

摘 要

本文归纳整理了现有双排桩支护结构体系的研究成果，并着重介绍了双排桩支护结构体系在目前工程设计中常用的几种计算方法；在此基础上对支护结构计算模型作了一些改进，给出了双排桩支护结构体系中前后排桩在不同桩位布置时所受的土压力表达式，提出了修正的计算模型；用大型数学计算软件 Matlab 对双排桩支护结构进行计算，并将结果同模型试验的结果作了对比，验证了所提计算方法的合理性。

对双排桩支护结构体系进行了模型试验研究，试验中模拟了基坑开挖过程，对双排桩桩身内力和桩顶水平位移作了量测。试验结果为支护结构的分析和计算模型的验证提供了可供参考和比较的数据。

提出了一系列双排桩结构的计算方案，探讨了诸多因素如桩排距、桩嵌固深度等对结构体系工作性能的影响。从计算结果的对比中，总结了双排桩支护结构体系的一些工作规律，得出对工程实践和理论研究有一定参考价值的建议。

主要得出了以下几点结论：1. 在相同总桩数条件下，双排桩桩身所受最大弯矩值要比单排悬臂桩桩身所受最大弯矩小得多，并且分布较均匀；2. 适当减小后排桩桩长时，后排桩桩身弯矩分布变化较大，但对整体支护效果并不产生较大的影响；3. 排距对支护效果影响颇大，当排距为 $2d \sim 4d$ 时，双排桩结构本身有着良好的调整桩身弯矩的作用；排距增大到 $6d$ 时双排桩支护效果接近于顶部支撑桩。

关键词 双排桩；土压力；排距；嵌固深度；支撑桩

Abstract

In this thesis the known work about retaining and protecting structure with double-row piles is summarized, and the several common calculation methods about it at present are emphasisedly introduced. On the basis of that, the calculation model about retaining and protecting structure with double-row piles is improved, and the earth pressure which the fore-pile and the rear-pile bear in different arrangements is given separately, so is the modified calculation model. Then the internal force of the pile body is calculated with large-scale mathematical calculation programme Matlab. According to the comparison between the calculation results and that of the model test, the modified calculation model proves to be reasonable.

The whole process of the model test for the retaining and protecting structure with double-row piles is also formulated. According to the model test, the excavation process of the foundation is simulated, and the internal force of the pile body and the horizontal displacement on the top of the piles are measured, which provides a series of data for the analysis of the structure and the verification of the given calculation model of the retaining and protecting structure.

According to the series of the calculation schemes which take into account many factors, such as the distance between the two rows and the embedded depth of the double-row piles, the influences on the working behavior of the retaining and protecting structure with double-row piles are studied as well. By the contrast of the calculation results, the working mechanism of the retaining and protecting structure with double-row piles is summarized and some valuable conclusions are gotten which can do some use to the engineering practice and theory research.

The main conclusions of this thesis are the following: 1. On the condition of the same number of piles, the maximum of the bending moment of the double-row piles is much less than that of the cantilever pile and the distribution of the former is more even than the latter; 2. Greater changes take place in the bending moment diagram of the rear-pile body when the length of the rear-pile decreases, yet the changes have little effect on the whole retaining and protecting structure; 3. The

change of the distance between the two rows has big effect on the whole structure. When it is in 2~4 times of the diameter of the pile, the structure itself can adjust the bending moment of the pile body very well. Yet when it increases to 6 times, the retaining and protecting effect of the structure is closely to that of the sustaining pile on the top.

Key words: double-row piles; earth pressure; distance between two rows;
embedded depth; sustaining pile;

第 1 章 绪 论

1.1 深基坑支护技术的应用与发展

基坑工程是一个古老而又具有时代特征的岩土工程课题,同时也是一个综合性的岩土工程难题。它涉及土力学中典型的强度、变形与稳定问题以及土与支护结构之间的共同作用。事实上,正是由于人类建筑频繁活动促进了基坑工程的发展,随着大量高层、超高层建筑以及地下工程不断涌现,支护结构难度越来越大,对基坑工程的要求越来越高,随之出现的问题也越来越多,迫使工程技术人员从新的角度去审视基坑工程这一古老课题,从而出现了许多新的经验、理论和研究方法并逐渐发展成熟,一门新的学科—基坑工程学就应运而生。

二战后的 20 多年间,欧美地区的发达国家在重建家园的需要和工业化进程的推动下,为兴建高层和超高层大厦,修建城市地铁而出现了大量的基坑工程,基坑支护技术的研究随之开展起来。对深基坑工程中的岩土工程问题最早提出分析方法的是 Terzaghi 和 Peck 等人,他们早在 20 世纪 40 年代就提出了预估挖方稳定程度和支撑荷载大小的总应力法。这以后,世界各国的许多学者都投入了研究,并不断地在这一领域取得丰硕的成果。20 世纪 50 年代, Bjerrum 和 Eide 给出了分析基坑坑底隆起的方法。20 世纪 60 年代开始在奥斯陆和墨西哥城的软粘土深基坑工程中使用仪器进行监测,对提高预测的准确性起到了促进作用,并从上世纪 70 年代起,产生了相应的指导开挖的法规^[1]。

基坑工程在我国进行广泛的研究始于实行改革开放的 20 世纪 80 年代初,随着城市建设投资的加大,高层建筑不断涌现,基础埋深不断增加,基坑开挖深度不断加大,特别是到了 20 世纪 90 年代,大多数城市都进入大规模的旧城改造阶段,在繁华的城区内进行深基坑开挖给这一古老课题注入了新的内容,并提出了新的挑战,那就是如何控制深坑开挖的环境效应问题,因而进一步促进了深基坑开挖技术的研究与发展,产生了许多先进的设计计算方法,众多新的施工工艺也不断付诸实施,出现了许多技术先进的成功工程实例。

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,并遵循实践、认识、再实践、再认识的规律,从而逐步走向成熟。早期的开挖常采用放坡开挖的形式,后来随着开挖深度的增加,放坡面空间受到限制,产生了支护开挖。迄今为止,支护型式已经发展至数十种。从基坑支护工作机理来讲,基坑支护方法的发展在放坡开挖后,有悬臂支护、内支撑(或拉锚)支护、组合型支护等。放坡开挖需要场地有较大的空间,且开挖土方量较大,在场地周围条件允许的情况下,放坡开挖至今仍然不失为基坑支护的好方法;悬臂支护是指不带内支撑或拉锚的支护结构,而是通过设置钢板桩或钢筋混凝土桩形成支护结构。另外,悬臂支护结构也可以通过对基坑周围土体进行加固改良形成;为了改善悬臂式支护结构的受力性能和变形特性,满足较深基坑支挡土体的要求,发展了内撑式支护和拉锚式支护结构;为了挖掘支护结构材料的潜在能力,使支护结构型式更加合理,并能适合各种基坑型式,综合利用“空间效应”,发展了组合型支护结构型式。

1.2 深基坑工程的主要特点及存在的主要问题

基坑是建筑工程的一部分,其发展与建筑业的发展密切相关,而深基坑是充分利用土地资源的方式之一。随着城镇建设中高层及超高层建筑的大量涌现,深基坑工程越来越多。同时,密集的建筑物、大深度的基坑周围复杂的地下设施,使得放坡开挖这一传统技术不再能满足现代城镇建设的需要,因此,深基坑开挖与支护问题引起了土建及环保部门的广泛重视。

尤其是 20 世纪 90 年代以来,基坑开挖与支护问题已经和正在成为我国建筑工程界的热点问题之一。基坑工程数量增多及规模急剧增大,同时所暴露的问题也很多。

1.2.1 深基坑开挖与支护状况特点

深基坑开挖与支护状况的主要特点是:

(1) 基坑越挖越深

现在在大城市、沿海城市,地下 3~4 层已很寻常,5~6 层也有,不少基坑深度已超过 10m,最深的甚至达到 30m 以上,如上海某基坑深度已达 32m^[2]。

(2) 基坑开挖面积越来越大

上海某基坑最大平面开挖尺寸已达 274m×187m,面积约为 51000m²。

(3) 基坑围护方法多

诸如挖孔灌注桩、预制桩、深层搅拌桩、地下连续墙、钢支撑、木支撑、砂袋堆撑、锚拉式支护、土层锚杆、注浆, 各种桩、板、墙、管、内撑同锚杆联合支护法, 以及土钉墙法等。

(4) 基坑工程具有很强的区域性和个性

区域性是基坑工程的又一特点。如软粘土地基、砂土地基、黄土地基等工程地质条件不同的地基中基坑工程差异性很大。同一城市不同区域也有差别。基坑工程的支护体系设计和施工不仅与工程地质和水文地质条件有关, 还与相邻建筑物、构筑物及市政地下管线的位置、重要性、抵御变形能力等有关。因此, 每一个基坑工程的设计都有其特点。

(5) 基坑工程的环境效应

基坑工程开挖势必引起周围地基中地下水位的变化和应力场的改变, 导致周围地基土体的变形, 对相邻建筑、构筑物及地下管线产生影响。大量土方运输也将对城市交通产生影响^[1]。因此, 对基坑工程的环境效应也应予以重视。

1.2.2 我国基坑开挖与支护存在的主要问题

我国基坑开挖与支护存在的主要问题有:

(1) 基坑工程设计质量低是发生事故的主要原因^[4,5]

由于设计人员的技术水平参差不齐, 参数取值、计算方法无章可循, 使一些工程设计缺陷多、隐患较大, 或盲目增加安全系数造成严重浪费。

(2) 施工工作混乱, 管理不力

基坑支护工程转手承包较为普遍, 少数施工单位不具备技术条件, 人力、物力等基本素质较差。现场管理混乱, 未做到信息化施工和动态化管理。

(3) 质量检验方面问题不少

基坑支护结构的质量检测、验收方法也无章可循, 没有针对基坑支护工程特点建立竣工验收的质量管理体系, 检测部门资质混乱。

(4) 忽视基坑工程对工程勘察的特殊要求

忽略对基坑环境地质的勘察, 对各种计算参数的试验方法及取值也缺乏或不符合现场实际情况。原位测试工作较少进行, 勘察深度和勘察点布置不符合基坑工程要求。

(5) 监理工作方面的问题

目前监理工作在人力、技术等方面还很不适应深基坑工程的特殊要求，应该把对基坑工程的监理作为整个建筑工程监理的重点之一。

1.3 深基坑典型支护结构特性和适用条件

1.3.1 基坑侧壁安全等级及重要性系数

在目前的基坑支护规程中，以结构重要性系数作为支护结构稳定性评价指标。支护体系一般为施工过程中临时构筑物，设计中不应盲目增大重要性系数，但适当安全储备还是必需的。重要性系数取 1.0，对一个工程不一定出问题；但宏观地看，对一个地区，工程事故数量就可能不少。从安全与经济两方面考虑，可以在采用较小的安全储备条件下，在施工过程中加强监测，并备有应急措施，保证在事故苗头出现时，采取措施，确保安全施工。重要性系数的选取见表 1-1^[7]。应该指出的是表中的重要性系数只是一个由确定的方法得到的一个定值，它未能考虑设计参数中任何内在的变异性，而实际上，安全系数是一个由设计因素的变异性决定的随机变量，应该用可靠度理论来更好地解决安全性问题。

表 1-1 基坑侧壁安全等级及重要性系数

安全等级	破坏后果	重要性系数
一级	支护结构破坏，土体失稳或过大变形对基坑周边环境及地下结构施工影响严重	1.10
二级	支护结构破坏，土体失稳或过大变形对基坑周边环境及地下结构施工影响一般	1.00
三级	支护结构破坏，土体失稳或过大变形对基坑周边环境及地下结构施工影响不严重	0.90

注：有特殊要求的建筑基坑侧壁安全等级可根据具体情况另行确定

1.3.2 典型支护结构选型

支护结构可根据基坑周边环境、开挖深度、工程地质与水文地质、施工作业准备和施工季节等条件，按表 1-2^[7]选用排桩、地下连续墙、水泥土墙、逆作拱墙、土钉墙、原状土放坡或采用表 1-2 中型式的组合。

表 1-2 支护结构选型表

结构型式	适用条件
排桩或地下连续墙	<ol style="list-style-type: none"> 1. 适于基坑侧壁安全等级一、二、三级 2. 悬臂式结构在软土场地中不宜大于 5m 3. 当地下水位高于基坑底面时, 宜采取降水、排桩加截水帷幕或地下连续墙
水泥土墙	<ol style="list-style-type: none"> 1. 基坑侧壁安全等级宜为二、三级 2. 水泥土桩施工范围内地基土承载力不宜大于 150kPa 3. 基坑深度不宜大于 6m
土钉墙	<ol style="list-style-type: none"> 1. 基坑侧壁安全等级宜为二、三级的非软土场地 2. 基坑深度不宜大于 12m 3. 当地下水位高于基坑底面时, 宜采取降水或截水措施
逆作拱墙	<ol style="list-style-type: none"> 1. 基坑侧壁安全等级宜为二、三级 2. 淤泥和淤泥质土场地不宜采用 3. 拱墙轴线的矢跨比不宜小于 1/8 4. 基坑深度不宜大于 12m 5. 当地下水位高于基坑底面时, 宜采取降水或截水措施
放坡	<ol style="list-style-type: none"> 1. 适于基坑侧壁安全等级宜为三级 2. 施工场地应满足放坡条件 3. 可独立或与上述其他结构结合使用 4. 当地下水位高于坡脚时, 宜采取降水措施

1.4 双排桩支护结构体系简介

悬臂桩支护结构是目前深基坑支护中最常见的一种支护结构。它是将钢筋混凝土灌注桩间隔排列而形成的一种挡土结构, 它完全依靠嵌入土内的部分所提供的抗力来平衡基坑侧壁对支护结构施加的土压力, 故嵌入深度是此种支护结构的关键。由于其施工简单, 在基坑深度不大时, 从经济性、工期、作业性方面分析为较好的支护结构类型, 因此, 在各地都得到了普遍应用。当采用这种结构时, 对于软土地区, 基坑深度一般不大于 5m; 对属于一般粘性土地区且地下水位较深的地区(东北、华北及西北的大部分地区), 基坑

深度一般不大于 10m；否则就很不经济^[9]。同时，由于桩顶水平位移以及结构本身变形较大，尤其是随着基坑开挖深度的不断增大，这个问题显得更为突出。目前，解决该问题的方法主要有对原来悬臂的桩墙加设内撑或锚拉，而双排桩支护结构也是有效的解决该问题的手段之一。

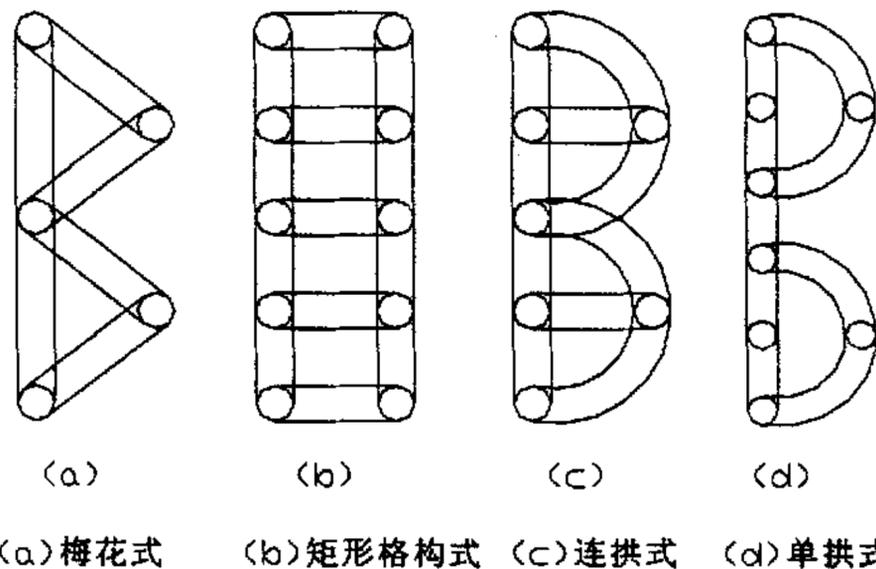
双排桩支护结构是一种空间组合类悬臂支护结构，近年来在深基坑、道路边坡工程中得到了广泛运用。双排桩支护结构是将密集的单排悬臂桩中的部分桩向后移，并在桩顶用刚性联系梁—盖梁把前后排连接起来，沿基坑长度方向形成双排支护的空间结构体系。它是在没有锚杆（或内支撑）的情况下，发挥空间组合桩的整体刚度和空间效应，并与桩间土协同工作，支挡因开挖引起的不平衡力，达到保持坑壁或坡体稳定、控制变形、满足施工和相邻环境安全的目的。

1.4.1 双排桩支护的布桩形式

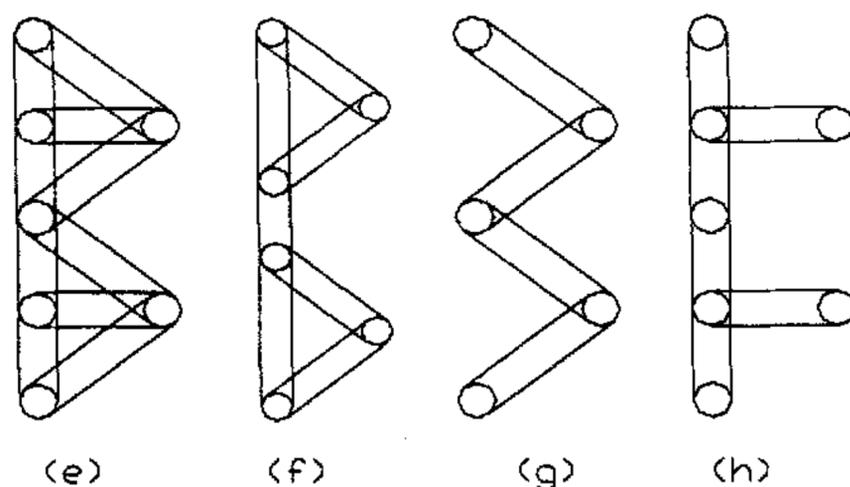
如前所述，双排桩支护结构可以理解为将密集的单排悬臂桩中的部分桩向后移而组合成的，因此，双排桩支护结构的布桩形式就非常灵活，常见的形式常见的有并列式（也有称矩形格构式）、梅花式，还有折线式、连拱式、双三角式、丁字式^[9]，这些可以看作是前两种形式的衍生式。其组合形式如图 1-1 所示。

1.4.2 双排桩支护结构的主要特点

双排桩支护结构体系的特点主要体现为：



(a)梅花式 (b)矩形格构式 (c)连拱式 (d)单拱式



(e)双三角式 (f)单三角式 (g)折线式 (h)丁字式

图 1-1 双排桩支护平面形式

- (1) 在双排桩支护结构中，前后排桩均分担主动土压力；但前排桩主要起分担土压力的作用，而后排桩兼起支挡和拉锚双重作用；
- (2) 双排桩支护结构形成空间格构，增强支护结构自身稳定性和整体刚度；
- (3) 充分利用桩土共同作用效应，改变土体侧压力分布，增强支护效果。

1.4.3 双排桩支护结构的优缺点

与单排悬臂桩支护相比，双排桩支护结构具有以下优点^[15]：

(1) 单排悬臂桩完全依靠弹性嵌入基坑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。悬臂式双排桩支护因由刚性连系梁与前后排桩组成一个空间超静定结构，整体刚度大；加上前后排桩形成与侧压力反向作用的力偶的原因，使双排桩的位移明显减小，同时桩身的内力也有所下降，并形成交变内力。

(2) 悬臂式双排支护桩为一超静定结构，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) 当工期、造价、施工技术或场地条件(如基坑用地红线以外不允许占用地下空间)等限制时，如果基坑深度条件合适，往往可采用悬臂式双排支护桩。施工实践表明，其施工简便、速度快、投资省。

(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，因为前者桩的直径小，施工方便并且造价低。

当然，由于双排桩支护结构是近年来才出现的一种围护结构形式，无论实践经验还是理论分析都具有很大局限性，主要是：

(1) 双排支护桩的设计计算方法还不够成熟，实测数据还不多，受力机理不够清楚。

(2) 基坑周边要有一定空间，以利于双排支护桩的实施，因此对于场地狭小的场合，该支护形式的使用受到限制。

综上所述，在对深基坑挡土支护结构的位移有限制的要求下，对于一般粘性土地区来说，双排支护桩是一种很有应用价值的挡土支护结构类型。地下水位较高的软土地区采用双排支护桩时，应做好挡土、挡水，以防止桩间土流失而造成结构失效，上海、杭州^[19]、宁波^[20]、福建^[21]、广东^[22]等地区已经有很多双排桩挡土支护结构的成功实例。

1.5 本文选题意义和研究内容

1.5.1 选题意义

双排桩支护结构作为一种新型的基坑支护结构，与普通排桩结构相比，它具有以下优点：具有较大的侧向刚度，可以有效地限制围护结构的变形；其围护深度比一般围护结构深，同时有缩短施工工期、施工方便、不设置支撑、受力条件和整体稳定性好以及节约造价等优点，因而逐渐成为深基坑支护结构的优选方案之一，尤其是在软土地区得到了更为广泛的应用。当然，和其它任何一种支护方式一样，双排桩支护结构的应用还具有一定的局限性，如其基坑周边需要有一定的空间，以利于双排支护桩的实施，因此对于场地狭小的场合，该支护形式的使用受到限制；同时，其设计计算方法和理论还不够成熟，实测数据还不多，受力机理不够清楚，尤其是在有些地方的基坑工程中还出现了很多事故问题，因此很有必要对其进行更为深入的研究。

1.5.2 研究内容

本文的研究目的在于分析深基坑双排桩支护结构在不同的桩距、嵌固深度等条件下基坑在开挖过程中桩身内力的大小及桩顶位移变化以及影响桩身内力大小及桩顶位移变化的主要因素。针对目前工程上存在的问题，力求给

出一个比较符合实际工程状况的计算方法，得出一些有益于实际工程设计施工的建议，减少基坑事故的发生，使设计更为经济、合理。基于以上认识，作者做了以下几个方面的工作：

- 查询、收集、归纳整理现有双排桩支护结构体系计算理论模型及相关的研究成果，并在此基础上提出修正的设计计算模型；
 - 通过自行设计的试验方案，以灌注了水泥沙浆的 PVC 管为模型桩，用不同尺寸的木板模拟圈梁，模拟深基坑的开挖过程；量测不同开挖深度处桩顶位移及桩身内力；用模型试验的结果验证所提出的修正计算模型的正确性、可行性；
 - 考虑影响双排桩支护结构体系的诸多因素，对双排桩支护体系进行敏感性分析总结其变化规律，得出了有一定参考价值的结论。
-

第 2 章 常用双排桩支护分析方法评述

土压力是基坑支护结构上作用的主要荷载,合理确定支护结构上土压力的分布和取值一直是岩土工程界广泛关注的热点问题之一^[1]。基坑失稳的主要原因往往就是由于在设计上对土压力的考虑不周或不恰当造成的。在计算双排支护时,也必须首先确定土压力分布情况,因此以下几种计算模型都着重于对土压力问题的阐述。

2.1 Winkler 地基梁法

该方法采用 Winkler 假定的计算模型进行分析,即以 Winkler 假定为基础,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为基础即可求出门式刚架挡墙结构的内力^[24]。

2.1.1 计算模型

由于前后排桩均为连续间隔分布,沿 Γ 截面纵向可看成半空间无限弹性体,取一榀门架断面结构进行分析,计算模型见图 2-1。该模型以结构内力分析所采用的门架式框架分析的基本方法为基础,将桩体作为弹性地基梁,考虑土与桩的共同作用,将双排桩结构分割成前、后排桩及连梁三部分,前排桩在基坑底面以上作用有荷载强度 e_1 、连梁的作用力及基坑底面以下土体弹性支撑,后排桩则在后排土压力强度 e_2 、连梁作用力及基坑底面下的弹性支撑下工作。

2.1.2 弹性地基梁模式确定土压力

双排钻孔灌注桩进入工作状态后,灌注桩之间的土体随墙身的平移而扰动,可近似将基底以上部分的土体看成受侧向约束的半无限长土体,根据平面应变问题的物理方程,并近似地认为桩间土的横向应变为零,于是桩间土

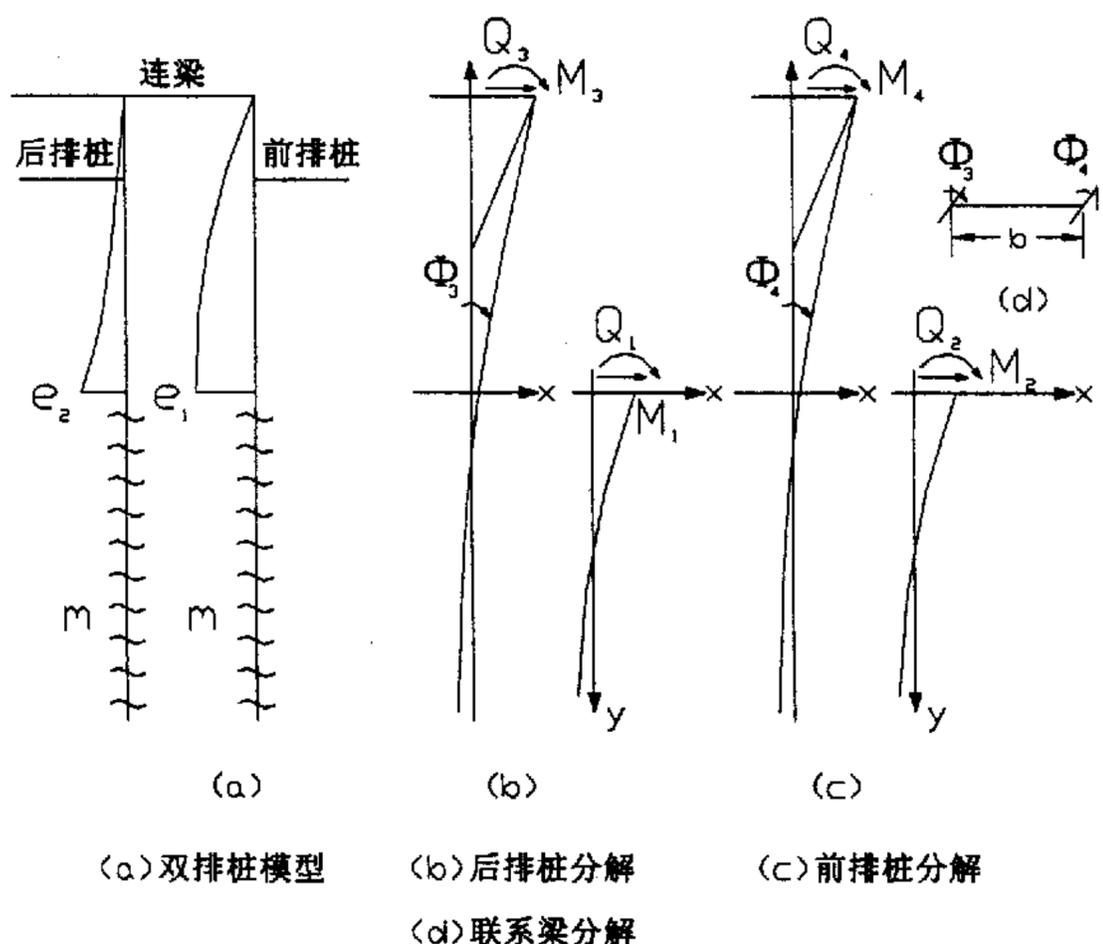


图 2-1 Winkler 地基梁法计算模型

的侧压力 σ 可按下式计算:

$$\sigma = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma \cdot z \quad (2-1)$$

式中 ν —— 土的泊松比;

γ —— 土的天然容重;

z —— 地表至计算点的距离。

基底以下部分的土对桩的侧向抗力, 采用 Winkler 假定, 将地基土看作彼此独立的弹簧来模拟其变形性质。

2.1.3 内力计算分析

对于 Winkler 假定的计算模型, 在解法上将两排桩体分隔成前、后排桩及联系梁三部分, 分别建立前、后排桩体侧向受载下的微分方程, 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, 联合求解墙顶的内力及位移, 进而得到整个双排桩结构的内力和位移。

上述模型比较复杂, 为应用方便, 一般工程则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简化计算模型^[17], 如图 2-2 通常取 $n = 1/5 \sim 1/3$ 。

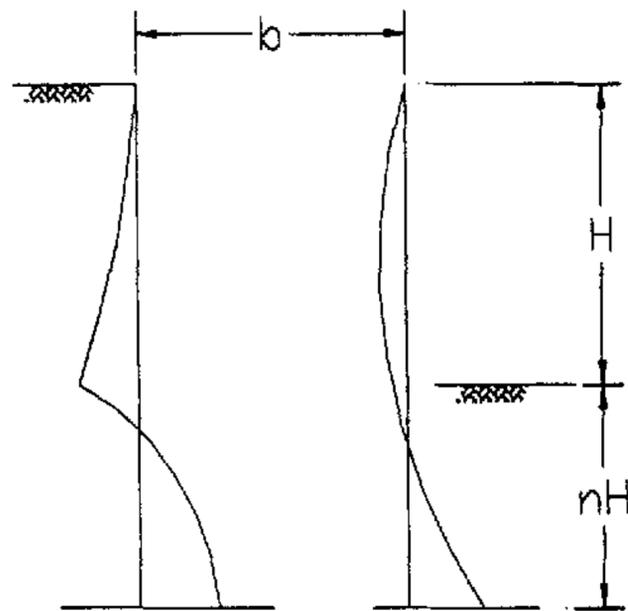


图 2-2 Winkler 地基梁法简化计算模型

评论: 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, 目前使用也越来越广泛^[16], 理论上比极限平衡法更合理, 而且还考虑支护结构的变形, 但是它仍然无法考虑土体的本构特性; 尤其是在水平位移较大的情况下, 其不合理性更为突出^[1]。

2.2 土体积比例系数法^[11]

2.2.1 计算基本假定

- (1) 将前后排桩与桩顶连梁看作一个底端嵌固, 顶端为直角刚结点的刚架门式结构;
- (2) 连梁为没有变形的绝对刚体;
- (3) 基坑开挖后, 在土压力作用下, 连梁不产生转角只能平移, 并且前后排桩在连梁标高处的水平位移相等。

2.2.2 计算土压力的确定

由上述三条假定可进一步推导双排桩在土压力作用下的内力与位移计算。

图 2-3 为刚架 ABDE 土压力简图，基坑开挖后，假定前排桩土压力为 P_{af} 及 P_{pf} ，后排桩土压力为 P_{ab} 及 P_{pb} （下标 a 和 p 分别表示主动和被动土压力， f 和 b 分别表示前排和后排桩）。其土压力强度可做如下简化。

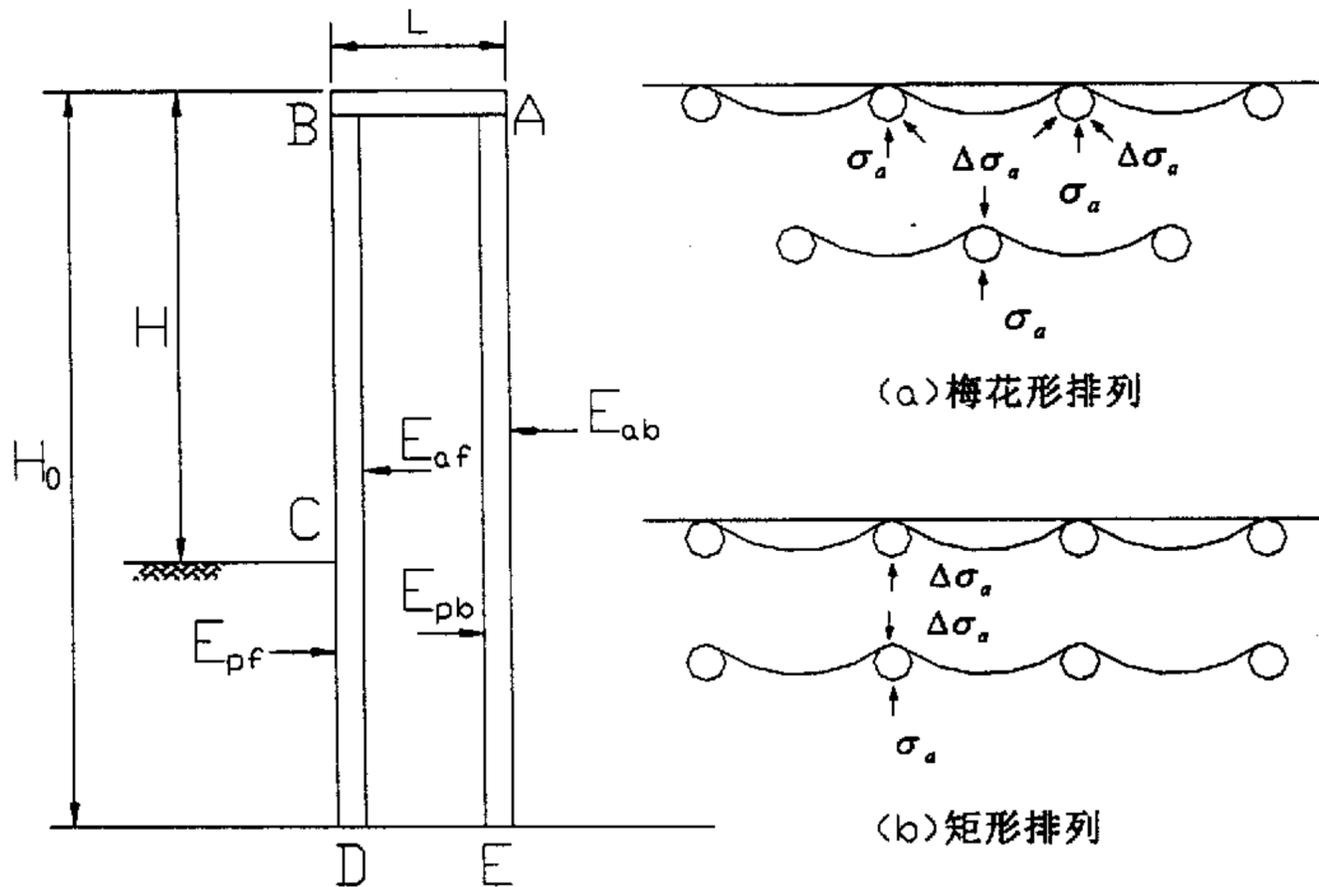


图 2-3 双排桩土压力简图

图 2-4 双排桩土压力传递示意图

先介绍主动土压力。图 2-4 是梅花形与矩形排列下力的传递示意图，根据不同的双排桩排列情况，可分别求得作用的土压力。

对于梅花形布桩的情况，如图 2-4 (a)，考虑桩间土对土压力的传递作用，前排桩与后排桩的土压力是不同的。由图可知：

$$\text{后排桩的主动土压力 } P_{ab} \text{ 为 } P_{ab} = \sigma_a - \Delta\sigma_a \quad (2-2)$$

$$\text{前排桩的主动土压力 } P_{af} \text{ 为 } P_{af} = \sigma_a + \Delta\sigma_a \quad (2-3)$$

$$\text{假定不同深度下，} \sigma_a \text{ 与 } \Delta\sigma_a \text{ 的比值相同，即 } \sigma_a = \alpha\sigma_a \quad (2-4)$$

式中 α 为比例系数, σ_a 为朗肯主动土压力, 将 (2-4) 代入 (2-2) 和 (2-3) 中, 则

$$\text{后排桩的主动土压力} \quad P_{ab} = (1-\alpha)\sigma_a \quad (2-5)$$

$$\text{前排桩的主动土压力} \quad P_{bf} = (1+\alpha)\sigma_a \quad (2-6)$$

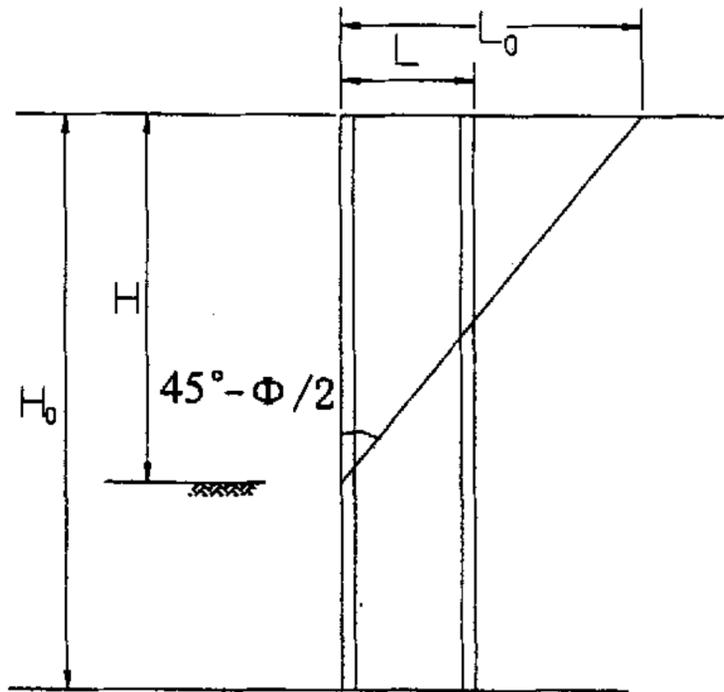


图 2-5 α 的确定方法

比例系数 α 可按下面方法确定 (此假定只作为一种近似方法), 如图 2-5 所示, 基坑深度 H , 双排桩排距 L 在 $0 \sim L_0$ 范围之内, 可按后排桩两侧滑动土体重量的比例关系确定 α ,

$$\alpha = \frac{2L}{L_0} - \left(\frac{L}{L_0}\right)^2 \quad (2-7)$$

式中 L —— 双排桩外侧排距;

$$L_0 = H \tan(45^\circ - \phi/2) \quad (2-8)$$

同样, 可求得被动土压力:

$$\text{后排桩的被动土压力} \quad P_{pb} = (1-\alpha)\sigma_p \quad (2-9)$$

$$\text{前排桩的被动土压力} \quad P_{pf} = (1+\alpha)\sigma_p \quad (2-10)$$

对于前后排桩为矩形 (并列式) 排列的情况 (图 2-4b), 由于前后排桩相

对, 基坑开挖后, 主动土压力可假定仅作用在后排桩上, 桩间土压力仍为 $\Delta\sigma_a$, 则前后排桩的主动土压力分别为:

$$\text{后排桩的主动土压力 } P_{ab} = \sigma_a - \Delta\sigma_a = (1 - \alpha)\sigma_a \quad (2-11)$$

$$\text{前排桩的主动土压力 } P_{af} = \Delta\sigma_a = \alpha\sigma_a \quad (2-12)$$

同样, 亦可求得被动土压力。

2.2.3 桩的内力计算

嵌固式双排桩结构的内力与挠度可按结构计算的方法计算。

评论: 该方法物理概念明确, 容易用程序实现, 因而现阶段为较多设计者在设计时采用的方法之一。但在某些情况下, 前后排桩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有一定的影响。

2.3 等效抗弯刚度法

熊巨华在文献[14]中首次提出此法。他指出, 当前后排桩距大于 8 倍桩径时按锚拉结构计算; 当前后排桩距在 4~8 倍桩径时按框架结构计算; 对于排间距小于四倍桩径的双排支护结构, 给出了等效抗弯刚度的计算方法。

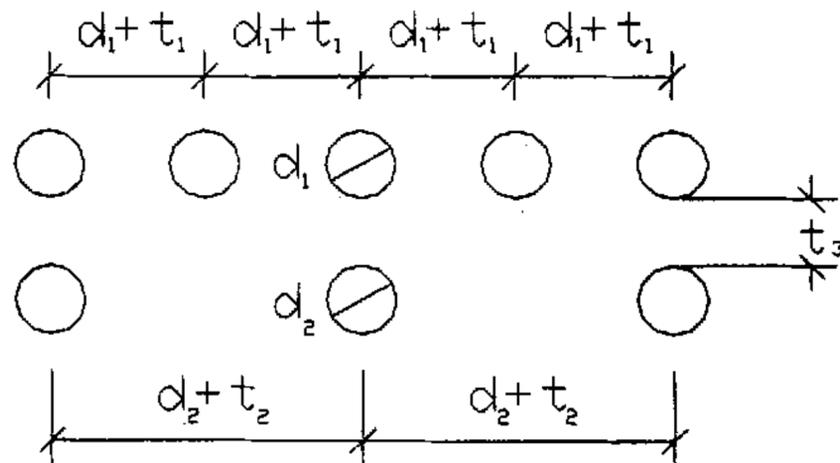


图 2-6 双排桩平面布置图

如图 2-6 所示, 设前排桩桩径 d_1 , 桩距 t_1 , 后排桩桩径 d_2 , 桩距 t_2 , 前后排桩之间距离为 t_3 (t_1 、 t_2 、 t_3 为桩间静距)。根据刚度等效的原则, 前后排桩可分别等效为厚度为 h_1 、 h_2 的连续墙。 h_1 、 h_2 按下式计算:

$$h_1 = 0.838 \cdot d_1 \sqrt[3]{\frac{d_1}{d_1 + t_1}} \quad (2-13)$$

$$h_2 = 0.838 \cdot d_2 \sqrt[3]{\frac{d_2}{d_2 + t_2}} \quad (2-14)$$

工程实践中，前后排桩之间往往设置有水泥土搅拌桩或旋喷桩，既能作止水帷幕，又能在前后排桩之间进行力的有效传递；再加上桩顶帽梁与桩之间是刚性连接，双排桩支护结构就可等效为由厚度分别为 h_1 、 h_2 、 h_3 的板组成的侧向挡土体系，其中 $h_3 = t_3$ 。以 1 延米为例，其整体抗弯刚度为：

$$\begin{aligned} EI &= E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 \cdot \frac{h_3^3}{12} \\ &= E_1 \cdot \left[\frac{(2h_1 + h_3)^3 - h_3^3}{24} \right] + E_2 \cdot \left[\frac{(2h_2 + h_3)^3 - h_3^3}{24} \right] + E_3 \cdot \frac{h_3^3}{12} \quad (2-15) \end{aligned}$$

式中 EI ——整体抗弯刚度，单位为 $\text{MN} \cdot \text{m}^2$ 。

$E_1 I_1$ ——前排桩抗弯刚度，单位为 $\text{MN} \cdot \text{m}^2$ ；

$E_2 I_2$ ——后排桩抗弯刚度，单位为 $\text{MN} \cdot \text{m}^2$ ；

E_1 ——前排桩的弹性模量，单位为 MPa ；

E_2 ——后排桩的弹性模量，单位为 MPa ；

E_3 ——前后排桩中间搅拌桩(或旋喷桩或注浆)加固体的弹性模量，单位为 MPa 。

如果前后排桩中间没有进行地基加固则在式(2-15)中可以忽略最后一项。

然后根据提出的等效刚度原则用弹性支点法(杆系有限单元法)的简化计算方法来进行计算。图 2-7 是分析计算围护结构内力和变形的弹性支点法采用的计算参数和边界条件，以‘m’法为例，基坑开挖面以下围护结构的基本挠曲方程为：

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + m \cdot z \cdot b \cdot y - p_a \cdot b_z = 0 \quad (2-16)$$

式中

y ——围护结构的水平挠曲变形，单位为 m ；

- z —— 竖向坐标, 单位为 m ;
- b —— 围护结构计算宽度, 单位为 m ;
- p_a —— 主动侧土压力强度, 单位为 kPa ;
- m —— 地基土的侧向基床比例系数, 单位为 kN/m^4 ;
- b_z —— 主动侧荷载计算宽度, 地下连续墙取单位宽度, 单位为 m 。

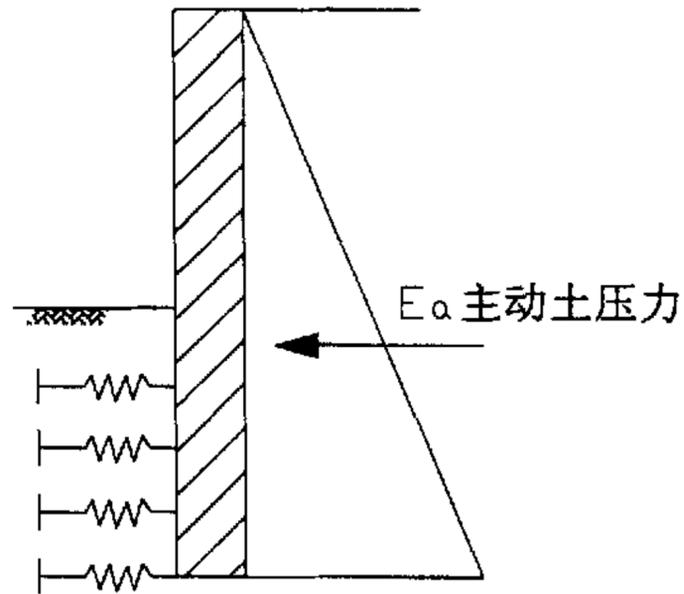


图 2-7 弹性支点法计算简图

2.4 桩间土刚塑性分析法

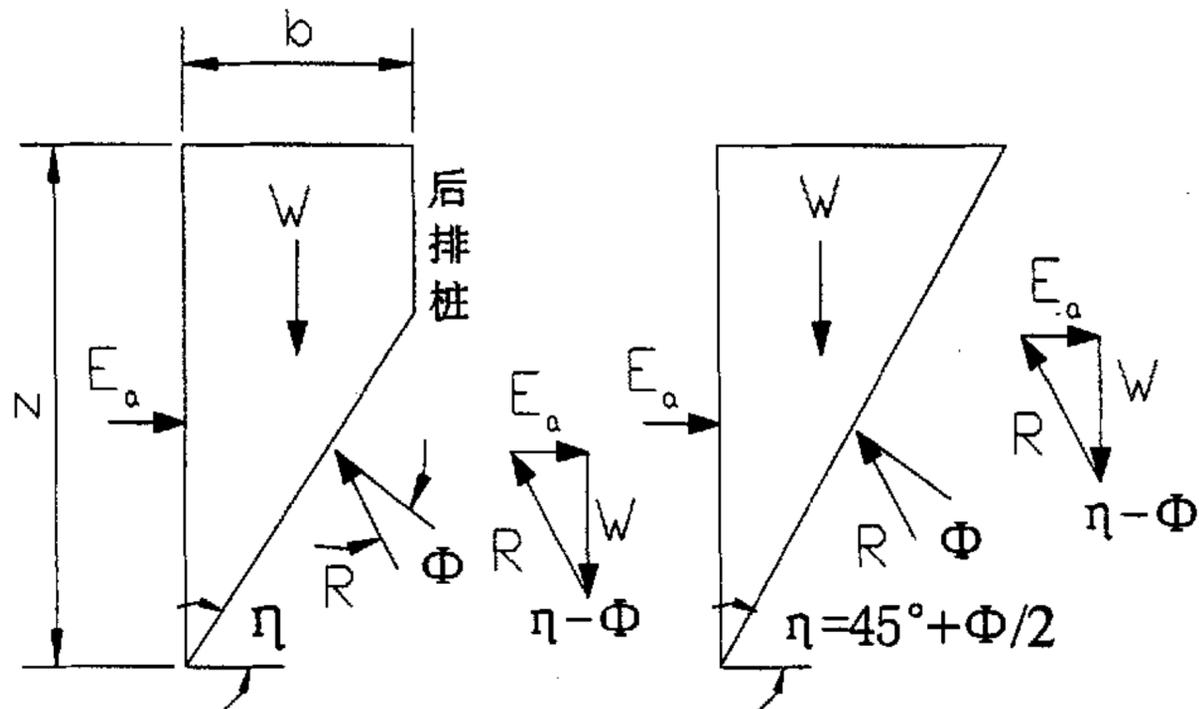


图 2-8 双排桩内土体受力分析

黄强在文献^[16]中提出了该计算方法, 该法根据经典的朗肯土压力理论, 把所研究的桩间土体作为独立的刚塑性体来进行分析。由于后排桩的存在, 改变了土体剪切破坏面, 因而土压力分布与无后排桩的情况是不同的, 如图 2-8 所示。两者的相同之处为: 土体均为刚塑性体、而且都不考虑土体与桩间的摩阻力; 主动土压力均按极限平衡原理计算; 两者不同之处在于: 由于后排桩的影响将使剪切角 η 发生改变, 从而剪切破坏面不同; 而桩排距 b 对 η 值的影响导致主动土压力的变化, 而且其影响是非常显著的。

根据极限平衡原理, 每延米土体的总重 W 为

$$W = \gamma b \left(z - \frac{b}{2} \tan \eta \right) \quad (2-17)$$

土体主动土压力合力 E_a 为

$$E_a = \gamma b \left(z - \frac{b}{2} \tan \eta \right) \cdot \tan(\eta - \phi) \quad (2-18)$$

沿墙体的主动土压力分布 e_a , 当墙高为 z 时, 主动土压力分布强度为

$$e_a = dE_a / dz \quad (2-19)$$

式中 γ ——土的重度, 单位为 kN/m^3 ;

b ——前排桩与后排桩的距离, 单位为 m ;

z ——计算点深度, 单位为 m ;

η ——滑动破坏面与水平面夹角, 单位为度;

ϕ ——土的内摩擦角, 单位为度。

当考虑到后排桩共同作用时, 土体的边界条件已经改变, 亦即剪切破坏面发生了变化, η 角不再是定值, 而是一变量, 其一般表达式是:

$$\eta = f(\varepsilon, \phi) \quad (2-20)$$

式中 ε 为深宽比, $\varepsilon = \frac{z}{b}$ (2-21)

η 随深度变化使主动土压力强度 e_a 不再随深度呈线性分布:

$$e_a = \frac{dE_a}{dz} = \frac{1}{b} \frac{dE_a}{dz} \quad (2-22)$$

根据此式, 对式 (2-18) 求导数, 便可得到 e_a 的一般表达式, 但实用极不方便, 仅提供求解可行性的依据, 为此引入没有后排桩影响的主动土压力公式。

实际工程中的双排桩结构, 其后排桩往往不连续布桩, 因此土压力计算

与以上分析假定连续布桩有区别，为近似地考虑后排桩间距的影响，假定前、后排桩的作用土压力之和为朗肯主动土压力，即：

$$e_a^0 = e_{af} + e_{ab} \quad (2-23)$$

并以 β_1 、 β_2 分别考虑非连续布桩的影响：

$$e_{af} = \beta_1 i_e e_a \quad (2-24)$$

$$e_{ab} = \beta_2 (1 - i_e) e_a \quad (2-25)$$

$$\text{式中 } \beta_1 = \frac{1 - \frac{d}{s_c} (1 - i_e)}{i_e} \quad (2-26)$$

$$\beta_2 = \frac{d}{s_c} \quad (2-27)$$

式中 d —— 桩径；

s_c —— 桩距；

i_e —— 土压力强度后排桩影响系数，定义为：

$$\text{当 } \varepsilon \leq \varepsilon_c \text{ 时, } i_e = \frac{e_a}{e_a^0} \quad (2-28)$$

$$\text{当 } \varepsilon \geq \varepsilon_c \text{ 时, } i_e = 1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{a + c(\varepsilon - \varepsilon_c)} \quad (2-29)$$

式中：临界深宽比 ε_c 为 $\varepsilon_c = \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})$ ， a 、 c 值根据 ϕ 值查表求得。

由前后排桩主动土压力强度，可求得主动土压力合力与作用点以及弯矩。求前后排桩的被动土压力时，为简化计算起见，假定其分配系数按主动土压力合力影响系数确定。

双排支护桩的内力和位移亦可按结构计算的力法计算。固定端的简化计算模型与图 2-2 相同。

对于土质较好的情况，一般能保证桩身最大弯矩作用点位于基坑开挖面以下 $1/5 \sim 1/3$ 支护高度范围内，但对于土质较差的情况，该经验值失效，需进行试算。

2.5 系数修正法

张弘在文献^[13]中提出了该计算方法, 要点如下:

2.5.1 计算基本假定

基坑开挖后, 双排桩将发生位移, 桩间土受到一定程度的扰动。考虑到两排桩的整体刚度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, 同时考虑到由于双排桩顶部圈梁的作用, 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 σ 为:

$$\sigma = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma \cdot z \quad (2-30)$$

式中 ν ——桩背土的泊松比。

2.5.2 土压力分析

(1) 前排桩土压力

作用于前排桩前的侧向抗力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:

$$e'_p = K_1 \cdot e_p = K_1 (\gamma z K_p + 2c\sqrt{K_p}) \quad (2-31)$$

式中 K_1 ——被动土压力折减系数, 它是桩土变形的函数, 一般取 0.5~0.7。

(2) 后排桩土压力

后排桩桩前的侧向抗力亦按式 (2-31) 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 (称为弹性土压力) 介于静止土压力与主动土压力之间, 即:

$$\sigma_e = K_2 \cdot e_a = K_2 (\gamma z K_a - 2c\sqrt{K_a}) \quad (2-32)$$

式中 K_2 ——土侧向压力修正系数, 一般取 1.1~1.2。

2.5.3 桩的内力计算

前排桩的计算可按顶部拉结、下端简支的挡土支护结构考虑；对于后排桩，桩长可通过对桩的抗倾覆验算求得；在根据上述公式所求得的土压力，由平衡条件进而可求得最大弯矩及作用点。

评论：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，但由于提出的经验系数具有较大的地域局限性，较难推广。

2.6 有限元分析法

文献[15]和[25]用平面应变非线性弹性有限元法对双排桩支护结构体系的内力和变形特征进行了分析计算。文献[26]充分考虑了桩土的协同作用，提出了位移反分析计算理论。前已有的研究成果表明：用有限元法可以对影响双排桩支护结构性状的各影响因素进行参数敏感性分析，并可根据前期开挖的实测资料，用反分析方法确定计算参数，对后期开挖进行预测和指导，进而对双排桩支护体系进行优化设计。

有限元方法可以精确的分析支护结构所受的土压力以及在侧土压力作用下产生的侧向变位及地面沉降等。该方法所需参数繁多，日前受试验测试技术的限制难以得到具有较高可靠性的土性参数，加之基坑工程存有明显的空间效应，用平面二维去模拟与实际相差较大。尤其是对桩土接触面的模拟与实际情况有较大出入，因此在工程中还不能取得很好的实际应用效果。

选择合适的土体本构模型、考虑各类非线性问题、实现三维模拟是用有限元方法分析双排桩支护结构体系的研究发展方向。

虽然用有限元在于对双排桩进行数值分析时能考虑支护结构—土共同作用的复杂性，但用该方法进行分析计算需要考虑：整体系数的选择，土与结构的本构模型，施工过程的模拟，不同材料之间的接触模拟，土体系数的确定等，目前在应用中还存在计算系数和计算模型难以取得的问题，暂时还未在双排桩支护结构体系设计中取得良好的效果，

由以上的分析可知，对于双排桩支护结构体系，纯粹运用极限平衡理论计算方法简单，与实际偏差较大；运用有限元方法分析复杂，虽能较好地对开挖进行模拟，但目前由于受试验测试技术的限制难以取得精确的参数，分析中亦不能取得理想的效果。因此，作者在对双排桩结构进行分析时，考虑

这几种计算方法的优略，对双排桩支护结构的计算模型进行了改进，这将在第四章中进行讨论。

第 3 章 双排桩支护模型试验

本章首先简单概括了模型试验及其在目前工程中的应用,进而对本次双排桩支护结构模型试验的准备(包括试验材料和模型的制作)和试验过程作了详细的介绍,最后对试验结果进行了对比分析,并得出了一些有价值的结论。

3.1 概述

模型试验是按一定的几何、物理关系,用模型代替原型进行测试研究,并将研究结果用于原型的试验方法^[27]。

由于模型试验具有的一系列优点(便于突出主要因素、重复试验等等),相对于现场试验和数值分析方法,室内模型试验仍然是研究深基坑开挖土压力及变形的有效手段之一。

本文所做的试验旨在揭示深基坑双排桩支护土压力及变形的一些规律及影响因素,并与理论计算的结果进行比较,以此来验证前文所提计算模型的合理性,并在此基础上提出对工程设计和施工的一些有意义的见解。因此本次试验采用的模型槽(作者自制)及试验所采用的土样,尽管没有按实际某个工程进行相似模拟,但通过试验仍可以反映在不同工况下深基坑双排桩支护土压力和变形的分布、大小及一些规律。这正如台湾的 Yung-Show Fang 等曾经所指出的,“由于规模效应,不可能应用小比例的模型研究成果预测大规模挡土墙的变形行为,但试验发现可以加深对本领域在未来发展影响上的理解。”^[28]作者所做工作的意义正在于此。

3.2 试验模型的设计及制作

本章作者采用自制的模型试验槽进行双排桩支护的模型试验研究,试验模型包括下面几个组成部分,分别是试验槽、模型桩、试验土样和数据量测系统。

3.2.1 试验槽

试验工作是在试验槽内进行的，试验槽的内部尺寸（长×宽×高）为 $1.8 \times 1 \times 1.5 \text{m}^3$ ，如图 3-1 所示。模型试验槽由红砖砌成，在一端高度为 1m 处设置一开口，填土时采用活动的木板代替砖墙，在挖土时可随深度不同取下木板，这样可方便在基坑开挖过程中取土；当土样完全回填后，在靠近另一端的基坑内施加地面超载，这主要考虑到试验开挖的基坑深度远小于实际工程

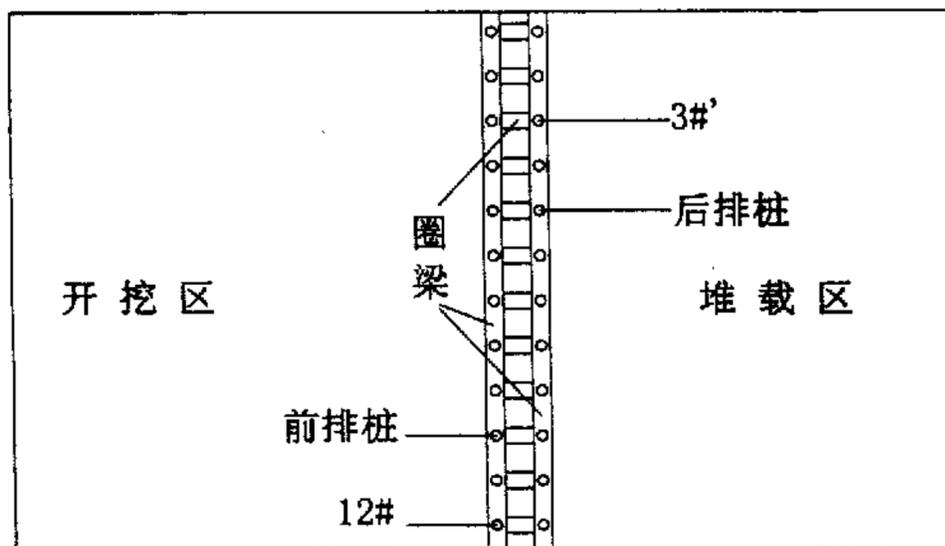


图 3-1 试验槽平面示意图

基坑开挖深度，而土体在较浅的基坑开挖时尚能自立。因此，为了促使试验桩产生较大内力及位移，施加了外加荷载，即在基坑未开挖的一侧堆上重物。

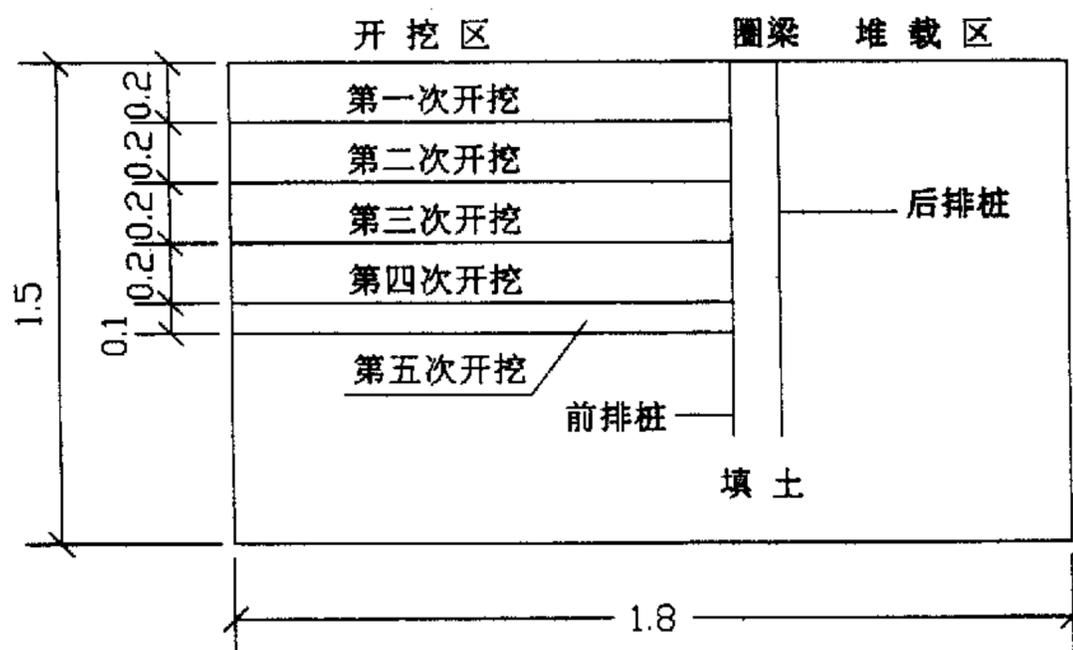


图 3-2 模型槽剖面图

如图 3-2 为模型槽剖面。

3.2.2 模型桩和圈梁

以灌注了水泥砂浆的 PVC 管为模型桩，用不同尺寸的木板根据桩距和排距打孔后模拟圈梁。模型桩的长度为 1.2m，直径 32mm。

3.2.3 试验土样

土样直剪试验测试结果见表 3-1。

表 3-1 直剪试验结果

平均压力 (KPa)	100	200	300	400
平均剪应力 (KPa)	93.575	158.585	254.13	281.71

通过用大型程序设计与应用语言 Matlab 对结果进行数值分析处理，直剪试验数据处理结果见图 3-3，土样的粘聚力和内摩擦角分别为 $32kPa$ 、 33.4° 。土样重度为 $23kN/m^3$ 。

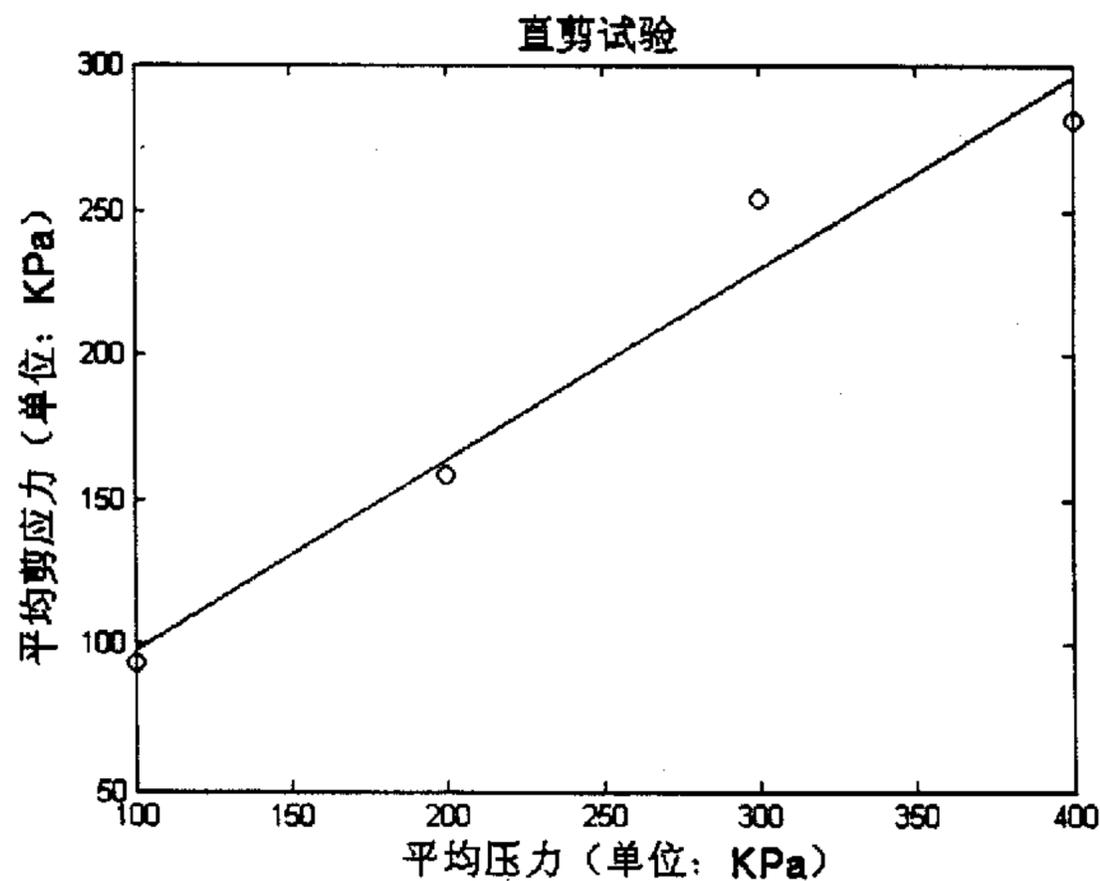


图 3-3 直剪试验数据处理

3.2.4 数据量测系统

本文试验是通过开挖模型槽的开挖区的地基上而达到使排桩受横向力发生变形而进行的。试验中量测了桩身应变和桩顶位移。

➤ 桩身应变的测量

本试验量测应变的桩号是 2#、4#、6#以及与之对应的后排桩 2' #、4' #、6' #。每根桩量测 6 个截面，其在桩身的布置如图 3-4 所示。桩身应变的测量

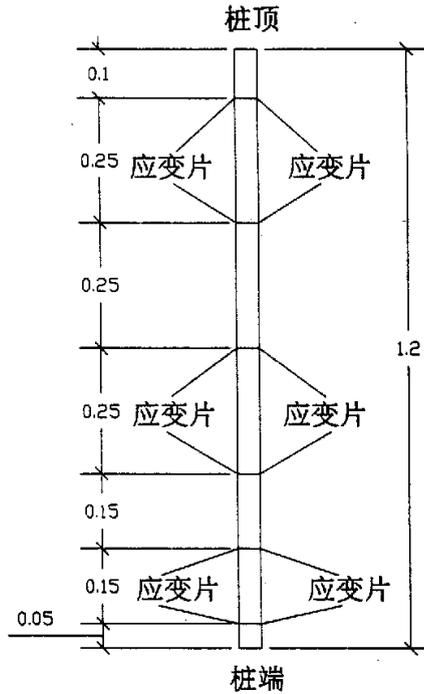


图 3-4 模型桩桩身测点布置图 (单位: m)

选用 120-3AA 型应变片进行。使用 7v-14 应变仪采集器进行数据采集, 运用既有的程序, 数据直接输入电脑。见图 3-5。

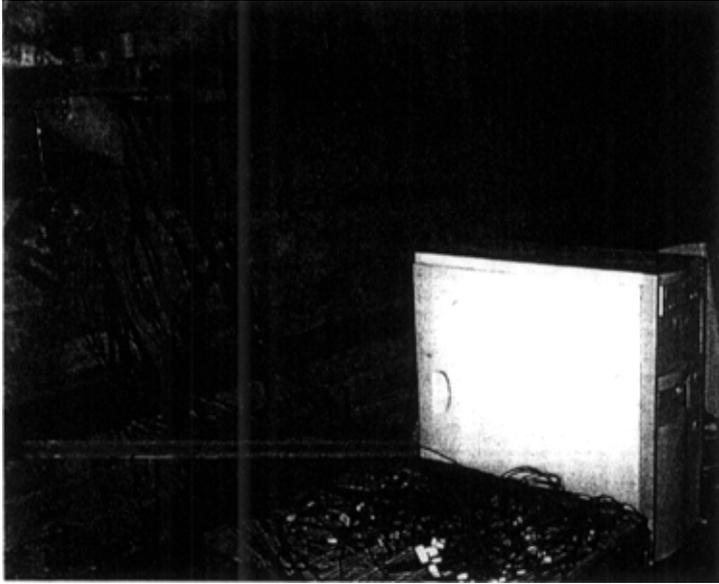


图 3-5 应变仪数据采集器接线示意图

➤ 桩顶位移的测量

桩顶位移的测量用百分表进行量测，见图 3-6。



图 3-6 百分表测定桩顶位移示意图

3.3 试验目的及方案

3.3.1 试验目的

模拟实际工程基坑分层开挖过程，量测不同排距的模型桩在基坑不同开挖深度时的桩身内力和桩顶位移，并通过对不同排距时双排桩桩身内力和桩顶位移的对比分析，探讨影响双排桩支护结构支护效果的主要因素，研究悬臂双排护坡桩的受力性能和工作机理，寻求合理的计算模型和方法，提出对工程设计和施工有实际参考价值的建议。

3.3.2 试验方案

模型分别对几种不同排距的双排桩及单排桩进行了试验。本试验双排桩采用矩形布置，前后桩位相对，即从同样桩数的单排桩每间隔一根抽出一根，将其排列在后排，从而使排桩总桩数不变而使桩距增加一倍。每排桩桩顶处及前后排间分别用加工的木板作为连接梁（模拟混凝土顶圈梁），从而使前后排桩形成一个双排桩支护结构。该试验中双排桩试验采用相同桩数，相同桩间距而改变双排桩的排距。模型试验的模型尺寸见表 3-3。

表 3-3 模型试验尺寸

编号	桩型	桩长 (m)	桩径 (mm)	桩数 (根)	桩距 (mm)	排距 (mm)	超载 (KPa)
1	a	1.2	Φ32	24	42	—	5.5
2	b	1.2	Φ32	24	80	64	5.5
3	b	1.2	Φ32	24	80	96	5.5
4	b	1.2	Φ32	24	80	128	5.5
5	b	1.2	Φ32	24	80	192	5.5

注：a：单排悬臂； b：双排桩

3.4 试验过程

本次试验按以下步骤进行：

(1) 试验前的各种准备工作。包括修建模型槽、土样制取、对试验超载所选用的重物、试验过程中要采用的各种仪器进行标定等。

(2) 制作模型。包括模型桩的制作、模拟圈梁（木板）的加工。模型桩用灌注水泥砂浆的外径 32mm 的PVC管模拟。

(3) 桩身贴片。首先对模型桩表面贴片部位处理并划线定位，然后涂刷胶水、贴片、引线，最后在表面涂环氧树脂进行保护。

(4) 分层填土（每层厚度为 20cm ），并在试验设定的位置布置桩。首先在试验槽内按一定的厚度进行分层填土、夯实；安置模型桩，将装配好的桩与圈梁的支护结构框架装入模型槽。土层重度用土样的体积进行控制。

(5) 施加超载，安置仪器。待试验槽填满后，在基坑未开挖的一侧施加超载；将桩身应变片引出的线接到应变仪采集器上，并在按试验方案在桩顶安置百分表。

(6) 模拟基坑开挖，并记录数据。分层开挖，每层开挖完毕待位移（监测应变）稳定后，记录桩身应变和桩顶位移，并进行下一步开挖，直至预定的深度。图 3-7 为基坑开挖到一定深度的示意图。

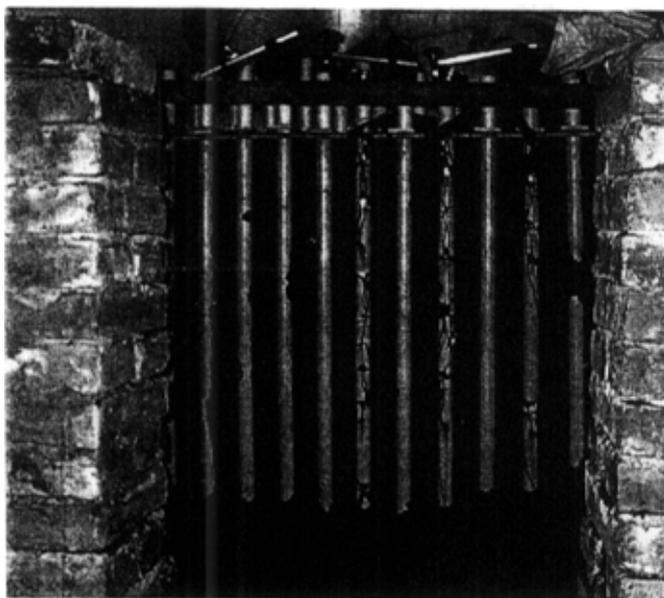


图 3-7 基坑开挖到一定深度的示意图

(7) 一组试验完成，铲出土体，并将模型桩取出，调整桩位，回填做下

一组试验。

3.5 试验结果整理及分析

3.5.1 水平位移

➤ 同一开挖深度下不同排距对桩顶水平位移的影响

表 3-4、和 3-6 分别为开挖深度为 $0.4m$ 和 $0.9m$ 时 6#和 4#桩的桩顶水平位移。

表 3-4 挖深为 $0.4m$ 时 6#和 4#桩的桩顶水平位移

位移 桩号	排距		
	2d	3d	4d
6#	0.65	0.51	2.03
4#	0.5	0.44	1.75

表 3-5 挖深为 $0.9m$ 时 6#和 4#桩的桩顶水平位移

位移 桩号	排距		
	2d	3d	4d
6#	12.5	11.23	21.41
4#	12.21	9.57	17.56

由试验结果可见，模型试验在相同的挖土深度（嵌固深度也相同）下，不同的布桩形式产生的桩顶水平位移是不相同的。6#和 4#两根桩无论在挖土深度为 $0.4m$ 或 $0.9m$ 时，其桩顶水平位移都呈现这样的规律：随着排距的增大，逐渐减小，而后逐渐增大。可见，排距是影响双排桩支护的桩顶水平位移的一个十分重要的因素。从表 3-4、3-5 可以看出，在场地土性、超载以及桩径不变的条件下，调整排距可以有效地减小桩顶水平位移。

➤ 对于同一根桩，开挖深度对桩顶水平位移的影响变化

图 3-8 为排距不同的几组试验中双排桩结构的 4#和 6#桩的桩顶水平位移随开挖深度而变化的曲线。

由试验结果可知，模型试验在排距不同时，4#和 6#桩的桩顶水平位移均呈现出大致相同的变化规律：在开挖深度较小时，其位移变化幅度较小；随

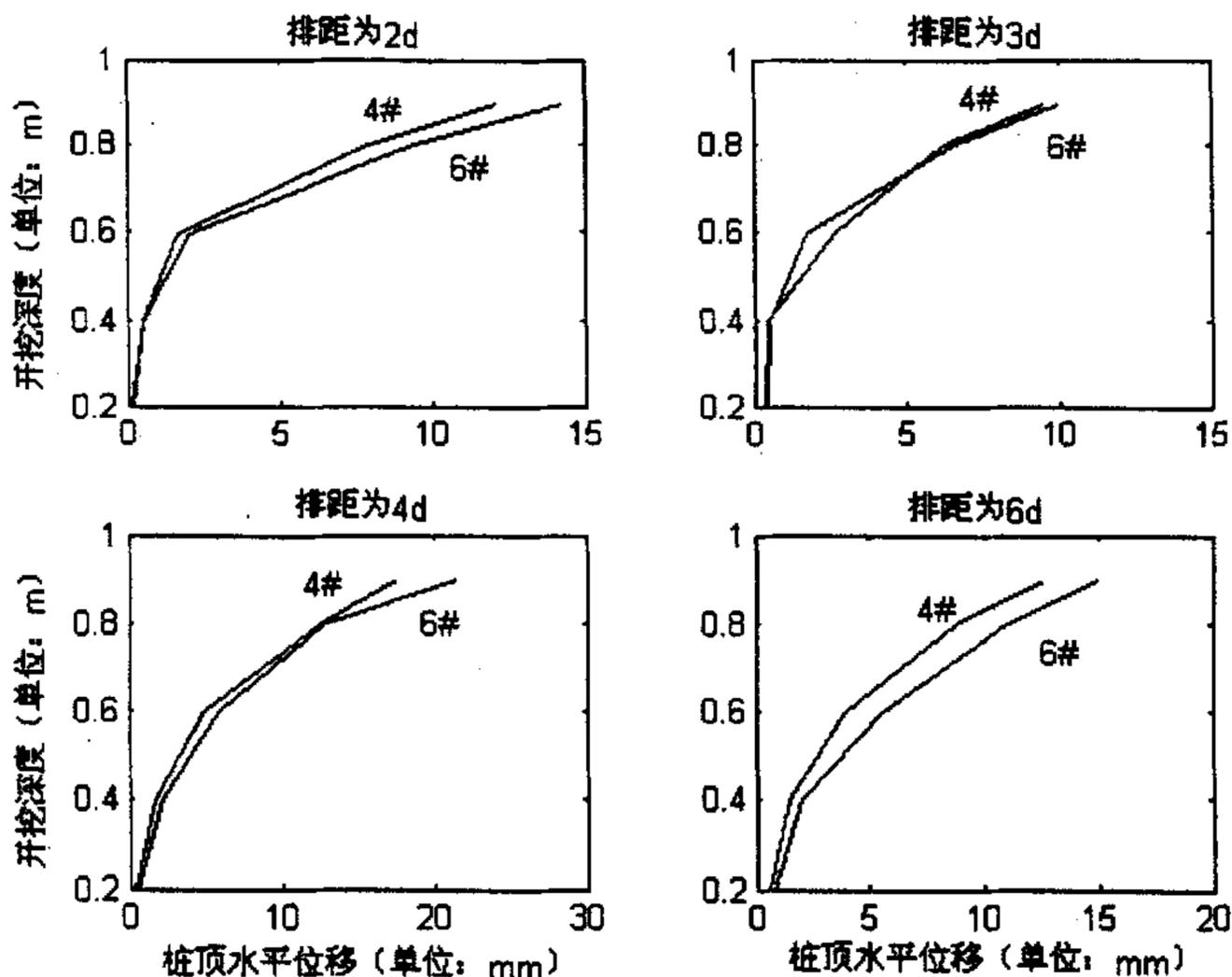


图 3-8 桩顶水平位移随开挖深度变化曲线

着开挖深度增大，其位移变化了逐渐增大。可见，开挖深度是影响桩顶的位移的重要因素。

➤ 开挖整个过程中，单排桩桩顶位移同双排桩桩顶水平位移的对比

表 3-5 为挖深为最大开挖深度（0.9m）时单、双排桩的桩顶水平位移列表。

表 3-5 最大开挖深度时的单、双排桩的桩顶水平位移

	单排 悬臂桩	双排桩 (排距 2d)	双排桩 (排距 4d)
桩顶水平位移 (mm)	30	13	20

由上表可见，模型试验在桩数相同的条件下（双排桩间距为单排桩间距的 2 倍），在相同的挖土深度下，双排桩桩顶水平位移明显小于单排桩的位移量，而两个不同排距的双排桩试验位移相差却小得多。可见，在支护结构方案的选择上，双排桩支护结构产生的桩顶水平位移比同样条件下单排桩支护效果要好。

综上所述，模型试验结果说明：

(1) 对于一基坑工程来说，采用双排桩支护结构时，不同的支护方案产生的效果差异是很大的，尤其是排距和开挖深度（或嵌固深度）的影响。我们可以通过比较，找到一较合理的方案，使桩顶水平位移最小。

(2) 虽然双排桩的间距增加了一倍，但由于加强了结构的刚度，桩的位移减小很多，这一试验结果对于实际工程意义很大，当基坑开挖不允许支护结构有过大的位移时，在单排悬臂桩不同满足要求的情况下，采用相同桩数的双排桩可明显减小桩顶的水平位移。

3.5.2 桩身内力

由于对桩身的应变进行分析就能反映桩身的弯矩变化，因此在这里仅对桩身的应变进行分析。下面是用数学分析软件 Origin 5.0 对模型试验结果进行分析的结果。

图 3-9、3-10 是排距为 $2d$ 时 4#（前排桩）、4'#（后排桩）在基坑开挖深度分别为 $0.4m$ 和 $0.9m$ 时桩身的应变变化曲线。

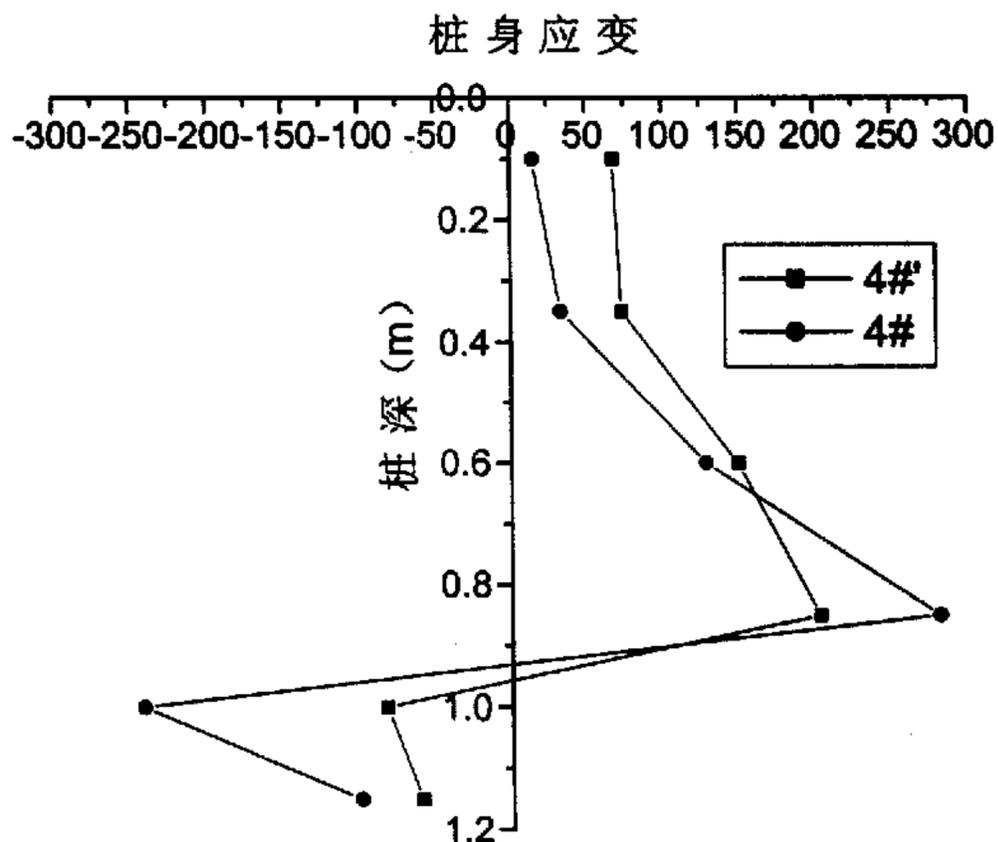


图 3-9 基坑挖深为 $0.4m$ 时桩身的应变曲线（排距为 $2d$ ）

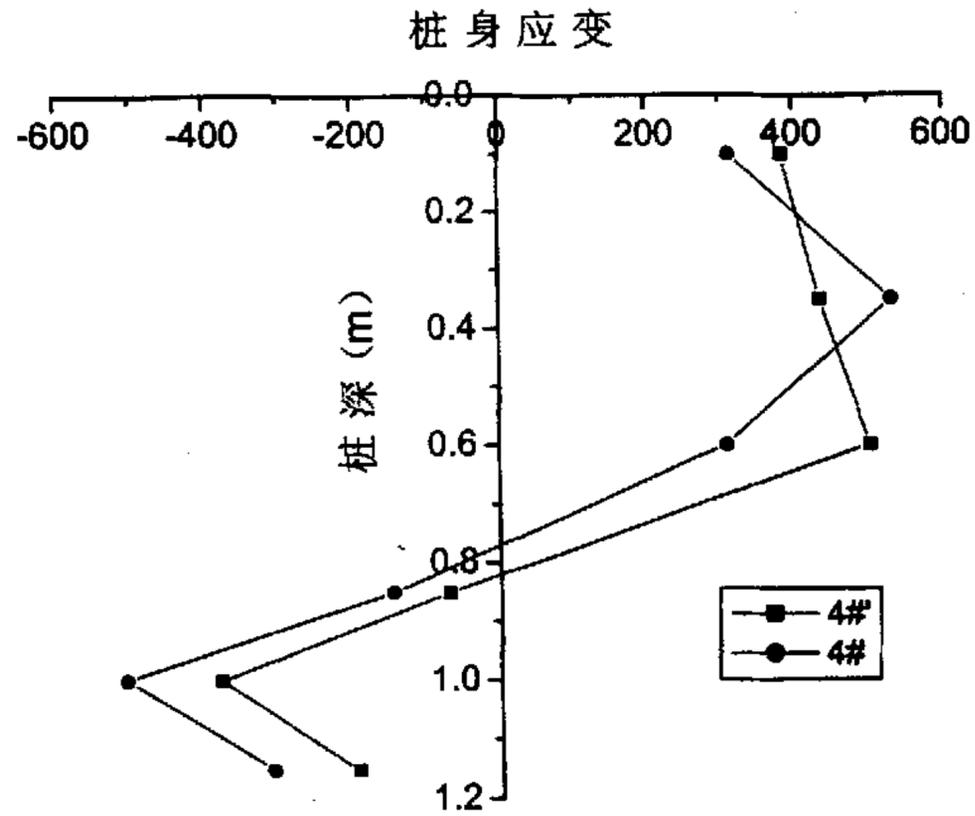


图 3-10 基坑挖深为 $0.9m$ 时桩身的应变曲线 (排距为 $2d$)

图 3-11 和 3-12 是排距为 $3d$ 时 4# (前排桩)、4'# (后排桩) 在基坑开挖深度分别为 $0.4m$ 和 $0.9m$ 时桩身的应变变化曲线。

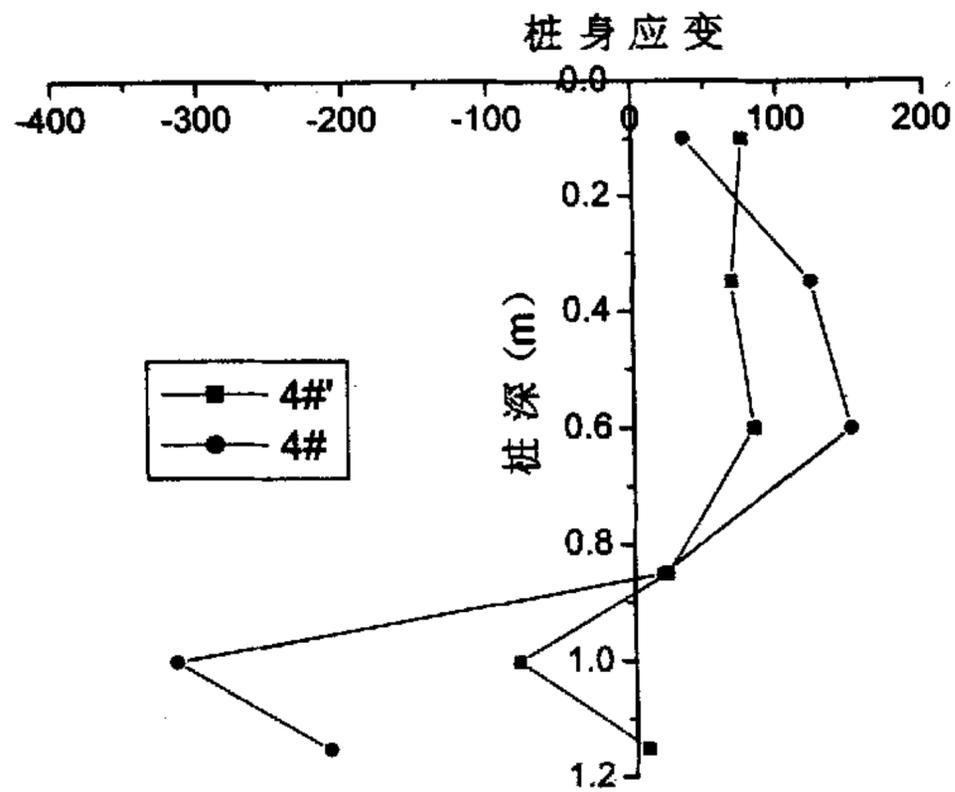


图 3-11 基坑挖深为 $0.4m$ 时桩身的应变曲线 (排距为 $3d$)

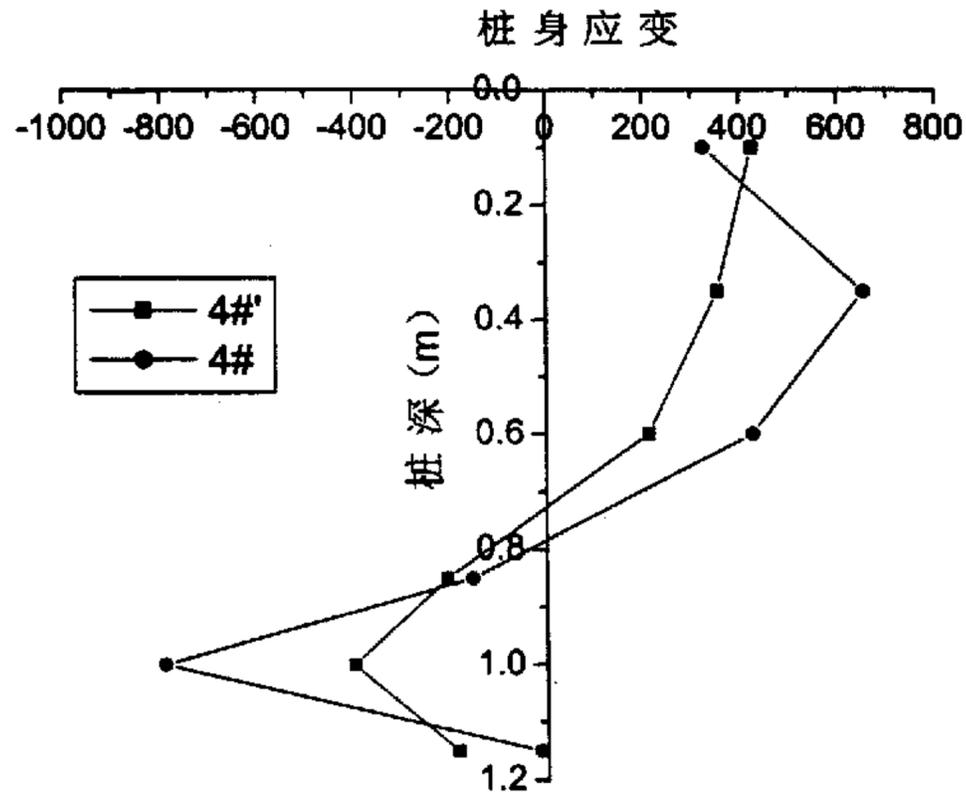


图 3-12 基坑挖深为 $0.9m$ 时桩身的应变曲线 (排距为 $3d$)

图 3-13 是基坑开挖深度为 $0.9m$ 时排距为 $2d$ 的双排桩支护的前、后排桩与单排桩桩身的应变曲线对比。

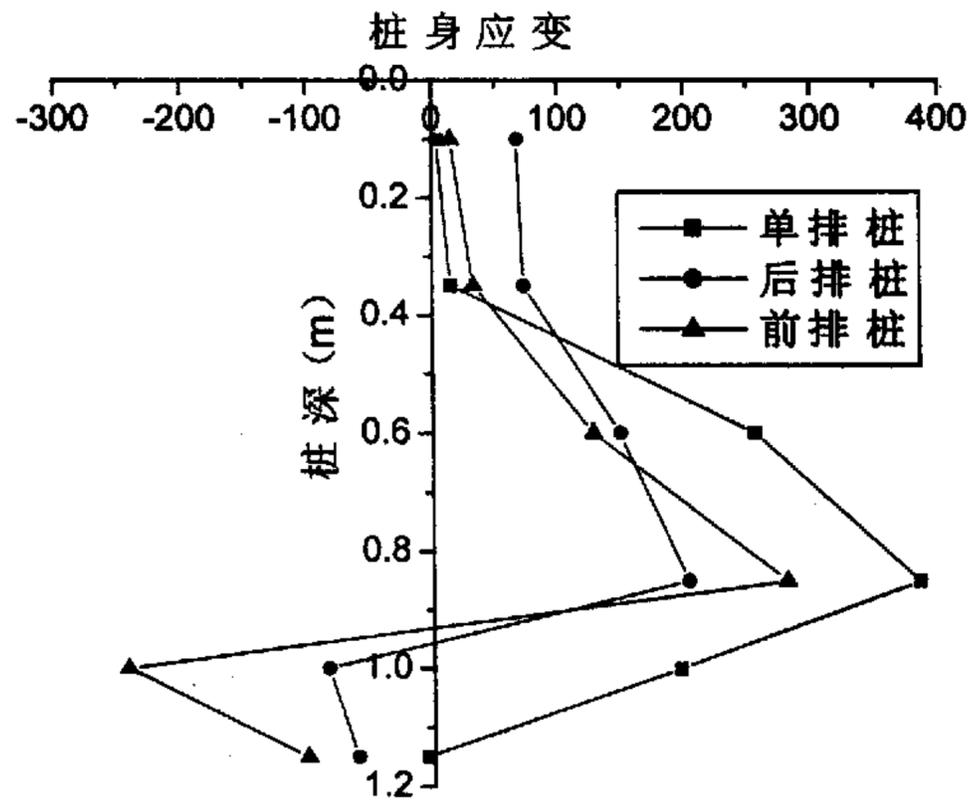


图 3-13 前、后排桩和单排桩桩身的应变曲线对比

结论:

(1) 排桩支护结构桩身应变(应力)呈 S 形, 且其在前后排均存在反弯点;

(2) 一般情况下, 前排桩的桩身应变(应力)要比后排桩的大;

(3) 随着基坑开挖深度的增加, 桩身应变(应力)逐渐增大;

(4) 相同总桩数条件下, 双排桩桩身所产生的最大应变要比单排悬臂桩桩身最大应变要小得多, 而且分布较均匀。

综上所述, 我们可以看出: 由于双排桩作为一空间超静定结构, 对受力状况具有自动的调节功能, 这也是与单排悬臂桩支护结构相比双排桩支护结构的优点。

第 4 章 双排桩支护结构计算模型

本章首先根据第 2 章介绍的目前在实际工程中应用比较广泛的几种计算分析模型, 提出修正的双排桩支护结构计算模型, 然后对双排桩支护结构进行计算; 进而与第 3 章中双排桩模型试验分析结果进行对比, 从而验证所提出的计算分析模型的合理性。

4.1 修正的双排桩支护结构计算模型

前面叙述了双排桩支护结构在目前实际工程中常用的几个计算模型, 在此基础上, 作者提出了修正的双排桩支护结构计算分析模型。

4.1.1 双排桩支护结构的土压力分析

如前所述, 双排桩支护结构的设计计算中首先应该解决的是桩侧土压力的问题, 即桩与土的相互作用。基坑未开挖时, 桩侧土压力可按半无限空间的侧向土压力公式计算; 基坑开挖之后, 桩侧土压力将会重新分布。它主要取决于支护结构的位移, 进一步分析研究表明, 前后两排桩的土压力各有各的变化规律。因此, 有必要将其分别加以考虑, 从而建立一个较能符合实际的分析模型。

➤ 计算基本假定:

(1) 将前后排桩与桩顶连梁看作一个底端铰接, 顶端为直角刚结点的门式刚架结构;

(2) 连梁为没有变形的绝对刚体;

(3) 基坑开挖后, 在土压力作用下, 连梁不产生转角只能平移, 并且前后排桩在连梁标高处的水平位移相等。

➤ 计算土压力的确定

土压力仍采用 2.2 中介绍的形式:

(1) 对于梅花形布桩

后排桩的主动土压力 P_{ab} 为
$$P_{ab} = (1 - \alpha)\sigma_a \quad (4-1)$$

$$\text{前排桩的主动土压力 } P_{af} \text{ 为 } P_{af} = (1 + \alpha)\sigma_a \quad (4-2)$$

但比例系数 α 的确定则与前述方法不同。根据极限平衡理论，潜在的滑动破坏面是从桩端开始、与水平面成 $45^\circ + \phi/2$ 角开展的剪切面。比例系数 α 可按下面方法确定，如图 4-1 所示，基坑深度 H ，桩长 H_0 ，双排桩排距 L 在 $0 \sim L_0$ （ L_0 可由式 4-4 确定）范围之内，则可按两排桩之间的滑动土体重量占前排桩后滑动土体总重量的比例关系确定 α 。

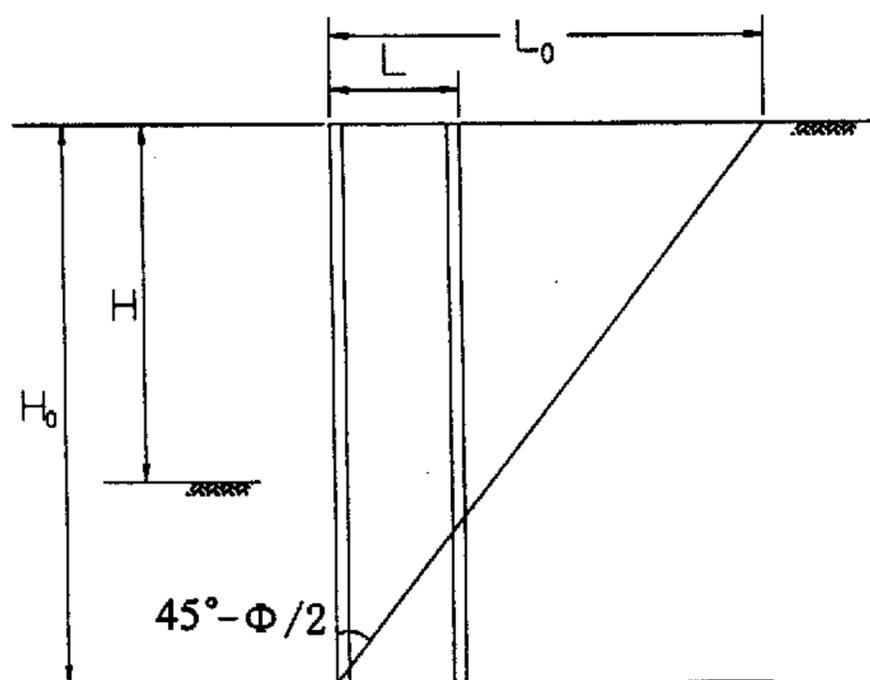


图 4-1 α 的确定方法

$$\alpha = \frac{2L}{L_0} - \left(\frac{L}{L_0}\right)^2 \quad (4-3)$$

式中 L ——双排桩外侧排距；

$$L_0 = H_0 \tan(45^\circ - \phi/2) \quad (4-4)$$

验证两种极限情况，（1）当前排桩与后排桩重叠，即 $L = 0$ ，这时没有桩间土，所以 $\Delta\sigma_a = 0$ ， $\alpha = 0$ 。（2）在另一个极限情况下，排距 $L = L_0 = H_0 \cdot \tan(45^\circ - \phi/2)$ ，这时后排桩在 $45^\circ - \phi/2$ 滑动面以外，可假定后排桩不会受到基坑开挖的影响，因此 $\Delta\sigma_a = \sigma_a$ ， $\alpha = 1$ 。

同样，被动土压力可取为：

$$\text{后排桩的被动土压力 } P_{pb} = (1 - \alpha)\sigma_p \quad (4-5)$$

$$\text{前排桩的被动土压力} \quad P_{pf} = (1 + \alpha)\sigma_p \quad (4-6)$$

(2) 对于矩形（并列式）布桩：

$$\text{后排桩的主动土压力} \quad P_{ab} = \sigma_a - \Delta\sigma_a = (1 - \alpha)\sigma_a \quad (4-7)$$

$$\text{前排桩的主动土压力} \quad P_{af} = \Delta\sigma_a = \alpha\sigma_a \quad (4-8)$$

同样，亦可求得被动土压力为：

$$\text{后排桩的被动土压力} \quad P_{pb} = \alpha\sigma_p \quad (4-9)$$

$$\text{前排桩的被动土压力} \quad P_{pf} = (1 - \alpha)\sigma_p \quad (4-10)$$

4.1.2 双排桩支护结构的计算模型

根据上节关于双排桩支护结构的计算假定，双排桩的计算分析可按门式刚架进行计算，求出桩顶弯矩和联梁作用力（计算时将前后排桩分开进行），其计算模型可用图 4-2 表示。

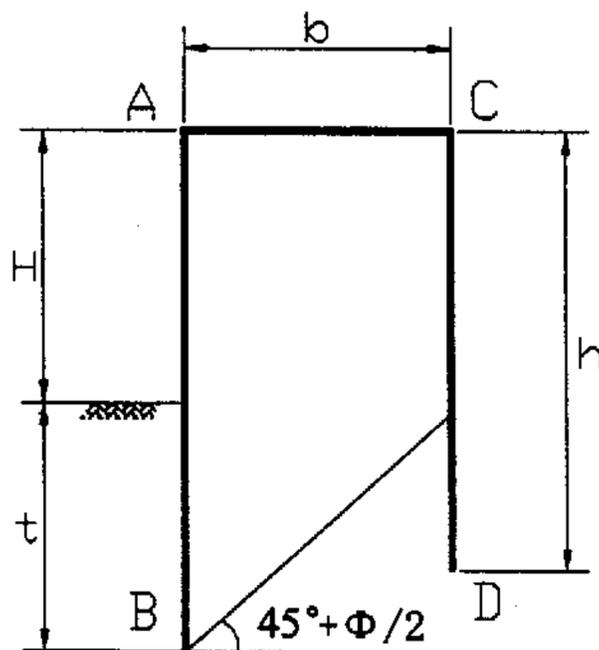


图 4-2 双排桩计算模型

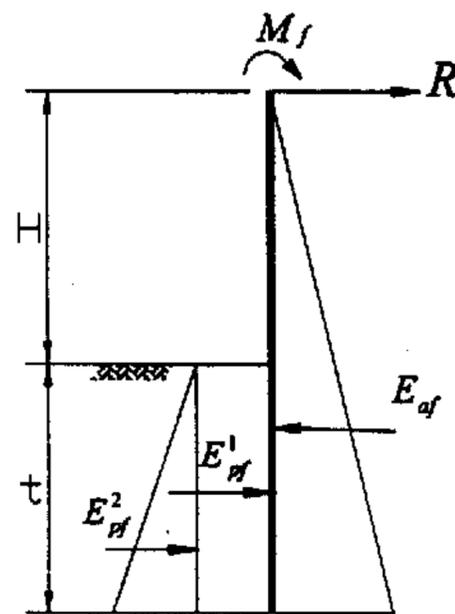


图 4-3 前排桩计算简图

(1) 双排桩的最小嵌固深度（指前排桩在坑底以下的长度）的确定
计算双排桩的最小嵌固深度时，可将双排桩结构及桩间土视为整体来考

虑, 根据整体在水平土方向上的静力平衡条件来确定最小嵌固深度 t' 。为安全其间, 在设计计算时取最小嵌固深度 $t = kt'$ (k 为安全系数, 可取 1.1~1.2)。

(2) 前排桩的计算分析

由上述分析, 前排桩的受力分析见图 4-3, 上端刚结、下端简支, 上、下两端支点即为桩顶、桩端。

根据 4.1.1 所述前排桩土压力分析结果, 可计算出前排桩桩前、桩后 (靠近基坑侧为桩前) 所受到的土压力。

桩前土压力合力:

$$E_{pf} = E_{pf}^1 + E_{pf}^2 = (1-\alpha) \left(2c \cdot t \cdot \sqrt{K_p} + \frac{1}{2} \gamma \cdot t^2 \cdot K_p \right) \quad (4-11)$$

桩背土压力合力:

$$E_{pf} = \alpha \cdot \frac{1}{2} \gamma \cdot H_0^2 \cdot K_a \quad (4-12)$$

连梁轴力 R 可以通过静力平衡计算求得:

$$R = E_{pf} - E_{pf} = \alpha \cdot \frac{1}{2} \gamma \cdot H_0^2 \cdot K_a - (1-\alpha) \left(2c \cdot t \cdot \sqrt{K_p} + \frac{1}{2} \gamma \cdot t^2 \cdot K_p \right) \quad (4-13)$$

前排桩桩顶弯矩 M_f 亦可通过平衡条件计算求得:

$$M_f = E_{pf}^2 \cdot \left(\frac{2}{3} t + H \right) + E_{pf}^1 \cdot \left(H + \frac{1}{2} t \right) - \frac{2}{3} E_{pf} (t + H) \quad (4-14)$$

为了满足稳定要求, 对下端简支 B 点, 抵抗倾覆力矩应为倾覆力矩的 K_H (K_H 为抗倾覆系数) 倍。对于永久性支护, $K_H \geq 1.5$; 对于临时性支护, $K_H \geq 1.2$ 。

$$K_H = \frac{\frac{1}{2} E_{pf}^1 \cdot t + \frac{1}{3} E_{pf}^2 \cdot t + R \cdot (H + t) + M_f}{E_{pf} \cdot \frac{1}{3} (H + t)} \quad (4-15)$$

而前排桩任意桩身截面 z 处的弯矩可表达为:

$$\text{当 } z \leq H \text{ 时, } M = R \cdot z - \frac{1}{6} z^3 \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot K_a + M_f \quad (4-16)$$

当 $H < z \leq H + t$ 时,

$$M = R \cdot z + (1-\alpha) \cdot c \cdot \sqrt{K_p} \cdot (z-H)^2 + (1-\alpha) \cdot \frac{1}{6} (z-H)^3 \cdot \gamma \cdot K_p - \frac{1}{6} \cdot z^3 \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot K_a + M_f \quad (4-17)$$

最大弯矩 M_{\max} 作用面（距桩顶 z 处）通过对（2—16）式求导而得到：

$$\frac{dM(z)}{dz} = 0 \quad (4-18)$$

$$\text{则 } z = \sqrt{\frac{2R}{\gamma \cdot \alpha \cdot K_a}} \quad (4-19)$$

$$\begin{aligned} \therefore M_{\max} &= R \cdot \sqrt{\frac{2R}{\gamma \cdot \alpha \cdot K_a}} - \frac{1}{6} \left(\sqrt{\frac{2R}{\gamma \cdot \alpha \cdot K_a}} \right)^3 \cdot \gamma \cdot \alpha + M_f \\ &= \frac{2}{3} R \cdot \sqrt{\frac{2R}{\gamma \cdot \alpha \cdot K_a}} + M_f \end{aligned} \quad (4-20)$$

同理，开挖面以下最大弯矩 M_{\max} 作用面亦可通过对（2—17）式求导而得到。

（3）后排桩的计算分析

后排桩的计算模型如图 4-4 所示，后排桩的桩长 h' 可通过静力平衡条件求得。

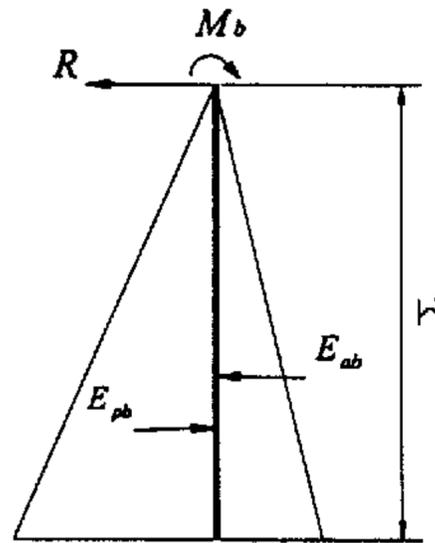


图 4-4 后排桩计算示意图

桩前侧土压力合力：

$$E_{pb} = 2c \cdot h' \cdot \alpha \sqrt{K_p} + \frac{1}{2} \gamma \cdot h'^2 \cdot \alpha \cdot K_p \quad (4-21)$$

桩背土压力合力:

$$E_{ab} = \frac{1}{2} h'^2 \cdot (1-\alpha) \cdot \gamma \cdot K_a - 2c \cdot h' \cdot (1-\alpha) \cdot \sqrt{K_a} \quad (4-22)$$

由水平方向上有

$$E_{ab} + R - E_{pb} = 0 \quad (4-23)$$

这是一个关于 h' 的方程, 易求得 h' 。

同时 h' 也应满足:

$$h' \geq (H+t) - b \cdot \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (4-24)$$

后排桩桩顶弯矩 M_b 为

$$M_b = c \cdot h'^2 \cdot \alpha \sqrt{K_p} + \frac{1}{3} \gamma \cdot h'^3 \cdot \alpha \cdot K_p - \frac{1}{3} h'^3 \cdot (1-\alpha) \cdot \gamma \cdot K_a + c \cdot h'^2 \cdot (1-\alpha) \cdot \sqrt{K_a} \quad (4-25)$$

后排桩桩身截面 z 处的弯矩为:

$$M = M_b - R \cdot z + c \cdot z^2 \cdot \alpha \sqrt{K_p} + \frac{1}{3} \gamma \cdot z^3 \cdot \alpha \cdot K_p - \frac{1}{3} z^3 \cdot (1-\alpha) \cdot \gamma \cdot K_a + c \cdot z^2 \cdot (1-\alpha) \cdot \sqrt{K_a} \quad (4-26)$$

最大弯矩 M_{\max} 作用面位置 (距桩顶 z 处) 为:

对上式求导得 $\frac{dM(z)}{dz} = 0$, 则

$$z = \frac{\sqrt{c^2 \cdot [\alpha \cdot \sqrt{k_p} + (1-\alpha) \cdot \sqrt{k_a}]^2 + 4R \cdot \gamma \cdot [\alpha \cdot k_p - (1-\alpha) \cdot k_a]}}{2\gamma \cdot [\alpha \cdot k_p - (1-\alpha) \cdot k_a]} \quad (4-27)$$

将上式代入 (4-26) 式, 则可得到 M_{\max} 。

(3) 整体稳定验算

双排桩支护结构设计时还应验算整体稳定, 其抗倾覆能力用抗倾覆稳定系数 K_0 表示:

$$K_0 = \frac{\sum M_y}{\sum M_0} \quad (4-28)$$

式中 $\sum M_y$ ——稳定力系对墙趾的总力矩;

$\sum M_0$ ——倾覆力系对墙趾的总力矩。

4.2 模型试验结果与理论计算结果对比

本节首先根据本章第 1 节提出的修正的计算理论, 应用大型程序设计与应用语言 Matlab 来进行双排桩支护结构体系受力计算; 然后用 Origin 软件将计算结果进行处理分析并同第 3 章中模型试验的分析结果进行了对比分析。

4.2.1 理论计算

下面对基坑开挖深度分别为 5.4m 和 10m 时的双排桩结构的计算结果, 其中选择的计算桩径为 1m, 排距为 2m。图 4-5 和图 4-6 分别为不同挖深时桩身内力曲线。

由图 4-5 和图 4-6, 易看出:

- (1) 双排桩支护结构桩身弯矩呈 S 型, 前后排桩均存在反弯点; 而且在一般情况下, 后排桩在桩顶处的弯矩最大。
- (2) 随着开挖深度的增加, 正负弯矩均相应增大, 前后排桩反弯点位置不断下移。

4.2.2 结果对比

将上述计算结果同第 3 章模型试验的结果进行对比, 这里只对桩身应变(弯矩)曲线形式和变化规律的进行比较。图 4-7 和图 4-8 为模型试验中桩身

应变变化曲线。

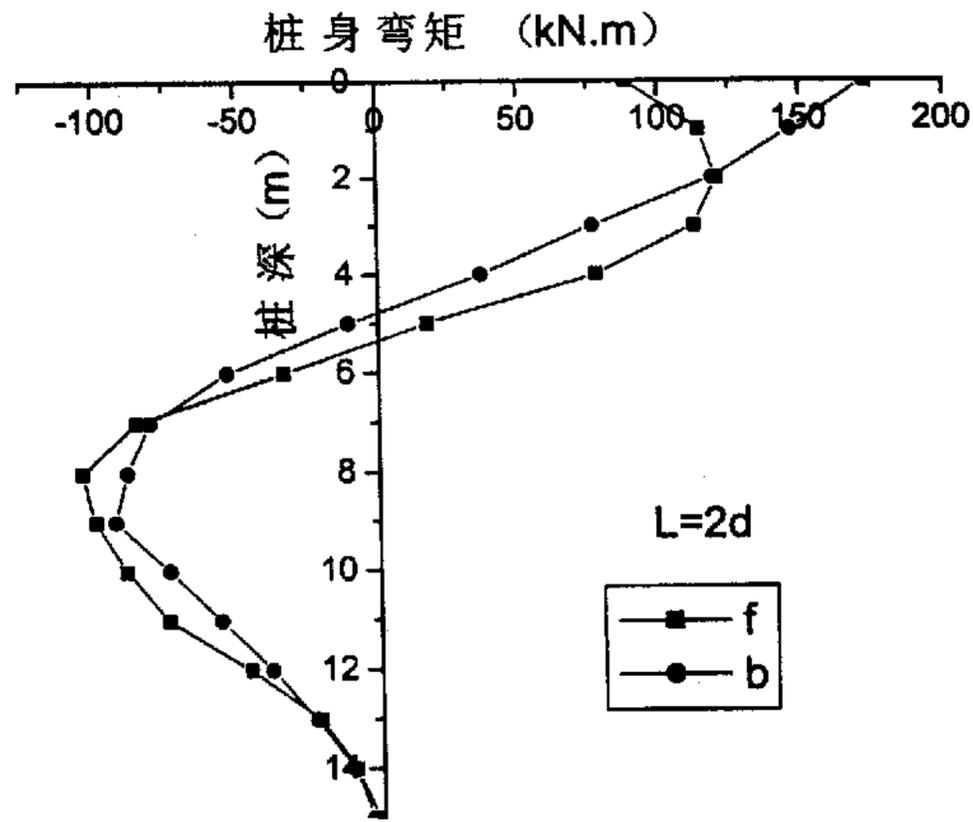


图 4-5 基坑挖深为 5.4m 时桩身的内力曲线

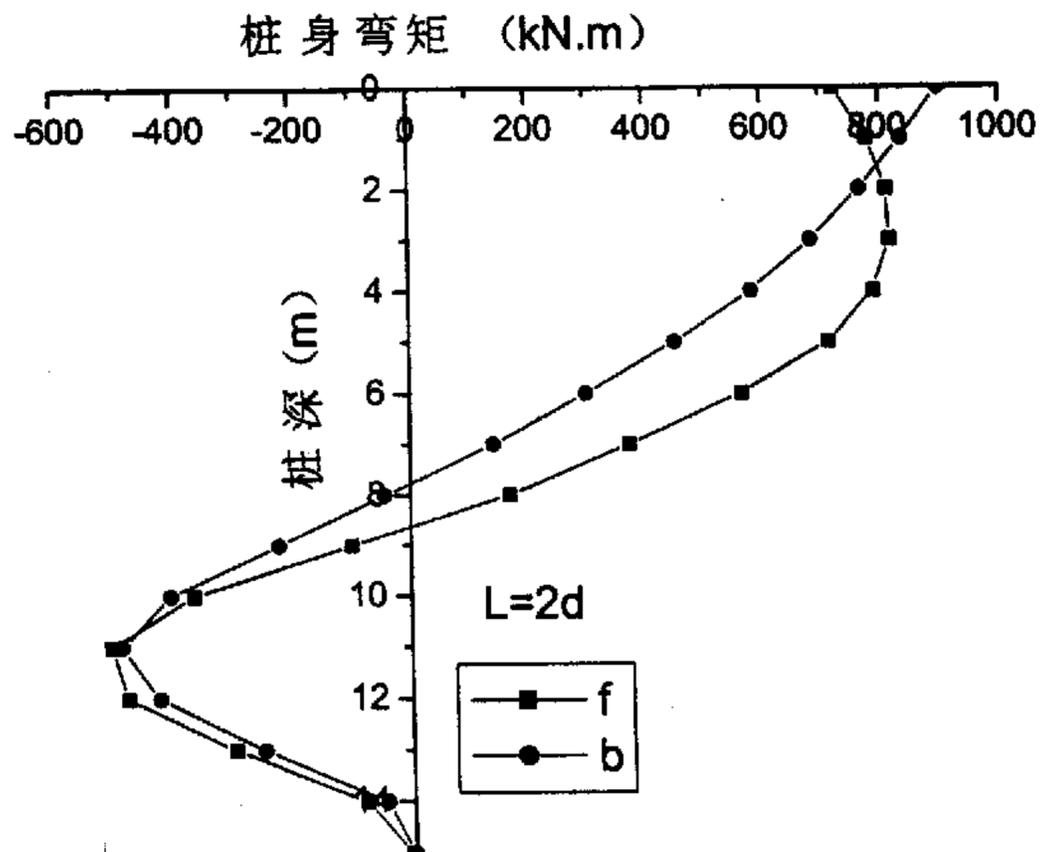


图 4-6 基坑挖深为 10m 时桩身的内力曲线

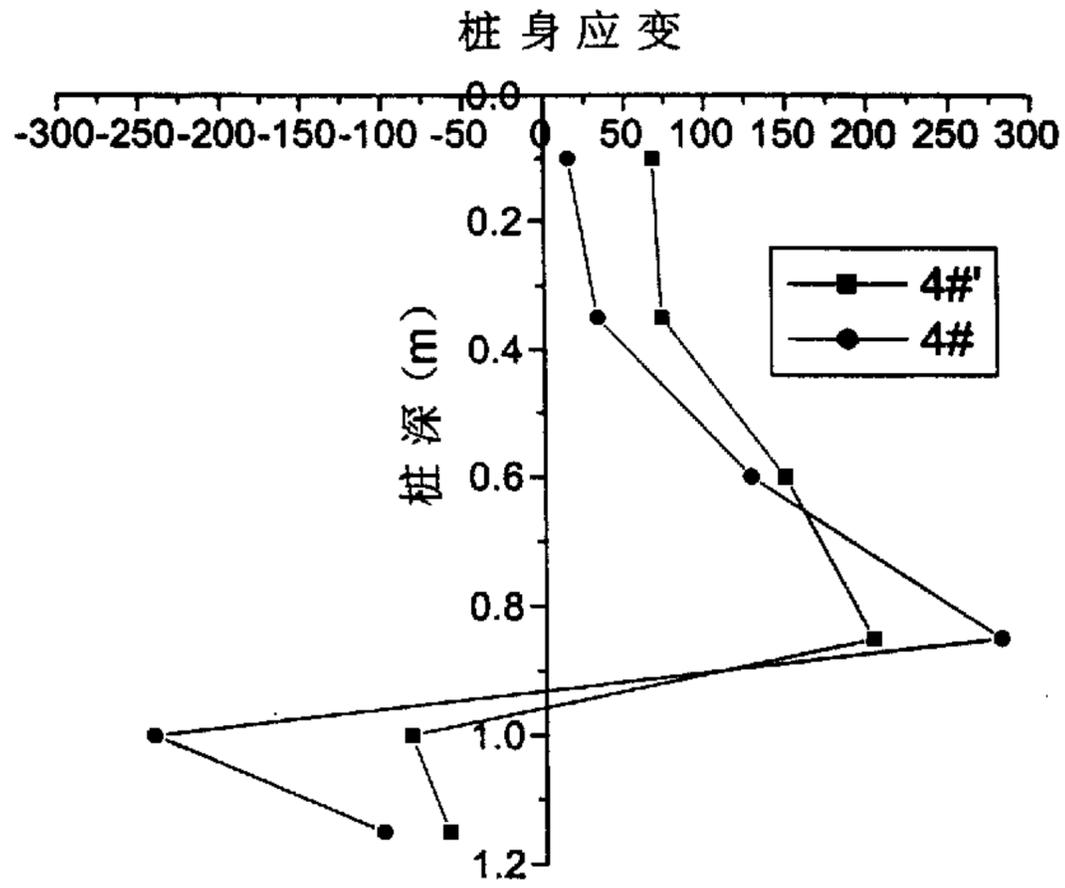


图 4-7 基坑挖深为 $0.4m$ 时桩身的应变曲线 (排距为 $2d$)

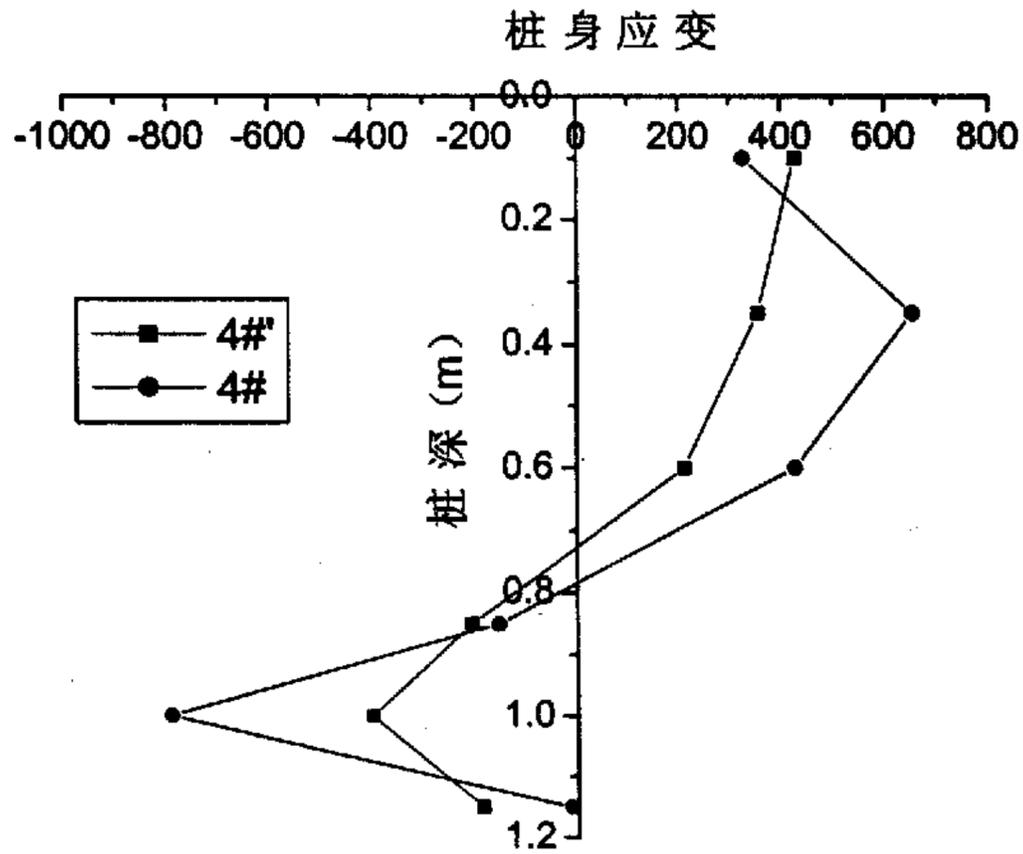


图 4-8 基坑挖深为 $0.9m$ 时桩身的应变曲线 (排距为 $3d$)

将图 4-5、4-6 同图 4-7、4-8 进行比较, 可以看出, 模型桩桩身应力具

有相同（或相似）的变化规律，这就证明了本章所提出的双排桩支护结构修正计算模型是比较合理的。

第 5 章 双排桩支护结构计算结果分析

根据前述修正的双排桩支护结构计算模型,对影响双排桩支护结构支护效果比较大的几个因素,如双排桩排距、桩长、围护结构嵌固深度、土体性质等,进行了计算,并对计算结果进行分析。在此基础上对双排桩支护结构的受力机理作了进一步探讨。

5.1 计算方案

双排桩支护结构作为一空间组合支护结构,受力复杂,影响其支护性能的因素众多,现运用本文中第 4 章提出的方法对双排桩支护结构体系进行分析计算,为了满足分析对比以及方案比较的需要,本文共进行了 10 种方案的计算。基本计算方案中桩径为 1m,桩间距为 2.4m,前后排桩排距为 2m,基坑开挖深度为 10m,桩长为 15m,对被支护土体取 $\phi = 33^\circ$, $c = 32kPa$, $\gamma = 19kN/m^3$ 。下表给出了各方案的计算条件。

表 5-1 计算方案表

影响因素		相关参数的变化
方案 1		基本方案,参数如上所述
方案 2		单排桩,桩间距为双排桩间距的 1/2
基坑开挖 深度的影响	方案 3	开挖深度 5.6m
	方案 4	开挖深度 7.8m
后排桩 桩长的影响	方案 5	坑底以下桩长为 7.5m
	方案 6	坑底以下桩长为 3.0m
前排桩 桩长的影响	方案 7	坑底以下桩长为 7.5m
	方案 8	坑底以下桩长为 9.5m
排距 的影响	方案 9	排距为 3m
	方案 10	排距为 4m
	方案 11	排距为 6m

注:上表中未作说明的参数仍为基本计算方案参数。

5.2 计算结果分析

以下是根据表 5-1 中各方案的计算结果对桩身的弯矩的比较分析:

(1) 相同总桩数条件下, 双排桩所受最大弯矩值比单排悬臂支护桩最大弯矩小得多, 而且分布均匀, 这主要是由于双排桩支护是一空间超静定结构, 对结构的受力具有自动调节作用, 如图 5-1 所示。

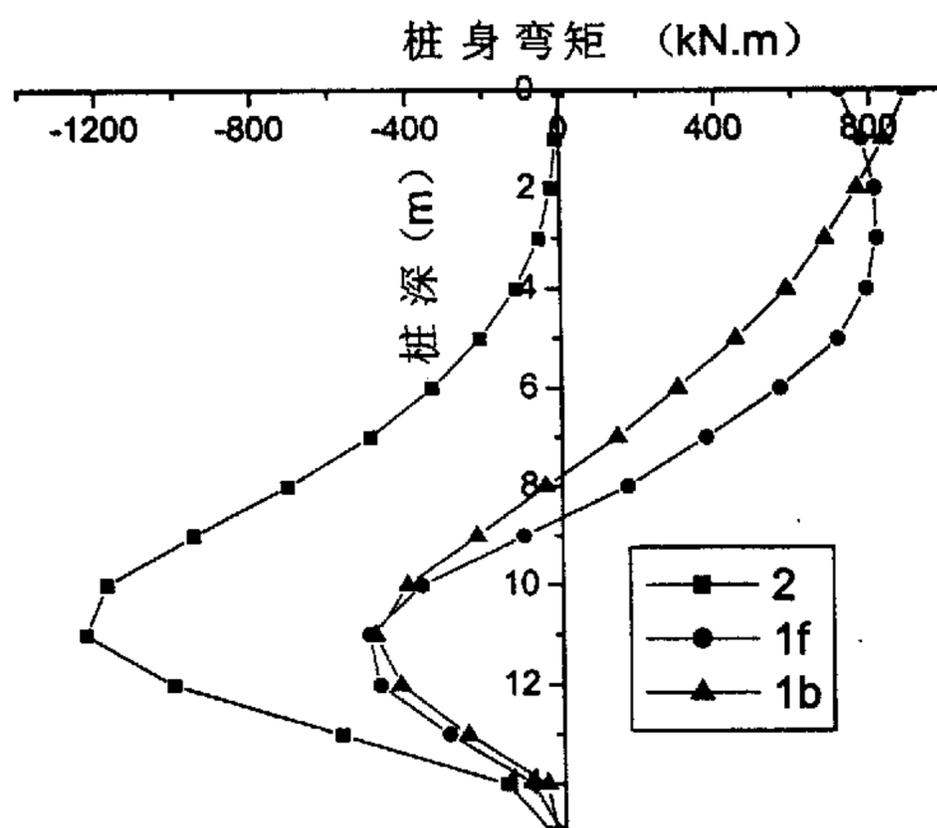


图 5-1 单排悬臂桩与双排桩支护桩身弯矩对比曲线

(2) 图 5-2 和 5-3 表明, 随着基坑开挖深度的增加, 无论是前排桩还是后排桩, 其桩身弯矩均相应地增加, 其反弯点位置也随之不断下移。

(3) 图 5-4 和 5-5 显示后排支护桩长度变化时, 桩身弯矩变化的情况。改变后排桩长度对前排桩桩身弯矩的影响没有对后排桩桩身弯矩产生的影响大; 虽然在适当减小后排桩桩长时, 后排桩桩身弯矩分布虽有较大变化, 但其最大弯矩基本不变, 对整体支护效果影响不大。这一结论和文献[13]较为吻合。

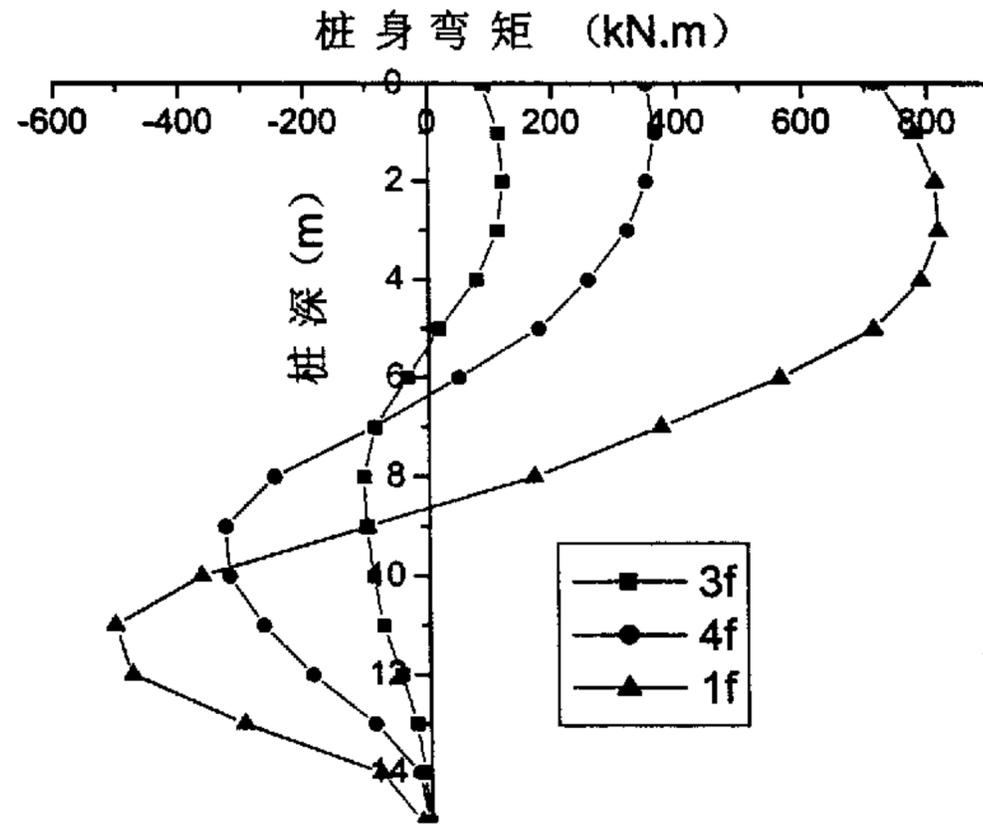


图 5-2 不同开挖深度的前排桩桩身弯矩

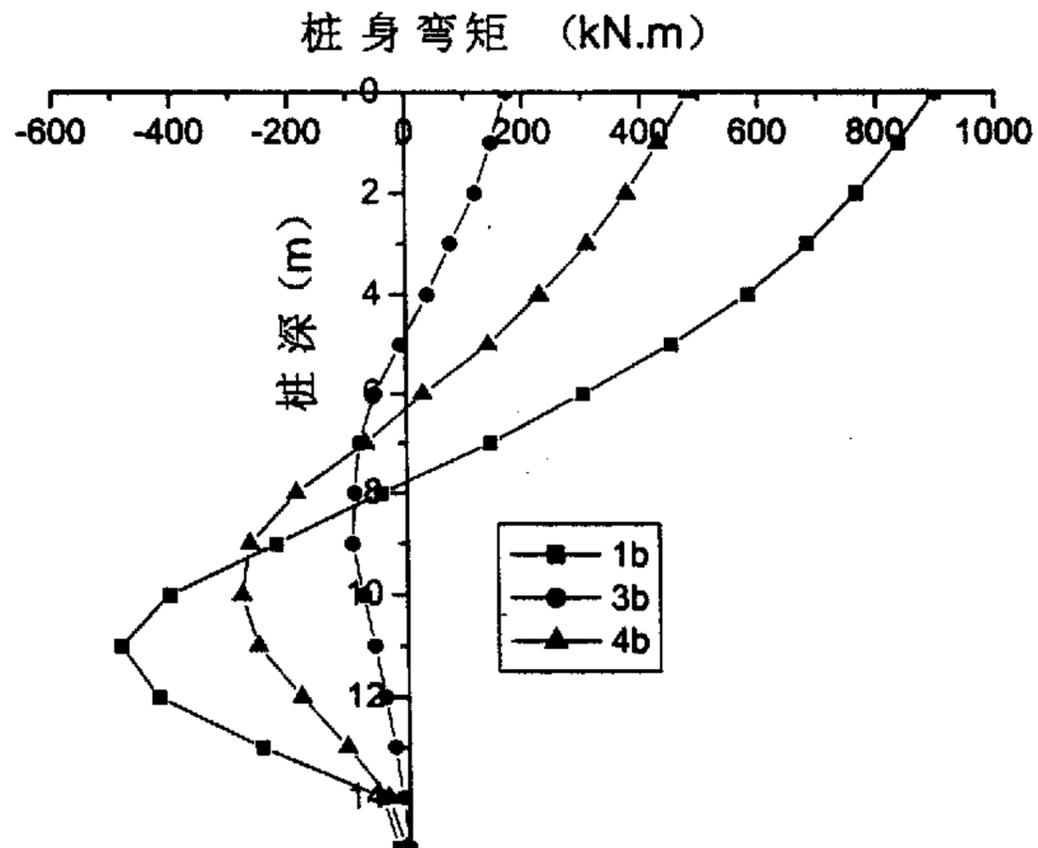


图 5-3 不同开挖深度的后排桩桩身弯矩

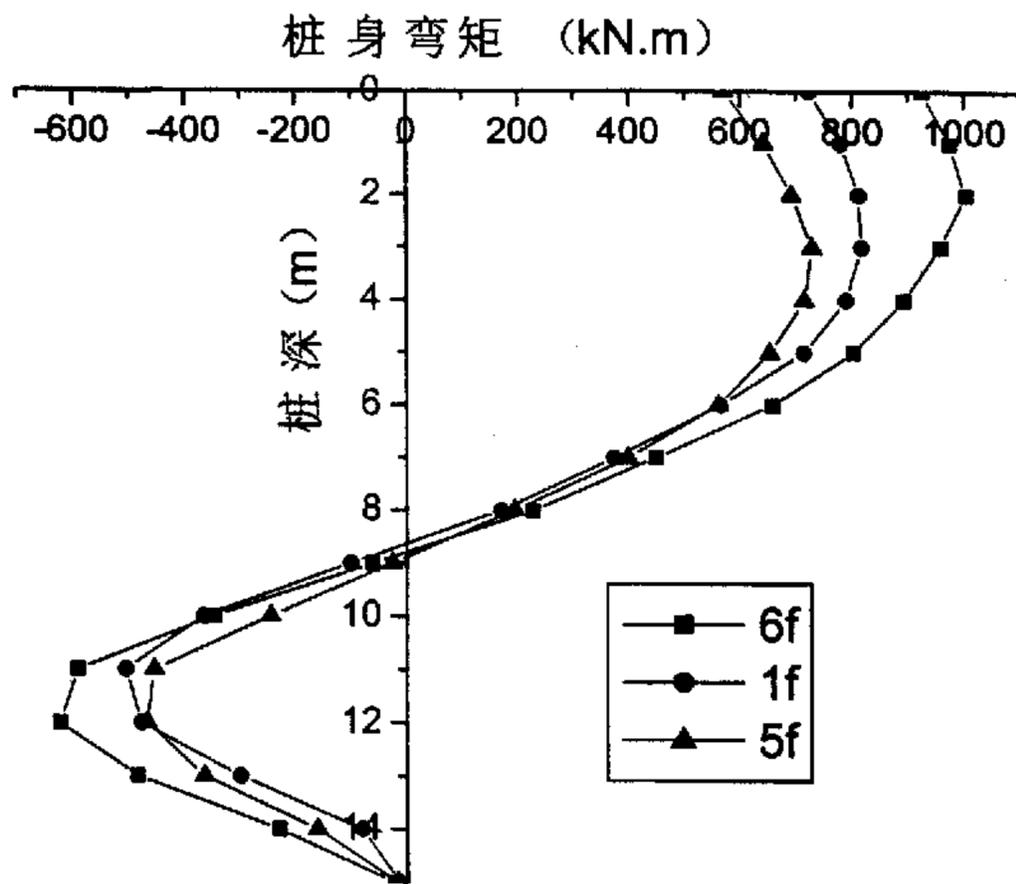


图 5-4 不同后排桩长时的前排桩桩身弯矩变化

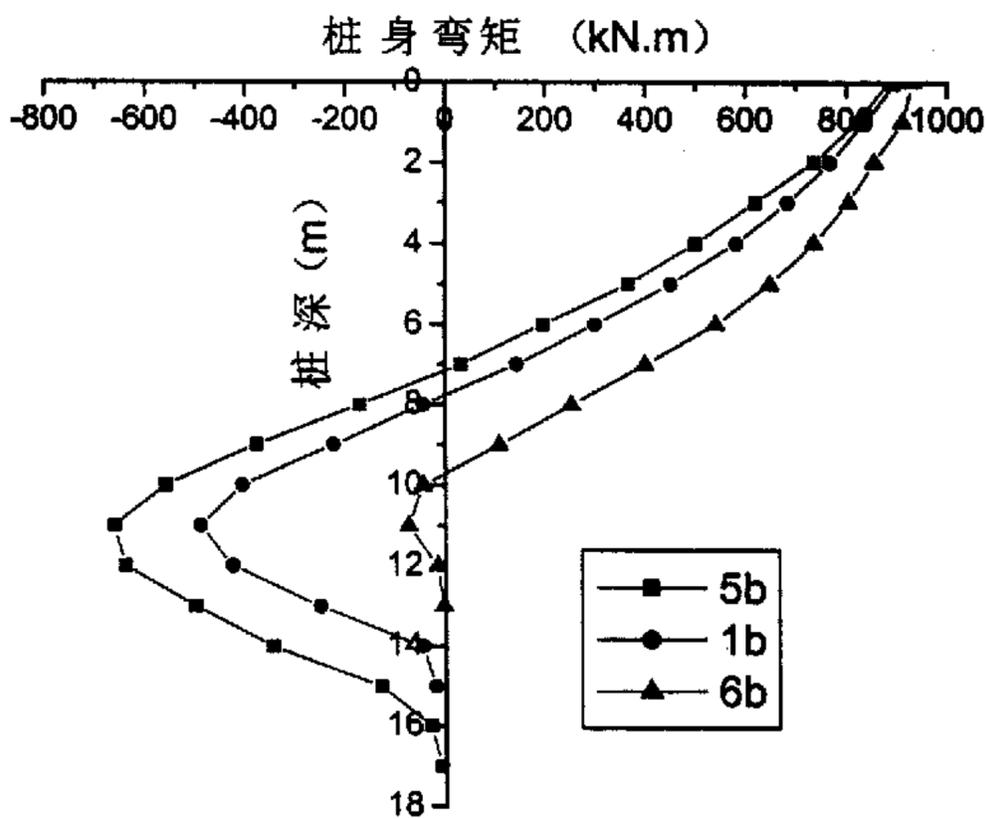


图 5-5 不同后排桩长时的后排桩桩身弯矩变化

(4) 当前排桩桩长变化时, 桩身弯矩亦有一定的变化, 只不过改变前排桩长度对前后排桩桩身弯矩的影响并不大, 如图 5-6 和 5-7 所示。

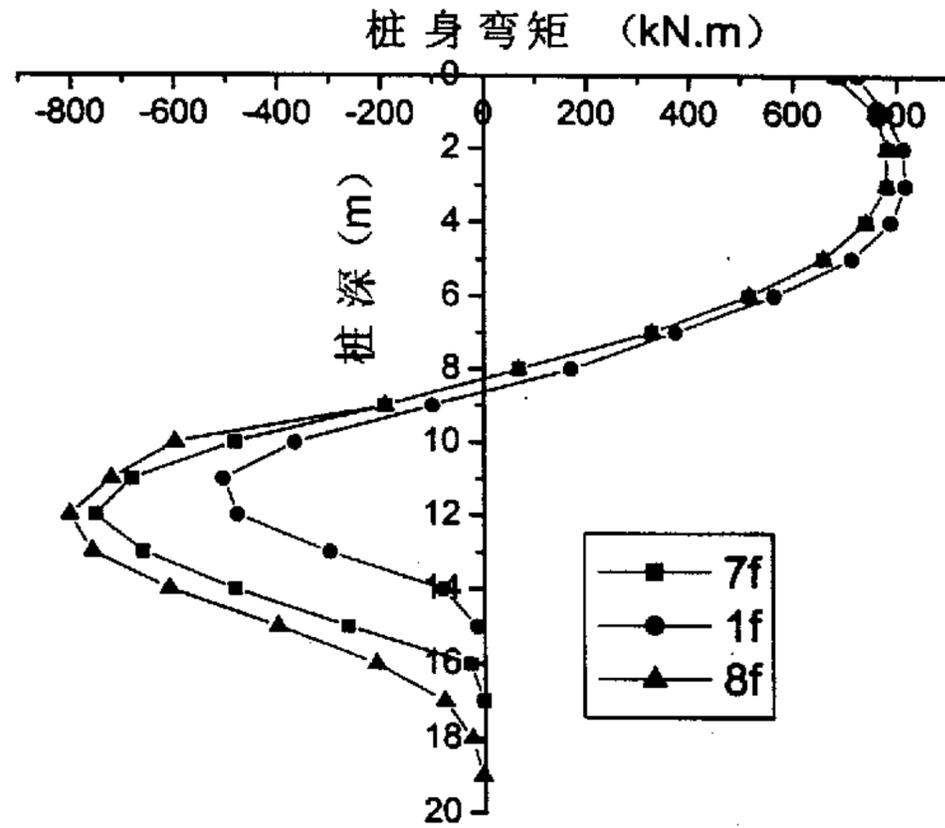


图 5-6 不同前排桩长时的前排桩桩身弯矩变化

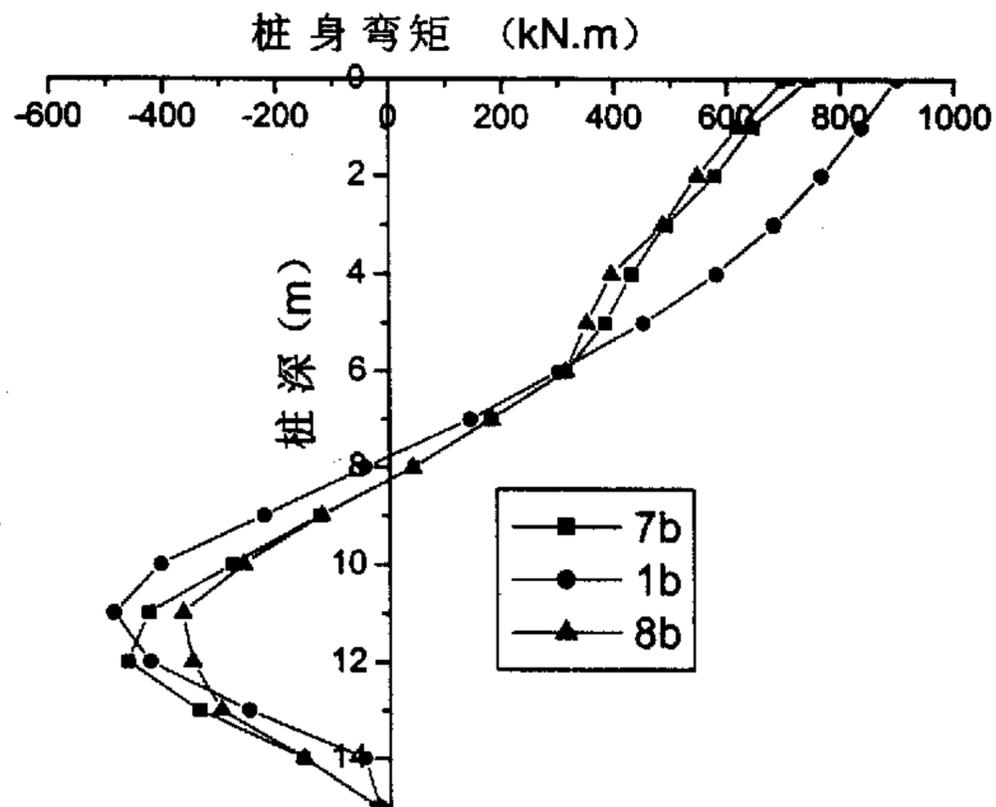


图 5-7 不同前排桩长时的后排桩桩身弯矩变化

(5) 图 5-8 和 5-9 显示了双排桩支护结构排距增大时, 桩身弯矩的变化

情况。随着排距的增大，前排桩桩身弯矩在开挖面以上有一定程度

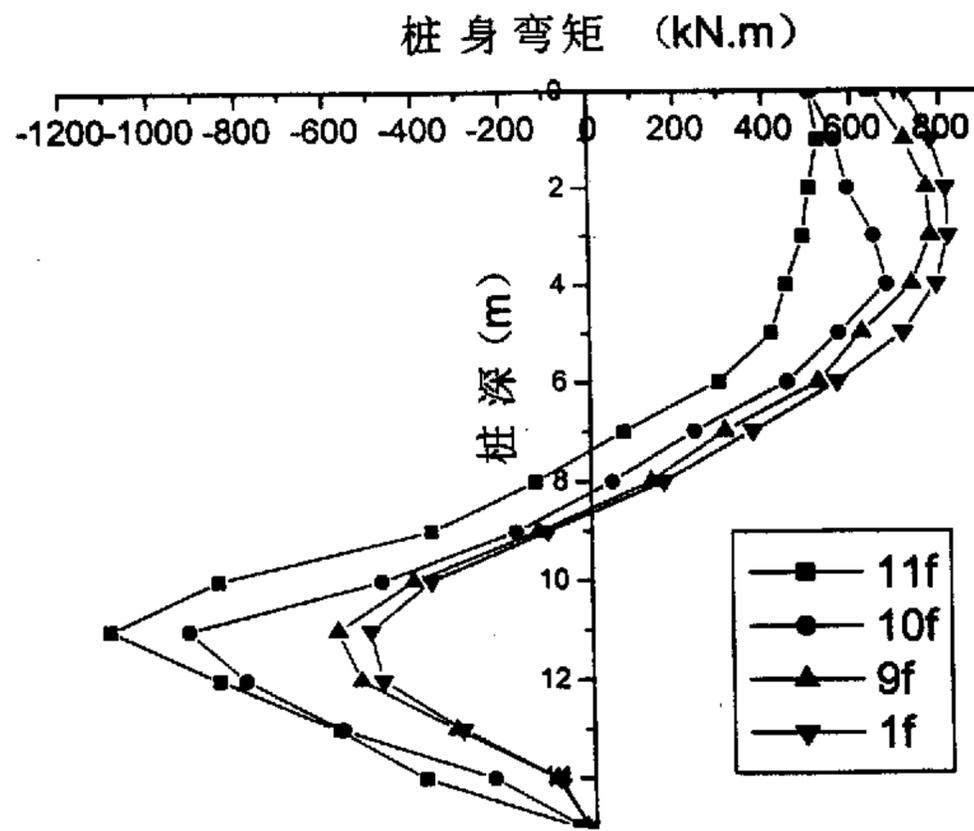


图 5-8 不同排距时的前排桩桩身弯矩变化

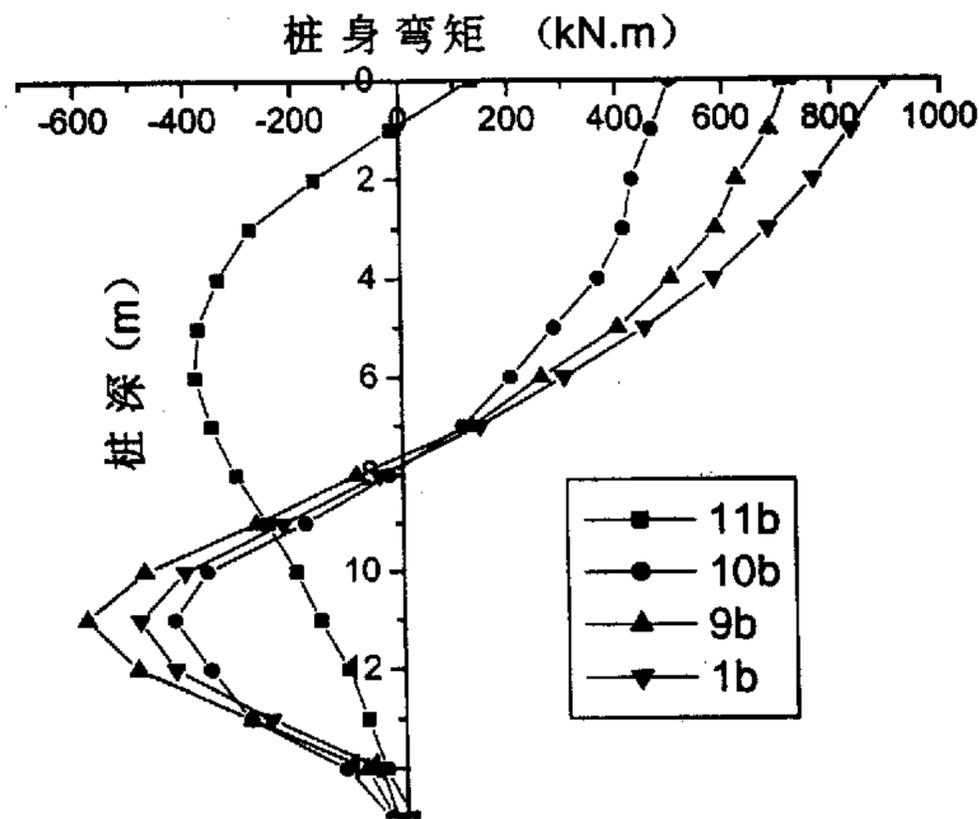


图 5-9 不同排距时的后排桩桩身弯矩变化

的减小，在开挖面以下也有一定程度的增大，其增大程度要比减小幅度大得

多。对于后排桩桩身弯矩，发生了更大的改变，不仅在弯矩的大小上，形状也有极大改变。当排距增大到 $6d$ 时，双排桩支护效果接近于顶部支撑桩，而在排距为 $2d\sim 4d$ 时，双排桩有着良好的调整桩身弯矩的作用。

(6)从图 5-1 至 5-9 可以发现，双排桩支护结构桩身所受弯矩大致呈 S 形，且其在前后排均存在反弯点。一般情况下，前排桩反弯点出现在坑底以下约 $1m$ 处的桩身截面上，这一结论与文献[3]的结论较吻合。而后排桩桩身弯矩一般在桩顶处的最大，这一弯矩由前后排桩所受的土压力和桩顶连梁以及圈梁的约束共同作用产生的，这就从另一个方面说明了在一定的条件下加强前后排桩与桩顶连梁以及圈梁连接刚度的必要性。

综合上述分析，在双排桩支护结构的设计中，要作到合理设计需考虑诸如桩长、桩间距、排距等一系列问题。

结 论

通过前面的理论分析、模型试验结果和计算结果的分析与比较,可以得出以下几点结论:

1. 对目前设计中常用的几种双排桩支护结构的计算方法作了阐述并进行改进,提出了修正的计算模型。计算模型的计算结果与模型试验的结果的比较表明,此修正模型能较好地反映实际结构的受力状况。

2. 模型试验结果和修正的计算模型计算结果均表明,在相同总桩数条件下,双排桩桩身所受最大弯矩值要比单排悬臂桩桩身所受最大弯矩要小得多,并且分布较均匀;而且桩顶位移要小的多。

3. 双排桩支护结构前后排桩桩身的弯矩分布均呈 S 形,并都存在反弯点。一般情况下,前排桩反弯点出现在坑底以下约 1m 处的桩身截面处。后排桩一般在桩顶处的弯矩最大,这一弯矩由前后排桩所受的土压力和桩顶连梁以及圈梁的约束共同作用产生的,这就从另一个方面说明了在一定的条件下加强前后排桩与桩顶连梁以及圈梁连接刚度的必要性。

4. 改变后排桩长度对前排桩桩身弯矩的影响没有对后排桩桩身弯矩产生的影响大;虽然在适当减小后排桩桩长时,后排桩桩身弯矩分布虽有较大变化,但其最大弯矩基本不变,对整体支护效果影响不大。

5. 前排桩桩长变化时,对前后排桩身弯矩的变化没有显著影响。但无论是前排桩还是后排桩,都应保证有足够的嵌固深度。

6. 排距的改变对后排桩桩身弯矩的影响远大于对于前排桩桩身弯矩的影响,尤其是当排距增大到 $6d$ 时,后排桩桩身弯矩大小和形状均发生了极大的改变,此时,双排桩支护效果接近于顶部支撑桩;而当排距为 $2d \sim 4d$ 时,双排桩结构本身有着良好的调整桩身弯矩的作用。

可见,双排桩支护结构作为空间组合类支护结构,在外荷载作用下,由于桩顶连梁和圈梁的约束作用,能自动地调整结构本身的内力,从而适应复杂多边且难以预计的荷载条件,减小了支护体系的水平位移。大量的支护工程都采用了双排桩这种支护形式,说明了其具有优越的工作性能。

本文通过模型试验和理论计算得出的结论,为双排桩的设计和进一步研究提供了参考,但是受作者的水平和其它条件所限,还应对以下问题进行研究:

1. 对双排桩支护结构的桩顶位移作进一步的讨论。

2. 寻求更为适合双排桩支护结构计算的有限元计算模型，有限元法能充分考虑土体的应力与应变关系以及模拟施工过程。

致 谢

本论文的选体和完成是在导师袁文忠副教授的悉心指导和严格要求下完成的。对于本论文中的试验，不仅提供了全部的试验经费，还对试验的全部过程进行指导。袁文忠老师的渊博学识、高尚的人格魅力、平易近人、严谨治学的学者风范以及乐观、正直的人生态度令学生永生难忘，一生受益。在攻读硕士学位的两年多时间里，袁文忠老师和廖师母对作者学习和生活给予了很多关心和帮助，在此，向袁文忠老师和廖师母表示最真诚的感谢！

在过去几年中，还得到了西南交通大学岩土工程系领导和多位教师的鼓励和指导，在此表示由衷的感谢。同时，对协助作者完成论文中模型试验的师弟詹永强、莫阳春以及对论文提出很多建议的师兄谢涛、同学吴同乐、李杰、赵通、刘清华等也一并致谢。

深深地感谢远在河南的父母亲多年来对作者的养育、经济上的支持和精神上的鼓励！

感谢所有给予我帮助的师长、同学和朋友们！

张 雷 军

2004 年 2 月于西南交通大学

参考文献

- [1]郭志昆, 张武刚等. 对当前基坑工程中几个主要问题的讨论. 岩土工程界. 2001.5
- [2]陈忠汉, 黄书秩等. 深基坑工程. 机械工业出版社, 2002.5
- [3] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程设计施工手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.4
- [4] 唐业清, 李启民, 崔江余. 基坑工程事故分析与处理, 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.4
- [5]杜云, 郝庆华. 深基坑现状. 焦作工学院学报. 2000.11
- [6] 余志成, 施文华. 深基坑支护设计与施工. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
- [7]中华人民共和国行业标准. 建筑基坑支护技术规程 JGJ120-99, 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.5
- [8]沈保汉. 深基坑工程技术讲座(2). 建筑技术开发. 1996.10
- [9]孙家乐, 张钦喜, 许宝华. 深基空间组合支护桩设计与工程应用. 工业建筑. 1995.9
- [10]黄强. 深基坑支护工程设计技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1995
- [11]何颐华, 杨斌, 金宝森等. 双排护坡桩试验与计算的研究. 建筑结构学报. 1996.4
- [12]王湛, 刘冰花. 双排桩计算方法探讨. 东北地震研究. 2001.6
- [13]张弘. 深基坑开挖中双排桩支护结构的应用与探讨. 地基处理. 1993.9
- [14]熊巨华. 一类双排桩支护结构的简化计算方法. 勘察科学技术. 1999.2
- [15]蔡袁强, 阮连法等. 软粘土地基基坑开挖中双排桩式围护结构的数值分析及应用. 建筑结构学报. 1999.8
- [16]熊巨华, 李建华. 基坑围护工程中土体水平抗力系数 m 值的分析与确定. 建筑结构. 1998.6
- [17]封盛, 辛业洪. 深基坑双排桩支护结构优化设计. 基建优化. 2001.12
- [18]沈保汉. 深基坑工程技术讲座(17). 建筑技术开发. 1999.4
- [19]宁波市城乡建设委员会. 软土地区深基坑支护工程实例. 北京: 中国建筑

工业出版社, 1997.3

[20]蔡袁强, 王立忠等. 软土地基深基坑开挖中双排桩桩式围护结构应用实录. 建筑就结构学报. 1997.8

[21]林栋. 用双排灌注桩作深基坑围护结构的尝试. 建筑施工. 1994.4

[22]林鹏, 许镇鸿. 软土基坑双排桩支护结构的应用研究. 土工基础. 2000.6

[23] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册, 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.4

[24]丁克, 臧红祥. 单排及双排灌注桩挡墙型式的设计与应用. 江西水利科技. 2001.12

[25]蔡袁强, 赵立倩等. 软土地基深基坑中双排桩式围护结构有限元分析. 浙江大学学报. 1997.7

[26]平扬, 白世伟, 曹俊坚. 深基双排桩空间协同计算理论及位移反分析. 土木工程学报. 2001.4

[27]袁文忠. 相似理论与静力学模型试验. 成都: 西南交通大学出版社, 1998

[28]Yung-Show Fang and Cheng-Yu Chen. Earth Pressures with Sloping Backfill. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 12, 1997

[29]Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechnics. New York: John Wiley and Sons, 1997

[30]桩基工程手册编委会. 桩基工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997

[31]许波, 刘征. Matlab 工程数学应用. 北京: 清华大学出版社, 2000

[32] 张铮, 杨文平等. Matlab 程序设计与实例应用: 北京: 中国铁道出版社, 2003

[33]刘成宇. 土力学. 成都: 西南交通大学出版社, 2000

[34]钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 (第二版). 北京: 水利电力出版社, 1994

[35]中华人民共和国行业标准. 建筑地基基础规范 (JGJ94-94). 北京: 人民交通出版社, 1995

[36]程知言, 裘慰伦. 双排桩支护结构设计计算方法探讨. 地质与勘探. 2001.3

[37]林栋. 双排桩深坑支护结构在宏利大厦工程中应用. 福建建筑科技. 1994.4

[38]林鹏, TSUI.Y. 双排桩结构在失稳基坑中的补强作用. 工业建筑. 2002.5

[39]王子辉. 非连续双排桩支护结构设计方法研究与工程应用. 建筑技术开发. 2002.2

- [40] Behavior of Pile Subject to Excavation-Induced Soil Movement. C.F.Leung, Y.K.Chow, R.F.Shen. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. November. 2000(947)
- [41] Rowe P W. Application of Centrifugal Models to Geotechnical Structure, Soil Mechanics, Recent Developments Sellen W H. Pty. Ltd., Australia, 1975:1~26
- [42] Base Stability of Deep Excavation in Anisotropic Soft Clays. Andrew J.White. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. August. 2000(757)
- [43] Hashash, Ground Movement Prediction for Deep Excavation in Soft Clay. Journal of Geotechnical Engineering. 1996,122(6)
- [44] Shen, C.K.&Bang, S.&Herrman, L.R.Ground Movement Analysis of Earth Support System. J.Geotech. Eng. Division, ASCE, 1981, 107(12): 1609~1623
- [45] Peck R B. Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground. 7th ICSMFE, State of the art Volume, 1969, D225~290
- [46] Bielak, J. (1976). "Modal Analysis for Building-Soil Interaction", Journal Engineering. Mech. Div., ASCE, 102(EM5), 771~786
- [47] Robert M.Koerner, Construction and Geotechnical Methods in Foundation Engineering, Mc Grawhill Book company, New York, 1984
- [48] Terzaghi, K.&Peck, R.B.Soil Mechanics in Engineering Practice. 1967
- [49] (美)YANG H.HUANG 包水纲等译. 土坡稳定分析, 北京: 清华大学出版社
- [50] Anon. Foundations and Earth Structures, Design manual 7.2(USA). India: Scientific Publishers, 1985

攻读硕士学位期间发表的论文

1. 张富军, 刘晋. 控制爆破在冷水铺站施工中的应用. 四川建筑, 2003 年第 6 期
-