

● 新时代土木工程新技术应用丛书

地铁深基坑施工相关影响 现场监测及有限元分析

DEEP FOUNDATION
AND SUBSURFACE EXCAVATION

● 李兵 孙威 周博 陈鑫 闫煦 刘浩 刘洋 高国瑞 著

非外借

中国建筑工业出版社

新时代土木工程新技术应用丛书

地铁深基坑施工相关影响现场 监测及有限元分析

李 兵 孙 威 周 博 陈 鑫 著
闫 煦 刘 浩 刘 洋 高国瑞

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地铁深基坑施工相关影响现场监测及有限元分析 / 李兵等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019.11

(新时代土木工程新技术应用丛书)

ISBN 978-7-112-24262-7

I. ①地… II. ①李… III. ①地铁隧道-深基坑-基坑施工-施工监测-研究 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 217770 号

责任编辑: 周娟华

责任校对: 赵听雨

新时代土木工程新技术应用丛书
地铁深基坑施工相关影响现场监测及有限元分析

李兵 孙威 周博 陈鑫 著
闫煦 刘浩 刘洋 高国瑞

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京建筑工业印刷厂制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 8½ 字数: 207千字

2019年12月第一版 2019年12月第一次印刷

定价: 68.00元

ISBN 978-7-112-24262-7

(34768)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

地铁建设一般处于城市人口密集区，周边环境复杂，因此地铁深基坑工程较多地出现在建筑物、道路、地下管线密集的区域，对周边环境的影响较大，还存在一定的风险。基坑开挖过后，由于坑内土体的卸荷作用，坑外土体发生了应力重分布，土体的平衡遭到了破坏，导致深基坑周边地表发生了差异沉降与水平位移。土体变形对基坑邻近建筑物的安全性、舒适性和使用功能都造成了极大的影响，尤其在桥桩、建筑物等离基坑较近时存在不小的风险性。由于各地地质条件的差异，基坑工程的特点也会有所不同，近年来我国地铁深基坑工程较多，但地铁深基坑施工对基坑邻近建筑物、桥桩的影响，以及预应力锚杆在地铁深基坑施工的应用及性能等，还需进一步的研究和总结。在地铁深基坑工程问题上一定要谨慎，避免发生事故造成经济损失和产生严重的社会影响。深基坑工程施工过程中考虑的因素较多，在确保基坑安全的前提下，既要稳固周边建筑，又要保证附近地下的管线、管道不受破坏，同时还要保障周围道路的正常通行。因此，本书对地铁深基坑施工引起的邻近建筑物和桥桩变形规律及保护措施的研究，以及预应力锚杆在地铁深基坑施工的应用及性能分析，都具有较明显的实际意义。

全书共分为9章，以地铁某车站深基坑工程为背景，在第1章中介绍了研究背景及研究内容，在第2章中详细介绍了基坑支护方案、监测方案和过程，并对各种监测结果进行了分析；在第3、4章中通过现场监测和数值模拟分析相结合的方法，对地铁车站深基坑施工对邻近桥桩的影响进行了分析；在第5~7章中对地铁深基坑开挖对邻近建筑物的影响进行了分析；在第8、9章中对预应力锚杆在地铁深基坑开挖中的应用及性能进行了分析。

本书主要由沈阳建筑大学教授李兵撰写，其中沈阳建筑大学孙威、周博、陈鑫、闫煦，沈阳大学刘浩，沈阳职业技术学院刘洋，辽宁省建设科学研究院有限责任公司高国瑞参与了部分撰写工作。最后定稿和校对由李兵完成。

感谢团队成员近五年的努力工作，谨以本书纪念一起工作、辛勤付出、痛并快乐的日

子。感谢我的学生，是他们的辛苦付出使项目顺利完成，他们是那琦、邹本春、嵇凤颖、杨路、方冰洋、孙小飞、于景春、马宁、刘亚锋、安赛男、杨光、刘洋、王师、李高科、刘玉强、曲晶彤、隋文、张鸿杰、吴晋豪、张熙哲、贺德龙、黄琛、李卓伦、郑一攀。

限于时间和作者水平，疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者和有识之士批评指正。

著 者

2019年8月27日

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势	2
1.3 深基坑施工特点及常见的支护结构	3
1.3.1 深基坑施工特点	3
1.3.2 深基坑常见的支护结构	4
1.4 土体自重及压力计算基本方法	5
1.5 主要研究内容	9
1.5.1 地铁深基坑施工对邻近桥桩的影响主要探究	9
1.5.2 地铁深基坑施工对邻近建筑物的影响主要探究	9
1.5.3 预应力锚杆在地铁车站深基坑开挖中的应用及性能主要探究	10
第 2 章 深基坑施工对周边风险源影响的理论分析及现场监测	11
2.1 地铁深基坑施工对建筑物的影响机理	11
2.1.1 邻近建筑物变形诱因	11
2.1.2 邻近建筑物变形机理	12
2.1.3 邻近建筑物变形控制标准	13
2.2 地铁深基坑对邻近桩基的影响机理	13
2.3 预应力锚杆特性及作用机理	14
2.3.1 锚杆的应用发展	14
2.3.2 锚杆的分类	15
2.3.3 预应力锚杆的作用机理	16
2.3.4 预应力锚杆参数的确定	17

2.4	工程概况	18
2.4.1	工程及监测概况	18
2.4.2	工程地质概况	21
2.5	基坑支护及监测方案	21
2.5.1	基坑支护方案	21
2.5.2	监测方案	21
2.5.3	施工工况	23
2.6	现场监测与分析	23
2.6.1	地表沉降监测与分析	23
2.6.2	桩顶水平位移监测与分析	27
2.6.3	围护桩深层水平位移监测与分析	27
2.6.4	锚杆轴力监测与分析	32
2.6.5	钢支撑轴力监测与分析	34
2.6.6	桥墩沉降和位移监测与分析	36
2.6.7	邻近建筑物沉降监测与分析	39
2.7	本章小结	43
第3章 深基坑施工对邻近桥桩影响的数值模拟分析		45
<hr/>		
3.1	MIDAS GTS 软件介绍	45
3.2	工程概况及模型基本假定	46
3.3	三维模型的建立	47
3.3.1	本构模型	47
3.3.2	支护结构模拟	47
3.3.3	基坑施工阶段定义	49
3.4	模拟结果分析	50
3.4.1	围护桩体水平位移分析	50
3.4.2	支撑轴力分析	53
3.4.3	桥墩桩基沉降分析	54
3.4.4	桥梁桩基水平位移分析	55
3.5	本章小结	56
第4章 不同条件下深基坑开挖对邻近桥墩桩基影响的数值分析		58
<hr/>		
4.1	引言	58
4.2	距基坑不同距离对邻近桥墩桩基水平位移的影响分析	58

4.3	不同支护刚度条件下深基坑开挖对邻近桩基水平位移的影响分析	59
4.4	围护桩的不同入土深度对桩基水平位移的影响分析	60
4.5	不同支撑预加轴力对邻近桩基水平位移的影响分析	62
4.6	不同地质条件下深基坑开挖对邻近桩基水平位移的影响分析	63
4.7	桥梁桩基不同入土深度对桩基水平位移的影响分析	64
4.8	施工方案优化设计	65
4.9	桩基变形控制和保护措施	66
4.10	本章小结	67
第 5 章 深基坑施工对邻近建筑物影响的数值模拟分析		69
<hr/>		
5.1	土的本构模型及计算参数的选取	69
5.1.1	土的本构模型	69
5.1.2	计算参数选取	69
5.2	三维模型的建立	71
5.2.1	计算模型的建立	71
5.2.2	基坑施工阶段的定义	71
5.3	数值模拟结果及分析	72
5.3.1	围护墙深层水平位移	72
5.3.2	钢支撑轴力	74
5.3.3	地表沉降	75
5.3.4	建筑物沉降	76
5.4	本章小结	78
第 6 章 基坑开挖对邻近建筑物的影响因素分析		80
<hr/>		
6.1	不同结构形式建筑物的相对位置对基坑和建筑物自身稳定性的影响分析	80
6.1.1	不同结构形式建筑物在不同位置对基坑围护结构的影响	80
6.1.2	不同结构形式建筑物在不同位置对建筑物自身变形的影响	81
6.2	钢支撑力学参数对建筑物沉降的影响	83
6.2.1	钢支撑预加轴力对建筑物沉降的影响	84
6.2.2	钢支撑刚度对建筑物沉降的影响	85
6.3	围护桩的力学参数对建筑物沉降的影响	87
6.3.1	围护桩的入土深度对建筑物沉降的影响	87
6.3.2	围护桩的桩径对建筑物沉降的影响	90
6.4	本章小结	92

第7章 深基坑施工对邻近建筑物沉降的控制措施	93
7.1 建筑物沉降控制措施	93
7.1.1 从引起变形的源头采取措施减小基坑变形	93
7.1.2 从传播途径上采取措施减小对周边环境的影响	93
7.1.3 从提高基坑周边环境的抵抗变形能力方面采取措施	94
7.2 施工方案优化设计对建筑物沉降的影响	94
7.3 设置隔断墙对建筑物沉降的影响	96
7.4 注浆加固对建筑物沉降的影响	98
7.5 本章小结	99
第8章 预应力锚杆在深基坑开挖过程的数值模拟分析	101
8.1 引言	101
8.2 本构模型与计算参数选取	101
8.2.1 土的本构模型	101
8.2.2 计算参数选取	101
8.3 三维模型建立	103
8.3.1 计算模型的建立	103
8.3.2 定义施工阶段和工况	103
8.4 数值模拟结果分析	104
8.4.1 围护结构深层水平位移	104
8.4.2 地表沉降	106
8.4.3 锚杆支护模拟	108
8.5 本章小结	109
第9章 预应力锚杆支护效果分析	111
9.1 引言	111
9.2 锚固段长度影响	111
9.3 锚杆倾角影响	113
9.3.1 锚杆倾角对水平位移的影响	113
9.3.2 锚杆倾角对最大轴力的影响	114
9.4 预应力大小影响	115
9.5 基坑宽度影响	117
9.5.1 基坑的时空效应	117

9.5.2 基坑宽度对锚杆支护的影响	117
9.6 锚杆支护与钢支撑对比	119
9.7 本章小结	119
参考文献	121

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

近些年来,我国经济进入了高速发展期,人口的快速增长和有限的土地供应使得城市变得越来越拥挤,严重的交通拥堵问题影响着城市的发展,城市交通问题已经成为制约城市发展的主要因素之一。为了满足城市交通需求,缓解地面交通压力,城市地铁成为大中型城市降低交通压力以及提高现代化综合交通体系的首选方式。据统计,我国已有、在建及规划建设地铁的城市已经达到30多个,预计在35年后全国建成的轨道交通总公里数将达到9000km。以沈阳地区的轨道交通发展为例,虽然目前已经投入使用的只有地铁1号线和地铁2号线,但同时已有其他8条线路正在规划或已经开始建设,将在未来八年内陆续建成并逐步投入使用。

地铁建设一般处于城市人口密集区,周边环境复杂,加大了施工难度,同时也给城市居民的生活工作带来了不可避免的影响。地铁车站深基坑工程较多地出现在建筑物、道路、地下管线密集的区域,对周边环境的影响较大,也存在一定的风险。基坑开挖过后,由于坑内土体的卸荷作用,坑外土体发生了应力重分布,土体的平衡也遭到了破坏,导致深基坑周边地表发生了差异沉降与水平位移,土体变形给基坑邻近建筑物的安全性、舒适性和使用功能都造成了极大的影响,尤其在桥桩、建筑物等离基坑较近时,存在不小的风险性。由于各地区地质条件的差异,基坑工程的特点也会有所不同。近年来,我国地铁深基坑工程较多,但深基坑施工对基坑邻近建筑物、桥桩的影响以及预应力锚杆在地铁深基坑施工的应用及性能等,还需进一步的研究和总结。

1.1.2 研究意义

地铁建设首先要面临的问题就是地铁车站深基坑问题,而这些地铁车站一般建设在城市比较繁华的地段,周围环境复杂,建筑物密集,地下管线众多,还有高架桥等构筑物,这就使得对基坑周围的建(构)筑物、地表管线的保护要有较高的要求,因此确保在深基坑开挖施工时的安全性具有重要的意义。地铁深基坑工程发展至今,由于设计或者工程现场施工等因素不符合要求,致使各类大小事故发生,包括邻近建筑墙体的开裂、歪斜,甚至坍塌,附近道路、高架桥的开裂,严重影响交通。因此,在地铁基坑工程问题上一定要谨慎,避免发生事故造成经济损失和严重的社会影响。地铁车站深基坑施工对周边建筑带来的严重危害如图1-1和图1-2所示。深基坑工程施工过程中考虑的因素较多,在确保基

坑安全的前提下既要稳固周边建筑，又要保证附近地下的管线管道不受破坏，同时还要保障周围道路的正常通行，因此本书中对地铁深基坑施工引起的邻近建筑物和桥桩变形规律和保护措施研究以及预应力锚杆在地铁深基坑施工的应用及性能分析都具有较明显的实际意义。

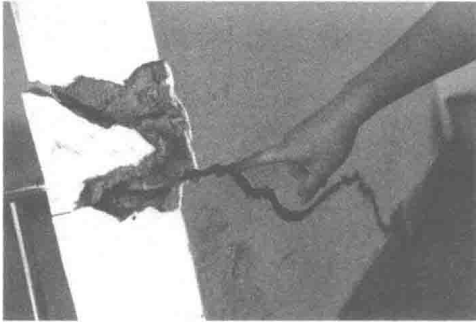


图 1-1 深圳地铁施工附近楼房开裂



图 1-2 广州地铁附近突发地陷

1.2 国内外研究现状及发展趋势

深基坑工程是一个非常复杂的岩土工程，涉及很多方面，包括土层性质、支护结构形式和地下水防治及周围环境的变化等多方面，大多又处在市中心繁华地段，周围环境复杂，不可控因素众多，因此我们要以一个全新的视角看待这个既古老又年轻、既富有历史底蕴又充满时代特点的综合性的工程。

国外研究现状: De Beer (1977 年) 研究桩基和周围土体的作用时，将桩分为两类：一类叫“主动桩”，直接主动承受外部荷载；另一类桩不直接承受外部荷载，仅是由于土体受到压力被动产生形变，称为“被动桩”。对于主动桩的研究方法众多，而被动桩因为受到土体和桩相互作用的复杂性，不可控因素较多，难以单一方法进行研究。20 世纪 50 年代，Bjerrum 和 Eide 基于实际工程和理论分析率先提出了关于基坑坑底隆起及变形的计算方法，为后续的深基坑研究打下了基础。1980 年，Mateur 使用可靠性理论展开了对深基坑工程的研究，提出了关于深基坑工程的各种失效机理，以及导致各种破坏的不确定因素。Selemetas (2004 年) 对邻近隧道的桩基沉降进行了监测研究。研究发现，桩顶部分的沉降大于周边地表。S.Bernat 运用有限元模拟软件模拟地铁基坑工程，结合土的相互作用和基坑支护结构，考虑卸载因素、孔隙水压力、安装衬砌和衬砌的重量等因素，更加贴近实际情况模拟基坑。

随着国内地铁规模的不断扩大，计算机模拟软件的普遍应用，国内专家学者也积极地投入到深基坑的模拟研究中，为我国的地铁事业做着贡献。

刘国彬等 (2007 年) 开发了一套深基坑监测管理信息系统，其实现了实时多方式数据传输，在保证数据安全的同时，实现数据网络共享，可多方参与其中，分享监测结果。此后，远程监测技术得到了更多的应用，在上海世博园区地下变电站基坑工程 (2008 年) 结合信息网络平台建立了全方位的全过程监测网络。任建喜 (2008 年) 以北京某基坑为实例工程背景，使用现场监测和理论分析的方法，研究了基坑的破坏形式和变形机理，使用 FLAC 模拟软件模拟基坑开挖施工，最后用分析模拟结果优化基坑施工参数和支

护结构。冯虎(2010年)研究总结了大量的深基坑工程,把采集来的监测数据整理成数据库,着重总结了围护桩的水平位移变化的数值、特征规律和影响因素,为后续实际基坑工程提供参考。梁发云(2012年)重点研究了深基坑的开挖方式,以某基坑工程为基础,分析不同的开挖方式对基坑的变形影响。通过分析可得出先挖大基坑、后挖小基坑才能有效地控制基坑的变形。朱志祥等人(2014年)用FLAC3D模拟软件分析了土体在加固和不加固两种不同设计方案下,基坑的连续施工对围护墙横向变形和地表沉降变形的影响分析。结果表明,土体加固情况下能有效地抑制围护墙的水平位移和地表竖向沉降,土体加固方案被很多工程所应用。

20世纪50年代,关于深基坑施工变形的研究就多了起来,许多专家学者基于大量的现场实际测量数据,分析深基坑变形的规律、机理和影响。提出了很多对基坑变形的估算方法,主要有解析法、数值分析和经验公式法等。通过这些研究,为了更规范地保障基坑施工的安全,专家也分析制定了基坑变形的控制值和预警值,更有效地指导后续基坑施工。

近些年来,电子计算机技术的不断发展,使得施工监测技术和数值分析也向人工智能自动化方面发展。工程施工过程中采用自动智能化的监测系统,对数据进行自动采集,并对数据进行智能化分析,实现了数据采集、分析与工程预测的智能化。未来的基坑工程监测工作将会以智能自动化的态势发展,成为信息化施工的产物。

1.3 深基坑施工特点及常见的支护结构

1.3.1 深基坑施工特点

1. 区域性

深基坑工程具有很强的区域性。不同形式的地基、工程地质和水文情况的差异性都会影响基坑工程的安全。即使同一城市的不同地方区域,同样存在着差异,所以基坑工程中对支护结构的设计和工程施工方法都要根据当地的实际情况综合考量。对于不同地方的经验,只能起到借鉴作用,不可以照抄、照搬使用。

2. 复杂性

基坑相邻建筑物和地下管线的位置,抵抗变形的能力及周围环境的影响,既要保护建筑物和市政设施的安全,也要满足地下施工要求和安全性。

3. 综合性

深基坑工程是多学科、涉及广、影响因素多的系统性工程,不能单从某一个方面分析,这就给施工带来了很大困难。

基坑施工开挖方式很多种,包括明挖法和盖挖法施工。

1. 明挖法

它是自上而下挖土,打完钻孔灌注桩后,做冠梁,然后向下开挖,一直做到基坑底,此方法适用于场地平整、施工现场周围路面宽阔、交通压力小的情形。

2. 盖挖法

盖挖法分为盖挖顺作法和盖挖逆作法。盖挖顺作法是当挖至地下几米深度后,在路面上做军便梁,以缓解交通压力,然后基坑施工还是自上而下挖土施工,挖至基坑底,再自

下而上做底板、侧墙、中板和顶板。盖挖逆作法是在做完军便梁后，然后自上而下施工，先做顶板，再做侧墙，最后做中板，此方法不用支撑，顶板和中板起到了支撑的作用。选择用什么方法施工，要综合考虑交通情况和地质情况。

1.3.2 深基坑常见的支护结构

1. 深层搅拌桩支护

将水泥和石灰材料等混合，在深层搅拌机械的搅拌下，利用材料的固化性能使材料和土体黏合在一起，产生物理化学反应，使土体的性质发生改变，提高稳定性和强度，以搅拌桩作为基坑的支护结构被工程广泛应用。施工流程如图 1-3 所示。

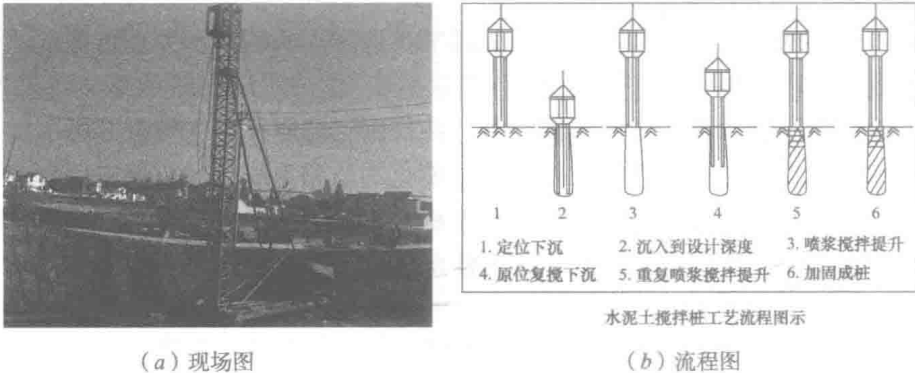


图 1-3 深层搅拌桩示意图

2. 排桩支护

排桩是按队列式位置把某种桩型重新排布的基坑支护结构。排桩包括钢板桩、钢筋混凝土板桩及钻孔灌注桩、人工挖孔桩等，支护要求基坑深度为 8~14m，并且周围环境要求不太高；此支护刚度大，施工对周边地层、环境影响小，但费工、费时，成孔速度慢。

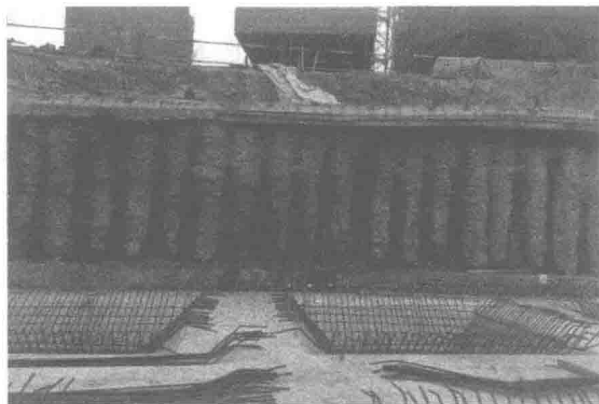


图 1-4 排桩支护示意图

3. 地下连续墙

地下连续墙是在工程周围用挖槽设备做出深长的导槽，在有泥浆护臂不倒塌的前提下，将绑扎好的钢筋笼用吊车放下，再浇灌水下混凝土，这样就形成了一道钢筋混凝土墙。连续墙的刚度大、整体性能好，同时可以做主体结构的一部分，起到支撑结构的作

用。由于其适用性强、对环境保护好、对土质的要求低、对周围构筑物的影响小等优点，被现代工程大量采用作为深基坑工程的围护结构。

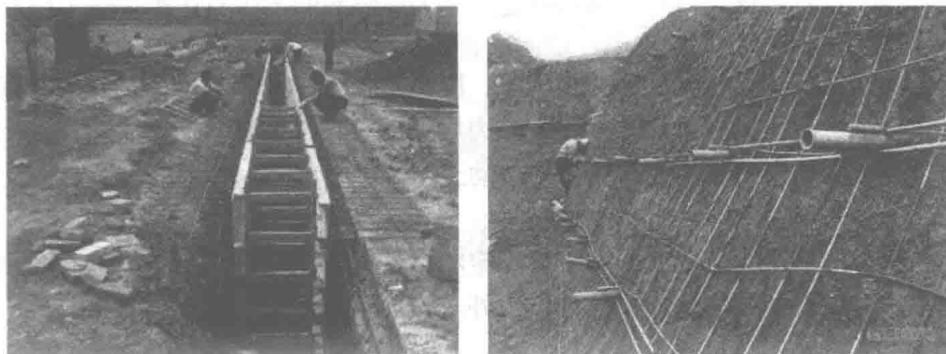


图 1-5 地下连续墙和土钉支护示意图

4. 土钉支护

将细长钉打入原有土体中，并喷射钢筋混凝土网面层。在土钉、混凝土面层和土体连接在一起共同作用，提升了整体强度和自身的稳定性，达到支护的作用。土钉墙支护施工效率高、省材料、费用低，而且施工设备及工艺简单，不需要复杂的技术和大型机具，施工对周围环境小；边开挖、边支护，便于信息化施工，一旦发现异常能及时调整补救，从而提高了工程的安全可靠性。

5. 锚杆支护

用金属件、木件、聚合物件或其他材料制成杆柱，打入地表岩体或洞室周围岩体预先钻好的孔中，利用其头部、杆体的特殊构造和尾部托板（亦可不用），或依赖于粘结作用，将围岩与稳定岩体结合在一起而产生悬吊效果、组合梁效果、补强效果，以达到支护的目的。具有成本低、支护效果好、操作简便、使用灵活、占用施工净空少等优点。锚杆支护广泛应用于矿山开挖的巷道支护，用来加固围岩。随着锚杆支护的支护效果好、价格便宜、便捷等优势逐渐显现，近年来锚杆支护自身不断地优化，种类逐渐丰富，锚杆支护也逐渐应用到了其他领域。在国内外的深基坑施工当中，锚杆支护也越来越受到青睐，各深基坑工程中锚杆支护的应用逐渐增多，锚杆支护的优缺点也在实际工程中越发明显地突显，锚杆支护在理论方面的研究还无法满足对实际工程当中运用的支持。本书中，也将对预应力锚杆在地铁深基坑施工的应用及性能进行分析。

1.4 土体自重及压力计算基本方法

作用在围护结构上的土压力可归为挡土结构上的压力，而围护结构的形式、设计强度和刚度等，也由挡土结构土压力的大小所决定，所以准确地预测土压力决定了围护结构的设计参数。土体自身的压力，即土压力是围护结构承受的压力；土体自身的物理力学性质，如表观密度、弹性模量、内摩擦角等，是土体压力大小的决定因素。作用在挡土结构上的土压力有三种极限平衡状态：

1. 主动土压力

基坑土体会随着基坑的开挖出现卸载，造成坑内的土体应力释放，围护结构外部的土

体就会有向基坑内移动和挤压的趋势，此时的围护结构被坑外的土体挤压朝向坑内移动。在围护结构向坑内移动的过程中，坑外土体的压力逐渐减小。同时，围护结构对土体的反力也在不断减小，直到最后达到平衡，这种极限平衡状态的土压力便是主动土压力。

2. 被动土压力

在有内支撑的围护结构受到外力作用时，围护结构在内支撑预应力的作用下向坑外移动或者发生转动，使得坑外土体被挤压，应力增大，直到围护结构的反力大小和土压力大小相同，这种极限平衡状态的土压力就是被动土压力。

3. 静止土压力

挡土结构（围护结构）的土体处于自稳定状态，土体和围护结构不发生相互挤压，不产生位移，这时的围护结构是静止的。坑内外土体的状态和未开挖时的状态一致，大小相同，这时的土压力即静止土压力。

土压力的大小和类型是由围护结构的类型、围护结构的刚度、土体自身的物理力学性质所决定的，但是在土体性质相同的条件下，由于围护的不同，会产生三种极限平衡状态，即三种土压力。被动土压力最小，静止土压力居中，主动土压力最大，而现场工程中的土压力一般都在这个范围内。

静止土压力的计算公式如下：

$$\sigma_0 = \gamma z K_0 \quad (1-1)$$

静止土压力合力为

$$E_0 = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_0 \quad (1-2)$$

式中 K_0 ——静止土压力系数；

γ ——土的重度；

H ——挡土结构的高度。

1. 土体自重计算

土体的自重引起自重应力，当把地基土视为半无限空间体时，由于天然土重所引起的垂直方向的自重应力按下式计算：

$$\sigma_{cz} = \gamma z \quad (1-3)$$

式中 σ_{cz} ——垂直方向土的自重应力（kPa）；

γ ——土的天然重度（kN/m³）；

z ——地面至计算点之间的距离（m）。 σ_{cz} 随深度成正比例增加，而沿水平面则为均匀分布。

一般情况下，地基均已成层的方式存在，而每层土的重度也不尽相同。地面下一定深度范围内各层的厚度均不一样，从上到下分别为 h_1, h_2, \dots, h_n ，相应的重度为 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ，则 z 深度处的铅直向自重应力可按下式进行计算：

$$\sigma_{cz} = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (1-4)$$

式中 n ——从天然地面起到深度 z 处的土层数；

γ_i ——第 i 层土的重度，地下水位以下用浮重度 γ'_i （kN/m³）；

h_i ——第 i 层土的厚度（m）。

地基中除在水平面上作用着铅直向的自重力外,在铅直面上也作用着水平向的自重应力,根据弹性力学,由广义胡克定律得:

$$\sigma_{cx} = \sigma_{cy} = K_0 \sigma_{cz} \quad (1-5)$$

式中 K_0 ——土的侧向力系数,水平面与铅直面剪应力均为零,即

$$\tau_{zx} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0 \quad (1-6)$$

基底压力又称接触压力,它是地面上荷载通过基础传给地基的压力。

2. 中心荷载下的基底压力

当基础受到中心荷载作用时,荷载的合力通过基础形心,基底压力均匀分布。基底压力按下式计算:

$$p = \frac{F+G}{A} \quad (1-7)$$

式中 F ——作用在基础上的竖向力 (kN);

G ——基础自重及其上回填土自重的总和, $G = \gamma_G A d$ (kN);

γ_G ——基础及回填土的平均重度;

d ——基础埋深 (m);

A ——基底面积 (m²)。

3. 基底附加压力

一般土层在自重作用下已经压缩稳定,因此只有新增加于基底平面处的荷载——基底附加压力,才能引起地基变形,也称基底静压力,计算公式如下:

$$p_0 = p - \sigma_{cz} = p - \gamma_0 d \quad (1-8)$$

式中 p ——基底压力 (kPa);

σ_{cz} ——基底处自重应力 (kPa);

γ_0 ——基础地面标高以上天然土层的加权平均重度;

d ——基础埋深 (m)。

4. 土中附加应力

在外荷载作用下,地基中各点会产生应力,为附加应力。在计算地基中的附加应力时,一般均假定土体是连续、均匀、各向同性的,采用弹性力学解答。铅直集中荷载作用下的附加应力计算式如下:

$$\sigma_x = \frac{3F}{2\pi} \left[\frac{x^2 z}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3} \left(\frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right] \quad (1-9)$$

$$\sigma_y = \frac{3F}{2\pi} \left[\frac{y^2 z}{R^5} + \frac{1-2\mu}{3} \left(\frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right] \quad (1-10)$$

$$\sigma_z = \frac{3F}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{R^5} = \frac{3F}{2\pi R^2} \cos^3 \theta \quad (1-11)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\frac{3F}{2\pi} \left[\frac{xyz}{R^5} - \frac{1-2\mu}{3} \cdot \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \quad (1-12)$$