

# 膨胀土边坡稳定性参数影响分析

王星运<sup>1</sup>，陈善雄<sup>2</sup>，梅涛<sup>1</sup>，樊炼<sup>1</sup>

(1.湖北省电力勘测设计院，武汉，430024；2.中国科学院武汉岩土力学研究所，武汉，430071)

**摘要：**膨胀土边坡稳定性控制是工程建设的一大难题。针对膨胀土边坡的稳定性进行探讨，把膨胀土边坡失稳模式总结为浅层平面破坏和整体圆弧破坏，将膨胀土边坡分为风化层和未风化层进行稳定性分析，并给出了膨胀土边坡计算的参数选取方法；根据某工程实例，运用了整体稳定性分析和浅层平面分析法探讨了中膨胀土、弱膨胀土边坡受坡高、坡比及风化层厚度影响时的稳定性，并对两种破坏模式进行对比分析；研究表明：坡比及风化层厚度对膨胀土边坡的影响较为明显，且边坡存在一稳定比，本工程大气影响深度为1.5~2m，则中膨胀土边坡稳定坡比为1:2.0~1:2.5，弱膨胀土边坡为1:1.5；膨胀土边坡破坏主要表现为浅层破坏膨胀土边坡，稳定性受浅层破坏模式控制。

**关键词：**膨胀土边坡；稳定性分析；失稳模式；浅层平面破坏；整体圆弧破坏

## 0 前言

膨胀土富含蒙脱石和伊利石，是一种吸水膨胀软化、失水收缩开裂的特殊性土。由于其胀缩性，膨胀土边坡在大气和降水作用下经历干湿循环，土体的强度逐渐折减，在水压力、膨胀力、重力等的作用下，容易引发边坡的破坏。因此，膨胀土边坡的稳定性问题成为工程建设的研究重点。

目前，膨胀土地区的边坡稳定性研究已经取得了许多成果<sup>[1-7]</sup>，但文献中针对不同坡比、坡高、风化层厚度，膨胀土边坡稳定性的系统探讨不多，本文主要针对中膨胀土、弱膨胀土在不同坡高、坡比和不同的风化层厚度情况下，探讨安全系数的变化规律，同时对比整体破坏模式和浅层平面模式，找出适合于膨胀土边坡的破坏模型，为工程建设中的膨胀土边坡问题提供参考。

## 1 膨胀土边坡稳定性分析理论

极限平衡法是边坡稳定性分析常用的方法。极限平衡法应用力平衡和力矩平衡的平衡方程，经推导出安全系数或极限荷载的表达式，再对这个含有待定参数的表达式进行相应的求解，最终可得到安全系数。极限平衡法主要包括瑞典圆弧滑动法、Janbu法、spencer法以及Bishop法<sup>[8]</sup>等；本文主要以Janbu法为例进行计算分析。

### 1.1 膨胀土边坡破坏模式分析

膨胀土的胀缩性、多裂隙性及风化特性是引起膨胀土边坡失稳的内在因素，而气候作用、雨水入渗与蒸发则是促使膨胀土边坡失稳的外在因素。经过气候变化和风化作用后，由于湿胀干缩的反复作用，表层中产生了很多裂隙，雨水入渗使土块膨胀、崩解、软化，最终导致沿着软化层的底部发生浅层溜滑；当填土长期沉陷，边坡吸水膨胀，软弱夹层的存在和地表水的下渗就会引起边坡的整体滑移；大量的工程实践经验表明，膨胀土边坡的破坏主要表现为表层坍滑和整体坍滑；因此，可将膨胀土边坡的破坏模式分为浅层平面破坏和整体圆弧破坏，如图1、图2所示。

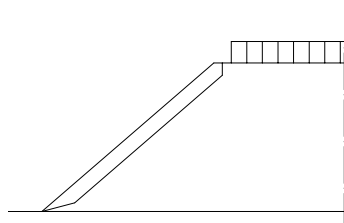


图1 浅层平面破坏模式

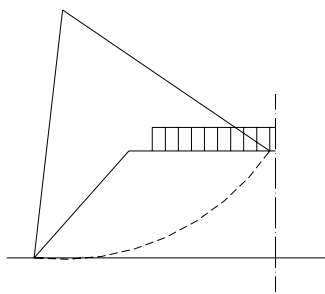


图 2 整体圆弧破坏模式

### 1.2 膨胀土边坡计算参数选取

针对膨胀土边坡变形和破坏的特点，对于膨胀土边坡稳定性分析，本文建议采用分层处理的方法，即是将膨胀土边坡分为风化层和未风化层，风化层厚度按大气影响深度确定，参照《膨胀土地区建筑技术规范》的定义，本文大气影响深度指自然气候条件下，由降水、蒸发、地温等因素引起土的升降变形的有效深度，其强度值选用残余强度值，然后用极限平衡法进行边坡稳定性分析。

对于气候影响深度范围内的抗剪强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值，经过现场对原状土取样，主要采取直接快剪法试验，得到该地区土体的强度指标值，详见表 1 所示。

膨胀土边坡稳定性分析计算参数 表 1

土质	部位	重度(kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\varphi$ (°)
弱膨胀土	风化层	19.1	13.68	20.0
	未风化层	19.1	59.5	26.5
中膨胀土	风化层	20.0	8.9	13.7
	未风化层	20.0	31.7	35.8

## 2 膨胀土边坡稳定性分析

### 2.1 浅层平面破坏模式分析

分别针对不同坡高  $H=4\text{m}$ 、 $H=8\text{m}$ 、 $H=12\text{m}$  及不同的风化层厚度和不同的坡比等几类情况，采用国际上常用的边坡计算分析软件 GEO-SLOPE 进行计算模拟，按浅层平面破坏模式分析，所得结果见表 2，表 3。

不同坡高、坡比条件下中膨胀土边坡稳定系数 表 2

坡比	风化层的厚度 (m)	边坡稳定系数		
		坡高(m)		
		4	8	12
1: 1.5	0.5	2.06	2.07	2.04
	1.0	1.28	1.22	1.20
	1.5	1.04	0.96	0.94
	2.0	1.04	0.82	0.80
1: 1.75	0.5	2.47	2.34	2.30

	1.0	1.43	1.37	1.35
	1.5	1.16	1.09	1.07
	2.0	1.05	0.93	0.91
1: 2.0	0.5	2.77	2.62	2.59
	1.0	1.84	1.65	1.63
	1.5	1.29	1.22	1.20
	2.0	1.09	1.03	1.01
1: 2.5	2.0	1.35	1.30	1.28

分析表 2、表 3 可以得到：

(1) 坡比和风化层厚度是影响边坡稳定性的关键指标，而坡高对边坡是否形成浅层滑动影响并不明显，随着坡高的增大，稳定系数变化较为平缓；这说明在相同的风化层厚度和坡比下，浅层滑动一旦发生，可在任何坡高的情况下发生。

(2) 坡高、坡比一定时，风化层越深，则稳定性越差；这就是初期稳定的膨胀土边坡随着时间的推移，在大气的风化作用下，经过干湿循环，风化层厚度增大，安全系数逐渐变小，最终导致失稳的原因。

不同坡高、坡比条件下弱膨胀土边坡稳定系数 表 3

坡比	风化层的厚度 (m)	边坡稳定系数		
		坡高(m)		
		4	8	12
1: 1.0	1.5	1.941	1.39	1.33
	2.0	1.824	1.29	1.08
1: 1.5	0.5	3.89	3.88	3.82
	1.0	2.67	2.39	2.30
	1.5	2.33	1.92	1.81
	2.0	1.98	1.70	1.59
1: 1.75	0.5	4.66	4.40	4.16
	1.0	3.05	2.72	2.60
	1.5	2.62	2.19	2.05
	2.0	2.09	1.94	1.80
1: 2.0	1.5	2.90	2.46	2.32
	2.0	2.30	2.18	2.03

## 2.2 整体稳定性分析

分别针对不同坡高  $H=5\text{m}$ 、 $H=8\text{m}$ 、 $H=10\text{m}$  及不同的坡比 1: 2.0、1: 1.75、1: 1.5 等几类情况，该地区大气影响深度为 1.5~2.0m，若表层风化层厚度取 2.0m，按整体稳定性分析所得结果见表 4 及图 3。

膨胀土边坡稳定系数(Janbu 法) 表 4

边坡类型	坡比	边坡稳定系数		
		坡高(m)		
		5	8	10(5 米高处 2 米宽台阶)
中膨胀土路堑边坡	1: 2.0	1.399	1.285	1.449
	1: 1.75	1.295	1.261	1.271
	1: 1.5	1.171	1.040	1.163
弱膨胀土路堑边坡	1: 2.0	2.545	2.158	2.188
	1: 1.75	2.132	1.835	2.007
	1: 1.5	1.944	1.649	1.822

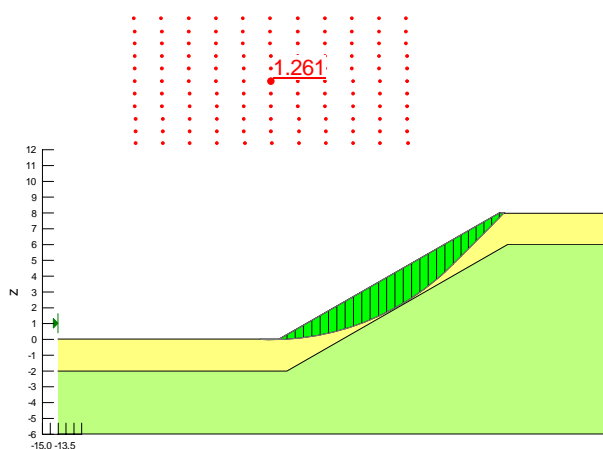


图 3 中膨胀土路堑边坡稳定性分析结果-Janbu 法( $H=8\text{m}$ , 坡比 1: 1.75)

分析表 4 和图 3 可以得到:

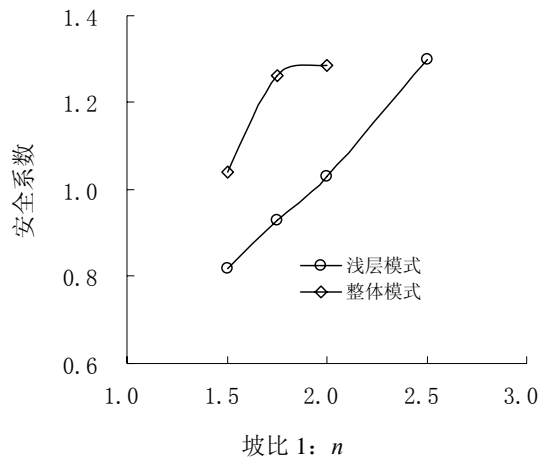
- (1) 坡高相同时, 坡比越大安全系数越小; 坡比相同时, 坡高越大(台阶除外), 安全系数越小。
- (2) 按照整体分析模式进行分析时, 计算搜索的最小安全系数仍然是在浅层的风化层。

### 2.3 两种破坏分析模式的综合分析

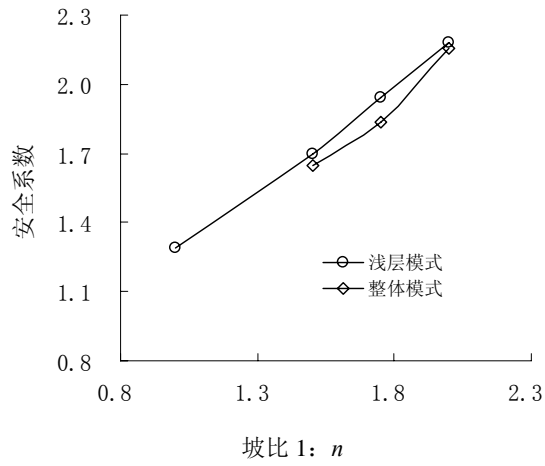
对比分析表 2、表 3、表 4, 将计算结果反映在图上, 如图 4 所示, 可得以下结果:

(1) 坡高、坡比及风化层厚度相等时, 对于中膨胀土, 浅层平面破坏模式计算所得安全系数明显小于整体破坏模式所得安全系数, 对于弱膨胀土, 两种破坏模式计算所得安全系数差别不大; 由此可知, 膨胀土边坡潜在滑动面均在表层风化层中, 膨胀土边坡的稳定性受浅层平面破坏模式控制。

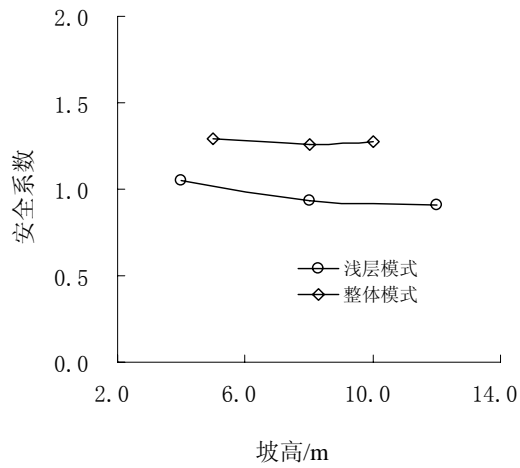
(2) 坡越陡, 安全系数越小, 并且边坡存在一稳定坡比。计算结果表明, 对于本工程大气影响深度为 1.5~2.0 时, 中膨胀土边坡稳定坡比为 1: 2.0~1: 2.5, 弱膨胀土边坡的稳定坡比为 1: 1.5。



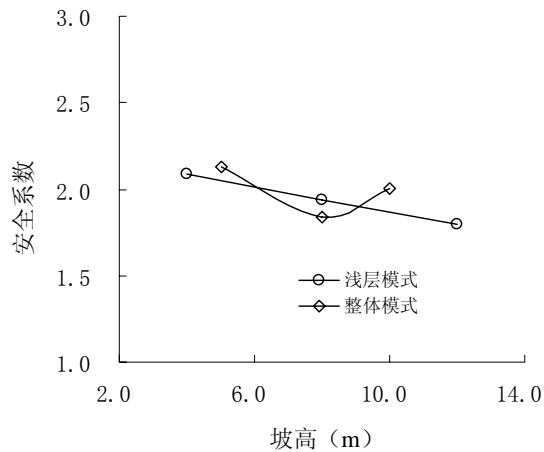
(a) 中膨胀土: 坡高 8m、风化层厚度 2m



(b) 弱膨胀土: 坡高 8m、风化层厚度 2m



(c) 中膨胀土: 坡比 1: 1.75、风化层厚度 2m



(d) 弱膨胀土: 坡比 1: 1.75、风化层厚度 2m

图 4 浅层破坏模式与整体圆弧破坏模式结果对比

### 3 结论及建议

(1) 坡比及风化层厚度对边坡稳定性的影响较为明显, 坡比越小、风化层厚度越深, 边坡越易失稳; 随着坡高的增大, 安全系数变化较为平缓, 坡高对边坡是否形成浅层滑动影响并不明显, 浅层滑动一旦形成, 可在任何坡比情况下发生。

(2) 坡越陡, 安全系数越小, 边坡存在一稳定坡比。本工程大气影响深度为 1.5~2.0, 中膨胀土边坡稳定坡比为 1: 2.0~1: 2.5, 弱膨胀土边坡的稳定坡比为 1: 1.5, 可根据这一结论设计合理的坡比。

(3) 膨胀土边坡潜在滑动面均在表层风化层中, 膨胀土边坡的稳定性受浅层平面破坏模式控制, 因此控制浅层滑动成为边坡设计的重点之一。

### 参考文献

- [1] 林育梁, 陈小亮, 杨扬. 膨胀土边坡稳定性非连续变形分析新方法[J]. 岩土力学 (增刊), 2007, 28 (10): 254-258.
- [2] 卫军, 谢海洋, 李小对, 等. 膨胀土边坡的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2865-2869.
- [3] 陈守义. 考虑入渗和蒸发影响的边坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 18 (2): 8-12.
- [4] 陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 447-450.
- [5] 陆蓉, 詹云霞. 襄十高速公路边坡破坏分析及其治理措施[J]. 武汉工业学院学报, 2006, 25(4): 68-72.
- [6] 陈新苗. 引江济淮膨胀土工程特性研究[J]. 合肥工业大学学报, 2009, 32(7): 1072-1075.
- [7] 肖建勋, 程远帆. 江苏盐通高速公路膨胀土边坡稳定性计算[J]. 四川地质学报, 2006, 26(2): 94-96.
- [8] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健. 岩质边坡稳定性分析-原理-方法-程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005

### Analysis on Stability of Expansive Soil Slope influenced by parameters

Wang Xing-yun, Chen Shan-xiong, Mei tao, Fan lian

**Abstract:** Stability control of expansive soil slope is one difficult problem of engineering construction. The stability of expansive soil slope is discussed, and the instability model of expansive soil slope is concluded to shallow layer failure and whole arc failure. Expansive soil slope is divided into weathered layer and unweathered layer, and how to choose calculation parameters of expansive soil slope is proposed. Based on certain engineering, the whole stability analysis and shallow layer stability analysis is used to study on the stability of middle expansive soil and weak expansive soil slope influenced by slope height, slope ratio and thickness of weathered layer, and the two failure models are also comparatively studied. The research results show that slope

ratio and thickness of weathered layer have a significant influence to the stability of expansive soil slope, and there is a stable slope ratio. The climate influenced layer of the engineering is 1.5~2.0m, and the stable slope ratio of middle expansive soli slope is 1:2.0~1:2.5, weathered expansive soil slope 1:1.5. The expansive soil slope failure mainly presents shallow layer, and controlled by shallow layer failure.

**Key words:** Expansive soil; stability analysis; instability model; shallow layer failure; whole arc failure;