

文章编号:1671-8879(2006)03-0010-04

# 膨胀土地区边坡活动带深度确定的吸力法

潘宗俊, 谢永利, 杨晓华, 徐 伟

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**应用 Mitchell 原理把吸力作为深度的函数,分别在西安—汉中高速公路南郑段 K86+060、K91+110 两处膨胀土边坡的坡顶和坡脚现场开挖观测井,利用张力计进行不同深度处吸力值的现场量测,确定两边坡最大吸力值和影响深度下的平衡吸力值;然后采用原状膨胀土进行水平土柱入渗试验,计算得到土体扩散率。根据以上量测和计算的参数确定大气影响深度,最后通过建立膨胀土边坡破坏模型方程,确定浅表层破坏深度。结果表明:两路堑边坡膨胀土吸力最大值均介于 70~80 kPa,膨胀土的活动带深度介于 1.71~1.74 m;浅表层破坏发生在活动带范围之内,其可能破坏深度为 1.59~1.72 m,二者深度十分接近,表明活动带深度以下的膨胀土层基本处于稳定状态,不受气候条件的影响。

**关键词:**道路工程;膨胀土;吸力;扩散率;活动带深度

**中图分类号:**U416.167 **文献标识码:**A

## Depth of Active Zone of Expansive Clay Slope

PAN Zong-jun, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, XU Wei

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** According to the principle of Mitchell, which expresses the function relationship between depth and suction, this paper researched expansive soil slope at Nanzheng area in Shaanxi Province along Xi'an-Hanzhong freeway. Through excavating observation wells on top and feet of slope on road cutting in K86+060 and K91+110, the suction values of different depths were measured by tensiometer, and the highest suction value and equilibrium soil suction of active zone depth were attained. Then the original expansive soils were tested in horizontal infiltrative experiments of soil column to attain diffusion coefficient of expansive soil. According to the Mithcell Formulation, the active zone depth was calculated. Finally through founding equation of expansive soil slope, the collapse depth of surface layer was gained. The results show that all the highest suction values of expansive soils of slope are between 70 kPa and 80 kPa. The active zone depth of expansive soils is between 1.71 m and 1.74 m. The collapse of surface layer occurs in active zone depth, and possible collapse depth is between 1.59 m and 1.72 m. Both depths are very close, which illustrate that expansive soil layer under the depth of active zone is stable. 3 tabs, 3 figs, 8 refs.

**Key words:** road engineering; expansive soil; suction; diffusion coefficient; depth of active zone

收稿日期:2005-05-16

基金项目:陕西省交通科技项目(2004E16)

作者简介:潘宗俊(1979-),男,辽宁辽阳人,博士研究生.

## 0 引言

膨胀土是一种吸水膨胀软化、失水收缩开裂的高塑性粘土,受大气降水和风化作用的影响非常显著,其反复胀缩变形及相应引发的强度衰减特性对膨胀土边坡存在长期潜在的破坏作用。膨胀土土层总是处于特定的自然地理条件之中,其中水分的变化与地形、地貌、气候及植被条件关系密切<sup>[1-3]</sup>。膨胀土活动带深度是指自然气候对土层湿度的影响深度,该深度受当地气候变化及变化持续的时间和土体结构所控制。膨胀土活动带深度是膨胀土边坡稳定性设计和病害处理的重要依据之一。大气环境干湿循环变化引发膨胀土表层土体反复胀缩变形和产生大量裂隙,进而导致边坡浅表层土体崩塌破坏。该类型破坏多发生在降雨过程中或紧随其后,极大地影响了高速公路的安全运营。

本文应用 Mitchell 原理把吸力作为深度的函数来预测吸力变化范围,选取西安—汉中高速公路南郑段膨胀土进行研究,分别在 K86+060、K91+110 两处的天然边坡坡顶和坡脚现场开挖观测井,使用张力计测定膨胀土层不同深度的吸力值,然后运用水平土柱试验确定膨胀土的扩散率,并根据南郑地区的气候特点确定该地区膨胀土干湿循环频数,最后借助 Mitchell 原理计算膨胀土受大气的影

## 1 基本原理

吸力法基于现场量测的吸力剖面、气候数据以及其他观测到的现场数据给出大致的估计,这种方法应用 Mitchell 原理把吸力作为深度的函数来预测吸力的变化范围。

Mitchell(1979)导出了土吸力值随气候循环变化的一维解析解

$$U(z) = U_e + 2U_0 \cos \frac{\pi z}{2Z_a} \exp \left[ -Z_a \left( \frac{n\pi}{\alpha} \right)^{1/2} \right] \quad (1)$$

式中: $U(z)$ 为土吸力随深度的函数(PF), $1PF = (1 + \lg 1) \text{kPa}$ ;  $U_e$ 为活动带深度以下的平衡土吸力(PF);  $U_0$ 为土吸力的最大变幅; $n$ 为气候变化的频率( $\text{cm}^2/\text{s}$ );  $\alpha$ 为扩散系数; $Z_a$ 为活动带深度(m);  $z$ 为深度(m)。

通过式(1)可以计算任意深度的土吸力。假定  $z=0$ ,即处于地表面,此时  $U(z) = U(0) = U_0$ ,则式(1)转化为式(2)

$$U(0) = U_e + 2U_0 \exp \left[ -Z_a \left( \frac{n\pi}{\alpha} \right)^{1/2} \right] \quad (2)$$

若令  $\Delta U_{\max} = U_0 - U_e$ ,由式(2)可以推出膨胀土活动带深度为

$$Z_a = \ln \left( \frac{2U_0}{\Delta U_{\max}} \right) / \sqrt{\frac{n\pi}{\alpha}} \quad (3)$$

根据式(3),测定了平衡土吸力、土吸力的最大变幅、扩散系数等参数,以期确定气候变化对膨胀土影响所达到的深度。

## 2 $U_0$ 和 $\Delta U_{\max}$ 的测定

### 2.1 土样常规指标的量测

西安—汉中高速公路穿越南郑境内分布有大量的膨胀土,在该地区的边坡取土,并根据《公路土工试验规程》进行了如下指标的试验工作(表1)。

表1 试验用土的物理力学指标

土样	K86+060	K91+110
天然含水量/%	24.36	26.41
液限/%	56.04	51.04
塑限/%	17.80	18.80
塑性指数	38.24	32.24
自由膨胀率/%	69	54
饱和粘聚力 $C_s/\text{kPa}$	10.0	11.2
饱和内摩擦角 $\varphi_s/(\circ)$	21.0	19.5

### 2.2 观测方法

分别在 K86+060、K91+110 坡顶和坡脚设置两处观测井,观测井的深度为 3 m,断面为 1.5 m × 1.5 m,开挖过程中及时用模板支护并用塑料薄膜遮盖防止水分散失。土吸力的量测仪器采用美国 Soilmoisture 公司生产的 2100F 型张力计。张力计由高进气值多孔陶瓷头与压力量测装置组成,适用于室内和野外非饱和土基质吸力的直接量测。因为边坡表层膨胀土吸力值超过了张力计的量测范围 90 kPa,所以张力计探头的布设深度从坡面下 0.35 m 开始,依次为 1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m。

坡顶和坡脚 0.35 m 处吸力值取算术平均值作为土吸力最大变幅值  $U_0$ ,选取观测井 3 m 深处的吸力值作为平衡土吸力值,试验之所以在 3 m 以下不再量测是因为基质吸力数值基本稳定。现场实测吸力与开挖深度的关系如图 1 所示。

由试验可知:

(1)随着时间的推移,张力计的读数不断变化,通常在插入土中 24 h 后读数稳定,反映土体的实际吸力值,而后随着气候影响土层含水量,吸力随之发生变化。

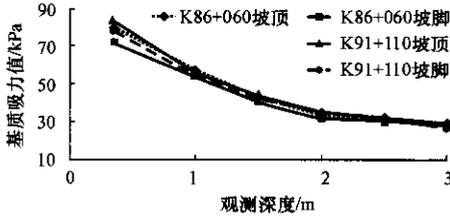


图1 现场实测吸力与开挖深度的关系曲线

(2) 观测深度范围内,膨胀土的基质吸力随着深度增加而减小,且在深度较浅 0.35~1.50 m 吸力变化较快;随着深度继续增加吸力下降缓慢,最后达到相对稳定的数值。

(3) K86+060、K91+110 边坡土吸力最大值  $U_0$  分别为 76.5 kPa、81.0 kPa,平衡土吸力值分别为 28.5 kPa、27.5 kPa。

### 3 扩散系数的确定

扩散系数确定的方法有两种:一是测出土水特征曲线,由土水特征曲线的斜率确定比水容量,并通过试验确定导水率,二者的比值即为扩散系数;二是通过水平土柱入渗试验,根据湿润锋锋面的含水率和时间关系进行计算<sup>[4]</sup>。采用水平土柱法测定土壤水分扩散率  $\alpha(\theta)$  公式为

$$\alpha(\theta) = -\frac{1}{2} (d\lambda/d\theta) \int_{\theta_0}^{\theta_i} \lambda d\theta \quad (4)$$

式中:  $\theta_0$  为土柱初始含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_i$  为饱和含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $x$  为水平距离 (cm);  $t$  为入渗时间 (s);  $\lambda$  为 Boltzmann 变换函数,  $\lambda = xt^{-1/2}$ 。

进行水平土柱吸渗试验时,在  $t$  时可测出土柱的含水率  $\theta$  分布,计算出各水平距离点的  $\lambda$  值,就可以得到  $\theta(\lambda)$  关系曲线。对  $\theta(\lambda)$  关系曲线用最小二乘法进行拟合进而得到不同含水率  $\theta$  的  $\lambda$  值,通过列表计算可得到相应于  $\theta$  值的  $d\theta/d\lambda$  和  $\int_{\theta_0}^{\theta_i} \lambda d\theta$  值。一般情况下,  $\theta$  与  $\lambda$  关系难以表达成一个解析式,将式(4)改写成差分形式。

$$\alpha(\theta) = -\frac{1}{2} (\Delta\lambda/\Delta\theta) \sum_{\theta_0}^{\theta_i} \lambda \Delta\theta \quad (5)$$

应用式(5)就可以计算出  $\alpha(\theta)$ 。

试验装置见图 2。分别在 K86+060、K91+110 按垂直方向取原状膨胀土,土柱尺寸为 15 cm×15 cm×40 cm,土柱物理指标见表 1。首先测定两土样的初始含水量,将原状膨胀土试样放入试验槽中,并覆盖塑料薄膜以防止土样中水分挥发。固定试验装置并保持水槽内水位略低于土柱层面,抽去挡板,开始计时,观察水前进时湿润锋的变化并记录湿润锋

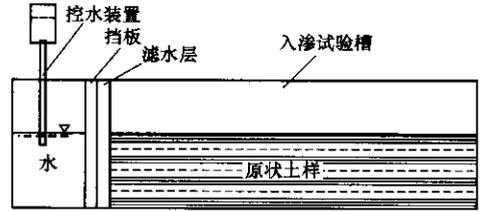


图2 水平土柱入渗试验装置图

的位移,待水前进到土柱的 3/4 时停止试验,记下总时间  $t$ ,测定土样各部分含水率,根据式(5)计算扩散率。

扩散率是以含水量为自变量的增函数,因此选择不同含水量所对应的扩散率,对于影响深度计算存在着较大的差别。基于偏安全考虑,选择不利条件下膨胀土的扩散率,即采用试验中含水量大于膨胀土天然含水量(通常低于 30%)的扩散率作为参数,结果见表 2。

表2 原状膨胀土扩散系数表

取样地点	$\theta/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$\bar{\lambda}/$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1/2}$ )	$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta}$	$\sum \bar{\lambda} \Delta\theta$	$D(\theta)/$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
K86+060	0.373	0.498	0.300	0.007 7	0.001 15
K91+110	0.375	0.472	0.220	0.011 8	0.001 30

注:  $\bar{\lambda}$ 、 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta}$  分别是相邻土样对应参数的平均值。

### 4 频数 $n$ 的确定和计算结果

#### 4.1 频数 $n$ 的确定

频数  $n$  是指在自然条件下,年度之间发生干湿循环的次数。频数  $n$  越小,就表明干湿循环间隔的时间越长。McKeen(1990)认为频数  $n$  的取值介于 0.5~1.5 之间。气候干燥地区  $n$  取下限,气候湿润地区  $n$  取上限<sup>[5]</sup>。根据气象资料,南郑地区为湿润地区,因此频数  $n=1.5$ 。

#### 4.2 计算结果

膨胀土边坡活动带深度计算可由式(3)求得,并将各参数量纲转化为 Mitchell 公式中的量纲,计算得出  $Z_a$ ,公式中所需参数及计算结果见表 3。

表3 膨胀土边坡活动带深度计算参数

取样地点	$U_0/\text{kPa}$	$\Delta U_{\text{max}}/$ kPa	$\alpha/$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$n/$ (次· $\text{a}^{-1}$ )	$Z_a/\text{m}$
K86+060	76.5	48.0	0.001 16	1.5	1.71
K91+110	81.0	53.5	0.001 30	1.5	1.74

### 5 路堑边坡浅表层破坏

#### 5.1 浅表层破坏过程

膨胀土边坡浅表层破坏过程可分为两个阶段:

(1)失水阶段:由于不均匀收缩作用产生裂隙和微裂隙,使膨胀土宏观结构遭受部分破坏,同时由于水分的损失,使其孔隙微孔隙暴露,膨胀土暂时具有较高的强度。

(2)吸水阶段:降雨情况下水分沿裂隙孔隙进入,并被强烈地吸附在微裂隙表面,产生楔裂压力,使膨胀土结构联结逐渐破坏,抗剪强度急剧降低。

5.2 路堑边坡浅表层可能破坏厚度计算模型的建立  
将膨胀土边坡土体作为研究对象,那么其承受的外力<sup>[6]</sup>为

$$F_{浮} = \gamma_b bh \quad (6)$$

$$F_{渗} = bh \gamma_w J \quad (7)$$

式中: $J$ 为渗透坡降; $\gamma_b$ 、 $\gamma_w$ 分别为土体的浮容重和水容重,且 $J = \sin\alpha$ ,故渗透力又可表示为 $F_{渗} = bh \gamma_w \sin\alpha$ 。

假设膨胀土边坡为无限均质边坡,故土条侧面的条间法向作用力有 $\Delta E = 0, \Delta X = 0$ (图3),因此极限状态方程为

$$(\gamma_b + \gamma_w)bh \sin\alpha = \gamma_b bh \cos\alpha \tan\varphi_s + C_s l \quad (8)$$

$$\text{即 } W \sin\alpha = N' \cos\alpha \tan\varphi_s + C_s l \quad (9)$$

式中: $l$ 为土条宽度; $h$ 为土条厚度; $\alpha$ 为坡角; $W$ 为土条自重; $N'$ 为土条底有效作用力。

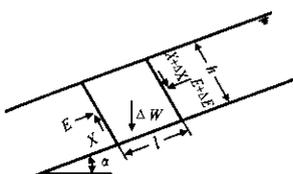


图3 膨胀土边坡浅表层破坏受力图

西安—汉中高速公路南郑段边坡比为1:1.75,试验测定浮容重 $\gamma_b$ 为8.80 kN/m<sup>3</sup>。利用表1中饱和直剪状态下 $C_s$ 和 $\varphi_s$ ,将各参数代入式(8),经计算得K86+060和K91+110边坡浅表层可能破坏厚度分别为1.59 m,1.72 m<sup>[7-8]</sup>。

## 6 结 语

(1)膨胀土的基质吸力随着深度增加而减小,且在深度较浅0.35~1.50 m吸力变化较快;随着深度继续增加吸力下降缓慢,最后达到相对稳定的数值。

(2)采用水平土柱入渗方法可确定原状膨胀土中水分的扩散率,扩散率随含水量的增加而提高。

(3)用吸力法确定膨胀土活动带深度的方法可行,公式简单,西安—汉中高速公路膨胀土边坡活动带深度为1.7 m。

(4)由式(8)计算结果可知,膨胀土边坡浅表层破坏深度接近该地区活动带深度,位于活动带深度以下的膨胀土层基本处于稳定状态,不受气候条件的影响。

## 参考文献:

### References:

- [1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.  
LIAO Shi-wen. Expansive Clay and Railway Engineering[M]. Beijing:China Railway Press,1984.
- [2] 李生林. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992.  
LI Sheng-lin. Engineering Geological Research for Expansive Soil in China[M]. Nanjing:Jiangsu Science and Technology Press,1992.
- [3] 王文生,谢永利,梁军林. 膨胀土路堑边坡的破坏型式和稳定性[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(1):20-24.  
WANG Wen-sheng, XIE Yong-li, LIANG Jun-lin. Classification of Expansive Clay Slope on Road Cutting[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005,25(1):20-24.
- [4] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988.  
LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Sen-chuan. Dynamics of Soil Water[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 1988.
- [5] 王小军,赵中秀,答治华. 膨胀岩的湿化特性及其对堑破浅层溜坍的影响[J]. 岩土工程学报,1998,20(6):42-46.  
WANG Xiao-jun, ZHAO Zhong-xiu, DA Zhi-hua. The Slaking Property and Its Effect on the Topsoil Slip of Swelling Rock Cut Slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998,20(6):42-46.
- [6] Wray W K, El-garhy B M, Youssif A A. Three-dimensional Model for Moisture and Volume Changes Prediction in Expansive Soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005,31(3):311-324.
- [7] 汪双杰,黄晓明,倪一鸿. 改性膨胀土路基受水特性[J]. 交通运输工程学报,2004,4(3):15-20.  
WANG Shuang-jie, HUANG Xiao-ming, NI Yi-hong. Infiltrating Properties of Modified Swelling Soil Subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004,4(3):15-20.
- [8] 杨和平,郑健龙. 云南楚大公路膨胀土的土性试验研究[J]. 中国公路学报,2002,15(1):10-14.  
YANG He-ping, ZHENG Jian-long. Experimental Research on Properties of Expansive Soil on Chu-Da Expressway in Yunnan[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1):10-14.