

下承式钢管砼系杆拱桥施工风险控制

徐夏源

浙江宝业建设集团有限公司，浙江 绍兴

收稿日期：2023年2月23日；录用日期：2023年3月15日；发布日期：2023年3月24日

摘 要

当城市桥梁面临桥面标高和桥下净空受限等问题时，下承式拱桥成为了更多城市的选择。本文以某下承式钢管砼系杆拱桥为例，介绍了大桥的总体结构设计；基于大桥建设条件，拟定合适的总体施工方案；详细介绍了大桥的拱脚、端横梁、系梁现浇及中横梁预制安装施工，钢管砼拱肋施工、吊杆安装和桥面板现浇等主要施工工序。最后对主要施工作业程序进行风险源辨识和安全风险估测，确定了施工过程中应加强控制的工序和风险。

关键词

钢管混凝土拱桥，系杆拱桥，施工工艺，风险评估，风险控制，城市桥梁

Construction Risk Control of Through Concrete-Filled Steel Tube Tied-Arch Bridge

Xiayuan Xu

Zhejiang Baoye Construction Group Co., Ltd., Shaoxing Zhejiang

Received: Feb. 23rd, 2023; accepted: Mar. 15th, 2023; published: Mar. 24th, 2023

Abstract

When urban bridges are faced with challenges such as limited deck elevation and clearance under the bridge, the through arch bridge has become the choice of more cities. In this paper, taking a through concrete-filled steel tube tied-arch bridge as an example, the overall structural design of the bridge is introduced. Based on the construction conditions of the bridge, formulate a suitable overall construction plan. The main construction procedures of the bridge are introduced in detail,

such as the cast-*in-situ* construction of the arch feet, end beams, tie beams and the prefabrication and installation of the middle beams, the construction of the steel pipe concrete arch ribs, the installation of the suspender and the cast-*in-situ* construction of the bridge deck. Finally, the risk source identification and safety risk estimation are carried out for the main construction procedures, and the procedures and risks that should be strengthened in the construction process are determined.

Keywords

Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridge, Tied-Arch Bridge, Construction Technology, Risk Assessment, Risk Control, Urban Bridges

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人们生活水平的稳步提高,人们对公共基础设施的景观提出了更高要求,城市桥梁不再以单纯地满足交通需求作为终极目标[1][2]。系杆拱桥中系杆的设置巧妙地解决了拱桥拱脚推力过大的问题,深厚软基地区拱桥不再是禁区,极大地拓展了拱桥的应用范围[3][4][5][6]。下承式钢管砼系杆拱桥因承载能力大、跨越能力强、造型优美被大量应用于城市桥梁。钢管砼拱桥施工步骤较多,拱肋合龙前体系稳定性较差,大桥施工的安全性是大桥建设过程中的重要考量[7][8][9][10]。

本文以某城区下承式钢管砼系杆拱桥为工程背景,介绍了大桥的总体施工方案和重点工序。基于LEC法的施工安全评估,确定了大桥施工中的主要风险类型,并制定了针对性的应急预案,确保大桥建设的安全有序。

2. 工程概况

2.1. 总体布置

本工程场地地处钱塘江南岸,地貌类型为湖沼积平原,地势较低,地形平坦开阔,现地面标高约4.9~6.4 m。本项目范围内沿线跨越浙东运河,现状河道宽度120 m,道路等级为城市主干路,道路红线宽度标准为33 m,设计速度50 km/h。

某新建大桥采用一跨144 m跨越现状萧绍运河,桥宽41 m,桥跨布置为16+144+16,全长177.4 m,主桥为钢管混凝土系杆拱,引桥为预应力预制矮T梁,主墩采用实体墩承台桩基础,引桥采用柱式台桩基础。主桥总体布置图如图1所示,桥梁上部结构断面布置如图2所示。

2.2. 构造设计

主桥采用下承式钢管砼系杆拱结构,计算跨径为140米,拱轴线形为二次抛物线,矢跨比为1/5。

拱肋断面形式为四肢全桁式,横向在机非隔离带位置设置两片拱肋。拱肋高度为3.5米,宽2.5米,上下弦杆采用 $\varphi 100\text{ cm}$ $\delta = 24\text{ mm}$ 的直缝焊接管,腹杆和普通上下平联采用 $\varphi 36\text{ cm}$ $\delta = 14\text{ mm}$ 的钢管,吊杆下平联采用 $\varphi 70\text{ cm}$ $\delta = 18\text{ mm}$ 的钢管。拱肋断面由上下弦杆通过腹杆和平联连接组成,钢材采用Q345C钢。纵向四根钢管内灌注C50混凝土,其余均为空钢管。拱肋间设置三道桁架式风撑,风撑弦杆

采用 $\phi 40 \text{ cm } \delta = 16 \text{ mm}$ 的钢管，腹杆和平联采用 $\phi 20 \text{ cm } \delta = 10 \text{ mm}$ 的钢管。

系梁为预应力砼结构，截面尺寸为高 2.8 米，宽 21 米，预应力钢束采用高强度低松驰钢绞线，标准强度为 $f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$ 。

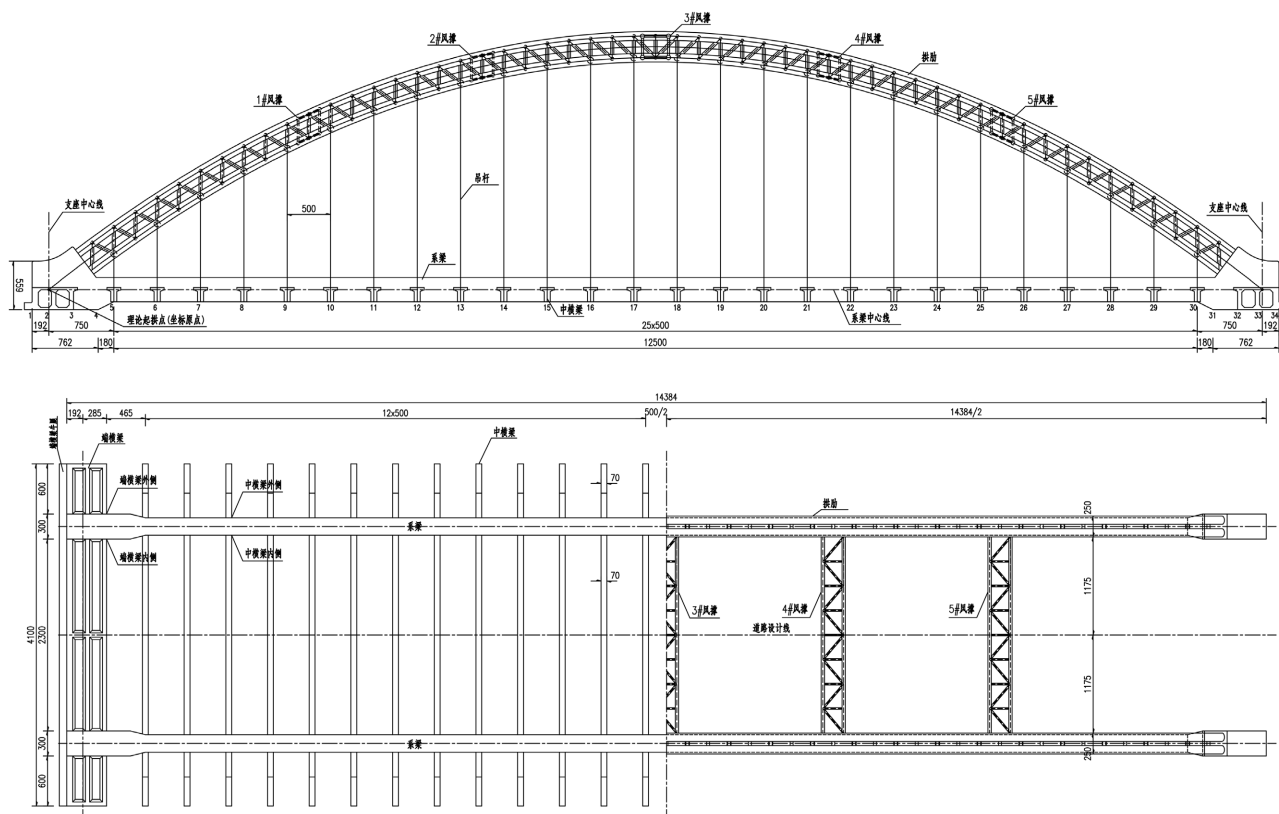


Figure 1. Overall layout of the bridge

图 1. 大桥总体布置图

全桥共设 28 道横梁，其中有 2 道预应力端横梁，2 道预应力中横梁。端横梁采用单箱双室截面，高度为 2.39~2.8 米；中横梁为 T 型截面，高度为 0.85~1.9 米。

吊杆布置采用可换式吊杆,纵桥向间距为 5 米,横桥向吊杆中心距为 26 米。吊杆为工厂生现场安装,由强度为 1670 MPa 的高强度镀锌钢丝外包双层 PE 套制成,吊杆的安全系数为 3.7。拱肋吊杆采用 151 $\phi 7$ 规格高强度钢丝,锚具采用墩头冷铸锚,吊杆与拱肋采用下平联加劲连接方案。

桥面板通过吊模现浇，与系梁、中横梁和端横梁形成整体，采用 C55 补偿收缩，厚度为 30 厘米。

3. 施工关键技术

本项目为大桥拆除重建施工，施工地点位于中心城区，周边交通繁忙，人流密集，施工关注度高，材料运输到现场难度较大，征地红线即为设计路线边线，且紧靠营业街区，作业面狭窄，采用围堰法施工后，施工区域相对封闭，干扰较少，主桥投影面两侧留有一定作业空间，施工条件尚可。

3.1. 总体施工方案

地基基础为围堰内河底淤泥就地固化, 固化水泥掺量 9%, 固化并养护 14 天后进行承载力检测, 承载力不小于 150 KPa, 填筑 60 cm 清宕渣, 宕渣顶面浇筑厚度 50 cm 钢筋砼扩大基础, 系梁横梁交叉点现

浇安装支架基础平面 $2.5\text{ m} \times 7\text{ m}$ ，中横梁悬臂外侧安装支架基础平面 $2.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ ，支架采用 $\varphi 426 \times 8$ 钢管立柱，工字钢承重梁，方木分配梁。

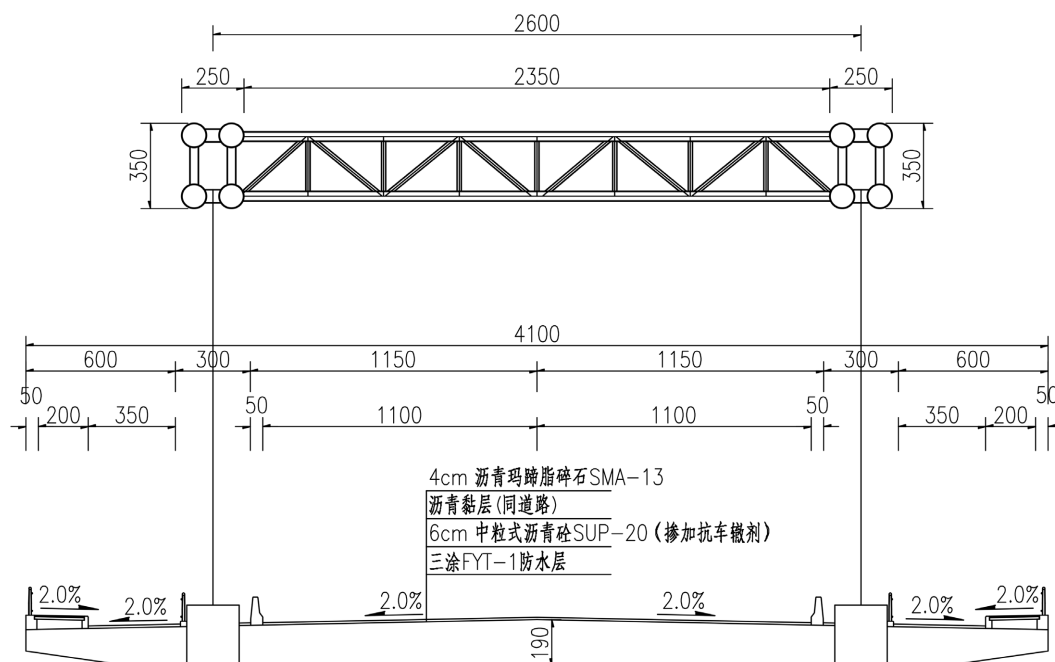


Figure 2. Cross section of bridge superstructure

图 2. 桥梁上部结构断面图

中横梁采用预制安装施工方法，预制台座布置在主跨地面上，台座位置设在两条中横设计位置投影面中间空挡处，与安装位置平行布置，吊装前在中横梁两端设置临时支墩，吊装就位后用钢管斜撑到支架上，确保稳定不倾覆。

系梁采用支架分段现浇法施工，每次浇筑长度为 10 m ，含两道与预制安装完成的中横梁之间的现浇连接段，从跨中往拱脚方向流水浇筑，直至与拱脚端合拢，最后浇筑跨中系梁合拢段，合拢段长度 1.5 m 。

1#、2#墩墩顶拱脚、端横梁为采用整体一次性支架现浇施工，同样采用砼扩大基础，采用钢管立柱、工字钢承重梁、方木分配梁形式，模板为整体式钢模。钢管拱拱脚部分预制拼装工作在工厂生产，与端横梁施工准备工作同步进行，在拱脚底模铺设完成后需运抵现场，与拱脚、端横梁钢筋一起安装。

系梁横梁及拱脚浇筑完成，连成整体框架，砼达到设计要求的砼强度及龄期，及时进行预应力张拉、压浆，系梁预应力分 3 次张拉，先张拉第一次系梁 T1、T6 号索，再张拉中横梁和端横梁。至此，砼结构浇筑完成，可移交下一步拱肋安装工作。

主桥上部结构主要施工程序：支架基础处理→砼扩大基础、预制台座浇筑→中横梁预制→横梁吊装→支架搭设→支架预压→系梁支架浇筑→端横梁拱脚浇筑→系梁预应力张拉→横梁预应力张拉→钢管拱现场拼装→钢管拱吊装→钢管拱砼浇筑→拆除拱肋支架→系梁第二次张拉→吊杆第一次张拉→拆除支架→系梁第三次张拉→现浇桥面板→吊杆二次张拉→桥面系及附属结构施工→吊杆三次张拉→成桥。

3.2. 大桥施工重难点

- 1) 主跨跨度大，桥面宽，拱矢高 28 m ，高处作业工序多、安全管控压力较大。
- 2) 系梁横梁支架使用涉及主桥上部结构施工全过程，承受荷载时间长，承受的荷载较大，对地基基

基础的沉降要求高。拱肋支架高度高，稳定性要求高。

- 3) 主桥路线在竖曲线上，系梁实际线型控制精度难度较大。
- 4) 肋拱高处拼接，线形控制难度大，安装精度要求高。
- 5) 拱肋风撑等需要在空中进行全熔透焊，施工难度大，焊缝质量控制以及焊接过程中的安全防护难度均较大。
- 6) 钢管拱构件工厂加工，构件尺寸较大，转运到现场运输难度大。
- 7) 施工现场为河道围堰内，场地较小，作业空间不足。

3.3. 关键工序施工

3.3.1. 拱脚、端横梁、系梁现浇及中横梁预制吊装

1#、2#单个主墩顶的端横梁与拱脚整体一次现浇采用支架现浇法，支架为 $\phi 426 \times 8$ 大钢管立柱、工字钢承重梁结构，端横梁拱脚均采用定型钢模板；中横梁采用在主桥下预制安装施工。中横梁预制采用主跨下预制，在两个中横梁中间位置设置台座，系梁之间预制部分中横梁长 22 m。

在中横梁预制安装完成后，进行系梁支架现浇与中横梁连接，系梁采用支架分段现浇法，支架同样采用 $\phi 426 \times 8$ 大钢管立柱、工字钢承重梁结构，系梁单次分段浇筑长度 10 m，跨中留 1.5 m 长合拢段，从跨中往拱脚方向分段流水现浇，与拱脚合拢后，最后进行跨中合拢。

3.3.2. 钢管砼拱肋施工

钢管拱肋制造分为弯管、横撑制造、节段制造、单根拱肋预拼、整体预拼。在满足《技术规范》和设计要求的条件下，拱肋单节长 2 m，工厂拼接成 10~12 m 长一节，整体运输到现场，现场再将拱肋拼接成单侧 7 个安装大段。钢管拱肋节段预拼利于控制桥梁的成桥线形、端口几何形状和拱肋的尺寸精度、接口间隙、相邻接口的精确匹配。

拱肋在工厂制作好后，经过整体预拼装后，一道刚拱分解成 7 节段运输至施工现场，其中端头 2 节段在拱脚段施工时预先埋设在拱脚内，其余中间 5 节段用汽车单节运到现场，经过二次拼装成整体，单节段最重 36 t，拱肋吊装施工如图 3 所示。

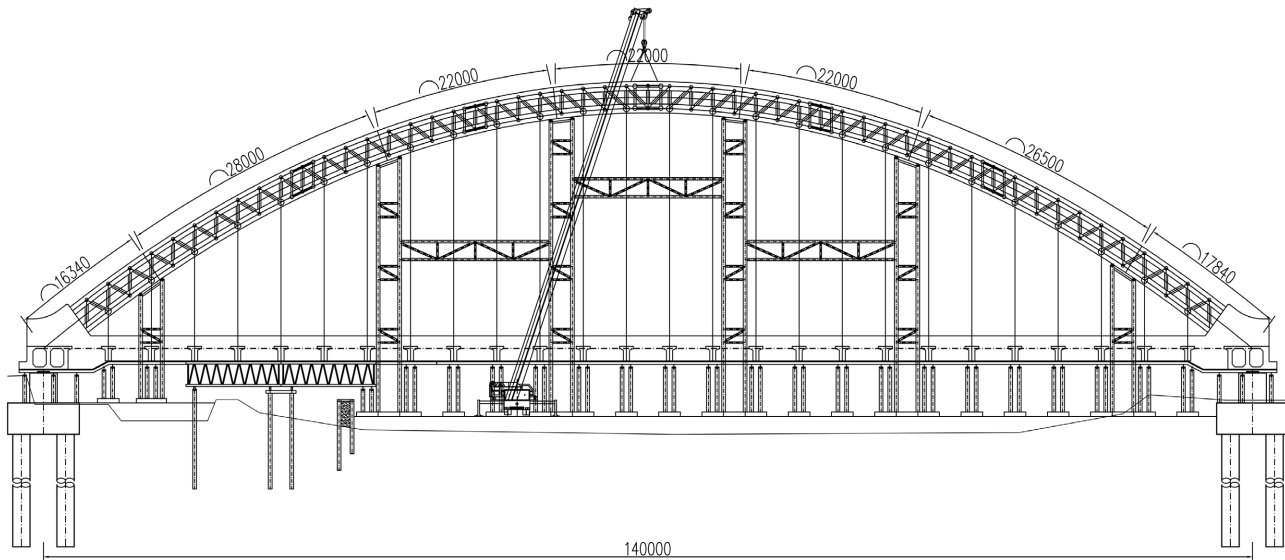


Figure 3. Construction diagram of arch rib erection
图 3. 拱肋吊装施工示意图

3.3.3. 现浇桥面板施工

加劲纵梁最后 2 索 T3、T4 张拉完成, 拆除桥面下临时支架后, 即可开始中横梁之间的现浇桥面板施工。主桥共 27 条, 宽 3.4 m, 长 41 m (含系梁宽), 厚 30 cm, 每条砼 37.5 m³, 现浇桥面板采用吊模法施工, 如图 4 所示。

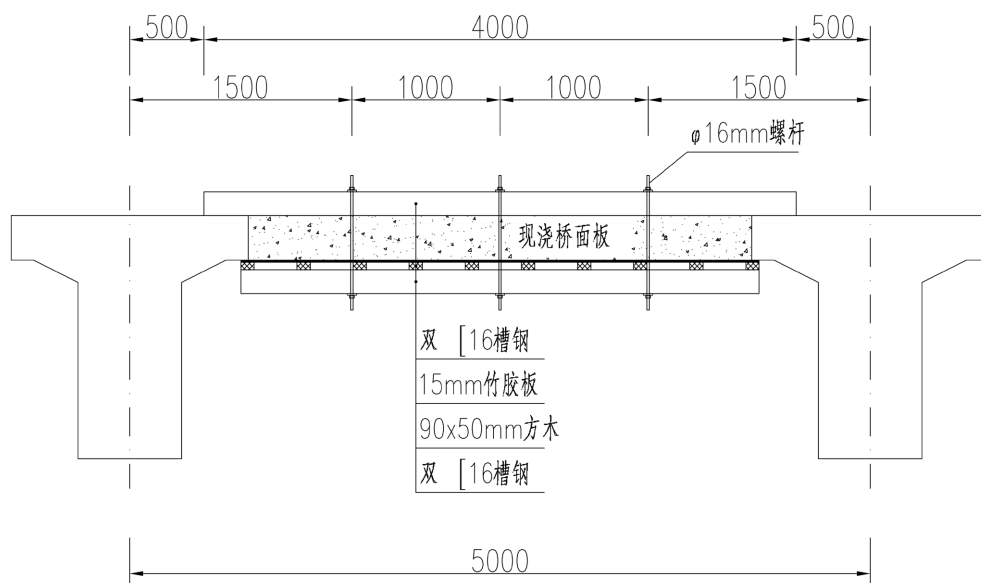


Figure 4. Construction diagram of bridge deck hanging formwork method

图 4. 桥面板吊模法施工示意图

4. 施工风险评估

4.1. 风险源辨识

事故致险因子: 从人、机、料、法、环等方面对可能导致事故的致险因子进行分析。建设工程安全隐患包括三个部分的不安全因素: 人的不安全因素、物的不安全状态和组织管理上的不安全因素。

通过对事故类型和致险因素的归纳和讨论, 结合砼钢管拱主桥、支架现浇的特点编制风险源分析表。编制的主要分析表有《拱脚、端横梁、系梁支架现浇风险源分析表》《中横梁、桥面板预制安装风险源分析表》《钢管拱肋制作安装风险源分析表》《现浇桥面铺装风险源分析表》, 潜在事故类型有: 坍塌、高处坠落、起重伤害、机械伤害、车辆伤害、物体打击、触电等。

4.2. 风险评估

4.2.1. LEC 评价法简介

LEC 评价法是对具有潜在危险性作业环境中的危险源进行半定量的安全评价方法。它是一种简单易行的评价操作人员在具有潜在危险性环境中作业时的危险性、危害性的评价方法。该方法采用与系统风险率相关的 3 种方面指标值之积来评价系统中人员伤亡风险大小。为了简化评价过程, 采取半定量计值法。即根据以往的经验 and 估计, 分别对这 3 方面划分不同的等级, 并赋值, 取值详见表 1~3。危险等级(D 值)取 L 值、E 值和 C 值的乘积, 详见表 4。

通过对该大桥砼钢管拱主桥施工危险因素分析可知, 拱脚、端横梁、系梁支架现浇, 钢管拱安装、砼压注时易发生坍塌(D 值 = 90), 施工过程中应加强控制。

Table 1. Possibility of accident (L value)
表 1. 发生事故可能性(L 值)

事故发生可能性	分数值
完全可以预料	10
相当可能	6
可能，但不经常	3
可能性小，完全意外	1
很不可能，可以设想	0.5
极不可能	0.2
实际不可能	0.1

Table 2. Frequency of exposure to hazardous environment (E value)
表 2. 暴露于危险环境的频繁程度(E 值)

暴露于危险环境的频繁程度	分数值
连续暴露	10
每天工作时间暴露	6
每周一次，或偶然暴露	3
每月一次暴露	2
每年几次暴露	1
非常罕见的暴露	0.5

Table 3. Consequences of accidents (C value)
表 3. 发生事故产生的后果(C 值)

暴露于危险环境的频繁程度	分数值
连续暴露	10
每天工作时间暴露	6
每周一次，或偶然暴露	3
每月一次暴露	2
每年几次暴露	1
非常罕见的暴露	0.5

Table 4. Hazard levels and countermeasures (D value)
表 4. 危险等级及应对策略(D 值)

范围	对策
D 值 ≥ 320	特大风险，不能继续作业
D 值 160~320	重大风险，需指定风险控制措施计划，立即整改，待风险降低后才能开始工作
D 值 70~160	中度风险，需降低风险，制定目标
D 值 20~70	可容许风险，在运行和活动中加以控制
D 值 < 20	可忽略风险，不需要采取措施

4.2.2. 应急预案

为了提高快速、及时、妥善地处置各类突发事件的能力,做好应急处置和抢险救援的组织工作,维护企业安全和稳定;为了明确应急管理和应急响应职责,迅速、准确、有效地处置发生或可能发生的各类突发事件,有效预防和最大限度地减少突发事件所造成的人员伤亡、财产损失、环境破坏、社会影响等,本着“预防与应急并重”的原则,坚持“安全第一、预防为主、综合治理”的安全生产管理方针,完善项目应急工作机制,结合本项目实际施工特点,制定了系列应急预案。

坍塌应急处置方案如下:

- 1) 事故发生后立即报告项目部应急救援领导小组。应急救援领导小组在第一时间到达后立即组织应急救援队抢救现场伤员,清理坍塌现场,并做好警戒,禁止无关人员进入事故现场,以免造成二次伤害。
- 2) 尽量使用人工挖掘被掩埋伤员及时脱离危险区。
- 3) 进行简易包扎、止血或简易骨折固定。
- 4) 对呼吸、心跳停止的伤员予以心脏复苏。
- 5) 应急救援队负责消除伤员口、鼻内泥块、凝血块、呕吐物等,将昏迷伤员舌头拉出,以防窒息。
- 6) 组织人员尽快解除重物压迫,减少伤员挤压综合症发生。并将其转移至安全地方。
- 7) 尽快与 120 急救中心取得联系,详细说明事故地点、严重程度,并派人到路口接应,同时准备好车辆随时准备运送伤员到附近的医院救治。
- 8) 在没有人员受伤的情况下,现场负责人根据实际情况研究补救措施,在确保人员生命安全的前提下,组织恢复正常施工秩序。
- 9) 加强支挡措施;迅速清理堆压重物;对未坍塌结构进行加固处理。
- 10) 技术负责人、现场安全员对坍塌事故进行原因分析,制订相应的纠正措施,认真填写伤亡事故报告表、事故调查等有关处理报告,并上报公司和上级相关部门。

此外,针对项目特点和项目所处地理位置,还制定了防台防汛应急处置方案和恶劣天气损害应急处置方案。

5. 结语

本文以某城区下承式钢管砼系杆拱桥为工程背景,介绍了大桥的总体施工方案和重点工序。基于 LEC 法的施工安全评估,确定了大桥施工中的主要风险类型,并制定了针对性的应急预案,确保了大桥建设的安全有序。本文的主要工作如下:

- 1) 根据大桥建设条件,拟定合适的总体施工方案。
- 2) 详细介绍了大桥的拱脚、端横梁、系梁现浇及中横梁预制安装施工、钢管砼拱肋施工、吊杆安装和桥面板现浇等主要施工工序。
- 3) 最后对主要施工作业程序进行风险源辨识和安全风险估测,确定了施工过程中应加强控制的工序和风险。

针对施工过程中拱脚、端横梁、系梁支架现浇、钢管拱安装、砼压注等作业时易发生的坍塌事故,制定了专项应急处置方案。

参考文献

- [1] 黄泽斌,肖雅丹,王奇文,文彦人. 城市景观桥梁群地域性美学研究[J]. 中外建筑, 2022(10): 40-45+17.
- [2] 俞志国. 桥梁美学设计的现状和发展[J]. 城市道桥与防洪, 2018(6): 102-104+370.
- [3] 周祥树. 某单跨 100 m 钢箱系杆拱桥总体设计[J]. 城市道桥与防洪, 2022(10): 13-14+66-68+80.

- [4] 龙汉, 刘剑. 钢管混凝土系杆拱桥静力参数敏感性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(2): 419-425.
- [5] 孙九春, 曹虹, 奚国栋. 钢管混凝土系杆拱桥施工控制技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(15): 67-71+77.
- [6] 周小勇, 吕志敏, 王加辉, 李庆刚. 支架现浇系杆拱桥吊杆张拉方案优化[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 125-130.
- [7] 金成棣, 葛耀君, 徐胜乙. 钢管混凝土桁架系杆拱桥稳定性分析[J]. 结构工程师, 2022, 38(1): 1-13.
- [8] 王伟, 李国峰. BIM 技术在高速公路桥梁施工安全管理中的应用[J]. 公路, 2020, 65(6): 176-178.
- [9] 冯志强, 张勇, 张智乐. 某钢管混凝土系杆拱桥施工监控分析研究[J]. 公路, 2019, 64(3): 123-127.
- [10] 马小锋, 钟荣炼, 马白虎, 汪建群. 千米级斜拉桥施工安全专项风险评估研究[J]. 公路, 2019, 64(9): 209-213.