

大型桩基工程安全风险识别与分级管控体系构建研究

黄少东

上海建科工程咨询有限公司 上海 202150

【摘要】：大型桩基工程因具有深度大、施工工期紧以及周边相邻环境复杂等特点，致使其安全风险处于交织叠加的状态。本研究以多种类型的工程实践为基础，对工艺操作维度、周边环境维度以及现场管理维度的风险源展开系统梳理，进而建立起多层次的评价指标体系，同时运用LEC法来实施半定量的风险分级工作，并且进一步设计出针对不同风险等级的差异化动态管控策略，同时依靠BIM模拟技术、监测预警机制以及总包协同机制来为这些策略提供支撑。此体系实现了从凭借经验进行判断朝着依靠数据驱动的方向转变，也实现了从笼统的管控模式朝着精准的施策模式的转变，从而为高风险的桩基工程施工提供了科学且有效的风险管理框架。

【关键词】：桩基工程；安全风险；LEC评价法；风险分级；动态管控

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.020

引言

在城市化进程朝着纵深方向不断推进的背景下，规模宏大、工期紧迫、技术复杂且环境敏感特征日益凸显的大型桩基工程，常常在城市核心区域或者邻近重要交通枢纽与既有建筑群的地方呈现出密集分布的状态，使得施工场地往往处于异常局促的状况，不仅重型机械与物料的运输组织面临着诸多困难，而且深基坑开挖以及桩基施工还容易对紧邻的处于运营状态的地铁隧道、高架线路、市政管线以及居民区造成显著的变形与安全风险，与此同时，工程本身还不得不面对深厚软土、高地下水位等不利的地质条件，以及超长结构裂缝控制、大体积混凝土浇筑、装配式构件精准安装等工艺方面的难题，而多区段流水交叉作业、大型群塔协同运作以及多专业分包界面管理等情况的存在，又进一步让现场协同与安全控制的复杂程度有所增加。然而传统的、较多依赖个体经验与定性判断的安全管理模式，在应对如此交织叠加并且处于动态变化之中的系统性风险时，常常会显得力不从心，难以实现对风险的超前精准辨识以及全过程的动态受控，因此迫切需要构建一套基于工程实践数据、将定量分析与差异化策略相融合的体系化管控框架。

1 大型桩基工程安全风险因素识别

1.1 施工工艺与操作风险识别

施工工艺风险直接关联工程实体质量与作业安全，钻孔灌注桩施工在深厚淤泥质粉质黏土层中成孔，泥浆护壁性能的稳定性至关重要，泥浆比重低于1.20极易引发孔壁缩颈乃至塌孔，钢筋笼安装时若焊接不牢或下放速度失控，在混凝土浇筑初期易受顶托力影响产生上浮，导管连接密封不严或埋深计算失误，则直接导致导管进水或堵管，形成桩身夹泥断桩缺陷^[1]。

预制静压桩施工产生的挤土效应不可忽视，在桩距密集区域压桩，孔隙水压力急剧升高可能造成已施工桩体上浮、倾斜，桩身接头焊接冷却时间不足便继续施压，接头会成为薄弱环节，主要施工工艺风险关键参数识别如表1所示。

表1 主要施工工艺风险关键参数识别

风险类别	关键风险点	典型控制参数/现象
钻孔灌注桩	塌孔与缩颈	在粉砂层中，泥浆比重<1.25时塌孔风险显著增加
预制桩施工	挤土效应	压桩速度>2 m/min时，距桩心1倍桩径内的土体水平位移可达30 mm
深基坑开挖	支撑轴力超限	混凝土支撑轴力监测值持续超过设计值的80%且无收敛趋势

1.2 周边环境与地质风险识别

工程外部环境及地质条件是风险管控的边界约束，邻近运营轨道交通设施施工构成最高等级风险，基坑西侧开挖边线距轨道交通8号线高架外边线仅21.7 m，距其柱墩基础约23.9 m，该侧基坑环境保护等级定为一类，要求围护结构变形控制在30 mm以内，任何超挖或支撑延迟都可能扰动地层，引发轨道结构附加变形。密集分布的市政管线构成另一重大威胁，基坑东侧恒南路下埋设有信息、给水、电信、雨水等多条管线，其中一条Φ500给水管距基坑仅8.1 m，其埋深0-0.8 m，对基坑变形极为敏感，土体位移超过10 mm即可能引起管道接口渗漏甚至破裂，具体的周边环境效果如图1所示，本基坑围护图纸将基坑划分为I区、II区、III区，其中I区分为I-1区、I-2区，

作者简介：黄少东（1989-），男，汉族，安徽亳州人，学历：本科，职称：高级工程师，研究方向：工程管理。

东侧 I 区基坑临近恒南路,环境保护要求一般,采用 SMW 工法桩+鱼腹梁钢支撑的围护形式,中间区段 II 区基坑环境保护要求相对一般,采用 SMW 工法桩+一道钢筋砼支撑的围护形式。西侧 III 区基坑邻近轨道交通 8 号线,环境保护要求较高,采用钻孔灌注桩+一道钢筋砼支撑的围护形式。

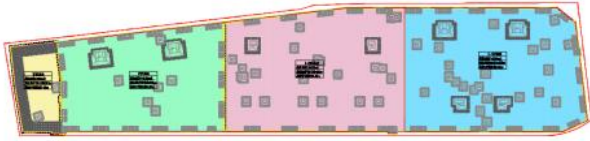


图 1 周边环境效果图

1.3 现场管理与协同风险识别

多界面、多要素的现场协同管理是风险滋生的重要温床,本工程基坑划分为 I、II、III 三个大区,其中 I 区又分为 I-1 和 I-2 小区,围护设计明确要求 I-1 和 II 区结构施工期间 I-2 区处于开挖阶段, I-2 区施工时 III 区仍在开挖,这种多区段、多工况的立体交叉作业,对施工平面动态布置与交通流线组织构成严峻考验,材料堆场与加工场地需随施工阶段在已完成底板、顶板及未开挖区域间辗转腾挪,任何协调失误都将导致工序脱节或相互干扰^[2]。大型施工机械的高密度集中布置带来复杂的安全管控问题,现场同时投入 8 台塔吊进行群塔作业,塔吊基础采用钻孔灌注桩结合钢格构柱形式,其平面位置必须经过严密计算,满足全覆盖要求的同时,确保相邻塔吊起重臂与平衡臂在回转半径内不发生碰撞,高处作业指挥依赖对讲机通讯,信号干扰或指令错误可能引发严重事故。

2 大型桩基工程安全风险分级评价模型构建

2.1 风险评价指标体系设计

为将定性风险识别转化为可量化比较的评价基础,需建立结构化的指标体系。体系目标层为大型桩基工程综合安全风险等级。准则层依据风险源属性划分为施工工艺操作风险、工程周边环境风险、施工现场管理风险三大类^[3]。指标层则从各准则中抽取最具代表性且可测量的关键因素,例如工艺操作准则下的“成孔工艺稳定性”“大型构件吊装难度”,周边环境准则下的“敏感构筑物最小净距”“水文地质复杂指数”,现场管理准则下的“多工种交叉作业密度”“极端天气影响系数”,大型桩基工程安全风险评价指标体系如表 2 所示。

表 2 大型桩基工程安全风险评价指标体系

目标层	准则层	指标层	量化基准(示例)
安全风险	工艺操作 (B1)	成孔工艺稳定性(C1)	根据土层条件与工艺成熟度评分,1—5分
安全风险	周边环境 (B2)	敏感构筑物最小净距(C2)	<10 m 计 5 分, 10-20 m 计 3 分, >20 m 计 1 分

目标层	准则层	指标层	量化基准(示例)
安全风险	现场管理 (B3)	交叉作业密度 (C3)	同时作业工种>3个计5分,2~3个计3分,≤1个计1分

2.2 基于 LEC 法的风险定量分级

作业条件危险性评价法提供了一种将事故可能性、人员暴露频率及潜在后果综合量化的半定量工具,事故可能性(L)取值依据事故发生的频率或概率,对于“极不可能发生”的情况赋值为 0.1,对于“完全意外、不可预测”的情况赋值为 10,中间值如 1、3、6 对应“可能性小”“可能”“相当可能”等层级,其赋值需参考同类工程历史事故统计与专家经验。暴露于危险环境的频繁程度(E)描述人员在危险环境中出现的时间比例,持续暴露赋值为 10,每天工作时间内暴露赋值为 6,每周一次或偶然暴露赋值为 3,每年几次暴露赋值为 2,罕见暴露赋值为 0.5。事故后果的严重性(C)衡量可能造成的人员伤亡与财产损失,可导致多人死亡或重大财产损失(超过 500 万元 RMB)的后果赋值为 100,导致一人死亡或较大财产损失(100 万元 RMB 至 500 万元 RMB)赋值为 40,导致重伤或一定财产损失(10 万元 RMB 至 100 万元 RMB)赋值为 15,仅需医疗处理或轻微财产损失(低于 10 万元 RMB)赋值为 7,轻微可能需处理则赋值为 3。风险值(D)为三者的乘积,其计算公式为:

$$D = L \times E \times C \quad (1)$$

式(1)中,D为风险分值,L为事故发生的可能性分值,E为暴露于危险环境的频繁程度分值,C为事故可能造成的后果严重性分值。应用时需将指标体系中的各指标评价结果映射至 L、E、C 的评判维度,例如“敏感构筑物最小净距”指标评分高,主要影响事故后果 C 值;“交叉作业密度”指标评分高,则同时增大事故可能性 L 和暴露频率 E 值。

2.3 风险等级划定与清单形成

计算得出的风险值 D 需通过预设阈值进行分级以指导差异化管控,通常将 $D \geq 320$ 的风险定为重大风险, $160 \leq D < 320$ 定为较大风险, $70 \leq D < 160$ 定为一般风险, $D < 70$ 定为低风险。该阈值划分借鉴了行业通用标准并结合了大型工程风险承受能力的调整^[4]。计算 $D = 3 \times 3 \times 40 = 360$,同样属于重大风险。依据此方法对全部识别出的风险进行逐项评价与计算,筛选出所有 D 值大于等于 160 的风险项,汇总形成《项目重大/较大安全风险动态清单》,该清单需明确风险点描述、所在部位、风险等级、LEC 赋值依据及计算分值,作为后续动态管控的直接输入与跟踪对象,基于 D 值的风险等级划分标准见表 3。

表3 基于D值的风险等级划分标准

风险等级	风险分值 (D)	管控颜色标识
重大风险	$D \geq 320$	红
较大风险	$160 \leq D < 320$	橙
一般风险	$70 \leq D < 160$	黄
低风险	$D < 70$	蓝

3 面向风险等级的动态化管控体系构建

3.1 分级管控体系总体框架

构建有效的安全风险管控体系必须实现从静态评估向动态循环管理的转变，该体系遵循“识别—评价—定策—管控”的闭环逻辑，其核心流程始于对工程全要素的持续性风险辨识与信息收集。随后将识别出的风险点输入基于LEC法的定量评价模型，计算得出量化的风险等级。依据不同的风险等级，系统自动匹配并触发预设的差异化管控策略与资源配置方案，包括专项方案编制与审批层级、监测监控的频次与精度、检查验收的严格程度以及应急预案的等级。所有管控措施的执行状态、监测数据与现场检查结果均实时反馈至体系中枢，通过预设的阈值与规则进行动态研判。一旦风险状况发生变化，如因施工进度、环境条件改变或监测数据异常导致风险等级跃升或降级，体系将立即启动新一轮的评价与策略调整流程，确保管控措施始终与当前风险水平相匹配。在该框架下，各参与方职责明确：建设单位负责审批重大风险管控方案并监督资源投入，安全风险分级动态管控体系运行流程如图2所示。

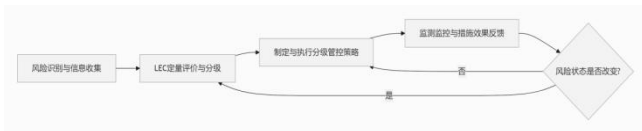


图2 安全风险分级动态管控体系运行流程图

3.2 差异化管控策略与实施

风险分级管控的精髓在于资源配置与管控强度的差异化，对于被评定为重大等级的风险，强制性要求编制独立成册的专项安全方案，并组织不少于5名相关专业专家进行论证，方案中必须包含详细的施工工况模拟、计算书与应急预案。例如，对于邻近地铁侧的深基坑开挖，专项方案需明确分块开挖顺序、支撑施加预紧力数值、限时完成底板浇筑的时间要求，并建立自动化监测系统，对围护结构水平位移、支撑轴力、地铁

隧道沉降与收敛进行实时监测，数据采集频率不低于1次/小时，预警值设定为控制值的60%，报警值设定为80%，一旦超限立即启动应急响应。项目负责人必须对关键工序执行带班检查并签字确认。针对较大等级风险，需编制专项施工方案，由项目技术负责人审批，在作业前进行可视化、可操作的交底，交底需覆盖全体作业人员并留存影像记录。过程检查频次提高至每日一次，并对验收标准进行强化^[5]。现场需设置统一的橙色警示标识，标明风险内容与责任人。对于一般及低风险，管控重点在于标准化与常态化，严格执行既定的标准作业程序，将其纳入每日安全巡检的必查项，并通过班前会、安全培训等形式进行持续性的意识教育。

3.3 体系运行的支持与保障机制

体系的有效运转依赖于技术、应急与管理三方面的坚实保障，技术保障的核心是数字化预控与实时感知。应用BIM技术进行施工全过程的四维模拟，在虚拟环境中提前发现群塔作业碰撞、PC构件吊装路径干涉、施工工序冲突等问题，优化方案。将物联网监测数据（如深层水平位移、沉降、轴力）与BIM模型关联，实现安全状态的动态可视化。应急保障要求建立分级响应的预案体系，针对重大风险必须编制专项现场处置方案，并配备专用的应急物资与设备，如针对基坑涌水涌砂风险，现场需常备足量的沙袋、水泥、水玻璃及大功率抽水泵，每季度至少组织一次实战化演练，检验流程、锻炼队伍。管理保障着力于组织协同与信息集成，强化工程总承包单位的统一指挥与协调权威，建立覆盖所有分包单位的安全管理网络，明确接口与责任。利用智慧工地平台集成视频监控、环境监测、塔吊防碰撞、人员实名制、风险清单等多元信息，当监测数据超限、人员进入危险区域或风险管控措施逾期未完成时，平台自动向相关责任人推送预警信息，形成“监测—预警—处置—反馈”的线上闭环，将动态管控的理念固化为可追溯、可考核的管理行为。

4 结语

本研究因城市复杂环境中大型桩基工程存在安全风险交织叠加以及传统管理方法效能不足的现状，故而系统构建起一套将风险精准识别、半定量科学分级和差异化动态管控集于一体的技术与管理体系，该体系通过对多项目工程实践数据进行融合的方式，把LEC评价法和结构化指标体系相结合，以此达成风险从定性经验判断朝着定量数据评估的转变，并且依据风险等级去匹配差异化的管控策略与资源配置，同时借助数字化平台和闭环管理机制来对体系的有效运行与动态调整加以保障。此研究成果把安全管理从被动响应提升至主动预控与过程精准受控的层面，为类似的高风险桩基工程提供了具有可复制性与可操作性的系统性解决方案，对于推动行业安全管理向标准化、精细化和智能化方向发展而言具备明确的实践价值。

参考文献:

- [1] 陈龙洋,吴园平,袁鹏举,等. 基于小波分析的桩基低应变检测技术研究[J].土工基础,2026,40(01):119-122.
- [2] 冯彬,高文生,杨晓冬. 建筑桩基工程“降碳”技术路径探索[J/OL].岩土工程技术,1-6[2026-02-28].
- [3] 吕海龙,沈宏远,曹燕娟. 风力发电机组桩基工程施工技术优化研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(01):110-112.
- [4] 李右名. 港口码头桩基施工技术与质量监理体系构建研究[J].质量与市场,2026,(01):42-44.
- [5] 张高峰. 住宅建筑工程桩基施工质量控制[J].城市建设理论研究(电子版),2026,(03):127-129.