

斜拉桥索塔转体施工期间风险评估和风险管理

苑晓锋^{1,2}, 夏宇轩^{1,2}, 沈毅凯^{1,2}

(1.上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 200032; 2.上海市工程结构安全重点实验室, 上海市 200032)

摘 要: 转体施工法作为一种桥梁施工方法, 由于其特有的施工优越性, 使得其被广泛应用于斜拉桥索塔的施工之中。然而, 由于斜拉桥索塔施工工序繁多和施工工艺复杂, 加之需保证转体过程顺滑、稳定及精度要求。故为了降低施工期间风险, 对斜拉桥索塔转体施工期进行结构安全风险评估是十分有必要的。依托某斜拉桥索塔转体施工为背景, 基于 ALARP 准则桥梁风险矩阵方法, 识别施工期间风险源, 进行风险分析, 为充分了解施工风险, 制定相应的防范措施来控制 and 降低风险水平, 以确保斜拉桥施工期安全。

关键词: 斜拉桥; 转体施工; 风险评估; 风险矩阵

中图分类号: U448.27; U445.465

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)09-0143-03

0 引言

目前, 我国在长大桥梁建设方面已经进入世界前列, 很多在建工程均在挑战世界桥梁建设记录, 面临世界级难题。桥梁施工过程中恶性桥梁事故将造成直接损失, 为避免施工阶段的风险损失, 桥梁施工风险评估和风险管理显得尤为必要。桥梁施工阶段的风险主要来自施工工艺、意外事故、自然灾害及人为灾害等各方面, 多数风险可通过周密施工计划和系统风险管理得以控制。完善的桥梁工程风险评估尚未形成, 该方面的研究仍处于各个行业间互相借鉴摸索过程中, 危险识别、风险评估和风险控制是安全评估的主要组成部分, 其中风险源识别及风险损失模型确定是风险评估过程中的关键。

1 简介

某斜拉桥全长 619 m, 跨径组成为 70 m+120 m 空间网状索面独塔斜拉为墩、塔、梁固结体系, 其中主塔采用倾斜式独柱型桥塔, 截面为八边形断面, 塔身向边跨侧倾斜 8°, 见图 1 所示。塔身采用钢-混组合桥塔, 离桥面 3 m 以上为钢塔, 桥面 3 m 以下混凝土塔, 主塔包括塔冠总高度 104.028 m (梁面以上为 91.45 m)。塔柱为八边形钢箱断面, 横桥向宽 4 m, 纵桥向宽 6 m, 四边纵横向倒角尺寸为 1.5 m ×

0.9 m, 钢混结合面设置在主梁面以上 3 m 处。钢箱腹板、侧壁板厚根据受力不同采用 30 mm 或 40 mm。主塔壁板及腹板均采用板式加劲肋进行加劲, 板厚 20 mm, 肋高 220 mm。钢塔分为 T1 至 T8 共 8 个节段, 其中 T3 至 T7 节段为斜拉索锚固区段, 最大节段重量约 100 t。钢混结合段 3 m 范围内桥塔混凝土为实心段, 塔断面为八边形, 纵桥向宽 6 m, 横桥向宽 4 m, 四边纵横向倒角尺寸为 1.5 m × 0.9 m。

钢主塔在桥梁边跨上拼装完成, 待钢主梁拼装完成后, 然后对主塔进行竖转施工。本桥钢主塔的竖转拉索采用 6 台 350 t 提升油缸逐级加载, 同步张拉拉索, 对大型钢结构进行竖转, 无论是位置控制, 还是荷载控制均有较高的难度。同时需重视转体三角架及转体铰接结构等临时转体结构的安全性。

索塔转体总重量约 1 150 t, 角度 82°, 拉索设 4 × 560 t 油缸, 背索 2 × 350 t 油缸, 拉杆采用 4 × 31 × 15.24 钢绞线。首先卧拼主塔, 安装压杆、拉杆、拉索锚点及背索锚点, 拉索和背索穿好钢绞线, 拉索每根钢绞线预紧约 1 t, 使拉杆钢绞线也处于预紧状态且每根钢绞线长度相等, 预紧完成后, 拉索分级加载到转体荷载。前拉点位置初始竖转时有 400 t 抗拔力, 经计算钢箱梁自重能提供 244 t, 分级加载前在前拉点位置压履带吊配重 200 t, 为增大安全系数, 钢箱梁与混凝土盖梁进行拉结, 分转体 20°、转体 41°、转体 41° (背索预紧, 并分级加载到指定荷载)、转体 60°、转体 70° 和转体 82° 到位各转体施工步骤, 而后对位焊接, 安装桥塔下部永久拉索并预张拉, 拆除临时结构, 完成转体施工。

收稿日期: 2021-12-01

基金项目: 上海建科集团科研创新项目(KY10000038.20200033)

作者简介: 苑晓锋(1985—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁与隧道检测与监测工作。

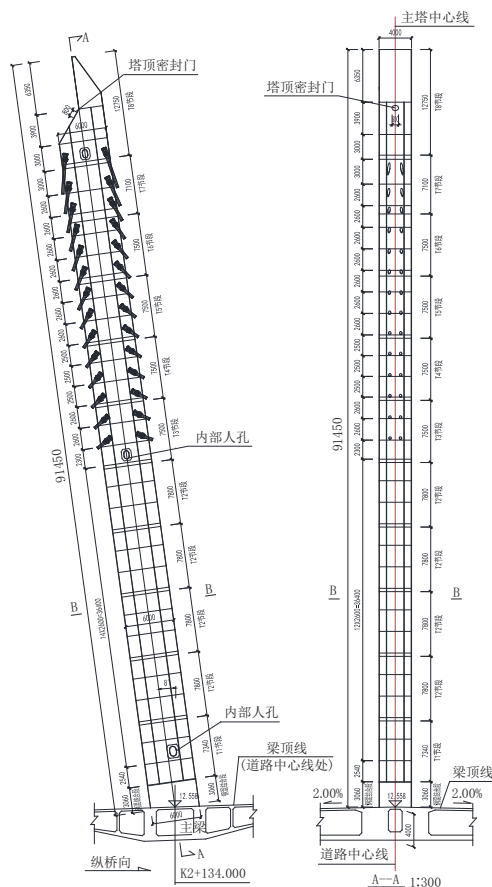


图1 桥塔节段分段图

2 转体施工专项风险评估方法构建

基于《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南(试行)》(交质监发[2011]217号),结合建设规模、地质条件、气候环境条件、地形地貌条件、桥位特征以及施工工艺成熟度等评估指标,对其进行总体风险评估风险等级为III级,属高度风险,需要组织开展专项风险评估^[1],而索塔施工作为施工关键工序且为转体施工,该过程的安全风险评估需更加关注。

转体施工过程中风险源主要包括自然条件、施工技术等,评估时间段为转体施工全过程,评估所涉及的因素为施工质量、施工进度及施工安全(包含索塔结构、临时结构及施工人员安全等),风险对策主要包含施工管理优化、施工工艺控制及施工工程保险等控制策略。

评估过程采用定性和半定量结合的方法,结合该项目特点及施工过程,首先识别风险源,而后开展基于ALARP准则桥梁风险评估矩阵,确定风险事件的基本对策。针对不可接受的风险事态将被定义为显著风险事态,需进行深入分析并制定详细的策略,

以将其风险等级降低至可控水平。

3 基于ALARP准则桥梁风险矩阵评估方法

基于ALARP准则桥梁风险矩阵是最常用的决策方法之一,当设计多种风险或单个灾害事故的风险值难以计算时,常用的方法即是将事故发生的概率和相应的后果置于同一矩阵,形成风险矩阵。构造风险矩阵是在研究风险指标基本水平的基础上,考虑效用函数影响,并考虑风险对策后综合确定的^[2]。ALARP准则是通过确定风险不可接受水平和风险可接受水平,将风险区域划分为风险不可接受区域、风险可接受区域和合理控制区域,落于风险不可接受区域内必须采取有效措施降低其风险,典型的ALARP准则如图2所示^[3]。

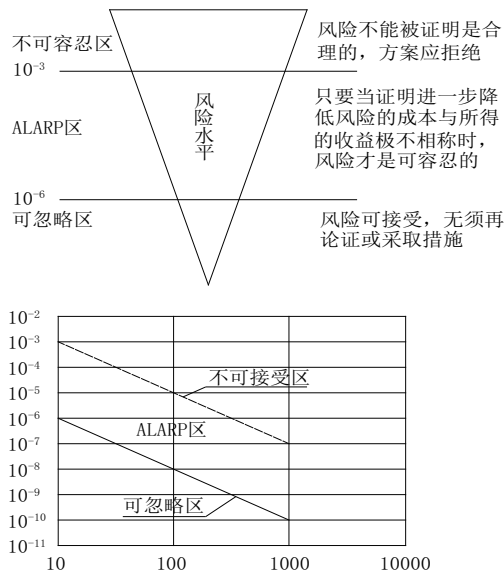


图2 典型ALARP区间和决策准则

阮欣等学者基于国际隧道协会颁布的《隧道风险管理指南》有关研究成果,给出桥梁风险评估的风险矩阵基本形式^[2],结合斜拉桥索塔转体施工过程,确定风险概率描述、风险损失描述、风险评估矩阵及基本风险对策结果见表1至表4。

表1 风险概率描述

等级	风险概率描述	概率间隔	概率中间值
1	非常不可能	<0.000 3	0.000 1
2	不可能	0.000 3 ~ 0.003	0.001
3	偶尔	0.003 ~ 0.03	0.01
4	可能	0.03 ~ 0.3	0.1
5	非常可能	>0.3	1

根据以往施工工程经验,研究认为,斜拉桥索塔转体施工期间主要风险事件可以分为自然灾害、意外事故、特殊问题和质量问题4类,针对上述风险事件,基于以往工程经验,针对工期延误、人员伤亡和

表 2 风险损失描述

等级	风险损失描述	工期延误/d	人员伤亡/人	货币损失比例
1	无关紧要	<1	0	$<1.25 \times 10^{-4}$
2	一般	1~7	轻伤	$1.25 \times 10^{-4} \sim 1.25 \times 10^{-3}$
3	严重	7~30	重伤 1~2	$1.25 \times 10^{-3} \sim 1.25 \times 10^{-2}$
4	非常严重	30~180	亡 1~2	$1.25 \times 10^{-2} \sim 1.25 \times 10^{-1}$
5	灾难性	>180	亡 3 以上	$>1.25 \times 10^{-1}$

表 3 风险评估矩阵

概率	后果				
	1	2	3	4	5
1	可忽略	可忽略	可接受	可接受	合理控制
2	可忽略	可忽略	可接受	合理控制	合理控制
3	可接受	可接受	合理控制	合理控制	不可接受
4	可接受	合理控制	合理控制	不可接受	不可接受
5	合理控制	合理控制	不可接受	不可接受	不可接受

表 4 基本风险对策

等级	风险损失描述
不可接受	无论降低风险成本多大,都应把风险降至合理控制区间内或以下
合理控制	应确定降低风险的各项措施,降低风险的成本与所取得的风险较低效益相比是合理则应执行风险降低措施
可接受	转体施工期间均应对这一风险进行管理,但无须立即采取专门的措施降低风险
可忽略	无须进一步考虑该风险

货币损失三大控制目标分别研究了其可能造成的损失等级,确定风险矩阵。其中,转体施工过程中,需要着重关注的风险事件为物体打击、起重伤害、高空坠落和坍塌^[4],表 5 为上述 4 中风险事件风险评估结果。

表 5 索塔转体施工中风险评估结果

风险描述	风险概率等级	工期延误	人员伤亡	货币损失
物体打击	3	可忽略	可接受	可接受
起重伤害	3	可接受	可接受	合理控制
高空坠落	4	合理控制	合理控制	合理控制
坍塌	4	合理控制	合理控制	不可接受

4 显著风险事件管理及控制

基于 ALARP 准则桥梁风险矩阵对斜拉桥索塔转体施工进行风险评估,并针对物体打击、坍塌、起重伤害和高空坠落风险事件进行评估结果分析,其中,坍塌对货币损失的影响是不可接受,必须要采取针对性的管控措施,高空坠落和起重伤害也均存在需合理控制的结果,总体而言,索塔转体施工过程风险水平相对较高,需要加强施工期间的风险管理,并

充分落实针对各风险事件制定的风险对策。

对于风险评估过程中控制目标,按照其风险程度的高低,其大致顺序为货币损失、工期延误、人员伤亡。由此,在斜拉桥施工过程中,减少施工事故及控制施工货币损失是施工过程中主要控制目标。

坍塌对货币损失的控制目标是不可接受的风险事件,对此需要进行风险对策研究。坍塌是由于设计或施工不合理造成建筑物、构筑物、堆置物等倒塌以及土石塌方引起的事故^[5]。建议对坍塌风险管理对策以管理措施为主,并结合保险措施转移风险。针对转体施工过程涉及情况复杂,于施工前通过对技术人员进行专门安全技术培训、天气监测、划定防护区以及确保所有施工器械及临时结构均在进场前进行合格确认并形成相关文件。

在桥塔转体施工前,应先进行试转体,并让桥塔在空中滞空一段时间,检查各系统工作状态,并对桥塔结构进行检查。同步转体系统操作应由专业技术人员操作,并应对整体转体设备进行空载、负载、及应急试验,尤其在油管破裂、误操作、断电等应急情况下应能保证不失控,不影响系统安全,应建立应急处理措施,并备好应急所需物资。

同时,桥塔转体施工应对转体整个过程进行监控,监控桥塔空中姿态、桥塔的应力及变形情况、桥塔墩柱处梁上应力及位移情况,桥塔竖转过程中最不利受力状态时,塔柱上扣点或吊点以及临时转体结构的受力状态应采用三维实体有限元进行详细分析计算,并对各负载点的负载情况,桥塔结构及临时转体结构变形情况进行监测。

并建议于保险措施中增加坍塌赔偿附加条款,加强日常施工管理并形成管理文件,以便于出险理赔。

5 结 语

结合某斜拉桥施工过程,基于 ALARP 准则桥梁风险矩阵对斜拉桥索塔转体施工进行风险评估,并根据以往对斜拉桥索塔施工的实践经验,研究得到了在转体施工过程中可能出现的安全风险及重大风险源,同时提出相应的风险事态管理和控制措施,科学地降低施工期间风险管理投入,为斜拉桥转体施工风险管理提供借鉴。

参考文献:

[1] 交通运输工程质量监督局,《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评

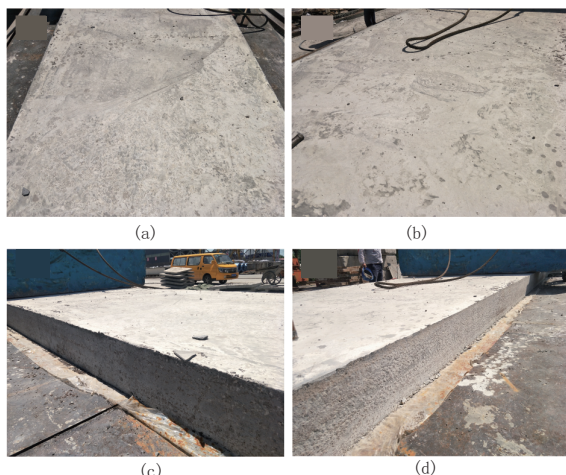


图 15 张拉后预制板梁表面(a、b)与端面(c、d)外观图

中具有良好的强度且能均匀传递钢束中的预应力至混凝土中。因此该新型锚具在实际工程实践中具有一定的适用性。

4 应用效果

该项研究提出小槽口改为整体槽口工艺,即将小箱梁负弯矩区的 7 个张拉槽口优化合并为 2 个。这不仅简化了预制梁场中的模板安装及钢筋穿束施工过程,同时也大大降低现场小箱梁负弯矩区施工难度,大幅提高施工效率与质量。

此外,该项研究提出将负弯矩区的扁锚锚具改为圆锚锚具工艺,并设计出一种新型锚具。该锚具在使用过程中配合具有圆形孔道的橡胶抽拔棒能够有效防止混凝土浇筑对预应力管道损坏,充分保证后续孔道灌浆的密实性。此外,新型圆锚锚具克服了扁锚摩阻损失大的缺点,能够控制钢束的伸长量,降低后续钢束的穿束与张拉难度,从而减小施工过程中预应力损失^[2]。

5 总结

小箱梁负弯矩区施工是实现桥梁结构体系由简

支状态向连续状态转换的重要工序,其施工质量与效率直接影响整体工程建设进展及桥梁后期运营使用的安全性与舒适性。为提升小箱梁负弯矩区的施工作业效率,该项研究还提出将负弯矩区小槽口改为整体槽口的创新工艺,很大程度上简化了小箱梁顶板浇筑工艺并降低后续负弯矩区张拉施工作业强度(见图 16)。此外,为进一步保证小箱梁负弯矩区施工质量与效率,该项研究设计出一种新型圆锚锚具。通过全面试验检验,充分论证了该新型圆锚锚具在提升钢束穿束效率与负弯矩钢束张拉应用方面具有较好的可行性。上述创新工艺已全面应用于上海 S7 公路(月罗公路-宝钱公路)新建工程中,充分提升了该建设的经济效益与社会效益。

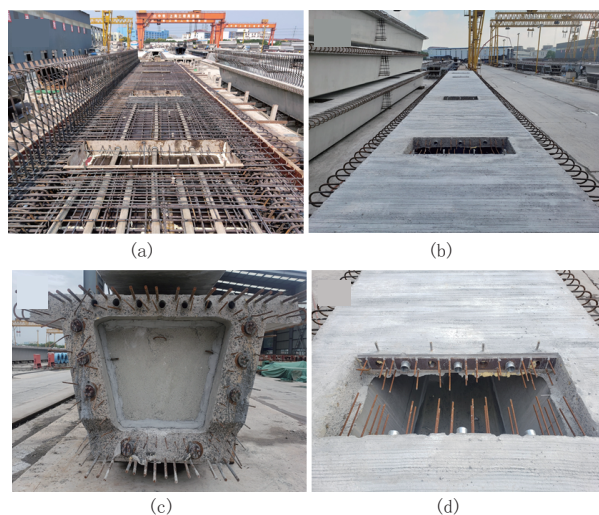


图 16 小槽口改为整体槽口工艺实际应用(a、b)及圆锚锚具实际应用(c、d)

参考文献:

- [1] 钟小军.采用先简支后连续结构体系的预制小箱梁优化[J].中国市政工程,2013(3):19-21+113-114.
- [2] 丁鹏.简支变连续 T 梁桥负弯矩区段构造改进技术研究[J].公路,2018,63(4): 86-93.
- [3] 彭义军.基于设计阶段的小箱梁桥墩顶负弯矩病害改进技术研究[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(4): 28-29.

(上接第 145 页)

估指南(试行)》(交质监发[2011]217号)

- [2] 阮欣,陈艾荣,石雪飞.桥梁工程风险评估[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [3] 于玲,包龙生,牛宏.大跨预应力混凝土梁式桥施工期间风险分析

[M].合肥:合肥工业大学出版社,2019.

- [4] GB 6441—1986,企业职工伤亡事故分类[S].
- [5] 交通运输部工程质量监督局.公路桥梁和隧道工程施工安全风险评价制度及指南解析[M].北京:人民交通出版社,2012.