

# 带朵纠倾掏土孔孔壁应力分析及工程应用

胡春林<sup>1)</sup> 陈伟超 周文韬

(武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

**摘要** 提出了一种带朵纠倾掏土孔的既有建筑纠倾新方法, 给出了带朵纠倾孔孔壁最大应力的近似计算公式, 用数值计算方法验证了近似公式的适用性。新方法相对于传统圆形掏土孔方法能更好地实现建筑纠倾工程的精确可控、快速纠倾、避免过倾。当大孔半径与小朵孔半径之比在 1~6 范围时, 纠倾效果较好。

**关键词** 带朵掏土孔, 应力集中, 快速掏土, 可控纠倾

中图分类号: TU441 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-18-001

## THE STRESS ANALYSIS OF HOLE WALL OF FLOWER SHAPE OBTAINED BY INCLINATION RECTIFICATION DIGGING AND ENGINEERING APPLICATION

HU Chunlin<sup>1)</sup> CHEN Weichao ZHOU Wentao

((School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract** A method of the inclination rectification of digging hole of flower shape for rectifying the existing building inclination is proposed, and the approximate calculation formula for the maximum stress in the hole wall is obtained, and the applicability of this formula is verified by a comparison with the results obtained by the numerical method. The new method can make the inclination rectification much more controllable, accurate, and rapid and as compared with the traditional way, in addition, the back inclination is avoided. As the ratio of the large hole radius to the small flower shape hole radius is in the range of 1~6, the performance is good.

**Key words** digging hole, stress concentration, digging soil rapidly, controllable inclination rectification

国内外在既有建筑纠倾技术领域有较多的研究成果。Terracina<sup>[1]</sup> 在拯救比萨斜塔方案中首次创造性的提出解除建筑地基应力的纠倾思想。Tugaenko 等<sup>[2]</sup> 利用浸水法对某 16 层住宅楼纠倾成功。Pryke<sup>[3]</sup> 系统地分析总结了基础托换纠倾法的纠倾原理和设计原则。刘祖德<sup>[4]</sup> 提出了地基应力解除法纠倾加固技术。吴宏伟等<sup>[5]</sup> 利用离心模型试验对应力解除纠偏机理进行研究, 认为竖向应力解除法能有效减小建筑物的倾斜。秦尚林等<sup>[6]</sup> 运用水平掏土

法和注浆技术对某建筑纠倾取得了较好效果。朱方敏等<sup>[7]</sup> 将深层掏土纠倾法应用于某桩基高层建筑纠倾工程, 探讨了掏土纠倾法的适用性。程晓伟等<sup>[8]</sup> 采用基底掏土结合锚索加压方式对某高层住宅楼进行了纠倾。工程中较多的掏土纠倾施工往往依靠经验进行<sup>[9-10]</sup>, 且以圆形掏土孔居多。但地基土体性能经过长期压密后变得复杂了, 掏土孔法往往难以成功, 可能实现不了预期纠倾效果, 或者纠倾十分缓慢, 或者过倾, 较难实现建筑纠倾的可控、快速和精

2018-01-02 收到第 1 稿, 2018-01-11 收到修改稿。

1) E-mail: chunlin\_hu@163.com

**引用格式:** 胡春林, 陈伟超, 周文韬. 带朵纠倾掏土孔孔壁应力分析及工程应用. 力学与实践, 2018, 40(4): 398-401

Hu Chunlin, Chen Weichao, Zhou Wentao. The stress analysis of hole wall of flower shape obtained by inclination rectification digging and engineering application. *Mechanics in Engineering*, 2018, 40(4): 398-401

准。本文提出一种新型带朵纠倾掏土方法，国内外未见相关方法的报道，该方法在某既有建筑纠倾工程中得到了应用，取得了明显的好效果。

## 1 带朵纠倾掏土孔分析

### 1.1 新型掏土装置简介

新型掏土装置主要组成部分包括：水管，接头，冲孔钻头，朵型钢筋等，如图 1。

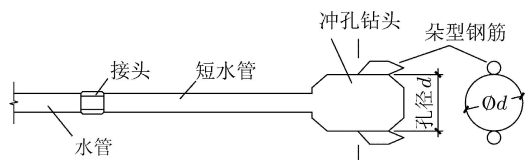


图 1 带朵掏土装置示意图

既有建筑纠倾法可以先对沉降量较大的一侧土体进行小孔注浆加固，在对原状土扰动较小前提下控制基础沉降，防止倾斜加剧。在沉降量较小一侧开挖沟槽，从基底土体中水平冲孔掏土，严格控制掏土孔孔径，孔径不能过大，采用该装置在各基础承台底部实施基底水平冲孔掏土纠倾。该装置水管的一端与压浆泵连接，水管的另一端与冲孔端头连接，冲孔端头顶部钢筋纵向焊接，边缘钢筋呈朵型焊接，相邻水管通过接头连接。水平成孔时，采用边人工冲孔边压力水冲孔，孔内土体随泥浆流出，冲孔取土装置工作时的水平剖面见图 2。

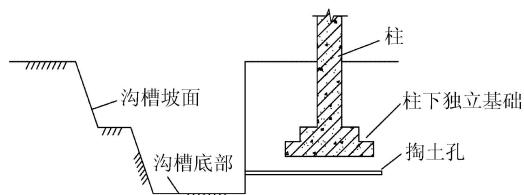


图 2 新型装置掏土示意图

在建筑物沉降较小一侧基底冲孔取土，在上部荷载及水平冲击作用下，在掏土孔朵型尖角处产生高度应力集中，即使基底土强度较高，孔径较小时，带朵掏土孔也会顺利塌孔和掏土。根据需要的沉降来设计掏土孔的孔径，孔径尽可能较小。

### 1.2 孔边应力集中分析 [11-12]

在新型掏土工具 2 个朵型钢筋下，掏土孔前端形成 1 个大圆和 2 个小圆的组合断面。原模型为 1 个半径为  $R$  的大圆形掏土孔和 2 个半径为  $r$  的圆孔组合模型，等效椭圆模型长轴为  $2(R + 2r)$ ，两个

模型边界在  $A$  点附近重合。根据弹性力学原理，两模型  $A$  点附近边界重合，在外荷载相同情况下，对  $A$  点应力状态而言两模型可以等效，如图 3。

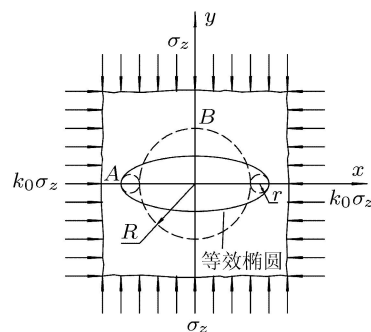


图 3 等效椭圆模型

由弹性力学可知，在二向应力状态下，椭圆孔孔壁  $A$  点应力取值

$$\sigma_A = \left( \frac{2a}{b} + 1 - k_0 \right) \sigma_z \quad (1)$$

式中， $a$  为椭圆长半轴长， $b$  为椭圆短半轴长， $k_0$  为土体侧压力系数。等效椭圆中

$$a = R + 2r \quad (2)$$

$A$  点处等效椭圆曲率半径

$$r = \frac{b^2}{a} \quad (3)$$

由式 (2)、式 (3) 消去  $a$  可得

$$b = \sqrt{r(R + 2r)} \quad (4)$$

式 (4) 代入式 (1) 中得到  $A$  点应力

$$\sigma_A = \left( 2\sqrt{2 + \frac{R}{r}} + 1 - k_0 \right) \sigma_z \quad (5)$$

$A$  点应力集中系数

$$K_{tA} = 2\sqrt{2 + \frac{R}{r}} + 1 - k_0 \quad (6)$$

## 2 工程案例

### 2.1 工程概况

某住宅楼共 7 层，标准层层高 3.0m，1 层为框架结构，2~7 层为砖混结构。住宅楼平面呈矩形布置见图 4，平面尺寸 21.0m×10.4m。①/④ 柱下独立基础平面尺寸 1.8m×1.8m，③/④ 柱下独立基

础平面尺寸 2.3m×2.3m, 埋深 2.6m~3.0m。持力土层为粉质黏土, 地下水位于基底以下。住宅楼北部 2.0m~7.0m 处为某基坑, 基坑深度 4.8m~7.0m。北侧基坑施工过程中, 住宅楼地基土体发生流土, 导致住宅楼整体向北倾斜, 最大倾斜率 0.77%, 超过规范允许值<sup>[13]</sup>。因此需对住宅楼进行纠倾加固。地基土体参数如表 1。

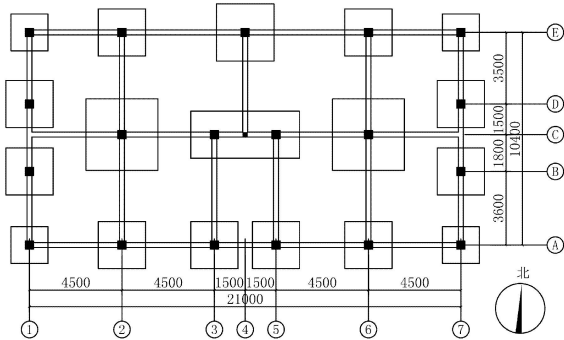


图 4 基础平面布置图 (单位: mm)

表 1 地基土体参数

| 编号 | 名称   | 厚度/m | 粘聚力 c/kPa | 内摩擦角/(°) |
|----|------|------|-----------|----------|
| 1  | 杂填土  | 1.0  | 8         | 18       |
| 2  | 粉质黏土 | 4.1  | 23.5      | 9.5      |

### 2.2 掏土孔应力计算

地基土体经过上部荷载长期压缩, 其承载力特征值  $f_{ak} = 180\text{ kPa}$ , 极限承载力  $p_u = 450.0\text{ kPa}$ 。

住宅楼纠倾方案是在沉降量较大的北侧注浆加固, 选用  $R/r = 5$  的新型带朵掏土工具在沉降量较小的南侧基底以下水平冲孔掏土。

楼面等效荷载综合取值  $q_0 = 14.0\text{ kPa}$ , 则 ①/④ 柱地基压力

$$p_1 = \frac{nq_0A_0}{A} = 147.0\text{ kPa} \quad (7)$$

式中,  $n$  为住宅楼层数,  $A_0$  为柱受荷面积,  $A$  为基底面积。

取土体侧压力系数  $k_0 = 0.5$ , 传统圆形掏土孔孔壁相应 A 点应力

$$\sigma'_A = (3 - k_0)p_1 = 365.7\text{ kPa} \quad (8)$$

带朵掏土孔孔壁 A 点应力

$$\sigma_A = \left(2\sqrt{2 + \frac{R}{r}} + 1 - k_0\right)p_1 = 851.1\text{ kPa} \quad (9)$$

同样, ③/⑤ 柱地基压力

$$p_2 = \frac{nq_0A_0}{A} = \frac{7 \times 14.0 \times 3.7 \times 2.7}{2.3 \times 2.3} = 185.1\text{ kPa} \quad (10)$$

传统圆形掏土孔孔壁相应 A 点应力

$$\sigma'_A = (3 - k_0)p_2 = 462.7\text{ kPa} \quad (11)$$

带朵掏土孔孔壁 A 点应力

$$\sigma_A = \left(2\sqrt{2 + \frac{R}{r}} + 1 - k_0\right)p_2 = 1071.7\text{ kPa} \quad (12)$$

可以看出, 较传统圆形掏土孔, 新型带朵掏土孔 A 点应力更大, 土体将产生更大沉降。掏土孔 A 点土体更容易变形塌孔破坏。

### 2.3 数值模拟

先利用 ANSYS 建立模型后划分网格, 再将网格导入 FLAC 3D 进行计算。假定土体为完全弹性体, 新型掏土孔模型外围尺寸为  $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m} \times 0.01\text{ m}$ , 新型掏土孔半径  $R = 50\text{ mm}$ , 土体侧压力系数  $k_0 = 0.5$ , 固定约束模型除顶面外的其他 5 个面边界, 如图 5。

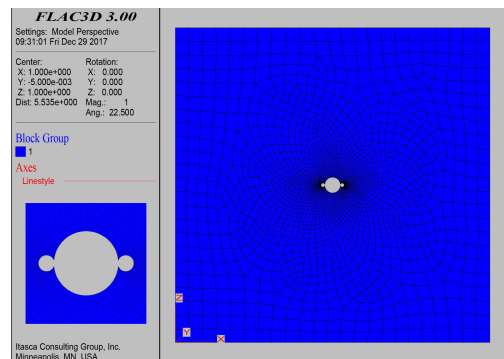


图 5 数值计算模型

以 ③/⑤ 柱为例, 模型顶部施加竖向应力  $p_2 = 185\text{ kPa}$ , 在不同  $R/r$  比值下, 由近似式 (6) 和数值模拟计算所得应力集中系数  $K_{tA}$  误差分析见表 2, 应力集中系数  $K_{tA}$  与大圆、小圆半径比值  $R/r$  关系曲线见图 6。

表 2 孔壁 A 点应力集中系数近似公式误差分析

| $R/r$    | 1    | 2    | 4    | 6    | 8     |
|----------|------|------|------|------|-------|
| 近似公式计算结果 | 3.96 | 4.50 | 5.40 | 6.16 | 6.82  |
| 数值模拟计算结果 | 3.83 | 4.38 | 5.21 | 5.87 | 6.30  |
| 误差/%     | 3.39 | 1.58 | 2.47 | 4.41 | 11.99 |

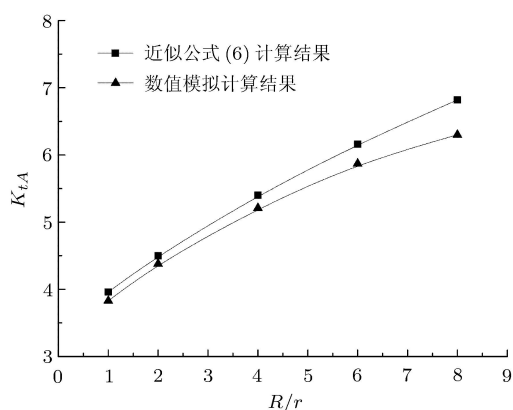


图 6 孔壁 A 点应力集中系数近似公式与数值模拟计算结果

可以看出, 当  $R/r$  处于 1~6 范围内时, 新型带朵纠倾掏土孔孔壁 A 点应力集中系数近似公式计算结果与数值模拟计算结果误差较小。

## 2.4 现场纠倾结果

纠倾过程前期先在沉降量较大区域注浆加固, 沉降量较小区域基底外地面开挖工作沟槽, 后在各基底水平掏土纠倾。此工程加固完成后, 对水平冲孔纠倾施工效果进行吊线偏移观测和沉降分析点的沉降观测, 一共包含 5 个阶段:

第一阶段 (8d): 准备工作, 用 50 mm 掏土孔径, 每个承台下 5 个孔进行水平掏孔, 掏土深度 6 m, 北侧吊线偏移量 170 mm, 倾斜率 7.7 %, 建筑物沉降量变化不明显;

第二阶段 (8d): 对水平掏土孔进行扩展, 扩大到 60 mm 掏土孔径, 每个承台下 5 个孔进行水平掏孔, 掏土深度 6 m, 沉降较小区域一侧开始发生沉降, 平均沉降速率为 1.6 mm/d;

第三阶段 (10d): 扩大到 80 mm 掏土孔径, 平均沉降速率为 2.0 mm/d;

第四阶段 (9d): 扩大到 100 mm 掏土孔径, 平均沉降速率为 3.1 mm/d。北侧吊线偏移量为 81 mm, 建筑物倾斜率降至 3.6 %;

第五阶段 (9d): 继续对掏土纠倾稳定后, 实施水平注浆塞孔, 回填夯实, 最终观测北侧吊线偏移量稳定在 65 mm, 建筑物倾斜率为 2.9 %。

该住宅楼纠倾后未发生回倾, 新型掏土方法取得了较好的纠倾效果, 为类似工程提供了纠倾加固

新思路。

## 3 结论

本文提出一种新型带朵纠倾掏土孔的既有建筑纠倾新方法。得出新型带朵掏土孔孔壁 A 点应力集中系数的近似计算公式, 并通过数值模拟验证了当  $R/r$  在 1~6 范围之间时, 掏土孔孔壁 A 点应力集中系数近似公式计算值和数值计算结果之间的误差较小。

新型带朵纠倾掏土方法能够有效克服传统圆形掏土孔纠倾不动或容易过量回倾的不足。且该带朵掏土装置制作较简单, 方便就地取材。当带朵掏土孔半径比  $R/r$  在 1~6 范围之间时, 容易实现快速纠倾和精准可控。

## 参考文献

- 1 Terracina F. Foundations of the Tower of Pisa. *Geotechnique*, 1962, 12(4): 336-339
- 2 Tugaenko NF, Matus Yu V, Sinyavskii SD. Rectifying tilt of 16-story residential building. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1979, 3: 63-65
- 3 Pryke JFS. The Pynford Underpinning Method. London: Blackie Academic & Professional, 1993
- 4 刘祖德. 地基应力解除法纠偏处理. *土工基础*, 1990, 4(1): 1-6
- 5 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. *岩土工程学报*, 2003, 25(3): 299-303
- 6 秦尚林, 陈善雄, 汪稔. 水平掏土法与注浆技术在建筑物纠偏中的应用. *岩土力学*, 2002, 23(S1): 88-90
- 7 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. *岩土力学*, 2006, 27(9): 1617-1621
- 8 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. *岩土工程学报*, 2012, 34(4): 756-761
- 9 Zhu Y, Wang X, Liang Y. Settlement rectifying method and application of incline building on collapsible loess//Loo YC. *Advances in Mechanics of Structures and Materials*. Rotterdam: A. A. Balkema Press, 2002
- 10 唐业清. 建筑物移位纠倾与增层改造. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- 11 Raymond DM. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid. *Physics*, 1936, 7: 195-202
- 12 高存法, 岳伯谦. 无限板内椭圆孔周的应力分析. *工程力学*, 1994, 11(4): 78-82
- 13 JGJ123-2012 既有建筑地基基础加固技术规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012

(责任编辑: 胡漫)