

# 深基坑支护结构设计与施工安全风险评估

丁磊

宁波市建设集团股份有限公司 浙江 宁波 315000

**摘要:**我国城市化加速,地下空间开发深入,深基坑工程数量、规模、深度增加,周边环境复杂化。其作为临时性地下结构,稳定性关乎主体工程、周边建(构)筑物及人民生命财产安全,但工程具有隐蔽性、复杂性和不确定性,失稳破坏后果严重。本文系统探讨深基坑支护结构设计原理、常用类型及适用条件,构建施工安全风险评估体系。先阐述工程特点与常见风险源,再详细分析排桩等主流支护结构设计要点。接着论述基于风险矩阵法和层次分析法结合的评估模型,对五大类风险因素识别、分析与量化评价。最后针对高风险环节提出综合风险控制策略。研究表明,将精细化设计与动态、定量风险评估深度融合,是保障深基坑工程安全高效实施的关键。

**关键词:**深基坑;支护结构;安全风险;风险评估;风险控制

## 引言

21世纪以来,中国大城市中心区土地紧张,向地下拓展空间成为缓解发展矛盾的关键,地铁等地下工程涌现,催生大量深基坑工程。按规程,开挖超5米(宁波地区是超过4米)或地质、周边环境复杂的基坑为深基坑,如今2层、3层地下室设计也日益增多。深基坑工程综合性、高风险性强,核心是保自身稳定、控制坑壁变形、保护周边环境。但因其临时性,部分项目重视不足,加上地下工程特性,施工充满不确定性与潜在风险。近年来多起坍塌事故造成巨大损失,凸显安全问题严峻。传统基坑设计依赖经验公式和静态分析,难以反映施工动态变化。现代风险管理理论强调全生命周期潜在威胁的系统应对。将二者结合构建风险管控闭环,对提升安全水平意义重大。本文将剖析风险来源、详述支护结构设计、构建风险评估模型、提出控制对策,为工程实践提供参考。

## 1 深基坑工程的主要特点与风险源分析

深基坑工程具有多方面特点与风险。其工程地质与水文地质条件极为复杂,地层由多种土层或岩层交错,物理力学参数变异性大,地下水会引发渗透破坏,且勘察资料存在局限性,使设计与实际有偏差。支护结构体系失效模式多样,有整体失稳、踢脚破坏、管涌/流土、支撑系统失稳、结构强度破坏及过大变形等。周边环境敏感制约明显,多位于城市建成区的深基坑紧邻重要基础设施,这些设施对变形敏感,基坑开挖引发的土体变化若控制不当,后果严重<sup>[1]</sup>。同时,施工过程动态性强,开挖改变应力场和位移场,支护结构安装、施工质量、降水、监测等环节都影响安全,再加上恶劣天气、交叉作业干扰、管理松懈、人员技能不足等人为和外部因素,进一步增

加了工程风险。

## 2 深基坑支护结构设计要点

### 2.1 设计基本原则与流程

设计前必须进行详细的岩土工程勘察,获取准确的地层分布、物理力学参数及水文地质资料。设计流程通常包括:确定基坑安全等级→选择支护结构方案→进行稳定性验算(整体稳定、抗倾覆、抗隆起、抗渗流)→进行结构承载力计算(内力、变形)→绘制施工图并提出监测要求。其中,基坑安全等级(一级、二级、三级)是决定设计标准和变形控制指标的关键,需根据基坑深度、周边环境重要性等因素综合判定。

### 2.2 主要支护结构类型及其设计考量

#### 2.2.1 排桩支护(钻孔灌注桩、SMW工法桩等)

排桩是应用最广泛的支护形式之一。设计核心在于确定桩径、桩长、桩间距及嵌固深度。桩长需满足抗倾覆和抗隆起稳定要求;桩间距过大会导致桩间土拱效应减弱,易发生漏土;过小则不经济。对于软土地区,常采用止水帷幕(如三轴搅拌桩、高压旋喷桩)与排桩结合,形成“挡”、“止”一体化的复合支护体系。SMW工法桩(型钢水泥土搅拌桩)则兼具挡土和止水功能,且型钢可回收,环保经济,适用于淤泥质土等软弱地层。

#### 2.2.2 地下连续墙

地下连续墙具有刚度大、整体性好、防渗性能优异、可作为主体结构外墙(两墙合一)等优点,特别适用于超深、超大基坑及对变形控制要求极高的场合(如紧邻地铁)。设计时需重点验算墙体在不同工况下的内力(弯矩、剪力、轴力)和变形,并进行槽壁稳定分析。接头形式(如锁口管、工字钢接头)的设计至关重要,是防渗的薄弱环节。

### 2.2.3 土钉墙与复合土钉墙

土钉墙是一种原位土体加固技术，通过在基坑边坡中钻孔、插入钢筋（土钉）并注浆，与喷射混凝土面层共同工作。其成本低、施工便捷，但对土质有一定要求（不宜用于软土、淤泥质土），且变形相对较大<sup>[2]</sup>。当土质较差或基坑较深时，常与预应力锚杆、微型桩等结合，形成复合土钉墙，以提高其承载力和控制变形能力。

### 2.2.4 内支撑体系

内支撑（水平支撑）主要用于平衡两侧支护结构所受的土压力，减小支护结构的跨度和变形。常用的有钢筋混凝土支撑和钢管支撑。前者刚度大、变形小，但施工周期长、拆除困难；后者安装拆除快捷、可施加预应力，但刚度相对较小。设计时需进行详细的平面布置（对撑、角撑、环撑等）和竖向布置（支撑标高），并对支撑构件进行强度、稳定性和节点连接的验算。预应力的施加是控制早期变形的有效手段。

### 2.2.5 锚杆（索）支护

锚杆通过将拉力传递至深部稳定地层来平衡支护结构所受的侧向土压力。其优点是不占用基坑内部空间，便于土方开挖和主体结构施工。但其成功与否高度依赖于锚固

段地层的性质，且存在腐蚀耐久性问题。在软土、未经处理的回填土或高水位地区，锚杆的应用受到限制。设计需精确计算锚杆的轴向拉力、自由段和锚固段长度，并验算其抗拔承载力。

## 3 深基坑施工安全风险评估模型构建

设计是基础，而动态的风险评估则是施工过程中的“安全雷达”。本文提出一种基于风险矩阵法与层次分析法（AHP）相结合的综合评估模型。

### 3.1 风险评估基本框架

风险（R）可定义为风险事件发生的可能性（P）与其后果严重程度（C）的乘积，即 $R = P \times C$ 。评估流程如下：（1）风险识别：全面梳理施工过程中可能出现的所有风险事件。（2）风险分析：分别对每个风险事件的可能性和后果进行定性或定量分析。（3）风险评价：利用风险矩阵，将分析结果进行综合，确定风险等级。（4）风险应对：针对不同等级的风险，制定相应的控制措施。

### 3.2 风险因素识别与指标体系建立

基于前述风险源分析，将深基坑施工安全风险分解为以下五个一级指标，并进一步细化为二级指标：

表1：深基坑施工安全风险评估指标体系

一级风险指标	二级风险指标
A.地质与水文条件风险	A1:地层突变与不良地质
	A2:土体力学参数离散性
	A3:地下水丰富程度与水位变化
	A4:渗透破坏（流砂、管涌）风险
B.支护结构自身风险	B1:支护结构选型合理性
	B2:结构计算模型准确性
	B3:关键构件施工质量
	B4:止水帷幕有效性
C.周边环境风险	C1:邻近建（构）筑物的重要性与距离
	C2:重要地下管线的类型、埋深与距离
	C3:道路、地铁等交通设施的敏感性
D.施工过程风险	D1:开挖与支护的时空顺序合理性
	D2:降水方案有效性及对周边影响
	D3:恶劣天气（暴雨、台风）应对能力
	D4:交叉作业协调与安全管理
E.监测与应急管理风险	E1:监测方案的全面性与精度
	E2:监测数据的实时性与预警机制
	E3:应急预案的完备性与可操作性

### 3.3 基于AHP的权重确定

不同风险因素对最终安全的影响程度不同，需赋予权重。AHP法通过构建判断矩阵，将专家经验定量化。

步骤1：构造判断矩阵。邀请多位资深岩土工程师，对同一层级的指标进行两两比较，按照1-9标度法（1表示同等重要，9表示极端重要）打分。步骤2：计算权重向量。

求解判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量,并进行归一化处理,得到各指标的权重<sup>[3]</sup>。步骤3:一致性检验。计算一致性比率(CR),若 $CR < 0.1$ ,则认为判断矩阵具有满意的一致性,权重分配合理。例如,通过AHP计算,可能得出一级指标的权重为: $W_A = 0.30, W_B = 0.25, W_C = 0.20, W_D = 0.15, W_E = 0.10$ 。这表明地质水文条件和支护结构自身是首要关注的风险点。

### 3.4 风险矩阵评价

对每个二级指标,分别评定其可能性(P)和后果(C)等级。通常分为5级:

可能性(P): 1-极低, 2-低, 3-中等, 4-高, 5-极高。

后果(C): 1-轻微(无人员伤亡,经济损失小), 2-一般, 3-较大(有人员轻伤,经济损失中等), 4-重大(有人员重伤,经济损失大), 5-灾难性(群死群伤,巨大经济损失及社会影响)。

将P和C的等级代入风险矩阵,即可得到风险值R,并划分风险等级:

低风险(蓝色):  $R \leq 4$ , 常规管理即可。

一般风险(黄色):  $5 \leq R \leq 9$ , 需加强监控。

较大风险(橙色):  $10 \leq R \leq 16$ , 需制定专项措施。

重大风险(红色):  $R \geq 17$ , 必须立即停工整改,采取最高级别防控措施。

### 3.5 综合风险值计算

项目的综合风险值( $R_{total}$ )可通过加权求和得出:

$$R_{total} = \sum(W_i \times R_i)$$

其中, $W_i$ 为第*i*个一级指标的权重, $R_i$ 为该一级指标下所有二级指标风险值的加权平均或最大值。 $R_{total}$ 可作为项目整体风险水平的量化表征,指导资源的倾斜和管理重点的聚焦。

## 4 深基坑施工安全风险控制对策

风险评估的最终目的是为了有效控制风险。针对评估结果,应采取多层次、全过程的综合控制策略。

### 4.1 源头控制: 强化精细化设计

一是深化勘察: 在关键区域加密勘探点,必要时采用物探、静力触探等补充手段,提高地质模型的准确性。二是数值模拟: 广泛应用有限元(FEM)或有限差分(FDM)等数值分析软件(如MIDAS/GTS, PLAXIS),模拟基坑开挖全过程,预测变形和内力,优化设计方案。三是冗余设计理念: 对于关键部位或高风险环节,适当提高安全系数,或设置备用措施(如备用降水井、应急支撑位置预留)。

### 4.2 过程控制: 推行信息化施工(IMS)

信息化施工是连接设计、施工与风险控制的核心纽带。(1)健全监测体系: 严格按照设计要求布设监测点,监测内容应包括支护结构顶部水平位移、深层水平位移(测斜)、周边地表沉降、邻近建筑物倾斜、支撑轴力、地下水位、孔隙水压力等。(2)实时数据反馈: 建立自动化监测平台,实现数据的自动采集、传输、分析和预警。设定“预警值”和“报警值”,一旦数据异常,立即启动相应级别的响应程序<sup>[4]</sup>。(3)动态设计与调整: 将监测数据及时反馈给设计和施工单位,根据实际工况对后续施工步序、支撑预加力、降水速率等进行动态调整,实现“动态设计、信息化施工”。

### 4.3 应急管理: 完善预案与演练

一是编制专项应急预案: 针对评估出的重大风险(如管涌、支撑失稳、邻近建筑突发沉降),制定详细的、可操作的应急预案,明确组织架构、职责分工、处置流程、物资储备和联络方式。二是定期应急演练: 组织相关人员进行实战演练,检验预案的有效性,提高应急处置能力和协同作战水平。

## 5 结语

本文系统地论述了深基坑支护结构的设计要点,并创新性地构建了一套融合AHP权重分析与风险矩阵评价的综合安全风险评估模型。该模型能够将抽象的风险概念转化为可量化、可视化的指标,有助于精准识别高风险环节。研究表明,保障深基坑安全不能仅依赖于单一的技术手段,而必须建立一个覆盖“精细化设计—动态化评估—信息化施工—全过程管理”的立体化风险防控体系。未来,随着物联网、大数据、人工智能等技术的深入应用,深基坑风险评估将朝着更加智能化、预测化的方向发展。通过构建数字孪生基坑模型,实现对工程状态的全要素感知、全周期模拟和全风险预判,将是提升我国深基坑工程安全管理水平的必由之路。

## 参考文献

- [1]王醒宇.深基坑支护结构设计与施工关键技术分析[J].中国建筑金属结构,2025,24(17):111-113.
- [2]夏祺.建筑工程深基坑支护结构设计研究[J].价值工程,2025,44(16):55-58.
- [3]郭中华.复杂地质条件深基坑支护施工安全风险评估方法[J].四川水泥,2024,(07):171-173.
- [4]王珏.土木工程深基坑支护施工技术与安全管理策略[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).江西昌铭建设工程有限公司,2025:1172-1174.