

地基应力解除法纠偏机理的离心模型试验研究

In-flight centrifuge modeling of vertical relief boring technique

吴宏伟¹, 徐光明²

(1. 香港科技大学 土木工程系, 中国 香港; 2. 南京水利科学研究院 土工研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 地基应力解除法是对建筑物倾斜进行纠偏的一种方法, 在国内、外得到广泛的应用。该方法已由原先打设斜孔从地下浅层掏土, 发展到现今钻设大孔径竖孔向深部掏土。很显然, 在建筑物基础边沿垂直向下掏土比倾斜向从建筑物基础正下方掏土容易得多。然而, 与斜孔应力解除法相比, 竖孔应力解除法的有效性尚缺乏很好的试验研究, 其纠偏的设计分析也基本上是完全根据经验的。首先报道了在香港科技大学新近开发的土工离心机上, 利用四轴机器人式操纵臂, 为研究竖孔应力解除法的纠偏有效性而完成的一组不停机条件下的竖孔开挖模拟试验; 其次, 利用 Mindlin 解导出了单个竖孔应力解除纠偏效果的弹性理论积分解, 对竖孔的开挖顺序、间距、深度以及开孔位置等因素影响的规律进行分析研究; 最后, 将离心模型试验结果与弹性理论分析计算结果进行了比较, 并讨论了两者的差异。离心模型试验结果和弹性理论分析证明, 竖孔应力解除法能非常有效地减小建筑物的倾斜; 此外, 简单弹性分析表明, 对于某一深度的竖向应力解除孔, 它距离建筑物越近, 开挖所产生的纠偏效果越显著。

关键词: 应力解除法; 纠偏; 离心模型实验; Mindlin 解; 机器人

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)03-0299-05

作者简介: 吴宏伟(1962-), 男, 岩土工程专业博士后, 副教授, 香港科技大学土工离心机实验室主任, 英国特许工程师。主要从事小应变、基坑支护、土工离心模型试验和非饱和土方面的研究工作。

NG, C. W. W.¹, XU Guang-ming²

(1. Department of Civil Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, HKSAR, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Similar to soil extraction through inclined boreholes, the use of relief boring techniques with soil extraction through vertical boreholes is popular in China to reduce tilting and to stabilize the buildings founded on soft grounds. It is obvious that vertical soil extraction is generally simpler than inclined extraction underneath the foundation of a building. However, the effectiveness of vertical boring, as compared with inclined drilling, may be somewhat doubtful and is often questioned by some engineers and the design analysis of remedial action to reduce building tilts is essentially empirical. In this paper, the effectiveness of vertical soil extraction is investigated in the state-of-the-art geotechnical centrifuge at the Hong Kong University of Science and Technology (HKUST) using a newly developed 4-axis robotic manipulator to carry out in-flight vertical boring. Results of a centrifuge test are compared with a newly derived theoretical elastic solution based on the Mindlin's equations. The discrepancies between the centrifuge model test and the theoretical elastic solutions are discussed. Both the results of the centrifuge test and theoretical solutions reveal that vertical relief boring technique can be very effective to reduce building tilts. Moreover, a simple elastic analysis using the derived theoretical solutions shows that for a given depth of boring, the closer the borehole from a building, the more significant the reduction of building tilts.

Key words: soil extraction; tilt correction; centrifuge modeling; Mindlin's equations; 4-axis robotic manipulator

0 前言^y

建筑物的倾斜是一个在全世界范围内存在的问题, 意大利比萨斜塔是最有名的倾斜建筑物, 中国的苏州虎丘塔亦发生倾斜, 现代民用建筑中(特别是高层建筑)存在为数不少的倾斜案例。建筑物倾斜一般是由于场区地层分布的不对称性或邻近新建筑物的兴建造成下卧土层不同部位发生差异变形所致。建筑物的倾斜又会在较大沉降侧(又称软侧)诱发不利的地基反力集中, 进而随着时间的推移加剧建筑物的倾斜, 最终可能造成建筑物的倒塌。建筑物倾斜现象受到人们的广泛关注。为了纠正建筑物的倾斜, 国内外学者提出了许多纠偏方法, 包括对上部结构物的支撑和加固、在沉

降较小侧(又称硬侧)施加压重以及钻孔开挖取土实施应力解除等等^[1]。

1962年, 意大利工程师Terracina(1962)针对比萨斜塔的倾斜恶化问题提出了一种地下抽土法^[2], 即从斜塔沉降较小的北侧开设一系列斜孔, 从塔基下地基土层中抽出部分沙土, 使斜塔的倾斜自然北移(见图1)。这也许是最早提出运用应力释放原理进行纠偏的设想。该法在墨西哥城主教堂和新近完工的比萨斜塔纠偏工程中得到了成功应用^[3]。刘祖德教授(1989)针对国内许多在软弱地基上兴建的民用住宅楼倾斜的案例, 提出了一种垂直向深部掏土进行纠偏处理的新方

^y 基金项目: 香港科技大学研究基金资助项目(DAG02/03. EG15)

法^[4]。该法是在倾斜建筑物沉降较小一侧布设大直径垂直钻孔排,使地基应力在局部范围内得到解除(或释放),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目的(见图2)。在多个民用建筑物的纠偏应用结果表明,对于软基上建筑物的倾斜,采用垂直向深部掏土的方法是可行的^[4]。

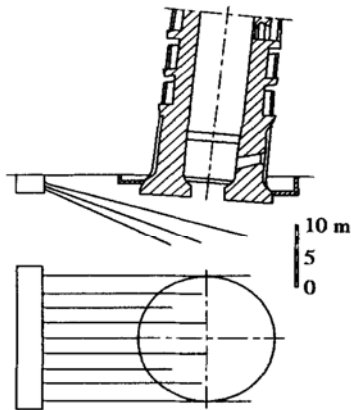


图1 为减小比萨斜塔倾斜程度而提出的地下抽土法
Fig.1 Soil extraction underneath the foundation for correcting inclination of Pisa Tower

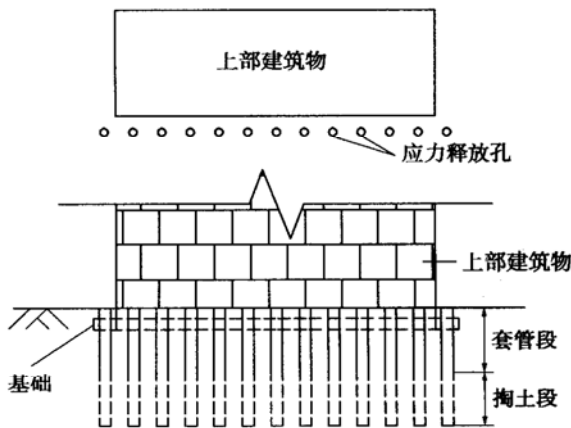


图2 应力解除法纠偏示意图(刘祖德,1990)
Fig.2 Relief boring technique with soil extraction for correcting inclination of tilted building (Liu, 1990)

倾斜建筑物的纠偏是一项受多因素影响的复杂问题。地下抽土法在实际应用于比萨斜塔纠偏之前,曾进行数值模拟分析、物理模拟试验以及大规模的现场试验,物理模拟试验又分为普通重力场和离心机高重力场两种模型试验。这些研究的目的在于预测地下抽土法的纠偏效果并确定优化的施工工艺^[3]。对于垂直向深部掏土的地基应力解除法,俞季民等(1992)^[5]曾针对武汉一栋住宅楼纠偏工程,采用邓肯-张非线性弹性本构模型,进行简单的平面应变有限元数值模拟,分析了纠偏过程中地基土位移、应力的变化规律。

然而,从已有文献资料来看,关于地基应力解除法的机理和影响因素,国内外研究并不充分,尤其缺乏严

格的物理模型试验研究以及三维弹塑性模拟分析。为此,笔者于香港科技大学岩土工程离心机实验所 400 g-ton 土工离心机和最近开发的四轴机器人操纵臂,开展了一组在离心机旋转过程中的纠偏模拟试验,并结合弹性理论计算,就竖孔掏土纠偏法的开孔顺序、开孔间距、深度等因素对纠偏效果影响的规律进行了研究。本文简要介绍模型试验的设备装置、量测手段和试验方法,报道这一组物理仿真离心模拟试验结果,叙述根据 Mindlin 弹性解所做的计算预测,最后将弹性解计算结果与离心模拟试验结果进行比较分析。

1 试验设备

离心模拟试验设备为香港科技大学岩土工程离心机实验所的 400 g-ton 土工离心机和最近开发的四轴机器人操纵臂,它们的主要技术性能指标分别列于表 1^[6,7]和表 2^[8]。图 3 为机器人操纵臂的示意图。四轴机器人操纵臂在离心模型运行中提供运动(3 个正交自由度和 1 个旋转自由度)和承载能力,模型箱上安放有 4 个快换器(工具盘),操纵臂在一个时间可以选择连接任何一个快换器并运动到任意指定位置。钻孔工具为一不锈钢空心圆管,它预先(实验前)安装于快换器下(见图 3 和图 4(a))。这样,钻孔工具就可以由机器人操纵臂送到指定位置钻孔,掏取指定深度内的土样,实现应力解除法纠偏过程的模拟。

表1 香港科技大学岩土工程离心机实验所
离心机主要技术性能指标

Table 1 Technical specifications for the HKUST's geotechnical centrifuge facility				
关键指标	容量 /g-ton	转臂半径 /m	最大离心加速度/ g	挂篮空间(m×m×m)
性能	400	3.42(至转台中心)	150	1.5×1.5×1(静力试验); 0.6×0.6×0.6(动力试验)

表2 四轴机器人操纵臂的主要技术性能指标

Table 2 Main specifications of the 4-axis robotic manipulator				
轴	行程	最大速率	精度	承载能力
X	875 mm	30 mm/s	±1.0 mm	±1000 N
Y	838 mm	30 mm/s	±1.0 mm	±1000 N
Z	317 mm	30 mm/s	±1.0 mm	±5000 N
θ	270°	10 °/s	±1.0°	±5 N·m

2 模型制作及试验步骤

如图 4(a)、(b) 所示,在一大模型箱(净空尺寸: 1245 mm×1270 mm×762 mm)内放置一较小的模型箱(净空尺寸: 565 mm×565 mm×302 mm),小模型箱内制作地基土模型及建筑物结构模型。

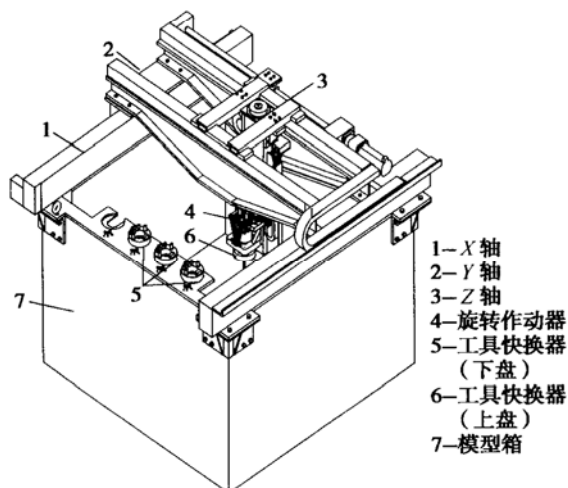


图3 四轴机器人操纵臂示意图

Fig. 3 A schematic diagram of the 4- axis robotic manipulator

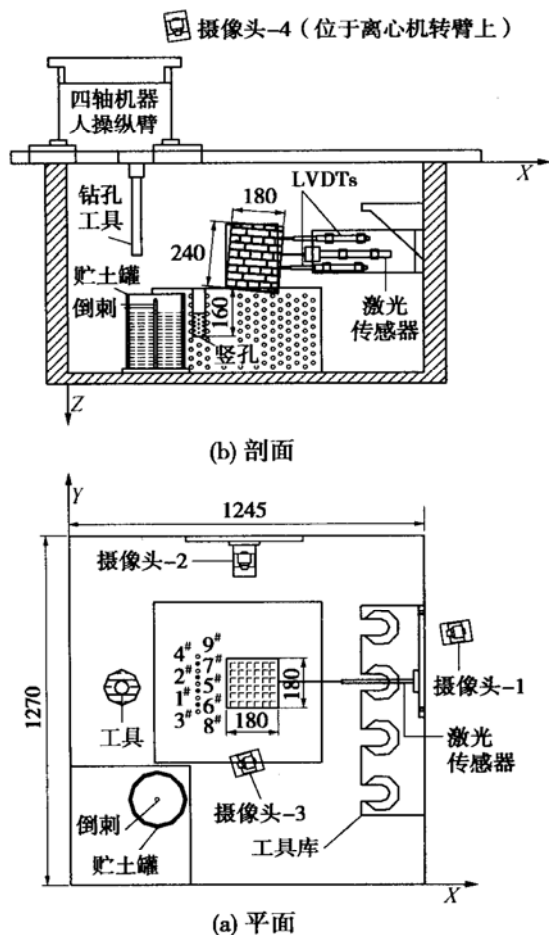


图 4 模型布置

Fig. 4 Model set-up

地基模型土层采用香港地区典型的花岗岩残积土,土层厚度 300 mm。建筑物结构模型为一等截面框架结构,横截面尺寸 180 mm×180 mm,高 240 mm,底板厚 5 mm,其重心在横截面内居中,重心高度 122 mm,模型总重量为 9.66 kg。运行离心加速度采用 30 *g*,则模拟原型地基厚度为 9 m,原型结构物尺寸为 5.4 m×5.4 m,基础底面平均荷载 89 kPa,其值约相当于一 9

层楼高的建筑物荷载。

花岗岩残积土的物理力学性质指标见表 3, 模型试样用分层压实法制备而成。为了使地基土在应力解除后易于变形、上层结构物位移明显和纠偏效果易于观察, 选取了一个很低的干密度来制备地基土模型, 试图让土的变形模量处在超软黏土的量级上。结构物置于土层上部浅层, 按照设定斜率 3.7% 让其倾斜。

表3 花岗岩残积土物理力学指标

Table 3 Main properties of completely decomposed granite

G_s	C_U	ϕ_{cs}' /(°)	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	w /%	e	S_r	G_i /MPa	ν
2.65	12	38	1300	15.3	0.90	0.40	0.253	1/3

应力解除孔布置在建筑物模型的纠偏侧,采用一排共 9 个孔。钻孔的直径为 30 mm, 孔深 160 mm, 孔中心距离建筑物模型边缘 100 mm。达到加速度 30 g 时, 模拟的钻孔直径为 0.9 m, 孔深 4.8 m, 孔中心至建筑物边缘 3 m。加速度至 30 g 后维持加速度不变, 在离心机运转过程中按钻孔顺序逐个进行。如图 4(b) 所示钻孔的编号即为钻孔次序。每孔分两步开挖, 第 1 步钻孔深 70 mm, 将土取出后移至贮土罐(见图 4(b)); 第 2 步继续钻孔至 160 mm 深, 再次将孔中弃土取出移至贮土罐。

建筑物结构模型在纠偏过程中倾斜程度变化通过电压差动式位移传感器(LVDT)和激光感应器(Wenglor emit visible laser light YP_MGV 型)量测,它们的布置如图4(a)及(b)所示。另有4路闭路电视摄像头,分别布置在模型箱和离心机转臂上,从不同角度对四轴机器人操纵臂动作和模型结构物的倾斜纠偏过程,实施实时监视。

3 试验结果和讨论

建筑物结构模型的初始倾斜率为 3.7%，机器人实施钻孔后，建筑物结构模型的倾斜率随钻孔的进行而逐渐减小，待 9 个钻孔完成后，结构物模型的倾斜率减至约 1.5%。图 5 给出了倾斜率随钻孔程序的发展而变化的过程曲线。对该纠偏过程及效果分析如下：

(1) 在相距较近的孔中, 先开挖的孔产生更多的纠偏效果。例如, 1[#] 和 2[#] 孔相对于建筑物结构模型倾斜中心面对称(见图 4(b)), 先开挖的 1[#] 孔, 成孔后引起建筑物结构模型倾斜率改变量达 0.5%, 而后开挖的 2[#] 孔产生的纠偏效果减至 0.3% 左右(见图 5)。前 4 个孔(1[#] ~ 4[#] 孔) 的开挖对建筑物结构模型产生的纠偏量为 1.4%, 而后 5 个孔(5[#] ~ 9[#] 孔) 的开挖所产生的纠偏量只有 0.7%。

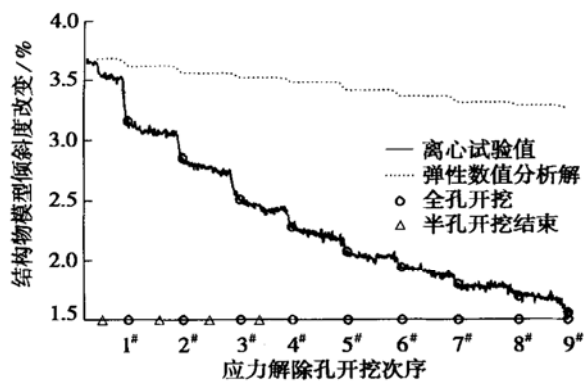


图5 结构物模型倾斜度随孔开挖进展的改变

Fig. 5 Comparisons of building tilt between elastic solution and centrifuge model test

以上试验现象说明,对于后开挖的孔来说,如果孔周围区域的地应力已经为先前钻孔部分释放,那么它的开挖所能发挥的纠偏效应将比先开挖孔来得低。因此在布置应力解除孔时,应使孔位之间有一定的间隔,尽量减少在同一区域和相邻区域内重叠,重叠过多的应力解除孔产生的纠偏效果有限。

(2) 应力解除孔必须达到一定的深度。每个孔均分两步开挖,而从图5可以看出,同一个孔的上半部分和下半部分所发挥的纠偏效用大不相同。图5特别标出了1[#]~4[#]孔上、下半个孔的成孔分界点。以1[#]孔为例,从地基表面至深度70 mm的上半孔和从深度70 mm至160 mm的下半孔引起的建筑物模型倾斜率改变量分别为0.15%和0.38%。分析认为,地基土中的应力由两部分组成,一部分是地基土自重引起的应力,自重应力分布随深度近似为线性关系;另一部分是由上部建筑物的荷载在地层中产生的附加应力。地层中某点处附加应力大小,取决于该点深度和与上部建筑物基础的水平距离。应力计算结果表明,上部建筑物的荷载在地层中基础以下一定范围内产生的附加应力比较明显,而在这个范围以外,其值可以忽略不计。就1[#]孔而言,按照 Boussinesq 公式计算,深度小于35 mm或大于145 mm的土层中,侧向附加应力值不足10% q_s ($q_s = 89$ kPa, 为上部建筑物结构模型在基础底面上作用的平均荷载)。由此可见,应力解除孔必须在一定深度内,才能释放占较大比例的建筑物引起的附加应力,并达到较佳的纠偏效果。这一试验结果与工程纠偏实践中观察到的现象完全一致(刘祖德, 1990)。

4 应力解除法单孔纠偏效果的弹性理论分析

针对该离心模型纠偏试验具体条件,进行弹性理论分析,有助于对离心模型试验结果的理解,同时可以

更好地理解应力解除法纠偏的机理。

依据弹性理论的 Mindlin 解^[9],通过沿深度积分,可以计算钻孔所释放的正应力和剪应力在建筑物结构模型两侧(纠偏侧及其对侧)所引起的竖向位移,两侧的位移差即为纠偏沉降差。

在半无限体表面以下任意点A(深度为 c)处施加水平点荷载 Q 和竖直线荷载 P ,分别在地表面某点 $B(x, y)$ 处引起的竖向位移如下

$$S_{zQ} = \frac{Qx}{4\pi G} \left| \frac{-c}{R^3} + \frac{(1-2\nu)}{R(R+c)} \right|, \quad (1)$$

$$S_{zP} = \frac{P}{4\pi G} \left| \frac{(1-2\nu)}{R} + \frac{c^2}{R^3} \right|. \quad (2)$$

式中 G 为土的弹性剪切模量, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, 弹性模量 E 或 G 根据开孔前结构物荷载增加(离心加速度增加)与地基沉降量之间关系推算(见表4); ν 为土的泊松比,取1/3。 R 为A与B之间距离, $R = \sqrt{r^2 + c^2} = \sqrt{(x^2 + y^2) + c^2}$; r 为A与B之间的水平距离。

将孔内某一深度 c 处沿该孔壁单元上所释放的水平正应力($-\sigma_x$),乘以该单元在孔中心面的投影面积 $D \cdot \Delta c$ (D 为孔径; Δc 为孔壁单元高度),作为该深度处水平点荷载 $Q(= -\sigma_x D \cdot \Delta c)$,代入 Mindlin 式(1),得到正应力释放引起的地面点 (x, y) 处的竖向位移 ΔS_{zQ} 。同样,将该单元释放的剪应力($-\tau_{xz}$)乘以投影面积 $D \cdot \Delta c$,作为竖直线荷载 $P(= -\tau_{xz} \cdot D \cdot \Delta c)$ 代入 Mindlin 式(2),得到剪应力释放引起的地面点 $B(x, y)$ 处的竖向位移 ΔS_{zP} 。将 ΔS_{zQ} 和 ΔS_{zP} 之和沿孔深积分,即可得到开挖所引起地面点 $B(x, y)$ 处的竖向位移:

$$S_z = \int_0^h \left[\frac{-x\sigma_x D}{4\pi G} \left| \frac{-c}{R^3} + \frac{(1-2\nu)}{R(R+c)} \right| + \frac{-\tau_{xz} D}{4\pi G} \left| \frac{2(1-\nu)}{R} + \frac{c^2}{R^3} \right| \right] dc, \quad (3)$$

式中 h 为钻孔深度。

分别对结构物纠偏侧及其对侧进行计算,即可求得两侧沉降差 δ ,进而计算出结构物模型倾斜率的改变量 δ/B (B 为结构物模型底板宽度)。不同孔位的单孔纠偏计算结果如图6所示,图中模型孔深已换算至原型尺度。

从图6可得①每孔开挖到一定深度后,应力释放引起的结构物倾斜率的改变才比较显著。就本例的弹性分析结果而言,这一深度界限约为1.5~2.0 m(在模型约为50~60 mm);②孔的位置对纠偏作用有相当的影响。5号孔位置相对结构物模型中心最居中,该孔开挖产生的纠偏效果也最显著;8[#]和9[#]两孔相对结构物模型中心倾斜面最偏远,这两孔的纠偏效果相对

而言最低。

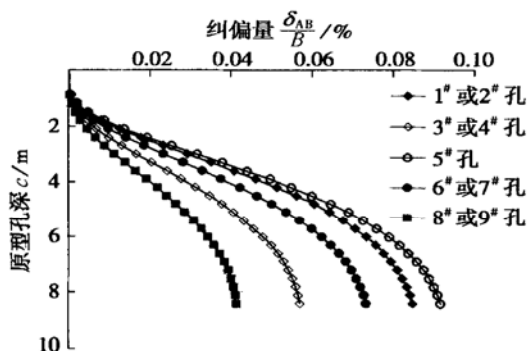


图6 计算纠偏量与孔深度关系

Fig. 6 Calculated relationship of building tilt with depth

5 试验结果与弹性理论计算对比

先开挖的孔已经在一定程度上改变了地基的应力状态,因此对后开挖孔的纠偏效果产生影响。多个孔的纠偏效果,不能由如上所述单个孔的计算结果简单线性叠加,而是应该按照开孔顺序逐个计算,即在每一个孔开挖之后都计算一次地基应力场的改变,并计算相应的建筑物结构的纠偏量。

为简单比较起见,不考虑各孔之间的影响,按照上述弹性解将各个孔的纠偏计算结果线性叠加(即每个孔都假定是从初始地应力状态开始发挥作用),得到9个孔的总的纠偏计算结果如图5所示。将计算结果与模型试验结果对比,可以看出理论预测的纠偏过程曲线的发展趋势与模型试验结果一致,但理论预测的纠偏量比实测效果低许多,仅为20%的实测值。造成这一差异的主要原因,一是没考虑先开挖孔对后开挖孔的影响,二是没考虑土的屈服和塑性变形,而按照土的塑性理论可知,塑性变形一般比弹性变形大得多。因此,为了较准确地预测纠偏效果,应该考虑开孔顺序和真实的土的应力应变本构关系,按照数值方法计算。

另外需要指出的是,本文中的离心模型试验中所模拟的土样以及结构物是一种完全理想化的情形,而实际工程所遇到的土质情况和结构形式往往是比较复杂的,因此,对于某个具体的纠偏工程的分析,需要考虑离心模型试验所预测结果和现场实际真实性状之间存在的差距,根据工程实际情况确定纠偏所需采用的孔径、孔距和孔深等。

6 结 论

(1) 离心模型试验是研究建筑物纠偏问题的有效方法。

(2) 对于密实度一般或松软的地基上的倾斜的上部建筑物,竖向应力解除孔的开挖所产生的纠偏效果是显著的。

(3) 先开挖孔对于后开挖的纠偏效果具有影响。

(4) 应力解除孔应该稀疏布置,减少孔与孔之间的应力重叠影响。

(5) 孔的深度必须达到建筑结构附加应力的主要影响深度区域。

(6) 基于Mindlin解的弹性理论计算结果,可以粗略反映地基开孔应力解除法的纠偏效果,但较准确的计算应该考虑开孔顺序的影响以及土的塑性变形。

参考文献:

- [1] Ranzani S M T. Stabilisation of leaning structures: the Tower of Pisa case[J]. Geotechnique, 2001, 51(7): 647- 648.
- [2] Terracina, Fernando. Foundations of the Tower of Pisa[J]. Géotechnique, 1962, 12(4): 336- 339.
- [3] Jamiolkowski M B. The leaning Tower of Pisa—Present situation [A]. A look back for future geotechnics[M]. Wu Shiming, Zhang Wohua, Richard D. Woods Rotterdam: A A Balkema, 2001, 93- 129.
- [4] 刘祖德. 地基应力解除法纠偏处理[J]. 土工基础, 1990, 4(4): 1- 6.
- [5] 俞季民, 刘祖德, 周全能, 等. 地基应力解除法进行建筑物纠偏的数值模拟[J]. 工程勘察, 1992, (1): 1- 5.
- [6] Shen C K, Li X S, Ng C W W, et al. Development of a geotechnical centrifuge in Hong Kong[A]. Proc Int Conf Centrifuge[C], Tokyo, Japan, 1998, 13- 18.
- [7] Ng C W W, Van Laak P, Tang W H, et al. The Hong Kong Geotechnical Centrifuge[A]. Proc 3rd Int Conf Soft Soil Engineering[C]. Hong Kong, 2001. 225- 230.
- [8] Ng C W W, Van Laak P A, Zhang L M, et al. Development of a four-axis robotic manipulator for centrifuge modeling at HKUST [A]. Proc Int Conf on Physical Modelling in Geotechnics[C]. Newfoundland, Canada, 2002. 71- 76.
- [9] Mindlin R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. J Appl Phys, 1936, 7(5): 195- 202.