

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.038

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



高速公路低路堤路基服役状态风险评估

徐敬业^a, 徐林荣^{a,b}, 张亮亮^a

(中南大学 a. 土木工程学院; b. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 长沙 410075)

摘要:高速公路低路堤受到路基高度的限制,容易产生工后沉降过大或不均匀沉降等问题。路基设计和养护规范中均未针对低路堤设计进行统一规定,导致低路堤在建设期、运营期存在影响工程正常使用的问题。借鉴地质灾害风险评估理论,分析干湿循环、交通荷载等影响因素,考虑养护维修对各因素进行修正,提出了低路堤路基服役状态评估方法。该方法运用模糊综合评价法和物元分析方法分析建设期结构质量易损性、运营期路基危险性及其养护维修修正值,得出低路堤路基综合风险度。将该方法运用于浙北低路堤段工程实例,得到的综合风险度为低度,服役状态风险程度与现场调查结果基本一致,说明了该评估方法的可行性。

关键词:高速公路;路堤;路基;服役状态;风险评估

中图分类号:U416.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2020)04-0036-08

Risk assessment of expressway low-embankment-subgrade in service status

Xu Jingye^a, Xu Linrong^{a,b}, Zhang Liangliang^a

(a. College of Civil Engineering; b. National Engineering Laboratory of High-speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha 410075, P. R. China)

Abstract: The low embankment of the expressway is limited by the height of subgrade, and some special problems such as excessive settlement or uneven settlement are easily caused after construction. At present, the subgrade design and maintenance codes do not uniformly regulate the design of the low embankment, resulting in many problems that would affect the normal use of the structure during the construction and operation of the low embankment. Based on the risk assessment theory of geological disaster, this paper analyzed the effect of some factors such as drying and wetting cycle as well as traffic load on the low embankment of the expressway. In addition, considering the maintenance and repair, these factors were modified and the evaluation method of low-embankment-subgrade in service status was proposed. Combined with fuzzy comprehensive evaluation method and matter-element analysis method, the structural quality vulnerability in construction period, the risk of subgrade in operation period and the modified value of maintenance and repair were analyzed. And then the comprehensive risk of low-embankment-subgrade was obtained. The method was applied to a low embankment project in northern

收稿日期:2019-11-15

基金项目:国家自然科学基金(51778634)

作者简介:徐敬业(1972-),男,高级工程师,博士生,主要从事岩土工程研究,E-mail:837088296@qq.com。

徐林荣(通信作者),男,教授,E-mail:lrxu@csu.edu.cn。

Received:2019-11-15

Foundation items:National Natural Science Foundation of China (No. 51778634)

Author brief: Xu Jingye (1972-), senior engineer, PhD candidate, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: 837088296@qq.com.

Xu Linrong (corresponding author), professor, E-mail: lrxu@csu.edu.cn.

Zhejiang. The result shows that the comprehensive risk is low and the service state risk is basically consistent with the filed survey result, which illustrates the feasibility of the proposed evaluation method.

Keywords: expressway; embankment; subgrade; service status; risk assessment

高速公路广泛采用高路堤(>2.5 m)设计方案,但采用高路堤会增大土石方工程量,而且在软土地基广泛分布的东南沿海地区,高路堤方案会出现路基不均匀沉降引起的纵横向开裂、整体或局部下沉、路基滑坡或边坡坍塌等问题^[1],因此,提出了高速公路低路堤的设计理念与方案。低路堤设计在高速公路建设中逐步得到推广应用,如山东省济青高速、河南省商开高速部分路段,均采用低路堤设计方案,取得了较好的社会效益。高速公路采用低路堤设计具有减少占地、降低工程量、行车安全舒适、工后沉降小、施工质量易于控制、较为经济等优点^[2]。然而,随着路堤高度的降低,低路堤设计也面临许多问题。例如:嘉兴高速公路自建成通车以来,低路堤区段出现多处路堤不均匀沉降、工后沉降偏大、路面裂缝、路面下陷、桥头跳车、下穿构造物出现断裂破坏等问题,造成公路的工后维护费用和工作量增大,对公路运营带来较大影响。

虽然程平等^[3]已提出公路低路堤设计指南,但对于低路堤路基施工质量和竣工质量验收、运营期间路基使用功能的评定,仍基本沿用高路堤相关规范标准。因此,判定低路堤工程质量是否合格,技术状况对应何种养护方案与实际情形存在偏差。Xu等^[4]提出了高速公路软土路基健康状况评价系统,但迄今为止专门针对低路堤路基服役状态风险评估的研究较为少见。笔者引入地质灾害评估理念,提出了针对建设期结构质量易损性、运营期危险性 & 养护维修修正三方面的低路堤路基状态评估理念,协助公路养护部门指导“防灾减灾”工作,同时,对高速公路低路堤的设计施工与养护维修提供建议。

1 低路堤路基状态评估

1.1 存在的问题

1.1.1 质量评定与低路堤运营状态无对等关系

尽管路基设计规范针对路基的压实检测指标、路基排水系统等做出了严格要求,但低路堤公路在运营期依旧会出现路基强度破坏,产生超过容许值的沉降变形或不均匀沉降,以及排水系统失效等一系列

问题。由此可见,仅依据竣工质量不足以判定运营期是否能满足使用要求,即结构质量评价结果优良也难以保证运营期达到要求;反之,运营期出现的各类问题,也并不能说明竣工质量评定不合格。

1.1.2 对低路堤受交通动荷载和干湿循环的影响考虑不足 目前的研究主要针对压实度、CBR等监测手段和测试方法的修正、改良,以期得到更为精确、可靠的数据。然而,无论对现有参数测量方法(静力测试和强度及变形)的修正改良,还是确定更加严格的质量验收标准,都基本局限在路基本身范围内,缺乏对低路堤自身特点与此类问题间关系的分析。

低路堤设计因受填土高度的影响,导致路基和地基受交通动荷载的影响更加显著,在其长时间作用下,容易产生工后沉降过大或不均匀沉降等问题。此外,当低路堤路基(特别是低路堤软土路基)处在水文地质条件复杂,且承受交通循环荷载和干湿循环的影响时,容易产生过大的沉降,相关设计或技术状况评定的适用性和可操作性很差。

低路堤为应对干湿循环的影响而对路基填料有更高的要求,且路基工作区深度会延伸到地基层,因此,对于地基处理的要求,高速公路低路堤设计与高路堤设计有显著区别,需要建立专门针对低路堤(尤其是经过软土地基的低路堤)路基服役状态评价体系。

1.2 低路堤路基状态评估新理念

通过对低路堤反复出现不均匀沉降及桥头跳车等问题的分析发现,大多数问题是由于建设竣工时结构质量问题导致。鉴于此,有必要专门针对低路堤公路正式通车的初始阶段就对工程的结构质量进行评估,并依照评估结果对不足之处及时做出相应修改,有效减少运营期反复维修的次数及反复出现病害的情况。

通过对低路堤干湿循环、交通荷载等外界环境的作用进行分析,可以对一段时间段内运营状态情况进行预测。另外,在高速公路运营较长时间后,对路基、路面病害采取了相应的养护措施,后期运营状态的发展趋势也需要进行评估。

鉴于路基状态主要受路基自身工程质量和外界环境影响两项内容控制,笔者将路基工程和外界环境分别视作“承灾体”和“致灾体”,将通车运营这一节点视作“灾前与灾后阶段的划分”。目前,地质灾害评价主要借助风险分析,关系为“风险性=易损性×危险性”。将建设期路基结构质量评估就等效于衡量承灾体灾前结构抗力的“工程易损性”^[5];而交通荷载、干湿循环造成的外界环境影响则等效于可能造成路基结构损坏的“灾害危险性”,二者结合可用于预测评估“灾害期望损失”情况。另外,考虑运营期对路基结构的养护维修作用,对评估结果进行修正,借鉴陈荟竹等^[6]生态风险评价体系,得到低路堤服役状态风险评估关系为“综合风险度=易损

性×危险性×养护维修修正系数”,可以对低路堤服役状态进行更加准确的评估。

2 低路堤路基风险状态评价体系

2.1 建设期易损性评估指标选取

通过对高速公路路基稳定性影响因素进行分析,并参考公路路基设计相关规范,建立以路基层、地基层两方面因素为评价指标体系。由于低路堤受交通荷载和干湿循环的影响更加显著,对路基本身的强度和变形要求更高,因此,地基处理的方法选择更加严格。为使评价结果更加准确,细化了质量控制指标中路基填料和地基处理的内容,建立的低路堤结构质量易损性指标等级划分如表1所示。

表1 易损性指标等级划分
Table 1 Classification of vulnerability indicators

指标类别	分类指标	极低易损性 I	低度易损性 II	中度易损性 III	高度易损性 IV	极高易损性 V
地 基 指 标	地基承载力/kPa	≥80	60~80	30~60	20~30	≤20
	地基压缩模量/MPa	≥10	8~10	5~8	3~5	≤3
	路基填土高度/m	>5.0	3.5~5.0	2.5~3.5	1.5~2.5	<1.5
	加载预压时间/月	≥12	10~12	8~10	6~8	≤6
路 基 指 标	填料类型	块石土	粗粒土	水泥改良土	石灰改良土	细粒土
	最小强度 CBR	≥15	10~15	8~10	4~8	0~4
	重型压实度	≥0.95	0.9~0.95	0.85~0.9	0.7~0.85	0~0.7
	稠度(路基干湿类型)	1.2~1.03	1.03~0.94	0.94~0.77	0.55~0.77	0~0.55

2.2 运营期危险性评估指标选取

运营期低路堤高速公路主要受交通荷载和干湿循环外部因素的影响。因此,建立了以交通荷载和干湿循环两方面因素的评价指标体系,分别对两因素进行细化处理。研究发现,超载对路面结构损伤极大,会导致路面结构在未达到使用年限时就出现裂缝、车辙、拥包、坑槽、沉陷等问题,大大影响道路

服务功能^[7]。研究发现,干湿循环会降低路基填土的强度,首次干湿循环幅度衰减较大,但经历3~5次干湿循环后,强度降低趋于稳定^[8-10],且干湿循环作用下,CBR值与循环次数呈负相关^[11-13],因此,选择干湿循环次数作为干湿循环危险性评价的重要指标。所建立的低路堤运营期路基危险性预测评估指标取值范围如表2所示。

表2 危险性指标取值范围
Table 2 Range of risk indicators

指标类别	分类指标	极低危险性 I	低度危险性 II	中度危险性 III	高度危险性 IV	极高危险性 V
交通荷载	平均行车速度/(km·h ⁻¹)	<60	60~80	80~100	100~120	>120
	年平均日交通量(10 ⁴ pcu·d ⁻¹)	<3.0	3.0~5.0	5.0~8.0	8.0~10.0	>10.0
	超载车辆比例/%	<5	5~10	10~20	20~30	>30
干湿循环	干湿循环次数	<1	1~2	2~3	3~4	>4
	月平均降雨量/10 ² mm	<0.2	0.2~0.5	0.5~1.5	1.5~2.0	>2.0
	月平均蒸发量/10 ² mm	<0.5	0.5~0.8	0.8~1.2	1.2~2	>2.0

2.3 养护维修指标选取

公路管理部门会针对运营环境的特点、变化以及相应路基技术状态,对路基进行定期养护维修。养护维修会对低路堤服役状态评估产生积极影响,因

此,在综合风险度评估时需要对其结果进行修正处理。将养护维修的影响细化为维护频率、养护经费比重和保养频率因素。为有效结合路基结构质量易损性和运营期危险性评定,仍旧沿用五级取值等级,如表 3 所示。

表 3 养护维修修正值指标取值范围

Table 3 Value range of maintenance repair correction value indicators

指标类别	分类指标	极低修正 I	低度修正 II	中度修正 III	高度修正 IV	极高修正 V
养护维修	定期维护频率/(次·年 ⁻¹)	>6	4~6	3~4	1~3	<1
	养护经费比重/%	>40	30~40	15~30	10~15	<10
	日常保养频率/(次·月 ⁻¹)	>5	3~5	2~3	1~2	<1

2.4 低路堤综合风险度

低路基服役状态风险评估包含了路基建设期、运营期及养护维修 3 方面影响因素,得到地路基综合风险度的综合评价体系,如图 1 所示。

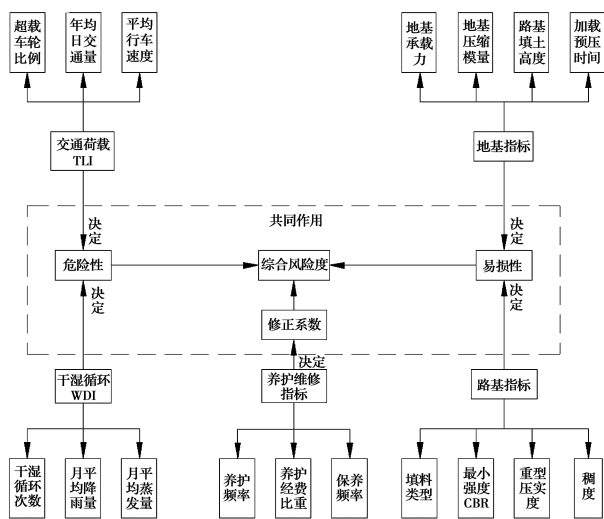


图 1 综合风险度评价体系

Fig. 1 Comprehensive risk assessment system

3 评价模型及方法

由于低路堤高速公路运营时间普遍较短,所暴露的问题随机性较大,成因机理、影响因素等与高路堤相比尚不明确,故能否套用高路堤的数值模拟计算、现场试验分析等方法,获取低路堤各项参数取值存在较大不确定性。鉴于此,借助评估手段从路基状态好坏等偏向定性分析的层面入手,获取低路堤路基状态的影响因素及其作用规律,逐步探索可用于定量计算的低路堤参数是更切合实际的做法。

3.1 评价方法

模糊综合评价法的隶属度理论把定性评估转化为定量评价,能较好地解决模糊、难以量化的问题。物元分析方法,是以促进事物转化、解决不相容问题为核心,是研究解决矛盾问题的规律和方法。易损性、危险性和养护维修指标结合模糊综合评价法和物元分析法进行评价。基于 3 项主要指标细化分量分析,对于采用模糊综合评价方法的隶属度函数借鉴徐林荣等^[14]泥石流易损性评价方法,从而形成模糊矩阵。对于采用物元分析法的关联度采用熵权法并进行归一化处理得到关联度函数。由于低路堤高速公路相关研究较少,可获取的客观数据很少,因此,使用主观赋权 AHP 法确定权重,使用 AHP 法需结合专家经验确定权重。

3.1.1 评定等级级 各种评价结果的集合为

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) \quad (1)$$

式中:各元素 $v_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 为各种可能的评价结果,本文的评价结果为

$$V = (\text{极低}, \text{低}, \text{中}, \text{高}, \text{极高}) \quad (2)$$

3.1.2 模糊综合评价 由各级具体细化的指标根据徐林荣等^[14]的泥石流易损性评价建立隶属度模糊矩阵,以地基指标为例,隶属度矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} \end{bmatrix} \quad (3)$$

各评价指标的权重向量为

$$W = [\omega_{c1} \quad \omega_{c2} \quad \omega_{c3} \quad \omega_{c4}] \quad (4)$$

模糊评价模型为

$$V = WR = [\omega_{c1} \quad \omega_{c2} \quad \omega_{c3} \quad \omega_{c4}] \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过归一化处理,得到易损性、危险性和养护维修修正的等级。

3.1.3 物元分析法 由各级细化的指标确定关联函数,如式(6)所示。待评事物 P 关于各等级 j 的关联度 $K_j(P)$ 为

$$K_{ij}(x_i) = \begin{cases} \frac{\rho(x_i, X_{0ji})}{\rho(x_i, X_{0pi}) - \rho(x_i, X_{0ji})} (x_i \notin X_{0ji}) \\ \frac{-\rho(x_i, X_{0ji})}{|X_{0ji}|} (x_i \in X_{0ji}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $|X_{0ji}| = b_{0ji} - a_{0ji}$ $\rho(x_i, x_{0ji}) = |x_i - (a_{ji} + b_{ji})/2| - (b_{ji} - a_{ji})/2$ $\rho(x_i, x_{0pi}) = |x_i - (a_{pi} + b_{pi})/2| - (b_{pi} - a_{pi})/2$

由于用关联度函数求出的值有正有负,为使结

$$V = W_i K_{ij} = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3] \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.2 路基风险评价模型

为与路基结构质量易损度、危险度与风险度分级接轨,使用级别偏向变量处理等级隶属度向量。基于布拉德福定律,以 0.2 为公差将易损度、危险度及养护维修修正值在 $[0, 1]$ 范围内分为 5 个数值等级,依次为极低、低度、中度、高度和极高。传统的布拉德定律中的区域分析方法,即将一定范围内的数值作等分划分成若干区域的方法,仍是目前处理数值分级的简单而又常用的方法。

级别偏向变量特征值采用式(11)获得。

$$a^* = \frac{\sum_{i=1}^5 a(i) \cdot K(i)}{\sum K(i)} \quad (11)$$

式中: $a = (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1)$, 分别对应 5 个工程易损性等级; K 为采用模糊综合评价算得的隶属度列向量或物元分析法算得的关联度列向量。

对结果进行偏于安全考虑,级别偏向变量特征值取两种方法的较大者,即

$$a^* = \max(a_m^*, a_w^*) \quad (12)$$

式中: a_m^* 为用模糊综合评价求得的级别偏向变量特征值; a_w^* 为用物元分析法求得的级别偏向变量特征值。

果与下路基评价模型相统一,需用熵权法对每列进行规格化处理,并对每行进行归一化处理。

熵权法公式为

$$k_{ij}(x_i) = \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (7)$$

经过熵权法处理后,关联度矩阵元素取值范围为 $[0, 1]$ 。

以交通荷载指标为例,关联度矩阵为

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} \end{bmatrix} \quad (8)$$

各评价指标权重为

$$W_i = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3] \quad (9)$$

物元分析法评价模型为

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} \end{bmatrix} \quad (10)$$

最后低路堤路基服役状态综合风险度 = 危险性 \times 易损性 \times 养护维修修正值。

4 工程实例应用

4.1 工程概况

浙北某高速公路低路堤路段地处浙江省北部嘉兴市,位于杭嘉湖平原区(浙江省最大平原),地势平坦。平原区东部地面标高 2~4 m(黄海高程,下同),南部 4~6 m,北部为太湖泻湖的一部分,是冲湖积平原,地势低洼,最低点位于北部太湖东侧,仅 1.0 m 左右。以圩区为代表的微地貌,圩区高程多在 1.2~1.7 m。路段软土主要为两层,表层 0.8~2.0 m 为亚黏土(俗称素填土),该土层在路基施工时一般会被清除,下层为深厚的、含有机质的低液限淤泥质亚黏土,及灰色、深灰色、青灰色、饱和、流塑、多呈层状和夹薄层亚砂土,含腐殖质及少量贝壳碎片,层厚 3.6~17.3 m。地基土容许承载力 60~65 kPa,地基土压缩模量为 8~10 MPa。地基压缩层具有高含水量、高压缩性、物理力学性质差等特点,因此,易变形和失稳是较为典型的软土特征,需严格进行软基处理。

交通量情况:交通量 68 188 辆/昼夜(按 2017 年平均小车交通量计算);路面设计荷载为标准轴载

100 kN;桥涵设计荷载中计算荷载为汽车-超 20 级,验算荷载为挂车-120;标准轴载累计作用次数为 25.28×10^6 次/车道。

所选路段均为填方路段、水网地带,采用储量丰富的宕渣作为路基填筑材料。对宕渣所进行颗分试验、击实试验、抗压回弹模量试验、CBR 试验等,试验成果如表 4 所示。

表 4 填料物理力学性质

Table 4 Physical and mechanical properties of the filler

		击实试验		不饱水试件		
击实标准/ ($g \cdot cm^{-3}$)	最佳含 水量/%	最大干密 度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	压实 系数	抗压回弹 模量/MPa	承载比 CBR	
A 重型	8	2.11	0.95	57.4	13.6	
B 重型	8.1	2.05	0.95	68.7	12.5	

4.2 建设期路基结构质量易损性评价

对所评低路堤路段,经调查所得结构质量易损性指标结果如表 5 所示。

表 5 建设结构易损性指标实际取值

Table 5 Actual value of construction structure vulnerability index

指标类别	分类指标	指标取值
地基指标	地基承载力/kPa	62
	地基压缩模量/MPa	9
	路基填土高度/m	2.3
	加载预压时间/月	8
路基指标	填料类型	宕渣
	最小强度 CBR	13.1
	重型压实度	0.95
	稠度(路基干湿类型)	0.61

使用 AHP 法得到地基指标的权重(0.167, 0.167,0.5,0.166),路基指标权重为(0.235,0.082, 0.234,0.449),一致性比率 $CR=0.0015 < 0.1$,符合一致性检验。

使用模糊综合评价得到建设期路基结构质量易损性向量为(0.168,0.236,0.122,0.437,0.028),经过级别偏向变量处理后特征值为 0.5788,说明此低路堤路基结构易损性为中度。

使用物元分析法得到建设期路基结构质量易损性向量为(0.209,0.130,0.245,0.206,0.210),经过级别偏向变量处理后特征值为 0.6156,说明此低路堤路基结构易损性为高度。

易损性取两种方法中的较大者,即易损性 = $\max\{a_m^*, a_w^*\}$ 。

4.3 运营期路基危险性评价

嘉兴市域降水的年际变化一般在 1100~1260 mm 之间,全年降水量的 50%~70%集中在 6 月至 7 月上、中旬的梅汛期,经过 7 月下旬至 8 月相对高温干旱期后进入台汛期,此后至次年 2 月份进入枯水期,各月份降雨量如图 2 所示。当地年平均蒸发量为 910 mm,主要集中在 7、8 月份^[15]。根据上述气候特点,当地修建的低路堤高速公路每年需经历 3 次干湿循环。运营期危险性各指标取值如表 6 所示。

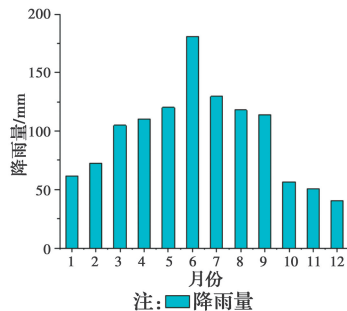


图 2 嘉兴市多年平均月、年降水量

Fig. 2 Average monthly and annual precipitation of Jiaxing

表 6 运营期路基危险性指标实际取值

Table 6 Actual value of subgrade risk indicators during operation period

指标类别	分类指标	指标取值
交通荷载	平均行车速度/($km \cdot h^{-1}$)	105
	年平均日交通量/($10^4 pcu \cdot d^{-1}$)	6.8188
干湿循环	超载车辆比例/%	15
	干湿循环次数	3
	月平均降雨量/ 10^2 mm	105
	月平均蒸发量/ 10^2 mm	75.8

由于干湿循环在全年不同月份对填料的影响不一样,取最严重的月份即 6 月至 8 月时的计算结果作为评价结果。

使用 AHP 法得到交通荷载指标的权重(0.25, 0.25,0.5),干湿循环指标权重为(0.5,0.25,0.25),一致性比率 $CR=0 < 0.1$ 符合一致性检验。

使用模糊综合评价得到运营期路基危险性向量为(0,0.089,0.676,0.236,0),经过级别偏向变量处理后特征值为 0.6300,说明此低路堤路基危险性为

高度。

使用物元分析法得到运营期路基危险性向量为(0.151,0.159,0.138,0.150,0.402),经过级别偏向变量处理后特征值为0.6986,说明此低路堤路基危险性为高度。

危险性取两种方法中的较大者,即危险性 = $\max\{a_m^*, a_w^*\}$ 。

4.4 养护修修正值评价

养护修修正值评价指标结果如表7所示。

表7 养护修修正值指标实际取值

Table 7 Actual value of maintenance repair correction value indicator

指标类别	分类指标	指标取值
运营养护	定期维护频率/(次·年 ⁻¹)	5
	养护经费比重/%	30
	日常保养频率/(次·月 ⁻¹)	2

用AHP法得到养护修修正值指标的权重为(1/3, 1/3, 1/3),一致性比率 $CR=0<0.1$,符合一致性检验。

使用模糊综合评价得到养护修修正值向量为(0, 0.495, 0.340, 0.165, 0),经过级别偏向变量处理后特征值为0.5364,说明此养护修修正值为中度修正。

使用物元分析法得到养护修修正值向量为(0.161, 0.150, 0.231, 0.237, 0.211),经过级别偏向变量处理后特征值为0.6314,说明此养护修修正值为高度修正。

修正值取两种方法中的较大者,即修正值 = $\max\{a_m^*, a_w^*\}$ 。

4.5 路基风险状态评价

综合风险度=危险度×易损度×养护修修正值=0.2716,说明高速公路低路堤服役状态风险评价结果为低度,表示所建设的低路堤在运营期考虑了超载的循环交通荷载和干湿循环对路基强度折减等外界环境影响,以及在后期养护维修条件下预估其服役状态风险为低度,不会发生路基大范围沉陷等大的工程问题。评估结果基本与现场调查结果一致,验证了低路堤路基风险评估模型的目的可行性。

5 结论

1)为了使评价结果更加准确,借鉴地质灾害风

险评估理念,提出低路堤路基风险状态评估的理念,分别针对建设期结构质量易损性、运营期危险性和养护修修正3方面进行分析评价。

2)选取路基和地基两方面的8项指标,构建了建设期结构质量易损性指标体系。鉴于交通荷载、干湿循环等外界环境对低路堤的影响,以及运营养护对环境影响的修正,针对循环次数、填土类型、交通量、超载比例等因素进行分析,建立了运营期路基危险性指标体系和养护修修正指标体系。

3)高速公路低路堤服役状态风险评估为低度,但仍需注意对超载情况进行交通控制,加强路基日常的养护。

参考文献:

- [1] 程勇. 公路软弱地基上的高填方路基开裂失效病害处治分析[J]. 资源信息与工程, 2017, 32(3): 167-168. CHENG Y. Analysis of cracking invalidation treatment of high fill subgrade on weak foundation of highway [J]. Resource Information and Engineering, 2017, 32(3): 167-168. (in Chinese)
- [2] 蒋相华, 鲍燕妮. 高等级公路低路堤设计影响因素及方法分析[J]. 中外公路, 2009, 29(4): 40-42. JIANG X H, BAO Y N. Analysis of factors and methods for designing low embankment of high-grade highway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(4): 40-42. (in Chinese)
- [3] 程平, 吴万平. 公路低路堤设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013. CHENG P, WU W P. Technical guidelines for design of highway low embankment [M]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)
- [4] XU J B, WANG Y Z, YAN C G, et al. Lifecycle health monitoring and assessment system of soft soil subgrade for expressways in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 138-145.
- [5] 徐林荣, 王磊, 苏志满. 隧道工程遭受泥石流灾害的工程易损性评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2153-2158. XU L R, WANG L, SU Z M. Assessment of engineering vulnerability of tunnel suffering from debris flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2153-2158. (in Chinese)
- [6] 陈荟竹, 刘希林. 广东省热带气旋、雨涝灾害和地质灾害生态风险评价(II)[J]. 生态环境学报, 2018, 27

- (11): 2047-2056.
- CHEN H Z, LIU X L. Ecological risk assessment of tropical cyclones, rainstorm waterloggings and geological disasters in Guangdong Province (II) [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018. 27(11): 2047-2056.
- [7] JIHANNY J, SUBAGIO B S, HARIYADI E S. The analysis of overloaded trucks in Indonesia based on weigh in motion data (east of sumatera national road case study) [J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 147: 02006.
- [8] JERMAN M, SCHEINHERROVÁ L, MEDVE? I, et al. Effect of cyclic wetting and drying on microstructure, composition and length changes of lime-based plasters [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103411.
- [9] 彭小平, 陈开圣. 干湿循环下红粘土力学特性衰减规律研究[J]. 工程勘察, 2018, 46(2): 1-7.
- PENG X P, CHEN K S. Study on attenuation law of the mechanical properties of red clay under drying-wetting cycles [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(2): 1-7. (in Chinese)
- [10] HU Z, PENG K, LI L H, et al. Effect of wetting-drying cycles on mechanical behaviour and electrical resistivity of unsaturated subgrade soil [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-10.
- [11] CHEN K S, ZHU R H. Study of the deformation characteristics for red clay under drying-wetting cycles [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Civil Engineering and Transportation 2015, November 28-29, 2015. Guangzhou, China. Paris, France: Atlantis Press, 2015: 511-516..
- [12] 周春梅, 王琴华, 张静波, 等. 干湿和冻融循环对压实黄土路用性能影响的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 533-540.
- ZHOU C M, WANG Q H, ZHANG J B, et al. Experimental study on the influence of dry-wet and freeze-thaw cycles on compacted loess road performance [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3): 533-540. (in Chinese)
- [13] ZHANG J R, JIANG T, WANG X C, et al. Influences of drying and wetting cycles and compaction degree on strength of Yudong silt for subgrade and its prediction [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1-10.
- [14] 徐林荣, 陈舒阳, 曹禄来. 泥石流危害桥隧工程易损性评价[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2642-2650.
- XU L R, CHEN S Y, CAO L L. Engineering vulnerability assessment for bridges and tunnels harmed by debris flow hazards [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2642-2650. (in Chinese)
- [15] 何晓壮, 陈杭. 嘉兴市生态环境需水量的初步探讨 [J]. 水利发展研究, 2005, 5(3): 15-16, 19.
- HE X Z, CHEN H. Preliminary discussion on water demand of ecological environment in Jiaxing City [J]. Water Resources Development Research, 2005, 5(3): 15-16, 19. (in Chinese)

(编辑 胡玥)