

张桑高速顺倾层状边坡施工期安全风险评估^{*}

龙健¹, 郭昕¹, 张满想¹, 黄雄立²

(1.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114; 2.湖南理大交通科技发展有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要:以张桑(张家界—桑植)高速公路顺倾层状边坡为研究对象,选取该类边坡常见的 7 个风险评估影响因子,采用《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南》中的打分及判定方法,利用灰色关联法对施工期边坡安全风险影响因子进行重要性排序。结果表明,在施工期坡体结构等边坡固有属性不变的前提下,该项目顺倾层状边坡施工期安全风险影响因子的重要性依次为坡形坡率、坡体结构、施工措施、地下水、边坡高度、地层岩性和周边环境。

关键词: 工程管理; 高速公路; 顺倾层状边坡; 施工期安全; 风险评估

中图分类号: U415.13

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)01-0160-05

顺倾层状边坡在山区分布较广且存在工程稳定性较差的特点,是工程施工中需重点关注和治理的一类边坡。随着边坡工程技术等级要求的提高,边坡的风险评估成为研究热点之一。但大多数边坡稳定性研究只关注边坡的固有属性,并未针对施工期进行特别分析。在顺倾层状边坡风险评估影响因素中,岩体结构条件和工程地质条件是内因,考虑施工期的影响,还有边坡坡脚开挖、施工措施及降雨等因素。边坡风险评估的方法有很多,如以概率论为基础的可靠性分析方法、以神经网络为基础的神经网络评价方法及以模糊数学为基础的模糊综合评价方法等。该文选取张桑(张家界—桑植)高速公路具有代表性的 10 座顺倾层状边坡,根据交安监发[2014]266 号文《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南》(下称评估指南)提取 7 个边坡风险评估影响因子,应用灰色关联法进行定量分析,得到顺倾层状边坡施工期影响因子的重要性排序,为顺倾层状边坡加固处治措施制定提供参考。

1 工程概况

张桑高速公路位于湘西山区,是湖南西北部重要的南北向通道之一。所在地区地貌以中低山、丘陵为主;地层岩性主要为残坡积层,主要有坡残积黏性土、砂质黏性土等;主线发育 F1、F3、F4 及 F5 断层,钻孔 SQZK05 揭露有断层破碎带;沿线水系较发育,位于长江水系,属亚热带季风湿润气候。

根据主线 1~6 合同段统计数据,该项目共有顺倾层状边坡 14 座,主要位于丘陵间所夹山间盆地,冲沟多呈近东西向,且所经地段大部分有基岩出露,出露地层从老到新依次为志留系、泥盆系中上统、二叠系、三叠系地层,岩体的岩性均为沉积岩。由于这类边坡稳定性普遍较差,且在开挖施工中部分边坡发生过垮塌,施工期安全风险评估尤为重要。

选取 10 个典型顺倾层状边坡为研究对象,其涵盖该项目各合同段,包括丘陵、河流谷地、低山 3 种地形地貌,残坡积层、奥陶系及志留系 3 类地层岩性,能反映该项目顺倾层状边坡施工期的情况。

2 影响因子确认及赋值

2.1 确认影响因子

选取的影响因子应具有代表性,至少能反映评价对象某一方面的特性,但并非越多越好。依据已有研究成果及评估指南,常见边坡安全风险影响因子有地层岩性、坡体结构、边坡高度、坡形坡率、地下水、施工季节等。结合张桑高速公路沿线顺倾层状边坡工程设计、施工情况并考虑因子选取的科学性,确定边坡高度(X_1)、坡形坡率(X_2)、地层岩性(X_3)、坡体结构(X_4)、地下水(X_5)、工程措施(X_6)、周边环境(X_7)为边坡施工期安全风险影响因素。

2.2 指标赋值

7 个影响因子中,边坡高度、坡形坡率及地下水可量化,但地层岩性、坡体结构、工程措施、周边环境

^{*} 基金项目: 2012 年度湖南省交通运输厅科技进步与创新项目计划(201205);2014 年度湖南省交通运输厅科技进步与创新项目计划(201403)

不是量化指标,需对其进行赋值计算。参考评估指南中的指标等级划分及评分方式,将每个影响因子划分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级4个等级,各等级分值分别为0~24、25~49、50~74、75~100,分值越大

则边坡稳定性越差,赋值方式见表1。

根据表1,对于地层岩性指标,地层分布复杂取大值,反之取小值;坡体结构指标,结构面与边坡倾向之间夹角 $\beta=0^\circ$ 时取大值, $\beta=60^\circ$ 时取小值,其他

表 1 顺倾层状边坡部分影响因子的分级及赋值

影响因子	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级
地层岩性	弱风化基岩	强风化层基岩	全风化层基岩	易滑及软弱地层
坡体结构	坡体中其他方向的结 构面不发育、不贯通	坡体中存在顺坡向缓 倾的硬性结构面	坡体中存在顺坡向 缓倾的软弱结构面	坡体中存在顺坡向缓倾软弱 结构面或贯通组合体
工程措施	挡土墙	注浆类	锚固	抗滑桩
周边环境	设施位于上述范围以外	坡顶开挖线以外 1.5H 内有地表建筑物、地下 埋藏物	坡顶开挖线以外 1.0H 内有地表建筑物、地下 埋藏物	坡顶开挖线以外 0.5H 内有地表建筑物、地下 埋藏物
赋值	0~24	25~49	50~74	75~100

夹角按线性内插取值;工程措施指标按措施施工情况打分,施工效果较差取大值,较好取小值;周边环境指标按建筑物与坡顶开挖线距离线性插值打分,距离近取大值,反之取小值。据此对所选10个典型

边坡的地层岩性、坡体结构、工程措施、周边环境4个影响因子进行赋值,综合边坡高度、坡形坡率、地下水(地下水分布高度与边坡高度的比值)指标结果得到总赋值(见表2)。

表 2 评价单元影响因子勘测及赋值结果

评价单元	边坡高度 X_1/m	坡形坡率 $X_2/(\text{^\circ})$	地层岩性 X_3	坡体结构 X_4	地下水 X_5	工程措施 X_6	周边环境 X_7
K3+172—327	27.5	47.71	41	71.3	0.25	73	10
K4+800—K5+084	28.8	45.00	26	66.0	0.24	66	24
K6+785—K7+000	24.2	49.07	25	66.0	0.27	55	9
K7+301—546	25.0	45.00	27	73.0	0.25	71	24
BK0+156—K10+360	47.5	48.25	25	66.0	0.25	50	13
K11+324—500	30.8	45.00	25	70.0	0.26	69	24
K11+593—760	29.3	47.71	43	69.7	0.25	50	10
K20+600—667	23.4	42.89	25	70.5	0.25	74	24
K42+800—930	55.8	41.20	49	66.0	0.26	50	24
K43+240—430	39.0	41.83	50	66.0	0.25	50	12

3 灰色关联度计算

3.1 关联数列

关联序列为 $X_i = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7\} = \{\text{边坡高度, 坡形坡率, 地层岩性, 坡体结构, 地下水, 工程措施, 周边环境}\}$ 。若选取 X_1 为参考序列, 则有:

$$X_1(k) = \{X_1(2), X_1(3), X_1(4), X_1(5),$$

$$X_1(6), X_1(7)\}$$

3.2 均值化处理

按均值化公式[见式(1)]对表2中的赋值进行计算,结果见表3。

$$X'_i(k) = \frac{X_i(k)}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_i(k)} \tag{1}$$

式中: $i=1, 2, \cdots, m; n=1, 2, \cdots, n$ 。

表3 顺倾层状边坡影响因子无量纲值

评价单元	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
K3+172—327	0.830	1.052	1.220	1.042	0.988	1.201	0.575
K4+800—K5+084	0.869	0.992	0.774	0.964	0.949	1.086	1.379
K6+785—K7+000	0.730	1.082	0.744	0.964	1.067	0.905	0.517
K7+301—546	0.755	0.992	0.804	1.066	0.988	1.168	1.379
BK0+156—K10+360	1.434	1.064	0.744	0.964	0.988	0.822	0.747
K11+324—500	0.930	0.992	0.744	1.023	1.028	1.135	1.379
K11+593—760	0.884	1.052	1.280	1.018	0.988	0.822	0.575
K20+600—667	0.706	0.945	0.744	1.030	0.988	1.217	1.379
K42+800—930	1.684	0.908	1.458	0.964	1.028	0.822	1.379
K43+240—430	1.177	0.922	1.488	0.964	0.988	0.822	0.690

3.3 绝对差数列

按绝对差公式[见式(2)]对表3中的无量纲值进行计算,结果见表4。

$$\Delta_{ij}(k) = |X'_i(k) - X'_j(k)| \quad (2)$$

式中: $k=1,2,\dots,m$ 。

表4 求差数列

评价单元	Δ_{12}	Δ_{13}	Δ_{14}	Δ_{15}	Δ_{16}	Δ_{17}
K3+172—327	0.222	0.390	0.212	0.158	0.371	0.255
K4+800— K5+084	0.123	0.095	0.095	0.079	0.216	0.510
K6+785— K7+000	0.351	0.014	0.234	0.337	0.174	0.213
K7+301—546	0.237	0.049	0.312	0.234	0.413	0.625
BK0+156— K10+360	0.370	0.690	0.470	0.446	0.611	0.687
K11+324—500	0.062	0.186	0.093	0.098	0.205	0.450
K11+593—760	0.167	0.395	0.134	0.104	0.062	0.310
K20+600—667	0.239	0.038	0.324	0.282	0.511	0.673
K42+800—930	0.776	0.226	0.720	0.657	0.862	0.305
K43+240—430	0.255	0.311	0.213	0.189	0.355	0.488

3.4 关联系数

由表4得 $\Delta_{\min}=0.014$ 、 $\Delta_{\max}=0.862$ 。按关联系数公式[见式(3)]计算,得到比较数列 X_j 对参考数列 X_1 的关联系数(见表5)。

$$\xi_{ij}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{|X'_i(k) - X'_j(k)| + \rho\Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中: ρ 为分辨系数,其值为 $[0,1]$,一般取 $\rho=0.5$ 。

表5 关联系数

评价单元	ξ_{12}	ξ_{13}	ξ_{14}	ξ_{15}	ξ_{16}	ξ_{17}
K3+172—327	0.681	0.541	0.692	0.755	0.555	0.648
K4+800— K5+084	0.803	0.844	0.845	0.871	0.687	0.472
K6+785— K7+000	0.568	1.000	0.669	0.579	0.735	0.690
K7+301—546	0.665	0.926	0.598	0.669	0.527	0.421
BK0+156— K10+360	0.555	0.397	0.494	0.507	0.426	0.398
K11+324—500	0.901	0.721	0.848	0.840	0.699	0.505
K11+593—760	0.743	0.538	0.787	0.831	0.902	0.600
K20+600—667	0.663	0.948	0.589	0.624	0.472	0.403
K42+800—930	0.368	0.677	0.386	0.409	0.344	0.604
K43+240—430	0.648	0.599	0.690	0.717	0.566	0.484

3.5 关联度

根据表5,按关联度公式[见式(4)]计算,得到比较数列 X_j 对参考数列 X_1 的关联度(见表6)。

$$r_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_{ij}(k) \quad (4)$$

表6 关联度

分区	关联度	分区	关联度
r_{12}	0.659 68	r_{15}	0.680 24
r_{13}	0.719 22	r_{16}	0.591 15
r_{14}	0.659 94	r_{17}	0.522 50

依次改变参考数列按上述步骤进行计算,求出所有比较数列 X_j 对参考数列 X_i 的关联度,得到式

$$R = \begin{bmatrix} 1.000\ 00 & 0.659\ 68 & 0.719\ 22 & 0.659\ 94 & 0.680\ 24 & 0.591\ 15 & 0.522\ 50 \\ 0.622\ 98 & 1.000\ 00 & 0.586\ 92 & 0.884\ 07 & 0.893\ 18 & 0.715\ 11 & 0.495\ 39 \\ 0.592\ 39 & 0.688\ 93 & 1.000\ 00 & 0.596\ 09 & 0.593\ 85 & 0.582\ 10 & 0.515\ 99 \\ 0.879\ 55 & 0.574\ 99 & 0.609\ 33 & 1.000\ 00 & 0.908\ 35 & 0.740\ 20 & 0.506\ 43 \\ 0.877\ 11 & 0.548\ 72 & 0.897\ 56 & 0.608\ 81 & 1.000\ 00 & 0.665\ 55 & 0.472\ 43 \\ 0.761\ 91 & 0.620\ 64 & 0.798\ 11 & 0.748\ 35 & 0.599\ 11 & 1.000\ 00 & 0.653\ 56 \\ 0.501\ 43 & 0.515\ 99 & 0.528\ 98 & 0.519\ 32 & 0.613\ 15 & 0.491\ 89 & 1.000\ 00 \end{bmatrix} \quad (5)$$

结果为 $0.897\ 56 > 0.877\ 11 > 0.665\ 55 > 0.608\ 81 > 0.548\ 72 > 0.472\ 43$, 即 $[r_{53}, r_{51}, r_{56}, r_{54}, r_{52}, r_{57}]$, 和地下水因子关联度最大的为地层岩性, 其次是边坡高度、工程措施、坡体结构、坡形坡率、周边环境。同理可得到其余各因子间关联度排序: 边坡高度为 $[r_{13}, r_{15}, r_{14}, r_{12}, r_{16}, r_{17}]$; 坡形坡率为 $[r_{25}, r_{24}, r_{26}, r_{21}, r_{23}, r_{27}]$; 地层岩性为 $[r_{32}, r_{34}, r_{35}, r_{31}, r_{36}, r_{37}]$; 坡体结构为 $[r_{45}, r_{41}, r_{46}, r_{43}, r_{42}, r_{47}]$; 工程措施为 $[r_{63}, r_{61}, r_{64}, r_{67}, r_{62}, r_{65}]$; 周边环境为 $[r_{75}, r_{73}, r_{74}, r_{72}, r_{71}, r_{76}]$ 。

3.6 因子权重

先求关联矩阵 R 中各行平均值 $\bar{r}_{(i)}$ ($i = 0, 1, \dots, 7$), 得:

$$\begin{aligned} \bar{r}_{(1)} &= 0.638\ 787\ 719; \bar{r}_{(2)} = 0.699\ 608\ 221 \\ \bar{r}_{(3)} &= 0.594\ 892\ 358; \bar{r}_{(4)} = 0.703\ 141\ 814 \\ \bar{r}_{(5)} &= 0.678\ 364\ 926; \bar{r}_{(6)} = 0.696\ 946\ 569 \\ \bar{r}_{(7)} &= 0.528\ 460\ 352 \end{aligned}$$

再按式(6)计算, 得到各因子权重(见表 7)。

$$w_i = \frac{\bar{r}_{(i)}}{\sum_{i=1}^7 \bar{r}_{(i)}} \quad (6)$$

表 7 影响因子的权重

影响因子	权重	影响因子	权重
X_1	0.140 70	X_5	0.149 41
X_2	0.154 09	X_6	0.153 51
X_3	0.131 03	X_7	0.116 39
X_4	0.154 87		

由表 7 可知: 施工期各因子的重要性排序为 $X_4 > X_2 > X_6 > X_5 > X_1 > X_3 > X_7$, 即坡体结构 > 坡

(5)所示关联矩阵 R 。

以关联矩阵第 5 行为例, 按照关联度大小排序,

形坡率 > 工程措施 > 地下水 > 边坡高度 > 地层岩性 > 周边环境。

4 结果分析及工程建议

4.1 排序结果分析

对比其他文献对顺倾层状边坡风险评估结果, 上述影响因子排序结果略有不同。这是由于:

(1) 边坡风险评估方法不同。如采取层次分析法进行评估, 边坡高度指标权重大于地下水指标, 与上述灰色关联法得出的结果相反。导致这一差异的原因在于两种方法的基础理论不同, 层次分析法通过定性指标模糊量化的方法计算层次单排序和总排序, 其关键在于判断矩阵的构建; 灰色关联法则根据因素之间变换趋势的相似程度衡量因素间的关联程度。两种排序方法各有其适用性, 相比层次分析法, 灰色关联法以样本原始数据为参考, 降低了人为主观因素的影响, 更适于顺倾层状边坡施工期安全风险评估分析。

(2) 评价时期不同。当前顺倾层状边坡风险评估研究文献中, 大多数影响因子的排序结果是坡体结构、地层岩性等因素较靠前, 这些因素为边坡的固有属性, 一旦道路路线设计敲定就无法改变, 是静态指标; 而施工期坡形坡率、工程措施、地下水等指标可通过相应工程措施来改变, 是可变指标。在施工期, 这类可变指标的变化与边坡稳定性变化联系更紧密, 因而上述排序结果中坡形坡率因子较靠前、地层岩性因子较靠后, 这种排序结果既符合当前顺倾层状边坡稳定性研究的主流成果, 同时更贴近张桑高速公路顺倾层状边坡施工期风险评估实际。

4.2 工程建议

根据评估结果, 为保证张桑高速公路顺倾层状

边坡施工期的稳定性,需重点关注坡形坡率、地下水和工程措施等靠前的可变影响因子。刷坡时无法改变边坡高度,但可减少边坡每级高度和放缓坡率;修建排水设施时,可因地制宜地采用不同排水结构物降低地下水分布高度;在工程措施方面,尽量选择施工难度小且对边坡扰动较小的防护工程。通过采取以上措施,增加边坡的稳定性,从而降低其安全风险等级。

5 结论

(1) 张桑高速公路顺倾层状边坡风险评估因子中坡体结构所占权重最大,为 0.154 87,是影响边坡稳定性的首要因素;其次是坡形坡率、工程措施、地下水、边坡高度、地层岩性;周边环境所占权重最小,为 0.116 39,稳定性影响作用最小。

(2) 张桑高速公路顺倾层状边坡施工期应优先关注排序靠前的可变因子,如坡形坡率,设计时考虑适当放缓,边坡处治方案比选时采取对边坡稳定性影响最小的措施。

参考文献:

- [1] 屠义伟.复杂地质条件下山区公路边坡稳定性评价及加固方法设计[J].公路工程,2018,43(1).
- [2] 黄润秋,赵建军,巨能攀,等.汤屯高速公路顺层岩质边坡变形机制分析及治理对策研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2).
- [3] 李炜.边坡稳定可靠性研究[D].大连:大连理工大学,2009.
- [4] 陈建宏,郑荣凯,陈浩.基于 PCA 和 BP 神经网络边坡稳定性分析[J].中国安全生产科学技术,2014,10(5).
- [5] 黄有堂.基于模糊综合评价法的高陡边坡稳定性研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [6] 郑长安,吴尚.层状岩土质混合高边坡施工的影响因素及其稳定数值分析[J].公路工程,2013,38(6).
- [7] 曾昆,曾晟.灰色加权关联分析在公路网评价中的应用[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(3).
- [8] 刘珂珂.中缓倾角顺层岩质边坡灾变机理及风险评估[D].重庆:重庆交通大学,2015.

收稿日期:2018-07-12

(上接第 74 页)

见图 7。从图 7 可见:橡胶沥青应力吸收层路段的裂缝较少,而未实施橡胶沥青应力吸收层的路段存在明显的有规则的纵横向裂缝等病害,证明橡胶沥青应力吸收层具有良好的抗剪切作用。



(a) 未实施应力吸收层路段 (b) 实施应力吸收层路段

图 7 应力吸收层实施前后效果对比

4 结语

该文借助商登高速公路郑州段橡胶沥青应力吸收层实体工程,开展橡胶沥青应力吸收层应用技术研究,分析复合改性橡胶沥青应力吸收层的最佳沥青洒布量、最佳碎石撒布量及剪切破坏变形,结合实际应用效果得出:复合改性橡胶沥青应力吸收层中碎石 9.5~13.2 mm 的最佳洒布量为 12 kg/m²,沥青最佳洒布量为 2.4 kg/m²;复合改性橡胶沥青应力吸收层的剪切破坏变形具有明显优势,剪切破坏

位移为 5 mm 左右,是土工格栅的 2 倍多、乳化沥青封层的近 3 倍、聚酯玻纤布的近 1.5 倍,复合改性橡胶沥青应力吸收层的使用效果良好。

参考文献:

- [1] 尚同羊,张苛,高涛涛,等.橡胶沥青应力吸收层设计方法探讨[J].郑州大学学报:工学版,2013,34(3).
- [2] 吕伟民.废胎胶粉改性沥青路面技术[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [3] 陈骁,金雷,吴至奇.SBS 改性沥青应力吸收层性能研究[J].中外公路,2005,25(6).
- [4] 曹荣吉,白启峰.橡胶沥青应力吸收层在盐通高速公路的应用研究[J].公路交通科技:应用技术版,2006(10).
- [5] 沈金安.沥青及沥青混合料路用性能[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 张晨晨,王旭东,黄英强,等.沥青混合料生产配合比均衡设计方法[J].中外公路,2013,33(1).
- [7] 广州市市政工程维修处,华南理工大学.广州市城市道路路面预防性养护成套技术研究[R].广州:华南理工大学,2007.
- [8] 李福建,王旭东,周兴业,等.基于路用性能的应力吸收层最佳油石比设计方法研究[J].公路与汽运,2011(3).

收稿日期:2018-05-17