

文章编号:1007-2993(2014)03-0143-05

开口环形深基坑围护结构变形监测与数值分析

章 新¹ 赵升峰¹ 黄广龙²

(1. 南京市测绘勘察研究院有限公司, 江苏南京 210019; 2. 南京工业大学交通学院, 江苏南京 210009)

【摘 要】 南京扬子储煤筒仓基坑工程地基中分布有厚度较大的软土层,且该工程基坑为 11.40 m 深,直径约 27.0 m 的开口圆环形,其中开口段弧长约 10.0 m。基坑围护结构采用钻孔灌注桩结合环形内支撑的型式。开口段对基坑的变形和稳定性有较大的影响。以该工程为例,采用三维有限元数值分析方法,建立了摩尔-库仑弹塑性模型,进行不同开挖阶段的数值模拟计算,并与监测结果进行了对比。结果表明,计算值与实测值差距较小,变化趋势基本一致,有限元计算的结果是可信的,可为类似工程优化设计与施工提供参考。

【关键词】 开口环形深基坑;三维有限元;水平位移;现场监测

【中图分类号】 TV 551.4;TU 942

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2014.03.008

Deformation Monitoring and Numerical Analysis of Supporting Structure of Open Ring Deep Foundation Pit

Zhang Xin¹ Zhao Shengfeng¹ Huang Guanglong²

(1. Nanjing Institute of Surveying, Mapping & Geotechnical Investigation, Co., Ltd, Nanjing 210019, Jiangsu, China;

2. College of Transportation Science & Engineering Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, Jiangsu, China)

【Abstract】 There are thicker soft soil layers distributed in the subsoil of Nanjing Yangzi coal storage silo project which deep foundation engineering excavates a pit with the depth of 11.40 m. The row piles were used as retaining structure with cast-in-situ bored pile and ring beams as struts which are 10.0 m length of open arc. However, the open sections of ring struts have a great influence on the deformation and stability of foundation pit excavation. Based on this practical engineering, a three-dimensional finite element numerical analysis model was established and the soil and the interface elements were modeled as elasto-plastic materials obeying Mohr-Coulomb failure criterion, then staged excavations were simulated and calculated. Compared with monitoring data, the results showed that the difference between calculated values and measured values was negligible, and the variation trend was almost the same. The calculated results of finite element are reliable, which can be references for design and construction improvement of similar engineering.

【Key words】 open ring deep foundation pit; 3D finite element; horizontal displacement; field monitoring

0 引言

随着我国城市建设的发展和大型地下工程的不断涌现,深基坑工程日益增多,且规模和深度不断加大。深基坑成为一项复杂的、综合要求较高的工程。在基坑施工过程中坑内外土体应力状态的改变将会引起土体的变形,从而造成其围护结构的变形。由于深基坑工程存在时空效应,一般很难通过解析的方法来求解基坑工程中围护结构的变形及其对周边环境的影响,有限元数值分析方法因强大的适用性,为这种问题的求解提供了一种强有力的计算分析工具^[1-3]。

基坑工程采用有限元数值分析方面,胡浩军^[4]运用 Mohr-Coulomb 本构模型对基坑开挖、失稳破坏、边坡支护进行了数值模拟分析;张运良^[5]建立了非线性有限元数值分析模型,对多种支护方式作用下的基坑开挖变形情况进行对比分析,总结出了这些支护方式下基坑变形规律;房师军^[6]依据基坑工程排桩围护结构变形实际监测数据,并结合数值模拟方法,详细分析了基坑施工各阶段的围护桩体变形规律;刘杰^[7]建立了弹塑性有限元模型,将获得的围护结构变形结果与监测结果进行了对比分析,结果表明,有限元数值计算结果与现场实测结果比

较一致;张春会^[8]以深基坑开挖为背景采用有限元数值模拟,对土体本构模型和计算参数进行了反演研究;刘红岩^[9]运用数值模拟手段对某基坑在开挖方法及支护方式已定情况下的安全性问题进行了探讨;Schweiger^[10]认为数值分析成本较低且相对于传统手算工作量较少,且完整合理的数值分析结果可作为设计依据。

基于上述分析,本文以开口圆环深基坑开挖有限元数值模拟为工程背景,通过midasGTS有限元与理正深基坑计算软件对南京扬子储煤筒仓深基坑进行模拟计算,并结合现场监测数据进行对比分析其开挖过程中围护结构的变形特性。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

南京扬子储煤筒仓由一直径100.0 m、高60.0 m原料仓,一座转运站,一座输煤栈桥组成。筒仓侧壁高40.0 m,基础埋深约3.5 m;中心筒机械转运传输带,最深处为11.4 m,直径约27.0 m的开口圆环形,其中开口段弧长约10.0 m;基坑由中心筒向侧壁经过廊道逐渐变浅。

1.2 工程地质概况

本工程场地位于南京扬子公司场区内,场地地势平坦,附近无已建或在建项目。地貌为长江漫滩地貌单元。基坑开挖影响范围土层物理力学参数见表1。

表1 土层物理力学性质表

层号	土层名称	平均厚度 h/m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩模量 E_s/MPa	泊松比 ν
① ₁	素填土	3.5	18.0	5	12	6	0.35
① ₂	冲填土	3.5	18.0	0	15	8	0.33
②	淤泥质粉质黏土	14.4	18.0	13	8.8	4.15	0.32
③	淤泥质粉质黏土与粉砂互层	12.9	18.2	11	15	4.78	0.29

土层自上而下为:

①₁素填土:杂色,为碎石混少量粉质黏土,结构松散,近期零星堆填,堆填时间小于5 a。

①₂冲填土:灰色,以粉细砂为主,见少量植物根茎,结构松散,近期堆填,堆填时间小于5 a。

②淤泥质粉质黏土:灰色,流塑,局部软塑,含有机质及腐殖质,偶夹薄层粉砂,粉砂厚度约1~2 mm,含量小于10%,黏性土有光泽,干强度及韧性中等,无摇晃反应。

③淤泥质粉质黏土与粉砂互层:灰色,黏性土呈流塑,局部软塑,含有机质,粉砂为稍密-中密,饱和。黏性土与砂呈互层状分布,厚度比约1:1,单层厚度0.1~0.5 m不等。

④₁粉质黏土:灰-灰绿色,上部呈可塑状态,下部为硬塑状态,呈渐变趋势,土质均匀。

④₂粉土:灰绿色,密实,湿,夹少量粉砂层。

⑤粉砂:灰色,饱和,密实,土质均匀,含云母碎片及石英颗粒,底部混少量卵砾石。卵砾石具有一定的磨圆度,无分选,粒径约2~4 cm,含量约20%。

⑥₁强风化砂质泥岩:紫红色,局部为泥岩,岩芯呈碎块,遇水易软化,手掰易断,裂隙较发育,岩石属极软岩,岩体基本质量等级为V级。

1.3 水文地质概况

场地范围及附近无污染源存在,无大面积地表水体。地下水主要分布于①₂层冲填砂及以下淤泥质土中,属孔隙潜水,④₂层、⑤层为深层含水层,具有一定的承压性。地下水和水位以上土层对混凝土具微腐蚀性,对混凝土结构中钢筋具微腐蚀性。

2 围护结构设计及监测

2.1 围护结构设计

围护结构设计见图1、图2。

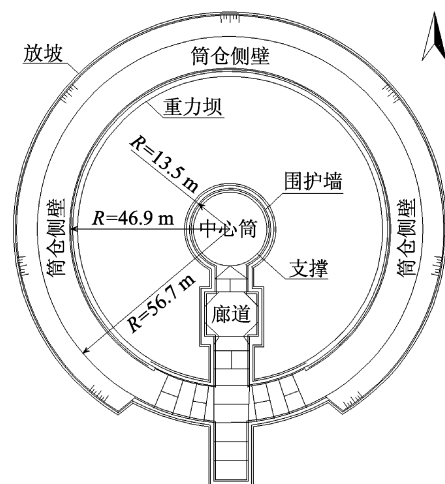


图1 基坑围护结构平面布置图

本基坑形状较复杂,综合场地的工程地质、水文地质条件和周边环境的保护要求,以“安全可靠、经济合理、技术可行、方便施工”为原则,选用以下顺作法支护方案。

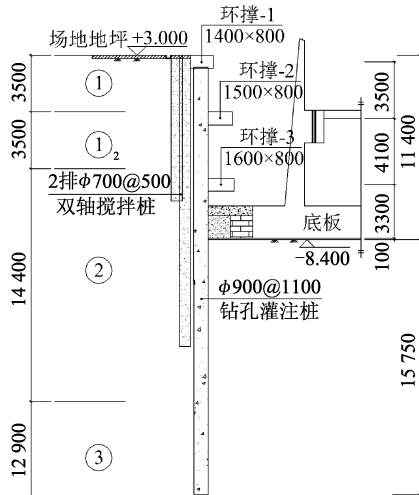


图2 中心筒部分围护结构剖面图(单位:mm)

2.2 监测项目

综合本工程基坑挖深大、工程地质与水文地质条件复杂、环境保护要求高等特点,根据设计要求、相关规范及地区工程经验确定本基坑工程的监测内容。主要监测点平面布置见图3。

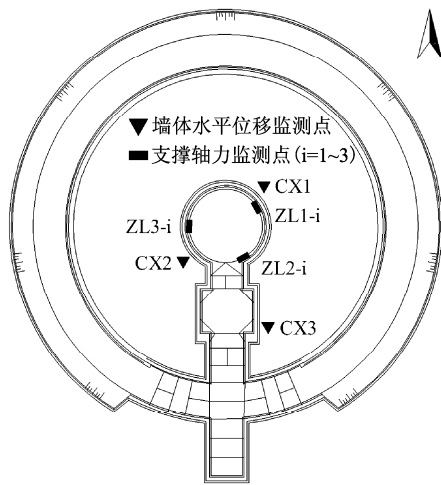


图3 主要测点平面布置图

为保证所有监测工作的统一进行,提高监测数据的精度,使监测工作有效地指导整个工程的施工,本次监测工作采用整体布设、分级布网的原则。即首先布设统一的监测控制网,并在此基础上布设监测点。

2.3 监测结果分析

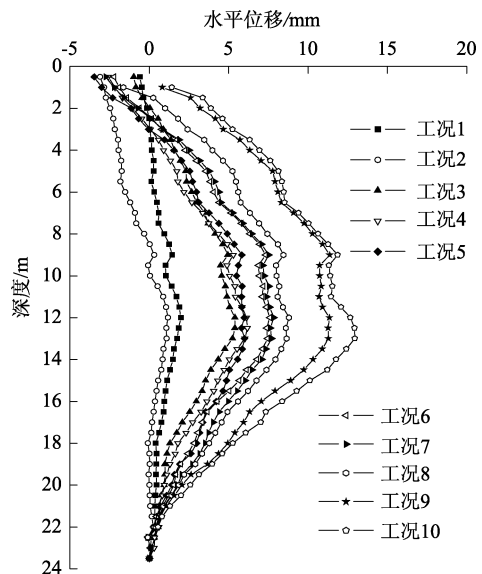
深层水平位移监测是反映基坑支护结构状况最

直观、最可靠,也是最重要的指标,是基坑施工中关注的重点。选取中心筒 CX1、CX2 两个典型测斜管的监测数据进行分析。基坑开挖关键工况见表2。图4(a)、图4(b)分别为埋设在紧靠围护墙外侧土体内的测斜管 CX1、CX2 测得的各开挖工况下土体水平位移随深度变化的曲线。

表2 关键施工阶段

工况	施工阶段	开挖面标高/m
1	施工围护墙	+3.000
2	开挖第一层土	+1.700
3	施工冠梁及第一道支撑	+1.700
4	开挖第二层土	-1.800
5	施工围檩及第二道支撑	-1.800
6	开挖第三层土	-5.900
7	施工围檩及第三道支撑	-5.900
8	开挖到坑底	-8.400
9	施工底板换撑	-6.300
10	拆除第三道环撑	

从曲线图可以看出,曲线呈“纺锤”状,符合内支撑支护结构变形特点,基坑每层开挖至设计深度后,其累计位移随开挖深度的加深不断地增大,每开挖一层最大变化量约 4.0 mm,开挖至设计深度后,最大累计位移量为 11.34 mm(管口下 11.0 m),在随后的底板施工过程中,位移量逐渐增大直至底板混凝土浇筑结束后,位移量才逐渐趋于平稳,第三层环撑拆除后,土体位移量变化不大。监测数据显示,最大累计位移量为 18.91 mm。



(a) CX1

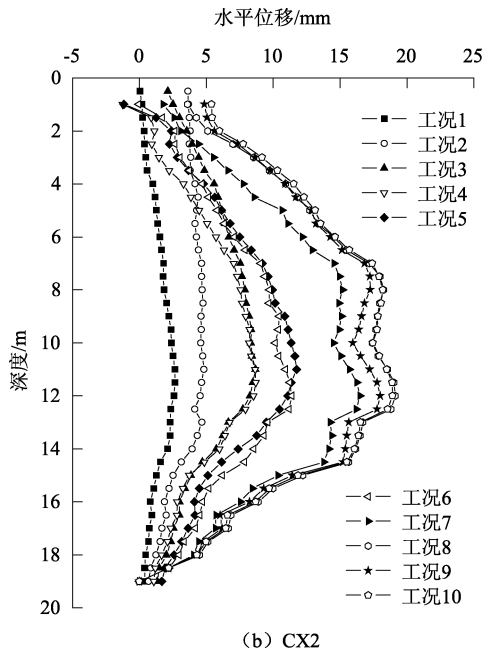


图4 开挖阶段水平位移曲线

3 数值分析

3.1 计算参数取值

由于支护结构刚度较大,选用线弹性模型。围护墙及支撑混凝土等级为 C30,弹性模量取 30 GPa,泊松比取 0.25,其余计算模型的结构参数见表 3。

表3 基本分析模型的结构参数

围护结构			支撑系统	
厚度 /mm	EI /($MN \cdot m^2 \cdot m^{-1}$)	EA /($MN \cdot m^{-1}$)	截面 /mm	EA /MN
$\Phi 900@1100$	878	17340	1400×800	33600
(700)	(858)	(21000)	1500×800	36000
$\Phi 1000@1200$	1226	19625	1600×800	38400
(800)	(1280)	(24000)	800×700	16800

注:()内数值为相应围护桩以抗弯刚度相同等效值

3.2 有限元模型

根据设计方案,建立了三维空间有限元模型进行分析计算(见图 5)。由于本基坑仅中心筒及廊道部分挖深较深,考虑基坑自身的尺寸效应,简化模型,故只对中心筒及廊道部分进行模拟。取模型尺寸为 80 m×80 m×36 m,模型底面为固定约束,四周为水平向固定、竖向滑动的约束。整个模型共划分 12 个网格组,16 340 个单元,8496 个节点。有限元模型见图 5。其中支撑梁及围檩采用空间梁单元,围护桩按刚度等效为围护墙后,采用空间板单元

模拟。基坑底面以下及外侧土体采用摩尔-库仑弹塑性模型。采用排水、有效应力分析法进行分析。

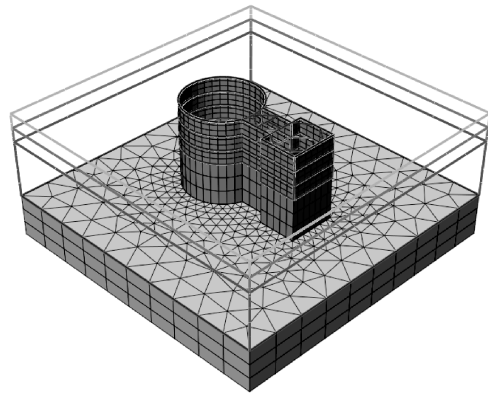


图5 中心筒及廊道部分基坑三维有限元模型

3.3 计算结果

图 6 给出了施工至基坑开挖到底由 midas GTS 计算的围护墙水平位移云图。由图可见圆环支撑开口处土体位移较大,且最大位移发生在坑底附近。

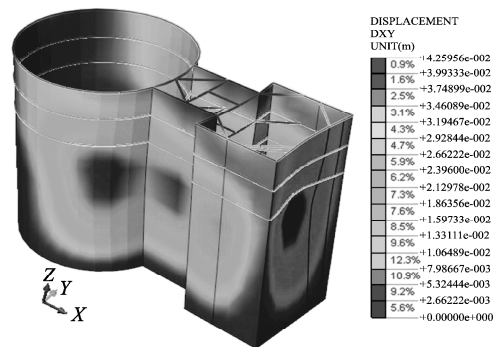


图6 围护墙水平位移图

4 计算与监测结果对比分析

选取关键施工阶段工况 8 的计算结果与实测值进行对比分析,图 7(a)、图 7(b)分别为 CX1、CX2 测斜管处围护墙水平位移实测值与计算值对比曲线。由图 7 中可看出;CX1 测斜管实测坑底位置围护墙最大位移为 8.8 mm。midasGTS 计算最大位移值为 8.0 mm,与实测值相比误差 9.1%;理正深基坑计算最大位移值为 29.66 mm,比实测值增长了 237.0%。CX2 测斜管实测坑底位置围护墙最大位移为 18.91 mm。midasGTS 计算最大位移值为 18.2 mm,与实测值相比误差 3.8%;理正深基坑计算最大位移值为 29.66 mm,比实测值增长了 56.8%。

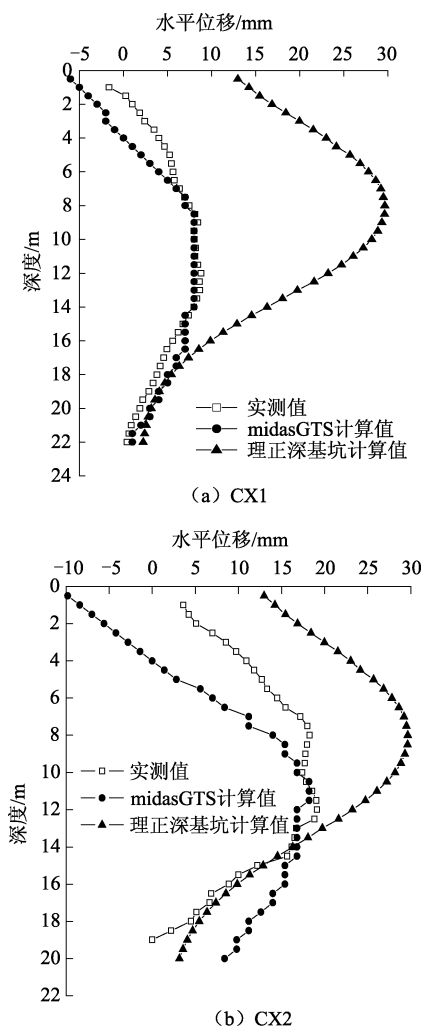


图7 水平位移实测值与计算值对比曲线

理正软件单元计算模型采用的是《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—1999)里规定的土压力计算模型。其计算过程只取单位宽度土条进行计算,忽略了基坑工程本身存在的空间效应,且理正软件单元计算只能考虑水平支撑,无法对环形内支撑进行分析,特别是环形支撑的拱效应。上述分析中,实测值与有限元模拟值均与理正计算值相差较大,一则与计算模型的选取相关;二则是由于环形基坑围护墙的侧向位移存在明显的空间拱效应,有效地减小了围护墙的变形。

5 结论

1)圆环开口处围护墙水平位移普遍大于其余部位。反映了环形支护结构在开口处应力集中,水平位移较大,进行支护设计时应考虑适当加强。

2)基坑开挖面以上部分,理正深基坑计算值远大于 midasGTS 计算值。整体的三维有限元模

型,相比于理正深基坑商业设计软件而言,能够更好地考虑基坑空间效应对围护结构水平位移的影响。

3)midasGTS 计算值略小于实测值,可能是由于模拟计算中车辆、施工机械等施工荷载的影响选取与工程现场实际不完全相同,使得计算结果和实测位移存在一定的偏差,但其变化趋势基本一致。表明有限元计算模型和参数取值是较合理的,可用于基坑工程分析。

参考文献

- [1] 李四维,高华东,杨铁灯. 深基坑开挖现场监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊1): 284-291.
- [2] Wang Z H, Zhou J. Three-dimensional numerical simulation and earth pressure analysis on double-row piles with consideration of spatial effects[J]. Journal of Zhejiang University(Applied Physics & Engineering), 2011, 12(10): 758-770.
- [3] 王浩然,王卫东,徐中华. 基于数值分析的预估基坑开挖对环境影响的简化方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 108-112.
- [4] 胡浩军,王元汉. 深基坑开挖与支护模拟仿真分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 669-672.
- [5] 张运良,聂子云,李凤翔,等. 数值分析在基坑变形预测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 113-119.
- [6] 房师军,付拥军,姚爱军. 某地铁工程深基坑排桩围护结构变形规律分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊1): 216-219.
- [7] 刘杰,姚海林,任建喜. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊2): 456-461.
- [8] 张春会. 基坑开挖的数值模拟及土体本构模型和参数反演研究(博士学位论文)[D]. 青岛:中国海洋大学, 2007.
- [9] 刘红岩,秦四清,李厚恩,等. 深基坑工程开挖安全性的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1441-1444.
- [10] Schweiger H F, Vermeer P A, Wehnert M. On the design of deep excavations based on finite element analysis[J]. Geomechanics and Tunneling, 2009(2): 333-344.

收稿日期:2013-10-30