DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2014.03.18

# 沈阳北站深基坑工程的变形 监测与数值模拟分析

杨博维

(辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要:以沈阳北站综合交通枢纽 I 区深基坑工程为研究对象,对基坑围护结构及其变形进行了现场监测,分析了 基坑施工过程中围护结构的变形随基坑开挖深度和时间的变化规律。运用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>,对深基坑开挖 支护的全过程进行了三维模拟,分析了基坑开挖后,围护结构的变形特性,并与现场监测结果进行了对比分析。数 值计算结果与现场实测结果比较一致。可通过数值模拟研究深基坑工程的变形规律。

关键词:深基坑工程;变形监测;变形规律;FLAC<sup>3D</sup>

中图分类号:TV314 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2014)03-0090-05

# Aanalysis of deformation monitoring and numerical simulation for deep foundation pit project in Shenyang north Station

#### **YANG Bowei**

(Institute of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract**: Taking the deep foundation pit engineering of integrated transport hub I area in Shenyang north station as research object, the paper carried out field monitoring to structure and deformation of foundation pit retaining and analyzed the change rule of deformation of retaining structure in foundation pit construction process with excavation depth and time. By using finite difference software FLAC<sup>3D</sup>, the whole process of deep excavation support was simulated by 3d. It analyzed the deformation characteristics of the retaining structure after excavation of foundation pit, and carried out comparative analysis for field monitoring results. The results of numerical calculation are consistent with the measured results. The deformation rule of deep foundation pit can be studied by numerical simulation.

Key words: deep foundation pip project; deformation moitoring; change rule of deformation; FLAC<sup>3D</sup>

### 1 研究背景

随着国民经济的发展与人们居住环境要求的提高,近年来我国高层建筑工程得到飞速发展。城市 土地资源紧张,因而发展高层建筑的同时,地下建筑 的建设也逐渐成为一个重要发展方向<sup>[1]</sup>。而包括 高层及多层建筑的地下室、地下商业街、地下车库、 地铁车站、越江隧道等各种形式的地下建筑工程的 建设,面临的首要问题就是大规模的深开挖。因此, 深基坑开挖和支护等一系列相关工程技术得到了不 断的发展<sup>[2-4]</sup>。

早在20世纪30年代初,Terzaghi等<sup>[5]</sup>人就已经

开始研究和深基坑开挖工程相关的岩土体稳定性问题,率先提出了预估挖方稳定性和支撑荷载大小的总应力法。此后国内外的许多知名学者都做了大量 有关深基坑问题的研究,并取得了显著的成绩<sup>[6-7]</sup>。 我国对深基坑工程的研究始于 20 世纪 70 年代末。 但我国经济建设发展迅速,特别是 90 年代以后,高 层建筑不断涌现,相应的如何保证深基坑开挖安全 和支护结构安全稳定、降低基坑开挖对周边建筑的 影响等成为了工程界和研究者最为关注的问题。相 应也产生了数十种先进的支护理论设计及施工工 艺,并在工程实践中得到较好的应用效果<sup>[3,8]</sup>。基 坑支护方法也从早前简单的放坡开挖发展到悬臂围 护、拉锚围护、组合型围护等多种支护形式。为了使 深基坑工程围护结构更加合理有效和安全经济,综 合利用"空间效应"形成了多种组合型围护形 式<sup>[9-12]</sup>。

本文以沈阳北站综合交通枢纽I区基坑工程为研 究对象,根据基坑工程及周边的环境条件、工程地质 条件、水文地质条件,做出了基坑工程方案的初步规 划设计;研究各种支护形式对于本基坑的适用性和经 济性,优选排除不适合的支护形式;对不同位置、不同 开挖深度的基坑分别优选混凝土、锚索支护形式;对 施工过程中有关的变形位移进行全程监测,并对监控 数据进行分析。利用大型有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>对 6 种不同工况下该基坑工程的开挖与支护过程进行数 值模拟,并对其计算结果进行了对比分析。

### 2 工程概况

### 2.1 工程条件

I 区社会车停车场位于友好街东侧,北站路以南,为地下两层结构,覆土1.5 m厚,地下部分为社 会车停车场,建筑面积约12294 m<sup>2</sup>,地面为公交车 停车场。I 区基坑东西向长138.6 m,南北向宽48.2 m,埋深12.05 m。I 区基坑东侧距离时代广场酒店 裙房地下室约5.45 m,时代广场酒店主楼地上25 层,裙房地上4层,局部5层,地下两层,埋深约 10.5 m;南侧距离天顺超市约20.4 m,天顺超市地 上26层,地下两层,埋深约10.3 m;西侧距离既有 地下一层人防结构约5.77 m,地下一层人防结构埋 深约7.35 m;北侧紧邻为北站路。

在 I 区基坑北侧和南侧有一排 D = 800 mm 间 距 L = 1 800 mm 的人工挖孔桩,桩顶标高-2.0 m, 桩长 l = 12 m,为 20 世纪 80 年代末施工的基坑围 护桩,混凝土标号 C20,纵筋为 C20,箍筋为 6.5@ 200,根据 2011 年 10 月 20 日沈阳市人防办组织的 I 区基坑方案专家组意见,应对原围护桩进行检测,在 保证安全的前提下适当利用原有围护桩,故本工程 基坑设计图纸在基坑开挖后,根据对原有围护桩进 行检测的结果进行调整。

#### 2.2 基坑支护结构设计

I 区基坑深 h = 12.05 m,围护结构采用钻孔灌 注桩 + 一道混凝土支撑。本基坑方案总体上考虑利 用南北两侧既有围护桩,将南北两侧新施做的围护 桩压低,利用原围护桩作为挡墙,以减小新施做围护 桩的长度、配筋,新施做的围护桩及混凝土支撑为原 围护桩提供可靠的嵌固条件,东西两侧新施做围护 桩桩顶与原围护桩顶平齐,并与原围护桩统一浇注 冠梁,形成整体冠梁结构。基坑的第一道支撑位于 同一标高,南北两侧支撑在冠梁上,东西两侧支撑在 腰梁上。围护桩采用直径 D = 1 m,间距 L = 1.5mm 钻孔灌注桩,局部桩径 D = 1.2 mm。临时立柱 桩直径 D = 850 mm,有效桩长  $l_0 = 15$  m,临时立柱 采用四根 L160mm × 12mm 角钢焊接的格构柱。在 基坑西侧靠近人防结构部位, -7.5 m 标高处施做 一道 3s 锚索, -3.15 m 标高处施做一道 4s 锚索,间 距均为 1.5 mm。锚索支护设计参数见表 1。

表 1 锚索支护设计参数表 m, mm, kN, (°)

参数名称		参数设计				
锚索长度	全长	20				
	自由段	9.5				
	锚固段	10.5				
材料	规格	强度 1860 MPa 钢绞线				
	截面	$4 \times \phi 15.24$				
	钻孔孔径	150				
预应力锁定值		200 ~ 400				
设计轴力		300 ~ 500				
空间位置	倾角	25				
	水平向布置	一桩一锚、两桩一锚或者两				
		者结合空				
	垂直向布置	两道或者三道				

### 2.3 监测方案设计及结果分析

为保证基坑施工安全和降低基坑开挖对周围的 环境影响,基坑开挖时应进行信息化施工,即加强基 坑施工过程中的动态监测,一旦出现监测量达到危 险警戒值,应立即报警并采取相应措施,降低危险发 生的概率。

根据工程需要对基坑围护桩的沉降量应进行现 场监测,根据本工程特点在基坑每侧各选取了一定 数量的测点共15个测点进行监测。监测点平面布 置见图1。



基准点高程为16.25 m,以此对各布点进行观

测。观测初期沉降较大,观测间隔2d,当后期趋于 沉降稳定时,间隔3~7d,观测总时间为60d。

图 2 为不同监测点的工后沉降量监测曲线。从 以上沉降观测结果可以看出,工后初期沉降变化较 大,沉降曲线发生陡降,之后趋于稳定,各测点在工 后 15 d 左右后基本不再沉降,各测点沉降量约占总 沉降量的 90% 左右。观测 60 d 后工后沉降量最小 值为 - 13.53 mm,出现在测点 1 - 3;沉降量最大值 为 - 17.81 mm,出现在测点 2 - 1。



图 2 不同测点沉降曲线

为对工后沉降进行合理预测,利用1stopt软件 对图2中各测点的监测数据进行回归拟合,见式 (1):

$$S = a_1 + a_2 (1 - e^{-a_3 t}) \tag{1}$$

式中: S 为基坑围护桩顶沉降量, mm; t 为监测时间;  $a_1, a_2, a_3$  为拟合系数。

从式(1)可以看出,基坑围护桩顶沉降初始沉降量为 *a*<sub>1</sub>,最终沉降量为 *a*<sub>2</sub>。

# 3 基坑支护结构数值模拟分析

#### 3.1 数值分析的本构模型

FLAC<sup>3D</sup>根据塑性流动理论的增量方程,结合摩 尔库仑破坏准则和拉伸破坏准则形成其 Mohr – Coulomb 本构模型<sup>[14]</sup>。Mohr – Coulomb 本构模型使 用的破坏准则是张拉剪切组屈服准则,如图 3 所示。

用点 A 到点 B 破坏包络线表示 Mohr – Coulomb 屈服准则, 即f = 0, 其中:

$$f^{s} = \sigma_{1} - \sigma_{3}N_{+} 2c \sqrt{N_{\phi}}$$
<sup>(2)</sup>

用 B 点到 C 点的包络线表示材料张拉破坏准则,即 $f_i = 0$ ,其中:

$$f_t = \sigma_3 - \sigma^t \tag{3}$$

$$N_{\phi} = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \tag{4}$$

式中: $\phi$ 为摩擦角; c 为粘聚力;  $\sigma$ <sup>'</sup> 为抗拉强度。



图 3 Mohr - Coulomb 破坏准则示意图

最大张拉强度由下式给出:

$$\sigma_{\max}^{t} = \frac{c}{\tan\phi} \tag{5}$$

模型的塑性势函数由 g<sup>\*</sup> 和 g<sup>\*</sup> 两部分组成,分别 表示剪切塑性流动和拉伸塑性流动。剪切塑性势函 数 g<sup>\*</sup> 满足非关联流动法则,可表示为:

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_{\psi} \tag{6}$$

式中:ψ为剪胀角,且:

$$N_{\psi} = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi} \tag{7}$$

拉伸塑性势函数 g' 满足相关联流动法则,可表

(8)

示为:

$$g^{t} = -\sigma_{3}$$

这个流动法则可用下面的方法来定义。函数  $h(\sigma_1,\sigma_3) = 0$ 表示 $(\sigma_1,\sigma_3)$ 平面内f' = 0和f' =0的对角线。这个函数被分为正负俩个区域,见图4。

### 3.2 基坑开挖模拟及计算结果分析

3.2.1 模型的建立 以沈阳北站综合交通枢纽 I 区深基坑工程为例,利用大型有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立三维基坑数值模型。首先将模型材料参数全部 按土体设定,提取基坑范围内土体的初始应力。在 原模型上设置锚索和混凝土支撑,设置基坑开挖步

骤,整个基坑开挖模拟分6步进行,土层及支护结构 物理力学参数见表2。



图 4 Mohr - Coulomb 模型中用于流动准则的区域

 $l_{rar}/m^3 = l_r D_a$ 

	表 2	土体及支护体物理力学参数			m, kg/m <sup>3</sup> , kPa, (°)		
材料	厚度	重度	粘聚力	内摩擦角	弹性模量	泊松比	模型
灰色粉质粘土	8.5	17.9	7	30	10.53	0.35	MC
灰色粉质粘土	2.4	18.2	12	20.5	3.98	0.35	MC
灰色粉质粘土	4.3	18.6	14	21	3.98	0.35	MC
灰色粉砂夹粉质粘土	5.4	18.0	10	23	4.48	0.35	MC
灰色粉质粘土	10.4	18.6	11	27	5.14	0.35	MC
锚索		78.5			20000	0.18	$\mathbf{EL}$
混凝土		25			2000	0.17	EL

3.2.2 施工过程模拟<sup>[15-16]</sup> 工况一:建立基坑数 值计算模型,对土体进行压密处理并将其压密位移 设定为0;工况二:第一层土体开挖2m并衬砌,在 距离地面1m进行锚索施工;工况三:第二层土体开 挖2m并衬砌,在距离地面3m进行锚索施工;工况 四:第三层土体开挖2m并衬砌,在距离地面5m进 行锚索施工;工况五:第四层土体开挖2m并衬砌, 在距离地面7m进行锚索施工。计算模型图如图5 所示。

3.2.3 模拟计算结果分析 不同测点的数值模拟



图 5 计算模型图

图 10 为各支护条件下坑壁的侧向位移。从图 10 可以看出, 坑壁水平位移以正值为主, 即坑壁朝 结果见图6~图9。

图 6~图9中散点为现场监测获得的数值,曲 线为通过数值模拟得到的测点沉降曲线。可以看 出,随着基坑的逐步开挖,各测点位移不断增大,在 开挖初期位移变化比较迅速,各测点在基坑开挖10 d 后左右,位移变化量逐渐减小,至20 d 左右后,各 测点变形几乎不再变化。数值模拟结果与现场监测 结果吻合度较好,说明可以通过采用数值模拟的方 法来实现对基坑施工引起各测点位移的变化规律的 预测。



#### 图 6 测点 1 的现场监测与数值模拟值

向基坑外侧发生移动,其原因主要是由于预应力锚 索张拉造成的。在联合支护的条件下,坡脚距顶面 距离大于6m时,坑壁水平位移为负,说明坑壁朝向 基坑内侧发生移动,位移量为2cm左右。而其它支 护条件下,坑壁位移主要以向外侧移动为主,且最大 值可达到7.8cm,变形量较大。由此可以看出联合 支护形式相比其它支护形式限制了基坑的侧移,起



## 4 结 语

以沈阳北站综合交通枢纽 I 区深基坑工程为依 托,采用理论分析、数值模拟和现场监测相结合的方 法研究了深基坑中围护混凝土加预应力锚索支护体 系的变形规律。主要工作和结论有:(1)影响深基 坑稳定性的主要因素包括基坑规模和支护结构设计 方案等。为保证基坑施工及周围建筑物的安全,应 选择合理安全的支护结构形式和支护结构参数。同 时开展信息化施工,进行基坑开挖施工过程的动态 监测。

(2)采用有限差分软件 FLAC<sup>30</sup>对沈阳北站综合 交通枢纽 I 区深基坑工程的实际开挖支护过程进行 数值模拟,数值模拟结果表明:随着基坑的逐步开 挖,各测点位移不断增大,在开挖初期位移变化比较 迅速,各测点在基坑开挖 10 d 后左右,位移变化量 逐渐减小,至 20 d 左右后,各测点变形几乎不再变 化。在预应力锚索张拉作用下坑壁朝向基坑外侧发 生移动。 到良好的支护效果。基坑坑壁水平位移最大的位置 一般位于基坑坡顶和坡脚处,这是引起坑底隆起原 因之一。基坑坑壁的同一个工况的坑壁各点水平位 移变化不大相差不超过 0.003 m,说明土体没有发 生不均匀的变形位移,整个支护体系安全有效<sup>[17]</sup>。



图 10 各支护条件下坑壁 X 方向位移

### 参考文献:

- [1] 赵志绍. 简明深基坑设计施工手册[S]. 北京:中国建筑 工业出版社,2000.
- [2] 胡 伟. 软土地层地铁车站深基坑开挖围护结构稳定性 数值模拟分析[D]. 成都: 西南交通大学. 2005.
- [3] 易念平,牛义昌,崔 鹏,等.填土基坑土钉墙设计与检测 分析[J].广西大学学报(自然科学版),2009,34(2): 131-135.
- [4] 陈宏东,都华,冯林平,等.深挖填土基坑监测及安全 性分析[J].广西大学学报(自然科学版),2010,35 (2):204-209.
- [5] Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics [M]. New York, John Wiley &Sons, 1943.
- [6] 赵院雄,赵永伦,刘国彬.用等值梁法估算有支护挡墙后的基坑主动土压力分布[J].地下工程与隧道,1998.
   (4):15-20.
- [7] 李钟旭,王钢城,李广杰,等. 深基坑支护等值梁法的程序 设计及其实现算法[J]. 世界地质, 2004. 23(1):50-55.
- [8] 卢萌盟,沈 俊,曾宪桃. 预应力锚索加固基坑的三维数 值分析[J]. 岩土工程学报,2005,27(10):1198-1202.

(下转第98页)

价太苛刻,对个别超标指标太重视造成对整体评价 结果有影响。

国标 F 法通过计算综合评定指数 F 值,将相应 的水质类别划分为 6 类,通过评价结果可以看出,该 方法的严格程度仅次于单因子评价方法,但其评价 结果一般综合考虑了各项指标,评价结果较好。

4 种评价方法各有优劣,综合来看,改进的 AHP 加权优序法与传统的模糊层次评价方法执行的是较 为宽松的评价制度,计算简单、方便,在地下水水质 评价中可以较好地得出各水体样本的污染程度和水 质类别,且通过算例可知其评价结果也是合理的。

改进的层次分析法可以直接定量获得的各评价 指标权重,与传统的模糊层次分析法相比,可以有效 地降低确定权重的主观性和盲目性,该方法具有广 泛应用前景。在实际地下水水质评价项目中,应根 据本地区地下水项目的特点,选取相应有效的评价 方法,有时也可选取多种方法同时评价对比,以避免 某种方法评价缺陷。

### 参考文献:

- Liu L, Zhou J, An X, et al. Using fuzzy theory and information entropy for water quality assessment in Three Gorges region, China [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(3): 2517 2521.
- [2]任传栋,王志真,高佳,等.加权优序法在地下水质评价

(上接第94页)

- [9] 杜东宁,张向东,杨逾,等.沈阳东森深基坑工程三维有限元分析[J].广西大学学报:自然科学版,2012,37 (4):763-768.
- [10] 陈育民等. FALC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 中国 水利水电出版社,2009.
- [11] 中华人民共和国国家标准. 建筑边坡工程技术规范 (GB50330-2002)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.
- [12] 赵明华,俞晓,等. 土力学与基础工程[M]. 武汉理工 大学出版社, 2000.
- [13] JGJS-2007, 中华人民共和国行业标准.《建筑变形测

中的应用[J]. 水科学与工程技术,2008,(5):52-54.

- [3] Liao Y, Xu J, Wang W. A Method of Water Quality Assessment Based on Biomonitoring and Multiclass Support Vector Machine [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011(10): 451-457.
- [4] 席北斗,于会彬,郭旭晶,等.基于模糊权物元理论的地下水水质评价模型构建及应用[J].环境工程学报, 2009,3(2):381-384.
- [5] 尚松浩.水资源系统分析方法及应用[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [6] 薛宏智,周维博. 基于改进 AHP 定权的优序法在地下 水水质评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2012, 23(3):44-47.
- [7] 国家环境保护总局. GB/T14848 1993 地下水质量标 准[S].北京:中国标准出版社,2003.
- [8] 王力,刘廷玺,戴鑫,等. 基于熵权的模糊物元在地下 水水质评价的应用[J]. 人民黄河,2010,32(12):120-122.
- [9] 王艳梅,赵希男,郭梅.一种调整模糊判断矩阵一致性的方法[J].模糊系统与数学,2006,20(3):89-94.
- [10] 姜艳萍,樊治平. 模糊判断矩阵一致性的调整方法[J]. 数学的实践与认识,2003,33(12):82-87.
- [11] 郑文辉,卞延彬,黄 健. 优序法决策在工程项目评价中 的应用[J]. 吉林建筑工程学院学报,2005,22(3):9-13.
- [12] 许超,袁烨.优序法在工程项目决策和评价中的应用 [J].工业技术经济,2005,24(9):78-80.

量规程》[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.

- [14] 刘 波,等. FALC 原理、实力与应用指南[M]. 北京:人 民交通出版社,2005.
- [15] Riehard Bremerton. FALC and Numerical modeling in Geomechanics. Netherlnads: Swts & Zeitling Publisher, 2003.
- [16] 贾金青,郑卫锋,陈国周. 预应力锚杆柔性支护技术的 数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005.
- [17] JGJ94-2008,中华人民共和国行业标准.建筑桩基技 术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,1994.