

摘 要

城市建设的日新月异，带动了城市地下空间的发展。目前，济南市各类用途的地下空间得到开发利用，诸如地下停车场、地下商城、地下仓库、地下人防工程等各种地下设施。这些地下空间的建设，多采用费用低廉、施工方便的明挖法，由此而产生了大量深基坑工程，且城市基坑工程往往处于地上建筑和地下管线及构筑物的密集地区。本文着重阐述了深基坑工程在济南市的发展现状，在一定程度上总结了适合该地区的一些设计与施工经验。同时，提出将来发展过程中一些亟待解决的问题。本文对此具体作了以下工作：

1、结合环境地质条件与深基坑工程特点，根据济南市特有的工程地质和水文地质条件，划分出硬质土区、中硬土区和软弱土区三类典型地层。

2、通过对济南市的深基坑工程典型地层分区，总结了济南市运用校核设计方法的设计思路，较全面介绍了深基坑工程主要支护结构的设计方法，并针对济南市不同典型地层条件下的支护结构设计的总体思路进行了探讨，提出了济南市深基坑工程设计过程中应注意的问题。

3、根据场地环境条件、基坑开挖深度和规模以及场地地层结构与工程性质，就济南市深基坑支护工程典型地层分区，总结了支护结构选型的原则。

4、就济南市深基坑工程而言，解决好软弱土区基坑降水对周边环境的影响是重中之重，故强调了软弱土区的深基坑工程必须设置竖向截水帷幕的设计思路；而软弱土区的支护结构选型具多元性，应综合各方面的因素进行支护结构选型。

5、根据目前济南市深基坑工程的现状，提出作者的一些有建设性的建议。

关键词：济南市 典型地层 深基坑 设计方法 结构选型

Abstract

The development of which has pushed on the development of underground space. Now, the underground space of Jinan city various uses gets development to use, such as underground parking places, underground markets, underground storehouse, servant guards against the various underground facilities. The construction of these underground spaces adopts the clear France of digging with cheap cost and convenient construction, has produced plenty of deep base hollow projects from this, and city base hollow project is often in the on the ground architectural and underground dense region of pipeline and construction thing. The works which have been done in this study are as following:

Firstly, Combine the environment geology condition with the deep foundation pit engineering characteristics, according to the special engineering geology and the hydrology geology condition of jinan city, divide the line a hard quality soil District and win the hard soil area and weak three types of typical model geologic stratus of soil area.

Secondly, through analyzing the area of cent of the deep foundation pit engineering typical model geologic strata of jinan city, tally up the design way of thinking of the south city pit in the usage school design method of jinan city, Compared to introduce the foundation pit engineering the design method that deeply is main to pay to protect the structure completely, and aim at under the different typical model geologic strata condition of jinan city of paid the total way of thinking of protect the structure design to carry on the study, The deep foundation the pit engineering that put forward jinan city designs the process in the problem that should notice.

Thirdly, according to the place environment condition, the foundation pit to dig the depth and scale and the place geologic strata structure and the engineering property, for the area of cent that protects the engineering typical model geologic strata of the deep foundation the pit of jinan city, tally up to pay to protect the principle that the structure chooses the type.

Fourthly, In regard to the deep foundation pit engineering of jinan city, the influence that solves the very weak soil area foundation pit to decline the water to the periphery environment

is heavy to win of heavy, so emphasized the deep foundation the pit engineering of the weak soil area and have to establish the toward the design way of thinking that cuts the water prudes; But the weak soil area pays to protect the structure to choose the type to have the diverse, should synthesize the factor of everyone noodles to carry on to pay to protect the structure to choose the type.

Fifthly, through summarizing the design and construction of foundation pits in Jinan city, some perspectives and suggestives which are objective and practical were proposed in this paper.

Keyword: Jinan city
Typical layer
Deep foundation pit
Design of the method
The structure chooses the type

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：郝晓平 日期：2008.11.1

关于学位论文使用授权的声明

本人同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的印刷件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：郝晓平 导师签名：李广 日期：2008.11.22

第一章 绪论

1.1 引言

改革开放以来，国民经济快速发展，促进了济南市城市建设的发展步伐，高层建筑的开发建设、市政设施的完善改造以及地下商城、地下车库等地下空间的开发利用，产生了大量的深基坑工程。深基坑工程往往处于市区人口密集区，施工时不仅要保证基坑边坡的稳定，还要满足变形控制要求，以确保基坑周围原有建筑物、构筑物、各种地下管线及道路的安全。济南城市建设的不断发展，对深基坑工程的设计方法、支护结构选型和施工技术提出了更高的要求。

深基坑工程是土力学与基础工程中的传统课题，同时又是一个综合性的岩土工程问题，既涉及土力学中典型的强度、稳定与变形问题，同时还涉及土与支护结构的共同作用问题。随着科学技术的发展，深基坑工程设计方法和理论在土力学的基础上，逐渐形成了理论体系。

深基坑支护结构设计和选型应综合考虑场地工程地质与水文地质条件、基坑开挖深度、降排水条件、周边环境对基坑侧壁位移的要求、基坑周边超载、施工季节、支护结构工作期限等因素，做到因地制宜，合理设计、精心施工、严格监控。

目前，在实际工程中，还存在着两种极端的现象：一是由于设计和施工方面的不合理而导致深基坑工程事故，造成重大经济损失，特别是引起基坑周边的既有建筑物、道路以及水、电、煤气管网等主要地下管线设施的破坏；二是支护结构设计偏于保守，造成浪费。因此，如何设计出安全可靠且经济合理的基坑支护结构已成为岩土工程领域研究的一个新课题。岩土工程分析在很大程度上取决于工程师的判断，具有很强的艺术性。岩土工程设计具有概念设计的特性，深基坑支护设计概念设计的特性更为明显。

由此，必须积累并总结大量的深基坑工程的成功经验和失败教训，运用科学的监测、检测手段，理论与实践相结合，探讨和研究济南市典型地层条件下深基坑工程支护设计方法和结构选型，总结济南市深基坑支护工程的施工经验，以适应当前和今后济南市深基坑工程发展的需要。

1.2 国内近年来深基坑方面的研究和发展现状

随着我国建筑业的发展, 基坑支护在建筑基坑中越发凸现出其重要性。如何保证基坑工程的安全可靠, 不但关系到工程本身的顺利进行, 更重要的是关系到周边环境的安全问题。诸多学者在深基坑工程方面做了不少研究和探讨:

王伟^[17]于 2002 年对若干典型工程实例的总结, 针对岩土工程中诸多问题的不确定性, 提出了基坑工程的概念设计方法, 并论述了与其相关的工程设计中可能遇到的诸多问题。

白江^[18]于 2004 年对放坡开挖深基坑的环境效应进行了分析, 从土体变形的环境效应、井点降水环境效应等方面进行了论述, 提出了放坡开挖的环境保护对策以及应采取的措施。

钱磊等^[21]于 2001 年对基坑工程设计现状, 就基坑工程中一些设计人员较为关心的问题进行了探讨与总结, 针对土体抗剪强度的确定、土压力的计算、基坑围护结构的计算方法、支撑结构的设计计算、基坑稳定性验算、基坑工程的变形计算及监测等给与了一定的探讨和剖析。

候学渊等^[27]于 2000 年对基坑工程的设计应该从强度控制设计向变形控制设计转变, 才能满足日益严格的环境要求。同时, 基坑工程的设计与施工紧密结合是基坑工程的必然趋势。强调基坑工程的设计参数应该通过现场反分析求得。

金造时等^[28]于 1999 年结合基坑工程设计的经验, 对基坑工程设计中必须重视的若干技术问题如支护结构、地下水处理的选择, 土的内聚力 c 值和内摩擦角 ϕ 值的选用, 土压力的计算等进行了较细致的探讨; 简介了常用的基坑工程设计方法和应该注意的事项。

张锦屏^[29]于 2003 年通过对基坑工程的特点和若干问题分析, 指出了当前我国基坑工程在设计、施工和监理工作中应当注意的问题, 希望引起岩土工程界的重视。

刘辉等^[30]于 2004 年论述了在深基坑施工过程中, 只有对基坑支护结构、基坑周围的土体和相邻的构筑物进行全面系统的监测, 才能对基坑工程的安全性和对周围环境的影响程度有全面的了解, 以确保工程的顺利进行。

唐传政等^[31]于 2003 年对基坑工程设计中容易忽视的一些问题作了论述, 并分析了基坑工程设计与勘察、施工、监测的相互关系。

杨子胜等^[32]于 2004 年着重介绍了目前国内深基坑工程在设计、施工、管理等主要方面的发展状况和工程施工中存在的主要问题,并在此基础上提出了深基坑工程施工中应当注意的一些事项。

刘二栓^[33]于 2004 年指出深基坑工程是施工开挖与结构工程、岩土工程、环境工程等诸多学科的交叉,是一项涉及范围广且具有时空效应的综合性工程。通过对以往经验的研究,摸索出深基坑工程的特点及目前存在的主要问题。

唐益群等^[34]于 2002 年以上海某基坑工程为背景,对土压力计算时 c 、 ϕ 取值,基坑降水以及施工监测等问题进行了总结探讨。

张有等^[35]于 2005 年介绍了基坑工程的概念、特点,阐述了基坑工程设计与施工的原则和内容,并对目前基坑工程设计与施工中存在的问题进行了详细分析。

贺瑞霞等^[36]于 2005 年介绍了随着我国高层建筑的不断发展,地下空间的开发和利用显得越来越重要,深基坑设计与施工技术近几年来取得了长足的进展。作者对目前深基坑工程中常用的支护结构形式、设计计算方法及施工的现状进行了分析,并提出了今后发展的方向。

杨育文等^[37]于 1999 年介绍了在建造深基坑工程支护选型专家系统过程中,通过对专家知识的分析后认为支护选型要全面地考虑支护主类、复合型支护、支护亚类及地下水处理方案等才比较合理,最后举例用新的产生式表达出这些专家知识。

阳吉宝等^[38]于 2000 年介绍了基坑工程施工经常遇到临近建筑物保护问题。简要讨论了在此情况下,基坑方案设计与施工时,必须引起重视的若干问题,以及建筑物基础沉降控制措施。

王曙光等^[39]于 2000 年介绍了基坑工程及专家系统技术,提出用专家系统解决基坑工程中问题的观点,并介绍了一个实例,证明了专家系统作为基坑工程设计的计算机辅助手段是真实可行的。

徐杨青^[75]于 2005 年基于深基坑工程的知识 and 经验,分析了深基坑工程设计系统的特点,即是由一个时间维、逻辑维和方法维组成的三维系统。其中,方案是深基坑工层优化设计中的关键环节。从安全可行、经济合理、环境保护、施工便捷四个方面,建立了深基坑工程设计方案评价指标体系,并采用多目标模糊决策理论推导了深基坑工程设计方案优化决策与评价模型,并应用于工程实践。

王政富等^[40]于 2003 年阐述了时空效应规律在软土深基坑工程中的运用情况,实践证

明,运用时空效应规律,能可靠而合理地利用土体自身在基坑开挖过程中控制土体位移的潜力而达到保护环境的目的。

王照宇^[76]于 2004 年根据基坑开挖工程的特点,提出考虑位移效应的土压力计算公式,以便更好地模拟实际情况。在弹性地基梁抗力法的基础上,采用考虑位移效应的土压力计算公式,对土压力计算模式进行了修改,并通过算例,进行了实用计算和分析。

以上各位学者和专家的研究主要从我国大范围内的深基坑工程设计和施工为着眼点,取得了深基坑工程的概念设计理念、施工方法、影响支护结构体系稳定性的 c 、 ϕ 指标等研究成果,为各地区深基坑工程的设计与施工提供了适合该地区值得借鉴和学习经验。

1.3 济南市深基坑工程现状

2006 年 11 月 15 日济南市建设委员会印发了《济南市深基坑工程管理(暂行)规定》的通知,文件中所称深基坑,是指开挖深度超过 5 米,或深度虽未超过 5 米,但地质条件和周围环境较复杂的基坑。深基坑工程包括工程勘察、围护结构与施工、土方开挖、地下水及控制、基坑及其相邻建筑物和构筑物变形监测等内容。该通知进一步加强对深基坑工程的管理,确保建设工程的顺利进行及相邻建筑物、构筑物、道路及地下管线的安全使用。

1.3.1 济南市深基坑的发展基于以下背景:

1、二十世纪八十年代以来,济南市高层建筑、超高层建筑蓬勃发展,由此产生了大量深基坑工程,且规模和深度不断加大;

2、随着城市建设的发展,市区范围内,人口密度增加,地价上涨,地上可用面积越来越少,向地下发展渐成趋势。为提高地下空间利用率,综合管线共同沟、地下停车场、地下商场等有关服务设施,日渐增多;

3、人防设置的要求;

由此可知,研究和探讨深基坑工程在济南地区的应运而生是必然的趋势。

1.3.2 济南市深基坑工程发展及其现状

进入二十世纪八十年代以来，济南地区的深基坑工程盛行，主要集中在绕城高速以内的区域。济南市深基坑工程的开挖深度最深已达到 21.2m；最大平面尺寸已达 290.0m×220m，面积约 63800m²，济南市全民健身中心工程基坑平面尺寸达到 282.9m×216.2m，最深达 12.0m。济南市的深基坑工程主要是在开发和建设高层建筑的同时展开的，主要有：

东部：百花小区 1#商住楼、嘉恒环球广场、海蔚广场、济南市中心医院病房综合楼等；

南部：济南市供电大楼、千佛山医院综合病房楼、山东大学西校区 4#高层住宅楼等；

西部：莱钢一（二）期住宅小区、山东邮电通讯物资大厦、艺术大厦等；

北部：银座商城北园店、北洋大酒店、济南卷烟厂经贸大厦、嘉汇环球广场等。

中部：不夜城、泉城广场、济南珍珠泉大厦、鲁能康桥小区、泉城路共同沟拓宽改造工程、政协大厦、济南市青少年宫教学楼、济南蓝石商务中心、明珠广场、中银 A 座、济南市中级人民法院审判大楼、山东省电力东兴里 2[#]、3[#]高层住宅楼、齐鲁商会大厦、济南五彩云大厦、利博大厦、圣凯摩登广场、中银商城、索菲特、鲁能电力烧鹅仔、经四路人防商城、皇冠假日酒店等。

济南市的深基坑工程主要集中在市区的主要道路两侧的繁华地段，而且基坑的规模逐渐增大，对深基坑工程的设计与施工提出了更高的要求和挑战。

1.4 济南市深基坑工程的特点

1.4.1 深基坑工程的一般特点

1、深基坑支护是土力学与基础工程施工的传统课题，它涉及土力学中典型的强度与稳定问题，又涉及变形问题，还涉及土与挡土支护结构的共同作用问题。总之，它是一项综合性的岩土工程难题。加之，基坑深度愈来愈深，基坑开挖面积大，长度与宽度有的达百余米，更突出了这一课题的难度。这就要求，作为深基坑工程工作人员，必须具备有关岩土工程和结构工程扎实的基础知识。

2、随着城市地下空间的开发利用，对深基坑支护技术提出了更严格的要求，不仅要确保挡土支护结构的强度要求和边坡的稳定，还要满足变形控制的要求，以确保基坑周

围的已有建筑物、地下管线及道路的安全。这就要求，在设计深基坑工程时，必须认真细致地考虑环境效应。

3、深基坑工程的造价，在整个土建工程造价中占有相当高的比例，深基坑工程的成败是整个土建工程能否顺利完成的关键。据统计，高层建筑的基础工程造价一般为建筑物总造价的 $1/4\sim 1/3$ ，工期约占总工期的 $1/3$ ，而深基坑工程造价可占工程总造价的 10% 以上。这就要求，在设计深基坑工程时，在确保深基坑工程安全的同时，也应提出合理的方案，以适当地降低其造价。

4、深基坑工程的施工对象是卸荷土体，其土体性质千变万化，不易控制，施工及设计人员必须对基坑开挖的各种施工技术、场地地质条件有了充分认识与掌握之后，方能适应现场各种状况，做到措施得当。这表明深基坑工程既有很强的地域性，又有很强的特殊性，因此，对其他深基坑工程的经验不能盲目照抄照搬。

5、深基坑工程施工包含挡土与支护、降水与截水和挖土等紧密相连的环节，其中某一环节失效将会导致整个工程的失败。深基坑工程是临时性工程，安全储备较小，具有较大的风险性，深基坑工程施工必须谨慎、细致，措施得力、稳妥。

6、深基坑支护结构（悬臂式和单支点、多支点）与一般挡土墙受力机理不同，其土压力计算、稳定与变形验算等计算理论、方法还不完善、不成熟，因此原位测试技术和信息法施工显得更为重要。

7、深基坑工程具有较强的时空效应。基坑的深度和平面形状对基坑挡土支护体系的稳定性和变形有较大的影响，因此在设计时需要注意深基坑工程的空间效应。同时需要注意的是，土体是蠕变体，特别是软粘土具有较强的蠕变性，作用在挡土支护结构上的土压力随时间变化大，同时由于蠕变作用将使土体强度降低、土坡稳定性变小，因此在设计时需要注意深基坑工程的时间效应。

8、鉴于深基坑工程的复杂性和不确定性，迄今对深基坑挡土支护还没有一个成熟的理论和计算模式，这对深基坑工程的设计和施工来说也是一个最大的难题。而在其他各地相继编制了适合该地区的规范和规程之外，而济南市还没有摸索出适合本市的规范和规程。希望在颁布《济南市深基坑（暂行）管理规定》的基础上，能够为济南市深基坑的发展和建设积累适合自身的规律，并指导以后的工程实践；

9、岩土性质千变万化，地质埋藏条件和水文地质条件的复杂性，往往造成勘察所得的数据离散性大，且往往难以全面代表土层的总体情况，给深基坑工程的设计和施工增

大了难度。

1.4.2 济南市深基坑工程的区域性特点

1、岩土工程性质多样

济南市南部为绵延起伏的山区，中部为山前倾斜平原，北部为冲积平原，同时，还有黄河、玉符河、北沙河、巨野河、港沟河、小清河等河流和大明湖等湖泊，形成了靠近山区的硬质土二元结构地层、靠近河流或湖泊的软弱土地层以及广泛分布的中硬土地层。由此，在不同工程性质地层中开挖，对于深基坑工程而言，支护设计方法与结构选型存在差异。

2、水文地质条件特殊

市区内不仅分布趵突泉等泉群、大明湖，还广泛分布多条河流，特有的环境地质特征，形成了济南市水位埋藏浅，部分区域地下水丰富的特点。在城区开发建设的深基坑项目，大多数必须考虑降低地下水位的处理措施。而在建筑物密集地区，特别是软弱土地地区必须设置止水帷幕和回灌措施，来保证周围建筑物和市政管线的安全正常使用。在市区泉群范围内开挖的深基坑工程可能会遇到解决承压水的问题。

1.5 济南市深基坑工程的难点

1.5.1 深基坑被支护土体结构性差、土体软弱

老城区尤其大明湖周围区域，填土厚达 5.0~8.0m，且下伏有湖相沉积的流塑~软塑的粘性土。北园路以北区域，为黄河、小清河冲积地层，以稍密状态的饱和粉土为主，振动析水，在此地区施工的深基坑工程，支护结构施工困难。

1.5.2 深基坑地下水控制要求严格

除靠近南部山前区域外，济南市区北部潜水地下水位埋深较浅，尤其在大明湖周边，地下水位埋深仅为 0.8-2.5m，北园路及其两侧地下水位在 2.0 m 左右。同时，目前济南市政府将“保泉护泉”作为城市可持续发展的重要标志和任务。丰富的地下水及高地下水位给深基坑工程的设计与施工造成诸多不利影响；

1.5.3 深基坑工程周边环境趋于复杂

济南市主要高层建筑物都集中在市区，而市区的建筑密度大、人口密集、交通拥挤、施工场地狭小、深基坑工程施工的条件均很差；已有建（构）筑物、地下管线、旧有的地下人防设施等环境因素，已成为新建项目深基坑工程设计与施工过程中必须考虑的方面。

1.5.4 深基坑工程控制变形措施须加强

深基坑开挖所引起的基坑周围地基土的变形是不可避免的，对周围环境势必有所影响。要消除这一影响，尤其对大明湖周围的软土区域，是一个很大的难题。不仅要考虑对邻近建筑物的影响，还要考虑对周围地下的煤气、电缆、电讯、上水和下水等管线的影响。深基坑工程与周围环境的应辩证地对待，应采取切合实际的措施将影响降低到允许限度以内。济南市区域性岩土体工程地质、水文地质以及复杂的周围环境条件，控制变形成为深基坑工程支护结构选型和地下水控制措施的难点。

除此之外，社会环保意识的增强，由于事前估计不足，基坑降水造成邻近建筑物开裂等事故，造成被迫停工、上诉法院之事屡见不鲜；随着市场竞争加剧，开发商对降低深基坑工程的造价、加快工程进度和确保工程质量的要求也越来越高，相应地增大了施工单位的难度。由于恶性压价而造成深基坑工程事故也不在少数；勘察所得数据离散性大，无法以点带面，给深基坑工程的设计和施工增大了难度。

本文旨在通过对济南市的典型地层进行分区，运用校核设计的思维方式，从深基坑工程设计与施工角度，尽可能全面的总结济南市不同典型地层条件下的深基坑工程支护设计方法和结构选型，探索出适合各典型地层条件下设计和选型的总体思路，并提出设计选型过程中应注意的问题和采用的方法，针对目前济南市深基坑工程存在的问题提出作者的想法和建议。

1.6 本文研究的内容和方法

深基坑工程的设计方法和结构选型是地下工程施工中极其丰富而富于变化的领域，包含土力学强度与稳定问题，位移变形问题，土与支护结构相互作用问题以及环境岩土工程问题。深基坑工程具有很强的区域性。因此，本文研究的内容在于探讨适合于济南

市深基坑的设计方法和结构选型，为岩土工作者提供较好的素材。

1.6.1 研究内容

1、结合环境地质条件与深基坑工程特点，根据济南市特有的工程地质和水文地质条件，划分出硬质土区、中硬土区和软弱土区三类典型地层。

2、根据场地环境条件、基坑开挖深度和规模以及场地地层结构与工程性质，就济南市三个典型的地层结构，总结了深基坑工程支护结构的选型原则。

3、就济南市深基坑工程而言，解决好软弱土区基坑降水对周边环境的影响是重中之重，故强调了软弱土区的深基坑工程必须设置竖向截水帷幕的设计思路；而软弱土区的支护结构选型具多元性，故应综合各方面的因素进行支护结构选型。

4、通过对济南市的深基坑工程典型地层分区，运用概念设计模式，从深基坑工程设计角度，尽可能全面总结济南市不同典型地层条件下的深基坑工程支护结构的选型和地下水控制方案的选择，并对各类典型地层条件下设计选型总体思路进行了探讨，提出了设计选型过程中应注意的问题和采用的方法。

1.6.2 研究方法

本文主要以济南市深基坑工程实践经验总结为主，介绍了典型地层条件下济南市深基坑支护设计方法和结构选型，为济南市深基坑工程的设计与施工，尽可能地提供一些具有现实意义的思路。

1.7 本章小结

1.7.1 本章叙述了国内以及济南市深基坑工程的发展现状，总结了深基坑工程的一般特点和济南市深基坑工程的区域性特点、以及设计与施工过程中的难点，强调了深基坑工程的发展必须积累济南市当地的工程实践经验，并且应与理论相结合，由此才能总结出适合于济南市自身的深基坑工程知识结构体系。

1.7.2 本章概述了本文的主要工作内容和方法，旨在结合作者多年的深基坑工程实践经验，较全面地探讨典型地层条件下济南市深基坑工程支护设计方法和结构选型。

第二章 济南市深基坑工程典型地层条件

济南市地处鲁中山地的北缘，南依泰山，北临黄河，地形南高北低。平面分布具有明显的东西向带状分布的特征。南部为绵延起伏的山区，山势陡峻，深沟峡谷，绝对标高 500~600m；中部为山前倾斜平原，绝对标高一般 30~50m；北部为冲积平原。同时，由于特殊的地质构造等因素，成就了济南“泉城”的美誉，市区地下潜水水位常年较高。因此，总结济南市典型地层的分布及特征，对研究深基坑支护设计方法和结构选型具有重要意义。

2.1 济南市环境地质特征

2.1.1 济南市地形地貌

根据济南地区地貌特征，将济南市划分为平原地貌与山地地貌两个 I 级区，依成因形态划分 II 级区(见表 2-1)。济南地区自东南至西北地形由高渐低，地貌成因类型依次为：低山区、残丘丘陵区、冲—洪积平原区、冲积平原区、岩溶地貌区。

表 2-1 地貌分级表

I 级		II 级	微地貌
平原地貌	堆积地貌	冲积平原	河漫滩、人工堤、沼泽、鱼塘
		冲洪积平原	河床、阶地、冲沟、堤坝
山地地貌	侵蚀地貌	残丘、丘陵	冲沟、“U”型谷、梯田、陡崖、崩塌
		低山	“V”型谷、人工陡崖、滑坡
	岩溶地貌	岩溶化丘陵、低山	溶洞、溶沟、溶槽

1、冲积平原

分布在市区的北部黄河两岸，微地貌变化受黄河、小清河控制。黄河以北地区地貌类型单一，属黄河冲积平原，地势平坦，地面标高约 23~26m，微地貌发育。物质组成主要受流水堆积作用控制，其岩性以粉土为主。

2、冲积—洪积平原

分布于山前地带，地势为南东高北西低，坡度一般 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。千佛山断裂以东地区：地形微倾北东，坡度一般 8° 左右，标高 30~150m，地形变化大，冲沟短而浅，数

座残丘呈串珠状展布；千佛山断裂至玉符河地区：地形北西倾斜，北部冲沟不发育，地势较平坦。玉符河冲积扇面积约 98km²，在罗而庄出口呈扇形展布，倾角 5°~10°，冲积扇颗粒粗，沉积物的厚度由南向北逐渐增大，下游阶地宽 1000m，发育 I、II 两级嵌入阶地，I 级阶地高出河床 2~3m，II 级阶地高出河床 5~10m。

3、残丘、丘陵

在市区的中南部，是山区向平原的过渡带，标高在 300m 以下，切割深度 50m 左右，属剥蚀堆积区。千佛山以西地区，山顶多呈混圆状，沟谷呈 U 字型，沟谷倾角 5°~10°，由于岩石抗风化能力不同，形成阶梯式地形，在市区南部重力堆积地貌较发育，出现滑坡、崩塌；山体周围多为人工开采石料形成的人工陡崖。

4、低山

分布在市区的南部边缘，标高 600~800m，流水作用强烈，沟谷呈 V 型，山体的东南坡坡度陡，30~40°，大顶山 756m，文风山 801m。由于岩石抗风化能力的差异，张夏灰岩形成陡坎峭壁。

5、岩溶地貌

在低山、残丘丘陵区，广泛分布着碳酸盐岩，形成一系列岩溶地貌，分布在兴隆山、千佛山、官山榭、白云山等地，灰岩顺层缓坡可见溶沟、溶槽地形，灰岩陡坡不同高程分布有溶洞，如西龙洞。

市区属鲁中南低山丘陵工程地质区和鲁西北黄泛平原工程地质区，平面分布具有明显的东西向带状分布特征。

2.1.2 岩土体结构类型

根据《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)及其它有关规范、规程，以第四系埋深 20 米等深线作为土体单元结构与岩土体二元结构的分界线，共分三种结构类型。

1、土体单元结构类型

自然地坪下 20 米以内均有第四系松散沉积物组成，主要分布在市区北部，范围：沿黄土崖、白谷堆、孙村、西顿丘、郭店、彭家庄、王舍人庄、牛王庄、七里河、大明湖南、藏家庄、药山张庄、东沙王庄、小杨庄、王官庄、七贤庄、邵而庄向北，至大杨庄向南，沿党家庄、魏家庄、崔马庄、罗而庄、大范庄、名庄、平安店、段庄、王府庄、务子前、齐庄至长清县城西向南至朱庄一线以北山前冲洪积平原前缘，以及黄泛冲洪积

平原的广大地区，第四系厚度由 20 米向北逐渐增厚至数百米，其成因类型为黄泛平原冲积层和山前北部冲洪积层，岩性北部以粉土、粉质粘土及粉细砂为主，南部以黄土、粉质粘土、粘土及少量碎石土组成。

2、岩土体二元结构

自然地坪下 20 米以内，上部为第四系松散层，下部为岩体组成。其范围为：土体单元结构以南，山前冲洪积平原及山间河谷地带，厚度较薄 0 至 20 米，分布一般较不稳定，成因类型为山前倾斜平原及山间谷地坡洪积、冲洪积层，岩性以粉质粘土、粘土、碎石土、砂（卵）砾石层为主。

3、岩体单元结构类型

由裸露基岩组成，主要分布在南部低山丘陵区，市区及东部零星出露，地形高差起伏较大，根据岩石成因类型及坚硬程度，岩体可分为 4 种类型：坚硬—较坚硬的中厚层—厚层状灰岩，较坚硬的薄层状灰岩、页岩，坚硬的块状侵入岩，较坚硬的薄层—中厚层状碎屑岩。

2.1.3 济南市地下水特点

济南地区可划分四大含水岩组，即：松散岩类孔隙水含水岩组；碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组；碎屑岩夹碳酸盐岩岩溶裂隙含水岩组；侵入岩风化裂隙含水岩组，其富水性因岩性及所处的地貌部位不同差别很大。主要影响济南市深基坑工程的含水层为松散岩类孔隙水含水岩组和岩溶裂隙含水岩组和侵入岩风化裂隙含水岩组。

松散岩类孔隙水含水岩组分布在西郊玉府河北沙河冲积扇、东郊王舍人和黄河以北地区。东、西郊孔隙水与岩溶水局部地段存在水力联系，具有互补关系，大气降水入渗补给为主要来源，总体运动方向由南向北。

松散岩类孔隙水的径流方向总体上由西南向东北。黄河以南地区，孔隙水先往小清河汇集，然后往东北下游排泄；在黄河以北，孔隙水由沿黄一带高水位区，向东北方向运动，由于水利坡度很小，运动迟缓，多以排水沟方式排泄。

2.1.4 济南市气象、水文特征

1、气象

济南市地处中纬度内陆地带，属暖温带大陆性气候，多年平均降水量为 647mm，在 6~

9月集中降水,12月至翌年3月较小,年最大降水量1194.50mm(1962年),最小340mm(1989年)。进入80年代以来,济南地区降水量较常年偏少,属于旱系列年份,近20年来降水偏枯年份出现几率增加,1949年~1972年偏枯降水年份出现几率4%,1980~2001年出现几率7%,如1988~1989年、1999~2002年连续四年干旱等。本区降水量在空间上分配也有差异,南部山区多年平均降水量大于北部山前平原。

2、水文

市区内河流主要有黄河、玉符河、北沙河、巨野河、港沟河、小清河等。

(1)黄河

黄河水是济南市重要客水资源,为一地上河,黄河水含大量泥砂,属于重碳酸型淡水,处理后适于灌溉和饮用。

(2)玉符河

玉符河为黄河的支流,河道渗漏严重,是岩溶水的重要补给来源之一。由于玉符河上游修建数座大小不等水库,拦截地表径流,加上水库水向市区供水,目前玉符河催马以下河段基本常年断流,为季节性河流,岩溶水的补给量大大减少。

(3)北沙河

位于市区的西部,属季节性河流。

(4)小清河

小清河发源于济南西郊的睦里村。现平均河宽已达百米,河槽深4m左右,水深一般为1.3m。小清河已成为济南一条总排污河。

(5)巨野河

位于白泉泉域,汇集宅科、大龙堂以南的地表径流,是白泉泉域岩溶地下水的重要补给源,巨野河渗漏严重,属于季节性河流

(6)大明湖

大明湖位于市区,湖面浩大,湖水碧波潋滟,湖岸杨柳翠绿,楼台亭阁,湖光山色美丽多姿,湖水主要来源于泉群排泄的地下水,号称济南三大名胜之一。

2.2 济南市深基坑典型地层分区

结合济南市环境地质条件,从深基坑工程的特点和应用出发,将影响深基坑工程设计与施工的地层结构划分为硬质土区、中硬土区和软弱土区三个典型地层分区。本文中的“典型地层”是指影响到深基坑工程的支护设计选型、投资和安全等方面的主要存在的土层。



图1 济南市深基坑典型地层分区示意图

2.2.1 硬质土区

1、分布范围

济南市深基坑工程所涉及的硬质土区范围指自八一立交桥往东沿经十路两侧的部分区域,以及其它区域以硬质土为主的深基坑工程,其中,影响深基坑设计方法和结构选型地层主要是碎石土和岩石。

2、工程地质条件

工作区硬质土岩土体一般具有二元结构,自然地坪下20米以内,上部为第四系松散层,下部为岩体组成。

(1)上部第四系松散层特点:地貌单元处于山前冲洪积平原及山间河谷地带,厚度较薄0至20米,分布一般较不稳定,成因类型为山前倾斜平原及山间谷地坡洪积、冲洪积层,岩性以粉质粘土、粘土、碎石土、砂(卵)砾石层为主。地层结构自上而下为:

①黄土:褐黄至黄褐色,可塑~硬塑,含白色菌丝状钙质网膜,大孔隙发育,含钙质结核,厚度一般小于5米,物理力学性质指标:含水量 $w=16.2\sim 21.2\%$,孔隙比 $e_0=0.65\sim$

0.77, 液限 $W_L=27.8\sim 31.1\%$, 塑限 $W_p=17.7\sim 19.8\%$, 压缩模量 $E_s=5.0\sim 7.76\text{MPa}$, 标准贯入试验击数 $N=6.0\sim 12.0$ 击, 具中等压缩性, 地基承载力特征值 $f_{ak}=140\sim 160\text{KPa}$;

②粉质粘土: 黄褐至棕黄色, 可塑~硬塑, 含较多碎石成分, 局部夹碎石层, 厚度一般较薄 1~3 米, 物理力学性质指标: 含水量 $w=17.1\sim 21.8\%$, 孔隙比 $e_0=0.67\sim 0.74$, 液限 $W_L=28.0\sim 42.3\%$, 塑限 $W_p=18.8\sim 19.8\%$, 压缩模量 $E_s=6.79\sim 10.33\text{MPa}$, 标准贯入试验击数 $N=8.0\sim 13.1$ 击, 具中等~低压缩性, 地基承载力特征值 $f_{ak}=150\sim 190\text{KPa}$;

③碎石土: 颜色一般为黄褐色~棕褐色, 稍密~密实, 碎石成分一般为灰岩, 呈次棱角~次圆状, 直径大小不一, 一般在 2~8cm, 可见块石、漂石, 含量不均 50~80%, 粘性土充填, 沿沟谷及趵突泉、黑虎泉附近等部分地段钙质胶结, 地基承载力特征值 $f_{ak}=300\sim 450\text{kpa}$ 。

(2)下部岩体特点:

①坚硬较坚硬的中厚层—厚层状灰岩岩组。

广泛分布于南部山区, 岩性为下奥陶系至寒武系张夏组灰岩、白云质灰岩、鲕状灰岩夹泥质灰岩, 岩石致密、坚硬、性脆、厚层状。地表和地下常见到水体侵蚀作用形成的溶槽、溶沟和溶洞, 岩溶发育。通过统计, 本区泥质灰岩、灰岩的饱和抗压强度在 72~120MPa, 抗拉强度在 4~8MPa 之间, 岩石地基承载力在 1500~4000MPa 之间。

②较坚硬的薄层状页岩及薄层状灰岩岩组。

主要分布于济南市南部边缘地带, 岩性为寒武系下统朱砂洞组及馒头组。页岩、薄层灰岩、泥灰岩, 岩石强度不一, 灰岩较坚硬, 页岩次之, 页岩夹泥灰岩。

③坚硬的块状侵入岩岩组

大部分隐伏于第四系松散层以下, 岩性为燕山期侵入的辉长岩、闪长岩, 岩石坚硬、致密, 岩石较完整, 裂隙发育, 微风化岩石力学强度高。但岩石易风化, 使其强度降低, 根据风化程度, 自上而下分为残积土、全风化层、强风化层、中等风化层及微风化层, 各层地基承载力特征值: 残积土 $f_{ak}=180\sim 260\text{KPa}$, 全风化层 $f_{ak}=300\sim 500\text{KPa}$, 强风化层 $f_{ak}=500\sim 1000\text{KPa}$, 中等风化层 $f_{ak}=1000\sim 1500\text{KPa}$, 微风化层 $f_{ak}=2500\sim 3000\text{KPa}$ 。

表 2-2 硬质土区主要地层物理力学性质指标统计表

层位	岩性	重度 (kN/m^3)	内聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^\circ$)	压缩模量 E, (Mpa)	地基承载力 (kPa)
①	黄土	17.0~19.4	14.0~36.3	16~20	3.32~9.09	140~160

②	粉质粘土	18.0-19.0	14.0-40.0	16-20	6.79-10.33	150-190
③	粘土	18.0-20.0	25.0-40.0	16-20	2.81-8.99	180-240
④	碎石	20	0-20.0	30-35	2.61-17.17	300-600
⑤	残积土	18.0-20.0	18.1-40	15-17	3.35-9.87	180-220
⑥	全风化带	18.0-20.0	20-50	17-22	5.16-15.18	280-320

3、水文地质特征

山前地质单元第四系孔隙潜水平离山前水位埋深 3.0~8.0m，地下水类型为第四系潜水和风化基岩裂隙水。以下典型工程的有关水文参数可作为参考：

(1)济南市全民健身中心（市体校地块）

经十路以南，广场西沟以东，原济南市体校。静止水位埋深 7.0~11.0 米。基坑规模：长 282.3 米，宽 216.2 米，深 10.0~12.0 米。

①场区地下水主要是接受大气降水补给和岩浆岩的风化裂隙水的径流补给，与场区西侧地表河水与场区浅层地下水存在一定的水力联系，但局部联系不密切；

②场区附近奥陶系岩溶地下水水位远低于场区内地下水水位 10m 左右，岩溶地下水与浅层地下水基本不存在水力联系；

③场区的西南部-西北部-东北部地段浅层富水性逐步增强，涌水量逐步增大。

④在场区西侧水文地质参数取值 K 为 2.84m/d， R 为 117.11m；场区东北部 K 为 10.34m/d， R 为 197.23m。

(2)山东大学齐鲁医院 4#高层住宅楼

文化西路以南，广场东沟以西，山东大学医学院住宅区东区内。静止水位埋深 1.70~2.00 米，绝对标高 39.24~39.90 米。基坑规模：长 41.0 米，宽 29.5 米，深 8.0 米。

抽水试验井深度 14.50 米，降深分别为 6.35 米和 14.10 米时，混合抽水渗透系数分别为 0.833 米/天和 0.844 米/天，影响半径分别为 44.0 米和 97.0 米。

2.2.2 中硬土区

1、分布范围

济南市深基坑工程所涉及的中硬土区范围指济南市区硬质土区和软弱土区之间呈东西向带状分布的可塑~硬塑的粘性土、黄土地层。

2、工程地质条件

市区内中硬土多具单元结构，自南向北厚度逐渐增加，从几米至数十米，无影山附近等局部地段厚度较小，岩性较稳定，上部以粘性土为主，底部为碎石土，成因类型为冲洪积；市区内表层多分布厚度不等的人工填土，结构类型从岩土体二元结构过渡到土体单元结构。主要地质结构，自上而下为：

①黄土：主要为黄土状粉土或黄土状粉质粘土，褐黄~黄褐色，可~硬塑，湿，针状孔隙发育，偶见钙质结核，分布广泛，地层较稳定，厚度一般小于7.0米，在东八里洼南部、长清平安店南部及济钢东部近山沟谷出口部位局部黄土厚度可达十几米，具中等压缩性，地基承载力特征值 $f_{ak}=120\sim 150\text{kPa}$ ；

②粉质粘土：褐黄~棕黄色，一般为可塑~硬塑，含姜石及灰岩碎石，含铁锰质结核及氧化物，分布较广泛，厚度较稳定，一般自南向北厚度逐渐增大，在无影山附近及其它零星部位厚度较小，具中等压缩性，地基承载力特征值 $f_{ak}=140\sim 180\text{kPa}$ ，该层局部夹碎石土薄层，厚度一般小于2米；

③粘土：棕黄~棕红色，硬塑，含铁锰质结核及氧化物，含较多灰岩碎石，属低压缩性土，分布广泛，厚度一般小于4米，局部夹碎石土或胶结砾岩，地基承载力特征值 $f_{ak}=180\sim 240\text{kPa}$ 。以上三层物理力学性质指标（见表2-3）。

表 2-3 中硬土地层物理力学性质指标统计表

层位	岩性	重度 (kN/m^3)	内聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^\circ$)	压缩模量 E_s (Mpa)	地基承载力 (kPa)
①	黄土	17.0-19.4	24.0-37.0	15-19	9.74	120-150
②	粉质粘土	18.0-20.0	17.0-22.0	11-15	7.97	140-180
③	粘土	18.0-20.0	50.0-69.0	16-17	13.29	180-240

3、水文地质条件

水位埋深2.0~6.0m，地下水类型主要为潜水，在泺源大街附近施工的挖深超过10.0米的深基坑工程会遇到泉水。以下典型工程的有关水文参数可作为参考：

(1)山东电力东兴里2#、3#高层住宅楼

经三路南侧，纬一路西侧。场地内地下水类型为第四系孔隙潜水及闪长岩风化基岩裂隙水，两层间水力联系较好。勘探期间（1999年10月）静止水位埋深5.0~6.3米，相应标高30.29~31.22米。基坑规模：长65.0米，宽61.0米，挖深16.7米。经混合抽水试验地层的渗透系数为2.642~3.87米/天，影响半径51.0~75.0米。

(2)济南蓝海大酒店

经七路以南，纬一路以西，南上山街东侧，南临南上山街小学。静止水位埋深 2.0 米左右。基坑规模：长 61.8 米，宽 50.0 米，基坑开挖深度 12.40 米。经混合抽水试验地层的渗透系数 10.69 米/天，影响半径 57.0 米。

(3)中国工商银行山东省分行营业办公楼

经四路南侧，纬三路和纬四路之间。静止水位埋深 4.32~5.12 米。基坑规模：长 189.0~197.5 米，宽 68.11 米，开挖深度 6.5~19.5 米。

第四系孔隙潜水，第三层粉质粘土和第四层粘土混合抽水，当降深为 1.0 米、7.0 米时，其地层的渗透系数为 17.19 米/天、12.27 米/天；第四系潜水与基岩裂隙水混合抽水，当降深为 0.32 米、2.63 米时，其地层的综合渗透系数为 29.55 米/天、24.97 米/天；辉长闪长岩全~强风化带裂隙水单独抽水，当降深 7.0~11.32 米时，渗透系数为 0.502 米/天。

2.2.3 软弱土区

1、分布范围

济南市深基坑工程所涉及的软弱土区范围指大明湖周边的素填土、流塑~软塑的粘性土、薄层淤泥或淤泥质土等地层，北园路两侧及其以北黄河、小清河冲积平原的流塑~软塑的粘性土、稍密状态的粉土等地层，以及玉符河冲积扇下部段店铁路桥周边地区的软塑粘性土地层。总而言之，济南市软弱土区的分布范围主要受市区内主要河流和湖泊的流域而定，部分区域主要受废弃荷塘的影响。。

2、工程地质条件

市区内软弱土多具单元结构，类型主要为：河滩沉积，在大明湖及附近为湖泊沉积。该区域主要包括填土、粉质粘土、粉土等河滩沉积和湖泊沉积形成的土层，特征为：高压缩性，易造成建筑物沉降量大；低透水性，垂直渗透系数在 10^{-6} ~ 10^{-8} 米/秒之间，影响地基的强度；流变性，影响基坑工程边坡的稳定性；不均匀性，基坑降水后，极易造成建（构）筑物不均匀沉降及变形。

(1)河流相沉积范围内，20m 深度以内土层主要分为四个工程地质层：

①粉土：广泛分布于该区表层，浅黄~灰黄色，土质均匀，层理明显，湿~饱和、稍密，固结差，含较多云母碎片，具高压缩性，摇振反应迅速，地基承载力特征值 $f_{ak}=80\sim 110\text{kpa}$ ；

②粉质粘土或粘土：厚度一般小于2米，黄褐~灰褐色，软塑~可塑，具腐植物，具高压缩性，地基承载力特征值 $f_{ak}=90\sim 120\text{kPa}$ ；

③粉土：灰黄色，稍密~中密，很湿，具云母碎片，振动析水，层理明显，具高压缩性，摇振反应迅速，地基承载力特征值 $f_{ak}=110\sim 150\text{KPa}$ 。该层部分地段夹淤泥及淤泥质土：浅灰色，流塑~软塑，触变性强，具高压缩性，地基承载力特征值 $f_{ak}=60\sim 90\text{KPa}$ ；

④粉质粘土：灰褐色~黄褐色，可塑，具中等压缩性，摇振反应迅速，地基承载力特征值 $f_{ak}=160\sim 220\text{KPa}$ 。

(2)湖相沉积工程地质分层：

该区地貌单元属于山前冲积平原，上部地层由第四系冲洪积形成的黄土、粘性土和碎石土组成，下伏中生代燕山期侵入的闪长岩。该区范围内主要分为四个工程地质分层：

①粉质粘土：灰黑色，软塑，含少量姜石及灰岩碎石，有机质含量较高。干强度、韧性中等，稍有光泽，摇震反应无。

②粉质粘土：棕黄色，可塑~硬塑，含姜石5~10%，粒径一般0.5~2cm，含少量姜石及铁锰氧化物。干强度、韧性中等，稍有光泽，摇震反应无。

③粘土：棕红色，可塑~硬塑。含少量姜石及铁锰氧化物，底部含碎石。干强度、韧性高，光滑，摇震反应无。

④粘土混碎石：棕红色，硬塑。碎石成分为石灰岩，含量20~40%不等，粒径2~5cm不等，大者大于10cm，局部钙质胶结，次棱角状，少量姜石。

3、水文地质条件

沿黄河分布黄河冲积层，厚度8.0~19.0m，含水层岩性为粉砂及粉细砂，受黄河侧渗补给，但因黄河以北地区孔隙水与岩溶水不存在水力联系，分为浅层淡水含水层（潜水或微承压水）、中深层咸水含水层、深层（深层承压水）淡水含水层。浅层（潜水或微承压水）淡水含水层底板埋深一般小于50m，水位埋深2.0~8.0m。大气降水是该含水层主要补给来源，黄河水也是浅层地下水的补给来源之一，地下水径流方向总体为北向；

大明湖周边含水层颗粒细，富水性弱，地下水位埋藏浅0.5~2.0m，地下水类型为潜水。以下典型工程的有关水文参数可作为参考：

(1)济南嘉馨苑高层住宅楼

南辛庄街以南，南辛庄中街以西。地貌单元为冲洪积平原的下部，受玉符河的影响上部土层长期浸泡在地下水位以下，致使该区域土层的力学性能较差。

表 2-4-(1) 地层物理力学性质指标统计表

层位	岩性	重度 (kN/m ³)	内聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	压缩模量 E _s (Mpa)	地基承载力 (kPa)
①	填土	19.0				
②	黄土	19.3	25	20		140
③	粉质粘土	19.4	14	9.6	5.6-6.6	130
	碎石土	22			15-20	350
④	粉质粘土	19.6	46	15	7.4-8.6	170-180
⑤	粘土	19.9	50	18	7.9-11.5	200-220

基坑开挖深度 6.0m, 含水层厚度 9.0m, 渗透系数 7.83~8.31m/d, 影响半径 23.2~59.14m。

(2) 鲁能康桥小区一期

三孔桥街以东, 胶济铁路以北。第四系地貌单元为黄河-小清河冲积平原。地下水为第四系孔隙潜水类型, 埋藏较浅, 静止水位埋深 0.90~1.90m, 相应标高 23.12~22.17m, 由东南往西北渗流。

表 2-4-(2) 地层物理力学性质指标统计表

层位	岩性	重度 (kN/m ³)	内聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	压缩模量 E _s (Mpa)	地基承载力 (kPa)
①	填土	18.5				
②	粉质粘土	19.5	20	9.4	4.7	100
③	粘土	18.4	34.0	10.0	4.6	90
④	粉土	19.3	21	14	10.2	110
⑤	淤泥质土	17.9	23	7.7	2.9	70
⑥	粉质粘土	19.7	31	10.8	4.7	130
⑦	粘土	19.6	41	12.8	5.5	160
⑧	粉质粘土	19.7	25	12	4.9	140

抽水试验是在第四系地层及闪长岩孔隙潜水中进行, 上部第四系土层中水量较小, 土层综合渗透系数 1.189~3.215m/d, 影响半径 15.58~122.36m, 下部卵石土及闪长岩风化带混合水具微承压性, 地层综合渗透系数 0.81~1.207m/d, 影响半径 17.32~229.09m/d。

2.3 本章小结

(1) 本章介绍了济南市的自然地理状况, 包括地形地貌、气象水文等, 详细阐述了与深基坑工程有关的地质环境, 分析了岩土体结构类型, 借用已有成果, 将影响深基坑工

程设计与施工的地层结构划分为软弱土区、中硬土区和硬质土区，为济南市深基坑工程研究提供了新的研究方向。

(2)深基坑工程的环境地质条件决定深基坑工程内容和方法，软弱土区和中硬土区是济南市深基坑工程主要集中区域。研究济南市深基坑工程设计与施工，必须理解并掌握济南市深基坑工程的典型地层条件。

(3)针对深基坑工程，总结了软弱土区、中硬土区和硬质土区三类典型地层中主要土层的物理力学指标，以及为济南市深基坑工程设计提供了理论数据。

第三章 济南市典型地层深基坑工程支护设计方法

济南市深基坑支护设计方法，是根据我国现行规程、规范和强制性标准，逐步吸取国内其它先进城市深基坑工程的设计经验，同时，积累了济南市自身经验教训的基础上设计与施工的。1999年3月4日，国家建设部颁布了中华人民共和国行业标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-99)，并且在2002年2月20日，国家建设部颁布了中华人民共和国国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)也把基坑工程单独作为一个问题提出，体现了我国工程界对基坑支护设计的重视程度。

目前，济南市深基坑工程支护设计主要应用校核设计的思维模式。针对某一特定深基坑工程，首先根据典型地层条件，初步选择支护结构型式和参数；再通过“理正深基坑支护结构设计软件”或“同济‘启明星’深基坑支挡结构分析计算软件”等设计软件对支护结构的强度、外部与内部整体稳定性、构造措施以及变形等方面进行分析验算，然后对开始选择的支护结构参数进行修改和调整，最终确定设计方案。校核设计是济南市典型地层深基坑工程支护设计的基本方法。

作者认为，熟悉典型地层条件是济南市深基坑工程支护设计的基础，合理选择支护结构型式是支护设计的前提，正确运用基坑工程的设计理论是支护设计的保障，掌握典型地层深基坑支护设计方法是深基坑工程支护设计的根本，设计方法与工程实践相结合是深基坑工程成功的关键。

3.1 济南市典型地层深基坑工程支护设计方法的理论基础

济南市由于其典型地层条件以及高水位的特点，济南市常用的深基坑工程支护结构方法有土钉墙、排桩和水泥土墙，同时采取了管井降水和截水帷幕的地下水控制措施，为了进一步做到信息化动态施工和总结经验，逐步对基坑坡顶和周围建（构）筑物进行变形监测做了严格规定。济南市的深基坑工程设计方法的理论基础是国家规范、规程。

济南市的深基坑工程设计采用校核设计的设计方法，普遍基于设计软件所依据的规程规范中土压力的计算方法。基坑工程设计中所指的土压力是指土体作用于支护结构上的侧向压力。在深基坑支护设计中，必须首先确定土压力的性质、大小和方向。土压力

值的合理选用是基坑支护设计中首先要解决的关键问题。

(1)重度指标选取

在土压力计算公式中,要用到土的重度指标,这反映了土体的自重对土压力的影响。所谓水土合算和水土分算,就是在计算公式中,土的重度是用天然重度还是浮重度,在物理概念上是土中水对支护结构的作用如何考虑的问题。从不同的概念出发,建立在不同假定的基础上,采用不同的强度指标,可以得出不同的计算方法。

①按有效应力原理计算:地下水的的作用单独考虑,土压力采用浮重度计算,内摩擦角也采用有效内摩擦角,即按有效应力原理计算。总应力法计算:水土分算,地下水作用单独考虑,土压力用浮重度计算,但内摩擦角则用总应力指标计算;水土合算:地下水的作用合在土的重度中反映,故采用饱和重度计算,内摩擦角也采用总应力指标。

②对于碎石土、砂土等无粘性土:粘聚力 c 小,土的透水性好,侧向水压力的作用相对于粘性土来说明显的多,按水土分算的原则进行计算。在地下水位以下,作用于支护结构的侧压力等于土压力与静水压力之和。土压力计算采用浮重度 γ' 和有效应力抗剪强度指标 c' 和 ϕ' 计算;对于粘性土和粉土:因为粘聚力 c 的作用,土的透水性很差,按水土合算原则进行计算。作用在支护结构上的侧压力,仅考虑土压力,水土合算时,地下水位以下的土压力采用饱和重度 γ_{sat} 和总应力抗剪强度指标 c 和 ϕ 计算。

(2)水土合算时的水土压力

水平荷载和抗力计算公式:

$$e_{ajk} = (q_0 + \sigma_{jk} + \sum r_i h_i) K_{aj} - 2c_{jk} \sqrt{K_{aj}} \quad (3.1)$$

$$e_{pjk} = (\sum r_i h_i) K_{pj} + 2c_{jk} \sqrt{K_{pj}} \quad (3.2)$$

式中: e_{ajk} ——作用在支护结构上 j 点处水平荷载标准值 (主动土压力强度) (kPa);

e_{pjk} ——作用在支护结构上 j 点处抗力标准值 (被动土压力强度) (kPa);

q_0 ——地面附加均布荷载 (kPa);

σ_{jk} ——局部附加荷载在 j 点处产生的竖向应力标准值 (kPa);

r_i ——第 i 层土的天然重度 (kN/m^3);

h_i ——第 i 层土的厚度 (m);

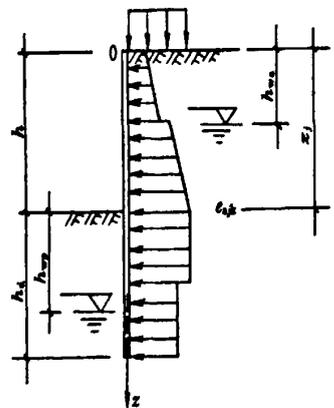


图 3.1 水平荷载标准值计算简图^[11]

K_{aj} ——第 j 点所在土层的主动土压力系数, $K_{aj} = \tan^2(45^\circ - \phi_{jk}/2)$;

K_{pj} ——第 j 点所在土层的被动土压力系数, $K_{pj} = \tan^2(45^\circ + \phi_{jk}/2)$;

c_{jk} 、 ϕ_{jk} ——第 j 点所在土层的粘聚力标准值 (kPa) 和内摩擦角标准值 ($^\circ$)。

(3) 水土分算时的水土压力

当计算点位于地下水位以下时:

$$e_{ajk} = (q_0 + \sigma_{jk} + \sum r'_i h_i) K_{aj} - 2c'_{jk} \sqrt{K_{aj}} + r_w(z_{ja} - h_{wa}) \quad (3.3)$$

$$e_{pj} = (\sum r'_i h_i) K_{pj} + 2c'_{jk} \sqrt{K_{pj}} + r_w(z_{jp} - h - h_{wp}) \quad (3.4)$$

式中 r'_i ——第 i 层土的有效重度 (kN/m³);

h_i ——第 i 层土的厚度 (m);

K_{aj} ——第 j 点所在土层的主动土压力系数,

$$K_{aj} = \tan^2(45^\circ - \phi'_{jk}/2);$$

K_{pj} ——第 j 点所在土层的被动土压力系数,

$$K_{pj} = \tan^2(45^\circ + \phi'_{jk}/2);$$

c'_{jk} 、 ϕ'_{jk} ——第 j 点所在土层的有效粘聚力标准值 (kPa) 和有效内摩擦角标准值 ($^\circ$);

r_w ——地下水的重度 (kN/m³);

z_{ja} ——水平荷载标准值计算点的深度 (m);

z_{jp} ——抗力标准值计算点深度 (m);

h ——基坑深度 (m);

h_{wa} ——基坑外地下水深度 (m);

h_{wp} ——基坑内地下水至基坑底的距离 (m);

当计算点位于地下水位以上时, 计算公式与水土合算公式相同。

(4) 附加竖向应力标准值 σ_{jk} 计算

当距支护结构 b_1 外侧, 地表作用有宽度为 b_0 的条形附加荷载 q_1 时, 基坑外侧 CD 范围内的附加竖向应力标准值:

$$\sigma_{jk} = q_0 b_0 / (b_0 + 2b_1) \quad (3.5)$$

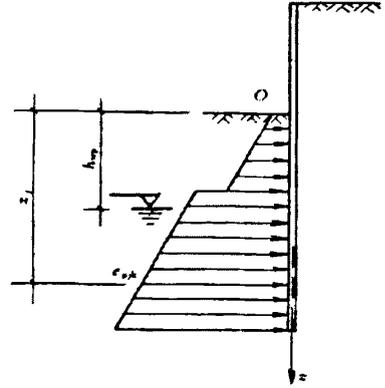


图 3.2 水平荷载标准值计算简图^[11]

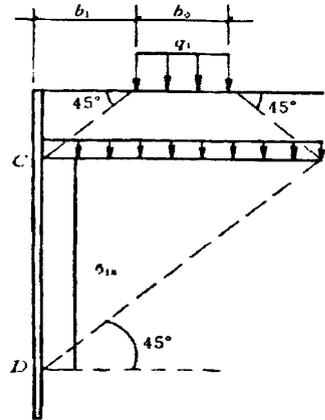


图 3.3 局布荷载作用时基坑外侧附加竖向应力计算简图^[11]

3.1.1 土钉墙支护结构设计

1、土钉墙结构的特点和适用条件

(1)土钉墙支护技术,是一种原位土体加固技术,是在分层分段挖土和施工的条件下,由原位土体、在基坑侧面土中斜向设置的土钉与喷射混凝土面层三者组成共同工作的土钉墙,其受力特点是通过斜向土钉对基坑边坡土体的加固,增加边坡的抗滑力和抗滑力矩,达到稳定基坑边坡的作用。土钉的施工一般采用钻孔中内置钢筋后,然后孔中注浆的土钉,坡面用配有钢筋网的喷射混凝土形成的土钉墙;也有采用打入式钢管再向管内注浆的土钉;还有采用土钉和预应力锚杆等结合的复合土钉墙结构。利用水泥土桩组合式土钉墙支护技术,形成封闭周边地下水的截水帷幕,使该项技术能够应用在少量降水的条件下,进行土钉墙的施工。

与其它支护类型相比,土钉墙具有以下特点:

①土钉墙支护技术是通过原位土体加固,充分利用原位土体的自稳能力,因而能大幅度降低支护造价,一般比桩墙支护结构节约很多费用,具有显著的经济效益。

②施工方法和设备简单,土钉的制作与成孔不需要复杂的技术和大型机具,土钉施工的作业对场地占用少。

③因施工工艺简单,施工与基坑土方工程同步进行,交叉作业。根据土钉设置的层数,挖一层土,施工一层土钉,施工工期一般较短。

(2)适用条件

①土钉墙适用于地下水位以上或经人工降水后的人工填土、粘性土和弱胶结砂土的基坑和边坡,当土钉墙与水泥土桩截水帷幕组合时,也可用于存在地下水的条件。

②土钉墙一般宜用于深度不大于 12m 的基坑。

当土钉墙用于下述情况时,应采取适当的措施:淤泥、淤泥质土等无法提供足够锚固力的饱和软弱土层时;当基坑旁边有地下管线或建筑物基础时,阻碍土钉成孔,或密实卵石层无法成孔时;用于含水丰富的粉细砂层容易造成塌孔的情况。

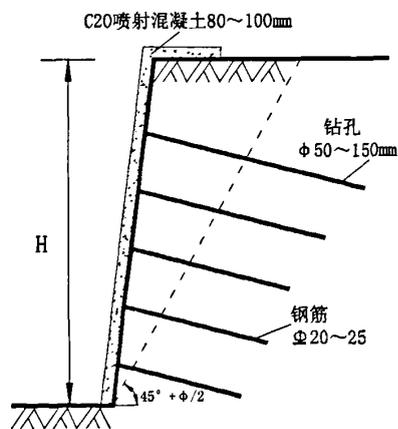


图 3.4 土钉墙构造简图^[7]

③不宜用于邻近有对沉降变形敏感的建筑物的情况，以免造成周边建筑物的损坏，当局部采用预应力土钉（锚杆）时，能使相应部位的水平变形略有减少。

2、土钉作用机理

(1)土钉对复合体起骨架约束作用：由于土钉本身的刚度和强度，以及它在土体内分布的空间组成复合体的骨架，使复合土体构成一个整体，骨架有约束土体变形的作用。

(2)土钉对复合体起分担作用：在复合土体内，土钉与土体共同承担外荷载和自重应力，土钉起着分担作用。由于土钉有很高的抗拉、抗剪强度和土体无法相比的抗弯刚度，所以在土体进入塑性状态后，应力逐渐向土钉转移。当土体开裂时，土钉分担作用更为突出，这时土钉出现了弯剪、拉剪等复合应力，从而导致土钉锚固体中浆体碎裂、钢筋屈服。土钉墙之所以塑性变形延迟，渐进性开裂，与土钉的分担作用是密切相关的。分担的比例取决于：①土钉与土体的相对刚度；②土钉所处的空间位置；③复合土体的应力水平。

(3)土钉起着应力传递与扩散作用：试验说明，当荷载增到一定程度，边坡表面和内部裂缝已发展到一定宽度，此时坡脚应力最大。这时下层土钉锚固体伸入到滑裂域外稳定土体中的部分仍能提供较大的抗拉力。土钉锚固体通过其应力传递作用，将滑裂域内部分应力传递到后边稳定土体中，并分散到较大范围的土体内，降低应力集中程度。

(4)坡面变形的约束作用：在坡面上设置与土钉连在一起的钢筋网喷射砼面板，是发挥土钉作用的重要组成部分。喷射砼面板起到坡面变形的约束作用，面板约束力取决于土钉表面与土的摩阻力，当复合土体开裂面区域扩大并连成片时，摩阻力主要来自开裂区域后的稳定复合土体。

3、土钉墙设计

主要包括土钉抗拉承载力计算、土钉墙内部和外部稳定性分析。

(1)土钉抗拉承载力计算

如图 3.5 的土钉墙在保证整体稳定性条件下，土钉墙面层与土钉的连系作用防止了沿朗肯主动土压力破裂面所产生的破坏，土钉墙面层与土钉共同承担主动土压力荷载。由于土钉墙面层刚度较小，整个面层无法形成一个相互协同作用的刚体。为保证沿主动土压力破坏面不发生破坏，需要依靠单根土钉的抗拉能力以平衡作用于面层上的主动土压力。当土钉的水平间距为 s_x ，垂直间距为 s_y 时，按文献^[11]的方法，局部稳定性要求单根土钉的受拉荷载标准值 T_{jk} 为：

$$T_{jk} = \xi e_{ajk} s_{xj} s_{yj} / \cos \theta_j \quad (3.6)$$

式中： T_{jk} ——第 j 层单根土钉所受土压力 (KN)； ξ ——荷载折减系数，与基坑放坡系数有关， $\xi = \text{tg}(\beta - \varphi_k) / 2 [1 / (\text{tg}(\beta + \varphi_k) / 2) - 1 / \text{tg}^2(45^\circ - \varphi_k / 2)]$ β ——为土钉墙坡面与水平面的夹角； φ_k ——基坑深度范围内摩擦角标准值，多层土时，取基坑深度范围内的加权平均值； s_{xj} 、 s_{yj} ——第 j 层土钉相邻土钉的平均水平、垂直间距； θ_j ——第 j 根土钉与水平面的夹角。

对于基坑侧壁安全等级为二级的土钉抗拉承载力应按试验确定，基坑侧壁安全等级为三级时单根土钉抗拉承载力设计值 T_{uj} 可按下式计算，如图 3.5 所示。

$$T_{uj} = \frac{1}{r_s} \pi d_n \sum q_{sik} L_i \quad (3.7)$$

式中 T_{uj} ——第 j 层土钉抗拉承载力设计值； d_n ——土钉锚固体直径； q_{sik} ——土钉穿越第 i 土层的锚固体与土体极限摩阻力标准值，应由现场试验确定，或参照有关经验数据； γ_s ——土钉抗拉力分项系数，一般取 1.3； l_i ——穿越破裂面之外第 i 层土中的土钉长度，破裂面与水平面的夹角为 $\frac{\beta + \varphi_k}{2}$ 。

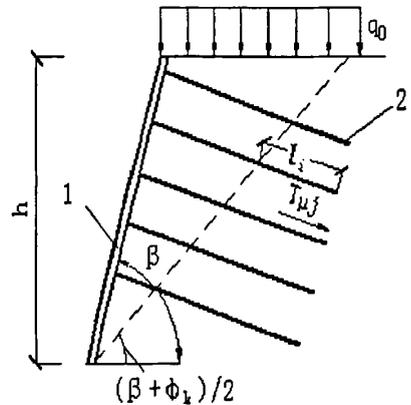


图 3.5. 土钉抗拉承载力计算简图^[11]
1—喷射混凝土面层；2—土钉

单根土钉抗拉承载力计算应符合下列要求：

$$1.25 \gamma_0 T_{jk} \leq T_{uj} \quad (3.8)$$

γ_0 ——基坑侧壁重要性系数；

(2) 土钉墙内部稳定性分析^[11]

土钉内部稳定性分析是保证土钉墙本身的稳定，这时的破裂面全部或部分穿过加固土体的内部，部分穿过加固土体时又称为混合破坏。土钉墙内部稳定性分析多采用边坡稳定的极限平衡状态的圆弧滑动条分法，只不过在破坏面上需要计入土钉的作用。

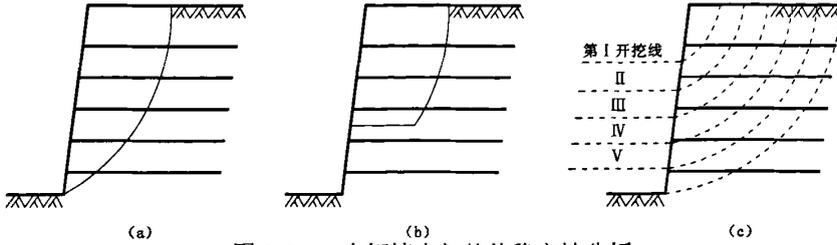


图 3.6 土钉墙内部整体稳定性分析

(a) 使用阶段沿全县破坏的内部整体稳定性分析；(b) 沿薄弱层土层破坏的稳定性分析；(c) 施工开挖时的整体稳定性分析

土钉墙应根据施工期间不同开挖深度及基坑底面以下可能滑动面采用圆弧滑动简单条分法进行计算，验算不同工况下的各种可能的潜在滑动面，或经过搜索寻找出最危险的滑裂面，由抗滑力矩 M_k 与滑动力矩 M_h 之比确定土钉墙的安全系数：

$$K_{zw} = M_k / M_h \geq 1.2 \tag{3.9}$$

$$M_k = \sum_{i=1}^n c_{ik} L_i s + s \sum_{i=1}^n W_i \cos \theta_i \operatorname{tg} \varphi_{ik} + \sum_{j=1}^m T_{nj} [\cos(\alpha_j + \theta_j) + \sin(\alpha_j + \theta_j) \operatorname{tg} \varphi_{ik} / 2] \tag{3.10}$$

$$M_h = s \gamma_0 \sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i, \quad W_i = w_i + q_0 b_i \tag{3.11}$$

式中 n --滑动体分条数； m --滑动体内土钉层数； w_i --第 i 分条土重； b_i --第 i 分条土宽度； c_{ik}, φ_{ik} --第 i 分条滑裂面处土体固结不排水

(快) 剪粘聚力、内摩擦角标准值； θ_i --第 i 分条滑裂面处中点切线与水平面夹角； L_i --第 i 分条滑裂面处弧长； T_{nj} --第 j 层土钉在圆弧滑裂面处锚固体与土体的极限抗拉力， $T_{nj} = \pi d_{nj} \sum q_{sik} L_{ni}$ 。

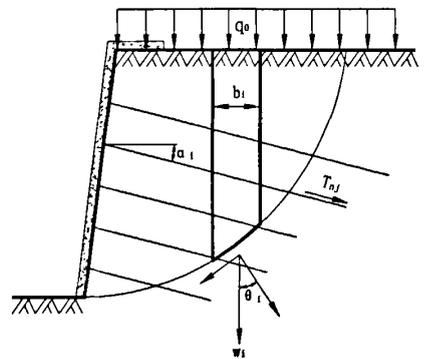


图 3.7. 土钉墙整体稳定性计算简图^[11]

(3) 土钉墙外部稳定性分析^[11]

以土钉原位加固土体，当土钉达到一定密度时所形成的复合体就会出现类似锚定板群锚现象中的破裂面后移现象，在土钉加固范围内形成一个“土墙”。

在内部自身稳定得到保证的情况下，土钉墙的外部整体稳定性分析与一般重力式挡墙的稳定性分析相同(见图 3.7)，此时可将由土钉加固的整个土钉体视作重力式挡土墙，

分别验算：

- ①整个支护沿底面水平滑动（图 3.8a）；
 - ②整个支护绕基坑底角倾覆，并验算此时支护底面的地基承载力（图 3.8b）；
- 在①和②的验算过程中，计算时可近似取墙体背面的土压力为水平作用的朗肯主动

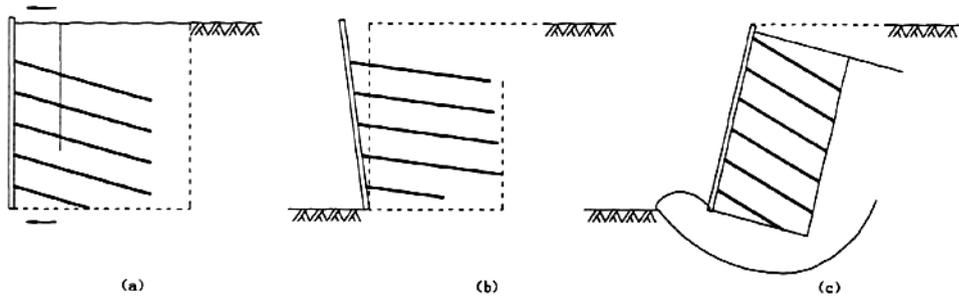


图 3.8 土钉墙外部整体稳定性分析
(a) 滑移；(b) 倾覆；(c) 整体失稳

土压力，取墙体的宽度等于底部土钉的水平投影长度。抗水平滑动的安全系数应不小于 1.2；抗整体倾覆的安全系数应不小于 1.3，且此时的墙体底面最大竖向压应力不应大于墙底土体作为地基持力层的地基承载力设计值的 1.2 倍。

- ③整个支护连同外部土体沿深部的圆弧破坏面失稳（图 3.8c）。

(4)当土体中有较薄弱的土层或薄弱层面时，还应考虑上部土体在背面土压作用下沿弱土层或薄弱层面滑动失稳的可能性，其验算方法与(3)条中有关整个支护沿底面水平滑动时相同。

3.1.2 排桩支护结构设计

排桩结构是在基坑开挖前，沿基坑边缘施工成排的桩，并使其底端嵌入到基坑底面以下一定深度。随着基坑的分层向下开挖，在排桩表面设置支点，支点形式采用锚杆为主。在排桩结构侧壁上土压力的作用下，排桩结构的受力形式相当于梁板结构，锚杆单独进行承载力的设计计算。排桩结构不设置支点时，称为悬臂桩，此结构只适用于基坑深度较浅同时周边环境对支护结构水平位移要求不高的情况。济南市已实施的基坑工程中常采用排桩-锚杆的桩锚支护结构。桩的类型包括各种工艺的钻孔桩、冲孔桩、挖孔桩等。当搅拌桩内插入型钢且进行受力杆件设计计算时（SMW 工法），也可纳入这种受力结构形式。

1、排桩支护结构的特点和适用条件

(1)特点：排桩作为挡土部分承受基坑侧壁的土压力荷载，当基坑侧壁排桩后有地下水存在时，还要承受水压力。基坑周边有建筑物或施工荷载会使土压力增加，土压力计算中应予以考虑，锚杆通过利用锚固在稳定土层上的锚固力为排桩提供弹性支点。锚杆拉力通过腰梁及其连接杆件对排桩提供约束。在这种受力模型下，排桩为受弯构件，一般可作为杆件进行计算和设计。受弯构件按弯矩设计截面尺寸和配筋，要比承受竖向荷载的桩所用的配筋量大得多。锚杆为轴心受拉构件，从受力上沿锚杆长度分为自由段和锚固段，对锚杆承载力起作用的是锚固段。影响锚杆承载力大小的有三个控制条件：①锚固段锚固体与周围土体的摩阻力；②锚固体对钢筋或钢绞线的握裹力；③钢筋或钢绞线的抗拉强度。

对于土层锚杆，锚固体对钢筋或钢绞线的握裹力一般大于锚固段锚固体与周围土体的摩阻力，因此承载力主要由摩阻力和钢筋或钢绞线的强度控制，可由摩阻力条件确定了锚杆承载力后，再根据承载力设计钢筋或钢绞线的截面。

根据采用不同材料，腰梁按钢结构或混凝土结构有关设计规范设计。

(2)适用条件

排桩支护技术适用范围很广，在大部分的典型地层中均可采用，尤其基坑深度大、对水平变形的限制要求高、基坑周边场地狭窄的情况最能体现其优越性。不适用于排桩支护结构的情况包括：

①基坑周边无法或不允许施工锚杆，如周边有其它地下结构、桩基础等造成施工障碍；

②特定地层条件下，锚杆锚固段无法避开软弱土层，即使锚杆很长，仍不能提供足够的锚固力，造价和工期不合理的情况。

③锚杆施工困难，如砂卵石地层存在承压水或胶结的情况下，现有机具无法成孔和不能保证水泥浆灌注质量。

虽然排桩支护技术适用较广，也易于保证基坑的安全，但是造价相对较高，在周边环境条件不复杂、能够采用其它更经济的支护技术的情况下，应综合安全、经济、工期等因素进行不同支护方案的比较后进行选择。

2、嵌固深度计算

(1)悬臂桩嵌固深度设计值 h_d

①根据弯矩平衡条件计算 h_d

悬臂式支护结构的最小嵌固深度设计值 h_d 通过各水平力对支护结构底端取矩的力矩平衡条件，由下式确定：

$$h_p \sum E_{pj} - 1.2\gamma_0 h_a \sum E_{ai} \geq 0 \quad (3.12)$$

式中 $\sum E_{pj}$ 、 $\sum E_{ai}$ —— 桩底以上基坑内侧各土层水平抗力标准值的合力值和基坑外侧水平荷载标准值的合力值； h_p 、 h_a —— 合力 $\sum E_{pj}$ 、 $\sum E_{ai}$ 的作用点至桩底的距离； r_0 —— 基坑侧壁重要性系数。

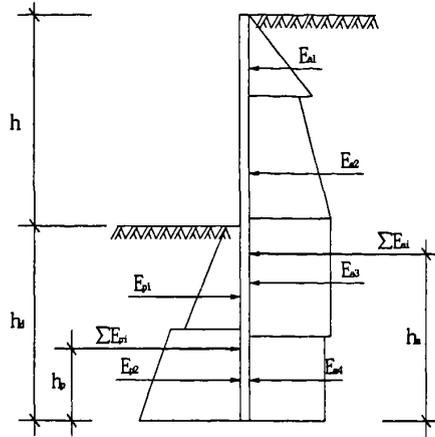


图 3.9 悬臂式支护结构嵌固深度计算简图^[11]

②构造要求确定 h_d

当计算得到的嵌固深度设计值 $h_d < 0.3h$ 时，为增强桩的抗倾覆能力，取 $h_d = 0.3h$ ， h 为基坑开挖深度。

(2)单支点桩嵌固深度设计值 h_d

①根据弯矩平衡条件计算 h_d

a. 求基坑地面以下支护结构设定弯矩零点位置至基坑底面的距离 h_{c1} ；可按下列下式确定：

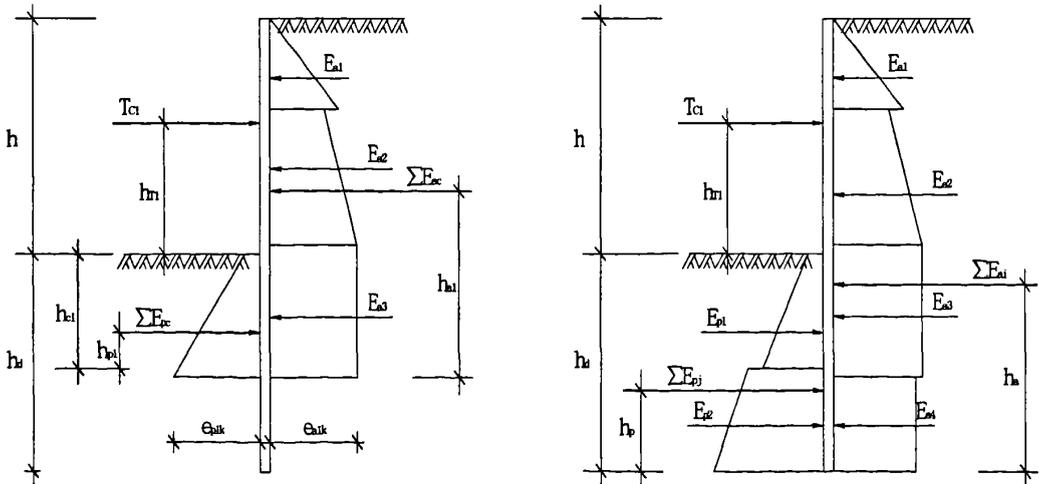


图 3.10 单支点支护结构支点力及嵌固深度计算简图^[11]

$$e_{a1k} = e_{p1k} \quad (3.13)$$

注意：基坑底面以下支护结构设定弯矩零点位置至基坑底面的距离 h_{c1} 点为主动土压力与被动土压力相等点。认为该点弯矩为 0。但要特别注意基坑开挖面以下可能有多个主动土压力与被动土压力相等点，计算时选择剪力为零以下的第一个主动土压力与被动土压力相等点。

b. 支点力 T_{c1} 可按下式计算：

$$T_{c1} = \frac{h_{a1} \sum E_{ac} - h_{p1} \sum E_{pc}}{h_{T1} + h_{c1}} \quad (3.14)$$

式中 e_{a1k} 、 e_{p1k} —— 水平荷载和抗力标准值；

$\sum E_{ac}$ 、 $\sum E_{pc}$ —— 设定弯矩零点位置以上基坑外侧和内侧各土层水平荷载和抗力标准值的合力之和；

h_{a1} 、 h_{p1} —— 分别为合力 $\sum E_{ac}$ 和 $\sum E_{pc}$ 作用点至设定弯矩零点的距离；

h_{T1} —— 支点至基坑底面的距离；

h_{c1} —— 基坑底面至设定弯矩零点位置的距离。

c. 嵌固深度设计值 h_d 可按下式确定：

$$h_p \sum E_{pj} + T_{c1}(h_{T1} + h_d) - 1.2\gamma_0 h_d \sum E_{ai} \geq 0 \quad (3.15)$$

②构造要求确定 h_d

当计算得到的嵌固深度设计值 $h_d < 0.3h$ 时，为增强桩的抗倾覆能力，取 $h_d = 0.3h$ ， h 为基坑开挖深度。

(3)多支点桩嵌固深度设计值 h_d

多支点桩的嵌固深度计算与上述方法不同，按整体稳定条件圆弧滑动简单条分法计算多支点桩嵌固深度设计值 h_d 。

①满足整体稳定圆弧滑动法计算的嵌固深度设计值 h_d 。

a. 整体稳定圆弧滑动法计算的嵌固深度 h_d

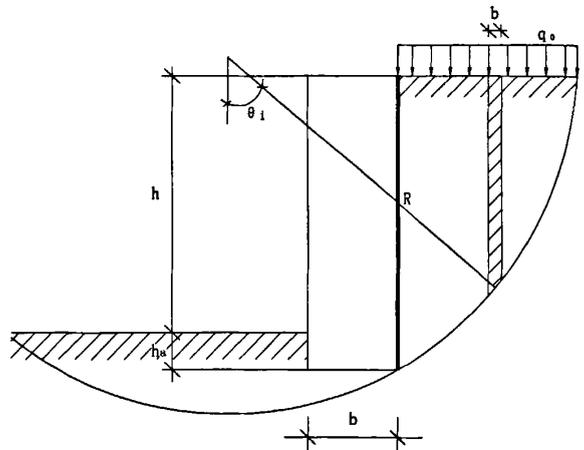


图 3.11 多支点桩嵌固深度计算简图^[11]

$$\sum c_{ik} l_i + \sum (q_0 b_i + w_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{ik} - \gamma_k \gamma_0 \sum (q_0 b_i + w_i) \sin \theta_i \geq 0 \quad (3.21)$$

式中 c_{ik} 、 ϕ_{ik} ——最危险滑动面上第 i 土条滑动面上土的固结不排水（快）剪粘聚力、内摩擦角的标准值； l_i ——第 i 土条的弧长； b_i ——第 i 土条的宽度； r_k ——整体稳定分项系数，应根据经验确定，当无经验时取 1.3； w_i ——作用于滑裂面上第 i 土条的重量，按上覆土层的天然重度计算； θ_i ——第 i 土条弧线中点切线与水平线夹角。

当嵌固深度下部存在软弱土层时，尚应验算软弱下卧层整体稳定性。

b. 构造要求确定 h_d

当计算得到的嵌固深度设计值 $h_d < 0.2h$ 时，为增强桩的抗倾覆能力，取 $h_d = 0.2h$ ， h 为基坑开挖深度。

(4)当基坑底为碎石土及砂土、基坑内排水且作用有渗透水压力时，侧向截水的排桩除应满足嵌固深度设计计算的有关规定外，还应满足抗渗透稳定条件：

$$h_d \geq 1.2r_0(h - h_{wa}) \tag{3.22}$$

3、结构计算

(1)弹性支点法

弹性方法：对于有支点的支护结构，将支点简化为弹性支座，基坑开挖面以下被动侧土压力简化为弹簧，这样形成的梁承受主动土压力的作用。通过求解该连续梁，得到该支护结构的内力和位移。

采用弹性杆系有限元法作为结构计算的基本模型。与各种经典计算方法相比，杆系有限元法更能体现基坑开挖过程的实际工况，边界条件可根据工程特点灵活确定，能较为准确地计算结构的变形和水平位移。

挡土结构后的土压力和水压力作为荷载作用在桩墙结构上；作为整个支护结构一部分的支撑或锚杆看做挡土结构的弹性支点；考虑到结构与土的相互作用，挡土结构与土接触面上，土对结构的作用模拟为弹簧，其中开挖面上为单向压缩型弹簧。

按弹性支点法计算支护桩变形（图 3.10），其基本挠曲线方程为

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} - e_{aik} b_s = 0 \quad (0 \leq z \leq h_n) \tag{3.23}$$

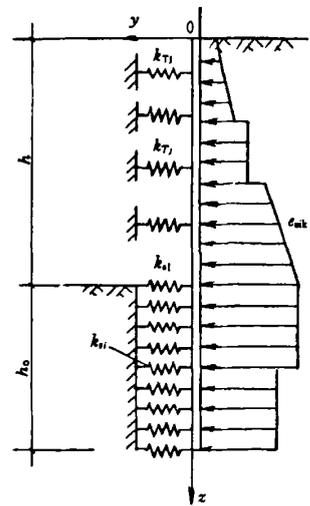


图 3.10 变形计算简图^[11]

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + mb_0(z - h_n)y - e_{aik} b_s = 0 \quad (z \geq h_n) \quad (3.24)$$

式中 EI --支护桩计算宽度的抗弯刚度;

m --地基土水平抗力系数的比例系数, 根据单桩水平荷载试验确定; 当无试验时, 第 i 土层水平抗力系数的比例系数

$$m_i = \frac{1}{\Delta} (0.2\varphi_{ik}^2 - \varphi_{ik} + c_{ik}) \quad (3.25)$$

其中 φ_{ik} 、 c_{ik} --第 i 土层的固结不排水(快)剪内摩擦角标准值($^\circ$)、粘聚力标准值(kPa);

Δ --基坑底面处位移量(mm), 无相关经验时取 10。

b_0 --圆形支护排桩结构抗力计算宽度, $b_0 = 0.9 \times (1.5d + 0.5)$, d 为桩身直径。当抗力计算宽度 b_0 计算值超过排桩间距时, 应取桩间距;

z --支护桩顶至计算点的距离; h_n --第 n 工况基坑开挖深度;

y --计算点水平变形; b_s --支护桩中心间距。

(2) 极限平衡法

极限平衡法是一种经典的支护结构计算方法, 在有限元方法流行之前, 应用较广, 目前已被杆系有限元等现代计算方法所替代。极限平衡法能计算结构内力和支座反力, 但不能计算结构的位移, 因此具有一定的局限性。等值梁法是极限平衡法的主要代表, 用于计算设有支点的桩墙结构。

等值梁法: 对于有支点的支护结构, 将基坑开挖面以下主动、被动土压力相等的点认为是铰, 即弯矩为零, 其它支点均为铰支, 这种就形成连续梁承受土压力, 通过求解该连续梁, 得到该支护结构的内力。按照文献^[11]规定, 排桩等桩墙结构的结构内力、变形和支点力计算值应根据基坑开挖及地下结构施工过程的不同工况按下列规定计算:

1) 宜按规程的弹性支点法计算, 支点刚度系数及地基土水平抗力系数应按地区经验取值, 当缺乏地区经验时可计算求得; 排桩可根据受力条件分段按平面问题计算, 排桩水平荷载计算宽度可取排桩的中心距。

2) 悬臂及单层支点结构的支点力计算值、截面弯矩计算值、剪力计算值可按静力平衡条件确定。

3) 结构内力及支点力的设计值应按下列规定计算:

①截面弯矩设计值 M

$$M = 1.25r_0M_c \quad (3.26)$$

式中 M_c —截面弯矩计算值。

②截面剪力设计值 V

$$V = 1.25r_0V_c \quad (3.27)$$

式中 V_c —截面剪力计算值。

③支点结构每层支点力设计值 T

$$T = 1.25r_0T_c \quad (3.28)$$

式中 T_c —每层支点力计算值。

3、桩墙截面承载力设计计算

(1)抗弯承载力

①局部均匀配筋和集中配筋的圆形截面(图 3.11)

截面弯矩设计值, M 考虑基坑安全等级, 根据文献^[15]要求, $M = 1.25\gamma_0M_c$ (3.29)

由静力平衡条件, 正截面受压区砗和钢筋抗压能力等于受拉区钢筋抗拉能力, 有

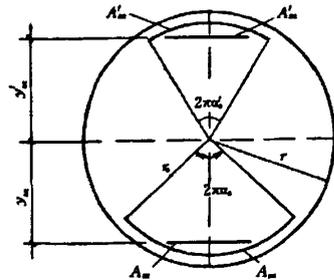


图 3.11 局部均匀配筋和集中配筋的圆形截面计算简图^[11]

$$\alpha f_{cm} A \left(1 - \frac{\sin 2\pi\alpha}{2\pi\alpha}\right) + f_y (A'_{sr} + A'_{sc} - A_{sr} - A_{sc}) = 0 \quad (3.30)$$

正截面弯矩设计值小于等于正截面抗弯能力, 有

$$M \leq \frac{2}{3} f_{cm} A r \frac{\sin^3 \pi\alpha}{\pi} + f_y A_{sr} r_s \frac{\sin \pi\alpha_s}{\pi\alpha_s} + f_y A_{sc} y_{sc} + f_y A'_{sr} r_s \frac{\sin \pi\alpha'_s}{\pi\alpha'_s} + f_y A'_{sc} y' \quad (3.31)$$

选取的距离应符合: $y_{sc} \geq r_s \cos \pi\alpha_s$, $y'_s \geq r_s \cos \pi\alpha'_s$

$$\text{砗受压区圆心半角的余弦应} \quad \cos \pi\alpha \geq 1 - \left(1 + \frac{r_s}{r} \cos \pi\alpha_s\right) \xi_b \quad (3.32)$$

式中 α —对应于受压区砗面积的圆心角 (rad) 与 2π 的比值, 且 $\alpha \geq 1/3.5 = 0.286$;

α_s —对应于周边均匀受拉钢筋的圆心角 (rad) 与 2π 的比值; α_s 宜在 $1/6\sim 1/3$ 之间选取, 通常可取定值 0.25;

α'_s —对应于周边均匀受压钢筋的圆心角 (rad) 与 2π 的比值; 宜取 $\alpha'_s \leq 0.5\alpha$;

A —桩的截面面积 (mm^2);

A_{sr} 、 A'_{sr} —均匀配置在圆心角 $2\pi\alpha_s$ 、 $2\pi\alpha'_s$ 内沿周边的纵向受拉、受压钢筋截面面积;

A_{sc} 、 A'_{sc} —均匀配置在圆心角 $2\pi\alpha_s$ 、 $2\pi\alpha'_s$ 的砵弓形面积范围内的纵向受拉、受压钢筋截面面积;

r —桩截面半径 (mm); r_s —纵向钢筋所在圆周的半径 (mm);

y_{sc} 、 y'_{sc} —纵向受拉、受压钢筋截面面积 A_{sc} 、 A'_{sc} 的重心至圆心的距离;

f_y 、 f_{cm} —普通钢筋抗拉强度设计值, 砵弯曲抗压强度设计值 (MPa);

ξ_b —矩形截面相对界限受压区高度, 按文献^[11]有关规定确定。

计算受压区砵截面面积的圆心角 (rad) 与 2π 的比值 α 宜符合: $\alpha \geq 1/3.5$ (3.33)

当不符合上式时, 其正截面受弯承载力可按下式计算:

$$M \leq f_y A_{sr} \left(0.78r + r_s \frac{\sin \pi\alpha_s}{\pi\alpha_s} \right) + f_y A_{sc} (0.78r + y_{sc}) \quad (3.34)$$

沿圆形截面受拉区和受拉区周边实际配置均匀纵向钢筋的圆心角应分别取为 $2\frac{n-1}{n}\pi\alpha_s$ 和 $2\frac{m-1}{m}\pi\alpha'_s$, n 、 m 为受拉区、受压区配置均匀纵向钢筋的根数。

配置在圆形截面受拉区的纵向钢筋的最小配筋率 (按全截面面积计算) 不宜小于 0.2%。在不配置纵向受力钢筋的圆周范围内应设置周边纵向构造钢筋, 纵向构造钢筋直径不应小于纵向受力钢筋直径的二分之一, 且不应小于 10mm; 纵向构造钢筋的环向间距不应大于圆截面的半径和 250mm 两者的较小值, 且不得少于 1 根。

②沿周边均匀配筋的圆形截面

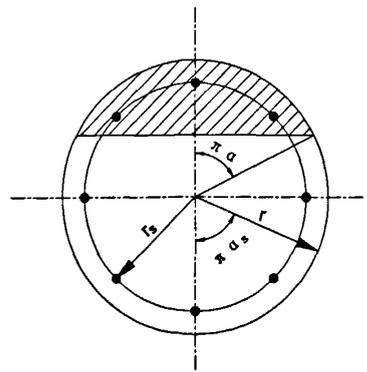


图 3.12 均匀配筋的圆形截面计算简图^[4]

沿周边均匀配置纵向钢筋，不少于 6 根纵向钢筋的圆形截面，其正截面受弯承载力（图 3.12），可按式（3.35）计算：

$$M \leq \frac{2}{3} f_{cm} A r \frac{\sin^3 \pi \alpha}{\pi} + f_y A_s r_s \frac{\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha_t}{\pi} \quad (3.35)$$

$$\text{且有 } \alpha f_{cm} A \left(1 - \frac{\sin 2\pi \alpha}{2\pi \alpha}\right) + f_y A_s (\alpha - \alpha_t) = 0 \quad (3.36)$$

式中 A_s —纵向钢筋截面面积 (mm^2)；

α_t —纵向受拉钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值，当 $\alpha \leq 0.62$ 时，取 $\alpha_t = 1.25 - 2\alpha$ ；当 $\alpha > 0.625$ 时，取 $\alpha_t = 0$ 。其它符号同上。

具体计算：首先根据经验取灌注桩配筋 A_s ；其次，计算系数 $K = f_y A_s / f_{cm} A$ ，由 K 查表或通过式（3.30）、（3.36）计算，求得 α ；将 α 代入式（3.31）、（3.35），得到单桩抗弯承载力 M ；最后比较 M 与单桩承受的弯矩，调整配筋量 A_s ，重复上述步骤，直到合适为止。

(2) 抗剪承载力

截面剪力设计值 V ，考虑基坑安全等级，根据文献^[11] 要求，

$$V = 1.25 \gamma_0 V_c \quad (3.37)$$

$$\text{根据文献}^{[11]}, \quad V = 0.7 f_c r^2 \quad (3.38)$$

4、预应力锚杆

锚杆是一种受拉杆件，它的一端与工程结构物或挡土桩墙联结，另一端锚固在地基的土层或岩层中，以承受结构物的上托力、拉拔力、倾侧力或挡土墙的土压力、水压力，

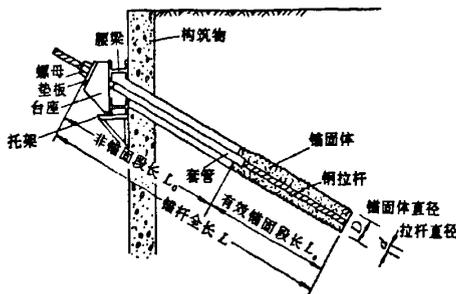


图 3.13 土层锚杆构造^[3]

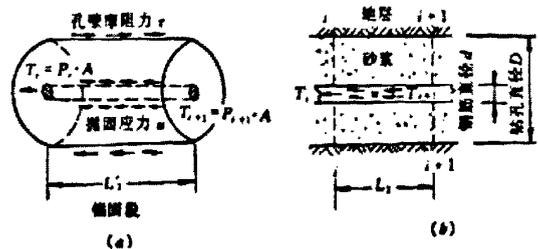


图 3.14 土层锚杆工作机理^[3]

它利用地层的锚固力维持结构物的安全和稳定。

(1)锚杆工作机理

①锚杆及锚杆支护体系（图 3.13）

锚杆支护体系由维护壁、围檩与托架、锚杆三部分组成。维护壁包括各类竖向挡土护壁结构。围檩可采用工字钢、槽钢等组成的组合梁，或采用钢筋混凝土梁。围檩搁置在托架上，托架固定在维护壁上。锚杆有锚杆头部、拉杆及锚固体三个基本部分组成。

②锚杆抗拔力的传递过程（图 3.14）

作用于基坑侧壁结构上的荷载，通过围檩传递给锚杆。锚杆与基坑侧壁结构共同工作，将锚杆头部与挡土侧壁联结起来，把侧壁结构承受的荷载传递到拉杆上去，拉杆将来自锚杆头部的拉力传递给锚固体。锚固体将来自拉杆的力通过摩阻抵抗力或支撑抵抗力传递给邻近稳固的地层。

传递过程随着荷载增加，锚杆与水泥砂浆粘结力逐渐发展到锚杆下端，待锚固段内发挥最大粘结力时，就发生与土体的相对位移，随即发生土与锚杆的摩阻力，直到极限摩阻力。

③影响锚杆抗拔力的因素

a. 土的抗剪强度

锚杆锚固体与土层的摩阻力取决于沿接触面外围的土层抗剪强度。

土层抗剪强度为： $\tau = c + \sigma \tan \varphi_k$

式中 c —锚固区内土的粘聚力（kPa）；

φ_k —土的内摩擦角（°）；

σ —锚固体周边法向压应力（kPa）。

b. 灌浆方式

压力灌浆对锚杆的抗拔力起很大作用，灌浆压力可使水泥浆颗粒渗入周围土层，增加了锚固体与周围土层的摩擦力，从而锚杆的抗拔力有效增加。实验表明，灌浆压力超过 4MPa 后，对提高锚杆抗拔力作用不再明显。

采用二次压力注浆，能够冲破第一次灌浆与土体形成的灌浆壁，充填由于浆液收缩在锚固体与灌浆壁的空隙，使二次灌浆的浆液进一步向周围土体入渗、挤压和扩散，使灌浆壁形成不规则的水泥镶嵌体，提高了周边土体的力学性能和抗剪强度，也增加了锚

固体与土体的摩擦面积，从而使锚杆的抗拔力成倍提高。

c. 杆体形式

改变锚杆杆体截面，提高锚固体与周围土层的接触面积，设置变化的截面都会明显增加锚杆抗拔力。

(2) 锚杆设计计算

桩墙-锚杆支护结构的锚杆承载力计算应符合下式要求：

$$T_d \leq N_u \cos \theta \quad (3.39)$$

式中 T_d ——锚杆水平拉力设计值；

N_u ——锚杆轴向受拉承载力设计值；

θ ——锚杆与水平面的倾角。

① 锚杆自由段长度计算

锚杆自由段是锚杆在基坑潜在滑动面以内的部分，文献^[11]规定，锚杆自由段长度 L_f 宜按下式计算：

$$L_f = L_t \cdot \sin\left(45^\circ - \frac{\varphi_k}{2}\right) / \sin\left(45^\circ + \frac{\varphi_k}{2} + \theta\right) \quad (3.40)$$

式中 L_t ——锚杆锚头中点至基坑底面以下基坑外侧荷载标准值与基坑内侧抗力标准值相等处的距离。

θ ——锚杆与水平面的倾角。

φ_k ——土体各土层厚度加权内摩擦角标准

值。

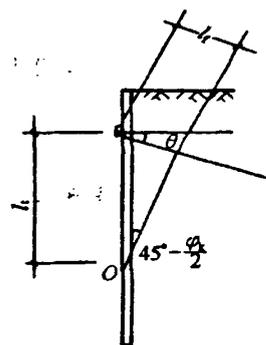


图 3.15 锚杆自由段长度计算简图^[3]

② 锚杆轴向受拉承载力设计值的确定和计算

锚杆受拉承载力是指锚杆伸入稳定土层的锚杆段，由所在土层锚杆体之间摩阻力产生的承载能力，基坑潜在滑动面以内的长度为自由段，不能提供抗拔力。按文献^[11]要求，锚杆的轴向受拉承载力设计值应按下列规定取值：

a. 对安全等级为一级及缺乏地区经验的二级基坑侧壁，应通过锚杆的基本试验确定极限承载力，锚杆轴向受拉承载力设计值 N_d 可取基本试验确定的极限承载力除以受拉抗力分项系数 r_s 得到，受拉抗力分项系数可取 1.3。

b. 基坑侧壁安全等级为二级且有邻近工程经验时, 可按下式计算锚杆轴向受拉承载力设计值, 并进行锚杆验收试验。工程上采用的锚杆以不扩孔锚杆最为常见, 此时锚杆承载力计算在下式基础上去掉括号内后两项即可。

$$N_u = \frac{\pi}{\gamma_s} \left[d \sum q_{sik} l_i + d_1 \sum q_{sjk} l_j + 2c_k (d_1^2 - d^2) \right] \quad (3.41)$$

式中 d_1 —扩孔锚固体直径;

d —非扩孔锚杆或扩孔锚杆的直孔段锚固体直径;

l_i —第 i 层土中直孔部分锚固段长度;

l_j —第 j 层土中扩孔部分锚固段长度;

q_{sik} 、 q_{sjk} —土体与锚固体的极限摩阻力标准值, 应根据已有经验或试验选取;

c_k —扩孔部分土体粘聚力标准值;

γ_s —锚杆轴向受拉抗力分项系数, 可取 1.3。

c. 对于塑性指数大于 17 的粘性土层中的锚杆应进行蠕变试验;

d. 基坑侧壁安全等级为三级时可按式 (3.41) 确定锚杆轴向受拉承载力设计值。

③锚杆杆体截面计算

锚杆杆体强度作为锚杆承载力的另一个控制条件, 也应满足抗拉锚杆轴力的要求。一般在锚杆设计时, 杆体的轴向受拉承载力应大于土层摩阻力提供的受拉承载力, 以充分发挥锚杆潜力。按文献^[11]规定, 以此原则计算的锚杆杆体截面面积应按下式公式确定:

$$a. \text{普通钢筋截面面积 } A_s: A_s \geq T_d / (f_y \cos \theta) \quad (3.42)$$

$$b. \text{预应力钢筋截面面积 } A_p: A_p \geq T_d / (f_{py} \cos \theta) \quad (3.43)$$

式中 f_y 、 f_{py} --普通钢筋、预应力钢筋抗拉强度设计值。

④锚杆预加力值的确定

锚杆预加力值(锁定值)应根据地层条件及支护结构变形要求, 宜取为锚杆受拉承载力设计值的 0.50~0.65 倍。

3.1.3 水泥土墙支护结构设计

1、水泥土墙结构的特点和适用条件

(1)水泥土墙结构的特点

水泥土墙重力式结构是在基坑侧壁形成一个具有相当厚度和重量的刚性实体结构，以其重量抵抗基坑侧壁土压力，满足该结构的抗滑移和抗倾覆要求。这类结构一般采用水泥土搅拌桩，使桩体相互搭接形成块状或格栅状等形状的重力结构。

水泥土重力式维护结构是利用水泥材料为固化剂，经过特殊的拌和机械（如深层搅拌机或高压旋喷机等）在地基中就将原状土和水泥（粉体、浆液）强制机械拌和，经过土和水泥固化剂或掺和料产生一系列物理化学反应，形成具有一定强度、整体性的水稳性的加固土圆柱体。施工时将圆柱体相互搭接，连续成墙，形成具有一定强度和整体结构性的水泥土实体墙或格栅状墙，主要利用其重力维持基坑边坡的稳定，保证地下室的施工及周边环境的安全。水泥土搅拌桩和旋喷桩作为支护结构承受弯矩与剪力的能力有限，墙体内不宜产生拉应力，如插入型钢或钢筋可改善墙体受拉特性。重力式水泥土墙具有以下主要的特点：

①充分利用了加固后原地基土的作用；

②搅拌或旋喷时无侧向挤出、振动小、噪声小和无污染，对周围建筑物及地下管道影响小；

③可灵活地采用壁状、格栅状和块状等结构型式；

④与钢筋混凝土桩相比，可节省钢材并降低造价；

⑤不需要内支撑或锚杆，便于地下室的施工；

⑥可同时起到止水和挡墙的双重作用。

(2)水泥土墙的适用条件

①水泥土墙适用于加固淤泥、淤泥质土和含水量高及强度低的粘土、粉质粘土、粉土。在这些土层中因锚杆或土钉的锚固力低，难以满足抗拔力要求或造价过高，可采用水泥土墙。对泥炭土及有机质土，因固结强度低，应慎重采用。

②因水泥土墙作为重力式结构，墙体一般较宽，必须具有较宽敞的周边施工场地。

③对于软土地层的基坑支护，一般适用于深度不应大于6m的基坑。

④因水泥土墙同时起到截水作用，可用于地下水位以下的基坑支护。

2、水泥土墙的设计方法

主要包括水泥土墙嵌固深度、截面宽度以及截面强度验算三个方面。

混凝土墙嵌固深度设计值 h_d 应通过下列计算确定。

(1) 根据基坑整体稳定性条件计算确定 h_d

根据多支点验算所采用的基坑整体圆弧滑动稳定性验算中的圆弧滑动简单条分法，由式 (3.21)，计算得到混凝土墙嵌固深度设计值 h_d 。

(2) 按管涌构造要求确定

当基坑底为碎石土及砂土、基坑内排水且作用有渗透水压力时，混凝土墙的嵌固深度设计值尚应满足抗渗透稳定条件要求：计算表达式：

$$h_d \geq 1.2\gamma_0(h - h_{wa}) \quad (3.44)$$

式中： h_d —基坑嵌固深度设计值 (m)； r_0 —基坑侧壁重要性系数：基坑侧壁安全等级为一、二、三级， r_0 分别为 1.1、1.0、0.9； h —基坑开挖深度 (m)； h_{wa} —基坑外侧（未开挖侧）地下水位到基坑天然地面的距离 (m)。

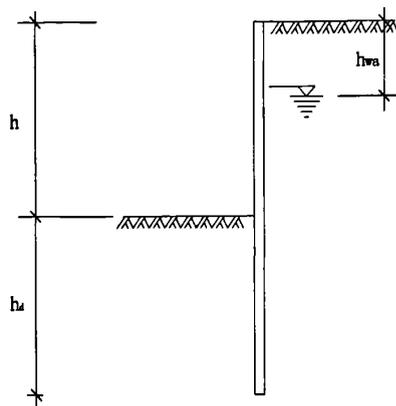


图 3.16 渗透稳定计算简图

(3) 构造要求确定 h_d

计算得到的 h_d ，应满足下列要求：当 $h_d \geq 0.4h$ 时，取 h_d ；当 $h_d < 0.4h$ 时，取 $h_d = 0.4h$ ， h 为基坑开挖深度。

(4) 计算截面宽度设计值 b

混凝土墙宽度设计值 b ，既要满足抗倾覆计算要求，又要满足构造要求。

① 根据抗倾覆稳定条件确定 b 。

分成两种情况：混凝土墙底部位于碎石、砂土或粘性土、粉土。计算简图如图 3.000。

a. 当混凝土墙底部位于碎石土或砂土时（图 3.17 (a)），墙体厚度设计值宜按式 (3.45) 确定：以墙趾点 O 为圆心取矩，则有：

$$b \geq \sqrt{\frac{10 \times (1.2\gamma_0 h_d \sum E_{ai} - h_p \sum E_{pi})}{5\gamma_{cs}(h + h_d) - 2\gamma_0\gamma_w(2h + 3h_d - h_{wp} - 2h_{wa})}} \quad (3.45)$$

式中： $\sum E_{ai}$ 、 $\sum E_{pi}$ ——混凝土墙底以上基坑外、内侧水平荷载标准值的合力 (KN)；

h_a 、 h_p ——合力 $\sum E_{ai}$ 、 $\sum E_{pi}$ 作用点至混凝土墙底的距离 (m)；

r_{cs} ——混凝土墙体平均重度 (KN/m³)；

r_w ——水的重度 (KN/m³)，取 $r_w = 10$ ；

h_{wa} 、 h_{wp} ——基坑外、内侧水位深度 (m)。

b. 当水泥土墙底部位于粘性土或粉土中时 (图 3.17 (b)), 墙体厚度设计值宜按式 (3.46) 确定 (不考虑水的作用):

$$b \geq \sqrt{\frac{2(1.2\gamma_0 h_a \sum E_{ai} - h_p \sum E_{pj})}{\gamma_{cs}(h+h_d)}} \quad (3.46)$$

式中的符号意义同上。

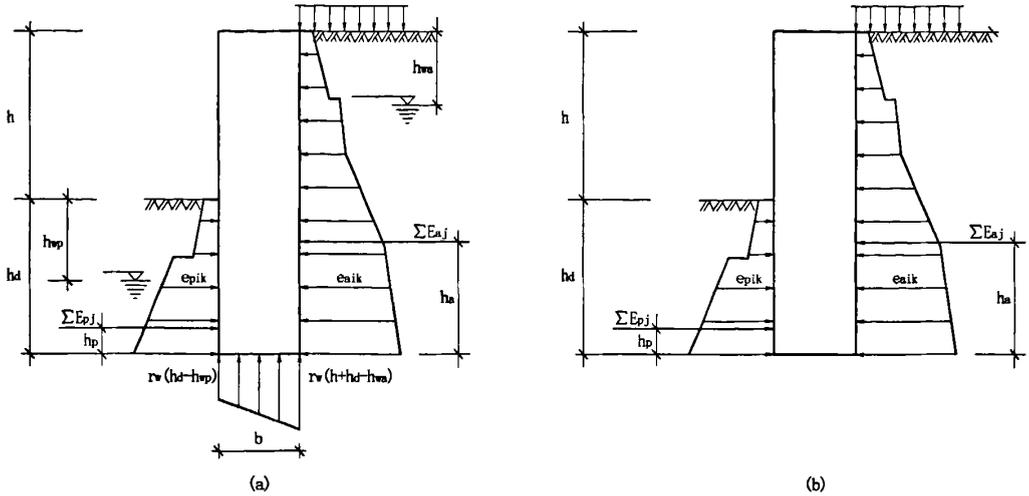


图 3.17 水泥土墙计算简图^[3]

②根据构造要求确定 b

当按上述规定确定的水泥土墙厚度小于 0.4h 时宜取 0.4h, h 为基坑开挖深度。

(5)截面强度验算

对于水泥土墙截面强度, 按式 (3.47)、(3.48) 验算。

①压应力验算:

$$1.25\gamma_0\gamma_{cs}z + \frac{M}{W} \leq f_{cs} \quad (3.47)$$

式中: γ_{cs} ——水泥土墙平均重度 (KN/m³);

z——由墙顶至计算截面的深度 (m);

M——单位长度水泥土墙截面弯矩设计值 (KN·m);

W——水泥土墙截面抗弯模量 (kpa);

f_{cs} ——水泥土开挖龄期抗压强度设计值 (kPa);

γ_0 ——建筑基坑侧壁重要性系数。

②拉应力验算:

$$\frac{M}{W} - \gamma_{cs} z \leq 0.06 f_{cs} \quad (3.48)$$

式中符号意义同上。

3.1.4 深基坑工程降（排）水设计

1、基坑降水设计

①初步布井：一般沿基坑外缘 1000mm 左右封闭式布置降水井。

②确定降水井深度（图 4.1）

$$H = H_1 + h + JL + l \quad (3.49)$$

式中 H —降水井深，m；

H_1 —基坑开挖深度，m；

h —基坑底面至降低地下水最终水位的距离，一般取 $h=0.5\sim 2.0\text{m}$ ；

J —水力梯度，环形井点系统 $J=1/8\sim 1/10$ ，单排井点系统 $J=1/4\sim 1/5$ ；

L —井点管至基坑中心的水平距离，m；

l —过滤工作部分长度，一般考虑 $1.2\sim 2.0\text{m}$ 。

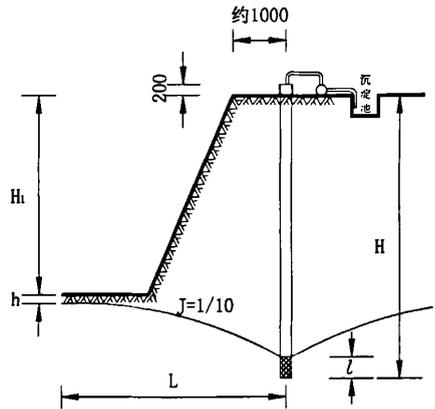


图 3.18 井管的埋设深度计算简图^[2]

②基坑出水量计算 Q (m^3/d)

文献^[1]给出了基坑总涌水量的计算方法，关键是根据工程地质条件，初步确定管井深度，从而选用正确的计算公式。均质含水层潜水完整井基坑涌水量可按下列规定计算：

a. 当基坑远离边界时，涌水量可按下列式计算：

$$Q = 1.366k \frac{(2H - s)s}{\lg \left(1 + \frac{R}{r_0} \right)} \quad (3.50)$$

式中 Q —基坑总涌水量； k —渗透系数； H —潜水含水层厚度；

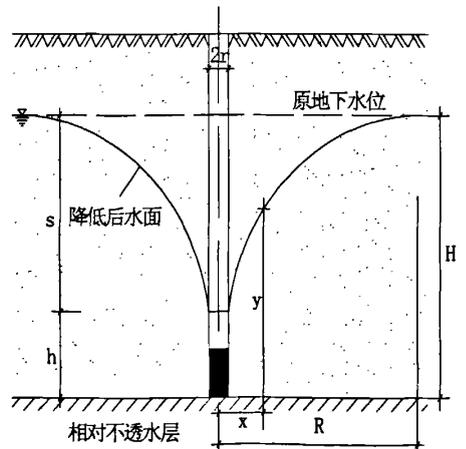


图 3.19 潜水完整井计算简图

s —基坑水位降深; R —降水影响半径; r_0 —基坑等效半径。

b. 当基坑靠近隔水边界, 涌水量可按下式计算:

$$Q = 1.366k \frac{(2H-s)s}{2\lg(R+r_0) - \lg r_0 (2b_1 + b_2)} \quad b' < 0.5R \quad (3.51)$$

④计算管井单井出水量 q (m^3/d)

在井径相同条件下, 采用抽水试验数据, 当无试验资料时, 可用经验公式估算:

$$q = 120\pi_s l \sqrt{k} \quad (3.52)$$

式中 r_s —过滤器半径, m ; k —含水层渗透系数, m/d ;

⑤确定降水井数量 n (个) 与井点间距 a (m)

降水井宜在基坑外缘采用封闭式布置, 井间距应大于 15 倍井管直径, 在地下水不及方向应适当加密; 当基坑面积较大、开挖较深时, 也可在基坑内设置降水井。

$$n = 1.1Q/q, \quad a = L_1 / (n-1) \quad (3.53)$$

式中 L_1 —基坑周长, m ; a —一般大于 $15D$ (D 为过滤器外径), m ;

⑥校核单井出水能力

群井抽水时, 要保证单井抽水稳定, 且实现单井抽水量目标, 井管抽水长度必须

$$y_0 > l \quad (3.54)$$

$$\text{对于潜水完整井 } y_0 = \sqrt{H^2 - \frac{0.732Q}{k} \left(\lg R_0 - \frac{1}{n} \lg nr_0^{n-1} r_w \right)} \quad (3.55)$$

式中 r_0 —圆形基坑半径, 非圆形基坑按等效半径处理:

$$\text{a. 矩形基坑, } a、b \text{ 为基坑的长短边, } r_0 = 0.29(a+b); \quad (3.56)$$

$$\text{b. 不规则块状基坑, } A \text{ 为基坑面积, } r_0 = \sqrt{A/\pi} = 0.564\sqrt{A}; \quad (3.57)$$

H —潜水含水层厚度; r_w —管井半径;

$$R_0 \text{—基坑等效半径与降水井影响半径之和, 即 } R_0 = r_0 + R \quad (3.58)$$

R —降水井影响半径: 安全等级一级基坑根据抽水试验确定, 二、三级基坑潜水含水层按下式计算, S 为基坑水位降深, $R = 2S\sqrt{kH}$ (3.59)

若求得 $y_0 \leq l$ ，应调整将水井数量和井点间距，再进行上述计算，直至满足 (3.55) 式为止。

⑦ 检验基坑中心水位降深值

基坑中心点的水位降深是降水设计的核心指标，该点降水后的水位是保证基坑开挖及一系列后期施工顺利的标志。因此核算该点水位降深值是降水设计的重要工作。降水井的深度应根据设计降水深度、含水层的埋藏分布和降水井的出水能力确定。设计降水深度在基坑范围内不宜小于基坑底面以下 0.5m。

对于块状基坑潜水完整井稳定流

$$S = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q}{1.366k} \left[\lg R_0 - \frac{1}{n} (r_1 r_2 \dots r_n) \right]} \quad (3.60)$$

式中 r_1, r_2, \dots, r_n —各井距基坑中心或各井中心处的距离。

计算出的降深不能满足降水设计要求时，应重新调整井数、布井方式。

2、基坑明排设计

基坑开挖时，对于地表水汇流，边坡地下水渗流，基岩裂隙水等，可采用集水明排的方法，基坑排水沟和集水井可按下列规定布置：

①排水沟和集水井宜布置在拟建建筑基础边净距 0.4m 以外，排水沟边缘离开边坡坡脚不应小于 0.3m，在基坑四角或每隔 30~40m 应设一个集水井；

②排水沟底面应比挖土面低 0.3~0.4m，集水井底面应比沟底面低 0.5m 以上。

基坑明排尚应重视环境排水，当地表水对基坑侧壁产生冲刷时，宜在基坑外采取截水、封堵、导流等措施。

3.1.5 深基坑工程竖向截水设计

深基坑工程在降水过程中抽取地下水，含水层中的地下水位下降引起土层中孔隙水压力降低，颗粒间有效应力增加，从而使地层压密。

1、坑底帷幕底端流土条件验算

在深基坑工程中，围护结构的设计主要是保证在墙后的水土压力作用下，围护结构

本身的稳定以及墙后土的整体稳定。当坑底以下土层为细砂、粉砂及粉土等容易产生流土的条件下，则尚需进行流土条件的验算。

根据工程实际经验，坑底边旁约在距围护墙为墙的插入深度 t 的一半范围内，最易产生流土。当坑内外存在水位差时，墙后地下水的渗流流线，在墙后基本上是竖向向下，在绕过墙趾后，即向上在坑底旁边附近渗出，见图（3.20）所示。如土层为均质土层，则地下水渗流的水力坡降为：

$$i = \frac{h}{L} \quad (3.61)$$

式中 h -坑内外水位差；

L -流线总长。

由上式可见在紧贴墙面的一根流线长度最短，因而水力坡降为最大，该处附近容易发生渗透变形或渗透破坏。

$$i_{\max} = \frac{h}{h+2t} \quad (3.62)$$

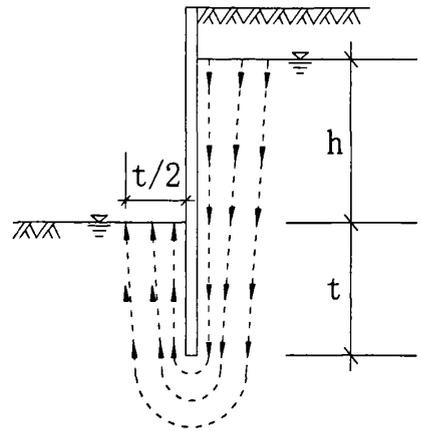


图 3.20 流土（流砂）验算示意图^[10]

按流砂定以，亦即当渗透压力 r_w =土的浮重度 r' 时将出现流砂的临界状态。此时的水力坡降称为临界水力坡降，以 i_{cr} 表示，故得 $i_{cr}=r'/r_w$ 。式中 r_w 为水的重度。令安全系数为 K ，则按下式验算：

$$i_{\max} = \frac{h}{h+2t} \leq \frac{r'}{K \cdot r_w} \quad (3.63)$$

式中 K 一般取 1.5-2.0。如计算表明不能满足上式，则应增大墙的插入深度 t ，直至满足上式为止。

2、竖向止水帷幕深度的确定

①落底式竖向止水帷幕

竖向止水帷幕应插入下卧不透水层。插入深度按下式计算：

$$l = 0.2h_w - 0.5b \quad (3.64)$$

式中 l -帷幕插入深度；

h_w -作用水头；

b -帷幕厚度。

一般插入下卧不透水层的深度宜为 2-3m。若下卧的不透水层渗透系数 $k < 1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，可不作流土条件检验。

②悬挂式竖向止水帷幕的深度确定

基坑底为透水层或弱透水层时，并且厚度较大，设置悬挂式竖向止水帷幕来阻隔地下水。

a. 与坑内井点降水相结合的止水帷幕深度。这里 h 指的是静止水位至帷幕底端深度。

$$h \geq M - \frac{Q(b + M + T)}{k \cdot B \cdot H} \quad (3.65)$$

式中 Q ——基坑外围绕过底端流入坑内的总水量； M ——含水层厚度； B ——基坑边长； H ——静止水位与设计降低水位之差； T ——设计降低水位至挡墙端深度； b ——支护挡墙厚度； k ——渗透系数。

用上述公式确定帷幕深度的条件时：

I. 坑内井点实际抽水量 $Q_{\text{总}}$ 要大于 Q ； $Q_{\text{总}}$ 的计算公式为：

$$Q_{\text{总}} = kBH \frac{M - h}{b + m + T} \quad (3.66)$$

II. 帷幕深度在满足结构稳定、基坑稳定的条件下予以确定，且要进行流土条件的验算：

III. 帷幕深度的最终确定要经过试算。

b. 基坑悬挂式竖向止水帷幕绕流总流量的另一种计算方法（部分符号意义见图 3-22 和图 3-23）：

I. 圆形基坑

$$\text{单宽流量 } q = 0.8kh \frac{1}{\xi_1 + \xi_2} \quad (3.62)$$

$$\text{帷幕底端水头值 } h_F = 1.3h \frac{\xi_2}{\xi_1 + \xi_2} \quad (3.63)$$

$$\text{总流量 } Q_{\text{总}} = 2\pi r q \quad (r \text{ 为圆形基坑帷幕半径}) \quad (3.64)$$

II. 正方形基坑：

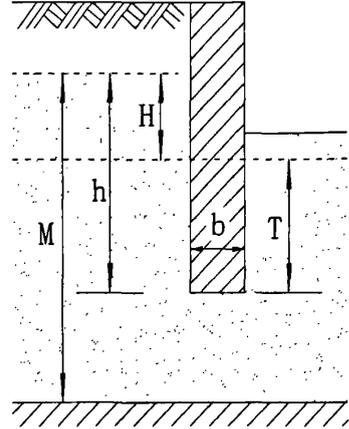


图 3.19 基坑涌水量计算简图^[10]

$$\text{单宽流量 } q = 0.75kh \frac{1}{\xi_1 + \xi_2} \quad (3.65)$$

$$\text{一边中点水头值 } h'_F = 1.3h \frac{\xi_2}{\xi_1 + \xi_2} \quad (3.66)$$

$$\text{角点处水头值 } h''_F = 1.7h \frac{\xi_2}{\xi_1 + \xi_2} \quad (3.67)$$

$$\text{总流量 } Q_{\text{总}} = 8rq \quad (r \text{ 为基坑一边帷幕长度}) \quad (3.68)$$

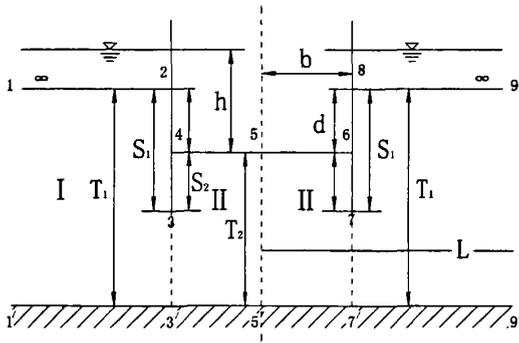


图 3.22 基坑分段法计算图^[10]

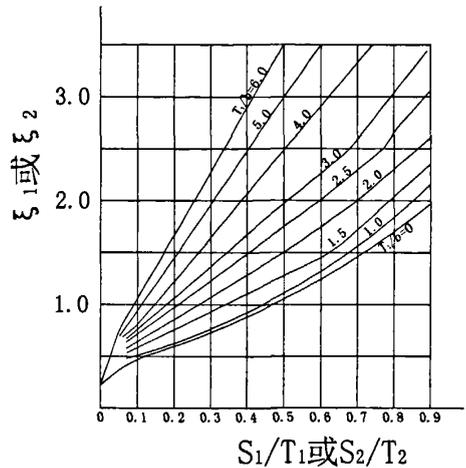


图 3.23 阻力系数曲线图^[10]

III. 长方形基坑

$$\text{单宽流量 } q = kh \frac{1}{\xi_1 + \xi_2} \quad (3.74)$$

$$\text{长边中点水头值 } h_F = h \frac{\xi_2}{\xi_1 + \xi_2} \quad (3.75)$$

短边中点和角点处的水头值与正方形基坑计算公式相同。

$$\text{总流量 } Q_{\text{总}} = 2(L_1 + L_2)q \quad (L_1、L_2 \text{ 为基坑长、短边帷幕长度}) \quad (3.76)$$

多边形基坑可简化为圆形基坑计算。

由基坑帷幕底端渗流坡降 J 可试算和检验流土条件得出帷幕深度。

$$J_F = \frac{h_F}{S_2} \quad (3.77)$$

$$J'_F = \frac{h'_F}{S_2} \quad (3.78)$$

$$J''_F = \frac{h''_F}{S_2} \quad (3.79)$$

深基坑工程的计算理论几乎穷尽所有能利用的数学、力学方法,但由于岩土工程的复杂性以及其工程性质研究的滞后性,并不能较切合实际地解决设计与施工问题,还得从大量的原始积累开始。多年的深基坑工程实践表明:实际工程是最好的原型试验,在试验室中无法考虑的诸多可变因素在实际工程中均得到了充分的反映。所以,应该用实际工程中积累得到的实测资料来建立新的设计施工理论或修正改进现有的深基坑工程的设计理论,进一步提高设计参数的精度。

3.1.6 变形监测探讨

鉴于深基坑的复杂性和不确定性,理论计算还难以全面准确地反映工程进行中的各种变化,所以,在理论分析指导下有目的地进行工程监测十分必要。利用其反馈的信息和数据,一方面可及时采取技术措施防止发生重大工程事故,另一方面亦可为完善计算理论提供依据。

工程监测要编制监测方案,监测内容视工程规模、周围环境情况、支护结构类型等而定。一般包括:支护结构水平变位;周围建筑物、地下管线等的变形;围护墙和支撑体系的内力;立柱的变形;土体分层位移;地下水位变化;土压力及抗力等。在监测过程中对一些内力和变形要根据计算数据和环境保护要求[见《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB50202-2002)表7.1.7基坑变形的监控值]应事先确定报警值。当内力、变形达到报警值时,要及时向有关人员报警,以便采取对策,防止因延误而造成事故。

济南市深基坑工程,还没有总结出适合于自身的支护结构水平位移的限值,目前只是停留在借鉴部分先进城市的施工经验的基础上。

(1)先进城市深基坑变形限值的规定

根据文献^[41],从地方规范的规定可以看出,对基坑围护设计的要求主要按变形控制,对不同安全等级的基坑提出不同数量的变形控制值,安全等级越高,变形控制值越小。

变形控制值有两种不同方法，一种是按水平位移的数值控制，另一种是按水平位移与围护结构高度的相对比值控制。

其实这两种不同的控制方法表示了不同的控制侧重点，相对比值用于控制围护结构本身能处于安全的工作状态，与安全系数相配合以保持围护结构的安全；水平位移的绝对值用于将围护结构对相邻建筑物的影响控制在许可的范围以内。

表 3-1 上海 DBJ08-61-97 规程变形监控标准^[10]

基坑等级	墙顶位移 (mm)	墙体最大位移 (mm)	地面最大沉降 (mm)
一级	30	50	30
二级	60	80	60

注：三级基坑通常宜按二级基坑的标准控制，当环境条件许可时可适当放宽。

表 3-2 深圳 SJG05-96 规范挡土支护结构最大水平位移允许值^[10]

基坑等级	挡土支护结构最大水平位移允许值 (mm)	
	排桩、地下连续墙、坡率法、土钉墙	钢板桩、深层搅拌桩
一级	0.0025H	
二级	0.0050H	0.0100H
三级	0.0100H	0.0200H

注：H 为基坑深度 (mm)。

表 3-3 广州规定 (1998 年 12 月) 支护结构最大水平位移控制值^[10]

安全等级	最大水平位移控制值 (mm)	最大水平位移与坑深控制比值 (mm)
一级	30	0.0025h
二级	50	0.004h
三级	100	0.02h

注：h 为基坑深度 (mm)。

表 3-4 武汉地区深基坑工程技术指南 (WBJ1-7-95) 规定支护结构最大水平位移^[41]

安全等级	支护结构最大水平位移 (mm)
一级	40
二级	100
三级	200

对于面向全国的规范，由于各地地质条件相差悬殊，很难如地方规范那样对变形作出具体的规定，《建筑基坑工程技术规程》(120-99) 在编制过程中曾分别邻近有无永久性建筑物给出了变形控制值，但在最终颁布时删去了这些内容。作为一种经验的总结还是有参考价值。

(2)济南市深基坑工程支护结构变形限值探讨

土钉墙支护结构,理论上还缺乏相应的手段分析计算基坑结构侧壁顶部及其基坑周边地面位移。大多通过实测经验对基坑坡顶位移设置监测报警限值或变形估计,一般坡顶位移与基坑开挖深度之比,可设定硬质区为3%;中硬土区为3~5%;软弱土区为5~10%为警戒值。在济南市缺乏此方面的统计资料,例如,济南某软弱土区深基坑工程(基坑挖深9.0m)的复合土钉墙支护,经连续监测,坡顶矢量位移达5.5%时有迅速发展的趋势,持续时间为4-5天,发展到10%左右发生滑塌。

悬臂式、单支点和多支点挡土结构已经能够从理论上计算桩顶的位移,但还没有总结出适合济南市的范围值。例如,济南某软土区工程中悬臂式排桩,桩顶最大矢量位移达17mm,没有发生事故。

(3)控制变形的结构措施

影响支护结构水平位移的主要因素包括支护结构刚度、预应力锚杆高度及层数、预应力锚杆水平间距等,其中预应力锚杆高度及层数影响最为显著,在工程中应慎重决策。增大支护结构刚度、冠梁和腰梁刚度均可减小支护结构的水平位移,前者效果最好,但经济性差,设计施工中可优先考虑后二者;减小预应力锚杆水平间距可以有效减小支护结构的水平位移。

3.2 济南市典型地层深基坑工程常用支护结构设计参数

根据文献^[11]规定:支护结构设计应考虑其结构水平变形、地下水的变化对周边环境的水平与竖向变形的影响,对于安全等级为一级和对周边环境变形有限定要求的二级建筑基坑侧壁,应根据周边环境的重要性、对变形的适应能力及土的性质等因素确定支护结构的水平变形限值。当场地内有地下水时,应根据场地及周边地区的岩土工程条件、周边环境情况和支护结构与基础型式等因素确定地下水控制方法。深基坑支护主要的目的和要求是挡土护坡、控制地下水和保护环境。

济南市深基坑设计所采用的抗剪强度指标(粘聚力 c 和内摩擦角 ϕ),一般依据岩土工程勘察报告中三轴不排水剪(UU)所提供的 c 、 ϕ 指标的标准值,作为设计参数;一般勘察报告中不提供杂填土的 c 、 ϕ 值,而对于济南市大部分片区普遍存在的较厚的杂

填土,在深基坑设计计算中一般取 $c=5\sim 10\text{kPa}$, $\phi=5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。在济南市软弱土区的深基坑工程,通过基坑降水前后的土样试验,基坑降水后 c 、 ϕ 指标增长明显的特点,一般可作适当调整。

3.2.1 济南市深基坑工程(复合)土钉墙设计参数

单独土钉墙支护在济南市深基坑工程的应用实例较少,一般用于中硬土区;而土钉和预应力锚杆组成的复合土钉墙支护应用最为普遍,其中,预应力锚杆作为复合土钉墙的加强和控制变形措施,该种复合土钉墙支护结构型式适用于任何地层。根据文献^[11]规定,土钉墙适用于深度小于 12m 的二级基坑。

(1)结构参数

①土钉墙坡面坡度:硬质区 1: 0.1~1: 0.3;一般粘性土区 1: 0.2~1: 0.3;软土区不小于 1: 0.25。

②土钉长度:土钉长度一般为基坑开挖深度的 0.5~1.2 倍。根据济南地区深基坑的施工经验,土钉长度除了满足设计验算要求外,根据钢筋定尺为 9.0m,考虑到土钉与加强筋连接,故一般有效土钉长度为 8.8m、5.8m、4.3m 和 2.8m 四种规格,而使用焊接工艺增长土钉的应用实例较少。

③土钉直径:土钉钢筋一般采用直径 20~25mm 的 II 级螺纹钢筋;成孔孔径为 100~150mm。预应力锚杆的主筋采用由 7 根钢丝构成的 $\phi 12.7\text{mm}$ 或 $\phi 15.2\text{mm}$ 预应力钢绞线,每孔由单束或多束钢绞线组成,一般为 1~3 束;成孔直径为 150mm。

④土钉间距:土钉的横向间距一般为 1.5~2.0m,竖向间距一般为 2.0m。根据侧壁土质条件的好坏,横向和竖向间距可适当增减;预应力锚杆水平间距为 1.5~4.0m,竖向间距一般采用 2.0m。

⑤土钉倾角:一般为 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$;预应力锚杆倾角:一般为 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$;

⑥注浆材料:一般选用水泥浆,水泥浆水灰比为 1: 0.5;预应力锚杆锚固体采用水泥浆,其强度等级一般不小于 M10。

⑦喷射混凝土面层:喷射混凝土面层配置钢筋网,钢筋直径为 6.5~14mm 的圆型钢筋,最常用的为 6.5mm,考虑局部加强时采用后者。钢筋网的间距 150~250mm,最常用的为 250mm。喷射混凝土强度等级一般为 C20,面层厚度一般为 80~100mm。

(2)构造措施:

①土钉与面层钢筋要有效连接，一般设加强钢筋，特殊处理情况下少数工程采用承压钢板等构造措施，加强筋与土钉的连接一般采用绑扎形式。加强筋直径一般采用 14 或 16 的 II 级螺纹钢筋。

②预应力锚杆腰梁主要有工字钢或槽钢组合型腰梁和喷射钢筋混凝土腰梁。其中，喷射钢筋混凝土腰梁采用喷射 C20 细石混凝土，主筋采用直径 14mm 或 16mm 的 II 级螺纹钢筋，加强筋一般采用直径 6.5mm 的圆钢，间距 200mm 或 300mm。

3.2.2 济南市深基坑工程排桩设计参数

悬臂桩支护结构主要适用于软弱土区和中硬土区的开挖深度不大且周边无变形要求的深基坑工程；而对基坑开挖深度较大且对周边有变形控制要求的深基坑工程，往往采用单支点桩或多支点桩支护结构，其中，济南市常采用预应力锚杆作为桩锚支护的锚拉系统，控制基坑侧壁变形。

①设计参数

- a. 支护排桩桩径一般采用水上或水下 C25 混凝土浇筑成型。
- b. 支护排桩钢筋笼的主筋一般采用直径 20~25 的 II 级螺纹钢筋，箍筋为 $\phi 6 \sim \phi 8$ mm，加强筋一般为 $\phi 14$ mm 的 II 级螺纹钢筋。桩间距以 1.2~1.6m 居多。
- c. 悬臂式结构的嵌固深度一般为桩长的 $1/3 \sim 1/2$ ，单支点或多支点结构的嵌固深度随地层条件而存在差异。
- d. 锚杆依需要分层设置，长度 12~30m 之间，自由段 4.5m~8.0m，以 $\phi 15.2$ 钢绞线为主要拉结材料，锚固体采用强度大于 M10 的水泥浆为主；
- e. 锚杆水平间距根据桩间距设置，采用单桩单锚或两桩一锚，竖向间距一般为 4.0m 左右，倾角约 20° ；

②构造措施

- a. 排桩顶部设置钢筋混凝土冠梁连接，冠梁宽度为 650~850 mm，冠梁高度为 500mm。桩顶冠梁的混凝土强度等级为 C20 或 C25。
- b. 基坑开挖后排桩的桩间土防护，软弱土区采用挂网素喷的方法处理，中硬土区或硬质土区一般不采用防护措施。
- c. 预应力锚杆腰梁一般采用工字钢或槽钢组合型腰梁。

3.2.3 济南市深基坑工程水泥土墙设计参数

单独土钉墙支护在济南市深基坑工程的应用实例较少，一般用于中硬土区；而土钉和预应力锚杆组成的复合土钉墙支护应用最为普遍，其中，预应力锚杆作为复合土钉墙的加强结构，该种复合土钉墙支护结构型式适用于任何地层。根据文献^[11]规定，土钉墙适用于深度小于 12m 的二级基坑。

(1)结构参数

①土钉墙坡面坡度：硬质区为 1: 0.1~1: 0.3；一般粘性土区为 1: 0.2~1: 0.3；软土区为小于 1: 0.25。

②土钉长度：土钉长度一般为基坑开挖深度的 0.5~1.2 倍。根据济南地区深基坑的施工经验，土钉长度除了满足设计验算要求外，根据钢筋定尺为 9.0m，考虑到土钉与加强筋连接，故一般有效土钉长度为 8.8m、5.8m、4.3m 和 2.8m 四种规格，而使用焊接工艺增长土钉的应用实例较少。

③土钉直径：土钉钢筋一般采用直径 20~25mm 的 II 级螺纹钢；成孔孔径为 100~150mm。预应力锚杆的主筋采用由 7 根钢丝构成的 $\phi 12.7\text{mm}$ 或 $\phi 15.2\text{mm}$ 预应力钢绞线，每孔由单束或多束钢绞线组成，一般为 1~3 束；成孔直径为 150mm。

④土钉间距：土钉的横向间距一般为 1.5~2.0m，竖向间距一般为 2.0m。根据侧壁土质条件的好坏，横向和竖向间距可适当增减；预应力锚杆水平间距为 1.8~2.0m，竖向间距一般采用 2.0m。

⑤土钉倾角：一般为 $5^\circ\sim 10^\circ$ ；预应力锚杆倾角：一般为 $10^\circ\sim 25^\circ$ ；

⑥注浆材料：一般选用水泥浆，水泥浆水灰比为 0.5 左右；预应力锚杆锚固体采用水泥浆，其强度等级一般不小于 M10。

⑦喷射混凝土面层：喷射混凝土面层配置钢筋网，钢筋直径为 6.5~14mm 的圆型钢筋，最常用的为 6.5mm，考虑局部加强时采用后者。钢筋网的间距 150~250mm，最常用的为 250mm。喷射混凝土强度等级一般为 C20，面层厚度一般 80~100mm。

(2)构造措施：

①土钉与面层钢筋要有效连接，一般设加强钢筋，特殊处理情况下少数工程采用承压钢板等构造措施，加强筋与土钉的连接一般采用绑扎形式。加强筋直径一般采用 14 或 16 的 II 级螺纹钢。

②预应力锚杆腰梁主要有工字钢或槽钢组合型腰梁和喷射钢筋混凝土腰梁。其中，喷射钢筋混凝土腰梁采用喷射 C20 细石混凝土，主筋采用直径 14mm 或 16mm 的 II 级螺

钢筋，加强筋一般采用直径 6.5mm 的圆钢，间距 200mm 或 300mm。

3.2.4 济南市深基坑工程降（排）水的设计参数

济南市素有“泉城”的美誉。丰富的地下水和水位埋藏浅是济南市深基坑工程设计与施工过程中一个必须重点解决的施工难题，尤其在软弱土区，基坑降水造成周围建筑物及市政地下管线破坏的事故频有发生。鲁能康桥一期、银座商城北园店、环球广场以及段店莱钢二期等深基坑工程项目，由于对地下水没有采取较好的控制措施，周边居民楼均发生了不同情况的下沉和开裂，在社会上造成了不良影响。近年来，济南市从建设单位到设计、施工单位在深基坑工程中，逐渐增强了对周边环境的保护意识，从工程投资、环境效益、社会效益等多个方面综合考虑深基坑工程设计方案的安全性和可行性。

解决深基坑工程中地下水的问题，主要包括两方面的问题，一是排水；二是竖向截水。排水就是采用何种基坑降水的方式疏干基坑内的地下水，为土建施工单位提供无水施工工作面；设置竖向截水的目的是在抽取基坑内地下水的同时，不会影响到基坑周边市政管线和建筑物的正常使用功能。随着，我国对深基坑工程发行了相关的规范、规程以及强制性条文等文件，济南市也对深基坑工程中的地下水控制问题逐渐引起了高度重视。本文主要从降水和截水两个方面来研究和讨论地下水控制体系，从而，较好地指导深基坑工程的设计与施工工作。

济南市深基坑工程案例中，单独采用明排降水的基坑为数很少，而以管井与明排相结合的降水形式是济南市常用的深基坑地下水降水措施。根据济南市的水文地质条件，开挖深度较深时，各类典型地层中均需采用基坑降（排）水措施。

济南地区的地下水主要以第四系潜水或基岩裂隙水为主，有些片区的基岩裂隙水具有（微）承压性。常年水位埋藏较浅，由于济南特殊的工程地质条件且粘性土可视为相对不透水层，一般深基坑工程中，降水井底端均进入粘性土层，以完整井模型进行基坑降水工程设计。由于济南市区地下水总体运动方向是从东南向西北流动，基坑南侧或东侧布井间距适当增加。

①济南市管井降水井的布置形式一般采用封闭式圆圈布置，而窄条状或场地受限的情况下一般采用局部布井的方式。

②降水井的经验设计深度一般要考虑到两方面的制约因素，一方面是基坑深度，另一方面是帷幕深度引起的经济因素。井深一般控制在 2 倍的基坑深度；若考虑止水帷幕

的经济因素, 井深一般宜满足比止水帷幕深度小, 同时满足 1.5 倍的基坑深度的要求。

③管井的间距一般控制在 16-20m;

④降水井成孔为 600-700mm; 管井滤水管一般采用混凝土无砂滤水管, 管外 500mm, 管内径 400mm, 每节长度 900mm; 滤水管与孔壁填料一般采用 <0.5cm 石灰岩石子或中粗砂。

⑤滤网: 根据工程地质条件, 采用单层或双层编织袋或砂网作为滤网。

3.2.5 济南市深基坑工程竖向截水结构参数

济南市深基坑工程竖向截水帷幕主要有高压喷射法和水泥土搅拌法形成的竖向止水帷幕板墙。水泥土搅拌桩一般适用于地下无障碍物的软弱土区, 而高喷止水帷幕则适用于所有典型地层; 同时, 考虑到经济因素, 在地下水位埋藏较深且在中硬土区或硬质土区施工的深基坑工程, 一般不考虑设置竖向截水措施。在济南市典型地层分区, 尤其是软弱土区, 如果没有采取必要的截水帷幕措施, 将会造成基坑周围建筑物或市政管线的倾斜或裂缝, 导致基坑工程事故的发生, 因此, 竖向截水帷幕是深基坑工程地下水控制体系中另一个重要的方面。

(1)根据工程场地的周边环境、场地工程地质条件以及深基坑工程特点, 济南市深基坑工程一般采用悬挂式和落底式竖向截水帷幕。

(2)根据深基坑工程周边环境情况, 竖向截水帷幕的布置有封闭和半封闭之分。其中, 临近深基坑有河道等, 一般采用半封闭竖向截水帷幕; 在济南市城区范围内施工的深基坑工程, 一般采用封闭式竖向截水帷幕。

(3)水泥土搅拌法形成双排桩体, 桩体直径 500mm, 搭接 150mm。水泥土搅拌法若形成封闭式止水帷幕, 在封闭接合部位须采取局部加固的措施, 可以采用形成超过三排的水泥桩或成孔后高压注浆等处理措施; 而高压喷射法就不存在此方面的问题。

(4)高压喷射法通常采用两管或三管法形成 30° 摆喷或旋喷桩, 桩孔间距一般为 1100-1400mm。

(5)竖向截水帷幕外侧需设置回灌井, 回灌井的规格与降水井相同, 而回灌井深度一般穿过开挖深度范围内渗透系数较大的土层为宜, 间距一般为降水井间距的 2 倍; 回灌井与降水井的距离一般大于 6.0m。

3.3 软弱土区深基坑工程支护设计方法

(1)软弱土区地层力学性质差,一般采用排桩、预应力锚杆、多排水泥土搅拌桩以及土钉墙等联合支护型式。诸如趵突北路济南蓝石商务中心采用土钉墙与预应力锚杆相结合的复合土钉墙的支护型式的深基坑工程并不多见,而当基坑底部地基土承载力较高时可考虑采用;而根据济南市深基坑工程软弱土破坏模式来看,加固基底土体,能够有效地增强边坡的稳定性。

(2)济南市软弱土区深基坑工程的破坏主要以滑塌为主以外,而另一种破坏模式为“夹心式”挤压滑移破坏。存在后一种破坏模式的深基坑工程的分布范围主要为距离大明湖较远的片区,厚层流塑~软塑的粉质粘土渐灭为薄层淤泥质土,三孔桥街鲁能康桥小区、经一路延长线巴黎花园等深基坑工程中,由于设计考虑不周,开挖过程中,上层可塑粉质粘土挤压薄层淤泥质土而产生局部塌方,采用钢管桩支护工艺可避免事故的发生。

(3)软弱土区深基坑工程设计,可考虑开挖速度的快慢、开挖前期基坑降水时间的长短,在进行支护结构验算时,可利用降水后软弱土强度增长的特点,选用较高的抗剪强度指标。

(4)软弱土区在基坑降水过程中,必须设置封闭式竖向截水帷幕,诸如鲁能康桥小区一期在深基坑工程中未采取截水措施,造成周围建筑物墙体开裂的事故,而在二期施工过程中采用了封闭式竖向截水帷幕则未对周边环境造成影响。

(5)软弱土区施工的深基坑工程,支护结构体现出其多样性,诸如趵突北路不夜城、少年宫路济南市青少年宫教学楼等项目采用悬臂或多支点排桩;舜井街省政协办公楼、北园路北洋大酒店、济阳崔寨煤矿污水池等项目采用土钉墙与多排水泥土搅拌桩形成的复合土钉墙支护结构;纬六路莱钢一期住宅楼、济南蓝石商务中心等项目采用土钉墙与预应力锚杆的复合土钉墙支护结构,均取得了较好的效果。

3.4 中硬土区深基坑工程支护设计方法

(1)中硬土区地层力学性质好,从深基坑本身控制变形的角度,济南市普遍采用了预应力锚杆与土钉墙相结合的复合土钉墙支护形式;在变形控制要求不严的场地,一般采用单独土钉墙的支护型式。基坑周边环境条件复杂的深基坑工程根据选型原则进行支护设计选型。

(2)土钉可以用击入钢管的方式形成，在花园路海蔚广场工程中得到成功应用。

(3)在中硬土区施工的深基坑工程一般不考虑设置竖向截水帷幕，仅考虑基坑外降水的地下水控制措施。

(4)在中硬土区的基坑降水过程中，还会遇到承压水的问题，主要是指沿泺源大街施工的深基坑工程项目，要考虑承压水的处理方法。在泺源大街圣凯摩登城深基坑工程中，承压水头比基底高 2.0m 左右，在最初用大功率潜水泵企图降低承压水头无效的情况下，最终采用特种工艺和材料封堵的技术措施，达到良好效果，为此片区的深基坑地下水处理措施积累了宝贵经验。而早几年施工的中信银行广场的深基坑工程，最终采用了抬高基底标高、变更结构设计的方法。

(5)在中硬土区施工的深基坑工程，纬二路齐鲁商会大厦、经七纬一蓝海大酒店、泺源大街圣凯摩登城和济南市中心医院综合病房楼等深基坑工程，在支护结构的选型上均采用了预应力锚杆和土钉墙组成的复合土钉墙，在地下水处理措施上也未设置竖向截水帷幕，均取得了较好的效果。

3.5 硬质土区深基坑工程支护设计方法

(1)硬质土区深基坑开挖，常用油锤破碎、爆破等手段，为了防止振动对上覆土层的影响，采用土钉墙、钢管桩与预应力锚杆相结合形成的复合土钉墙支护形式，是一种行之有效的支护结构选型。

(2)钢管桩可以用其它刚性桩所替代，嵌入硬质土中的深度必须满足设计要求。

(3)英雄山路周边、自八一立交桥附近向东沿经十路两侧的范围，地下水位埋藏较深，考虑到碎石土和基岩裂隙水的渗流特点，基坑降（排）水主要应采用管井降水与设置集水井的明沟排水为主的处理方法。在此范围内，一般不考虑设置竖向截水帷幕。

(4)在硬质土区施工的深基坑工程，千佛山医院综合病房楼、山东大学西校区 4#高层住宅楼等项目，根据以上经验均取得了较好的效果。

3.6 本章小结

3.6.1 指出了校核设计是济南市深基坑工程支护设计的基本方法，并在介绍济南市

常用深基坑工程支护方法的理论基础上，总结了济南市深基坑工程不同支护结构型式和地下水控制措施的设计参数，为今后的工程实践提供参考依据。

3.6.2 参考了国内部分先进城市位移警戒值的确定方法，同时，结合济南市深基坑工程经验，探讨了变形监测警戒值问题，对济南市深基坑支护设计具有借鉴意义。

3.6.3 在理论基础介绍和常用支护结构设计参数的基础上，总结了深基坑工程支护在济南市典型地层中的设计方法。尤其对于软弱土区，强调降排水和竖向截水帷幕的设计，应根据场地及周边工程地质条件、水文地质条件和环境条件并结合基坑支护和基础施工方案结合分析、确定。

第四章 济南市典型地层深基坑支护结构选型应用实践

深基坑工程区域性、个性很强。济南市地处鲁中山地的北缘，南依泰山，北临黄河，地形南高北低。平面分布具有明显的东西向带状分布的特征。南部为绵延起伏的山区，中部为山前倾斜平原，北部为冲积平原；同时，深基坑工程聚集的市区范围内有大明湖、护城河以及趵突泉泉群等，从而，特殊的环境地质条件，使得济南市深基坑工程具有其独特的地域特色。

根据工程地质和水文地质条件，基坑开挖深度和周边环境条件，选用合理的支护型式非常重要。如何合理选用，作者认为应抓住该深基坑工程支护中的主要矛盾。要认真分析基坑支护的主要关键点是什么，主要关键点是稳定问题，还是控制变形问题，产生稳定和变形问题的主要原因是土压力问题，还是水的问题。在进行深基坑支护选型时，应该分析清楚该深基坑工程概况、典型地层条件和设计选型的关键点等问题，然后进行支护结构选型。

深基坑工程支护选型须结合场地典型工程地质和水文地质、基坑开挖深度、施工条件、场地周边环境等众多客观因素而定。本章结合典型地层条件，以济南市具有代表性的深基坑工程为案例说明抓住主要关键点是合理选用支护型式的关键。

4.1 硬质土区深基坑支护结构选型应用实践

济南市深基坑工程所涉及的硬质土区范围指自八一立交桥往东沿经十路两侧的部分区域，以及其它区域以硬质土为主的深基坑工程，其中，影响深基坑设计选型、投资和安全的地质主要是碎石土和岩石。

4.1.1 硬质土区深基坑工程特点

济南市的硬质土区一般上覆有厚薄不一的第四系土层，保证其在下部岩石爆破开挖过程中的安全稳定是硬质土区深基坑工程支护设计过程中主要解决的问题。

4.1.2 确定硬质土地区支护设计选型的基本原则

该区具二元结构，下部岩石开挖过程中，一般需要爆破施工，基坑开挖后作用在支护结构上的土压力主要是来自基坑上部的填土或原状土的压力，而下部基岩对支护结构的侧压力较小。故支护结构的类型主要以上部加强锚固为主，下部以防护为主，并且要在岩质或碎石边坡上设置一定数量的泄水管，以防支护结构后产生过大的静水压力。

4.1.3 典型案例分析

【案例一】山东省广电中心综合业务楼基坑工程

1. 工程概况（图 4.1）

山东省广电中心综合业务楼建于济南市经十路以北，青年东路以东。场地范围内东侧距基坑边坡 8.0~9.0m 有一条排洪沟，沟内污水四季常流。该工程地上 8 层，设 2 层地下室，局部 3 层。基坑开挖深度约 15.00m。

2. 工程地质条件

(1) 地形、地貌：拟建场地为旧房搬迁场地，地形平坦。排洪沟东地势略低。地貌单元属山前冲洪积扇。

(2) 地层结构及各层岩土物理力学性质

勘察深度范围内，场地地层有第四系冲洪积成因的黄土状粉质粘土、粘土碎石胶结及粘土混碎石构成，上覆近期人工填土，下伏奥陶系的白云质灰岩。大致五层：

① 杂填土，以杂色为主，局部为灰~黄褐色，稍密，稍湿，成份以建筑垃圾为主，混碎石、灰渣及粘性土，局部见厚度不等的混凝土基础，层底深度 0.20~5.00m，结构松散，成份不均。

② 黄土状粉质粘土，褐黄色，可塑~硬塑，稍湿，含铁锰氧化物及少量姜石、钙质条纹，具大孔结构，局部混多量灰岩碎石。层底深度 3.20~5.10m，厚度 0.2~4.00m。该层为中压缩性土，具自重失陷性。

③ 粘土及碎石胶结层，该层分为 3 层和 3-1 层。3 层为粘土，棕红色~棕黄色，硬塑~坚硬，稍湿，含铁锰氧化物—多量灰岩碎石。③-1 层为碎石胶结，分布于粘土中间或其下面，不连续，且部分孔缺失。厚度 0.30~45.38m，棕红~灰色，坚硬，密实，碎

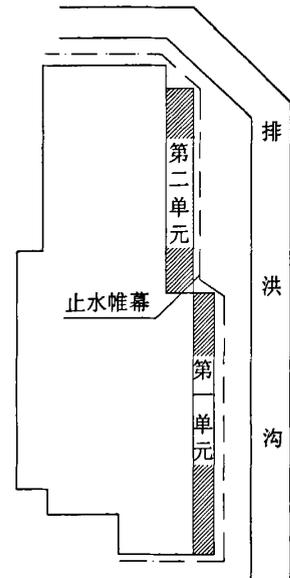


图 4.1 山东省广电中心综合业务楼基坑工程平面图

石成份为灰岩，粒径 0.40~15.0cm，分选性差，钙质及泥质胶结，厚度 3.30~8.80m。综合分析该层土按低压缩性土考虑。

④粘土，灰黄色，坚硬，稍湿，含铁锰氧化物及其结核，混少量或多量碎石角砾，该层仅分布于综合楼场地及主楼局部，埋深较大，厚度 1.00~16.40m。该层土按低压缩性土考虑。

⑤白云质灰岩，灰色~青灰色，局部灰黄色，产状为倾向 305°，倾角 9~10°，隐晶质结构，中厚层构造。该层可视为不可压缩层。

3.设计选型的关键点

(1)截污

由于场地东侧有一排洪沟，宽度 18.0m，深度 4.0m 左右。为防止排洪沟污水向坑内渗漏，危害基坑边坡，在基坑东、北侧设置止水帷幕。

(2)支护选型的限制因素

①在碎石土油锤破碎和岩石开挖爆破时，上覆土层受影响较大，故应采取加固的措施。

②场地地层存在自重湿陷的黄土状粉质粘土，必须采取一定的防水措施。

4.深基坑工程设计选型

采用复合土钉墙支护结构体系，使用《北京理正深基坑支护 F-SPW5.03》计算。

由于沿沟基坑开挖深度不同，地质情况亦有差异。沿沟基坑侧壁支护分两个单元（图 1）。为保护东侧排洪沟，减少东侧土体位移量，利用高喷止水帷幕喷射完成后，插入 $\phi 89$ 焊管，形成超前支护桩（墙），长度 6.0m，间距 1.2m。:

(1)第一单元（图 4.2）

长约 100.0m，挖深 12.0m，侧壁放坡系数 1:0.1，设二道预应力锚杆，二道非预应力锚杆。

第一道预应力锚杆长度 9.00m 左右（穿透排洪沟，两端锚头锁定，排洪沟侧有两根 4.0m [18 槽钢作腰梁），水平间距 2.0m，锚杆标高 -2.5m，孔径 $\phi 150$ 。

第二道预应力锚杆长度 14.00m，自由端 4.00m，

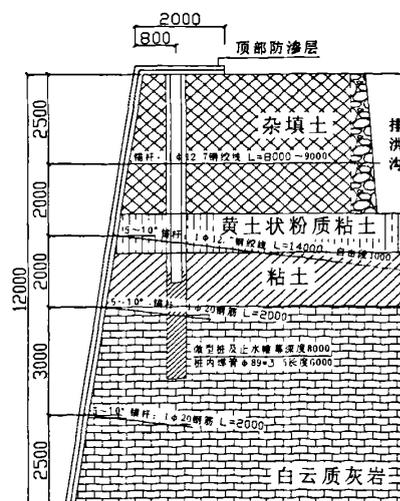


图 4.2 第一单元剖面示意图

水平间距 2.0m, 锚杆标高-4.5m, 孔径 $\phi 150$ 。

第三道非预应力锚杆长度 2.00m, 水平间距 2.0m, 锚杆标高-6.5m, 孔径 $\phi 50$ 。若于粘土层长度增加至 9.00m, 孔径改为 $\phi 150$ 。

第四道非预应力锚杆长度 2.00m, 水平间距 2.0m, 锚杆标高-9.5m, 孔径 $\phi 50$ 。

(2)第二单元(图 4.3)

长约 203m, 挖深 15.0m, 侧壁方坡系数 1: 0.1, 设一道预应力锚杆, 五道非预应力锚杆。

第一道非预应力锚杆长度 9.00m, 水平间距 2.0m, 锚杆标高-2.5m, 孔径 $\phi 150$ 。

第二道预应力锚杆长度 14.00m, 自由端 4.00m, 水平间距 2.0m, 锚杆标高-4.5m, 孔径 $\phi 150$ 。

第三道非预应力锚杆长度 6.00m, 水平间距 2.0m, 锚杆标高-6.5m, 孔径 $\phi 110$ 。

第四道非预应力锚杆长度 14.00m, 水平间距 1.6m, 锚杆标高-8.5m, 孔径 $\phi 150$ 。若遇砾岩、白云质灰岩长度减少至 6.0m, 孔径改为 $\phi 110$ 。

第五道非预应力锚杆长度 9.00m, 水平间距 1.6m, 锚杆标高-10.5m, 孔径 $\phi 150$ 。若遇砾岩、白云质灰岩长度减少至 2.0m, 孔径改为 $\phi 50$ 。

第六道非预应力锚杆长度 6.00m, 水平间距 1.6m, 锚杆标高-12.5m, 孔径 $\phi 150$ 。若遇砾岩、白云质灰岩长度减少至 2.0m, 孔径改为 $\phi 50$ 。

(3)锚喷面层设计

喷射砼强度 C20, 设计配比为水泥: 砂: 碎石=1: 2: 2(重量比), 厚度 80mm, 钢筋网 $\phi 6.5@200 \times 200$ mm 双向布置, 另外设置加强筋 $\phi 16@1000 \times 1000$ mm, 并在坡顶设置 2.0m 钢筋砼外翻, 防止坡顶水源渗漏。

5.施工效果

(1)监测数据显示东沟沟壁最大位移 5mm, 未发生污水渗漏现象, 虽然局部白云质石灰岩有细微渗水, 未对施工造成任何影响。侧壁安全稳定, 开挖顺利。

(2)本工程采用高喷截水帷幕内插入钢管, 并与复合土钉墙相结合的支护结构型式取

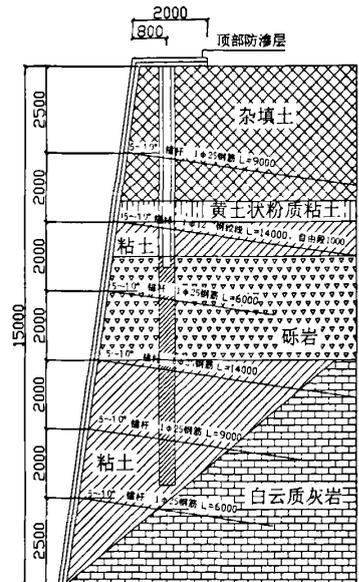


图 4.3 第二单元剖面示意图

得了硬质土区深基坑工程的成功经验。

(3)在靠近排洪沟一侧设置了半封闭竖向截水帷幕，达到了控制地下水的目的。

4.2 中硬土区深基坑支护结构选型应用实践

济南市深基坑工程所涉及的中硬土区范围指济南市区硬质土区和软弱土区之间呈东西向带状分布的可塑~硬塑的粘性土、黄土地层。

4.2.1 中硬土区深基坑工程的特点

可塑~硬塑状态的粘性土和黄土，力学性质好，孔隙比小，含水量低，渗透系数小，基坑降水后形成的水力坡度小，基坑开挖和降水对周边环境产生的影响小。

4.2.2 中硬土区深基坑工程选型的基本原则

①从总体上考虑，必须从基坑各部位的具体情况出发，根据基坑周边场地条件和地质条件接近似或不同的情况，采用同一或多种挡土支护结构类型。

②从场地条件考虑，如坑周场地较为开阔，则可采用上段放坡开挖，下段采用悬臂桩或桩锚挡土支护结构；如坑周场地较为狭窄并且邻近又有重要建筑物需要保护时，则可采用桩锚支护方案。

③从基坑开挖深度与范围考虑，开挖深度不大时，可采用悬臂式挡土支护结构、土钉墙或喷锚支护等结构；开挖深度较大时，可视情况采用挡土桩加单层锚杆或多层锚杆型式。

④从土层地质条件考虑，土质较好的情况可采用土钉或喷锚支护结构；土质较差的情况，则可采用桩锚结构等型式。

⑤从场地地下水位考虑，如地下水位较低时，可采用土钉或喷锚支护结构及稀疏桩排挡土支护结构；如地下水位较高时，可采用支护桩+水泥土桩（旋喷桩，深层搅拌桩等）等。

4.2.3 典型案例分析

【案例二】齐鲁商会大厦深基坑工程

1、工程概况（图 4.4）

齐鲁商会大厦工程位于济南市经五纬二路交叉口西南角，地上三十一层，地下三层，建筑面积 81260m²，其中地下室建筑面积 10750m²，东西长 58m，南北长 110m。桩筏基础，主楼为人工挖孔桩基，共 234 颗，桩径 1.2、1.3m 两种规格，主楼西边板底标高 -17.6~-17.8m；南、北、东侧抗拔桩为钻孔灌注桩，共 68 颗，桩径为 1m，边缘板底标高 -16.3m；桩基坐落在场地第⑨层中风化岩层， $f_{rc} \geq 12\text{Mpa}$ 。工程±0.000 相当于绝对标高 41.500m，场地地坪与±0.000 高差由南向北-0.3~-1.6m。

2、工程地质条件

场区内地层上覆人工填土，场地地面标高：41.30~39.91 米，其下为第四系冲洪积层和残积层，下伏白垩系闪长岩，自上而下可分为 9 层：

①杂填土：层底标高 40.18~34.93 m，埋深 0.30~6.00， $C=0\text{Kpa}$ ， $\psi=12.0^\circ$ ， $\gamma=18.0\text{KN/m}^3$ 。

②-1 碎石： $C=0\text{Kpa}$ ， $\psi=32.0^\circ$ ， $\gamma=19.8\text{KN/m}^3$ 。

②黄土状粉质粘土：可塑，局部硬塑，层底标高 35.70~35.33 m，埋深 4.50~5.50m，厚度 0.60~3.00， $C=26.6\text{Kpa}$ ， $\psi=17.1^\circ$ ， $\gamma=19.0\text{KN/m}^3$ 。

③黄土状粉质粘土：可塑，很湿，局部少量姜石，层底标高 33.59~32.26m，埋深 7.00~8.70m，厚度 2.20~3.30， $C=18.2\text{Kpa}$ ， $\psi=15.7^\circ$ ， $\gamma=19.1\text{KN/m}^3$ 。

④粘土~粉质粘土：硬塑~可塑，湿，层底标高 31.30~28.38m，埋深 9.70~12.50m，厚度 1.40~5.00m， $C=52.1\text{Kpa}$ ， $\psi=13.2^\circ$ ， $\gamma=19.6\text{KN/m}^3$ 。

⑤粘土：硬塑，局部可塑，湿，层底标高 28.93~25.76m，埋深 11.20~14.60m，厚度 1.00~4.50m， $C=60.6\text{Kpa}$ ， $\psi=12.1^\circ$ ， $\gamma=18.9\text{KN/m}^3$ 。

⑥粘土混碎石：硬塑，层底标高 25.08~22.76m，埋深 15.70~18.10m，厚度 0.40~3.80m， $C=70.0\text{Kpa}$ ， $\psi=15.0^\circ$ ， $\gamma=19.5\text{KN/m}^3$ 。

⑦残积土：可塑~硬塑，层底标高 22.72~10.10m，埋深 18.20~30.00m，厚度 1.20~18.80m， $C=13.7\text{Kpa}$ ， $\psi=16.7^\circ$ ， $\gamma=16.9\text{KN/m}^3$ 。⑧强风化：层底标高 19.88~4.13m，埋深 21.00~36.00m，厚度 1.10~8.20m，局部未揭穿。⑨中风化：最大揭

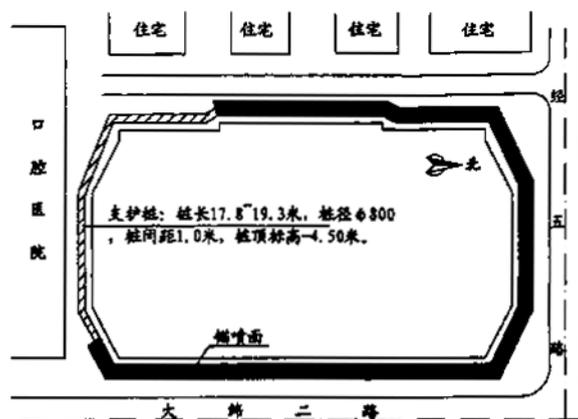


图 4.4 深基坑支护平面布置

露深 46.5m。

水文地质情况：地下水为第四系孔潜水及基岩裂隙水，具微承压性，主要补给来源为大气降水及地下径流。勘察期间（2002 年）地下水静止埋深为 4.70~5.70 米，相对标高 35.12~35.50 米。地下水对砼无侵蚀性。

3.设计选型的关键点

(1)本工程场地狭窄，经五路和大纬二路地下管线较多，分布复杂。

(2)东侧地下室筏板外边线距大纬二路人行道红线距离仅为 1.90 米。

(3)南侧地下室筏板外边线距口腔医院办公楼围墙 4.68 米，口腔医院办公楼地上八层，地下一层，片筏基础，埋深约 4.50 米。

(4)西侧基础边缘距居民楼外墙 10.00 米，居民楼为 4 栋 2~4 层砖混结构，毛石条形基础，埋深约 1.50 米。据业主介绍，二层楼为 50 年代建造，中间两栋为 60 年代建造，南四层楼为 70 年代建造。

(5)北侧地下室筏板外边线距经五路人行道红线最小距离为 4.00 米。

4.深基坑工程设计选型

(1)东侧和西侧北段(图 4.5)：锚喷支护，地下室筏板外边线距大纬二路人行道仅 1.2 米，且地下管线较多，埋深约 3.6 米。人防通道埋深约 5.0 米。上部锚杆设计要避免打到管线。东侧地平面标高为-1.5 米。基坑挖深 14.8 米，按 1:0.1 放坡，设 10 道锚杆(含 4 道予应力锚杆)，水平间距 1.50 米。

(2)西侧南段(图 4.6)：四栋四层居民楼，基础埋深在地下水位以上，距基槽 7.0 米，附

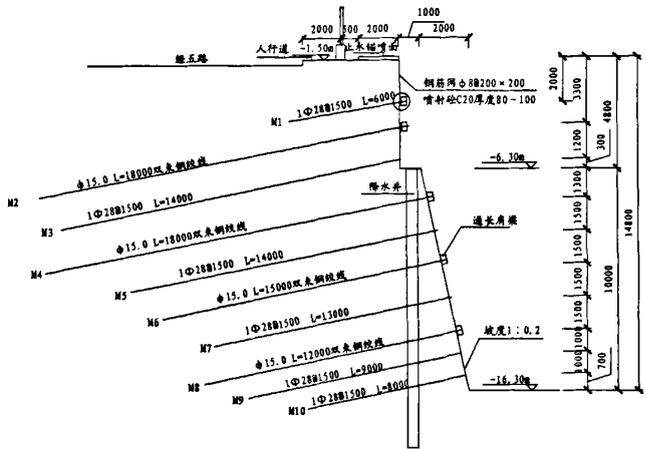


图 4.5 东侧和西侧北段边坡支护剖面图

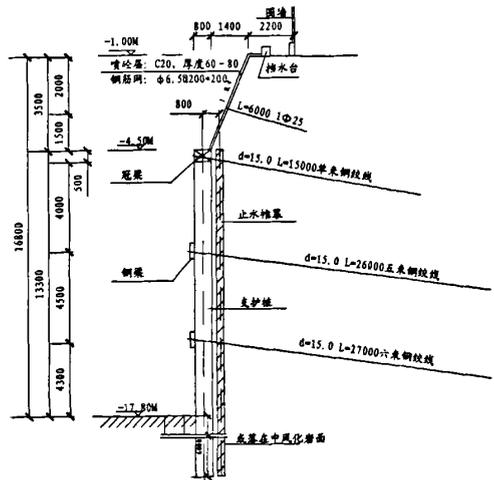


图 4.6 西侧南段边坡支护

加荷载相对较大(约 60KN/m²)。该房属典型的老房,有的无圈梁,有的仅在屋顶设置一道,抵抗侧向变形及不均匀沉降的能力极差,因此应高度重视。其支护采用复合锚喷止水帷幕。西侧地平标高为-1.2 米。基坑挖深 16.6 米,按 1:0.2 放坡,设 12 道锚杆(含 5 道予应力锚杆),水平间距 1.50 米。

(3)北侧:一路之隔的汇宝大厦距场地较远,基础埋深大,可不考虑降水、基坑开挖对其安全的影响。支护采用复合锚喷。上部锚杆考虑经五路的地下管线保护。北侧地平标高为-1.5 米。基坑挖深 14.8 米,按 1:0.2 放坡,设 10 道锚杆(含 4 道予应力锚杆),水平间距 1.50 米。

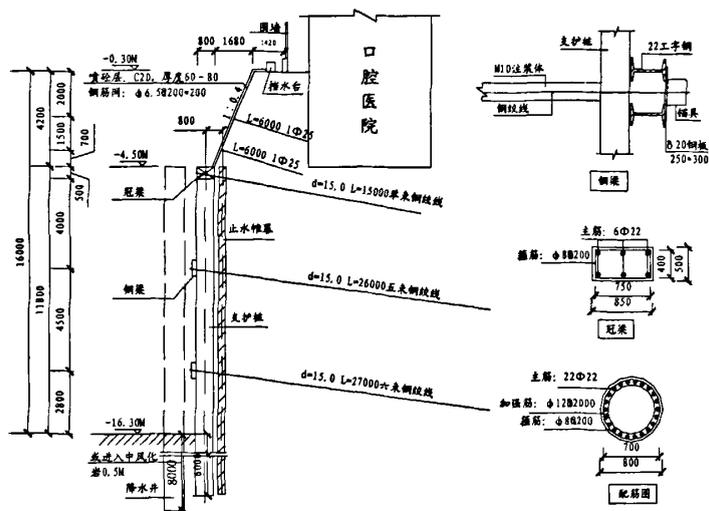


图 4.7 南侧边坡支护剖面图

(4)南侧(图 4.7):地下室筏板外边线距口腔医院办公楼围墙 4.68 米,口腔医院办公楼地上八层,地下一层,片筏基础,埋深约 4.50 米。

5.施工效果

(1)该深基坑采用的支护结构型式有:东侧、西侧北段以及北侧采用了土钉与预应力锚杆的复合土钉墙;西侧南端和南侧边坡采用顶部放坡复合土钉墙支护,下部采用桩锚支护的挡土结构型式;基坑四周封闭式布置降水井。

(2)根据基坑周边复杂的环境因素,通过选择不同的支护结构型式,确保了基坑开挖及主体结构施工过程中侧壁安全稳定。

【案例三】济南市中心医院综合病房楼

1. 工程概况

济南市中心医院综合楼位于济南市解放路 105 号, 济南市中心医院院内, 总建筑面积约为 18519.15m^2 , 地上六层, 地下两层。结构类型为框架结构, 基础型式采用独立柱基。拟建综合楼基坑东西距离 115.45m , 南北跨度 121.90m , 基坑形状不规则, 基坑挖深 $9.0\sim 11.0$ 米。

2. 工程地质与水文地质条件

(1) 工程地质条件

该场地地基土为第四系冲洪积地层, 表层为杂填土, 自上而下描述如下:

①填土 (Q_4^{pl}): 分杂填土和素填土。杂填土: 杂色, 稍密, 稍湿, 含砖屑、碎石、灰渣等建筑垃圾。主要分布在该层上部, 场地内大部分地段表层铺设 $10\sim 20\text{cm}$ 厚砼地面。素填土: 黄褐~褐黄色, 可~硬塑, 稍湿, 含少量砖块、灰渣、砼块等, 主要由粘性土组成。层厚: $0.90\sim 3.80\text{m}$; 层底标高: $40.98\sim 43.48\text{m}$ 。

②黄土 (Q_4^{al}): 褐黄色, 局部黄褐色, 可~硬塑, 湿, 无摇振反应, 刀切面稍有光泽, 干强度及韧性中等, 具虫孔。含铁锰氧化物、少量姜石、碎石。层厚: $0.90\sim 3.00\text{m}$; 层底深度 $2.50\sim 4.00\text{m}$; 层底标高: $39.58\sim 41.92\text{m}$ 。

③粘土 (Q_4^{cl}): 棕黄色, 硬塑, 湿, 无摇振反应, 刀切面光滑, 干强度及韧性高, 含铁锰氧化物、少量姜石、碎石, 该层上部局部粘粒含量较少, 为粉质粘土, 呈透镜体分布。层厚: $4.90\sim 9.30\text{m}$; 层底深度 $8.60\sim 12.00\text{m}$; 层底标高: $31.56\sim 35.23\text{m}$ 。

④闪长岩残积土 (Q^f): 黄绿~灰绿色, 湿。原岩剧烈风化呈土状, 有砂感, 手捏具塑性。层厚: $0.50\sim 2.70\text{m}$; 层底深度 $9.80\sim 12.50\text{m}$; 层底标高: $31.21\sim 33.94\text{m}$ 。

⑤强风化闪长岩 (δ_3^f): 灰绿色, 密实。原岩剧烈风化呈中~粗砂状, 含少量母岩硬块。层厚: $0.50\sim 5.20\text{m}$;

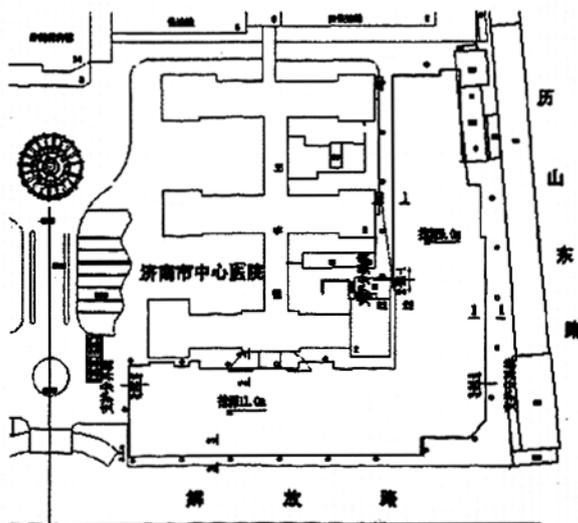


图 4.8 深基坑工程平面图

层底深度 11.60~15.00m；层底标高：28.74~32.73m。

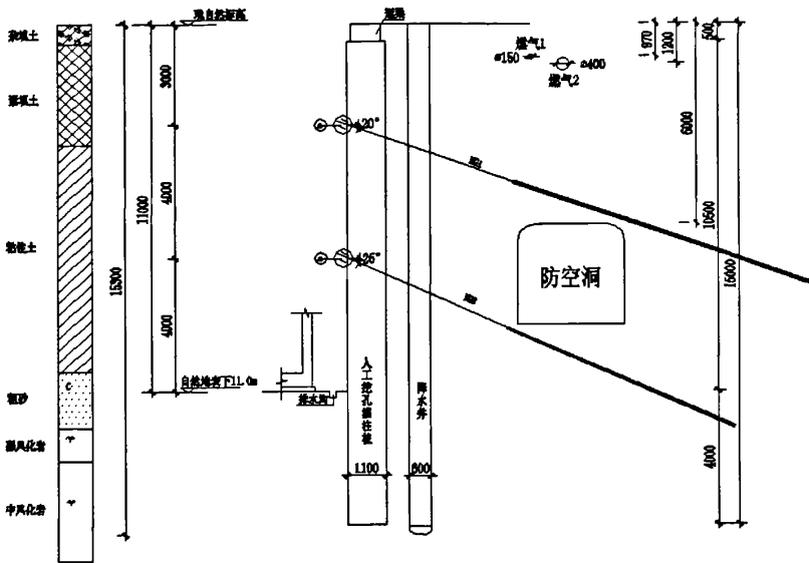


图 4.9 3-3 剖面示意图

⑥中等风化闪长岩 (δ_3^3): 灰绿色, 致密, 坚硬, 斑状结构, 块状构造, 钻探岩芯呈柱状。该层未钻穿, 最大揭露厚度 2.00m, 最大揭露深度 16.00m。

(2)地形地貌及水文地质条件

根据岩土工程勘察报告, 勘区地貌单元属山前冲洪积平原中部, 地形起伏较小, 地表相对高差 1.90m, 地势由东南向西北方向逐渐降低, 现自然地表绝对标高 43.08~45.73m。

场地地下水属第四系孔隙潜水和风化基岩裂隙水类型, 07 年 5 月勘察期间测得地下水位埋深在 5.10 ~7.10m, 相应标高为 38.31~39.28m。地下水有自南向北径流的趋势。

3.设计选型的关键点

(1)基坑周边环境复杂(图 4.8): 基坑东侧为临街一层砖混结构商铺, 距离拟建综合楼基础外边线约 8.9m; 基坑东南角为二层砖混结构商铺, 距离基础外边线约 10.1m; 基坑南侧紧邻解放路, 医院外墙距离基础外边线约 4.8m, 且紧邻解放路地下管线和人防等设施; 基坑西侧及西北角紧邻 2 层“王”字病房楼, 最近点距拟建建筑基础外边线仅 1.4m, 场地狭小; 基坑东北角场地较开阔, 距旧保健楼约 14.8m。

(2)医院内要求施工噪音较小。

4.深基坑工程设计选型

(1)1-1 剖面,挖深约 9.0 米,考虑到场地较开阔的特点进行复合土钉墙支护设计:粘性锚杆(土钉)3 道,水平间距 1.8m,倾角 10° ,钻孔直径 150mm,长度均为 8.80m;预应力锚杆 1 道,水平间距 1.8m,倾角 15° ,钻孔直径 150mm,长度为 12.0m;其中预应力锚杆为第二道,竖向间距均为 2.0m。

(2)2-2 剖面,挖深约 9.0m,考虑到施工场地狭窄、距离“王”字楼最近约 1.4m、地下浅埋防空洞以及医院严禁噪声污染的特点进行人工挖孔灌注桩支护设计:钢筋混凝土灌注桩施工桩长 13000mm,成孔 1100mm,有效桩径 800mm,桩距 1600mm;桩顶冠梁设置统一标高,冠梁尺寸 850mm \times 500mm;预应力锚杆 2 道,长度分别为 12.0m 和 9.0m,水平间距 1.6m,倾角 15° ,钻孔直径 150mm;

(3)3-3 剖面(图 4.9),挖深约 11.0m;考虑现场地势较高且放坡后紧邻燃气管线和人防通道以及医院严禁噪声污染的特点进行人工挖孔灌注桩支护设计:钢筋混凝土灌注桩施工桩长 15000mm,成孔 1100mm,有效桩径 800mm,桩距 1600mm,局部(3-3 设计剖面东西端)间距 1800mm;预应力锚杆 2 道,长度分别为 14.0m 和 12.0m,水平间距 1.6m(东西端 1.8m),倾角 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$,钻孔直径 150mm。

(4)仅考虑基坑降水:降水井设计井深 15.3m,井间距 15~17m;未设置竖向截水帷幕。

5.施工效果

(1)结合深基坑工程的特点,分别选用了复合土钉墙和桩锚支护型式;并且,根据地层和医院内要求施工噪音较小的条件,采用了人工挖孔桩。

(2)监测数据显示支护桩部分最大位移为 5mm,复合土钉墙部分最大位移为 20mm,未对施工造成任何影响,侧壁安全稳定,开挖顺利。

4.3 软弱土区深基坑支护结构选型应用实践

济南市深基坑工程所涉及的软弱土区范围指大明湖周边的素填土、流塑~软塑的粘性土、薄层淤泥或淤泥质土等地层,北园路两侧及其以北黄河、小清河冲积平原的流塑~软塑的粘性土、稍密状态的粉土等地层,以及玉符河冲积扇下部段店铁路桥周边地区的软塑粘性土地层。

4.3.1 软弱土区深基坑工程特点

软土具有强度低、压缩性大、透水性小、受荷载后变形大,加之蠕变及应力松弛等

特性,以及容易出现坑底隆起、管涌等现象。再则,在市内建筑物密集地区开挖深基坑,周围土体变形是不容忽视的问题。因此,在深基坑开挖中稍有疏忽,必然会导致邻近建筑物及地下管线的损坏等事故发生。但是,只要我们以科学的态度,认识、研究和把握软土的工程特性,认识和研究它对工程的反应和危害的规律以及制定相应的防治措施,在设计与施工中充分考虑软土的特性,亦可以在软土区进行深基坑开挖,这方面,济南市在学习上海等设计与施工经验的基础上,总结和积累了适合本市软土区的成功经验。

4.3.2 确定软弱土地基挡土支护结构类型的基本原则

4.3.2.1 总体上考虑,必须从基坑各部位的具体情况出发,根据基坑周边场地条件和地质条件接近或不同的情况,采用同一或多种挡土支护结构类型。

4.3.2.2 从场地条件考虑词,如坑周场地较为开阔,则可采用上段放坡开挖,下段采用深层搅拌水泥土桩墙或高压旋喷桩墙等;(济南市青少年宫教学楼工程南边坡等工程中得到应用效果良好)如基坑周围施工宽度狭小并且邻近建筑物需要保护时,则必须按照被保护建筑物的重要性与安全等级标准,采用能够相应控制地面位移与沉降的挡土支护结构类型。

4.3.2.3 从基坑开挖深度与范围考虑,开挖深度较小时,可采用悬臂式挡土支护结构;(在济阳煤矿污水处理池工程四周、济南市青少年宫教学楼工程北侧边坡)开挖深度较大时,可视情况采用单支点或多支点挡土支护结构;(在省政协办公楼工程中)开挖范围较小时,可采用内撑型支点;开挖深度较大时,可采用单层或多层锚杆。(在不夜城工程中)

4.3.2.4 从土层地质条件考虑,土质较好的情况可采用土层锚杆或排桩等类型;土质较差的情况,则可采用深层搅拌水泥桩墙与坡顶放坡相结合的方式。

4.3.3 典型案例分析

【案例四】济南将军经贸大厦

1.工程概况

将军经贸大厦工程位于济南市东城区将军路中段路西171[#],地上24层,地下2层,裙楼地下一层,局部2层,地上3层。主楼南北长49.2m,东西宽18.3m,基坑开挖深度(自然地面下)13.0m,裙楼I东西长36.9m,南北宽28.0m,基坑开挖深10.8m。裙楼II南北长8.0m,东西宽20.0m,基坑开挖深度为4.1m。

基坑周边环境：东距将军路 30.0m，是主要交通要道，南邻 12.0m 为宋刘鱼塘，西邻、北邻均为二层、三层临建，距离均小于 10.0m，较远一面又是酒店与多层住宅小区。

2.地形地貌、工程地质与水文地质条件

(1)地形地貌

场地为人工改造地形，呈东北高、西南低走势，地面海拔高 24.09~24.93 米，属黄河~小清河冲积平原。

(2)工程地质条件

在基槽深度内地层岩性自上而下可分为 5 层：

①杂填土 (Q_4^{al})，上部主要为粘性土、碎石块、砖块等，下部以灰渣为主，含少许碎石、块石，层厚 1.20~3.50 米，层底标高 21.40~23.27 米。②粉土 (Q_4^{al})，褐黄色，稍密，饱和，流塑，振动析水严重，局部地层夹有粉质粘土透镜体。层厚 2.30~5.00 米，层底标高 16.93~19.10 米。③粉质粘土 (Q_4^{al})，灰色，软塑~可塑，含有机质，局部夹淤泥薄层，层厚 1.70~3.90 米，层底标高 14.23~16.75 米。④粉土 (Q_4^{al})，褐黄~灰黄色，稍密~中密，饱和，含少许云母碎片，层厚 1.70~5.20 米，层底标高 9.49~12.82 米。⑤粉质粘土 (Q_4^{al})，灰黄色，可塑，含少许粉粒及云母碎片，铁质浸染锈斑及灰色条纹，层厚 1.80~4.30 米，层底标高 7.40~10.05 米。

(3)水文地质条件

场区内地下水分为两层，上层为第四系孔隙潜水，静止水位埋深 0.90~1.20m，静止水位标高 22.79~23.29m，主要含水层为第 2、4 层粉土层。地下水主要补充来源为大气降水及黄河小清河的侧向补给。下层为闪长岩风化层中的风化裂隙水，具有微承压性质，可顶托补给第四系孔隙潜水，两层水中无较好的隔水层。枯、丰水期水位变幅 0.80m 左右。根据抽水资料： K （渗透系数）：5.61 (m/d)； R （影响半径）：160.0 (m)。

3.设计选型的关键点

(1)水位埋深浅，水量大，影响范围远。

(2)地处险要位置，尤其场地东临将军路为交通要道，两侧铺有煤气、热力、通讯、电力、上下水等各种管线。

(3)地质条件复杂，尤其第 2、4 层粉土为饱水土层，且有振动析水特点，水很难自然析出，边坡支护困难，锚杆无法成孔，施工中钻头一旦拔出便很快淤死。

(4)周围建筑较多，要求基坑开挖降水不能对周围环境造成破坏，更不能危及附近建

筑。

(4)基坑开挖深度平均 10.8m，最深达 13.0m，此开挖深度在济南市软土地区，尚属首例。

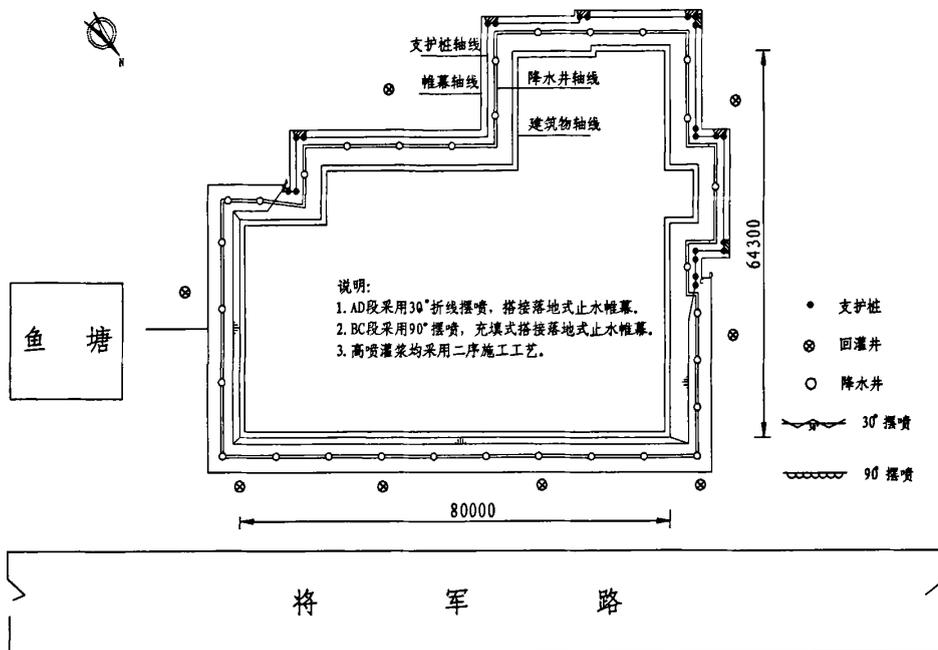


图 4.10 将军经贸大厦深基坑工程平面示意图

4.深基坑工程设计选型

(1)基坑四周做封闭式高压摆喷止水帷幕，其深度均插入不易透水的粘性土层。

(2)基坑内采用大口径深井降水，坑外回灌，保持坑外原始水位。

(3)主、裙楼交接处采用钢管桩，设两道预应力锚索，加两道腰梁。

(4)主楼其它部位采用砼灌注桩，设两道预应力锚索，桩顶做连梁，锚索做腰梁。由于锚索成孔困难，采取钢管直接代替麻花钻成孔并灌注，强度达到后直接锚拉。

(5)裙楼采取放坡锚喷，设一道预应力锚索。

(6)依据周围情况设置以下沉降监测点：

基坑东北：济南卷烟厂办公楼设置 3 个点；基坑东侧：将军路设置 7 个点；基坑东南：新建住宅设置 4 个点；基坑南侧：基坑边设置 5 个点。

支护桩共设置 16 个观测点

5.施工效果：

(1)结合软弱土区深基坑工程的特点,根据该工程特点,选用了桩锚支护、周圈布置降水井以及桩间高喷截水的支护结构型式。

(2)周围建筑物及道路监测结果:累计沉降量 $-0.1\sim 10.6\text{mm}$,对周围建筑物无任何不良影响。支护桩桩顶位移监测结果:累计位移 $0\sim 34\text{mm}$,对基坑未造成任何影响。(3)

【案例五】鲁能康桥小区一期2#楼深基坑工程

1.工程概况(图4.11)

该工程东西长约67.6m,南北宽18.0m,小高层住宅楼,设一层地下室,采用筏板基础。基坑开挖深度约6.60m。

2.工程地质与水文地质条件

(1)工程地质条件

该区地貌单元属于黄河~小清河冲积平原,上部为第四系

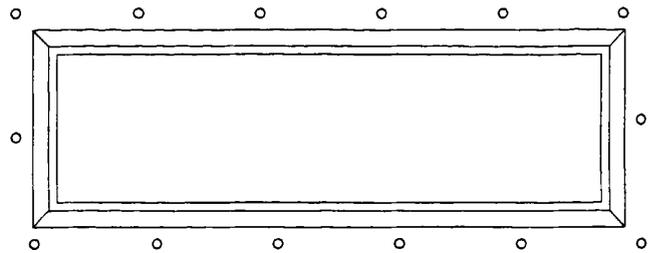


图4.11 2#住宅楼深基坑工程平面图

河流相冲积成因的粘性土、卵石,下伏燕山期闪长岩侵入体的风化带。勘区钻探深度自上而下:

- ①填土,分为杂填土和素填土。平均厚度1.50m, $r=18.5\text{KN/m}^3$, $c=5.0\text{KPa}$, $\phi=5^\circ$;
- ②粉质粘土,褐黄色,软~可塑,很湿。含铁锰氧化物,平均厚度1.20m, $r=19.5\text{KN/m}^3$, $c=20.0\text{KPa}$, $\phi=19.4^\circ$;
- ③粘土,黄褐~褐黄色,可塑,局部硬塑,湿,平均厚度1.00m, $r=18.4\text{KN/m}^3$, $c=34.0\text{KPa}$, $\phi=10.0^\circ$;
- ④粉土,上部呈灰黄色,很湿,稍密,含氧化铁;下部呈灰色,很湿,稍密,含有机质、贝壳碎片,振动析水。平均厚度为1.50m, $r=19.3\text{KN/m}^3$, $c=21.0\text{KPa}$, $\phi=14^\circ$;
- ⑤淤泥质粘土:浅灰~黄灰色,软~流塑,饱和。平均厚度为0.30m, $r=17.9\text{KN/m}^3$, $c=23.0\text{KPa}$, $\phi=7.7^\circ$;
- ⑥粉质粘土,灰~灰黑色,可塑,湿。平均厚度1.10m, $r=19.7\text{KN/m}^3$, $c=31.0\text{KPa}$, $\phi=10.8^\circ$;
- ⑦粘土,灰褐色,硬可塑,湿,平均厚度1.40m, $r=19.6\text{KN/m}^3$, $c=41.0\text{KPa}$, $\phi=12.8^\circ$;
- ⑧粉质粘土,灰黄~褐黄色,可塑,湿。平均厚度3.10m, $r=19.7\text{KN/m}^3$, $c=25.0\text{KPa}$, $\phi=12.0^\circ$;

(2)水文地质条件

场区地下水属第四系孔隙潜水,勘探期间(2001年10月份)测得地下水位埋藏深度 $0.90\sim 1.50\text{m}$,地下水有自东南向西北渗流的趋势。

3.设计选型的关键点

(1)地质条件：在基坑侧壁中部左右存在层厚约 0.30m 的淤泥质粘土层，根据在该场区施工经验，在土方开挖和复合土钉墙施工过程中，基坑侧壁容易出现“夹心式”挤压滑移破坏。

(2)地下水丰富：实测地下水位埋深 0.90~1.50m，基坑降水后软~可塑粉质粘土对周边建筑物的影响会较大，地下水控制是关键。

4.深基坑工程设计选型

(1)基坑开挖深度 6.60m，边坡放坡系数 1: 0.3，工作面预留 1.00m，外翻 2.00m。基坑四周采用复合土钉墙支护型式，设计一道预应力锚杆和一道摩擦土钉。锚孔的水平间距 2.00m，第一道预应力锚杆深度 8.00m，自由段 3.00m，锚固

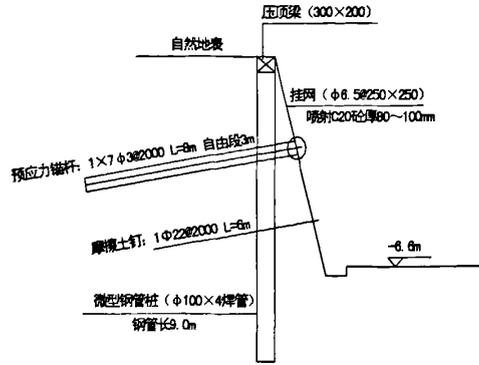


图 4.12 支护结构剖面图

段 5.00m，倾角 15° ~20°，标高确定为自然地面下-2.50m；第二道摩擦土钉深度为 6.00m，倾角 5° ~10°，标高-4.50m。

(2)为避免产生“夹心式”挤压滑移破坏，沿开挖线设置一排 φ 146 微型钢管桩，桩长 9000mm，嵌固深度 2500mm 左右，中心间距 800mm，插入钢管 d100×4 (公称口径 100mm，公称尺寸外径 114mm，壁厚 4mm)，注入 M10 水泥砂浆，注浆压力 1.2MPa 左右；最后挖冠梁沟槽，在桩顶做通长冠梁，尺寸 300×200，4Φ 14 钢筋，φ 6.5@250mm 箍筋。

(3)基坑降水：设 14 眼大口径降水井，水平间距在 13.0~15.0 米。降水井的深度考虑井内外的水跃值、沉淀管深度和水力梯度影响，井深设计为 15.00m，井径 700mm，井管径 500mm；

(4)截水设计：在鲁能康桥一期工程施工过程中未采取竖向截水帷幕。

5.施工效果

(1)经过采用复合土钉墙与超前微型钢管桩相结合的支护型式，避免了在基坑侧壁存在薄层淤泥质土产生“夹心式”挤压滑移破坏事故的发生，成功地积累了类似地层的施工经验。

(2)在一期深基坑过程中未采用竖向截水帷幕，造成周边旧居民楼墙体开裂，造成不良的社会影响，经过各方努力，最终将影响降到最小，故在二期施工过程中采用了封闭

式竖向截水帷幕，对周围环境未产生不良影响。从而，表明在软弱土区，采取截水措施的必要性。

【案例六】济南市少年宫办公交流培训中心基坑工程

1.工程概况 (图 4.11)

该工程东西长约 90m，南北宽 18.0~30.0m，七层，局部二层、一层，均设一层地下室，基础采用深层搅拌桩复合地基，设计有效桩长 6m。基坑开挖深度约 5.90m。该工程东侧、北侧河道环绕，距基础隔板边缘仅 4.0—6.0m，河水常年不断，汛期常常满槽外溢。

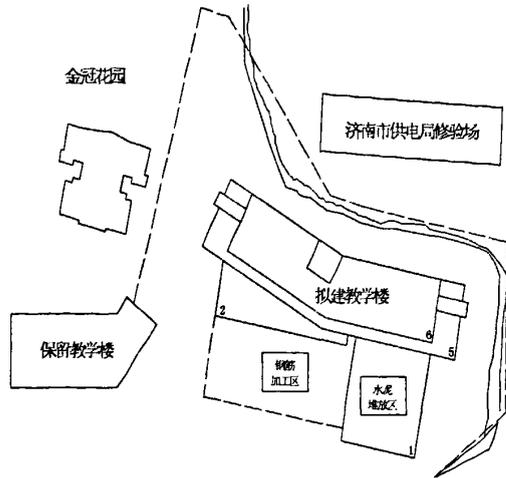


图 4.13 济南市青少年宫深基坑工程环境图

2.工程地质与水文地质条件

(1)工程地质条件

该区地貌单元属于山前冲积平原，据查原为藕池。勘区钻探深度自上而下：

①杂填土 (Q_4^{pd}) 多为碎砖石，少量粉质粘土及淤泥质。平均厚度 1.79m, $r=16.0\text{KN/m}^3$, $c=3.0\text{KPa}$, $\phi=5^\circ$;

②粉质粘土 (Q_4^1), 软塑, 含少量姜石及灰岩碎石, 平均厚度为 5.32m, $r=19.0\text{KN/m}^3$, $c=23.0\text{KPa}$, $\phi=15.7^\circ$;

③粉质粘土 (Q_3^{al+pl}) 棕黄色, 可塑~硬塑, 含少量姜石, 平均厚度 3.32m, $r=19.7\text{KN/m}^3$, $c=28.0\text{KPa}$, $\phi=12.5^\circ$;

④粘土 (Q_3^{al+pl}): 棕红色, 可塑~硬塑。含少量姜石及铁锰氧化物, 底部含碎石。平均厚度为 3.85m, $r=18.9\text{KN/m}^3$, $c=51.0\text{KPa}$, $\phi=15^\circ$;

⑤粘土混碎石: 棕红色, 硬塑。碎石成分为石灰岩, 含量 20~40%不等, 粒径 2-5cm

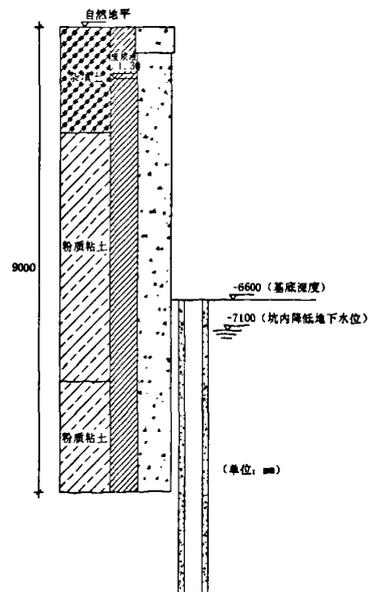


图 4.14 基坑东、西、北剖面图

不等, 勘察时该层未钻穿。

(2) 水文地质条件

场区地下水属第四系孔隙潜水, 勘探期间(2004年7月份)测得地下水位埋藏深度0.50~1.15m, 平均0.76m。

3. 设计选型的关键点

(1) 周边环境: 该工程东侧、北侧河道环绕, 河水常年不断, 汛期常常满槽外溢, 必须截断河水与场区地下水的联系, 设置止水帷幕;

(2) 场地限制: 西侧及邻近河道的北、东侧: 拟建基础筏板边缘与河道边壁或场区围墙仅4~6m; 支护结构必须直立, 且无处拉锚;

(3) 地质条件: 软塑粉质粘土的限制: 因难于成孔, 常用土钉墙支护不宜使用;

(4) 地下水丰富: 实测地下水位埋深900mm, 河水与地下水连通, 水量丰沛, 地下水控制是关键。

(5) 周边建筑密集: 距离基坑西侧边缘11m处为一栋桩基础办公楼和一栋桩基础小高层住宅, 北侧东段河对面20m处有供电发射塔, 对基坑工程引起的位移敏感。

4. 深基坑工程设计选型

(1) 初步方案

① 北侧、东侧止水帷幕(图4.12):

基础采用粉喷桩复合地基, 因此止水帷幕优先考虑水泥土搅拌桩。沿河道的东侧和北侧采用单排浆喷水泥土搅拌桩, $\phi 500@300$, 桩长9m, 桩顶标高-1.200m, 水泥掺入比15%;

② 北侧、东侧支护(图4.13): 钻孔灌注桩悬臂支护, 设计参数: $\phi 600\text{mm}@1200\text{mm}$, $L=9.0\text{m}$, 桩顶标高-1.200m; 砼强度C25; 配筋: 主筋 $8\phi 20$, 箍筋 $\phi 8@200$, 加强筋 $\phi 14@1500$ 。灌注桩桩顶设置冠梁, 断面尺寸 $650\text{mm}\times 500\text{mm}$, 钢筋笼尺寸 $550\text{mm}\times 400\text{mm}$; 砼强度C25; 配筋: 主筋 $8\phi 20$, 箍筋 $\phi 8@250$ 。

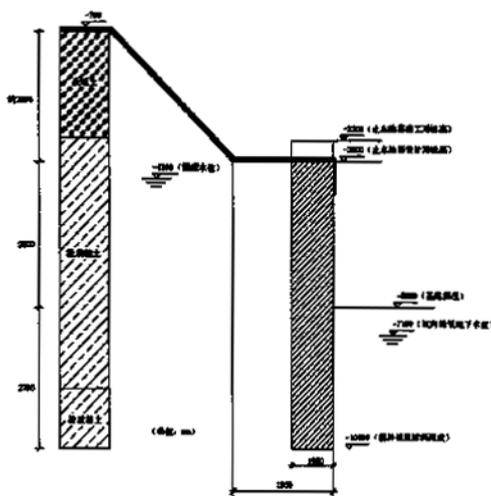


图 4.15 基坑南坡放坡与水泥土搅拌桩结合支护

③南侧、西侧支护及止水帷幕(图 3): 上覆杂填土 2.5m 深度范围 1: 0.5 放坡, 挂网喷护; 钢筋网 $\phi 6.5@250 \times 250$ 双向布置, 喷射 C20 砼, 厚度为 80mm。通过 1.5m 宽平台过渡, 做双排深层搅拌桩($\phi 500\text{mm}@350\text{mm}$, $L=7.0\text{m}$, 含桩头 500mm, 桩顶标高-3.20m), 既挡土又止水, 搅拌桩做法与止水帷幕相同;

④降水设计:

1) 基坑内地下水: 设 15 眼大口径降水井, 水平间距在 18.00~20.00 米。降水井的深度考虑井内外的水跃值、沉淀管深度和水力梯度影响, 井深设计为 10.00m, 有效井深井底标高-10.9~-10.7m 井径 700mm, 井管径 500mm;

2) 南侧、西侧上覆 2.5m 范围内杂填土降水: 设 6 眼降水井, 井深 8m, 井距水平间距在 18.00~20.00 米。

3) 回灌: 由于东、北两侧紧邻河道, 河水常年不断, 通过河水补偿, 帷幕以外水位保持平衡。南侧场地开阔, 没有建筑物, 所以不考虑降水的沉降影响。只有西侧和北侧西部设四眼回灌观测井, 井径 $\phi 700\text{mm}$, 井深 8m, 避免降水沉降影响西侧建筑。

(2)优化设计形成最终方案

经专家论证, 对初步方案提出加强建议:

①东、北侧止水帷幕改为旋喷工艺(图 4.12): 单排水泥土搅拌桩做止水帷幕, 即使在规范允许偏差内, 相邻两颗桩如果具有相反的垂直度偏差, 漏水隐患较大。因此帷幕采用高压喷射灌浆构筑, 帷幕布置在支护桩的外侧, 灌浆轴线距支护桩轴线 400mm 处, 孔位两桩中间。为了实现帷幕自身和帷幕与支护桩的可靠连接, 采用半圆喷射形式。凝结体呈半圆桩镶嵌两支护桩之间。帷幕深度-10.200m, 桩顶标高为-1.300m。喷射段长 8.9m。与支护桩共同形成止水帷幕。

②南侧、西侧双排深层搅拌桩需要加强(图 4.13): 再增加一排搅拌桩, 三排桩共同挡土止水。

③考虑地层性状, 深层搅拌桩难以搅动粘土层, 经过实验, 南侧基坑东段约有 300mm 不能形成搅拌桩, 但土层渗透系数较低, 可保证降水和止水效果。

④由于设计变更, 基坑西侧场地狭窄, 采用与北、东侧同样方案(图 4.12)。

5.施工效果

(1)该基坑工程主要采用了上部挂网喷射混凝土与下部三排水泥土搅拌桩形成的组合式挡土结构和悬臂式支护排桩挡土结构, 桩间高喷与水泥土墙同时形成了竖向截水体系。

(2)采用封闭式竖向截水帷幕,实现深层搅拌桩和高压旋喷截水帷幕相结合,使坑内外形成两个独立的地下水体系,降水效果明显,周边环境未受任何影响。

(3)监测数据显示北侧支护桩桩顶最大位移 10mm,基坑开挖后未发生渗漏现象,虽然局部有细微渗水,未对施工造成任何影响。坑底干燥,粉喷桩基施工顺利,基坑侧壁安全稳定。

【案例七】济南蓝石商务中心

1.工程概况

蓝石商务中心项目位于济南市趵突泉北路 6 号,总建筑面积约为 1.35 万平方米,地上五层、地下一层(局部两层)。基坑底面积约 3400 平方米,开挖平均深度约 8.2 米,基坑南侧西段最深达 9.0 米。

2.工程地质与水文地质条件

(1)工程地质条件

场地主要以填土为主,根据钻探揭露,场地地基土自上而下描述如下:

①杂填土:杂色,松散,稍湿~很湿,主要成份为灰渣、砖石块等,充填粘性土,厚度 2.70~5.00 米,。

②素填土:灰褐色,稍密~中密,主要成份为可塑~流塑状态的粘性土,见贝壳,偶见砖瓦碎片。厚度 2.40~5.00 米。

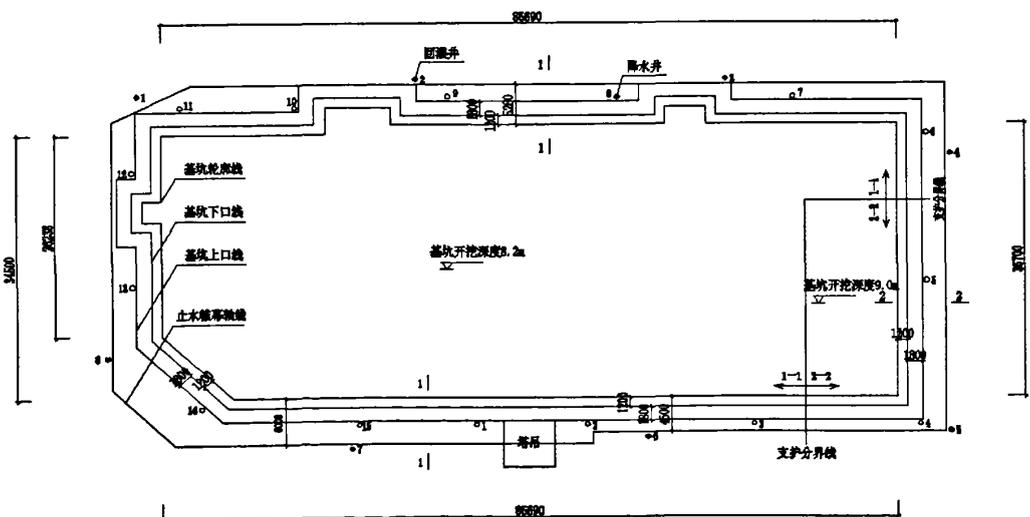


图 4.16 济南蓝石商务中心基坑设计平面图

③粉质粘土:黄褐色,可塑,含少量氧化铁及贝壳,无摇振反应,稍具光泽反应,

干强度和韧性中等。厚度 0.30~2.10 米。

④粘土：黄褐~棕红色，硬塑，含少量氧化铁及铁锰氧化物，无摇振反应，具光泽反应，干强度和韧性高，局部下部混碎石 20~30%，碎石粒径 20~50mm。厚度 0.50~1.30 米。

⑤碎石：灰色，棕红色，湿~饱和，中密~密实，棕红色硬塑粘土充填，局部钙质胶结成砾岩。碎石含量 50~60%，成份为石灰岩，亚圆形~次棱形，粒径 20~60mm。厚度 1.60~2.50 米。

⑥残积土：棕红~灰绿色，湿~饱和，稍密~中密，母岩为闪长岩，风化呈土状、砂状。场区普遍分布，厚度 3.20~7.10 米。

⑦全风化闪长岩：灰绿色，中密，岩芯呈砂状，原岩结构基本可辨，矿物成份已全部蚀变。厚度 2.10~4.00 米。

⑧强风化闪长岩：灰绿色，中密~密实，岩芯呈砂状，碎块状，矿物成份长石、角闪石已大部分蚀变，岩石坚硬程度表现为极软岩， $RQD=0$ 。最大揭露厚度 2.60 米。

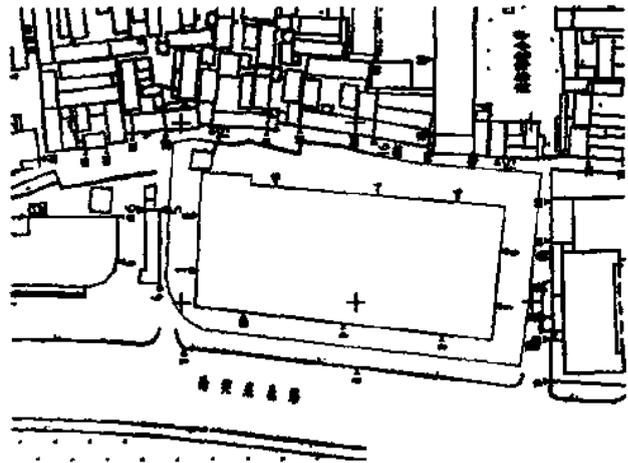


图 4.17 周围环境及变形监测点平面图

(2) 水文地质条件

场地地下水位第四系孔隙潜水，地下水稳定水位埋深 1.80~2.30 米，水质对混凝土无腐蚀性。

3. 设计选型的关键点

(1) 基坑周边环境复杂：济南蓝石商务中心基坑东侧紧邻居民平房或三层居民楼、基坑南侧紧邻三联集团刺绣厂、基坑西侧紧邻趵突泉北路及五龙潭泉群、西南角距离售楼处约 6.0m 左右、北侧中国铁通大楼；同时基坑南侧和东侧距临时办公室 1.0 米左右。基坑周边市政道路下埋设有雨水管、污水管、电力管、给水管、燃气管等多种地下管网。

(2) 高地下水位：基坑工程方案要妥善处理好地下水对基坑周边环境和对基坑安全的影响。

4.深基坑工程设计选型

(1)支护结构选型:

统一采用粘结性锚杆(土钉)、预应力锚杆及挂网喷砼的复合土钉墙支护措施。粘结性锚杆(土钉)2道,水平间距1.8m,倾角 10° ,钻孔直径150mm,长度分别为8.80m和5.80m;预应力锚杆1道,水平间距1.8m,倾角 15° ,钻孔直径150mm,长度为9.0m;

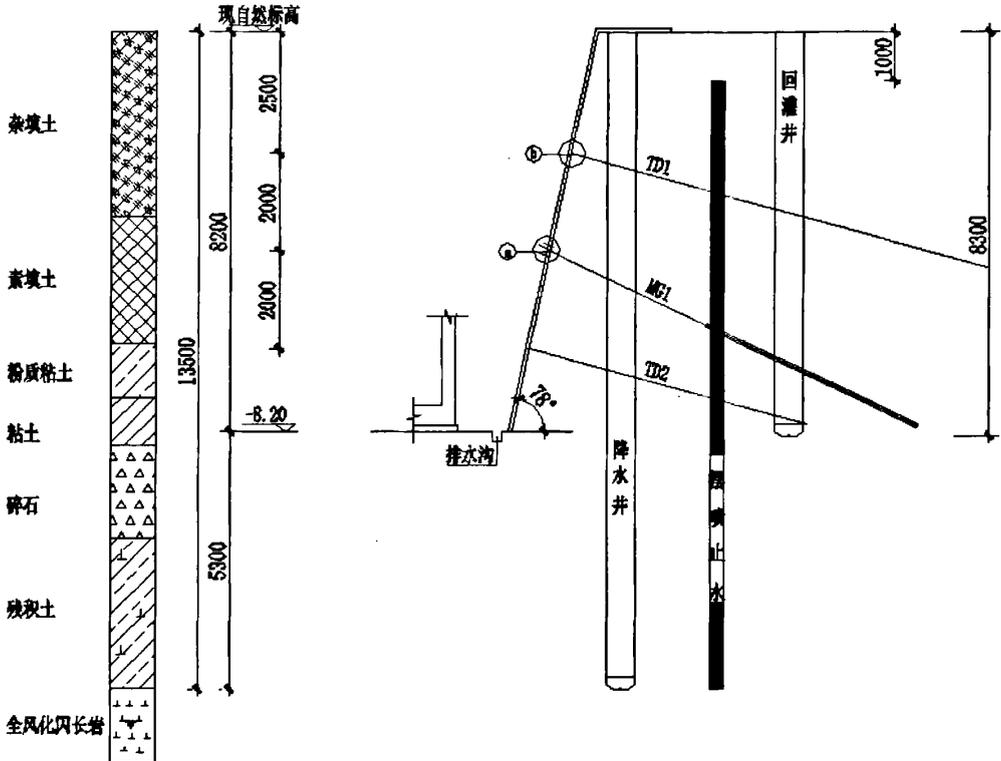


图 4.18 基坑剖面示意图

其中预应力锚杆为第二道,竖向间距均为2.0m。

(2)设置15眼降水井进行基坑降水,同时设置封闭式竖向截水帷幕,外侧设置8眼深度8.3m的回灌井回灌。

5.施工效果

(1)基坑北边坡塌方:

①塌方发生时间:2007年5月20日晚22:36时。

②塌方诱因:由于2007年5月13日夜間,在第二道预应力锚杆未形成预应力的情况下,土方施工单位急于撤场,大面积挖出坡道处土方,由5.0m挖至8.5m,严重超挖,从而使坡顶位移迅速增加;在采取加固措施期间的多次降雨是造成塌方的另一个主要原

因。

③影响范围：长约 20.0m，高约 8.5m，坡顶裂缝处距离开挖面约 2.5m。

④塌方征兆：除裂缝明显增大外，由于多次降雨，塌方前 1~2 天内，能够明显听到钢筋网片局部钢筋断裂的声音。在塌方当日下午 18:00 左右听到靠近 2#监测点附近有钢筋断裂的声音。

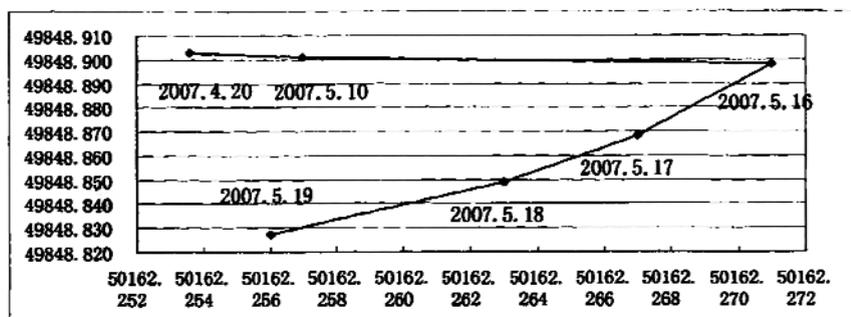


图 4.19 1#位移监测点变形趋

可从 1#位移监测点监测图（图 4.19）中，观察到边坡的发展趋势：坡顶矢量位移达 5.5% 时有迅速发展的趋势，持续时间为 4-5 天，发展到 10% 左右发生滑塌。可总结出该基坑位移预警值为 5.5%。

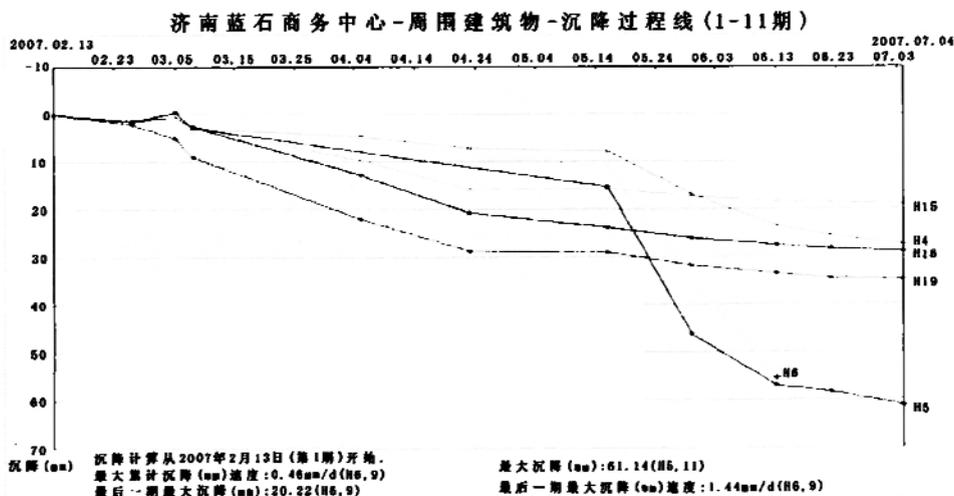


图 4.20 周围建筑物特征沉降监测点趋势图

(2)在加固期间，采取了如下措施：坡顶裂缝灌注水泥砂浆；搭设脚手架距坡顶 1.5m 处增设一排预应力锚杆（未施工完）；抽取竖向截水帷幕外侧 7#回灌井。其中，抽取 7#回灌井是错误措施，造成北侧邻近待拆除二层建筑产生不均匀沉降，墙体产生多处裂缝。从周围建筑物特征沉降监测点趋势图（图 4.20），可观察到抽水前后沉降的变化幅度和

趋势。

(3)根据图 4.20, 从 4[#]、5[#]、6[#]沉降监测点的发展趋势来看, 流塑~软塑的素填土流变性的一面。

(4)基坑降水从 2007 年 2 月 24 日开始, 根据图 2, 从 15[#]、16[#]、19[#]三个沉降观测点, 还能够观察到, 截止到 2007 年 7 月 4 日, 周围建筑物的沉降基本趋于稳定, 最大沉降量达到 3.5cm, 未对东侧周围建筑物造成破坏。

(5)在基坑降水、挖土过程中, 抽取了埋深 6.0m 左右的 6 个土样, 与勘察报告期间的实验结果进行了对比, 土的抗剪强度指标均有提高:

表 4-1 基坑降水前后抗剪强度对比表

土样名称 (素填土)	C (Kpa)	提高 (%)	ϕ ($^{\circ}$)	提高 (%)
勘察期间	14	164	5.0	136
降水后	37		11.8	

根据文献^[38], 降水的主要目的是为施工提供干燥的工作条件, 一般要求地下水位降低至坑底以下 0.5~1.0m, 在井点附近水位降落得更多。降水同时还有对土体的疏干作用, 可以改善土的性质, 对坑底有一定的加固作用。一些室内试验和原位测试的结果说明这种加固作用还是比较明显的, 但目前的设计方法一般不采用加固以后的指标计算。这是因为人们对于土工指标在降水前后的变化规律的认识还不够, 还不能作为设计的依据, 为安全计, 降水对土工指标的改善只能作为一种安全储备。

故本文建议在验算软弱土区深基坑支护结构强度时, 可“适当”提高抗剪强度指标, 从而达到安全和经济的效果。

4.4 典型地层深基坑工程支护结构选型的总体经验

4.4.1.1 挡土结构

(1)在济南市的大部分深基坑工程中, 土钉与预应力锚杆相结合的复合土钉墙支护结构应用最为普遍, 而在控制变形有严格要求的深基坑工程, 应采用桩锚支护结构型式。同时, 深基坑工程根据特定场地不同工程地质和水文地质、周边环境以及施工技术经济分析, 确定深基坑采用的不同支护结构体系。

(2)挡土排桩主要有人工挖孔桩和钻孔灌注桩两种形式；考虑到人员安全的因素，一般均采用钻孔灌注桩形式，而在场地受限或考虑机械施工噪音的情况下，才采用人工挖孔桩作为支护排桩。

(3)对于某一个特定的深基坑工程，支护结构应从能否采用单一的支护结构形式入手分析和研究。由于深基坑工程目前市场的不规范性，施工往往和设计相脱节，而单一的支护结构形式能够使施工单位最大程度地领会设计意图，施工过程容易管理，能够保证施工质量，避免事故发生。

(4)根据类似工程经验，以概念设计为主，理论验算为辅，进行支护结构与施工，从施工可行性、安全可靠性和经济合理性等方面得到控制。

4.4.2.2 地下水控制措施

(1)济南市部分中硬土区和硬质土区一般单独采用管井降水的地下水控制措施，例如，经七路、文化路和解放东路两侧施工中信广场、圣凯摩登广场、山东大学西校区4#高层住宅楼、济南市中心医院综合病房楼等深基坑工程；而大部分深基坑工程还是坑内降水结合坑外截水配合回灌井的地下水控制措施；

(2)为了减少管井降水引起的不均匀沉降，在降水过程中，应防止抽水带走土层中的细颗粒，适当减缓降水漏斗的坡度，还应使抽水设备连续运转，降低抽水速度，尽量避免间歇和反复抽水。

(3)根据济南地区土层地质条件，若单独采用明排降水，由于施工机械或人工形成排水沟和集水井，很大程度上会扰动地基土，从而影响拟建建筑物的变形和沉降，故明排降水一般适合于基底有不易受到扰动的碎石土或岩基的深基坑工程，主要应用于硬质土区。而管井降水基本适合于济南市所有的深基坑工程。

(4)竖向截水帷幕板墙，从可靠性、经济性、环境、工期等方面做比较，水泥石搅拌法在很大程度上能够体现出其优越性。根据目前济南市市场，在能够满足其施工条件的情况下，水泥石搅拌法已成为深基坑竖向止水帷幕的首选。根据两种方法的施工机械的不同，水泥石搅拌法主要适用于处理济南市软土区和一般粘性土区的部分深基坑工程，而遇到含有块石或混凝土废旧基础的场地，水泥石搅拌法则不适用；而高压喷射法适用于济南市的所有深基坑工程。

(5)根据施工经验，止水帷幕在深基坑工程中的作用一方面体现在截水方面，另一方

面与支护结构中的摩擦土钉和锚杆相结合增加了基坑侧壁的稳定，后者在多项工程实践中得到验证。

(6)水泥土搅拌法若形成封闭式止水帷幕，在封闭接合部位须采取局部加固的措施，可以采用形成超过三排的水泥桩或成孔后高压注浆等处理措施；而高压喷射法就不存在此方面的问题。

4.5 本章小结

4.5.1 总结了三类典型地层影响深基坑工程的主要因素，并明确了硬质土区深基坑工程设计选型的基本原则。

4.5.2 通过典型案例，展现了在济南市典型地层中深基坑工程的设计理念。深基坑支护型式很多，每一种深基坑支护型式都有合理的适用范围，都有其各自优点和缺点。一定要根据深基坑的个性，具体问题具体分析，选用合理的支护型式。基坑的个性主要指工程地质和水文地质条件、基坑深度和形状，以及周围环境。具体问题具体分析主要指处理好该基坑工程支护设计的关键点。只有这样才能合理选用支护型式。

4.5.3 突出强调了济南市典型地层中软弱土区深基坑工程在各类不同地质和周边环境等条件下，支护设计选型的复杂性、多变性，并总结了适合软弱土区各类设计结构选型的实践经验。

第五章 济南市典型地层深基坑工程支护施工经验

济南市深基坑工程支护的施工经验是在结合济南市典型地层条件的基础上逐渐总结了地区经验,从支护结构和地下水处理措施两方面得到了充分体现。深基坑工程设计方法和结构选型必须重视工程实践,故总结适合于济南市深基坑工程支护的施工经验具有重要的现实意义,通过工程实践经验与理论相结合,可以有效地推动济南市深基坑工程的发展。

5.1 深基坑工程支护结构施工经验

5.1.1 土钉施工

(1)硬质土区和中硬土区一般采用钻孔注浆土钉。钻孔注浆土钉施工是先在土中采用XY-2型地质钻机钻 $\phi 100\text{mm}$ 或 $\phi 150\text{mm}$ 孔,置入钢筋,然后沿全长注浆,为使土钉钢筋处于孔的中心位置,有足够的浆体保护层,沿土钉长度方向每隔2m设置对中支架。土钉外露一般采用约0.2m弯勾与 $\phi 6.5$ 挂网钢筋相连。

在岩石或胶结碎石层中成孔一般采用潜孔钻机成孔,成孔直径50mm~100mm。

(2)在无法成孔的情况下,软弱土区一般采用打入注浆土钉。打入注浆土钉施工是直接将带孔的 $\phi 45\text{mm}$ 钢管打入土中,然后高压注浆形成土钉。钢管的注浆孔沿管身注浆孔由机械成孔,孔径一般为 $\phi 10\text{mm}$,每个注浆孔均应设置一块护铁。为每间隔300~500mm布设一组,每组2~3个,沿钢管壁三个方向均匀布设。充分加固土体又避免钢管底部大量溢浆,注浆孔距管尾的距离一般为1500mm左右。在打入钢管前一般将前端形成楔状。

5.1.2 支护桩施工

(1)中硬土区和上覆力学性质较好土层的硬质土区可采用人工挖孔桩。人工挖孔施工,覆盖层人工开挖,到风化层时采用风镐和风钻钻眼、弱爆破进行开挖,抽水泵抽水,机械配合出土,砼锁口护壁防护。济南市往往在噪音控制严格且场地受限的深基坑工程中采用人工挖孔桩,一般采用护壁外直径 $\phi 1100\text{mm}$,护壁内直径 $\phi 800\text{mm}$ 。

(2)各类典型地层中的灌注桩均可采用冲击成孔钻机。济南市主要使用 CZ-22 型冲击钻机,其所有部件装在拖车上,包括电动机、传动机、卷扬机和桅杆等,整体牵引。冲击钻孔是利用钻机的曲柄连杆机构,将动力的回转运动改变为往复运动,通过钢丝绳带动冲锤上下运动。通过冲锤自由下落的冲击作用,将卵石或岩石破碎,钻渣随泥浆(或用掏渣筒)排出。一般成桩直径为 $\phi 600\text{mm}$ 。

(3)中硬土区和软弱土区的灌注桩施工一般采用旋转成孔钻机,济南市主要有龙门架钻机和 SPJ300 型水文反循环成孔钻机。反循环钻机由电动机驱动转盘带动钻杆、钻头旋转钻孔,同时开动泥浆泵,夹带杂渣的泥浆经钻头、空心钻杆,提水笼头、胶管进入泥浆泵,再从泵的闸阀排出流入泥浆池中,而后泥浆经沉淀后再流向孔井内,从而成孔。一般成孔直径为 $\phi 600\sim 1000\text{mm}$ 。

5.2 深基坑工程地下水处理施工经验

5.2.1 基坑降水(回灌)井施工

济南市深基坑工程管井降水中的降水井和回灌井施工,中硬土区和软弱土区一般采用 SPJ300 型水文钻机成孔,硬质土区一般采用 CZ-22 型冲击成孔钻机成孔。

5.2.2 基坑竖向截水帷幕施工

(1)各类典型地层条件下均可采用高压摆喷或旋喷竖向截水帷幕,济南市一般采用 GS500-4 型高喷台车进行施工。首先采用 XY-2 型钻机造孔,然后下入高喷管施工以浆、气、水三种介质同时作用于地层,使浆液与地层颗粒成份混合、搅拌、置换、充填渗透形成竖向截水帷幕。作为竖向截水帷幕一般采用 300 摆喷,“折线式”或“直线式”搭接。

软弱土区一般采用三重管法施工,布置间距为 1.0~1.2m;硬质土区和中硬土区二重管法和三重管法均可采用,布置间距为 1.3m 左右且不超过 1.4m。

(2)软弱土区,下伏无含碎石等硬质土层或场地内障碍物已清除,考虑经济因素,可采用水泥土搅拌法形成竖向截水帷幕。济南市一般采用 PH-5D 型搅拌机,成桩直径一般为 500mm。

5.3 深基坑工程其它施工经验

(1)杂填土的支护：若基坑中存在厚度不等的杂填土，其成份大多为建筑垃圾、松散土壤及砂、石等。在此类地层中成孔甚难，或不易钻进，或不易钻直，或极易塌孔。采用套管钻机可解决此类孔的造孔问题，致使成本较高。我们采用的高压注浆锚管法，既安全、可靠，又经济、快捷。方法是：先用喷射混凝土封闭，然后将锚管打入此类土层中，再对锚管进行高压注浆，使浆液通过一定密度的管壁孔眼，在排除空气的同时，渗入到较大范围（20~30m）土层缝隙中，把松散土壤、建筑垃圾固结为较坚硬完整的整体。

(2)淤泥层的支护：淤泥层接近饱和，也具有流动性。自稳时间很短，一般为0~1小时。施工方法是：开挖前进行超前锚固，开挖时严格控制开挖深度和长度，开挖后立即用喷射混凝土封闭，继而按通常的喷锚网支护施工工艺操作。

(3)塌方段的加固处理：在深基坑支护施工过程中，局部基坑侧壁会由于多种原因产生塌方和险情，危及周边环境的安全。济南市一般采用喷锚网加固方法对这些险情、塌方地段进行快速、有效的处理。施工方法是：自上而下，逐层清除滑塌体，逐层进行喷锚网加固；及时封闭，预制钢筋网，快速锚固，高压注浆，同时进行全方位防水。

(4)信息施工法：在施工前后和施工过程中，对支护本身或对象（被支护岩土体）的动态变化进行监测，并把获得的信息或情报通过修改设计而反馈于施工中，这种做法称为信息施工法或情报化施工法。

5.4 本章小结

总结了济南市深基坑支护的施工经验，强调积累深基坑工程施工经验的重要性，能够为济南市深基坑工程提供有力的发展基础。

第六章 结论与展望

6.1 结论

6.1.1 结合济南市特有的工程地质和水文地质条件，从深基坑工程设计与施工的角度，将影响济南市深基坑工程设计与施工的地层结构划分为硬质土区、中硬土区和软弱土区等三个典型地层分区。

6.1.2 总结了济南市深基坑工程不同典型底层的支护结构体系的选型原则，并通过典型案例说明选型原则的适用性。

6.1.3 针对济南市深基坑工程中软弱土区的设计与施工，基坑开挖降水前后，土层抗剪强度指标 c 、 ϕ 值的增长有利于支护结构稳定性，总结出在支护结构设计时，适当利用降水后土层增加的 c 、 ϕ 值的后期安全储备的设计思路，突破了仅采用勘察报告数据作为设计依据的局限性。

6.1.4 通过收集和查阅已完深基坑工程的竣工资料，总结出适合不同典型地层分区的深基坑工程支护结构体系和地下水控制体系的特点，从而为济南今后的深基坑工程具有借鉴意义。

6.1.5 通过个案强调了施工监测的重要性。监测是基坑工程施工中的眼睛，只有作好监测工作，才能看清施工方向。监测的重点是周围环境的变化和基坑本身的变形动态，按施工进度跟踪进行监测，及时报出动态数据控制施工进度，当出现报警值时，要加密监测频率，调整施工流程节拍。

6.1.6 提出在济南市软土区存在“夹心式”挤压滑动破坏模式，在设计过程中要引起足够的重视，应预先采取适当的加固措施。

6.1.7 经过经验总结得出，由于竖向截水帷幕的设置从造价和工期上都对深基坑工程施工有一定的影响，故建议在中硬土区可不考虑设置竖向截水帷幕，在硬质土区要结合地下水位和上覆土层的力学性质综合判定是否需设置竖向截水帷幕，而在软弱土区必须设置竖向截水帷幕。

6.2 展望

6.2.1 本文仅从经验总结的角度来讨论济南市深基坑工程的设计选型，而随着深基坑工程技术和科学手段的不断提高，应采用精密的监测仪器和有限元技术，有针对性地研究不同典型地层条件下的深基坑工程各方面的机理，理论与实践相互检验，更准确选择适合济南市深基坑工程设计原则。

6.2.2 设立专门的深基坑工程设计与施工审查机构，规范化济南市深基坑工程市场。通过长期大量的理论研究及施工经验积累，希望能够制订出适合于济南市深基坑工程的设计与施工的相关规范。

6.2.3 目前，济南市没有进一步地研究和总结，各种土层及不同环境因素条件下，土钉墙或复合土钉墙中土钉和预应力锚杆的破坏性研究试验；仅从竣工验收着手，从特定工程来说，只能说明某一特定工程，施工满足安全要求，但是，由于缺乏理论与实践的相互检验，每个深基坑工程的安全程度是否经济合理不能定量判断。希望在此做一部分研究工作，能够更好地指导工程实践。

参考文献

1. 刘建航、侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑业出版社,1997.4.
2. 赵志缙、应惠清.简明深基坑工程设计施工手册[M].北京:中国建筑业出版社,2000.4.
3. 林宗元主编.简明岩土工程勘察设计手册[M].北京:中国建筑业出版社,2003.
4. 黄强.建筑基坑支护技术规程应用指南[M].北京:中国建筑业出版社,1999.11.
5. 曾宪明、黄久松、任作民.土钉支护设计与施工手册[M].北京:中国建筑业出版社,2000.7.
6. 余志诚、施文华.深基坑支护设计与施工[M].北京:中国建筑业出版社,2002.7.
7. 陈肇元、崔京浩.土钉支护在深基坑工程的应用[M].北京:中国建筑业出版社,2000.7.
8. 高大钊.岩土工程的回顾与前瞻[M].北京:人民交通出版社,2001.3.
9. 陈仲颐、叶书麟.基础工程学[M].北京:中国建筑业出版社,1996.4.
10. 米祥友、徐前主编.注册岩土工程师专业考试辅导指南[M].北京:地震出版社,2003.5.
11. JGJ120-99.建筑基坑支护技术规程[S].中国建筑业出版社,1999.
12. GB50021-2001.岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑业出版社,2001.
13. GB500210-2002.混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑业出版社,2002.
14. 中国土木工程学会.注册岩土工程师专业考试复习教程(第四版)[M].北京:中国建筑业出版社,2007.5.
15. GB50007-2001.建筑地基基础设计规范[S].中国建筑业出版社,2001.
16. JGJ 79-2002.建筑地基处理技术规范[S].中国建筑业出版社,2002.
17. 王伟.基坑工程的概念设计[J].昆明理工大学学报:2002(6),102~105.
18. 白江.放坡开挖深基坑工程的环境效应与对策[J].山西建筑,2004(7),68~69.
19. 薛殿基.粉喷桩设计与施工[M],郑州:河南科学技术出版社,1999.8.
20. 山东省地质矿产局八〇一水文地质工程地质大队.济南城市多参数立体化综合地质调查报告[R],济南:2005.3.
21. 钱磊等.基坑工程设计的若干问题[J].浙江建筑,2001.增刊:59~60.
22. 李连祥、郝晓平、牟强.济南市河道近旁的深基坑工程案例[J].水利与建筑工程学报,2006(4):
23. 李连祥、黄志炎、郝晓平.济南市深基坑工程创新技术分析[J].地下工程与空间学报,2006(5):881~886.
24. 李连祥、朱金德、郝晓平.软弱土层中深基坑工程的系统施工技术[J].岩土力学,2004.增刊.
25. 李连祥、王吉强、于峰.济南市基坑工程杂填土治理技术[J].岩土力学,2006.增刊.
26. 龚晓南.关于基坑工程的几点思考[J],土木工程学报,2005(9)99~102.

27. 候学渊、刘国彬、黄院雄等.城市基坑工程发展的几点看法[J], 施工技术, 2000 (1): 5~7.
28. 金造时、汪钧标等.关于基坑工程设计要点及若干问题的探讨[J].地质科技情报, 1999 (6): 57~60.
29. 张锦屏.基坑工程的特点和若干问题分析[J], 低温建筑技术, 2003 (3): 64~65.
30. 刘辉、周德泉.基坑工程信息化施工[J].西部探矿工程, 2004 (8): 48~49.
31. 唐传政、朱兰萍、洪兴泉.基坑工程设计中的一些问题探讨[J].西部探矿工程, 2003 (3): 91~92.
32. 扬子胜、扬毅辉、白晓红.深基坑工程发展初探[J].科技情报开发与经济, 2004 (5): 118~119.
33. 刘二栓.深基坑工程特点及存在问题[J].有色金属设计, 2004 (4): 45~47.
34. 唐益群、叶为民、黄雨.深基坑工程施工中几个问题的探讨[J].施工技术, 2002 (1): 5~6.
35. 张有、欧阳永龙.浅议基坑工程及设计与施工[J].中国矿业, 2005 (8): 79~81.
36. 贺瑞霞.深基坑工程支护结构的现状及发展[J].铁道建筑, 2005 (12): 47~49.
37. 杨育文、袁建新.基坑工程支护选型多样性探讨[J].岩土力学, 1999, (3): 69~73.
38. 阳吉宝.基坑工程施工对邻近建筑影响的控制[J].地下空间, 2000 (9): 221~224.
39. 王曙光、陆培毅、顾晓鲁.基坑工程设计中的专家系统[J].岩土力学, 2000, (9): 278~280.
40. 王政富、鞠泳.时空效应规律在软土深基坑工程中的运用[J].山西建筑, 2003 (9): 32~33
41. 高大钊.深基坑工程设计 大连深基坑工程支护研讨会, 2006.7
42. 孙剑平等. 济南珍珠泉大厦深基坑土钉支护技术[J], 施工技术, 1998 (9) .
43. 龚晓南、高有潮, 深基坑工程设计施工手册[M].北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
44. 余子华.深基坑工程实践与研究[M].北京: 中国水利水电出版社, 1999.
45. 《岩土工程手册》编写委员会.岩土工程手册[M].北京: 中国建筑工业出版社, 1995.4.
46. 吴林高.工程降水设计施工与基坑渗流理论[M], 北京: 人民交通出版社, 2002.9.
47. 徐至钧、全科政.高压喷射注浆法处理地基[M], 北京: 机械工业出版社, 2004.1.
48. 徐至钧、曹名葆.水泥土搅拌法处理地基[M], 北京: 机械工业出版社, 2004.2.
49. 薛殿基.粉喷桩设计与施工[M], 郑州: 河南科学技术出版社, 1999.8.
50. 肖兴军、陈营明等, 济南市西市商城深基坑支护技术[J].山东建材, 2002 (6): 23~24:
51. 蒋洪胜、王国富、曹怀武.基坑支护形式与边坡位移的相关性分析[J].岩土力学, 2004 (2): 297~
52. Clayton C R I, Symons I F.The Pressure of Compacted Fill on Retaining Walls[J]. Geotechnique, 1992, 42(1):127~130.
53. Griffiths D V, Hicks M A, Li C O. Transient Passive Earth Pressure Analyses. Geotechnique, 1991, 41(4): 615~620.
54. B Simpson, Partial Factors of Safety for the Design of Retaining Walls, Geotechnique,1994, Vol.14, No.3:527—528.
55. 王仲发.深基坑支护技术初探.建筑技术开发, 2003 (2): 21~22.
56. 刘之葵.深基坑支护设计图压力计算方法中的几个问题[J].广西地质, 2000 (9): 61~65.

57. 李惠强、吴静.深基坑支护结构安全预警系统研究[J], 华中科技大学学报(城市科学版), 2002 (1), 61~64.
58. 邹冰.深基坑支护体系空间变形形状分析[J].科技通报, 2000 (6): 416~420.
59. 吕江宏、俞季民.考虑分级开挖的深基坑支护计算[J].长江科学院院报, 1998 (3): 43~46.
60. 高文华、杨林德、沈蒲声.软土深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响因素分析[J].土木工程学报, 2001 (5): 90~96.
61. 杨茜、张明聚、陈建国.复合土钉支护机理研究[J].地下空间与工程学报, 2005 (6): 409~412.
62. 彭孔曙、胡敏云、沈维维.复合土钉墙设计计算方法研究[J].浙江工业大学学报, 2006 (1): 15~19.
63. 黄力平、何汉金, 挡土挡水复合土钉墙支护技术[J].岩土工程技术, 1999 (1): 7~21.
64. 宋二祥、邱玥.基坑复合土钉支护的有限元分析[J].岩土力学, 2001 (3): 241~244.
65. 杨雪强、刘祖德.论深基坑支护的空间效应[J].岩土工程学报, 1998 (2): 74~78.
66. 彭明祥, 毛燕荣.深基坑支护结构数值分析实用计算方法[J].建筑结构, 2001, (4): 37~40.
67. 杨振军、王想勤、崔文华.复合土钉墙在深基坑支护中的应用[J].土工基础, 2002(3): 41~43.114. 杨丽君.深基坑支护结构中关于土压力的几个问题 [J], 江苏建筑, 2002 (2), 49~51
68. 赵锡宏, 陈志明等.高层建筑深基坑围护工程实践与分析[M].上海: 同济大学出版社, 1996.
69. 刘红军、贾永刚.深基坑支护设计的弹性抗力法[J].青岛海洋大学学报, 1999 (2): 309~312.
70. 陆培毅、刘畅、顾晓鲁:深基坑支护结构支撑系统简化空间分析方法的研究[J].岩土工程学报, 2002 (4): 471~474.
71. 张可能.深基坑支护形式的选择及其适应性分析[J].西部探矿工程, 1998 (3): 18~19.
72. 钱锐、葛崇勋等.深基坑支护中的位移土压力计算模及计算方法[J].江苏建筑, 2002 (4): 54~
73. 陈清华.复合土钉支护在复杂环境、软土地层深基坑支护中的应用[J].防渗技术, 2003 (3): 33~38.
74. 杨志银、张俊、王凯旭.复合土钉强技术的研究和应用[J].岩土工程学报, 2005 (2): 153~156.
75. 徐杨青.深基坑工程设计方案优化决策与评价模型研究[J].岩土工程学报, 2005 (7): 844~848.
76. 王照宇.位移土压力模型及其在基坑工程中的应用[J].四川建筑科学研究, 2004 (3): 83~84.

致 谢

紧张而又充实的在职研究生生活即将结束，在毕业论文完成之际，谨向在论文研究期间，给予过作者帮助的各位老师和同事致以衷心的感谢。

作者非常有幸能够师从朱维申教授攻读工程硕士学位。本文从选题到研究工作的进行，自始至终得到导师的悉心指导和亲切关怀，导师渊博的学识，严谨的治学态度和敬业精神以及宽厚待人的学者风度，都给作者留下了深刻的印象，导师的谆谆教诲将会使学生受益终生。在此向尊敬的导师致以最诚挚的感谢。

论文期间，张强勇教授给予作者以极大的帮助，对本文提出了许多有益的意见和建议，在此表示衷心的感谢。同时感谢济南市勘察测绘研究院的樊祜传总工程师、姜小明主任，对作者写毕业论文期间的关心和帮助。

此外，我的同事和朋友陈圣仟、于峰、商汝平、李连祥等都曾对作者给予过真诚的帮助，在此也深表感谢。

本文引用了大量的资料和参考文献，在此向其作者表示谢意。

最后感谢始终支持和关心作者的亲朋好友。

二零零八年十一月