

深基坑双排桩支护结构设计理论与应用

聂庆科 梁金国 韩立君 白冰○著

SHENJIKENG
SHUANGPAIZHUANG ZHIHU JIEGOU
SHEJI LILUN YU YINGYONG

中国建筑工业出版社

深基坑双排桩支护结构 设计理论与应用

聂庆科 梁金国 著
韩立君 白 冰



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

深基坑双排桩支护结构设计理论与应用/聂庆科等著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2008
ISBN 978-7-112-10025-5

I. 深… II. 聂… III. 深基础-结构设计 IV. TU473.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 048867 号

深基坑双排桩支护结构设计理论与应用

聂庆科 梁金国 著
韩立君 白 冰

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13¼ 字数: 330 千字
2008 年 5 月第一版 2008 年 5 月第一次印刷
印数: 1—3000 册 定价: 30.00 元
ISBN 978-7-112-10025-5
(16828)

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)

本书通过对现场监测资料分析、室内试验、理论模型建立和数值模拟,研究了深基坑双排桩支护结构体系的变形和土压力分布规律,提出了考虑空间效应的双排桩支护结构体系设计计算理论。利用所建立的设计理论,编制了便于工程设计的应用软件。同时,还研制了可用于深基坑工程监测信息分析的深基坑监测信息分析处理系统。

全书共分7章,具体内容如下:深基坑工程和双排桩支护结构的研究现状、深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究、开挖卸荷条件下粉质黏土变形性状研究、双排桩支护结构的设计计算理论、双排桩支护结构设计计算机软件研制、深基坑开挖过程中双排桩支护的三维数值模拟分析、深基坑监测信息处理系统研制,最后本书还给出双排桩支护结构设计软件部分源程序。

本书可供从事深基坑工程的设计、施工及科研人员和高等学校有关专业师生参考。

* * *

责任编辑:王 梅 咸大庆

责任设计:董建平

责任校对:孟 楠 兰曼利

前 言

双排桩支护结构是近年来发展起来的一种受到普遍欢迎的深基坑支护技术,已在很多工程中获得成功应用。我国许多学者在该领域已进行了大量探索。但总体看来,由于问题的复杂性,关于它的受力机理和设计理论尚不十分成熟。为此,作者结合近年来从事深基坑双排桩支护结构的工程实践,对深基坑双排桩支护结构的设计理论进行了深入研究。

本书主要通过对现场监测资料分析、室内试验、理论模型建立和数值模拟,研究了深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力分布规律,提出了考虑空间效应的双排桩支护结构设计计算理论。利用所建立的设计理论,编制了便于工程设计的应用软件。同时结合工程监测,研制了可用于工程监测分析的深基坑监测信息处理系统,为深基坑工程的信息化施工提供了基础。

全书共分7章,具体内容如下:第1章主要对目前深基坑工程和双排桩支护结构的研究现状进行概括和总结;第2章主要根据现场监测资料,研究了深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力问题。在对现场变形和土压力等监测结果进行分析的基础上,通过理论分析建立了合理的土压力计算方法;第3章针对一种典型的粉质黏土进行了室内卸荷试验研究,其中考虑了土性条件和复杂应力路径的影响,给出了基于考虑开挖卸荷效应的复杂应力路径条件下的应力-应变关系的数学表达式,并得出变形模量的确定方法,从而为基坑开挖和支护设计理论的发展提供依据;第4章建立了一个完善的双排桩支护结构设计计算模型,该模型可给出双排桩支护结构的受力和变形计算方法,并对双排桩支护结构进行抗倾覆稳定验算和整体稳定验算,最后根据规范给出桩身的配筋布置和安全系数;第5章利用前面一章的理论成果,编制了便于工程应用的设计软件,该设计软件考虑了空间效应,能计算基坑某一长度范围内每根桩的冠梁刚度系数、冠梁的弯矩、位移分布,可计算任意开挖深度情况下桩身的内力和位移,能考虑前排桩、后排桩的长度不同等多种情况;第6章利用FLAC3D大型有限差分计算程序,建立了考虑空间效应的三维数值模型,以此来模拟深基坑双排桩的开挖和支护过程,进而分析开挖过程中土体位移场和应力场的变化;第7章介绍了所研制的深基坑监测信息处理系统的原理和基本框架,并以某双排桩深基坑工程的深层位移和钢筋内力的处理为例来说明深基坑工程监测信息处理系统的应用;本书最后附录给出了双排桩支护结构设计计算软件源程序,可供读者参考。

本书由河北建设勘察研究院有限公司聂庆科教授级高工、梁金国教授级高工、韩立君教授级高工和北京交通大学白冰教授合著,聂庆科和白冰负责统一全稿。河北建设勘察研究院有限公司的王炜教授级高工、胡建敏高级工程师、王英辉高级工程师、李华伟高级工程师、王国辉高级工程师、吴立春高级工程师、祈建勇工程师、赵钢工程师和北京交通大学吴刚硕士参加了本书的部分研究工作。

本书部分内容承蒙铁道科学研究院周镜院士、武汉大学刘祖德教授、清华大学李广信教授、机械工业勘察设计研究院张苏民勘察大师、建设综合勘察研究设计院顾宝和勘察大师于百忙之中认真审阅原稿，并提出了不少宝贵意见和建议，作者在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到河北省建设厅立项课题“深基坑双排桩支护结构设计理论与应用研究”的资助，也得到河北省建设厅领导的大力支持，在此一并表示诚挚的谢意。

作者

2008年5月

目 录

第 1 章	深基坑工程和双排桩支护结构的研究现状	1
1.1	引言	1
1.2	双排桩支护结构概述	2
1.3	双排桩支护结构研究现状	3
1.4	深基坑工程的信息监测	11
第 2 章	深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究	15
2.1	引言	15
2.2	工程概况	15
2.3	现场监测	16
2.4	土压力影响因素分析	21
第 3 章	开挖卸荷条件下粉质黏土变形性状研究	23
3.1	引言	23
3.2	基坑开挖卸荷的典型应力路径	23
3.3	试验方案和试验说明	24
3.4	试验结果与分析	25
3.5	本章小结	29
第 4 章	双排桩支护结构设计计算理论	31
4.1	引言	31
4.2	土压力的空间效应	31
4.3	冠梁的变形协调作用	31
4.4	沿桩身的土压力分布	34
4.5	双排桩位移和内力计算模型	36
4.6	配筋计算原理	38
4.7	稳定分析原理	41
4.8	本章小结	42
第 5 章	双排桩支护结构设计软件研制	43
5.1	软件的主要功能	43
5.2	程序的开发环境和基本框架	43

5.3	计算程序编制	43
5.4	系统安装和操作说明	54
5.5	程序应用过程演示	57
5.6	工程实例分析	63
5.7	本章小结	65
第 6 章	深基坑双排桩支护结构的三维数值分析	66
6.1	引言	66
6.2	基本原理	66
6.3	河北邯郸某双排桩支护结构深基坑开挖过程模拟	67
6.4	双排桩支护结构影响因素分析	76
6.5	邯郸市电信二枢纽楼深基坑工程的数值计算	82
6.6	本章小结	106
第 7 章	深基坑工程监测信息分析处理系统研制	108
7.1	引言	108
7.2	系统的主要功能	108
7.3	系统的开发环境	109
7.4	系统的开发过程	110
7.5	系统操作说明	114
7.6	本章小结	121
参考文献		122
附录	双排桩支护结构设计软件源程序代码	125
附录 1	基本说明	125
附录 2	用户界面源程序	125
附录 3	计算源程序	169
附录 4	配筋分析源程序	200
附录 5	稳定分析源程序	201

第 1 章 深基坑工程和双排桩 支护结构的研究现状

1.1 引言

深基坑工程是指在地表以下开挖的一个地下空间及其配套的支护体系。深基坑支护就是为了保证基坑开挖、基础施工的顺利进行及基坑周边环境的安全,对基坑侧壁及周边环境采用的支挡、加固与保护措施。深基坑工程研究的主要内容包括:深基坑支护体系的强度和变形控制、基坑坑底和支护结构后土体的安全和变形控制、周围建(构)筑物的安全和变形控制、相关地面地下管线的安全和变形控制、地下水的降水止水措施等。

深基坑工程的发展往往是一种新的支护形式的出现带动新的分析方法的产生。早期的基坑由于深度较浅常采用放坡开挖的方式。后来随着基坑深度的增加,放坡面空间受到了限制,产生了支护开挖。迄今为止,支护形式已发展到数十种,从基坑支护机理来讲,基坑支护方法的发展最早有放坡开挖,然后有悬臂支护、拉锚支护、组合型支护等。放坡开挖需要较大的工作面,且开挖土方量较大,但由于开挖方便且经济,在条件允许的情况下,至今仍然不失为基坑开挖的好方法;悬臂支护是指不带内撑或拉锚的支护结构,可以通过设置钢板桩或钢筋混凝土桩形成支护结构;进而为了充分利用支护结构材料的潜在能力,使支护结构形式更加合理,并能适合各种基坑形式,综合利用“空间效应”,发展了组合型支护结构形式^[15]。

基坑支护体系一般包括两部分:挡土体系和止水降水体系。基坑支护结构一般要承受土压力和水压力,起到挡土和挡水的作用,一般是支护结构和止水帷幕共同形成止水体系。但尚有两种情况,一种是止水帷幕自成止水体系,另一种是支护结构本身也起到止水帷幕的作用。支护结构形式主要分为以下几种类型:

(1) 放坡开挖

放坡开挖是选择合理的基坑边坡角度,以保证在开挖过程中边坡的稳定性。边坡稳定性包括坡面的自立性和边坡的整体稳定性。放坡开挖一般适用于地基土质较好、开挖深度不深、以及施工现场有足够放坡区域的工程。

(2) 悬臂式支护结构

悬臂式支护结构主要依靠结构足够的入土深度和结构的抗弯能力来保证基坑的整体稳定和结构的安全,悬臂式支护结构常采用钢筋混凝土排桩墙、木板墙、钢板桩、钢筋混凝土板桩、地下连续墙等形式。适用于开挖深度较浅的基坑工程。

(3) 水泥土重力式挡土墙支护结构

水泥土重力式挡土墙主要依靠水泥和土混合后具有足够的重量和一定的强度而达到支护周围土体的目的。在工程中用的较多的水泥土重力式挡土墙支护结构,常采用深层搅拌

法,有时也采用高压喷射注浆法形成。深层搅拌水泥土桩重力式挡土墙支护结构常用于软黏土地区,开挖深度一般不超过6.0m的基坑工程。采用高压喷射注浆法施工可以在砂类土地基中形成水泥土挡墙。

(4) 内撑式支护结构

内撑式支护结构由支护结构体系和内撑体系两部分组成。支护结构体系常采用钢筋混凝土排桩或地下连续墙形式。内支撑可以分为水平支撑和斜支撑。适用范围较广,可适用各种土层和基坑深度。

(5) 拉锚式支护结构

拉锚式支护结构由支护结构体系和拉锚体系两部分组成。支护结构同内撑式支护结构一样,常采用钢筋混凝土排桩或地下连续墙两种。拉锚体系可分为锚杆式和地面拉锚式两种。锚杆式需要地基土能提供锚杆较大的锚固力,适用于砂土地基或黏土地基,很少使用于软黏土地基。地面拉锚式需要有足够的场地设置锚桩,或其他锚固物。

(6) 土钉墙支护结构

土钉一般通过钻孔、插筋和注浆来设置。边开挖基坑,边在土坡中设置土钉,在坡面上铺设钢筋网,并通过喷射混凝土面层,形成土钉墙支护结构。其机理可以理解为通过在基坑边坡中设置土钉,形成加筋土重力式挡土墙起到挡土作用。

(7) 双排桩支护结构

在工程中常用钢筋混凝土灌注桩、冠梁或连系梁形成空间门架式的支护结构,双排桩支护结构一般属悬臂型,但其支护深度比单排桩悬臂式支护结构要深。

(8) 拱式组合型

由钢筋混凝土桩同深层搅拌桩形成的水泥土拱组合形成的支护结构,这种支护结构有效利用了拱的受力特性以及水泥土抗压强度较大,抗拉强度小的特性。

(9) 喷锚支护结构

喷锚网支护结构是由锚杆、钢筋网、喷射混凝土面层与边坡土体组成。结构形式与土钉墙类似。

(10) 加筋水泥土挡墙支护结构

由于水泥土抗拉强度低,水泥土重力式挡土墙支护结构支护深度小,为了克服这一缺点,在水泥土中插入型钢,形成加筋水泥土挡土墙支护结构。在重力式支护结构中,为了提高深层搅拌桩水泥土墙的抗拉强度,常在其中加入毛竹或钢筋。

(11) 沉井支护结构

采用沉井结构形成支护体系,常用于支护面积不大的基坑工程。

1.2 双排桩支护结构概述

双排桩支护结构是指在地基土中设置两排平行桩,前后两排桩桩体呈矩形或梅花形布置,在两排桩桩顶用刚性冠梁将两排桩连接,沿坑壁平行方向,形成门字形空间结构,这种结构具有较大的侧向刚度,可以有效的限制基坑的变形。一般情况下,两排支护桩呈悬臂式。但与单排悬臂桩支护结构相比,双排桩支护结构有很多优点:

(1) 单排悬臂桩支护结构完全依靠嵌入坑底土内的足够深度来承受桩后的侧压力并维

持其稳定性,坑顶位移和桩身本身变形较大。双排桩支护结构因由刚性冠梁与前后排桩组成一个空间超静定结构,整体刚度很大,加上前后排桩形成与侧压力反向作用的力偶的原因,使双排桩支护结构的位移明显减小,同时桩身的内力也有所下降,可以支护比单排桩更深的基坑而不需要设置内支撑,可以用较小桩径的桩代替单排桩中较大直径的桩,降低成本。

(2) 双排桩支护结构为超静定结构,在复杂多变的外荷载作用下能自动调整结构本身的内力,使之适应复杂而又往往难以预计的荷载条件,而单排悬臂桩为一静定结构(多数是弹性支承悬臂结构)则不具备此种功能。

(3) 双排桩支护结构与拉锚结构相比,它无需太多的场地,占据场地少,对环境的要求比较低,在密集建筑区更具优势。

(4) 在同样采用锚杆(或支撑)的情况下,锚杆(支撑)双排桩比锚杆(支撑)单排桩要经济得多,因为前者支护深度更大,所用支护桩的直径更小。

(5) 双排钢板桩支护结构和用水泥土充填或用水泥土搅拌桩加固的双排钢筋混凝土桩结构,均具有防渗功能,可用于围堰、防波堤和码头的建设中。另外水泥土充填的双排钢板桩具有双重防渗的能力,在对防渗有严格要求的建筑物中有广泛应用前景。

虽然双排桩支护结构有很多优点,但在目前还有一些问题值得深入研究:①作用在前后桩体上的土压力的计算问题;②双排桩的排距、桩径、桩长和桩间土的刚度对支护结构稳定性的影响问题。

1.3 双排桩支护结构研究现状

在计算分析双排桩支护结构时,首先要确定土压力在前后排桩的分布情况和桩顶端的连接和底端的嵌固情况;其次就要分析桩间土对前后排桩的作用,土体滑裂面对土压力分布状况的影响、冠梁的空间协调作用以及桩土之间的相互作用等因素。许多学者对此开展了大量研究,也建立了多种计算模型。分析这些计算模型,主要分为三类:一类是基于经典土压力理论确定的计算模型;一类是基于 Winkle 假定的计算模型;一类是基于土拱理论建立的计算模型。

1.3.1 基于经典土压力的计算方法

张弥(1993)利用经验系数和极限土压力来确定作用在桩体上的土压力,考虑了两排桩的整体及其对土体的约束作用,近似地将桩间土视为受侧向约束的无限长弹性土体,同时考虑到双排桩顶部冠梁的作用,可认为深度 z 处相对于水平位移而引起的横向应变为零,故作用于前排桩桩背的土压力为

$$\sigma_1 = \mu \gamma z / (1 - \mu) \quad (1-1)$$

作用于前排桩前的侧向抗力 e_1 介于静止土压力与被动土压力之间,为计算方便,通常对被动土压力予以折减,即

$$e'_1 = K_1 e_p = K_1 (\gamma z K_p + 2c\sqrt{K_p}) \quad (1-2)$$

式中 K_1 ——被动土压力折减系数,它是关于桩土变形的参数,一般取 0.5~0.7。

作用于后排桩的侧向抗力按式(1-1)考虑,桩背土压力的大小取决于桩的侧向位移。

由于双排桩的刚度较大,因此假定后排桩土位移仍处在弹性范围内,即桩背侧向土压力 σ_e 介于静止土压力与主动土压力之间,即

$$\sigma_e = K_2 e_a = K_2 (\gamma z K_a - 2c\sqrt{K_a}) \quad (1-3)$$

式中 K_2 ——侧向主动土压力修正系数,一般取 1.1~1.2。

根据上述确定的土压力提出了如图 1-1 所示的计算模型。前排桩的计算按单锚板桩来考虑,在计算桩最小入土深度时,可按两端简支的板桩计算,上下两个简支点为桩顶和桩端,支点的反力可以由静力平衡求得,进而可求得最大弯矩及其作用点位置。后排桩的桩长可通过对桩抗倾覆验算求得,后排桩的桩前侧向抗力合力及桩背弹性土压力合力可由式 (1-2) 和式 (1-3) 求得,从而可求得最大弯矩及其作用点。

该方法为早期设计双排桩时采用的方法,在计算上比较简单,但其假定与实际工程有一定出入,表现在与土压力反向的桩顶力偶作用不能考虑,且通过此假定的计算结果并不能反映双排桩支护结构体系作为超静定结构在多变外力情况下对内力的自动调节作用,加之文中提出的经验系数具有较大的地域性,因此现阶段设计时已较少采用,但当前后排桩排距较大,连系梁与前后排桩连接刚度较小时,运用此法的计算模型还是可行的。

何颐华等 (1996) 根据双排桩前后排桩之间的滑动土体占桩后滑动土体总量的体积比例来确定前后排桩所受的侧土压力。

基坑开挖后,假定前排桩土压力合力为 E_{af} 及 E_{pf} , 后排桩土压力合力为 E_{ab} 和 E_{pb} (图 1-2), 可根据双排桩的排列情况的不同、土压力传递不同而求得。

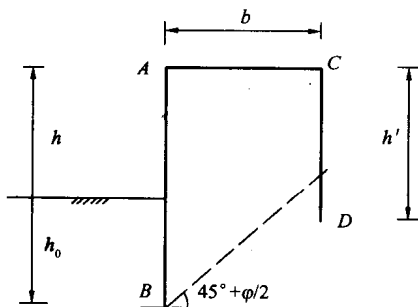


图 1-1 双排桩支护结构计算模型

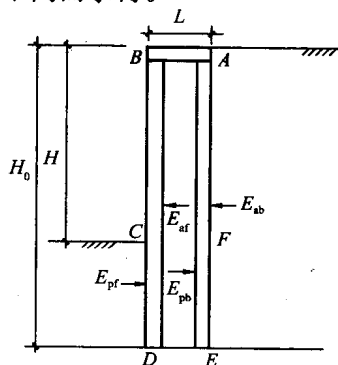


图 1-2 双排桩支护结构土压力简图

通常双排桩分为三角形排列和矩形排列,如图 1-3 所示,三角形排列主动土压力的确定方式为

后排桩

$$p_{ab} = \sigma_a - \Delta\sigma_a \quad (1-4)$$

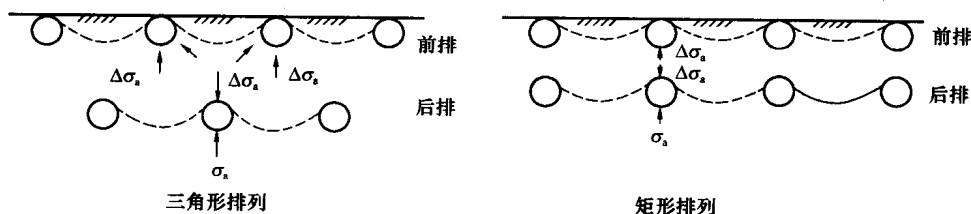


图 1-3 双排桩支护结构土压力的传递

前排桩
$$p_{af} = \sigma_a + \Delta\sigma_a \quad (1-5)$$

若假定不同深度下 $\Delta\sigma_a$ 与 σ_a 的比值相同, 即 $\alpha = \Delta\sigma_a / \sigma_a$, 则

$$p_{ab} = (1 - \alpha)\sigma_a \quad (1-6)$$

$$p_{af} = (1 + \alpha)\sigma_a$$

其中, $\alpha = 2L/L_0 - (L/L_0)^2$, 可按后排桩靠基坑侧滑动土体占整个滑动土体的体积比例确定。同样可以确定被动土压力的取值为

$$p_{pb} = (1 - \alpha)\sigma_p \quad (1-7)$$

$$p_{ap} = (1 + \alpha)\sigma_p \quad (1-8)$$

矩形排列的主动土压力的确定方式为

$$p_{ab} = (1 - \alpha)\sigma_a \quad (1-9)$$

$$p_{af} = \alpha\sigma_a \quad (1-10)$$

被动土压力计算公式与式 (1-9) 和式 (1-10) 类似。

计算假定:

(1) 将冠梁看作是一个底部嵌固, 顶部为直角刚接点的刚架结构。

(2) 由于冠梁与桩长相比很小, 且实际工程采用的冠梁刚度较大, 所以可将冠梁看作是只能平移而不产生转角。

(3) 由于冠梁为刚体, 不产生压缩或拉伸变形, 因此前后排桩顶的位移相同。

土压力 E_{af} 、 E_{pf} 、 E_{ab} 和 E_{pb} 已经求出。由基本假定, 将双排桩看作是一个底端嵌固顶端刚接的刚架, 这样就可以用结构力学计算刚架的方法将前后排桩的弯矩分布及挠度求出。

这种计算模型相对计算简单, 概念比较明确, 是现阶段被较多的设计者所采用的方法之一。但前后排桩的土压力尤其是被动土压力分配过于悬殊, 对桩长和最大弯矩的确定均产生较大的影响。

黄强 (1995) 认为, 后排桩的存在改变了土体滑裂面的形态, 因而土压力的分布情况与无后排桩的情况是不同的, 双排桩支护结构受力情况如图 1-4 所示。

根据极限平衡理论每米土体的总重为

$$W = \gamma b (z - 0.5b \tan \eta) \quad (1-11)$$

主动土压力的合力为

$$E_a = \gamma b (z - 0.5b \tan \eta) \tan(\eta - \varphi) \quad (1-12)$$

主动土压力分布强度为

$$e_a = dE_a/dz \quad (1-13)$$

考虑到后排桩的存在改变了后排桩的剪切破坏面, 由极限平衡理论: $dE_a/d\eta = 0$ 得到

$$z/b = 0.5 [\tan \eta + \tan(\eta - \varphi) \cos^2(\eta - \varphi) / \cos^2 \eta] \quad (1-14)$$

为了近似地考虑后排桩桩间距的影响, 假定前后排桩的作用土压力之和为朗肯主动土

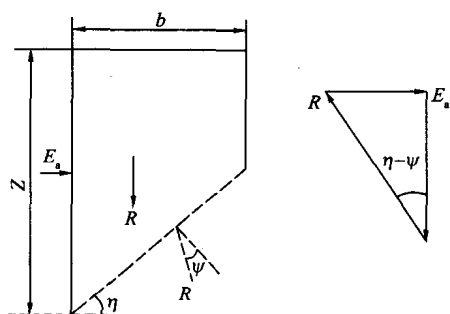


图 1-4 双排桩支护结构排间土体受力分析

压力,以参数 β_1 、 β_2 考虑非连续布桩的影响。

令

$$i_e = e_a / e_{a朗} \quad (1-15)$$

$$i_E = E_a / E_{a朗} \quad (1-16)$$

$$e_{a前} = \beta_1 i_e e_{a朗} \quad (1-17)$$

$$e_{a后} = \beta_2 (1 - i_e) e_{a朗} \quad (1-18)$$

$$e_{p前} = i_{E前} e_{p朗} \quad (1-19)$$

$$e_{p后} = i_{E后} e_{p朗} \quad (1-19)$$

式中 i_e ——主动土压力强度影响系数;

i_E ——主动土压力影响系数;

e_a ——主动土压力强度;

E_a ——主动土压力合力;

$e_{a朗}$ ——朗肯主动土压力强度;

$E_{a朗}$ ——朗肯主动土压力合力;

$e_{a前}$ ——前排桩土压力分布;

$e_{a后}$ ——后排桩土压力分布;

$e_{p前}$ ——前排桩被动土压力分配系数;

$e_{p后}$ ——后排桩被动土压力分配系数;

$e_{p朗}$ ——朗肯被动土压力强度;

$i_{E前}$ ——前排桩主动土压力影响系数;

$i_{E后}$ ——后排桩主动土压力影响系数。

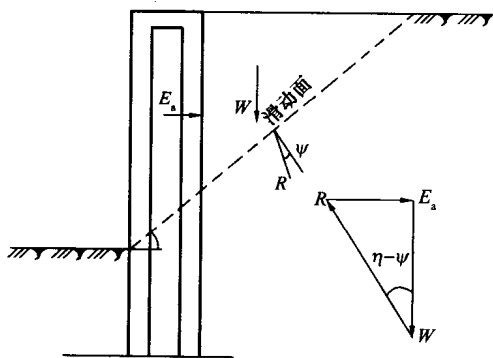


图 1-5 双排桩支护结构土体受力分析

该计算方法考虑了后排桩的存在对土体滑裂面的影响,但该模型认为双排桩所受土压力是以桩间土压力为主,故从桩间土受力分析破裂面夹角可推出当深宽比越大,即排间距越小时,破裂角越大,当 $b \rightarrow 0$ 时,破裂角趋近于 90° ,这与单排桩的实际破裂面不相符合,另外,由于滑裂面的变化, $e_{a朗} = e_{a前} + e_{a后}$ 并不成立。

程知言(2003)认为,双排桩桩间土体对支护作用较小,土压力以后排桩所受土压力为主。将双排桩视为水平受力的刚架,认为后排桩的存

在改变了土体的剪切破裂角,此时的滑裂角不再是 $45^\circ + \varphi/2$ (图 1-5),而是一个变数,是深宽比 $\xi (\xi = z/b)$ 和土体内摩擦角 φ 的函数,将桩后土体作为独立的刚塑性体进行分析。

由极限平衡理论得到

$$\xi^2 (\cot \eta / \cos^2 (\eta - \varphi) - \tan (\eta - \varphi) / \sin^2 \eta) - 2\xi / \cos^2 (\eta - \varphi) + \tan (\eta - \varphi) / \cos^2 (\eta - \varphi) + \tan \eta / \cos^2 (\eta - \varphi) = 0 \quad (1-20)$$

$$e_a = dE_a / dz = 0.5 \gamma b^2 [(2\xi \cot \eta - \xi^2 / \sin^2 \eta) (d\eta / d\xi) - 2 + 1 / \cos^2 \eta (d\eta / d\xi) \tan (\eta - \varphi) + (\xi^2 \cot \eta - 2\xi + b^2 \tan \eta) 1 / \cos^2 (\eta - \varphi) d\eta / d\xi] \quad (1-21)$$

后排桩主动土压力计算为

$$e_{a后} = (1 - \alpha) e_a \quad (1-22)$$

α 为后排桩前后土体面积之比, $\alpha = (2bz\cot\eta - b^2)/(z\cot\eta - b)^2$ 。

前排桩主动土压力计算为

三角形布置

$$e_{a前} = (1 + \alpha)e_a \quad (1-23)$$

矩形布置

$$e_{a后} = (1 - \alpha)e_a \quad (1-24)$$

前后排桩的被动土压力均按朗肯土压力计算, 其中桩间土视为后排桩的被动荷载区。整个结构按受水平力的超静定刚架来计算前后排桩体的变形和弯矩。

熊巨华(1999)指出, 当前后排桩排距大于 8 倍桩径时, 按拉锚结构来计算, 当前后排桩排距在 3~8 倍桩径时, 按框架结构计算, 对于前后排桩排距小于 4 倍桩径和桩顶设置桁架式帽梁的这类双排桩支护结构, 根据抗弯刚度等效原理来计算, 进而提出了能运用弹性支点法(杆系有限单元法)的简化计算方法。工程实践中, 前后排桩之间往往设有水泥土搅拌桩, 既可以对前后排桩之间进行力的有效传递又能作为止水帷幕, 从而认为双排桩支护结构可以等效为由厚度分别为 h_1 、 h_2 、 h_3 的板组成的挡土体系(图 1-6)。

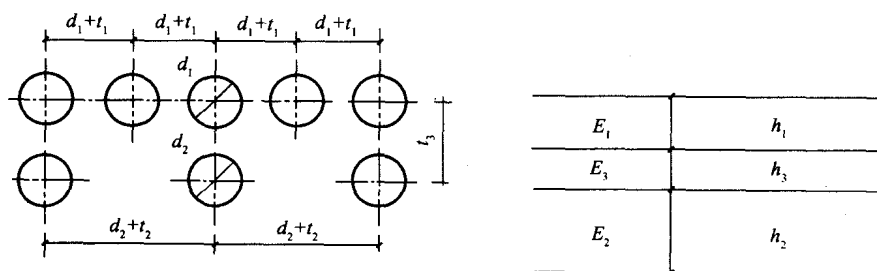


图 1-6 双排桩支护结构平面布置与简化图

其关系式为

$$h_1 = 0.838d_1\sqrt{d_1/(d_1 + t_1)} \quad (1-25)$$

$$h_2 = 0.838d_2\sqrt{d_2/(d_2 + t_2)} \quad (1-26)$$

$$h_3 = t_3 - d_1/2 - d_2/2 \quad (1-27)$$

其整体的抗弯刚度为

$$\begin{aligned} EI &= E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 \frac{h_3^3}{12} \\ &= E_1 \left[\frac{(2h_1 + h_3)^3 - h_3^3}{24} \right] + \left[\frac{(2h_2 + h_3)^3 - h_3^3}{24} \right] + E_3 \frac{h_3^3}{12} \end{aligned} \quad (1-28)$$

式中 EI ——整体刚度;

$E_1 I_1$ ——前排桩抗弯刚度;

$E_2 I_2$ ——后排桩抗弯刚度;

E_1 ——前排桩的弹性模量;

E_2 ——后排桩的弹性模量;

E_3 ——前后排桩中间加固土体的弹性模量。

然后, 根据所提出的等效刚度原则, 用弹性支点法的简化计算方法来进行计算, 如图 1-7 所示。

事实上, 按照经典土压力的计算思想, 桩体受到的土压力为极限状态下的土压力, 忽略了冠梁与桩体变形协调

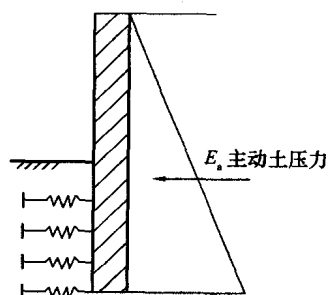


图 1-7 弹性支点法计算简图

的关系。这种情况只有在支护结构接近破坏时才可能发生,因此,不能用于分析工作状态下的情形。

1.3.2 基于 Winkle 假定的计算方法

刘钊(1992)提出了在目前的双排桩支护结构计算中认可度比较高的一种计算模型(图 1-8)。该模型采用 Winkler 假定的计算模型进行分析,考虑桩与土的共同作用,确定出前、后排桩在开挖面以上的土压力荷载及地基土的水平基床系数,按照弹性地基梁和结构力学分析的方法即可求出双排桩支护结构的内力。

假定后排桩桩背土压力为主动土压力,将基底以上部分的桩间土看作受侧向约束的无限长土体,应用弹性力学平面应变的物理方程,桩间土的侧压力为

$$p_1 = \mu \gamma y / (1 - \mu) \quad (1-29)$$

$$p_x = b_0 K_h x \quad (1-30)$$

式中 b_0 ——桩的计算宽度;

K_h ——地基水平基床系数;

x ——侧向位移。

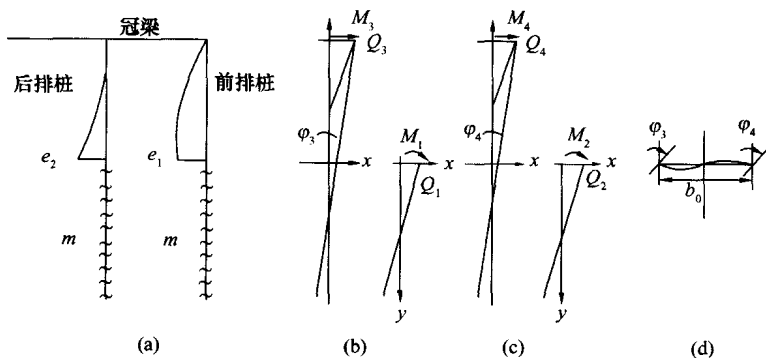


图 1-8 双排桩支护结构 Winkle 地基梁法计算模型

在计算支护结构内力时,将两排桩体分隔成前排、后排桩及冠梁三部分,分别建立前、后排桩桩侧向受荷下的微分方程,引入桩尖集中剪力和集中弯矩为零的边界条件,同时利用变形协调及内力关系,联合求解桩顶内力与位移,进而得到整个双排桩支护结构的内力和位移。上述模型比较复杂,为应用方便,一般工程采用先假设土压力按某种形式分布,然后假定开挖面下某一深度为固定端的计算方法。

此法在一定程度上考虑了支护结构与土体的相互作用的影响,用压缩刚度等效的土弹簧模拟地层对支护结构变形的约束,理论上比较合理。但是,采用上述模型时,由于在桩顶常出现桩与土体脱离的现象,因此,对桩顶位移的计算与实际情况偏差较大。

曹俊坚等(1999)假定:①双排桩为弹性体,满足力和位移的叠加原理,冠梁两端嵌固,桩顶只发生位移不发生转角;②桩侧土为 Winkler 离散弹簧,不考虑桩土之间的黏着力和摩阻力;③土的抗拉强度为 0;④地基水平抗力系数 $K(z)$ 随深度 z 线性增加;⑤土压力的空间效应影响范围 B 等于基坑深度,在影响范围内土压力呈抛物线分布。

在上述假定的基础上提出了如图 1-9 所示的计算图式。

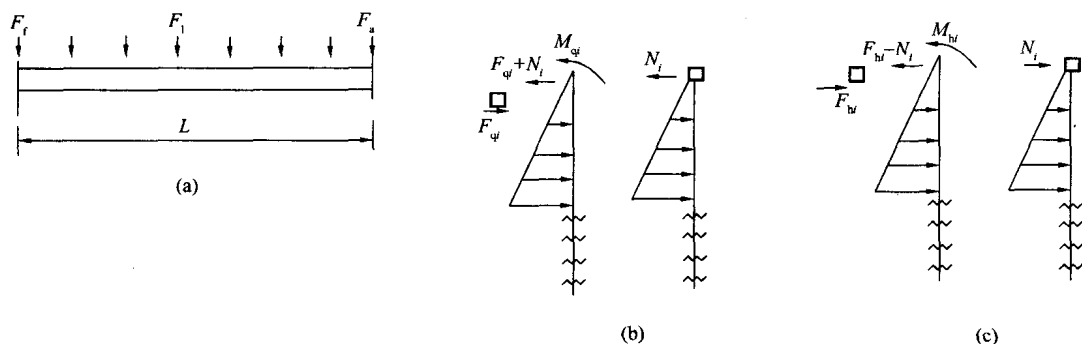


图 1-9 考虑冠梁空间作用的双排桩支护结构计算图
(a) 冠梁受力简图; (b) 前排桩计算简图; (c) 后排桩计算简图

前排第 i 根桩桩顶产生的位移和转角为

$$U_{qi} = U_{qi}(E_i, F_{qi}, M_{qi}, N_i) = U_{Ei} - \delta_{pF_{qi}}^U (F_{qi} + N_i) - \delta_{pM_{qi}}^U M_{qi} \quad (1-31)$$

$$\theta_{qi} = \theta_{qi}(E_i, F_{qi}, M_{qi}, N_i) = \theta_{Ei} - \delta_{pF_{qi}}^\theta (F_{qi} + N_i) - \delta_{pM_{qi}}^\theta M_{qi} \quad (1-32)$$

式中 E_i ——土压力;

F_{qi} ——冠梁对排桩的水平作用力;

M_{qi} ——弯矩;

N_i ——冠梁轴力;

U_{Ei} , θ_{Ei} ——土压力单独作用时桩顶产生的位移和转角。

再由变形协调性, 桩顶的位移与冠梁的位移相同, 桩顶的转角为 0, 得到方程为

$$U_{Ei} - \delta_{pF_{qi}}^U (F_{qi} + N_i) - \delta_{pM_{qi}}^U M_{qi} = \sum_{j=1}^n \delta_{BF_{ij}} F_{qj} \quad (1-33)$$

$$\theta_{Ei} - \delta_{pF_{qi}}^\theta (F_{qi} + N_i) - \delta_{pM_{qi}}^\theta M_{qi} = 0 \quad (1-34)$$

同理可以得到后排桩的协调方程为

$$U_{Ei} - \delta_{pF_{hi}}^U (F_{hi} + N_i) - \delta_{pM_{hi}}^U M_{hi} = \sum_{j=1}^n \delta_{BF_{ij}} F_{hj} \quad (1-35)$$

$$\theta_{Ei} - \delta_{pF_{hi}}^\theta (F_{hi} + N_i) - \delta_{pM_{hi}}^\theta M_{hi} = 0 \quad (1-36)$$

前后排桩桩顶位移相同, 得到

$$\sum_{j=1}^n \delta_{BF_{ij}} F_{qj} = \sum_{j=1}^n \delta_{BF_{ij}} F_{hj} \quad (1-37)$$

联立以上方程求解 $5n$ 个未知数, 从而可得到桩顶的弯矩和水平力, 再利用弹性地基梁有限元理论求解桩身变形和桩身弯矩。

平扬等 (2001) 提出了一种双排桩空间效应的反分析计算模型, 计算模型是建立在前排桩桩顶实测变形的基础上, 认为模型的误差主要来源于土压力位移的误差, 只对由土压力引起的位移进行修正。假定基坑的边长为 L , 共有 n 根桩, 在 $m=i+p$ 根桩上, 测得了桩顶水平位移为 U_{i+p}^s , 根据式 (1-31), 用实测位移 U_{i+p}^s 代替计算位移 $U_{q(i+p)}^s$ 来进行修正。同理根据式 (1-35) 用实测位移 U_{i+p}^s 代替计算位移 $U_{h(i+p)}^s$ 从而得到

$$U_{Em} = \delta_{pF_{qm}}^U (F_{qm} + N_m) + \delta_{pM_{qm}}^U M_{qm} + U_m^s \quad (1-38)$$

$$U_{Em} = \delta_{pF_{hm}}^U (F_{hm} + N_m) + \delta_{pM_{hm}}^U M_{hm} + U_m^s \quad (1-39)$$