

文章编号: 1674-599X(2020)04-0101-06

## 落墩中央分隔带施工安全风险评估研究

刘昶<sup>1</sup>, 刘辉<sup>1</sup>, 邓小钊<sup>2</sup>, 刘耀坤<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙拓正交通科技有限公司, 湖南 长沙 410008;  
3. 湖南理工学院, 湖南 岳阳 414006)

**摘要:** 传统的桥梁施工安全风险评估方法在易用性和系统性方面存在缺陷, 而且忽视了动态交通带来的风险。以新建常祁高速公路 G72 分离桥为依托, 通过量化施工风险指标和交通风险指标, 对传统 LEC 评价法进行改进; 运用作业分解结构-风险分解结构和层次分析法对该桥进行风险评估。研究表明: 该桥可分解为 4 个分项工程和 18 个单位作业, 按照 HSE 风险管理模式, 确定了 17 个风险指标; 将作业指标和风险指标形成耦合矩阵, 确定了 192 处风险源, III 级以上风险源 14 处; 通过层次分析法得到了 III 级以上风险的单位作业 7 处和分项工程 1 处, 该桥梁总的风险度为 171.8, 属于 III 级风险; 并从交通组织与安全防护两方面提出落墩中分带上跨高速公路项目的施工风险管控措施, 可为类似的工程提供了理论和实践借鉴。

**关键词:** 落墩中央分隔带; LEC 评价法改进; RBM 耦合矩阵; 层次分析法; 风险响应

中图分类号: U447

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.015

### Research on the construction safety risk assessment of the central separate belt with pier

LIU Chang<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, DENG Xiao-zhao<sup>2</sup>, LIU Yao-kun<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Changsha University of Sciences & Technology, Changsha 410114, China;  
2. Changsha Tuozheng Transportation Technology Co., Ltd., Changsha 410114, China;  
3. Hunan Institute of Science & Technology, Yueyang 414006, China)

**Abstract:** The traditional bridge construction risk evaluation method has defects in user-friendliness and systematicness, and ignores dynamic traffic risks. This paper is based on the research conducted on the newly built G72 Separation Bridge of Chang-Qi Expressway, in which the traditional LEC Method is improved by quantifying the construction risk index and traffic risk index, and the risk of this bridge is evaluated comprehensively by the use of WBS-RBS and AHP. The results show that the bridge can be divided into 4 sub projects and 18 unit operations, and 17 risk indicators are identified in accordance with the HSE risk management model; 192 risk sources are determined by coupling operation index and risk index, among which 14 are above level III; Through the analytic hierarchy process, 7 unit operations and 1 sub-divisional project with risks above level III are obtained, and the total risk of the bridge is 171.8, which is also a level III risk. Finally, construction risk management and control measures are proposed from the aspects of traffic organization and safety protection, which provides theoretical and practical guidance for similar projects.

**Key words:** pier on central separate belt; improved LEC method; RBM coupling matrix; analytic hierarchy process; respond of risk

收稿日期: 2019-12-25

基金项目: 长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJXC201926)

作者简介: 刘昶(1996-), 男, 长沙理工大学硕士生。

中国高速公路主干网已贯通,现处于网络化建设时期,其建设过程中出现了各种复杂线路的交叉<sup>[1]</sup>。不少线路的交叉选择将墩柱设置在现役高速公路的中央分隔带上,这类跨线桥不仅存在一般桥梁的施工风险,而且对被交路段的交通产生较大影响。因此,如何系统地对此类桥施工进行风险评估,并提出风险控制措施,是桥梁建设安全管理重点之一。目前,许多学者相继对桥梁施工风险评价模型展开了研究,提出了各类桥梁施工安全风险评价方法。张美意<sup>[2-3]</sup>等人在识别桥梁施工阶段主要风险因素的基础上,构建了桥梁施工阶段风险估计的指标体系,并建立了基于蒙特卡罗法的桥梁施工风险估计模型。康俊涛<sup>[4]</sup>等人构建了风险因素和风险事件的贝叶斯网络关系模型,引入连锁故障的事故链理论,利用层次分析法(analytic hierarchy process, 简称为 AHP)对各事故链评分排序,识别诱发风险事件的关键线路。陈常松<sup>[5]</sup>等人结合不确定层次法和模糊综合评判法,提出了一种系统实用的桥梁工程风险评估方法。赖笑<sup>[6]</sup>等人运用灰色关联度理论和 LEC 法构建风险等级评价模型,实现对桥梁结构施工状态的综合性评价。由于这些方法大多是将其他领域的风险评价方法应用于桥梁风险评估,在易用性和系统性方面存在缺陷,并且都只考虑了桥梁施工本身的风险,忽视了交通风险等因素。因此,作者拟采用作业分解结构-风险分解结构(work breakdown structure-risk based supervision, 简称为 WBS-RBS)方法对 G72 分离桥进行风险源识别,采用改进 LEC(likelihood exposure criticality, 简称为 LEC)法对风险源进行衡量,并引入 AHP 法对每一

单位作业和分项工程进行风险度计算,得到总的风险度。针对交通方面的影响,提出了对应的风险管控措施,形成了一套施工完整的桥梁风险评估体系。

## 1 工程简介

新建跨线桥上跨 G72 泉南高速,桥长 63 m,交角为  $96^\circ$ ,与泉南高速路面最小净高 6.9 m。桥梁上部构造为  $2 \times 30$  m 预应力砼小箱梁,下部为长 8.1 m、厚 70 cm、高 5.5 m 的薄壁墩,墩柱两侧设置 F 型 SS 级防撞护栏,墩柱基础为长 11.1 m、宽 3.71 m、高 1.5 m 的钢筋混凝土扩大基础,埋深 4.5 m。桥梁平面示意如图 1 所示。

1#墩设置在泉南高速中央分隔带上,中央分隔带宽 1.8 m,防护形式为波形梁,两侧水沟为 0.5 m,超车道为 3.75 m,施工场地宽度共 10.3 m,东西长度可根据施工要求拆除中央分隔带,延长施工场地。采用围挡进行封闭,场内预留堆土场,墩柱施工场地布置如图 2 所示。施工路段日均双向车流量约 1 万台,节假日、春运流量倍增,其中,大车流量占 1/3。

## 2 改进的 LEC 法

LEC 法作为一种半定量的评估方法,因其操作简便,能对施工过程中的风险源进行量化,广泛应用于多个领域的风险评估中。传统 LEC 法只研究了危险源的固有属性,没有考虑作业环境和交通环境对施工带来的风险。其次,其评分判据过于模糊,

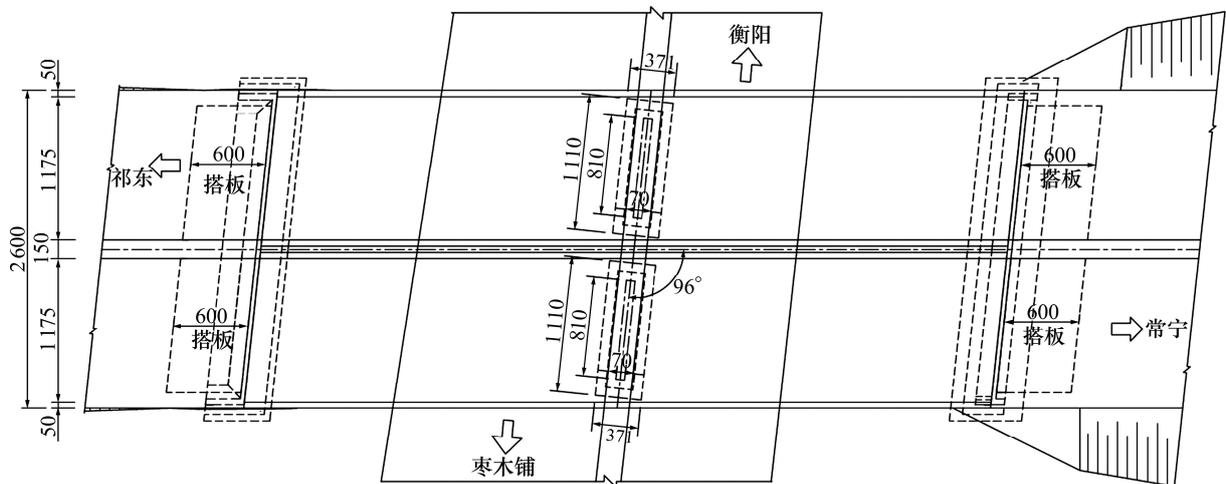


图 1 G72 分离桥平面示意

Fig. 1 Schematic diagram of the G72 separation bridge

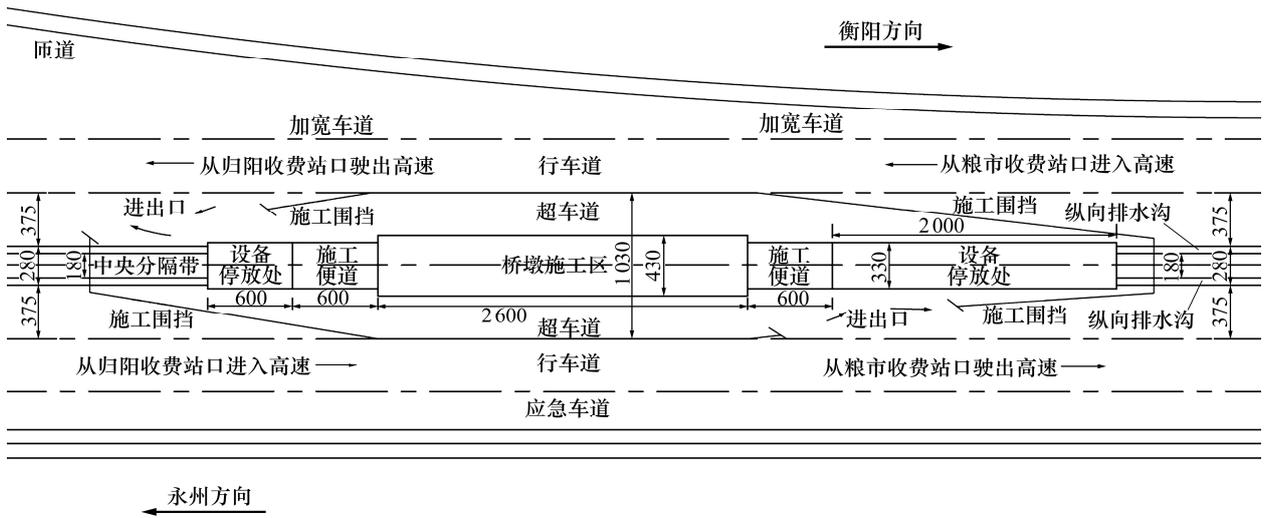


图 2 墩柱施工场地布置

Fig. 2 Schematic diagram of the Construction site

导致主观性太强<sup>[7]</sup>。鉴于传统 LEC 法具有局限性, 结合占道施工的特点对其进行改进, 量化  $L$ 、 $E$ 、 $C$  的取值, 考虑交通影响, 建立 LEC 改进评估体系。

### 2.1 事故发生的可能性

传统 LEC 法中事故发生的可能性( $L$ )的取值标准单一, 且主观性太强。结合本工程及类似工程的实际情况, 将专项施工方案、交通组织方案、日均车流量和工程地质条件列入事故发生可能性评估体系中, 取值见表 1。改进后  $L$  值的计算公式为:

$$L = \lambda_1 \times L_1 + \lambda_2 \times L_2 + \lambda_3 \times L_3 + \lambda_4 \times L_4 \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为  $L_1 \sim L_4$  指标的权重系数, 分别为  $\lambda_1=0.3$ 、 $\lambda_2=0.3$ 、 $\lambda_3=0.3$ 、 $\lambda_4=0.1$ 。

表 1 事故发生可能性等级划分

Table 1 Classification of accident probability

$L$ 值	专项施工方案	交通组织方案	日均车流量/ 万辆	工程地质 条件
10.0	未编制	未编制	$\geq 10$	很复杂
6.0	可操作性差	可操作性差	5~10	较复杂
3.0	可操作性较差	可操作性较差	1~5	复杂
1.0	可操作性一般	可操作性一般	0.5~1	一般
0.5	可操作性较强	可操作性较强	0.1~0.5	较好
0.1	可操作性强	可操作性强	$< 0.1$	非常好

### 2.2 暴露于危险环境的频繁程度

作业人员暴露在危险作业单元的频率与作业时长有关, 时间越长, 频率越高, 则越容易受伤。参照文献[8], 作业单元中以作业人员的作业时长为评估指标, 构建暴露于危险环境频繁程度等级  $E$  的

划分标准,  $E$  值为 10.0, 6.0, 3.0, 2.0, 1.0, 0.5 m, 其危险环境的作业时长分别为  $\geq 10$  h、8~10 h、6~8 h、4~6 h、2~4 h、 $< 2$  h。

### 2.3 事故可能发生的后果

传统 LEC 法中事故可能发生后果  $C$  的取值以人员伤亡作为唯一指标, 不能反映实际情况。为了尽量保证评价结果的可靠性, 充分考虑动态交通风险, 在原有指标的基础上优化了人员伤亡指标的取值, 并加入经济损失、工期延误和交通延误 3 个指标, 见表 2。改进后事故可能发生的后果  $C$  值的计算公式为:

$$C = \beta_1 \times C_1 + \beta_2 \times C_2 + \beta_3 \times C_3 + \beta_4 \times C_4 \quad (2)$$

式中:  $\beta$  为  $C_1 \sim C_4$  指标的权重系数, 分别为  $\beta_1=0.4$ 、 $\beta_2=0.3$ 、 $\beta_3=0.2$ 、 $\beta_4=0.1$ 。

表 2 事故发生可能的后果等级

Table 2 Possible consequence level of accident

$C$ 值	人员伤亡/人	经济损失/%	工期延误/%	交通延误/h
100	死亡 $\geq 11$	$\geq 20$	$\geq 20$	$\geq 720$
40	死亡 3~10	10~20	10~20	240~720
15	死亡 1~10	1~10	5~10	48~240
7	重伤 1~10	0.1~1	1~5	0~48
3	轻伤 3~10	0.01~0.1	0.5~1	0.5~2
1	轻伤 1~2	$< 0.01$	$< 0.5$	0~0.5

### 2.4 危险性等级

危险性等级划分由  $L$ 、 $E$ 、 $C$  三者的乘积为每一个作业单元的危险性分值  $D$ 。当  $D < 20$  时, 为 I 级风险; 当  $20 \leq D < 70$  时, 为 II 级风险; 当  $70 \leq D <$

160 时,为III级风险;当  $160 \leq D < 270$  时,为IV级风险;当  $D \geq 270$  时,为V级风险。

### 3 风险评估体系

项目资料的调研、风险辨识、风险衡量和风险度计算是土建工程施工安全评估工作的主要内容<sup>[9]</sup>,也是桥梁风险评估体系的组成部分。其中,风险辨识采用职业健康、安全、环境(health security environment, 简称为 HSE)和 WBS-RBS 结合的方法。风险衡量采用 LEC 法和专家调查法综合。风险度计算是在 LEC 法计算结果的基础上,采用 AHP 法分配权重,再进行计算。

#### 3.1 基于 WBS-RBS 的风险源识别

基于 WBS-RBS 的风险源识别,不仅能全面统筹项目的整体风险,也能精确兼顾工程的局部风险<sup>[10]</sup>。其识别流程为:

1) 构建 WBS 分解。按照结构特点将 G72 分离中桥划分为桥台施工( $W_1$ )、墩柱施工( $W_2$ )、上部结构施工( $W_3$ )、桥面系及附属结构施工( $W_4$ )4 个分项工程。然后,按照施工顺序将分项工程继续分解,得到单位作业 18 项,其中,  $W_1$  分为基础开挖( $W_{11}$ )、钢筋运输与焊接( $W_{12}$ )、立模浇筑( $W_{13}$ );  $W_2$  分为交通设施布设( $W_{21}$ )、围挡施工( $W_{22}$ )、基坑开挖( $W_{23}$ )、钢筋运输与焊接( $W_{24}$ )、立模浇筑( $W_{25}$ );  $W_3$  分为梁片预制( $W_{31}$ )、梁片运输( $W_{32}$ )、预制梁架设( $W_{33}$ );  $W_4$  分为支座安装( $W_{41}$ )、防撞栏杆施工( $W_{42}$ )、桥面铺装( $W_{43}$ )、伸缩缝安装( $W_{44}$ )、桥面排水( $W_{45}$ )、防抛网安装( $W_{46}$ )、桥墩防撞墩施工( $W_{47}$ )。

2) 构建 RBS 分解。从 HSE 的 3 个方面出发,结合相关行业规范,采用专家调查方式,得到了该桥梁工程 RBS 风险识别体系,分别为职业健康风险( $R_1$ )、安全管理风险( $R_2$ )和施工环境风险( $R_3$ ),其中,  $R_1$  包括施工噪音( $R_{11}$ )、粉尘( $R_{12}$ )、化学毒物( $R_{13}$ )、焊接操作( $R_{14}$ )、恶劣天气( $R_{15}$ );  $R_2$  包括施工路段车速过快( $R_{21}$ )、施工围挡不牢固( $R_{22}$ )、运输车辆出入( $R_{23}$ )、用电不当( $R_{24}$ )、高空作业防护不当( $R_{25}$ )、高处掉落施工材料( $R_{26}$ )、设备欠修或老化( $R_{27}$ )、易燃易爆物存放不当( $R_{28}$ )、机械故障或使用不当( $R_{29}$ );  $R_3$  包括施工垃圾、污水及废弃物( $R_{31}$ )、施工机具油污泄漏( $R_{32}$ )、尾气、化合物挥发( $R_{33}$ )。

3) 构建 RBM 耦合矩阵。以工作分解为行,风险分解为列,构成作业单元和风险的映射关系,耦合形成 RBM 耦合矩阵,总共确定了 192 处风险源。以墩柱施工的 RBM 耦合矩阵为例,共存在 50 处风险源,见表 3,其中“0”表示耦合不产生风险。由于 WBS 和 RBS 分解均具有层次关系。因此,既能从宏观层面把握工程的总体风险,也能从微观角度分析每处风险的来源及其严重程度,使得后续的风险管控更加系统和精确。

#### 3.2 风险衡量

采用改进的 LEC 法,邀请了 5 位专家以问卷调查的形式对 RBM 耦合矩阵中的风险源进行评分,以他们的评分结果的算数平均值作为风险源评估结果。以墩柱施工为例, I 级风险源有 10 处, II 级风险源 17 处, III 级风险源 17 处, IV 级风险源 5 处, V 级风险源 1 处,其不同作业单元的危险性分值见表 3。

表 3 墩柱施工 RBM 耦合矩阵

Table 3 RBM coupling matrix of pier construction

RBS 分解	WBS 分解				
	$W_{21}$	$W_{22}$	$W_{23}$	$W_{24}$	$W_{25}$
$R_{11}$	15.1	15.1	25.2	0.00	25.2
$R_{12}$	0.0	0.0	25.2	0.00	0.0
$R_{13}$	0.0	0.0	0.0	58.00	86.0
$R_{14}$	0.0	0.0	0.0	15.10	0.0
$R_{15}$	15.1	15.1	45.2	15.10	45.2
$R_{21}$	159.6	92.4	159.6	92.40	281.4
$R_{22}$	0.0	46.2	77.0	46.20	141.4
$R_{23}$	0.0	0.0	186.2	79.80	236.2
$R_{24}$	0.0	44.5	74.2	0.00	74.2
$R_{25}$	0.0	0.0	0.0	0.00	182.6
$R_{26}$	0.0	0.0	152.6	91.60	182.6
$R_{27}$	0.0	0.0	89.6	53.80	89.6
$R_{28}$	0.0	0.0	0.0	224.30	0.0
$R_{29}$	48.7	48.7	81.2	52.08	98.0
$R_{31}$	0.0	0.0	78.4	47.00	56.0
$R_{32}$	0.0	0.0	28.0	16.80	28.0
$R_{33}$	8.4	0.0	14.0	8.40	0.0

#### 3.3 风险度计算

WBS-RBS 法的分解结构符合 AHP 法的权重计算原理。具体步骤:

1) 计算该桥 WBS 中 4 个分项工程的权重  $\omega_i$ 。将 4 个分项工程  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  组成 4 阶判断矩

阵,并采用 Saaty 九标度法进行重要性赋值,得到的判断矩阵  $A$  为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 3 \\ 3 & 1 & 1/2 & 6 \\ 5 & 2 & 1 & 8 \\ 1/3 & 1/6 & 1/8 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\omega_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (4)$$

按式(4)计算矩阵最大特征值所对应的正规化特征向量(各被比较元素的权重),得到  $\omega_1=0.118, \omega_2=0.305, \omega_3=0.527, \omega_4=0.051$ 。

2) 进行一致性检验。按照式(5)和式(6)分别计算矩阵最大的特征值  $\lambda_{\max}$  和相容性指标  $C_1$ , 计算得到  $\lambda_{\max}=4.0476, C_1=0.0159$ , 则一致性比率  $C_R=C_1/R_1=0.0179 < 0.10$ , 满足一致性要求, 阶数  $1 \sim 10$ , 其中  $R_1$  为平均随机一致性指标, 取值分别为  $0.0, 0.58, 0.9, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45, 1.49$ 。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega)_i}{n\omega_i} \quad (5)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

3) 采用同样的方法分别计算出同一分项工程中各个单位作业的权重  $\omega_{ij}$  和同一单位作业中各个风险源的权重  $\omega_{ijk}$ ;

4) 按照式(7)~(9)计算出任意单位作业风险度  $D_{ij}$ 、分项工程风险度  $D_i$  和桥梁总风险度  $D$ 。

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n D_{ijk} \times \omega_{ijk} \quad (7)$$

$$D_i = \sum_{j=1}^n D_{ij} \times \omega_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \times \omega_{ijk} \quad (8)$$

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \times \omega_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} \times \omega_{ij} \\ = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \times \omega_{ijk} \quad (9)$$

式中:  $i$  为分项工程序号;  $j$  为单位作业序号;  $k$  为风险源序号。

按照该方法, 识别出 III 级以上风险的单位作业 7 处, 其中,  $W_{25}$  为 IV 级风险,  $W_{33}$  为 V 级风险。4 个分项工程中,  $W_3$  为 IV 级风险,  $W_2$  为 III 级风险,  $W_1$  和  $W_4$  为 II 级风险, 其对应的风险度分别为  $D_3=$

$223.4, D_2=146.2, D_1=61.4, D_4=43.6$ , 则桥梁总风险度  $D=171.8$ , 属于 III 级风险。

## 4 风险管控措施

针对该桥施工期间对交通的影响, 提出从交通组织与安全防护两方面的施工风险管控措施<sup>[10]</sup>, 给类似的工程提供借鉴。

### 4.1 防护棚架搭设

防护棚长 36 m、右侧宽 12 m、左侧宽 9.7 m, 高 5.5 m。基础采用 C20 砼条形基础, 立柱采用  $\phi 400 \times 10$  的钢管, 布置在高速路两侧和中间隔离带处, 间距 6 m。在四立柱顶面沿高速方向设置  $I_{40b}$  钢梁作为横向主梁。在主梁顶面沿桥梁方向, 按间距 2.0 m 设置工  $I_{40b}$  钢梁作为纵向次梁。在次梁顶面沿高速方向, 按间距 0.6 m, 设 12a 槽钢+2 mm 钢板+彩钢瓦, 形成封闭缓冲层和隔水层。

### 4.2 交通组织方案

跨线施工期间, 将对该路段的车辆通行带来不可避免的影响, 结合施工实际, 交通组织拟分 4 个阶段进行: ①施工时, 封闭泉南高速双向超车道, 利用水马、交通锥压缩部分车道。施工车辆的进出顺着高速公路方向, 封闭区域布置材料堆放场地、设备停放区, 采用架管围挡进行隔离。②基础立柱施工时, 根据施工需求灵活封闭部分车道, 防护棚架横纵梁及顶面铺装分幅施工。期间, 需管制交通, 每次管制时间约 3~5 min。开放交通后, 车辆通过超车道通行。③施工时, 需在施工路段近端管制交通。当预制箱梁吊装进入高速范围时, 通知交通警察开始管制交通, 管制时间约 10~15 min。开放交通后, 车辆在已搭设好的安全通道内通行。④此阶段交通组织参照第二阶段交通组织。

## 5 结论

1) 在传统 LEC 法基础上, 考虑交通因素的影响, 同时, 对这 3 个指标的取值标准进行量化和补充, 获得更加准确的评价结果。

2) 对 G72 分离桥施工阶段进行 WBS 分解, 得到 4 大分项工程, 并继续细化到 18 个单位作业。采用 HSE 风险管理模式, 对本桥进行 RBS 分解, 确定了 17 个风险指标。基于 WBS-RBS 耦合矩阵,

确定了 192 处风险源, 并采用改进的 LEC 法确定了各风险源的危险性分值。

3) WBS-RBS 耦合矩阵基础上, 采用 AHP 法, 确定 III 级以上风险的单位作业 7 处, 总风险度为 171.8, 属于 III 级风险。

4) 跨线施工期间结合实际, 交通组织拟分桥墩施工、防护棚架安装、桥梁小箱梁吊装施工、防护棚架拆除 4 个阶段进行, 可供类似工程提供借鉴。

#### 参考文献(References):

- [1] 徐舟, 刘卓. 高速公路与国省干线交叉施工点行车风险评估方法[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 115-118. (XU Zhou, LIU Zhou. Traffic risk estimation of building overpass expressway bridge above national and provincial road[J]. Highway Engineering, 2018, 43(3): 115-118. (in Chinese))
- [2] 张美意, 陈佳维. 湖南省综合交通枢纽城市体系研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(1): 107-111. (ZHANG Mei-yi, CHEN Jia-wei. Study on the urban transportation hub city system in Hunan Province[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(1): 107-111. (in Chinese))
- [3] 丁闪闪, 刘小勇, 王遥, 等. 基于蒙特卡罗法的桥梁施工阶段风险估计[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(6): 121-125. (DING Shan-shan, LIU Xiao-yong, WANG Yao, et al. Risk assessment of bridge construction stage based on monte carlo[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(6): 121-125. (in Chinese))
- [4] 康俊涛, 刘洋. 桥梁施工安全性评价的贝叶斯网络方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(7): 157-162. (KANG Jun-tao, LIU Yang. Study on safety assessment of bridge construction based on bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(7): 157-162. (in Chinese))
- [5] 陈常松, 卫毅. 模糊综合评判法在斜拉桥施工风险评估中的应用[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(3): 43-49. (CHEN Chang-song, WEI Yi. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in construction risk assessment of cable-stayed bridges[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(3): 43-49. (in Chinese))
- [6] 赖笑, 王锋, 谭勇. 基于桥梁风险评价的灰色关联性风险评估模型构建研究[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 205-209. (LAI Xiao, WANG Feng, TAN Yong. Research on grey correlation risk assessment model based on bridge risk assessment[J]. Highway Engineering, 2018, 43(4): 205-209. (in Chinese))
- [7] 刘辉, 孙世梅. 基于改进 LEC 法的公路隧道施工安全评价研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 26-32, 61. (LIU Hui, SUN Shi-mei. Study on safety evaluation of highway tunnel construction based on improved LEC method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(1): 26-32, 61. (in Chinese))
- [8] 曾宪云. 城市高架路施工安全风险评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. (ZENG Xian-yun. Research on safety risk assessment of construction for urban elevated road [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [9] 贾俊峰, 梁青槐. WBS-RBS 与 AHP 方法在土建工程施工安全风险评估中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(7): 101-103, 107. (JIA Jun-feng, LIANG Qing-huai. Application of WBS-RBS and AHP methods in risk evaluation of civil engineering construction safety[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(7): 101-103, 107. (in Chinese))
- [10] 陈国华, 吴武生, 徐三元, 等. 基于 WBS-RBS 与 AHP 的跨海桥梁工程施工 HSE 风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(9): 51-57. (CHEN Guo-hua, WU Wu-sheng, XU San-yuan, et al. Assessment HSE risk of during sea-crossing bridges project construction based on WBS-RBS and AHP[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(9): 51-57. (in Chinese))
- [11] 王明慧, 李开兰, 朱永波. 山区高速铁路特大桥上跨高速公路施工安全管理[J]. 铁道建筑, 2015(2): 52-54. (WANG Ming-hui, LI Kai-lan, ZHU Yong-bo. Construction safety management of super large bridge over expressway of high speed railway in mountainous area[J]. China Safety Science Journal, 2015(2): 52-54. (in Chinese))