

高速公路高墩大跨桥梁施工安全风险识别与管控研究

刘云天

中交北疆工程咨询有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘要: 高速公路高墩大跨桥梁施工环境复杂、技术难度高、风险耦合性强,是公路工程建设中安全管理工作中的重点和难点问题。从风险管理的角度出发,对高墩大跨桥梁施工特点以及风险进行研究,提出了一套包括风险源辨识、风险评价、风险分级管控的风险管理方法。在风险辨识方面,根据结构体系、施工设备、环境条件、组织管理四个方面划分出不同类型的风险。最后,在风险控制上提出了“技术控制为主导、管理控制为核心、监测预警为抓手、应急预案为基础”的全方位风险防控理念。结论认为,高墩大跨桥梁施工安全风险管控应该由以往被动式隐患排查转变为全面、及时、智能的风险管理方式,对于类似项目具有一定的借鉴意义。

关键词: 高速公路;高墩桥梁;大跨度桥梁;施工安全;风险防控

引言

随着高速公路网向山区、沟壑、河流等地形复杂的地区发展,在建设中高墩大跨桥梁越来越多。墩高大于40m、单跨大于150m的高墩大跨桥梁在施工期间需要克服很多困难:高空作业多、悬臂在未合龙状态下抵抗倾覆的能力差、大型机械设备多机配合工作难度大、山地天气变化无常以及不良地质条件都会增加意外发生的可能性。近几年发生的一些高墩大跨桥梁施工事故都说明:传统的“经验式”的安全管理不能满足这种类型的工程项目中的各种问题,必须有一套合理的、标准的并且是全方位的风险辨识和防范措施。基于施工安全风险的一般原理,结合高墩大跨桥梁的特点,对它的风险辨识的方法、风险分类和控制措施进行研究。

1 高墩大跨桥梁施工的工程特征与风险特性

1.1 工程特征分析

高墩大跨桥梁施工不同于一般桥梁的主要特点有以下几点。一是规模巨大。墩身高一般超过40m,有的甚至上百米,墩身断面不断变化,模板提升及混凝土灌注高度较高;主梁跨度大于150m,多用悬臂浇筑或者是悬臂拼装的方法施工,在合龙之前是静定结构,抵抗施工荷载的能力较差。二是施工过程繁杂并且相互关联。由桩基础到承台再到墩柱到0号块到挂篮悬浇到边跨合龙再到中跨合龙,每一步都是紧密相连,前面的工作失误都会影响到后面的工程,一旦某个部位出现问题就会影响到整个工程的安全^[1]。三是空间限制大并且高空作业显著。高墩顶上施工面积很小,工人上下使用施工电梯或者爬梯子;挂篮作业、预应力张拉、钢筋绑扎等都在几十米的高度进行,安全隐患极大。四是外界的影响因素众多。峡谷地带往往会有突发的大风、大雾、短时间内

的暴雨,河流两岸地势险峻,滑坡崩塌的风险很高。

1.2 风险特性归纳

从以上工程特点出发,高墩大跨桥梁施工安全风险具有以下六个主要特点:第一是累加性,在施工过程中,由于墩身垂直度偏差以及预应力管道位置偏差等因素逐渐累积,可能导致局部结构受力过大而导致结构失稳;第二是耦合性,在主梁悬臂施工过程中,两侧浇筑不平衡力矩、挂篮前移不同步、临时支座受力不均等不利因素相互影响而产生一系列问题;第三是突变性,高墩大跨结构受到风荷载或者施工荷载作用下可能会出现突然失稳的情况,比如高墩在临界荷载下会发生弹性屈曲,悬臂根部弯矩过大造成脆性断裂一般不会有明显的塑性变形;第四是时间和空间的变化,在施工过程中,随着时间推移,结构刚度、边界条件、重心不断改变,相应的风险也会发生变化,如合龙前风险最大时往往是悬臂最长的时候;第五是隐蔽性,高墩内部混凝土质量问题或者预应力管道堵塞、锚下有效预应力不足等问题无法通过普通的检查方式发现,但是在后续加载中容易引起脆性破坏;第六是环境敏感性,在山区微气象环境中,瞬时风速可能远大于设计风速而且不易预测;大雨造成的山洪会把施工便道和临时设施冲毁,阻碍救援工作开展。

2 施工安全风险识别

风险识别是风险管理的基础,在高墩大跨桥梁施工中,要对风险源类别、重要环节以及承灾体脆弱性等进行全面分析。

2.1 风险源分类体系

根据造成风险因素类型不同,可以将高墩大跨桥梁施工安全风险分为四类。

2.1.1 第一类：结构体系风险

主要有以下几种情况：高墩模板支撑体系失稳（包括翻模、爬模、滑模锚固失效、千斤顶不同步、导轨变形等）；悬臂浇筑过程中出现的不平衡弯矩问题（两侧混凝土浇筑方量不同步、挂篮前移不同步）；预应力施工问题（张拉控制应力过大、断丝滑丝、孔道压浆不密实造成预应力损失）；合龙段施工问题（劲性骨架焊接强度不够、合龙温度选择不合理引起附加温度应力）；临时固结及支座系统出现问题的风险（0号块临时锚固螺栓或者钢管支架受力不够大）。

2.1.2 第二类：施工装备风险

高墩大跨径桥梁工程需要使用大量大型专业机械设备，主要有以下几种：塔式起重机和施工升降机倾覆的风险（基础承载能力不足、附墙装置脱落或者连接失效、超载运行）；挂篮的风险（主桁架焊接部位断裂、吊带或者精轧螺纹钢断裂、后锚固点松动）；混凝土泵送的风险（输送管堵塞破裂、接口处脱开）；张拉设备的风险（千斤顶未经校准、油表显示错误）；施工电梯的风险（防坠安全器失效、导轨架垂直偏差过大）。

2.1.3 第三类：环境与地质风险

山区中，环境风险较大：强风风险（高墩顶部以及悬臂端部风荷载较大，容易产生共振或者大的涡激振动）；雷击风险（高墩顶部钢筋以及塔吊较易遭受雷击）；不良地质风险（墩位处岩溶发育、断层破碎带、堆积体滑坡等）；恶劣天气风险（暴雨造成基坑淹没、道路损毁、混凝土浇筑中断）^[2]。

2.1.4 第四类：组织管理风险

包括：专项施工方案编制及论证不到位（特别是对于超过一定规模的重大危险源）；安全技术交底走过场；特种作业人员无证上岗；多工种同时施工缺乏有效沟通配合；未进行应急救援演练；安全资金不足造成防护设施不到位等。

2.2 关键工序风险点识别

将施工过程划分成几个主要步骤，在每个步骤找出主要危险因素。桩基、承台施工阶段：深基坑坍塌（排桩或喷锚支护失效）、人工挖孔桩有害气体中毒或者孔壁坍塌、承台大体积混凝土水化热引起温度裂缝。高墩施工阶段：模板体系不稳定（爬锥埋设不够深、穿墙螺栓松动）、作业平台无防护造成人员高处坠落、墩身倾斜过大、混凝土浇筑时模板突然爆裂、施工升降机附墙距离较大。0号块以及挂篮安装阶段：0号块托架或者支架承载力不够、挂篮预压加载不均匀造成倾覆、挂篮拼接处螺栓未拧紧。悬臂浇筑或拼装阶段：两侧浇筑不

平衡力矩大于设计要求、挂篮前行时后锚固点未及时更换、竖向预应力筋张拉滞后造成腹板开裂、已浇筑部分出现较大偏差。边跨和中跨合龙阶段：合龙段劲性骨架焊接不合格、合龙配重提前或者推迟拆除、顶推力过大损坏桥梁结构。桥面铺装以及附属工程施工阶段：桥面临时护栏缺失、临时电线布置不合理、不同工种交叉作业发生物体打击等。

2.3 基于工作分解结构-风险分解结构的识别方法

在实际应用中可以采用工作分解结构（WBS）与风险分解结构（RBS）结合的方法来进行系统的识别。WBS从单位工程到分部工程再到分项工程以及工序逐级细化；而RBS从风险类型的方面进行划分如技术风险、管理风险、环境风险、人员风险等。然后对每一个格子进行检查从而找出每个工作包所对应的风险事件，得到初步的风险清单。这种方法能较好地防止疏漏，尤其适合工序较多、接口较复杂的高墩大跨径桥梁施工。

3 施工安全风险管控策略

3.1 技术性管控措施

技术性控制是最有效的预防或者减少风险的方法。对于高墩施工，首选液压爬模或自动提升翻模，它们有导向及防坠双重保护措施；爬锥以及预埋件需进行拉拔试验检查其承受能力；混凝土浇筑应分层对称进行以避免偏载。对于悬臂施工，“对称平衡”是基本原则，两侧混凝土方量差不应超过设计规定值一般不超过节段自重的20%；挂篮移动须同时，移动之前解除后锚固但是保留防倾覆保险锚固；每次浇筑一个节段之后马上施加该节段的纵向、竖向张拉预应力，不得延迟^[3]。对于大吨位机械设备，塔吊附着距离、预埋件均需经过计算确定并设置风速传感器联锁报警装置，在风力达到6级以上时停止提升操作。对于预应力施工，宜使用智能张拉及压浆设备，同时进行应力和伸长率双重控制并对管道内压浆饱满情况进行无损检测。

3.2 管理性管控措施

管理措施贯穿施工全过程。一是严格危险性较大的分部分项工程施工管理，高墩施工、挂篮悬浇、拆除模板支架等均需单独编制安全专项施工方案，对超过一定规模的还需组织专家论证。方案实施前，项目经理需向项目部相关人员及工人进行交底，有书面交底记录；二是落实风险管理及隐患排查治理双重预防措施：项目部每月开展一次全面的风险辨识工作，及时更新风险清单；施工队每周检查一次；班组每天在班前开会时提醒当天的工作内容以及应注意的安全问题；三是特种作业人员（塔吊司机、施工电梯司机、起重信号工、挂篮操

作工)必须持有效的资格证书并且要定期进行复审;四是建立健全变更管理制度,在施工过程中如果出现施工方案、作业条件、施工机械等的变化,需要重新进行风险辨识。

3.3 监测预警措施

现代监测技术是高墩大跨桥梁施工安全保障的眼睛。必须进行监测有:高墩垂直度、沉降监测(每次浇筑一个节段测量一次);挂篮重要部位应力、应变监测(主桁架弦杆、吊带、后锚杆等);悬臂两端标高监测(每次浇筑前、浇筑后、张拉后各测一次,以保证线型和平衡力矩);塔吊塔身垂直度以及力矩限制器工作状态监测;施工电梯导轨架垂直度和防坠器有效期检查^[4]。可选智能化监测包括:高墩及悬臂结构在风荷载作用下振动加速度监测(判断舒适性和安全性问题);预应力孔道压浆密实度阵列式超声波检测;大体积混凝土高墩水化热温度在线监测。一旦监测数值超过警戒线(例如挂篮吊带应力达到其额定值的80%),设备应能及时发出声音和灯光警告并停止相应操作。

3.4 应急保障措施

即便风险辨识及防控工作做得很好,在最坏情况下也需有应对措施。应制定针对高墩坠落、挂篮倾覆、起重伤害、模板坍塌、支架垮塌、山体滑坡、恶劣天气等情况专项应急预案并进行桌面推演以及实地演练(每半年至少一次)。应急准备包括:在高墩处设置两条以上不同方向逃生路线;每层作业平台上放置足够数量安全绳、自锁器、救生软梯;塔吊司机室以及施工升降机内放置对讲机及急救药品;施工现场存放应急物品(千斤顶、切割机、备用钢丝绳、灭火器)并且定期检查其是否过期。与当地应急管理机构、消防队、医院保持联系以便在突发事件发生时能在半小时内得到专业的救援。

3.5 分级管控责任体系

依据风险等级明确责任人。Ⅰ级风险由班组负责,现场技术员检查确认;Ⅱ级风险由施工队队长负责,项

目部安全员复核;Ⅲ级风险由项目部总工程师以及安全总监共同负责,公司安全部门存档;Ⅳ级风险由公司主要领导负责,聘请专家指导并每日上报监管部门。该方式防止“一刀切”带来的管理资源浪费,又使重大风险受到足够重视。

4 结语

高速公路高墩大跨桥梁施工安全风险具有累加性、耦合性、突发性、时空动态性和隐蔽性以及对环境敏感等因素特点,在实际工作中仅凭经验进行管理效果甚微甚至适得其反。为此本文从风险识别、评价及防控的角度提出了相应的思路:在风险识别方面,从结构体系、施工机械、环境地质条件、组织管理四个方面进行划分,同时结合高墩、悬臂浇筑、合龙等重点环节,采用WBS-RBS矩阵法进行风险识别;而在防控上,则制定了以技术控制(例如爬模选择、智能化张拉)、管理控制(专项方案、双重预防)、监测预警(应力、垂直度、风速联控)以及应急保障为一体的四管齐下措施,并设置了四个等级的责任制。需要指出的是,风险防控是一个不断循环的过程,在施工过程中随着施工进度的变化、外部环境改变以及新技术的应用都需要及时更新和完善。今后还需进一步加强智能化监测、BIM及数字孪生技术的研究应用,实现由“静态防控”到“动态自适应防控”的转变,最终达到本质安全的目标。

参考文献

- [1]赵记广.山区高速公路高墩大跨桥梁施工安全风险防控研究[J].价值工程,2026,45(3):52-54.
- [2]王尚.大跨径高墩桥梁施工技术研究[J].运输经理世界,2025,(29):96-98.
- [3]吴建伟.高墩大跨桥梁悬臂浇筑施工工艺与安全控制研究[J].交通科技与管理,2026,7(8):115-117.
- [4]王华,刘振宇.大跨径悬臂浇筑施工挂篮安全监测与预警技术[J].施工技术,2021,50(15):56-60.