

城市狭窄空间地下结构 施工影响与控制

赵伯明 杨清源 王子珺 刘树亚 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

城市狭窄空间地下结构 施工影响与控制

赵伯明 杨清源 王子珺 刘树亚 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书依托复杂环境下大型地铁枢纽及相邻隧道群关键技术研究和应用,从理论分析、模型试验、数值分析等方面,详细介绍了基于深圳典型地层深基坑降水引起坑外水位变化及变形机理和规律,基坑开挖引起变形回弹计算和有限土体土压力计算方法的研究与应用等。这些成果具有一定的创新性,为类似典型地层基坑工程降水、开挖和支护的设计、施工提供参考。

本书主要作为高等学校土木工程专业本科生和研究生的科研参考书,也可供从事地下工程研究、设计和施工的人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

城市狭窄空间地下结构施工影响与控制 / 赵伯明等
编著. —上海:同济大学出版社,2018.8

ISBN 978-7-5608-7996-3

I. ①城… II. ①赵… III. ①地下工程—结构工程—研究 IV. ①UT93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 153704 号

城市狭窄空间地下结构施工影响与控制

赵伯明 杨清源 王子珺 刘树亚 编著

责任编辑 高晓辉 助理编辑 宋立 责任校对 谢卫奋 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排 版 南京新翰博图文制作有限公司

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 18.25

字 数 456 000

版 次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-7996-3

定 价 88.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

赵伯明 工学博士，北京交通大学土木建筑工程学院，教育部隧道与地下工程研究中心，教授，博士生导师，防灾减灾工程研究所所长，防灾减灾及防护工程学科责任教授，从事社会基础设施抗震减灾与工程安全科研与教学。主持完成自然科学基金重点项目、国家科技支撑计划、国家重大科学工程等国家级课题20余项，科技部、铁道部、中国地震局等省部级课题50余项。发表学术论文120余篇，其中SCI、EI、ISTP检索论文40余篇，编著学术著作6部。现任全国标准化技术委员会委员、中国地震局城市危害性评价专家、国家铁路局及中国铁路总公司铁路建设专家。

杨清源 工学博士，北京交通大学土木建筑工程学院，教育部隧道与地下工程研究中心，研究领域为隧道与地下工程及抗震工程。作为主要人员完成国家级科研课题2项，发表学术论文7篇，申请国家发明专利4项。

王子珺 工学博士，北京交通大学土木建筑工程学院，教育部隧道与地下工程研究中心，讲师，研究领域为岩土工程与地震工程，美国哥伦比亚大学、英国伯明翰大学访问学者。主持及主要完成国家级科研课题8项，发表学术论文20余篇，以第一作者在学科顶级期刊发表SCI检索论文6篇，申请国家发明专利2项。

刘树亚 工学博士，深圳地铁集团技术管理中心，副主任，从事地铁地下结构工程科研创新和技术管理工作。主持“地铁三维管线和地质资料信息管理系统”“11号线现浇高耐久性混凝土研究”等7项研究。参编《城市轨道交通建设项目的管理规范》（GB 50722—2011）等5项标准，主编《城市轨道交通隧道与地下工程三维激光扫描测量技术规范》等3项标准。撰写学术论文21篇。出版学术专著《滨海地铁高耐久性地下结构关键技术研究》1部。

前言

近年来,我国经济飞速发展、城市化进程不断加快,为满足日益增长的人口需求,各大城市的地铁、地下商业街、摩天大楼等工程越来越多。基坑开挖包含在各类工程建设过程中所涉及的基坑工程,不仅关乎整个工程建设的进度与质量,而且涉及对周围地下空间和地下管线等既有工程的保护问题。

深圳市作为改革开放建立的第一个特区,经济实现飞速发展,城市建设也走在我国前列。深圳的城市建设不断朝着深层、密集、大型、复杂方向发展,基坑开挖也随之出现新的变化:平均深度越来越深,大多为2至4层地下室,深度超过20 m的基坑已比较普遍。基坑来源更加广泛,以建筑物基础工程为主,市政设施、人防工程、机场、地下商场、地下构筑物等工程的基坑占比亦在增加。基坑的规模较大,平面形状也愈加复杂,动辄开口面积可达数万平方米、土方挖运量可达数十万立方米。同时,基坑周边建筑物密集、距离越来越近,市政管线纵横,开挖环境越来越复杂。在城市建设高度发达的今天,狭窄空间内大型地下工程的施工建设面临严峻的课题。深圳地铁车公庙综合枢纽工程是其中具有典型代表性的案例。深圳地铁车公庙枢纽四条轨道交通线路(1号线、7号线、9号线和11号线)交汇,且紧邻既有地下商业街车站,地面分布多栋高层及超高层建筑,枢纽结构上方为双向大型立交桥,进行如此大规模的枢纽工程建设,对工程技术、建设管理提出极大挑战。在此背景下,基于深圳地铁集团科研项目“复杂环境下大型地铁枢纽及相邻隧道群关键技术研究与应用(SZ-CGM-KY001/2014)”的主要研究成果,依托理论分析、模型试验、数值分析等手段,研究总结了深基坑降水引起坑外水位变化及变形机理和规律,基坑开挖引起变形回弹计算和有限土体土压力计算方法的研究与应用等几项主要内容。这些成果具有一定的创新性,将为同类工程的基坑工程降水,开挖与支护设计以及工程施工提供参考。

本书共三个部分,第一部分8章,主要介绍了深基坑降水引起坑外水位变化及变形机理和规律研究;第二部分4章,主要介绍了基坑开挖引起坑底回弹变形研究;第三部分4章,主要介绍了有限土体土压力计算方法的研究与应用。

本书的研究成果和出版得益于深圳地铁集团对科研项目“复杂环境下大型地铁枢纽及相邻隧道群关键技术研究与应用(SZ-CGM-KY001/2014)”的资助,深圳地铁集团有限公司陈湘生院士,刘树亚教授级高工,以及北京交通大学王梦恕院士,袁大军教授的亲切指导,北京交通大学赵天次、郭凯、李永庆、宋晓哲等参与了模型试验和数据计算,在此一并表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中难免疏漏和欠妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

2018年6月

目 录

第一部分 深基坑降水引起坑外水位变化及变形机理和规律研究

第 1 章 国内外研究现状	2
1.1 地下水井流理论研究	2
1.1.1 稳定流理论研究	2
1.1.2 非稳定流理论研究	2
1.2 基坑降水引起的地表沉降研究	3
1.2.1 理论研究	3
1.2.2 数值模拟研究	5
1.2.3 室内模型试验和现场监测研究	7
1.3 基坑降水引起基坑围护结构变形研究	8
第 2 章 模型试验设计	10
2.1 模型试验相似设计	10
2.1.1 传统量纲分析法	10
2.1.2 分离相似设计法	11
2.2 试验地层材料设计	13
2.2.1 深圳地区典型地层介绍	13
2.2.2 地层相似材料选择	14
2.2.3 地层相似材料配比	14
2.3 试验基坑围护结构设计	16
2.4 试验模型箱设计	17
2.5 试验降水系统设计	17
2.5.1 降水管的设计	17
2.5.2 抽水系统的设计	18
2.6 试验量测仪器	18
第 3 章 基坑内不完整井降水引起坑外水位变化研究	21
3.1 潜水层基坑内不完整井降水引起坑外水位变化机理研究	21
3.1.1 潜水层基坑内不完整井降水机理试验研究	21
3.1.2 潜水层不完整井有效影响深度确定	24

3.1.3	考虑地连墙影响的降水曲线	29
3.1.4	绕渗区的划分	36
3.2	承压水地层基坑内不完整井降水引起坑外水位变化机理研究	39
3.2.1	承压水地层基坑内不完整井降水机理研究试验介绍	39
3.2.2	承压水地层不完整井有效影响深度确定	42
3.2.3	考虑地连墙影响的降水曲线	45
3.2.4	绕渗区的划分	49
3.3	基坑内不完整井降水引起坑外水位变化规律研究	51
3.3.1	潜水典型地层基坑内不完整井降水引起坑外水位变化规律研究	51
3.3.2	潜水—承压水典型地层基坑内不完整井降水引起坑外水位变化规律研究	64
3.4	本章小结	78
第4章	基坑内不完整井降水引起变形研究	80
4.1	基坑内不完整井降水引起坑外地表沉降研究	80
4.1.1	潜水地层基坑内不完整井降水引起坑外地表沉降简化计算方法	80
4.1.2	潜水地层基坑内不完整井降水引起坑外地表沉降计算方法修正	83
4.1.3	承压水地层基坑内不完整井降水引起坑外地表沉降计算方法	86
4.1.4	承压水地层基坑内不完整井降水引起坑外地表沉降计算方法修正	87
4.2	基坑内不完整井降水引起坑外地表沉降变化规律研究	89
4.2.1	潜水典型地层基坑内不完整井降水引起坑外地表沉降规律研究	89
4.2.2	潜水—承压水典型地层基坑内不完整井降水引起坑外地表沉降规律研究	91
4.3	基坑内不完整井降水引起地连墙变形规律研究	94
4.3.1	潜水典型地层基坑内不完整井降水引起地连墙变形规律	94
4.3.2	潜水—承压水典型地层基坑内不完整井降水引起地连墙变形规律	96
4.4	本章小结	98
第5章	典型地层三维流固耦合计算模型	99
5.1	本构模型选取	99
5.2	模型参数确定	99
5.2.1	基坑尺寸及降水井分布确定	99
5.2.2	土层参数确定	100
5.2.3	边界条件设置	104
5.2.4	地连墙模拟	104
5.3	降水过程模拟	104
5.4	模型网格划分	104
5.5	三维数值计算验证	105
5.6	理论方法在实际基坑工程中的应用	106

5.7 本章小结	107
第6章 基坑降水引起坑外水位变化及变形规律数值研究	109
6.1 潜水地层基坑降水引起坑外水位变化规律	109
6.1.1 分区降水对抗外水位的影响	111
6.1.2 分层降水对抗外水位的影响	113
6.2 潜水—承压水地层基坑降水引起坑外水位变化规律	113
6.2.1 分区降水对抗外水位的影响	115
6.2.2 分层降水对抗外水位的影响	116
6.3 基坑降水引起坑外地表沉降及地连墙变形规律数值研究	116
6.3.1 潜水地层基坑降水引起基坑内外土体变形和地连墙侧移规律	116
6.3.2 潜水地层基坑降水引起坑外地表沉降规律研究	121
6.3.3 潜水—承压水地层基坑降水导致的基坑内外土体变形和地连墙侧移研究	124
6.3.4 潜水—承压水地层基坑降水引起的坑外部地表沉降规律研究	129
6.4 本章小结	131
第7章 基坑降水引起的坑外地表沉降的影响因素数值研究	133
7.1 潜水地层基坑降水引起坑外地表沉降的影响因素	133
7.1.1 土层渗透性的影响	133
7.1.2 砾质黏性土土层厚度的影响	136
7.1.3 既有邻近地下建筑物的影响	138
7.2 潜水—承压水地层基坑降水引起地表沉降的影响因素	140
7.2.1 土层渗透性的影响	140
7.2.2 砾质黏性土土层厚度的影响	144
7.2.3 既有邻近地下建筑物的影响	146
7.3 本章小结	147
第8章 基坑降水引起的坑外邻近建筑物及地表沉降控制数值研究	149
8.1 潜水典型地层基坑降水引起的邻近建筑物及地表沉降控制	149
8.1.1 竖直回灌井地下水回灌对邻近建筑物沉降控制效果分析	149
8.1.2 倾斜回灌井地下水回灌对邻近建筑物沉降控制效果分析	151
8.1.3 旋喷桩止水帷幕对邻近建筑物沉降控制效果分析	153
8.1.4 不同形式回灌对抗外地表沉降影响	155
8.2 潜水—承压水典型地层基坑降水引起的邻近建筑物及地表沉降控制	156
8.2.1 竖直回灌井地下水回灌对邻近建筑物沉降控制效果分析	156
8.2.2 倾斜回灌井地下水回灌对邻近建筑物沉降控制效果分析	157
8.2.3 旋喷桩止水帷幕对邻近建筑物沉降控制效果分析	159

8.2.4 不同形式回灌对坑外地表沉降影响	161
8.3 本章小结	162

第二部分 基坑开挖引起坑底回弹变形研究

第 9 章 国内外研究现状	166
9.1 坑底回弹变形影响因素研究	166
9.2 坑底回弹变形计算方法研究	168
9.3 基坑开挖数值模拟研究	169
第 10 章 土体卸荷回弹变形特性试验研究	171
10.1 室内固结试验设计	171
10.1.1 试验仪器及土样	171
10.1.2 加载与卸载方法	173
10.2 试验指标的计算方法	174
10.3 试验结果与分析	174
10.3.1 回弹率变化规律分析	174
10.3.2 压缩回弹变形曲线	175
10.3.3 再压缩变形曲线	177
10.3.4 回弹模量变化规律分析	177
10.4 本章小结	178
第 11 章 坑底回弹变形计算方法研究	179
11.1 现有方法计算坑底回弹变形	179
11.1.1 计算方法概述	179
11.1.2 规范方法计算实例	180
11.1.3 残余应力法计算实例	181
11.1.4 自重应力抵消法计算实例	184
11.2 数值模拟计算坑底回弹变形	186
11.2.1 计算模型概况	186
11.2.2 土层本构关系与参数选取	187
11.2.3 基坑开挖模拟方法	189
11.2.4 数值模拟计算结果	190
11.3 土体各项参数的影响	194
11.4 计算结果的对比与分析	194
11.4.1 影响深度计算结果对比	194
11.4.2 坑底回弹量增长情况对比	195

11.5 基坑开挖的时空效应分析	196
11.5.1 基坑暴露时间的影响	196
11.5.2 基坑宽度的影响	198
11.5.3 硬质地层与挡土墙的影响	201
11.6 本章小结	203
第 12 章 基坑卸荷回弹特征分析	205
12.1 工程简介	205
12.2 物业大厦基坑开挖过程变形分析	207
12.2.1 模型尺寸与各部件参数	207
12.2.2 基坑开挖模拟方法	209
12.2.3 数值模拟计算结果	209
12.3 数值模拟与现场监测结果对比分析	210
12.3.1 基坑周边地表沉降的对比	211
12.3.2 基坑周边既有建筑位移的对比	212
12.3.3 挡土墙水平位移的对比	213
12.4 既有建筑及逆作法施工条件的影响研究	213
12.4.1 邻近既有建筑的影响	213
12.4.2 工程桩的影响	215
12.4.3 逆作法地下结构施工的影响	216
12.5 修正的坑底回弹变形计算方法	218
12.5.1 计算方法简介	218
12.5.2 方法的运用与验证	219
12.6 本章小结	220

第三部分 有限土体土压力计算方法的研究与应用

第 13 章 有限土体土压力理论计算研究	224
13.1 国内外研究现状	224
13.1.1 相关学者的研究方法	226
13.1.2 规范建议方法	227
13.2 无黏性土的有限土压力公式推导	228
13.2.1 模型建立	228
13.2.2 建立方程	229
13.3 黏性土主动土压力计算	231
13.3.1 研究背景	231
13.3.2 建立方程	232

13.4	有限土体滑裂角研究	234
13.5	特殊情况下的有限土体土压力研究	235
13.6	本章小结	237
第 14 章	有限土体土压力数值分析研究	239
14.1	引言	239
14.1.1	正交试验简介	239
14.1.2	有限元软件与土体本构选取	239
14.1.3	模型假定	241
14.1.4	模型基本设置与参数	241
14.2	正交试验设计	242
14.3	正交试验结果整理	244
14.4	正交模拟试验结果分析	244
14.5	本章小结	246
第 15 章	有限土体土压力计算方法对比研究	247
15.1	土体尺寸效应对有限土体土压力的影响	247
15.1.1	不同深度下的各种计算方法对比	247
15.1.2	不同宽度下的各种计算方法对比	249
15.1.3	有限土体宽度对于滑裂角的影响的理论分析	254
15.2	土体性质对土压力强度影响	255
15.2.1	土体内摩擦角对有限土体土压力影响	255
15.2.2	黏聚力对有限土体土压力影响	257
15.2.3	墙土摩擦角对有限土体土压力影响	258
15.3	土体上部堆载对土压力强度影响	260
15.4	相邻建筑相对埋深比对有限土体土压力的影响	262
15.5	本章小结	264
第 16 章	有限土体土压力计算的验证研究	265
16.1	不同计算方法在实际工程中的直接对比	265
16.1.1	工程概况	265
16.1.2	明挖基坑数值模拟建模	265
16.1.3	数据结果与分析	267
16.2	不同计算方法在实际工程中的间接对比	269
16.2.1	车公庙站工程简介	269
16.2.2	基本参数计算	269
16.2.3	不同方法土压力计算	270

16.2.4 数值模拟建模	271
16.2.5 结果分析	271
16.3 本章小结	272
参考文献	273

第一部分

深基坑降水引起坑外水位变化及 变形机理和规律研究

第 1 章 国内外研究现状

1.1 地下水井流理论研究

1.1.1 稳定流理论研究

1863 年,裘布依(J. Dupuit)^[1]研究了一维稳定运动和向水井的二维稳定运动,提出了著名的 Dupuit 假设及 Dupuit 公式,奠定了稳定井流理论的基础。至今,Dupuit 公式在基坑涌水量的计算和基于稳定流抽水试验反演含水层水文地质参数上仍得到广泛应用。

1901 年,P. Forchheimer^[2]等研究了更复杂的渗流问题,从而奠定了地下水稳定理论的基础。

1906 年,Thiem^[3]改进了 Dupuit 公式,从而可用稳定流抽水试验来计算渗透系数等参数。1928 年,O. E. Meinzer^[4]注意到地下水运动的不稳定性和承压含水层的贮水性质。

1937 年,Muskat^[5]用数学方法较系统地论述了地下水的运动。

以上为稳定流发展情况,地下水稳定流理论的建立,使地下水渗流进入各种严格定量的水动力学方法的研究阶段。

1.1.2 非稳定流理论研究

随着人们对地下水开采需求和规模的增大,对地下水井流研究更加深入,产生了非稳定流理论。

C. V. Theis^[6]在假定流量固定不变、水头下降引起的地下水从贮存量中的释放是瞬时完成的等条件下最早提出承压水完整井非稳定井流公式,该项研究奠定了地下水非稳定径流理论的基础。

为了考虑含水层竖向补给的现实情况,Jacob^[7]在 Theis 公式的基础之上建立了考虑越流补给的无限区域承压层稳定流解和外边界为圆形区域下的承压层非稳定流解。随后,Hantush^[8]在此基础上,考虑是否忽略弱透水层释水、定流量或定降深等影响,提出了越流含水层的非稳定流完整井和非完整井流公式。

而 Boulton^[9]在假定隔水底板水平、无限延伸等条件下提出了考虑滞后疏干的潜水层完整井非稳定流计算模型,随后,Neuman^[10-12]在此基础上考虑了流速的垂直分量和弹性释水,并把潜水面视为可移动的边界,建立了潜水面变动连续性方程。

由于 Hantush^[13-17]在建立承压含水层完整井流模型时,假定井径无限小,忽略了井内储水的影响,但对大井径降水井,储水影响是不能忽略的,为此,Papadopoulos^[18]、Singh^[19]、Moench^[20]去掉了无限小井径的假设,得到了考虑降水井井径、井储效应的承压层完整井非稳定流解析解。

而 Hantush 在建立含水层非完整井流模型时,假定滤管处的流量为均匀分布的,这种理

想状态在现实中无法实现,为此,Javandel^[21]、Cohen^[22]、Butler^[23]、Ruud^[24]、Cassiani^[25]对这一假定做了进一步改进,从而得到了承压含水层非完整井流的半解析解。

我国学者在前人研究基础之上,也开展了含水层渗流理论的研究。

薛禹群^[26]基于水—热系统,考虑水岩热交换、热对流、热扩散、热传导、自然对流和其他的主要影响因素,较全面地研究了三维热量运移,建立相对完善的,也是国内首个地下水三维传热模型,对热、冷的水的运移和存储能量的预测提供了科学依据,并在上海含水层回灌储存研究中取得了良好效果。

陈崇希^[27-28]研究发现了平均布井的方法违背了质量守恒原理,因此修正了采用地下水补给量对可持续开采量计算方法的错误,提出了以质量守恒为基础的地下水资源利用评价原则,强调回灌补给增加水量与抽排减少水量对于评价地下水可持续开采量具有重要意义。在地下水动力学方面,发现并修正了稳定井流中以影响半径模型为基础研究的错误,确定了以圆岛模型为基础开展 Dupuit 稳定井流研究的正确性,提高了 Theis 公式和 Hantush 公式的适用性,改进并完善了地下水非稳定井流理论中的一些基本概念。

刘运航等^[29]基于有限层法,采用拉普拉斯变换等手段,将在时间域上的地下水非稳定流的求解问题转化为在拉普拉斯域上的求解问题,建立了拉普拉斯域中的有限层求解方程,从而提出了利用拉普拉斯变换等手段求解地下水三维非稳定流的有限层求解方法。并采用 Stehfest 数值逆变换等手段,快速求解了在给定时刻中任意位置的地下水降深值。

王旭东等^[30]基于贝塞尔函数和基函数,在柱坐标系下提出了降深试探函数,该函数充分满足地下水流动的边界条件;基于伽辽金法,推导了考虑层状非均质各向异性越流情况下,承压含水层中地下水非稳定流的有限层方程,建立了地下水非稳定流的有限层分析方法。

1.2 基坑降水引起的地表沉降研究

基坑降水过程中因抽降地下水而导致地下水水量减少,抽水过程土体中的细小颗粒随水带走而导致土颗粒的减少,以及抽降地下水亦会导致周围土层中水的流动而产生渗流附加应力,周围土层中的应力将重分布,这些都会对基坑周边一定范围内的地表变形产生不同程度的影响。目前国内外关于基坑降水引起地表沉降的研究主要集中在理论解析研究、数值模拟研究、室内模型试验和现场监测研究等几个方面。

1.2.1 理论研究

太沙基(Terzaghi)^[31-32]是最早研究流固耦合变形现象的学者,他先将流体在可变形、饱和的多孔介质中流动的问题看作流固耦合变形的问题,建立了一维固结模型,并提出了有效应力的概念;Biot^[33-34]在 Terzaghi 研究基础上,考虑三向变形材料与材料中孔隙压力之间相互作用进行了研究,并在一定假设条件下提出了相对完善的三维固结理论;在此之后,Biot^[35-38]又将各向同性的多孔介质三维固结理论推广到各向异性多孔介质和动力研究分析中。在此之后,流固合理论发展主要集中于研究在假设不同孔隙材料的条件下而得到与之对应的物理方程。Zienkiewicz 和 Shiomi^[39-40]考虑了多孔介质的几何非线性和材料非线性影响因素,在 Biot 各向异性三维固结理论上提出了广义的 Biot 公式。

阳军生等^[41]基于随机介质理论,将基坑抽降水引起的周围地表沉降视为随机过程,建立了与之对应的随机介质模型,进而计算基坑抽降水引起的周围地表最终沉降,并通过工程实例加以验证,说明该方法的合理性和有效性。

谢康和等^[42]假定基坑降水引起的土体渗流问题为一维渗流问题,推导了基坑降水引起的土层内应力变化和周围地表沉降计算公式,发现渗流是导致土体中应力变化和地表沉降根本原因,研究成果应用于某基坑工程实例,取得了较好的计算效果。

周志芳等^[43]以润扬长江公路大桥南锚基坑工程为研究工程背景,考虑不同水文地质条件下水流运动特征的差异,对基坑降水引起的地下水流进行计算,提出了双层结构的数学模型,根据此模型可以求出不同地层中的地下水位。在基坑降水和土体固结过程中,考虑了贮水系数和渗透系数随土层的物理力学参数呈非线性变化,提出了深基坑降水与周围地表沉降的非线性耦合的计算方法。该方法为基坑降水引起周围土体变形的预测和控制提供了新的思路。

骆冠勇等^[44]研究发现承压水层降水减压引起周围土层固结沉降计算与潜水层降水引起的周围土层固结沉降计算不同,重点在考虑深厚弱透水层下卧强透水承压层的复杂地质条件,推导了下卧承压水层降水减压引起的周围土层中应力变化及周围地表沉降的计算方法;并假定一维竖向固结的条件,推导了降水减压引起的周围土层沉降固结计算公式,该公式与双向排水固结公式相同,表明降水减压固结与双向排水固结效果相同。将上述计算方法应用于潮州供水枢纽工程西溪水闸周围土层沉降计算,通过实际监测结果对比,表明该方法能较好地满足工程降水沉降计算要求。

张莲花等^[45]基于基坑降水引起的变形控制原则,在满足降水施工安全等要求的情况下,为达到最优降水设计,提出了降水最优目标函数并建立了相关的计算模型,将研究成果运用于实际工程中,取得了较好的降水效果。

王翠英等^[46]考虑了降水漏斗上覆弱透水层的排水固结和土体压缩等影响,深入研究了降水引起的地表沉降机理,得到降水漏斗的上覆弱透水层是引起地表沉降量的主要原因。利用 BP 神经网络法手段对大量工程实测数据进行处理,建立对应的映射关系,得到在不同降深、降水时间下的地表沉降计算修正系数 M_s ,为降水引起周围土体地表沉降的预测提供了实用简单的方法。

李琳等^[47]在假定忽略土体侧向变形条件下,根据 Dupuit 假定给出了降水后的土中地下水位稳定形成的降水漏斗曲线方程,并利用土体剪切与位移的关系考虑了基坑支护结构对土体的约束作用,最后,运用分层总和法计算地表的最终沉降量,研究成果应用于某工程实例中,取得了较好的计算效果。

黄雅虹等^[48]利用拟合反演区域骨架成分弹性储水因子和非弹性储水因子的最小二乘方法,反演出北京亦庄轻轨工程建设场地典型地层骨架成分弹性储水因子和非弹性储水因子,并基于两者采用有效应力法预测评估了该区域地面沉降趋势。

王建秀等^[49]通过分析上海地铁 9 号线宜山路车站的深基坑工程实例相关监测数据,总结出在软土地层中降水引起地表沉降的机理和规律,发现土层中各层沉降之和与地面总沉降值不等的现象,于是通过区分各分层上层内压缩和单点沉降,假设逆回弹和固结同时发生但分别计算,采用顶板逆回弹系数对分层总和法进行修正,能够更为准确地计算单点沉降和地面沉降。