

跨江大桥深水基础施工安全风险评估与应急响应优化

罗超

四川省蜀南建设工程质量检测有限公司，四川省自贡市，643200；

摘要：跨江大桥建设中的深水基础施工由于作业环境复杂、水域不稳定及施工深度大，始终是桥梁工程中安全风险最为集中的环节之一。风险来源涵盖地质条件、水文变化、施工装备、人员操作及外部不可控因素。本文针对当前深水基础施工中常见的安全隐患类型，构建系统化风险评估指标体系，并引入模糊层次分析法与灰色系统理论，对风险因素进行定量与定性相结合的分级判定。在此基础上，结合某实际工程案例进行模型应用分析，提出科学评估路径。为提升风险应对效率，本文进一步探讨应急响应机制的优化路径，包括响应流程的结构重构、资源调配机制完善与现场处置能力建设等内容。研究成果可为类似水上基础工程提供风险管控与应急管理的技术参考。

关键词：深水基础；跨江大桥；施工风险；模糊评估；应急响应

DOI：10.69979/3060-8767.25.07.062

引言

随着交通基础设施向更大跨径、更深基础与更复杂环境发展，跨江大桥的深水基础施工逐渐成为工程安全管理中的重难点。由于受限于特殊水文地质条件、空间环境约束以及大型设备的水上操作特性，深水基础作业在安全控制上面临高度不确定性。近年来多起桥梁工程事故表明，深水基础施工阶段是安全事故多发、高风险集中的关键阶段，稍有疏忽便可能造成设备损毁、结构失稳甚至人员伤亡。因此，有必要从工程特征出发，对其风险点进行系统梳理，构建符合工程实际的评估方法体系，并探索针对性强、响应及时的应急处置方案。本文拟在明确风险类型的基础上，引入多源信息集成的评估模型，对深水基础施工过程中技术性与环境性风险进行量化判定，同时提出优化应急响应体系的实践路径，提升大桥工程水上施工的整体安全保障能力。

1 深水基础施工面临的安全风险类型

1.1 水文与地质因素引发的结构不稳定风险

深水基础施工受限于江河水域的自然环境，其结构稳定性首先受到水文条件与地质特征的直接影。不同河段存在水流流速、水位波动幅度、潮汐周期等显著差异，若未进行充分的前期勘测与设计校核，极易在施工过程中因突发水流变化导致围堰失稳、基坑侧壁塌方等安全事故^[1]。部分区域水下地质结构复杂，存在软弱夹层、松散砂层或局部涌水溶洞，在桩基施工或沉井下沉过程中，如未及时识别，可能造成桩端失稳、沉井倾斜甚至整体基础偏移。

汛期水位快速上涨、回水顶托等动态变化，也对围

护结构与临时设施构成较大冲击。若排水系统设计冗余度不足，或未设立有效的监测与预警系统，一旦外部水压超限，将导致结构局部破坏乃至整体坍塌。在应对地质不确定性方面，施工单位往往依赖历史资料与经验判断，缺乏实时数据支持，风险识别存在滞后性，加剧事故发生可能。

1.2 施工装备与船机平台的运行风险

深水基础作业需依赖大量专用施工设备，包括打桩船、吊装船、浮吊平台、导管船等大型工程船机。由于作业位置受水域宽度、深度与水流方向限制，船机设备的定位、稳定与协同操作存在较高难度。强风、暗流与水面波动均可能影响施工设备的运行状态，引发偏移、倾覆或设备失控等突发事件^[2]。尤其在水下混凝土浇筑、钢护筒安装与桩基成孔等环节，对设备垂直精度与稳定性要求较高，一旦定位误差累计超限，不仅影响结构质量，还会导致钻具卡死、护筒倾斜甚至断裂事故。此外，船机设备多为柴油动力系统，能耗大、故障频发，若现场备件与维修能力不足，将对连续施工造成中断，进而形成局部积压与计划紊乱，增加管理混乱带来的间接安全隐患。

在实际项目中，部分施工单位存在设备超龄使用、负荷配置不匹配及安全维护不到位等问题，提升了施工期间因机械系统失效而引发连锁事故的风险。因此，深水装备的选型、调度、维护与操作培训应作为专项风险管理对象，纳入整体施工安全控制体系。

1.3 潜水作业及人员安全控制难点

深水基础施工往往伴随较长周期的水下作业任务，

尤其在桩基检测、导管安装、钢筋校对与沉井对位等阶段,需安排专业潜水人员完成细部作业。相比地面作业,水下作业存在可视性差、空间受限、水压高与通信困难等特点,极大增加人员风险。潜水员在有限通气环境中作业时间受限,若水流速度突变或结构晃动剧烈,将直接威胁其人身安全。

水下应急响应存在天然延迟性,一旦出现潜水设备故障、氧气供应中断或人员意识模糊,救援窗口极为有限。现阶段多数施工单位尚未建立系统化的水下作业风险预警机制与标准化的应急处置流程,潜水人员多依靠经验判断与单人自保,缺乏技术辅助系统支持^[3]。此外,水下操作涉及大量精细定位与结构装配工序,若因能见度差导致操作误差,不仅会造成工程质量问题,还可能引发后续构件变形或联动破坏。

加强对潜水作业的作业前评估、作业中监测与作业后评估,是控制深水基础施工人身风险的重要环节。应配置独立的水下监控系统、实时语音通信设备与快速撤离装置,为作业人员提供基本安全保障。

2 深水基础施工的风险评估方法与模型构建

2.1 风险评估指标体系构建与参数选取

要实现对深水基础施工全过程的有效风险控制,首要工作是构建科学、系统的风险评估指标体系。该体系需涵盖施工环境、工艺流程、设备管理与人员作业等多个维度,反映风险的源头、传播途径与潜在后果。根据前述风险类型可初步划分为四类指标:自然条件指标(如水流速度、水深变化、地质类型等)、施工技术指标(如施工方法复杂度、工序衔接合理性)、设备运行指标(如船机设备故障率、维护频率)以及人员作业指标(如潜水作业强度、班组技能匹配度等)^[4]。

指标选取需坚持代表性、可测性与差异性原则。以“水文条件变化”为例,需细化为“施工期平均水位波动幅度”、“突发水流冲击频率”等可量化参数;“设备运行稳定性”可细化为“单日非计划停机时长”与“关键零部件年故障次数”。部分难以直接观测的指标,如“作业组织复杂程度”,可通过专家打分与现场调研相结合方式获得赋值。在指标体系构建完成后,还需明确各指标的风险边界值、预警阈值及等级划分标准,以支撑后续评估模型的定量处理。

指标体系应具备开放性,允许不同项目根据自身实际情况增减或调整参数,形成标准框架与工程个性化指标之间的动态兼容,增强评估体系在不同水域、不同基础类型下的适应性。

2.2 模糊层次分析法与灰色评估模型应用

由于深水基础施工面临的诸多风险因素存在模糊性、不确定性与耦合性,传统线性评分方法难以准确反映其综合风险水平。为此,模糊层次分析法(Fuzzy-AHP)与灰色系统理论被引入到本研究的风险评估模型中,实现主观经验判断与客观数据计算的有机结合。

模糊层次分析法的基本思路是在传统层次分析法的基础上引入模糊数学原理,对风险指标间的相对重要性进行模糊判断,进而构建模糊一致性矩阵,求解各指标的权重值。以“设备故障风险”与“水文波动风险”相比为例,若专家认为二者重要性相当但略偏向前者,则可赋予模糊评分“(0.55, 0.6, 0.65)”,通过三角模糊数处理形成统一权重序列。

在权重计算完成后,可结合灰色关联分析方法,将实际观测数据与各风险等级标准数据进行灰色关联度计算,得出各指标对总体风险等级的关联强度。通过对全部指标的关联度进行加权汇总,最终可将施工现场的风险水平归类为“可控”“警戒”“高危”等等级,为项目管理提供明确的技术决策依据。

该模型具有适应性强、容忍不完全信息、结构清晰等特点,尤其适用于深水作业数据缺乏、工况复杂多变的施工场景。经前期实证测试,模型评估结果与现场实际风险表现高度吻合,具备较强工程推广价值。

2.3 案例分析:某跨江大桥项目评估结果解析

为验证模型的实际适用性,本文以某正在施工的跨江大桥项目为评估对象,对其深水基础施工阶段进行了全流程风险评估。该桥梁主墩采用钢板桩围堰+钻孔灌注桩复合基础结构,施工水域位于下游江段,流速较大,地质条件复杂,存在强烈的卵砾石层与高地下水压^[5]。

评估团队通过现场调研与技术资料采集,选取包含12项一级指标、26项二级指标的风险评估体系,对近一个月的施工数据进行整理与归类。通过模糊层次分析法确定各指标权重,其中“围堰稳定性”与“设备运行干扰频次”权重较高,反映出该工程施工安全主要受结构防护与设备因素制约。在灰色评估阶段,将实际监测数据代入计算模型,得出项目当前整体风险等级为“Ⅲ级:中度预警”,主要问题集中在设备稳定性不足与潜水作业风险偏高两个方面。

3 应急响应机制优化路径研究

3.1 现有应急响应体系存在的问题

当前大多数跨江大桥项目在深水基础施工中虽已设立应急预案制度,但在实际运行过程中仍存在多项制约因素,导致应急响应效率偏低、处置反应迟缓,难以有效应对突发性技术风险。一方面,应急预案编制内容

普遍偏重形式,缺乏针对性与可操作性,常采用模板式结构,未能充分结合具体施工环境与工程节点制定差异化应对策略;另一方面,各施工单位间职责划分不清、信息通报流程不畅,一旦突发事件发生,各部门往往各自为政,难以实现统一指挥与资源协同。

在信息化方面,部分项目未建立实时监测系统与预警联动机制,应急响应主要依赖人工报告与层级指令传达,难以在短时间内形成统一响应链。特别在水下突发事件中,信息上报滞后与决策失误将大大压缩现场处置时间窗口,极易造成不可逆损失。此外,应急资源配置不均、储备不足亦是一大短板,部分项目缺乏专用水下救援器材、快速封堵设施或专业水域应急队伍,导致应急措施无法迅速落地执行。针对以上问题,需对现有应急响应机制进行结构性优化,提升其适应复杂作业环境与突发情境的能力。

3.2 快速响应机制与多级联动模型设计

为提升应急系统响应速度与组织协调效率,应在原有预案体系基础上引入“快速响应+多级联动”的复合式机制。一方面,建立覆盖施工现场、技术部门、管理单位的三级响应结构,实现信息采集、应急判断与资源调配的层级闭环控制;另一方面,依托数字平台实现风险预警、响应决策与过程反馈的数据共享与任务同步。

快速响应机制的核心在于风险信息的前置识别与即时处理。施工单位应在关键环节布设高频监测点位,包括水压、水位、流速、设备偏移、动力中断等关键指标,并通过物联网传感系统与平台联动形成预警信号。当指标突破预警阈值,系统可自动生成事件编号并推送至相关责任人,实现信息闭环流转。

多级联动机制强调响应单位的协同与资源共享。在设计上,应明确施工总承包、监理单位、交通水政、安全监管与属地政府等主体职责,制定“响应权限图谱”,对各类事件设定响应等级与牵头部门。例如,一旦发生围堰破裂或船机倾覆事件,应由技术管理部牵头,联合设备部、后勤部与属地水警开展协同处置,并同步启动区域交通管制机制,避免救援过程发生次生风险。

通过“监测前置、响应分级、处置协同”的流程重塑,可大幅缩短信息响应时间与资源调配时长,提高应急系统的整体反应速度与协调能力。

3.3 应急资源配置与现场演练体系完善建议

高效应急机制的落地,离不开资源配置的精准匹配与现场演练体系的制度化建设。资源方面,应按“专业化、区域化、冗余化”原则配备应急物资与专业设备。除传统安全装备外,深水基础施工还需重点配置高功率

水泵、便携式围堰封堵装置、救援潜水器、气垫船与应急照明系统等专用装备,并建立区域物资储备中心,覆盖多个施工标段,提高资源响应效率。

在人力资源方面,建议设立专职应急小组,明确岗位职责,配备具备潜水资质、电气检修、水域救援与医疗急救能力的复合型队伍,定期开展培训与考核,确保队伍能力与工程风险相匹配。对水下作业人员,应建立“潜水作业登记—状态跟踪—风险档案”管理机制,动态掌握作业人员健康状况与心理状态,避免突发事件因人员失误扩大影响范围。

演练体系方面,应制定覆盖“预警响应—人员疏散—设备封控—事故隔离—数据报告”的完整演练流程,并设定每季度不少于一次的实战演练计划。演练内容应涵盖常规险情(如设备故障、水泵停电)、突发事故(如沉井漂移、涌水失控)及极端条件(如台风、船舶碰撞)等多种情境,提升应急队伍在多元风险条件下的联动能力与决策效率。

在信息平台建设方面,可引入事件记录归档、预案版本更新、响应轨迹留痕与处置结果评估等功能,形成“事前准备—事中控制—事后追溯”闭环系统,为后续安全管理改进提供数据支持与经验积累。

4 结语

深水基础作为跨江大桥施工中的关键部位,其安全管理复杂程度远高于一般基础工程。本文通过风险类型辨识、评估模型构建与应急机制优化等路径,提出了一套针对性强、适应性广的技术解决思路。研究表明,系统化的风险评估方法与响应机制能显著提升突发事件应对效率,降低重大事故发生概率。未来可在数据实时采集、智能化决策辅助与多部门协同响应方面继续深入,推动深水基础施工向更加安全、高效的方向发展。

参考文献

- [1] 宋铁强. 水流湍急深水区跨江大桥基坑支护施工技术[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2022, 22(03): 26-30.
- [2] 符强. 跨江大桥深水基础主墩钢套箱围堰工位散拼施工技术[J]. 四川水泥, 2018, (01): 88.
- [3] 杨光, 张本元, 姜立国, 等. 大跨径跨江大桥超长桩基施工及承载力特性研究[J]. 建筑机械, 2024, (08): 174-178+6.
- [4] 裴亚博. 跨江大桥施工关键技术探析[J]. 交通世界, 2023, (18): 129-131.
- [5] 仲云飞. 某跨江大桥地基基础稳定性分析中的若干问题探讨[J]. 安徽建筑, 2016, 23(06): 124-126.