

黄土地区高边坡稳定性模糊识别法理论与应用

王秀丽, 王艳红, 朱彦鹏

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 边坡稳定是土木工程中十分重要的问题, 而黄土地区的边坡稳定问题则具有更加明显的地域特点。结合黄土地区的实际工程问题和土质特点, 采用多级模糊模式识别方法进行黄土边坡稳定性的分析, 充分考虑多种因素的影响, 并针对湿陷性黄土边坡稳定分析中影响因素众多、而且具有不确定性的特点, 建立相应的判别准则, 计算中对于不同的影响因素赋予不同的权重系数, 编制了实用的计算程序, 应用于实际工程, 取得良好的经济效益。此外, 采用常规的极限平衡法进行对比计算, 计算结果表明采用多级模糊模式分析性黄土地区高边坡稳定性是合理的。理论分析与实践表明, 该方法能较全面考虑黄土地区边坡多参数的影响, 使分析结果更加可靠, 计算速度更加快捷, 可用于黄土地区的高边坡工程。

关键词: 土力学; 黄土地区高边坡; 稳定性; 隶属函数; 多级模糊识别

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 1 - 2868 - 07

THEORY AND APPLICATION OF FUZZY PATTERN RECOGNITION TO STABILITY OF LOESS SLOPE

WANG Xiuli, WANG Yanhong, ZHU Yanpeng

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Slope stability is a very important problem in civil engineering, especially for the loess slope because of its specific region characteristics. A new analysis method for slope stability is proposed using multilevel fuzzy pattern recognition to analyze loess slope stability. By considering adequately the characteristics of various influencing factors and uncertain properties in the analysis of the loess slope stability, many influence factors are taken into account. Based on the proposed method, a computer software is developed. For the convenience of data input, transfer, output and handling via graphical window interfaces, the object-oriented programming language is used. The proposed method is compared with the limit equilibrium method through an engineering case. The results illustrate that the method is more credible and the computing velocity is more rapid, and also indicate that the method of the multilevel fuzzy pattern recognition is suitable for the analysis of stability in loess slope.

Key words: soil mechanics; loess slope; stability; membership function; multilevel fuzzy pattern recognition

1 引言

边坡稳定问题在土木工程中一直是一个十分重

要的问题, 随着我国经济建设的飞速发展, 城市用地趋于紧张, 修建在边坡上的工程越来越多, 边坡稳定问题更显重要。目前, 常规的边坡稳定性分析方法大致可以分为两类, 即定性分析和定量分析方

收稿日期: 2005 - 11 - 22; **修回日期:** 2005 - 12 - 21

基金项目: 甘肃省自然科学基金计划项目(ZS032 - B25 - 021)

作者简介: 王秀丽(1963 -), 女, 1987 年于兰州理工大学结构工程专业获硕士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事结构工程和基础工程方面的教学与研究工作。E-mail: wangxl@lut.cn

式^[1, 2], 而黄土地区高边坡问题是一个受多因素影响、随时空变异的复杂动态系统, 相应的稳定性具有很大的不确定性与随意性, 因此对于湿陷性黄土边坡稳定性的分析和评价, 单纯依靠定性或定量方法都难以真正解决问题。近年来很多学者都将模糊数学理论引入到各种工程问题中^[3~6], 分别采用模糊综合评判方法和模糊极限平衡分析方法对此进行研究; 也有部分研究者采用改进后的 BP 神经网络进行黄土质边坡稳定性的分析, 能够满足一般工程实践中对黄土质边坡的稳定性进行快速准确判断的要求, 从而避免了边坡稳定性传统分析方法繁琐的计算, 具有一定的实用性^[7]。本文基于黄土地区的高边坡问题, 应用多级模糊模式识别模型评判黄土边坡的稳定性, 充分地考虑到黄土边坡问题的不确定性与随意性, 使评判结果更加合理。分析结果表明, 该方法能较全面地考虑黄土地区边坡多参数的影响, 使分析结果更加可靠, 计算速度更加快捷, 是一种适用于黄土地区高边坡稳定性分析的合理算法。

2 模糊模式识别的基本理论

模式识别问题是在已知各种类型的情况下, 识别给定的对象属于哪个类型。应用多级模糊模式识别理论模型求解模糊模式识别^[8]问题是: 已知若干个模式或标准样本, 识别与计算研究对象属于各个模式的相对隶属度, 计算相对状态(或级别)特征值, 识别判断研究对象属于哪一个模式或标准样本。

设有对一模糊概念进行识别的 n 个样本组成的集合, 有 m 个指标特征值表示样本的整体特征, 则样本集的指标特征值矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为样本 j 、指标 i 的特征值, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

如样本集依据 m 个指标按 c 个状态或级别的已知指标标准特征值进行识别, 则建立指标标准特征值矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1c} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: y_{ih} 为状态或级别 h 、指标 i 的标准特征值, $h = 1, 2, \dots, c$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

通常指标分递减型与递增型 2 类: 第 1 类是从 1 级至 c 级指标标准特征值减小, 第 2 类是从 1 级至 c 级指标标准特征值增加。不同类型指标的隶属函数是不一样的。对于递减型指标的隶属函数为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq y_{ic}) \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & (y_{i1} > x_{ij} > y_{ic}) \\ 1 & (x_{ij} \geq y_{i1}) \end{cases} \quad (3)$$

h 级指标标准特征值的隶属函数为

$$s_{ij} = \begin{cases} 0 & (y_{ih} = y_{ic}) \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & (y_{i1} > y_{ih} > y_{ic}) \\ 1 & (y_{i1} = y_{ic}) \end{cases} \quad (4)$$

而对于递增型指标(从 1 级至 c 级指标标准特征值增加)的隶属函数则为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \geq y_{ic}) \\ \frac{y_{ic} - x_{ij}}{y_{ic} - y_{i1}} & (y_{i1} < x_{ij} < y_{ic}) \\ 1 & (x_{ij} \leq y_{i1}) \end{cases} \quad (5)$$

h 级指标标准特征值对的隶属函数为

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & (y_{ih} = y_{ic}) \\ \frac{y_{ic} - y_{ih}}{y_{ic} - y_{i1}} & (y_{i1} < y_{ih} < y_{ic}) \\ 1 & (y_{i1} = y_{ic}) \end{cases} \quad (6)$$

利用重要性定性排序原理得到样本集的指标权向量 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$, 最后利用模糊模式识别模型:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & (h < a_j \text{ 或 } h > b_j) \\ \frac{1}{\left(\frac{\sum_{k=a_j}^{b_j} \left[\frac{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - s_{ih})]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - s_{ik})]^p} \right]^{\frac{2}{p}}}{d_{hj}} \right)^{\frac{2}{p}}} & (a_j \leq h \leq b_j, d_{hj} \neq 0) \\ 1 & (d_{hj} = 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: p 为距离参数, $p = 1$ 为海明距离, $p = 2$ 为欧氏距离。

相对隶属度分布列满足归一化条件:

$$\sum_{h=1}^c u_{hj} = 1 \quad (8)$$

以状态变量 h 为相对隶属度的权重, 总和为

$$H_j(u) = \sum_{h=1}^c u_{hj} h \tag{9}$$

由此来判别样本 j 对模糊概念的级别 h 的最优相对隶属度。

3 黄土地区高边坡稳定性分析模型

为了考虑黄土边坡的稳定性受多种因素的影响, 准确描述边坡的力学特征, 首先需要建立黄土地区高边坡稳定性分析模型。

3.1 确定因素集

在黄土边坡稳定计算中, 由于计算方法不同引起的计算结果偏差与参数选取不当引起的偏差相比要小得多, 因此正确地选取计算参数, 使计算结果符合实际, 就成为设计中最关心的问题。而要正确地选取计算参数, 必须把握各参数对计算结果影响的敏感性。湿陷性黄土边坡的稳定性受多种因素的影响, 必须考虑黄土地层的工程性质极其构造特征, 边坡的稳定性影响因素集 $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\}$, 7 个影响因素为: 坡高、边坡坡角 θ 、天然容重 γ 、土的内摩擦角 φ 、土的黏聚力 c 、地震(同表 2 中)烈度、孔隙水压力比(含水量)。

3.2 确定指标权向量

由于影响边坡稳定性因素的重要程度不一样, 所以要确定每一指标的权重。首先根据重要性定性排序原理, 不同指标之间作重要性二元比较, 以 f_{lk} 表示重要性定性排序标度。

若 $c_1 \sim c_7$ 比 c_l 重要, 取 $f_{kl} = 1, f_{lk} = 0$; 若 c_k 比 c_l 重要, 取 $f_{kl} = 0, f_{lk} = 1$; 若 c_k 与 c_l 同样重要, 取 $f_{kl} = 0.5, f_{lk} = 0.5(k = 1, 2, \dots, 7; l = 1, 2, \dots, 7)$ 。

由此可得

$$F = \begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 0.5 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

根据重要性的二元对比矩阵 F 可以得到 7 项指标的重要性排序依次为 $c_7, c_6, c_5, c_4, c_3, c_1, c_2$ 。运用经验知识, 以排序(1)的指标, 依次与排序序号(2), (3), (4), (5), (6), (7)的指标比较, 给出重要性程度的二元对比判断如下: c_7 比 c_6 “稍稍”重要, c_6 与 c_5 相比处于“同样”与“稍稍”重要之间, c_5

比 c_4 “稍稍”重要, c_4 与 c_3 相比处于“稍稍”与“略微”重要之间, c_3 与 c_2 相比处于“略微”与“较为”重要之间, c_2 比 c_1 “略微”重要。

根据表 1 得到项指标的非归一化权向量: $w = \{0.667, 0.600, 0.739, 0.818, 0.905, 0.818, 1.000\}$, 再转化为归一化指标权向量: $w = \{0.120, 0.108, 0.133, 0.147, 0.147, 0.165, 0.180\}$ 。

表 1 语气算子与定量标度相对隶属度关系

Table 1 Relationship between the mode operator and membership function

语气算子	定量标度		相对隶属度	
同样	0.50	0.525	1.000	0.905
稍稍	0.55	0.575	0.818	0.739
略微	0.60	0.625	0.667	0.600
较为	0.65	0.675	0.538	0.481
明显	0.70	0.725	0.429	0.379
显著	0.75	0.775	0.333	0.290
十分	0.80	0.825	0.250	0.212
非常	0.85	0.875	0.176	0.143
极其	0.90	0.925	0.111	0.081
极端	0.95	0.975	0.053	0.026
无可比拟	1.00	0.975	0.000	0.026

3.3 建立边坡稳定性评定分级标准

根据大量的黄土的物理力学特性资料^[9~13], 考虑到工程使用的可操作性, 将黄土边坡稳定性评价分为 5 个级别^[14, 15]: (1) 稳定, (2) 较稳定, (3) 一般, (4) 不稳定, (5) 极不稳定。表 2 所示为黄土边坡稳定性评定分级标准。

表 2 黄土边坡稳定性评定分级标准

Table 2 Classified standard for loess slope stability

评定级别指标	坡高 /m	边坡坡角 $\theta(^{\circ})$	天然容重 $\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	地震烈度/度	孔隙水压力比
稳定	<6	<15	>18	>35	>50	<3	<0.1
较稳定	6~12	15~25	17~18	30~35	40~50	3~5	0.1~0.2
一般	12~18	25~35	16~17	25~30	30~40	5~7	0.2~0.3
不稳定	18~24	35~45	15~16	20~25	20~30	7~8	0.3~0.4
极不稳定	>24	>45	<15	<20	<20	>8	>0.4

由表 2 可知相应指标的标准特征值矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} \text{稳定(1)} & 6 & 15 & 18.0 & 35.0 & 50 & 3.0 & 0.10 \\ \text{较稳定(2)} & 9 & 20 & 17.5 & 32.5 & 45 & 4.0 & 0.15 \\ \text{一般(3)} & 15 & 30 & 16.5 & 27.5 & 35 & 6.0 & 0.25 \\ \text{不稳定(4)} & 21 & 40 & 15.5 & 22.5 & 25 & 7.5 & 0.35 \\ \text{极不稳定(5)} & 24 & 45 & 15.0 & 20.0 & 20 & 8.0 & 0.40 \end{bmatrix}^T$$

这样，由样本指标可以组成样本集的指标特征值矩阵 X ，然后应用式(1)~(4)得到矩阵 R ， S ，再应用式(7)得到矩阵 U ，最后以状态变量为相对隶属度的权重，应用式(9)来判别样本 j 对模糊概念的级别 h 的最优相对隶属度。

4 工程实例应用及对比分析

4.1 实例 1

该工程为一自然湿陷性黄土边坡，位于甘肃省兰州市七里河区近郊。该边坡高约 15 m，坡角约为 80°。边坡坡顶为一坪地，距下一台阶的距离大于 50 m，表面覆盖有少量草皮，而地下水位较深，常年地下水位低于 100 m，因此在计算时孔隙水压力比可忽略不计。在该边坡下拟修建一公路，因此必须查明该边坡的稳定性，为实际工程参考。该边坡的断面简化形式如图 1 所示。为了确定相关参数指标，作者在边坡的不同水平位置、不同高度共取 6 处原状土。土的特征参数试验结果如表 3~5 所示。

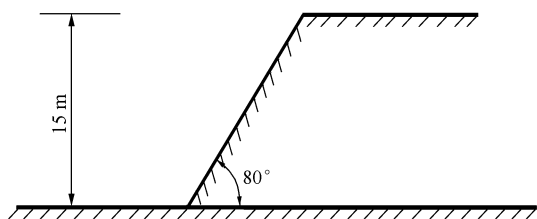


图 1 实例 1 边坡断面图

Fig.1 Cross section of slope in case 1

表 3 含水量试验结果

Table 3 Experimental results of water content

盒号	盒质量 /g	盒+湿土质量/g	盒+干土质量/g	水分质量 /g	干土质量 /g	含水量 /%	平均含水量 /%
1	11.9	18.3	18.2	0.1	6.25	1.60	3.5
2	12.1	22.1	21.9	0.2	9.89	2.02	
3	11.8	22.2	22.0	0.2	10.2	1.96	
4	12.1	18.8	18.4	0.4	6.40	6.25	
5	12.5	18.8	18.5	0.3	5.98	5.02	
6	12.4	14.9	14.8	0.1	2.40	4.17	

根据表 3~5 的试验结果，做抗剪强度与垂直压力的关系图，即可得到土的抗剪强度指标，内摩擦

表 4 密度试验结果

Table 4 Experimental results of density

土样编号	环刀号	环刀容积 /cm ³	环刀质量/g	土+环刀质量/g	土样质量/g	天然密度 /(kg·m ⁻³)	平均天然密度 /(kg·m ⁻³)
1	1	60	37.08	119.9	82.82	1.380	1.37
	2	60	38.00	118.9	80.90	1.348	
2	3	60	38.09	120.5	82.41	1.374	
	4	60	38.08	120.3	82.22	1.370	
3	5	60	38.08	120.4	82.32	1.372	
	6	60	37.08	118.4	81.32	1.355	

表 5 快剪试验结果

Table 5 Experimental results of shear strength

土样编号	垂直压力 150 kPa		垂直压力 250 kPa		垂直压力 350 kPa		垂直压力 450 kPa	
	百分表读数/%	抗剪强度/kPa	百分表读数/%	抗剪强度/kPa	百分表读数/%	抗剪强度/kPa	百分表读数/%	抗剪强度/kPa
1	60	139	89	199	75	174	110	246
2	43	99.8	60	134	105	244	120	269

角 $\varphi=30^\circ$ ，黏聚力 $c=30$ kPa。根据以上试验结果采用多级模糊模式识别方法进行分析如下：利用上述 7 个指标特征值表示样本的整体特征，组成了样本集的指标特征值矩阵：

$$X = \begin{Bmatrix} 15.0 \\ 80.0 \\ 13.7 \\ 30.0 \\ 30.0 \\ 8.0 \\ 0.0 \end{Bmatrix}$$

先将矩阵 X ， Y 转换为相应的相对隶属度矩阵，应用式(1)~(4)得

$$S = \begin{Bmatrix} 1 & 0.833 & 3 & 0.5 & 0.166 & 7 & 0 \\ 1 & 0.833 & 3 & 0.5 & 0.166 & 7 & 0 \\ 1 & 0.833 & 3 & 0.5 & 0.166 & 7 & 0 \\ 1 & 0.833 & 3 & 0.5 & 0.166 & 7 & 0 \\ 1 & 0.833 & 3 & 0.5 & 0.166 & 7 & 0 \\ 1 & 0.800 & 0 & 0.4 & 0.100 & 0 & 0 \\ 1 & 0.833 & 3 & 0.5 & 0.166 & 7 & 0 \end{Bmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} 0.500 & 0 \\ 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 \\ 0.666 & 7 \\ 0.333 & 3 \\ 0.000 & 0 \\ 1.000 & 0 \end{pmatrix}$$

求解黄土边坡对各个级别的相对优属度，应用多级模糊模式识别理论模型(式(7))，得

$$U = \begin{pmatrix} 0.075 & 3 \\ 0.121 & 1 \\ 0.301 & 7 \\ 0.260 & 0 \\ 0.204 & 1 \end{pmatrix}$$

再利用式(9)，最后得到： $H = hU = 3.28$ 。由此可以判别此边坡处于一般稳定与较稳定之间。

为了检验计算结果的正确性，又采用了传统的极限平衡法进行计算。根据边坡形状，画出边坡的断面图，如图 2 所示。输入计算数据，建立数据文件，运行 Bishop 计算程序可以得到结果：滑动圆心位置： $x_c = 38.63 \text{ m}$ ， $y_c = 129.53 \text{ m}$ ，滑动半径 $R = 20.38 \text{ m}$ ，安全系数 $K_s = 1.21$ 。说明边坡处于安全状态。

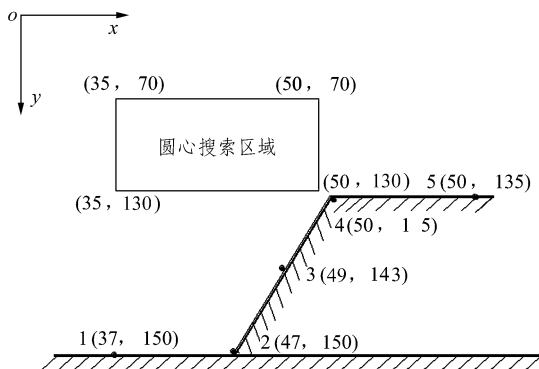


图 2 实例 1 极限平衡法计算图(单位: m)

Fig.2 Schematic diagram of limit equilibrium method in case 1(unit: m)

由计算结果可知，传统的极限平衡法计算所得的安全系数为 1.21，边坡处于安全状态。极限平衡法经过了大量实践工程的检验，方法比较可靠，也是实践中常用的方法。多级模糊模式识别方法是一种考虑影响因素较全面的方法，应用黄土大量物理

力学指标进行稳定等级分类，输入样本的物理力学指标，进行综合计算，最后确定边坡的稳定状态。此例计算结果 $H = 3.28$ ，说明边坡处于一般稳定与较稳定之间。两者的评判结果吻合，表明多级模糊模式识别方法是可靠和实用的。此边坡经过将近 1 a 的实际观测，一直处于安全状态，并且经过几次大雨的冲击，依然稳定，没有发生较大的变形。边坡的实际状态与计算结果十分吻合。

4.2 实例 2

兰州理工大学 16# 学生公寓拟修建在黄土边坡附近，该边坡最大高度高约 40 m，平均坡角 70° ，在整个边坡高度范围内有一条宽约 1 m 的小路，是相邻工厂工人上下班的通道，沟底部位市政排洪沟道。边坡的简化断面形式如图 3 所示。土质特征参数试验结果为：平均含水量为 8.7%，平均天然容重为 13.708 kN/m^3 ，黏聚力 $c = 26.2 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 35.4^\circ$ 。

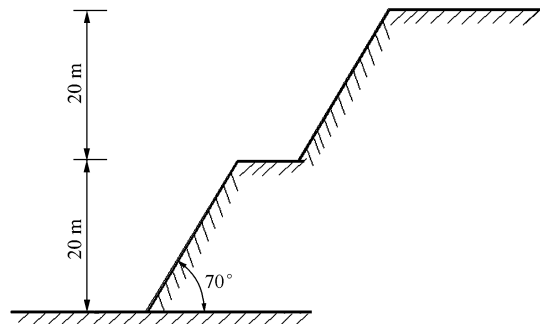


图 3 实例 2 边坡断面图

Fig.3 Cross section of slope in case 2

对于该边坡分别采用多级模糊模式识别与极限平衡分析方法计算分析，结果如下：

样本有上述 7 个指标特征值表示样本的整体特征，组成了样本集的指标特征值矩阵：

$$X = \begin{pmatrix} 40.000 \\ 70.000 \\ 13.708 \\ 35.400 \\ 26.200 \\ 8.000 \\ 0.000 \end{pmatrix}$$

首先将矩阵 X ， Y 转换为相应的相对隶属度矩阵，应用式(1)~(4)，得

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0.8333 & 0.5 & 0.1667 & 0 \\ 1 & 0.8333 & 0.5 & 0.1667 & 0 \\ 1 & 0.8333 & 0.5 & 0.1667 & 0 \\ 1 & 0.8333 & 0.5 & 0.1667 & 0 \\ 1 & 0.8333 & 0.5 & 0.1667 & 0 \\ 1 & 0.8000 & 0.4 & 0.1000 & 0 \\ 1 & 0.8333 & 0.5 & 0.1667 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 1.0000 \\ 0.2067 \\ 0.0000 \\ 1.0000 \end{bmatrix}$$

求解黄土边坡对各个级别的相对优属度，应用多级模糊模式识别理论模型(式(7))，得

$$U = \begin{bmatrix} 0.1030 \\ 0.1154 \\ 0.1880 \\ 0.3057 \\ 0.3209 \end{bmatrix}$$

再利用式(9)，得到 $H = hU = 3.73$ ，说明边坡处于一般与较不稳定之间。

极限平衡分析方法的计算图形参照图 4，运行 Bishop 计算程序可以得到滑动圆心位置 $x_c = 27.5$ m， $y_c = 57.5$ m，滑动半径 $R = 43.5$ m，安全系数 $K_s = 0.8514$ ，边坡处于不稳定状态。

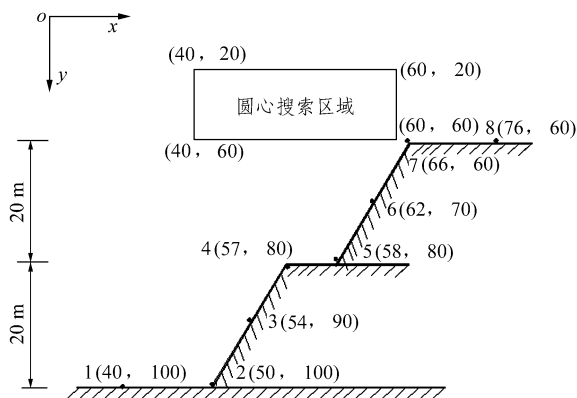


图 4 实例 2 极限平衡法计算图(单位: m)

Fig.4 Schematic diagram of limit equilibrium method in case 2(unit: m)

从以上两种方法的计算结果可以看出，两种方法的计算结果所得的边坡稳定状态的结论较为一致。此边坡较高，约 40 m，是相邻工厂工人上下班的必经之路。据现场观测，边坡上部经常有土块掉下。此外试验中在取土样时，也发现部分地段土质较疏松，局部也有含水量较高的现象，取土比较困难，上部土体时有脱落下滚现象，比较危险。从边坡的实际状态可以看出，边坡处于较不稳定状态，与理论计算结果一致。本工程实际做法中，在较长范围内按照地形做了扶臂式挡土墙，并兼作建筑物的地下室，既对边坡土体进行加固，也保证了建筑空间的合理利用，在无建筑物的范围作了土钉墙支护设计^[16]。

5 结 论

据本文的研究与分析，可得到一些结论及建议，供进一步研究和工程设计参考。

多级模糊识别模型在黄土地区高边坡的稳定性分析可以用于黄土边坡稳定性的初步评判。

该方法可以充分考虑影响黄土边坡稳定性的多种影响因素，并且考虑了黄土边坡稳定性的不确定性。

工程实例证明了该方法较为合理，与实际情况较符合。

对于边坡建筑设计时除应考虑建筑物自身的强度、刚度和耐久性外，还必须考虑建筑物所处边坡的稳定问题和建筑物自身的整体稳定问题。

进一步的分析还应考虑受力边坡稳定问题，计算中考虑可能出现的各种荷载工况以及地震区边坡时地震作用对边坡稳定的影响。

参考文献(References):

[1] 黄昌乾, 丁恩保. 边坡工程常用稳定性分析方法[J]. 水电站设计, 15(1): 53 - 58.(Huang Changqian, Ding Enbao. Common analysis method of slope engineering[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 15(1): 53 - 58.(in Chinese))

[2] 李 靖, 周欣华, 党进谦. 黄土边坡稳定性图解法[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 40 - 43.(Li Jing, Zhou Xinhua, Dang Jinqian. Graphic method for the stability of loess slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 40 - 43.(in Chinese))

[3] 王元汉, 刘端伶. 边坡稳定性的 fuzzy 综合评判法[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(增 1): 96 - 98.(Wang Yuanhan, Liu Duanling. Comprehensive fuzzy evaluation method for the stability of slope[J].

- Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1998, 26(Supp.): 96 - 98.(in Chinese)
- [4] 刘伟庆, 徐敬海, 邓民宪. 震害影响因子的多级模糊综合评判研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 123 - 127.(Liu Weiqing, Xu Jinghai, Deng Minxian. Multi-level fuzzy comprehensive evaluation research on seismic disaster influence factor[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(2): 123 - 127.(in Chinese))
- [5] 廖瑛, 夏海力. 层次分析、模糊综合评判法在深基坑支护方案优选中的应用[J]. 工业建筑, 2004, 34(9): 26 - 35.(Liao Ying, Xia Haili. Application of AHP method and fuzzy complex evaluation method to optimizing analysis of bracing system for deep excavation[J]. Industrial Construction, 2004, 34(9): 26 - 35.(in Chinese))
- [6] 赵明华, 程 晔, 曹文贵. 桥梁基桩桩端溶洞顶板稳定性的模糊分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1 376 - 1 383.(Zhao Minghua, Cheng Ye, Cao Wengui. Fuzzy method for the stability analysis of cave roof under pile tip in karst region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1 376 - 1 383.(in Chinese))
- [7] 李喜安, 彭建兵. 用改进后的 BP 神经网络评价黄土质边坡稳定性[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(4): 56 - 59.(Li Xi'an, Peng Jianbing. Estimation of loess slope stability with improved BP neural network[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, 13(4): 56 - 59.(in Chinese))
- [8] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.(Cheng Shouyu. Engineering Fuzzy Set Theory and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.(in Chinese))
- [9] 王永焱, 林在贵. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 105 - 171.(Wang Yongyan, Lin Zaigui. China Structural Characteristics of Loess and Physical-mechanical Property[M]. Beijing: Science Press, 1990. 105 - 171.(in Chinese))
- [10] 孙广忠. 西北黄土的工程地质力学特性及地质工程问题研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1989.(Sun Guangzhong. Research of Engineering Geological Mechanical Property and Geological Engineering Problem on Northwest Loess[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1989.(in Chinese))
- [11] 文宝萍, 李 媛, 王兴林. 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究[M]. 北京: 地质出版社, 1997.(Wen Baoping, Li Yuan, Wang Xinglin. Research on Prediction and Reducing Countermeasure of Disaster for Typical Landslide on Loess Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.(in Chinese))
- [12] 朱彦鹏, 王秀丽, 于 劲, 等. 悬臂式支护桩内力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 236 - 239.(Zhu Yanpeng, Wang Xiuli, Yu Jin, et al. Experimental investigation for the internal force of cantilever supporting piles in excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 236 - 239.(in Chinese))
- [13] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.(Compile Committee of Manual for Foundation Treatment. Manual for Foundation Treatment(Second Edition)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. 建筑边坡工程技术规范(GB50330 - 2002)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical Code for Building Slope Engineering(GB50330 - 2002)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [15] 朱彦鹏, 王秀丽, 张贵文, 等. 兰州中广大厦超长深基坑支护的设计、施工与试验监测[J]. 工程力学, 2003, 20(增): 336 - 341.(Zhu Yanpeng, Wang Xiuli, Zhang Guiwen, et al. Design, construction and experimental monitoring of lengthy deep foundation in Zhongguang highrise building of Lanzhou[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(Supp.): 336 - 341.(in Chinese))
- [16] Zhu Y P, Wang X L. Anti-slide design of foundations for buildings on loess slope[A]. In: Advances in Mechanics of Structures and Materials[C]. Golden Coast: [s. n.], 2002. 50 - 55.