

地下工程稳定性控制及 工程实例

DIXIA GONGCHENG WENDINGXING KONGZHI JI
GONGCHENG SHILI

郭志飏 胡江春 杨军 王炯 齐干 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

地下工程稳定性控制及 工程实例

郭志飏 胡江春 杨军 王炯 齐干 编著

北 京

冶金工业出版社

2015

内 容 提 要

本书讲述了各类地下工程稳定性控制的理论、技术及工程实例,主要包括基坑工程、城市地铁工程、交通隧道工程、矿山地下工程、非开挖工程和地下工程环境效应及风险管理等,内容涉及范围广、实用性强。书中结合典型工程实例论述了主要地下工程类型的稳定性控制设计方法和技术,通过对工程实例和现有实用理论的对比分析研究,实现了理论和实际工程稳定性控制的进一步融合,可为研究类似地下工程稳定性控制提供参考。

本书可作为高等院校土木工程、交通工程、水利工程、市政工程、采矿工程等专业本科生、研究生的教学参考书,也可供从事地下工程相关理论、技术研究的科研人员和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程稳定性控制及工程实例/郭志飏等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2015. 5

ISBN 978-7-5024-6921-4

I. ①地… II. ①郭… III. ①地下工程—稳定性—研究

IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 099587 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 张耀辉 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6921-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2015 年 5 月第 1 版, 2015 年 5 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 20.25 印张; 396 千字; 315 页

69.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

人类的起居空间首先是在地下，随着人类文明、社会经济的进步，人们才慢慢来到地表。在经济高度发展、社会日益繁荣的今天，人们对生存空间要求越来越多，人类的生活空间又会逐渐转入地下。由此，出现了各种各样、满足不同功能的地下工程空间，这些地下空间的稳定性研究一直是地下工程的主要问题之一。

随着我国经济迅猛发展，工程建设提供的空间，呈现向上和向下发展的趋势，其中地下工程空间越来越成为人们关注的主题，而地下工程稳定性问题一直是困扰工程师和研究者的难题之一。地下工程的勘察、设计、施工等过程，都贯穿着稳定性控制的问题。由于围岩的自然特性、地下工程地质环境的非确定性以及地下工程使用要求和标准的非统一性，造成现有的稳定性控制理论很难获得广泛的认可和相应成熟的应用。

本书针对不同行业的地下工程特点和理论技术，对最新地下工程学科领域的设计规范、标准进行了充分解释和阐述；同时结合地下工程稳定性控制问题，列举了不同行业具有代表性的工程案例进行简要的分析和评述。让读者充分了解现有理论和工程实践的差别，是本书区别于其他同类图书的显著特点之一。

地下工程本身极其复杂，涉及地质环境因素、工程因素、社会经济水平、材料科学发展水平、施工过程控制水平以及地下工程在整个工程体系功能中的地位等。鉴于现有的稳定性控制分析方法和理论较之地下工程实践相对滞后，为弥补这方面的不足，作者在阐述基本理论的同时，还依托大量的工程实例，以求新的编写思路和内容框架为宗旨展开论述，力争反映最新成果和学术动态。

本书由中国矿业大学（北京）岩土工程研究中心郭志飏副教授、

杨军博士、王炯博士，中原工学院岩土与地下工程研究所胡江春副教授，北京市地质研究所齐干高级工程师以及一线的工程师共同协作完成。全书共分为7章：第1章，绪论；第2章，基坑工程；第3章，城市地铁工程；第4章，交通隧道工程；第5章，矿山地下工程；第6章，非开挖工程；第7章，地下工程环境效应及风险管理。

本书的编写和出版得到国家自然科学基金（项目编号：51074196、51479195、51304210、51404278）、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金（项目编号：SKLGDUEK0917、SKLGDUEK1017）、河南省高校青年骨干教师资助计划项目（项目编号：2011GGJS-113）、中央高校基本科研业务费专项基金（项目编号：2009QL06、2010QL03、2011QL07）以及中原工学院学术专著出版基金资助。衷心感谢国家自然科学基金委员会、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室、中原工学院和北京市地质研究所等单位对本书涉及的研究工作的大力支持。北京城乡建设集团有限责任公司谢校亭高级工程师、十四冶建设云南勘察设计有限公司刘克文高级工程师、郑州市市政工程管理处薛保亮高级工程师、北京城建设计发展集团股份有限公司李乾工程师、上海建科建设监理咨询有限公司唐强达工程师、北京市轨道交通建设管理有限公司李宏安博士、中铁六局李国峰高级工程师、中铁一局王运钢工程师等与作者进行了有益探讨交流并提供了参考资料，特此感谢。中原工学院王红芳副教授、研究生李晨和刘晓阳，中国矿业大学（北京）硕士研究生邓小卫、石海洋、马星、王浩、崔家森等参与了部分资料整理工作，为本书的完成做出了贡献，在此一并表示感谢。在本书的编写过程中参阅并引用了大量国内外有关专业文献，谨向文献作者表示感谢。

由于作者水平所限，书中不足之处，希望广大读者不吝赐教。

作 者
2015年1月

目 录

1 绪论	1
1.1 地下工程分类	1
1.2 地下工程稳定性控制现状	1
1.3 本书特点和作用	2
2 基坑工程	4
2.1 基坑工程特点	4
2.2 土压力的分类和计算	4
2.2.1 土压力分类	5
2.2.2 静止土压力计算	6
2.2.3 朗肯土压力理论	7
2.2.4 库仑土压力理论	9
2.3 基坑支护结构	9
2.3.1 支挡式结构	11
2.3.2 土钉墙	17
2.3.3 重力式水泥土墙	29
2.4 基坑稳定性分析	32
2.4.1 支挡式结构的稳定性验算	32
2.4.2 土钉墙的稳定性验算	38
2.4.3 重力式水泥土墙的稳定性验算	41
2.4.4 渗透稳定性验算	44
2.5 典型工程实例	45
2.5.1 新源里综合楼工程	45
2.5.2 大理滨海俊园基坑支护工程	50
2.5.3 中国电子南京科技园华电分园基坑工程	54
3 城市地铁工程	61
3.1 城市地铁工程发展现状及工程特点	62
3.1.1 国内外地铁发展现状	62

3.1.2 城市地铁组成及工程特点	66
3.2 地铁工程稳定性概述及分析方法	68
3.2.1 地下工程围岩稳定概述	68
3.2.2 地下工程围岩失稳形式	68
3.2.3 围岩稳定性影响因素	70
3.2.4 围岩稳定性分析方法	72
3.3 地铁工程施工方法及工艺	75
3.3.1 明(盖)挖法	75
3.3.2 暗挖法	79
3.3.3 盾构法	82
3.3.4 其他常用辅助工法	88
3.4 工程实例	89
3.4.1 北京地铁 10 号线丰台站工程	89
3.4.2 北京地铁 10 号线三元桥站—亮马河站区间隧道工程	102
3.4.3 广州轨道交通五号线中山八站—西场站区间穿越广茂 铁路工程	112
4 交通隧道工程	120
4.1 隧道工程施工方法	120
4.1.1 新奥法施工技术	120
4.1.2 洞口施工方法	122
4.1.3 明洞施工方法	123
4.2 隧道工程的结构设计原理	124
4.2.1 隧道洞室开挖后的应力状态	124
4.2.2 隧道支护结构设计计算原理	126
4.3 围岩松动压力的形成和确定方法	132
4.3.1 围岩松动压力的形成	132
4.3.2 确定围岩松动压力的方法	133
4.4 工程实例	143
4.4.1 浅埋偏压邻近既有线小净距隧道工程	143
4.4.2 新扩建隧道工程	152
4.4.3 某山区隧道工程	160
5 矿山地下工程	168
5.1 矿山地下工程特点及分类	168

5.1.1 矿山地下工程特点	168
5.1.2 矿山地下工程分类	169
5.2 矿山地下工程稳定性影响因素	171
5.2.1 围岩性质	172
5.2.2 地下水	172
5.2.3 地应力	173
5.2.4 巷道的位置和布置	173
5.2.5 巷道的断面形状和尺寸	173
5.2.6 巷道支护形式和施工工艺	174
5.3 矿山地下工程稳定性控制理论及方法	174
5.3.1 地下工程稳定性控制理论	174
5.3.2 地下工程稳定性设计方法	177
5.3.3 地下工程稳定性支护技术	178
5.4 典型工程应用	185
5.4.1 软岩巷道工程	185
5.4.2 深部巷道工程	196
5.4.3 深部软岩硐室群工程	204
5.4.4 深部软岩井筒与马头门工程	212
6 非开挖工程	219
6.1 非开挖工程概述	219
6.1.1 非开挖技术的背景	219
6.1.2 非开挖施工方法简介	219
6.1.3 非开挖施工方法的优点	221
6.1.4 非开挖技术在我国的发展历程	221
6.1.5 我国非开挖技术的前景及建议	222
6.2 非开挖施工技术	223
6.2.1 顶管法	223
6.2.2 HDD 施工技术	230
6.2.3 微型隧道施工	233
6.3 典型工程实例	241
6.3.1 南宁地铁 15 标 D1500 污水管工程	241
6.3.2 郑州工人路顶管专项方案	247
6.3.3 郑州市江山路拓宽改造污水工程	252

7 地下工程环境效应及风险管理	258
7.1 地下工程环境效应	258
7.1.1 概述	258
7.1.2 基坑工程环境效应	258
7.1.3 地铁工程环境效应	260
7.1.4 矿山工程环境效应	261
7.2 地下工程风险管理概述	270
7.2.1 风险的特点及分类	270
7.2.2 风险管理一般流程	272
7.2.3 地铁工程安全风险的基本内容及特点	274
7.2.4 北京地铁施工环境安全风险的主要技术控制措施	279
7.3 地下工程风险管理典型实例	281
7.3.1 角门北路站二号风道施工环境风险因素辨识	281
7.3.2 角门北路站二号风道施工环境风险的模糊层次分析	290
7.3.3 角门北路站二号风道施工环境风险控制的对策及措施	296
7.3.4 风险控制效果分析	310
参考文献	314

1 绪 论

1.1 地下工程分类

地下工程是一个较为广阔的范畴,泛指修建在地面以下岩层或土层中的各种工程空间与设施,是地层中所建工程的总称。

地下空间的利用为各类建筑工程的选址开辟了广阔的前景。当前,地下空间已经作为极其重要的自然资源被加以开发利用,在我国各领域其已经被大量利用,特别是人口密集和交通繁忙的城市市区,地下空间的开发与日俱增。

按照功能和用途,可将地下工程分为基坑工程、城市地铁隧道工程、交通山岭隧道工程、矿山井巷工程、水工隧洞工程、水电地下洞室工程、地下空间工程和军事国防工程等。

1.2 地下工程稳定性控制现状

地下工程的稳定性问题一般指的是工程周围岩土体的变形与破坏问题。在建筑密集的城市中兴建高层建筑、地下车库、地下铁道或地下车站时,往往需要在狭窄的场地上进行深基坑的开挖。这种靠近地表的地下工程的稳定性问题一般是土体或者土岩混合体的变形破坏和地下水的渗流问题,表现为土体滑移、倾覆、隆起和地下水的管涌和渗流;埋藏较深的工程一般表现为围岩的变形与破坏问题,表现为顶板塌落、边墙挤出、底板隆起、围岩开裂、突发岩爆、支护失效等。上述现象都属于地下工程的不稳定显现,因此,要根据地下工程的不同类型确定相应的稳定性控制对策和方法。

由于地下工程涉及地质环境因素、工程因素、社会经济水平、材料科学发展水平、施工过程控制水平以及地下工程在国民经济中的地位等因素,很少有条件完全相同的两个工程。依据传统的科学思想,地下工程中应该采用确定性的思维、精确的力学与数学分析方法。实践证明,单纯应用力学、数学的理论分析是行不通的,应该采用系统的方法去解决地下工程问题。

对于靠近地表的工程,人们习惯采用全面开挖的基坑工程。该类的分析方法最早是太沙基(Terzaghi)和佩克(Peck)等人提出的。20世纪50年代,Bjerrum和Eidr给出了分析深基坑底板隆起的方法,60年代开始在奥斯陆和墨西哥城软黏土深基坑中使用仪器进行监测,此后的大量实测资料提高

了预测的准确性,并从70年代起,产生了相应的指导开挖的法规。从80年代初开始我国逐步涉入深基坑设计与施工领域,在深圳市的一个深基坑支护工程中率先应用了信息施工法,大大节省了工程造价。进入90年代后,为了总结我国深基坑支护设计与施工经验,开始着手编制深基坑支护设计与施工的有关法规。

狭义上的地下工程一般是指全封闭的地下空间工程。现有的地下工程稳定性控制包括设计理论、设计方法、控制技术以及监控监测技术等。各行各业在稳定性控制方面描述不一,但是基本思想和技术还是一脉相承,都属于岩土力学与工程问题。设计理论应用较多的应该是20世纪70年代末传入中国的“新奥法”。设计方法一般是支护结构设计方法,包括概率极限状态法、荷载-结构计算法、经验类比法和岩石力学计算法等。稳定性控制包括被动的衬砌、管棚、U型钢等支护方法,还有和“新奥法”配合的锚网索等主动支护方式。随着计算机技术与岩土本构关系研究的发展,支护系统的数值计算方法有了新的进展,虽然计算技术与数学方法的介入,使我们有可能对地下工程的一些问题进行分析与研究,但是存在的问题是数值分析模型缺少基础理论支持,具体表现为:回归统计的概率模型过于简单;位移反分析力学模型的假设缺少理论支持;模型试验尚难以实现时空模拟;围岩承载特征曲线的测量难以实现,失稳判据难以确定等。总体来说,岩土力学基础理论的不成熟是造成地下工程控制难以摆脱经验与工程类比的主要原因。

地下工程实践证明,地下工程问题是一个非确定性问题,从认识论的角度解释诸多预测围岩稳定性的方法难以获得普及与理论上的突破进展的原因,就是存在对地下工程问题的认识与方法局限性问题。围岩是一个自然体,在其间的开挖与支护等工程问题是一个复杂的系统问题,不可能用简单的数学方法和物理学方法加以解决。因此,岩土力学正从确定性研究转向非确定性方法研究,该过程中多采用信息化施工与动态设计。地下工程的基础理论研究与应用研究几乎同步进行,且至今仍远未达到成熟的程度,需要用系统的、复杂的、未知的眼光和方法去探索,总结实践,提升理论。

1.3 本书特点和作用

由于经济建设的快速发展,大规模的地下工程建设逐渐展开,尤其是大型地下工程的建设涉及工程地质、稳定性控制理论和技术、设计与施工方面,造成工程实践的发展更快,理论研究落后于实践。因此,急需通过对大量工程实践稳定性控制的系统分析,促进理论和技术的进一步发展,并对其有较好的补充和完善,即要以实践推动理论的进一步发展。

本书的特点是实用的理论技术研究和工程实例的分析,目的在于通过工程实

例的分析研究和现有实用理论分析,达到理论和实际工程稳定性控制的进一步融合。根据作者从事的工作领域,本书主要涵盖了基坑工程、城市地铁工程、交通隧道工程、矿山地下工程、非开挖工程和地下工程环境效应及风险管理等,涉及范围广、实用性强,结合典型工程实例论述了主要地下工程类型的稳定性控制设计方法和技术,可为研究类似地下工程稳定性控制提供参考。

2 基坑工程

20 世纪 80 年代以来,我国城市建设迅猛发展,高层建筑如雨后春笋般拔地而起。这些高层建筑一般都有 1~4 层地下室或车库,相应带来了基坑的开挖施工。由于高层和其他地下工程的基坑施工经常遇到各种不同的技术问题,包括极其复杂的工程水文地质条件和周边环境问题,致使许多基坑工程成为当地建筑工程中投资大、难度高、风险大的技术工程。基坑工程的稳定性控制,不仅要保证基坑内能正常安全作业,而且要防止基底及坑外土体移动,保证基坑附近建筑物、道路、管线的正常运行。

2.1 基坑工程特点

在建筑密集的城市中兴建高层建筑、地下车库、地下铁道或地下车站时,往往需要在狭窄的场地上进行深基坑的开挖。由于场地的局限性,在基坑平面以外没有足够的空间安全放坡,人们不得不设计规模较大的开挖支护系统,以此保证施工的顺利进行。这类工程具有以下一些基本特点:

(1) 主要高层、超高层建筑都集中在市区。市区的建筑密度很大,人口密集,交通拥挤,施工场地狭小,因此,其施工的条件往往很差。

(2) 为了节约土地,在工程建设中要充分利用基地面积。地下建筑物一般占基地面积的 90%,紧靠邻近建筑,要充分利用地下空间,设置人防、车库、机房、仓库等各种设施。基础深度越大,基坑开挖与支护工程的施工难度也就越大。

(3) 深基坑的施工,除了确保深基坑的自身安全外,还要考虑对邻近建筑物的影响,考虑对周围地下的煤气、上下水、电信、电缆等管线的影响。

(4) 深基坑支护工程大多为临时性支护工程。在实际处理这个问题时,常常得不到建设方应有的重视。

因此,深基坑开挖与支护工程是一个系统工程,不仅涉及工程地质和水文地质、工程力学与工程结构、土力学与基础工程,还涉及工程施工与组织管理,是融合多学科知识于一体的综合性科学。

2.2 土压力的分类和计算

深基坑的开挖改变了施工场地土的原始应力平衡状态,需要采用各种不同类

型的支护结构来恢复、平衡原来的应力状态。因此，深基坑支护设计的重要问题是分析场地在深基坑开挖前、开挖过程中及开挖后的一段时期维持土体原有应力状态的变化情况。侧向土压力是设计的一个重要参数，挡墙和板桩墙、支撑和不支撑的开挖，筒仓壁和储箱上的谷物压力，隧道墙以及其他地下结构物上的土或岩石压力都需要通过对构件的侧向压力进行定量估算来做设计或稳定性分析。

2.2.1 土压力分类

土压力是土作用在工程结构上的或作用在被土所包围的结构物表面上的压力或这些压力的合力。这些压力由土的自重、土所承载的恒荷载和活荷载所产生，其大小由土的物理力学性质、土和结构之间的物理作用、绝对位移、相对位移以及变形值与特征所决定。

图 2-1 所示为几种支护工程结构土压力的实例，其基本不同点在于位移的类型和数值。图 2-1 (a) 为重力式挡土墙支护结构类型，当基底考虑为不动时，位移体现在墙身绕基底转动；图 2-1 (b) 为柔韧拉锚板桩支护结构，其变形主要体现在支护结构本身（与土体协调）；图 2-1 (c) 为支撑围护的护壁水平移动。

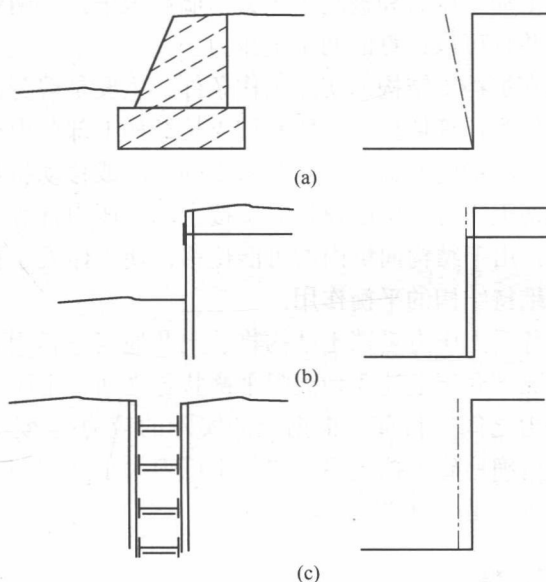


图 2-1 与土压力有关的支护结构问题

(a) 重力式挡土墙；(b) 拉锚板桩；(c) 支撑

根据墙的移动情况，作用在挡土墙墙背上的土压力可以分为静止土压力、主动土压力和被动土压力，其中静止土压力值介于其他两者之间，它们与墙的位移关系如图 2-2 所示（静止土压力 E_0 ；主动土压力 E_a ；被动土压力 E_p ）。

如果墙体的刚度很大,墙身不产生任何位移或转动,这时墙后填土对墙背所产生的土压力称为静止土压力。

如果刚体墙身受墙后填土的作用绕墙底部(即墙踵)向外转动或平行移动,则作用在墙背上的土压力值逐渐减小,直到填土内出现滑动面。在滑动面以上的土体(滑动楔体)将沿着这一滑动面向下向前滑动。在这个滑动楔体即将发生滑动的一瞬间,作用在墙背上的土压力减小到最小值,称为主动土压力,而土体内相应的应力状态称为主动极限平衡状态。相反,如墙身受外力作用而

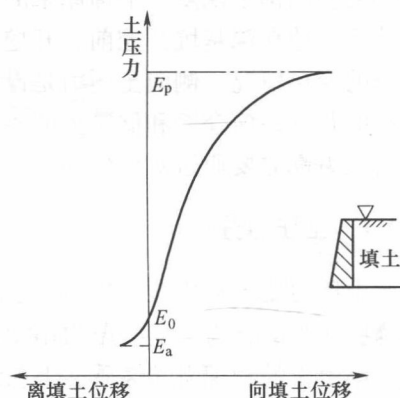


图 2-2 墙身位移与土压力关系

挤压墙后的填土,则土压力从静止土压力值逐渐增大,直到填土内出现滑动面,滑动楔体将沿某一滑动面向上向后推出,发生破坏。在这一瞬间作用在墙背上的土压力增加到最大值,称为被动土压力,而土体内相应的应力状态称为被动极限平衡状态。所以,主动土压力和被动土压力是墙后填土处于两种不同极限平衡状态时作用在墙背上并且可以计算的两个土压力。

设计时应根据支护挡土结构的实际工作条件,主要是墙身的位移情况,决定采用哪一种土压力作为计算依据。一般基坑支护结构上部分由于受到墙后土的作用和地基变形,总要转动向前移动,这些微小的转动或移动将足以使作用在墙背上的土压力接近主动土压力,所以设计时多按主动土压力计算。与此同时,基坑支护结构的下部分,由于结构向坑内的可能位移,使土体处于被动受压状态,产生了被动土压力以维持结构的平衡作用。

事实上,挡墙背后土压力是挡土结构物、土及地基三者相互作用的结果,实际工程中大部分情况均介于上述 3 种极限平衡状态之间,土压力值的实际大小也介于上述 3 种土压力之间。目前,根据土的实际的应力-应变关系,利用数值计算的手段可以较为精确地确定挡土墙位移与土压力大小之间的定量关系,这对于一些重要的工程建筑物是十分必要的。

2.2.2 静止土压力计算

当挡土墙绝对不动时,墙后填土因墙的侧限作用而处于弹性平衡状态,这时填土作用在墙背上的土压力称为静止土压力 E_0 。

设 K_0 为土的静止土压力系数, e_0 为作用在墙背上填土表面下任意深度 z 处的静止土压力强度, E_0 为作用在墙高为 H 的墙背上的静止土压力,则

$$e_0 = \sigma_x = \xi \gamma z = K_0 \gamma z$$

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

可见, 静止土压力沿挡土墙高度呈三角形分布。

关于静止土压力系数 K_0 , 理论上有 $K_0 = \frac{\mu}{1 - \mu}$, μ 为土的泊松比, K_0 可通过对填土的室内试验或原位试验测定。当缺乏试验资料时, 还可由经验公式来估算, 即

$$\text{对于砂性土} \quad K_0 = 1 - \sin \varphi'$$

$$\text{对于黏性土} \quad K_0 = 0.95 - \sin \varphi'$$

我国《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 21—89) 给出静止土压力系数 K_0 的参考值: 砾石、卵石为 0.20; 砂土为 0.25; 粉土为 0.35; 粉质黏土为 0.45; 黏土为 0.55。

目前古典土压力的理论主要有朗肯 (W. J. M. Rankine) 理论和库仑 (G. A. Coulomb) 理论。

2.2.3 朗肯土压力理论

朗肯土压力理论是英国学者朗肯 (Rankine) 1857 年根据均质的半无限土体的应力状态和土处于极限平衡状态的应力条件提出的。在其理论推导中, 首先作出以下基本假定:

- (1) 挡土墙为刚性并且墙背垂直;
- (2) 挡土墙的墙后填土表面水平;
- (3) 挡土墙的墙背光滑, 不考虑墙背与填土之间的摩擦力 (即 $\delta = 0$)。

然后按墙身的移动情况, 根据墙后土体内任意一点处于主动或被动极限平衡状态时最大和最小主应力间的关系求得主动和被动土压力强度, 以及主动和被动土压力 (它等于土压力强度分布图形的面积)。由于没有考虑摩擦力, 这样求得的主动土压力值偏大, 而被动土压力值偏小。因此, 用朗肯土压力理论来设计挡土墙总是偏于安全的, 而且公式简单, 便于记忆, 所以也被广泛应用。

朗肯研究了无限均质土体任意点的应力状态, 导出了土压力理论。

地表下深为 z 的某处, 在它水平底面上的竖向应力 σ_z 为主应力, 并等于其自重应力:

$$\sigma_z = \gamma z \quad (2-2)$$

而水平应力 $\sigma_h = \xi \gamma z$ 则是另一个主应力, 这时土应力状态如图 2-3 中的应力圆弧 $\widehat{12}$ 所示。当侧向水平应力 σ_h 由于土的侧胀而减小时, 点 2 就逐渐左移, 最后到达点 3 的位置, 这时, 应力圆正好与抗剪强度线相切, 这时的状态称为主动

极限平衡状态。反之，当水平应力由于土受到侧向挤压而挤紧时，应力圆弧 $\widehat{12}$ 上的点2就要向右方移动，一直移到图中的点4的位置而与抗剪强度线相切，这时的状态称为被动极限平衡状态。当土体处于极限平衡状态时，土中任一点的最大主应力 σ_1 与最小主应力 σ_3 间存在着如下关系：

$$\text{无黏性土} \quad \sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2-3)$$

$$\text{或} \quad \sigma_3 = \sigma_1 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2-4)$$

$$\text{黏性土} \quad \sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2C \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2-5)$$

$$\text{或} \quad \sigma_3 = \sigma_1 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2C \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2-6)$$

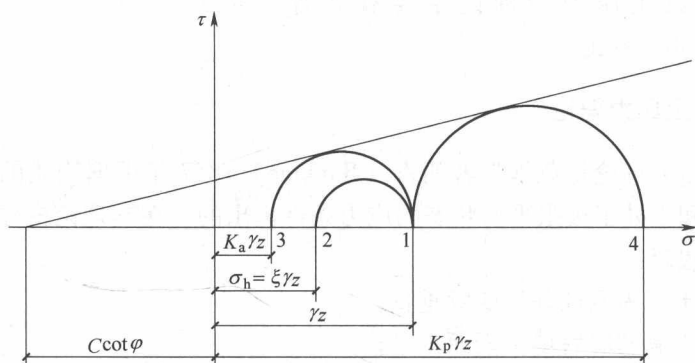


图 2-3 朗肯极限平衡状态应力图

而滑动面（即破裂面）与最大主应力平面之间的夹角等于 $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ 。

当整个土体在水平方向有机会侧向膨胀伸展而达到主动极限平衡状态时（或主动朗肯状态时），在深度 z 处任一点所受的竖向应力 γz 是最大主应力，而水平应力是最小主应力，也就是该点的主动土压力强度 e_a 。由式（2-4）和式（2-6）可得：

$$\text{无黏性土} \quad e_a = \gamma z \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2-7)$$

$$\text{黏性土} \quad e_a = \gamma z \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2C \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2-8)$$

因为最大主应力是竖向的，也即最大主应力作用面是水平的，所以滑动面和