

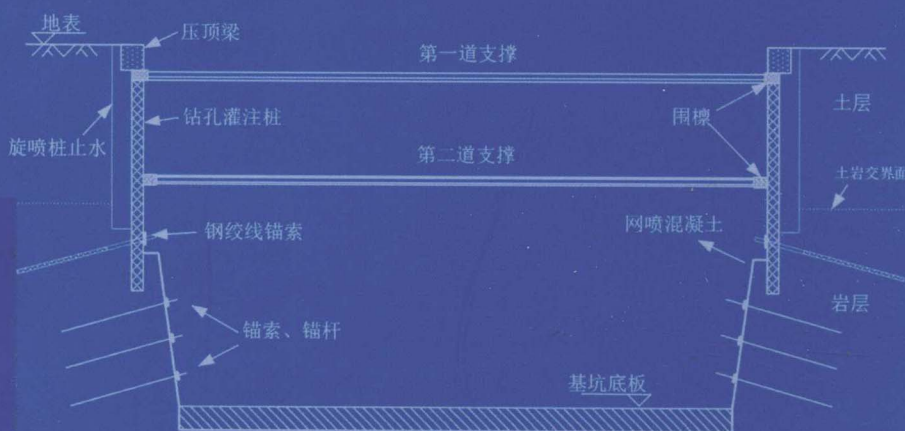


土岩组合

COMBINATION OF
SOIL AND ROCK

沈圆顺 著

地铁深基坑变形特性与控制指标研究



土岩组合

COMBINATION OF
SOIL AND ROCK

沈圆顺 著

地铁深基坑变形特性与控制指标研究

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS
镇江



图书在版编目(CIP)数据

土岩组合地铁深基坑变形特性与控制指标研究 / 沈圆顺著. — 镇江 : 江苏大学出版社, 2018. 12
ISBN 978-7-5684-1027-4

I. ①土… II. ①沈… III. ①地下铁道车站—深基坑—研究 IV. ①U231.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 289713 号

土岩组合地铁深基坑变形特性与控制指标研究

Tuyan Zuhe Ditie Shenjikeng Bianxing Texing yu
Kongzhi Zhibiao Yanjiu

著 者/沈圆顺

责任编辑/徐 婷

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江市江东印刷有限责任公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

开 本/890 mm×1 240 mm 1/32

印 张/5.5

字 数/160 千字

版 次/2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-1027-4

定 价/35.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

近年来,由于城市建设和经济发展的需要,特别是城市轨道交通建设的迅猛发展,基坑工程大量涌现。目前,基坑的设计施工理念已由传统的强度控制转为变形控制,然而基坑工程具有明显的区域特性,以青岛为代表的土岩组合地区深基坑工程不断出现,其变形性状和风险认知目前尚无系统的研究。本书结合青岛地区土岩组合基坑的工程实践,通过大量实测数据对这种特殊地层基坑工程的变形性状进行了系统的研究。在此基础上,基于支持向量机理论和粒子群优化算法,提出了土岩组合基坑变形预测的时序分析模型和从工程实例中获取最大允许变形的方法,建立了基坑工程智能控制体系。针对土岩组合基坑提出了一整套风险等级标准和变形控制指标,建立系统的基坑工程安全风险评价体系。

本书的主要研究和创新之处如下:

(1)在对青岛地区大量基坑实测数据分析的基础上,给出了土岩组合基坑地表、围护结构、坑内土体的变形规律,系统地分析了其影响因素,研究得到了大量有关变形的公式和实用图表,可直接应用于相关地区基坑工程的设计和施工。

(2)提出了土岩组合基坑变形时序预测和容许位移估算的分析模型,通过实例验证了该方法的实用性,提出“基于支持向量机的基坑工程变形智能控制体系”。

(3)给出了考虑基坑本体风险和周边环境风险的“土岩组合基坑总体风险等级划分标准”,弥补了国家规范对基坑风险定义过于简单,对土岩组合地区针对性不强的问题。

本书的研究,实测分析是出发点,提出的预测模型是对实测数据的拓展,安全风险评价体系统领了全部研究内容,各部分相互关

联成为一体,以期为土岩组合地区基坑工程的变形和风险预控提供系统的理论依据及实用工具。相信本书的研究成果对工程师、科研人员、各类学生会有较多帮助。

本书的出版得到了同济大学刘国彬教授的指导,谨在此表达诚挚的感谢!在本书写作过程中,中铁四院万鹏工程师、江苏大学李传勋老师提出了宝贵的建议,研究生江留慧、杨怡青参与了稿件的校对,在此向他们表示由衷的感谢!本书参考和引用了国内外诸多学者的相关研究成果和文献,向他们表示诚挚的感谢!由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足,恳请广大读者和同仁不吝指教。

工程领域的研究必须立足于实践,这薄薄的卷册,虽然页数不过百余,但其背后现场的踏勘,数据的量测、分析,成果的汇聚整理无不凝聚着众多工程建设者、科研工作者的辛勤付出,倘若这汗水与心血的结晶能有些许闪光之处,能够为后续工程提供借鉴、支持,我将感到无比欣慰。

谨以此书献给我的爱人、儿子、女儿!科研、教学的路上你们给予我前行的力量!

作者
2018.10

目 录

第1章 绪论 001

- 1.1 岩石地区基坑工程现状 001
- 1.2 土岩组合基坑的特点和问题 002
 - 1.2.1 土岩组合基坑的特点 003
 - 1.2.2 土岩组合基坑工程面临的问题 004
- 1.3 基坑变形研究现状 006
 - 1.3.1 基坑变形经典文献概述 006
 - 1.3.2 基坑变形预测的研究 008
- 1.4 研究内容和创新点 010
 - 1.4.1 研究内容 010
 - 1.4.2 创新点 011

第2章 实测数据库的建立 012

- 2.1 数据库的建立 012
 - 2.1.1 区域背景 012
 - 2.1.2 基坑概况 013
 - 2.1.3 几何分析 013
- 2.2 研究参数的定义 018
 - 2.2.1 纳入分析范畴的量测项目 018
 - 2.2.2 形变参数的定义 020
 - 2.2.3 工况的定义 021

第3章 工程地质与支护方式分析 023

3.1 工程地质特性 023

3.1.1 土岩组合地层工程地质分区 023

3.1.2 典型地层物理力学性质指标 024

3.2 围护结构特性 025

3.2.1 土岩组合基坑常用围护结构形式 025

3.2.2 土岩组合地铁基坑典型围护结构 027

第4章 土岩组合基坑地表变形特性分析 030

4.1 地表最终变形 030

4.1.1 地表最终变形值的分布 030

4.1.2 基坑外围的地表变形模式 031

4.2 地表最大沉降值 032

4.2.1 地表最大沉降与开挖深度间关系 032

4.2.2 嵌岩桩与吊脚桩的对比 033

4.3 地表沉降的空间分布 034

4.3.1 地表沉降分布模式 034

4.3.2 最大地表沉降的位置 038

4.3.3 地表沉降的影响范围 039

4.4 地表沉降与土层厚度的关系 040

4.4.1 对地表最大沉降值的影响 041

4.4.2 对地表最大沉降位置、沉降范围的影响 041

4.5 地表沉降的时间特性 042

4.5.1 灌注桩未嵌入基底 043

4.5.2 灌注桩嵌入基底 046

4.6 本章小结 050

第 5 章	土岩组合基坑围护结构变形特性分析	052
5.1	围护结构最大侧移	052
5.1.1	最大侧移量	052
5.1.2	最大侧移位置	055
5.2	围护结构侧移与土层厚度的关系	057
5.3	围护结构侧移与首道支撑的关系	059
5.4	围护结构侧移与地表沉降的关系	060
5.5	围护结构位移的时间特性	062
5.5.1	灌注桩未嵌入基底	062
5.5.2	灌注桩嵌入基底	072
5.6	坑底回弹、立柱竖向位移分析	080
5.6.1	坑底回弹	081
5.6.2	立柱竖向位移	084
5.7	本章小结	085
第 6 章	土岩组合基坑开挖变形动态预测研究	087
6.1	基坑变形预测的意义	087
6.2	基坑变形监测时间序列的数学描述	088
6.3	监测信息时间序列的 SVM 模型	089
6.3.1	统计学习理论的核心	090
6.3.2	支持向量机的分类	093
6.3.3	支持向量机的核函数	098
6.3.4	SVM 模型的参数选择	099
6.4	基坑变形预测的 PSO-SVM 模型	100
6.4.1	粒子群优化算法	101
6.4.2	PSO-SVM 模型	102
6.5	工程应用一:土岩组合基坑变形的时序预测	103
6.5.1	地表沉降变形预测	104
6.5.2	围护结构侧移预测	111

6.6	工程应用二:获取围护结构最大允许侧移	121
6.6.1	方法思路	121
6.6.2	围护结构变形影响因素	122
6.6.3	土岩组合基坑最大允许侧移预测	123
6.7	基于支持向量机的基坑施工智能控制	128
6.8	本章小结	129
第7章	土岩组合基坑风险评价和变形控制指标研究	131
7.1	土岩组合基坑总体风险评价	131
7.1.1	评价考虑因素	131
7.1.2	建筑物接近程度分区	132
7.1.3	周边地层影响分区	133
7.1.4	风险等级划分	135
7.2	土岩组合基坑变形控制指标	136
7.2.1	地表变形	136
7.2.2	建(构)筑物变形	138
7.2.3	管线变形	140
7.3	基坑变形的动态控制	142
7.4	本章小结	144
第8章	总结与展望	146
8.1	总结	146
8.2	展望	149
参考文献		151
附录A	青岛地区土岩组合地层物理力学性质指标统计	160
附录B	青岛地区土岩组合基坑总体风险评价指标及变形控制指标	164

第1章 绪 论

1.1 岩石地区基坑工程现状

进入 21 世纪后,我国面临大规模开发利用地下空间资源,加速推进城市现代化进程的历史机遇,基坑工程的数量、类型、规模都快速增长,目前我国已成为世界上基坑设计、施工和研究的热点地区。基坑工程是实践性很强的学科,地质情况是决定基坑设计施工的关键因素。

由于我国幅员辽阔,地形地质条件复杂多变,岩石地区基坑工程往往呈现出不同的地质特点,如重庆地区的砂岩地层(见图 1.1)、深圳部分地区的花岗岩地层(见图 1.2)、青岛地区的土岩组合地层(见图 1.3)、广州部分地区的岩溶地层。综合看来,我国岩石地区基坑工程的规模、深度和建设难度不断加大,越来越呈现出“深、大、近、紧、难”的特点。

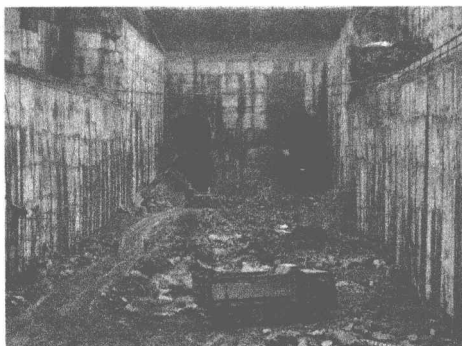


图 1.1 砂岩地层基坑(重庆)



图 1.2 微风化花岗岩地层基坑(深圳)



图 1.3 土岩组合地层基坑(青岛)

总体来说,岩石地区基坑的变形和稳定性受岩体类型、风化程度、结构面的形态、基坑支护方式等多方面因素影响,并且坑底常常采用爆破开挖,爆破方式等对基坑支护结构也会有影响。相比较于土质地层,岩石地区基坑工程是一个更为复杂的系统工程,影响基坑工作特性的因素众多,一旦发生事故其危害程度也越大。

1.2 土岩组合基坑的特点和问题

以青岛为例,它是我国典型的岩石地区,但其地质情况又与其他岩石地区存在差异,该区域的基坑工程有着自身的特点,在工程

实践中还存在着各种亟待解决的问题。

1.2.1 土岩组合基坑的特点

青岛地处山东半岛南部,濒临黄海,具有典型的“土岩组合”地质结构。浅成相岩脉与花岗岩岩基组成的复合岩层以基底形式分布于地表或地下一定深度内,其上沉积了厚度不一的第四纪松散堆积物。该区域的基坑工程具有鲜明的上软下硬二元地质特征,如图 1.4 所示。

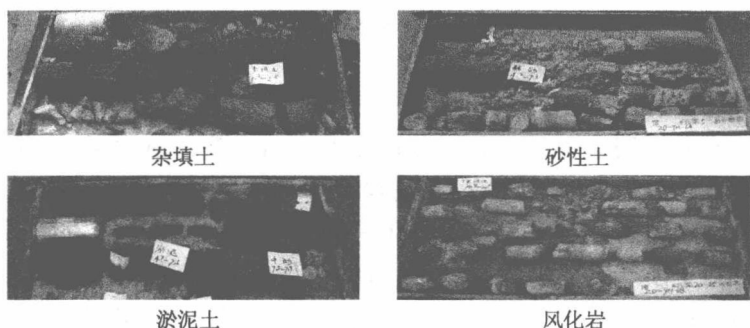


图 1.4 基坑挖深范围内同一钻孔不同的地层情况

这类基坑的特点包括以下几个方面:

第一,岩体和土体两种介质差异较大,在分析中很难用一种计算模型来解决。

第二,基坑的变形不仅受上部土层的影响,还与土岩交界面的形态,下部岩体的风化程度、结构面的产状,基坑边坡的走向,施工方式等多方面的因素相关,并且基坑内外的变形特征非软土地区有大量成熟的经验和规律可循。

第三,基坑失稳破坏的形式多样,可由上覆土层破坏引起(或沿土岩层面滑动,或在土层中圆弧滑动),也可因岩体失稳导致破坏(如沿岩层面滑动,产生块体破坏和整体滑动破坏)等。

第四,支护类型比较复杂,有放坡、桩锚、地下连续墙、锚杆肋梁等。有时基岩面起伏较大地层结构多变,同一个基坑中支护类型也常常存在多样化的特点。

第五,施工中,基坑止水帷幕非常关键,尤其是在第四系地层

和基岩接触面位置至关重要,直接影响基坑稳定性,而一般的搅拌桩止水帷幕很难嵌入基岩,一旦止水效果不理想,极易在薄弱环节产生问题。岩体部分通常采用爆破开挖,爆破施工对基坑支护结构也会产生较大影响。

1.2.2 土岩组合基坑工程面临的问题

由土岩组合基坑的特点可以看出,相对于土质基坑而言,土岩组合基坑的设计和施工有其特殊性,而现阶段无论是从规范、设计理论,还是从变形控制标准等诸多方面来看,土岩组合地区的基坑工程还存在大量问题亟待解决。

(1) 规范、理论有待完善

现阶段我国基坑工程的经验主要来自土质基坑领域,岩质基坑工程积累的经验较欠缺,而土岩组合基坑更是少之又少。现行《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)中第4.8节“基坑工程”是针对土质基坑工程编制的,没有针对岩质基坑工程给出相应的条款,仅指出“根据场地的地质构造、岩体特征、风化情况、基坑开挖深度等,按当地标准或当地经验进行勘察”。《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307—2012)中第12节“明挖法勘察”只是对岩质边坡坡度允许值做了规定,而对岩质基坑支护开挖没有进一步的说明。《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)中的3.4节“水平荷载标准值”和3.5节“水平抗力标准值”也只是考虑了砂土、碎石土、粉土、黏性土,没有给出岩质地层的执行标准。《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497—2009)也没有对岩石地区基坑常测的爆破震速等监测项目给出监测要求和频率。

目前,土质基坑失稳机理、支护结构设计及施工工艺的研究已经相当成熟并日趋完善,但对土岩组合基坑的研究较少,现有的大多数土岩组合基坑支护设计普遍套用土质基坑支护理论,或借鉴岩质边坡稳定性支护设计方法,未形成独立的土岩组合基坑支护设计理论和方法体系。

(2) 控制标准缺失

国外的基坑变形控制标准主要是基于基坑工程施工影响范围

内的建(构)筑物的变形、应变控制标准;我国现有的研究和规范主要还是基于控制围护结构的变形,并提出基坑围护结构(排桩、地下连续墙等)的最大水平位移来保证对环境影响的控制。现有的一些基坑工程和地下工程施工引起的地面沉降允许值往往由专家们根据经验笼统地以某一标准值来规定。例如,北京地铁规定施工中引起的地表下沉控制范围为30 mm;深圳地铁规定施工中引起的地表下沉不得超过30~40 mm,地面附加倾斜不得超过1/300;重庆地铁规定地表沉降累计不得超过25 mm,地面附加倾斜不得超过3/1000;上海市编制了《软土市政地下工程施工技术手册》对基坑开挖过程中的各项监测指标提出管理标准值。目前国内对基坑施工引起的支护结构变形与环境变形之间关系的理论研究较少,且已有的研究大多是基于土质地层基坑,总体看来,土岩组合地区的基坑工程支护结构自身变形、受力、周边环境影响的研究和控制指标少之又少。

(3) 变形预测困难

深基坑工程变形预测包括的内容很多,如周边地表的沉降、管线变形、围护结构变形、坑底隆起等。影响上述每一种变形的因素都很多且复杂,比如,影响支护结构变形的因素:就有基坑地质条件、施工条件、结构刚度、土体强度、地下水变化、围护结构形式等。目前,关于深基坑变形的理论计算方法还不成熟,现有的理论公式计算结果很难直接运用到工程实际中。由于土岩二元地质结构复杂、基坑支护多样,因而影响基坑变形的因素非常多,其机理也更加复杂,使得对这种基坑变形预测非常困难。

基坑工程的变形监测是基坑支护体系力学性态变化最直接最明显的反映,易于通过工程类比总结经验,建立判别准则,从而能对这种宏观的量测信息所反映的基坑支护体系安全特性及时做出判别和反馈。用监测的数据进行建模对基坑支护体系和周边环境的未来演化规律、发展趋势等进行预测是目前基坑变形预测研究的热点领域,一些学者在软土地区和水工岩土领域进行了尝试,但土岩组合基坑的变形预测如何开展目前依然是亟待解决的问题。

1.3 基坑变形研究现状

1.3.1 基坑变形经典文献概述

1969年, Peck在第七届国际岩土力学与基础工程会议上首次发表了比较全面深入的基坑工程研究现状报告, 这对于研究影响基坑开挖支护系统变形行为的因素具有里程碑式的意义。在其后三十多年的时间里, 随着地下的空间开发和利用, 发表了很多与基坑开挖变形相关的研究论文, 其中 Lambe、Goldberg、O'Rourke、Clough、Long 及刘建航等对基坑开挖变形的研究做出了重要的贡献。

(1) Peck 的研究

1969年, Peck基于旧金山、西雅图、芝加哥、圣路易斯及奥斯陆等地关于基坑开挖的实测数据, 研究了侧向位移、地表沉降、坑底隆起失效、减小地表沉降的措施及土压力计算图式等内容。这些基坑工程案例的围护结构为钢板桩或混凝土桩, 支撑系统包括对撑、斜撑、锚拉和锚杆等形式, 土层条件则包括软到中等硬度黏土、硬黏土及砂土。Peck从土层种类和性质、开挖深度及施工质量等方面入手研究基坑变形, 并提出了一种研究基坑行为的方法。该论文是基坑工程领域被引用得最多的文献。

(2) Lambe 的研究

1970年, Lambe对基坑开挖的设计和分析及其支护系统进行了研究, 探讨了基坑开挖中影响土体位移的因素。Lambe采用当时的设计和分析方法研究了波士顿地铁中的3个基坑工程, 并将预测结果与实测进行了对比, 由于预测的支撑系统受力和土体位移与实测结果相差甚远, 因此认为当时关于基坑开挖的设计和分析方法存在不足。Lambe指出有限元方法和工程经验是理解深基坑开挖变形的两个最有效的途径。

(3) Goldberg 的研究

1976年, Goldberg等为美国联邦公路管理局(FHWA)撰写了

三卷关于开挖支撑系统的设计、施工及变形行为总结的研究报告,这是当时关于基坑开挖研究较为详尽的总结资料。该报告以63个工程案例的实测数据为基础,研究了基坑围护结构最大侧移、最大地表沉降及沉降分布形态。Goldberg首次通过大量实测数据来研究围护结构变形、地表沉降分布形态与基坑开挖深度、地层条件等因素之间的关系。

(4) O'Rourke 的研究

1981年,O'Rourke分析了基坑开挖及其相关工程活动引起的土体变形,指出基坑开挖前期的施工项目(如降水、围护结构施工、桩基施工等)会对土体的变形产生影响。根据7个工程案例的实测数据,O'Rourke研究了围护结构的变形形态、墙体侧移与地表沉降比值之间的关系。他在研究中将基坑内支撑的因素考虑了进去,讨论了支撑刚度、支撑加预应力、最下道支撑以下的开挖深度、留土的作用等对基坑变形的影响。

(5) Clough 的研究

1990年,Clough根据有关工程案例和前人的研究对基坑开挖引起的变形进行了较全面的研究。Clough将变形分为两种:一种是基坑开挖和支撑架设过程引起的变形;另一种则是由相关的施工活动如围护结构的施工、基础的施工或撑锚体系的拆除等引起的变形。他对所收集工程资料的变形进行了总结,这有助于预估围护结构的变形和地表沉降。Clough指出可以从引起变形的主要原因着手来预测基坑的变形,并将其限制在较合理的范围内。

(6) 刘建航的研究

1997年,刘建航结合上海软土地区数十年来的工程实践和试验研究,通过土体不同卸载条件下的变形特性和流变曲线试验,提出了针对上海软土基坑开挖的“时空效应原理”。刘建航指出基坑围护结构与周围地层变形具有时间和空间的特点,主要体现在以下三个方面:① 基坑周围地层位移随时间而变化;② 支护结构的变形及内力随时间而变化;③ 基坑开挖的空间作用。根据时空效应原理,在软土地区深基坑设计和施工时,应考虑采用“分层、分

块、平衡、对称、限时”的施工原则来减少基坑变形。这一原理已成为上海软土地区深大基坑设计和施工的指导性标准。

(7) Long 的研究

2001 年,Long 收集了全世界范围内大量基坑工程的墙体变形和土体变形的实测资料,根据土层条件进行了分类,并分析了各种情况下基坑的变形。讨论了开挖深度、支撑系统刚度、坑底抗隆起稳定系数等对基坑变形的影响。Long 的研究对于理解基坑变化的变化趋势具有积极的作用。

Peck、Lambe、Goldberg、O'Rourke、Clough、刘建航及 Long 的研究对认识深基坑开挖的变形特性做出了重要的贡献,通过这些经典的研究文献可以发现:① 实测数据和有限元法是研究深基坑开挖变形的两个最有效的途径;② 地层性质、围护结构是影响基坑变形的主要因素;③ 及时支撑、施加预应力等可以有效减小变形;④ 基坑变形的预测要考虑支撑因素、开挖因素、围护结构类型、开挖时空关系等多方面的影响;⑤ 基坑工程是实践性很强的学科,不同地质条件下差异很大,研究需要因地制宜。这些成果对本研究具有重要的参考价值。

1.3.2 基坑变形预测的研究

目前国内外基坑变形预测的方法主要有:经典力学算法、数值模拟法(包括正分析和反分析)、实测统计法、变分法、系统科学法(如神经网络法、灰色理论法)等。表 1.1 给出了 1971 年以来的有代表性的 8 篇(不完全统计)研究基坑变形计算和预测方法的文献,按照时间顺序编排。