

基于模糊评判法的黄土地区铁路边坡稳定性分析

盖海龙, 王家鼎, 王建斌, 谢婉丽

(西北大学 地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: [目的] 建立黄土地区铁路沿线边坡稳定性综合评判模型, 评价山西省中南部通道 DK29+860 处黄土边坡的稳定性。[方法] 在综合分析黄土地区铁路沿线边坡各种影响因素的基础上, 选取 7 个评价因子, 按照稳定、次稳定、不稳定和极不稳定的边坡稳定性的分类标准, 并利用信息扩散原理, 与 FLACR 数值模拟软件计算结果进行对比。[结果] 运用模糊评判法评判该边坡处于次稳定状态, 使用 FLACR 数值模拟软件模拟求得该边坡稳定系数为 1.18, 两者评价结果基本一致。[结论] 该评价方法真实可靠, 能够准确地评价边坡的稳定性。

关键词: 黄土地区; 铁路; 边坡稳定性; 模糊综合评判

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)03-0157-05

中图分类号: P642.5

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.035

Analysis on Slope Stability Along Railway in Loess Area Based on Fuzzy Evaluation Method

GAI Hailong, WANG Jiading, WANG Jianbin, XIE Wanli

(Department of Geology/State Key Laboratory of Continental Dynamics,
Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: [Objective] To establish the comprehensive evaluation model for the slope stability ultimately in loess region along the railways and to evaluate the loess slope stability of the channel DK29 + 860 in Mid-southern Shanxi Province. [Methods] Based on the comprehensive analysis of various influence factors about loess slope along the railway, seven assessment factors were selected. According to the classification criteria of slope stability (stable, less stable, unstable and extremely unstable), the principle of information diffusion was adopted to compare the seven factors with the results calculated by of the FLACR numerical simulation. [Results] The slope was in a steady state evaluated with fuzzy judgment method, the slope stability coefficient was 1.18 with the FLACR numerical simulation software. The two conclusions were basically identical. [Conclusion] Fuzzy evaluation method was reliable, it can evaluate the slope stability accurately in loess region along railways.

Keywords: loess areas; railway; slope stability; fuzzy comprehensive evaluation

随着中国西部大开发的不断深入,特别是近年来一大批高等级公路、高速铁路等工程的相继建设极大地缓解了中西部地区的交通压力,促进了地方经济建设的可持续发展。然而,中西部黄土广布地区地面侵蚀切割强烈、地貌单元复杂,沟壑纵横,公(铁)路沿线存在大量的黄土边坡。对这些黄土边坡稳定性的评价至关重要,传统的力学计算方法计算量大且过于繁琐。为此,寻求一种简便、快捷、准确的铁路边坡稳定

性评价方法尤为必要。国内外学者对此进行了相关研究。王家鼎等^[1-2]基于黄土边坡稳定性的实际资料,利用信息分配、模糊一二级近似推论及信息集中等原理建立了一套黄土边坡稳定性的评价方法,并将该方法应用于兰州市滑坡防灾规划和皋兰山三台阁北侧几个滑坡及边坡稳定性的研究中,取得了良好的效果;陈晓利等^[3]利用模糊数学的方法对地震滑坡危险性进行评定,并编制了地震滑坡危险性评价图;谢

收稿日期:2014-04-22

修回日期:2014-04-29

资助项目:国家自然科学基金项目“列车长持时振动引起高速铁路路基黄土振陷研究”(4097219);高等学校博士点学科点专项科研基金“列车长持时振动引起高速铁路地基黄土振陷、液化和滑移等灾害链及其防治研究”(20116101130001);西北大学研究生自主创新基金(YZZ13010)

第一作者:盖海龙(1988—),男(汉族),甘肃省平凉市人,硕士研究生,主要研究方向为工程地质及其数值模拟。E-mail:nwuhailong@sina.cn.

全敏等^[4]提出了滑坡灾害破坏损失综合评价方法,建立了滑坡灾害破坏损失综合评价模型,并通过实例详细分析了滑坡灾害破坏损失综合评价方法的应用;何书、王家鼎等^[5]探讨了基于信息扩散原理的 BP 神经网络的黄土边坡稳定性评价模型,并对 4 组预测样本进行预测,效果良好。以上研究地域上多集中于中国西北、西南地区,针对中国煤炭资源丰富的山西地区尚缺乏研究,为此,笔者以山西中南部重载铁路通道建设为背景,在综合分析黄土地区铁路沿线边坡各种影响因素的基础上,选取合理的评价因子及边坡稳定

性分类标准,采用信息扩散原理^[6],建立各评价因子与安全系数之间的模糊关系,并在此基础上进行二级近似模糊推论,建立黄土地区铁路沿线边坡稳定性综合评判模型,对铁路沿线典型黄土边坡进行稳定性评价,并与 FLACR 数值模拟软件计算结果进行对比。

1 建立模糊综合评判体系

1.1 黄土边坡稳定性分类及评价指标

根据黄土地区的实际资料及特点,将边坡稳定性分析分类如表 1 所示。

表 1 黄土边坡稳定性分类

等级	代号	边坡物质结构组成	地貌特征	在地震动作用下滑坡情况
稳定	I	河流阶地,黄土梁顶,或由砂岩、轻变质岩组成的边坡	坡脚无河流及人为切割,坡度小于 30°	在Ⅶ,Ⅷ,Ⅸ,Ⅹ度地震作用下,不会发生滑坡
次稳定	Ⅱ	黄土、砂、泥岩互层(岩层倾向坡内)	坡脚切割轻微,坡度小于 30°	在Ⅶ,Ⅷ度地震作用下无滑坡,但在Ⅸ度以上地震动作用下,可能发生局部小滑坡或坍塌
不稳定	Ⅲ	黄土、泥岩及砂泥岩互层,岩层倾向坡外,倾角 10°~20°	坡脚切割较强,坡度 30°~45°,边坡高度较高	在Ⅶ,Ⅷ度地震作用下,发生小规模滑坡,在Ⅸ度以上的地震动作用下,将发生大规模滑坡,滑距远
极不稳定	Ⅳ	上部为黄土,下部为泥岩,二者接触面倾角大于 15°,或由泥岩及砂岩互层组成的边坡,岩层倾向坡外,倾角 20°~30°	坡脚切割强烈,坡顶出现张裂缝,坡度大于 45°,边坡高差较大	在地震动作用下,会发生更大规模的滑坡,滑距很远

设评价边坡稳定性的因素有 7 个论域,即:土的黏聚力 $C(\text{kPa})$;土的内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$;边坡的坡度 $\alpha(^{\circ})$;边坡的高度 $H(\text{m})$;日降水量强度 $F(\text{mm})$;地震地面运动最大加速度 $A_{\text{max}}(\text{m/s}^2)$;边坡结构类型 T 。

同理,设另一边坡稳定性论域 S

$$S_{\Delta} \{s_1, s_2, s_3, s_4\} = \{I, II, III, IV\} \quad (1)$$

式中: I——稳定边坡; II——次稳定边坡; III——不稳定边坡; IV——极不稳定边坡。下同。

1.2 各评价指标与边坡稳定性的模糊关系

1.2.1 岩性、边坡坡度及高度 岩性对边坡稳定性的影响较大,人们往往在室内进行土工试验,求出土性参数:黏聚力 C 及内摩擦角 φ ,先建立黏聚力与边坡稳定性的模糊关系。设有两论域:黏聚力论域 $C(\text{kPa})$ 与边坡稳定性论域 S 。

$$C_{\Delta} \{c_1, c_2, \dots, c_6\} = \{5, 25, 45, 65, 85, 105\} \quad (2)$$

$$S_{\Delta} \{s_1, s_2, s_3, s_4\} = \{I, II, III, IV\} \quad (3)$$

以元素 c_i, s_j 作为行列构成信息矩阵 $Q(6 \times 4)$,如表 2 所示。

设有原始数据 (c_i, s_j) ,其扩散到 Q_{ij} 的信息按正态扩散公式^[7-8]计算。

设窗口宽为 Δ_m ,则有以下正态扩散估计:

$$\tilde{f}_m(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}mh} \sum_{j=1}^m \exp\left[-\frac{(v-v_j)^2}{2h^2}\right] \quad (4)$$

式中: h ——标准正态扩散 $\mu(x) = (1/\sqrt{2\pi})e^{-x^2/2}$ 时的窗口; m ——样本容量; v_j ——知识样本 $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ 中 ω_j 的观测值; v ——基础论域 V 中的元素。

按式(4)的信息扩散法,将黄土地区收集的 150 组原始数据进行模糊处理,将 Q 矩阵的对应元素叠加起来,即可形成信息分布表。对这个信息表中的边坡稳定性各级作正规化处理(即用每列中的最大值,遍除该列各行的值),便可得 C, S 的模糊关系 $R_{c,s}$ (如表 2 所示)。

表 2 黏聚力与边坡稳定性论域的模糊关系 $R_{c,s}$

C/kPa	I (S_1)	II (S_2)	III (S_3)	IV (S_4)
$C_1(5)$	0.002	0.403	0.804	1.000
$C_2(25)$	0.050	0.820	0.956	0.750
$C_3(45)$	0.410	0.925	0.397	0.046
$C_4(65)$	0.470	0.649	0.010	0.002
$C_5(85)$	0.770	0.309	0.007	0.001
$C_6(105)$	1.000	0.025	0.003	0.001

注: C 为黏聚力论域; S 为边坡稳定性论域。下同。

同理,按信息扩散法,可将 150 组原始资料中的 φ, α, H 值分别扩散在矩阵 $Q_{\varphi,s}(10 \times 4), Q_{\alpha,s}(7 \times 4)$ 和

$Q_{h,s}$ (9×4) 中, 正规化后可得内摩擦角 φ , 边坡坡度 α 和边坡高度 H 与边坡稳定性 S 的模糊关系 $R_{\varphi,s}$, $R_{\alpha,s}$ 及 $R_{h,s}$ (如表 3—5 所示)。

表 3 边坡坡度和高度与稳定性的模糊关系 $R_{\varphi,s}$

$\varphi(^{\circ})$	I (S_1)	II (S_2)	III (S_3)	IV (S_4)
$\varphi_1(2.5)$	0.002	0.008	0.023	1.000
$\varphi_2(7.5)$	0.007	0.019	0.136	0.053
$\varphi_3(12.5)$	0.010	0.038	0.457	0.733
$\varphi_4(17.5)$	0.015	0.440	1.000	0.320
$\varphi_5(22.5)$	0.023	0.024	0.857	0.368
$\varphi_6(27.5)$	0.497	0.868	0.300	0.158
$\varphi_7(32.5)$	0.311	1.000	0.429	0.009
$\varphi_8(37.5)$	0.745	0.144	0.036	0.008
$\varphi_9(42.5)$	1.000	0.097	0.054	0.006
$\varphi_{10}(47.5)$	0.553	0.083	0.047	0.001

表 4 边坡坡度和高度与稳定性的模糊关系 $R_{\alpha,s}$

$\alpha(^{\circ})$	I (S_1)	II (S_2)	III (S_3)	IV (S_4)
$\alpha_1(5)$	0.278	0.136	0.023	0.005
$\alpha_2(15)$	1.000	0.620	0.152	0.042
$\alpha_3(25)$	0.278	1.000	0.660	0.091
$\alpha_4(35)$	0.0456	0.252	0.775	0.474
$\alpha_5(45)$	0.011	0.039	0.356	1.000
$\alpha_6(55)$	0.009	0.004	0.027	0.737
$\alpha_7(65)$	0.006	0.013	0.035	0.874

表 5 边坡坡度和高度与稳定性的模糊关系 $R_{h,s}$

H/m	I (S_1)	II (S_2)	III (S_3)	IV (S_4)
$h_1(5)$	1.000	1.000	1.000	0.452
$h_2(55)$	0.987	0.913	0.495	0.258
$h_3(105)$	0.484	0.864	0.901	0.500
$h_4(155)$	0.238	0.726	0.909	0.727
$h_5(205)$	0.268	0.283	0.959	0.620
$h_6(255)$	0.008	0.040	0.960	0.826
$h_7(305)$	0.005	0.064	0.260	0.994
$h_8(355)$	0.002	0.013	0.088	0.984
$h_9(405)$	0.000	0.009	0.041	1.000

1.2.2 24 h 降雨量强度 降水强度是指单位时间的降水量。通常以 mm/24 h, mm/h, mm/10 min 为单位, 还可根据应用部门的专门需要而定。本次选用 24 h 降雨强度(暴雨指标)作为影响边坡稳定性的其中一个因子, 进行边坡稳定性各级的隶属度 S_f 求解(表 6)。为方便起见, 该指标可不进行模糊近似推论, 具体可依据表 6 取值。

1.2.3 地震动参数 一般地震工程中仅考虑烈度为 VI, VII, VIII, IX, X 度的情况^[9], 其对应的地面运动最大加速度为 0.04, 0.125, 0.25, 0.40, 0.80 g, g 为重力

加速度(m/s^2)。同理, 按正态信息扩散法可求得 150 组原始资料的地面运动最大加速度值与边坡的模糊关系(如表 7 所示)。

表 6 边坡稳定性各级隶属度子集 S_f

雨量等级	降雨强度 [(mm · (24 h) ⁻¹)]	I (S_1) II (S_2) III (S_3) IV (S_4)			
		小雨	<10.0	1.0	0.5
中雨	10.0~24.9	1.0	0.6	0.2	0.0
大雨	25.0~49.9	0.6	1.0	0.4	0.0
暴雨	50.0~99.0	0.0	0.5	1.0	0.5
大暴雨	100.0~199.0	0.0	0.2	0.6	1.0
特大暴雨	≥ 200.0	0.0	0.1	0.5	1.0

表 7 地面运动最大加速度与边坡的模糊关系 $R_{a,s}$

A_{max}/g	I (S_1)	II (S_2)	III (S_3)	IV (S_4)
$a_1(0.04)$	1.000	1.000	0.411	0.102
$a_2(0.125)$	0.479	0.641	1.000	0.855
$a_3(0.250)$	0.216	0.470	1.000	1.000
$a_4(0.400)$	0.008	0.071	0.934	1.000
$a_5(0.800)$	0.001	0.052	0.063	1.000

1.2.4 边坡结构类型 边坡结构类型(见图 1)对边坡稳定性有极大的影响, 但该指标不能用一个量来表示, 只能采用专家打分给出稳定性各级的隶属度 S_l (表 8)。当然, 表 8 中所示的只是一些典型的边坡类型, 实用时可根据具体情况由专家评估出 S_l 。

表 8 边坡稳定性各级隶属度子集 S_l

结构类型	符号	I (S_1)	II (S_2)	III (S_3)	IV (S_4)
图 1a	t_1	1.00	0.60	0.10	0.00
图 1b	t_2	0.60	1.00	0.30	0.00
图 1c	t_3	0.10	0.30	1.00	0.60
图 1d	t_4	0.00	0.00	0.70	1.00

2 实例分析

山西中南部通道位于山西省吕梁市、临汾市境内, 线路自瓦唐向南至蒲县再向东跨越 3 个不同地貌单元, 该段黄土边坡地处黄土沟壑发育区, 多处沟谷呈“V”形谷。其中 DK29+860 处坡高 50.5 m, 坡度 45°, 坡向 184°, 线路开挖坡脚, 近垂直于坡向延伸。边坡从上而下依次出露新黄土、粉质黏土。新黄土为第四系上更新统风积黄土, 粉质黏土为第三系上新统黏土, 其剖面结构如图 2 所示。

综合野外调查、工程地质测绘及室内物理力学参数指标测试, 该边坡的影响因素如表 9 所示。

表 9 DK29+860 处边坡影响因素

C/kPa	$\Phi/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	H/m	F/mm	A_{max}/g	结构类型
24.8	24.3	28	50.5	500	0.05	a

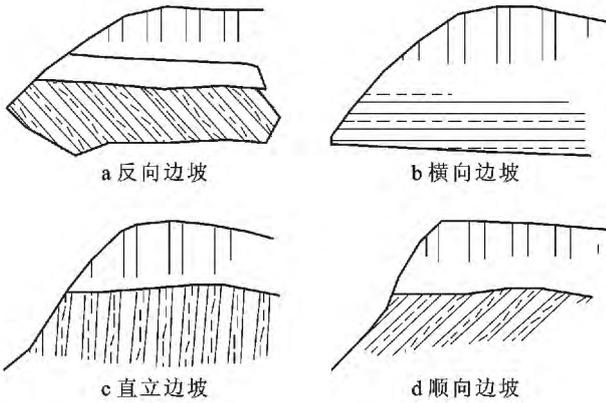


图 1 各种边坡结构类型

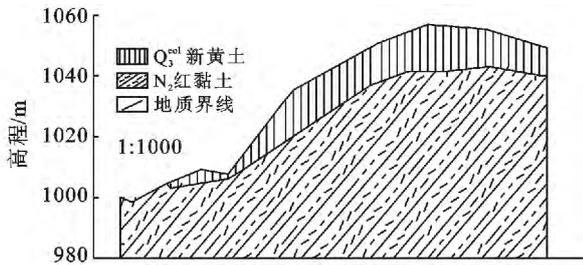


图 2 DK29+860 处工程地质剖面

先以 C 推论边坡稳定性各级的可能性分布,为了避免前人采用的专家打分的主观因素,参考文献[10]曾提出过如下公式:

当 $a_{min} < a < a_{max}$ 时,

$$A_i = [\max\{0, 1 - \frac{a - a_i}{\Delta}\}] \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: Δ ——步距,即 $\Delta = a_{i+1} - a_i$

从表 2 可知 $C \in (c_1, c_2)$,按(5)式计算可得:

$$C = [0.01 \quad 0.99 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

按模糊近似推论:

$$S_c = C \cdot R_{c,s} \quad (6)$$

式中:“ \cdot ”为组合运算,国内外研究认为最普通乘不会丢失信息。

故由(6)式得:

$$S_c = [0.01 \quad 0.99 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} 0.002 & 0.403 & 0.804 & 1.000 \\ 0.050 & 0.820 & 0.956 & 0.750 \\ 0.410 & 0.925 & 0.397 & 0.046 \\ 0.470 & 0.649 & 0.010 & 0.002 \\ 0.770 & 0.309 & 0.007 & 0.001 \\ 1.000 & 0.025 & 0.003 & 0.001 \end{bmatrix}$$

$$= [0.049 \ 5 \quad 0.815 \ 8 \quad 0.954 \ 5 \quad 0.752 \ 5]$$

同理,可得其他指标对边坡稳定性的各级可能性分布如下:

$$S_\phi = [0.003 \ 8 \quad 0.012 \ 0 \quad 0.063 \ 7 \quad 0.659 \ 1]$$

$$S_\alpha = [0.494 \ 6 \quad 0.281 \ 2 \quad 0.061 \ 7 \quad 0.016 \ 1]$$

$$S_H = [0.988 \ 2 \quad 0.920 \ 8 \quad 0.540 \ 4 \quad 0.275 \ 5]$$

$$S_F = [1.000 \ 0 \quad 0.600 \ 0 \quad 0.200 \ 0 \quad 0.000 \ 0]$$

$$S_A = [0.938 \ 7 \quad 0.957 \ 8 \quad 0.480 \ 3 \quad 0.190 \ 6]$$

$$S_t = [1.000 \ 0 \quad 0.600 \ 0 \quad 0.100 \ 0 \quad 0.000 \ 0]$$

以上是单因素评价边坡稳定性,为了综合考虑各种因素的影响,就必须进行二级模糊近似推论:

$$B^{[2]} = A^{[2]} \cdot R^{[2]} \quad (7)$$

式中: $A^{[2]}$ ——每个单子的权,可按灰色关联度求解^[11]; $R^{[2]}$ —— $S_c, S_\phi, S_\alpha, S_H, S_F, S_A, S_t$ 的组合,本例 $A^{[2]}, R^{[2]}$ 分别为:

$$A^{[2]} = [0.100 \quad 0.100 \quad 0.200 \quad 0.100 \quad 0.250 \quad 0.100 \quad 0.150]$$

$$R^{[2]} = \begin{bmatrix} S_c \\ S_\phi \\ S_\alpha \\ S_H \\ S_F \\ S_A \\ S_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.049 \ 5 & 0.815 \ 8 & 0.954 \ 5 & 0.752 \ 5 \\ 0.003 \ 8 & 0.012 \ 0 & 0.063 \ 7 & 0.659 \ 1 \\ 0.494 \ 6 & 0.281 \ 2 & 0.061 \ 7 & 0.016 \ 1 \\ 0.988 \ 2 & 0.920 \ 8 & 0.540 \ 4 & 0.275 \ 5 \\ 1.000 \ 0 & 0.600 \ 0 & 0.200 \ 0 & 0.000 \ 0 \\ 0.938 \ 7 & 0.957 \ 8 & 0.480 \ 3 & 0.190 \ 6 \\ 1.000 \ 0 & 0.600 \ 0 & 0.100 \ 0 & 0.000 \ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{故 } B^{[2]} = A^{[2]} \cdot R^{[2]}$$

$$= [0.696 \ 9 \quad 0.566 \ 9 \quad 0.281 \ 2 \quad 0.191 \ 0]$$

即求取到了综合因素下边坡稳定性各级隶属度大小。各级隶属度与边坡的关系如表 10 所示。

表 10 各级隶属度与边坡的关系

边坡类型	S_1	S_2	S_3	S_4
隶属度 $b_i(S_i)$	0.696 9	0.566 9	0.281 2	0.191 0

按信息集中原则求最终结果,将边坡稳定性各级的稳定程度范围表示如表 11 所示。

取每级的中间值为一个模糊子集即

$$\mu(S_i) \Big|_{\text{极度不稳定}} \triangleq \frac{0.175}{\text{稳定}} + \frac{0.505}{\text{次稳定}} + \frac{0.755}{\text{不稳定}} + \frac{0.930}{\text{极度不稳定}}$$

按照信息集中公式 $u = \sum_{i=1}^n b_i^k \mu_i / \sum_{i=1}^n b_i^k$

式中: u ——要求得变量的最终结果; u_i ——模糊近似推论求出的第 i 个元素的可能性分布; u_i —— i 等级变量的大小; k ——常数,视情况而定; n ——所分的等级数。将 μ_i 取为模糊子集 $\mu(S_i)$, k 取值 2, n 取值 4,则边坡总体的稳定性为:

表 11 边坡稳定性各级的稳定程度范围

边坡类型	S_1	S_2	S_3	S_4
不稳定程度范围 $\mu(S_i)$	(0, 0.35]	(0.35, 0.65]	(0.65, 0.85]	(0.85, 1]

$$S = \frac{\sum_{i=1}^4 b_i^2(S_i) \mu(S_i)}{\sum_{i=1}^4 b_i^2(S_i)} = 0.3695, 0.3695 \in (0.35, 0.65]$$

查表 11 可知该边坡处于次稳定状态。为了验证该结果的可靠性,根据边坡的实际情况,结合已有资料,使用岩土数值模拟软件 FLAC 建立二维静力分析模型。

该模型长 200 m,高 78 m,模型共 1 465 个节点,460 个单元,四周边界采用水平约束,底部选择全固定约束。断面计算所用材料参数是结合土工试验、地区经验及试算,综合选用参数见表 12。

表 12 土层物理、力学参数指标

土层名称	$P/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C/$ kPa	$\varphi/$ ($^\circ$)	$E/$ MPa	λ
新黄土	15.1	24.8	24.3	50.6	0.35
红黏土	19.5	34.7	22.6	67.4	0.38

对模型进行求解,得到天然工况下该边坡的最小稳定安全系数为 1.18,结合《铁路路基设计规范》(TB10001—99)和《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)边坡稳定安全系数的规定,该边坡处于基本稳定状态,与模糊综合评判结果次稳定一致。

3 结论

(1) 山西中南部通道 DK29+860 处沿线黄土边坡为例进行稳定性综合评价,得出该边坡处于稳定状态,使用 FLACR 数值模拟软件所得该边坡稳定系数为 1.18,说明该综合评判模型结论真实可靠。

(2) 信息扩散、二级模糊近似推论等方法用于黄土地区铁路沿线边坡稳定性综合评价是可行的,该方法的优势在于不需要确定滑动面,只全面考虑边坡稳定性的影响因素,能够简便、快捷、准确地评价边坡的稳定性。

(3) 由于铁路工程线路长、地质条件复杂、地质环境差异大,沿线边坡数量巨大,快速准确地评价这

些边坡的稳定性至关重要,本文研究方法对于判断黄土地区铁路沿线边坡稳定性、保障铁路工程的顺利建设及工后安全运营具有一定的参考价值。

[参 考 文 献]

- [1] 王家鼎,王靖泰,王念秦,等. 模糊信息分析法在兰州市边坡稳定性评价中的应用[J]. 甘肃科学学,1990,3(2): 59-66.
- [2] 王家鼎,冯学才,孟兴民. 黄土边坡稳定性的模糊信息分析法[J]. 山地研究,1991,9(1):33-40.
- [3] 陈晓利,祁生文,叶洪,等. 基于 GIS 的地震滑坡危险性的模糊综合评价研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,2008,44(3):434-438.
- [4] 谢全敏,李道明,陈立文,等. 滑坡灾害破坏损失综合评价模型及应用[J]. 武汉理工大学学报,2006,28(11):98-102.
- [5] 何书,王家鼎,王欢,等. 基于信息扩散和 BP 网络的黄土边坡稳定性分析[J]. 西北大学学报:自然科学版,2008,38(6):983-988.
- [6] Wang Jiading. Further study on fuzzy mathematical method in evaluation of seismic liquefaction[J]. International Symposium on Engineering Geology Problems in Seismic Areas, 1986(2):47-56.
- [7] 黄崇福,王家鼎. 模糊信息分析与应用[M]. 北京:北京师范大学出版社,1992.
- [8] 黄崇福,王家鼎. 模糊信息优化处理技术及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1995.
- [9] 王家鼎. 饱和土震动液化势影响因素的灰色理论分析[J]. 甘肃科学:甘肃科学院学报,1990,2(1):42-47.
- [10] Wang Jiading. The analysis of fuzzy information in soil dynamics problems [J]. Proceedings of International Symposium on Fuzzy Systems and Knowledge Engineering, 1987(3):753-760.
- [11] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉:华中科技大学出版社,1993.