

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1147

斜孔掏土应力解除法治理煤矿生根井塔偏斜研究

况联飞¹, 周国庆¹, 王建州¹, 朱坤朋², 商翔宇¹

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中铁上海设计院集团有限公司徐州设计院, 江苏 徐州 221000)

摘 要: 为验证斜孔掏土应力解除法治理华东某双向偏斜生根井塔的适应性和有效性, 综合理论分析、数值模拟和现场实测研究了斜孔掏土孔周塑性区发展、纠偏机制及掏土各因子对纠偏效果的影响规律。结果表明, 开孔后孔周塑性区半径与孔径和孔周应力成正比, 且随钻孔深度增加而增大。掏土纠偏的内在机制在于钻孔能有效解除孔周一定范围内的应力, 使孔周土体不断向孔内坍塌, 进而减小开孔侧井筒的外荷载, 与对侧产生应力差值, 促使井塔回纠。通过正交试验设计极差分析得出钻孔排宽度为影响掏土纠偏的最主要因子, 其次为钻孔深度、孔径和孔距井筒中心线距离, 且斜孔纠偏效果优于竖直孔。最后, 基于模拟获得的最优纠偏参数组合设计了现场纠偏方案, 并对井塔偏斜和井筒受力进行施工监测得出, 斜孔掏土应力解除法有效遏制了生根井塔的偏斜发展, 目前井塔偏斜和井壁受力均处于安全可控状态。

关 键 词: 应力解除法; 井塔; 纠偏; 井壁监测

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 04-1422-09

Research on inclined digging technology for deviation rectification of rooting mine shaft tower

KUANG Lian-fei¹, ZHOU Guo-qing¹, WANG Jian-zhou¹, ZHU Kun-peng², SHANG Xiang-yu¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Xuzhou Design Institute of China Railway Shanghai Design Group Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221000, China)

Abstract: To verify the adaptability and effectiveness of inclined digging technology in the rectification of a deviated rooting mine shaft tower in East China, the plastic zone around the inclined hole, the mechanism of the technology, and the influence of various factors on the rectification effect are studied by theoretical analysis, numerical simulation and field measurement. The results show that the radius of the plastic zone is proportional to the diameter of the hole and the stress around circle hole, and it increases with the depth of drilling hole. Drilling can effectively reduce the stress within a certain range of the digging hole, so that the soil around continuously collapses, and then the difference between external load on drilling side and the shaft lining can be reduced, which produces a stress difference with the opposite to promote the shaft tower back to correct. Based on the orthogonal experiment design, we find that the most important factor to influence the deviation is the row width of the drilling, and depth, diameter and the distance between drilling row and shaft centreline. Last, according to the study results, the optimal deviation scheme is designed by long term monitoring of the shaft tower deflection and lining stress, we conclude that this drilling technology is effective in the deviation rectification of rooting mine shaft tower.

Keywords: stress relieving method; mine shaft tower; rectification; shaft lining monitoring

1 引 言

深厚表土层中立井井筒施工多采用冻结法^[1], 井筒周围土体在冻融循环作用下承载力将大幅下降。为避免落座于其上的井塔基础产生不均匀沉降,

在我国 20 世纪 70~80 年代, 立井井塔通常选择直接建造在与井筒刚性相连的倒锥台基础之上, 也即井塔基础生根于深长井筒。这一结构型式能够很好地传递井塔荷载, 但同样也由于井塔-井筒变形高度协调一致, 井筒结构破坏变形即可导致井塔出现倾

收稿日期: 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51504245, No. 41502271, No. 41772338); 江苏省博士后基金(No. 1402009B)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51504245, 41502271, 41772338) and the Postdoctoral Sustentation Fund of Jiangsu Province, China (1402009B).

第一作者简介: 况联飞, 男, 1984 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事深部土与地下工程等方面的研究工作。E-mail: klfumt@126.com

斜等病害。

我国华东地区某矿主井井塔即采用这一生根基础型式,受地层的不均匀沉降、井筒井壁的多次破裂治理以及改扩建导致的主井提升超负荷运行等多因素综合影响,出现了塔顶向北 122 mm、向西 39 mm 的双向偏斜,且偏斜发展未见稳定,严重制约着矿井的正常提升与安全生产,急需进行纠偏处理。

查阅相关井塔纠偏的文献报道不难发现,目前国内对偏斜井塔的治理多为钢结构井塔(架)^[2-5]。钢结构井架主要由立架和斜撑两部分组成,其中立架一般通过支撑框架坐落在井颈或围土层之上,而斜撑则在围土层之上设独立基础,此类井塔并不与深长井筒刚性相连,也即不生根。同时由于钢结构的采用以及提升机下置,其自重较轻,仅百吨重量级,通常采用围土地层先期加固,后千斤顶顶升斜撑的办法即可短期内完成纠倾处理,其操作难度相对简单。而文献报道中仅有的倾斜混凝土结构井塔^[6]为独立箱型基础,也不与井壁存在刚性连接,同样基于地层加固和人工开挖凿除的办法实现了井塔纠倾。可见对于本文中这类重达数千吨且生根座落于深长井筒之上的混凝土井塔纠偏目前尚无可类比的成功案例值得参考,其纠偏治理难度空前。

另一方面,在古塔^[7]、烟囱^[8]、输电线路铁塔^[9]以及高层建(构)筑物^[10]等纠偏处理中诸见有采用地基应力解除法治理成功的案例。其基本原理^[11]为在倾斜建筑物沉降较小一侧布设大直径竖直或倾斜钻孔排,使地基应力在局部范围内得到解除,促使土体向该侧移动,从而增大该侧的地基沉降量以达到纠偏的目的。但不可否认的是这类结构通常基础较浅,存在基础底面,掏土施工甚至能够深入到基础下方,其纠偏处理相对容易,但该方法是否也适用于基础刚性连接于 600 多米深立井井筒之上的井塔结构纠偏则需要进一步的研究和实践检验。

笔者综合理论分析、数值模拟和现场实测对斜孔掏土孔周塑性区发展、纠偏内在机制及掏土各因子影响纠偏效果的规律展开系统研究。

2 掏土孔孔周土体弹塑性变形分析

假定井筒周围土体为理想弹塑性体,服从摩尔-库仑屈服准则,采用岩土介质小孔扩张理论^[12]对土体开孔后孔周塑性区半径进行求解可得掏土孔内压力 p 与塑性区半径 C 之间满足以下关系:

$$\frac{C}{a} = \left\{ \frac{(1+\alpha)[Y+(\alpha-1)p]}{2[Y+(\alpha-1)p_0]} \right\}^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (1)$$

式中: C 为掏土成孔后形成的塑性区最大半径; a 为掏土成孔扩张后的半径; p 为钻孔扩张后孔内压力; p_0 为孔内初始内压力; $\alpha = (1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi)$; $Y = 2c\cos\varphi/(1-\sin\varphi)$, φ 为土体内摩擦角, c 为黏聚力。

由式(1)可知,对于摩尔-库仑材料孔周塑性区半径与掏土孔初始应力 p_0 、成孔后孔壁应力 p 、土体内摩擦角 φ 和黏聚力 c 均有关。假设本工程中井筒周围土体为均一饱和黏土 $c=19\text{ kPa}$, $\varphi=26^\circ$, $\rho=1.75\text{ g/cm}^3$, p_0 可取不同深度处土体水平应力分量,则有: $\left. \frac{C}{a} \right|_{p=0} = 0.67$, $\left. \frac{C}{a} \right|_{p=1.7} = 1.00$, $\left. \frac{C}{a} \right|_{p=15} = 3.11$, $\left. \frac{C}{a} \right|_{p=30} = 7.49$, 孔周塑性区范围随深度的变化如图 1 所示。

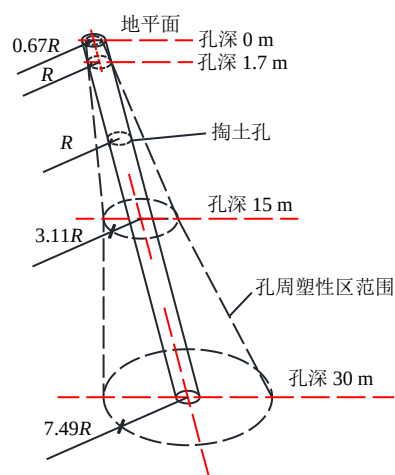


图1 倾斜掏土孔孔周塑性区范围示意图
Fig.1 Schematic of the plastic area around the hole

由图可知,随掏土深度增加,孔周塑性区不断增大。自地表至-1.7 m 段,掏土成孔后由于孔壁存在土拱效应,孔周土体具有一定强度,且此段土体深度浅,孔周应力较小不足以形成塑性区。其中 $h=-1.7\text{ m}$ 时,孔壁受力达到极限平衡状态,随着深度增加,孔壁处土体自重应力不断增加,塑性区范围不断扩大。孔周塑性区半径与掏土孔半径、孔周应力成正比,实际掏土施工中,随掏土深度增加,掏土率不断降低,但由于深部土体应力较大,掏土率虽下降但也应能在孔周产生较为理想的塑性区范围。

3 斜孔掏土纠偏三维有限元分析

为进一步探究斜孔掏土纠偏的内在机制所在,分析掏土深度、孔排宽度、钻孔倾角以及孔径等诸因子对纠偏效果的影响,并定量获取与工程条件相对应的最优纠偏参数组合,进行以下三维有限元模拟。

3.1 模拟细节

本工程中原型井塔为外筒内框架钢筋混凝土结构,其平面尺寸为 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$,高 63 m 。井筒内半径为 2.75 m ,外半径为 3.75 m ,且经测量测定井筒在地下 -61 m 处倾斜终止,目前塔顶北偏 122 mm ,换算成角度约为 0.1° ,西偏 39 mm ,约为 0.03° 。但考虑井筒-井塔均为对称结构,以下模拟仅考虑井塔-井筒南北方向倾斜,并按实际倾斜状态建立实体模型。经建模试算,确定模拟土体范围长宽均为 100 m 、深为 75 m 能确保土体水平方向位移基本为 0 。对模型边界底部 $z=-75\text{ m}$ 平面选择约束 x 、 y 、 z 方向平动及转动的固定铰支座,天然地面 $z=0$ 处于自由状态,模型不进行约束。四周边界不受剪应力作用,采用滑动铰支座,固定土体水平方向位移,竖直方向不受约束,即土体可自由产生沉降变形。

根据主井施工地质勘察报告,数值模拟中井筒穿越土层土体材料的相关参数如表 1 所示。

表 1 土体材料参数

Table 1 Parameters of soil in simulation

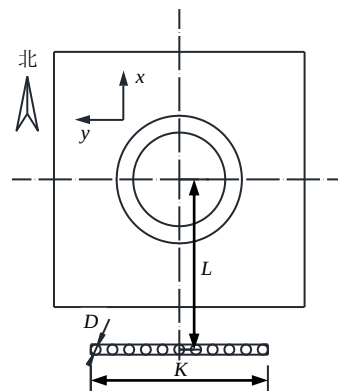
序号	岩层名称	埋深 /m	密度 /(g/m^3)	弹性模量 /MPa	泊松比	内摩擦角 /($^\circ$)	黏聚力 /kPa
1	杂填黏土	0.00~8.46	1.62	4.13	0.34	21	17
2	土黄色黏土	8.46~21.80	1.64	6.42	0.37	26	24
3	含细砂层黏土	21.80~34.39	1.77	9.64	0.40	24	18
4	黏土	34.39~51.61	1.72	15.9	0.37	29	24
5	含粗砂黏土	51.61~75.00	1.83	48.1	0.40	27	19

数值模拟的基本步骤包括依次计算井塔、井筒建造前后的初始地应力,获得井塔-井筒使用状态下的应力和变形,按设计方案杀死孔中土体单元,模拟掏土开挖,读取井塔-井筒的形变量。

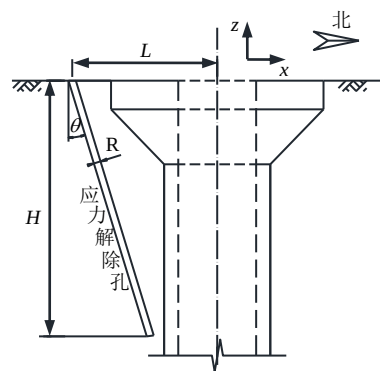
3.2 掏土施工参数敏感性正交试验分析

采用正交试验设计的方法,选取倾斜掏土 5 个主要技术参数进行纠偏敏感性分析:①掏土孔直径 D ;②掏土孔排总宽度 K (由理论分析可知,孔口段土体多发生缩孔坍塌现象,孔下部由于塑性区范围不断扩大相连,进而可对实际钻孔排按成槽考

虑);③掏土孔排距离井筒中心线距离 L ;④掏土孔垂深 H ;⑤孔倾角 θ ,各参数含义如图 2 所示。



(a) 斜孔掏土施工平面布置图



(b) 斜孔掏土施工剖面布置图

图 2 倾斜掏土施工各技术参数示意图

Fig.2 Schematic diagram of parameters of inclined digging

依据工程现场实际,选用 $L25(5^6)$ 正交试验表进行上述 5 因子 5 水平的数值模拟试验,其中孔排宽度 K 各水平依次为 7 、 11 、 15 、 18 、 20 m ;孔直径 D 依次为 0.20 、 0.25 、 0.30 、 0.35 、 0.40 m ;孔距井筒中心线距离 L 依次为 8 、 9 、 10 、 11 、 12 m ;孔倾角 θ 依次为 4° 、 6° 、 8° 、 10° 和 12° ;孔垂深 H 依次为 20 、 25 、 30 、 35 m 和 40 m 。但实际上以上参数组合存在部分不可行现象,原因在于当掏土孔距离 L 一定时,随倾角 θ 的增大,孔深 H 并未达到设计值钻孔即可能与井筒相接,进而造成掏土孔穿透井壁的虚假现象。为避免此种情况出现,在极差分析模拟中暂不考虑掏土孔倾角的变化,先计算 $\theta=0^\circ$ 时其余各掏土技术参数对井塔偏斜的影响。对模拟获得的井塔回倾量(定义为井塔塔顶与塔底井口回纠位移差值,也即该差值为 0 时井塔完全纠正)正交试验结果进行极差分析,见表 2。

表2 正交试验结果极差分析

Table 2 Range analysis about the results of orthogonal test

因子	K	D	L	H
I_{1j}	-31.56	-94.15	-147.68	-92.28
I_{2j}	-88.55	-120.24	-136.41	-125.54
I_{3j}	-137.99	-134.83	-133.80	-123.00
I_{4j}	-184.32	-145.38	-116.75	-145.03
I_{5j}	-193.57	-141.39	-101.35	-150.14
R_j	162.02	51.23	46.33	57.86

由表可知, 各掏土技术参数极差值 R_j 敏感性排序从大到小依次为孔排宽度 K 、孔深 H 、孔直径 D 和孔距井筒中心线距离 L , 其中孔排宽度 K 极差约为次之因子孔深 H 的 2.8 倍, 说明宽度 K 对纠倾效果影响最为敏感, 因此, 在纠倾实施过程中应将掏土孔排宽度作为主要调控因子。除宽度 K 外其余三因子极差量值相差不大, 说明三者对纠倾效果敏感性同样产生影响, 进而可从施工安全、便利和经济性等方面合理选择三者最优参数。

以上数值试验中暂未考虑钻孔倾角 θ 的影响, 为进一步探讨斜孔与竖直孔掏土纠偏效果的优劣, 选取 5 组不同工况下的井塔回倾量分析结果, 如图 3 所示。

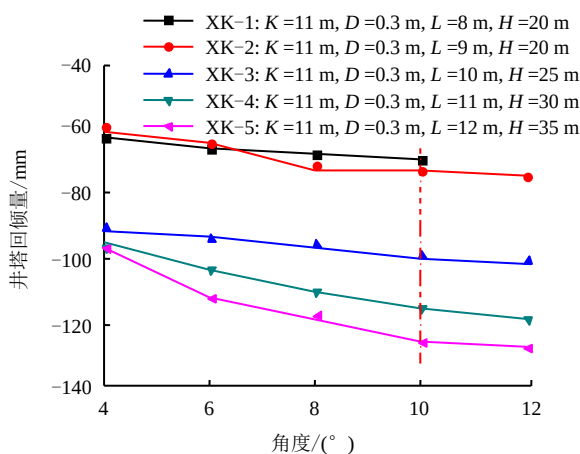


图3 井塔回倾量与钻孔倾角之间关系

Fig.3 Relationship between back tilting of shaft tower and θ

由图可知, 井塔回倾量值随钻孔倾角的增大而增大, 且孔深越大, 增加斜孔角度, 井塔的回倾增加的越明显。如孔深为 20 m 时, 井塔回倾量随钻孔倾角的增长率约为 11.1%, 而当孔深达 35 m 时, 增长率增加至 31.4%。但当钻孔倾角超过 10°后井塔回倾量随钻孔倾角的增长率下降, 由此斜孔倾角的选定应综合施工便利性和机械设备性能等综合因素确定。

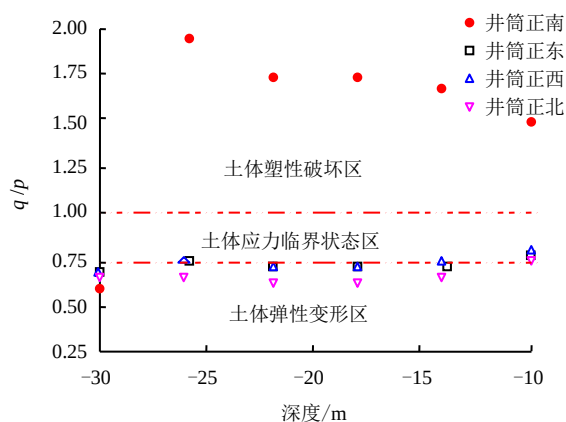
3.3 斜孔掏土纠偏机制分析

由上述分析及井塔回倾定量数值可以看出, 斜

孔掏土应力解除法能够有效地实现本工程生根井塔的回纠, 但其纠偏机制究竟如何, 以下从井筒围土和井壁受力两方面分析二者在开挖前后的改变。

(1) 井筒围土临界状态受力分析

由上述理论分析可知掏土开挖应力解除后, 土体向孔内产生塑性屈服流动, 继而发生变形破坏, 土体临界状态理论是判定土体是否达到塑性破坏变形的理论依据。选取典型工况 ($K=11$ m, $D=0.4$ m, $L=8$ m, $H=30$ m) 井筒中心外 5 m (井壁外 1.25 m) 东、南、西、北 4 个方位, 深度分别为 -10、-14、-18、-22、-26、-30 m 处土体单元的主应力, 计算各单元偏应力 q 与有效应力 p 的比值, 如图 4 所示。

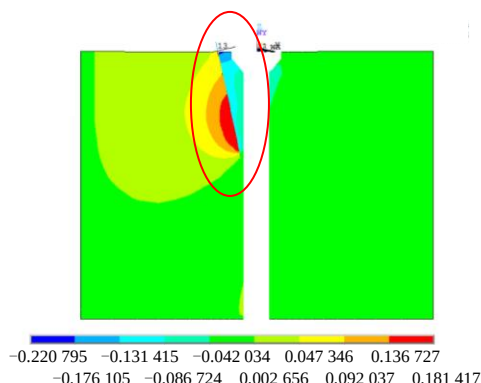
图4 井筒围土不同深度处土体单元 q/p 比值Fig.4 The q/p values of soil element in different depths

不同性质土体临界状态 q/p 比值多在 0.75~1.00 之间, 由图 4 可知, 未开挖扰动土体单元该比值均较小, 大部分小于 0.75, 处于弹性变形阶段。但开挖侧深度范围内该比值均大于 1, 说明开挖范围内土体已超出临界状态发生塑性破坏, 仅在孔底 -30 m 处, 该处土体单元 q/p 为 0.58, 说明掏土孔以下范围土体仍处于弹性变形状态。另外, 由 q/p 比值随深度增加不断增大还可以得出, 越深处的土体塑性发展越明显, 这与上述理论掏土孔孔周土体弹塑性变形分析结论是完全一致的。也即斜孔掏土改变了围土原有的应力状态, 使孔周土体进入塑性状态进而发生变形破坏。

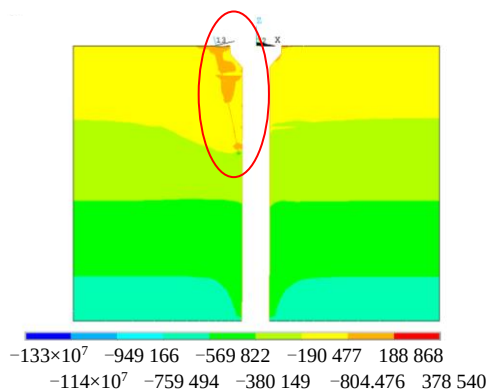
进一步分析斜孔掏土施工后井筒围土在 x 方向位移及主应力变化云图如图 5 所示。

斜孔开挖后, 钻孔南侧土体向孔内发生位移且沿深度向下不断增加。同样北侧土体也在向孔内位移, 但最大位移发生在孔口位置附近且沿深度向下不断减小。钻孔南北两侧土体向孔内发生位移沿深度的变化规律不同且与上述理论分析存在差别的原因在于, 理论计算基于平面应变问题分析, 未考虑

钻孔的三维空间走向。但同时该差异也进一步表明,按一定倾斜角度布置钻孔对于土体产生坍塌进而回纠井塔更为有利。此时土体的位移方向与井筒的回倾需求保持一致,进而减小对井筒回倾的阻力。而应力云图则显示,随掏土开挖井筒与掏土孔之间土体水平应力不断减小,使土体更易发生向孔内的水平剪切变形,促使掏土孔悬空侧土体向孔内坍塌,为井筒的回倾创造了位移空间。



(a) 井筒围土 x 方向位移云图 (单位: m)



(b) 井筒围土水平方向主应力云图 (单位: Pa)

图 5 井筒围土 x 方向位移及应力云图

Fig.5 The first principal stress and displacement nephogram of soil in x direction

(2) 井壁径向受力分析

选取典型工况 ($K=11$ m, $D=0.4$ m, $L=8$ m, $H=30$ m) 下井壁不同深度处径向应力作雷达图, 见图 6。

掏土施工沿井筒南侧进行, 由图 6 可知, 随深度增加井壁径向应力增大, 同时南北两侧应力差值也不断增加, 掏土侧井壁的径向应力数值约为其他方位的 $1/3 \sim 1/2$, 最大差值达 156.23 kPa。可见, 掏土施工能显著改变井壁的受力状态, 利于井塔回倾。但在钻孔底部井壁径向应力差值减小, 从而也说明了掏土施工对井壁受力的影响范围有限, 现场

施工监测可集中观测钻孔深度段的井壁受力。

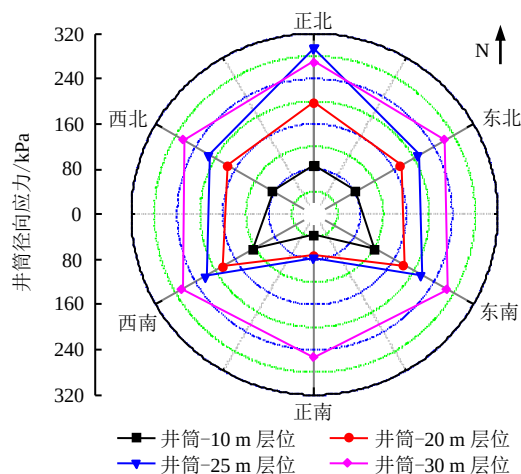


图 6 井壁不同层位径向应力图

Fig.6 Radial stress of shaft from different layers

综上, 单侧掏土施工能有效改变井筒围土原有的受力状态, 使孔周土体进入塑性状态进而更易向孔内发生坍塌变形破坏。围土变形导致掏土侧井壁受力减小, 进而与对侧产生应力差值, 促使井筒弯曲带动井塔回纠, 此即斜孔掏土井塔纠偏的内在机制所在。

3.4 各掏土施工因子影响纠偏效果规律分析

为详尽各掏土施工技术参数对纠偏效果的影响, 获取各参数的最优取值, 指导现场纠倾方案设计, 以下进行各因子影响规律分析。

(1) 掏土孔排宽度与井塔回倾量的关系

极差分析结果表明, 掏土孔排宽度为影响井塔回倾最敏感因子, 井塔回倾量随孔排宽度增大而增大, 但若孔排宽度过宽则极易造成过纠或无法控制回倾速度。为此选定 4 种不同孔排宽度模拟计算, 结果如图 7 所示。

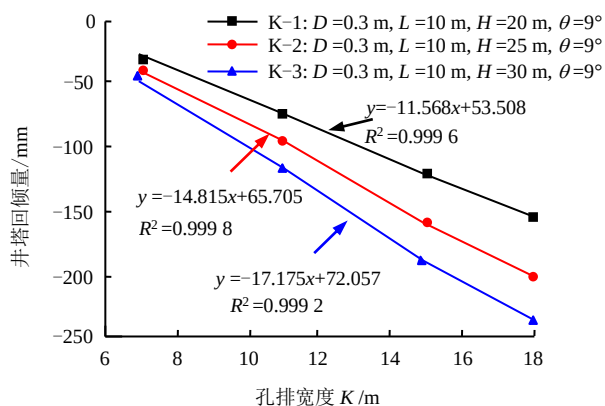


图 7 掏土孔排宽度与井塔回倾量之间关系

Fig.7 Relationship between the row width of the drilling and back tilting of shaft tower

由图可知,对不同掏土孔深,井塔的回倾量值与掏土孔排宽度之间的关系曲线基本为直线。增加孔排宽度,能有效促进井塔回倾。当掏土孔排宽度相同时,孔深度增加井塔的回倾量增大,且孔排宽度越大,增加相同的孔深度,井塔的回倾量值增加越大。

(2) 掏土孔深度与井塔回倾量的关系

极差分析结果表明,掏土孔深度在各因子敏感性中排第二,说明掏土孔深度对井塔回倾影响同样较为敏感。但掏土孔深度越大,施工越困难,掏土效率越低。研究掏土孔深度取值,可加快纠倾施工进度,降低施工成本。取5种不同工况进行模拟分析结果如图8所示。

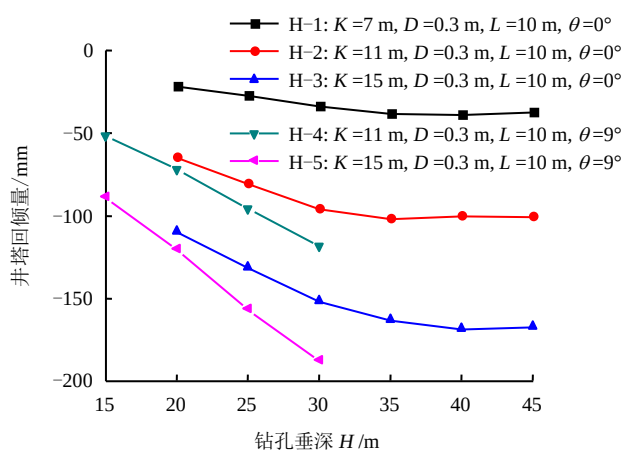


图8 掏土孔深度与井塔回倾值之间关系

Fig.8 Relationship between the depth of drilling and back tilting of shaft tower

由图可知,随掏土孔深度增加井塔的回倾量值逐渐增大,其中曲线斜率在20~30 m时最大,30~40 m时不断减小,大于40 m以后基本为水平。也即掏土孔深度在30 m以内时,增加同等孔深可获得最大纠倾回报,实际工程中考虑施工的便利性和经济性,建议掏土孔最大垂深为30 m。另外,相同条件下斜孔掏土的回倾量值均大于竖直孔,即斜孔纠偏效果更优。

(3) 孔距井筒中心线距离与井塔回倾量的关系

孔距井筒中心线距离决定了上部土体应力解除区与井筒之间的距离,一般分析认为应力解除区与井筒间距离越小,纠倾效果越佳。但同时该距离也关系到掏土孔与井筒之间土体厚度的大小,其对井筒的回倾起到缓冲保护的作用。因此,选择合理的距离,是保证井塔顺利回倾与井筒安全的重要条件,取5种不同工况模拟计算结果如图9所示。

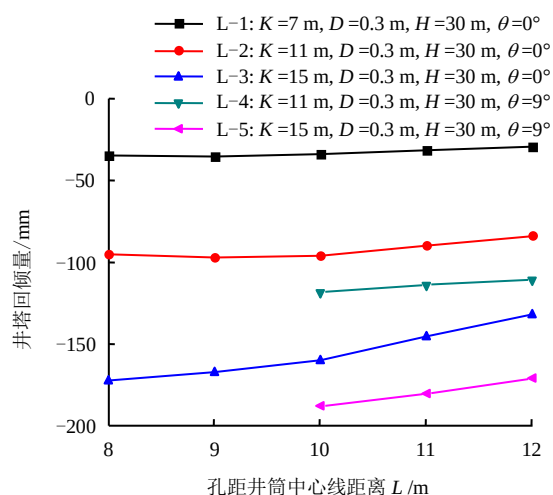


图9 孔距井筒中心线距离与井塔回倾量之间关系

Fig.9 Relationship between distance L and back tilting of shaft tower

由图可知,随孔距井筒中心线距离增加,井塔的回倾量值减小,且孔排宽度越宽时减小的越明显。同样斜孔掏土井塔的回倾量也随距离增加而减小,但其减小的幅度要小于竖直钻孔,且回倾量值更大。由此实际施工中考虑钻机作业空间及施工的便利性等因素,建议孔距井筒中心线距离控制在10 m左右为宜,并采用斜孔掏土以获得更大的回倾量值。

(4) 掏土孔直径与井塔回倾量的关系

掏土孔直径增加能够有效扩大土体塑性区范围,从而更多解除孔间土体的应力。同时掏土孔直径增大,为土体向孔内移动提供了更大的空间,由此决定了井筒的最大回倾量。以下选取2种不同工况分析掏土孔直径变化对井塔回倾量的影响,如图10所示。

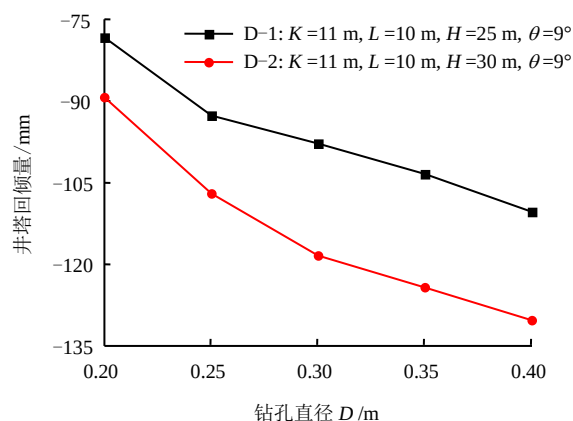


图10 掏土孔直径与井塔回倾量之间关系

Fig.10 Relationship between the diameter of digging holes and back tilting of shaft tower

由图可知,井塔的回倾量值随钻孔直径的增加而增大,且掏土孔越深时增加的越明显,其中直径为 0.2~0.3 m 时,曲线斜率要大于 0.3~0.4 m 段,由此可认为直径为 0.2~0.3 m 时为最优范围。

(5) 掏土孔开孔顺序对井塔回倾量的影响

考虑到本工程井塔为双向偏斜,为进一步分析掏土开孔施工过程对井塔回倾的影响,选定典型工况 ($K=16$ m, $D=0.3$ m, $L=10$ m, $H=30$ m, $\theta=9^\circ$) 分析以下 3 种不同掏土孔开挖顺序对井塔 X 轴和 Y 轴回倾的影响: 方式 1 从井筒中心线同时对称向两侧掏土,方式 2 先从井筒中心线向东侧掏土,然后从井筒中心线向西侧掏土,以及方式 3 自西向东依次掏土,如图 11 所示。

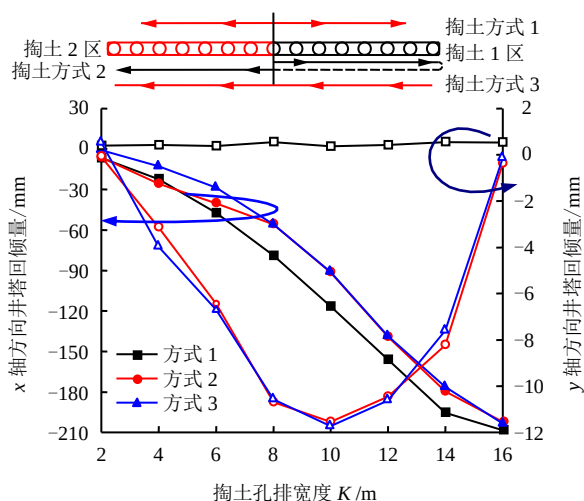


图 11 不同掏土方式井塔回倾曲线

Fig.11 Back tilting of shaft tower in x and y direction under different digging ways

分析图 11 可知,3 种掏土方式对井塔 x 轴方向的回倾总量影响不大,但对 y 轴方向影响则明显不同。当孔排宽度较小时 ($K<8$ m),在 x 轴方向上方式 2 回倾量大于方式 3,即从中间往边上掏土的效果优于从一侧往中心掏土。而在相同掏土宽度条件下,方式 1 回倾量则均大于方式 2 和方式 3,也即对称掏土效果最优。在 y 轴方向上,采用掏土方式 1 时基本保持稳定。但方式 2 和方式 3 可产生最大 11.5 mm 的回倾,随后随着钻孔沿井筒中心趋于对称分布,井塔在 y 方向偏斜恢复。由此,对于单向偏斜井塔纠偏,掏土方式 1 最优。但对于双向倾斜井塔,可根据实际情况选择掏土方式 2 或方式 3,使井塔沿两个目标方向回倾。

综上,对于本工程井塔的偏斜现状及以上数值模拟获得的掏土回倾规律,选定最优的井塔回倾掏土技术参数为:孔排宽度 $K=15$ m,钻孔垂深 $H=$

30 m,孔距井筒中心线距离 $L=10$ m,钻孔倾角 $\theta=9^\circ$,钻孔直径 $D=0.2$ m,钻孔顺序可选择方式 2 或者方式 3。

4 现场实施与监测

基于上述最优掏土技术参数,并充分确保井塔、井壁结构的安全,柔和缓慢地逆止并视现场条件回纠偏斜井塔,现场实施的斜孔掏土方案如图 12 所示。即仅在井塔东南角进行掏土施工,开孔边界暂不过井筒中心线,钻孔垂深 $H=30$ m,孔距井筒中心线距离 $L=10$ m,钻孔倾角 $\theta=9^\circ$,钻孔直径 $D=0.2$ m。井塔南侧开孔顺序为自西向东(掏土方式 2),东侧为由南往北(掏土方式 3)。首阶段先施工 1#~20#钻孔,孔间距为 0.8 m,随后对钻孔进行扫孔并加密 21#~38#新钻孔,孔间距缩小至 0.4 m。

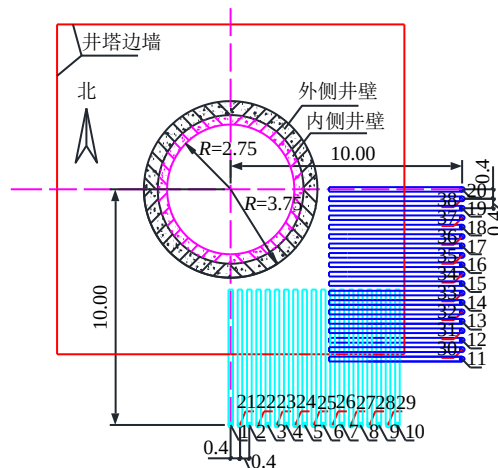


图 12 现场斜孔掏土方案平面布置图(单位: m)

Fig.12 Floor plan of inclined digging on this project (unit: m)

为实时动态监控纠偏过程中井壁结构的安全以及井塔偏斜的发展,于井壁内表面安装应变计,井塔顶、底层安装倾斜仪。

倾斜仪对井塔偏斜测量历时结果如图 13 所示。可见在纠偏工程实施之前(2013 年 9 月前),井塔偏斜向北持续发展,速率约为 0.24 mm/d,东西方向上虽有动荡但总体也仍西倾。

2013 年 9 月利用螺旋钻机施工了首阶段 1#~20#钻孔,井塔偏斜发展无论在南北还是东西方向上均基本实现了逆止。究其原因在于掏土施工对井筒东南角的围土压力进行了一定程度的解除,但鉴于孔排宽度 $K=7.5$ m,钻孔间距为 0.8 m (远大于钻孔直径 0.2 m),依据上述理论计算及因子影响纠偏规律分析可知,现阶段的施工仍过于保守,钻孔仅能

在深处产生塑性区相连,中上部的大部分土体以及井筒中心线外未施工土体均阻止了井塔的回倾。

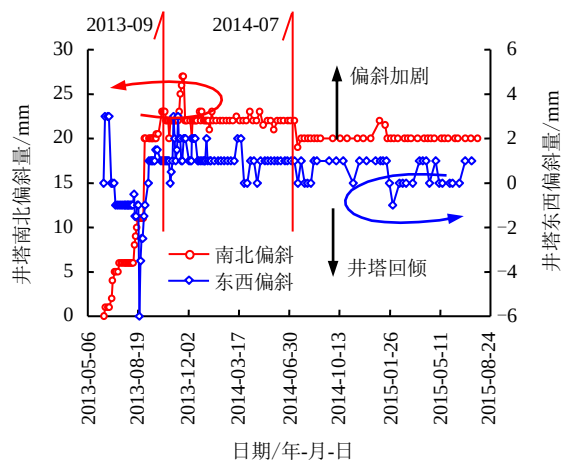


图 13 井塔偏斜实测结果历时曲线
Fig.13 Measured gradient of the shaft tower

2014年7月在井塔偏斜保持稳定10个月,经矿方同意组织实施了原有钻孔的扫孔及加密,新开了21#~38#钻孔,进一步将孔间距缩小至0.4 m。可见再次施工后井塔偏斜的平衡态势得到了巩固加强,并在南北方向上略见有2 mm,东西方向约1 mm的回倾。依据理论分析结果可知,当孔间距缩小至0.4 m时,孔间间隙为0.2 m与钻孔直径相当,那么对于30 m垂深的钻孔,在15 m深度位置处孔周塑性区即已充分相连($C/a=3.11R$),进而更有利于井塔往东南方向回倾。另一方面,由掏土孔开孔顺序对井塔回倾量的影响分析可知,掏土方式2或方式3对主纠倾方向的回纠量值要远大于其正交方向的副纠倾方向。也即按掏土方式2在井塔南面施工钻孔主要导致井塔南纠,附带井塔略东纠。但可能是受钻孔施工顺序的影响(先施工了井塔南侧钻孔,后施工东侧钻孔),再次施工后井塔南北方向的回倾量值要略大于东西方向。

进一步分析,实际井塔回倾量值小于上述数值模拟的原因在于,实际钻孔按单孔施工,有别于模拟中的成槽考虑,且为后续扫孔方便,孔口2 m深左右进行了PVC套管护壁,这在一定程度上限制了钻孔坍塌。同时实际施工考虑到纠偏的风险性,开孔孔排宽度有限,仅为井塔边墙长度的一半,另一半未施工土体也在很大一定程度上限制了井塔的回倾。但不论南北还是东西方向,对近年来的长期持续监测结果表明,目前井塔偏斜在东西和南北方向上均达到了稳定,即斜孔掏土应力解除法对本生根井塔偏斜发展实现了有效控制。后续回纠可视需要

加宽孔排宽度,加大钻孔直径以及加密钻孔使孔排(群)连接至成槽。

另一方面,对-40 m位置井壁西北和东南方位安装的竖向表面应变计受力进行分析,如图14所示。

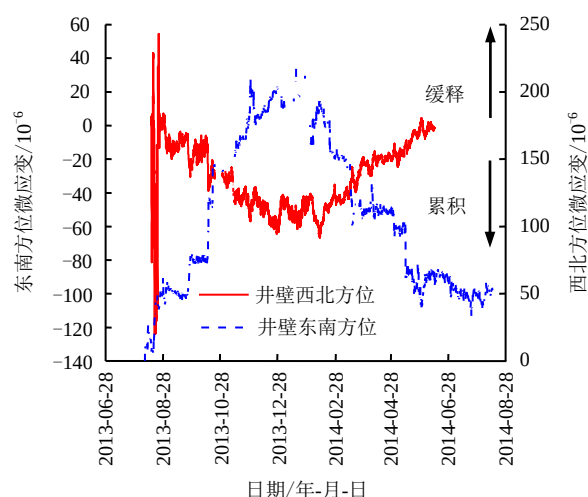


图 14 井壁-40 m处竖向应变变化
Fig.14 The vertical strain of shaft at the depth of 40 m

在治理初期井壁西北方位的应变表现为累积趋势,即井壁受压。而东南方向则表现为应变缓释,即井壁受拉,这与井塔的偏斜发展(由东南往西北方向偏斜)密切相关。在井塔东南角进行掏土施工后,两对侧井壁受力表现为方向反转,西北侧为应变缓释而东南侧则变为应变累积。且从定量数值上可以看出,两处的应变变化量值在 $(50\sim 200)\times 10^{-6}$,该数值大小对井壁安全而言是有保障的,但遗憾的是受主井提升落煤等恶劣条件限制后续测试遭受了破坏。

5 结论及建议

(1) 斜孔掏土应力解除法对生根偏斜井塔纠偏是适用和有效的,该研究对深长桩基基础建(构)筑物以及我国早期建造的其他通过倒锥台刚性相连于井壁之上的生根井塔纠偏具有重要的借鉴参考意义。

(2) 斜孔掏土纠偏的内在机制在于单侧掏土施工能有效改变井筒周围土体原有应力状态,使孔周土体进入塑性区进而更易向孔内发生坍塌变形破坏。围土变形导致掏土侧井壁受力减小,进而与对侧产生应力差值,促使井筒弯曲并带动井塔回纠。

(3) 在各掏土施工因子中,影响纠偏效果的最主要因子为孔排宽度,其次依序为钻孔垂深、钻孔

直径和孔距井筒中心线距离,且斜孔掏土纠偏效果优于竖直孔。

(4) 基于模拟获得的最优纠偏参数组合,进行了现场斜孔掏土纠偏治理及施工监测,目前井塔偏斜及井壁安全均有保障,后续的井塔回纠可考虑进一步加宽孔排宽度,加大钻孔直径以及加密钻孔以减小孔间距使孔排接近至成槽状。

参考文献

- [1] 崔广心. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
CUI Guang-xin. The frozen wall and shaft lining in thick overburden[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1998.
- [2] 王在泉, 王广云, 杨维好, 等. 井架偏斜的分析预测与纠偏控制[J]. 金属矿山, 2002, (4): 24—26.
WANG Zai-quan, WANG Guang-yun, YANG Wei-hao, et al. Analysis and forecast of shaft frame inclination and its rectification control[J]. **Metal Mine**, 2002, (4): 24—26.
- [3] 刘明凯, 唐永志, 曹承平, 等. 丁集矿大型井架纠偏技术[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2012, 32(增刊): 253—256.
LIU Ming-kai, TANG Yong-zhi, CAO Cheng-ping, et al. The technology of deviation rectification for Dingji mine derrick[J]. **Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)**, 2012, 32(Supp.): 253—256.
- [4] 张海芳, 安宝剑, 彭龙超, 等. 煤矿主井井架偏斜原因分析及纠偏方案设计[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(2): 231—233.
ZHANG Hai-fang, AN Bao-jian, PENG Long-chao, et al. Leaning cause analysis and leaning correction plan design of mine shaft headframe[J]. **Coal Science and Technology**, 2013, 41(2): 231—233.
- [5] 孔德才. 单侧斜撑式立井井架纠偏工艺研究[J]. 中国煤炭, 2013, (4): 71—73.
KONG De-cai. Study on rectification technique of single-side inclined supporting headframe for vertical shaft[J]. **China Coal**, 2013, (4): 71—73.
- [6] 张帮仕. 井塔治理施工中基础稳定性分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, (1): 115—117.
ZHANG Bang-shi. Foundation stability analysis on shaft tower deviation rectification[J]. **Ground Pressure and Strata Control**, 2004, (1): 115—117.
- [7] RANZINI S M T. Stabilisation of leaning structures: The tower of pisa case[J]. **Géotechnique**, 2001, 51(7): 647—648.
- [8] 魏焕卫, 孙剑平, 陈启辉, 等. 120 m 烟囱倾斜原因及降水纠偏的作法及效果[J]. 建筑技术, 2005, 36(6): 425—427.
WEI Huan-wei, SUN Jian-ping, CHEN Qi-hui, et al. Cause and dewatering correction of a 120 meter-high inclined chimney and its effect[J]. **Architecture Technology**, 2005, 36(6): 425—427.
- [9] 刘毓斌, 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-chuan, LIU Zu-de. Study on stabilization and rectification technology for inclined transmission tower[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 173—176.
- [10] 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. Inclination rectification and ground stabilization of high-rise building[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1999, 32(4): 69—74.
- [11] 吴宏伟, 徐光明. 地基应力解除法纠偏机理的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 299—303.
WU Hong-wei, XU Guang-ming. In-flight centrifuge modeling of vertical relief boring technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(3): 299—303.
- [12] YU Hai-sui. 岩土介质小孔扩张理论[M]. 周国庆, 赵光思, 梁恒昌, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2013.
YU Hai-sui. Cavity expansion methods in geomechanics[M]. Translated by ZHOU Guo-qing, ZHAO Guang-si, LIANG Heng-chang, et al. Beijing: Science Press, 2013.