

# 某高层住宅楼倾斜原因及纠倾加固技术研究

程晓伟, 王 桢, 张小兵

(中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 在正确分析一 30 层住宅楼倾斜原因的基础上, 对该楼纠倾加固工程采取的纠倾加固措施以及控制技术进行了针对性的研究。为确保该倾斜建筑物安全、平稳、线性的回归, 本工程通过首次采用“基底掏土为主, 锚索加压为辅”的组合纠倾方法, 对应力控制、锚索加压调控及变形控制等多重纠倾控制技术进行深入的研究, 而后制定科学合理的施工工序, 最终保证了该高层建筑物纠倾加固工程的成功实施, 大楼倾斜率由纠倾前的 2.66‰ 回归到 0.87‰, 满足了国家相关规范及正常实用要求, 本工程在纠倾高度 (97 m) 及层数 (30 层) 方面, 刷新了国内高层建筑物纠倾纪录, 填补了在强风化泥岩、复杂地基、深埋基础中实施双向纠倾的空白, 对高层建筑物的纠倾具有很高的借鉴价值。

**关键词:** 高层建筑; 纠倾加固; 控制技术

中图分类号: TU475

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)04-0756-06

**作者简介:** 程晓伟(1982-), 男, 河南夏邑人, 硕士, 工程师, 主要从事建(构)筑物病害治理, 高边坡及滑坡病害治理等方面的研究及设计和施工。E-mail: cxw20020526@163.com。

## Causes of inclination of a high-rise residential building and relevant inclination-rectifying and reinforcement technology

CHENG Xiao-wei, WANG Zhen, ZHANG Xiao-bing

(Northwest Research Institute Co., Ltd. of China Railway Engineering Corporation, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the inclination-rectifying and reinforcement of a thirty-storey residential building, the relevant inclination-rectifying measures and control technology are introduced after analyzing the causes of its inclination. In order to ensure the safety, stability and linear structure of inclined building, this project first adopts the combined inclination-rectifying reinforcement means of “major soil-digging and minor anchor-pressuring”, and brings forward many control technologies such as stress control, fine-tuning by anchor-pressuring and deformation control and so on, and thus scientific and reasonable construction procedures are prepared so as to guarantee successful implementation of inclination-rectifying and reinforcement of the high-rise building. The inclination rate of the building returns to 0.89‰ from 2.61‰, meeting the national related standards and practical requirements. This project has created a new national record of inclination-rectifying buildings in the building height (97m) and the number of building floor (30 floors), and fills in the gap for the implementation of inclination-rectifying of high-rise buildings located on the weathered mudstone, complex foundation and deep foundation. It will be useful for rectifying inclined high-rise buildings.

**Key words:** high-rise building; inclination-rectifying and reinforcement; control technology

## 0 引 言

建筑物纠倾加固是一项起步晚、难度大、综合性强的工程技术。目前, 此类技术主要以土力学理论和工程经验为指导, 借鉴某些成熟的设计施工技术为来指导工程实践, 至今尚未形成系统的理论和设计施工技术体系, 因此一直以来该项工程技术的施工风险很高, 特别是在高层建筑物的纠倾加固中。本文以成功实施的青海师范大学 3 号住宅楼纠倾加固工程为实例, 在高层建筑物纠倾加固方法、纠倾控制技术及防

复倾加固方面进行了针对性的研究, 以指导实践, 对类似工程具有很好的借鉴价值。

## 1 工程概况

青海师范大学 3 号住宅楼为框架剪力墙结构, 地上 30 层, 地下 1 层, 建筑高度 97 m, 建筑面积 15896 m<sup>2</sup>, 采用梁板式筏形基础, 埋深 8.2 m, 筏板东西向长 41.0 m, 南北向最大宽度 19.8 m。

该楼所在场地位于西宁市湟水河南岸二级阶地, 场地平坦, 地貌单一, 在其北侧 30 m 远处为一东西向陡坎, 落差 6 m, 其下为湟水河一级阶地, 明都大厦位于该阶地上。场地位置见图 1。

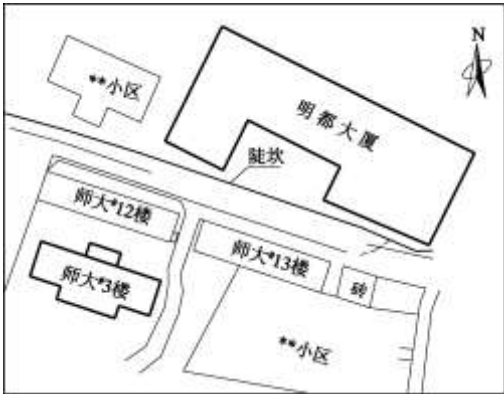


图 1 3 号楼地理位置图

Fig. 1 Geographic position of Building No. 3

根据详勘报告和后期补勘资料, 该场地所揭示地层由第四系松散层和第三系泥岩组成, 自上而下分别为黄土层、粉土、砂砾石层、强风化泥岩和中风化泥岩, 师大 3 号楼基础坐落在强风化泥岩层上, 各土层相关指标见表 1。

表 1 各土层参数统计表

Table 1 Statistical parameters of soils

层序	材料名称	厚度 /m	$\gamma$ /(kN m <sup>3</sup> )	$c$ /kPa	$\varphi$ /(°)	$E_0$ /Pa
①	黄土层	2.31	17	15	16	$6.00 \times 10^7$
②	粉土	0.91				
③	砂砾层	2.77	20	5	38	$1.04 \times 10^8$
④	强风化泥岩	3.28	18.8	27	26	$6.94 \times 10^7$
⑤	中风化泥岩	19	19.5	35	28	$1.08 \times 10^8$

2 大楼倾斜变形状况及原因分析

青海师范大学 3 号住宅楼于 2006 年 10 月开工建设, 2007 年 9 月, 主体结构封顶后不久, 地基便发生不均匀沉降, 大楼整体朝北东方向倾斜, 此后, 差异沉降与日俱增, 倾斜变形不断发展。截止 2008 年 10 月 15 日, 大楼朝北方向的倾斜率达 2.66‰, 朝东方向的倾斜率达 1.82‰, 根据《建筑地基基础设计规范》, 3 号楼整体倾斜已超过规范规定的 2.5‰允许值<sup>[1]</sup> (见图 2)。

通过对 3 号楼结构形式、地基均匀性、周边环境

等与大楼倾斜的相关性分析, 发现大楼的不均匀沉降非单一因素所致, 而是由多种不利因素组合共同作用的结果, 其中:

(1) 地基强风化泥岩层本身空间分布复杂多变、风化不均性、顺倾的岩层产状、发育的裂隙和地下水文条件构成了地基土的先天不利因素。

(2) 3 号楼在基坑开挖到持力层后, 人为无意间在西南侧 (沉降少侧) 持力泥岩层内换填了 4 个大小不等混凝土墩 (截面 3.3 m×4.0 m, 深 2 m), 加剧了地基不均匀性, 构成了 3 号楼不均匀沉降的内因。

(3) 在距 3 号楼北侧约 30 m 远处, 新建工程基坑开挖过程中造成边坡 2 次坍塌失稳, 继而牵引到 3 号楼北侧侧向应力松弛; 加之该基坑施工过程中长达数月的持续抽水, 加速了地下水位的变化和物质运移, 进而影响到 3 号楼地基的正常固结, 以上构成了地基产生不均匀沉降的外部诱发因素。



图 2 青海师范大学 3 号楼全景

Fig. 2 Fullview of Building No.3 of Qinghai Normal University

3 纠倾加固方案

考虑到 3 号楼在尚未投入使用的环境下发生倾斜, 致使电梯无法安装, 且倾斜量不断加剧恶化, 纠倾加固工作势在必行。由于 3 号楼具有质量大 (3.2×10<sup>4</sup> t)、重心高 (约 39 m), 埋置深 (8.2 m) 等特点, 采用顶升纠倾法要求的顶升吨位极大, 难度很高, 故在纠倾方案制定上首选迫降纠倾或组合迫降纠倾法。在经过对各种纠倾措施的综合对比后, 确定了竖井内放射状水平掏土+锚索施力调控+斜孔钢管桩止倾+地基注浆加固”的综合纠倾加固方案, 具体为

(1) 室外竖井内放射状水平掏土。在 3 号楼室外沉降少侧 (西南侧) 开挖 4 个竖井, 井深 10.5 m, 至筏板以下 2~3 m, 竖井在平面布置上与筏板搭接 0.7 m 宽度, 以备筏板上施工加压用的锚索。在竖井内基础标高以下强风化泥岩里水平向放射状掏土, 削减基

底的受力面积，从而增大地基土应力，促进该侧基础下沉。

(2) 锚索加压调控辅助纠倾措施。分别在少沉侧竖井内露出的筏板上，垂直打入两根锚索，锚固段深入中风化泥岩，利用锚索与筏板组成加力系统，通过千斤顶向筏板加压，以增加西南侧地基沉降量，达到纠倾的目的。

(3) 钢管桩止倾。在 3 号楼室外原沉降多侧打入一排斜孔钢管桩，斜插入筏板下中风化层内。钢管桩端部用钢筋混凝土梁连成一个整体，起到加固北侧地基和侧向约束的作用。

(4) 地基注浆加固。纠倾目标完成后，掏土孔内高压注入水泥砂浆，起到加固地基的作用(见图 3, 4)。

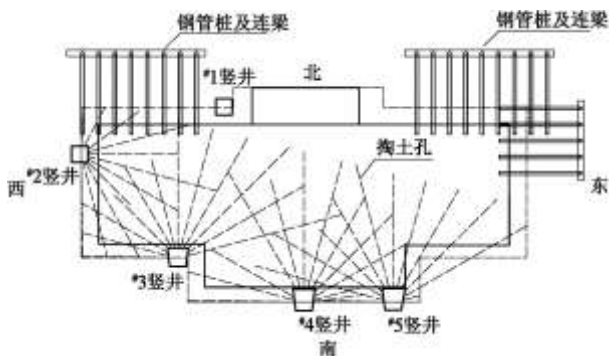


图 3 3 号楼纠倾加固措施布置平面图  
Fig. 3 Location of inclination-rectifying and reinforcement measures for Building No. 3

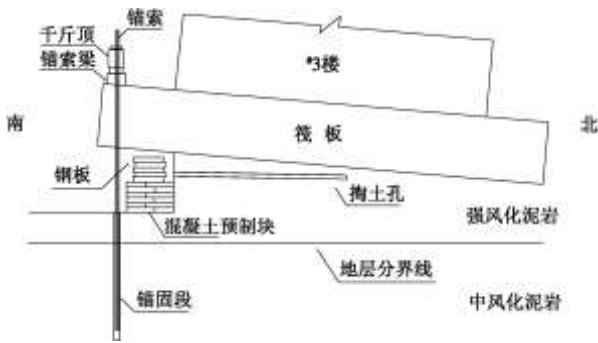


图 4 纠倾示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of inclination-rectifying

4 纠倾加固中的控制技术

4.1 应力控制

纠倾前首先要确定该地基的承载力临界值及目前状态下的地基应力值，确保掏土后的地基应力值不超过地基承载力临界值，即纠倾中的应力控制。众所周知，地基的应力 - 应变曲线如图 5 所示，地基应力  $\sigma$  在承载力基本值  $\sigma_s$  的附近<sup>[2]</sup>。当掏土后，掏土孔间的土条的应力值(这里不妨称之为掏土造就地基应力值)

随掏土面积的增大而增大， $\sigma_p$  朝  $\sigma_k$  向增加，随着  $\sigma_p$  的增大，土条处于塑性变形状态，地基沉降量不断增加。由于 3 号楼坐落在强风化泥岩层上，且其质量大，一旦掏土量过大，造就地基应力超过地基承载力临界值时，就有可能产生“突沉”现象。因此  $\sigma_p$  的确定尤为重要，应满足  $\sigma_p < \sigma_k$  的条件。

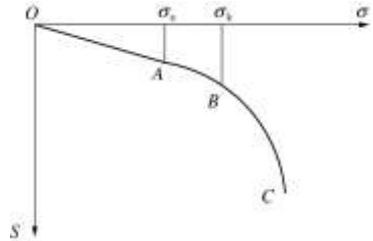


图 5 地基应力 - 变形曲线  
Fig. 5 Curve of ground stress-deformation

通过计算，3 号楼纠倾前的基底最大应力值为 409 kPa，静荷载试验确定的地基承载力修正值为 504 kPa，计算的 1/3 塑性开展深度地基承载力临界值为 550 kPa。为做到安全可控，本工程将掏土造就的最大应力值控制为 550 kPa，通过分三阶段掏土从小到大逐渐逼近该应力值，本工程三阶段掏土造就应力值设计为：465，504，550 kPa (见图 6)。

在确定掏土造就的地基土应力值后，3 号楼掏土面积通过三阶段掏土造就应力值计算。为更精确、线性的布置不同位置处的掏土面积，计算每阶段掏土面积时，将迫降区基底应力等值线每 5 kPa 分成一区，然后分别计算每个区域上不同应力值阶段的掏土面积，掏土面积的计算公式为

$$\Delta A = A \frac{\Delta \sigma_p}{\sigma} = A \beta \quad (1)$$

式中  $\Delta A$  为掏土面积； $A$  为原地基承载面积； $\beta$  为地基应力增长率。

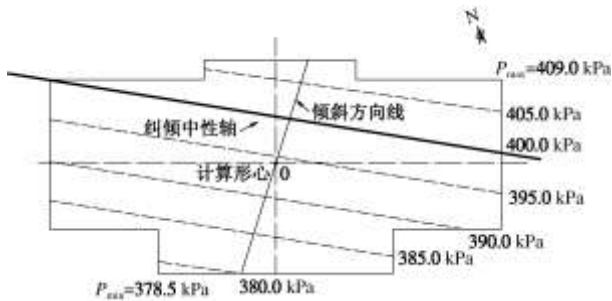


图 6 纠倾前地基应力等值线分区图  
Fig. 6 Zoning of stress contours before digging soil

在计算出每一应力阶段不同应力区内的掏土面积后，布置掏土孔位置并对其编号，布置掏土孔时还必须做到西南侧要求沉降量大朝东北逐渐递减，满足

掏土后迫降区地基应力分布线性, 防止出现应力集中和掏土盲区。不同应力阶段的掏土孔需间隔布置, 掏土时分井、分孔、分批间隔进行, 避免多掏 (见图 7)。

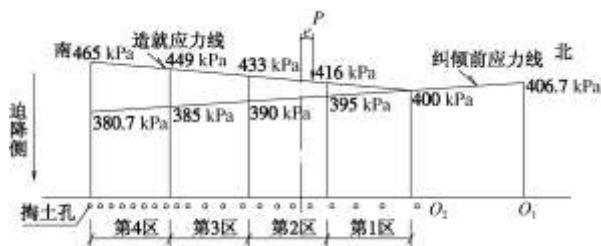


图 7 倾斜方向线上掏土造就应力线 (第一阶段)

Fig. 7 Stress line of digging soil on inclined direction

## 4.2 锚索加压调控

青海师范大学<sup>#3</sup>住宅楼纠倾采取了以掏土为主, 锚索加压调控为辅的纠倾思路, 实现“掏土至临界, 辅助加压调控”, 即掏土时有意“欠掏”一些, 而后通过迫降区锚索加压, 使<sup>#3</sup>楼下沉回倾, 当基底因掏土和锚索加压要发生屈服破坏时, 由于筏板下沉而使锚索上的加压千斤顶自动卸荷, 从而防止“突沉”现象的发生。本工程锚索布置于迫降区的<sup>#2</sup>、<sup>#3</sup>、<sup>#4</sup>、<sup>#5</sup>井内, 每井内筏板上各布置两束锚索, 利用锚索、筏板、千斤顶组成加力系统, 通过千斤顶对筏板施加压力, 增大<sup>3</sup>号楼地基上的偏心压力, 达到纠倾调控的目的 (见图 8)。

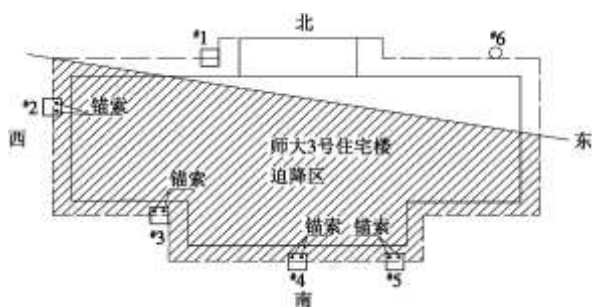


图 8 锚索分布图

Fig. 8 Distribution of anchors

## 4.3 安全防护措施

为防止纠倾过程中, 地基产生突然沉降或过量沉降, 纠倾前预制一定数量的混凝土预制块, 待到纠倾阶段, 把混凝土预制块布置于井中筏板下方, 预制块顶部与筏板基础之间用钢板填塞, 但预留一定的空隙, 使筏板具有下沉的空间, 同时密切关注监测数据的变化, 根据沉降速率的快慢考虑是否在空隙中钳入硬木板, 作为临时支撑, 以控制筏板的下沉速度。

另外, 在对西南侧基底的混凝土墩松绑时, 考虑其对大楼沉降侧的安全防护作用。采用了取芯钻机进行水平切削的办法, 即用钻机横向切掉一层间距为

110 mm 的混凝土条带, 解除其对筏板的支承作用, 提供筏板下沉的空间, 一旦筏板的沉降量达到 110 mm 时, 即切除的混凝土条带曾占刷的空间完全闭合时, 混凝土墩再次受力, 约束筏板继续下沉, 从而达到安全防控的目的 (见图 9)。



图 9 基底混凝土墩处理现场

Fig. 9 Processing site of concrete blocks

## 4.4 变形控制

变形控制是建 (构) 筑物纠倾的终极目标, 纠倾工程不仅需要满足建筑物通过纠倾措施的实施达到“改斜归正”, 达到预期的纠倾目标, 同时还要保证建筑物在整个纠倾过程中安全、平稳、线性, 这就要求在施工过程中把握好建筑物的回倾速率, 使其在一定的范围内, 整个纠倾过程做到: 缓慢启动, 均匀回倾, 平稳锁定<sup>[3]</sup>。根据《建筑物移位纠倾增层改造技术规范》, 考虑到<sup>#3</sup>楼质量大、重心高, 埋置深的特点, 且是我国第一次尝试对坐落在强风化泥岩上高层建筑物纠倾, 为稳妥起见, 将本工程的变形速率预定为 2~5 mm/d 范围内 (见图 10)。

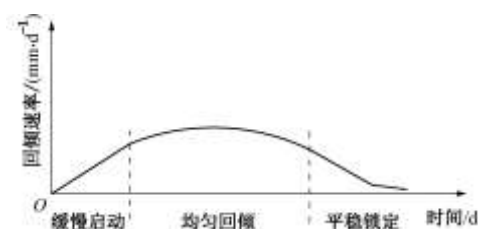


图 10 理想状态下纠倾回倾速率简图

Fig. 10 Diagram of inclination-rectifying rate under ideal state

为实现整个纠倾过程中建筑物的变形可控, 青海师范大学 3 号住宅楼纠倾加固工程建立起的一套包含多重监测手段的监测体系, 包括水准监测、倾斜监测、电梯井内吊线锤监测、液态静力水准测量等多重监测方法。每一项监测方法之间相互验证, 优势互补, 增加监测数据的可信度, 使监测控制体系更好服务于纠倾施工。

5 防复倾加固措施

5.1 钢管桩加固

在 3 号楼室外原沉降多侧打入一排斜孔钢管桩, 斜插入筏板下中风化层内。钢管桩端部用钢筋混凝土梁连成一个整体, 起到加固北侧地基和侧向约束的作用。

5.2 竖井防复倾回填处理

纠倾完成后, 对位于沉降多侧的#1、#6 井采取与南侧竖井不同的回填方案。竖井筏板以下 2 m 高度内用多根钢管支顶筏板, 同时植入钢筋用混凝土与筏板浇注成一体, 井中央竖向安装两个注浆管, 深入井底, 混凝土浇注完毕后利用高压注浆, 充填其周围缝隙。

5.3 预应力锚索张拉锁定防复倾

纠倾完成后, 大楼仍然存在一定的残余偏心倾覆力矩, 为克服这些偏心倾覆力矩, 对大楼#2~#4 竖井内的 8 束锚索分别进行加力锁定, 相当于在大楼西南侧施加了一个回复力矩, 在一定程度上平衡大楼倾斜产生的倾覆力矩, 提高大楼今后的抗震性能。

6 纠倾加固流程

根据本工程的纠倾加固措施及施工思路, 结合青海师范大学 3 号楼的特殊性, 本工程的纠倾加固流程如图 11 所示。

7 纠倾效果评价

2008 年 10 月 15 日, 青海师大 3 号住宅楼纠倾加固工程正式开始, 按照前期制定的纠倾加固方法及控制技术手段有条不紊的实施, 在实施每一步骤时, 及时监测大楼沉降及倾斜量, 根据监测反馈的信息决定是否进行下一道程序, 即执行“动态化设计, 信息化施工”的理念。期间观测点的日最大沉降速率为 2.2 mm/d, 整个纠倾过程中实现了建筑物的安全, 可控。经过 70 d 的紧张施工, 2009 年 1 月 5 日, 大楼南北向倾斜率由纠倾前的 2.66‰回归到 0.87‰; 东西向倾斜

率由纠倾前的 1.82‰回归到 1.28‰, 均满足了国家相关规范规定的小于 2.5‰要求, 纠倾加固取得圆满成功, 大楼两个方向的倾斜率-时间变化曲线见图 12, 13。

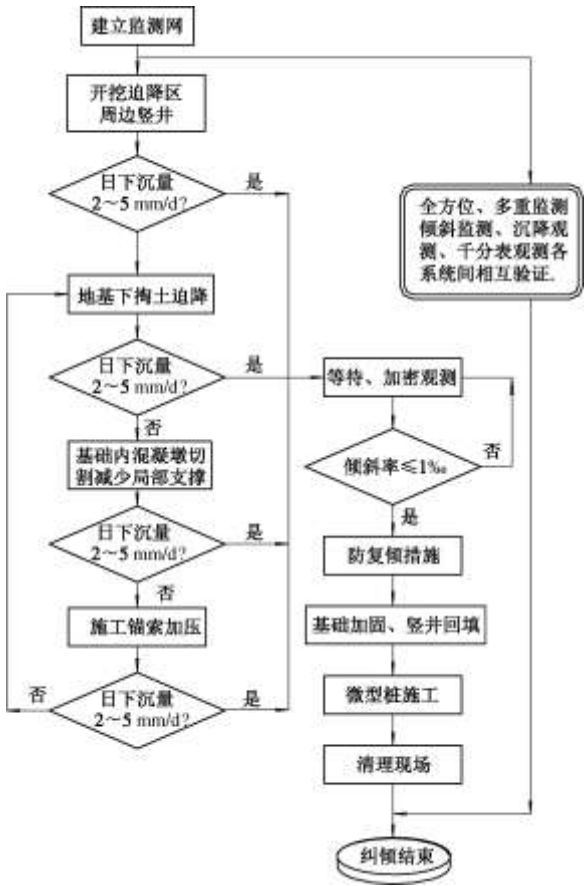


图 11 纠偏加固流程图

Fig. 11 Flowchart of inclination-rectifying and reinforcement

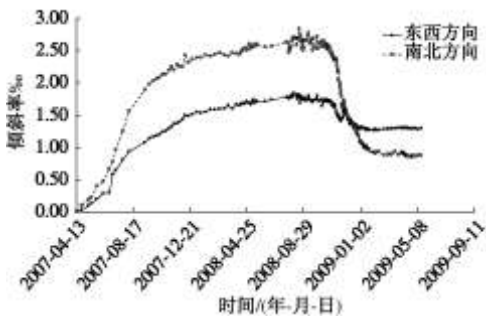


图 12 大楼两方向的倾斜率时间变化曲线

Fig. 12 Change curve of inclined rate along two directions of building

8 结论及建议

青海师范大学3号楼纠倾加固工程的成功实施, 在纠倾高度及层数上刷新了国内高层建筑物的纠倾记录, 填补了国内在强风化泥岩、复杂地基、深埋基础

中实施双向纠倾的空白, 通过本工程得出以下几点结论及建议:

(1) “基底掏土为主, 锚索加压为辅”的迫降纠倾法是切实可行的, 是一种可控性好、精度高的组合纠倾方法。

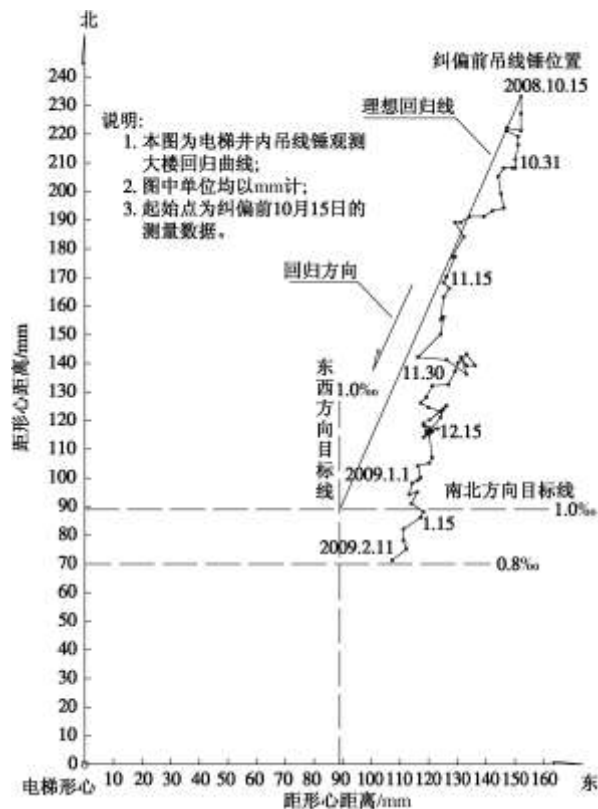


图 13 大楼电梯井吊线锤回归迹线

Fig. 13 Regression tracing line of hammer dropped in elevator well

(2) 建筑物纠倾加固是一项技术难度大、影响因素多的技术密集型工作, 由于在目前的纠倾技术水平下还不能进行精确的科学计算, 要做到建筑物的安全、平稳、线性, 纠倾控制技术尤为重要, 多重控制技术措施的实施是建筑物纠倾加固的重要保障, 特别是对质量大、重心高、埋置深的高层建筑物。

(3) 变形监测是纠倾加固工程中一项必不可少的内容, 是实现“动态化设计、信息化施工”的前提, 它不仅是检验纠倾成果的手段, 而且是指导施工、矫正偏差的依据。建立两种或两种以上监测手段的体系, 各监测手段之间相互校核, 互为补充, 保证了监测信息反馈的及时、客观。

通过对本工程倾斜原因的分析, 我们发现在西宁地区, 建筑物基础多坐落于卵石层或泥岩层上, 由于卵石层为含水层, 其下的强风化泥岩为弱透水层, 因此应特别注意新建工程基坑降水对临近建筑物地基沉降变形的影响; 除应对基坑降水方案进行充分论证之外, 在建筑物密集地段, 宜采用止水帷幕配合基坑开挖, 以防止次生灾害产生。局部地基处理及集水坑回填应采用与原地基土层物理力学性质相近的材料, 不可简单的采用素混凝土回填处理。

参考文献:

[1] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB 50007—2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))

[2] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994. (GONG Xiao-nan. Advanced soil mechanics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994. (in Chinese))

[3] 谌壮丽, 王 桢. 古塔纠倾中某些技术关键的思考[J]. 特种工程新技术, 2007: 120 - 124. (SEN Zhuang-li, WANG Zhen. Thinking for some key technology of pagodas incline-rectifying[J]. Special Engineering Technologies, 2007: 120 - 124. (in Chinese))

[4] 史佩栋. 建(构)筑物地基基础特殊技术[M]. 北京: 人民教育出版社, 2004. (SHI Pei-dong. Special techniques in foundation of buildings or structures[M]. Beijing: People's Education Press, 2004. (in Chinese))