

文章编号:1671-8879(2017)05-0097-07

基于交通事故成本控制的高速公路 施工区布局优化

吴江玲¹, 张生瑞¹, SINGH A K², 马壮林³, 周 备¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 阿特金斯北美公司, 德克萨斯 奥斯汀 TX78758;
3. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为研究交通事故成本最小情况下的高速公路养护施工区最优化布局,在对高速公路养护施工区特征及临时交通安全设施分析基础上,遴选重要指标并构建高速公路养护施工区交通事故成本预估模型;通过问卷调查确定高速公路养护施工区的布局特征对交通事故的影响等级,定量研究高速公路养护施工区布局特征对交通事故发生风险的影响程度,确定拟实施养护作业路段的事故率变化;最后,建立以交通事故成本控制为目标的高速公路施工区布局优化模型,从而确定最优的养护期间施工区的布局设置。研究结果表明:高速公路施工区布局设置对养护施工区交通事故成本有显著影响,遴选的各类施工区特征中相应的风险等级最高的施工区特征参数分别为白天(6:00~10:00)施工、移动施工、入口匝道附近作业、车道宽度小于标准车道宽度、路面画线、太阳眩光、无限速、施工设备安装、隧道群处、异质性车队(大型车比例 20%~80%);有巡逻车引导车辆通行能在最大程度上减少施工区交通事故;通过求解以交通事故成本控制为目标的高速公路施工区布局优化模型,可获得养护施工区的最优布局设置,实证分析证明了该模型的有效性和实用性。该研究可为优化施工区布局设置、交通安全管理措施评价和施工区成本效益分析提供理论基础。

关键词:交通工程;高速公路养护;施工区特征;临时交通安全设施;事故成本

中图分类号:U491

文献标志码:A

Optimum layout of freeway construction area based on crash cost control

WU Jiang-ling¹, ZHANG Sheng-rui¹, SINGH A K², MA Zhuang-lin³, ZHOU Bei¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Atkins North America Inc., Austin TX78758, Texas, USA; 3. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to explore the optimal layout of freeway maintenance construction area under the condition of minimum cost of traffic crashes, the important indexes were selected and the traffic accident cost prediction model of freeway maintenance construction area was constructed on the basis of analyzing the characteristics of freeway maintenance construction area and temporary traffic control (TTC) facilities. A questionnaire survey was conducted to determine the influence level of the layout characteristics of freeway maintenance construction area on traffic accidents.

收稿日期:2017-04-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51208052);中国博士后科学基金项目(2015M582593);

云南省交通运输厅科技计划项目(云交科 2014(A)29);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821172202)

作者简介:吴江玲(1987-),女,河南开封人,工学博士研究生,E-mail:wujiangling2006@gmail.com。

通讯作者:张生瑞(1963-),男,陕西佳县人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhangsr@chd.edu.cn。

Quantitative study of influence of the layout characteristics of freeway maintenance construction area on traffic accident risk was conducted to determine the accident rate change of the proposed maintenance operation sections. Taking traffic accident cost control as the goal, the objective function model of layout optimization of expressway construction area was established, so as to determine the optimal layout of construction area during maintenance period. The results show that the layout of freeway construction area has significant impacts on traffic accident cost of maintenance construction area. The corresponding layout parameters with the highest risk level in proposed 10 types of characteristics of construction area are daytime (6:00 to 10:00) construction, mobile construction, construction nearby entrance ramps, lane-width less than the standard, pavement marking, sun glare, no speed limited, construction equipment installation, tunnel group, heterogeneous fleet (large vehicle ratio is between 20% to 80%), respectively. Cruisers in construction area which guide the passage of vehicles can greatly reduce the traffic accidents to the largest extent compared to the other safety improvement countermeasures. The optimal layout of maintenance construction area obtained by solving the objective function model of layout optimization of freeway construction area which takes the traffic accident cost control as the goal, and empirical analysis proves the validity and practicability of the model. The research can provide a theoretical basis for optimizing the layout of construction area, evaluating the traffic safety management measures and cost benefit analysis of construction area. 4 tabs, 2 figs, 20 refs.

Key words: traffic engineering; freeway maintenance; characteristic of construction area; TTC facility; crash cost

0 引言

高速公路养护施工区路段是典型的交通瓶颈区和事故易发区,一旦发生交通事故,将会严重影响交通系统正常运行,不但会造成道路系统运行成本和施工总成本的显著上升,而且会威胁道路使用者及施工人员安全。合理设置施工区的布局可以有效减少交通事故。

针对施工区交通安全管理、控制和施工区交通事故成本问题,国内外学者进行了大量研究。Richards 等对高速公路中间车道养护交通管理策略进行了评估^[1];Rouphail 等研究了高速公路施工区车道封闭交通流特性^[2];Mccoy 等以道路使用者与交通控制总成本最小为目标,确定了最优施工区长度^[3];Beacher 等实测评估了在美国各州广泛实施的晚合流交通控制策略对提高施工区通行能力和交通安全的有效性^[4];Clark 等对养护施工区事故成因及交通安全绩效措施的意义进行了探讨^[5];Debnath 等通过对澳大利亚昆士兰多个施工区 66 名道路施工人员进行采访,从施工人员视角对施工区的常见危险及其缓解措施进行了研究^[6];Elghamrawy 针对公路建设项目,研究了施工区布局设置对交通事故发生风险及成本的影响^[7];Coburn 等基于施工

区不同的事故类型和事故严重程度,量化了施工区事故损伤结果,并建立了施工区事故损伤成本模型^[8];Sun 等采用施工区事故成本来评估实施奖惩(I/D)措施的项目缓解施工区交通影响的成效^[9];吴新开等就施工区行车速度控制进行了探讨^[10];马聪等基于公路养护施工区最大服务交通量与基本通行能力(V/C)比,对施工区交通延误进行对比研究^[11];苏志强对高速公路养护施工区交通事故成因进行了分析^[12];吴彪研究了高速公路施工区行车风险因素及安全控制策略^[13];卞伟在对考虑混合交通影响的城镇道路路段养护方案优化进行建模的过程中,考虑了夜间施工对事故成本的修正^[14];孟祥海等研究了高速公路施工作业区的追尾风险及其突出影响因素识别问题^[15]。

综上所述,国外发达国家对施工区交通安全管理和控制问题的研究经历了“安全管理策略-事故成因分析-安全控制措施及实施效果评价-事故成本研究”的历程,目前正在向精细化事故成本控制的方向发展,在理论和实践方面亦逐步形成相对完善的体系。中国在施工区交通安全及事故统计方面还未形成完备的管理体系,缺少针对性调研数据,多数研究仅停留在交通事故成因分析上,缺乏对施工区安全管理措施实施效果的评价和总结,在道路施工区应

用研究方面较落后,尚未意识到交通事故成本控制重要性。当前的研究大都集中在高速公路施工区布局特征的某一方面或某几个方面对交通安全的影响,缺乏以交通事故成本控制为导向的施工区布局优化。针对以上问题,很有必要根据中国国情对高速公路施工区交通安全管理和控制进行探讨。为此,本文在缺少专门针对施工作业区交通安全数据收集统计的情况下,通过查阅分析国内外大量文献资料,借鉴国内外研究成果,总结中国高速公路养护施工区特征,给出高速公路养护施工区交通事故成本的预估模型,考虑施工区交通管理措施及各布局特征对交通事故的修正,以期对养护施工区交通事故成本进行探讨,建立施工区布局优化模型,对施工区的最优布局设置进行研究。

1 高速公路养护施工区特征及临时交通安全设施

发达国家的高速公路成网时间较早,现大多已完成高速公路投资回收,实行车辆免费通行,故研究时没有明确区分一般公路和高速公路。中国高速公路受投资回收期的影响,目前实行全封闭控制出入收费通行的管理方式,相应的养护施工管理及施工区特征差别较大。

1.1 高速公路养护施工区特征

1.1.1 交通特征

发达国家高速公路和普通等级公路交通组成特征差别不大,都以机动车交通为主,交通组成相对单一。中国高速公路和普通等级公路的交通组成特征差别极大,普通等级公路混合交通现象普遍,机动车与非机动车、人力车与机械动力车在同一路段上通行。中国高速公路交通组成特征复杂^[16],交通量特征和车速特征均与发达国家不同,因此养护施工区的交通特征也不同。

1.1.2 作业控制区形式

不同形式的作业控制区对交通及驾驶人产生不同程度的影响,从而影响事故发生概率的程度不同。Elghamrawy 按照封闭车道数对美国伊利诺斯州道路养护施工作业控制区进行分类分析^[7],这种分类方法的优点是逻辑方法简单、便于计算,但是没有考虑到封闭车道分布位置对交通及驾驶人的影响。本文考虑封闭车道位置对施工区交通事故影响,将作业控制区分为 7 类,如表 1 所示。

1.1.3 车道宽度

开展养护作业往往会挤占行车道,导致行车道

表 1 施工区特征参数风险等级 ε_{ij} 与修正系数 α_i^j			
Tab.1 Risk levels and modification factors of work zone characteristic parameters			
第 i 类参数	第 j 类参数	ε_{ij}	α_i^j
施工时段 ($i=1,j=1\sim4$)	早上(6:00~10:00)	0.78	1.195
	日间(10:00~18:00)	0.49	1.000
	晚上(18:00~22:00)	0.76	1.181
	夜间(22:00~6:00)	0.73	1.161
施工持续时间 t ($i=2,j=5\sim8$)	长期定点施工($t>3\text{ d}$)	0.43	1.000
	短期定点施工($1\text{ d}<t\leqslant3\text{ d}$)	0.64	1.147
	临时定点施工($t>30\text{ min}$)	0.69	1.182
	移动施工($t\leqslant30\text{ min}$)	0.70	1.189
作业控制区 ($i=3,j=9\sim15$)	入口匝道附近养护作业	0.75	1.250
	出口匝道附近养护作业	0.72	1.229
	内侧车道封闭	0.69	1.207
	外侧车道封闭	0.58	1.129
	借用对向车道通行	0.46	1.043
	车道全封闭	0.49	1.064
	路肩封闭	0.40	1.000
车道宽度 ($i=4,j=16\sim17$)	车行道宽度为 3.75 m	0.48	1.000
	车行道宽度小于 3.75 m	0.72	1.162
分隔类型 ($i=5,j=18\sim21$)	路面划线	0.70	1.328
	水马、三角锥	0.43	1.117
	主动式路障,反光护栏等	0.28	1.000
	震动带或发光道钉	0.48	1.156
视觉环境 ($i=6,j=22\sim28$)	标志板	0.48	1.042
	施工器械、设备	0.65	1.162
	太阳眩光	0.78	1.254
	车灯眩光	0.70	1.197
	夜间眩光	0.64	1.155
	临时混凝土路障	0.42	1.000
限速 ($i=7,j=29\sim33$)	逐级限速	0.20	1.000
	限速 40 km/h	0.22	1.017
	限速 60 km/h	0.34	1.117
	限速 80 km/h	0.55	1.292
	建议减速	0.77	1.475
	无限速	0.89	1.575
作业类型 ($i=8,j=34\sim40$)	施工设备安装	0.72	1.255
	封闭路肩施工	0.37	1.000
	路面铣刨/罩面	0.70	1.241
	热拌沥青混凝土摊铺	0.66	1.212
	桥梁/涵洞建设和养护	0.55	1.131
	路面施画标识标线	0.65	1.204
	设备车辆出入	0.64	1.197
施工区位置 ($i=9,j=41\sim44$)	一般路段	0.25	1.000
	桥梁	0.68	1.344
	隧道	0.74	1.392
	隧道群	0.89	1.512
交通组成特征 ($i=10,j=45\sim47$)	大型车比例小于等于 20%	0.26	1.000
	大型车比例大于 20%且小于 80%	0.78	1.413
	大型车比例大于等于 80%	0.30	1.032

有效宽度降低,行驶条件较正常路段恶劣,造成交通安全隐患。

1.1.4 行车方向分隔设施

发达国家公路分隔带形式变化较大,从无任何防护分隔带到各种类型的主动式路障,设施类型较多,主要有以下几类:路面划线(无物理分隔)、植草带、简单处理的土地、可装卸分隔带、抬高的分隔带、震动带、发光道钉、栅栏、挡土墙、护栏等,另外双向转弯车道在美国公路十分常见。中国高速公路一般的行车方向分隔设施主要是主动式路障,如护栏、护栏+植被等,在普通等级公路路面上施划标线的分隔方式最常见。

1.1.5 作业类型

公路养护工程按工程性质、规模大小、技术性繁简分为小修保养、中修、大修、改扩建 4 类。本文主要关注占用路面空间、对行车安全有重大影响的作业,也包括作业控制区布置阶段的施工设备安装和施工期间的工程车辆出入。

1.1.6 施工区空间位置

匝道、隧道、隧道群、桥梁等特殊区段的交通运行特征、事故特征均与基本路段有所不同,对这些特殊路段处的施工区交通事故风险应进行单独分析^[17]。

由太阳眩光、平/纵面线形等引起的视觉受限、施工区限速等都会对施工区交通运行产生影响,从而不同程度地影响交通事故的发生;另外,不同的施工类型对交通运行及交通安全的影响也有显著差别。

1.2 临时交通安全设施

中国高速公路养护施工区常见的临时交通安全设施主要包括信息板、速度显示牌、旗手/安全员、车载缓撞垫/移动式护栏、巡逻车引导、监控设备、箭头板、渠化设备、夜间安全设施等。

以上施工区特征及临时交通安全设施对交通事故发生概率的影响需要进行量化,以便对施工区事故成本做出合理预估。

2 高速公路养护施工区交通事故成本预估模型

2.1 事故成本构成

事故成本有 2 类,经济成本和综合成本。经济成本即人力资本(human capital),综合成本还包含非货币损失^[18]。高速公路施工区事故损失的经济成本包括 2 种:①直接事故成本,指发生交通事故时

造成的人员伤亡及财产损失成本;②间接事故成本指由于事故发生致使旅客和货物在途时间延长而额外增加的成本。

直接事故成本是由施工区的存在而带来的预期事故率变化的函数^[19]。一般来讲,计算该成本时所需要的输入变量有:①施工区事故率和(或)事故频数;②单位事故成本;③施工区影响范围内的交通量。

2.2 事故成本模型

高速公路施工区交通事故成本计算公式为

$$C = \prod_{i,j,p} (\alpha_i^j \beta_p^j) \sum_{m=1}^4 (R_m V_m) N \tag{1}$$

式中: C 为施工区交通事故成本(万元); α_i^j 为施工区特征修正系数; β_p^j 为临时交通安全设施 p 的修正系数; R_m 为 m 类交通事故的事故率[次/(10^8 veh·km)], $m=1,2,3,4$,分别表示死亡事故、严重伤害事故、轻微伤害事故、仅有财产损失事故; V_m 为 m 类交通事故平均损失(万元); N 为施工区影响范围内的交通量(10^8 veh)。

2.2.1 交通事故率

某路段发生 m 类交通事故的事故率为

$$R_m = \frac{n_m}{QL_1} \times 10^8 \tag{2}$$

$$Q = TQ_A \times 365 \tag{3}$$

式中: n_m 为统计期内(一般推荐 3 年)路段发生 m 类交通事故的次数; Q 为统计期内交通量总数(veh); L_1 为路段长度(km); T 为统计期(年); Q_A 为年平均日交通量(双向,veh/d)。

2.2.2 施工区影响范围内交通量

通过施工区的交通量直接受到施工作业的影响,影响范围内的交通量计算公式为

$$N = DQ_b L_2 \tag{4}$$

式中: D 为施工区存续时间(d); Q_b 为平均日交通量(10^8 veh/d); L_2 为影响范围内路段长度(km)。

2.2.3 事故平均成本

单位事故平均成本表示在一定社会发展水平下,基于事故严重级别,对每次交通事故的经济和社会损失进行综合量化后得出的平均值。估算事故平均成本时需要考虑每次交通事故涉及的人员数、人员伤亡程度、伤亡损失以及相关的车辆损失和出行延误。中国事故严重程度分为 4 类,但实际情况中只能获得死亡事故、伤害事故和财产损失事故的信息^[20]。

2.2.4 施工区特征

施工区特征包括作业控制区形式、车道宽度、行

车方向分隔设施、作业类型、施工区空间位置、视觉受限、施工区限速、交通组成特征等。

2.2.5 临时交通安全设施

临时交通安全设施包括交通渠化设备、交通信息显示板等,施工区交通管理措施可有效引导交通流,降低交通事故的发生概率。

2.3 施工区布局特征修正

本文根据中国高速公路施工区特征和临时交通安全设施特征,进行问卷调查。邀请具有丰富专业知识和经验的人员,对表 1 第 2 列、表 2 第 1 列的参数进行等级评分,分值为 1、2、3、4、5。确定施工区特征和临时交通安全设施对交通事故的影响等级,以量化高速公路养护施工区布局特征对交通事故发生风险的影响程度。问卷调查表格设计简单明了,被调查人应具有丰富的专业知识和经验,此次调查采用目标抽样。

表 2 临时交通安全设施的有效性 φ_p 和修正系数 β_0^p

Tab. 2 Effectiveness φ_p and modification factors β_0^p of temporary traffic safety countermeasures

参数		φ_p	β_0^p
$p=1$	信息板	0.73	0.87
$p=2$	速度显示牌	0.69	1.00
$p=3$	旗手/安全员	0.72	0.90
$p=4$	车载缓撞垫/移动式护栏	0.70	0.97
$p=5$	巡逻车	0.95	0.16
$p=6$	监控设备	0.72	0.90
$p=7$	箭头板	0.75	0.81
$p=8$	渠化设备	0.73	0.87
$p=9$	夜间安全设施	0.78	0.71

2.3.1 施工区特征修正

施工区特征参数的风险等级 ϵ_{ij} 为

$$\epsilon_{ij} = \sum_{k=1}^5 kx_{ijk} / (5 \times 120) \tag{5}$$

式中: ϵ_{ij} 为第 i 类参数中第 j 个参数的归一化风险等级, $i=1\sim 10, j=1\sim 47$, 计算结果见表 1; k 为备选风险等级, 表示施工区技术人员对某一施工区特征的风险判定, $k=1, 2, \dots, 5$; x_{ijk} 为把第 i 类参数中第 j 个参数的风险等级判定为 k 级的技术人员数。

施工区特征修正系数计算公式为

$$\alpha_i^j = (1 + \epsilon_{ij}) / \min_j (1 + \epsilon_{ij}) \tag{6}$$

各施工区特征修正系数计算结果见表 1。遴选的 10 类施工区特征中风险等级最高的施工区特征参数分别为白天(6:00~10:00)施工、移动施工、入口匝道附近作业、车道宽度小于标准车道宽度、路面画线、太阳眩光、无限速、施工设备安装、隧道群处、

异质性车队(大型车比例为 20%~80%)。

2.3.2 临时交通安全设施修正

临时交通安全设施的有效性为

$$\varphi_p = \sum_{k=1}^5 kx_{pk} / (5 \times 120) \tag{7}$$

式中: φ_p 为临时交通安全设施第 p 个参数减少养护施工区交通事故的有效性, $p=1\sim 9$, 计算结果见表 2; x_{pk} 为把第 p 个临时交通安全设施有效性判定为 k 级的技术人员数。

临时交通安全设施修正系数为

$$\beta_p^0 = (1 - \varphi_p) / \max_p (1 - \varphi_p) \tag{8}$$

临时交通安全设施修正系数计算结果见表 2。可见, 各类临时交通安全设施中减少施工区交通事故最有效设施是巡逻车。

3 高速公路养护施工区布局优化

以交通事故成本 C 最小为目标函数, 建立施工区布局优化模型

$$\min C = \prod_{i,j,p} \alpha_i^j \beta_0^p \sum_{m=1}^4 R_m V_m N \tag{9}$$

s. t.

$$\alpha_i^j \in \alpha_i, \beta_0^p \in \beta$$

根据不同项目的具体方案(α_i 为第 i 类参数的特征修正系数域), α_i^j 取值见表 1, β_0^p 取值见表 2; R_m 需由式(2)计算得到; V_m 可通过综合考虑基年和目标年的 CPI(consumer price index, 消费物价指数)和 ECI(employment cost index, 就业成本指数), 对基年统计得到的交通事故平均损失进行修正而得到; N 由式(4)计算得到。

优化模型取最小值时, 所对应的施工区布局即为养护施工区的最优布局方式。需要指出的是, 根据不同项目的具体方案, 有些类别的特征参数可能需要计算多次, 例如, 若施工路段同时存在标志板妨碍驾驶人视线、施工器械及设备对驾驶人视线产生妨碍、夜间眩光等问题, 则需要同时考虑这几个参数。

4 实证分析

采用本文模型对包茂(包头—茂名)高速公路西铜段(西安—铜川)预养护路段施工区进行布局优化。首先对该养护路段进行交通调研; 然后给出施工区布局备选方案, 针对不同的备选方案, 通过求解所建立的以交通事故成本控制为目标函数的优化模型, 确定养护期间最优的施工区布局设置。

2016 年 9 月,包茂高速公路西铜段 K814+650~K816+650 计划对路面坑槽进行道路养护施工作业(图 1),该路段为单向三车道、长度 2 km。

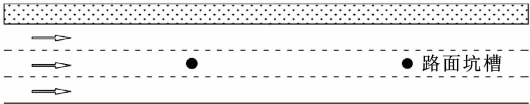


图 1 待修补路面坑槽位置示意

Fig. 1 Location illustration of pavement potholes to be repaired

据统计,该路段 2013、2014、2015 年的年平均日交通量分别为 20 200、21 300、22 100 veh;60 km 道路范围内 3 年的交通事故数为 325 起,其中死亡事故 8 起,伤害事故 53 起,只有财产损失的事故 264 起,路段限速 120 km/h,大型车平均占比为 24.6%。

统计期内交通事故率及各类交通事故平均成本如表 3 所示。

表 3 事故率及平均成本
Tab. 3 Traffic crash rates and average costs

事故类型	n_m	R_m	V_m /万元	$R_m V_m$
死亡事故	8	0.574 3	450.4	258.7
伤害事故	53	3.805 1	106.9	40.7
仅有财产损失	264	18.954 0	0.8	15.7

养护施工期间平均日交通量约为 22 311 veh,交通量时变曲线见图 2。



图 2 交通量时变曲线

Fig. 2 Time variant curve of traffic volume

养护期间在施工区采取逐级限速、行车道宽度 3.75 m,并选择夜晚施工以减少对交通的影响。夜晚施工存在夜间眩光、施工器械及车辆对驾驶人视觉干扰的情况;临时交通安全设施采用信息板、箭头板、渠化设备、夜间安全设施、安全员。

对施工时段、作业控制区形式、分隔类型进行研究,备选方案有 8 个:方案 1,夜间施工,封闭外侧两车道,水马/三角锥分隔;方案 2,夜间施工,封闭内侧两车道,水马/三角锥分隔;方案 3,夜间施工,封

闭外侧两车道,反光护栏分隔;方案 4,夜间施工,封闭内侧两车道,反光护栏分隔;方案 5,晚上施工,封闭外侧两车道,水马/三角锥分隔;方案 6,晚上施工,封闭内侧两车道,水马/三角锥分隔;方案 7,晚上施工,封闭外侧两车道,反光护栏;方案 8,晚上施工,封闭内侧两车道,反光护栏。

若夜间施工预计工期 15 d,若晚上施工则预计工期 22 d。养护施工期间影响区段范围内的交通量计算分 2 种情况:夜间施工, $N_1=15\times 22\ 311\times 2\times 10^{-8}\approx 6.7\times 10^{-3}(10^8\text{veh}\cdot\text{km})$;晚上施工, $N_2=22\times 22\ 311\times 2\times 10^{-8}\approx 9.8\times 10^{-3}(10^8\text{veh}\cdot\text{km})$ 。

各方案的交通事故成本见表 4。由表 4 可知,方案 3 的交通事故成本最小,因此最优的布局设施方案为方案 3。方案 3 为夜间施工,封闭外侧两车道,采用反光护栏进行分隔,可最大程度地减少养护施工期间的交通事故,确保行车安全。通过施工区布局方案寻优,可提高养护施工期间交通安全,减少交通事故。

表 4 不同施工区布局方案交通事故成本
Tab. 4 Traffic crash costs with different work zone layout schemes

zone layout schemes								万元
方案号	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8
C	2.8	3.1	2.5	2.7	4.2	4.5	3.8	4.1

5 结 语

(1)分析总结了我国高速公路养护施工区特征和临时交通安全设施,综合考虑了各种施工区布局特征对交通事故的修正。

(2)不同施工区布局特征的风险等级显著不同,施工区布局特征对高速公路施工区的交通事故率有显著影响。给出了不同施工区布局特征对施工区潜在交通事故成本影响的修正系数,建立了高速公路养护施工区交通事故成本预估模型。

(3)以交通事故成本控制为目标函数建立了施工区布局设置优化模型;通过案例分析给出 8 个备选方案,通过求解模型,确定了养护施工期间最优的施工区布局方案,验证了模型的有效性和实用性。

(4)下一步可考虑气候、地理条件等因素对高速公路施工作业的影响,如寒冷地区,并扩充样本数据库,从而更全面地优化高速公路施工区布局。

参考文献:

References:

[1] RICHARDS S H, DUDEK C L. Field evaluation of

- traffic management strategies for maintenance operations in freeway middle lanes[J]. Transportation Research Record,1979(703):31-36.
- [2] ROUPHAIL N M, TIWARI G. Flow characteristics at freeway lane closures[J]. Transportation Research Record,1985(1035):50-58.
- [3] MCCOY P T, MENNENGA D J. Optimum length of single-lane closures in work zones on rural four-lane freeways[J]. Transportation Research Record,1998(1650):55-61.
- [4] BEACHER A G, FONTAINE M D, GARBER N J. Guidelines for using late merge traffic control in work zones;Results of a simulation-based study[J]. Transportation Research Record,2005(1911):32-41.
- [5] CLARK J B, FONTAINE M D. Exploration of work zone crash causes and implication for safety performance measurement programs[J]. Transportation Research Record,2015(2485):61-69.
- [6] DEBNATH A K, BLACKMAN R, HAWORTH N. Common hazards and their mitigating measures in work zones;A qualitative study of worker perceptions[J]. Safety Science,2015,72:293-301.
- [7] ELGHAMRAWY T M. Optimizing work zone practices for highway construction projects[D]. Champaign: University of Illinois,2011.
- [8] COBURN J S, BILL A R, CHITTURI M V, et al. Injury outcomes and costs for work zone crashes[J]. Transportation Research Record,2013(2337):35-41.
- [9] SUN C, MACKLEY A, EDARA P. Programmatic examination of Missouri incentive/disincentive contracts for mitigating work zone traffic impacts[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2014, 140(1):46-52.
- [10] 吴新开, 吴兵. 高速公路养护维修作业区行车速度控制方法探讨[J]. 公路, 2004(7):132-137.
- WU Xin-kai, WU Bing. Discussion about speed control measures in work zone of highway maintenance and construction[J]. Highway, 2004(7):132-137.
- [11] 马聪, 张生瑞, 王晋. 基于V/C比的公路养护施工区交通延误研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(7):133-139.
- MA Cong, ZHANG Sheng-rui, WANG Jin. Research of traffic delay in highway maintenance work zone based on V/C ratio[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(7):133-139.
- [12] 苏志强. 高速公路养护维修作业区安全状况分析[J]. 交通信息与安全, 2008, 1(1):40-43.
- SU Zhi-qiang. Analysis of freeway work zone safety[J]. Computer and Communications, 2008, 1(1):40-43.
- [13] 吴彪. 高速公路作业区行车风险与安全控制策略[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- WU Biao. Driving risk and safety control strategy for work zones of expressway[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [14] 卞伟. 考虑混合交通影响的城镇道路路段养护方案优化研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- BIAN Wei. Optimizing for urban road segment maintenance projects with consideration of mixed traffic[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [15] 孟祥海, 郑来, 毕海峰, 等. 高速公路半幅封闭施工区交通特性与交通冲突特性研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2):140-146.
- MENG Xiang-hai, ZHENG Lai, BI Hai-feng, et al. Research on traffic characteristics and traffic conflicts of one-way closed work zone on expressway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2):140-146.
- [16] 马壮林, 张宏璐, 张玮玮, 等. 高速公路路侧事故起数预测模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2017, 37(4):119-126.
- MA Zhuang-lin, ZHANG Hong-lu, ZHANG Yi-yi, et al. Roadside accident frequency prediction model on expressway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37(4):119-126.
- [17] 张生瑞, 李耘, 赵友功. 山区高速公路隧道群交通安全分析方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6):94-99.
- ZHANG Sheng-rui, LI Yun, ZHAO You-gong. Analysis method for traffic safety of mountainous freeway tunnel groups[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6):94-99.
- [18] COUNCIL F, ZALOSH N J A, MILLER T, et al. Crash cost estimates by maximum police-reported injury severity within selected crash geometries[R]. Mclean: Federal Highway Administration, 2005.
- [19] MALLELA J, SADASIVAMS. Work zone road user costs; Concepts and applications[R]. Mclean: Federal Highway Administration, 2011.
- [20] MA Z, ZHANG S, WANG J. Analysis of accident severity on Chinese two-lane rural highways using multinomial Logit model[C]//ASCE. Multimodal Approach to Sustained Transportation System Development: Information, Technology, Implementation. Reston: ASCE, 2011:693-699.