

# 湿陷性黄土地区某高层住宅建筑顶升纠偏加固方案的探索与应用

江岳春

(上海勘察设计研究院(集团)有限公司, 上海 200093)

**摘要:** 针对湿陷性黄土地区河南省某高层住宅建筑出现不均匀沉降并导致较大倾斜, 严重影响建筑物正常使用和结构安全, 结合勘察、设计、施工、监测资料及实地踏勘, 分析其倾斜原因主要是湿陷性黄土受地下空洞结合强降雨极端天气及管网的渗漏, 造成水土流失。基础加固采用锚杆静压钢管桩将原筏板基础复合地基调整为桩筏基础, 将建筑物荷载传至较好土层, 并穿透可能存在湿陷性的土层及地表下空洞沉降变形的影响范围, 避免受到基底土湿陷或土层流失等影响。设置反力顶升装置, 借助千斤顶利用先期施工的锚杆桩作为反力支点进行桩式顶升纠偏, 最后在基底通过注浆密闭脱空, 实现建筑物无损顶升加固纠偏。监测数据表明该建筑纠偏加固后倾斜在1%以内, 沉降趋缓已达到稳定状态, 纠偏加固效果明显。

**关键词:** 湿陷性黄土地区; 高层住宅建筑; 锚杆静压钢管桩; 顶升纠偏加固; 桩式顶升; 监测措施

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)01-0055-07

## Exploration and application of jacking rectification and reinforcement scheme for a high-rise residential building in collapsible loess area

JIANG Yue-chun

(SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

**Abstract:** A high-rise residential building in Henan Province in the collapsible loess area has experienced uneven settlement. Therefore, the building has a large inclination, which seriously affects the safe use and the structural stability. Combined with survey, design, construction, monitoring data and field survey, the paper analyzed the main reasons for its inclination. Underground cavities combined with extreme weather of heavy rainfall, and together with the leakage from the pipeline network, eventually lead to loess erosion. The method of foundation reinforcement is to adjust the original raft foundation composite foundation into a pile raft foundation using static pressure anchored piles. It transmits the loading of the building to the better soil layer, penetrates the possible collapsible soil layer and the influence area of subsidence deformation of subsurface voids. This method can prevent the building from being affected by subsoil collapse or soil erosion. Finally, the basement is sealed by grouting, so as to realize the nondestructive jacking reinforcement and rectification of the building. The monitoring data show that the inclination of the building is within 1% after rectification and reinforcement. The settlement has slowed down to a stable state, and the effect of correction and reinforcement is obvious.

**Key words:** collapsible loess area; high rise residential building; static pressure anchored pile; rectification and reinforcement; pile jacking; monitoring measures

## 0 引言

随着城市化的快速发展, 一方面城市老旧建筑日益增多, 另一方面由于技术或管理的原因很多建

筑出现倾斜等问题, 都亟待解决。

国外对既有建筑的纠偏加固技术起源于一些重要历史建筑的保护, 比较典型的是 20 世纪初墨西哥城天主教堂的纠偏加固, 此后相继研发了迫降纠偏、

顶升纠偏、堆载纠偏等技术,并在比萨斜塔和特朗斯康谷仓等重要历史建筑中得到成功应用。20世纪80年代欧美国家已经制定了建筑物纠偏技术规范 and 标准。与此同时国内专家也开始投身于建筑物纠偏技术的研究,在不断的创新与研究下,经过工程实践,纠偏技术也不断发展,纠偏方法也越来越多<sup>[1-10]</sup>。

对于湿陷性黄土<sup>[11-13]</sup>地区,建筑物大多建造于经过地基处理的复合地基之上。近年来由于季节性多雨等因素,区域内易出现建筑塌陷沉降等问题,导致建筑物产生不均匀沉降,以致倾斜。对于倾斜较大影响建筑物正常使用以及结构安全时,必须采取一定的纠偏加固措施<sup>[14-16]</sup>。

本文以湿陷性黄土地区河南省某高层住宅建筑顶升纠偏加固项目为实例,重点介绍顶升纠偏加固实施方案及实施效果。

## 1 工程概况

该工程于2018年建成交付使用,其中本次顶升纠偏加固的楼栋位于小区最北侧中间位置。

受特大暴雨等极端天气的影响,建筑物发生不均匀沉降和倾斜。随后发现建筑物北侧地面向上喷水,在喷水点开挖后发现消防水管在入楼部位爆裂,发生严重漏水。同时,建筑物沉降和倾斜情况加剧,北侧路面也发生显著沉降,见图1~2所示。

### 1.1 建筑概况

该建筑为一栋高层住宅,地上18层,地下1层,建筑高度54.45 m,室内外高差0.45 m,长约29 m,宽约16 m,平面布局为一梯三户,详见图3。总建筑面积约7 000 m<sup>2</sup>,周边无地下室,为独立独栋建筑。

### 1.2 结构概况

本建筑为剪力墙结构,安全等级为二级,地基基础和主体结构的设计使用年限为50年。抗震设防类别为丙类<sup>[17]</sup>,所在场地区域抗震设防烈度为7°(0.10 g),设计地震分组为第二组。工程所在场地区域的场地类别为II类,按《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2004)分类<sup>[18]</sup>,本建筑为乙类建筑。

本建筑采用灰土挤密桩复合地基(处理湿陷性)+CFG桩+筏板基础。筏板板厚950 mm,满布双向双层拉通筋并增设附加筋。筏板混凝土采用C35(P6抗渗等级)。

(1)灰土桩处理湿陷性:灰土挤密桩直径400 mm,等边三角形布桩,桩间距1.2 m,处理深度不大于4 m,基底由上至下设75 mm厚防水层、

100 mm厚C15垫层、300 mm厚3:7灰土褥垫层,总计桩数609根。灰土挤密桩桩身详图见图4,灰土挤密桩平面图见图5。

灰土桩是利用打入钢套管(或振动沉管)在地基中成孔,通过挤压作用使地基上得到加密,然后在孔内分层填入素土(或灰土、粉煤灰加石灰)后夯实而成灰土桩。



图1 整体向北倾斜示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the overall tilt to the north



图2 填土与主体脱空

Fig. 2 Void space between the filling layer and the main building

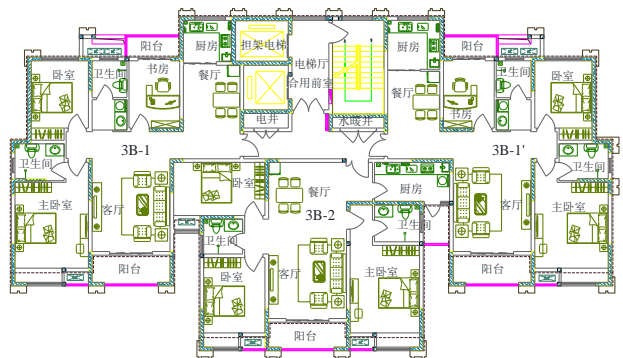


图3 标准层平面图

Fig. 3 Plan of standard floor

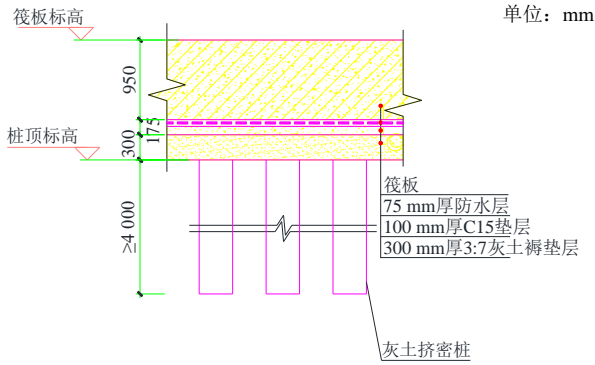


图 4 灰土挤密桩桩身详图  
Fig. 4 Detail of lime-soil compaction pile

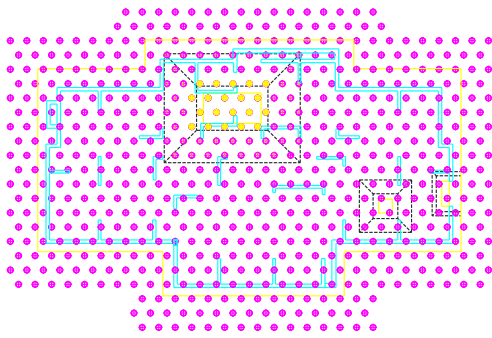


图 5 灰土挤密桩平面图  
Fig. 5 Layout of lime-soil compaction pile

(2) CFG 桩复合地基: 素混凝土桩桩身材料 C25 混凝土, 桩径 400 mm, 处理后地基承载力  $f_{ak}$  不小于 160 kPa, 有效桩长 10 m, 共计 389 根。桩身详图见图 6, 平面布置见图 7。

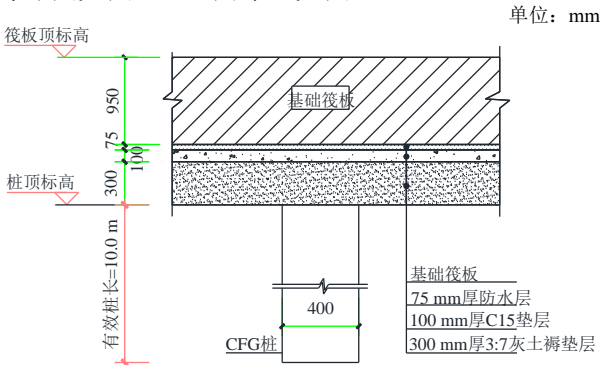


图 6 CFG 桩身详图  
Fig. 6 Details of CFG pile

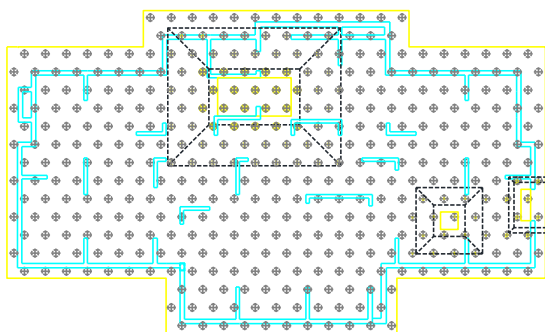


图 7 CFG 桩位平面图  
Fig. 7 Layout of CFG pile

CFG 桩是水泥粉煤灰碎石桩的简称。它是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑和砂加水拌和形成的高黏结强度桩, 和桩间土、褥垫层一起形成复合地基。

### 1.3 现状概况

根据 2022 年 3 月 10 日的监测数据, 建筑物整体向东北方向倾斜, 向北最大倾斜率 15.2‰, 建筑物高度 54.45 m, 即向北偏移顶部最大约 827 mm, 向东最大倾斜率 5.6‰, 即向东偏移顶部最大约 305 mm。其中以东北角下沉速率最快, 西南角下沉速率最小, 倾斜有进一步加大趋势。最大倾斜率远超出限值 3‰(根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 中<sup>[19]</sup> 的第 5.3.4 条及表 5.3.4, 对于高层建筑的整体倾斜, 当  $24\text{ m} < H_g \leq 60\text{ m}$ , 整体倾斜率限值为 3.0‰, 其中  $H_g$  为自室外地面起算的建筑物高度。2022 年 3 月 10 日建筑物倾斜情况见图 8。

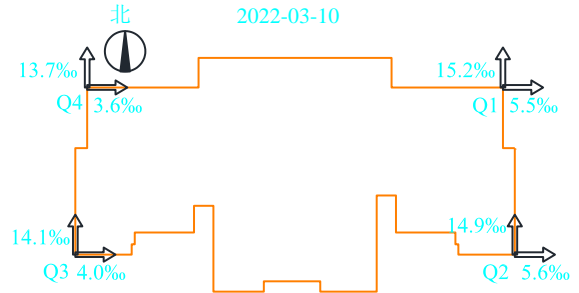


图 8 2022 年 3 月 10 日建筑物倾斜情况图  
Fig. 8 Tilt of the building on March 10, 2022

## 2 工程地质条件

小区基地所处建设场地原始地形西高东低, 最大高差 6.7 m, 局部有深沟。本次顶升纠偏建筑东侧存在一条深约 25.0 m 的冲沟。勘察期间场地内的冲沟已全部回填。地貌单元属黄土丘陵向黄河冲洪积平原过渡地段。勘察期间未发现其他影响工程安全的不良地质作用。

本场地属 I 级(轻微)非自重湿陷性场地, 地基土不液化。本场地属于对建筑抗震不利地段。勘探深度范围内未见地下水。场地地层分布特征见表 1。

另据建筑物倾斜发生后走访调查, 该建筑物北侧及东侧原为一 U 型冲沟, 冲沟深约 25.0 m。当地村民在冲沟两侧依地势建造窑洞<sup>[20]</sup>, 个别地方窑洞有两层。补充勘察中, 在该建筑物北侧探井施工过程中发现多个孔位处存在空洞情况。经取样人员在孔内查看, 推测为原窑洞, 深度约为地面下 6~9 m。

表1 场地地层分布特征表

Table 1 Stratigraphic distribution in the site

编号	名称	层底埋深/m	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ /MPa	特征值 $f_{ak}$ /kPa	静力触探 $P_s$ /MPa
①	粉土	1.2~4.0	8.8	140	3.7
②	粉土	5.8~9.2	7.9	130	2.7
③	粉土夹粉质黏土	7.7~11.2	8.1	130	2.5
④	粉土	13.0~18.2	11.4	160	4.6
⑤	粉土夹粉质黏土	18.2~23.1	9.9	150	3.2
⑥	粉土	20.0~28.1	13.7	190	5.0
⑦	粉质黏土	26.4~30.5	8.1	200	3.6
⑧	粉质黏土	39.4~43.5	9.3	230	4.1
⑨	粉质黏土	未揭穿	10.7	260	—

### 3 倾斜原因分析

根据建设单位提供的设计、施工资料、沉降监测成果、勘察并结合现场踏勘成果,该建筑建成至今使用约两年,导致建筑物倾斜的主因是地基土出现不均匀沉降,现对本工程产生沉降倾斜问题的原因简要分析如下:

(1) 根据原地勘报告显示,该场地属于 I 级(轻微)非自重湿陷性场地,湿陷性土层为第①层粉土、第②层粉土和第③层粉土夹粉质黏土,为消除黄土地区地基湿陷性影响及满足地基承载力使用要求,地基采用复合桩型,先施工灰土桩以消除基底土的湿陷性,处理深度为基底下 4.0 m,根据高程推算剩余湿陷性土层厚度约 3.8~5.2 m,可能会产生轻微湿陷。

(2) 本工程所处原始场地存在冲沟,但主要位于该建筑物东侧楼栋位置,深约 25.0 m,施工前已对其进行回填处理,结合东侧楼栋沉降观测数据,冲沟回填区域未表现出明显沉降变形现象。但考虑到本工程处于湿陷性黄土地带,又有较厚的建筑回填土层,结合近期内的强降雨极端天气和北侧管网的渗漏水现象,使得建筑物地基长时间受到地表降水和漏水的浸泡影响,可能导致建筑物基底土受水浸润产生湿陷,从而产生一定的附加下沉。

(3) 根据补勘调查结果,本工程所在场地北侧地面下仍存在三处大小不一的空洞,结合强降雨极端天气及北侧管网的渗漏水现象,初步判定建筑物场地北侧地层由于受到浸水影响,可能导致空洞局部塌陷并产生水土流失等不利现象,影响范围约在地表下 5~10 m 处,空洞范围距建筑物北侧外墙约 2.5~5 m,极易导致基底土产生流失变形现象,初步判断该因素是导致建筑物产生较大差异沉降的主因。

### 4 加固方案

#### 4.1 建筑物特点

根据本项目勘察、设计、施工及监测资料并结合现场踏勘,本项目具有如下特点:

(1) 本工程场地位于非自重湿陷性黄土区域,浅层填土及部分基底下土仍可能存在一定的湿陷性,且北侧地面下窑洞沉陷尚未解决,后续仍可能对建筑物下方的基底土产生影响。

(2) 本工程为 18 层剪力墙结构,自重大,原设计采用 CFG 桩复合地基进行处理,现地基整体发生明显沉降,基础加固需考虑永久托换,先加固、后顶升纠偏。

(3) 目前建筑物倾斜明显,均已严重超过规范允许值 3.0‰,基础的沉降量明显,且日均沉降未有稳定的趋势 (>1.0 mm/d),需进行每日监测,通过监测数据分析,及时采取主动纠偏处理措施,以恢复建筑物的正常使用功能。

(4) 本工程为地下 1 层,净高约为 2.9 m,且内部有较多管线及设备,施工空间狭小,布桩位置受限,需要选择合理的压桩设备。

(5) 本工程基底土易受扰动,基础加固纠偏方案应充分考虑相应的施工措施,在进行压桩时应重视施工过程中的拖带沉降控制。


(6) 基底满堂布置灰土桩、CFG 桩,桩基托换的沉桩难度较大,应对原有复合桩基进行合理避让,必要时需采取引孔促沉措施。

(7) 本工程高宽比为 3.3,东西与南北两个方向向近似为 1.8:1,相差不大,且两个方向均有明显倾斜,加固纠偏方案应充分考虑两个方向在顶升过程中可能产生的扭转耦合作用,避免施工过程中发生某一方向纠偏过量或不足等现象。

### 4.2 顶升纠偏加固方案分析

基础纠偏加固拟将原筏板基础复合地基调整为桩筏基础,将建筑物正常使用工况下的荷载通过桩基传至较好土层上,穿透可能存在湿陷性的土层及地表下空洞沉陷变形的影响范围,避免受到基底土湿陷或土层流失等影响。并根据结构荷载分布合理布桩,结合建筑物倾斜规律,在沉降较大处增加补桩密度,设置反力顶升装置<sup>[1]</sup>,利用钢管桩反力实现建筑物的顶升纠偏,最后在基底通过注浆密闭脱空,确保建筑物的桩筏基础在纠偏加固后可满足正常安全使用要求,实现建筑物无损顶升加固纠偏。

#### (1) 加固方案

加固钢管桩采用  $\Phi 426 \times 14$ ,设计桩长 38 m,以第③层粉质黏土层为桩基持力层,进入持力层深度约 9 m,单桩承载力特征值 2 000 kN,兼作顶升反力系统及后期永久工程桩,计算承载力特征值及极限值同时满足施工及永久使用阶段的安全性要求。详见补桩平面布置图(图 9),合计桩数 98 根,见图中“”所示。

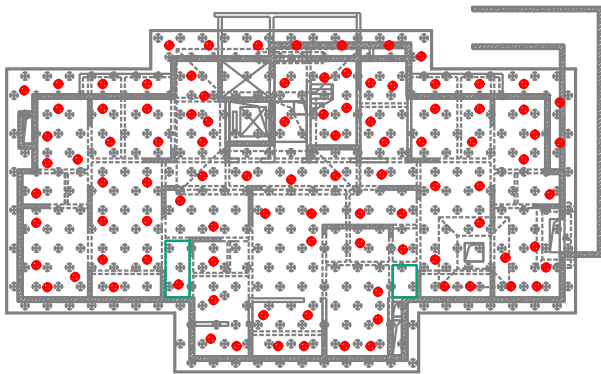


图 9 补桩平面布置图

Fig. 9 Layout plan of supplementary pile

#### (2) 顶升纠偏方案

利用加固钢管桩作为顶升反力来实施建筑物纠偏。顶升托换装置传力路径为建筑物上部结构→筏板底板→竖向锚杆→顶升反力系统→顶升千斤顶→锚杆静压钢管桩。顶升装置安装示意图 10。

根据建筑物平面尺寸及现有沉降倾斜量,对建筑物拟采取顶升纠偏值如下:

建筑平面尺寸 29.4 m×16.3 m(东西×南北),根据顶升施工前,即 2022 年 5 月 7 日的监测报告,现有倾斜率东西方向为 3.8‰~6.2‰,南北方向为 15.4‰~17.1‰。

考虑建筑物两个方向刚度相差不大,顶升时可能存在扭转耦合作用,对建筑物采取过量纠偏的方式,两个方向的设计纠偏倾斜率计算控制值均按

1‰确定。

以基础筏板西南角点为假定零点,纠偏方向为由北向南、由东向西。以 4 个角点平均倾斜率作为纠偏参考倾斜,经计算,筏板东北角最大顶点位置处顶升量为 348 mm(其中东西向 147 mm,南北向 201 mm)。顶升量网格划分见图 11,顶升量空间示意图 12。

单位: mm

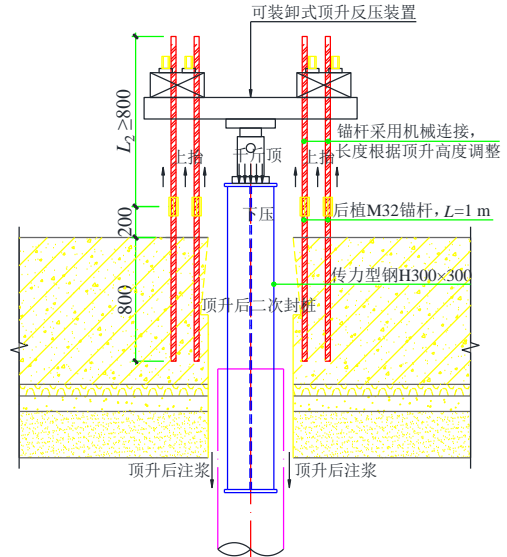


图 10 顶升反力装置安装示意图

Fig. 10 Installation diagram of jacking reaction device

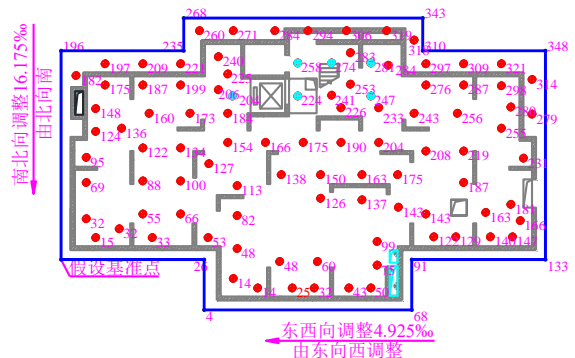


图 11 顶升量网格划分图

Fig. 11 Grid division of jacking quantity

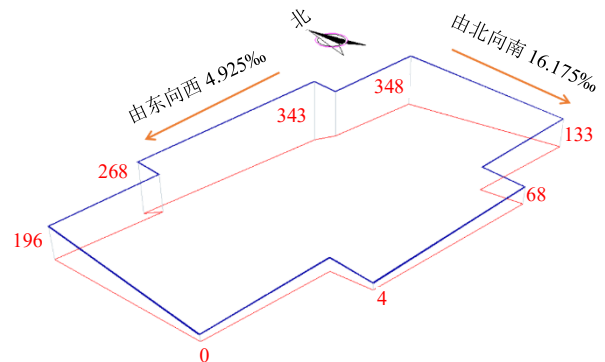


图 12 顶升量空间示意图

Fig. 12 Spatial diagram of jacking volume

## 5 监测措施

### 5.1 监测设备

(1) 在建筑外墙 4 个角部设置了 4 个沉降监测点, 在建筑靠近楼顶位置 4 个角部设置 4 个倾斜监测点, 自 2021 年 12 月 8 日以来按 1 天 1 测的频率进行人工监测。

(2) 在建筑物地下室外墙内布置静力水准仪, 实行自动化 24 h 实时监测, 施工期间一般按 30 min 采集 1 次数据, 顶升施工期间按 5 min 采集 1 次数据, 并通过云技术, 可实现在手机及电脑客户端查阅监测数据。

### 5.2 数据分析

该项目从 2022 年 3 月 1 日开始施工, 至 2022 年 6 月 15 日顶升纠偏加固施工结束。其中 2022 年 5 月 22 日—27 日进行顶升纠偏施工。2022 年 6 月 22 日建筑物倾斜情况详见图 13。各方向倾斜均小于 1.0‰, 小于规范限值 3.0‰。

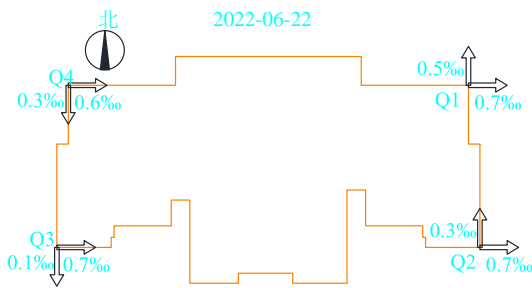


图 13 2022 年 6 月 22 日建筑物倾斜情况图

Fig. 13 Tilt of the building on June 22, 2022

建筑物沉降布点如图 14, 沉降发展趋势如图 15。

由图 15 可看出, 从 2021 年 12 月 8 日开始监测, 2022 年 3 月 1 日开始补桩施工, 沉降速率有所加快, 至顶升期间明显上抬, CJ1 点最大上抬 300 mm, 顶升结束后沉降趋势趋于平缓, 监测数据与施工工况一致, 经过一段时间休止, 最近 100 d 沉降发展曲线平缓, 基本无新增沉降, 达到沉降稳定状态, 顶升纠偏加固效果明显。

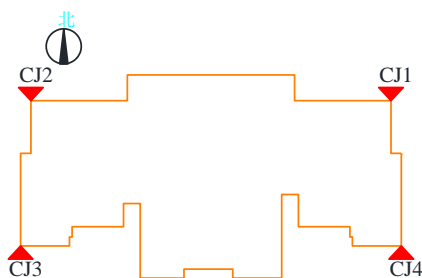


图 14 建筑物沉降布点图

Fig. 14 Layout of settlement monitoring points

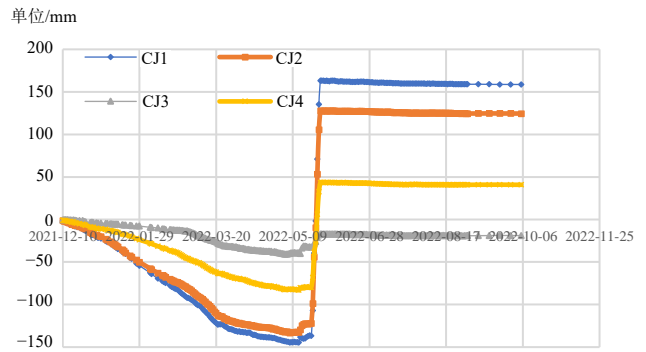


图 15 沉降发展趋势图

(2021 年 12 月 8 日—2022 年 10 月 5 日)

Fig 15 Development of settlement

(December 8, 2021 to October 5, 2022)

最近 100 d 左右的沉降速率小于 0.04 mm/d, 符合规范《建筑变形测量规范》(JGJ 8—2016) 中<sup>[22]</sup>的第 7.1.5 条第 4 款的规定: 当最后 100 d 的最大沉降速率小于 0.01~0.04 mm/d 时, 可认为已达到稳定状态。

## 6 结论

桩式顶升是先在沉降较大侧进行锚杆静压钢管桩跳压施工, 完成压桩后采用千斤顶作为稳压系统维持压力暂不封桩, 抑制沉降较大侧沉降的进一步发展。而后在沉降较小侧跳压锚杆静压钢管桩, 并施加预应力随压随封。完成压桩后, 在建筑物沉降较大侧借助千斤顶利用先期施工的锚杆桩作为反力支点进行桩式顶升施工。顶升完成后, 顶升区域锚杆桩再进行封桩处理, 同步进行板底注浆, 待节点处理达到指定强度后, 分批撤除千斤顶。从而实现整体顶升纠偏的目的。

相较于传统顶升纠偏, 该方法不需要截断竖向结构构件, 对原建筑破坏小, 原结构的整体性不受影响, 同时用作顶升的锚杆静压钢管桩顶升后可作为基础加固的桩基, 控制后期沉降。

该方法主要适用于建造于天然地基或经过地基处理后的非桩基建筑物, 上部结构和基础形式基本不受影响, 适用性广泛。

对于高层建筑物, 顶升纠偏难度大, 风险高, 本项目结合湿陷性黄土地区复合地基的基础形式, 采用桩式顶升的方法, 成功实现了顶升纠偏加固。相较于传统截断墙柱等竖向构件的顶升方法, 更加安全可靠。

对于湿陷性黄土地区, 近年来由于季节性多雨等因素及其它地区出现的建筑物不均匀沉降和倾

斜问题,该项目的顺利实施对后续类似项目的处理都有着重要的参考意义。

## 参考文献

- [1] 刘祖德,叶勇.比萨斜塔的最新动向及纠偏方案探讨[J].土工基础,2000,14(1):53-56.  
LIU Zu-de, YE Yong. Discussion on the latest trend of leaning tower of Pisa and rectification scheme[J]. Geotechnical Foundation, 2000, 14(1): 53-56.
- [2] 刘祖德.纠偏防倾工程十五年[J].土工基础,2006,20(6):83-87.  
LIU Zu-de. Fifteen years of rectification and anti-tilt project[J]. Geotechnical Foundation, 2006, 20(6): 83-87.
- [3] 陈锋,刘祖德.建筑物纠偏地基应力解除法的有限元分析[J].土工基础,2000,14(3):4-7.  
CHEN Feng, LIU Zu-de. Finite element analysis of stress relief method for building foundation[J]. Geotechnical Foundation, 2000, 14(3): 4-7.
- [4] 刘毓策,刘祖德.输电线路倾斜铁塔原位加固纠偏关键技术研究[J].岩土力学,2008,29(1):173-176.  
LIU Yu-ci, LIU Zu-de. Research on the key technology of in-situ reinforcement and rectification of inclined tower of transmission line[J]. Geotechnical Mechanics, 2008, 29(1): 173-176.
- [5] 唐业清.100 m高烟囱的纠倾扶正[J].施工技术,1995,24(8):24-26.  
TANG Ye-qing. Rectification and righting of 100 m chimney[J]. Construction Technology, 1995, 24(8): 24-26.
- [6] 徐学燕,唐业清,徐国光,等.高层建筑纠倾与加固[J].土木工程学报,1999,32(4):69-74.  
XU Xue-yan, TANG Ye-qing, XU Guo-guang, et al. Tilting and strengthening of high-rise buildings[J]. Journal of Civil Engineering, 1999, 32(4): 69-74.
- [7] 朱彦鹏,王秀丽,周勇.湿陷性黄土地区倾斜建筑物的膨胀法纠偏加固理论分析与实践[J].岩石力学与工程学报,2005,24(15):2786-2794.  
ZHU Yan-peng, WANG Xiu-li, ZHOU Yong. Theoretical analysis and practice of rectification and reinforcement of inclined buildings in collapsible loess area by expansion method[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2786-2794.
- [8] 王林枫,冉群,刘波,等.锚杆静压桩加固既有建筑物地基及纠偏设计与施工[J].施工技术,2005,34(8):20-23.  
WANG Lin-feng, RAN Qun, LIU Bo, et al. Design and construction of foundation reinforcement and rectification of existing buildings by anchor static pressure pile[J]. Construction Technology, 2005, 34(8): 20-23.
- [9] 王建平,李品先,陈凯.疏桩加固与浸水迫降法在建筑物纠偏中的应用[J].煤田地质与勘探,2012,40(5):60-62.  
WANG Jian-ping, LI Pin-xian, CHEN Kai. Sparse piles and soaking landing method for rectifying a tilted building[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(5): 60-62.
- [10] 朱方敏,茜平一,解家毕,等.深层掏土纠偏法在桩基上多层建筑中的应用研究[J].岩土力学,2006,27(9):1617-1621.  
ZHU Fang-min, QIAN Ping-yi, XIE Jia-bi, et al. Research on the application of deep excavation correction method in multi-storey building on pile foundation[J]. Geotechnical Mechanics, 2006, 27(9): 1617-1621.
- [11] 雷祥义.中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J].中国科学:B辑,1987,17(12):1309-1316.  
LEI Xiang-yi. Pore type and collapsibility of loess in China[J]. Science in China: Series B, 1987, 17(12): 1309-1316.
- [12] 高国瑞.黄土湿陷变形的结构理论[J].岩土工程学报,1990,12(4):1-10.  
GAO Guo-rui. Structural theory of collapsible deformation of loess[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1-10.
- [13] 赵景波,岳应利,陈云.黄土湿陷性及其成因[J].地质力学学报,1997,3(4):62-68.  
ZHAO Jing-bo, YUE Ying-li, CHEN Yun. Collapsibility of loess and its causes[J]. Journal of Geomechanics, 1997, 3(4): 62-68.
- [14] 冯寿青.既有建筑物整体顶升纠偏法的应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.  
FENG Shou-qing. Research on the application of integral jacking rectification method for existing buildings[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [15] 张力,卫龙武,邓学支.锚杆静压桩在建筑物纠偏与加固中的应用[J].施工技术,2005,34(9):71-73.  
ZHANG Li, WEI Long-wu, DENG Xue-zhi. Application of anchor arm static pressure piles in deviation correction and strengthening of buildings[J]. Construction Technology, 2005, 34(9): 71-73.
- [16] 魏焕卫,孙剑平,贾留东,等.采用顶升法和微型桩的纠偏加固设计施工[J].建筑技术,2006,37(6):455-457.  
WEI Huan-wei, SUN Jian-ping, JIA Liu-dong, et al. Design and construction of leaning rectification and reinforcement of building by jack lifting and root pile[J]. Architectural Technology, 2006, 37(6): 455-457.