

表 1 土层主要物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil layers

土层名称及 编号	厚度 m	含水量 w%	孔隙比 e	天然重度 KN/cm ³	液限 Wl%	塑性指 数 Ip	液性指 数 Il	压缩系数 avMpa-1	压缩 模量 EsMpa	固结快剪		f _{ak}
										C (Kpa)	φ (°)	
①粉质粘土	0.8-1.5	32.4	0.93	18.6	41.5	17.6	0.60	0.3	4.6	9.6	24.5	110
②粉质粘土	0.8-1.5	33.0	1.07	17.3	45.9	22.7	0.98	0.4	3.3	7.0	11	80
③淤泥质粉 质粘土	3	43.7	1.23	17.6	40.4	14.2	1.32	0.8	3.2	9.0	24.3	70
④粉砂	5	38.3	1.08	18.0	35.9	10	1.32	0.56	4.9	7.7	26.2	130
⑤淤泥质粉 质粘土	11	44.7	1.27	17.4	41.3	15.0	1.28	0.8	3.0	10.1	23.4	70

E. 纠偏设计及施工

纠偏采用基础内深层土体螺旋钻孔掏土法，南侧沿基础外边缘进行堆载。基础内深层掏土在沉降小的南侧布置斜孔，用螺旋钻从孔底③层深层取土，钻孔距基础 1.2m，孔径 130mm，孔距 1.1m，倾角 75°，倾向北，孔深 6.0m，掏土深度 3.5~6.0m，总掏土量与沉降差成正比，每次掏土量不大于 0.03m³，在接近纠倾目标时利用纠倾滞后效应进行微调，达到纠倾目标后用中细砂充填钻孔，在工程施工时进行注浆加固。纠偏掏土见图2。

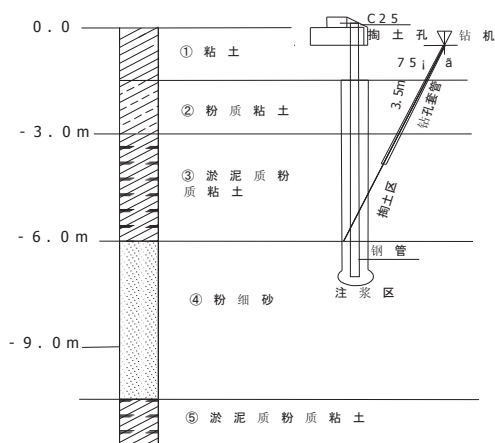


图 2 加固、纠偏掏土孔布置剖面图

Fig.2 Section plane of excavation bore of reinforcement and rectification

F. 纠偏加固效果

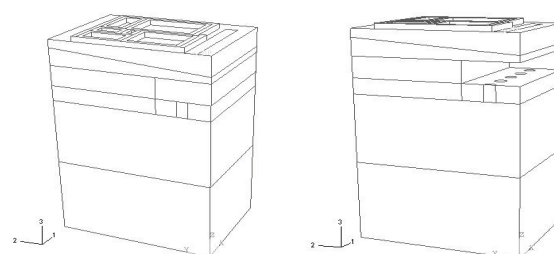
该小区经六个月的施工，所有房屋都得到纠偏和加固，指标达到了设计要求，经一年的观测，房屋的倾斜和沉降全都在规定的指标范围内，第 29 栋的倾斜率由 11%纠正为 5%，沉降基本稳定。

III. 掏土纠偏过程有限元分析

利用有限元软件 ABAQUS，选倾斜度为 11%住宅楼为有限元模拟对象，总掏土量 7.473m³，单孔掏土量 0.83m³，有限元模拟掏土方案与施工设计方案相同，不考虑注浆和钢管桩加固。

A. 各部分几何体

因模型具有对称性，模型取一半同时施加对称边界。另外三个立面施加位移边界，U3 自由，其它位移均固定。模型主要由地基、条形基础、堆载面三部分组成。其中条形基础和地基创建为三维变形体，条形基础平面图如图 1 所示。地基在坐标 1, 2, 3 方向的尺寸分别为 10m, 13.6m, 20m，掏土孔共 4.5 个，深度 4.5m~6m，孔距 2.2m，参看图 3。堆载面设为壳解析刚体，置于较高的南侧地基，宽 1m，长 8.4m，与条形基础边缘平齐。对地基施加 1000kg/m²的面压力，U3 自由，其它位移均固定。



(a) 模型部件组合 (b) 掏土孔位置

图 3 掏土纠偏有限元分析模型

(a) Assembly of model components

(b) Positions of excavation holes

Fig.3 Finite element model of rectification

B. 基本材料力学性能与参数

该建筑采用条形基础，为 C20 混凝土，采用线弹性材料模型，密度为 2500kg/m^3 ，弹性模量为 25.5GPa ，地基土层采用弹塑性模型^[4]。

C. 分析步设置

分析步共分为 7 步，第 1 步为地基初应力平衡步，第 2~6 步为掏土步，通过掏土解除一定地基应力。依次掏去靠近对称面的半圆柱孔和逐步远离对称面的 4 个孔。对于掏土过程，ABAQUS 采用的是移除单元，使单元失效的方法。第 7 步为堆载加压步，通过南侧堆载加压，使南侧地基进一步沉降。

D. 上部荷载简化

在条形基础中线上固结抗弯刚度极小的“软梁”，上部荷载简化为线荷载施加于“软梁”上，对条形基础和地基土层施加重力荷载。

E. 网格划分

条形基础设为三维 8 节点实体单元，地基为三维 4 节点实体单元。网格均以单元尺寸控制。条形基础单元尺寸设为 0.3m ，共 910 单元。地基单元尺寸设在 0.3m 至 0.75m 之间，掏土孔单元尺寸设为 0.2m ，整个地基单元总数共约 10 万。堆载刚性面为解析刚体，不需划分网格。有限元模型网格划分如图 4 所示。

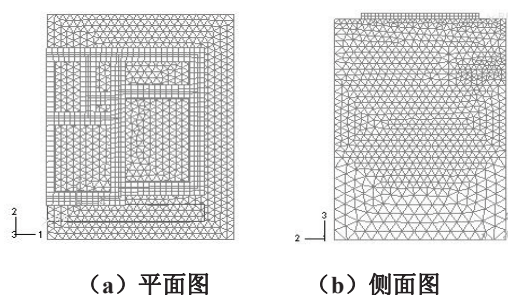


图 4 掏土纠偏有限元模型网格划分
(a) Plan view (b) Side view

Fig.4 Meshing of finite element model of rectification

F. 计算结果及分析

(1) 地基沉降量分布

由于上部荷载偏心 and 土层分布不均的原因，地基顶面沉降量各处分布不一样，如图 5 所示。纠偏前地基北侧沉降量比南侧大，基础向北侧倾斜。纠偏后，南侧沉降量增大，基础倾斜度减小。

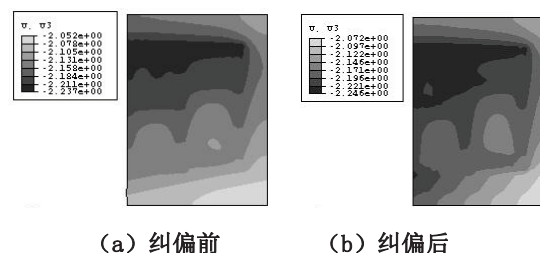


图 5 地基顶面竖向位移分布图（上北下南）

(a) Before rectification (b) After rectification

Fig.5 Vertical displacement distribution at top surface of foundation

图 6 给出了地基侧面竖向位移分布图，可以看出，浅层地基沉降量很大。随着地基加深，上部荷载局部影响逐渐减小。在纠偏过程中，因堆载加压，整个地基竖向位移均有所增大。

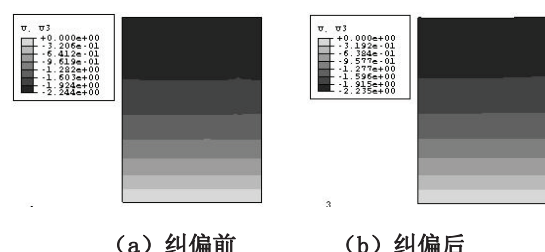


图 6 地基侧面竖向位移分布图（左北右南）

(a) Before rectification (b) After rectification

Fig.6 Vertical displacement distribution at the side of foundation

(2) 基础沉降量和建筑物倾斜度

图 7 给出了掏土前后基础南北侧沉降差。

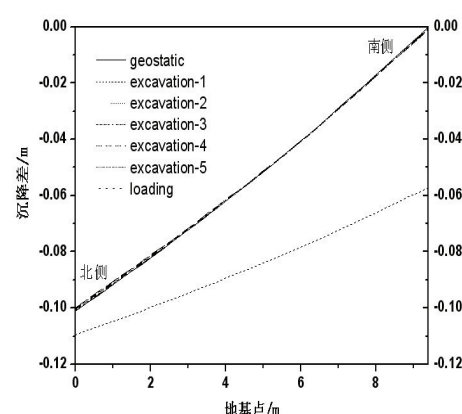


图 7 掏土纠偏前后基础沉降差比较

Fig.7 Difference of foundation settlement of excavation adopting constructing method

在地基初应力平衡分析步里，南北侧沉降差 -0.101m ，经过 5 步掏土，基础南北两侧沉降量分别为 0.00m 、 $+0.01\text{m}$ ，基础南侧基本不动，北侧有

上升趋势。堆载加压过程中,基础南北两侧沉降量分别为 -0.057m 、 -0.008m ,南北两侧沉降差为 -0.049m 。最终,基础倾斜度降低为 5.5% ,这与实测吻合,同时我们也可发现,堆载产生的纠偏效果优于掏土,但堆载同时加大了两侧的沉降。

IV. 掏土纠偏方案比较有限元仿真

A. 施工次序变化的有限元仿真模拟

设计了两种不同的纠偏方案作为比较,结果绘于图 8。方案一是把掏土步由 5 步改为 1 步,掏土孔一次掏除,然后堆载加压。方案二是不掏土直接进行堆载加压。结果表明,方案一的 1 步掏土与施工方案的 5 步掏土,计算结果相差很小。方案二直接堆载加压法的计算结果也与施工方案相差不大,只是基础北侧沉降量稍大。究其原因,主要是由于该建筑为二层半住宅楼,总荷载比较小,地基内附加应力较小,掏土过程对地基内附加应力调整影响较小。相对而言掏土位置偏深,掏土对地基上部影响偏小。

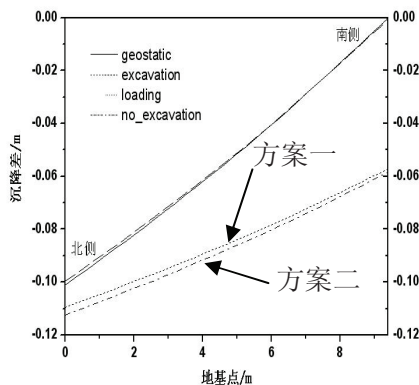


图 8 不同掏土纠偏方案时的基础沉降差

Fig. 8 Difference settlement of foundation adopting different methods of rectification through excavation

B. 掏土量变化的有限元仿真模拟

为了进一步研究掏土对纠偏过程的影响,对掏土量加大两倍时的工况进行了仿真。图 9 给出了掏土量加大两倍时的基础沉降情况。可以看出,随着掏土量的增大,基础南侧沉降量加大,而北侧逐渐抬升,基础围绕中间一点(距北侧边界约 2 米处)作近似刚性转动,这也说明加大掏土量能提高纠偏效果,同时要处理好南侧沉降可能带来的危害。

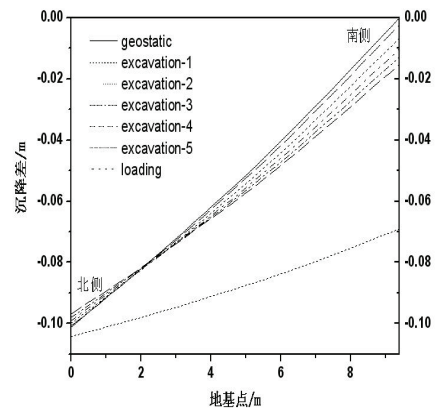


图 9 掏土量增加两倍时的基础沉降差

Fig. 9 Difference of foundation settlement as excavation amount was increased two times

V. 结论

对于建筑物纠偏过程,由于涉及的参数较多,上部荷载及地基土层性质复杂多样,运用理论方法进行计算有一定的难度,按经验设计施工又有很大的盲目性,因此建立合理的有限元模型对于指导工程实践具有重要的现实意义。

本文采用有限元软件 ABAQUS,对某小区典型住宅楼进行了模拟分析。在地基初应力平衡步里得到纠偏前的倾斜度为 10.7% ,实测值约为 11% ,吻合较好。随后,按照施工方案模拟掏土纠偏过程,得到的结果与实际相符,同时,还模拟了不同施工次序和不同掏土量时的沉降情况,根据有限元计算结果和分析,提出了纠偏方案的修正思路。

References

- [1] LIU Zu de. Fifteen Year Experience in buildings (structures) rectification and inclination prevention [J]. Soil Eng. And Foundation, 2006, 20(6): 84-86. (In Chinese)
- [2] ZHANG Li, YANG Hua, YU Xingfu. Investigation and remedy on a buoyed underground-garage of raft foundation basement [J]. GEOLOGY AND PROSPECTING, 2008, 44 (4) :93-94(In Chinese)
- [3] Chen Feng, Liu Zude. Study of the method of subgrade-stress relieving method based on F.E.M. in building rectification[J]. Soil Eng. And Foundation, 2000, 10(3): 4-7(In Chinese)
- [4] SUN Chaoqun, ZHOU Ke. A constitutive model of Shanghai soft clay based on SMP criterion[J]. Hydrogeology and Engineering Geology. 2009, 36(2):81-83(In Chinese)