction, and the comprehensive reinforcement effect is remarkable. According to the monitoring data, the cumulative settlement at the measuring points DX1, DX2 and DX7 are relatively large. The maximum cumulative settlement at the measuring point DX1 is -81.1 mm, and the maximum daily settlement at the measuring point DX7 is -1.23 mm. About 15 d after the construction of the micro-steel pipe piles, the average daily settlement of the reinforced existing building is stably controlled between 0 and $0.05 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$. The research findings can provide some reference for the reinforcement design of uneven settlement of foundation in filling area.

Key words: existing building; underpinning technology; micro-steel pipe pile; construction monitoring; reinforcement effect

0 引言

随着社会经济的快速发展,城市建筑用地日益紧张,于是出现了建筑空间竖向发展的现象,并涌现出大量高层、超高层建筑。为了满足城市经济需要,挖填方工程也逐渐向着更大规模的方向发展。随之而来的便是各种复杂的地基承载力问题,已有建筑物的地基处理问题也成了许多土木工程领域专家学者研究的热点课题^[1-2]。

填方区地基的不均匀沉降会导致建筑物倾斜、开裂等,削弱和破坏了建筑物结构的整体性、安全性以及耐久性,直接或间接地影响建筑物的正常使用。已有诸多专家学者针对建筑物不均匀沉降导致的上部结构开裂、倾斜等问题做了相应研究,并取得了一些研究成果^[3-4]。托换技术是指对已有建筑物进行地基处理、基础加固和改造等措施,或者是解决在已有建筑物基础下修建地下工程以及邻近建设新工程而影响已有建筑物的安全等技术总称,主要适用于已有建筑物的加固、增层或扩建,以及受修建地下工程、新建工程和基坑开挖影响的已有建筑物的地基处理或基础加固。张勇等^[5]利用加固完楼房的反向不均匀沉降,结合微型钢管桩分期、分区施工,成功对事故楼房进行了纠偏和加固,并通过观测数据验证了微型钢管桩对倾斜楼房进行纠偏加固的效果。李清泉等^[6]采用锚杆静压桩加固及钻孔取土纠倾的措施,对一倾斜楼体进行纠倾加固,证明了锚杆静压桩加固法和钻孔取土纠倾法在湿陷性黄土地区应用的可行性。朱彦鹏等^[7]利用实际加固纠偏工

程,在黄土填方场地制作了 3 根微型钢管桩试桩,在试桩桩身中布置应变计,进行单桩静载试验,并得出了微型钢管桩加固实际工程的若干条结论。江岳春^[8]针对某高层建筑不均匀沉降引起的建筑物倾斜问题,采用锚杆静压桩进行基础加固,通过反演分析计算,设计了具体的基础加固方案。Cheng 等^[9]研究了承重墙基础托换钢筋模型的简化计算方法,采用简化 Timoshenko 法对 3 种钢砖砌体组合梁进行理论分析,得到组合梁的挠度解和轴向、法向应力解,并将该法应用于监狱围墙的地基托换,验证了简化计算与实际模型之间的关系。然而,已有研究中的大多工程采用梁式托换加固和扩大基础底面积法,对于填方地基已有桩筏基础建筑不均匀沉降的托换加固研究比较匮乏。

为了研究托换技术在黄土填方区已有桩筏基础建筑加固中的应用,本文以三门峡市某已有桩筏基础建筑物的基础托换工程为例,通过分析地基不均匀沉降原因,设计微型钢管桩托换加固地基基础的方案,通过沉降监测分析,评价该方法的加固效果,为今后类似的基础托换加固工程提供参考。

1 工程概况

1.1 工程背景

本工程为三门峡市某已有桩筏基础建筑物基础加固项目,位于三门峡市中心商务区西部,周公西路与苍龙东路交叉口东南侧。该建筑物地上 16 层,地下 1 层,主体为剪力墙结构。原填方地基为水泥土复合地基,承载力特征值为 250 kPa ,基础形式为桩

筏基础,筏板基础厚 1.0 m,基桩为载体桩,桩径 0.5 m。图 1 为被加固建筑物位置。



图 1 被加固建筑物位置

Fig. 1 Location of reinforced building

《建筑变形测量规范》(JGJ 8—2016)^[10]中的倾斜率计算公式为

$$\alpha=(S_A-S_B)/L \tag{1}$$

表 1 各土层物理参数

Table 1 Physical parameters of each soil layer

土层	厚度/m	压缩模量 E_s /MPa	含水率 ω /%	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	承载力特征值 f_{ak} /kPa	湿陷系数 δ_s
人工填土 Q_1^{ml}	9.6~14.5	9.2	11.5	15.6	130	0.016 0
粉土 Q_2^{l}	1.9~2.4	9.1	11.8	16.5	150	0.003 0
卵石 Q_3^{l}	7.5~11.8	23.0	12.1	18.2	260	0.000 2
黄土状粉土 Q_4^{l}	6.5~8.2	9.7		16.7	180	
粉砂 Q_5^{s}	2.7~4.1	18.0		17.9	200	

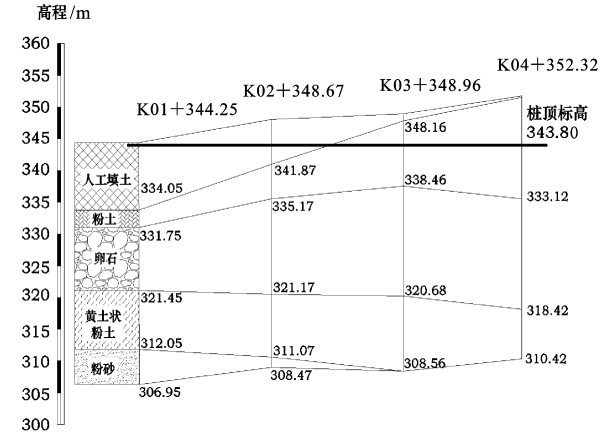


图 2 工程地质剖面

Fig. 2 Engineering geological section

2 破坏机理分析及加固方案确定

2.1 破坏机理分析

图 3 为建筑物倾斜示意图。通过现场勘察以及调阅相关资料,认为该楼发生倾斜的主要原因有:

(1)该楼西侧位于填土范围内,最厚处可达 10 m,地基土含水量较大、压缩性较高^[11],且该区域地势有低洼,存在浸水、固结和湿陷性沉降。

(2)该楼初步沉降倾斜后,楼体自身质量中心与

式中: α 为基础、构件的倾斜率; S_A 、 S_B 分别为基础、构件倾斜方向上 A、B 两点的沉降量; L 为 A、B 两点之间的距离。

截至 2020 年 10 月 6 日,第 9 次观测时的整体倾斜率为 0.001 4,规范限值为 0.002,已达限值的 75%;不均匀沉降量最大值为 27.7 mm,规范限值为 25.2 mm,已达限值的 110%。

1.2 水文地质条件

根据本工程勘察单位所提供的地质勘察报告,揭露场地主要地层依次为人工填土、粉土、卵石、黄土状粉土和粉砂。地下水埋深在现自然地表下 38.00~52.30 m 之间,水位高程为 305.92~309.25 m。因为场地西侧有苍龙涧河蓄水,所以抗浮及防水水位按高程 325.00 m 考虑。各土层物理参数如表 1 所示,工程地质剖面如图 2 所示。

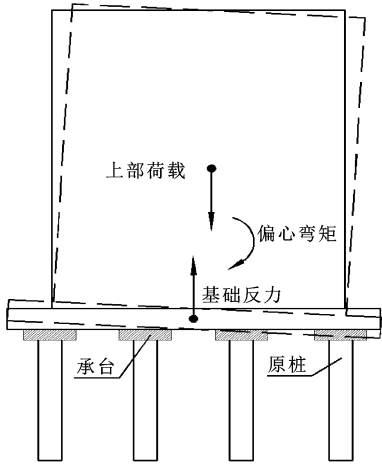


图 3 建筑物倾斜示意图

Fig. 3 Schematic diagram of building tilt

桩筏基础反力中心不重合,使得地基受到偏心荷载(偏心压力)的作用,加剧了沉降产生和上部结构倾斜^[12]。

(3)原地基桩侧阻力和桩端极限承载力减小,导致载体桩的承载力难以达到设计要求。

2.2 加固方案比选

基础加固方法较多,目前较成熟的地基基础加固方法有静压注浆法^[13]、树根桩法^[14]、静压桩法^[15]

和加大基础底面积法^[16]。

(1)静压注浆法。该方法便于施工,且施工时间短,经济成本低,但由于本工程的加固建筑位于填方区,静压注浆会导致地基进一步产生不均匀沉降,破坏建筑主体结构。

(2)树根桩法。该方法适用于淤泥、淤泥质土、粉土、砂土、碎石和人工填土地基上已有建筑物修复和增层、古建筑整修等的加固。

(3)静压桩法。该方法施工方便,工期短,加固效果明显,加固机理明确,可控性强,且施工空间小,对周围环境污染小。适用于紧急抢险工程,对于快速抑制已有建筑物沉降有显著效果。

(4)加大基础底面积法。该方法适用于已有建筑的地基承载力或基础底面尺寸不满足规范要求时的加固。增大基础底面与地基的接触面积,从而减少土体应力,达到加固基础的目的。此方法虽然经济性好,但施工对已有建筑物扰动较大,效果不易保证。

经过几种方案优缺点对比,为了快速施工托换桩基础,抑制建筑物沉降,减小对周围环境的影响,本工程最终选择钢管静压桩法进行基础加固。

3 微型钢管桩设计与施工

3.1 微型钢管桩设计

微型钢管桩托换为桩式托换的一种,桩身由钢管混凝土组成,所用钢管由若干根长为 1.0 m 的短钢管拼接而成,桩身长度由设计取值而定。钢管首节端部呈锥形,方便千斤顶将钢管压入土体,每节钢管之间用焊接的方式连接,以确保工作时的整体稳定性。筏板基础上植筋,并且露出筏板表面约 5 cm,上面有螺纹可以安装千斤顶工作时的反力施力架,通过千斤顶和反力施力架将微型钢管桩压入持力层,且嵌入持力层不小于 1 m。原筏板基础厚度为 1.0 m,固定法兰盘所用的锚固螺栓嵌入筏板基础 300 mm,原筏板基础的设计满足桩基抗冲切与剪切的要求。图 4 为微型钢管桩封桩示意图。

为了增强沉降区地基承载力,分散上部结构对基础的压力,在基础沉降量较大的一侧采用增大基础底面积的方法,即筏板外扩后增加钢管静压桩,且在施工外扩筏板基础时预留微型钢管桩桩孔以及预埋钢套筒,外扩筏板植筋示意图如图 5 所示。钢管静压桩采用直径 273 mm、壁厚 10 mm、每节长为 1 m 的钢管焊接而成,首节带锥形,尾部环向焊接一圈钢筋,钢筋后面环向设有 3 个溢浆孔,采用强度为

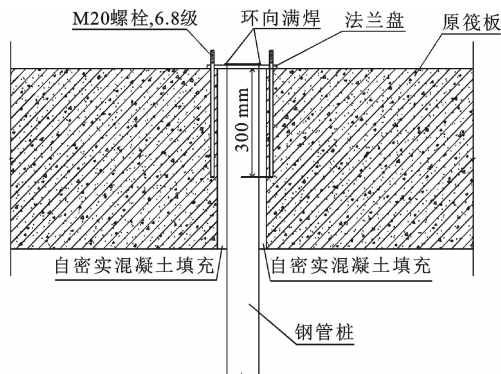


图 4 微型钢管桩封桩示意图

Fig. 4 Schematic diagram of micro-steel pipe pile sealing

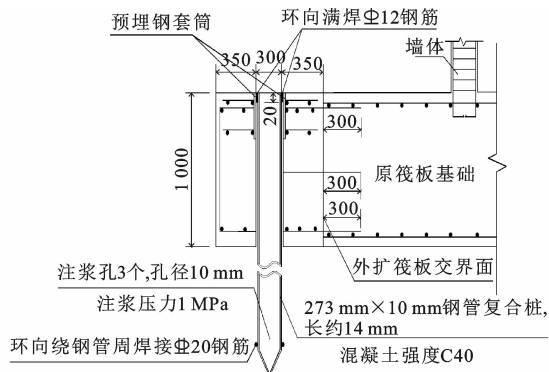


图 5 外扩筏板植筋示意图(单位:mm)

Fig. 5 Schematic diagram of planting reinforcement on outer expanded raft (unit:mm)

C40 等级的混凝土,注浆压力为 1 MPa。

3.2 单桩竖向承载力计算

由场内原位压试桩测得压桩力约为 2 400 kN,且桩端嵌入持力层(卵石层)不小于 1.0 m。由于本次加固采用直径为 273 mm 的钢管桩,桩径较小,桩身与桩周土体接触面积小,所以按照龚晓南等^[17]给出的端承桩承载力计算公式计算单桩竖向承载力设计值,如式(2)所示。

$$P = \frac{P_1}{K'} \quad (2)$$

式中: P 为单桩承载力设计值; P_1 为试桩时最终入土深度施加的压桩力; K' 为压桩力系数,黄土中 K' 取 2.0。

由式(2)可得,当桩长为 14 m 时,单桩竖向承载力设计值约为 1 200 kN。原基础桩采用载体桩,且设计承载力符合要求,本次加固采用桩式托换和外扩筏板相结合的方法对原地基基础进行加固。由地质勘察报告可知,建筑物西侧填土最厚,约为 10 m,具体地质情况可参考图 2。

根据地层及填土厚度分布以及基础不均匀沉降

观测,将加固区域分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区。Ⅰ区沉降最为显著,托换所有原载体桩,原载体桩承载力^[18]设计值为1 600 kN,Ⅰ区托换载体桩数量为30根,桩长均为14 m,总承载力为48 000 kN,故需要托换的微型钢管桩40根;Ⅱ区填土厚度较小,原载体桩端部靠近卵石层,具备一定承载力,故只托换部分基础桩,取总承载力67 200 kN的30%进行托换,Ⅱ区

桩长均为10 m,故需要托换的微型钢管桩数量为 $67\,200 \times 30\% \div 1\,100 \approx 20$ 根;同理,Ⅲ区托换总承载力33 600 kN的20%,需要托换微型钢管桩约6根。图6为微型钢管桩平面布置图。

3.3 单桩竖向承载力稳定性计算

托换工程的现场施工方式为干作业法,桩侧土主要为硬塑状态的人工填土,取k法地基系数 K_0 。

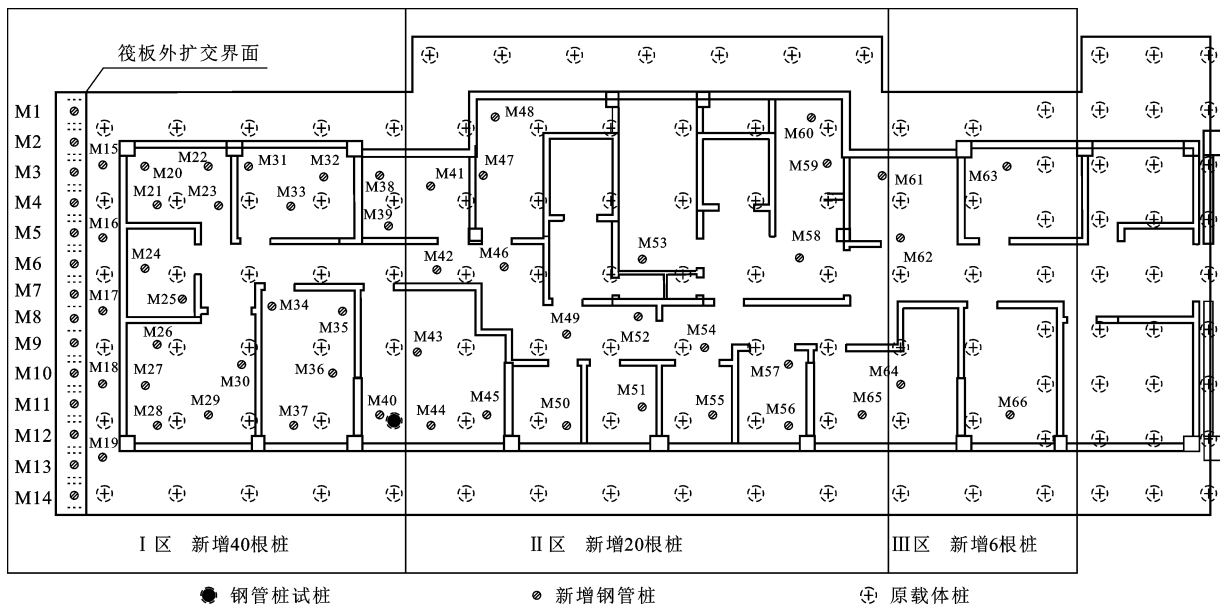


图6 微型钢管桩平面布置

Fig. 6 Plane layout of micro-steel pipe pile

为 $1.5 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。施工中所用钢管的屈服强度为400 MPa,弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,钢管内混凝土采用抗压强度为40 MPa的C40级混凝土。所用钢管桩为内径 $d \leq 1 \text{ m}$ 的圆形钢管,根据文献^[19]将计算宽度按式(3)计算。

$$\left. \begin{aligned} I_c &= \pi d_0^4 / 64 = 2.35 \times 10^{-4} \text{ m}^4 \\ I_s &= \pi (D^4 - d^4) / 64 = 7.7 \times 10^{-4} \text{ m}^4 \\ EI &= E_s I_s + 0.8 E_c I_c = 1.65 \times 10^2 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \\ b_0 &= 0.9 (1.5d + 0.5) = 0.819 \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: I_c 、 I_s 分别为混凝土桩和圆形钢管的截面惯性矩; E_s 、 E_c 分别为圆形钢管和管内混凝土的弹性模量; EI 为钢管静压桩抗弯刚度; d_0 为混凝土桩直径; D 为圆形钢管桩的外径; b_0 为钢管静压桩计算宽度。

参考文献^[20]中微型钢管桩单桩失稳承载力的计算方法,失稳荷载 P_{cr} 和最小临界长度 l 的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} P_{cr} &= 2(K_0 b_0 EI)^{1/2} = 3\,287 \text{ kN} \\ l &= \pi(4EI / K_0 b_0)^{1/4} = 1.51 \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

本案例设计单桩竖向承载力为1 200、1 100

kN,远小于计算得失稳承载力3 287 kN,故单桩竖向承载力符合要求。桩最小临界长度远小于实际桩长,说明在1.51 m以下,桩的横向位移和转角均趋近于0,而且桩长大于1.51 m时,增加桩长不会降低桩体的失稳承载力。

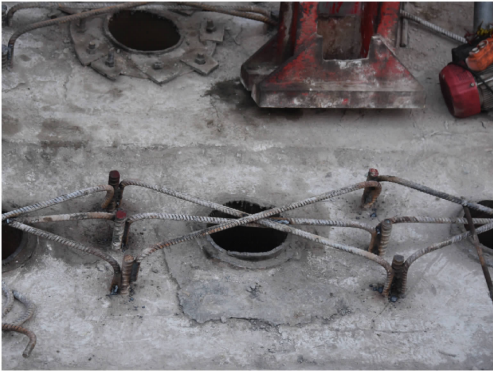
3.4 微型钢管桩施工

通过微型钢管桩在场地内的试桩,确定了施工控制参数与工艺。根据基础底板轴线,用钢卷尺量出压桩孔及锚杆位置,并用红油漆标记。在筏板的设计孔位处开凿压桩孔,压桩孔宜为圆形,孔径为300 mm,将孔壁凿毛,清理干净,并将原筏板钢筋割断后弯起。然后开凿锚杆孔,确保锚杆孔内清洁干燥后再埋设锚杆,并以黏结剂加以封固。采用M27锚杆,锚杆螺栓的锚固深度取12倍螺栓直径^[21],且不应小于300 mm,锚杆露出底板顶面长度应满足压桩机具要求,并小于120 mm。锚杆螺体在锚杆孔内的黏结剂可采用环氧砂浆或硫磺胶泥。每节桩身钢管采用外包钢管焊接,首节桩连接圆锥形实心桩头,反力装置按单桩承载能力进行制作。压桩时压桩架应保持竖直,锚固螺栓的螺帽应均衡紧固,压

桩过程中应随时拧紧松动的螺帽。就位的桩节应保持竖直,使千斤顶、桩节及压桩孔轴线重合,不得偏心加压。桩位平面偏差不得超过 $\pm 20\text{ mm}$,桩节垂直度偏差不得大于 1% 的桩节长。压桩施工不得中途停顿,需一次到位。根据场内试桩情况,在桩端达到设计压桩力 $2\,400\text{ kN}$ 或设计深度后,即可使千斤顶卸载,拆除压桩反力装置,清除压桩孔内杂物、积水及浮浆,然后于孔内植筋,将所植钢筋与底板割断后弯起钢筋进行焊接,并灌筑C40混凝土封孔。按照上述施工方法,先进行Ⅰ区托换,再进行Ⅱ区施工,最后施工Ⅲ区微型钢管桩。微型钢管桩现场施工如图7所示。



(a) 压桩



(b) 封桩

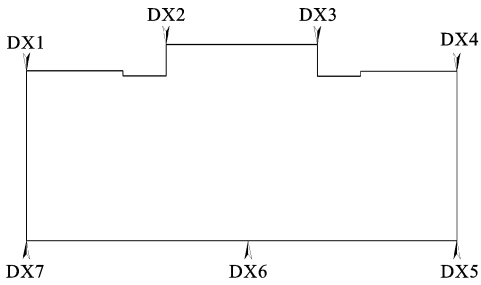
图7 微型钢管桩现场施工

Fig.7 Site construction of micro-steel pipe pile

4 加固效果

为了准确掌握建筑物实时沉降情况,在建筑物周围设置了7个沉降监测点,具体监测点布置如图8所示。沉降监测总共历时4个月,得到33组有效监测数据。监测前期沉降相对较大,3 d记录一次读数,后期施工完毕,沉降量显著减小,适当加长统计间隔,10 d左右记录一次。通过监测数据来反映建筑物沉降趋势,进一步验证托换方案的加固效果。

由监测数据可知,测点DX1、DX2和DX7处产



基础沉降测点

图8 不均匀沉降测点布置

Fig.8 Layout of uneven settlement measuring point

生的不均匀沉降相对较大,结合图2的工程地质剖面图可知,测点DX1和DX7处人工填土厚度最大,故选择测点DX1、DX2和DX7处的沉降进行分析。图9为测点DX1、DX2和DX7处的各期沉降量。从图9可以看出,建筑物在2020年10月6日第9次检测前,各期沉降变化幅值较大,特别是测点DX1和测点DX7处,最大沉降达到 -2.7 mm 。在施工期间,施工器械扰动以及筏板开孔降低了基础整体稳定性,导致建筑物不均匀沉降略有增加,第18次监测沉降量达到 -3.7 mm ,说明开凿桩孔对筏板基础整体稳定性有较大影响,而且开凿微型钢管桩孔位对筏板基础扰动也有一定程度影响。微型钢管桩施工结束后,不均匀沉降幅值显著减小。图10为测点DX1、DX2和DX7处日均沉降量变化趋势。从图10可以看出,施工微型钢管桩期间,测点DX1、DX2和DX7处日均沉降量都有所增大,测点DX7在第18次观测时,日均沉降达 -1.23 mm 。在微型钢管桩施工完毕后,日均沉降量稳定在 $-0.2\sim 0\text{ mm}$ 之间,在施工完大约15 d后,日均沉降量稳定在 $0\sim 0.05\text{ mm}$ 之间,基本符合规范要求的 $0\sim 0.04\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 日均沉降量^[10]。

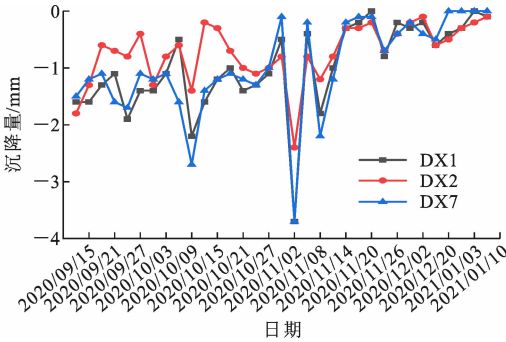


图9 部分测点各期沉降量

Fig.9 Settlement of some measuring points in each period

图11为测点DX1~DX7累计沉降量变化趋

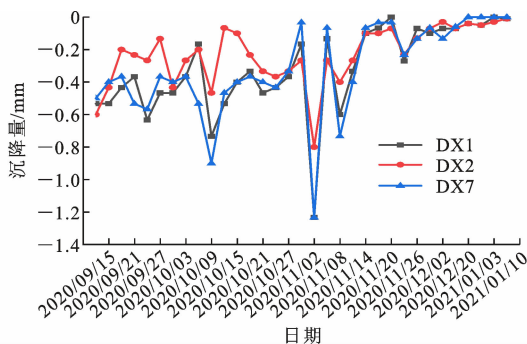


图 10 部分测点日均沉降量

Fig. 10 Average daily settlement of some measuring points

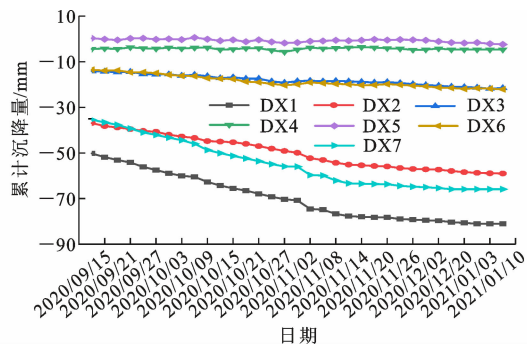


图 11 DX1~DX7 累计沉降量

Fig. 11 Cumulative settlement of DX1-DX7

势。由图 11 可知:测点 DX1 处累计沉降量最大,最大沉降达到 -81.1 mm ;其次是测点 DX2 和 DX7 处,累计沉降分别为 -59.0 mm 和 -65.9 mm ;测点 DX3 和测点 DX6 沉降较小,累计沉降分别为 -21.5 mm 和 -22.1 mm ;测点 DX4 和 DX5 处累计沉降微小,对建筑物影响基本可以忽略不计。产生上述沉降变化趋势的原因主要是人工填土区内土体产生固结沉降,导致载体桩承载力难以达到原设计要求,故而产生较大的不均匀沉降,影响建筑物安全使用。从图 11 还可以看出,在微型钢管桩全部施工完毕以后,测点 DX1、DX2 和 DX7 处沉降的变化速率显著减小,在 2020 年 11 月 2 日以后,3 点处累计沉降位移变化曲线明显减缓,最后曲线斜率趋近于 0,说明微型钢管桩托换加固法适用于该建筑物的地基加固。监测数据充分说明了本次加固所用施工时间短,加固机理明确,加固效果显著,是一次比较成功的微型钢管桩托换加固已有建筑的案例。

5 结 语

(1)通过加固方案探讨、承载力计算以及监测数据分析,确定微型钢管桩托换已有建筑物基础的方法是可行的,而且加固效果明显。

(2)由监测数据可知,测点 DX1、DX2 和 DX7 处累计沉降位移较大,测点 DX1 处最大累计沉降位移达 -81.1 mm ,测点 DX7 处最大日均沉降为 -1.23 mm 。

(3)在微型钢管桩施工结束大约 15 d 后,日均沉降位移逐渐趋于稳定,介于 $0\sim 0.05\text{ mm}$ 之间。

参考文献:

References:

- [1] 王新武. 钢管微型桩在楼房地基加固和纠偏中的综合应用[J]. 建筑科学, 2008, 24(11): 99-101, 104.
WANG Xinwu. The comprehensive application of micro-steel pipe pile in foundation reinforcement and inclination-rectifying[J]. Building Science, 2008, 24(11): 99-101, 104.
- [2] 张小兵, 陈广涛, 赵文强. 微型桩在青海李坎公路 K14 km 加固路肩挡墙基础中的应用[J]. 施工技术, 2009, 38(增 1): 220-222.
ZHANG Xiaobing, CHEN Guangtao, ZHAO Wenqiang. Application of micro-pile in basis of retaining wall reinforcement in K14 kilometers of Qinghai Li-Kan Road [J]. Construction Technology, 2009, 38(S1): 220-222.
- [3] 吴江斌, 王向军, 宋青君. 锚杆静压桩在低净空条件下既有建筑地基加固中的应用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增 2): 162-165.
WU Jiangbin, WANG Xiangjun, SONG Qingjun. Application of foundation reinforcement by anchor-jacked piles under low clearance [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 162-165.
- [4] 徐醒华, 付兆明, 伍锦湛. 锚杆静压桩在建筑物基础加固中的应用[J]. 建筑结构, 2004, 34(12): 22-23.
XU Xinghua, FU Zhaoming, WU Jinzhan. Application of anchor static pressure pile in building foundation reinforcement[J]. Building Structure, 2004, 34(12): 22-23.
- [5] 张 勇, 盛宏光, 赵红玲, 等. 应用钢管微型桩对倾斜楼房进行纠偏加固[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 3122-3126.
ZHANG Yong, SHENG Hongguang, ZHAO Hongling, et al. Rectification and reinforcement of a tilted building by using micro-steel-piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3122-3126.
- [6] 李清泉, 张小兵, 程晓伟. 钻孔取土和锚杆静压桩在湿陷性黄土地区建筑物纠倾加固中的应用[J]. 铁道建筑, 2013, 53(6): 118-121.
LI Qingquan, ZHANG Xiaobing, CHENG Xiaowei.

- Application of drilling soil and anchor static pressure pile in building inclination rectification and reinforcement in collapsible loess area[J]. *Railway Engineering*, 2013, 53(6): 118-121.
- [7] 朱彦鹏,王海明,杨奎斌,等.黄土填方地基中微型钢管桩承载性状试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(增1): 198-204.
- ZHU Yanpeng, WANG Haiming, YANG Kuibin, et al. Experimental study on bearing characteristics of micro steel tube piles in loess fill foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(S1): 198-204.
- [8] 江岳春.锚杆静压桩加固高层建筑中不均匀拖带沉降控制的探索与应用[J]. *建筑结构*, 2021, 51(8): 110-114.
- JIANG Yuechun. Exploration and application of uneven towing settlement control in high-rise buildings strengthened by anchor static pressure piles[J]. *Building Structure*, 2021, 51(8): 110-114.
- [9] CHENG X S, HONG J L, LI D. Simplified Timoshenko method for pile underpinning reinforcement of existing self-bearing brick masonry walls[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35: 102062.
- [10] 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Code for deformation measurement of building and structure: JGJ 8—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [11] 石鹏鑫, Q₃黄土竖向压缩-回弹特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- SHI Pengxin. Experimental study on the characteristics of vertical compression-resilience of Q₃ loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [12] 朱彦鹏,王秀丽.工程事故分析与处理[M].北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- ZHU Yanpeng, WANG Xiuli. Analysis and treatment of engineering accidents[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.
- [13] 胡伟,陈林庆,孙光俊,等.定位静压注浆在既有建筑物地基加固中的应用[J]. *施工技术*, 2000, 29(9): 34-44.
- HU Wei, CHEN Linqing, SUN Guangjun, et al. Application of locating static pressure grouting method in strengthening the soil retrofication of existing buildings[J]. *Construction Technology*, 2000, 29(9): 34-44.
- [14] 邓建红,李文彪.树根桩与静压注浆复合地基在某高速公路既有通道地基加固处理中的应用[J]. *工程勘察*, 2008, 36(12): 9-11, 20.
- DENG Jianhong, LI Wenbiao. Application of composite foundation in reinforcement treatment for a highway existing culvert[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2008, 36(12): 9-11, 20.
- [15] 姚智全,曹光栩,吴渤昕.微型钢管桩不同施工工艺在既有建筑物地基加固工程中的应用与比较[J]. *建筑科学*, 2021, 37(7): 94-99.
- YAO Zhiquan, CAO Guangxu, WU Boxin. Application and comparison of different construction technologies of mini steel pipe piles in foundation reinforcement engineering of existing buildings[J]. *Building Science*, 2021, 37(7): 94-99.
- [16] 王巍伟,易达.嵌岩钢管水泥浆组合桩在地基处理中的应用[J]. *施工技术*, 2015, 44(13): 43-46, 96.
- WANG Weiwei, YI Da. Application of rock-socketed steel pipe cement combination pile in foundation treatment[J]. *Construction Technology*, 2015, 44(13): 43-46, 96.
- [17] 龚晓南,陶燕丽.地基处理[M]. 2版.北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- GONG Xiaonan, TAO Yanli. Ground treatment[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [18] 载体桩技术标准: JGJ/T 135—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Technical standard for piles with ram-compacted bearing sphere: JGJ/T 135—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [19] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [20] 朱彦鹏,严紫豪,朱轶凡.微型钢管砂浆复合桩在土体中稳定性计算[J]. *岩土力学*, 2020, 41(4): 1339-1346.
- ZHU Yanpeng, YAN Zihao, ZHU Yifan. Stability calculation of micro steel tube mortar composite pile in soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1339-1346.
- [21] 锚杆静压桩技术规程: YBJ 227—91[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- Technical specification for anchor static pressure pile: YBJ 227—91[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991.