

文章编号: 1003-1995(2018)09-0088-06

深厚填土区既有建筑组合纠偏加固技术

孔德刚¹, 张世径², 赵成江², 柳 勇³, 张小兵²

(1. 中铁科学研究院有限公司, 四川 成都 611730; 2. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要 兰州市一 12 层住宅楼坐落在厚约 40 m 的杂填土地地上, 地基基础不均匀沉降导致楼体严重倾斜。在分析其倾斜原因的基础上, 对复杂深厚填土地区建筑物的纠偏加固措施及控制技术进行了研究。采用桩周应力释放+截桩迫降的综合纠偏方法, 并制定科学合理的施工工序, 使得大楼最终倾斜率由 13.76‰ 回归到 2.8‰, 满足规范要求。提出了截桩迫降的基本原理及理论计算公式, 该工程填补了国内在深厚杂填土回填场地(包括填土、饱和填土、回填块石层等)上高层建筑纠偏的空白。

关键词 深厚填土地基; 组合纠偏法; 现场试验; 既有建筑纠偏; 桩周应力释放; 截桩迫降

中图分类号 TU475 文献标识码 A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.09.23

随着我国经济建设的快速发展, 西北地区城市建设日益加快。伴随着削山造地工程的开展, 许多新建在深厚填土地基上的建筑物, 由于勘察、设计、施工、使用维护管理、自然灾害等多方面原因, 产生地基基础不均匀沉降、楼体倾斜、开裂等病害, 轻者影响建筑物的正常使用, 严重时使其丧失使用功能, 甚至倒塌破坏。

国内外在处理建筑物沉降和基础加固方面已积累了诸多理论和实践经验, 实际的纠偏方法应根据建筑物的倾斜程度、原因、上部结构、基础类型、基础刚度、荷载特征、土质情况、施工条件、周围环境等因素综合分析^[1]。对于筏板基础的高层建筑来说, 大多采用应力解除法纠偏, 并实施辅助工作, 通过多种控制技术最终达到纠偏效果^[2-4]。对于桩基础的高层建筑, 尤其是倾斜率过大时, 截桩迫降法的纠偏速度较快, 能在短时间内保证楼体恢复到规范允许的范围内。文献[5-6]在软土地区采用截桩迫降技术纠偏, 达到了很好的纠偏效果, 并进行三维数值模拟分析, 表明了控制好截桩量及纠偏速率时, 截桩迫降对上部结构影响不大。但对于黄土地区深厚(达 40 m)杂填土地地上的桩基础建筑物纠偏, 由于地质条件复杂, 楼体倾斜率过大, 桩周应力释放及截桩迫降能否达到纠偏效果, 尚需理论研究和实践检验。

本文以兰州市一住宅楼纠偏加固工程为例, 对深厚杂填土地地上楼体产生病害的机理进行分析。采取

桩周应力释放+截桩迫降的综合纠偏方法, 达到消除既有建筑物病害、恢复使用功能的目的。

1 既有建筑物概况

1.1 建筑结构

兰州市九州新区某小区 9 号住宅楼为钢筋混凝土现浇框架-剪力墙结构, 地下 1 层, 地上 12 层。建筑物长为 49.0 m, 宽为 13.0 m, 建筑总高度为 35.5 m。整个建筑物修建在深达 40 m 且未经过任何碾压的杂填土回填场地上。建筑物基础形式为机械成孔混凝土灌注桩, 原设计桩径分别为 800, 1 000 mm, 桩底扩大头直径分别为 1 400, 1 600 mm。桩端持力层为中风化砂岩。

1.2 工程地质条件

该建筑物所处场地地貌单元为黄河北岸高阶地。根据钻探揭露, 场地原为罗锅沟支沟, 场地南侧为山坡, 北侧为沟谷, 沟谷发育, 切割较深, 后经人工挖填整平作为建筑场地, 填方区厚度在 40 m 左右。本场地在病害补充勘察深度范围内地层主要由杂填土①、杂填土②、杂填土③、砂岩组成。由上至下分述如下:

1) 杂填土①(Q_4^m), 褐红色~棕红色, 主要由黄土状粉土及泥质砂岩组成, 局部含有圆砾及建筑垃圾, 土质不均, 中密, 稍湿, 场区普遍分布。厚度 14.30~20.00 m, 平均 18.13 m。土体物理力学指标见表 1。

2) 杂填土②(Q_4^m) 组成成分与杂填土①完全相同, 中密, 稍湿~湿, 土体呈饱和状, 含水率大于 23%, 饱和度大于 80%, 场区普遍分布。厚度 10.10~19.30 m, 平均 15.08 m; 层底埋深 27.31~38.30 m, 平均 33.21 m。

收稿日期: 2018-01-16; 修回日期: 2018-03-27

第一作者: 孔德刚(1980—), 男, 高级工程师。

E-mail: kongdg01@163.com

表1 土体物理力学指标(17组样本)

指标	最大值	最小值	平均值
天然重度/(kN/m ³)	18.600	16.200	17.394
孔隙比	0.877	0.687	0.785
含水率/%	17.300	11.800	14.876
塑性指数	9.500	8.500	8.941
湿陷系数	0.023	0.006	0.013
自重湿陷系数	0.053	0.002	0.015
压缩系数/MPa ⁻¹	0.300	0.042	0.211
压缩模量/MPa	41.143	6.098	10.420

3) 杂填土③(Q₄^{ml}),棕红色,局部为灰绿色,主要由人工回填的直径数米的风化砂岩块石及碎石组成,土质不均,风化砂岩块石层间空隙极大,局部钻孔在钻进过程中有掉钻情况发生。厚度0~6.30 m,平均2.77 m。层底埋深32.00~42.20 m,平均33.06 m。

4) 砂岩(K₁hk¹),棕红色,局部为灰绿色,中厚层,细粒结构,致密,泥钙质半胶结,成岩型差,为软岩。顶部2~3 m为强风化层。该层普遍夹有中~厚层状细砂岩、砂砾岩,岩性呈松散或短柱状,遇水或暴露地表极易软化崩解或风化。

2 建筑物倾斜变形情况及原因分析

该栋住宅楼于2008年1月开工建设,2010年6月竣工。自2013年起,在使用过程中发现了墙体裂缝,结构整体出现倾斜现象,随着时间的推移不均匀沉降日益增加,倾斜变形不断发展。截至2016年1月,上部结构整体倾斜率最大达13.76‰(见图1),根据GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》^[7],整体倾斜率已超过规范规定的允许值3‰。

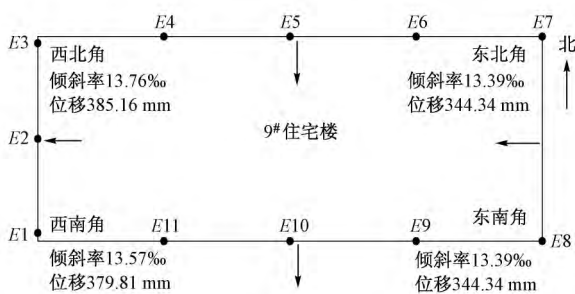


图1 楼体倾斜示意及各监测点平面布置

通过对9号楼结构形式、地层情况、周围环境、施工合理性等方面进行系统分析,发现该建筑物的倾斜和不均匀沉降是由多种不利因素共同作用的结果,详述如下:

1) 原设计采用桩基础受力,桩基须穿透深厚的杂填土层,进入中风化砂岩。因施工原因,桩基未进入持

力层,桩基承载形式由端承桩变为摩擦桩,且桩底基本无扩大头,使得桩基承载力不满足要求。这是建筑物不均匀沉降的主要因素。

2) 建筑场地为杂填土回填场地,回填厚度为3.00~40.20 m,回填土层为欠固结土。原场地作为弃土场使用,在回填过程中未经过任何碾压,压实度极低,在固结沉降作用下会对桩体产生负摩阻力,增加基础顶部荷载,进而引起基础沉降。此外,随着天然降雨及管线跑漏水,以及填土后老沟槽地形地貌的改变,原有沟道自然排水通道堵塞,致使老沟槽内地下水位逐年上升,回填土的工程性状发生改变,使桩基的端阻力和侧阻力下降。这是地基土先天的不利因素。

3) 原建筑北侧桩基础数量相对较多,南侧基础较少,使得南北基础刚度不一致,且刚度中心与质量中心不重合,出现偏心荷载。

3 纠偏方案

该建筑物南侧沉降大,北侧沉降小,根据倾斜方向、差异沉降量及地基基础形式,确定北侧为迫降区,南侧为阻沉调整区。综合考虑各种纠倾加固措施后,选用桩周应力解除+截桩迫降综合纠偏方法,并辅助采用锚杆静压桩和坑道回填注浆对地基进行加固^[8]。

3.1 锚杆静压桩止倾

在建筑物监测过程中发现,楼体向南倾斜的速率逐渐变大。为了迅速止倾,在建筑物南侧地下室钢筋混凝土底板上布置一排锚杆静压桩,锚杆静压桩的压桩力不得小于500 kN。通过锚杆静压桩的实施,使上部结构荷载迅速传至新增的锚杆静压桩上,达到了迅速止沉的目的,为后期的纠偏工作奠定了基础。

3.2 桩周应力解除法纠偏

1) 桩周应力解除原理

依据场地地层情况确定本层饱和填土的厚度和深度,在建筑物倾斜沉降较小的一侧桩周布置垂直钻孔,并通过竖向掏土的方式解除孔周的径向应力。应力解除孔内的饱和土在上部荷载作用下向钻孔方向水平侧移,通过清理孔内淤泥,使得上层土体发生竖向沉降,牵带桩周土体向下移动,增大了桩体的负摩阻力,从而带动桩体发生竖向移动,最终达到纠倾效果。桩周应力释放纠偏原理如图2所示。

2) 掏土量计算

主要掏土区为饱和填土层,在每个桩基础周围均匀布置3个竖向掏土孔。饱和填土层采用麻花钻掏土,掏土孔每孔掏土量计算式为

$$V = \frac{1}{N} \Delta S_{\max} BL \quad (1)$$

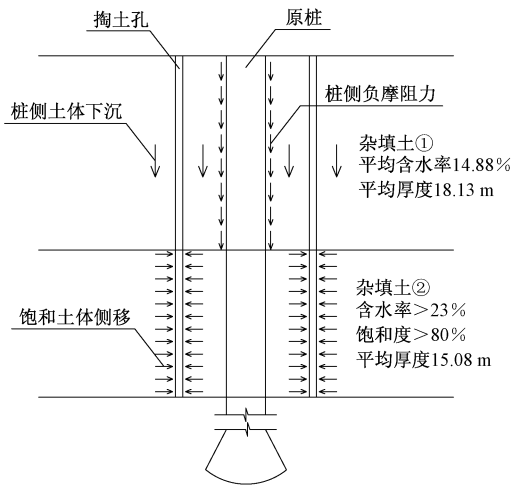


图 2 桩周应力释放纠偏原理示意

式中: V 为设计掏土量; N 为掏土孔数量; ΔS_{\max} 为基础边缘最大沉降量; B 为平行于纠倾方向的基础宽度; L 为垂直于倾斜方向的基础长度。

实际掏土量根据掏土量与楼体沉降变化关系进行动态调整。

3) 桩周应力解除法纠偏效果

通过对楼体位移监测,采用桩周应力解除法纠偏时楼体的沉降变形曲线如图 3 所示。

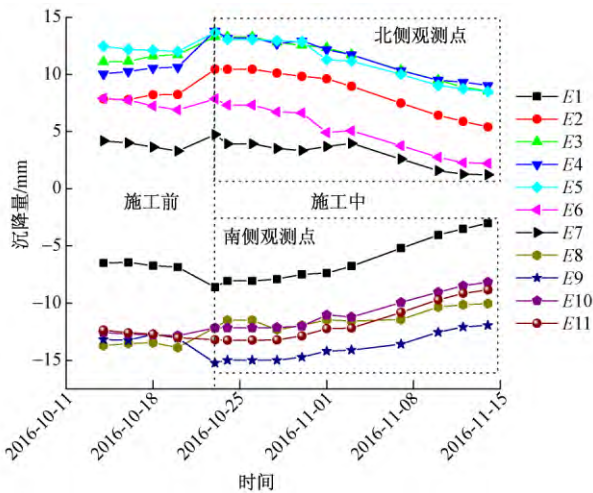


图 3 应力解除法纠偏楼体沉降变化曲线

由图 3 可知,在掏土施工前,锚杆静压桩的实施基本达到了止倾的目的,南侧楼体监测点基本保持不动,南侧观测点沉降曲线近于水平。锚杆静压桩发挥作用后,对北侧立即实施掏土作业,随着掏土工作的进行,南北两侧楼体位移开始出现转折,南侧上移,北侧沉降,两侧均朝着目标方向偏移,偏移量几乎相同,整个楼体出现了“跷跷板”效应,使得纠偏达到了事半功倍的效果。桩周应力解除法的实施,验证了锚杆静压桩对南侧的止倾效果,以及桩周应力解除法的可

行性,为后期截桩迫降奠定了基础,达到了辅助纠偏的目的。

3.3 截桩迫降法纠偏

1) 截桩迫降纠偏原理

采用桩周应力解除法使楼体向预期方向发生回倾,为防止楼体在后期截桩纠倾过程中向反方向复倾,在以上工作实施后,进入了截桩纠倾阶段。

本次截桩采用金刚石钻机垂直桩身钻圆形截桩孔。截桩孔之间预留混凝土条带,作为防止突然下沉的保障措施。在截桩孔内充填沙袋,在预留条带达到塑性变形、楼体发生沉降后,截桩孔被挤压,压迫孔内沙袋,然后通过可控的掏出沙袋内细沙的方式控制楼体的沉降,如图 4 所示。



图 4 截桩迫降

采用截桩法进行建筑物纠偏时,假定楼体沉降较大一侧在相应的止倾工作后不发生竖向位移,依据相似三角形原理,精确计算每根桩基的纠倾截桩量。通过相应的内力计算工具,计算出每根桩的实际受力情况,根据桩体混凝土的实际抗压强度和纠倾截桩量,较为精确地计算出截桩孔直径和预留混凝土条带的宽度。利用建筑物自重,使预留水平孔间的桩体混凝土条带逐步达到塑性破坏,建筑物逐渐缓慢下沉,使楼体整体倾斜率恢复到规范允许范围之内,最终达到纠倾效果。

2) 截桩量计算

以南侧各点为不动点,依据监测数据北侧各点的差异沉降量分别为 $E3(126.5 \text{ mm})$, $E4(128.8 \text{ mm})$, $E5(131.0 \text{ mm})$, $E6(133.3 \text{ mm})$, $E7(135.5 \text{ mm})$ 。由相似三角形原理确定每根桩的截桩量,具体桩位及沉降量如图 5 所示。

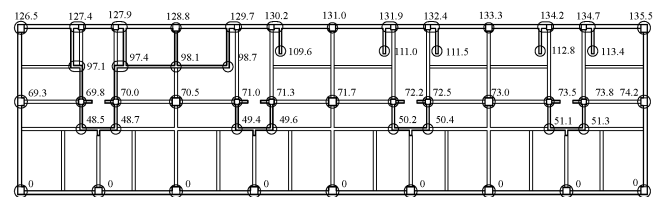


图 5 截桩桩位及沉降量示意(单位: mm)

3) 截桩孔及混凝土预留条带计算

截桩部位首先在混凝土条带最窄的区域即截桩孔圆心所在的平面发生塑性变形, 该平面面积 A 为混凝土条带面积 A_2 与钻孔面积 A_1 之和。混凝土条带与钻孔形状均为曲边梯形, 依据微积分原理, 以直代曲, 截桩部位以上总荷载标准值 F_N 为

$$F_N = F_k + G_k + F_T \quad (2)$$

$$A_1 = \sum_{i=1}^n dL_i \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{F_N}{f_{cu}} \quad (4)$$

$$A = A_1 + A_2 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5)$$

式中: F_k 为相应于荷载效应标准组合值时建筑物上部结构传至基础顶面的竖向力; G_k 为截桩部位以上基础自重及基础上覆土重; F_T 为截桩过程中的竖向施工荷载; d 为截桩钻孔直径; n 为截桩孔数量; L_i 为第 i 个截桩孔长度; f_{cu} 为原桩体混凝土抗压强度, 由试验测定; D 为原桩体直径。

由式(2)一式(5)联立确定钻孔位置和钻孔直径, 从而也确定了预留混凝土条带的宽度。

经室内抗压强度试验, 取原桩体混凝土抗压强度最小值 18.5 MPa 作为计算值, 则混凝土预留条带宽度约为 30 mm。钻孔直径依据钻头规格和桩基下沉量具体确定。

4) 应力及沉降控制

在每根需要截桩的部位标定钻孔位置, 选取合适的钻头和钻机, 按照事先标定好的位置钻成一排水平孔, 如图 6 所示, 水平孔之间应预留混凝土条带。该部分混凝土所承受的力基本等于或略大于每根桩的实际受力, 以防止建筑物突然下沉。

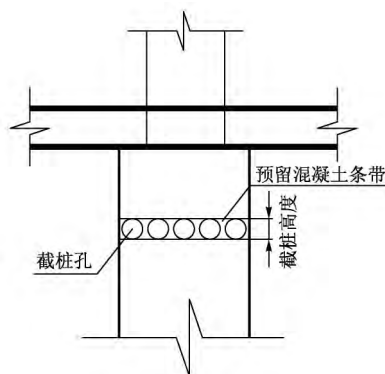


图 6 截桩孔布置

在实际施工过程中, 要求截桩作业在最短工期内迅速完成。由于截桩部位混凝土处于极限应力状态, 因此, 要尽可能减小外部荷载对楼体的扰动, 避免楼体

沉降过快或沉降突变带来的不可控因素。同时, 相邻的截桩部位不能在同一水平线上, 避免在水平荷载作用下截桩薄弱部位发生整体剪切破坏。在截桩过程中应隔桩截桩, 对称截桩, 避免局部承载力不足而发生部分楼体下沉, 从而引起上部结构开裂或破坏。

为了防止在纠偏过程中截桩部位产生突然沉降或过量沉降, 在纠偏前须要准备一定量的细沙, 包装成孔径大小的柱体, 待到纠倾阶段, 将钻机形成的水平孔用细沙柱体代替填充, 但需要预留一定的空隙, 使桩体具有一定的下沉空间, 同时密切关注楼体变形倾斜的监测数据, 根据沉降速率的快慢来控制掏沙量, 从而控制楼体的下沉速度。

5) 截桩恢复

纠倾工作完成后及时将截断的桩体内压溃的混凝土清除, 并采用植筋的方法, 将上下两侧桩身混凝土用钢筋进行连接。在裂隙较小部位预先进行特种环氧树脂灌封胶进行黏结加固, 然后将原桩身凿毛清理, 截桩部位采用 C35 自密实混凝土与微型桩承台一并进行浇注。须确保对接后的桩体完整可靠, 各项指标满足国家及行业规范要求。

3.4 回倾控制

纠偏工程的最终目标是使建筑物回倾至目标值, 满足相关规范要求, 同时也要保证建筑物中安全、平稳、线性地回倾, 因此, 需根据建筑物的特性合理确定回倾速率。根据 JGJ 270—2012《建筑物倾斜纠偏技术规程》^[9] 及以往纠偏成功案例, 本次迫降纠偏控制回倾速率在 2~10 mm/d。由于基础和结构刚度较大, 结构整体性较好, 回倾速率在纠偏开始与结束阶段取小值, 纠偏过程中取大值, 整个纠倾过程采用“缓慢启动, 均匀回倾, 平稳锁定”的原则。

监测工作是控制回倾速率和沉降速率的关键。本次纠偏工程采用了沉降监测、倾斜监测、水准监测等多种监测方法^[10]。每项方法之间相互验证, 优势互补, 增加了监测数据的可靠性, 同时也服务于纠偏工程, 达到动态化设计, 信息化施工。

4 纠倾加固流程与效果评价

4.1 纠倾加固流程

考虑到该场地地质情况的特殊性, 确定了本工程纠倾加固流程, 如图 7 所示。

9 号住宅楼于 2016 年 10 月 1 日开始纠偏加固工程, 严格按照设计及施工方案进行纠偏加固, 在纠偏过程中采用控制技术手段, 对楼体的沉降及倾斜量实施动态监测, 最终使楼体安全、平稳、线性回归, 倾斜率由原来的 13.76‰ 回归到 2.8‰。

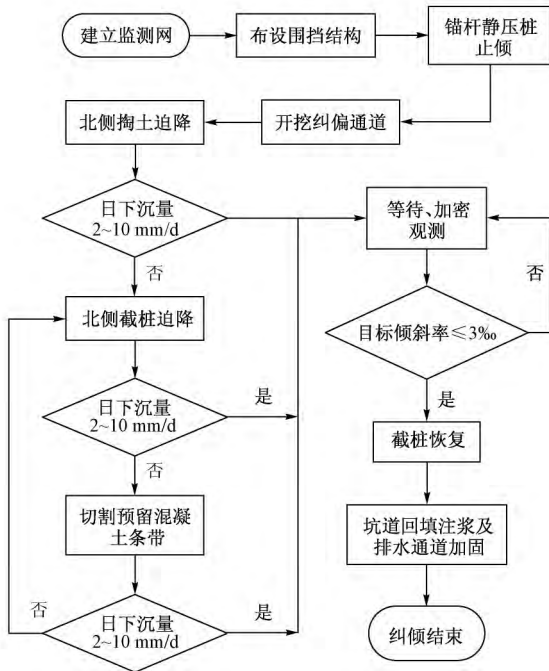


图 7 纠偏加固流程

4.2 楼体沉降变化

整个楼体从开始施工到施工结束,各监测点沉降量时程变化曲线见图 8。可以看出,在施工前期楼体依然处于不稳定状态,南侧继续下沉,10 月份以后开始对楼体南侧进行锚杆静压桩止倾,北侧采用桩周应力释放辅助纠偏,各监测点沉降量开始出现转折,楼体北侧出现下沉趋势,沉降曲线平缓,下沉速率慢,基本达到辅助纠偏的目的。因此,开始第 2 阶段截桩迫降法纠偏,楼体沉降量大,沉降速率快,可达到快速纠偏的目的。通过后期的截桩恢复及加固措施,楼体沉降逐渐趋于稳定,沉降量基本达到预期目标。

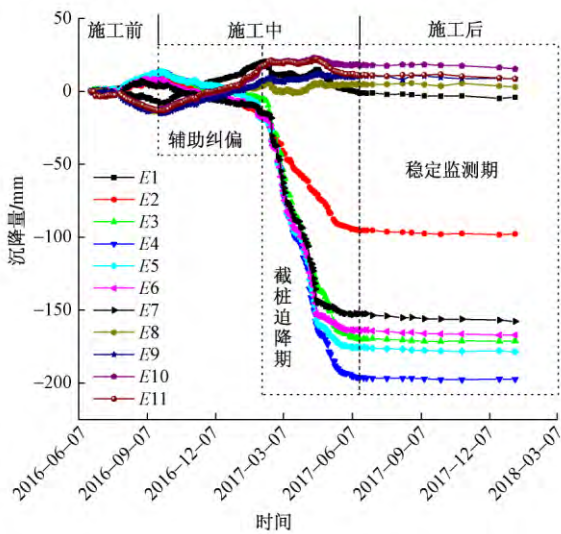


图 8 各监测点沉降量时程变化曲线

4.3 楼体倾斜率变化

整个楼体从开始施工到施工结束,倾斜率时程变化曲线见图 9。可知在对楼体采取止倾及纠偏措施以前,整个楼体的倾斜率在持续增大,最大倾斜率达 13.76‰,虽然掏土纠偏使得楼体有回倾趋势,但倾斜率变化不明显,很有可能在外力因素作用下倾斜率继续增加。采用截桩迫降纠偏后,倾斜率逐渐减小且变化速率快,逐渐稳定在 3‰以内,满足相关规范的要求。

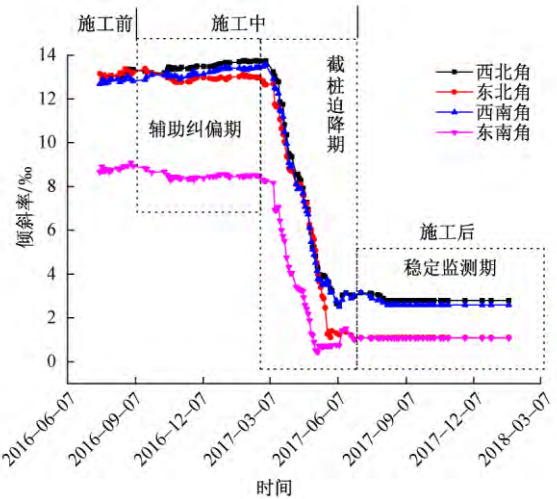


图 9 楼体倾斜率时程变化曲线

5 结论

本次住宅楼纠偏加固工程的成功实施,为复杂深厚填黄土地区既有建筑纠偏加固工程奠定了基础,提出了截桩迫降的基本理论及计算公式,填补了国内在深厚杂填土回填场地上高层建筑物纠偏的空白。主要结论如下:

- 1) 对继续倾斜的楼体,采用先止倾后纠倾的工序是必要的。在截桩迫降前为防止截桩后由于桩体本身的抗拉强度大大降低,使建筑物发生复倾,在存在饱和下卧层的地层中预先采用竖向应力解除法进行辅助纠偏十分必要。
- 2) 采用“截桩迫降为主,竖向应力解除为辅”的综合纠偏方法是切实可行的,尤其是对于复杂深厚填土地区既有建筑的纠偏,这是一种控制精度较高的组合纠偏方法。
- 3) 相比其他迫降纠偏法,截桩迫降工期短,造价低,可控性强,对上部结构损伤小。对于倾斜率较大、工期紧迫的桩基纠偏工程,采用截桩迫降法能达到快速纠偏的目的,但必须按设计步骤严格执行,加强对楼体沉降和倾斜监测,对异常情况及时调整施工方案和工艺。

4) 截桩迫降的理论计算方法切实可行,对钻孔截桩具有指导意义。实际施工中应根据钻头尺寸规格及工程情况进行调整,严格控制桩体下沉量。

5) 深填黄土地区新建建筑物需要考虑地基土体固结沉降和湿陷沉降,基础宜采用桩基形式且必须保证桩端进入持力层,同时应做好排水系统,防止雨水及生活用水渗漏至地基中,造成地基土体湿陷下沉。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 123—2012 既有建筑地基基础加固技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 程晓伟, 王楨, 张小兵. 某高层住宅楼倾斜原因及纠倾加固技术研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 756-761.
- [3] 杨志昆, 邓正定, 梁收运, 等. 某筏式基础高层建筑纠偏加固技术研究[J]. 施工技术, 2017, 46(4): 104-109.
- [4] 孙琪, 胡明珠, 王逢睿, 等. 某高层住宅楼基础纠偏加固设计及施工监控[J]. 建筑技术, 2017, 48(8): 838-841.
- [5] 戴占彪, 付素娟, 李旭光, 等. 软土地区某多层房屋纠倾加固技术[J]. 施工技术, 2014, 43(16): 44-47.
- [6] 付素娟, 李旭光, 贾媛媛. 软土地区截桩迫降纠倾法数值模拟分析[J]. 建筑技术, 2016, 47(3): 234-237.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 270—2012 建筑物倾斜纠偏技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [10] 中华人民共和国建设部. JGJ 8—2007 建筑变形测量规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

Deviation-rectifying and Strengthening Technologies of Existing Buildings in Deep Filling Area

KONG Degang¹, ZHANG Shijing², ZHAO Chengjiang², LIU Yong³, ZHANG Xiaobing²

(1. China Railway Academy Co. Ltd., Chengdu Sichuan 611730, China; 2. Northwest Research Institute Co. Ltd. of China Railway Engineering Corporation, Lanzhou Gansu 730000, China; 3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract A 12-story residential building is located in the complex and about 40 m deep filling area in Lanzhou city. A series of uneven settlement caused it serious inclining. On the basis of cause analysis, the deviation-rectifying and strengthening technologies in filling areas were studied. A comprehensive deviation-rectifying method of stress release around pile and forced settlement by pile cutting was taken. Through scientific and reasonable construction procedures, the final building inclination rate returned from 13.76‰ to 2.8‰, and meets the requirements of relevant national codes. The basic principle of forced settlement by pile cutting was expounded and its theoretical calculation formula was put forward. This practice filled in the blank of deviation-rectifying of high-rise building in deep miscellaneous filled soil including filled soil, saturated filled soil, backfill stone layer, etc.

Key words Deep filling foundation; Combined correction method; Field test; Existing building deviation-rectifying; Stress release around pile; Forced settlement by pile cutting

(责任审编 李付军)