

# 狭小空间内基坑开挖的监测数据分析及预测

邢益善<sup>1</sup>, 邱江风<sup>2</sup>, 李枚洁<sup>2</sup>, 向伟明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>广东汇建检测鉴定有限公司, 广东 广州

<sup>2</sup>广州大学, 广东 广州

收稿日期: 2021年9月23日; 录用日期: 2021年10月8日; 发布日期: 2021年10月26日

## 摘要

随着社会经济的高速发展, 人口增长以及国民生活质量不断提高, 越来越多的地下空间结构不断增多, 伴随着基坑开挖过程许多问题也不断出现。近年来, 基坑工程随处可见并且可能带来不利影响, 造成建筑物因地表下沉产生倾斜、开裂甚至倒塌等破坏。由于基坑施工场地复杂, 在城市郊区或偏远地区的基坑工程施工场地一般较为宽广, 而在城市内许多拆迁扩建的工程中, 基坑开挖都是处于相对狭小的空间, 而基坑周边又有许多重要管线、重要建筑物等。基于此, 如何在场地受限的基坑开挖过程中保护周边环境的安全就显得格外重要。本文以广州某工程为例, 通过对基坑的实时监测数据进行整理, 分析了基坑支护结构水平位移、周边地表沉降和周边建筑物沉降的变形规律, 并通过分析研究监测数据及时掌握基坑开挖对支护结构和周边环境所带来的影响, 对监测数据进行分析, 并采用相关理论分析与有限元软件进行数值模拟, 并将二者结果进行对比, 最后采用灰色理论GM(1,1)模型对地表沉降进行预测分析, 为今后相类似的工程提供借鉴和参考。

## 关键词

基坑施工, 实时监测, 地表沉降, 数值模拟, 灰色理论

# Analysis and Prediction of Monitoring Data of Foundation Pit Excavation in Narrow

Yishan Xing<sup>1</sup>, Jiangfeng Qiu<sup>2</sup>, Meijie Li<sup>2</sup>, Weiming Xiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Guangdong Huijian Testing and Identification Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

Received: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Oct. 8<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 26<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

With the rapid development of social economy, population growth and the continuous improvement of national quality of life, more and more underground space structures are increasing. With the process of foundation pit excavation, many problems continue to appear. In recent years, foundation pit engineering can be seen everywhere and may bring adverse effects, causing buildings to tilt, crack and even collapse due to surface subsidence. Due to the complex construction site of foundation pit, the construction site of foundation pit engineering in suburban or remote areas is generally wide. In many demolition and expansion projects in the city, the foundation pit excavation is in a relatively narrow space, and there are many important pipelines and important buildings around the foundation pit. Based on this, how to protect the safety of the surrounding environment in the process of foundation pit excavation with limited site is particularly important. Taking a project in Guangzhou as an example, by sorting out the real-time monitoring data of the foundation pit, this paper analyzes the deformation laws of the horizontal displacement of the foundation pit support structure, the surrounding surface settlement and the settlement of the surrounding buildings, timely grasps the impact of the foundation pit excavation on the support structure and the surrounding environment, and analyzes the monitoring data. Finally, the grey theory GM (1,1) model is used to predict and analyze the surface settlement, so as to provide reference for similar projects in the future.

## Keywords

Foundation Pit Construction, Real-Time Monitoring, Surface Settlement, Numerical Simulation, Grey Theory

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 绪论

### 1.1. 研究背景

国内基坑开挖工程对周边建筑物的影响研究仅停留在某项施工工艺或者流程中, 尚未考虑基坑施工各过程对周边建筑物的影响, 更没有从理论上进行归纳总结[1]。很多基坑工程的开挖所引起的周边建筑物沉降的解决办法还只能依靠着工程经验进行分析和决策, 这就容易导致基坑工程在施工中存在未知的安全隐患[2]。不仅如此, 在很多实际工程, 由于缺乏对建筑物沉降所引起危害的认知, 使工程施工过程中的解决手段存在严重的偏差。笔者认为, 基坑工程的设计与施工阶段是一个系统性的问题, 只有通过实际工程, 基坑开挖对周边建筑物沉降影响进行分析, 找出相关的影响因素并研究出对应的控制措施, 才能较好地完成工作。

### 1.2. 研究意义

基坑开挖不仅施工难度大, 而且还经常受到场地限制等影响, 开挖过程中容易引起周边变形, 而土体的变形状态是持续的, 若是周边有文物及较为重要的建筑或是地下管线等, 必须及(实)时掌握基坑周边的变形规律, 利用数值计算预测发现问题、解决问题, 调整施工方案, 采取相应的措施, 以保证基坑顺利施工和事故发生。另外, 基坑工程具有不可逆的特点, 最重要的就是过程控制, 只有加强施工过程中

的质量监督和安全控制,才能有效地避免各种质量问题发生。基坑开挖过程,特别重要的是地表沉降,它会贯穿整个施工阶段,且沉降将对整个工程或者是周边环境产生巨大影响,若是发生事故后果不堪设想。

综上所述,基坑开挖引起的地表沉降和对周边环境的影响重大,只有通过对支护结构和周边环境的实施监测与数值模拟计算,并将二者结果进行对比分析,掌握其全过程的变形规律,才能科学地为基坑工程提供参考依据。不仅如此,对于基坑施工引起的地表沉降问题的研究也不可忽视。通过对实际监测数据进行统计分析,探寻地表沉降的变化规律,并做出科学预测,是施工控制和事故预防的重要手段之一。

### 1.3. 数据分析的研究现状

灰色模型作为一种预测手段一直得到众多学者的关注和不断地改进。在上个世纪六十年代,扎德教授首次提出了“模糊”这个概念,并以此解决了现实生活中许多不确定的问题,随之创立了模糊数学[3]。

邓聚龙教授在1982年便率先提出了灰色系统理论[4][5],其原理就是利用不确定或者不全面的信息,通过数学方法建立模型从而进行数据预测。它的突破之处就在于摒弃以前传统的方法(必须具有完整全面的信息才可以进行数据分析),它只需少量数据并且在运算过程中不断进行迭代和修正便可以取得较好的预测效果。国内外许多学者在该领域也作了探讨并取得成果。

### 1.4. 现阶段存在的主要问题

不少学者对基坑分析软件进行研究,也获得不少研究成果。但由于基坑工程所处的地域差别大,在城市周边的基坑施工场地较为开阔,而在城市内基坑施工场地比较狭小,并受到多方面因素制约,导致施工条件差别甚大,使得数值模拟得到的结果不尽合理。相当一部分的研究没有与实际工程接轨,或虽然有些学者也结合实际工程,但在模拟时未考虑降水、本构模型等影响因素的变化。然后恰恰是这些未被考虑到的因素,却在实际工程中起着至关重要的作用。笔者认为阶段基坑开挖影响存在的主要问题有:

1) 一个本构模型并不能使用在所有工况中,只有采用了正确的本构模型才能在数值模拟中得到精确的结果。

2) 实际的基坑开挖施工过程中,设计和施工可能并不一致,其中会存在许多问题,将导致实际施工量增大且效果不理想。

3) 目前基坑对于在设计参数、周边环境和施工工况等一些影响条件下的研究还不够深入,当前基坑周边的建筑物大都密集,对基坑开挖所引起的土体变形的反应也十分敏感,所以在做理论分析的同时要与实际工程结合,这样才能保证准确性和科学性。

4) 由于目前的基坑工程所处的地质条件和施工工艺等都有一定的差异,导致其没有完善的理论体系,大多数都是采用经验公式,这就必定会产生偏差。而灰色模型的适用性研究也不够全面,还具有一定的局限性。所以制定出完善的理论体系迫在眉睫。

### 1.5. 研究方法

根据目前基坑工程的发展现状及工程技术,在国内外研究现状以及基坑工程理论分析的基础之上,作者以广州某基坑工程为背景,建立有限元模型,通过实测数据与有限元获取的结果进行对比分析,然后进一步研究基坑开挖对周边环境产生的影响和基坑开挖对地表沉降产生的影响。

#### 1.5.1. 预测方法

利用自适应 GM(1,1)模型对未来某段时间内的地表沉降值进行预测,然后将预测值与实际监测值进

行对比分析, 得出基坑开挖周边地表的预测规律, 同时得出了灰色模型的适用条件, 并且证明这种预测模型可以较好的预测出结果, 也为实际的基坑开挖工程提供经验。

### 1.5.2. 研究路线

本文从以下几个方面进行研究:

1) 基坑工程的开挖既要保证基坑本身的稳定, 又要确保既有地铁结构的安全和地铁的正常运营。本文以某基坑工程为背景, 借助 Midas GTS NX 有限元分析软件, 模拟开挖引起的基坑变形并分析其变形规律, 验证基坑开挖方法及支护结构的安全性。

2) 通过整理现场监测数据, 与 Midas GTS NX 有限元分析软件得出的结果进行对比分析, 总结出基坑围护结构变形以及坑外地表沉降的一般规律。

3) 建立符合实际的土体开挖的边坡模型, 模拟四种不同土体超挖工况, 得到四种超挖状况下土体的位移滑移以及各工况下土体的剪切应变, 总结出不同工况下边坡的稳定性。

4) 利用正交设计实验和灰色关联分析法耦合分析淤泥质土体边坡敏感性因素, 得出各类敏感性因素对边坡稳定性的敏感程度, 通过敏感程度再次对事故原因进行深化分析。研究路线见图 1 所示。

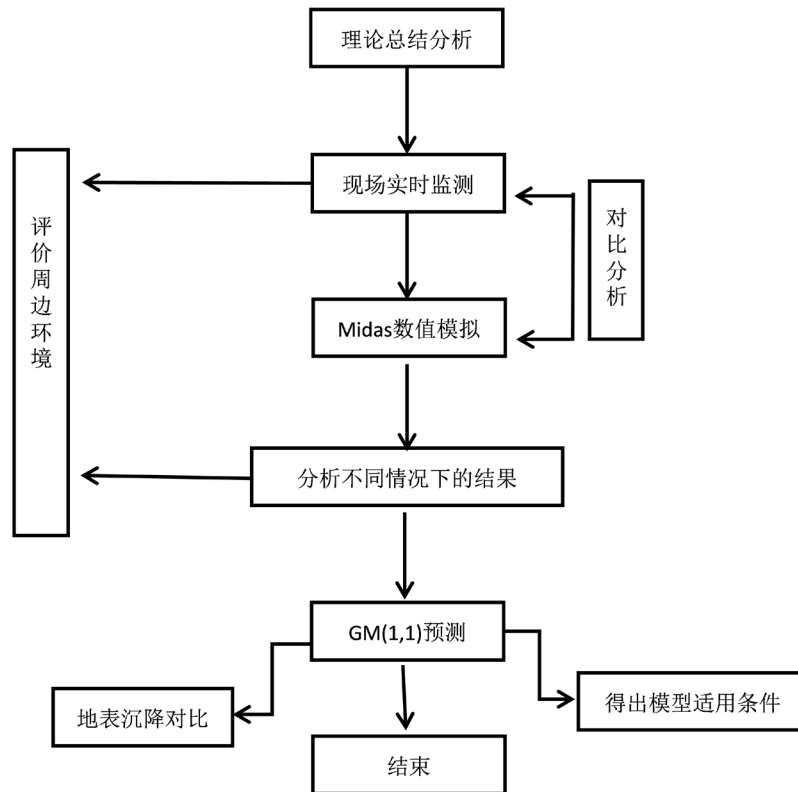


Figure 1. Research roadmap  
图 1. 研究路线图

## 2. 基坑开挖对周边环境影响监测分析

随着目前的基坑工程的逐渐增多, 由此引发的事故也逐年递增, 为了确保基坑开挖和周边环境的安全性, 需要在整个基坑开挖过程对其进行实时监测, 同时也需要设计一个合理的监测方案, 以此来保证基坑开挖和周边建筑的安全[6]。

## 2.1. 工程概况

### 2.1.1. 工程简介

拟建项目位于广州某区，总建筑面积为 46515 m<sup>2</sup>，楼高 16 层，其中地下 2 层建筑面积 2637 m<sup>2</sup> 深约 8.00 m。基坑支护按平整场地标高 6.80 m 设计，深度为 8.69 m~9.49 m。基坑支护主要采用钻孔灌注桩 + 一道钢筋混凝土内支撑 + 桩外双排搅拌桩止水帷幕的支护形式。基坑开挖范围内无受影响的管线，基坑 2 倍深度范围内的管线主要有：基坑西侧：150 mm 直径给水管、100 mm 直径雨水管、200 × 200 mm 电信管；基坑南侧：100 mm 电视光纤、300 × 150 mm 供电铜管、600 mm 直径污水管、80 mm 路灯管线、300 mm 直径雨水管、400 × 400 mm 电信管、400 mm 直径排水管及 80mm 路灯管。管线埋深 0.3~1.28 m。

### 2.1.2. 基坑开挖

土方分层分段进行开挖，分层开挖后，修坡并立刻进行挂网喷射砼护坡施工。工地出入口设置在场地东边，需要外运的土方经此出入口，基坑东端设置坡度为 1:5 的土方运输坡道进入基坑底，基坑的土方开挖施工流向是：基坑西端→基坑东端→工地出入口。开始土方采用盆式开挖，当喷射砼护坡缺乏工作面时土方开挖采用中心岛式开挖。

### 2.1.3. 基坑支护设计

基坑开挖深度约 8.69 m~9.49 m。基坑东侧及西侧安全等级为一级，南侧及北侧安全等级为二级。根据场地岩土工程地质勘察报告，并结合场地周边的环境情况及施工工期影响，本工程基坑支护方案采用钻孔灌注桩+一道钢筋砼内支撑+桩外双排止水帷幕的支护形式。围护桩采用 Φ 1000 mm@1200 mm 钻孔灌注桩，围护桩顶部设置 1000 mm × 1000 mm 的冠梁，桩间采用 Φ 550 mm@400 mm 双排搅拌桩止水。内支撑斜撑段采用 800 mm × 800 mm 及 800 mm × 1000 mm 截面，对撑段采用 800 mm × 1000 mm 截面。在对撑段中部设置一道 600 mm × 1000 mm 钢筋砼连梁。在跨度较大的斜撑及主撑与连梁节点处设置型钢中立柱。止水帷幕采用 Φ 550 mm@400 mm 搅拌桩止水，搅拌桩穿透淤泥进入相对不透水层 0.5 m。

## 2.2. 监测方案

### 2.2.1. 监测目的和意义

1) 在现场的实测过程中，由于设计采用的是经典的侧向土压力计算公式，所以实测值与设计值可能存在差异，所以在实际监测过程中需要实时将实测值与设计值进行比较，以便对施工方案进行修正，从而保证信息动态化。

2) 支护结构在即将发生破坏时，会出现大的变形和裂缝。为了保证基坑的安全需要在基坑周边进行严密的监测控制，这样可以在危险发生之前采取有效的应对措施，可以较大减轻破坏。

3) 为保证周边建筑的安全性，还需要对基坑周边的地下水位、地下管线以及支撑系统进行监测，通过对这一系列监测项的动态监测可以确保施工的安全和周边建筑的安全。

因此在整个基坑开挖全过程中，要对基坑本身和周边建筑的实时监测，通过对监测到的数据进行分析总结，合理地选择应对措施从而保证基坑开挖的顺利进行。

### 2.2.2. 监测内容

本工程施工监测根据设计图纸和规范要求，采用多种监测方法对基坑变形进行监测。主要监测项目见下表 1。

以上监测项目是依据《建筑基坑工程监测技术规范》(GB50497-2009) [7]实时的监测基坑支护工程，监测结果需及时向建设单位、监理、设计、施工人员作信息反馈。必要时，应根据现场监测结果采取相应措施。



**Table 1.** Overview of monitoring items**表 1.** 监测项目简介表

序号	监测项目	埋设位置	符号	测点数量	测试仪器及元件	监测精度	测点布置说明
1	深层测斜	支护桩、土体	C	10 个	测斜管、测斜仪	1.0 mm	间距 10~15 米
2	支护结构顶水平位移	支护桩顶部	W	10 个	全站仪	1.0 mm	间距 10~15 米
3	支护结构顶垂直位移	支护桩顶部	W	10 个	水准仪	1.0 mm	间距 10~15 米
4	地下水位	基坑周边	SW	4 个	水位计、水位管	5.0 mm	/
5	周边建筑物沉降	基坑周边的房屋角点	J	77 个	水准仪	1.0 mm	/
6	地面沉降	基坑周边地面	D	16 个	水准仪	1.0 mm	/
7	管线沉降	基坑周边管线	G	37 个	水准仪	1.0 mm	间距 10~15 米
8	立柱沉降	立柱	LZ	6 个	水准仪	1.0 mm	/
9	支撑轴力	支撑	ZL	7 个	钢筋计	1% (F.S)	/

### 2.2.3. 监测内容

依据规范要求可知监测点的布设是应该准确直观的反应监测项的实际变化趋势，并且能准确得出周边建筑或地表沉降的变形。所以监测点的布设不仅要满足规范要求，更应该布设在基坑关键部位上。基坑沉降监测点应布设在基坑支护结构的腰梁部位，基坑周邻沉降监测点应布设在周邻被测建筑物和周边道路地面的重要变形部位。

### 2.2.4. 监测方法

#### 1) 地面沉降、周边建筑物沉降及管线沉降

根据设计图纸和规范要求，设置周边建筑物沉降监测点 77 个、地面沉降监测点 16 个，管线沉降监测点 37 个，并根据现场实际情况间距作适当调整。建筑物沉降的测点应布置标志并涂防腐剂，并且要避开与监测有关的障碍物，例如雨水管、开关等等。隐蔽式沉降监测点标志的型式，可按有关规定执行。按照规范要求建筑物竖向构件布置测点，要求各测点深入柱内 10 cm，离地面 30 cm，采用  $\Phi 16$  mm 准用测点标志埋设在选定的砼柱上。

道路沉降直接采用道钉将监测点布置于周边待测路面且易于保护的位置上。管线沉降观测点则采用间接监测方式，将道钉布设与待测管线的正上方，通过其正上方的土体变形情况反映管线的变形情况。

#### 2) 支护结构水平位移

该项目是基坑监测的基本项目，它全面反映各个位置基坑支护的水平位移变形情况。沿基坑支护结构纵向在基坑顶部边缘埋设支护结构顶水平位移及支护结构顶垂直位移一体化观测点 10 个。

支护结构顶水平位移监测点采用长为 400 mm 的  $\Phi 16$  mm 的螺纹钢筋，并在其上部焊接一块 5 mm 厚的 35 mm  $\times$  35 mm 的钢板用于黏贴反射片。然后其用锤打入土内或桩体内(需要冲击钻钻孔)，再将规格为 30 mm  $\times$  30 mm 的索佳反射片粘贴在管接头上。基点采用钢筋或专用螺丝，在其上加工十字丝。

#### 3) 水位观测

在基坑四周每侧设置水位观测孔，本工程共设置 4 个水位观测孔。根据水位孔附近的基坑深度决定。测管埋深约 10 m。

水位管的布设采用钻探成孔法埋设。管上部留出 0.5~1.0 m 为管口段(不打孔)，以保证封口质量。管壁外包扎过滤层，过滤层可选用土工织物或网纱。管壁与孔壁之间用净砂回填至地表 0.5 m 处，再用粘

土封顶,以防地表水流入,管口砌保护墩,管口高出地表 30 cm,加盖防止地表水流入。

### 2.2.5. 监测周期

本基坑工程监测工作从 2017 年 1 月开始实施,2017 年 3 月完成钻孔桩施工,随后开始进行土方开挖,为了保证在基坑开挖过程中基坑及周边建筑物的安全,对周边环境进行了全程的实时监测。

### 2.2.6. 预警值的设定

基坑监测的内容包括支护结构监测和周边环境监测,其监测预警值均由累计允许变化量和单位时间内允许变化量(变化速率)控制[8]。支护结构的预警值须按照实际的施工土层性质或经验来确定;基坑周边环境预警值,一般按周围建(构)筑物预警值和周围管线预警值来确定[7]。

若支护结构的变形过大或失,将导致基坑周边土体变形增大,从而直接危及到基坑的周边环境安全,若是连续的变形速率增大,变形累积值超出设计容许值 80%时,应立即报警,第一时间通知相关部门以便采取相应措施阻止基坑变形增大[9]。根据《建筑基坑工程监测技术》(GB50497-2009) [7]规定,各项目的监测报警值见表 2:

Table 2. Monitoring alarm value table

表 2. 监测报警值表

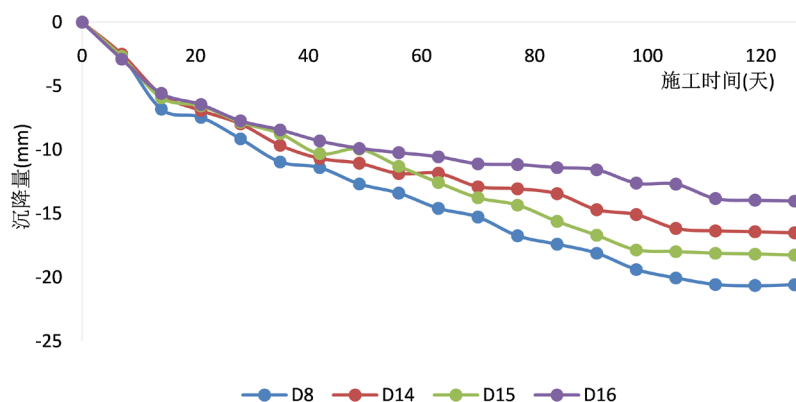
监测项目	一级(二级)	
	报警值	变化速率
深层测斜	30 mm (45 mm)	2 mm/d (3 mm/d)
支护结构顶水平位移	23 mm (36 mm)	2 mm/d (3 mm/d)
支护结构顶垂直位移	23 mm (36 mm)	2 mm/d (3 mm/d)
地下水位	2000 mm	500 mm/d
周边建筑物沉降	20 mm	3 mm/d
地面沉降	25 mm	2 mm/d
管线沉降	刚性管线 30 mm, 柔性管线 40 mm	刚性管线 3 mm/d, 柔性管线 5 mm/d
立柱沉降	25 mm	2 mm/d
支撑轴力	80%的承载能力设计值	/

## 2.3. 监测结果分析

### 2.3.1. 基坑周边地表沉降分析

本次监测工作从 2017 年 3 月 5 日开始,一直持续到 2017 年 7 月 16 日结束,历时四个月。其中,基坑周边地表沉降较为明显的是 D8、D13、D14、D15 和 D16,该类点的变化趋势如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,基坑开挖会引起周边地表的沉降,各个监测点的地表累积沉降均随着基坑开挖深度的增加而逐渐增大。其中,D8 监测点累积沉降量最大,达到了 24.65 mm,最大沉降值为 0.28%H,这是因为 D8 测点相对于另外的测点,是距离基坑边缘最近的监测点,这也表明,基坑周边地表沉降的大小主要与距离基坑边缘的距离有着密切的关联。在基坑东侧的地表沉降监测点在整个基坑开挖过程中其沉降量稳定在 5~15 mm 之间,在整个基坑开挖至设计标高后,整个基坑边缘的地表沉降逐渐变缓,趋势达到稳定状态。

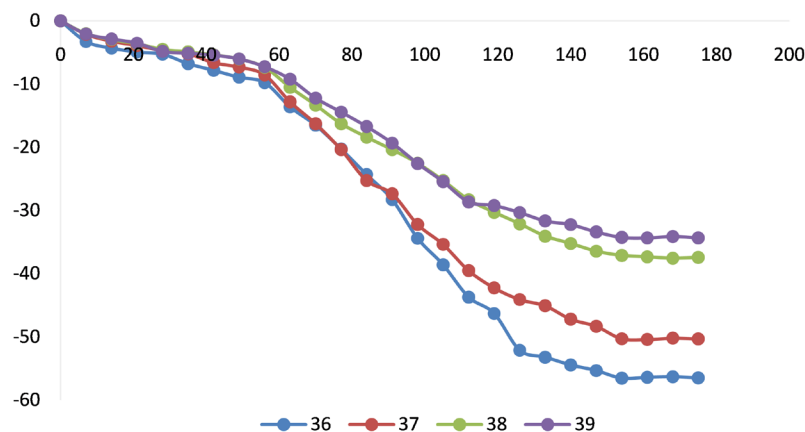


**Figure 2.** Surface settlement curve around foundation pit  
**图 2.** 基坑周边地表沉降曲线图

### 2.3.2. 基坑临近建筑物沉降分析

由于现场的监测点位太多，本文研究对象只选取了其中最具代表性的点同时也是变化量最大的点位进行分析。在基坑的四周很多都是民房以及医院大楼，距离基坑距离约为 2 至 10 米，多为砖混结构和砖混框架结构。在基坑开挖时需要对周边建筑物的沉降进行监测，通过现场及时的监测来获取周边建筑物的变形特点和趋势，确保周边建筑物的安全。

本节选取了具有代表性的或者是沉降较大的点位进行分析，基坑周边建筑物沉降测点布置图如图 3。由整个监测数据曲线图可以看出，建筑物的沉降大致可以分为三个阶段，即：均匀沉降阶段、差异沉降阶段以及稳定沉降阶段。



**Figure 3.** Settlement time curve of Building 1  
**图 3.** 一号楼沉降时间曲线

一号楼的结构形式为砖混结构的民宅，距离基坑最近的距离约 2 米左右，整个沉降的时间曲线大致分为三个阶段。第一阶段主要是均匀沉降阶段，从 2017 年 1 月 12 日到 2017 年 3 月 4 日，在这大约两个月的时间内，建筑物呈现出均匀下沉，各个监测点的沉降量都不是很大，平均的下沉量在 4.12 mm，且没有发生倾斜，其中 36 号监测点的累积沉降量最大，达到了 8.93 mm。第二阶段为差异沉降阶段，从 2017 年 3 月 5 日开始基坑开始土方开挖，直到 2017 年 6 月 25 日基坑开挖至设计标高，支护结构也已施工完成且支护桩的水平位移几乎不再增加。该阶段建筑物的各个监测点均发生了明显的差异沉降，随着基坑



的开挖深度不断加深,均已超出报警值的设定,其中沉降较大的点为36和37号监测点,而36号监测点累积沉降达到了56.54 mm。另外38和39号监测点相对来说距离基坑距离远一些,最大累积沉降量为37.12 mm,最大沉降差为26.7 mm。第三阶段为稳定沉降阶段,从2017年6月26日到2017年7月16日,该阶段基坑开挖深度已不再增加,对基坑周边建筑物的影响程度明显减小,各个监测点的沉降量几乎不再增加,且逐渐趋于稳定。总的来说,一号楼的南侧监测点沉降(距离基坑较近)要高于北侧监测点沉降量,同时也表明了随着基坑开挖不断加深,基坑周边建筑物沉降量也逐渐加大,周边建筑物的累积沉降量与距离基坑边缘的距离有关。

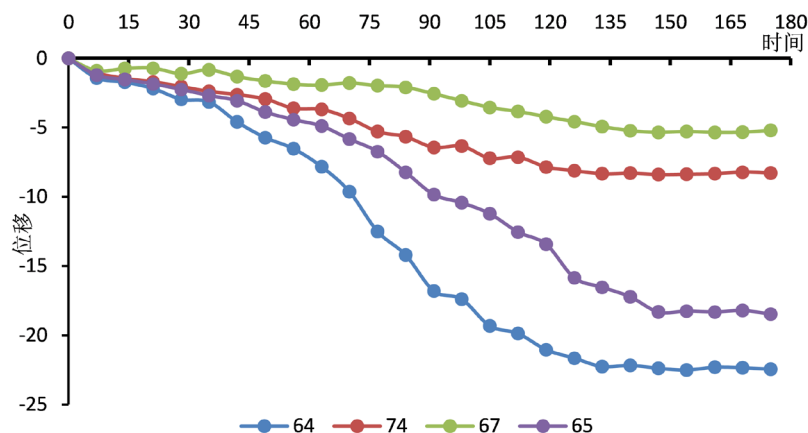


Figure 4. Settlement time curve of No. 2 Building

图 4. 2 号楼沉降时间曲线

2 号楼距离基坑边缘的最近距离约为 6 米, 建筑物的结构形式为砖混框架结构。各个监测点的沉降量如图 4 所示, 各个监测点的沉降量随着基坑开挖深度的不断加深而增加。其中 64 号监测点距离基坑边缘最近, 因而沉降量最大, 达到 22.5 mm, 但控制在预警值以内。而 67 和 74 号监测点因距离基坑边缘较远, 其沉降量呈现均匀下沉的趋势, 且累计沉降量不大, 平均下沉 4.23 mm。不难看出, 2 号楼的整体变化趋势和 1 号楼的沉降曲线类似, 而且沉降时间曲线发生变化的时间段也与基坑开挖的时间点基本吻合。

### 2.3.3. 桩顶水平位移分析

支护桩水平位移的监测对整个基坑开挖以及周边建筑物的安全性具有十分重要的意义。而且支护桩体的水平位移和发展的规律都是评价整个支护效果、优化基坑支护结构设计的一个重要依据之一。本工程的桩顶水平位移监测点共布设十个, 监测日期从 2017 年 2 月 26 日开始到 2017 年 6 月 24 日结束。因各个测点均未达到预警值, 故本节取基坑四周位移最大的测点进行探讨分析, 如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 随着基坑开挖深度的增加, 桩顶水平位移呈现出整体增大的趋势。这是由于基坑内的土随着被开挖出去后, 卸载了原有的土压力, 导致支护结构受到坑外主动土压力的作用而向基坑内部发生侧移, 在基坑开挖至坑底之后, 桩顶水平位移出现明显减缓增加的现象, 这主要原因在于, 土体间的孔隙水压力是慢慢释放的, 从而慢慢使得周边土体达到稳定状态。总的来说, 各桩顶水平位移变化量并不大, 均在预警值之内。其中 W5 和 W9 测点位移相对较大, 其累积位移量为 9.08 mm 和 10.67 mm, 主要原因是由于在基坑东西两侧较为密集建筑物所导致。W6 测点的位移量最大, 累积位移达到 13.06 mm, 但未超过设定的预警值, 整个基坑的支护结构在开挖过程中均处于稳定状态, 工作正常。

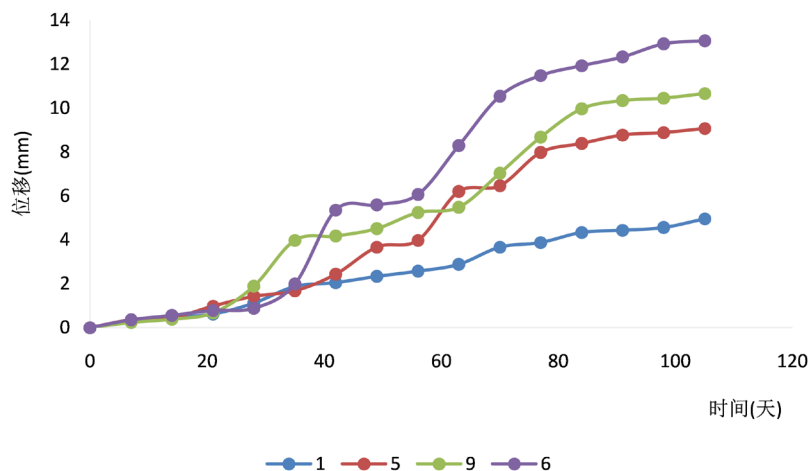


Figure 5. Monitoring value of pile top horizontal displacement  
图 5. 桩顶水平位移监测值

### 3. 基坑开挖的有限元模拟分析

基坑开挖施工多受到场地限制,这主要由于基坑多位于既有建筑物、地下管线或地质复杂等区域,不仅如此,施工条件的复杂也会带来各种影响。土体应力场的改变是基坑施工过程中的一个重要因素,它不仅会对基坑周边土层产生扰动,同时也会导致基坑周边的建筑物沉降。在飞速发展的现代社会中,目前计算机的强大功能,已应用在岩土工程计算中来。有限元法这正是这些数值计算中最常用的方法,现在已经是土木工程领域不可或缺的手段,推动着整个工程领域快速发展。

#### 3.1. 有限元模型的建立

基坑开挖的有限元模型中,进行数值分析时,应简化基坑计算模型,并选择合适的模型尺寸。基坑开挖深度、基坑的平面尺寸、工程地质状况等因素决定了深基坑开挖对周边环境的影响范围。根据施工经验及圣维南原理,土体开挖影响的范围一般为开挖深度的 2~4 倍,超出这个范围时,周边环境受基坑开挖的影响明显减弱[10]。

本工程基坑尺寸约为  $52\text{ m} \times 32\text{ m}$ ,开挖深度为  $8.79\text{ m}$ 。综合考虑本工程的基坑形态、开挖深度以及周边环境等状况,取水平影响范围为 3 倍的基坑开挖深度,去竖向影响范围为 3 倍的开挖深度,得到模拟的模型尺寸为  $110\text{ m} \times 90\text{ m} \times 38\text{ m}$ ,共划分网格数为 18,029 个。

#### 3.2. 基坑开挖模拟过程

建立基坑及周边建筑物的三维有限元数值模型,模拟基坑施工开始到基坑施工结束的整个过程。Midas/GTS 软件通过网格组的“激活”与“钝化”功能,模拟基坑开挖引起周围建筑物沉降的过程。现以关键施工过程来划分工况见表 3,并计算关键工况完成后的支护结构、基坑周边土体及建筑物的内力与变形情况。

Table 3. Schedule of construction

表 3. 施工过程表

工况	内容	备注
1	初始地应力场分析	—
2	等效地连墙施工	—

## Continued

3	开挖第一层土体	开挖至-1.5 m, 施做内支撑
4	开挖第二层土体	开挖至-4.5 m
5	开挖第三层土体	开挖至-7.5 m
6	开挖第四层土体	开挖至-8.79 m

### 3.3. 计算结果分析

#### 3.3.1. 支护结构水平位移

本文主要选取基坑东侧的位移结果进行分析:

从不同工况下的桩顶水平位移曲线图可以看出,虽然在基坑开挖过程中支护结构监测点布置较多,但其整体的变化趋势基本相同。在基坑开挖初期,桩顶受力最大,其水平位移不断加大,且增速较快,随着基坑即将挖至坑底时,其位移变化量逐渐趋于平缓,并最终达到稳定状态。其中 9#测点的累加位移量最大,主要原因是 9#测点较另外两个测点来说距离建筑物距离较近,建筑荷载的作用导致支护结构受力增加。9#测点的桩顶水平位移实测值与模拟值总体趋势基本一致,在基坑开挖前期的差量不大,随着开挖深度的增加,桩顶水平位移量偏差开始逐渐增大,模拟值的最终桩顶水平位移量比实测值略小,主要原因是实际开挖过程中由于施工原因或者集中堆载原因在模拟时考虑不到所致。总的来说二者变形规律基本吻合,说明数值模拟可以预测支护结构水平位移。

#### 3.3.2. 基坑周边地表沉降

随着基坑不断开挖,基坑内外的土体在逐渐产生高度差的作用下,支护结构向基坑内发生位移同时使坑底土体隆起,从而产生地表沉降,不同工况下每个测点的沉降量均发生变化,整体趋势都是随着基坑开挖深度的加大而加大。直至基坑挖至设计标高阶段,地表沉降量开始趋于平缓最终达到稳定状态。

根据两个沉降最大的测点的实测值与模拟值地表沉降量对比,两个测点的实测值与模拟值均误差并不大,在合理范围之内。可以看出,基坑周边地表沉降量最大发生在 D8 测点,其最大的实测值为 15.27 mm,模拟值为 12.9 mm,模拟值比实测值相对比较吻合,造成模拟值比实测值小的最重要原因是在模拟过程中没有完全考虑到实际施工影响因数,从而使计算结果有一定误差。

### 3.4. 计算结果参数分析

#### 3.4.1. 支护结构刚度的影响

支护结构的刚度影响主要体现在内支撑的直径上,直径越大其刚度也越大。本节假设围护结构截面不变,主要改变内支撑桩径不同对建筑物的变形影响。按规范要求可知,桩径最小不得小于 0.6 m。故本节取内支撑刚度与设计刚度之比为 0.7、0.9、1.1、1.3、1.5 五种情况分别进行对比分析,得出不同的支护刚度对周边建筑物变形的影响规律见表 4。

**Table 4.** Building settlement under the influence of different supporting structure stiffness

**表 4.** 不同支护结构刚度影响下建筑沉降量

测点	支撑刚度与设计刚度之比				
	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5
36#沉降值(mm)	28.65	27.38	26.18	25.77	25.59
37#沉降值(mm)	24.58	23.87	23.04	22.59	22.48

支护结构的刚度对周边建筑物沉降影响并不大。所以当基坑周边建筑物沉降较为明显时,增大支护结构刚度略减小其沉降量,但作用不大。从经济方面考虑,增大支护结构刚度会大大增加工程造价,且效果并不明显。

### 3.4.2. 地连墙的影响

本文等效地连墙厚度为0.7 m,假设其他条件不变的情况下,将地连墙厚度分别扩大到0.75 m,0.8 m,0.85 m。随着地连墙厚度的增加,墙体的水平位移出现减小趋势,在地连墙厚度为0.8 m和0.85 m时,其水平位移的减小量出现减弱。由此可看出改变地连墙厚度,当地连墙厚度增大会导致围护结构整体刚度得到增大,所以侧向位移随之减小,但地连墙厚度逐渐增加对水平位移的影响会逐渐减弱。

地连墙主要是由土体产生的被动抗力来阻止下滑,并将土体推力传递到基坑内,以此来维持基坑的稳定。本文等效地连墙的选取依据工程经验值进行设定,分别选取10 m,15 m,20 m,25 m,30 m进行模拟,地连墙的嵌固深度影响其水平位移,当地连墙嵌固深度加大,其水平位移会逐渐减小,在嵌固深度为5~20 m内时变化较为明显,在嵌固深度达到约18 m之后,其水平位移减小速度明显变慢,说明地连墙嵌固深度在达到一定值之后对地连墙水平位移的影响并不大,其影响的临界值可以确定在大约为基坑开挖深度的2倍。

## 4. 地表沉降预测分析

### 4.1. 灰色系统理论

#### 4.1.1. 灰色系统基本原理

灰色系统理论是在二十世纪八十年代,由华中科技大学的邓聚龙教授首次提出。在控制论和系统论中,其主要对一些不确定的数据、贫乏的信息对系统已知的生成,并掌握有效的信息来维持系统更好的进展。在实际的监测和施工过程中,因数据的不规律和不完整性,会导致安全问题出现很大变化,人们把这些数据称为灰数,这也是灰色系统理论的基本依据[11]。

灰色系统理论对于原始数据的规律与数量没有特定要求,不但可以利用原始数据进行建模与预测,同时还可以利用数据本身不断地对模型进行优化和修正,逐渐消除灰度使得模型具有更高的适应性。它的主要优点是对初始数据要求不高,可以通过一系列的生成和转化,使原本杂乱无章的数据慢慢显露出规律性,从而分析得到未来时间序列上的预测值。

灰色系统理论的核心主要是灰色模型[12]。灰色模型的作用是将杂乱无章或者不确定的数据建立动态模型。由于微分方程适用于连续可导函数,所以灰色系统得到的函数都是离散函数。将离散函数进行关联分析,得出微分方程,并且建立微分方程的动态模型,即灰色模型。GM(1,1)模型将系统看成是一个随时间改变的函数,建模时对数据的要求不高,建模后通过不断优化模型能够达到较好的预测效果,并且可以取得理想的拟合和预测精度,这是灰色系统里的一个主要模型。灰色系统可以给事件提供一个很好的预测,其范围可以延伸非常远,可以适应实际的供需关系,所以给科学预测领域方面提供广阔的发展空间。灰色系统理论研究的关键主要分为三个步骤:数据生成、灰色建模以及灰色预测[13][14]。

预测是指根据事物本身的发展规律,根据事物提供的数据进行分析与探讨,并结合实际情况对事物之后的一系列状态进行预测估计。一般地,预测分为一下几个步骤[15]:

- 1) 确定预测的对象和目标;
- 2) 对预测目标在以往出现的数据规律进行分析总结;
- 3) 根据实际情况和预测方法,选择一个合理的预测方法或手段;
- 4) 根据已选用的预测手段来建立预测模型;

5) 总结预测结论, 以便比较分析。

#### 4.1.2. 灰色系统模型

GM 模型(Grey Model)是灰色系统的基本模型, 主要是由微分方程拟合得出。在预测过程中, 由数值的界限所包围的面叫做灰色平面, 它由原点呈发散状指向未来时刻, 发射点越远, 整个灰色平面也就越大。所以, 模型的预测精度会随着时间的推移而慢慢减小[16]。为了提高整个的预测效果, 灰色系统理论提出了一系列调整和修正模型的方法。

#### 4.1.3. GM(1,1)模型的建立

根据灰色模型的建模要求, 总结出以下 GM(1,1)的建模步骤[17]:

- 1) 将原始序列进行累加运算生成新序列
- 2) 建立矩阵;
- 3) 求出逆矩阵;
- 4) 求出 a 和 u 的估值;
- 5) 利用时间函数计算拟合值, 最后用累减算子进行还原得到
- 6) 精度检验及预测。

#### 4.1.4. 自适应 GM(1,1)模型的建立

由于 GM(1,1)模型是一直随着时间向前不断进行发散, 所以前期的预测精度可以达到要求, 但是一直预测下去, 其未来的预测值精度也会随之逐渐降低, 可能与实际监测值相距甚远, 变得没有参考价值。为了解决 GM(1,1)模型的这种局限性, 使它能更广泛的运用在工程领域当中, 并且可以利用实测的监测数据而对未来做出更有价值型的预测结果, 可将 GM(1,1)模型进行优化改进:

首先将累加之后的数列建立为 GM(1,1)的初始模型, 然后利用该模型计算出时间序列上的下一个未来值并且得出具体预测结果。在第一遍拟合之后, 将数列的第一个数消除, 随即在数列最后加入时间序列上的后一个数值, 这也是为了保持整个数列的维数不改变。在之后的拟合过程中, 一直重复这个步骤, 就可以计算出自己想得到的时间点上的数值。这种不断进行自我修进的灰色模型就称为自适应 GM(1,1)模型。这样不仅能对实际的监测到数值作出变形预测, 同时也能保证较好的精度, 可以对现代信息化的施工指导产生积极的意义。

#### 4.1.5. GM(1,1)模型精度检验方法

在模型确定之后都应通过一定的检验手段才能最终判定其合理性, 一般灰色模型的精度检验方法有三种: 按点检验的相对误差大小检验法、按残差概率分布进行检验的后验差检验法、根据模型曲线与行为数据曲线的几何相似程度的关联度检验法。

- 1) 相对误差大小检验法
- 2) 后验差检验法

后验差检验法其中心思想是利用残差的概率分布来进行模型检验。

具体标准如表 5 所示。

Table 5. Prediction accuracy test table

表 5. 预测精度检验表

	好	良好	合格	不合格
C	<0.35	<0.5	<0.65	≤0.7
P	>0.95	>0.8	>0.7	≤0.7



### 3) 关联度检验法

关联度检验中,以所得预测值曲线与实测曲线间差值的大小,作为关联程度的衡量标准。关联度以 $\gamma$ 为标记。当分辨率 $\rho = 0.5$ 时,预测模型精度的评定标准如表6所示。

**Table 6.**  $\rho = 0.5$  prediction accuracy test table

**表 6.**  $\rho = 0.5$  时预测精度检验表

	好	良好	合格	不合格
$\gamma$	$\leq 0.5$	$0.5 \leq \gamma \leq 0.6$	$0.6 \leq \gamma \leq 0.8$	$0.8 < \gamma$

当预测值不满足精度要求,则应对原模型进行适当修正。

## 4.2. 本工程地表沉降灰色预测

建模数据的来源取本工程不同时段的地表沉降量,按每两次监测作为一个时间点,根据之前的阐述,将这些沉降值列表并变为正数,如表7所示:

**Table 7.** Surface subsidence at monitoring points

**表 7.** 监测点的地表沉降量

时间 t	1	2	3	4	5	6	7	8	9
地表沉降量	6.82	9.13	11.39	13.4	15.27	17.41	19.38	20.55	20.58

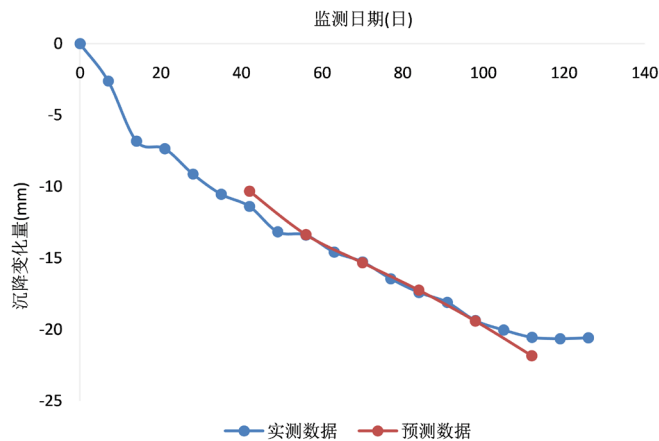
综上可得,对照表5,其模型精度C为1级,P为1级,所以改GM(1,1)模型的精度级别为一级。

本工程实测数据与预测数据的见表8及图6、图7。

**Table 8.** Comparison of daily deformation rates between measured data and predicted data

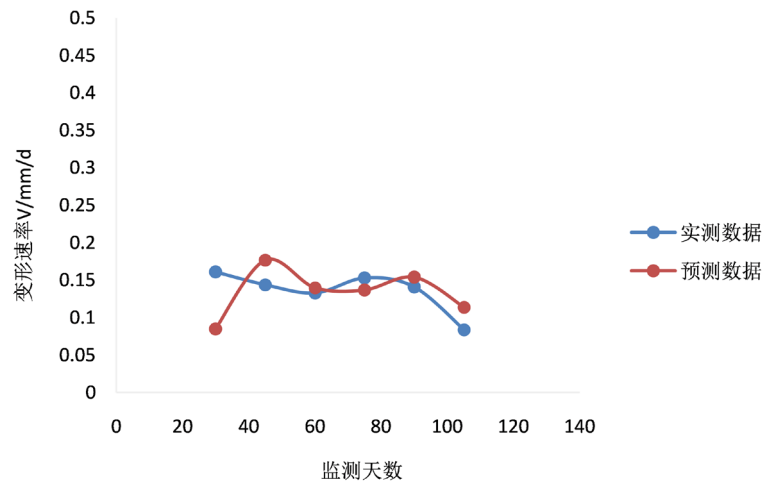
**表 8.** 实测数据与预测数据的日变形速率对比表

时间序号	2	3	4	5	6	7	8	9
实测数据(mm)	9.13	11.39	13.4	15.27	17.41	19.38	20.55	20.78
预测数据(mm)		10.32	13.366	15.33	17.25	19.41	21.84	
实测变形速率(mm/d <sup>-1</sup> )		0.161	0.144	0.133	0.153	0.141	0.084	
预测变形速率(mm/d <sup>-1</sup> )		0.085	0.177	0.14	0.137	0.154	0.114	



**Figure 6.** Comparison curve of measured and predicted settlement amount

**图 6.** 实测沉降量与预测沉降量对比曲线图



**Figure 7.** Comparison curve of measured and predicted deformation rates  
**图 7.** 实测变形速率与预测变形速率对比曲线图

从以上预测结果中不难看出, GM(1,1)模型可以很好地预测出沉降变形量, 自适应 GM(1,1)模型的预测结果也与实测结果非常接近, 其预测的变形速率也是相距甚微, 都在合理范围之内。其模型精度主要是第一组数据出现得比较大, 究其原因, 主要是第一组数据较之后的数据来看波动较大, 而后两组监测数据都逐渐的趋于稳定, 波动越来越小, 其预测值的精度就更好, 更加接近于实测值。所以自适应 GM(1,1)模型是可以预测出沉降变形量, 但并不是适用于任何数据, 越是波动较小的监测数据, 其预测出来的数值会更加合理, 更接近实际监测值。由于基坑开挖过程中沉降机理具有不确定性, 灰色模型并不适用于任何系统, 所以在不一样的工程中应该去寻求探索更合理的一套灰色预测模型来解决工程问题。

## 5. 结论

随着地下空间结构日益开发, 基坑开挖过程中的许多问题也随之出现, 而基坑在开挖过程中的自身变形并引起的周边环境变化问题需要得到重视。本文以广州某实际工程为例, 结合理论知识、实测数据, 运用有限元模拟与监测数据对比的方法, 研究了基坑在开挖过程中的变形影响和因素, 并且运用灰色理论的方法对实测数据进行预测, 在整个过程中得到的主要结论有:

1) 为了保证基坑在开挖过程中对周边环境的安全性, 实时监测是必不可少的一个环节, 特别是对安全系数较高或较为重要的建筑物而言, 监测既可以保证周边环境的安全, 也可以确保施工过程有效顺利的进行。在监测过程中, 有效地选用监测仪器和设置监测点, 对于监测工作十分重要。对监测数据的有效处理和及时分析, 可以很大程度上的防止事故的发生。

2) 通过有限元软件的建模对比分析, 可以得出基坑周边地表沉降和基坑周边建筑的沉降量主要随着距离基坑的距离和基坑开挖深度的变化而变化, 离基坑越近, 其累积沉降量越大; 基坑开挖深度越深, 其累积沉降量也越大。支护结构在基坑的安全性影响中占据非常重要的位置, 随着基坑开挖深度的增加, 桩顶水平位移呈现出整体增大的趋势, 而控制好支护结构的位移变化量, 能有效地保证基坑安全以及周边环境的安全。

3) 通过对灰色理论的总结, 采用自适应 GM(1,1)模型可以对数据进行不断的替换和更新, 循环往复来优化模型, 对于光滑且数据较少的序列, 其预测的精度较高, 可以有效的预测出未来某时间的沉降值, 且经过检验之后的误差较小。但对于变化无规律、杂乱无章的数值预测, 其误差相对偏大, 预测的精度也较差。

## 参考文献

- [1] 叶任寒, 单华峰, 王显椿, 夏唐代. 软土地区深基坑开挖变形监测[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(z1): 306-311.
- [2] 彭晶. 土岩组合地区基坑开挖与邻近建筑物相互作用研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [3] 刘章军, 叶燎原, 潘文. 灰色与模糊理论在深基坑支护方案评价中的应用[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2003, 28(1): 108-111.
- [4] 邓聚龙. 灰色系统综述[J]. 世界科学, 1983(7): 1-5.
- [5] 邓聚龙, 孙顺庚. 灰色系统理论与科技进步[J]. 科技进步与对策, 1986(5): 40-41.
- [6] 孟宪. 深基坑支护设计及监测数据分析[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- [7] GB50497-2009. 建筑基坑工程监测技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [8] 林源. 黄土超深基坑施工对周边环境的影响及对策研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [9] GB50007-2011. 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [10] 李伟. 深基坑不同开挖方式对周围环境的影响[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2016.
- [11] 尹逊震. 灰色模型的改进及其应用[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [12] 李翠凤. 灰色系统建模理论及应用[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工商大学, 2006.
- [13] 王磊. 深基坑的变形分析及预测[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [14] 王伟. 基坑位移时间序列分析的自记忆预测模型研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [15] 刘洪斌. 深基坑变形预测模型及其实践[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [16] 张俊中, 雷伟伟, 王睿, 崔建伟, 宋蕾. 灰线性回归模型在建筑物沉降分析中的应用[J]. 河南科学, 2015(3): 416-420.
- [17] 周一帆. 改进的灰色预测模型及其在测绘数据处理中的应用[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 东华理工大学, 2017.