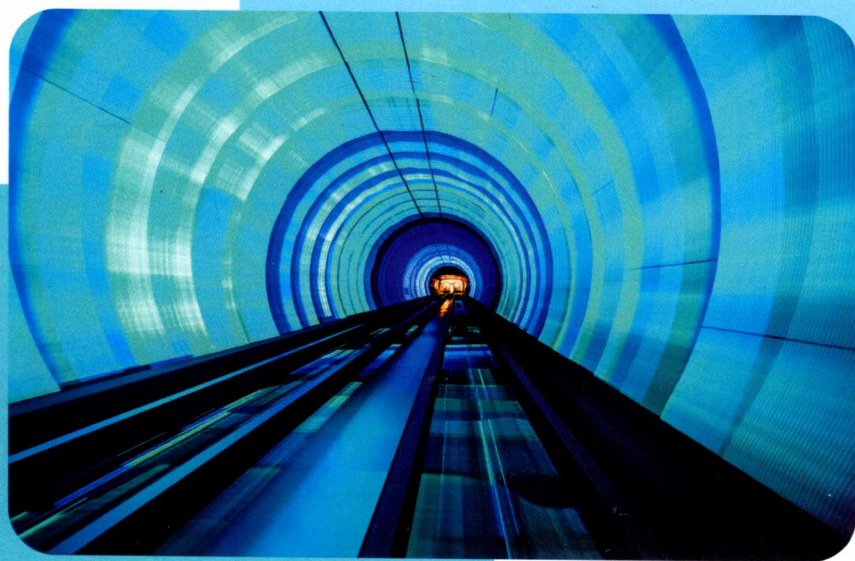


基坑开挖卸荷对 地铁隧道变形规律影响及 机理分析

JIKENG KAIWA XIEHE DUI
DITIE SUIDAO BIANXING GUILV YINGXIANG
JI JILI FENXI



孙华圣◎著



西北工业大学出版社
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY PRESS

JIKENGKAIWAXIEHEDUIDITIESUIDAOBIANXINGGUI

基坑开挖卸荷对地铁隧道变形规

LVYINGXIANGJIJILIFENXI

律影响及机理分析

孙华圣 著

西北工业大学出版社
西安

图书在版编目(CIP)数据

基坑开挖卸荷对地铁隧道变形规律影响及机理分析/
孙华圣著. —西安: 西北工业大学出版社, 2018. 5

ISBN 978 - 7 - 5612 - 6005 - 0

I. ①基… II. ①孙… III. ①基坑—
基础开挖—影响—地铁隧道—研究 IV. ①U231.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 112981 号

策划编辑:付高明 李栋梁

责任编辑:付高明

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西奇彩印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:11

字 数:262 千字

版 次:2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷

定 价:50.00 元

前言

PREFACE

随着经济社会的不断发展,越来越多的基坑工程也不断地出现在地铁隧道的周围。其中,部分邻近开挖的基坑工程必然会引起隧道的横向和纵向不均匀变形,严重时还会造成地铁轨道的扭曲,从而对隧道的安全和地铁列车正常运行带来严重的影响。因此,有效而又合理地预测基坑开挖引起周围隧道的严重变形,理解和掌握隧道的变形规律和变形机理,对确保地铁隧道的安全具有十分重要的理论和现实意义。

目前,许多学者对基坑开挖引起隧道变形这一课题进行了深入的研究。然而,现有的研究尚不能有效地描述基坑开挖引起地铁隧道的变形规律和变形机理,还存在着解析解答较复杂、离心模型试验较少、数值模拟采用的本构模型较简单等问题。此外,研究因素主要涉及隧道和基坑的相对位置、隧道刚度、基坑开挖尺寸等,缺乏对土体的基本性质(如土体相对密实度)、支挡结构的刚度等因素的研究。针对以上问题,本书开展了解析解答、离心模型试验以及数值模拟分析,提出了基坑开挖引起隧道变形的简便预测模型,研究了土体的相对密实度以及支挡结构的刚度对隧道变形规律的影响,分析了影响机理,系统研究了基坑开挖的三维效应(基坑开挖的尺寸、隧道与基坑的相对位置等)对隧道变形的影响。

本书的创新之处主要包括以下几方面。

(1)提出了能够预测基坑开挖卸荷引起隧道变形的三维显式解析模型。该解答不仅可以考虑基坑底部的竖向应力释放对周围地基变形的影响,而且可以考虑基坑侧壁的水平应力释放引起的地基变形。该方法计算简便,经验证可以用于初步评估隧道的竖向位移。

(2)开展离心模型试验研究了土体的相对密实度以及支挡结构的刚度对隧道变形规律的影响,揭示了变形机理,为工程实践中采用经济合理的加固方式提供了科学依据。

(3)采用能够考虑土体小应变以及应力路径依赖性的亚塑性模型(Hypoplastic model)开展了三维有限元分析,研究了土体的相对密实度、支挡结构刚度、基坑的开挖尺寸、隧道与土体的相对位置等因素对隧道变形规律的影响,并分析了变形机理,给出了设计图表,方便工程应用。

(4)在离心模型试验及大量有限元模拟的基础上,给出了计算基坑开挖引

起隧道位移的简化求解公式,并验证了其适用性和合理性。

本书是淮阴工学院教师孙华圣在得到国家自然科学基金(项目批准号:51708245)、江苏省自然科学基金(项目批准号:BK20160426)和江苏省住建厅科技计划项目(项目批准号:2017ZD124)资助的基础上完成的。本书也得到了香港科技大学吴宏伟教授和河海大学雷国辉教授的指导和帮助。在此对这些资助和帮助表示感谢。本书的研究成果可为科技工作者、高校教师、工程技术与管理人员、研究生提供关于基坑—隧道—土体相互作用方面的理论和实践指导。

鉴于土与结构相互作用理论的复杂性以及作者能力和研究水平的有限,书中难免存在不足之处,敬请读者予以批评指正。

著者

2018年4月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 基坑开挖对天然地基变形影响的研究现状	2
1.2.1 现场监测	2
1.2.1.1 地表沉降	2
1.2.1.2 基坑坑底隆起	4
1.2.1.3 支挡结构水平位移	4
1.2.2 数值模拟	5
1.2.2.1 系统刚度和场地条件的影响	5
1.2.2.2 开挖尺寸的影响	5
1.2.3 解析解答	5
1.2.4 离心模型试验	6
1.3 基坑开挖卸荷对既有隧道影响的研究现状	7
1.3.1 隧道横向和纵向内力及变形规律研究	7
1.3.1.1 现场实测法	7
1.3.1.2 数值模拟	8
1.3.1.3 解析分析	10
1.3.1.4 离心模型试验	11
1.3.2 基坑开挖引起隧道内力和变形的影响因素研究	12
1.3.2.1 隧道衬砌刚度的影响	12
1.3.2.2 基坑开挖尺寸的影响	12
1.3.2.3 隧道与基坑的水平间距和竖向间距	12
1.3.2.4 基坑施工工况及支护与加固方法	12
1.3.3 本构模型在基坑开挖对隧道影响模拟中的应用研究现状	13
1.4 存在的问题	14
1.4.1 现有的解析解答需借助数值积分的方法求解	14
1.4.2 开展离心模型试验再现土体应力水平势在必行	14

1.4.3	土体相对密实度和支挡结构刚度对隧道变形影响机理不明确	15
1.4.4	考虑土体劲度的应力应变依赖性 is 合理开展数值模拟的关键	15
1.5	本书的研究内容及技术路线	16
第2章	基坑开挖卸荷对隧道变形影响的三维解析模型	18
2.1	概述	18
2.2	解答推导过程	18
2.2.1	基本假定	18
2.2.2	计算模型	19
2.2.3	基本公式	20
2.2.3.1	水平三角形荷载作用在竖向矩形面上的位移解答	22
2.2.3.2	竖向均布荷载作用在水平向矩形面上的位移解答	22
2.2.4	基本解答的验证	23
2.2.5	求解方法	23
2.3	解答验证	24
2.3.1	对比现场监测	24
2.3.2	对比数值模拟	25
2.3.3	对比离心模型试验	26
2.4	参数分析	28
2.4.1	基坑开挖长度的影响	28
2.4.2	基坑开挖宽度的影响	30
2.4.3	基坑开挖深度的影响	31
2.4.4	隧道埋深的影响	32
2.4.5	隧道中心与基坑中心的距离的影响	33
2.4.6	土体弹性模量的影响	34
2.5	讨论	36
2.6	本章小结	36
第3章	基坑开挖卸荷对隧道变形影响的三维离心模型试验设计	37
3.1	离心模型试验概述	37
3.1.1	几种岩土物理模拟技术简介	37
3.1.2	岩土离心模拟技术的基本原理	39
3.1.3	离心模拟技术的运动学原理	40
3.1.4	离心模拟的相似比	41
3.2	量纲分析	41
3.2.1	量纲分析基础	42
3.2.1.1	基本量与导出量	42
3.2.1.2	量纲分析的依据	42
3.2.2	开挖卸荷对既有隧道影响问题的相关参数	43
3.2.3	量纲归一化	44
3.3	离心模型试验方案	45

3.3.1	第一组试验 CD68 和 CD51	46
3.3.2	第二组试验 SD69 和 SS70	46
3.4	离心模型试验设计	51
3.4.1	离心机	51
3.4.2	模型箱尺寸	51
3.4.3	试验用土	52
3.4.4	密度标定	53
3.4.5	模型支挡结构设计	54
3.4.6	模型隧道制作	55
3.4.7	模型量测	56
3.4.7.1	地表沉降和基坑坑底隆起量测	56
3.4.7.2	隧道位移及变形量测	56
3.4.7.3	隧道纵向和横向弯矩量测	57
3.4.8	开挖模拟系统	57
3.4.9	模型安装制备	58
3.4.10	试验模拟进程	59
3.5	本章小结	59
第 4 章	基坑开挖卸荷对隧道变形影响的三维数值模型建立	61
4.1	概述	61
4.2	有限元软件	61
4.3	土体、隧道、支挡结构本构模型选择	62
4.3.1	亚塑性本构模型理论基础	62
4.3.2	考虑土体小应变的亚塑性模型	63
4.3.3	亚塑性模型参数及标定方法	65
4.4	离心模型试验的数值计算模型及目的	66
4.4.1	有限元网格、边界条件及单元类型选择	66
4.4.2	本构模型及模型参数	66
4.4.3	有限元模拟过程	67
4.5	数值参数分析计算模型及目的	67
4.6	三种不同土体本构模型对隧道变形的预测能力研究	68
4.7	本章小结	68
第 5 章	土体相对密实度和支挡结构刚度对隧道变形影响的离心试验及数值分析	71
5.1	概述	71
5.2	离心模型试验结果与分析	72
5.2.1	支挡结构后的地表沉降	72
5.2.2	基坑坑底隆起	73
5.2.3	隧道纵向位移	74
5.2.4	隧道横截面变形	75
5.2.5	隧道横截面弯矩及弯曲应变	77

5.2.6	隧道纵向弯矩及弯曲应变	78
5.3	离心模型试验的模拟与分析	81
5.3.1	隧道顶部纵向竖向位移	81
5.3.2	隧道顶部和底部土体的竖向应力及劲度变化	83
5.3.3	隧道与基坑周围土体的位移矢量图	84
5.3.4	隧道横截面衬砌直径变化	85
5.3.5	隧道横截面附加弯曲应变	87
5.3.6	隧道衬砌周围土压力	89
5.3.7	隧道纵向附加弯曲应变	90
5.4	本章小结	91
第6章	基坑开挖卸荷对隧道变形影响的三维数值模拟分析	93
6.1	概述	93
6.2	数值模拟方案	93
6.3	土体相对密实度及支挡结构刚度对位于基坑正下方隧道的影	94
6.3.1	不同土体相对密实度对隧道的影	94
6.3.1.1	隧道纵向隆起	94
6.3.1.2	隧道横向变形	95
6.3.1.3	隧道横截面弯曲应变	95
6.3.1.4	隧道纵向弯曲应变	96
6.3.2	不同支挡结构刚度对隧道的影	97
6.3.2.1	隧道纵向隆起	97
6.3.2.2	隧道横向变形	99
6.3.2.3	隧道横截面弯曲应变	100
6.3.2.4	隧道纵向弯曲应变	101
6.4	土体相对密实度及支挡结构刚度对位于基坑外侧隧道的影	102
6.4.1	隧道位移随土体相对密实度的变化($C/D=2, H_c=9\text{ m}$)	102
6.4.2	隧道位移随支挡结构刚度的变化($C/D=2, H_c=9\text{ m}$)	103
6.4.3	支挡结构刚度对墙后土体水平位移的影响($C/D=2, H_c=9\text{ m}$)	106
6.4.4	土体相对密实度对隧道的影($C/D=1, H_c=15\text{ m}$)	107
6.4.4.1	隧道顶部纵向位移	107
6.4.4.2	隧道横向变形	108
6.4.4.3	隧道纵向弯曲应变	108
6.4.5	支挡结构刚度对隧道的影($C/D=1, H_c=15\text{ m}$)	109
6.4.5.1	隧道纵向沉降	109
6.4.5.2	隧道横向变形	110
6.4.5.3	隧道纵向弯曲应变	110
6.5	基坑开挖尺寸对隧道变形的影	112
6.5.1	基坑开挖长度的影	112
6.5.1.1	隧道顶部竖向位移	112

6.5.1.2	隧道横截面变形	113
6.5.1.3	隧道纵向弯曲应变	115
6.5.2	基坑开挖宽度的影响	116
6.5.2.1	隧道顶部竖向位移	116
6.5.2.2	隧道横截面变形	119
6.5.2.3	隧道纵向弯曲应变	120
6.5.3	基坑开挖深度的影响(隧道位于基坑正下方, $C/D=3, H_e=15\text{ m}$)	122
6.5.3.1	隧道顶部竖向位移	122
6.5.3.2	隧道横截面变形	123
6.5.3.3	隧道纵向弯曲应变	124
6.5.4	基坑开挖深度的影响(隧道位于支挡结构外侧, $C/D=1, H_e=15\text{ m}$)	125
6.5.4.1	隧道顶部纵向位移	125
6.5.4.2	隧道横截面变形	128
6.5.4.3	隧道纵向弯曲应变	129
6.6	隧道纵向隆起归一化	130
6.6.1	离心模型试验验证	132
6.6.2	现场试验验证	132
6.7	本章小结	135
6.7.1	隧道位于基坑正下方	136
6.7.2	隧道位于基坑外侧	136
第7章	结论与展望	138
7.1	总结	138
7.2	展望	140
附录	三种不同土体本构模型对基坑开挖卸荷引起隧道变形问题的预测能力研究	142
A.1	概述	142
A.2	离心模型试验描述	143
A.3	有限元模拟	143
A.3.1	有限元网格及边界条件	143
A.3.2	本构模型及模型参数	144
A.3.2.1	Mohr-Coulomb 模型	144
A.3.2.2	Duncan-Chang 模型	145
A.3.2.3	Hypoplastic 模型	146
A.3.2.4	模型参数标定	147
A.3.3	有限元模拟过程	148
A.4	数值模拟结果对比	148
A.4.1	基坑坑底隆起	148
A.4.2	隧道纵向隆起及隆起梯度	149
A.4.3	隧道横截面衬砌直径变形	150
A.4.4	隧道横截面弯曲应变	150



第 1 章 绪 论

1.1 概 述

随着我国经济社会的发展,各大城市的建设规模不断扩大,由此产生了大量的基坑工程。在城市地区进行基坑工程开挖,由于交通线路及建筑密集分布,要求基坑工程在建设过程中不仅要注意自身的安全稳定,更要做好对周围建筑物的保护措施,确保周围地基及建筑物的应力和变形在合理的范围内。根据对大量工程实例的研究发现,基坑工程事故通常包括基坑塌方及大面积滑坡,坑外地基沉降引起的周围建筑物的变形或破坏,支挡结构的位移过大或破坏。可见,评估基坑工程的安全及其对周围环境的影响是岩土工程中的重要课题。

地铁隧道在城市发展过程中发挥着重要的作用,极大地缓解了城市的交通状况。为了有效地利用地下空间,越来越多的基坑工程位于已建隧道周围。地铁隧道在使用阶段不可避免地要受到周围各种施工活动的影响,这对基坑工程的要求也越来越高,不仅要确保基坑本身的安全,也要考虑周围已建隧道的安全和正常运行。如何控制基坑开挖卸荷对既有隧道的影响在合理的范围内对保障人们生命财产安全具有十分重要的现实意义。

侯学渊等(2000)^[1]指出:基坑工程周边的建筑物或地下管线或隧道的抵抗变形及不均匀变形的能力是有一定限度的。当基坑邻近地铁隧道(地铁隧道要求绝对变形不能超过 20 mm,曲率必须小于 1/15 000)时,单纯保证基坑工程的稳定远不能满足如此严格的变形要求,所以采用现有基坑工程的设计理论(强度控制设计)和常规施工技术已难以达到保护基坑周围环境的要求;在实际工程中基坑支挡结构除满足强度要求外,还应控制其变形,基坑的设计也应从传统的强度控制转变为变形控制,以免对周边环境造成破坏。可见,研究基坑开挖卸荷对正常使用时的隧道响应应具有十分重要的理论和现实意义。首先,可以理解和掌握基坑开挖卸荷对隧道的影响程度和变形规律;其次,通过掌握基坑开挖卸荷对地铁隧道的影响程度和变形规律,从而可以对地铁隧道的正常使用起预测、保护作用;此外,还可以对类似工程起到借鉴作用。



针对基坑开挖对隧道的影响这一课题,很多学者对此进行了卓有成效的研究。然而,考虑到土与隧道相互作用这一问题的复杂性,很多问题还需要研究。基于众多学者(Peck 1969a & b^[2,3]; Mana & Clough 1981^[4]; Wong & Broms 1989^[5]; Clough & O'Rourke 1990^[6]; Hashash & Whittle 1996^[7]; Burd 等 2000^[8])对土与结构相互作用这一问题的研究,相关类似问题概括如下:

- (1)周围土体的劲度与强度特性,如各向异性,非线性,应力应变依赖性,松散粘滞性等。
- (2)在土与结构相互作用过程中孔隙水压力的变化,土体固结对预测结果的影响。
- (3)支挡结构的类型及刚度。
- (4)土与结构的接触面性质。
- (5)邻近结构的基础型式。
- (6)隧道衬砌的刚度及型式。
- (7)结构尺寸及之间的距离。
- (8)开挖顺序及施工工艺。

可见,基坑开挖与隧道的相互作用问题涉及岩土工程的领域非常宽广。尽管很多学者对此进行了研究,然而,还有很多基础问题亟待解决,如隧道周围土体的性质在开挖卸荷与隧道相互作用过程中对隧道应力和变形的影响,支撑系统的刚度影响等问题。本文将在前人研究的基础上对基坑开挖卸荷对隧道影响这一问题进行进一步研究,以期深刻理解和掌握土体的密度等基本性质以及支撑系统刚度等对隧道变形规律的影响,为科学研究及工程建设提供参考和经验。

1.2 基坑开挖对天然地基变形影响的研究现状

1.2.1 现场监测

1.2.1.1 地表沉降

基于现场监测结果,Peck (1969)^[2]总结了几种开挖情况的地表沉降结果,如图 1-1 所示。根据土的类型及工作状态的不同,沉降的影响范围分成三个区域。区域 I 适用于一般工作状态下的砂土或软至硬黏土。区域 II 适用于非常软的软黏土,其中包括基坑底部存在有限厚度的黏土层以及基坑底部有较大深度的黏土层(当稳定数 $N_b < N_{cb}$ 时)。区域 III 适用于基坑底部有较大深度的很软至软黏土层($N_b > N_{cb}$)。这一经验图示适于支撑结构为板桩的情况,对于新的支护结构,如刚性挡墙,则最大沉降将小于图 1-1 中所示。

通过对大量实例的研究,Clough & O'Rourke (1990)^[6]认为在砂土或硬黏土中开挖,沉降曲线的轮廓是三角形,最大地表沉降发生在紧靠墙处,无量纲化的轮廓曲线示于图 1-2 中(横、纵坐标为墙后距挡墙距离和地表沉降分别对开挖深度和最大沉降的归一值),开挖的沉降影响区域为开挖深度的 2 至 3 倍,对于软到中硬黏土,最大沉降发生在离挡墙一定距离处,即沉降呈现梯形。在这种方法中,只要知道了开挖深度及最大沉降,利用上述图示,就可知道各点的沉降。

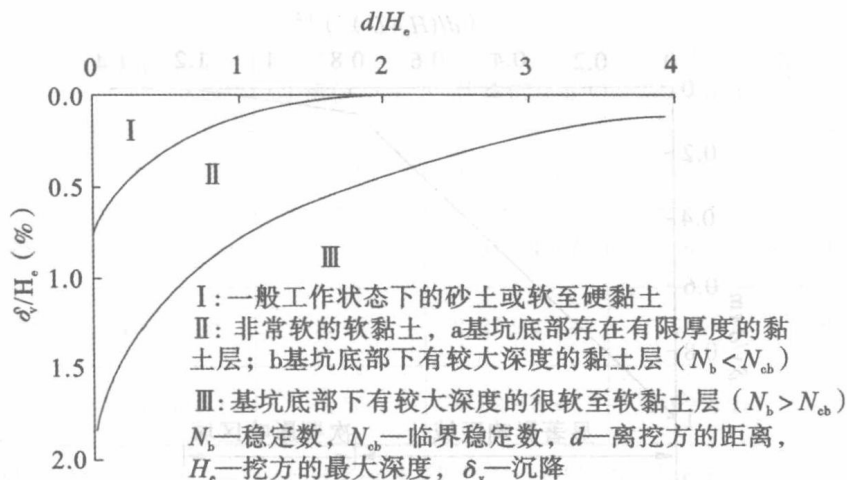


图 1-1 预测地表沉降的 Peck 法^[2]

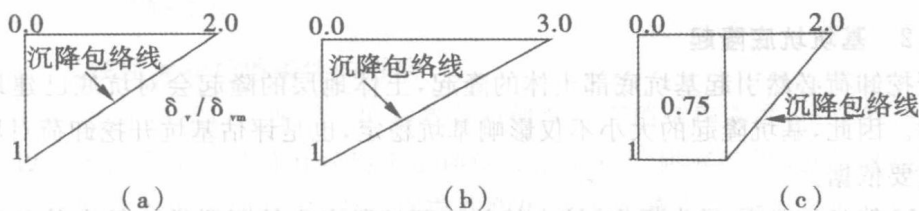


图 1-2 估计地表沉降的 Clough 和 O'Rourke 法^[6]

(a) 砂土; (b) 硬到很硬的黏土; (c) 软至中等黏土

通过对台北 10 个基坑的研究, Ou 等(1993)^[9] 观察到墙后土体的沉降可扩展至相当大的距离, 且随着开挖深度的增加而增加, 在这一范围内, 建筑物或公用设施可能受到损坏, 这一区域被称作显著影响范围(AIR), 显著影响范围以外的沉降很小, 建筑物或公用设施不会受到严重的影响。显著影响范围大致等于主动区域所定义的距离, 距离的上限为墙的深度, 即 $AIR = (H_0 + D) \tan(45^\circ - \phi/2) \leq (H_0 + D)$, 式中 H_0 和 D 分别为开挖的最后深度和墙的人土深度, ϕ 为土体的有效内摩擦角。Ou 建议用三角线形来估计沉降轮廓, 如图 1-3 所示 (H_0 和 D 分别为开挖的最后深度和墙的人土深度, d 为距挡墙距离)。

Long (2001)^[10] 通过总结分析 296 个基坑开挖案例发现, 在硬黏土中, 基坑开挖引起的支挡结构后最大地表沉降范围为 $0 \sim 0.25\% H_e$ (H_e 为基坑开挖深度)。Moormann (2004)^[11] 通过对 530 个软土地区中的基坑开挖工程分析, 发现支挡结构后最大地表沉降范围为 $1\% \sim 10\% H_e$, 平均最大沉降 $1.1\% H_e$ 。最大地表沉降位于基坑的支挡结构后 $0.5 H_e$, 少数数据位于支挡结构后 $2 H_e$ 。Wang 等(2005)^[12] 报道了上海软土地区 300 个深基坑开挖案例, 发现支挡结构后最大地表沉降范围为 $0.1\% \sim 3\% H_e$, 位于基坑的支挡结构后范围为 $1.5 H_e \sim 3.5 H_e$ 。

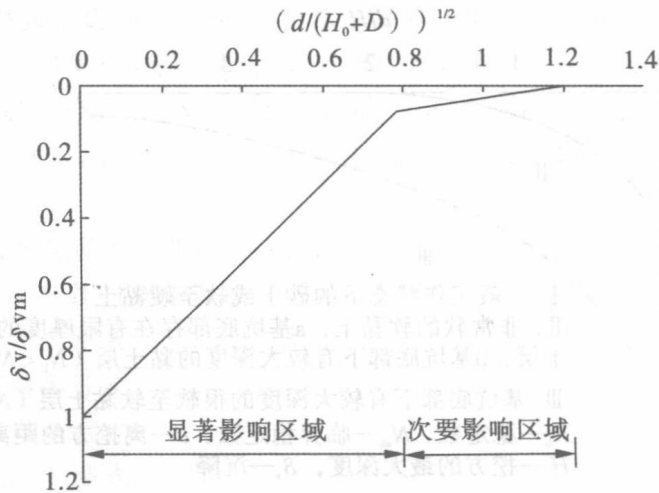


图 1-3 预估拱肩形沉降的 Ou 法^[9]

1.2.1.2 基坑坑底隆起

基坑开挖卸荷必然引起基坑底部土体的隆起,土体地层的隆起会对坑底已建地铁隧道产生上浮作用。因此,基坑隆起的大小不仅影响基坑稳定,也是评估基坑开挖卸荷对坑底既有隧道影响的重要依据。

Terzaghi 等(1967)^[13]最先提出,较小的基坑开挖段产生的回弹性比较大的基坑开挖段小的现象。随后,Bjerrum & Eide(1956)^[14]给出了分析深基坑坑底隆起的方法。国内的刘国彬和侯学渊(1996)^[15]根据上海地区的大量基坑开挖工程实测资料,建立了求解基坑隆起变形的计算模型。在此基础上,刘国彬等(2000)^[16]对该计算模型进行了改进,在对土体卸荷模型研究的基础上,提出了计算基坑坑底隆起的简化计算方法。徐彪和刘佳(2004)^[17]报道了上海某 7.6 m 深的基坑工程,坑底回弹量为 53.1 mm(0.70% H_e)。宰金珉(1997)^[18]总结了京沪 6 幢高层建筑基坑坑底回弹量,见表 1-1。

1.2.1.3 支挡结构水平位移

Long (2001)^[10]通过总结分析 296 个基坑开挖案例发现,在硬黏土中,基坑开挖引起的支挡结构最大水平位移范围为 0.05%~0.25% H_e (H_e 为基坑开挖深度);在软黏土中,支挡结构最大水平位移可达 3.2% H_e 。Moormann (2004)^[11]通过对 530 个软土地区中的基坑开挖工程分析发现,支挡结构最大水平位移范围为 0.5%~1% H_e ,平均值为 0.87% H_e 。支挡结构最大水平位移位于地表下 0.5~1.0 H_e 。Wang 等 (2005)^[12]报道了上海软土地区 300 个深基坑开挖案例,发现支挡结构最大水平位移范围为 0.27%~1.5% H_e ,均值 0.42% H_e 。可见,在硬黏土中,基坑开挖引起的支挡结构最大水平位移范围约为 0.05%~0.25% H_e ,在软黏土中约为 0.27~1.5% H_e 。

表 1-1 京沪高层基坑回弹实测值与估算值统计表^[18]

建筑物名称	基坑尺寸 $B \times L/D$	实测值/cm	估算值/cm	实测值/ D	估算值/ D
北京国贸中心办公楼	60×60/15	2.60	3.93~7.86	0.17% D	0.26~0.52% D
北京国际公寓	36×36/13	1.80	2.04~4.02	0.14% D	0.16~0.31% D



续表

建筑物名称	基坑尺寸 $B \times L/D$	实测值/cm	估算值/cm	实测值/ D	估算值/ D
北京国际信托大厦	37×64/12.7	2.31	0.69~1.38	0.18% D	0.05~0.31% D
上海康乐大楼	14×70/5.5	2.00	2.92~4.87	0.36% D	0.53~0.89% D
上海四平大楼	10×50/5	3.40	2.27~3.70	0.68% D	0.45~0.74% D
上海华盛大楼	14×58/4.14	4.50	4.82~8.03	1.09% D	1.16~1.94% D

注:回弹模量的取用:北京地区为5~10倍的压缩模量;上海地区为3~5倍的压缩模量。

1.2.2 数值模拟

1.2.2.1 系统刚度和场地条件的影响

Mana & Clough (1981)^[4]通过数值参数分析研究了支挡结构刚度,支撑间距,支撑刚度,支撑预应力以及土体模量对基坑开挖周围土体的变形分析。研究表明,基坑周围土体变形随着支挡结构刚度的增大而减少,随着支撑间距的减少而减少。地基变形也随着支撑刚度的增大而减少,但在较高的支撑刚度下,地基变形增大的速率减少。研究结果还表明,土体模量对地基变形的影响较大,较大的土体模量产生的地基变形较小。

Clough & O'Rourke (1990)^[6]对硬黏土中的基坑开挖问题进行了有限元参数分析。研究结果显示,在硬黏土中,刚土墙刚度和支撑间距对开挖引起的地基变形影响较小。这是由于在硬黏土中,土体的模量较大,抵消了支撑系统的刚度对地基变形的影响。与支撑系统的刚度相比,土体的模量和水平土压力系数对地基变形的影响较大。

1.2.2.2 开挖尺寸的影响

Mana & Clough (1981)^[4]通过二维有限元参数分析研究了基坑开挖宽度以及深度对地基变形的影响。研究表明,地基变形随着基坑宽度和深度的增大而增大。

Hashash & Whittle (1996)^[7]通过一系列有限元参数分析研究了基坑开挖中支挡结构埋置深度,支撑间距等对周围土体变形的影响。有限元模拟中采用 MIT-E3 本构模型,能够模拟黏土中应力应变关系的各向异性,应力依赖性以及应变依赖性。支挡结构埋置深度对地基破坏前的土层变形影响较小,但对破坏位置的影响较大。采用较大的支挡结构埋置深度能够提高坑底的稳定性,但同时也会在支挡结构中产生较大的弯矩,容易引起支挡结构的破坏。

1.2.3 解析解答

Osman & Bolton (2006)^[19]在 Bolton & Powrie(1988)^[20]、Bolton 等(1989)^[21]对“允许发挥强度(Mobilised Strength)”研究的基础上提出了 MSD(Mobilised Strength Design)解析解答,来预测不排水地基中由于基坑开挖引起的土体变形。其优点是可以根据土体的应力应变关系方便地求解基坑周围土体变形。然而,该解答没有考虑支撑系统的刚度。Lam (2010)^[22]改进了 Osman & Bolton (2006)^[19]提出的解析解答,考虑了支撑系统的刚度的影响。通过对



比数值计算结果发现,该解答与有限元计算结果相差 30% 左右。

1.2.4 离心模型试验

采用离心模型试验对基坑开挖进行模拟研究,主要有两类方式:一类是在停机开挖的条件下完成基坑开挖,然后开机进行试验;另一类是在离心机运转的条件下,直接进行基坑开挖的模拟。关于停机开挖方式的研究,张师德等(1993)^[23]以上海地铁一号线徐家汇车站的基坑为对象进行了离心模型试验,观察基坑土体位移场、墙体变形等问题,以研究基坑施工开挖的稳定性。模型试验用土取自现场,将其预先制成泥膏状,在离心机中通过双面排水分层固结,固结时间根据土样固结度和强度控制。观测基坑施工对周围地面的影响时,试验采用了半断面,预先开挖基坑至预定深度,然后将模型在特定的离心加速度场中进行研究。而在基坑施工的全貌研究中采用了全断面,以不同的加速度模拟不同的开挖深度,同时又进行了掘进前方土坡稳定问题的试验,此外还对开挖进行了有限元模拟。研究结果表明,坑底最大隆起量约为坑周最大沉降量的 2.5 倍,坑周沉降范围约为坑宽的 2 倍。

刘金元(1999)^[24]采用现场原状的上海淤泥质黏土进行试验,通过试验结果分析,对停机再开机进行基坑开挖模拟方式的可行性进行了研究,对开挖过程中土压力、土体强度以及维护墙体的受力等变化进行分析。研究了开挖空间以及加固对基坑的影响。通过有无支撑条件下基坑破坏的离心模型试验,加深了对破坏模式的理解,在对破坏期间的土压力、墙体弯矩、滑动面位置等的分析基础上,对类似问题提出了安全计算模式及方法。

丁春林等(2005)^[25]基于离心模型试验对上海地铁的承压水基坑变形、稳定性影响因素进行了分析。试验采用常用的停机开挖支护方式来模拟基坑开挖过程,分别研究了上海隔水层存在与缺失、基坑开挖深度和承压水头高度等的影响因素。试验用土取自现场,通过离心固结形成重塑土后进行试验。为了实时准确地模拟承压水位,设计了一套承压水位控制系统。根据等强度理论,用铝板模拟钢筋混凝土地下连续墙,铝棒模拟支撑。试验结果显示,不论隔水层是否存在,基坑变形均随着开挖深度和承压水头的增加呈非线性增大;开挖深度对基坑变形影响的敏感性比承压水头大;当基坑开挖深度较小、承压水头较低时,不论隔水层存在与否,基坑最大变形差异较小,随着开挖深度和承压水头的增大,两者变形差异也越大,缺失隔水层对基坑稳定不利。

Richards & Powrie(1998)^[26]利用离心模型试验研究了超固结高岭土中有两道支撑的挡土结构的基坑开挖。研究包括地下水的影响、土的侧压力系数、嵌入深度、地层位移、挡墙的弯矩和支撑轴力内容。基坑的开挖过程通过排液来进行。研究结果表明,增大挡墙的嵌入深度将导致墙体最大弯矩的增大,并降低下部支撑的轴力,但是地表位移并没有因挡墙嵌入深度的增大而增大。降低挡墙后地下水位可以显著地减小挡墙弯矩和支撑轴力。

王凯民(2005)^[27]利用离心模型试验探讨黏土层中悬臂式支挡结构在开挖时的变形以及对邻近地层的影响。试验主要就开挖深度,插入深度以及土体强度等不同参数,对悬臂式支挡结构的开挖进行研究分析。针对排液法模拟基坑开挖中存在的液体压力在垂直和水平方向压力系数相同的缺点,研发了可以独立的模拟开挖过程的水平加压(氯化锌袋施加侧向液压力)和垂直加压(气袋充气施加垂直覆土压力)的加压设备。在设定的离心加速度场里,通过降低气袋的气压和利用汽水转换瓶的控制,逐步的排放氯化锌溶液来模拟基坑开挖过程,较为符合现场的情形。试验得出,黏土不排水剪切强度、开挖深度和插入深度对地层位移与挡墙的变形