

文章编号: 0451-0712(2006)01-0050-03

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

# 岩质路堑边坡最大稳定开挖坡角分析方法

孙锡民<sup>1,2</sup>, 夏元友<sup>1</sup>, 蒋超<sup>1</sup>, 卢小超<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院 武汉市 430070; 2. 云南祥临公路建设指挥部 弥渡县 675600)

**摘要:** 以云南省祥临公路路堑边坡为背景,建立了基于BP神经网络的含软弱面岩质路堑边坡最大稳定开挖坡角的计算方法,确定了影响稳定开挖坡角的因素。根据祥临公路路堑边坡具体参数分布情况,通过正交方法设计了边坡案例,建立了计算最大稳定开挖坡角的人工神经网络模型;最后通过实例分析,证明这种计算模型作为一种计算边坡最大稳定开挖坡角简便途径的有效性和实用性。

**关键词:** 公路边坡; 最大稳定开挖坡角; 神经网络

岩质边坡的稳定性主要受其内部软弱面的控制,对于具有顺层软弱面的边坡,其滑动面主要位于软弱结构面上<sup>[1,2]</sup>。在公路工程设计中,对此类具有软弱结构面边坡的设计,往往没有引起足够的重视,普遍采用的方法是结合该路段的地质情况,根据经验或者规范,参照其他同类边坡的坡比进行放坡,而没有进行必要的稳定性计算分析。由于各个边坡特征的独特性,必然导致通过类比、经验进行设计的不准确性,从而影响在建设过程中边坡的稳定。而对于此类边坡最大稳定开挖坡角的分析,无疑对公路工程路堑边坡设计具有重要指导意义。本文基于祥临公路路堑边坡实际情况,基于人工神经网络的非线性映射功能以及正交试验方法,给出计算此类边坡的最大稳定开挖坡角的一种可行简易的途径。

## 1 含软弱面岩质边坡稳定开挖坡角的影响因素分析

含软弱面岩质边坡的最大稳定开挖坡角,是指边坡在不做任何加固措施条件下能保持稳定的最大坡角。滑面假定由3段折线组成<sup>[2]</sup>,主滑动面位于岩体的软弱面上。

考虑到边坡模型的普遍适用性,模型示意如图1所示。根据边坡稳定性极限平衡分析方法,影响岩质边坡稳定开挖坡角的因素主要有:自然坡高 $h$ ,自然坡角 $\beta$ ,软弱面与水平面的夹角 $\sigma$ ,软弱面与路基平面的交点到路面边缘的距离 $L$ (交点在路面上则 $L$ 取正值,反之取负);模型中软弱面上覆岩土

的粘聚力 $c_0$ ,内摩擦角 $\varphi_0$ ,重度 $\gamma$ ;滑带土的粘聚力 $c$ ,内摩擦角 $\varphi$ 。

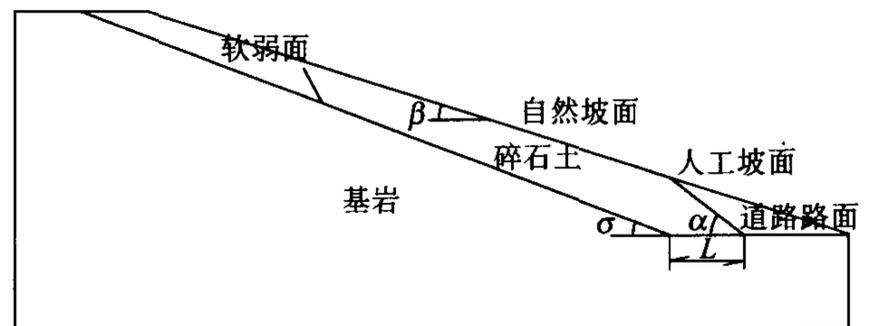


图1 含软弱面的岩质边坡模型

## 2 祥临公路岩质边坡最大稳定开挖坡角神经网络模型的建立

祥临公路全长140.2 km,沿线工程地质条件复杂,岩体风化严重,岩土性质差,易滑地层分布广,一期工程中发现中大型滑坡已达52处之多,且滑动面大多由岩体的软弱面发展而成,岩性为石英片岩的含碎石粉质粘土。根据重新勘查发现,采用类比法得到的开挖坡角过大是造成滑动的主要原因之一。

### 2.1 祥临公路边坡稳定开挖坡角案例构造

根据对文献[3]资料的统计分析,确定构造案例参数的取值范围。岩性为石英片岩的含碎石粉质粘土滑带土的抗剪强度指标( $c, \varphi$ )的建议取值范围分别为18.203~23.289kPa和17.172°~23.372°,滑体重度 $\gamma$ 取20 kN/m<sup>3</sup>,自然坡角范围为25°~38°,软弱面的控制参数( $\sigma, L$ )范围分别为20°~43°和-10~

10 m。为了减少试验次数又能够代表整体性质,采用正交设计法<sup>[4]</sup>,水平数取5个。因该公路边坡安全系数设计标准为1.05,边坡软弱面以上岩土层一般为含碎石粉质粘土,抗剪强度指标 $c_0$ 取25 kPa, $\varphi_0$ 取25°, $\gamma$ 取20 kN/m<sup>3</sup>。故可取因子数为5个(因子位级见表1),选择正交表 $L_{25}(5^6)$ 。

表1 因子位级变化

位级	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$	$\sigma/(\text{°})$	$L/\text{m}$
1	18.203	17.172	25.000	20.000	-10.000
2	19.475	18.722	28.250	25.750	-5.000
3	20.747	20.272	31.500	31.500	0.000
4	22.018	21.822	34.750	37.250	5.000
5	23.289	23.372	38.000	43.000	20.000

依据正交设计表,设计构造案例边坡具体参数值如表2所列(参数值只包括5个变量,重度 $\gamma$ 、安全系数设计标准 $F$ 、滑坡体力学参数 $c_0$ 和 $\varphi_0$ 等4个不变量未列入)。

表2 正交试验方案边坡案例结果

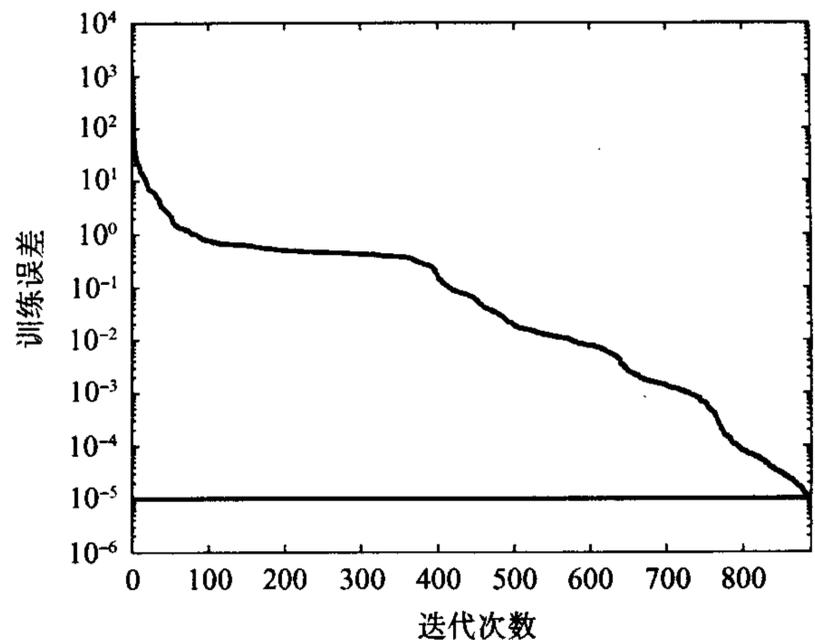
位级	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$	$\sigma/(\text{°})$	$L/\text{m}$	$\alpha/(\text{°})$
1	18.20	17.17	28.25	37.25	0.00	38.75
2	19.48	17.17	38.00	43.00	10.00	48.97
3	20.75	17.17	34.75	20.00	5.00	35.28
4	22.02	17.17	25.00	31.50	-10.00	27.48
5	23.29	17.17	31.50	25.75	-5.00	32.36
6	18.20	18.72	31.50	31.50	5.00	33.48
7	19.48	18.72	28.25	25.75	-10.00	27.86
8	20.75	18.72	38.00	37.25	-5.00	39.20
9	22.02	18.72	34.75	43.00	0.00	47.43
10	23.29	18.72	25.00	20.00	10.00	28.36
11	18.20	20.27	25.00	43.00	-5.00	36.78
12	19.48	20.27	31.50	20.00	0.00	33.40
13	20.75	20.27	28.25	31.50	10.00	45.14
14	22.02	20.27	38.00	25.75	5.00	39.86
15	23.29	20.27	34.75	37.25	-10.00	32.54
16	18.20	21.82	34.75	25.75	10.00	30.76
17	19.48	21.82	25.00	37.25	5.00	52.01
18	20.75	21.82	31.50	43.00	-10.00	32.36
19	22.02	21.82	28.25	20.00	-5.00	27.04
20	23.29	21.82	38.00	31.50	0.00	40.33
21	18.20	23.37	38.00	20.00	-10.00	35.02
22	19.48	23.37	34.75	31.50	-5.00	36.46
23	20.75	23.37	25.00	25.75	0.00	38.39
24	22.02	23.37	31.50	37.25	10.00	48.36
25	23.29	23.37	28.25	43.00	5.00	51.76

取地震烈度为Ⅷ度,采用Spence法进行极限平衡计算(搜索最危险滑动面),经过迭代求解,得到1.05的安全系数对应的构造案例的最大稳定开挖

坡角 $\alpha$ 见表2。

## 2.2 神经网络模型建立

BP神经网络(Back Propagation),又称误差反向传播多层前馈神经网络,是目前应用最广泛也是发展最成熟的一种神经网络模型。它是一单向传播的多层前向网络,网络除输入输出节点外,有一层或多层的隐含层节点,同层节点中没有任何耦合。输入信号从输入层节点,依次传过各隐含层节点,然后传到输出节点,每一层节点的输出只影响下一层节点的输出。节点的激活函数必须是可微、非减的,通常取为S型函数。具体计算方法参考相关文献<sup>[5,6]</sup>。根据实际预测效果的分析,本模型采用了含有1个隐含层、7个隐结点的BP神经网络结构作为预测模型;采用归一化处理<sup>[7,8]</sup>进行数据预处理;将表2的1~22组中前5个参数作为输入数据, $\alpha$ 作为输出数据构建BP神经网络模型。神经网络模型的输入层为5个输入结点的linear函数,隐含层分别为7个隐结点的tansig函数,输出层为1个输出结点的purelin函数。在设定学习速率为0.01后,利用22个样本点进行训练,迭代888次后得到的误差效果达到目标值(训练误差如图2所示)。



注:迭代888次后的训练误差为 $9.30166 \times 10^{-6}$ ,误差目标值为 $1.0 \times 10^{-5}$ 。

图2 神经网络学习误差示意

用训练好的神经网络对位级为5、12、16以及23~25号共6个样本进行计算,得到的结果如表3所列。由表3中结果对比可知,神经网络预测模型的推广性和记忆性都很好。

显然,通过上述样本的学习,神经网络中已经储存了样本所包含的内在非线性映射关系,且已经确定了各输入、输出层间的权重和阈值,可以直接用于最大稳定开挖坡角的计算。

表 3 样本计算值与实际值对照

样本号	预测值	实际值	样本号	预测值	实际值
5	32.359 1	32.36	23	38.387 8	38.39
12	33.399 2	33.4	24	49.353 9	49.36
16	30.765 7	30.76	25	51.759 8	51.76

### 3 公路边坡实例应用分析

祥临公路 K212+440~K212+594 路段边坡, 位于头道水河左岸山坡线, 穿越古滑坡前缘, 已经过挖方、削坡和填方等施工。左侧人工边坡为 2 台 3 坡, 平均坡高为 30 m, 坡比为 1:0.75~1:1, 平均开挖坡角为 48°。该边坡内部发育一结构面, 结构面以上岩土层为含碎石粉质粘土, 抗剪强度指标  $c_0$  取为 25 kPa,  $\varphi_0$  取为 25°,  $\gamma$  取为 20 kN/m<sup>3</sup>; 结构面以下基岩由全~强风化澜沧群片岩构成, 节理裂隙发育, 岩石破碎。结构面处  $c$  取为 21.02 kPa,  $\varphi$  取为 20°, 自然坡角为 27°; 软弱面控制参数  $\sigma$  为 34°,  $L$  为 8 m。

边坡数据作为输入参数, 带入已得网络, 可得相对应的输出值 41.6°, 即为所求的祥临公路 K212+440~K212+594 路段高边坡所要得到的最大稳定开挖坡角。

由于预测得到的最大稳定开挖坡角(41.6°)远小于该边坡的实际开挖坡角(48°), 故理论上该边坡采用 48°的开挖坡角是不稳定的, 这与该边坡在 2002 年 10 月发生滑动变形的实际情况相一致, 而这种一致性也说明了对这类边坡的最大稳定开挖坡角的分

析结果是有效和可信的。

### 4 结论

在假定滑动面为 3 段直线的情况下, 建立了含软弱面岩质边坡的最大稳定开挖坡角计算模型, 分析了其影响因素。基于祥临公路路堑边坡地质条件与设计的几何参数, 应用正交设计方法, 构造了边坡稳定开挖坡角案例集, 进而建立了最大稳定开挖坡角计算的神经网络模型。通过对祥临公路边坡实例的分析, 说明运用上述网络模型的可行性。

### 参考文献:

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 李永政, 宋福玉. 云南省祥临公路滑坡工程地质勘察报告[R]. 2002.
- [4] 马希文. 正交设计的数学理论[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [5] 周志华, 曹存根. 神经网络及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 楼顺天, 施阳. 基于 MATLAB 的系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [7] 戴文站. 基于三层 BP 网络的多指标综合评估方法及应用[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(5).
- [8] 夏元友, 熊海丰. 边坡稳定性影响因素敏感性人工神经网络分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16).

## Analysis Method of Maximum Stable Excavation Angle of Rock Slopes

SUN Xi-min<sup>1,2</sup>, XIA Yuan-you<sup>1</sup>, JIANG Chao<sup>1</sup>, LU Xiao-chao<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Xianglin Road Construction Administrative Headquarter of Yunnan Province, Midu 675600, China)

**Abstract:** In this paper, a design method based on the Back Propagation artificial neural network (ANN) is established, which is used in the experience of the slopes of Xianglin road. The optimum stable excavation angle of a slope containing weak surfaces can be calculated with the method. The factors which influence the stable excavation angle of the rock slopes are worked out. The examples of the slopes are designed through orthogonal design way based on the parameter distribution of the slopes of Xianglin road. An ANN model used to calculate the optimum stable excavation angle of slopes is established. Last, efficiency and practicability of using the ANN model as a convenient way to calculate the maximum stable excavation angle is proved through the analysis of the examples of the road.

**Key words:** highway slope; maximum stable excavation angle; ANN