

文章编号:1673-2049(2018)03-0087-08

# 桩基础高层建筑纠倾加固方法及工程实践

朱彦鹏<sup>1,2</sup>,王海明<sup>1,2</sup>,杨奎斌<sup>1,2</sup>,杨校辉<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 甘肃土木工程防灾减灾重点实验室,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:**针对高度为 99.9 m 的桩基础高层建筑不均匀沉降事故工程,为减小其地基压缩量及更好地增强建筑基础的整体刚度,从而制止沉降和抵抗不均匀沉降,结合该高层建筑结构特点以及地质条件,基于“加强基础刚度,止沉调平”的基本思路提出了“增补筏板+外部筏板外扩+锚杆静压桩”的纠倾加固方法,通过检测数据分析对该方法进行了验证。结果表明:以“增补筏板+外部筏板拓宽+锚杆静压桩”技术为主的综合纠倾加固方案是可行的;对于过量沉降以及产生较大不均匀沉降的桩基础高层建筑,采用“增补筏板+外部筏板外扩+锚杆静压桩”的综合纠倾加固方案将原桩基础转化为桩筏复合地基,有效提高了建筑物的整体性和地基基础承载力,同时利用锚杆静压桩布置数量、施工的先后顺序、施工时间差异对基础承载力进行调整,可以为大楼自然回倾创造条件,达到既制止其沉降与倾斜又适当纠倾的目的;外部筏板拓宽既能在纠倾过程中减缓沉降趋势,也能在建筑物使用过程起到防止复倾的作用。

**关键词:**桩基础;高层建筑;纠倾加固;增补筏板;锚杆静压桩

**中图分类号:**TU43 **文献标志码:**A

## Rectifying and Strengthening Method for Pile Foundation of High-rise Building and Engineering Practice

ZHU Yan-peng<sup>1,2</sup>, WANG Hai-ming<sup>1,2</sup>, YANG Kui-bin<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-hui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, 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:** Aiming at a differential settlement accident engineering of certain 99.9-meter high-rise buildings with pile foundation, in order to not only reduce the foundation's compression and preferably intensify the whole rigidity of building foundation, but also stop settlement and resist uneven settlement, combining with the characteristics of the high-rise building structure and geological conditions, the method of “supplement raft + broaden the external raft + the static bolt pile” was proposed based on the thinking of intensifying the foundation's rigidity and stopping settlement and regulate balance. The method was verified by test data analysis. The results show that it is feasible to scheme of comprehensive inclination rectification and reinforcement with the technology of “supplement raft + broaden the external raft + the static bolt pile”. For excessive settlement and large uneven settlement of high-rise buildings, with the

收稿日期:2017-09-20

基金项目:甘肃省科技重大专项计划项目(1302FKDA030)

作者简介:朱彦鹏(1960-),男,甘肃庆阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhuypl@163.com。

technology of “supplement raft + broaden the external raft + the static bolt pile”, the pile foundation will change into raft pile composite foundation, which can improve the intensity and the bearing capacity of foundation. The static bolt pile’s locations, quantity and construction order can be used to create the conditions of building return back and to attain the aims of stopping settlement and tilt and rectifying properly. The raft expansion can not only reduce the settlement trend in the process of rectifying inclination, but also play the role of preventing tilting in the building use process.

**Key words:** pile foundation; high-rise building; rectifying and reinforcement; supplement raft; static bolt pile

## 0 引言

随着时代的发展,各大城市的高层建筑如雨后春笋般不断增加,但是在工程建设中常常遇到建(构)筑物地基基础过量沉降或不均匀沉降以及桩基承载力不足等问题,导致建筑结构上部损坏,整体倾斜,丧失使用功能,造成了很多不应有的损失,必须采取有效的加固措施进行挽回。

目前国内外在处理建(构)筑物沉降和基础纠倾加固方面已经积累了大量的理论和实践经验<sup>[1-8]</sup>,以较小的工程费用支出挽救大量倾斜建筑物,避免了较大的经济损失。然而对于上部荷载较大、基础类型为桩基础的高层建筑,纠倾加固技术研究非常匮乏,大多依赖于比较传统的方法。朱方敏等<sup>[9]</sup>以某栋房屋的倾斜和纠偏为例,采用多高层建筑上部结构-桩基础-地基共同作用分析方法,对掏土纠偏法在桩基础纠偏中的适用性进行了深入研究。杨建华等<sup>[10]</sup>以某高边坡桩柱式挡土墙为背景,介绍采用强夯置换法进行桩基纠偏的处理方案、参数估算方法及施工质量控制等要点。李世宏等<sup>[11]</sup>结合某预应力混凝土管桩基础的高层建筑纠偏工程,介绍了以截桩法为主、桩端高压射水法为辅的迫降纠偏方法,取得了较好效果,但是在纠倾加固过程中如何防止建筑物矫枉过正,减少多沉侧的拖带沉降,确保建筑物纠倾扶正后地基基础承载力提高和变形长期稳定,做到风险可控,一直是困扰纠倾工程界的难题,特别是对高层、超高层建筑物的纠倾加固而言更为突出<sup>[12]</sup>。

对于桩基础高层建筑,若采用顶升法将面临自重大的问题,已施工完成的桩基作为顶升系统反力支点时,会加速下沉导致二次沉降危害等,而且技术难度大,纠倾费用高,对建筑影响大;现有迫降法虽然风险小,适合软土地基建筑物基础的纠倾,但是当高层建筑自重大且采用桩-承台合作基础时,纠倾难度

很大,如桩端高压射水法迫降将导致原桩端部或地基土承载力降低,使高层建筑结构加剧沉降,纠倾速度慢,对原桩影响大<sup>[13]</sup>。因此,需要采用一种施工方便、工期短、安全可靠、经济可行的纠倾加固方法。基于此,本文提出一种新的高层建筑桩基础纠倾加固方法并以成功实施的昆明一高层住宅楼纠倾加固工程为例,对荷载较大、地质条件复杂、结构复杂的桩基础高层建筑物止倾、纠倾及加固技术进行针对性的研究,其结论对类似工程具有较好的借鉴意义。

## 1 纠倾加固方法

### 1.1 纠倾加固原理

对于高层建筑桩基础由于施工问题而导致承载力不足,沉降不稳定而存在不均匀沉降的问题,本文提出一种新的高层建筑桩基础纠倾加固方法,其原理是把基础、地基和上部结构作为一个整体对原有桩基进行加固的同时依靠建筑自重对其进行纠倾,即采用“增补筏板+外部筏板拓宽+锚杆静压桩”的综合纠倾加固方案将桩基础转化为桩筏复合地基,利用锚杆静压桩布置位置、数量及施工时间差异对基础承载力进行调整,来造成大楼自然回倾的条件,以达到既加固制止其沉降与倾斜又可适当纠倾的目的。

在纠倾加固施工前,首先根据建(构)筑物沉降倾斜实际情况,确定旋转轴,按式(1)、(2)计算建(构)筑物最终水平变位设计控制值(图1)。

$$S_H = \frac{\Delta S' H_g}{b'} \quad (1)$$

$$\Delta S' = \Delta S - a \quad (2)$$

式中: $\Delta S$ 为建(构)筑物设计沉降量; $a$ 为预留沉降值; $\Delta S'$ 为建(构)筑物倾斜需要调整的沉降量; $b'$ 为倾斜建(构)筑物宽度在水平方向上的投影,当倾斜角 $\theta$ 小于 $5^\circ$ (即倾斜率小于 $9\%$ )时,方可取建(构)筑物宽度 $b$ ; $H_g$ 为自室外地面算起建(构)筑物高

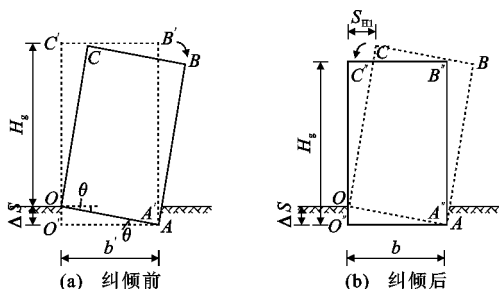


图 1 纠倾计算示意图

Fig. 1 Schematic of Rectifying Calculation

度; $S_H$  为建(构)筑物水平变位设计控制值, $S_H \approx S_{H1}$ , $S_{H1}$  为建(构)筑物水平倾斜量。

然后计算倾斜建(构)筑物基础形心位置和偏心距,其中偏心距按式(3)计算,即

$$M_p = (F_k + G_k)e \quad (3)$$

式中: $M_p$  为倾斜建(构)筑物基础底面偏心距; $F_k$  为相应于荷载效应组合值时,建(构)筑物上部结构传至基础顶面的竖向力; $G_k$  为基础自重和基础上的土重力; $e$  为倾斜建(构)筑物偏心距。

计算基础底面压应力,然后根据基底压应力图(图 2,其中  $p_{kmax}$  为相应于荷载效应组合值时,基础底面边缘最大压应力, $p_{kmin}$  为相应于荷载效应组合值时,基础底面边缘最小压应力),验算地基承载力,即

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{A} \quad (4)$$

$$p_{kmax} = \frac{F_k + G_k}{A} \pm \frac{M_p}{W} \quad (5)$$

式中: $p_k$  为相应于荷载效应标准组合值时,基础底面平均压应力; $A$  为基础底面面积; $W$  为基础底面抵抗弯矩。

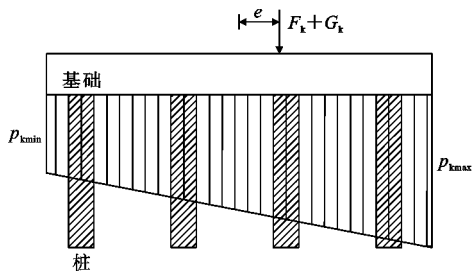


图 2 偏心荷载下基底压力计算示意图

Fig. 2 Schematic of Foundation Pressure Calculation with Eccentric Load

采用本文提出的方法进行纠倾加固,其主要纠倾加固步骤如下:①在建筑整个基础范围内增补筏板,分块施工,连成整体,以提高底板整体刚度,当增补筏板形成后,筏板一开始力受力很小,但随着沉降

持续和上部结构荷载增大,筏板后期受力会增大,通过筏板的设置,能强化软弱地基的承载力或阻止建筑物的不均匀沉降、倾斜,增加建筑物基础承载力;②当筏板施工完成后将楼体外部筏板全部拓宽,以增加底板受力面积,并预留静压桩孔位;③增补锚杆静压桩,计算加固后建(构)筑物正常使用的总荷载标准值,包括新增筏板荷载、填土荷载,选定待施工静压桩的单桩承载力特征值,求出补桩根数,结合高层建筑建筑物沉降倾斜现状和发展趋势,确定补桩顺序;④当新增内部筏板和外拓筏板强度达到 80% 时,对沉降较大侧采用静压桩并与筏板可靠锚固连接,调整承载力,使得新增外拓筏板与原有基桩(包括增补静压桩)形成桩筏复合地基,建筑原沉降较大侧经静压桩加固,基础承载力得到调整,沉降速率逐渐变小,趋于稳定,原沉降较小侧在建筑自重作用下继续保持沉降,不断调整差异沉降,在沉降过程中新增内部筏板和外拓筏板对土体的压缩使得地基土承载力提高,原基桩承载力也逐渐提高,沉降较小侧沉降速率逐渐减小,实现加固的目的;⑤待高层建筑回位达到规范要求,立即将沉降较小侧(包括周边未沉降部分)静压桩与外拓筏板可靠连接,使得整个基础协调同步沉降,最终达到稳定,实现纠倾的目的。

### 1.2 纠倾加固过程中的动态监测

动态监测是纠倾工作的核心,纠倾工程是在动态中完成的,技术性强,风险性大,因此必须以动态监测资料来指导纠倾施工方能达到满意的效果。在对建(构)筑物纠倾施工过程进行动态观测时,要建立相应的沉降速率和局部倾斜预警控制标准,对监测结果及时反馈,发现异常情况及时通知施工方和设计人员,以便及时采取对策,若补强过程中发现异常,应立即停止施工并采取相应措施,待楼体稳定后方可继续施工,确保建(构)筑物均匀、缓慢、安全地回倾。

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

工程实例为昆明市某小区 17 号楼,其采用一柱一承台+剪力墙结构,总共 57 根基桩,均采用人工挖孔灌注桩,桩径  $d=1\,000\sim2\,000\text{ mm}$ ,桩端扩孔直径  $D=d+600\text{ mm}$ ,按设计要求桩长为  $16.0\sim17.0\text{ m}$ ,且要求桩端进入中风化灰岩不小于 1 倍扩孔直径  $D$ (桩位平面布置如图 3 所示),地上部分建筑物高度为  $99.9\text{ m}$ ,总建筑面积为  $12\,252.16\text{ m}^2$ ,总户数为 96 户。

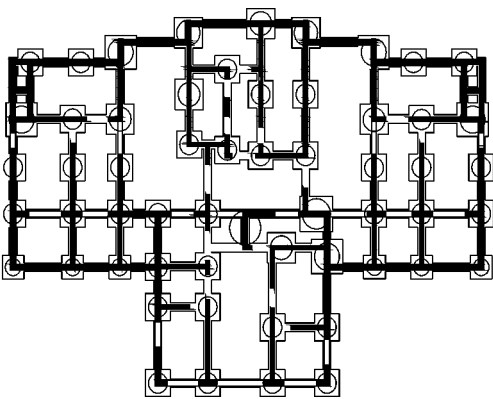


图3 桩位平面布置

Fig. 3 Layout of Pile Locations

建筑场地位于昆明湖积盆地南部近山麓地带,属湖积平原地貌。根据详勘资料及后期补勘资料,该建筑场地地层自上而下主要由素填土、次生红黏土、红黏土及中风化灰岩组成,场地的土层及特征见表1,室内试验测得地基土体物理力学指标见表2。

表1 建筑场地土层分布与特征

Tab. 1 Soil Layer Distributions and Properties of Building Site

土层名称	土层特征	土层厚度/m
素填土① <sub>2</sub>	褐红、褐黄色,由黏性土组成,结构松散,含植物根茎,稍湿	0.0~0.5
次生红黏土② <sub>1</sub>	褐黄、褐红色,可塑—硬塑,中压缩性为主,稍有光泽,干强度及韧性中等,饱和	13.1~17.0
红黏土③ <sub>1</sub>	褐红色,可塑—硬塑,中压缩性为主,稍有光泽,干强度及韧性中等,饱和	1.7~6.0
破碎中风化灰岩④ <sub>1</sub>	灰色、灰白,节理裂隙发育,岩石破碎,多呈碎块状,少量短柱状、柱状	3.1~8.2
中风化灰岩④ <sub>1</sub>	灰色,岩石较完整,多呈柱状。强风化岩,岩芯呈松散状或短柱状,遇水或暴露地表极易软化崩解或风化	3.3~7.7

表2 建筑场地土体物理力学指标

Tab. 2 Soil Physical and Mechanical Properties of Building Site

土层名称	含水率 $\omega/\%$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	承载力特征值 $f_{ak}/\text{kPa}$
① <sub>2</sub>	37.7	27.0	16.2	4.91	100
② <sub>1</sub>	39.5	25.3	13.3	5.33	160
③ <sub>1</sub>	42.5	20.3	9.4	5.55	150
④ <sub>1</sub>					2 000
④ <sub>1</sub>					6 000

2.2 沉降情况

17号楼于2013年1月底封顶(32层),中冶集团武汉勘察研究院有限公司(2013年6月29日到2014年1月15日)和云南省建筑工程质量监督检

验站(2012年12月到2014年3月)分别对建筑物进行沉降观测,17号楼沉降观测点与旋转轴见图4。2014年3月17号楼沉降速率以及累积沉降量如图5,6所示。观测数据显示该楼沉降观测点17-1<sup>#</sup>,17-5<sup>#</sup>,17-6<sup>#</sup>和17-7<sup>#</sup>累计沉降量较其他沉降观测点大,截至2014年3月30日17号楼的平均沉降量约为50 mm,17-2<sup>#</sup>,17-3<sup>#</sup>,17-4<sup>#</sup>,17-5<sup>#</sup>,17-6<sup>#</sup>,17-8<sup>#</sup>和17-9<sup>#</sup>沉降速率均大于0.04 mm·d<sup>-1</sup>,据规范<sup>[14]</sup>规定:“当最后100 d的最大沉降速率小于0.01~0.04 mm·d<sup>-1</sup>时,可认为已达到稳定状态”,因此判定这些观测点沉降未收敛,且沉降速率无明显降低趋势。这说明该楼沉降十分严峻,它虽然没有表现出明显的不均匀沉降,但根据地质资料、荷载状况及沉降趋势,应立即着手进行地基加固工作。

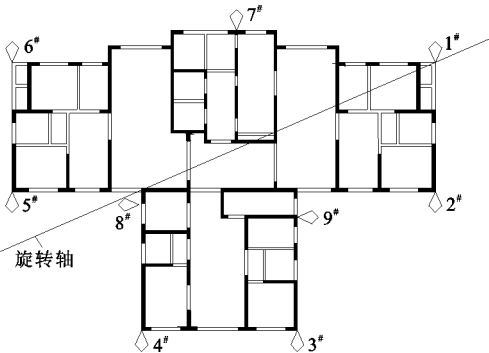


图4 沉降观测点

Fig. 4 Settlement Observation Points

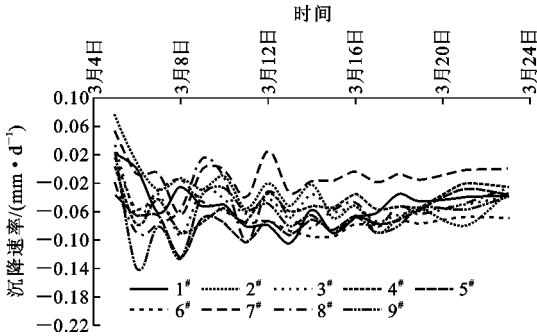


图5 沉降速率

Fig. 5 Settlement Rate

2.3 沉降与不均匀沉降产生原因分析

通过对17号楼结构形式、地质条件、周边环境 and 桩基检测的综合分析发现,造成目前较大的沉降及较严重不均匀沉降的原因主要有以下几个方面:

(1)原17号楼的基础为一桩一承台+剪力墙结构,由检测单位对桩承载力和完整性进行检测,发现西北侧部分桩未达到稳定持力层,桩底含夹层的持力层变形,桩底沉渣普遍较厚,端承桩实际变为摩擦桩,承载力不满足要求。

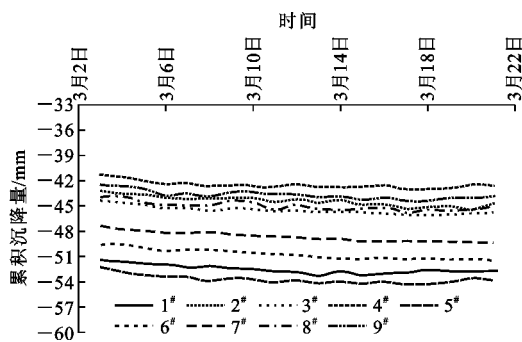


图6 累积沉降量

Fig. 6 Cumulative Settlement

(2)根据地质补勘报告,由于压缩层厚度不均匀,且物理性质差别大,导致17号楼产生不均匀沉降,在沉降较大侧压缩性土层厚度较大。同时勘探发现沉降较大一侧(西北侧及东北侧)存在溶隙、溶孔发育,局部发现较大溶洞,桩端承载力不符合设计要求。同时由于部分桩承载力不足导致桩基反力中心与上部结构质量中心存在一定的偏移,具有明显的偏心效应,加剧了建筑物的沉降与倾斜。

(3)从工程地质资料来看,17号楼压缩层厚度范围内都为土质差的中压缩性土,且厚度较厚,按目前荷载实况,基底下②<sub>1</sub>层土的应力水平已经超过其允许承载力,局部区域可能已发展成塑性区,故其沉降及沉降速率都较大,沉降不易收敛是必然的。

## 2.4 纠倾加固方案

根据该楼的沉降情况,结合结构特点以及地质条件,为减小此压缩量,并能更好地增强建筑基础的整体刚度,以抵抗不均匀沉降,提出“加强基础刚度,止沉调平”的纠倾加固基本思路,即将17号楼独立桩基础改变成筏板+桩基础,以提高其整体性和地基基础承载力,并且通过静压桩实现补桩后地基基础反力中心与上部结构质量中心重合。

### 2.4.1 纠偏加固设计计算

根据地质勘察资料,取素填土极限侧阻力标准值为20 kPa,次生红黏土极限侧阻力标准值为63 kPa,红黏土极限侧阻力标准值为50 kPa,按式(6)对每根桩的单桩承载力特征值进行计算,求得桩基总承载力为301 458 kN。由于目前该楼沉降一直不能稳定,因此桩承载力取值应在此基础上折减使用,桩基总承载力乘以0.8得241 166 kN,小于建筑物总重293 000 kN,基桩竖向承载力不满足设计要求。同时根据公式(7)求得原桩基的反力中心为(17 896.3, 10 627.4),相对于上部结构质量中心(15 016.9, 11 863.5)发生了明显偏移。

$$Q_{uki} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{\sum_{i=1}^n Q_{uki} x_i}{\sum_{i=1}^n Q_{uki}} \\ Y &= \frac{\sum_{i=1}^n Q_{uki} y_i}{\sum_{i=1}^n Q_{uki}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $Q_{uki}$ 为第*i*根桩的单桩极限承载力; $u$ 为桩身周长; $q_{sik}$ 为桩侧第*i*层土的极限侧摩阻力标准值; $l_i$ 为第*i*层土中桩身长度; $q_{pk}$ 为极限端阻力标准值; $A_p$ 为桩端面积; $X, Y$ 为反力中心在平面直角坐标系中的坐标值; $x_i, y_i$ 分别为第*i*根桩的坐标值; $n$ 为基桩数量。

当桩基承载力不足及偏心效应的作用下,桩基受力将会不均匀,受力大的一侧将产生较大沉降,引起建筑物的整体倾斜,而建筑物的整体倾斜将使上部荷载产生新的偏心距增量,从而产生新的力矩增量,这又反过来增大了建筑物的整体倾斜,建筑物越高,这种现象越明显<sup>[15]</sup>。在考虑偏心效应的情况下采用式(8)对桩基承载力重新进行计算,求得旋转轴北侧所需的桩基总承载力为116 892.5 kN,现有桩基承载力仅为89 605.7 kN,求得旋转轴南侧所需的总承载力为177 519.6 kN,现有桩基承载力为190 394.3 kN,但有部分桩不满足承载力要求,需进行补桩加固。

$$N_i = \frac{G}{n} \pm \frac{G(X-X')y'_i}{\sum y_j'^2} \pm \frac{G(Y-Y')x'_i}{\sum x_j'^2} \quad (8)$$

式中: $N_i$ 为考虑附加弯矩后的单桩所需承载力特征值; $G$ 为建筑物总重; $X', Y'$ 为上部结构质量中心在平面直角坐标系中的坐标值; $x'_i, x'_j, y'_i, y'_j$ 分别为第*i, j*根基桩至*y*轴、*x*轴的距离。

补桩采用锚杆静压桩方法,选用PHC-400-AB-95-2型管桩,竖向承载力设计值为800 kN,设计压桩力为1 600 kN,混凝土强度等级为C40。计算求得旋转轴北侧所需补桩数量为35根,对南侧不满足要求的桩进行补强,求得所需补桩数为22根,补桩后桩基的反力中心为(15 753.3, 11 347.1),有效地减小了由于桩基反力中心与上部结构质量中心不重合造成的桩基附加弯矩(图7)。为安全起见,实际施工过程中预留孔数按照实际补桩数量的1.5倍计算,实际预留孔总计86个。

基础补强划分为楼体内新增筏板、外部筏板拓

宽及新增锚杆静压桩共 3 个部份,如图 7 所示。基础补强均采用 C45 防水混凝土,抗渗等级为 P8,钢筋采用 HRB400 热轧螺纹钢筋,净保护层厚度为 35 mm,钢筋焊接搭接长度为单面焊  $10d$ ,双面焊  $5d$ ,经基础加厚拓宽处理后,筏板下地基土反力新增值约为 80 000 kN(扣除筏板自重),地基承载力总安全系数为 1.2。

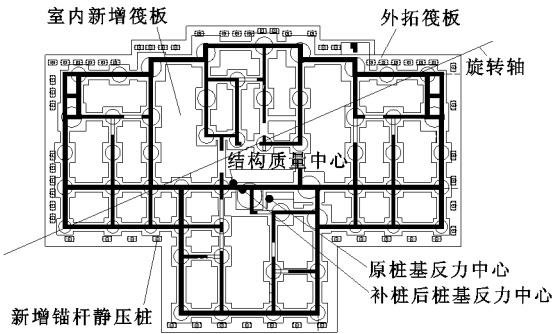


图 7 基础补强平面图

Fig. 7 Foundation Reinforcement Plan

2.4.2 建筑纠倾加固施工步骤

建筑纠倾加固施工步骤如下:

(1)楼体内部新增筏板:按规范<sup>[16]</sup>进行设计,在原第 3 层地下室底板上表面凿毛后,按 400 mm×400 mm 的间距将抗剪钢筋植入防水底板,架设双层受力钢筋穿过剪力墙,再浇筑 800 mm 厚的混凝土。筏板钢筋接头应采用焊接,接头应错开。室内新增筏板接头位置为下部纵筋在跨中  $L/3$  ( $L$  为跨径)范围内,上部纵筋在支座处,基础底板上下层钢筋之间须设拉结筋,采用 12 mm 螺纹钢筋与抗剪植筋共用,梅花形布置。

(2)外部筏板拓宽:在现有地下室外墙的范围线向外扩展 1.40 m,并预留静压桩孔位,如图 8 所示。拓宽后的筏板厚 1.30 m,采用 3 层钢筋网片,钢筋不应设置接头,其顶部与室内加厚后的底板顶面在同一水平面上,如图 9 所示。

(3)新增锚杆静压桩:当新增内部筏板和外拓筏板强度达到设计强度的 80% 时,在外拓筏板上采用压桩器压桩,压桩结束以压力控制为主,长度为辅,桩端落在破碎中风化灰岩上,如图 10 所示。静压桩嵌入外拓筏板深度不小于 100 mm,植入地下室底板的钢筋长度不小于  $15d$ ,植入承台的钢筋长度不小于  $20d$ ,并采用结构胶将植入钢筋与原混凝土结构黏合。反力架和千斤顶安装必须保持竖直,其倾斜度不得大于 1% 的标准段长,待施工静压桩的平面偏差不得超过  $\pm 20$  mm。锚固螺栓应均衡紧固,



图 8 外拓筏板与预留静压桩孔位

Fig. 8 Raft Expansion and Reserved Static Pressure Pile Holes

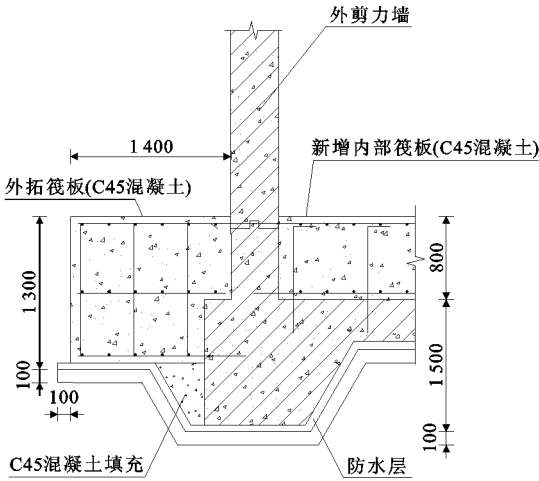


图 9 新做筏板与外拓筏板连接示意(单位:mm)

Fig. 9 Schematic of Connection of New Raft and External Raft (Unit:mm)

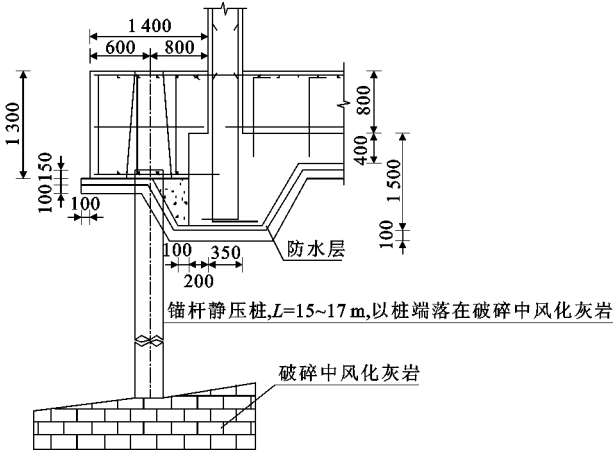


图 10 锚杆静压桩剖面图(单位:mm)

Fig. 10 Profile of Anchor Static Pressure Pile (Unit:mm)

待施工静压桩就位后保持竖直(可采用临时支座进行固定),使千斤顶、待施工静压桩和待压孔轴线重合。每段待施工静压桩长应根据现场反力支架、千斤顶和场地空间条件来决定,原则上每段待施工静



压桩长  $l \geq 2$  m。接桩可采用现场焊接或硫磺胶泥拼接。对施工完毕的静压桩需按照规范<sup>[16-17]</sup>进行承载力和完整性检测,合格后方可进入下一工序施工。

(4)沉降较大区封桩:根据沉降、倾斜监测速率,沉降较大一侧静压桩施工完成并达到规范规定持荷要求后,立即将压桩锚栓交叉焊接“[”形封装钢筋(本工程中选 2 根 18 钢筋交叉焊接),浇筑高强度微膨胀细石混凝土进行封桩,见图 11。同时沉降较小一侧保持继续沉降。



图 11 锚杆静压桩封桩

Fig. 11 Sealing of Anchor Static Pressure Pile

(5)高层建筑自重纠倾施工:沉降较大侧经静压桩加固后趋于稳定,沉降较小侧在建筑自重作用下整体继续保持沉降,不断对地基土进行压缩,使得地基土承载力逐渐提高,原基桩的承载力也逐渐提高,结合新增筏板和外拓筏板的协调作用,沉降较小侧沉降速率逐渐减小,趋于稳定,待纠倾量满足规范要求时,进行封桩。在建筑物自重及正常使用总荷载作用下,承台、原基础、新增筏板、外扩筏板和施工完成的静压桩整体协同工作,使得建筑进入正常工作状态,纠倾加固完成。

### 2.5 纠倾加固成果

该工程于 2014 年 3 月 11 日开始施工,经过 90 d 奋战,完成大楼的纠倾加固工作。施工期间现场建立沉降观测网,专人定期测量沉降值,截至 2014 年 12 月 25 日,大楼的各沉降观测点时间-沉降量曲线如图 12 所示。

从时间-沉降量曲线可以看出,在纠倾加固的 3 个阶段,大楼的各观测点沉降量有明显特征:在地基加固准备阶段,大楼各观测点均有沉降,日沉降量较大;在封桩纠倾阶段,建筑原沉降较大侧经静压桩加固,沉降速率逐渐变小,趋于稳定,原沉降较小侧在建筑自重作用下继续保持沉降,不断调整差异沉降,反映出大楼的回倾过程;在工后监测阶段,时间-沉降量曲线日趋平缓,大楼沉降趋于稳定。通过纠倾

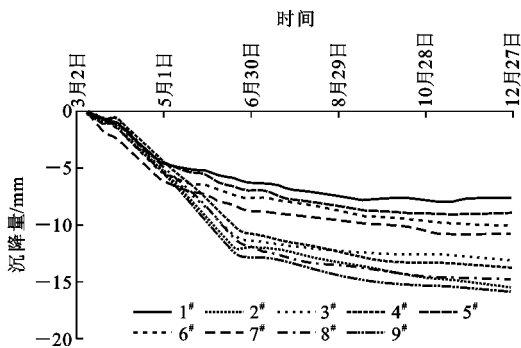


图 12 时间-沉降量曲线

Fig. 12 Time-settlement Curves

加固工程施工,大楼倾斜率满足国家规范<sup>[17]</sup>要求,沉降速率满足规范要求的沉降稳定标准,纠倾加固工程取得圆满成功。

## 3 结 语

(1)该桩基础高层建筑通过纠倾加固后沉降和倾斜率满足国家规范的要求,纠倾加固工程圆满完成。实践证明,以“增补筏板+外部筏板拓宽+锚杆静压桩”技术为主的综合纠倾加固方案是可行的。

(2)对于过量沉降以及产生较大不均匀沉降的桩基础高层建筑,采用“增补筏板+外部筏板拓宽+锚杆静压桩”的综合纠倾加固方案将原桩基础转化为桩筏复合地基,有效提高了建筑物的整体性和地基基础承载力,同时利用锚杆静压桩布置数量、施工的先后顺序、施工时间差异对基础承载力进行调整,可以创造大楼自然回倾的条件,达到既制止其沉降与倾斜又适当纠倾的目的。

(3)筏板外拓既能在纠倾过程中减缓沉降趋势,也能在建筑物使用过程起到防止复倾的作用。

(4)纠倾加固工程是一项极其复杂而难度大的工作,其控制性措施是至关重要的,在施工之前必须进行贯穿于整个工程的控制性分析,应用控制性措施,包括变形监测、施工工艺等,以此保证纠倾工程的顺利进行。

### 参考文献:

#### References:

[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. Investigation on the Latest Trend and Rectification of Pisa Tower[J]. Soil Engineering and Foundation,2000,14(1):53-56.  
[2] 刘毓炅,刘祖德. 某危房的地基应力解除法纠偏工程实例[J]. 土工基础,2000,14(4):29-31.

- LIU Yu-chuan, LIU Zu-de. The Rectification of a Building by Stress Relief Method[J]. Soil Engineering and Foundation, 2000, 14(4): 29-31.
- [3] 江见鲸, 陈希哲, 崔京浩. 建筑工程事故处理与预防[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.
- JIANG Jian-jing, CHEN Xi-zhe, CUI Jing-hao. Treatment and Prevention of Building Accidents[M]. Beijing: China Building Materials Press, 1995.
- [4] 龚晓南. 地基处理新技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- GONG Xiao-nan. New Technologies in Ground Treatment[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.
- [5] 朱彦鹏, 张贵文, 王秀丽, 等. 诱使沉降法纠正偏移建筑的模型试验及案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3288-3296.
- ZHU Yan-peng, ZHANG Gui-wen, WANG Xiu-li, et al. Model Test on Rectification of Inclined Buildings by Induced Settlement Method and Case Studies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3288-3296.
- [6] 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): 2786-2793.
- ZHU Yan-peng, WANG Xiu-li, ZHOU Yong. Theoretical Analysis and Practice of Rectifying Reinforcement Using Expansive Method for Incline Building on Collapsible Loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2786-2793.
- [7] 林 彤, 刘祖德. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1049-1052.
- LIN Tong, LIU Zu-de. Study on Indoor Tests of Fly Ash and Quick Lime Improving Soft Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 1049-1052.
- [8] 王建平, 朱思响, 李品先. 既有建筑综合纠倾法设计与施工[J]. 施工技术, 2011, 41(9): 57-59.
- WANG Jian-ping, ZHU Si-xiang, LI Pin-xian. Design and Construction of Integrated Deviation Correction of Existing Building[J]. Construction Technology, 2011, 41(9): 57-59.
- [9] 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, 1627.
- ZHU Fang-min, QIAN Ping-yi, XIE Jia-bi, et al. Study on Application of Deviation Rectification of Building with Pile Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1617-1621, 1627.
- [10] 杨建华, 彭从文. 强夯置换法在桩基纠偏中的应用[J]. 施工技术, 2017, 46(5): 48-50.
- YANG Jian-hua, PENG Cong-wen. The Application of Dynamic Replacement Method in Deviation Rectification of Support Pile[J]. Construction Technology, 2017, 46(5): 48-50.
- [11] 李世宏, 杜吉坤. 某高层建筑迫降法纠偏施工技术[J]. 施工技术, 2011, 40(6): 52-54.
- LI Shi-hong, DU Ji-kun. Deviation Rectification Technology of Some High-rise Building by Forced Settlement Method[J]. Construction Technology, 2011, 40(6): 52-54.
- [12] 邓正定, 孙 琪, 王 珑, 等. 止倾迫降综合纠倾法机理分析及在高层建筑纠偏中的应用[J]. 铁道建筑, 2016, 56(2): 116-120.
- DENG Zheng-ding, SUN Qi, WANG Long, et al. Mechanism Analysis of Integrated Incline-rectifying and Forced Settlement Rectification Method and Its Application to High-rise Building Rectification[J]. Railway Engineering, 2016, 56(2): 116-120.
- [13] 朱彦鹏. 一种高层建筑预制桩桩基纠偏加固方法: 中国, CN 201510425543. 2[P]. 2015-10-14.
- ZHU Yan-peng. A Method of Precast Pile in High-rise Building Pile Foundation Rectifying Reinforcement; China, CN 201510425543. 2[P]. 2015-10-14.
- [14] JGJ 8—2016, 建筑变形测量规范[S].
- JGJ 8—2016, Code for Deformation Measurement of Building and Structure[S].
- [15] 楼晓明, 刘建航, 胡中雄. 高层建筑箱形基础倾斜的综合分析[J]. 同济大学学报, 2000, 28(6): 646-650.
- LOU Xiao-ming, LIU Jian-hang, HU Zhong-xiong. Systematic Analysis on the Inclination of Box Foundations for High-rise Buildings[J]. Journal of Tongji University, 2000, 28(6): 646-650.
- [16] GB 50007—2011, 建筑地基基础设计规范[S].
- GB 50007—2011, Code for Design of Building Foundation[S].
- [17] JGJ 106—2014, 建筑基桩检测技术规范[S].
- JGJ 106—2014, Technical Code for Testing of Building Foundation Piles[S].