

Study on Calculation Method of
SOIL ARCH EFFECT

土拱效应 原理计算方法研究

朱建明 赵琦 林庆涛 郑剑岳 祝恩阳 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

土拱效应原理计算方法研究

朱建明 赵琦 林庆涛 郑剑岳 祝恩阳 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

经典的朗肯或库仑土压力计算理论认为土压力为线性分布,因而无法解释室内模拟试验得到的挡土结构主动土压力分布呈现非线性分布这一现象。而对于土体这样的散体材料来说,土压力分布受土拱效应的影响非常大,因而有必要将其考虑到土压力计算中。本书主要针对黏性土填料下挡土墙主动土压力计算理论以及不同位移模式下考虑土拱效应的主动土压力计算方法,并分别求解了邻近建筑物外墙影响下的主动土压力以及盾构施工开挖面的支护阻力计算方法,最后在自主开发的盾构施工模拟系统中对土体特性参数与盾构刀盘扭矩相互影响关系开展了实验验证。

本书是一部系统研究土拱理论计算方法的专著,研究内容丰富,可供土木、交通、地下工程等相关专业的工程技术人员、科研人员和高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

土拱效应原理计算方法研究/朱建明等著. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2015. 8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2627 - 3

I. ①土… II. ①朱… III. ①土压力理论 IV. ①TU432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 031539 号

书 名 土拱效应原理计算方法研究

著 者 朱建明 赵 琦 林庆涛 郑剑岳 祝恩阳

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 11.75 字数 280 千字

版次印次 2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

现有的室内模型试验及相关研究表明,多数情况下挡土墙主动土压力均呈非线性分布,并指出上述现象主要是由土拱效应引起的。目前有关土拱效应原理的计算方法主要集中在砂性土填料的平面应变条件下平移模式时的土压力计算,而对黏性土填料下挡土墙、不同位移模式下土拱效应原理的计算方法以及考虑空间土拱效应的挡土墙土压力计算理论及其在实际工程中应用的研究还非常欠缺。因此本书主要针对上述问题开展了研究与探讨,主要研究内容和取得的成果如下:

(1) 对土拱效应下的土拱曲线形状及其挡土墙土压力计算方法进行了研究。提出的圆弧形土拱曲线形状较接近于实际,且更为实用。并基于水平层析法,提出了平移模式下黏性土填料挡土墙侧向主动土压力在应力状态和静力平衡两种状态时的墙后竖向平均应力的计算方法。

(2) 解决了黏性土填料下挡土墙在特定变化模式下的土压力计算方法。在分析挡土墙土层间摩擦系数变化规律的基础上,提出了绕墙顶及绕墙底两种模式下的竖向平均应力及其主动土压力计算公式,以及主动土压力合力及其作用点高度的计算方法,并基于上述计算方法提出了平面应变条件下临近建筑物外墙影响下的主动土压力的计算问题。

(3) 将上述平面条件下的土拱效应计算方法推广到空间土拱效应计算中,建立了空间土拱效应的计算理论方法。应用空间土拱效应计算方法解决了一般挡土墙条件下主动土压力以及临近地下室外墙的挡土墙主动土压力的计算问题,并将上述方法应用到地下盾构施工相关参数的确定与计算中,提出了盾构开挖面的极限支护力的计算公式。

(4) 成功开发了一套土压平衡盾构施工模拟系统,通过试验可以得出不同土层条件下盾构刀盘扭矩的计算公式,研究成果验证了相关文献和本项目研究

提出的有关理论计算公式。

本书内容的研究得到了北京航空航天大学姚仰平教授、南京工业大学陈国兴教授、北方工业大学屈铁军教授的指导和帮助,同时江苏省苏州市轨道交通集团有限公司滕长浪高工、江阴市人民政府重点工程建设办公室江强博士等对本项目提供了支持与帮助,此外,本书还参考了相关的文献资料,在此一并表示衷心的感谢。

众所周知,土拱效应是土力学应用研究中遇到的实际问题,其计算方法一直是土力学研究中的难题,由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。希望本书的出版能够起到抛砖引玉的作用,为土拱效应原理计算方法的研究做些贡献。

作 者

2015 年 7 月

PREFACE

According to the laboratory model tests, in most cases, the active distribution on the retaining structure is nonlinear. The soil arch effect is the main reason. The soil arch effect computation theories so far mainly focus on sandy soil padding with translational retaining wall. While less study is carried out on computation theories of clay padding with the retaining wall in different displacement mode or considering spacial soil arch effect. Aiming at the upward issues, study and discussion are carried out and the main contents and achievements in this book are as following:

(1) The soil arch, soil arch shape and the computation method of the earth pressure on the retaining wall are studied. The circular arc is more practical and proper to describe the soil arch shape. Stress state method and static balance method are raised to solve the vertical mean stress of the clay padding on the retaining wall at translational displacement mode.

(2) The computation method of the active earth pressure of the clay padding on the retaining wall that being at different displacement modes is developed. After analysing the distribution of the friction coefficients between the clay padding layers, equations of the vertical mean stress and the active earth pressure with the retaining wall spinning around both of the top and the bottom are presented. The resultant force and its acting position of the active earth pressure are presented. Based on the above theory, the computation method of the active earth pressure on the neighbor basement outer wall in plane strain condition is also presented.

(3) Applying the computation method considering spacial soil arch effect, computation of the general active earth pressure on the retaining wall or on the neighbor basement outer wall are solved. This method is also ap-

plied in the parameter determination of the shield construction, and the equations of the limit support pressure are also deduced.

(4) An earth pressure balance shield construction simulation system is successfully developed. And the equations of the torque of the cutter head of the shield tunneling machine are presented. Then the achievements from this project and from the relative references are verified.

The researches in this book is supported by Professor Yao Yangping from the Beihang University, Professor Chen Guoxing from Nanjing Tech University, Professor Qu Tiejun from North China University of Technology, the senior engineer Teng Changlang from Suzhou Rail Transit Group Co. , Ltd , and Doctor Jiang Qiang from the office of key project construction of Jiangyin in Jiangsu province. In addition, the author sincerely appreciated all the authors of the literatures that have been referred to.

The soil arch effect is a practical issue in soil mechanics application, and the computation method all long is an issue in soil mechanics research. Being confined to the research level of the authors, some shortcomings existing are hoped to be corrected by the readers. Expecting the publication of this book to provide some construction to the soil arch effect issue and inspire more new achievements.

Authors
2015. 7

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 挡土结构土拱效应研究现状	2
1.2.1 挡土墙试验国外学者研究现状	2
1.2.2 挡土墙平移模式下的土压力研究现状	3
1.2.3 考虑位移模式的挡土墙土压力研究现状	12
1.2.4 考虑位移关系的挡土墙土压力研究现状	12
1.2.5 考虑有限填土的挡土墙土压力研究现状	13
1.2.6 数值模拟研究现状	14
1.2.7 挡土墙土拱效应研究趋势	15
1.3 研究内容	15
2 平移模式下的黏性土填料主动土压力研究	16
2.1 引言	16
2.2 侧向主动土压力系数求解	19
2.2.1 主应力旋转	19
2.2.2 黏性土库仑滑裂面倾角计算	22
2.3 土拱形状研究	26
2.4 竖向平均应力求解	27
2.4.1 分析模型对比	27
2.4.2 侧向主动土压力系数变换原理	29
2.4.3 张拉裂缝高度的影响	29
2.4.4 平移模式下的考虑土拱效应主动土压力计算公式	30
2.5 影响规律研究	32
2.5.1 应力状态法与静力平衡法计算区别	32

2.5.2	黏性土挡土墙土压力变化规律	35
2.6	试验验证	36
2.6.1	Tsagareli 试验	36
2.6.2	周应英试验	38
2.6.3	赵恒惠试验	38
2.6.4	四川省建筑科学研究所试验	39
2.7	本章小结	40
3	不同位移模式黏性土填料主动土压力研究	41
3.1	引言	41
3.2	侧向主动土压力系数	42
3.3	主动层间摩擦系数	42
3.4	平均竖向应力求解	42
3.5	影响规律及折减系数的研究	45
3.5.1	影响规律研究	45
3.5.2	对折减系数 ξ 的讨论	45
3.6	试验验证	48
3.7	本章小结	50
4	邻近地下室外墙影响下的主动土压力研究	51
4.1	引言	51
4.2	侧向主动土压力系数	52
4.3	竖向平均应力求解	54
4.4	邻近地下室外墙的主动土压力求解	56
4.5	试验结果	58
4.5.1	砂性土土压力计算研究	58
4.5.2	黏性土土压力计算研究	60
4.6	本章小结	62
5	考虑土拱效应的主动土压力与被动土压力统一解研究	64
5.1	引言	64
5.2	侧向土压力系数统一解	69

5.3	竖向平均应力求解	71
5.4	基于统一解下的土压力合力及作用点高度计算公式	72
5.5	算例研究	73
5.5.1	主动土压力计算研究	73
5.5.2	被动土压力计算研究	74
5.6	本章小结	75
第 6 章	考虑土拱效应的挡土墙空间土压力计算方法	76
6.1	引言	76
6.2	考虑土拱效应的挡土墙空间土压力研究	81
6.2.1	计算模型	82
6.2.2	主动土压力计算	83
6.2.3	挡土墙空间主动土压力合力	89
6.2.4	算例研究	91
6.3	临近地下室外墙影响下的挡土墙空间土压力研究	94
6.3.1	计算模型	94
6.3.2	主动土压力计算	97
6.3.3	挡土墙空间主动土压力分布	101
6.3.4	算例研究	101
6.4	本章小结	104
7	基于土拱效应的盾构开挖面稳定性计算	106
7.1	引言	106
7.2	盾构开挖面稳定性研究现状	107
7.2.1	理论研究现状	107
7.2.2	试验研究现状	113
7.2.3	数值模拟现状	115
7.3	考虑横向土拱作用的迎坡条件下盾构隧道开挖面稳定性研究	116
7.3.1	迎坡条件下盾构开挖面极限支护力	117
7.3.2	滑动面倾角 α	120
7.3.3	线路纵坡坡度的影响分析	123
7.4	考虑土拱效应的盾构隧道开挖面稳定性研究	124

7.4.1	α 、 β 角的取值	126
7.4.2	上部覆土压力计算	127
7.4.3	算例分析	133
7.5	本章小结	134
8	盾构刀盘扭矩计算与试验验证	136
8.1	引言	136
8.2	盾构机刀盘扭矩计算国内外研究	137
8.3	土压平衡盾构刀盘扭矩修正模型	140
8.3.1	平面应变条件下的 SMP 准则	140
8.3.2	修正前后内摩擦角比较	141
8.3.3	刀盘扭矩修正计算	143
8.4	模拟盾构掘进机刀盘扭矩试验研究	148
8.4.1	相似模拟设计	148
8.4.2	$\phi 600$ mm 模拟盾构掘进机刀盘扭矩的试验研究	149
8.4.3	试验参数的确定	150
8.4.4	试验结果分析	152
8.5	本章小结	154
9	主要结论	155
9.1	结论	155
9.2	展望	156
	参考文献	157
	近期已发表或已录用的相关学术论文	168

CONTENTS

1	Introduction	1
1.1	Introduction	1
1.2	Research status of soil arch effect of retaining wall	2
1.2.1	Foreign research status of tests on retaining wall	2
1.2.2	Research status of the earth pressure as the retaining wall translating	3
1.2.3	Research status of the earth pressure considering the displacement mode of the retaining wall	12
1.2.4	Research status of the earth pressure considering the displacement relationship	12
1.2.5	Research status of the earth pressure considering limited soil padding	13
1.2.6	Research status of numerical simulation	14
1.2.7	Research trends of the soil arch effect	15
1.3	Research content	15
2	Research on active earth pressure of clay in translating mode	16
2.1	Introduction	16
2.2	Solving the coefficient of active earth pressure	19
2.2.1	Principle stress rotation	19
2.2.2	Inclination calculation of the Coulomb sliding surface for clay ...	22
2.3	Research of the shape of the soil arch	26
2.4	Solving the vertical mean stress	27
2.4.1	Comparison of the model	27
2.4.2	Transformation principle of the coefficient of active earth	

pressure	29
2.4.3 Influence of the height of the tensile fracture	29
2.4.4 Equations of the active earth pressure considering the soil arch effect as the retaining wall translates	30
2.5 Research of the influence rule	32
2.5.1 Differences between the stress state method and the static equilibrium method	32
2.5.2 Distribution of the earth pressure on the retaining wall by the clay	35
2.6 Tests verification	36
2.6.1 Tsagareli test	36
2.6.2 Test by Zhou Yingying	38
2.6.3 Test by Zhao Henghui	38
2.6.4 Test by Sichuan Institute of Building Research	39
2.7 Conclusion	40

3 Research on active earth pressure of clay in different displacement mode

.....	41
3.1 Introduction	41
3.2 The coefficient of the active earth pressure	42
3.3 The active friction coefficient between layer and layer	42
3.4 Solving the mean vertical stress	42
3.5 Researches on the influence rule and the reduction coefficient	45
3.5.1 Research on the influence rule	45
3.5.2 Discussion on the reduction coefficient	45
3.6 Tests verification	48
3.7 Conclusion	50

4 Research on the active earth pressure under the influence from the neighboring basement exterior wall

4.1 Introduction	51
4.2 The coefficient of the active earth pressure	52

4.3	Solving the mean vertical stress	54
4.4	Solving the active earth pressure on the neighboring basement exterior wall	56
4.5	Test results	58
4.5.1	Computation research on earth pressure from sands	58
4.5.2	Computation research on earth pressure from clays	60
4.6	Conclusion	62
5	Research on the unified solution of the active and passive earth pressure considering soil arch effect	64
5.1	Introduction	64
5.2	Unified solution of the coefficient of the earth pressure	69
5.3	Solving the mean vertical stress	71
5.4	Calculations of the resultant force and its application point height based on the unified solution	72
5.5	Examples	73
5.5.1	Computation of the active earth pressure	73
5.5.2	Computation of the passive earth pressure	74
5.6	Conclusion	75
6	Computation theory of spacial earth pressure considering soil arch effect	76
6.1	Introduction	76
6.2	Study of the spacial earth pressure considering soil arch effect	81
6.2.1	Computation model	82
6.2.2	Computation of the active earth pressure	83
6.2.3	Resultant force of the spacial active earth pressure on the retaining wall	89
6.2.4	Examples	91
6.3	Research on the spacial earth pressure under the influence from the neighboring basement exterior wall	94
6.3.1	Computation model	94
6.3.2	Computation of the active earth pressure	97

6.3.3	Distribution of the spacial active earth pressure on the retaining wall	101
6.3.4	Examples	101
6.4	Conclusion	104
7	Stability computation of the excavation surface of shield tunnel considering soil arch effect	106
7.1	Introduction	106
7.2	Research status of the excavation surface of shield tunnel	107
7.2.1	Research status on theories	107
7.2.2	Research status on tests	113
7.2.3	Research status on numerical simulation	115
7.3	Research on the stability of the excavation surface of shield tunnel under facing-slope condition considering soil arch effect	116
7.3.1	Limited supporting force on the excavation surface of shield tunnel under facing-slope condition	117
7.3.2	Inclination of the sliding surface	120
7.3.3	Influence of the longitudinal gradient of the slope	123
7.4	Research on the stability of the excavation surface of shield tunnel considering the soil arch effect	124
7.4.1	The value of α, β	126
7.4.2	Computation of the earth pressure of the upper soil	127
7.4.3	Example	133
7.5	Conclusion	134
8	Computation and test verification of the torque of the cutter head of shield tunneling machine	136
8.1	Introduction	136
8.2	Research status of the computation of the torque of the cutter head of shield tunneling machine	137
8.3	Modification model of the torque computation of the cutter head of earth pressure balance shield tunneling machine	140

CONTENTS

8.3.1	SMP criterion in plane strain condition	140
8.3.2	Comparison of the friction angles before and after the modification	141
8.3.3	Modification computation of the torque of the cutter head	143
8.4	Test research on the torque of the cutter head of shield tunneling machine	148
8.4.1	Design of the similarity theory	148
8.4.2	Test research on the torque of the cutter head of shield tunneling machine	149
8.4.3	Determination of the test parameters	150
8.4.4	Analysis of the test results	152
8.5	Conclusion	154
9	The main conclusions	155
9.1	Conclusions	155
9.2	Prospects	156
Reference		157
Related academic papers published recently		168

1 绪 论

1.1 引言

挡土墙土压力与地基承载力和边坡安全系数是土力学的三大传统课题之一。如何确定挡土墙墙后土压力大小及其分布规律一直是个大难题。传统的挡土墙土压力计算理论朗肯(Rankine)理论以及库仑(Coulomb)理论得到的挡土墙土压力是土体在极限状态时的结果,其特征是土压力系线性分布。但是,众多实验^[1-9]表明,不管是主动土压力还是被动土压力,也不管挡土墙后填料是砂性土还是黏性土,其分布均呈现非线性,并且与挡土墙的位移模式相关。L. R. Handy 等学者^[10-14]认为,正是由于土体存在土拱效应而造成了土压力呈现这种非线性分布。

土拱效应的作用机理可用图 1-1 解释。在自重的作用下,一部分土体由于屈服产生向下的变形,如果两边滑动面上可以提供足够的剪切力的话,这时滑动土体便会通过土颗粒相互挤压作用而将屈服应力转移至周边土体,其结果便是土体的竖向应力会减小、水平向应力会增加。或一种说法,挡土墙墙底的竖向应力小于 γH ,因为墙后土体的自重有一部分由墙土摩擦力及土体黏聚力(黏性土中存在)来承担。上述力学现象也广泛存在于煤矿回填和谷物仓储中。

通过上述解释,挡土墙土拱现象主要特点是:① 土压力分布呈非线性;② 总压力大小及作用点也与朗肯理论和库仑理论不同;③ 墙底竖向平均应力小于 γH 。太沙基(K. Terzaghi)^[1,11]于 1934 年首次通过活动门试验发现了土拱效应这一现象,于 1943 年正式提出土拱效应这一概念,他认为土拱效应是指当土体应力屈服时,其应力转移到旁边非屈服的区域。L. R. Handy^[10]和 K. H. Paik^[12]认为土拱效应是指墙后土体主应力旋转的一种现象。

经典的朗肯与库仑理论也不能用于求解有限填土情况下的挡土墙土压力,因为此时与其无限填土的假定已经不符。所谓有限填土,就是指挡土墙后填土是有限的,即挡土墙后存在建筑地下室外墙等结构物。目前,在求解此类挡土