

台风灾害下多种公路构筑物快速智能风险评估

刘小玲¹, 裴伦友¹, 丁勇^{2*}, 舒海斌³, 孔青青², 万克为⁴, 曹之彬⁴

(1.宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2.宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 3.海曙区公路与运输管理中心, 浙江 宁波 315012; 4.中国太平洋财产保险股份有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315001)

摘要: 针对台风灾害下公路上构筑物种类多样、数量众多的特点, 提出一种快速化、智能化的公路台风灾害风险评估模型。在对公路灾害风险的可能性分析中, 建立边坡、桥梁、隧道出入口、路基以及路面统一框架下的三层灾害风险事故可能性指标体系, 其中承灾体自身因素的底层指标根据不同构筑物特点, 从关键风险指标、构筑物自身状况和承灾体破坏因子三个方面选取, 从而使自动化、智能化评估成为可能; 在对公路灾害风险损失的定量计算中, 将事故可能性和事故损失耦合, 实现公路事故损失的风险评估自动化; 更加注重事故预防性和智能巡检, 建立了侧重于事故可能性的非对称公路灾害风险计算方法, 风险评估结果量化在0到1的范围内。开发出相关的智能化风险评估系统平台, 实现对2019年8月10日台风“利奇马”影响下的宁波市国道公路的自动化、智能化灾害风险评估, 结果表明, 该评估模型能够快速、准确地形成台风灾害下公路上多种构筑物的风险评估, 便于筛选重点巡检对象。

关键词: 道路工程; 风险评估; 公路; 台风灾害; 构筑物

中图分类号: U416.1+4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 06-0035-06

我国沿海城市经常遭受台风侵袭, 台风对公路、桥涵、隧道等基础设施的正常运营造成了严重的影响, 每年造成的公路水毁直接经济损失巨大^[1]。为了提高公路抵御风险能力, 有效构筑公路风险保障体系, 各地区相继探索了公路灾害保险创新示范项目。宁波市作为保险创新示范区, 于2016年在公路灾害保险方面首创了普通国道公路运营期巨灾风险保险试点方案^[2]。在试点方案中, 核心问题是如何在灾害前和灾害中快速地给出公路构筑物的风险等级, 用于指导重点巡检工作。而公路上涉及的构筑物种类繁多, 包括边坡、桥梁、隧道、路基、路面等, 因此亟需建立一个统一、快速的风险评估模型。

在公路自然灾害风险评估研究中, 针对运营期的公路风险评估尚无相关规范, 只有边坡^[3-4]、桥梁^[5]等施工阶段风险评估指南可参考。许多学者针对台风灾害下的主要公路构筑物提出了相应的风

险评价方法^[6-9]。例如程致远等^[10]针对现有公路边坡养护指南中边坡安全状况分级标准模糊的情况, 建立了边坡安全性多层次评价模型; Li等^[11]提出一个基于概率的沿海桥梁在台风灾害下的生命周期风险评估框架。Zhang等^[12]运用属性数学理论, 建立了隧道洞口边坡稳定性风险评价的属性识别模型。以上研究提出了单一公路构筑物的风险评价方法, 但是在多指标、涉及面广的多种构筑物指标体系方面, 未给出相应的统一评估方案, 无法满足智能化多构筑物风险评估软件的扩展需求。另一方面, 虽然目前针对公路自然灾害风险评价方法的研究取得了一定的成果, 例如马保成^[13]针对沿河公路水毁灾害, 综合考虑降雨、植被覆盖度、河网密度和沟谷比重等影响因素, 提出了沿河公路、小桥涵和沟谷泥石流流水毁易发地段的危险性分段方法; 齐洪亮^[14]将公路自然灾害承灾体分为大中桥、小桥涵、路基及防护工程、边坡防护工程、路

收稿日期: 2022-04-11.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51808301); 宁波市交通运输科技项目(202104); 农村公路综合保险技术服务项目(HK2021000140)。

第一作者: 刘小玲(1988-), 女, 江苏连云港人, 博士/副教授, 主要研究方向: 公路桥梁的养护与评估。E-mail: liuxiaolingseu@163.com

*通信作者: 丁勇(1975-), 男, 浙江余姚人, 教授, 主要研究方向: 防灾减灾工程及防护工程、桥梁工程。E-mail: dingyong@nbu.edu.cn

面、排水系统及道班房屋七类,采用模糊综合评判模型对其进行风险评估,但是对于众多结构不同的公路构筑物,风险严重程度评估往往依靠人工判断,耗时长,没有实现自动化,这种方式不利于大批量构筑物的快速甄选巡查。

鉴于此,本文以宁波市的国省道公路为研究对象,建立包括边坡、桥梁、隧道出入口、路基、路面等构筑物的统一架构下的风险可能性评估体系,实现软件的智能化,在严重程度评价时耦合风险损失价值与事故发生可能性,实现软件自动快速评估,最后开发相关的智能化风险评估系统平台,实现对多种构筑物的风险评估自动化、智能化,并进行相关的评估实例研究,验证方法的适用性。

1 风险评估理论体系

1.1 公路灾害风险评估框架

国省道公路灾害风险评估框架如图1所示。公路在自然灾害下的风险评估通常考虑三个层面的风险,分别是致灾因子危险性、孕灾环境稳定性以及承灾体脆弱性^[15]。致灾因子危险性指台风的破坏程度,选用三个具有显著影响力的指标,为台风预警等级、暴雨预警等级和暴雨持续天数。对于孕灾环境,选用周边环境风险源和灾害频发程度两个指标,对于不同的构筑物,周边环境因具有不同的风险源,需区别对待。承灾体方面,强调了关键风险指标、承灾体技术状况、承灾体技术因子,众

多构筑物,例如路面、路基、边坡、桥梁、隧道等皆可按此逻辑进行指标选取。据此建立多种构筑物统一架构下的事故可能性指标体系框架,并通过加权层次分析法得到风险事故可能性程度^[16],从而为后续智能化风险评估提供有效数据。

除了要考虑风险事故可能性,还需考虑风险事故损失程度。孕灾环境和承灾体中均包含了一定的损失因素,前者有路人或居民的人员伤亡风险,后者有承灾体或周边受影响建筑物的价值损失。而损失多少与风险事故可能性程度具有直接的相关性。

在得到台风灾害下承灾体风险事故可能性程度和事故损失程度的基础上,一般多采用风险矩阵法估测综合风险等级,风险等级分为I级至IV级四个等级。本文创新地使用了公路保险机制,更加注重事故预防性,因此根据实际应用效果,偏重于事故可能性,采用非对称风险评估矩阵,拟合确定风险计算方法为

$$R_j = 0.65P_j + 0.35L_j, \quad (1)$$

式中: R_j 为第 j 类构筑物的综合风险度; P_j 为第 j 类构筑物的事故可能性风险度; L_j 为第 j 类构筑物的事故损失风险度。

该方法基于事故可能性和事故损失耦合下提出,既增加了事故可能性的影响力度,又使得结果是0至1之间变化的值,更有利于巡检对象的遴选。最终的风险等级可通过表1查询得到。

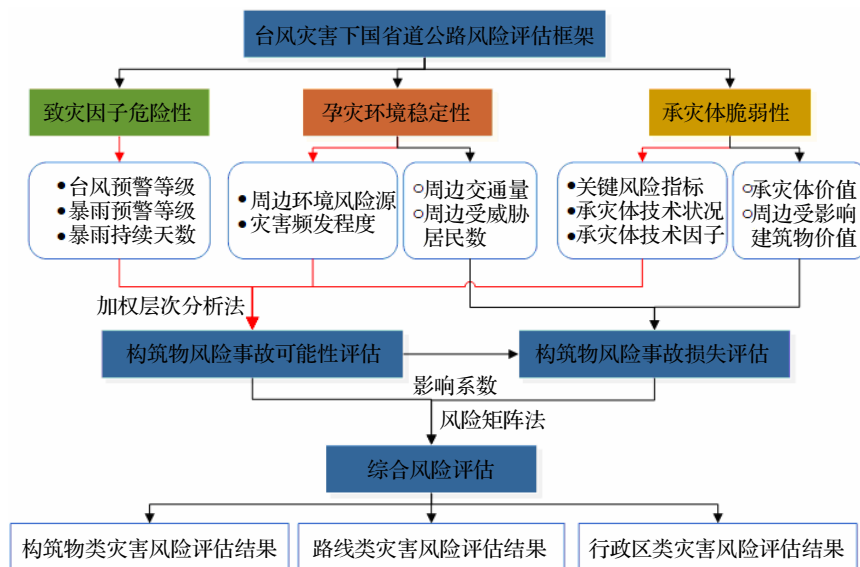


图1 公路灾害风险评估框架

表 1 风险度与风险等级对应关系		
风险度区间	风险典型值	风险等级
(0, 0.2]	0.05	I级
(0.2, 0.6]	0.4	II级
(0.6, 0.8]	0.75	III级
(0.8, 1.0]	1	IV级

1.2 公路灾害风险的可能性分析

台风灾害下承灾体的事故可能性大小计算可采用加权层次分析法, 根据前期调研分析, 综合考虑公路构筑物的技术状况、公路周边环境、自然灾害的严重程度, 将公路灾害风险指标体系划分为三层结构, 具体如图 2 所示, 顶层为构筑物的整体事故可能性, 中间层分别为致灾因子、孕灾环境和承灾体自身因素, 底层为具体影响因子评价指标。图 2 中列出了边坡、桥梁、隧道出入口、路面以及路基的自身因素, 这里主要考虑事故关键影响因子、结构自身状况和典型风险类型。

边坡中的关键影响因子选取了排水系统和渗流, 这两个也是常规巡检中可观测的指标, 根据实际检查结果统计, 典型风险类型主要是滑塌和坠物落石; 隧道出入口往往也是边坡的形式, 因此它的关键影响因子和典型风险类型与边坡是一致的, 但是在构筑物状况方面, 同时包含了隧道出入口和边坡的技术状况; 桥梁中没有关键影响因子, 而典型风险类型依据桥梁的空间部件划分为下部结

构风险、上部结构风险以及桥面系风险; 路面中的关键影响因子选取了路面排水能力, 典型风险类型主要考虑宁波市不同海拔地区的水淹风险和历史上曾经发生水毁的频率和损坏程度; 路基的关键影响因子着重考虑了路基水毁冲沟深度和路基沉陷深度, 典型风险类型包括路基坍塌风险以及路基水毁、水淹风险。

在实际评估中, 对于多种构筑物, 只需替换承灾体自身因素这一指标, 以实现快速且智能化风险评估。据此在役公路台风灾害风险事故可能性大小的计算为

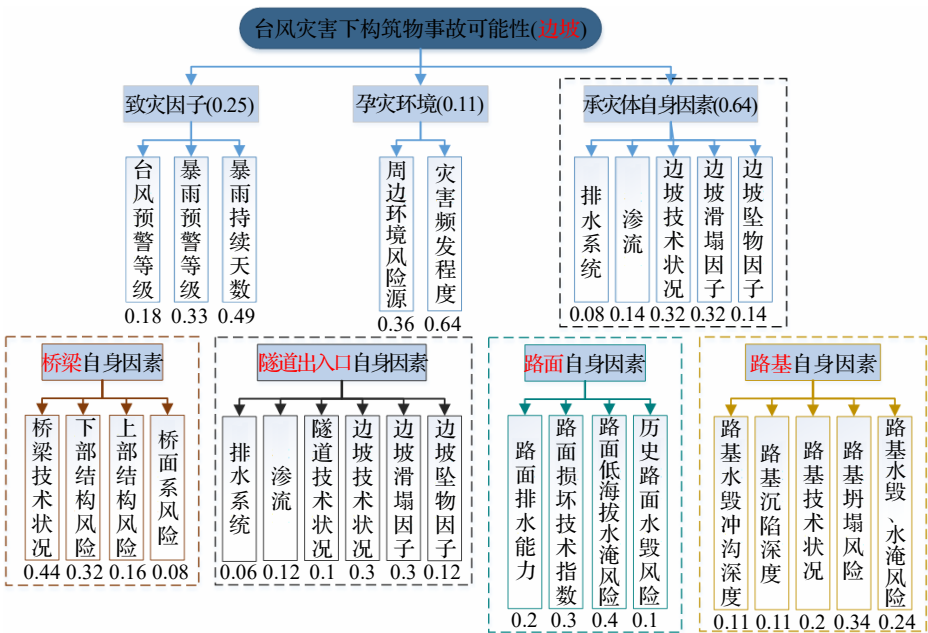
$$P_j = \omega_{j1} \sum_{i=1}^3 \frac{X_{j1i}}{100} \omega_{j1i} + \omega_{j2} \sum_{i=1}^2 \frac{X_{j2i}}{100} \omega_{j2i} + \omega_{j3} \sum_{i=1}^m \frac{X_{j3i}}{100} \omega_{j3i}, \quad (2)$$

式中: X_{j1i} 至 X_{j3i} 为第 j 类构筑物第 1、2、3 属性层指标下第 i 个底层指标的分值; ω_{j1i} 至 ω_{j3i} 为第 j 类构筑物第 1、2、3 属性层指标下第 i 个底层指标的权重值; ω_{j1} 至 ω_{j3} 为第 j 类构筑物属性层三个指标的权重值; m 为承灾体状况下的底层指标数量。

底层指标 X_{j1i} 的四级分级标准见文献[17]。依据 35 个不同部门的专家问卷调查结果并结合特征向量法和聚类分析法得到指标权重(图 2)。

1.3 公路灾害风险损失自动化计算

公路风险损失通常要考虑人员伤亡和经济损



失两部分,而这往往需要专门调查来确定.在实际应用过程中,公路上构筑物数量达到百千量级,如果在台风灾害来临后逐个仔细评估,则会错失巡检时机,也不利于日常快速巡检工作的开展.因此,有必要寻找一种可以系统批量化的公路风险事故损失评估方法,以便于快速、准确地提取出事故中损失较大的关键构筑物.

本文将事故发生的可能性和事故损失耦合,首先建立不考虑灾害发生情况下实际的人员分布和经济价值,然后在此基础上考虑事故发生可能性的影响,赋予事故损失风险一个折减系数,最后在人员损失和经济价值的损失风险中取最不利结果作为最终事故损失评估值.具体来说,人员方面评定类别包含周边交通量和周边受威胁居民数,经济方面包含构筑物自身价值和周边受影响建筑物价值,价值评定标准参照保险赔付额制定.各项评定类别可取风险典型值进行计算,具体见表2.

表2 事故损失风险类别评定标准

风险典型值	周边交通量	周边受威胁居民数/人	构筑物自身价值/万元	周边受影响建筑物价值/万元
0.05	较小	≤ 10	≤ 15	≤ 15
0.4	一般	(10, 100]	(15, 50]	(15, 50]
0.75	较大	(100, 500]	(50, 100]	(50, 100]
1	繁重	>500	>100	>100

事故可能性对事故损失的折减系数按照抛物线规律式计算:

$$M=P_f(2-P_f). \quad (3)$$

接着计算人员伤亡价值、经济损失价值,再按最不利原则,得到事故损失风险 L_j 计算公式.

$$N_1=J_{11}+0.12J_{12}, \quad (4)$$

$$N_2=J_{21}+0.12J_{22}, \quad (5)$$

$$L_j=\max\{MN_1, MN_2\}, \quad (6)$$

式中: J_{11} 、 J_{12} 、 J_{21} 、 J_{22} 分别表示周边交通量、周边受威胁居民数、构筑物自身价值、周边受影响建筑物价值的风险值; N_1 、 N_2 分别为人员伤亡价值评估值、经济损失价值评估值.

2 公路灾害快速风险评估实例

根据以上建立的公路灾害风险快速评估方法,以宁波市国省道公路为对象,开发相关的智能化风险评估系统平台,平台里实现了台风灾害信息

管理、公路构筑物对象状况管理、风险评估计算、风险评估报告打印、风险评估结果地图总览等功能.图3给出了某次台风灾害后选取边坡、桥梁以及三种不同风险等级的结果总览.



图3 风险评估结果总览示例

以该系统平台录入的数据为基础,日常巡查时,采用历史台风灾害统计数据,可以快速形成台风灾害下公路上多种构筑物的风险等级报告,便于筛选出重点巡查构筑物.

突发台风灾害时,也可以及时形成公路的灾害风险等级分布.以2019年8月10日的台风“利奇马”为例进行灾害风险评估.2019年8月10日1时45分许,台风“利奇马”的中心在浙江省温岭市城南镇沿海登陆,登陆时中心附近最大风力有16级.“利奇马”挟风裹雨横扫宁波,宁波市气象局启动最高级别应急响应,全市发布台风红色预警及暴雨橙色预警.

宁波市国省道公路共有10条线路,公路涉及10个县市区,此次共评估1872个构筑物,其中边坡216个,桥梁17个,隧道出入口1个,路基822个,路面816个,由于路基和路面是按照每1km为一个对象,因此数量较多.各类构筑物的风险评估结果见表3.

表3 “利奇马”台风灾害下公路风险评估结果

风险等级	边坡	桥梁	隧道出入口	路面	路基
IV级	22	1	0	3	0
III级	52	0	1	16	11
II级	139	16	0	801	805
I级	3	0	0	2	0

从表3可看出,边坡III级以上风险数量最多,

需重点关注,桥梁有1个是IV级风险,隧道出入口只有1个评定为III级,路面和路基III级以上风险相对比例较小,但仍应找到相应位置做好巡查工作。

为了进一步了解各管理部门和各投保线路的风险分布状况,根据评估结果分别按照县市区和国省道线路统计III、IV级风险数量,如图4所示。

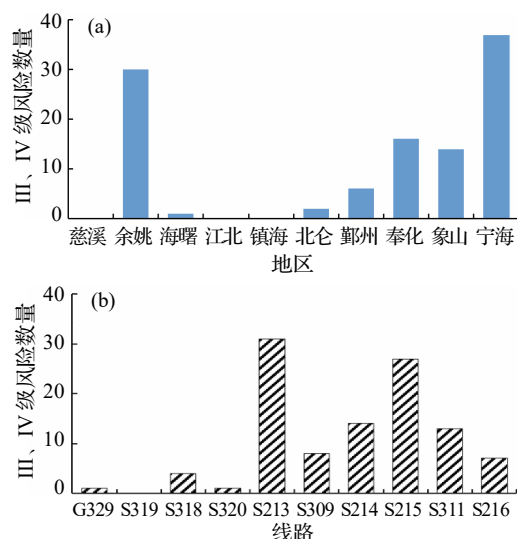


图4 构筑物III、IV级风险数量分布

从图4中可见,宁海县、象山县、奉化区、余姚市内构筑物III级以上风险数量较多,其他县市区风险较小。这主要是因为宁海县、奉化区和象山县处在台风登陆点附近,受到威胁最大,而余姚市内边坡处于山区,周边风险源普遍较大,且该区投保的构筑物最多,占比达到19.5%。国省道路线上构筑物风险也与此对应,S213 浒溪线主要分布在余姚市,S214 甬临线、S215 盛宁线、S311 象西线、S216 茅石线以及S309 江拔线主要分布在宁海县、象山县、奉化区。分类的结果给公路管理部门提供了重点巡查路线和巡查对象决策参考。

台风过后,有15个边坡出现了不同程度的落石、塌方,例如,S213省道里程桩号K34+000边坡处,挡墙未见受损,边坡无防护,挡墙上部边坡上方滑塌长18m、底宽12m、高8m,如图5所示。其中在系统评估结果中有5个IV级风险和1个III级风险,初步定损金额共160万元。可以得出,该系统能够较为准确地定位边坡的风险等级,为公路管理部门或者巡检单位提供巡检依据。

需指出的是,仍有9个边坡并未在系统档案中,说明系统容易遗漏其他具有较高风险的评估对象。

针对这一隐患,巡检单位在巡检过程中要密切注意具有滑塌倾向或者落石的非III、IV级类边坡。公路管理部门可结合群众的力量去发现更多的风险边坡(例如边坡上部山体有农作物的地方,农民发现树木倒伏或者土体移动时积极联系管理部门,就能提前对其进行管控)。



图5 S213省道某上边坡滑塌现场

3 结论

(1)改进了公路台风风险评估理论体系。在对称风险矩阵法的基础上,提出了偏重于事故可能性的非对称风险评估计算方法,风险评估结果除了四类风险等级,还可以量化到0至1的范围内。

(2)建立了可扩展的三层公路风险事故可能性指标体系,顶层指标为构筑物风险事故可能性,二级指标统一为致灾因子、孕灾环境以及承灾体状况,底层指标根据不同构筑物特点可自由扩展,实现了统一架构下的多构筑物风险评估智能化。

(3)提出了一种基于事故发生可能性和事故损失耦合的公路风险事故损失评估方法,将事故可能性以折减系数的形式融入人员和经济损失计算中,实现大批量构筑物的快速评估。

(4)开发了宁波市国省道公路灾害风险评估系统,对于突发灾害下的风险评估结果较为准确,系统实现了分县市区、分线路、分构筑物类型的结果查看,便于确定公路巨灾风险管控的重点巡检对象,安排防灾减灾计划。

参考文献:

- [1] 陈望春,许洁.宁波市近年台风及灾害损失分析[J].中国水利,2016(7):28-29;32.
- [2] 万克为,曹之彬.宁波国省道营运期巨灾保险撑起公路“保护伞”[J].宁波通讯,2018(9):62.
- [3] 宁波市公路管理局.山区公路边坡性能评估与处置养护技术指南[M].北京:人民交通出版社,2016.

- [4] 交通运输部安全与质量监督管理局. 高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南: 试行[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [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估制度及指南解析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [6] 刘小玲, 丁勇, 王佩, 等. 面向巨灾保险的营运期公路边坡多灾害风险评估[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(2): 74-81.
- [7] 李环禹, 陈朝晖, 范文亮, 等. 区域降雨型滑坡风险分析统计模型研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4):103-111.
- [8] 唐丽丽. 基于 GIS 的台风灾害灾情及风险评估研究——以浙江省为例[D]. 北京: 首都师范大学, 2011.
- [9] Lin C Y, Lin C Y, Chompuchan C. Risk-based models for potential large-scale landslide monitoring and management in Taiwan[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2017, 8(2):1505-1523.
- [10] 程致远, 汪益敏, 张坤标, 等. 运营期公路边坡养护决策多层次分析方法研究[J]. 公路, 2022, 67(1):337-343.
- [11] Li Y H, Dong Y. Risk-informed Assessment of Climate Change by Considering Deterioration and Hazards[M]// *Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges*, New York: CRC Press, 2018: 1666-1671.
- [12] Wang J, Zhang Q, Zhang H. Attribute recognition model and its application of risk assessment for slope stability at tunnel portal[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2017, 19(4): 2726-2738.
- [13] 马保成. 公路水毁灾害识别技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [14] 齐洪亮. 公路自然灾害评价系统的研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [15] 裴惠娟, 陈晋, 李雯, 等. 甘肃省暴雨洪水时空分布及风险评估[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(3):167-175.
- [16] 林立, 卓卫东, 范立础, 等. 基于全寿命的工程建设项目风险模型研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4):18-25.
- [17] 刘小玲, 黄侨, 任远, 等. 基于群组 AHP 的斜拉桥评估指标权重研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(6):79-84.

Rapid intelligent risk assessment of various highway structures under typhoon disaster

LIU Xiaoling¹, PEI Lunyou¹, DING Yong^{2*}, SHU Haibin³, KONG Qingqing², WAN Kewei⁴, CAO Zhibin⁴

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China; 2.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3.Highway and Transportation Management Center of Haishu, Ningbo 315012, China; 4.China Pacific Property Insurance Co., Ltd., Ningbo Branch, Ningbo 315001, China)

Abstract: According to the characteristics of various types and large number of structures on the highway under typhoon disaster, a rapid and intelligent highway typhoon disaster risk assessment model was proposed. When analyzing the possibility of highway disaster risk, a three-tier disaster risk and accident possibility index system under the unified framework of slope, bridge, tunnel entrance and exit, subgrade and pavement was established. The bottom indicators of the factors of the disaster bearing body were selected from three aspects: the key risk indicators, the condition of the structure itself and the damage factors of the disaster bearing body according to the characteristics of different structures. This approach makes the automatic and intelligent assessment possible. In the quantitative calculation of highway disaster risk loss, the accident possibility and accident loss were coupled to realize the automatic risk assessment of highway accident loss. By paying more attentions on accident prevention and intelligent inspection, an asymmetric highway disaster risk calculation method focusing on accident possibility was established. The risk assessment results were quantified in the range of 0 to 1. A relevant intelligent risk assessment system was also developed, which was successfully applied in the automatic and intelligent disaster risk assessment of the national and provincial roads in Ningbo under the influence of typhoon “Lekima” on August 10, 2019. The results show that the assessment model can quickly and accurately form the risk assessment of various structures on the highway under typhoon disaster, which is convenient for screening key inspection objects.

Key words: road engineering; risk assessment; highway; typhoon disaster; structures

(责任编辑 韩超)