

文章编号:1671-1637(2014)02-0021-07

## 膨胀土边坡浅层破坏稳定性分析

肖杰, 杨和平, 李晗峰, 唐咸远

(长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**应用南宁膨胀土开展低应力下的常规饱和慢剪、固结快剪、快剪试验, 获得了抗剪强度随竖向应力的变化规律, 分析了低应力对抗剪强度的影响。进行了75、100、200、300 kPa竖向压力下的残余强度试验, 运用Seep/W和Slope/W软件, 考虑降雨入渗条件, 采用M-P、Ordinary和Bishop三种极限平衡法对各抗剪强度下膨胀土边坡的稳定性进行对比分析。分析结果表明: 各抗剪强度受低应力的影响显著, 均呈非线性, 可用幂函数表达; 饱和慢剪强度在低应力时最小, 高应力时最大; 采用含低应力饱和非线性慢剪强度进行边坡稳定分析结果与实际发生的浅层破坏吻合。

**关键词:**膨胀土边坡; 浅层破坏; 稳定性分析; 低应力; 抗剪强度

**中图分类号:**U416.14

**文献标志码:**A

## Shallow failure stability analysis of expansive soil slope

XIAO Jie, YANG He-ping, LI Han-feng, TANG Xian-yuan

(Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road and Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

**Abstract:** Conventional saturated slow shear test, solidification quick shear test and quick shear test were carried out for Nanning expansive soil under low stresses condition, the change laws of various shear strengths with the change of vertical stresses were gotten, and the influences of low stresses on various shear strengths were analyzed. Residual shear strength tests were performed under the vertical stresses of 75, 100, 200 and 300 kPa, and the expansive soil slope stabilities at various shear strengths were compared by using the softwares of Seep/W and Slope/W with the consideration of rainfall infiltration and three limit equilibrium methods including M-P method, Ordinary method and Bishop method. Analysis result shows that the shear strengths are significantly influenced by the low stresses. The influences have nonlinear trends and the trends can be expressed by power functions. The saturated slow shear strength is lowest at low stress and highest at high stress. The stability analysis result of expansive soil slope calculated by nonlinear saturated slow shear at low stress is consistent with the actual slope failure situation. 5 tabs, 11 figs, 20 refs.

**Key words:** expansive soil slope; shallow failure; stability analysis; low stress; shear strength

**Author resumes:** XIAO Jie(1981-), male, lecturer, doctoral student, +86-731-85258255, xiaojie324@sina.com; YANG He-ping(1954-), male, professor, +86-731-82309581, cscuyang@163.com.

收稿日期:2013-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(50978035, 51108049);交通运输部科技项目(2009 353 311 060);道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金项目(kfi090303);广西交通科技项目(2011-20)

作者简介:肖杰(1981-),男,湖南邵阳人,长沙理工大学讲师,工学博士研究生,从事道路工程研究。

导师简介:杨和平(1954-),男,湖南长沙人,长沙理工大学教授。

## 0 引 言

因富含蒙脱石等亲水性粘土矿物,膨胀土具有显著的吸水膨胀软化和失水收缩开裂特性,导致工程开挖边坡经常出现坍塌破坏并呈现 2 个明显的特点:失稳多在雨季或降雨后发生,且大多数破坏都是浅层坍塌<sup>[1-5]</sup>,因此,研究膨胀土坡的坍塌破坏分析方法具有重要的理论意义和工程价值。

长期以来,许多学者致力于膨胀土边坡问题的研究,大多从确定土的抗剪强度参数与边坡稳定分析方法 2 方面着手。最初,部分学者将膨胀土边坡当作一般粘性土边坡对待,致使分析结果与实际不符,如南阳十八里岗膨胀土堑坡,极限平衡法计算的安全系数大于 2.7,结果发生了滑坡<sup>[1]</sup>。为解决这一矛盾现象,有学者采用残余强度来分析膨胀土边坡的稳定性,显然这与坡内土体的实际状态并不相符。后来的研究抓住膨胀土边坡土体的强度与其风化、开裂程度密切相关这一重要特性,按风化程度将边坡体分层,每层采用不同强度参数进行稳定分析,并通过改变试验控制条件、方法及强度取值原则以确定相应的抗剪强度,常采用的抗剪强度有折减强度<sup>[6]</sup>、裂隙面强度<sup>[7-9]</sup>、干湿循环强度<sup>[10-12]</sup>、残余强度<sup>[13]</sup>、固结快剪强度<sup>[14]</sup>、反算强度或根据经验取值等。彭良泉等采用裂隙面慢剪强度参数分析膨胀土边坡的稳定性<sup>[9]</sup>;殷宗泽等提出将膨胀土边坡划分为 3 层,分别用 5 次干湿循环后的饱和固结不排水参数、原状未风化膨胀土饱和固结不排水参数,以及两者的均值作为全风化、未风化和部分风化层强度参数进行边坡稳定分析<sup>[10]</sup>;徐彬等建议用 5 次干湿循环后固结不排水饱和强度来模拟膨胀土裂隙充分发展的状况<sup>[11]</sup>;平扬等也将边坡分为 2 层,分别用不同的强度参数进行稳定分析<sup>[13]</sup>。

尽管按风化程度分层、采用不同强度参数分析膨胀土边坡的做法比以前的方法有大的改进,但还是未抓住问题的本质。因为标准试验条件下膨胀土

的残余强度较大,使得边坡稳定分析结果难与浅层坍塌的实际相吻合<sup>[7,10]</sup>,加之计算中所需的强度参数多,而不同层位选用的试验参数也无统一标准。事实上,土的实测抗剪强度线通常呈非线性<sup>[6,15]</sup>,而膨胀土的膨胀特性使得其非线性特征明显,认清这点对于合理分析膨胀土坡的坍塌破坏尤为重要。大多数膨胀土边坡失稳是浅层破坏(深度不大于 2.5 m)<sup>[15]</sup>,坍塌面上所受应力小于 50 kPa,而《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)规定采取 50、100、200、300 或 100、200、300、400 kPa 竖向压力做试验并线性回归强度参数,当然导致边坡稳定分析结果与实际不相符合,因此,分析以浅层破坏为主的膨胀土边坡的稳定性时,应该且必须考虑其低应力下的土体强度及其非线性性质。

目前,有关膨胀土强度非线性的研究还很少,采用实测非线性强度参数来分析边坡的稳定性更是鲜见。为准确模拟雨后膨胀土边坡浅层坍塌的实际性状,本文尝试用常规直剪仪开展含低应力(5、15、30、50、75、100、200、300 kPa)的膨胀土饱和慢剪、固结快剪、快剪以及高正应力(75、100、200、300 kPa)的残余强度试验,研究各抗剪强度随正应力的变化规律和特点;运用 Seep/W 和 Slope/W 软件,考虑降雨入渗条件下边坡瞬态渗流,分别代入各种强度参数,比较不同强度参数对边坡稳定性分析结果的影响,进而建立膨胀土坡浅层破坏的分析计算方法。

## 1 含低应力条件的膨胀土抗剪强度试验

### 1.1 试验用土

土样取自南宁外环路五塘互通中线(K24+000)深 2~3 m 处,其天然含水率、天然密度和干密度分别为 20.31%、2.075 g·cm<sup>-3</sup>和 1.697 g·cm<sup>-3</sup>,其他特性指标见表 1,I/S 为伊/蒙混泥层粘土,I 为伊利石,K 为高岭石,C 为绿泥石。因土样自由膨胀率为 62%,蒙脱石质量分数和比表面积中等,可将其定为中膨胀土<sup>[16]</sup>。

表 1 膨胀土的特性指标

Tab. 1 Characteristic indexes of expansive soil

相对密度	自由膨胀率 /%	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数/%	颗粒(mm)组成/%			蒙脱石质 量分数/%	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	粘土矿物质量分数/%			
					>0.075	0.005~0.075	<0.005			I/S	I	K	C
2.70	62	46.04	23.77	22.27	0.30	56.14	43.56	11.78	105.53	58	11	20	11

### 1.2 试样制备和试验方法

受大气干湿循环作用,膨胀土边坡表层土体膨胀、松散,并出现大量裂隙,原始结构已遭破坏,其干密度和含水率随距表面的深度而变化,现场很难采

集均匀原状土样,加之本试验数量大,故取扰动土制备试样近似代替。试样制作采用静压法,其初始含水率为 16%,干密度为 1.70 g·cm<sup>-3</sup>(接近原状土),共制备有效试样 3 组(24 个)分别进行慢剪、固

结快剪和快剪。残余剪与慢剪采用相同试样。有效试样满足密度差不大于  $0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  且含水率差不大于  $0.2\%$ 。采用  $24 \text{ h}$  真空饱和法,实施过程中限制其体积不变,并达到完全饱和。除残余剪切竖向压力采用  $75, 100, 200, 300 \text{ kPa}$  外,其余均采用  $5, 15, 30, 50, 75, 100, 200, 300 \text{ kPa}$ 。常规仪器配荷砝码最小为  $50 \text{ kPa}$ ,  $5, 15$  和  $30 \text{ kPa}$  三种低应力用等效荷载直接在试样上施加,其他竖向压力仍通过杠杆配重实现。试验中,慢剪与快剪的剪切速率分别为  $0.02, 0.80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,其他试验操作及要求均按《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)执行。

### 1.3 试验结果分析

图1、2分别为快剪、固结快剪和慢剪强度的曲线拟合和常规直线拟合。其中常规直线拟合的上述3种抗剪强度参数的粘聚力和摩擦角分别为  $35.9, 31.3, 17.1 \text{ kPa}$  与  $11.2^\circ, 15.2^\circ, 20.2^\circ$ 。

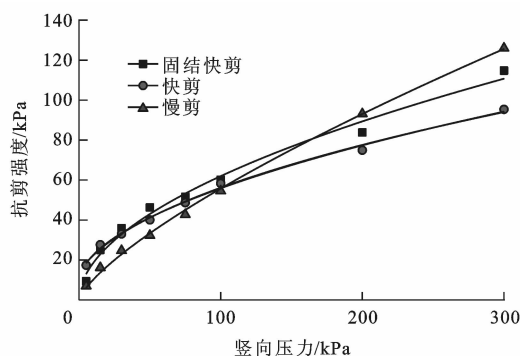


图1 曲线拟合  
Fig. 1 Curve fitting

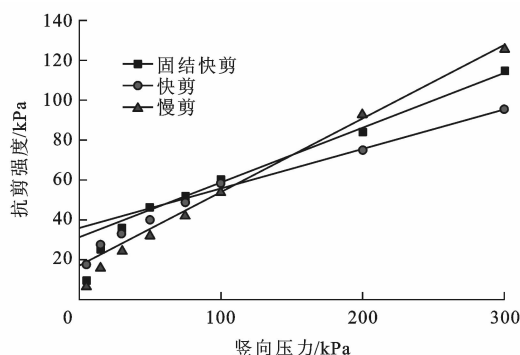


图2 直线拟合  
Fig. 2 Linear fitting

在全应力范围内,各抗剪强度均呈明显非线性,可用幂函数表达<sup>[15]</sup>,具体的非线性拟合参数见表2。粘聚力随竖向压力增加而增大,摩擦角随竖向压力增加而减小。抗剪强度为

$$\tau = P_a A \left( \frac{\sigma}{P_a} + T \right)^n \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为抗剪强度; $\sigma$ 为竖向应力; $P_a$ 为标准大气压力; $A, n, T$ 均为量纲为1的强度参数。

在高应力下,各抗剪强度线性关系良好,粘聚力值的大小顺序为快剪、固结快剪、慢剪;摩擦角的大小顺序为慢剪、固结快剪、快剪。

在低应力下( $\leq 50 \text{ kPa}$ )下,抗剪强度的实测值都比常规直线回归值小得多,且应力越小两者相差越大。以慢剪的实测值与拟合值为例, $5, 15, 30, 50 \text{ kPa}$ 下的差值分别是  $11.73, 6.25, 3.24, 3.04 \text{ kPa}$ ,两者之比为分别为  $37.9\%, 72.3\%, 88.5\%, 91.4\%$ 。究其原因,膨胀土含水率增大与干密度减小是2大影响因素。低应力下试样吸水增多,体积膨胀,固含水率增大干密度减小;且应力越低,吸水越多,体胀越大,干密度越小;高应力下,试样被压缩,含水率减小,干密度增大。

表2 非线性拟合参数

Tab. 2 Parameters of nonlinear fitting

参数	$A$	$T$	$n$
慢剪	0.555	0.000	0.740
快剪	0.510	0.131	0.546
固结快剪	0.543	0.056	0.485

在高应力下,慢剪强度大于固结与快剪强度,但在低应力下,慢剪强度小于快剪与固结快剪强度。

残余强度测试结果见图3,从中可知,残余强度下的粘聚力和摩擦角分别为  $12.1 \text{ kPa}, 18.0^\circ$ 。

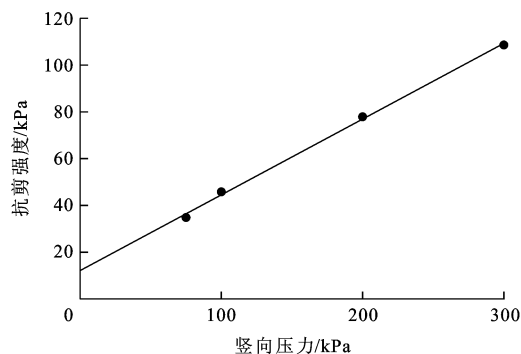


图3 残余强度测试结果

Fig. 3 Test result of residual strength

## 2 膨胀土边坡的稳定性比较分析

### 2.1 数值模型

膨胀土的数值模型见图4,采用 Seep/W 和 Slope/W 软件,分析降雨入渗条件下边坡瞬态渗流场,研究不同降雨历时与强度参数对其稳定性的影响,同时还进行了稳态流分析。计算模型边坡高度为  $6 \text{ m}$ ,坡率为  $1:1.5$ 。

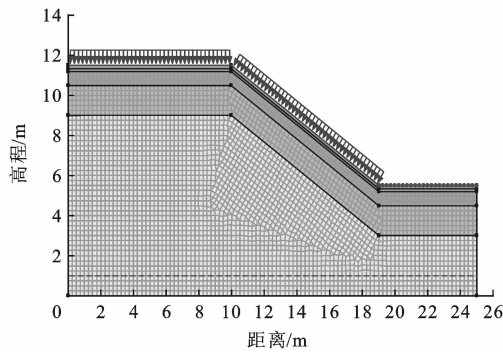


图 4 数值模型  
Fig. 4 Numerical model

边坡土按强风化、弱风化和未风化分为 3 层,强风化层厚 1.0 m,弱风化层厚 1.5 m。已有研究提出膨胀土饱和渗透系数随风化程度而异,强风化层的渗透性比土本身的渗透性大 2~4 个数量级,此处分别设强、弱风化层的饱和渗透系数为未风化层的 100、10 倍。图 5 为实测的土水特征曲线与按文献[17]预测的渗透性函数曲线,可知饱和未风化层、强风化层、弱风化层渗透系数分别为  $2.3 \times 10^{-8}$ 、 $2.3 \times 10^{-6}$ 、 $2.3 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且各层渗透性函数的形状相同。

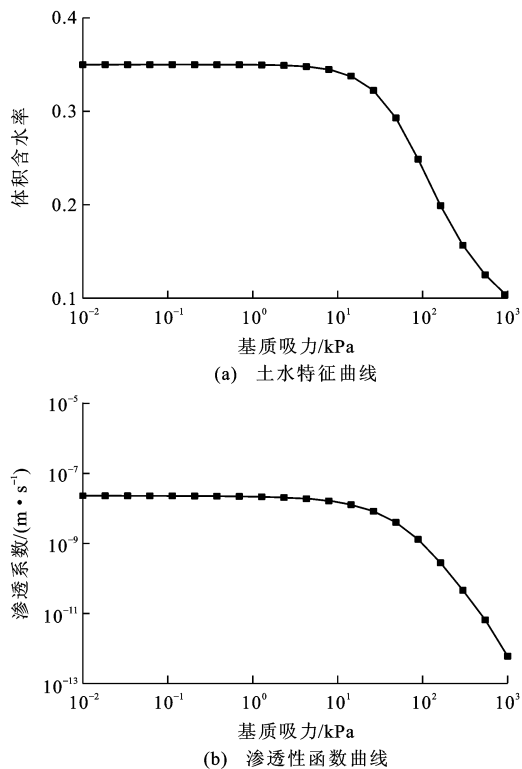


图 5 土水特征曲线与渗透性函数曲线  
Fig. 5 Curves of soil-water characteristic and permeability function

## 2.2 边界条件

在图 4 中,地下水位水平,高程为 1 m,左右两

侧水位线以下为定水头边界,其余为零流量边界。设最大负孔隙压力线性分布于水位线上,水头为 5 m。坡体初始孔隙水压力分布见图 6。

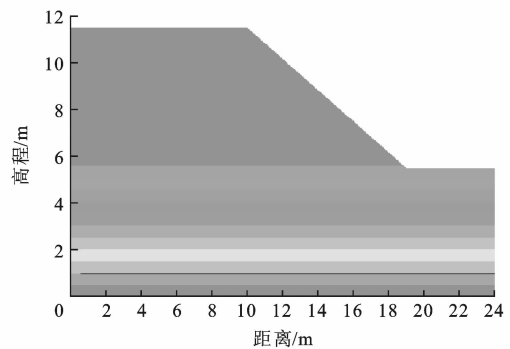


图 6 初始孔隙水压力分布  
Fig. 6 Initial pore water pressure distribution

坡顶和坡面采用流量边界,坡脚平面采用零水头边界,可自动判断降雨强度与土体渗透系数之间的关系:当降雨强度大于表层土体渗透系数时,按定水头边界处理,水头值等于位置高程;当降雨强度小于表层土体渗透系数时,按流量边界处理,其值等于降雨强度。取降雨强度为  $2.78 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),历时 2 d,每 4 h 记录保存 1 次数据。

## 2.3 抗剪强度参数

采用 5 种强度参数进行稳定分析(表 3),其中 B~E 分别为表 2 和图 3 中 75、100、200、300 kPa 下直线回归的慢剪、固结快剪、快剪及残余强度参数类型。强度参数类型 C、D 仅用于计算稳态流边坡安全系数(总应力法)。

表 3 强度参数  
Tab. 3 Strength parameters

类型	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力/ kPa	摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	吸力摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
B	20.0	17.10	20.2	
C		31.29	15.3	
D		35.91	11.2	
E		12.10	18.0	
F		由图 7 确定		10

根据图 5(a)的土水特征曲线与坡体内体积含水率分布,与强度参数类型 B、E 相关的土体抗剪强度  $\tau_1$  为<sup>[18-20]</sup>

$$\tau_1 = c' + (\sigma_n - u_a) \tan(\varphi') + (u_a - u_w) \cdot \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tan(\varphi') \quad (2)$$

式中: $c'$ 为有效粘聚力; $\sigma_n$ 为法向应力; $u_a$ 为破坏面上的孔隙气压力; $\varphi'$ 为内摩擦角; $u_w$ 为孔隙水压力;

$\theta_w$  为体积含水率; $\theta_s$  为饱和体积含水率; $\theta_r$  为残余体积含水率。

非线性强度参数类型 F 采用 Slope/W 手册中的数据点样条曲线技术处理,具体操作如下:对边坡极限平衡法分析中每一条块,利用 Slope/W 先求其底面法向应力,后算出对应法向应力样条曲线的切线斜率,该值为条块的内摩擦角,切线延伸交竖向轴的截距即为有效粘聚力。参考 Slope/W 手册,取吸力摩擦角为  $10^\circ$ ,因此,强度参数类型 F 的有效粘聚力和内摩擦角随应力变化,非定值。与强度参数类型 F 相关的土体抗剪强度  $\tau_2$  可根据图 7 确定,即

$$\tau_2 = c' + \sigma_n \tan(\varphi') + (u_a - u_w) \tan(\varphi_b) \quad (3)$$

式中: $\varphi_b$  为吸力摩擦角,本文简化为定值  $10^\circ$ 。

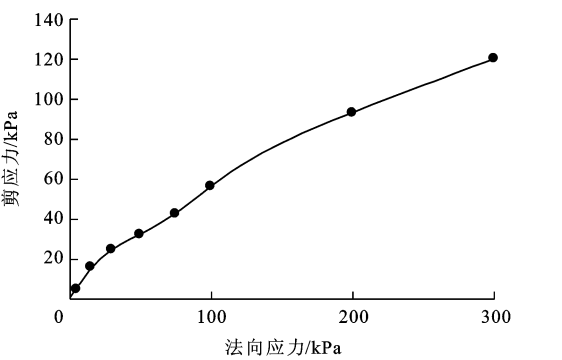


图 7 慢剪强度样条曲线  
Fig. 7 Spline curve of slow shear strength

2.4 计算结果分析

当降雨历时分别为 24、48 h 时,坡体内的孔隙水压分布见图 8、9,从中可见雨水入渗使坡内一定深度范围的孔隙水压力由负变正。降雨 48 h 后,表层土 1 m 深处孔隙水压力变为约 10 kPa,浸润峰随降雨历时慢慢向深部推进。表层土的负孔隙水压力消散直至变正,导致边坡安全系数减小。

表 4 为 Morgenstern-Price(M-P,方法 1)、Ordinary (方法 2)和 Bishop(方法 3)三种极限平衡法计算强

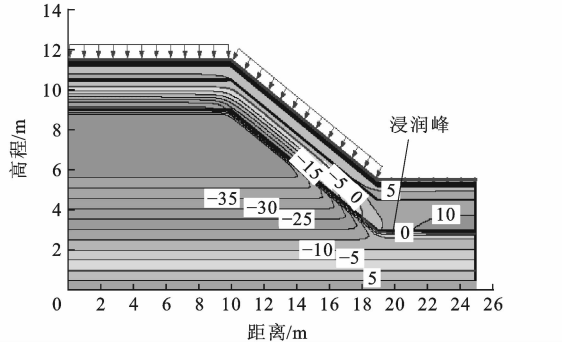


图 8 24 h 的孔隙水压力分布  
Fig. 8 Distribution of water pore pressure after 24 h

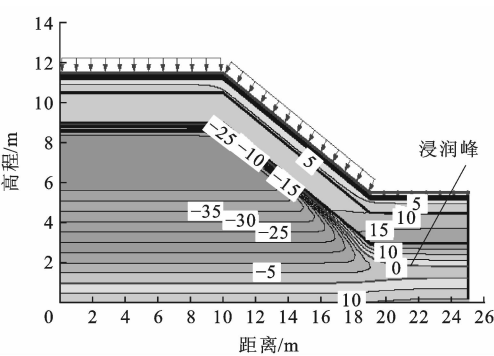


图 9 48 h 的孔隙水压力分布  
Fig. 9 Distribution of water pore pressure after 48 h

度参数类型 B、E、F 在不同降雨下的边坡安全系数  $F_s$ ,降雨历时、强度参数对安全系数的影响见图 10。以 M-P 法为例,F 型强度参数对应的安全系数最小,且受降雨历时的影响最大, $F_s$  由 2.09 降至 1.12,减少 46.4%;E 型次之, $F_s$  由 2.19 减小到 1.32,减少 39.7%;B 型最小, $F_s$  由 2.54 减小到 1.73,减少 31.9%,降雨 16 h 后,安全系数下降较快。

表 4 安全系数  
Tab. 4 Safety coefficients

降雨 历时/ h	B			E			F		
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 1	方法 2	方法 3	方法 1	方法 2	方法 3
0	2.54	2.47	2.55	2.19	2.09	2.19	2.09	1.95	2.09
4	2.46	2.38	2.48	2.02	1.97	2.05	2.02	1.89	2.02
8	2.39	2.33	2.44	1.96	1.88	2.00	1.78	1.75	1.88
12	2.35	2.28	2.41	1.92	1.85	1.97	1.49	1.45	1.58
16	2.33	2.25	2.39	1.88	1.87	1.93	1.39	1.35	1.48
20	2.3	2.28	2.38	1.79	1.78	1.84	1.34	1.30	1.42
24	2.18	2.16	2.26	1.72	1.70	1.78	1.30	1.26	1.38
28	2.07	2.04	2.14	1.63	1.61	1.69	1.26	1.22	1.34
32	1.96	1.95	2.03	1.53	1.51	1.59	1.22	1.19	1.30
36	1.87	1.85	1.94	1.43	1.40	1.48	1.18	1.14	1.26
40	1.79	1.77	1.85	1.36	1.33	1.41	1.14	1.10	1.22
44	1.75	1.73	1.81	1.34	1.31	1.38	1.13	1.09	1.20
48	1.73	1.71	1.79	1.32	1.29	1.37	1.12	1.08	1.20

已有研究认为膨胀土的残余强度与干湿循环强度相近,进行边坡稳定性分析时可相互替代<sup>[12]</sup>。由表 5 中 E 型参数分析求得最小  $F_s$  (Ordinary 法)也有 1.29,表明采用膨胀土的残余或干湿循环强度做边坡稳定分析也不能保证得出符合实际的结果。然而,采用实测非线性强度参数进行分析,M-P、Ordinary 和 Bishop 三种方法求得的  $F_s$  值分别为 1.12、1.08 和 1.20,均小于《公路路基设计规范》(JTG D30—

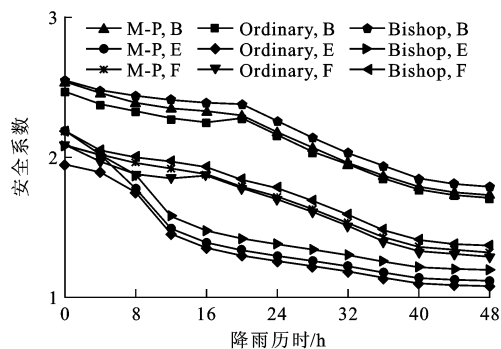


图 10 安全系数与降雨历时的关系

Fig. 10 Relations between safety coefficient and rainfall duration

2004)对路堑边坡安全系数的要求(1.25~1.30),表明边坡已不安全,即用低应力下非线性抗剪强度来分析膨胀土边坡安全性,能获得与实际相符的结果。

图 11 为用实测应力抗剪强度(M-P 法,48 h)分析得到的边坡最危险滑面(安全系数为 1.12),滑面最大竖向深度约为 1.1 m,为发生在强风化与弱风化层界面的浅层坍塌,与膨胀土坡坍塌位置受各风化层界面控制的结论一致。

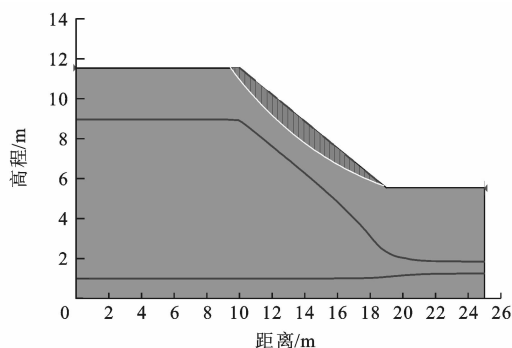


图 11 最危险滑动面

Fig. 11 Critical slip surface

为了对比分析,计算了稳态流边坡稳定性分析,结果见表 5。由表 5 知,各强度参数计算的安全系数从小到大排列为 F、E、B、C 和 D,即稳态流条件下,F 型参数的安全系数仍最小,仅为最大值 D 型的 50.2%(M-P 法)。虽然残余强度参数 E 计算得到的安全系数与 F 型参数的结果相近,但其滑坡深度达到 4.9 m,与实际破坏情况不符。

由上述分析知,因膨胀土边坡浅层坍塌时破坏面土体上作用的应力小,尤其溜坍深度为 0.5~2.5 m 时,其有效法向正应力小于 30 kPa,远比常规直剪试验的最小上覆压力(50 或 100 kPa)小。从边坡破坏的实际出发,低应力下的粘聚力与摩擦角的拟合值才能代表土体的真实强度,采用土体的非线性强度分析膨胀土坡的坍塌破坏,其结果符合实际。

表 5 稳态流下的边坡稳定性分析结果

Tab. 5 Analysis results of slope stability under steady seepage

强度参数	M-P 法	Ordinary 法	Bishop 法
B	1.49	1.39	1.49
C	2.11	2.00	2.11
D	2.21	2.12	2.21
E	1.15	1.05	1.15
F	1.11	1.00	1.12

### 3 结 语

膨胀土的三性导致开挖边坡坍塌并具有雨后发生和浅层性 2 大特点。当做稳定分析时,必须考虑低应力下土的抗剪强度及其非线性性质,实测的各抗剪强度均呈非线性,可用幂函数表达。低应力下的强度非线性增大,慢剪强度小于固结与快剪强度;高应力下的强度线性增加,慢剪强度大于固结和快剪强度。表层土体负孔隙水压消散直至变正,导致膨胀土坡安全系数的减小,而引起浅层破坏的主要原因之一是上覆压力小,土体吸湿后迅速膨胀,含水率大增,干密度减小,抗剪强度严重衰减。即使用残余强度或干湿循环强度参数来分析膨胀土边坡的稳定性,其结果也难与实际破坏相符。用极限平衡法进行膨胀土边坡稳定性分析,要想获得与浅层破坏一致的计算结果,需选择含低应力条件的非线性慢剪强度参数。本文只做了南宁膨胀土的试验和分析研究,结论的普遍适应性还有待进一步验证。

### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] 包承纲. 非饱和土的形状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15.  
BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1-15. (in Chinese)
- [2] 孙惠兰, 徐培华. 高等级公路膨胀土地段路基施工技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 1999, 16(4): 35-39.  
SUN Hui-lan, XU Pei-hua. Highway expansive soils roadbed construction technology[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 1999, 16(4): 35-39. (in Chinese)
- [3] 毛新虎. 公路膨胀土路堑边坡防护方案探讨[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(4): 49-53.  
MAO Xin-hu. Discuss of cutting slope treatment project for expansive soil on highway[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(4): 49-53. (in Chinese)
- [4] 郭军辉, 阎长虹, 夏良斌, 等. 某一级公路路基填土膨胀性试验[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(1): 85-89.

- GUO Jun-hui, YAN Chang-hong, XIA Liang-bin, et al. Experimental study on swelling property of subgrade soil in a first-class highway[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(1): 85-89. (in Chinese)
- [5] 肖杰,杨和平,李哈峰,等.低应力条件下不同密度的南宁膨胀土抗剪强度试验[J].中国公路学报,2013,26(6):15-21.
- XIAO Jie, YANG He-ping, LI Han-feng, et al. Shear strength test of Nanning expansive soil with various dry densities and low stresses[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 15-21. (in Chinese)
- [6] 汪明元,徐哈,杨洪,等.非饱和膨胀土边坡破坏机理与稳定性分析[J].南水北调与水利科技,2008,6(1):151-153, 158.
- WANG Ming-yuan, XU Han, YANG Hong, et al. Analysis methods of unsaturated expansive soil slope[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2008, 6(1): 151-153, 158. (in Chinese)
- [7] 程展林,李青云,郭熙灵,等.膨胀土边坡稳定性研究[J].长江科学院院报,2011,28(10):102-111.
- CHENG Zhan-lin, LI Qing-yun, GUO Xi-ling, et al. Study on the stability of expansive soil slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(10): 102-111. (in Chinese)
- [8] 吴珺华,袁俊平,卢廷浩.非饱和膨胀土边坡的稳定性分析[J].岩土力学,2008,29(增):363-367.
- WU Jun-hua, YUAN Jun-ping, LU Ting-hao. Stability analysis of unsaturated expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S): 363-367. (in Chinese)
- [9] 彭良泉,王钊.降雨入渗下非饱和膨胀土的性状研究及边坡稳定性分析[C]//中国土木工程学会土力学及岩土工程分会.第二届全国非饱和土学术研讨会论文集.杭州:浙江大学,2005:635-647.
- PENG Liang-quan, WANG Zhao. Study on unsaturated soil properties and slope stability analysis under rainfall infiltration[C]//China Civil Engineering Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Branch. The Second National Symposium on Unsaturated Soil. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 635-647. (in Chinese)
- [10] 殷宗泽,徐彬.反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2011,33(3):454-459.
- YIN Zong-ze, XU Bin. Slope stability of expansive soil under fissure influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 454-459. (in Chinese)
- [11] 徐彬,殷宗泽,刘述丽.膨胀土强度影响因素与规律的实验研究[J].岩土力学,2011,32(1):44-50.
- XU Bin, YIN Zong-ze, LIU Shu-li. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 44-50. (in Chinese)
- [12] 吕海波,曾召田,赵艳林,等.膨胀土强度干湿循环试验研究[J].岩土力学,2009,30(12):3797-3802.
- LU Hai-bo, ZENG Zhao-tian, ZHAO Yan-lin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3797-3802. (in Chinese)
- [13] 平扬,刘明智,郑少河.降雨入渗条件下的膨胀土边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(增1):4478-4484.
- PING Yang, LIU Ming-zhi, ZHENG Shao-he. Stability analysis of expansive soil slope with rainfall infiltration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4478-4484. (in Chinese)
- [14] 李振霞,王选仓,陈渊召,等.膨胀土的强度与力学特性[J].交通运输工程学报,2008,8(5):54-60.
- LI Zhen-xia, WANG Xuan-cang, CHEN Yuan-zhao, et al. Strength and mechanic property of expansive soil[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(5): 54-60. (in Chinese)
- [15] LADE P V. The mechanics of surficial failure in soil slopes[J]. Engineering Geology, 2010, 114(2): 57-64.
- [16] 杨和平,湛文涛,肖杰,等.南宁膨胀土作路堤填料的土性试验[J].中国公路学报,2011,24(1):1-7.
- YANG He-ping, ZHAN Wen-tao, XIAO Jie, et al. Soil property testing of Nanning expansive soil as embankment filler[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1): 1-7. (in Chinese)
- [17] FREDLUND D G, XING An-qing. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [18] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379-392.
- [19] 邹群,邹国平.高速公路生态护坡技术及其应用[J].筑路机械与施工机械化,2013,30(2):52-54.
- ZOU Qun, ZOU Guo-ping. Application of ecological slope protection technology to expressway[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2013, 30(2): 52-54. (in Chinese)
- [20] 胡俊,胡怀雯.水库地区公路边坡加固及土质大坝防渗处理[J].筑路机械与施工机械化,2013,30(3):48-50,55.
- HU Jun, HU Huai-wen. Highway slope reinforcement and impermeable treatment of earth dam in reservoir area[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2013, 30(3): 48-50, 55. (in Chinese)