

普通高等教育土木工程专业新形态教材

基坑工程设计施工 及风险控制

刘 军 周与诚 白雪峰 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

基坑工程是土木工程领域中一个极为重要的学科分支,涉及工程地质与水文地质、土力学、基础工程、结构力学、土与结构相互作用、原位测试技术、施工技术以及环境岩土工程等诸多学科,综合性很强。基坑工程应用范围极为广泛,但事故发生率较高。本书以基坑工程风险控制为主线阐述了最常用支护结构形式的基坑工程设计与施工,不同支护结构的基坑工程设计与施工及风险控制自成体系。本书紧密结合社会发展需求,构建了基坑工程风险控制体系,不仅反映了学科前沿状况,还对超深基坑工程的发展及存在问题做了探讨,知识系统且理论密切联系实践。

本书可作为研究生教材,也可作为职业培训教材;可供受过一定程度专业教育的本科生、工程技术人员、科研人员参考。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

基坑工程设计施工及风险控制/刘军,周与诚,白雪峰编著. —北京:清华大学出版社,2023.3
普通高等教育土木工程专业新形态教材
ISBN 978-7-302-62685-5

I. ①基… II. ①刘… ②周… ③白… III. ①基坑工程—工程设计—高等学校—教材 ②基坑工程—工程施工—高等学校—教材 IV. ①TU46

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 025957 号

责任编辑:秦娜 王华

封面设计:陈国熙

责任校对:王淑云

责任印制:丛怀宇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15.5

字 数:374 千字

版 次:2023 年 4 月第 1 版

印 次:2023 年 4 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

产品编号:094385-01

前言

PREFACE

基坑工程技术复杂、风险大,是土木工程中最具有挑战性的工程技术。基坑工程事故发生率较高,有些事故给国家经济和人民生命财产造成了严重损失。如何强化基坑工程风险意识,避免事故发生是摆在青年学子、工程技术人员、各级研究人员面前的重要课题。

本书根据国家及地方现行的法律、法规和标准,构建了基坑工程从勘察阶段、设计阶段到施工阶段的全过程风险控制体系,阐述了最常用支护结构形式的基坑工程设计施工及风险控制。全书共分6章,包括基坑工程风险控制总论、基坑支护设计原理与风险预控、地下水控制、土钉墙支护基坑工程风险控制、锚拉式支护基坑工程风险控制、内撑式支护基坑工程风险控制。书中对具有发展前景的超深基坑工程带来的技术挑战做了初步探讨。本书吸收了编者的最新研究成果、参与编制的国家及地方标准,将基本原理和方法与实践结合起来,力求突出实用性和创新性,并体现时代特征。

通过本书学习,使青年学子、工程技术人员能够迅速掌握基坑工程设计与施工基本原理和基本方法,主动将风险理念融入具体实践中,以防止和减少基坑工程事故、保障人民群众生命和财产安全为己任,做到理论与实际相结合,因事而化、因时而进、因势而新。

本书编写时,力求做到重点突出、语言简练、条理清晰。本书第1章与第2章由刘军和周与诚编写;第3章与第4章由白雪峰编写;第5章与第6章由刘军编写;最后由刘军统稿。

本书编写过程中,研究生刘展伊、魏杰、王可馨收集了大量资料并进行了整理,中航勘察设计研究院有限公司章良兵提出了许多宝贵意见,北京市政工程设计研究总院有限公司惠丽萍教授级高级工程师提供了部分素材,北京云庐科技有限公司提供了部分素材,在此一并致谢。

我国著名岩土工程专家杨斌(中国建筑科学研究院地基基础研究所)教授级高级工程师在百忙中为本书进行了精心审阅,提出了许多宝贵意见和建议,使本书得到进一步完善。在此表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

清华大学出版社

目 录

CONTENTS

第 1 章 基坑工程风险控制总论	1
1.1 基坑工程含义及支护结构类型	1
1.1.1 基坑工程概述	1
1.1.2 基坑支护结构安全等级和类型	2
1.2 基坑工程事故类型与事故等级划分	6
1.2.1 基坑工程事故类型	6
1.2.2 基坑工程事故原因分析	11
1.2.3 基坑工程事故等级划分	12
1.3 基坑工程风险评估与风险预控	12
1.3.1 基坑工程风险评估	13
1.3.2 基坑工程风险预控	23
1.4 风险跟踪与监测	24
1.4.1 风险跟踪与监测的目的和工作内容	24
1.4.2 基坑工程影响分区与监测等级	26
1.4.3 现场巡查和远程视频监控项目	28
1.4.4 仪器量测项目	29
1.5 基坑工程施工过程中的风险控制	36
1.6 超深基坑工程带来的技术挑战	38
1.6.1 设计方面	38
1.6.2 施工方面	40
1.6.3 风险监测与控制方面	41
第 2 章 基坑支护设计原理与风险预控	42
2.1 基坑支护设计原则	42
2.1.1 基坑支护设计总体原则	42
2.1.2 基坑支护设计极限状态	42
2.2 基坑工程勘察	44
2.2.1 基坑勘察方案	44
2.2.2 基坑勘察成果	44
2.3 土压力计算	45

2.3.1	土的抗剪强度指标取值	46
2.3.2	竖向附加应力计算	46
2.3.3	土压力标准值计算	49
2.3.4	有限土压力标准值计算	50
2.3.5	土压力存在的问题及计算优化方向思考	51
2.4	挡土结构设计计算	52
2.4.1	挡土结构变形特点	52
2.4.2	挡土结构变形与内力影响因素	54
2.4.3	挡土结构设计	55
2.4.4	挡土结构内力及变形计算	60
2.4.5	挡土结构截面计算	69
2.5	稳定性验算	74
2.5.1	嵌固稳定性验算	74
2.5.2	整体稳定性验算	74
2.5.3	抗隆起稳定性验算	76
2.5.4	地下水渗透稳定性验算	78
2.6	基坑工程设计程序及风险预控要点	79
2.6.1	基坑工程设计程序	79
2.6.2	风险控制要点	80
第3章	地下水控制	83
3.1	概述	83
3.1.1	地下水控制含义	83
3.1.2	地下水类型和渗透性	83
3.1.3	地下水控制方法	85
3.2	水文地质勘察	85
3.2.1	勘察方案设计	86
3.2.2	勘探	87
3.2.3	水文地质勘察评价与建议	88
3.3	地下水控制设计	89
3.3.1	地下水控制等级划分	89
3.3.2	地下水控制设计内容	91
3.4	隔水帷幕	92
3.4.1	隔水帷幕分类	92
3.4.2	隔水帷幕设计	94
3.4.3	隔水帷幕施工	96
3.4.4	隔水帷幕检测验收	104
3.5	降水	105
3.5.1	降水设计计算	105

3.5.2	降水施工	115
3.5.3	降水井设置	121
3.6	地下水回灌	122
3.6.1	防沉降地下水回灌	122
3.6.2	资源性地下水回灌	123
第4章	土钉墙支护基坑工程风险控制	126
4.1	概述	126
4.1.1	土钉墙支护结构基本概念	126
4.1.2	土钉墙支护分类	127
4.1.3	土钉墙支护作用机制与工作性能	128
4.1.4	土钉墙支护特点与应用	129
4.2	土钉墙支护结构与风险预控	130
4.2.1	土钉墙支护结构设计	130
4.2.2	风险预控	136
4.3	土钉墙支护基坑工程施工与风险控制	138
4.3.1	土钉墙支护基坑工程施工工序	138
4.3.2	施工准备中的风险预控	139
4.3.3	土钉墙支护基坑工程施工过程	141
4.3.4	土钉墙支护基坑工程风险跟踪与监测	147
4.3.5	施工过程中的风险控制	154
4.4	事故案例分析	156
4.4.1	广西隆安县土钉墙坍塌事故	156
4.4.2	上海市静安区基坑局部失稳事故	157
4.4.3	某大厦基坑倒塌事故	159
第5章	锚拉式支护基坑工程风险控制	162
5.1	概述	162
5.1.1	锚拉式支护结构基本概念	162
5.1.2	锚拉式支护结构分类	164
5.1.3	锚拉式支护结构作用机制与工作性能	166
5.1.4	锚拉式支护结构特点与应用	167
5.2	锚拉式支护结构与风险预控	167
5.2.1	锚拉式支护结构设计	167
5.2.2	风险预控	175
5.3	锚拉式支护基坑工程施工与风险控制	178
5.3.1	锚拉式支护基坑工程施工工序	178
5.3.2	施工准备中的风险控制	179
5.3.3	锚拉式支护基坑工程施工过程	180

5.3.4	锚拉式支护基坑工程风险跟踪与监测	192
5.3.5	施工过程中的风险控制	198
5.4	事故案例分析	200
5.4.1	广西绿地中央广场房地产项目 D 号地块(二期)基坑崩塌事故	200
5.4.2	某住宅楼基坑坍塌事故	201
5.4.3	北京某基坑工程塌方事故	203
第 6 章	支撑式支护基坑工程风险控制	204
6.1	概述	204
6.1.1	支撑式支护结构基本概念	204
6.1.2	支撑式支护结构分类	205
6.1.3	支撑式支护结构作用机制与工作性能	208
6.1.4	支撑式支护结构特点与应用	209
6.2	支撑式支护结构设计 with 风险预控	210
6.2.1	支撑式支护结构设计	210
6.2.2	风险预控	219
6.3	支撑式支护基坑工程施工 with 风险控制	221
6.3.1	支撑式支护基坑工程施工工序	221
6.3.2	施工准备中的风险预控	222
6.3.3	支撑式支护基坑工程施工过程	222
6.3.4	支撑式支护基坑工程风险跟踪与监测	228
6.3.5	施工过程中的风险控制	232
6.4	事故案例分析	234
6.4.1	杭州地铁 1 号线某站基坑事故	234
6.4.2	武汉地铁某站基坑垮塌事故	235
6.4.3	天津地铁 4 号线某站基坑事故	235
参考文献		238



第1章

基坑工程风险控制总论

1.1 基坑工程含义及支护结构类型

1.1.1 基坑工程概述

基坑是为进行地下建(构)筑物的施工由地面向下开挖出的空间;基坑工程是指为保证基坑和地下结构施工的安全以及周边环境不受损害而采取的支护、地下水控制和周边环境保护等措施;基坑支护结构是指支挡或加固基坑侧壁的结构。基坑支护结构一般是临时性的结构,设计中不考虑其耐久性问题,荷载及其分项系数是按临时作用考虑的;地下水控制也是按临时性措施考虑的。

基坑工程是土木工程领域中一个极为重要的学科分支,应用范围极为广泛,城市轨道交通、综合地下管廊、工业与民用建筑等领域均有大量的基坑工程。基坑工程涉及工程地质与水文地质、土力学、基础工程、结构力学、原位测试技术、施工技术以及环境岩土工程等诸多学科,其综合性、区域性、系统性、时空效应很强。

基坑工程具有如下特点:

(1) 土性的不确定性:土的三相组成的质量和体积之间的比例关系不同,则土的质量、含水性和密实程度等基本物理性质就各不相同,并随着各种条件(如水位变化、压实程度等)的变化而改变。例如黏性土,黏性土随着本身含水量的变化,可以处于不同的物理状态——固体状态、可塑状态、流塑-流动状态,其工程性质也相应地发生很大的变化。土体具有非均质性(成层、倾斜)和各向异性,是一种非弹非塑又有一定黏性的物质,其性质以及对支护结构的作用或提供的抗力还随施工过程或环境的变化而变化;土的抗剪强度指标值的大小与试验时的条件有密切关系,尤其与排水条件有关,同一种土在不同排水条件下进行试验,可以得出不同的 c (土的黏聚力)和 φ (内摩擦角)值。

(2) 外力的不确定性:作用在支护结构上的外力往往随着环境条件、施工方法和施工工序等因素的变化而改变。

(3) 变形的不确定性:变形控制是支护结构设计的关键,也是保证周边环境安全的关键,但影响变形的因素很多,支护结构刚度、支撑(或锚杆)体系的布置和构件的截面特性、岩土性质、地下水的性质及变化、开挖方式以及施工质量和现场管理水平等都是产生变形的原因。

(4) 影响因素的不确定性:一些偶然变化会引起超载变化的不确定,如基坑周边的活

荷载或动荷载等；事先没有掌握的地下障碍物、地下管线、水囊、不良地层，以及周围环境的改变等因素都会影响基坑工程的正常施工和维护使用。

从基坑工程特点可以看出：

- (1) 土力学的强度、变形、渗透三大基本原理全部出现；
- (2) 设计计算模式与实际工况具有差异性；
- (3) 施工过程中的影响因素多且具有不确定性。

基坑工程的特点表明基坑工程技术复杂、风险大，施工过程中易出现工程事故，是土木工程中最具有挑战性的工程技术。

基坑工程应是一项包括勘察阶段、设计阶段、施工阶段的系统工程，设计阶段和施工阶段是基坑工程的两个关键阶段。勘察阶段的主要任务是查明工程建设区的工程地质与水文地质条件并做出评价，为设计和施工提供依据。设计阶段的主要任务是依据勘察成果选择适宜的支护结构类型并分析支护结构的稳定性等，提出地下水控制、周边环境保护措施，对基坑开挖、支护结构施作、监测、应急预案等提出施工要求。施工阶段包括两个环节，一是施工准备，依据勘察和设计成果先进行施工准备工作，如编制专项施工方案等；二是施工过程，基坑工程施工过程中的不确定因素较多，基坑的开挖、支护、地下水控制等工序紧密联系且相互交叉，其中某一工序失效将可能导致整个基坑工程的失败。

工程实践表明：基坑工程勘察缺失或偏差将直接导致设计出现缺陷；设计缺陷将直接影响基坑工程施工的安全性；施工阶段除勘察、设计可能导致的不利影响外，还有其自身诸多不利因素。基坑工程技术从源头上加强风险控制的研究，强化基坑工程技术人员的风险理念，以不断改进和完善设计、施工方法，形成基坑工程设计与施工的科学化、系统化和规范化，这是规避或减少基坑工程事故的关键所在。

1.1.2 基坑支护结构安全等级和类型

基坑支护结构类型繁多，不同类型各有其适用范围。基坑支护结构在基坑开挖中起着挡土、止水、稳定坑底的作用，是保证基坑工程安全的重要措施；基坑支护结构的破坏可能危及人的生命、造成经济损失、对社会或环境产生不良影响，因此对基坑支护结构安全等级的划分意义重大，是基坑工程设计阶段拟解决的关键技术问题。

1.1.2.1 基坑支护结构安全等级

《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)规定，基坑支护设计时，应综合考虑基坑周边环境 and 地质条件的复杂程度、基坑深度等因素，按照基坑支护结构破坏或失效后果严重程度将支护结构的安全等级分为一、二、三级(表 1-1)；对同一基坑的不同部位，可采用不同的安全等级。

表 1-1 基坑支护结构的安全等级

安全等级	破坏后果
一级	支护结构失效、土体过大变形对基坑周边环境或主体结构施工安全的影响很严重
二级	支护结构失效、土体过大变形对基坑周边环境或主体结构施工安全的影响严重
三级	支护结构失效、土体过大变形对基坑周边环境或主体结构施工安全的影响不严重

基坑支护结构安全等级采用的是原则性划分方法而非定量划分方法,主要是考虑到基坑深度、周边环境状况及土的性状等因素对破坏后的影响程度难以量化。基坑支护结构安全等级选用原则是:

(1) 基坑周边存在受影响的重要既有住宅、公共建筑、道路或地下管线等时,或因场地的地质条件复杂、缺少同类地质条件下相近基坑深度的经验时,支护结构破坏、基坑失稳或过大变形对人的生命、经济、社会或环境影响很大,安全等级应定为一、二级;

(2) 当支护结构破坏、基坑过大变形但不会危及人的生命、经济损失轻微、对社会或环境的影响不大时,安全等级应定为三级;

(3) 对大多数基坑,安全等级应定为二级。

基坑支护结构破坏后果具体表现为支护结构破坏、土体过大变形对基坑周边环境及主体结构施工安全的影响。基坑支护结构的安全等级,主要反映在设计时支护结构及其构件的重要性系数和各种稳定性安全系数的取值上。

北京市地方标准《建筑基坑支护技术规程》(DB 11/489—2016)依据行业标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)和北京市基坑工程的具体情况,将基坑支护结构失效后果严重程度细化为基坑深度、周边环境条件和工程地质条件 3 个指标,并通过这 3 个指标,将基坑支护结构按基坑侧壁划分的安全等级为一、二、三级(表 1-2)。进行支护结构设计时,根据不同的安全等级选用重要性系数:一级, $\gamma_0=1.10$;二级, $\gamma_0=1.00$;三级, $\gamma_0=0.90$ 。

表 1-2 基坑侧壁安全等级划分

开挖深度 h/m	周边环境条件与工程地质、水文地质条件								
	$\alpha < 0.5$			$0.5 \leq \alpha \leq 1.0$			$\alpha > 1.0$		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$h > 15$	一级			一级			一级		
$10 < h \leq 15$	一级			一级		二级	一级	二级	
$h \leq 10$	一级	二级		二级	三级		二级	三级	

在表 1-2 中:

(1) h ——基坑开挖深度。

(2) α ——相对距离比, $\alpha = x/h_a$ 。为管线、邻近建(构)筑物基础边缘(桩基础桩端)离坑口内壁的水平距离与基础底面距基坑底垂直距离的比值,见图 1-1。

(3) 工程地质、水文地质条件分类:

I 复杂——土质差、地下水对基坑工程有重大影响;

II 较复杂——土质较差,基坑侧壁有易于流失的粉土、粉砂层,地下水对基坑工程有一定影响;

III 简单——土质好,且地下水对基坑工程影响轻微。

坑壁为多层土时可经过分析按不利情况考虑。

(4) 如邻近建(构)筑物为价值不高的、待拆除的或临时性的,管线为非重要干线,一旦破坏没有危险且易于修复,则 α 值可提高一个范围;对变形特别敏感的邻近建(构)筑物或重点保护的古建筑等有特殊要求的建(构)筑物时,对二级及三级基坑侧壁则应提高一级

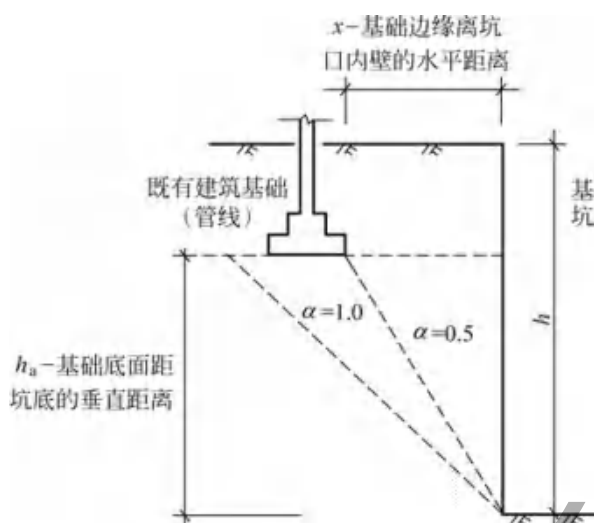


图 1-1 相对距离比示意图

安全等级；当既有基础(或桩基础桩端)埋深大于基坑深度时,应根据基础距基坑底的相对距离、附加荷载、桩基础形式以及上部结构对变形的敏感程度等因素综合确定 α 值范围及安全等级。

(5) 同一基坑周边条件不同可划分为不同的安全等级。

1.1.2.2 基坑支护结构类型及适用条件

前已述及基坑支护结构是保证基坑工程安全的重要措施,基坑支护结构应根据基坑开挖深度、周边环境条件、工程地质与水文地质条件、施工工艺及设备条件、施工场地条件及施工季节、支护结构施工工艺的可行性、经济指标、环保性能和施工工期等,选择经济合理的支护结构形式。基坑支护结构及适用条件见表 1-3。

表 1-3 基坑支护结构及适用条件

结构类型		适用条件	
		安全等级	基坑深度、环境条件、土类和地下水条件
支护式结构	锚拉式结构	一级 二级 三级	适用于较深的基坑
	支撑式结构		适用于较深的基坑
	悬臂式结构		适用于较浅的基坑
	双排桩		适用的基坑深度大于悬臂桩,但占用较大场地。当锚拉式、支撑式和悬臂式结构不适用时,可考虑采用双排桩
	逆作法		适用于不宜采用临时支护结构构件或主体结构地上、地下同步施工的场所
		1. 排桩适用于地下水位以上、可降水或结合截水帷幕的基坑 2. 地下连续墙宜同时用作主体地下结构外墙,可同时用于截水 3. 锚杆不宜用在软弱土层和含有高水头地下水的碎石土、砂土层中 4. 当邻近基坑有建筑物地下室、地下构筑物等,锚杆的有效锚固长度不足时,不应采用锚杆 5. 当锚杆施工会造成基坑周边建(构)筑物的损害或违反城市地下空间规划等规定时,不应采用锚杆	

续表

结构类型		适用条件	
		安全等级	基坑深度、环境条件、土类和地下水条件
土钉墙	单一土钉墙	二级 三级	适用于地下水位以上或可实施降水的基坑,但基坑深度不宜大于10 m(国家行业标准为12 m)
	预应力锚杆复合土钉墙		适用于地下水位以上或可实施降水的基坑,但基坑深度不宜大于15 m
	水泥土桩垂直复合土钉墙		基坑深度不宜大于12 m且不宜用在含有高水头地下水的碎石土、砂土、粉土层中
	微型桩垂直复合土钉墙		适用于地下水位以上或可实施降水的基坑,基坑深度不宜大于12 m
放坡		三级	1. 具有放坡的场地条件 2. 可与上述支护结构形式结合

1. 土钉墙支护结构

土钉墙支护结构是一种经济、简便、施工快速、不需大型施工设备的基坑支护形式。土钉墙支护结构指由随基坑开挖分层设置的、纵横向密布的土钉群、喷射混凝土面层及原位土体所组成的一种挡土结构,一般适合于安全等级为二级、三级的基坑工程,多用于安全等级为三级的基坑工程。北京市地方标准《建筑基坑支护技术规程》(DB 11/489—2016)对单一土钉墙支护深度有限制,规定不超过10 m,当基坑深度超过10 m或对基坑变形控制有更高要求时,可采用复合土钉墙支护形式;复合土钉墙支护形式包括预应力锚杆复合土钉墙、水泥土桩垂直复合土钉墙、微型桩垂直复合土钉墙等。

2. 锚拉式支护结构

锚拉式支护结构指以挡土构件和锚杆为主的一种支挡式结构,如排桩+锚杆结构、地下连续墙+锚杆结构、SMW工法墙+锚杆结构,适合于安全等级为一级、二级和三级的基坑工程,其中排桩、SMW工法墙和地下连续墙等桩(墙)体为挡土构件。锚拉式支护结构易于控制水平变形,挡土构件内力分布均匀,当基坑较深或基坑周边环境对支护结构位移的要求严格时,常采用这种支护结构形式。

锚拉式支护结构可以给后期主体结构施工提供很大的便利,但在下列条件下是不适合使用锚杆的:

- (1) 锚杆不宜用在软弱土层和含有高水头地下水的碎石土、砂土层中;
- (2) 当邻近基坑有建筑物地下室、地下构筑物等,锚杆的有效锚固长度不足时,不应采用锚杆;
- (3) 当锚杆施工会造成基坑周边建(构)筑物的损害或违反城市地下空间规划等规定时,不应采用锚杆。

锚杆要侵入红线之外的地下区域且长期留在岩土体内,给相邻地域的使用和地下空间开发造成障碍,不符合保护环境和可持续发展的要求;一些国家在法律上禁止锚杆侵入红

线之外的地下区域,目前我国部分城市也出台了这方面的限制要求。因此,开发新型锚杆是摆在工程技术人员面前的一大问题。青年学子要担当社会责任,勇于创新,坚持理论与实际相结合,解决目前存在的问题。

3. 支撑式支护结构

支撑式支护结构是由挡土构件和内支撑构件所组成的一种支挡式结构,如排桩+内支撑、地下连续墙+内支撑、SMW 工法墙+内支撑,也适合于安全等级为一级、二级和三级的基坑工程。与锚拉式支护结构一样,挡土构件主要有排桩、SMW 工法墙和地下连续墙等桩(墙)体。支撑式结构也易于控制水平变形,挡土构件内力分布均匀,当基坑较深或基坑周边环境对支护结构位移的要求严格时,也常采用这种支护结构形式,但内支撑的设置会给后期主体结构施工造成障碍。

4. 悬臂式支护结构

悬臂式支护结构指仅由挡土构件组成的一种支挡式结构,适合于安全等级为一级、二级和三级的基坑工程,挡土构件与锚拉式支护结构的也一样。悬臂式结构顶部位移较大,内力分布不理想,但可省去锚杆和支撑,当基坑较浅且基坑周边环境对支护结构位移的限制不严格时,可采用悬臂式结构。

5. 双排桩支护结构

双排桩支护结构指在地基土中设置两排平行桩体,且呈矩形或梅花形布置,两排桩顶的冠梁通过刚性连梁连接,沿坑壁平行方向形成门字形空间结构,适合于安全等级为一级、二级和三级的基坑工程。双排桩支护结构是一种刚架结构形式,具有较大的侧向刚度,其内力分布特性明显优于悬臂式结构,水平变形也比悬臂式结构小得多,适用的基坑深度比悬臂式结构略大,但占用的场地较大;当不适合采用其他支护结构形式且在场地条件及基坑深度均满足要求的情况下,可采用双排桩支护结构。

6. 逆作法

逆作法是指先施作挡土构件然后自上而下完成土方开挖和边墙、中隔板及底板衬砌的施工,适合于安全等级为一级、二级和三级的基坑工程。逆作法适用于不宜采用临时支护结构构件或主体结构地上、地下同步施工的场合。

7. 放坡

放坡基坑为不加任何支护或简单进行保护措施基坑,是基坑工程常用的一种方法,其施工方便,造价较低,但有一定的适用范围,仅适用于硬质、可塑性黏土和良好的砂性土,适合于安全等级为三级的基坑工程。当周边环境简单、基坑较浅时可采用放坡基坑。

本书主要针对常用的土钉墙支护结构、锚拉式支护结构、支撑式支护结构基坑工程涉及的风险控制问题进行分析与阐述。

1.2 基坑工程事故类型与事故等级划分

1.2.1 基坑工程事故类型

基坑工程事故是发生于预期之外的造成人身伤害或经济损失的不利事件。基坑工程涉

及的范围广,变化因素多,事故率高,当事故发生时,会给国家经济和人民生命财产造成严重损失。表 1-4 为近年来基坑事故统计,图 1-2 为基坑事故照片。

表 1-4 基坑事故统计

日 期	事 故 名 称	伤亡及损失
2021 年 3 月 21 日	杭州市“3·21”基坑坍塌事件	路面发生塌陷
2021 年 1 月 19 日	济源市“1·19”基坑坍塌事故	1 人死亡
2020 年 11 月 8 日	郑州市鑫苑鑫家小区施工工地基坑坍塌事故	2 人死亡,2 人受伤
2020 年 10 月 26 日	长沙县百联购物公园二期在建工地化粪池基坑发生塌方	2 人死亡
2020 年 10 月 21 日	肇庆永利大道一建筑工地发生坍塌事故	2 人死亡,1 人受伤
2020 年 7 月 12 日	广西百色市一在建基坑工地发生塌方事故	3 人死亡
2020 年 7 月 10 日	四川南部县深基坑坍塌事故	无伤亡
2020 年 3 月 21 日	西安临潼区北环路陕西全都实业有限公司全都大厦基坑坍塌事故	3 人死亡,1 人受伤
2019 年 10 月 28 日	贵阳市观山湖区一在建地下停车场发生基坑坍塌事故	8 人死亡,2 人受伤
2019 年 9 月 26 日	成都市金牛区一基坑边坡发生局部坍塌	3 人死亡
2019 年 6 月 8 日	南宁绿地中央广场房地产项目 D 号地块(二期)基坑崩塌事故	无伤亡
2019 年 4 月 10 日	扬州市广陵区一基坑发生局部坍塌	5 人死亡,1 人受伤
2019 年 1 月 29 日	深圳市罗湖区东晓街道东立项目深基坑工程发生局部坍塌	无伤亡
2018 年 12 月 29 日	上海市闵行区基坑坍塌事故	3 人死亡
2018 年 12 月 24 日	盐城市“12·24”深基坑坍塌事故	1 人死亡,1 人受伤,直接经济损失约 142.4 万元
2018 年 8 月 31 日	德州市龙溪香岸住宅小区地下车库工程发生模板支撑脚手架坍塌事故	6 人死亡,2 人受伤
2018 年 8 月 21 日	宁波市象山县墙头镇亭溪加油站旁施工工地发生坍塌事故	3 人死亡
2017 年 6 月 20 日	西安市某热力管网接收井基坑坍塌事故	3 人死亡,1 人受伤
2017 年 5 月 11 日	深圳市“5·11”基坑坍塌事故	3 人死亡,1 人受伤,直接经济损失 345 万元

基坑工程事故类型主要有支护结构破坏或失效、土体失稳、地下水渗流破坏、周边环境破坏等,其可能是某单一原因也可能是多个原因的叠加,当风险积累到某种极限状态时,就会出现某种破坏状态。实际工程中,在一起基坑工程事故中往往这些类型均存在,是一系列的连锁反应,使得同一基坑工程事故的表现形式多种多样,但直观表现均为基坑塌方。严格地说,基坑事故类型是无法截然分类的,但为了阐述方便、深挖内涵,分类仍然具有一定意义。

1.2.1.1 支护结构破坏

1. 支护结构破坏含义

支护结构在荷载作用下,其承受的实际应力超过材料强度,导致结构发生不适于继续承



图 1-2 某基坑工程事故照片

载的大变形,即发生支护结构破坏。支护结构破坏包括:桩(墙)体等挡土构件变形过大、开裂、折断;锚杆、土钉变形过大、失效或被拔出;内支撑变形过大、失稳、失效等。

支护结构的破坏大多是有征兆的,是可避免的。若没有及时采取补救措施,则会发生周围土体向坑内坍塌、周围建筑物管线破坏等一系列连锁反应。

2. 典型事故案例

2005年11月30日下午,北京地铁十号线某车站基坑在正常施工,基坑下部挖掘机正在进行土方开挖工作,基坑上面有两部吊车,一部正停在基坑南端进行吊土施工,另一部没有安排作业。吊车支腿距离基坑边缘约3m。由于北侧结构顶板回填需要部分土方,故在基坑东侧距离基坑14.7m以东、南侧12m以南设置堆土区域。

14:20分左右,基坑南侧深度约8m处有污水渗出。5分钟后,出现大量涌水,10分钟后,基坑南侧边上出现裂缝,随后基坑南侧中间部分突然坍塌,支护桩被折断(图1-3)。塌方导致基坑南侧的通信电缆和其他电缆裸露悬空。基坑东侧直径600mm自来水管断裂,自来水注入基坑内,同时造成一根直径1600mm上水管弯曲,一根直径800mm的污水管断裂,一根燃气管线外露,多根电信管线断开。

经专家研判,事故原因是:污水(雨水管)管长期渗漏,在车站基坑南端形成水囊,水对车站南端土体长期浸泡使土体的稳定性受到破坏;南端喷射混凝土厚度仅为8cm,不能抵挡内侧土性质变化带来的侧压力变化,并在水的作用下开始出现裂缝,从而造成事故。

1.2.1.2 土体失稳

1. 土体失稳含义

土体失稳是指在土体中形成了连续的滑动面,支护结构连同基坑外侧及坑底的土体一起丧失稳定性。一般的失稳形态是支护结构的上部向坑外倾倒,支护结构的底部向坑内移



图 1-3 北京地铁十号线某车站基坑塌方事故现场照片

动,坑底土体隆起,坑外地面下陷。

土体失稳包括:基坑侧壁土体整体圆弧滑动失稳、整体平移;坑底隆起、失稳,如基坑内外地基承载力失去平衡、基底踢脚隆起过大。

2. 典型事故案例

某大厦基坑位于长沙市中心,东、西、南三面紧邻城市干道。该基坑支护形式采用悬臂式人工挖孔桩,支护结构形式如图 1-4 所示。基坑开挖至 13.7 m 时,靠近主干道一侧的悬臂桩顶在土体压力作用下发生水平位移,道路产生严重开裂与不均匀沉降现象。随后的两天,该支护结构(19 根悬臂桩)全部倒塌断裂,墙后土体伴随着断裂的混凝土桩一起涌入基坑,围护结构与桩后土体整体失稳,并且造成该侧基坑周围的燃气管线和通信管线破坏。

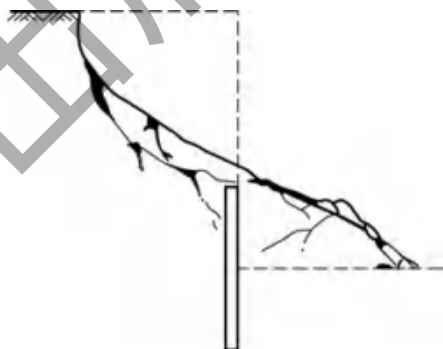


图 1-4 某大厦基坑坍塌示意图

根据专家组现场研判,本次基坑坍塌事故是勘察数据严重不符合实际情况所致。土方开挖情况表明工程地质报告所描述的土层构成、厚度和物理力学性能指标与实际相差较大,这样导致土压力计算值严重失真,支护桩的可靠性降低。而且,设计方根据错误的勘察数据进行支护桩设计,设计经验不足,所设计的悬臂桩过长,嵌固深度不足最终导致了基坑的坍塌。基坑坍塌的原因是多方面的,这是岩土工程学科的复杂性所决定的。我国早期的基坑设计当中技术规程不完善,往往有部分工程并没有经过细致的地质勘察就根据经验进行基坑支护桩设计,造成了诸多事故的发生。

1.2.1.3 地下水渗流破坏

1. 地下水渗流破坏含义

地下水渗流破坏是指基坑在富水地层开挖的过程中,支护结构内外会形成水头差。地下水在土体的孔隙中流动,当水力梯度过高时,基坑底部和周围大量土体随地下水渗流灌入基坑,导致围护结构破坏。渗流常常会引起流土、流砂、突涌和坑底管涌等现象造成基坑事故。

2. 典型事故案例

2019年1月29日清晨5:35,位于深圳罗湖区某项目工地发生基坑坍塌事故,坍塌面积约 200 m^2 (图1-5)。受事故影响,工地旁鹿鸣园小区一侧道路也出现路面下陷情况,基坑北侧一建筑物楼体倾斜。



图1-5 罗湖区某基坑坍塌事故现场照片

根据专家组现场研判,认为此基坑坍塌事故原因是地下水渗流造成的。基坑北侧坍塌建筑基础采用摩擦性桩型基础,建筑桩基周围有暗渠,土层在地下水渗流的作用下质地疏松。罗湖区基坑开挖后,围护结构内外产生较大水头差,渗流速度加快。基坑周围、坍塌建筑物基础周围土体,随着地下水渗流作用下涌入基坑,最终造成基坑北侧建筑物桩基础发生脆性破坏,楼体局部倾斜下沉,基坑坍塌。

1.2.1.4 周边环境破坏

1. 周边环境破坏含义

周边环境破坏是指基坑在开挖过程中支护结构变形过大或降水,引起地面沉降过大、裂缝、塌方或周围建筑物的开裂坍塌或地下管线破坏。常见的周边环境破坏形式有房屋结构开裂、整体倾斜、道路沉降或开裂、地下管线破坏等。

2. 典型事故案例

广州某基坑在2005年7月21日中午发生塌方,如图1-6所示。该基坑原定开挖 17 m ,实际开挖 20.3 m 。支护方式为上部采用喷锚支护,下部采用人工挖孔桩结合钢管内支撑的支护。基坑周围环境复杂,东侧为机动车道和二号线地铁;西侧、北侧邻近河道;基坑南侧有一栋7层高的宾馆。事故发生前,基坑南侧宾馆裂缝数量增多、宽度增大。基坑内部南侧

人工挖孔桩,桩身出现竖向裂缝。随后基坑发生坍塌,事故造成三人遇难。

根据专家组现场研判,事故原因主要是基坑超挖,原设计17 m,后开挖20.3 m。其次基坑支护结构为临时结构,规定服务年限一年,而该基坑从实际开挖到基坑坍塌已经接近三年,严重超时。另外基坑坍塌侧岩层倾斜,设计单位考虑不充分,支护方式一概而论,多因素综合导致该基坑坍塌。该事故对周围环境破坏极为严重,基坑南侧有一栋7层高的宾馆部分倒塌,最终对该宾馆采取爆破拆除。



图 1-6 广州某基坑倒塌事故现场照片

1.2.2 基坑工程事故原因分析

表 1-5 为 162 项基坑工程事故的调查资料,可以看出,事故原因是多方面的,有建设单位(业主)问题、勘察问题、设计问题、施工问题和监理问题。

表 1-5 基坑工程事故统计表

序号	事故原因	事故次数	所占比例/%
1	建设单位(业主)问题	10	6
2	勘察问题	7	3.5
3	基坑工程设计问题	74	46
4	基坑工程施工问题	66	41.5
5	基坑工程监理问题	5	3
合 计		162	100

- (1) 建设单位(业主)问题主要表现为不能提供符合设计施工要求的基础资料,或资料不完整、不正确。
- (2) 勘察问题主要为土层参数试验方法不正确或不全面,报告中提供的地层参数不正确、不全面或者与基坑支护方案要求的地层参数不匹配;忽视水文地质勘察,对上层滞水、潜水、承压水界定有误,对承压水水位、水头标高及土层渗透系数等不进行专门试验。
- (3) 设计问题主要是支护结构选型不当、设计参数取值安全储备不够或计算错误、忽视基坑的稳定性等;对周边环境调查不够,环境风险认识不足,支护结构变形控制不满足要求;计算中基坑周边地面超载,堆载范围、施工荷载与工程实际不一致,支(锚)结构预加轴力值与图纸不一致。

(4) 施工引发事故的主要问题在于管理、互相协调、质量控制、监测、应急措施等。没有有效的工程筹划、施工组织方案,导致工序混乱、盲目开挖与超挖,随意改变设计意图,不按照设计和规范施工;施工质量存在缺陷,如桩的直径(或地下连续墙的厚度)或强度因施工过程中的塌孔、夹泥夹砂、浇筑不连续等原因造成不符合设计要求,如缩径、露筋、强度不连续等。

从基坑事故原因分析可知,设计阶段和施工阶段占比最大,是基坑工程风险控制的重点;勘察问题占比虽小,但勘察是设计的前置条件,因此意义较大。

1.2.3 基坑工程事故等级划分

根据我国《生产安全事故报告和调查处理条例》,以事故造成的人员伤亡或者直接经济损失情况为依据,将基坑工程事故分为以下 4 个等级(注:“以上”包括本数,“以下”不包括本数):

(1) 特别重大事故,是指造成 30 人以上死亡,或者 100 人以上重伤(包括急性工业中毒,下同),或者 1 亿元以上直接经济损失的事故;

(2) 重大事故,是指造成 10 人以上 30 人以下死亡,或者 50 人以上 100 人以下重伤,或者 5000 万元以上 1 亿元以下直接经济损失的事故;

(3) 较大事故,是指造成 3 人以上 10 人以下死亡,或者 10 人以上 50 人以下重伤,或者 1000 万元以上 5000 万元以下直接经济损失的事故;

(4) 一般事故,是指造成 3 人以下死亡,或者 10 人以下重伤,或者 1000 万元以下直接经济损失的事故。

《中华人民共和国安全生产法》(2021 年修订版)明确要求:安全生产工作应当以人为本,坚持人民至上、生命至上,把保护人民生命安全摆在首位,牢固树立安全发展理念,坚持安全第一、预防为主、综合治理的方针,从源头上防范化解重大安全风险;生产经营单位应健全风险防范化解机制,提高安全生产水平,确保安全生产。

基坑工程风险评估与风险控制是化解、防范基坑工程事故的重要举措。基坑工程应将勘察阶段、设计阶段、施工阶段进行有机结合,进行风险评估和风险预控,在施工过程中进行风险跟踪与监测,从而进行风险控制,以规避或减少基坑工程事故等不利事件的发生。

1.3 基坑工程风险评估与风险预控

基坑工程风险是指在基坑工程不利事件发生的可能性及其后果严重性的组合;不利事件是指可能产生不良后果的事件,如事故、缺陷或不良影响等,其中最重要的是事故,即基坑塌方。基坑工程风险具有可变性特点,主要表现在质和量上的变化:有些风险将被消除,有些风险会被转移,有些风险会发生但能降低或能够承受;在某个施工工序中还可能产生新风险或出现风险的动态升级或降级。

基坑工程风险评估是指在不利事件发生之前或发生中,对该事件给人们的生活、生命、财产等各个方面造成的后果严重性和可能性而进行的工作。不利事件发生之前包括勘察阶段、设计阶段和施工阶段的施工准备环节;不利事件发生中指施工阶段的施工过程中。

基坑工程风险预控是指不利事件发生前,采取经济、合理、有效的措施,将不利事件发生的后果严重性和可能性降至最低程度。

基坑工程风险评估与风险预控涵盖勘察阶段、设计阶段和施工阶段的施工准备环节,在

这些阶段和环节辨识风险源和风险因素、进行风险分析和评价,确定风险等级,提出预防控措施,为基坑工程的风险控制奠定基础。

1.3.1 基坑工程风险评估

1.3.1.1 基坑工程风险评估方法

风险评估方法主要有头脑风暴法、德尔菲法、检查表法、风险指数法、层次分析法、风险矩阵法等,各方法的适用范围以及在风险评估过程中各阶段的适用性见表 1-6。

表 1-6 风险评估方法及各阶段的适用性

风险评估方法 及技术	适用范围	风险评估过程					能否 提供 定量 结果
		风险辨识	风险分析			风险 评价	
			后果	可能性	风险等级		
头 脑 风 暴 法	适用于风险评估全过程。可以单独使用 来激发风险管理过程阶段的想象力,也 可以与其他风险评估方法一起使用	非常适用	适用	适用	适用	适用	否
德 尔 菲 法	适用于风险评估全过程。可依靠集体的 经验判断进行风险分析,但难以借助精 确的分析技术。受时间和经费限制,或 因专家之间存有分歧、隔阂不宜当面交 换意见	非常适用	适用	适用	适用	适用	否
检 查 表 法	可以用来识别潜在危险、风险或者评估 控制效果,可以作为其他风险评估技术 的组成部分进行使用	非常适用	不 适用	不 适用	不适用	不 适用	否
风 险 指 数 法	可以有效地划分风险等级,主要用于风 险分析	适用	非 常 适用	非 常 适用	适用	非常 适用	是
层 次 分 析 法	用于多目标、多层次、多因素的复杂系统 的决策	不适用	适用	适用	非常适用	非常 适用	是
风 险 矩 阵 法	风险矩阵是一种将后果分级与风险可能 性相结合的方式。适用于风险评估全过 程。该方法可根据使用需求对风险等级 划分进行修改,使其适用不同的分析系 统,但要有一定的工程经验和数据资料 作依据	非常适用	非 常 适用	非 常 适用	非常适用	适用	是

1. 头脑风暴法

头脑风暴法是指激励一群知识渊博的人员畅所欲言,以发现潜在的失效模式及相关危害、风险、决策准则或应对办法的方法。该方法主要通过组织专家团队讨论来发现问题,或做更细致的评审以及特殊问题的细节讨论,需要参与人员提前进行充分准备,明确会议的目的和结果,有具体的方法来评价讨论思路,并尽可能多地收集不同观点,以便进行后续分析。

头脑风暴法可以单独使用来激发风险管理过程阶段的想象力,也可以与其他风险评估方法一起使用。

该方法的优点包括：

- (1) 激发了想象力,有助于发现新的风险和全新的解决方案;
- (2) 让主要的利益相关方参与其中,有助于进行全面沟通;
- (3) 速度较快并易于开展。

该方法的局限包括：

- (1) 参与者可能缺乏必要的技术及知识,无法提出有效的建议;
- (2) 由于该方法相对松散,因此较难保证过程及结果的全面性;
- (3) 可能会出现特殊的小组状况,导致某些有重要观点的人保持沉默而其他人成为讨论的主角。

2. 德尔菲法

德尔菲法是依据一套系统的程序在一组专家中取得可靠共识的技术。该方法是通过使用问卷调查表对一组专家进行提问,专家组成员独立填写问卷,调查人员再集结、整理并共享意见,周而复始,最终获取共识。

德尔菲法可以用于风险管理过程或系统生命周期的任何阶段。

该方法的优点包括：

- (1) 由于观点是匿名的,因此成员更有可能表达出那些不受欢迎的看法;
- (2) 所有观点都获得相同的重视,以避免某一权威占主导地位 and 话语权的问题;
- (3) 便于展开,成员不必一次聚集在某个地方。

该方法的局限包括：

- (1) 是一项费力、耗时的工作;
- (2) 要求参与者进行清晰的书面表达。

3. 检查表法

检查表法是指凭经验编制一个危险、风险或控制故障的清单列表,并按此表进行检查,以“是/否”进行回答的方法。该方法通过组成检查表编制组,依据有关标准、规范、法律条款及过去经验,选择设计一个能充分涵盖整个范围的检查表,经过熟悉过程或系统各个因素的人员、团队审查检查表上的项目是否有缺失,再按此表对系统进行检查。

检查表法可用于识别潜在危险、风险或者评估控制效果,适用于产品、过程或系统生命周期的任何阶段。它们可以作为其他风险评估技术的组成部分进行使用。

该方法的优点在于：

- (1) 简单明了,非专业人士也可以使用;
- (2) 如果考虑全面,可将各种专业知识纳入便于使用的系统中;
- (3) 有助于确保常见问题不会被遗漏。

该方法的局限包括：

- (1) 只可以进行定性分析;
- (2) 可能会限制风险识别过程中的想象力;
- (3) 检查过程只是对设置好的选项“在方框内画钩”;
- (4) 往往基于已观察到的情况,不利于发现以往没有被观察到的问题。

4. 风险指数法

风险指数是对风险的半定量测评,是利用顺序尺度的记分法得出的估算值。风险指数

法通过确认一个系统,对系统的各因素确定分值,并将得分相加来考虑累计效果,再将这些得分结合起来,以提供综合指数。

风险指数法可作为一种范围划定工具用于各种类型的风险,以根据风险水平划分风险。

该方法的优点包括:

- (1) 可以提供一种有效的划分风险等级的工具;
- (2) 可以将影响风险等级的多种因素整合到对风险等级的分析中。

该方法的局限包括:

- (1) 如果过程(模式)及其输出结果未得到很好的确认,那么可能使结果毫无意义。
- (2) 在很多使用风险指数的情况下,缺乏一个基准模型来确定风险因素的单个尺度是线性的、对数的还是某个其他形式,也没有固定的模型可以确定如何将各因素综合起来。在这些情况下,评级本身是不可靠的,对实际数据进行确认就显得尤其重要。

5. 层次分析法

层次分析法是指将一个复杂的多目标决策问题作为一个系统,将目标分解为多个目标或准则,进而分解为多指标(或准则)的若干层次,通过定性指标模糊量化方法算出层次单排序(权数)和总排序,以作为目标(多指标)、多方案优化决策的系统方法。

层次分析法适合于多目标、多层次、多因素的复杂系统的决策,在目标因素结构复杂且缺少必要数据的情况下使用更为方便。

该方法的优点包括:

- (1) 是系统性的分析方法、简洁实用的系统性决策方法,所需定量信息较少,较好地体现了系统工程学定性分析与定量分析相结合的思想;
- (2) 在决策过程中,决策者直接参与决策过程,并且其定性思维过程被数学化、模型化,而且还有助于保持思维过程的一致性。

该方法的局限包括:

- (1) 很大程度上依赖于人们的经验,主观因素的影响很大,它至多只能排除思维过程中的严重非一致性,却无法排除决策者个人可能存在的严重片面性;
- (2) 比较、判断过程较为粗糙,不能用于精度要求较高的决策问题。

6. 风险矩阵法

风险矩阵法是将风险事件发生的概率和影响程度分级评分,然后分别作为矩阵的行和列形成风险矩阵,将风险概率和风险后果估计值相乘得到风险值,进而按照风险事件在矩阵中的位置做出评估的方法。该方法需要对风险发生可能性的高低和后果严重程度进行定性或定量评估后,依据评估结果绘制风险图谱再结合风险矩阵进行风险等级划分,是一种常用的方法。

风险矩阵法通常作为一种筛查工具用来对风险进行排序,根据其在矩阵中所处的区域,确定哪些风险需要更细致的分析,或是应首先处理哪些风险,该方法可根据使用需求对风险等级划分进行修改,使其适用不同的分析系统,但要有一定的工程经验和数据资料作依据。其既适用于整个系统,又适用于系统中的某一环节。

该方法的优点包括:

- (1) 方法简单,易于使用;
- (2) 显示直观,可将风险很快划分为不同的重要性水平。

该方法的局限包括:

- (1) 必须设计出适合具体情况的矩阵,因此,很难有一个适用于组织各相关环境的通用

系统；

- (2) 很难清晰地界定等级；
- (3) 该方法的主观色彩较强,不同决策者之间的等级划分结果会有明显的差别；
- (4) 无法对风险进行累计叠加。

1.3.1.2 基坑工程风险评估步骤

基坑工程风险评估包括风险辨识、风险分析和风险评价,应对基坑工程中存在的各种风险及其影响程度进行综合分析、对比和排序,评估步骤如下。

1. 风险辨识

风险辨识也称为风险识别,是调查识别基坑工程中潜在的风险因素、类型、可能发生部位及原因等所做的工作,运用各种方法,系统地、连续地认识所面临的各种风险以及分析事故发生的潜在原因。基坑工程风险辨识包括静态风险辨识和动态风险辨识。静态风险辨识是在勘察阶段、设计阶段、施工阶段的准备工作中的风险辨识;动态风险辨识是对施工过程中可能出现的新风险进行的辨识。风险辨识是风险控制的基础和前提,因此要全面、系统地分析风险因素,辨识各类风险。

风险辨识步骤包括风险分类、确定参与者、收集相关资料、风险识别、风险筛选和编制风险辨识报告。风险辨识参与者需选择工程经验丰富及理论水平较高的工程技术人员、管理人员和研究人员一起参与,风险辨识中专家信息对辨识十分重要。

1) 风险辨识方法

风险辨识可采用检查表法、专家调查法等定性方法,以及工程类比法等综合分析方法。

2) 风险源和风险因素

风险源是指可能造成人员伤害或疾病、财产损失、工作环境破坏或这些情况组合的根源或状态,是风险的载体;风险因素是指可能引起或增加风险事故发生的机会或扩大损失的幅度,风险因素是不利事件发生的潜在原因,也是造成损失的直接或间接原因。风险源具有多样性和多层次性,与分析的对象关系密切;从宏观上看,勘察阶段、设计阶段、施工阶段均可看成基坑工程风险源,一个风险源可能包括若干个次一级的风险源或风险因素。

(1) 勘察阶段风险因素:勘察阶段风险指基坑工程由勘察缺失或偏差导致基坑工程不利事件的发生。勘察阶段风险因素包括:未作勘察、勘察范围不足、特殊工程地质条件、水文地质条件、地层抗剪强度、工程建议等(表 1-7)。

表 1-7 勘察阶段风险因素

序 号	风 险 因 素	风 险 描 述	风 险 类 型
1	未作勘察	套用附近建筑物以往勘察资料,导致地层分布情况失真	导致设计阶段缺陷和施工阶段事故
2	勘察范围不足	钻孔深度和布置不符合标准要求;地质纵剖面图中,绘制出的地质情况带有部分虚假成分	
3	特殊工程地质条件	特殊地层勘探精准度差;漏判粉、砂土地层中的液化土层或特殊地层;地层空洞的规模、准确位置不清楚等	
4	水文地质条件	对上层滞水、潜水、承压水界定有误,对承压水水位、水头标高及土层渗透系数等的确定有误	

续表

序 号	风 险 因 素	风 险 描 述	风 险 类 型
5	地层抗剪强度	地层抗剪强度指标不正确	
6	工程建议	工程建议不正确	

(2) 设计阶段风险因素：设计阶段风险指基坑工程因设计缺陷而导致基坑工程不利事件的发生。设计阶段风险因素包括：支护结构选型不当、设计参数取值不当、计算结果错误、构造要求不合理、周边环境保护措施不足、施工要求不明确等(表 1-8)。

表 1-8 设计阶段风险因素

序 号	风 险 因 素	风 险 描 述	风 险 类 型
1	支护结构选型不当	采用的基坑支护方案与工程地质、水文地质条件、周边环境条件不匹配；支护结构的设计图不完整，深度不够、内容不全；不同支护剖面间的过渡缺乏表达	导致施工阶段缺陷或不良影响或事故
2	设计参数取值不当	在基坑支护结构受力计算和稳定验算中，土体的强度指标选用不正确	
3	计算结果错误	基坑周边地面超载、堆载范围、施工荷载与工程实际不一致；计算程序、计算公式、荷载组合存在错误，计算工况与实际工程不一致；计算基坑深度、支护参数取值与实际工程不一致；过大折减支护结构的土压力或内力，导致支护结构抗力不足；荷载组合系数、分项系数、重要性系数取值有误，内力计算、配筋不正确；基坑稳定性验算内容不全，稳定性安全系数取值不正确	
4	构造要求不合理	构造不满足规范要求；尺寸或配筋与计算书不一致；节点设计不完整	
5	周边环境保护措施不足	对周边环境调查不够，对周边环境风险认识不足，支护结构、周边环境的变形控制不满足要求	
6	施工要求不明确	设计说明中相关的技术要求不完善；监测布点图不正确；周边环境及支护结构的安全控制标准、管理要求有误；应急预案要求不完善	

(3) 施工阶段风险因素：基坑工程施工阶段风险指因技术方案存在缺陷、使用材料存在缺陷、施工设施不安全、施工管理缺陷可能造成的工程事故。技术方案的缺陷包括施工工序、风险预控措施、地下水控制、风险跟踪与监测、应急预案等不遵循勘察和设计文件，或没有辨识新风险相关内容等；施工管理缺陷包括施工过程中的风险跟踪与监测和应急预案等管理措施不到位。基坑工程施工阶段风险类型主要分为基坑坍塌、机械伤害、高处坠落、物体打击、起重伤害、火灾、车辆伤害、触电、中毒和窒息等九类，其中基坑坍塌、机械伤害、高处坠落、物体打击为本书讨论内容。

基坑工程施工可划分为土方开挖、支护施工、地下水控制、维护使用 and 支护结构拆除五个关键工序，按各关键工序，分析风险因素，判断风险类型，筛选出主要风险类型并排序(表 1-9)。

表 1-9 基坑工程施工关键工序与风险因素

序 号	风 险 因 素	关 键 工 序	风 险 描 述	风 险 类 型	风险类型排序
1	不利自然条件	土方开挖	主要指暴雨、汛期雨季等；没有季节性施工安全措施	坍塌	坍塌、机械伤害、高处坠落、物体打击
2	超挖		未按设计要求开挖,包括支护结构未达到设计强度而进行的开挖	坍塌	
3	地层条件		地质情况局部突变	坍塌	
4	开挖工艺		非对称开挖导致偏压过大	坍塌	
5	成品保护		碰撞或损伤支护结构	坍塌	
6	地面超载		土方堆置不合理,坑边超载过大	坍塌	
7	机械设备		作业不规范,碰撞、碾压作业人员	机械伤害	
8	施工工艺	支护结构施工	施工未按照设计图纸要求;打桩、连续墙施工措施不当;锚杆、土钉施工工艺不当	坍塌	
9	施工质量		支护桩(墙)、锚杆(土钉)、支撑施工质量存在缺陷,支撑杆件内部损坏(内伤),建筑材料与构配件不合格	坍塌	
10	轴力施加		加撑或预加轴力不及时	坍塌	
11	机械设备		钻机、起吊设备及钢筋笼侧翻	机械伤害	
12	地下水控制方法	地下水控制	未进行地下水控制或方法不当,产生流砂等	坍塌	
13	辅助排水		坑壁及坑底疏、排水措施不当	坍塌	
14	止水帷幕		止水帷幕失效	坍塌	
15	支护结构	维护使用	支护结构变形过大、开裂、支撑断裂破坏	坍塌	
16	交叉作业		基坑内打桩、地基处理或施工抗浮锚杆影响支护结构	坍塌	
17	基坑暴露		坑底暴露时间过长	坍塌	
18	基坑排水		坑顶排水措施不当	坍塌	
19	周边堆载		基坑周边堆载超过设计值	坍塌	
20	邻近工程		邻近工程影响;相邻基坑施工时,由于两基坑开挖、支护、回筑不同步造成压力不平衡、失稳	坍塌	
21	拆除方法	支护结构拆除	除支撑(锚杆)前未按设计要求换撑	坍塌	
22	作业人员保护		拆除支撑时保护措施不当	高处坠落、物体打击	
23	机械设备		拆除锚杆、腰梁等措施不当	机械伤害	

基坑工程施工关键工序的划分,不同支护结构形式有区别,如基坑开挖深度之内无地下水,则不存在“地下水控制”关键工序。进行基坑工程风险因素辨识时,应当依据所采用的基坑支护结构形式,合理划分关键工序。

风险跟踪与监测和应急预案风险因素的分析见表 1-10。

表 1-10 风险跟踪与监测和应急预案的风险因素

序 号	风 险 因 素	管 理 措 施	风 险 描 述	风 险 类 型
1	监测点布设	风险跟踪与监测	监测点破坏或不稳固;监测点布设不规范	坍塌
2	数据分析		对基坑结构自身及周围环境不监测;监测分析和预判不准确;未及时发现支护结构变形过大、轴力过大或丧失	
3	信息反馈与预警		出现连续报警或突变值未被重视	
4	无应急预案	应急预案	出现问题不能及时分析和处理,应急预案无法落实	坍塌
5	应急处置措施		应急处置措施不当	

2. 风险分析

1) 后果严重性分析

后果严重性指风险事故发生时对人、经济、周边环境、社会的影响程度。可采用不同方法对基坑工程主要风险事故(基坑坍塌)进行后果严重性分级。按照基坑开挖深度、地质条件和周边环境条件可将基坑坍塌后果的严重性划分为三级(表 1-11),该表中 α 为相对距离比,为工程地质、水文地质条件,参见图 1-1。对同一基坑的不同侧壁,可采用不同的后果严重性等级;当同一基坑工程存在不同后果严重性等级时,可取其中最高等级。

表 1-11 后果严重性等级划分

开挖深度 h/m	周边环境条件								
	$\alpha < 0.5$			$0.5 \leq \alpha \leq 1.0$			$\alpha > 1.0$		
	工程地质、水文地质条件								
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$h > 15$	一级			一级			一级		二级
$10 < h \leq 15$	一级			一级		二级	一级	二级	
$5 < h \leq 10$	一级			一级	二级		二级	三级	
$h \leq 5$	一级		二级	二级	三级		三级		

后果严重性等级一级:对人、经济、周边环境、社会的影响很大,后果很严重;

后果严重性等级二级:对人、经济、周边环境、社会的影响较大,后果较严重;

后果严重性等级三级:对人、经济、周边环境、社会的影响一般,后果不严重。

表 1-11 中,对人、经济、周边环境、社会的影响严重性判定标准见表 1-12~表 1-15。

(1) 人员伤亡严重性等级见表 1-12。

表 1-12 人员伤亡严重性等级分类及描述

分 类	人		
等级	描述	死亡人数	受重伤人数
1	很严重	≥ 3	10 人以上
2	较严重	1~2	3 人以上 10 人以下
3	不严重	0	1 人以上 3 人以下

(2) 经济损失严重性等级见表 1-13。

表 1-13 经济损失严重性等级分类及描述

等 级	描 述	直接经济损失
1	很严重	1000 万元以上
2	较严重	100 万元以上 1000 万元以下
3	不严重	100 万元以下

直接经济损失是指在工程建设期内由安全风险控制措施失效引发的事故造成的人身伤亡赔偿治疗费用及工程实体损失费用。

(3) 周边环境影响严重性等级见表 1-14。

表 1-14 周边环境影响严重性等级分类及描述

等级	描述	周边环境
1	很严重	工程建设期内施工场地在 $\alpha < 0.5$ 范围内存在： (1) 既有轨道交通工程基础设施； (2) 重要建(构)筑物，如党政机关、军事管理区、文物保护单位、学校、医院、人员密集场所、居民居住区、大型交通枢纽、化工厂、加油站等； (3) 重要市政地下管线，如水、电、气、热等； (4) 河流或湖泊； (5) 处于重大活动保障任务范围内
2	较严重	工程建设期内施工场地在 $0.5 \leq \alpha \leq 1$ 范围内存在： (1) 既有轨道交通工程基础设施； (2) 重要建(构)筑物，如党政机关、军事管理区、文物保护单位、学校、医院、人员密集场所、居民居住区、大型交通枢纽、化工厂、加油站等； (3) 重要市政地下管线，如水、电、气、热等； (4) 河流或湖泊； (5) 处于重大活动保障任务范围内
3	不严重	工程建设期内施工场地在 $\alpha > 1$ 存在： 一般建(构)筑物、一般城市桥梁道路、一般市政地下管线

(4) 社会关注度等级见表 1-15。

表 1-15 社会关注度等级分类及描述

等 级	描 述	工程项目社会性质	同一事故类型频次
1	很严重	国家和地方重点工程、标志性工程、保密工程	工程所在区级行政区域及管理区域 6 个月内施工现场发生过亡人或重大社会影响的事故类型

续表

等 级	描 述	工程项目社会性质	同一事故类型频次
2	较严重	基础设施工程、民生工程、住宅工程；一般性社会投资工程	工程所在区级行政区域及管理区域 12 个月内施工现场发生过亡人或重大社会影响的事故类型
3	不严重	除上述工程以外的其他工程	—

2) 发生的可能分析

基坑工程事故发生的可能性指风险事故发生的概率,根据基坑支护形式和施工企业及项目经理信用能力确定,按事故发生概率的高低分为很可能、较可能、可能、较不可能、基本不可能五类,以基坑支护常用的土钉墙、锚拉式、内支撑式划分的结果见表 1-16。

表 1-16 基坑工程风险发生可能性分级表

支护形式		施工企业及项目经理信用能力		
		良 好	一 般	不 良
锚拉式	排桩+锚杆	可能	较可能	很可能
	连续墙+锚杆	较不可能	较可能	很可能
内撑式	桩+内支撑	可能	较可能	很可能
	连续墙+内支撑	基本不可能	可能	较可能
土钉墙		很可能	很可能	很可能

根据生产安全事故统计,土钉墙支护结构基坑工程事故发生的概率最高,因此其发生事故的可能性很大,表 1-16 中均评定为:很可能。

施工企业及项目经理信用能力包括企业安全生产管理水平、项目部管理能力和水平、项目部管理人员配备情况,它们与发生事故的概率密切相关;企业及项目经理信用能力评价结果分为良好、一般和不良三类(表 1-17)。

表 1-17 企业及项目经理信用能力评价表

项目经理考评结果	企业标准化考评结果		
	优良	合格	不合格
优良	良好	一般	一般
合格	一般	一般	不良
不合格	不良	不良	不良

表 1-17 中,依据“住房城乡建设部关于印发《建筑施工安全生产标准化考评暂行办法》的通知”(建质[2014]111 号),对施工企业评定结果分为“优良”“合格”“不合格”;对项目经理信用能力评价目前尚无权威可信的评价数据,暂按“合格”考虑,如有可信资料,也可按“优良”或“不合格”考虑;企业暂无安全生产标准化考评结果的,企业信用能力按“一般”考虑。

出现下列任一情况,可将发生事故的可能性直接定为:很可能。

- (1) 企业半年内发生 2 起一般生产安全事故的;
- (2) 企业一年内发生 3 起一般生产安全事故的;

- (3) 企业一年内发生 1 起较大及以上生产安全事故的；
- (4) 采用新技术、新工艺、新设备、新材料，尚无国家、行业及地方技术标准，可能给施工安全带来较大风险的；
- (5) 工程项目施工工期压缩超过 30% 或者工期压缩未采取技术措施的；
- (6) 其他自然条件复杂、工艺复杂、结构复杂、技术难度大的分部分项工程。

3. 风险评价

风险评价是依据后果的严重性、可能性判定风险大小，确定风险等级的过程。风险评价应从识别出的风险因素所引发的风险事故发生的可能性、后果严重性两个方面进行分析，为确定基坑工程风险等级并决定风险是否需要应对和管控提供信息支撑。

1) 风险等级

风险等级按矩阵法分为重大风险、较大风险、一般风险和低风险四级，见表 1-18。

表 1-18 基坑工程风险等级划分矩阵表

发生的可能性	后果严重性		
	三级	二级	一级
基本不可能	低风险	低风险	一般风险
较不可能	低风险	一般风险	较大风险
可能	低风险	一般风险	重大风险
较可能	一般风险	较大风险	重大风险
很可能	较大风险	重大风险	重大风险

存在下列情况之一的，可直接列为重大风险：

- (1) 基坑开挖对邻近建(构)筑物、设施造成重大安全影响或有特殊保护要求的；
- (2) 达到设计使用年限拟继续使用的基坑；
- (3) 改变现行设计方案，进行加深、扩大及改变使用条件的基坑；
- (4) 邻近有水源的基坑。

存在下列情况之一的，可直接列为较大风险：

(1) 存在影响基坑工程安全性、适用性的材料低劣、质量缺陷、构件损伤或其他不利状态的情况；

- (2) 支护结构或邻近施工产生的振动、剪切等可能产生流土、土体液化、渗流破坏；
- (3) 截水帷幕可能发生渗漏；

(4) 交通主干道位于基坑开挖影响范围内，或基坑周围建筑物、构筑物、市政管线可能产生渗漏、管沟存水，或存在渗漏变形敏感性强的排水管等可能发生的水作用产生的危险源；

- (5) 雨季施工时土钉墙、浅层设置的预应力锚杆可能失效或承载力严重下降；
- (6) 侧壁为杂填土或淤泥等特殊性岩土；
- (7) 基坑开挖可能产生过大的坑底隆起；
- (8) 基坑侧壁存在振动、冲击荷载；
- (9) 内支撑因各种原因失效或发生破坏；
- (10) 对支护结构可能产生横向冲击荷载。