

文章编号: 0451-0712(2006)04-0171-06

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

# 有限元强度折减法在 膨胀土路堑滑坡分析中的应用

谭 波<sup>1,2</sup>, 杨和平<sup>2</sup>

(1. 桂林工学院 桂林市 541004; 2. 长沙理工大学 长沙市 410076)

**摘 要:** 膨胀土路堑滑坡机理复杂, 传统边坡分析方法无法对它进行分析并得出合理解释。而有限元强度折减法可采用岩土材料的非线性弹塑性本构关系, 能考虑膨胀力等因素的作用, 通过计算坡体的应力与应变, 合理分析土坡变形过程和潜在滑动面, 并采用安全系数评价边坡稳定性, 较好地解决了膨胀土边坡稳定性及滑坡处治效果分析问题。应用有限元强度折减法, 分析了南友路膨胀土滑坡规律, 以及柔性支挡的处治效果。

**关键词:** 膨胀土; 路堑滑坡; 有限元; 柔性支挡

传统的边坡分析方法, 如极限平衡法、极限分析法、滑移线场法等, 都建立在极限平衡理论基础之上, 不适用于膨胀土边坡的稳定性分析。这是因为: (1) 这些方法需在人为假定的滑裂面上进行力学平衡分析, 而膨胀土边坡的滑面往往呈现由圆弧和直线组合而成的不规则形状, 且具有浅层性, 坡体滑裂面难以人为假定; (2) 膨胀土边坡的下滑力不仅包括重力因素而且包括由于膨胀土的超固结性和吸水膨胀作用而产生的膨胀力, 传统方法无法合理地考虑

膨胀力的作用; (3) 传统方法无法计算膨胀土体内部的应力、应变, 无法分析膨胀土边坡特有的膨胀变形破坏过程。有限元方法则克服了上述缺陷, 20 世纪 80 年代国外推出有限元强度折减法, 并随着计算机技术和岩土力学的发展而逐渐成熟。该法可采用岩土材料的非线性弹塑性本构模型, 计算出土体内部的应力、应变, 自动分析滑裂面, 模拟边坡的破坏过程, 同时可模拟支挡体与边坡的变形协调, 能直接得出边坡稳定性安全系数。本文将有限元强度折减法

基金项目: 交通部交通建设科技项目(2002318000)

收稿日期: 2005-11-13

## A Study on Design for Interchange Safety of Expressway

JIANG Xiao-xia<sup>1</sup>, YUAN Hong-wei<sup>1</sup>

(1. Guangdong Provincial Highway Design Institute, Guangzhou 510507, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xian 710064, China)

**Abstract:** Three key indexes for design on interchange safety are harmonious unity among interchange alignment signing with traffic volume, traffic velocity and the satisfaction of drivers and passengers. On the basis of the design of Shitan Interchange of Third Inner-Ring Expressway in the north of Guangzhou City, some aspects on interchange safety design that should be paid more attention to are analyzed.

**Key words:** design for interchange safety; interchange alignment signing; traffic volume; traffic velocity; drivers and passengers

应用于膨胀土边坡稳定性分析,借助大型有限元分析软件 ANSYS 分析了膨胀土边坡以及柔性支挡的稳定性。

## 1 有限元强度折减法的基本理论

### 1.1 基本原理

在工程设计中,判断边坡稳定性的大小习惯上采用边坡稳定性安全系数来衡量。Bishop 等将土坡稳定安全系数定义为沿整个滑移面的抗剪强度与实际剪应力之比,用公式表示如下:

$$k = \frac{\int_0^l \tau_s dl}{\int_0^l \tau dl} = \frac{\int_0^l (c + \sigma \tan \varphi) dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (1)$$

将式(1)两边同除以  $k$ , 则式(1)变为:

$$1 = \frac{\int_0^l (\frac{c}{k} + \frac{\sigma \tan \varphi}{k}) dl}{\int_0^l \tau dl} = \frac{\int_0^l (c' + \sigma \tan \varphi') dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (2)$$

式中:  $c' = \frac{c}{k}$ ;  $\varphi' = \arctan(\tan \varphi / k)$ 。

式(2)左边等于 1, 表明当强度折减  $k$  以后, 坡体达到极限状态。有限元强度折减法在本质上与传统方法一致, 通过代入折减后的土坡强度参数计算土体的极限平衡状态, 此时, 折减系数  $k$  即安全系数。由于有限元强度折减法无法直接用公式计算, 因而需根据某种破坏判断依据来判定系统是否进入极限平衡状态。目前的失稳判断依据主要有 2 类: 一类是把有限元计算过程中力和位移的不收敛作为边坡失稳的标志; 另一类以广义塑性应变或者等效塑性应变从坡脚到坡顶贯通作为边坡破坏的标志。以上 2 种判断依据对安全系数的计算结果基本等效。采用有限元的计算收敛与否作为失稳的标志时认为: 计算不收敛对应的是边坡的滑体由稳定静止状态变为运动状态, 位移和塑性应变不再是一个定值, 而是处于无限塑性流动状态, 这时边坡将产生很大的位移而失去稳定。所以, 把收敛与不收敛的临界点作为边坡的极限状态是合理的。

有限元强度折减系数法的基本原理是将坡体强度参数——粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  值, 同时除以一个折减系数  $k$ , 得到一组新的  $c'$ 、 $\varphi'$  值, 然后作为新的资料参数输入, 再进行试算。当计算接近不收敛时, 对应的  $k$  被称为坡体的最小稳定安全系数, 此时坡体达到极限状态, 塑性应变贯通形成滑动面。

### 1.2 屈服准则

有限元强度折减法中岩土材料本构模型采用理想弹塑性模型。研究表明, 安全系数计算的准确性与采用的屈服准则有关。在土力学中常用的屈服准则为莫尔-库仑准则(M-C 准则), 该准则较为可靠, 但其屈服面为不规则的六角形截面的角锥体表面, 存在尖顶和棱角, 给数值计算带来困难。因此, 目前流行的大型有限元软件 ANSYS, 以及美国 MSC 公司的 MARC、PATRAN、NASTRAN 等软件均采用了 Drucker-Prager 准则(D-P 准则), 表达式为:

$$\begin{aligned} F &= \alpha I_1 + J_2^{1/2} = k \\ \alpha &= \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \\ k &= \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $I_1$ 、 $J_2$  分别为应力张量的第一不变量和应力偏张量的第二不变量;  $\alpha$ 、 $k$  是与岩土材料内摩擦角  $\varphi$  和内聚力  $c$  有关的常数, 通过变换  $\alpha$ 、 $k$  的表达式就可以在有限元中实现不同的屈服准则。

D-P 准则的屈服面是一通过莫尔-库仑不规则的六角形锥外角点的外接圆锥(图 1), 在  $\pi$  平面上为 M-C 准则的外角外接圆, 此法虽然方便了数值计算, 但不可避免地会引入一定的误差。为提高计算精度, 徐干成、郑颖人<sup>[1]</sup>(1990 年)提出摩尔-库仑等面积圆屈服准则, 该准则是在 D-P 准则上的修正(称为 DP3), 通过改变  $\alpha$ 、 $k$  的表达式实现:

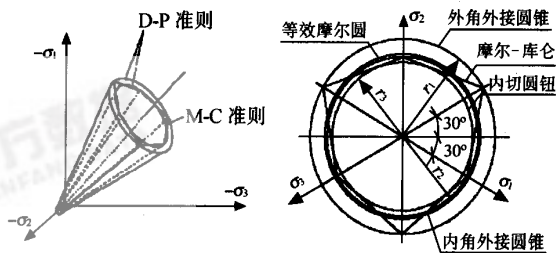


图 1 各屈服准则在三维和  $\pi$  平面上的曲线

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{2 \sqrt{3} \sin \varphi}{\sqrt{2\pi} \sqrt{3} (9 - \sin^2 \varphi)} \\ k &= \frac{6 \sqrt{3} c \sin \varphi}{\sqrt{2\pi} \sqrt{3} (9 - \sin^2 \varphi)} \end{aligned}$$

对于平面应变问题, 又提出计算精度更好的 DP4 准则:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\sin \varphi}{3} \\ k &= c \cos \varphi \end{aligned}$$

本文将边坡稳定性问题考虑为平面应变问题,

采用 DP4 准则。

## 2 膨胀土边坡土坡强度参数分析

膨胀土滑坡与一般土坡不同,机理较为复杂,表现形式一般具有浅层性、牵引性、平缓性等特点。导致膨胀土滑坡的因素也较多,可简要概括为 2 个方面:(1)由于膨胀土边坡开挖暴露后,在风化和降水的影响下,土体历经干湿循环,水分不断发生迁移,因而裂隙不断发育,整体强度不断降低;(2)由于膨胀土边坡的开挖卸荷表现出来的超固结性,以及土坡在降雨后表里吸水不均等都可对边坡土体产生膨胀力。因此,在稳定性分析时应该注重从土体强度和膨胀力这 2 个方面考虑,目前主要通过试验手段来进行研究。

### 2.1 土体强度参数

在边坡分析当中,主要考虑土体的抗剪强度,膨胀土抗剪强度表现出一种典型的“变动强度”特性和规律,同时具有峰值强度很高、残余强度很低的性质。廖世文<sup>[2]</sup>将膨胀土强度分为土块强度、结构面强度与土体强度。土块强度一般可用来描述土体原始结构的强度,认为其微裂隙尚未发生,具有较高的测试强度;结构面强度表示土块间裂隙及其填充物、土层间结构面的抗剪强度,情况比较复杂,强度一般接近残余强度;土体强度接近两者之间,是包括土块强度与结构面强度在内的综合抗剪强度。由于膨胀土抗剪强度的变动特点,获得合理边坡土体的强度指标是一个有待研究的问题。许多学者提出采用非饱和土理论来进行研究,根据非饱和土强度理论,土的抗剪强度为:

$$\tau_f=c'+(\sigma-u_a)\tan\varphi'+(u_a-u_w)\tan\varphi_b$$

式中:  $(u_a-u_w)$  为吸力;  $(u_a-u_w)\tan\varphi_b$  为吸附强度;  $c_{total}=c'+(u_a-u_w)\tan\varphi_b$  为总粘聚力。

通过非饱和土三轴试验,可获得膨胀土的强度规律。表 1<sup>[3]</sup>为宁明膨胀土试验结果。土样取自广西南宁~友谊关(南友)高速公路宁明段 K134+080 断面,为灰白色粘土,属中一强膨胀土。

表 1 各状态参数与吸附强度的数据

吸力 $(u_a-u_w)/\text{kPa}$	0.0	42.3	78.9	156.6
饱和度/%	100.0	93.1	82.1	77.4
总粘聚力 $c_{total}/\text{kPa}$	30.13	41.39	47.23	54.66
吸附强度/ $\text{kPa}$	0	11.26	17.10	24.53
$\varphi_b/(\circ)$	15.02	14.90	12.23	8.91

另一种方法是通过室内模拟干湿循环条件,使膨胀土试样历经干缩湿胀效应,在室内利用直剪仪和三轴仪进行模拟剪切试验测得抗剪强度。这样土体因为经过干湿循环效应,在一定程度上反映了土块和结构面组合的综合强度。图 2 为灰白色宁明膨胀土干湿循环下三轴试验结果。

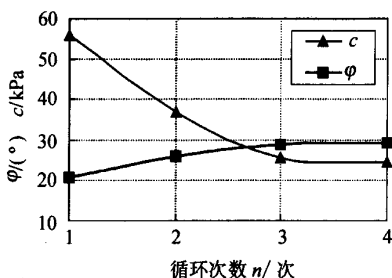


图 2 抗剪强度指标与干湿循环次数的关系

综合参考以上 2 个试验的结果,本文在计算时采用了所有结果中强度值相对最小的一组,得  $c=30.13\text{ kPa}$ 、 $\varphi=15.02^\circ$ 。

### 2.2 膨胀力

膨胀力是边坡稳定性分析中的难点,因为膨胀对于安全系数的计算影响很大,所以在有限元分析中如何合理考虑膨胀力至关重要。目前在边坡有限元分析时,可将膨胀力考虑为体力<sup>[4]</sup>或面力,并在分析边坡膨胀变形机理的基础上提出相应假设:(1)膨胀力的产生与含水量增加有关,且含水量增加越大,膨胀力越大;(2)膨胀力的产生只发生在路基表层,一般在 2~3 m 的大气风化影响范围内,之后土体内的膨胀力将小到 0;(3)室内测定膨胀力是在土样完全饱和和无任何膨胀变形的条件下进行的,而路基土一般不具备完全饱和条件,且允许一定量的膨胀变形,所以实际膨胀土路基体吸水产生的膨胀力比室内试验得到的膨胀力值要小。

以体力的形式引入膨胀力较符合实际情况,但其大小和分布范围的确定缺乏实验或测量数据的支持;而膨胀力试验是通过测试土块表面力的间接方式得到膨胀力的大小。因此,以面力引入膨胀力的方式虽是一种间接方式,但可以采用膨胀力试验获得试验数据。笔者认为,可将膨胀力考虑为坡面受到的向外的拉力,该等效做法也是合理的。本文采用面力形式引入膨胀力。表 2 为灰白色宁明膨胀土膨胀力试验结果。

从试验结果分析,初始含水量对膨胀力的影响很大,而现场膨胀土的含水量一般在 25%~30%之间。

表 2 膨胀力与初始含水量的关系

初始状态		膨胀力 kPa
干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	初始含水量/%	
1.66	15.4	470.5
	18.9	313.0
	20.8	234.6
	22.3	200.5
	24.0	124.5
	28.2	94.5
	30.0	78.3

本文计算时采用的膨胀力为100 kPa,同时计算分析了膨胀力大小的变化对于边坡安全系数的影响。

3 算例

3.1 有限元计算模型有关参数

本文分析边坡为广西南宁~友谊关高速公路宁明K134段,坡高为10 m,坡比为1:1.5,坡顶后段坡度为1:10。膨胀土基本性质见表3。

在有限元分析中将边坡考虑为平面应变问题:土体单元采用平面8节点等参单元,土体为理想弹塑性材料;计算宽度为60 m,其中边坡破顶以右宽

表 3 宁明膨胀土的物理性质指标

取样深度 m	相对密度	液限	塑限	塑性指数	颗粒大小/mm			土类名称	自由膨胀率F <sub>s</sub> %
					砂粒	粉粒	粘粒		
	G <sub>s</sub>	$\frac{w_L}{\%}$	$\frac{w_P}{\%}$	$\frac{I_P}{\%}$	0.25~0.074	0.074~0.05	<0.05		
2	2.72	54.4	20.9	33.5	1	20	79	高液限土	77

为30 m,坡脚以左宽为15 m;上部计算高度为13 m,下部为10 m。图3为有限元网格划分,表4为有关计算参数。

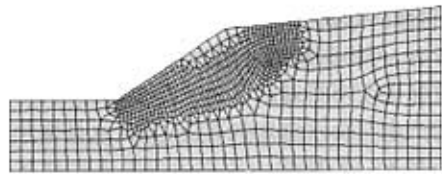


图 3 有限元单元网格划分

表 4 有限元计算参数

坡高/m	坡比	变形模量 MPa	泊松比	c/kPa	$\varphi$ (°)	容重 kN/m <sup>3</sup>	膨胀力 kPa
10	1:1.5	10	0.25	30.13	15.02	19	100

表 5 安全系数与坡比的关系 (膨胀力为 100 kPa)

坡高/m	坡比	安全系数K
10	1:1	0.557
10	1:1.5	0.726
10	1:1.75	0.789
10	1:2	0.865
10	1:3	1.035
10	1:5	1.074

表 6 安全系数与膨胀力的关系

坡高/m	坡比	膨胀力/kPa	安全系数K
10	1:1.5	100	0.726
10	1:1.5	80	0.948
10	1:1.5	60	1.198
10	1:1.5	40	1.477
10	1:1.5	20	1.814
10	1:1.5	0	2.501

3.2 路堑边坡稳定性计算分析

本文应用有限元强度折减法,通过2套方式进行计算:一是保持膨胀力不变,为100 kPa,而是改变边坡坡比(1:1~1:5);二是保持边坡坡比不变,为1:1.5,而是改变膨胀力大小(0~100 kPa)。

计算结果见表5、表6,同时对滑坡的规律进行了分析(图4~图7)。

(1)从计算结果可以看出膨胀力为100 kPa时,边坡是不稳定的,即便采取放缓边坡的办法,对于安全系数的提高也作用不大。当坡比为1:5时安全系数也仅为1.074,还不能满足要求(K>1.25)。计算

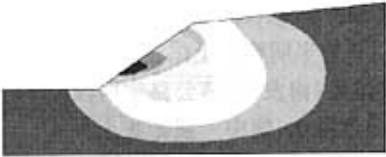


图 4 边坡水平位移计算图

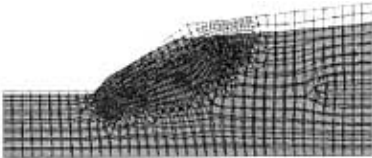


图 5 边坡变形





图 6 有膨胀力作用下的塑性区



图 7 无膨胀力作用下的塑性区

结果与实际情况是比较吻合的。南友高速公路在建设期间,宁明段所有膨胀土路堑边坡几乎全部坍塌,当时设计坡比为 1:1.5,后将坡比放缓至 1:3,大部分边坡在雨季仍然出现坍塌。廖世文的《膨胀土与铁道工程》一书中也有实例证明即便将坡比放缓至 1:5,边坡仍不稳定。放缓边坡只能缓解重力作用,而膨胀力的作用仍将导致边坡发生浅层滑坡。

(2)计算说明,膨胀力是导致边坡坍塌的重要因素,对于边坡稳定性的影响十分明显。膨胀力下降以后,安全系数显著提高,当膨胀力下降至 50 kPa 左右,安全系数即可满足要求( $K>1.25$ )。而膨胀力试验说明,膨胀力的大小与土体的初始含水量以及含水量变化有关,因此解决好边坡的“保湿防渗”问题是边坡稳定的关键。

(3)从边坡的变形和水平位移计算图中可以看出,由于膨胀力的作用,边坡中下部水平位移明显增加,出现鼓胀变形。从图 6 中可看出塑性区贯通,这代表滑裂面已产生。但该滑裂面与没有膨胀力作用下边坡的滑裂面(见图 7)有明显区别:①滑裂面的出口位置位于坡脚以上 1~2 m 处;②滑裂面由圆弧与直线组合而成,直线段一般位于坡顶,边坡滑塌后形成陡坎;③滑裂面下部坡度平缓,整个滑体体积不大,为浅层滑坡。这些分析结果很好地反映出膨胀土滑坡特有的滑坡规律且与实际情况一致。图 8 为本文计算边坡 K134 段的现场滑坡照片,从照片中可以看出坡顶有明显裂缝区,这与图 6 计算结果十分吻合。因此,可以认为膨胀土边坡特有的滑坡规律主要是由于膨胀力作用而导致的。

3.3 柔性支挡处治计算分析

根据膨胀土路堑滑坡机理,在南友路采用了一种柔性支挡的处治方法。即利用土工格栅加筋的方式筑成柔性土墙,土墙坡度与边坡开挖坡度一致(设



图 8

计厚度为 3.5 m,加筋间距为 50 cm)。这样的柔性支挡体对于墙后边坡既可以起到支挡作用,又可以起到很好的封闭防护效果。另外,柔性支挡体允许一定变形,可释放边坡土体大部分应力和膨胀产生的破坏力,起到更好的支挡效果。本文应用有限元强度折减法进行了柔性支挡的稳定性计算。柔性土墙的参数为:变形模量=50 kPa; $c=80$  kPa; $\varphi=28^\circ$ ;泊松比=0.25。

计算表明,柔性支挡的处治可以增强边坡的稳定性,墙厚大于 3 m 即可满足安全要求(表 7)。如果考虑在柔性支挡的封闭防护作用下膨胀力的减弱,边坡的安全系数将更加提高。所以,柔性支挡的处治方案对于膨胀土路堑滑坡是十分有效的。从图 9 看到,在柔性支挡的作用下,滑裂面位置后移,形状为圆弧状,这与一般粘性土坡滑坡形式一样。这说明柔性支挡可以有效地抵消膨胀力作用。

表 7 柔性支挡厚度与安全系数的关系(膨胀力为 100 kPa)

坡高/m	坡比	墙厚/m	K
10	1:1.5	2	1.133
10	1:1.5	3	1.275
10	1:1.5	4	1.425
10	1:1.5	5	1.528



图 9 柔性支挡与边坡共同作用的塑性云图

4 结语

(1)应用有限元强度折减法分析膨胀土边坡稳定性时,应注重坡体强度参数选取以及膨胀力的分

析,所有参数均应采用原土坡体的实验数据。

(2) 膨胀土滑坡呈现特有的滑裂面形式, 滑裂面由底部圆弧和上部直线组合而成且剪出口位于坡脚以上数米, 该滑坡形式的产生与膨胀力作用有关。

(3) 减小膨胀力的作用能显著提高边坡稳定性,这给滑坡处治方案的设计提供了理论指导。

(4) 通过计算分析表明,柔性支挡是一种针对膨胀土滑坡的有效处治方式。

### 参考文献:

- [1] 郑颖人,赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(19).
- [2] 廖世文. 膨胀土与铁道工程[M]. 北京:中国铁道出版社, 1984.
- [3] 郑健龙,杨和平. 膨胀土处治理论、技术与实践[M]. 人民交通出版社, 2004.
- [4] 秦禄生,郑健龙. 膨胀土路基边坡雨季失稳破坏机理的应力应变分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1).

# Appliance of Strength Reduction Method with FEM to Analyzing Landslide of Dilative Soil Road Cut

**TAN Bo<sup>1,2</sup>, YANG He-ping<sup>2</sup>**

(1. GuiLin University of Technology GuangXi GuiLin 541001;

2. ChangSha University of Science and technology HuNan ChangSha 410076)

**Abstract:** The mechanism of landslide of dilative soil road cut is complex, so the traditional slope analysis method is unable to analyze it and obtain the reasonable explanation. But the shear strength reduction method with FEM can adopt the elastoplastic relation, the effect of the factor can be taken such as expansibility into account. Through calculating the stress and strain of slope body, the distortion process of earth slope and the latent sliding plane are analyzed reasonably, the safety factors to evaluate the slope stability is adopted, the problems of dilative soil stability and landslide treating effect are preferably solved. The shear strength reduction method with FEM is applied to analyze the rule of Nanyou Road dilative soil landslide and the treating effect of flexible shoring.

**Key words:** dilative soil; landslide of road cut; FEM; flexible shoring

《公路工程试验实训》(光盘)征订

内容简介:本教材为多媒体教材,以视频演示形式生动再现了公路工程土工试验、建材试验的过程。本教材分为9个部分,分别为土质与土工、集料、水泥、沥青材料、无机结合料稳定材料、水泥混凝土、建筑砂浆、沥青混合料、钢筋等。各部分分别介绍了相应材料的基本知识、试验仪器和试验过程。

**读者对象:**本教材可作为各类交通职业教育道路桥梁工程技术专业、工程监理与检测专业、工程造价专业实训教材,同时也可作为公路工程试验工培训教材,以及从事公路工程试验、监理、检测等工作的工程技术人员使用或参考。定价:48 元。

**联系人:**叶萍 [北京东四前炒面胡同 33 号,100010;(010)65235625]