

## 第 30 章 风险分析与安全评估

### 30.1 概述

#### 30.1.1 基坑工程风险评估意义

随着城市地下空间的日益发展，深大基坑工程愈来愈多。受目前施工条件与施工环境的影响，基坑工程的施工存在许多复杂性和不确定性因素，且由于基坑工程多为临时性工程，安全储备相对较小，加之施工管理不善，为此在深基坑工程施工中发生了不少事故，造成了巨大的经济损失和人员伤亡，延误了工期，引起了不良的社会影响。例如，2004年4月20日，新加坡地铁环线1（CCC1）的第824标段基坑施工中，在基坑开挖到30m深度时，发生了临时围护结构的失效事故。基坑大面积倒塌，临近基坑地面下沉了13m之多，基坑整体被外推了30~40m；基坑的倒塌导致了紧邻的 Nicoll 公路 100m 范围的坍塌（如图 30-1 所示），并造成了 4 名现场人员的死亡。比较庆幸的是，事故发生时坍塌段的 Nicoll 公路上没有车辆通行。通过新加坡调查委员会（COI）的事故分析，造成这次灾难性事故的根本原因是钢支柱接头和临时支撑设计方法存在问题，另外未能有效执行风险评估、现场薄弱的管理等也是造成事故发生的主要外在因素<sup>[1]</sup>。



图 30-1 新加坡地铁基坑坍塌现场图

像类似这样的风险事故还可以罗列许多。因此，如何尽可能的降低深基坑工程施工中的风险事故发生，已经成为了一个迫切需要重视的方向。风险评估为此提供了一条有效可行的途径，其意义体现在以下几个方面：

（1）有利于减少工程事故的发生。城市深基坑工程施工环境复杂，施工对周围环境造成的影响较大。通过深基坑工程的风险分析，可以找到引起深基坑工程风险事故的主要风险因素，从而采取针对性的规避措施，建立科学有效的预警系统，尽可能的减小其损失后果。

（2）为深基坑工程的围护方案和施工方案的选择提供依据。深基坑工程的风险分析结果，可为深基坑工程的围护方案和施工方案的优化提供依据，即选择造价和风险损失之和最小的方案为最优方案，并为基坑开挖的合理工序提供理论依据。

（3）帮助决策者进行科学的决策。风险分析的最终目的是为各类决策者提供决策依据，从决策者的角度来说，其价值可以体现在决策者决策时信心的增强、对工程进展情况的掌控、重大风险点规避以及对资金流向的有效控制上。

（4）为工程保险提供参考依据。通过对深基坑工程施工期的风险分析，可为深基坑和相关工程的保险范围、保费和保额提供直接依据。

### 30.1.2 国内外基坑工程风险评估现状

风险管理的研究最早可追溯到公元前916年的共同海损制度。1964年, Casagrande<sup>[2]</sup> “计算风险在土工与地基工程中的作用”(The role of ‘Calculated Risk’ in earthwork and foundation engineering)的太沙基讲座,首次提到岩土工程中的计算风险问题,标志着岩土工程风险分析研究的开始。目前基坑工程风险研究大致可分为两部分内容:一是从工程管理角度进行基坑工程风险管理理论的研究;另一方面是针对风险管理中重要环节——风险评估进行研究,即从岩土力学角度和工程经济角度对基坑工程风险事故的失效概率和事故损失进行研究。

J.B. Burland<sup>[3]</sup>、S. J. Boone<sup>[4-8]</sup>研究了地表沉降量和房屋破坏之间的关系,并对基坑开挖引起的房屋损坏进行了风险评估。R. J. Finno<sup>[9]</sup>研究了软土中刚性支护基坑开挖对周围建筑物的影响,判断周围建筑物是否产生裂缝并评定其破坏风险等级。Faber<sup>[11]</sup>把岩土工程风险事故后果分为直接经济损失(建筑物损坏,产品损坏),间接经济损失(使用延期,不便,失业),人员伤亡、环境破坏等。荷兰GeoDelft中心的Martin Th. van Staveren<sup>[2,12]</sup>等人提出利用通过监测地层和工程系统的变形情况,控制工程的风险,并在2007年<sup>[3]</sup>对大型地下工程施工导致的建筑物破坏风险进行了评估。美国OSHA (Occupational Safety and Health Act)从工程管理的角度规定了人为开挖工程中,避免发生风险事故应采取的措施,制订了相应的标准。

国内对基坑工程风险评估的理论研究及其应用的研究相对起步较晚。但是随着国家和社会对工程质量和人员安全的高度重视,风险评估正逐渐受到重视,越来越广泛的应用于地下工程领域。上海隧道设计研究院的范益群博士<sup>[14]</sup>提出了地下结构的抗风险设计概念,计算出深基坑、隧道等地下结构风险发生的概率以及定性评价风险造成的损失,并提出改进的层次分析方法。李惠强等<sup>[15]</sup>用事故树方法分析了某深基坑工程边坡开挖的风险问题。仲景冰等<sup>[16]</sup>把工程失败学引入到风险分析当中,并建立深基坑地下连续墙支护结构体系的风险事故树图。杨子胜等<sup>[17]</sup>介绍了基坑工程项目风险管理的国内外研究动态,分析了基坑工程项目中的不确定性问题,阐述了基坑工程项目风险管理的概念、特点和管理措施。黄宏伟等<sup>[18]</sup>采用风险矩阵法对深基坑工程进行了风险评估,并结合某工程实例进行应用分析。廖少明<sup>[19]</sup>通过对深基坑变形数据的分析,得到了地铁深基坑变形速率与工程风险的关系,确定了相应指标的阈值。边亦海<sup>[20]</sup>提出了时变风险的概念,给出了基于风险分析的深基坑支护方案设计流程。

### 30.1.3 目前存在的问题

从上面国内外现状的分析可以发现,虽然基坑方面的风险评估得到了各国学者的高度关注,并取得了一些研究成果,但是很多研究者和管理单位对风险研究在认识上仍存在许多误区,或实施过程中不完善、不规范,主要体现在以下几个方面:

- (1) 缺乏相关的历史统计资料,使得评估风险时的概率值存在大的偏差。
- (2) 风险分析与可靠度概念混淆,许多人往往认为可靠度就是风险评估,事实上二者在概率分析上一致,而风险评估还强调后果分析。
- (3) 风险指标与力学计算结合不够。风险指标往往通过专家调查法等主观方法得到,缺少必要的数学力学理论分析以及现场或室内试验,使得风险指标的可靠性和准确性大打折扣。
- (4) 难以实现真正的风险定量分析。
- (5) 没有建立完善的风险预警预案体系。目前的预警预案系统尚未走向系统化和程序化;另外,如何把监测数据和预警指标进行有机的结合,及如何把预警预案系统融入到深基坑工程的风险评估中亦有待深入研究。
- (6) 实施风险管理的流程和内容不完善、不规范。

(7) 对风险决策的认识存在误区。认为风险越小越好是错误的，因为减少风险是有代价的。

(8) 保险不是风险处理的唯一方式。购买保险只是一种转移风险的方式，但并不是风险处理的唯一方式。

以上的问题突出地反映了我国基础工程风险管理研究相对落后的几个方面，急需对基础工程风险管理进行全面普及和提高。为了达到这个要求，首先应该了解风险和工程风险评估的概念，掌握基础工程风险分析和控制的方法，以及在具体工程中的运用，这将有助于我国基础工程风险管理做到理论更成熟，操作更标准，方法更先进。实现“工程技术、经济环境”与“安全、进度、投资和质量”达到合理科学要求。

## 30.2 风险管理的基本原理

### 30.2.1 安全风险的定义

“风险”，源于法文的 *risque*，在 17 世纪中叶被引入到英文，拼写成 *risk*，到 18 世纪前半期，“*risk*”一词开始出现在保险交易中。风险是一个极为抽象而且模糊笼统的概念，由于人们研究的角度不同，对风险的看法和给出的定义也不尽相同，很难给出一个完善、严谨、并应用于不同领域的定义。在涉及风险问题的研究中，风险的定义大致可分为两类：第一类定义强调风险的不确定性，称为广义风险；第二类定义强调风险损失的不确定性，称为狭义风险。

已有大量的参考文献表明，不同的行业、不同的研究领域、不同的对象，不同的实际需要、不同的研究角度对风险的定义各不相同。

对于深基坑工程，将其安全风险定义为：在深基坑与地下工程项目建设中，一些事件能否发生是不确定的，而一旦发生，将给工程建设者(业主、承包商、施工方等)和第三方的预期利益带来损害，人们所预期的这样一类事件就是工程安全风险。

### 30.2.2 风险管理步骤与流程

风险管理(Risk Management)一词最初是由美国的肖伯纳博士于 1930 年提出。在风险管理的发展过程中，由于不同的学者对风险管理的出发点、目标、手段和管理范围等强调的侧重点不同，从而形成了不同的学说。其中最具代表性的学说有美国学说和英国学说。

美国学者通常从狭义的角度解释风险管理，他们把风险管理的对象局限于纯粹风险，且重点放在风险处理上。Jerry S.Rosenbloom<sup>[21]</sup>把风险管理定义为：风险管理是处理纯粹风险和决定最佳管理方法的一套技术。

英国学者对风险的定义则侧重于对经济的控制和处理程序方面。英国伦敦特许保险学会的风险管理教材，给风险管理下的定义为：为了减少不确定事件的影响，对企业各种业务活动资源的计划、安排和控制。

我国台湾学者袁宗慰则定义为：风险管理是指在对风险的不确定性及可能性等因素进行考察、预测、收集分析的基础上制定出包括识别风险、衡量风险、积极管理风险、有效处置风险及妥善处理风险所致损失等一整套系统而科学的管理方法。

我国大陆学者李中斌<sup>[22]</sup>把风险管理定义为研究风险发生规律和风险技术的一门新兴管理科学，各经济单位通过风险识别、风险估测、风险评价，并在此基础上优化组合各种风险管理技术，对风险实施有效的控制和妥善处理风险所致的后果，期望达到以最少的成本获得最大安全保障的目标。

结合基础工程特点，结合上述定义，基坑工程风险管理一般包括以下几个过程：

(1) 风险辨识：它是基坑工程风险管理的第一步，指在风险发生之前，通过分析、归



纳咨询和整理各种统计资料,对风险的类型及风险的生成原因、可能的影响后果做定性估计、感性认识和经验判断。如施工中可能遇到的风险有基坑渗漏,支撑系统失稳,坑底隆起,围护结构整体失稳,坑底管涌、流砂,坑内滑坡,围护结构折断或大变形,内倾破坏等。以基坑渗漏为例,引起基坑渗漏的原因是围护墙的止水效果不好或止水结构失效,可能致使大量的水夹带砂粒涌入基坑,严重的水土流失会导致围护结构失稳和路面坍塌的严重事故,还可能先在墙后形成洞穴而后突然发生地面坍塌。

(2) 风险估计:它是在风险辨识的基础上,通过对所收集的大量资料的分析,利用概率统计理论、数值分析、专家调查等方法,估计和预测风险发生的可能性和相应损失的大小。风险估计是对风险的定量化分析。对基坑工程来说,在辨识了基坑施工过程中可能出现的风险后,可根据事故统计资料对风险的发生概率和损失进行估计,没有事故统计资料时,可采用专家调查法进行估计。

(3) 风险评价:它是在风险辨识和风险估计的基础上,对风险发生的概率、损失程度和其它因素进行综合考虑,得到描述风险的综合指标——风险度或其它目标参数,以便对基坑工程的单个风险因素进行重要性排序,并根据风险接受准则对基坑工程项目的总体风险进行评价。

(4) 风险控制:风险评价之后,风险管理对基坑工程项目存在的种种风险和潜在损失有了一定的把握。在此基础上,在众多的风险应对策略中,选择行之有效的策略,并寻求与之对应的既符合实际,又会有明显效果的具体规避措施,力图使风险转化为机会或使风险所造成的负面效应降到最低的程度。如非工作人员进入施工现场,场地排水问题等风险可采取风险回避的方法;此外,决策者通常会遇到无法依靠自身能力解决的风险,此时,可采用风险转移的方法。风险转移包括非保险转移和保险转移。非保险转移是指通过各种契约将本应由自己承担的风险转移给他人,例如将基坑工程中技术难点予以转包、施工机械设备的租赁等。保险转移则是通过购买工程保险从而通过保险公司获得可能的事后损失补偿,如人员伤亡意外保险。

(5) 风险监控:即对基坑工程项目风险的监视和控制。跟踪已识别的风险,监视残留风险和识别新的风险,严格执行风险规避措施并适时调整,密切注视这些措施对降低风险的有效性,将项目的进展控制在决策者手中。

整个基坑工程风险管理流程如图 30-2 所示,必须注意的是,在施工中这个流程是动态循环的。

### 30.2.3 风险分析与评估所需资料

风险分析与评估所需要的资料大致如下:

#### 1、法律法规

与基坑工程相关的国家法律法规,如《建设工程勘察设计管理条例》(国务院令第 293 号)等。

#### 2、部门规章

与重大基坑工程相关的部门规章,如《关于开展重大危险源监督管理工作的指导意见》(安监管协调字[2004]56 号)、《公民防范恐怖袭击手册》(公安部 2008)等。

#### 3、国家、行业标准

与基坑工程相关的国家、行业标准,如:《地铁及地下工程建设风险管理指南》(2007)、《地基基础设计规范》(上海市工程建设规范, DGJ08-11-1999) \ 《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)、《起重机械安全规范》(GB6067-85)等。

#### 4、工程设计文件

工程所有资料,包括工程背景、工程水文地质资料、设计资料、气象资料、周围环境资

料、工程已有的研究报告等。

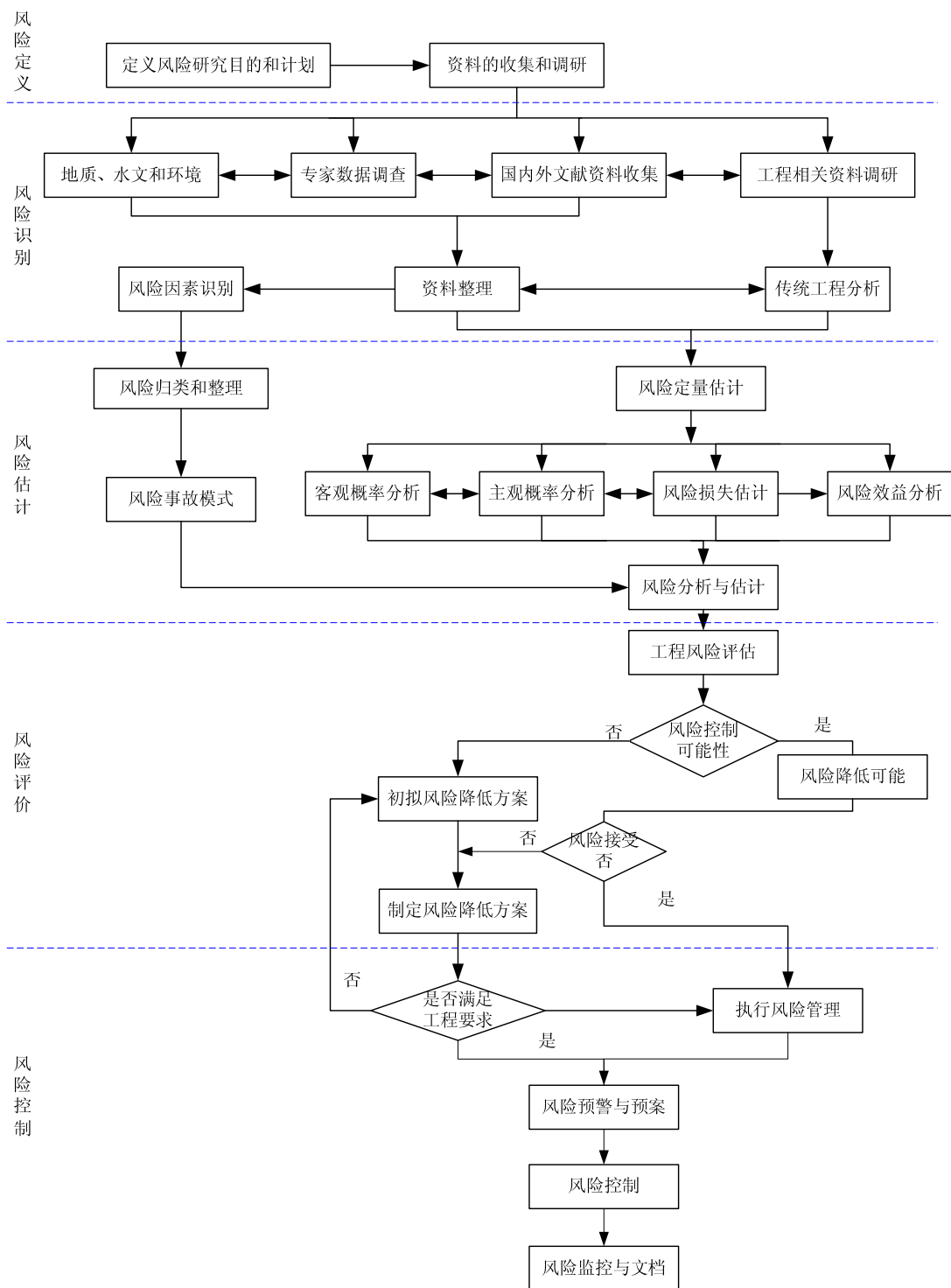


图 30-2 基坑工程风险管理流程

### 30.3 工程风险的分析方法

工程风险评估与分析的方法很多，张少夏<sup>[23]</sup>对各种风险分析方法的适用范围进行了研究分析，对能够应用于隧道及地下工程的方法进行了筛选，并对其优缺点进行了总结。常用方法主要有：

#### 1、基于信心指数的专家调查法

该方法由两步组成：首先辨识出某一特定项目可能遇到的所有风险，列出风险调查表（Checklist）；然后利用专家经验对可能的风险因素的重要性进行评价，综合成整个项目风险。

陈龙<sup>[24]</sup>推出了一种改进的专家调查法，称之为“信心指数法”。该方法的前提是要在调查中引入“信心指数”这个参数。所谓信心指数就是专家在做出相应判断时的信心程度，也可以理解为该数据的客观可靠程度。这意味着将由专家自己进行数据的可靠性或客观性评价，这就会大大提高数据的可用性，也可以扩大数据采集对象的范围。通过这种方法，可以挖掘出专家调研数据的深层信息。即使数据采集对象并非该领域的专家，只要他对所做出的判断能够有一个正确的评价，那么这个数据就应该视为有效信息。

#### 2、事故树分析方法

事故树分析法（FTA，Fault Tree Analysis）是一种评价复杂系统可靠性与安全性的方法。FTA 是把系统不希望发生的事件（失效状态）作为事故树的顶事件（Top event）。用规定的逻辑符号表示，找出导致这一不希望事件所有可能发生的直接因素和原因。它们是从处于过渡状态的中间事件开始，并由此逐步深入分析，直到找出事故的基本原因，即事故树的基本事件为止。它们的数据是已知的，或者已经有过统计或实验结果。事故树的流程如图 30-3 所示。

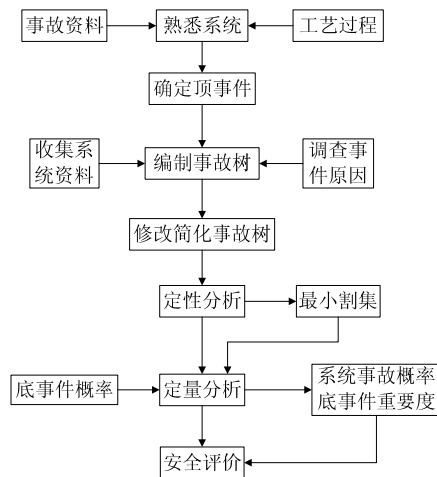


图 30-3 事故树分析流程图

#### 3、层次分析法

用层次分析法（AHP，Analytic Hierarchy Process）做系统分析，首先要把问题层次化，即根据问题的性质和达到的总目标，将问题分解为不同的组成因素，并按照因素间的相互关联、影响以及隶属关系将因素按不同层次聚集组合，形成一个多层次的的分析结构模型，并最终把系统分析归结为最底层（供决策的方案措施等）相对于最高层（总目标）的相对重要性权值的确定或相对优劣次序的排序问题。该方法能把定性因素定量化，并能在一定程度上检验和减少主观影响，使评价更趋科学化。具体分析步骤如下：

- （1）分析系统中各因素之间的关系，建立系统的递阶层次结构；
- （2）对同一层次的各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较，构造两两

比较判断矩阵；

(3) 由判断矩阵计算被比较判断元素对于该准则的相对权重；

(4) 计算各层元素对系统目标的合成权重，并进行排序。

除以上常用方法外，风险评估与分析的方法还有：决策树法、工程区域实地探勘与调研分析、危险源辨识(HAZID)、危害与可操作性分析(HAZOP)、事故类型及影响分析(FMEA)、多重风险分析(MultiRisk Analysis)、蒙特卡罗模拟(Monte Carlo Simulation)、数值模拟与分析等。

## 30.4 风险安全评估与控制

### 30.4.1 安全风险等级划分及接受准则

为了有效把握工程的风险事故，指导风险决策的开展，需对不同的风险事故进行风险等级划分。一般来说，风险可表征为风险事故发生的概率和事故损失的乘积，这里推荐依据《地铁及地下工程建设风险管理指南》<sup>[25]</sup>，给出风险事故概率和损失的等级评定标准，以及针对风险事故的等级划分标准和接受准则。

#### 1、风险等级标准

依据风险发生的概率（频率）的大小，风险的发生概率分为五级。

风险发生概率等级标准

表 30-1

| 等级   | 一级           | 二级                      | 三级                   | 四级                  | 五级            |
|------|--------------|-------------------------|----------------------|---------------------|---------------|
| 事故描述 | 不可能          | 很少发生                    | 偶尔发生                 | 可能发生                | 频繁            |
| 区间概率 | $P < 0.01\%$ | $0.01\% \leq P < 0.1\%$ | $0.1\% \leq P < 1\%$ | $1\% \leq P < 10\%$ | $P \geq 10\%$ |

注： $P$  为事故发生概率。

基坑工程中，一旦发生风险就会对工程本身、第三方或周边环境造成损失，考虑不同损失严重程度的不同，建立风险损失的等级标准，具体不同风险承险体对象（工程项目、第三方或周边环境）的风险损失等级标准见后。

风险事故损失等级标准

表 30-2

| 等级 | 一级  | 二级  | 三级 | 四级   | 五级  |
|----|-----|-----|----|------|-----|
| 描述 | 可忽略 | 需考虑 | 严重 | 非常严重 | 灾难性 |

#### 2、风险矩阵

根据不同风险发生的等级和事故损失，建立风险等级评价矩阵。

风险评估矩阵

表 30-3

| 风险       |                            | 事故损失   |        |       |        |       |
|----------|----------------------------|--------|--------|-------|--------|-------|
|          |                            | 1.可忽略的 | 2.需考虑的 | 3.严重的 | 4.非常严重 | 5.灾难性 |
| 发生<br>概率 | A: $P < 0.01\%$            | 1A     | 2A     | 3A    | 4A     | 5A    |
|          | B: $0.01\% \leq P < 0.1\%$ | 1B     | 2B     | 3B    | 4B     | 5B    |
|          | C: $0.1\% \leq P < 1\%$    | 1C     | 2C     | 3C    | 4C     | 5C    |
|          | D: $1\% \leq P < 10\%$     | 1D     | 2D     | 3D    | 4D     | 5D    |
|          | E: $P \geq 10\%$           | 1E     | 2E     | 3E    | 4E     | 5E    |

#### 3、风险接受准则

不同的风险需采用不同的风险管理和控制措施，结合风险评估矩阵，建议不同等级风险的接受准则和相应的控制对策。

风险接受准则

表 30-4

| 等级 | 风险                | 接受准则  | 控制对策             | 建议应对牵头部门      |
|----|-------------------|-------|------------------|---------------|
| 一级 | 1A,2A,1B,1C       | 可忽略的  | 不必进行管理、审视        | 设计、施工、监理单位    |
| 二级 | 3A,2B,3B,2C,1D,1E | 可容许的  | 引起注意，需常规管理审视     |               |
| 三级 | 4A,5A,4B,3C,2D,2E | 可接受的  | 引起重视，需防范、监控措施    | 总承包商          |
| 四级 | 5B,4C,5C,3D,4D,3E | 不可接受的 | 需重要决策，需控制、预警措施   | 建设公司；指挥部或政府部门 |
| 五级 | 5D,4E,5E          | 拒绝接受的 | 立即停止，需整改、规避或预案措施 |               |



### 30.4.2 安全风险评估

安全风险评估的基本流程为：

- (1) 充分了解所需要研究的工程情况，收集尽可能相关的资料；
- (2) 划分评价层次单元和重要专题；
- (3) 对各评价单元的可能发生风险事故进行分类辨识；
- (4) 对各风险事故的原因、发生工况、损失后果进行分析；
- (5) 采用定性及部分定量的评价方法对风险事故进行评价；
- (6) 对各风险事故提出建议性控制措施；
- (7) 对各评价单元的风险进行评价；
- (8) 将各评价单元的评价进行汇总，从而对工程的总体风险进行评价；
- (9) 给出结论和建议；
- (10) 编制风险评估报告。

工程风险评估的流程如图 30-4 所示。

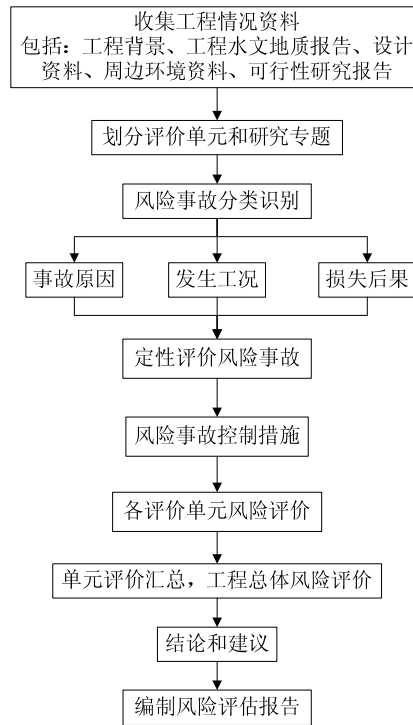


图 30-4 安全风险评估流程图

### 30.4.3 风险控制措施

在基坑工程施工中，风险是实时存在的，工程风险辨识、评估后，应根据项目总体目标和策略，以有利于尽可能的提高对项目风险的控制能力和降低项目风险的潜在损失为原则，规划并选择合理的风险管理控制对策，风险控制对策一般有四种，可选择一种或多种：

#### 1、风险消除（回避）

不让工程风险发生，将工程风险的发生概率或损失降低到零。

#### 2、风险降低（规避）

通过采取措施或修改技术方案以减少工程风险发生的损失和概率或两者任意一种来实现。

#### 3、风险转移（分散）

将风险较大的分项工程转包给第三方,或通过保险或者其他方式安排来让第三方承担这一风险。

#### 4、风险自留（接受）

风险自留的前提是所接受的工程风险可能导致的损失比转移风险所需费用小。

另外,工程现场应建立一套系统的风险监控和预警预报体系,制定可行的风险应急处置预案,采取必要的安全防护措施等。

## 30.5 基坑安全风险评案例

### 30.5.1 基坑工程施工准备期的风险评估案例

#### 1、工程概况

上海世博 500kV 地下变电站是世博会的重要配套工程，由上海市电力公司投资建设，总体设计单位为华东电力设计院，土建设计单位为华东建筑设计研究院有限公司。工程位于上海市静安区成都北路、北京西路、山海关路和大田路所围成的区域之中。地块南北方向长约 220m、东西方向宽约 200m。工程为全地下筒型结构，地下结构外墙外壁直径 130m，开挖深度为 33.7m。根据上海市标准《基坑工程设计规程》(DBJ08-61-97) 中的相关规定，本基坑工程属于一级基坑。工程土建部分总投资 4.4 亿元左右。

工程施工采用主体结构与围护结构全面结合的逆作施工方案。即“地下连续墙两墙合一+结构梁板替代水平支撑+临时环形支撑”的“逆作法”总体施工。本案例主要针对水平支撑体系进行风险评估。

#### 2、水平支撑体系施工的风险评估

##### (1) 风险辨识与分析

水平支撑结构主要是利用地下变电站主体结构的楼板和内衬墙，以及三道临时环向混凝土支撑。主要参数见表 30-5 所示。

水平支撑体系概况

表 30-5

|      |         |   |
|------|---------|---|
| 水平支撑 | 结构梁板    | 共五层楼板，板顶标高依次为-2.0m、-11.5m、-16.5m、-26.5、-31.3m；对应的板厚依次为 300mm、250mm、200mm、200mm、2500mm；板面有 9 个预留口。顶层结构中部大跨度区域框架梁中采用预应力技术 |
|      | 临时环形内支撑 | 共三道，首道为单环，其余为双环；位于竖向间距大的楼层中间，中心标高依次为-7.0m、-22.0m、-30.3m。  |
|      | 结构内衬墙   | 墙厚 800mm，位于连续墙内侧，与地下连续墙共同组成复合墙体。  |

结构楼板替代支撑整体性好、刚度大，可以有效的控制围护结构的变形。但地下结构的底板厚 (2.5m)、体积大 (混凝土方量约 32500m<sup>3</sup>)，且位于地下 34m 深处，属于逆作超深大体积混凝土施工，综合施工技术复杂，并且大体积混凝土容易产生温度裂缝。混凝土内部温度变化产生的变形受到混凝土内部和外部的约束后，将产生很大的应力，这是导致混凝土产生裂缝的主要原因。此外底板配筋、混凝土收缩变形、混凝土徐变都对大体积混凝土裂缝的产生有影响。本工程顶板结构为深梁结构，梁的高度达到 2m，如此高的梁支撑在第③层淤泥质粉质粘土上，对排架支撑及垫层下土体变形控制要求高。此外，对于一般的逆作法施工，由于整个地下结构沿水平方向受力不可能完全相同，导致柱与柱间产生不均匀沉降，将引起结构楼板与柱之间节点产生裂缝或严重破坏，影响支撑系统的稳定性，进而使结构楼板的施工存在一定的风险。水平支撑体系施工存在的风险如图 30-5 所示。

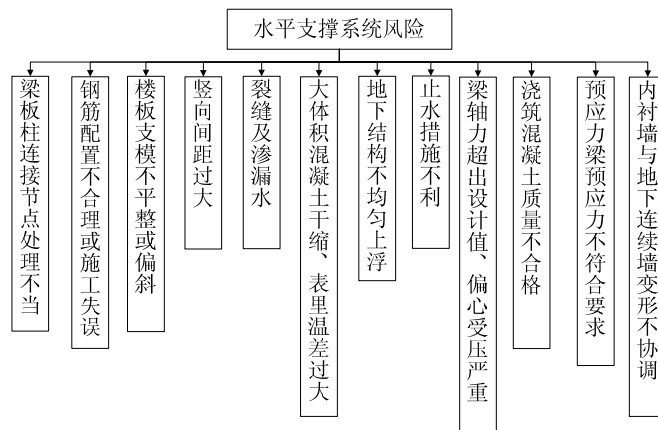


图 30-5 水平支撑系统施工风险

(2) 风险估计与评价

采用“基于信心指数的专家调查法”（本次调研表发出 25 份，收回 20 份），并且运用同济大学风险评估软件——隧道及地下工程风险评估软件（TRM1.0.0），对该工程的水平支撑体系施工风险评估进行评价，见下表。

水平支撑体系施工风险评估 表 30-6

| 序号 | 风险事故              | 发生概率 | 损失后果 | 风险指标   | 风险等级 |
|----|-------------------|------|------|--------|------|
| 1  | 梁板柱连接节点处理不当       | B    | 3    | 0.1902 | 二级   |
| 2  | 钢筋配置不合理或施工失误      | B    | 3    | 0.1848 | 二级   |
| 3  | 楼板支模不平整或偏斜        | C    | 2    | 0.1921 | 二级   |
| 4  | 水平支撑竖向间距过大        | B    | 3    | 0.2025 | 二级   |
| 5  | 大体积混凝土干缩、表里温差过大   | B    | 3    | 0.2211 | 二级   |
| 6  | 地下结构不均匀上浮         | C    | 3    | 0.3410 | 三级   |
| 7  | 梁轴力超出设计值、偏心受压严重   | B    | 3    | 0.1721 | 二级   |
| 8  | 预应力梁施加预应力过小       | B    | 3    | 0.1963 | 二级   |
| 9  | 内衬墙与地下连续墙变形不协调    | B    | 3    | 0.1954 | 二级   |
| 10 | 浇筑混凝土质量严重不合格      | B    | 3    | 0.3407 | 三级   |
| 11 | 节点或楼板产生裂缝和渗漏水     | B    | 3    | 0.1931 | 二级   |
| 12 | 梁板柱节点预留插筋锈蚀       | B    | 2    | 0.0901 | 一级   |
| 13 | 边缘梁、板与内衬墙预埋件连接时错位 | B    | 3    | 0.1937 | 二级   |

3、风险控制措施及建议

为了降低或控制该工程水平支撑体系的风险，建议采用如下控制措施：

(1) 施工时一定要按图施工，按照施工组织进行，要协调好与基坑土方工程等其他分部工程的关系。

(2) 加强对梁板受力、变形和立柱不均匀沉降的监测, 通过监测分析及时预报并提出建议作到信息化施工, 减少风险事故和随时检验设计施工的正确性。

(2) 梁板模板及支架应具有足够的强度、刚度和稳定性, 能可靠地承受新浇混凝土自重、侧压力和施工中产生的荷载。水平梁板支模前一定要采取有效降水措施, 尽量保证土体固化效果, 达到支模平整的要求。

(3) 楼板出土口的设计方案涉及到土方开挖工程施工效率, 所以应对其布置形式进行优化设计, 按照规范要求对洞口楼板进行加固。

(4) 地下结构水平梁、板、柱接触节点处, 对于整个结构稳定性十分重要, 设计施工中都应该特别注意, 严格遵守施工要求, 处理好新老混凝土接合, 钢筋连接和支撑下混凝土的浇捣。此外还要做好节点处的防水措施。节点处设计和施工要满足结构稳定和抗震要求。

(5) 本工程顶板和大底板为大体积混凝土工程, 鉴于其重要性, 建议进行专项研究。底板施工时除常规的钢筋绑扎、混凝土浇捣、养护及测温等施工外, 应特别注意处理还新老混凝土的接合和底板钢筋与地下连续墙的连接。顶板作为施工阶段的主要施工场地, 又要留出出土口以便土方开挖和材料运输, 所以要保障顶板各方面的施工质量。

### 30.5.2 事故树在基坑工程风险评估中的应用案例

对基坑工程进行事故树分析, 其目的是从工程整体的角度来认识可能引发工程事故的安全隐患。在工程施工之前开展这项工作, 可避免不安全的设计和施工方案, 并提出现场施工安全监管的重点。事故树的分析主要从三方面进行, 即事故树的绘制、顶上事件的发生概率计算及底事件的重要度分析。

#### 1、深基坑支护结构事故树编制

在遵循事故树编制的有关原则上<sup>[26-28]</sup>, 本案例剖析研究 SMW 工法在上海软土地区用于围护结构可能失事的原因, 编制了 SMW 工法围护结构体系失效风险的事故树<sup>[20]</sup>, 见图 30-6。事故树中只考虑 SMW 工法围护结构体系本身的情况, 暂不考虑甲方、设计单位、监理单位和施工单位管理不善的原因, 也不考虑深基坑工程施工对周围建筑、路面、地下管线的不良影响以及附近建筑物施工影响。其中对 SMW 工法围护结构体系失效风险的事故树中的一些符号进行说明:

(1) 各层事件均以相同首字母编号, 顶事件编号为  $T$ , 基本事件、非基本事件和条件事件以  $X$  开头按序编号, 其它中间事件按由上至下的顺序以  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为开头分别编号。

(2)  $M_S$  为侧向水土压力和地表超载作用引起的围护墙体上最大弯矩;  $M_R$  为支护墙体的抗弯强度。

(3)  $H_S$  为围护墙体发生的水平位移;  $H_R$  为围护墙体水平位移的允许值, 可参见相关规范。

(4)  $N_S$  指在侧向水土压力和地表超载作用下, 支撑承受的最大压力;  $N_R$  为支撑自身的抗压强度。

(5)  $H\gamma_w > h\gamma_s$  为承压水引起涌水涌土的条件公式, 式中,  $H$  为承压水压力水头;  $\gamma_w$  为地下水的重度;  $h$  为深基坑坑底到坑下承压水层的土层厚度;  $\gamma_s$  为土层土的加重量度。



(6)  $\gamma' < kj$  为上层滞水引起涌水涌砂的条件公式, 式中,  $\gamma'$  为土的浮重度;  $k$  为安全系数, 参见文献[29]取值;  $j$  为最大渗流力, 式中,  $j = \gamma_w h' / (h' + 2t)$ ,  $\gamma_w$  为地下水的重度;  $h'$  为地下水位至基坑坑底的距离;  $t$  为墙体入土深度。

## 2、顶上事件发生概率计算

编制事故树后, 计算顶上事件, 这里指 SMW 工法围护结构体系事故可能发生的概率, 对于计算风险防范所值得投入的成本和参加工程保险都有很重要的意义。

事故树分析法中计算顶上事件的概率, 通常是先求导致顶上事件发生的最小基本事件的集合, 即先求事故树的最小割集。对于图 30-6 的事故树按布尔代数法有:

$$\begin{aligned}
 T &= A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = B_1 + B_2 + X_1 X_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 + X_3 + B_7 + B_8 = X_4(C_1 + C_2) \\
 &+ X_5(C_3 + C_4 + C_5) + X_1 X_2 + X_6(C_6 + C_7) + X_7 + C_8 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_3 + X_{12} X_{13} X_{14} + \\
 &X_{15} X_{16} X_{17} X_{18} = X_4(X_{19} + X_{20} + D_1 + X_{21} + D_2) + X_5(X_2 + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{19} + X_{25}) \\
 &+ X_1 X_2 + X_6(X_{22} + X_{26} + D_3 + X_{21} + D_4) + X_7 + X_{27} + X_{26} + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_3 + X_{12} X_{13} \\
 &X_{14} + X_{15} X_{16} X_{17} X_{18} = X_4(X_{19} + X_{20} + X_{28} + X_{29} + X_{21} + X_{30} X_{31}) + X_5(X_2 + X_{21} + X_{22} + X_{23} + \\
 &X_{24} + X_{19} + X_{25}) + X_1 X_2 + X_6(X_{22} + X_{26} + X_{28} + X_{29} + X_{21} + X_{30} X_{31}) + X_7 + X_{27} + X_{26} + X_8 + \\
 &X_9 + X_{10} + X_{11} + X_3 + X_{12} X_{13} X_{14} + X_{15} X_{16} X_{17} X_{18} = X_4 X_{19} + X_4 X_{20} + X_4 X_{28} + X_4 X_{29} + X_4 X_{21} \\
 &+ X_4 X_{30} X_{31} + X_5 X_2 + X_5 X_{21} + X_5 X_{22} + X_5 X_{23} + X_5 X_{24} + X_5 X_{19} + X_5 X_{25} + X_1 X_2 + X_6 X_{22} + X_6 \\
 &X_{26} + X_6 X_{28} + X_6 X_{29} + X_6 X_{21} + X_6 X_{30} X_{31} + X_7 + X_{27} + X_{26} + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_3 + X_{12} \\
 &X_{13} X_{14} + X_{15} X_{16} X_{17} X_{18}
 \end{aligned} \tag{30-1}$$

由上述结果可知, 顶上事件为 30 个最小割集的并集, 最小割集为  $\{X_4 X_{19}\}$ ,  $\{X_4 X_{20}\}$ ,  $\{X_4 X_{28}\}$ ,  $\{X_4 X_{29}\}$ ,  $\{X_4 X_{21}\}$ ,  $\{X_4 X_{30} X_{31}\}$ ,  $\{X_5 X_2\}$ ,  $\{X_5 X_{21}\}$ ,  $\{X_5 X_{22}\}$ ,  $\{X_5 X_{23}\}$ ,  $\{X_5 X_{24}\}$ ,  $\{X_5 X_{19}\}$ ,  $\{X_5 X_{25}\}$ ,  $\{X_1 X_2\}$ ,  $\{X_6 X_{22}\}$ ,  $\{X_6 X_{26}\}$ ,  $\{X_6 X_{28}\}$ ,  $\{X_6 X_{29}\}$ ,  $\{X_6 X_{21}\}$ ,  $\{X_6 X_{30} X_{31}\}$ ,  $\{X_7\}$ ,  $\{X_{27}\}$ ,  $\{X_{26}\}$ ,  $\{X_8\}$ ,  $\{X_9\}$ ,  $\{X_{10}\}$ ,  $\{X_{11}\}$ ,  $\{X_3\}$ ,  $\{X_{12} X_{13} X_{14}\}$ ,  $\{X_{15} X_{16} X_{17} X_{18}\}$ , 分别对应于导致顶上事件发生的 30 种风险事故发生模式。实际工程中, 顶事件的发生概率  $P(T)$  一般采用近似的独立事件和的概率公式来计算。

$$P(T) \approx \prod_{j=1}^{N_k} \prod_{i \in K_j} F_i(t) = 1 - \prod_{j=1}^{30} [1 - P(K_j)] \tag{30-2}$$

式中  $P(K_j)$  为第  $j$  个最小割集的发生概率。如  $P(K_1)$  表示第一个最小割集  $\{X_4 X_{19}\}$  的发生概率, 它又取决于基本事件  $X_4$  和  $X_{19}$  发生的概率之积。在事故树分析中, 最重要也是最难的就是如何确定这些基本事件的发生概率。这取决于对一些基本事件发生概率的统计数据 and 专家依据积累的经验来估计, 参考文献[15, 30, 31]对一些基本事件发生概率的统计数据和方法, 对 SMW 工法围护结构事故树中各基本事件和条件事件发生概率估计如下:

(1) 基本事件发生概率估计。在本事故树中, 基本事件有两种类型:

①二值基本事件。发生时候  $P=1$ , 不发生时候  $P=0$ , 这样基本事件有 6 个, 分别是  $X_{12}$ ,  $X_{13}$ ,  $X_{15}$ ,  $X_{16}$ ,  $X_{21}$ ,  $X_{30}$ 。

②随机基本事件, 其发生概率通过统计估算得到。这样的基本事件有 20 个, 分别为  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_7$ ,  $X_8$ ,  $X_9$ ,  $X_{10}$ ,  $X_{11}$ ,  $X_{17}$ ,  $X_{19}$ ,  $X_{20}$ ,  $X_{22}$ ,  $X_{23}$ ,  $X_{24}$ ,  $X_{25}$ ,  $X_{26}$ ,  $X_{27}$ ,  $X_{28}$ ,  $X_{29}$ ,  $X_{31}$ 。根据模糊数学<sup>[32]</sup>假设:

$$a_i = 0.9m_i \tag{30-3}$$

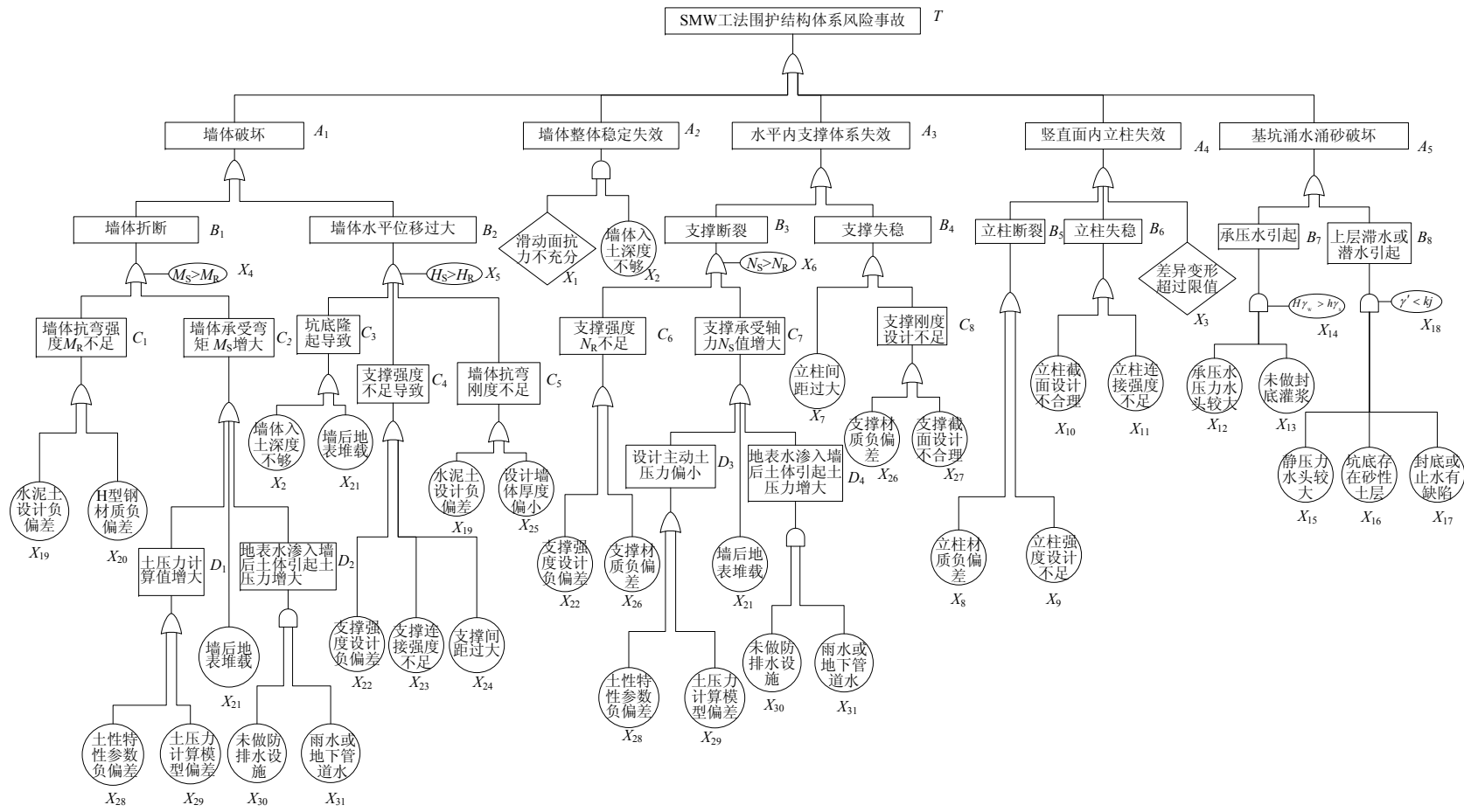


图 30-6 SMW 工法围护结构体系风险事故的事故树图 (引自边亦海博士学位论文<sup>[20]</sup>)

$$b_i = 1.1m_i \quad (30-4)$$

运用式(30-3)和(30-4)对各随机基本事件的发生概率模糊化, 得到各基本事件的模糊概率, 如表 30-7 所示。

事故树中各基本事件模糊概率 表 30-7

| 基本事件编号          | 模糊概率值   |        |         | 基本事件编号          | 模糊概率值   |        |         |
|-----------------|---------|--------|---------|-----------------|---------|--------|---------|
|                 | a       | m      | b       |                 | a       | m      | b       |
| X <sub>1</sub>  | 0.0135  | 0.015  | 0.0165  | X <sub>20</sub> | 0.00117 | 0.0013 | 0.00143 |
| X <sub>2</sub>  | 0.0315  | 0.035  | 0.0385  | X <sub>22</sub> | 0.00243 | 0.0027 | 0.00297 |
| X <sub>3</sub>  | 0.00108 | 0.0012 | 0.00132 | X <sub>23</sub> | 0.00126 | 0.0014 | 0.00154 |
| X <sub>7</sub>  | 0.00486 | 0.0054 | 0.00594 | X <sub>24</sub> | 0.00126 | 0.0014 | 0.00154 |
| X <sub>8</sub>  | 0.00126 | 0.0014 | 0.00154 | X <sub>25</sub> | 0.00225 | 0.0025 | 0.00275 |
| X <sub>9</sub>  | 0.00126 | 0.0014 | 0.00154 | X <sub>26</sub> | 0.00126 | 0.0014 | 0.00154 |
| X <sub>10</sub> | 0.00108 | 0.0012 | 0.00132 | X <sub>27</sub> | 0.00108 | 0.0012 | 0.00132 |
| X <sub>11</sub> | 0.00126 | 0.0014 | 0.00154 | X <sub>28</sub> | 0.00486 | 0.0054 | 0.00594 |
| X <sub>17</sub> | 0.0252  | 0.028  | 0.0308  | X <sub>29</sub> | 0.0162  | 0.018  | 0.0198  |
| X <sub>19</sub> | 0.00729 | 0.0081 | 0.00891 | X <sub>31</sub> | 0.0351  | 0.039  | 0.0429  |

(2) 条件概率。其发生概率根据经验估计得到, 这样的底事件有 5 个, 分别为 X<sub>4</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>6</sub>, X<sub>14</sub>, X<sub>18</sub>, 运用式(30-3)和(30-4)对各条件事件的发生概率模糊化, 得到各条件事件的模糊概率, 如表 30-8 所示。

事故树中各条件事件模糊概率 表 30-8

| 基本事件编号         | 模糊概率值 |     |      | 基本事件编号          | 模糊概率值 |     |      |
|----------------|-------|-----|------|-----------------|-------|-----|------|
|                | a     | m   | b    |                 | a     | m   | b    |
| X <sub>4</sub> | 0.09  | 0.1 | 0.11 | X <sub>14</sub> | 0.18  | 0.2 | 0.22 |
| X <sub>5</sub> | 0.18  | 0.2 | 0.22 | X <sub>18</sub> | 0.18  | 0.2 | 0.22 |
| X <sub>6</sub> | 0.09  | 0.1 | 0.11 |                 |       |     |      |

将上述基本事件和条件事件的模糊概率值代入式(30-2)中, 即可计算得到几种不同情况下顶事件发生的模糊概率如表 30-9 所示。

顶事件的模糊概率值 表 30-9

| P <sub>12</sub> | P <sub>13</sub> | P <sub>15</sub> | P <sub>16</sub> | P <sub>21</sub> | P <sub>30</sub> | P <sub>T</sub> (a, m, b)  |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | (0.0264, 0.0309, 0.0358)  |
| 0               | 0               | 1               | 1               | 0               | 0               | (0.0308, 0.0364, 0.0423)  |
| 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 0               | (0.3389, 0.372, 0.4043)   |
| 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | (0.03255, 0.0385, 0.0449) |
| 1               | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | (0.2017, 0.2247, 0.2479)  |
| 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | 1               | (0.4638, 0.5043, 0.5428)  |

注：表中，当基坑存在较大承压水水头时， $P_2=1$ ，否则  $P_2=0$ ；当基坑未做封底灌浆时， $P_3=1$ ，否则  $P_3=0$ ；当基坑存在较大静水压力水头时， $P_5=1$ ，否则  $P_5=0$ ；当坑底存在砂性土层时， $P_6=1$ ，否则  $P_6=0$ ；当墙后地表超载时， $P_{21}=1$ ，否则  $P_{21}=0$ ；当地表未做防水止水措施时， $P_{30}=1$ ，否则  $P_{30}=0$ 。

从表 30-9 中可以看出，墙后地表是否堆载，对 SMW 工法围护结构发生事故概率影响很大；地下水位较高时，特别是存在较大承压水压力水头时，发生事故概率明显增大，基坑地表是否做了防排水措施，对发生事故概率有一定影响，但影响不大。

### 3、重要度分析

为了分析 SMW 工法围护结构事故树中各基本事件的发生对顶上事件发生所产生的影响大小，对各基本事件进行重要度分析是非常有必要的，本案例将从结构重要度、概率重要度两方面进行分析。

#### (1) 结构重要度分析

根据文献[26]的结构重要度分析的方法，得到各基本事件的结构重要度顺序为：

$$\begin{aligned} I_{S3}(3) &= I_{S7}(7) = I_{S8}(8) = I_{S9}(9) = I_{S10}(10) = I_{S11}(11) = I_{S26}(26) = I_{S27}(27) \\ &> I_{S21}(21) > I_{S2}(2) = I_{S19}(19) = I_{S22}(22) = I_{S28}(28) = I_{S29}(29) > I_{S1}(1) \\ &= I_{S20}(20) = I_{S23}(23) = I_{S24}(24) = I_{S25}(25) = I_{S30}(30) = I_{S31}(31) > I_{S12}(12) \\ &= I_{S13}(13) > I_{S15}(15) = I_{S16}(16) = I_{S17}(17) \end{aligned} \quad (30-5)$$

所以，仅从事故树结构上来看，基本事件  $X_3, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{26}, X_{27}$  对 SMW 工法围护结构风险事故的影响最大。在控制 SMW 工法围护结构风险事故发生时，首先要控制这几个风险因素，减少它们的发生概率。

#### (2) 概率重要度分析

概率重要度可通过下式，即底事件对系统事故发生的影响程度来表现：

$$I_g(i) = \frac{\partial P_T}{\partial P_i} \frac{P_i}{P_T} \quad (30-6)$$

式中， $P_i$  为底事件发生的概率。

通过式 (30-2) 和 (30-6) 可求得各底事件的概率重要度为：

$$\begin{aligned} I_g(7) &> I_g(8) = I_g(9) = I_g(11) > I_g(3) > I_g(27) = I_g(10) > I_g(12) = I_g(13) > I_g(17) \\ &> I_g(25) > I_g(23) = I_g(24) > I_g(26) > I_g(20) > I_g(1) > I_g(19) > I_g(22) > I_g(31) \\ &> I_g(29) > I_g(28) > I_g(15) = I_g(16) > I_g(21) > I_g(2) > I_g(30) \end{aligned} \quad (30-7)$$

可以看出基本事件  $X_7, X_8, X_9, X_{11}, X_3, X_{27}, X_{10}$  发生概率的变化对顶上事件发生概率的影响程度较大。只要能够减少这些基本事件的发生概率，就能大大减少顶上事件的发生概率。

由以上分析可知，导致 SMW 工法围护结构失效的主要因素是存在较大承压水压力或静水压力水头、未做封底灌浆或封底止水有缺陷、地表堆载、支撑材料和截面设计问题、立柱材料、设计问题以及差异沉降过大等。这些基本事件，无论是仅与事故树结构有关的结构重要度，还是仅与基本事件的概率敏感度有关的概率重要度，都比其它基本事件的值大，说明这些基本事件无论从哪一个方面来说，都是比较重要的。因此，在进行基坑工程日常风险管理的过程中，需要重点注意这几个风险因素，控制住这几个风险因素，就能大大减

少 SMW 工法围护结构风险事故发生的概率。

### 30.5.3 基坑开挖对临近构筑物影响的风险分析案例

基坑开挖在围护和降水不当的情况下，常会因坑外地面沉降量超出设计值而危及周围各种构筑物的正常使用。基坑工程施工对周边环境可能引起的破坏主要包括四个方面：一是导致地面建筑物的开裂、倾斜，甚至倒塌；二是造成路面以及其他地面设施的破坏；三是造成地下管线（给排水管道、煤气管道、电缆管道等）的破裂等；四是使地下隧道（包括已建隧道和在建隧道）变形，衬砌管片产生不均匀沉降引起裂缝，漏水，甚至碎裂。在这四个方面中，又以第一方面的破坏最为明显，对社会影响也最大。因此，本节案例主要探讨基坑开挖对临近建筑物的影响风险，对其它方面暂不考虑。

目前，研究基坑开挖对周边建筑物影响的方法主要是按照传统的力学观点建立分析模型，利用有限元方法或解析方法，考虑土、建筑物、基坑之间的共同作用，研究建筑物在基坑开挖过程中产生的可能的变形及破坏。但这种方法未考虑建筑物破坏所造成的经济损失，只限于技术研究领域。本节主要建立由于基坑开挖造成地面沉降对建筑物影响而引起经济损失之间的关系。

本节以上海国际航运中心基坑开挖对临近中远老楼的影响为案例，以说明基坑开挖对临近构筑物影响的风险分析过程<sup>[20]</sup>。

#### 1、工程概况

上海港国际客运中心工程位于东大名路以南、西侧为溧阳路、东临高阳路、南靠黄浦江。基坑的围护采用  $\Phi 950$  和  $\Phi 1150$ （中远老楼区域内围护）钻孔灌注桩作挡土墙，外侧为单排 SMW $\Phi 850@600$  三轴水泥土搅拌桩止水帷幕，临黄浦江侧为双排 SMW 工法桩，坑内设置水泥土搅拌桩暗墩加固。基坑形状为东西长条形，宽度为 86m。基底面绝对标高-9.2m（指吴淞标高），基坑挖土深度为 13.10m。坑内支撑采用钢筋混凝土围檩和三道钢筋混凝土水平支撑，第一道支撑中心标高 2.9m，第二道为-1.9m，第三道为-5.8m，坑内垫层厚度为 0.3m。

中远老楼位于上海港国际客运中心基坑西区北测，建于 1907 年，属上海市优秀保护建筑，为五层砖混结构，离基坑边缘 10.8m，垂直于基坑方向长度约为 40m，平行于基坑方向长度约为 32m，如图 30-7 所示。中远老楼与基坑的平面位置如图 30-8 所示。





图 30-7 中远老楼图

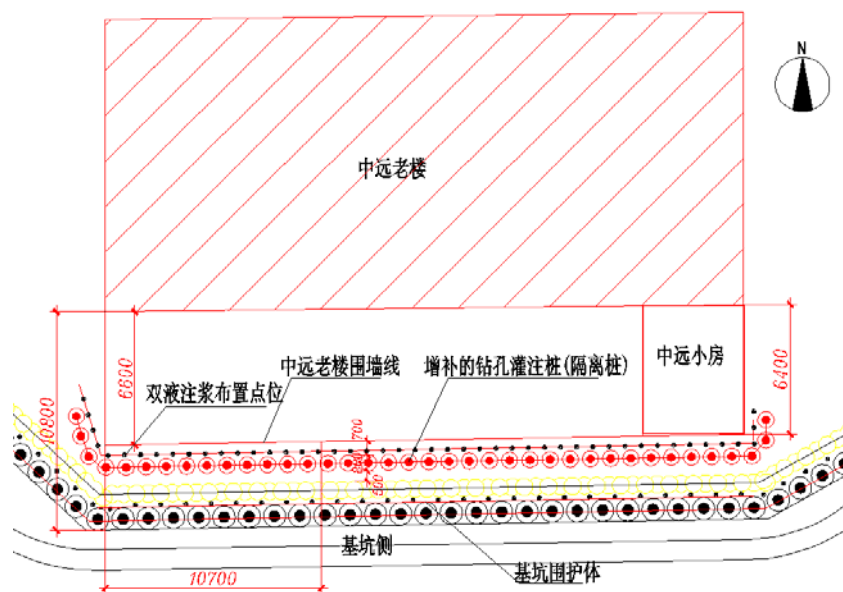


图 30-8 中远老楼位置平面图

## 2、深基坑开挖的蒙特卡罗数值模拟

### (1) 有限元模型的建立

数值模拟计算采用连续介质有限元模型分析，计算中充分考虑基坑开挖的影响范围来建立计算模型，模型尺寸在水平方向取 188.6m，垂直方向为 50m。数值模拟中，左右边界的侧向位移限制为 0，而垂直方向可以自由变形，模型底部为固定边界条件，自由地表设定为自由变形边界条件，见图 30-9 所示。地表附加荷载，0-10m 范围内按规范取值 20kN/m，在 10m-50m 范围内为中远老楼，经换算按 30kN/m 取值。

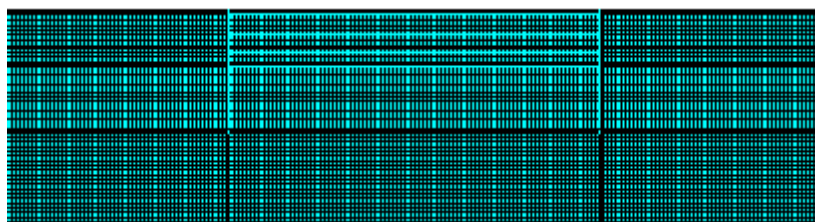


图 30-9 基坑开挖的数值计算模型

### (2) 数值模拟工况及计算参数

按照基坑开挖工序，数值模拟中采用了 5 个工况：

工况 1：初始工况，计算土体的自重应力场，但不考虑土体在自重应力场作用下产生的位移场；

工况 2：第一次土体开挖，开挖深度标高：3.9m~2.5m，并在标高 2.9m 处设置支撑；

工况 3：第二次土体开挖，开挖深度标高：2.5m~-2.3m，并在标高-1.9m 处设置支撑；

工况 4：第三次土体开挖，开挖深度标高：-2.3m~-6.2m，并在标高-5.8m 处设置支撑；

工况 5：第四次土体开挖，开挖深度标高：-6.2m~-9.2m，并浇筑混凝土垫层。

计算参数主要包括土体、钻孔灌注桩、搅拌桩以及垫层的物理力学参数。对土体按照

实际的土体分层情况进行模拟，土体采用理想弹塑性本构模型并在基坑开挖过程中采用德鲁克—普拉格(Drucker-Prager)屈服准则。其它结构包括钻孔灌注桩、钢筋混凝土支撑、垫层以及搅拌桩等，采用线弹性模型。

根据工程勘察报告及相关资料，土层物理力学相关参数见表 30-10。根据上海市地质勘察有关试验、土层物理力学参数指标均视为服从正态分布，土的粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  值的相关系数取-0.4。钻孔灌注桩、钢筋混凝土支撑、垫层以及搅拌桩等物理力学参数见表 30-11。

土体的物理力学参数及其变异系数 表 30-10

| 土层<br>层号       | 土层名称          | 层厚<br>(m) | 泊松比<br>$\mu$ | 重度<br>$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> ) |                 | 压缩模量<br>$E$ (MPa) |            | 粘聚力<br>$C$ (KPa) |            | 内摩擦角<br>$\varphi$ (°) |                  |
|----------------|---------------|-----------|--------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|------------|------------------|------------|-----------------------|------------------|
|                |               |           |              | $\mu_\gamma$                        | $\delta_\gamma$ | $\mu_E$           | $\delta_E$ | $\mu_c$          | $\delta_c$ | $\mu_\varphi$         | $\delta_\varphi$ |
| ① <sub>1</sub> | 杂填土           | 2.88      |              |                                     |                 |                   |            |                  |            |                       |                  |
| ① <sub>2</sub> | 浜填土           | 3.50      |              |                                     |                 |                   |            |                  |            |                       |                  |
| ② <sub>0</sub> | 粘质粉土<br>(红滩土) | 4.89      | 0.3          | 18.2                                | 0.07            | 8.17              | 0.1        | 8                | 0.35       | 28.5                  | 0.25             |
| ② <sub>1</sub> | 粘土            | 1.46      | 0.3          | 18.2                                | 0.07            | 4.53              | 0.1        | 23               | 0.35       | 18                    | 0.25             |
| ③              | 淤泥质粉质<br>粘土   | 4.96      | 0.35         | 17.5                                | 0.07            | 4.13              | 0.1        | 11               | 0.35       | 22                    | 0.25             |
| ④              | 淤泥质<br>粘土     | 7.17      | 0.35         | 16.6                                | 0.07            | 2.58              | 0.1        | 14               | 0.35       | 13                    | 0.25             |
| ⑤ <sub>1</sub> | 粉质粘土          | 7.31      | 0.3          | 18.0                                | 0.07            | 4.57              | 0.1        | 17               | 0.35       | 17                    | 0.25             |
| ⑤ <sub>2</sub> | 粘质粉土          | 4.05      | 0.3          | 17.8                                | 0.07            | 8.13              | 0.1        | 8                | 0.35       | 29                    | 0.25             |
| ⑤ <sub>3</sub> | 粉质粘土          | 17.23     | 0.3          | 17.9                                | 0.07            | 5.24              | 0.1        | 17               | 0.35       | 23.5                  | 0.25             |

钻孔灌注桩、支撑、垫层以及搅拌桩的物理力学参数 表 30-11

|           | 钻孔灌注桩 | 支撑   | 垫层   | 搅拌桩 |
|-----------|-------|------|------|-----|
| $E$ (MPa) | 3E4   | 3E4  | 3E4  | 2E2 |
| $\mu$     | 0.15  | 0.15 | 0.15 | 0.2 |

影响围护结构抗力不确定性因素主要有材料性能的不定性  $K_M$ 、几何参数的不定性  $K_A$ 、计算模式的不定性  $K_P$ 。由于围护结构材料性能的变异性远小于其几何参数和计算模式的变异性，可认为其主要物理力学参数（弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$ ）为常量。计算中几何参数取钻孔灌注桩直径为随机变量，服从正态分布，均值为 1，变异系数为 0.03。计算模式不定性因子概率特征参数见表 30-12。

I 的修正统计特征 ( $\xi = 0.6$ ) 表 30-12

|            | 均值   | 标准差   |
|------------|------|-------|
| $I_M$      | 0.52 | 0.175 |
| $I_P$      | 0.92 | 0.259 |
| $I_\delta$ | 2.03 | 0.764 |

开挖过程取四种工况进行迭代（工况 1 除外），工况取定同前。编制了基于 ANSYS 的 APDL 语言的各工况可靠度计算程序，为了保证计算精度，又考虑计算机的计算速度限制，各工况的模拟次数取 2000 次。

(3) 模拟数值结果的分析

图 30-10 为中远楼裂缝计算示意图，为了计算基坑开挖引起的中远楼裂缝，需要求解开挖引起的 A 点的沉降和水平位移、B 点的沉降和水平位移、C 点的沉降以及沉降曲线形式。在 ANSYS 数值计算中，通过提取 A、B、C 处对应节点的沉降和水平位移计算结果，B 处对应节点的沉降和水平位移计算结果以及 C 处对应节点的沉降计算结果，即可通过砖混结构裂缝宽度计算公式计算中远楼裂缝。由于 B 节点边界水平位移为 0，实际需要得到的节点位移为 A 点的水平和竖向位移，B 点和 C 点的竖向位移。

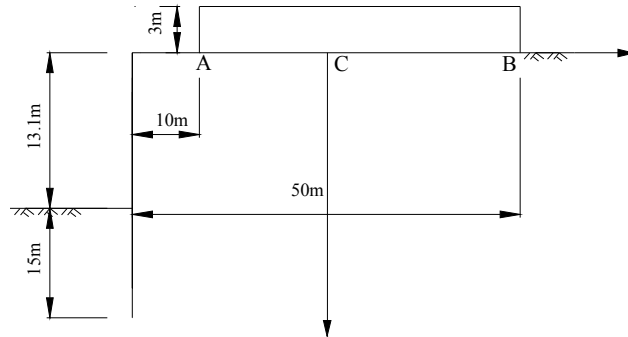
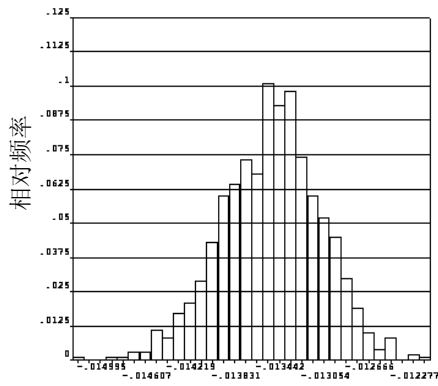


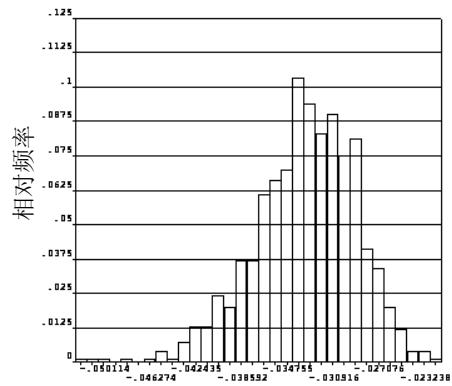
图 30-10 中远楼裂缝计算示意图

根据蒙特卡罗数值模拟结果，得到开挖中 A 点的水平和竖向位移，B 点和 C 点的竖向位移频率直方图，这里仅罗列出最后一步的情况，如图 30-11~30-14 所示。



B 处节点竖向

图 30-11 第四步开挖 B 点竖向位移频率直方图



A 处节点竖向

图 30-12 第四步开挖 A 点竖向位移频率直方图

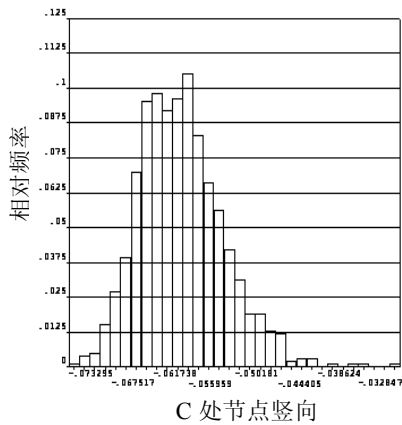


图 30-13 第四步开挖 C 点竖向位移频率直方图

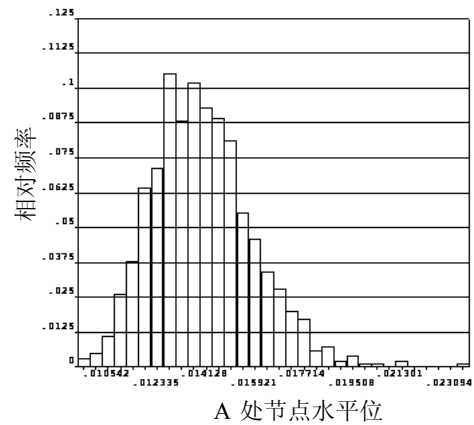


图 30-14 第四步开挖 A 点水平位移频率直方图

对于每步开挖的计算结果，根据边亦海<sup>[20]</sup>论文中的砖混结构裂缝计算方法，计算得到每步开挖工况下，裂缝宽度统计如图 30-15~30-18 所示。

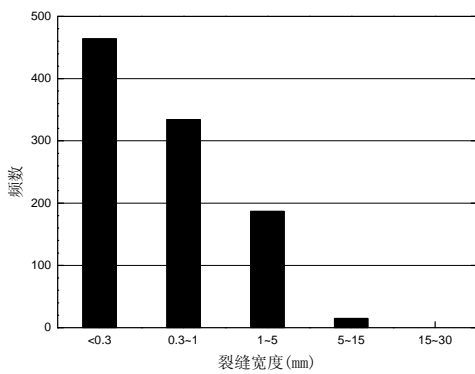


图 30-15 第一步开挖裂缝宽度直方图

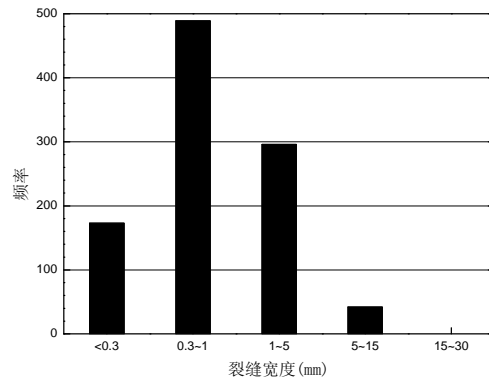


图 30-16 第二步开挖裂缝宽度直方图

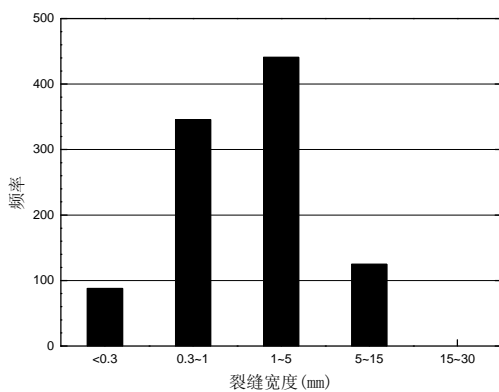


图 30-17 第三步开挖裂缝宽度直方图

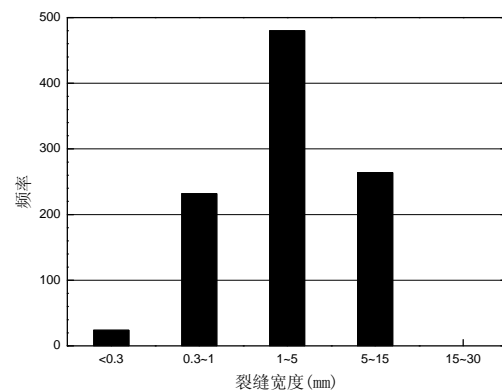


图 30-18 第四步开挖裂缝宽度直方图

### 3、风险损失的计算

基坑开挖引起的建筑物损失包括直接损失和间接损失两部分。在本案例中，仅计算建筑物的直接经济损失，主要指结构破损以及重建的费用，用损失比  $\lambda$  来表示。间接经济损

失主要指中远老楼的历史、文化无形价值等方面，在本案例分析中暂不予以考虑。建筑物直接经济损失如下式：

$$C_L = \lambda m \quad (30-8)$$

其中， $C_L$ ——建筑物直接经济损失；

$\lambda$ ——基坑开挖引起中远老楼的损失比，即基坑开挖引起中远老楼直接经济损失占其破损前的现值的比率；

$m$ ——中远老楼破损前的现值。

(1) 开挖损失比的计算

表 30-13 为建筑物损失比与裂缝宽度对应关系<sup>[20]</sup>。由此表可以得到中远楼损失比随基坑开挖如图 30-19 所示。根据实测的裂缝资料，开挖到基坑底部时，中远老楼墙体出现十几条 1~2.5mm 宽度不等的裂缝，平均裂缝宽度 1.75mm，损失比为 15.625%。可以看到中远老楼受基坑开挖影响处于功能破坏，未达到结构破坏。

建筑物损失比与裂缝宽度的关系 表 30-13

| 损失分类 |          | 美观破坏  | 功能破坏  | 结构破坏  | 倒塌     |
|------|----------|-------|-------|-------|--------|
| 砖混结构 | 裂缝宽度(mm) | 0.3-1 | 1-5   | 5-15  | 15-30  |
|      | 损失比(%)   | 0-10  | 10-40 | 40-80 | 80-100 |
| 框架结构 | 裂缝宽度(mm) | 0.3-1 | 1-3   | 3-10  | 10-25  |
|      | 损失比(%)   | 0-10  | 10-40 | 40-70 | 70-100 |
| 室内财产 |          | 0-4   | 4-20  | 20-40 | 40-90  |

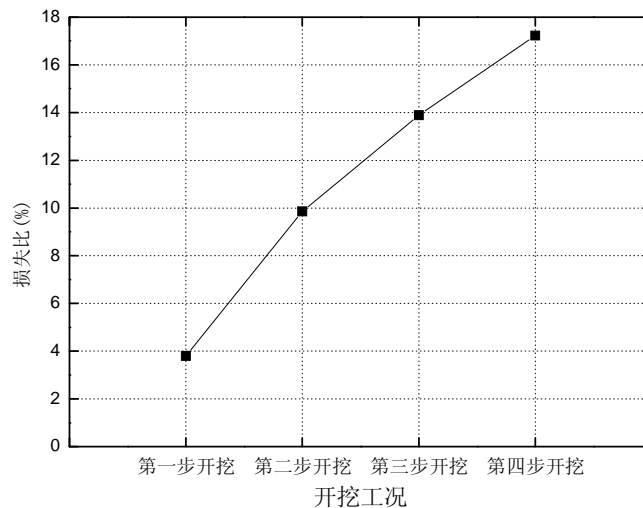


图 30-19 中远楼损失比随基坑开挖变化图

(2) 中远老楼现值的评价

对于中远老楼作为上海市优秀保护建筑而言，采用成本法估价比较适用，但中远老楼已有百年历史，属于超期服役建筑，按一级砖混结构折旧计算方法，50年后残值率为 2%，



按这种计算方法，中远老楼价值为零，这显然不符合实际情况。因此，采用综合因素计算法来评估中远老楼现值，计算公式如下：

$$P = (A + D - Y) \times (1 + w - s) \times Z / (G + Z) + Y \quad (30-9)$$

式中， $P$ ——建筑物估价，万元；  
 $A$ ——建筑物原价，万元；  
 $D$ ——已在该建筑物投入的更改费用，万元；  
 $Y$ ——预计该建筑物净残值，万元；  
 $G$ ——已使用年限，年；  
 $Z$ ——尚可使用年限，年；  
 $W$ ——物价上涨指数；  
 $s$ ——无形磨损指数。

由于缺乏中远老楼的相关实际资料，一些数据只能采用假设的方法得到。假设中远老楼原造价为 500 万元，在使用过程中投入维修费用 200 万元，房屋现残值为 100 万元，尚可使用 20 年，年平均物价上涨指数为 4%，年平均无形磨损指数为 2%，则根据公式(30-9)，

$$P = (500 + 200 - 100) \times (1 + 4\% - 2\%) \times 20 / (98 + 20) + 100 = 203.7 \text{ 万}$$

根据图 30-19 和中远老楼现值计算结果，得到中远楼风险损失随基坑开挖变化图，如图 30-20 所示。

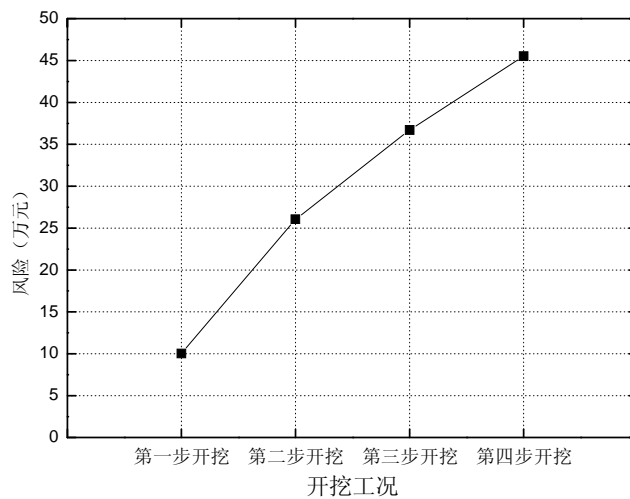


图 30-20 中远楼风险损失随基坑开挖变化图

从图 30-20 可以看出，随着土体开挖深度的加大，中远楼的风险损失逐渐加大，从第一步开挖损失 10.03 万元，到第二步开挖的 26.05 万元，到第三步开挖的 36.71 万元，一直到第四步开挖损失达 45.52 万元。在最不利工况下，中远老楼的破坏风险损失为 45.52 万元，约占中远老楼现值的 22.34%。

## 参考文献

- [1] L J Endicott. Nicoll Highway Lessons Learnt[C]. Key Note Lecture 3. International Conference on Deep Excavations 28-30 June 2006, Singapore.
- [2] Arthur Casagrande. Role of “Calculated Risk” in Earthwork and Foundation Engineering [J]. ASCE: JSMFD, 1965, Vol.91(SM4): 1-40.
- [3] J.B. BURLAND. Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation [J]. Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed.), 1997, Balkema, Rotterdam, 1189-1201.
- [4] S.J. BOONE. Ground Movement Related Building Damage [J]. J. of Geotech. Eng., ASCE, 1996, Vol.122(11): 886-896.
- [5] S.J. BOONE. Ground-Movement-Related Building Damage: Closure [J]. J. of Geotech. And Geoenvironmental Eng., ASCE, 1998, Vol.124(5): 463-465.
- [6] S.J. BOONE, B. GARROD, and P. BRANCO. Building and Utility Damage Assessments, Risk and Construction Settlement Control [J]. Tunnels and Metropolises, Balkema, 1998: 243-248.
- [7] S.J. BOONE, J. WESTLAND, and R. NUSINK. Comparative Evaluation of Building Responses to an Adjacent Braced Excavation [J]. Canadian Geotech. J., 1999, Vol.36: 210-223.
- [8] Boone, S.J. Assessing construction and settlement-induced building damage: a return to fundamental principles [C]. Proceedings, Underground Construction, Institution of Mining and Metallurgy, London, 2001, 559-570.
- [9] Finno, R. J., Bryson, L. S., and Calvello, M. Performance of a stiff support system in soft clay [J]. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2002, Vol.128(8): 660-671.
- [10] Faber M H. Risk and safety in civil Engineering[R]. Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland, 2001.
- [11] Staveren MTh van, Knoeff JG. The Geotechnical Baseline Report as risk allocation tool [C]. In: Proceedings of EurEnGeo, Liege, 2004, Vol.104: 777-785.
- [12] Martin Th van Staveren, Ton J. M. Peters. Matching Monitoring, Risk Allocation and Geotechnical Baseline Reports [C]. In: Proceedings of EurEnGeo, Liege, 2004, Vol.104: 786-791
- [13] M.Th. van Staveren & M.T. van der Meer. Educating Geotechnical Risk Management [A]. First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk[C], 2007.
- [14] 范益群, 钟万颢, 刘建航. 时空效应理论与软土基坑工程现代设计概念[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(增 1): 49-53.
- [15] 李惠强, 徐晓敏. 建设工程事故风险路径、风险源分析与风险概率估算[J]. 工程力学, 2001 增刊: 716-719.
- [16] 仲景冰, 李惠强, 吴静. 工程失败的路径及风险源因素的 FTA 分析方法[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003, Vol.20 (1): 14-17.
- [17] 杨子胜, 杨建中, 杨毅辉. 基坑工程项目风险管理研究[J]. 科技情报开发与经济, 2004, Vol.14(9): 205-207.
- [18] 黄宏伟, 边亦海. 深基坑工程施工中的风险管理[J]. 地下空间与工程学报[J]. 2005, Vol.1(4): 611-614.
- [19] 廖少明, 刘朝明, 王建华等. 地铁深基坑变形数据的挖掘分析与风险识别[J]. 岩土工程

- 学报, 2006, Vol.28 (Supp): 1897-1901.
- [20] 边亦海. 基于风险分析的软土地区深基坑支护方案选择[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [21] Jerry S.Rosenbloom. A Case Study in Risk Management. PrenticeH all, 1972.
- [22] 李中斌著. 风险管理解读. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [23] 张少夏. 隧道工程风险分析方法及工期损失风险研究[硕士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [24] 陈龙. 城市软土盾构隧道施工期风险分析与评估研究[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [25] 中华人民共和国建设部. 地铁及地下工程建设风险管理指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [26] 汪元辉. 安全系统工程[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999: 118 - 197.
- [27] 蒋军成, 郭振龙. 安全系统工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 48~54.
- [28] 梅启智等. 系统可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 82 - 85.
- [29] 吴静. 深基坑支护结构事故预警系统研究[硕士学位论文 D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [30] 边亦海, 黄宏伟. SMW 工法支护结构失效概率的模糊事故树分析[J]. 岩土工程学报, 2006, Vol.28(5): 644-648.
- [31] 曾兴. 深基坑支护结构系统事故分析[硕士学位论文 D]. 武汉: 华中科技大学, 2000.
- [32] 李洪兴, 汪培庄. 模糊数学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.