

高空作业环境下公路桥梁施工安全防护体系构建

胡 鹏 唐恭禧

四川公路桥梁建设集团有限公司大桥工程分公司 四川 成都 610000

摘要：公路桥梁工程作为国家交通基础设施的骨干，其建设过程中的高空作业环节因环境复杂、风险集中而成为安全事故的高发区。传统的、碎片化的安全管理模式已难以满足现代大型桥梁工程对本质安全的严苛要求。本文聚焦于构建一个系统化、全链条、智能化的高空作业安全防护体系。研究首先深入剖析了高空坠落、物体打击、机械伤害等核心风险源的成因与特征；进而从“人、机、料、法、环”五个维度，系统性地提出了涵盖组织管理、人员行为、工程技术、智能监控和应急响应五大子系统的综合防护框架。该体系强调以完善的安全责任制为基础，以标准化的防护设施（如生命线系统、智能安全带）为核心，以BIM+物联网等信息化技术为赋能手段，实现对风险的全过程、动态化、精准化管控。研究表明，构建并实施这样一个多维度融合的安全防护体系，是保障公路桥梁施工人员生命安全、确保工程顺利推进的根本途径。

关键词：公路桥梁；高空作业；安全防护体系；生命线系统；智能监控

引言

随着我国交通基建升级，大型、特大型公路桥梁工程增多，高空作业成为建设核心环节。但高空作业风险极高，一旦失足或防护失效，后果严重，高处坠落事故在桥梁施工安全事故中占比常年超50%，是一线工人生命安全的“头号杀手”。面对严峻形势，国家高度重视，相关法律法规不断强化，2025年3月实施的《公路水运工程施工安全标准化技术要求》明确推广生命线系统等硬性措施，行业安全管理向主动预防、标准化转型。在此情况下，仅靠传统个人防护用品和零散安全教育远远不够，需构建综合性安全防护体系，解决“物”的不安全状态与“人”的不安全行为，实现风险实时感知与智能预警。本文将系统阐述该体系构建逻辑、核心内容与实施路径，为提升公路桥梁施工安全水平提供参考指导。

1 高空作业环境下的主要安全风险识别与分析

要构建有效的防护体系，首要任务是精准识别并深刻理解各类安全风险的根源。公路桥梁高空作业的主要风险可归纳为以下几类：

1.1 高处坠落风险

这是最直接、最致命的风险。其成因主要包括：（1）临边与洞口防护缺失或失效：在桥面边缘、墩顶、预留孔洞等位置，若未按规定设置牢固的防护栏杆、盖板或安全网，极易导致人员踏空坠落。（2）脚手架与操作平台失稳：用于高空作业的脚手架、挂篮、移动式操作平台等，若设计不合理、搭设不规范、材料不合格或超载使用，可能发生坍塌、倾覆或局部构件失效，造成群死群伤。（3）个人防护装备使用不当：工人未正确佩戴安

全带，或安全带未系挂在牢固可靠的锚固点上（如系挂在不稳定的钢管、钢筋上），在发生意外时无法起到保护作用。（4）恶劣天气影响：强风、暴雨、冰雪等恶劣天气会显著增加作业难度和滑倒、失稳的风险。新颁布的JT/T 1514-2024标准已强制要求在六级风及以上、暴雨等条件下停止高空作业。

1.2 物体打击风险

高空作业区域下方往往有交叉作业或通行人员，来自上方的坠落物构成严重威胁。（1）工具与材料坠落：小型工具（扳手、锤子）、零散材料（螺栓、焊条）甚至大型构件（模板、小型设备）若未采取有效的防坠落措施（如使用工具袋、设置踢脚板、安装防坠网），可能因操作失误或固定不牢而掉落^[1]。（2）拆除作业风险：在进行模板、支架拆除作业时，若未划定警戒区域、未进行有效沟通协调，极易发生物体坠落伤人事故。

1.3 机械与起重伤害风险

桥梁施工高度依赖塔吊、履带吊、泵车等大型机械设备，这些设备在带来效率的同时也潜藏着巨大风险。一方面，起重机在吊装大型梁段、模板等重物时，操作人员可能因视线受阻、与指挥信号不清，或者设备本身存在制动失灵、钢丝绳断裂等机械故障，导致吊物失控摆动、坠落或直接碰撞到高空作业人员。另一方面，在空间受限的桥面上，移动式设备的操作难度极大，稍有不慎就可能与已完成的桥墩、箱梁等永久结构发生碰撞，轻则造成设备损坏，重则引发设备倾覆，危及周边所有人员的安全。因此，对大型机械设备的日常维护、操作人员资质审查以及作业过程中的协同指挥，构成了安全

防护体系中不可或缺的一环。

1.4 触电及其他风险

除了上述主要风险外，触电及其他衍生风险同样需要警惕。施工现场临时用电线路敷设混乱、电气设备绝缘老化或破损等问题，都可能导致作业人员在高空环境中发生触电事故，其后果尤为严重。此外，长时间处于高空环境会对工人的心理产生负面影响，如恐高、焦虑等情绪可能导致注意力不集中，从而增加操作失误的概率。同时，高强度的体力劳动和不合理的作息安排容易引发疲劳作业，进一步放大了各种安全风险。这些看似次要的因素，实则是安全管理体系中必须关注的细节，需要通过科学的排班、心理疏导和良好的工作环境来加以缓解。

2 安全防护体系的系统性构建框架

针对上述风险，一个行之有效的安全防护体系必须是一个有机整体，而非孤立措施的简单堆砌。本文提出以“五维一体”为核心思想的构建框架，打造五大相互支撑的子系统。

2.1 组织管理子系统：筑牢安全责任基石

一个健全的组织管理体系是整个安全防护体系得以运行的根基。这首先要建立以项目经理为第一责任人的安全生产领导小组，将安全总监、专职安全员、各专业班组长直至每一位一线工人的安全职责清晰界定，形成一张“横向到边、纵向到底”的严密责任网络。在此基础上，必须严格执行安全技术交底制度，确保每一项高空作业开始前，相关的风险点、防护措施和应急处置方法都能准确无误地传达给所有参与人员。对于分包队伍的管理，绝不能采取“以包代管”的放任态度，而应将其完全纳入总包单位的安全管理体系之中，实行统一的标准、培训和考核，从源头上杜绝因分包队伍素质参差不齐带来的安全隐患^[2]。同时，安全投入的保障至关重要，必须确保用于安全防护设施采购、个人防护用品更新、安全教育培训以及隐患排查治理等方面的专项资金足额提取、专款专用，为各项安全措施落地提供坚实的物质基础。

2.2 人员行为子系统：规范安全作业习惯

再完善的硬件设施和管理制度，最终都需要由人来执行。因此，规范人员的安全作业行为是体系成功的关键。这始于全覆盖、高质量的安全培训。培训不应仅停留在入场时的泛泛而谈，而应根据不同工种的具体作业特点，如钢筋工的绑扎、模板工的支立、起重工的吊装等，开展针对性极强的专项培训。培训内容不仅要包括理论知识，更应借助VR/AR等沉浸式技术，模拟真实的

高空场景，让工人在虚拟环境中体验事故的恐怖后果，从而在内心深处建立起对安全规程的敬畏感。在此基础上，积极推行行为安全观察（BBS）机制，鼓励管理人员与工人之间、工人与工人之间相互监督、善意提醒，及时纠正不安全行为，逐步营造出“人人都是安全员、人人关心安全”的良好文化氛围。此外，对作业人员身心状态的关注也不容忽视，应建立班前健康问询制度，严禁患有高血压、心脏病、恐高症等职业禁忌症的人员上岗，并通过科学合理地安排工作与休息时间，有效防止因疲劳导致的注意力涣散和操作失误。

2.3 工程技术子系统：构筑本质安全屏障

工程技术措施是从源头上消除或控制风险的最有效手段，构成了安全防护体系的核心壁垒。近年来，行业大力推广标准化、定型化的防护设施，其目的就是用可靠的“物防”替代不可靠的“人防”。其中，生命线系统（Lifeline System）的应用尤为关键。根据JT/T 1514-2024的强制性要求，在无法设置可靠护栏的区域，如钢箱梁顶板、悬索桥主缆等特殊部位，必须安装水平或垂直的生命线。工人将安全带挂钩系于这条经过严格计算和测试的生命线上，便可以在规定的作业范围内自由移动，彻底解决了传统安全带“无处可挂”或“挂点不可靠”的老大难问题。除此之外，采用工厂预制、现场组装的装配式防护栏杆和符合国家标准的密目式安全立网、平网，也能形成稳定、可靠的物理屏障，有效防止人员和物体的意外坠落^[3]。在施工工艺层面，应尽可能优化方案，例如采用地面大节段拼装后整体吊装的方式，最大限度地减少高空散拼作业量，从工艺上降低风险。对于脚手架、挂篮等高风险的临时结构，则必须实行全生命周期的精细化管理，从设计、选材、搭设、验收、使用到最终拆除，每一个环节都需有章可循、有据可查，真正做到“一桥一案、一篮一验”，确保万无一失。

2.4 智能监控子系统：赋能动态风险预警

现代信息技术的发展为安全管理注入了前所未有的活力，智能监控子系统正是利用这些技术为传统管理赋能。在项目前期，BIM技术可以发挥巨大作用，通过构建精确的三维模型并进行4D施工模拟，项目团队能够在虚拟环境中提前“预演”整个施工过程，精准识别出高空作业的冲突点和潜在风险区域，从而在方案阶段就进行优化调整。进入施工阶段后，BIM模型可以与现场部署的物联网（IoT）设备数据进行深度融合，构建智慧工地平台。通过在工人安全帽或手环中集成定位和姿态传感器，系统可以实时掌握每位高空作业人员的位置和状态，一旦检测到异常跌倒或长时间静止不动，便会立即触发报

警^[4]。同时,在关键作业点部署的高清摄像头,结合人工智能(AI)视频分析算法,能够自动识别出未戴安全帽、未系安全带、违规穿越警戒区等不安全行为,并将告警信息实时推送给相关管理人员,实现了从“人盯人”到“技防+人防”的转变,极大地提升了风险预警的及时性和精准度。

2.5 应急响应子系统:兜住最后安全底线

无论预防措施多么周密,都无法做到百分之百杜绝事故的发生。因此,一个高效的应急响应系统是保障人员生命安全的最后一道防线。这首先要要求项目部针对高处坠落、物体打击等最可能发生的高风险事故,制定出详细、具体、可操作的专项应急预案。预案中必须明确救援的组织架构、各方职责、联络方式、救援程序以及所需物资清单。其次,施工现场必须常备专业的应急救援装备,如速差自控器、缓降器、多功能担架、急救药箱等,并定期组织相关人员进行培训和演练,确保他们在紧急情况下能够熟练、冷静地使用这些装备。最后,定期的应急演练至关重要,它不仅是对预案有效性的检验,更是对救援队伍协同作战能力和快速反应能力的实战锤炼。通过反复的桌面推演和实战模拟,可以不断发现预案中的不足并加以完善,确保在真正的事故发生时,能够争分夺秒,最大限度地减少人员伤亡。

3 体系实施的关键保障措施

再完善的体系,若缺乏有效的保障措施,也难以落地生根。首先,必须强化法规标准的引领作用。各级行业主管部门应加强对《公路水运工程施工安全标准化技术要求》(JT/T 1514-2024)等新标准的宣贯力度,并将其作为日常监督检查的核心依据,对不达标、不合规的项目坚决予以停工整改,形成强有力的外部约束。其次,应积极推动技术创新与应用。鼓励大型施工企业与高校、科研院所建立合作关系,共同研发更轻便、更智能、成本效益更高的新型安全防护技术和装备,通过技术进步来降低先进安全措施的推广应用门槛。最后,也是最根本的,是

要着力培育深入人心的安全文化。企业应将“安全第一、生命至上”的理念融入其核心价值观,通过设立安全宣传栏、举办安全知识竞赛、表彰安全先进个人等多种形式,让安全意识内化于心、外化于行,真正实现从“要我安全”到“我要安全、我会安全”的根本性转变。

4 结语

高空作业安全是公路桥梁工程建设的生命线。面对复杂严峻的安全挑战,唯有摒弃头痛医头、脚痛医脚的旧思维,转而构建一个集组织管理、人员行为、工程技术、智能监控和应急响应于一体的系统化、全链条安全防护体系,才能真正实现本质安全。该体系以明确的责任制为前提,以标准化的工程技术措施为核心,以智能化的监控手段为赋能,最终形成一个自我运行、自我纠偏、持续改进的安全管理闭环。随着国家强制性标准的出台和技术的不断进步,全面推广和深化应用这一体系,不仅是保障万千建设者生命安全的迫切需要,更是推动我国从“桥梁大国”迈向“桥梁强国”的必然要求。未来的研究与实践应进一步探索如何将大数据、人工智能等前沿技术更深度地融入该体系,实现安全风险的超前预测和自主防控,为公路桥梁建设事业的高质量发展保驾护航。

参考文献

- [1]黄河油.高速公路桥梁施工中高空作业安全防护体系优化研究[J].交通科技与管理,2025,6(13):186-188.
- [2]刘大伟.公路桥梁施工安全管理体系优化与实践路径探索[J].中国建筑金属结构,2026,25(02):166-168.
- [3]索国祥.高速公路桥梁施工安全管理影响因素及应对策略研究[J].运输经理世界,2025,(35):67-69.
- [4]胡家伟,刘晓林.公路桥梁施工安全风险智能预警与信息化管控平台构建研究[C]//中国智慧工程研究会.2025工程创新与可持续发展经验交流论文集(上).江西省四通路桥建设集团有限公司;新余市公路桥梁工程局,;2025:184-186.