

上海市水利工程设计研究院

同济大学

编著



软土水利基坑工程的设计与应用



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

软土水利基坑工程的设计与应用

吴 睿 夏才初 陈 峰 李小荣 编著
王宗仁 主审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

软土水利基坑工程的设计与应用/吴睿等编著. —北京:中国水利水电出版社, 2002

ISBN 7-5084-1083-1

I. 软… II. 吴… III. 软土-基坑-水利工程-工程设计
N. TV551

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 028755 号

书 名	软土水利基坑工程的设计与应用
作 者	吴睿 夏才初 陈峰 李小荣 编著
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 371 千字
版 次	2002 年 6 月第一版 2002 年 6 月北京第一次印刷
印 数	0001—4100 册
定 价	40.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

城市水环境的整治是城市环境综合整治的关键，国内外很多大城市的环境整治都是从整治河道着手，以上海市为例，一些年来对苏州河的综合整治就是上海市城市环境综合整治的重大举措，已取得了十分喜人的成果。随着大规模的河道整治和防汛墙建设的增加，城市软土水利基坑工程也将越来越多，它们为在软土地区修建水闸、泵站和河道护岸等工程建设发挥了极其重要的作用。软土水利基坑工程虽然深度不大，一般为6~8m，但这恰处于安全性和经济性之间矛盾比较突出的深浅基坑的临界深度（上海市以挖深7m以上为深基坑）。软土水利基坑通常靠近江河岸边，在设计和施工中要考虑地下水的动态渗流对围护体系的作用，以及封航、断流等施工措施的影响；有些围护结构即为河道的永久护岸，设计时既要考虑施工时的各种工况，也要计入运行时的各种工况，因而，软土水利基坑工程在设计和施工中有其自身独有的特色。

由上海市水利设计研究院设计人员和同济大学老师们联合编著的《软土水利基坑工程的设计与应用》一书，从软土水利基坑工程的上述特点出发，在总结多处软土水利基坑工程设计经验并结合监测分析结果经整理归纳而汇编成册。全书着重论述了软土水利基坑工程的设计理论和方法；同时，还简要介绍了软土水利基坑工程的施工及其质量控制，以及施工过程中的监测和环境保护等内容，这些对在设计文件中就施工质量、施工监测和环境保护诸重要方面提出的具体要求与建议都是非常有用的。另一方面，专业设计人员与高校教师合作编写专著，既加深了理论与实践的结合，也有利于一些工程实际问题的解决，我想是一种极好的尝试。该书的出版必将对从事软土水利基坑工程的设计施工人员有很好的参考借鉴而深受助益。

为此，我写了以上的一点文字，是为序。

孙 钧

2002年初夏于同济园

前 言

近 20 年来,随着城市建设的发展,软土基坑工程的设计和施工技术得到了前所未有的发展,有关基坑工程设计、施工、实例的论著和手册出版了许多,这些书籍中涉及的基坑大多是为建造高层建筑地下室而施工开挖的基坑,当然也有城市地铁、合流污水工程和过江隧道等市政工程方面的基坑。我国大多数城市都依江傍河,整治城市环境必须以整治城市河道为先导。因此,近年来,为配合城市河道环境整治而修建的水闸、泵站和护岸工程逐年增多,由于这些工程在建(构)筑物林立、管线密布的城区修建,不能像在乡间旷野修建那样采用通常所用的大开挖放坡方式,而需采用基坑围护方式。由此,软土水利基坑数量也越来越多。软土水利基坑的设计、施工和监测首先需遵循一般建筑基坑所需遵循的原则,但也有它的独特的方面,如水利基坑的深度大多数处于安全与经济之间矛盾突出的临界基坑深度(开挖深度 6~8m),地下水的动态渗流对围护墙体有着重要的影响,基坑围护结构大多数兼作永久水工结构,其作用通常贯穿于整个水利工程施工和运行的全过程。因此,软土水利基坑的设计不仅需要工程地质、土力学和结构工程等方面的知识,还需要综合水利工程方面的相关知识。

木渎港泵闸工程是上海市苏州河综合整治工程中第一个开工的泵闸工程,也是 1998 年上海市重大市政工程项目,虽然该工程基坑的深度和规模都较一般,但由于该基坑工程的地质条件和周边环境相当复杂,基坑的围护体系采用了放坡开挖、钻孔灌注桩加土层锚杆围护结构、双排桩灌注桩门架式围护结构、大直径灌注桩悬臂式围护结构以及灌注桩加斜撑的围护结构等多种围护结构型式。在施工过程中,还采用了基于时空效应控制变形原理的纵向分部施工工法,从而将近内河道一段灌注桩加斜撑的围护结构中的斜撑取消。而且该基坑工程的作用贯穿于整个泵闸工程施工的全过程,因而,其重要性是不言而喻的。在该基坑的施工过程中,设计方上海市水利工程设计研究院和监测方同济大学密切配合,与业主方上海苏州河

综合整治建设有限公司、项目管理方上海水利投资建设有限公司、监理方上海宏波建设工程建理有限公司和施工方上海浦东市政公司等有关各方共同研讨设计和施工中出现的问题，充分运用信息化设计施工的原理，使工程得以顺利地按期竣工。根据在解决木渎港泵闸基坑工程等软土水利基坑中遇到的工程地质资料解读、土压力计算方法，以及设计、施工和监测等方面的技术问题的体会，萌发出编写一部软土水利基坑工程方面的书的想法，特别是在业主方上海苏州河综合整治建设有限公司的大力支持鼓励下，使该想法付诸实施。在此，对上述单位表示诚挚的感谢！

该书着重论述软土水利基坑工程设计的理论和方法，同时，从满足设计人员知识结构要求的角度，介绍软土水利基坑工程的施工及其质量控制，施工过程中的监测和环境保护等内容，最后详细论述了4个软土水利基坑工程的实例。

全书由吴睿、夏才初和陈峰主编，王宗仁主审。第一章由李小荣编著，第二章由吴睿、李小荣、陈峰、王军编著，第三章由李小荣、陈峰、吴睿编著，第四章由夏才初、王军编著，第五章由夏才初、陈峰、王军编著，第六章由陈峰、李小荣、吴睿编著。本书可供从事基坑工程设计尤其是软土水利基坑设计的技术人员使用，也可从事基坑工程施工、监理、监测的科技人员和高校相关专业师生参考。

本书承中国科学院院士孙钧先生作序，在此谨致谢忱。

限于我们的水平，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2002.5

目 录

序

前 言

第一章 概论	1
第一节 软土水利基坑工程的发展	1
第二节 软土水利基坑工程的特殊性	4
第二章 软土的工程性质及土压力计算	9
第一节 工程勘察和测试	9
第二节 土压力计算	12
第三章 软土水利基坑工程的设计	33
第一节 软土水利基坑工程的基本形式与方案设计原则	33
第二节 基坑稳定性验算	37
第三节 重力式挡墙围护结构的设计	50
第四节 围护结构内力的计算	62
第五节 围护结构的设计	84
第六节 土层锚杆和地面拉锚式围护结构的设计	99
第七节 内支撑结构体系设计	106
第四章 软土水利基坑工程的施工和质量控制	120
第一节 边坡降水和开挖	120
第二节 水泥土搅拌桩和 SMW 工法施工	122
第三节 钻孔灌注桩的施工	128
第四节 板桩施工	132
第五节 地下连续墙施工	137
第六节 土层锚杆和土钉的施工	149
第七节 内支撑施工	155
第五章 软土水利基坑工程的监测与环境保护	160
第一节 概述	160
第二节 监测仪器和方法	162
第三节 监测方案设计	178
第四节 监测报表与监测报告	187
第五节 工程环境保护技术	188

第六章 软土水利基坑工程实例.....	194
第一节 木渎港泵闸工程基坑工程.....	194
第二节 张家塘泵闸枢纽工程基坑围护.....	217
第三节 上海化学工业区二级排水工程一期泵涵基坑围护工程.....	226
第四节 张家浜综合整治一期工程河道护岸围护工程.....	236
参考文献.....	241

第一章 概 论

第一节 软土水利基坑工程的发展

一、软土水利基坑的产生与作用

随着城市环境要求的逐渐提高,城市水利建设进入了前所未有的发展阶段,特别是沿海经济发达地区,城市防洪、水环境的综合整治、城市河网的合理调整都需建设大量的水利控制工程,城市规模的扩大将给城市防洪、水资源的治理带来更大的挑战。以上海市为例,近五年来共完成了 51.1 亿元的水利工程投资,占新中国成立以来完成水利工程投资总量的 62.1%;1992 年以来,新建了约 50 座水闸,200 多座泵站,近 400 座涵洞和 2000 多 km 的堤防护坡。

城市河道弯曲复杂是目前城市水网的现状,给城市防洪排涝、河道的清污治理带来了极大的困难。城市化的大力发展,土地资源的紧缺,沿河道周边建筑物林立密布,管线错综复杂,使水利控制工程及河道护岸工程的建设受到周边环境较大的限制和制约,为了保证工程的顺利进行,需采取基坑围护的方式,并满足以下要求:

(1) 创造良好的土方开挖和水工结构(水下和地下)施工的条件,要求基坑围护起到挡土和提供施工空间的作用,保证整个围护结构在施工过程中的安全。

(2) 在土方开挖和结构施工过程中,保证河道两岸已有建筑物的安全及正常使用,要求基坑围护体系能限制周围土体的变形,使基坑周围地表沉降和水平位移控制在容许范围以内,不产生对邻近建(构)筑物、地下管线使用功能的不利影响,同时,在此前提下还需设计合理、节约造价、方便施工、缩短工期。

(3) 保证基坑工程施工作业面在地下水位以上,通过采取截水、降水、排水等措施,保证结构工程在基坑内的施工环境为干施工。

二、水利基坑工程的现状与发展

软土水利基坑的开挖深度主要取决于控制工程底板的埋置深度和河道开挖的深度。以上海地区为例,通常河道两岸的地坪标高约为 3.50~4.50 m(吴淞零点),河道的开挖深度多为 4.00~6.00m,控制工程(如水闸、泵站)底板的埋置深度为-1.00~-3.50 m 左右,厚度一般为 0.50~2.00m,控制工程的开挖深度一般为 6.00~8.00m,软土地区工程常称此类开挖深度的基坑为“临界基坑”。在软土地区通常将开挖深度 7m 作为深浅基坑的分界,开挖深度小于 7m 称之为浅基坑,大于 7m 称之为深基坑,而开挖深度 6~8m 正好处于交界范围。深基坑的围护型式一般采用地下连续墙或大直径灌注桩加支撑的方式,浅基坑一般采用重力式挡墙的方式。而处于“临界基坑”范围,若采用深基坑的围护方式,安全系数偏大,围护的费用较高;若采用浅基坑的围护方式,通常围护结构的水平位移较大,位移随时间的发展较难控制,有些基坑围护设计者采取单纯加大墙体宽度或墙体插入深度来控

制位移, 导致围护费用大幅度的增加, 并不是一个较好的解决办法。从近年来的统计资料来看, “临界基坑”的围护方式多种多样, 也很难区分那种方式为最优, 因此, 在临界基坑的设计中, 综合考虑安全与造价两个因素, 寻求较优的水利基坑工程围护方案是必须深入研究的课题。

目前软土水利基坑工程设计多采用半经验半理论的方法, 围护结构的参数和边界条件的拟定与工程实施的具体情况有一定的差距, 并且理论计算与实际工程之间的差别也是多方面的。首先, 土力学理论尚未完善, 如软土的流变性, 饱和软土的流动性, 地下水的渗透等, 至今工程界对诸如此类的问题, 认识还有偏差, 许多问题还无法用定量的方式表示出来, 计算理论还不明确; 其次, 土性计算参数取值的不确定, 测试所得的指标离散性较大, 测试方法的不同对指标参数的影响亦较大; 再次, 计算过程中, 采用了过多的假设, 计算的模式与实际情况不完全相符。因此, 基坑工程的设计, 需设计者具备土力学、基础工程、结构力学、弹性力学、原位测试等多门学科的理论基础, 对土性参数的选定, 各种公式的适用范围、条件, 不同地区土的特性, 地下水的作用, 以及土体与围护结构的相互关系等都需有深刻的了解, 并且要善于积累工程实践经验, 对于不同地区的土质, 需汲取当地的工程经验。特别在软土地区, 对基坑开挖后软土强度随时间变化的流变性质, 理论研究尚未成熟, 试验手段有限, 试验方法也不完善, 更需工程经验的积累来修正理论计算上的不足。

基坑围护是由挡墙、支撑系统及周围土体介质组成的三维空间受力体系, 但现在工程设计计算时, 一般将其假设为竖向杆系, 即采用竖向弹性地基梁基床系数法, 将一个空间问题转化为一个平面问题, 坑内开挖面以上的支撑点, 以弹性支座模拟, 坑内开挖面以下作用在围护墙面的弹性抗力, 根据地基土的性质和施工措施等条件确定, 并以均布的水平弹簧支座模拟。为了计算上可行, 将土体看成是一个完全弹性体, 而土体实际上是一种弹塑性的介质。在岩土工程界, 有的研究设计人员采用三维有限元模拟分析基坑围护结构各工况的受力和变形情况, 但计算模型参数复杂、计算量大, 在实际工程设计中还较难推广应用。

软土水利基坑工程围护桩(墙)体通常沿河道两岸平行分布, 与建筑基坑工程围护不同, 其围护无法沿工程四周形成闭合, 但通过长期的工程实践和观测分析, 发现时空效应规律在软土水利基坑工程中同样存在着较大的作用。通过对时空效应规律在软土水利基坑工程中应用的进一步研究, 并合理运用到设计与施工中, 能够对周边建筑物、地面、道路以及管线进行有效的保护, 同时, 能降低围护的费用, 可获得相当的社会效益与经济效益。

自 20 世纪 40 年代以来, 大量国内外学者及工程技术人员对基坑工程的时空效应规律都做了大量的探索工作。1973 年 Bgerum 在室内试验中发现, 软粘土无支护基坑稳定性评价不符合实际情况, 指出过去稳定性分析计算中未考虑粘性土的应力应变与时间效应的关系。1977 年 Clough 与 Davision 在研究中提出基坑开挖长度与宽度之比与稳定性密切相关。前人的研究成果给我们将软粘土基坑稳定和变形与开挖的时间、空间、开挖顺序、开挖位置、基坑暴露时间等因素的关系运用到软土基坑工程的设计和施工中提供了宝贵的依据, 如在设计方面, 考虑时空效应规律对主动土压力的取值、被动土抗力系数的影响等。传统的土体水平抗力系数仅涉及沿深度分布以及随土性变化的特性, 而没有涉及施工因素的影响。

主动土压力的取值则按照传统土压力公式进行计算,没有考虑环境保护等级的因素。而实际情况是,保护等级要求越高,地下桩(墙)体所允许的变形就越小,相应地,计算参数取用高值土压力就越大;反之,土压力就越小。因此,在基坑设计之初,在选定基坑变形控制标准及设计外荷载等依据的同时,应合理选定施工工序及施工参数,以便合理地确定土压力的取值。施工方面,在基坑开挖过程中有计划地对土体采取分块、分层、平衡地进行开挖,根据水利工程的特点,先开挖水工主体结构部分的土体,等主体结构施工至地坪标高,再开挖两边消力池及河道的土方,如苏州河综合整治工程中的木渎港泵闸工程的土方开挖,先开挖水工主体结构的土体,分层开挖至地坪以下2.5m,施工锚杆后,再分层开挖至底板底标高,等水工主体结构施工至地坪标高后,再分段开挖两边土体。整个过程中考虑时空效应下确定基坑开挖与锚杆的施工参数,考虑施工因素对软土地层中支护结构、变形以及坑周地层移动的影响,可以在基坑设计计算中再作定量的考虑,使得在基坑受力平衡得以稳定的条件下,有效地控制坑周土体位移量和差异位移量。

近几年,基坑工程的重要性和特殊性越来越得到工程界的重视,虽然目前还没有基坑方面指令性的国家标准,但已有多个行业或地方相继编制了有关此方面的技术标准和规程。例如:建设部批准的JGJ120—99《建筑基坑工程技术规范》、冶金部批准的YB9258—97《建筑基坑工程技术规范》、建设标准化协会批准的CECS22:90《土层锚杆设计与施工规范》、CECS96:97《基坑土钉支护技术规程》以及上海、深圳、广东等地编制的地方性技术标准,这对基坑工程的勘测、设计、施工、监测起到了很好的指导作用,这也是大量的工程和科研成果的总结,为基坑工程的实施提供了标准和依据。但在水利行业还没有编制基坑工程方面的相关技术标准和规范。水利基坑工程是在近几年随着城市水利的发展而兴起,因此,目前水利工程中基坑围护的勘测、设计、施工都仅能参考已有的相关规程,并结合水利工程的特点,以及以往工程的经验来进行。

随着基坑工程的发展,基坑工程的设计、施工逐渐程序化、规范化、标准化和信息化。目前,用于基坑工程方面的软件较多,有商业性的工程软件,还有一些高等院校、设计和科研单位自行开发的专业软件。例如:同济启明星深基坑支挡结构和支撑结构分析软件,将整个围护结构分成竖向挡土和水平支撑两部分进行计算。支挡结构分析软件提供了弹性挡土结构分析、重力式挡土结构分析、SMW工法、土钉墙设计分析、锚杆验算分析、基坑周边地表沉降预估、反分析与动态设计等多种功能,可用于计算多种围护结构(如灌注桩、地下连续墙、排桩、重力式挡墙等)在各种工况下的位移和内力,以及围护结构墙底抗隆起、坑底抗隆起、抗管涌、整体稳定性等各种验算。弹性挡土结构的位移和内力计算提供了m法、常数法、混合法三种方法,采用此软件分析,在保证各项稳定验算参数满足规范要求的情况下设计的围护结构是偏安全的。支撑结构分析软件用于各种平面布置支撑结构的位移和内力的计算分析,在计算模式中采用腰梁上加分布弹簧描述挡土墙和墙后土体对支撑结构的约束作用。

由北京理正软件设计研究所开发的理正深基坑支护结构设计软件提供了单元计算和整体计算两个功能,单元计算的功能类似于同济大学开发的深基坑支挡结构分析计算软件。整体计算功能采用冠梁、腰梁、支撑结构、挡土结构与周围土体共同作用的空间有限元整体分析计算方法,并提供了各种复杂支护结构的计算问题。如:①局部内支撑问题;②内支

撑和锚杆混计算问题；③无内支撑，只有连续墙的问题；④预应力内支撑问题；⑤错层内支撑问题；⑥有冠梁无内支撑的排桩支护问题；⑦任意复杂边界形式的问题；⑧多种支护形式组合的问题等。

以上两套软件系统都为工程技术人员对深基坑支护结构分析计算提供强有力的工具，较真实地反映了支护体系的实际受力状况。软件系统同时提供了较友好的用户界面，具有较强的开放性，可通过一系列参数的调整，使计算结果更为安全可靠，经济合理。

另外，许多工程技术人员也常用 SAP 等通用有限元程序计算基坑墙体和支撑的内力和位移，但实测水平位移一般要比程序计算结果值约大 2~3 倍，因此，采用此软件进行分析计算时，应严格控制墙体的水平位移。

由于基坑围护工程是一项边界条件极为复杂的介质与结构共同作用的体系，而现在的软件一般都以弹性理论为基础，即使考虑支护构件、支撑构件和土体三者共同作用，计算结果和实测结果仍有一定的差异，这是客观存在的。计算机辅助计算系统只是在给定的条件下完成赋予的指令，不可能完全取代人的工作，因此，应合理地运用软件，将软件的计算结果作为指导设计的参考，采用弹性和弹塑性理论分别计算出两个界限值，使实测值能控制在两个界限值的范围内。在施工的整个过程中，进行全过程监测，采用反分析法，根据实测数据进行反算，跟踪预测，不断地修正设计参数，确定是否要采取进一步的工程措施，以适应新的情况。

第二节 软土水利基坑工程的特殊性

一、软土水利基坑工程的特点

基坑工程是一项综合性很强的系统工程，包括基坑围护体系的设计、施工、土方的开挖以及开挖过程中围护体系的监测，需要工程技术人员将岩土工程与结构工程的知识和技术良好地结合。但软土水利基坑工程又有其很大的特殊性，主要有以下五个特点：

(1) 一般建筑工程中的基坑围护是一项临时措施，地下室施工完成后围护体系即完成了使命。因此基坑围护体系的安全储备可相对较小。而水利工程中基坑围护结构常兼作永久结构，围护桩（墙）前土体开挖后不再回填，具有很大的风险，基坑围护体系的稳定需考虑长期荷载效应的作用。经过对多个工程的总结分析，认为永久基坑的验算在水利行业规程未编制之前，可按现有的规程执行，但须提高一个安全等级。例如：上海浦东新区张家浜河道综合整治工程，沿岸建设河道时遇到多处驳岸周边建筑靠河道较近，护岸无法开挖施工，于是采用基坑围护与防汛墙结合一体，围护桩（墙）直接作为防汛墙的结构墙体，基坑设计验算过程中，将其安全等级提高一个等级，河道开挖清淤后，只在围护墙外做一层钢筋混凝土护面。这种结构型式在张家浜河道整治中，无论是重力式挡墙基坑围护型式，还是双排桩围护型式均取得了成功，既保证了防汛墙的顺利实施，又保证了周边建筑物的安全。

(2) 水利工程中的基坑同建筑工程中的基坑一样，具有较强的区域性，但不同的工程地质和水文地质条件地基中的基坑工程的差异性很大。在软土地区更应注意地质条件的不同对基坑工程的影响。由于水利工程一般沿原有河道或河道周边不远处建造，因此，基坑

工程常可能建在老河道中,或遇到岸边的地下暗浜,并且,基坑周边土体中地下水位较高,补给很丰富,地下水渗流对围护桩(墙)体的影响不容忽视。这样,详细周密地进行地质勘探是软土水利基坑工程成功的前提,所以基坑围护体系的设计、施工和土方的开挖要因地制宜,根据不同的地质条件采取相应的合理方案和措施,不能仿照建筑工程简单搬用。

(3) 软土水利基坑围护体系的设计、施工和土方开挖不仅与地质条件有关,还与基坑相邻建(构)筑物、地下管线的位置、重要性及其抵御变形的能力等周围场地条件有关。若作为临时性基坑,在施工期间满足围护结构稳定的前提下,保护相邻建(构)筑物和地下管线的安全是基坑工程设计与施工的关键。若基坑围护结构兼作永久结构,则还与结构本身的特性有关,这时,满足结构本身的长期稳定是基坑工程的设计和施工的关键。因此基坑工程具有很强的个性,工程技术人员需结合工程的要求、当地的具体情况具体分析、实施,同时,水利工程是一种专业性较强的工程,水利基坑工程中不仅需要岩土工程和结构工程的知识,对水利方面的知识也需要相当了解,因此,只有具备多方面的知识,才能设计出合理的、经济的基坑工程。基坑工程涉及土力学中稳定、变形和渗流三个基本课题,三者融合在一起。有的基坑工程围护结构稳定性是主要矛盾,有的基坑围护体系避免由土中渗流引起的流土破坏是主要矛盾,有的基坑围护体系控制变形量则是主要矛盾。在软土水利基坑工程中,以上三方面有时其中两方面或三方面会同时成为主要矛盾。如:浦东张家浜河道综合整治中的基坑工程,在围护结构稳定满足的前提下,土中的渗流稳定和围护结构长期荷载效应组合下的变形量同时成为基坑设计的主要矛盾。

(4) 软土水利基坑工程是一项综合性很强的系统工程,从围护结构的设计施工到土方开挖以及围护结构体系的监测,每个环节都需紧密配合,在土方开挖过程中,施工组织是否合理在一定程度上决定着围护体系能否成功。不合理的土方开挖方式、步骤和速度将导致围护结构变形过大,严重者会导致围护体系失稳破坏,特别在水利工程中兼作永久结构的基坑围护结构,围护桩(墙)作为工程的主体结构,在河道开挖或清淤过程中,若施工组织不利,一旦出现围护结构失稳或变形过大,将很难挽救和弥补。因此,在施工过程中应加强监测,对在各种工况下实测的监测数据进行仔细分析,以实现信息化施工。

(5) 基坑工程一般施工周期长,从开挖到完成地面以下全部隐蔽工程,常需经历多次降雨、周边堆载、振动等多种不利条件,在水利工程中,还受到河道汛期地下水渗流变化的影响,其安全度的随机性较大,并且,一般水利工程施工工期常安排在非汛期到来之前完成水下部分结构工程,否则需根据现场情况采取一定的措施来保证基坑围护体系的安全。

二、软土水利基坑工程设计需注意的问题

1. 土、水压力分算和合算问题

作用在围护结构上的土压力包括两个部分,即水压力和有效土压力。对于透水性较强的砂性土,地下水以自由水为主的方式存在于土中,按水土压力分算,这已无可争议,但对于粘性土的土压力计算问题,一直存在着水土压力分算还是水土压力合算的分歧。

根据土的有效应力理论,水土压力分算较为合理,但水土分算需采用土的有效强度指标 c' 、 φ' ,一般粘性土中的孔隙水压力比较难测定,以现有的测试手段,即使测试出来也不一定完全正确,因此, c' 、 φ' 的数值也较难测定出来。但在工程界,为了简化计算,可采用总应力指标 c 与 φ 代替有效应力指标强度 c' 、 φ' ,并按地区经验作必要的调整,忽略孔隙水

压力的影响, 这样的计算结果是偏于保守的, 特别在软粘土地区, 基坑开挖后, 孔隙水较难排出, 孔隙水压力变化甚小, 即使增大也是非常有限的。

水土压力合算理论依据虽不是很充分, 但计算较为简单, 计算所用的土性总应力指标也较容易测试, 在软土地区, 根据以往的经验, 加上一定的修正, 较接近于实际情况。例如上海市地区基坑规程中提到, 根据工程积累的经验, 水泥土围护结构的土压力计算可采用水土合算的原则, 乘以一个经验土压力系数达到简化计算的目标, 并且能满足工程的要求。

2. 渗流效应下围护墙前后水压力的分布以及对土压力计算的影响

在我国大部分软土地区, 地下水位一般较高, 特别位于城市河道附近的区域, 地下水位往往离地坪面仅 0.5~1.0m 左右。在此区域内, 作用在围护桩(墙)上的水压力较大, 水压力的计算应仔细考虑, 以往的设计中, 通常都将水压力作为静水压力考虑。在无渗流时, 认为作用于围护墙上主动土压力侧的水压力, 在基坑内地下水位以上按静水压力三角形分布, 在基坑内地下水位以下按矩形分布, 见图 1-1 (a)。

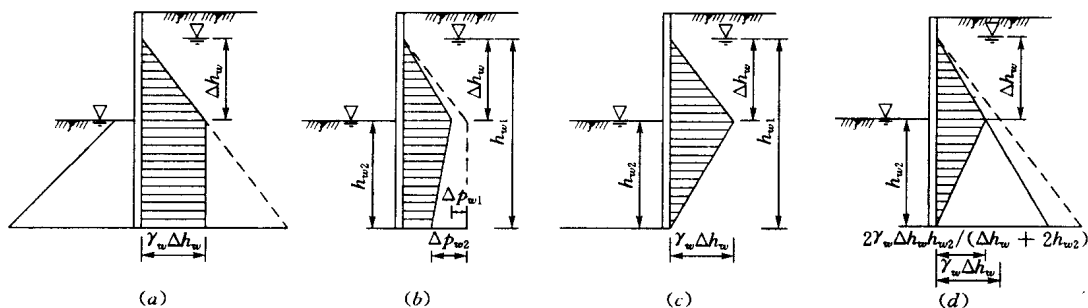


图 1-1 渗流效应下围护墙前后水压力的分布

在地下水有稳定渗流的情况下, 上海市标准《基坑工程设计规程》提供了两种近似的计算方法, 见图 1-1 (b)、(c)。

在龚晓南主编的《深基坑工程施工手册》中对渗流条件下的水压力分布进行了分析, 认为渗流作用下坑底水压力降低 1/3, 因此, 在这种情况下, 图 1-1 (c) 中三角形计算模式就不是很合理, 而应按图 1-1 (d) 的三角形进行计算, 并指出对于低透水性土层, 必须同样考虑渗流效应。因此, 在软土水利基坑工程设计中, 不容忽视渗流的影响, 应根据水利工程的经验, 认真分析渗流效应下水压力变化对围护桩(墙)的作用。

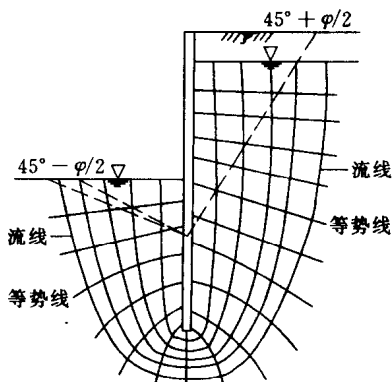


图 1-2 在渗流效应下土压力的流网计算法

同时, 还应考虑地下水有稳态渗流时, 渗流效应对作用于围护桩(墙)上的土压力存在的影响。其主要表现在两个方面: 一方面是使主动侧的水压力减少, 使被动侧的水压力增大, 这对围护体系的稳定表现为有利的一面; 另一方面是主动侧的土压力增大, 使被动侧的土压力减少, 这对围护体系的稳定表现为不利的一面。在渗流效应下的土压力一般采用流网法进行计算分析, 见图 1-2。

3. 坑内加固的问题

在软土地区，一般基坑底面以下的土体多为较深厚的软弱土层，被动土抗力不足，即使通过增大围护桩（墙）体的插入深度来满足基坑的稳定性，围护结构的位移和变形也通常较大，无法满足周围环境的要求。

大量的工程实践表明，在基坑内局部进行加固是一种经济有效的措施，通过各种方式使坑内被动区范围内的软弱土体的力学性能得到明显改善，提高土体的力学性质指标，从而达到减小围护结构的变形、地面沉降及坑底隆起的作用。理论分析得出加固被动区土体比加固支护结构后方的主动区土体更为有效的结论。

目前，工程界一般根据围护结构的变形形态以及当地的经验确定被动区软弱土体加固的方式和范围，而加固方法多采用深层搅拌桩、压密或劈裂注浆、旋喷桩等，但怎样采用最少的工程量获得最大的加固效果是一个值得探讨的问题，特别在软土水利工程中兼作永久性结构的基坑围护结构，对围护结构的变形要求十分严格的情况，对如何合理确定加固方式和范围，更是一个亟待解决的难题。据采用“m”法计算的研究分析，认为对被动区土体加固对减少围护桩（墙）最大弯矩、最大剪力、支撑轴力以及围护桩（墙）的最大位移在一定深度范围内比较有效，超过此深度，效果不明显，并提出加固深度为墙体入土深度的 $1/3$ 效果最好。据采用平面有限元法对基坑被动区加固进行的研究分析，认为增大被动区加固深度和宽度均能减少围护桩（墙）水平位移、支撑的轴力、地面沉降以及基底的隆起量，但增加加固宽度比增加加固深度效果更好，并得出结论：对悬臂式支护结构加固深度宜取开挖深度的一半，对于单支撑支护结构，加固深度宜取 0.6 倍的开挖深度。我们通过大量的工程实例分析总结，在软土水利基坑工程中，以上海地区为例，被动区土体加固对减小围护桩（墙）的变形、地面的沉降、支撑（锚杆）轴力、防止围护桩（墙）的“踢脚”破坏、坑底承压水的破坏、坑底土体的隆起等均有一定的作用。同时认为，被动区土体加固深度以 $3\sim 6\text{m}$ 为宜，根据不同的开挖深度确定，开挖深度大，坑底土层较为软弱，则加固深度取大值，反之取小值。被动区土体的加固宽度不应小于加固的深度，土体连续加固比间隔加固效果要好。

虽然被动区土体局部加固的方式在深基坑围护工程中被广泛应用，但目前仍无很成熟的设计计算方法，以上的结论也只供参考，并以此引起设计人员对这个问题的注意。

4. 地下水控制的设计问题

软土地区，地下水位一般埋藏较浅，土层含水量丰富，并且软土层中多有夹砂层或夹粉层，因此，对地下水的控制需同围护结构设计一样地重视。收集以往的许多工程资料，大部分工程事故均与地下水的控制不好有关，所以，正确地分析地下水的渗流形态，设计出合理的止水、降排水方案对保证基坑工程的安全是至关重要的。

基坑工程不同于一般的水工挡土墙，在基坑开挖后，内外水位差较大，地下水的渗流问题十分突出，即使在渗透系数很小的土层中，渗流效应依然是存在的。而渗透破坏往往会带来严重的后果，主要表现在两方面：一方面是坑底的管涌破坏，造成围护结构整体失稳；另一方面是坑壁的流土破坏，造成周边地层下陷，引起邻近建（构）筑物的不均匀沉降。

工程界对于地下水的控制通常采用竖向止水帷幕和降、排水相结合的方式，在有必要的情况，还在坑内设置水平止水帷幕。

竖向止水帷幕设置在基坑外侧，阻止地下水在坑内外水头差的作用下渗入坑内，防止由此而产生的流砂破坏以及由此导致的周边地面的沉陷。竖向止水帷幕深度应按照渗径要求计算确定，在不透水层埋置较浅时，原则上应伸入不透水层。在软土水利基坑工程中，一般不做水平止水帷幕，因为一方面水平止水帷幕费用较高，另一方面水利工程中许多底板需抗浮都设计成透水性底板。

基坑内需设置降、排水措施，主要保证基坑内施工场地干燥，防止地下水因渗流产生流砂和管涌破坏等现象，并降低作用于围护结构上的静水压力和渗透压力，坑内降水还可使坑底表层土的孔隙水压力消散，土的有效应力增加，提高土体的强度，从而提高了围护结构的稳定性。但降水会给周围环境带来一定的影响，特别是透水层较厚，竖向止水帷幕未伸入不透水层，在降水的影响范围内，建（构）筑物会产生附加沉降，这种情况可采用降水和回灌相结合的方式处理。

软土水利基坑工程在周边环境允许的情况下，也可不做止水帷幕，直接采用降水的方式，根据开挖基坑的深度，采取不同的工艺，但此时，降水管需设置在基坑外侧。

总的来说，地下水的控制在基坑设计和施工中是一个非常重要的环节，只有合理认真地做好止水和降、排水的设计和施工，才能确保基坑及周围建（构）筑物的安全。

第二章 软土的工程性质及土压力计算

第一节 工程勘察和测试

一、基坑工程勘察

深基坑围护工程地质勘察所提供的报告和资料是做好降水、地基加固和基坑围护等设计和施工的基本依据。

为主体工程设计提供地质勘探调查大多是为基础形式、桩基设计提供所需的资料,对于基坑工程设计,需要增加工程中处理土体稳定性和变形问题的勘探内容。

基坑支护设计所需的工程地质及水文地质调查内容及要求如下。

1. 工程地质调查

调查基坑所处地的地层构成、土层分类、土的物理力学参数、地层描述、地质剖面图以及必要数量勘探点的地质柱状图。地质剖面图要根据足够的勘探点的地质柱状图绘出,以保证可靠性,不能用距工程位置过远或间距过大的钻孔和不充分的地质资料绘制出带有部分遗漏或虚假性的地质剖面图,以避免由此造成的施工措施的失误,而引起大幅度甚至灾害性的地层移动。特别对靠近建筑设施的基坑边缘尤应仔细勘察。

深基坑工程勘探点的布置:勘察范围为支护结构可能设置的地段,在开挖边界外的1~2倍基坑开挖深度范围内布置勘探点。对于软土,勘察范围应适当扩大,勘探点应布置在基坑周围,间距视地层复杂程度而定,一般为20~30m左右。地质勘察深度,一般软土地层中要求达到开挖深度的2~3倍,在深大基坑工程中按预测基坑周围下卧地层土体位移的需要确定勘探孔深度。

基坑支护工程的设计与施工都会碰到地表浅层土,因而对其勘察要求更要详细一些。上海地区表层土常会遇到暗浜、暗塘、暗井、古河道及地下障碍物等,常见的填土为素土与垃圾土。如果回填前没有清除水草和浜土,则往往含有大量的有机质。

在深基坑支护的工程地质勘察中,若遇到上述填土、暗浜、古河道、地下障碍物等土层情况,除采用控制性钻孔外,可布置较多的浅孔,例如小口径的勺钻或麻花钻,孔距可为2~3m左右,要求查明其填土成因、类型,了解地形、地物、河塘变迁,查明其分布特征、厚度及界面变化,阐明主要工程特性。

针对软土基坑工程中的特殊要求,增加特殊的土工试验,如为了预测软土层深基坑施工中的坑底回弹再压缩量、基坑抗隆起的土体稳定性以及基坑围护墙体内侧土体的弹性抗力,就需要测试坑底处或设计深度处的土体压缩模量、回弹模量、回弹再压缩曲线、基床系数以及不排水抗剪强度等。对特殊的不良地层要查明其膨胀性、湿陷性、触变性、冻胀性和液化趋势等不良特性参数。

2. 水文地质调查