

基于固结试验的膨胀土地基变形预测方法

姚海林¹, 程平², 吴万平²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中交第二公路勘察设计研究院, 湖北 武汉 430052)

摘要: 由广西膨胀土的固结试验, 确定了广西膨胀土的体积变形指标。对依托工程膨胀土进行了现场静力触探试验, 根据比贯入阻力随深度的变化曲线特征, 确定了膨胀土活动区深度。给出了膨胀土裂隙开展深度的理论解, 膨胀土裂隙开展深度的计算值与静力触探试验确定的膨胀土活动区深度和现场观测的裂隙开展深度基本一致。最后介绍了基于固结试验基础上的膨胀土地基变形计算方法, 并在试验基础上给出了膨胀土地基变形的计算结果。以膨胀土地基变形量作为膨胀土地基的分类指标, 对膨胀土地基进行了分类。分类结果对膨胀土基础选型具有重要意义。

关键词: 土力学; 膨胀土; 活动区; 固结试验; 地基变形

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)21 - 3911 - 05

PREDICTION OF GROUND HEAVES IN EXPANSIVE SOILS BASED ON CONSOLIDATION TESTS

YAO Hai-lin¹, CHENG Ping², WU Wan-ping²

(1. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*; 2. *China Communications Second Highway Survey Design and Research Institute, Wuhan 430052, China*)

Abstract: Consolidation tests are applied to determine the indexes of volumetric deformation with respect to normal stress for expansive soils in Guangxi of China, and to predict ground heaves in expansive soils. Static cone penetration tests are conducted for expansive soil investigations, and test results are used to determine the active expansive zone. A theoretical solution is developed to determine cracking depth of expansive soils. The depths of the active zone from static cone penetration tests and theoretical solution are respectively identical to the results from observation in-situ. A simplified method for prediction of ground heaves in expansive soils based on consolidation tests is given. The index of ground heave in expansive soils is used as the basis for the classification of expansive soil foundations. The results of expansive ground heave have significant meaning to the choice of building foundations in expansive soil.

Key words: soil mechanics; expansive soil; active zone; consolidation test; ground heave

1 引言

我国近 22 个省份有膨胀土分布, 今后修筑的国道主干线大部分将穿越膨胀土地区。由于地形地貌和公路线形的制约, 膨胀土填方路堤和挖方路堑将

不可避免。膨胀土地区的建筑物、公路、铁路、机场、水利工程等经常遭受严重的破坏, 造成巨大的经济损失。从已建和在建的高速公路情况看, 膨胀土地区高速公路往往经过多年运行, 其路基仍不稳定, 还在产生路基沉陷, 路堤边坡坍塌也时有发生, 混凝土板断裂、甚至产生较大的错台等病害。膨胀

收稿日期: 2004 - 11 - 02; **修回日期:** 2004 - 12 - 23

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目(2002 318 00014)

作者简介: 姚海林(1965 -), 男, 博士, 1986年毕业于武汉水利电力学院水利水电工程专业, 现任副研究员, 主要从事软基处理、岩土工程地质灾害的防治、非饱和土及特殊土力学方面的研究工作。E-mail: hlyao@whrsm.ac.cn.

土地基变形是造成膨胀土地区地质灾害的主要原因。因此，对膨胀土地基变形的有关问题进行研究具有十分重要的意义。

当净法向应力或基质吸力的数值发生变化时，非饱和膨胀土的体积就会发生变化。膨胀土地基的变形取决于土的性质和初始状态。在净法向应力为常数的情况下，非饱和膨胀土会由于环境变化造成基质吸力的改变而发生膨胀和收缩。一些研究人员提出了基于基质吸力状态变量发生变化的地基变形预测方法^[1]，由于在基质吸力的测量方面遇到了很大困难，这种测量方法难于在工程实际中得到广泛的应用。文[2, 3]给出了基于一维固结试验结果的膨胀土地基的变形预测方法，在这种确定地基变形的预测方法中，毋须量测基质吸力。基于一维固结试验结果的膨胀土地基的变形预测方法主要有自由膨胀固结试验法、常体积固结试验法和双固结试验法。这些方法的应用必须考虑现场的应力路径，并且必须考虑取样扰动的影响，否则地基变形的计算结果会与实际情况有较大的出入。文[4, 5]认为体积收缩与含水量的变化呈线性关系，可以利用体积收缩系数进行膨胀土地基变形预测，但没有考虑应力的变化对地基变形的影响。

本文在广西膨胀土固结试验的基础上，进行了膨胀土地基变形计算，为膨胀土地基的分类和膨胀土地基上的建筑的基础选型提供了依据。

2 建立在固结试验基础上的膨胀土地基变形预测

2.1 固结试验数据的校正

文[6]认为恒体积固结试验是预测膨胀土变形最好的方法。用等效基质吸力的概念，最大膨胀压力可以用常规的恒体积得到。如果没有基质吸力，理论上最大膨胀压力就等于产生初始体积条件的有效应力。由于土样扰动的影响，传统的试验方法过低地估计了膨胀压力 σ'_s ，因此需对膨胀压力进行修正，从而得到修正后的膨胀压力 σ'_{sc} 。图1中OMN代表原始压缩曲线，某一个地质时期，土层沿虚线M1卸载，在干燥或者吸力增加的情况下(假定有效应力没有变化)，孔隙比沿1→2减小。土样在点2从地面取出，取出过程中假定土样体积变化忽略不计。恒体积膨胀试验沿着2→3→4路径，如果没有土样扰动影响，点4对应的压力即为膨胀压力。由于土样扰动影响，吸力松弛很快，实际测得的膨胀压力在点3。

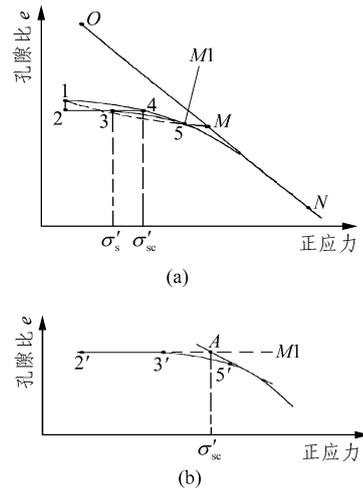


图1 扰动土样恒体积膨胀试验数据的修正

Fig.1 Correction of constant volume swell test data for disturbed sample

因此，膨胀压力可以按下列方法进行修正：(1) 画出实验室实测的固结压缩曲线2'→3'→5'；(2) 找出最大曲率点5'；(3) 过点5'画切线与2'→3'直线的沿长线交于点A；(4) 点A对应压力即为校正的膨胀压力 σ'_{sc} 。

校正的膨胀压力 σ'_{sc} 比未校正的膨胀压力 σ'_s 大得多。一旦得到初始有效应力条件和校正的膨胀压力 σ'_{sc} ，膨胀土的变形就可以从常规膨胀回弹曲线得到的膨胀指数和最终应力条件求出。

2.2 应力状态的确定

膨胀土的总膨胀量的主要因素有3个，即体积的变化指数、现在的应力状态和将来的应力状态。除了土的性质，如干密度和含水量外，膨胀土的总变形量也是施加于土样上的总应力的函数。在试验中，将当前的原位应力状态投影到净法向应力平面上，称为“校正”膨胀压力。测得的校正膨胀压力代表了等效的上覆压力与基质吸力之和。等效基质吸力是指土的基质吸力在净应力平面上的投影。这样，通过固结试验就可以测到原位应力状态(在总应力平面上)，而不必去测应力的各个分量。图2为膨胀土在浸水过程中“实际”和“分析”用应力路径。

在通过固结试验确定目前原位应力状态和膨胀指数后，就可进行分析，预测应力状态将来的可能变化。根据地区经验和气候条件，可以预测施工结束若干年后的应力状态。总应力可能因开挖基坑、置换土料或其他加荷而发生变化。将来可能发生的应力状态通常假定为在常净法向应力作用下，土的最终基质吸力变为0，即假定膨胀土100%饱和，最后的应力状态为

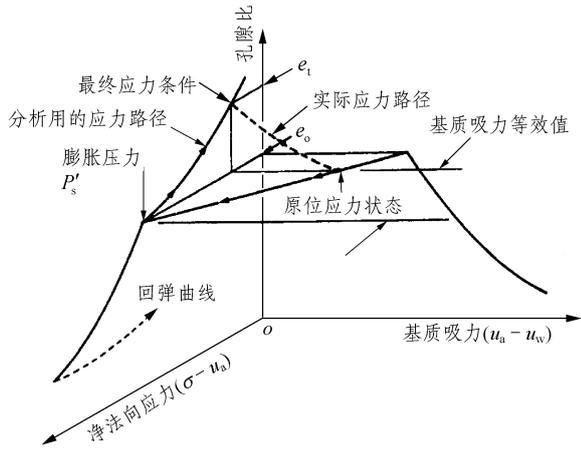


图 2 膨胀土在浸水过程中“实际”和“分析”用应力路径
Fig.2 Idealized and actual laboratory stress paths for the constant volume oedometer test

$$\sigma'_f = \sigma'_0 \pm \Delta\sigma - u_{wf} \quad (1)$$

式中： σ'_f 为最后有效应力， σ'_0 为初始条件下总上覆应力， $\Delta\sigma$ 为由于开挖或超载引起的总应力的变化， u_{wf} 为估算的最后的孔隙水压力。

2.3 建立在固结试验基础之上的膨胀土地基变形预测

根据固结试验回弹曲线，膨胀土地基的最后孔隙比可写为

$$e_f = e_o - C_s \lg \frac{\sigma'_f}{\sigma'_{sc}} \quad (2)$$

式中： e_o 为初始孔隙比， e_f 为最后孔隙比， σ'_{sc} 为由恒体积试验中校正的膨胀压力， σ'_f 为最后有效应力， C_s 为膨胀指数。

土层的总变形为各层土变形之和，则

$$\rho = \sum_{i=1}^n \Delta z_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_i}{(1+e_o)_i} z_i = \sum_{i=1}^n \frac{C_s z_i}{(1+e_o)_i} \lg \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{sc}} \right)_i \quad (3)$$

式中： ρ 为总隆起变形， Δz_i 为第 i 层土的隆起变形， z_i 为第 i 层土的初始厚度， $\Delta e_i = (e_f - e_o)_i = [C_s \lg(\sigma'_f / \sigma'_{sc})]_i$ 为第 i 层土的初始孔隙比的变化， n 为土层的层数。

3 膨胀土的活动区

膨胀土问题主要是由于膨胀土上部几米土层含水量变化引起。深层膨胀土出现地质灾害十分少见。浅部膨胀土地层含水量的变化主要受气候环境条件影响，受气候环境条件影响的区域称之为季节波动区或活动区。活动区是膨胀土地区一种特有的地质现象。膨胀土风化是在一定的大气风化营力作

用下的结果。水可以加强甚至决定其他风化营力的作用。温度的变化主要对土体产生机械破坏和破碎。因此可用湿度的变化、温度的变化、以及力学参数的变化来确定膨胀土的活动区的深度。本文分别采用了膨胀土的力学参数的变化和膨胀土裂隙变化的理论解来确定膨胀土的活动区。

3.1 利用力学参数的变化确定活动区

膨胀土在周围环境作用下，土体经过多次往复循环的缩胀变形，土体原有结构发生破坏，产生裂隙，其强度必然会大大地降低，强度的降低为膨胀土的活动区的划分提供了依据。采用静力触探试验可以测试土层对探头的比贯入阻力，比贯入阻力反映土层的物理力学特性，通过比贯入阻力的大小确定不同土层的密实度和结构强度。

图 3 所示为广西白色一乐业公路 K58+100 膨胀土试验点的单桥静力触探试验 P_s-H 关系曲线。地表土体风化强烈，比贯入阻力最小，随着深度增加，土体风化程度减弱，比贯入阻力逐渐增大，直到一定深度处，强度显著提高，该处以上土层为活动区。由图 3(a)，(b)孔静力触探曲线可明确地判断，该

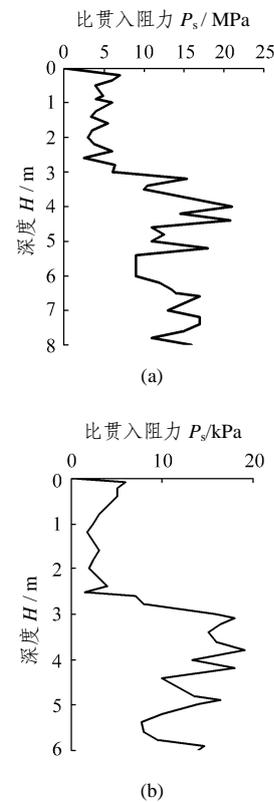


图 3 百色路 K58+100 膨胀土单桥静力触探 P_s-H 关系曲线
Fig.3 Curves in terms of specific penetration resistance and depth of expansive soil layer for Baile highway at chainage K58+100

试验点的膨胀土的活动区的影响深度为 3.0~4.0 m。与现场试坑观测到的竖向裂隙发育深度 3.6 m 相一致。因此，利用膨胀土的力学参数的变化确定膨胀土活动区深度是一种直观和可靠的方法。

3.2 利用裂隙深度确定活动区

膨胀土是多裂隙粘性土，膨胀土地区地表随处可见张开裂隙。张开裂隙一般都是大气营力的作用而产生的风化裂隙，其中包括胀缩裂隙。这些可见裂隙发育发展成为长大贯通裂隙，通常称之为地裂。地质构造作用或地震产生的裂隙不属于本文的研究范畴，因此，膨胀土裂隙发育深度，在一定程度上反映了膨胀土活动区的深度。膨胀土的地裂开展深度可以按理论公式进行计算^[7]，也可通过地区调查确定。

在非饱和土中，基质吸力不仅影响剪切强度，而且影响其抗拉强度。土的抗拉强度^[8]为

$$t = -0.5[c' + (u_a - u_w) \tan \phi'] \cot \phi' \quad (4)$$

式中： t 为抗拉强度， c' 为土的粘聚力， u_a 为孔隙气压力， u_w 为孔隙水压力， ϕ' 为土的内摩擦角。

当裂纹尖端水平应力超过土的抗拉强度时，裂隙开始扩展。利用裂隙开展的弹性解确定裂隙开展深度。根据裂纹尖端的平衡条件可得

$$z_c = \frac{s_0 + ct}{\frac{s_0}{w} + D} \quad (5)$$

式中： s_0 为地表膨胀土的吸力； z_c 为裂隙深度； w 为地下水位埋深； $c = (1 - \mu)/(1 - 2\mu)$ ， μ 为泊松比； $D = \mu r/(1 - 2\mu)$ ， γ 为土的重度。

取土体特性参数： $\mu = 0.3$ ， $t = 10$ kPa， $\gamma = 20$ kN/m³， $s_0 = 150$ kPa(根据地表膨胀土的含水量和膨胀土的 SWCC 曲线确定或者现场实测确定)， $w = 4.95$ m(为基岩的埋置深度)。根据式(4)，裂隙扩展深度 z_c 为

$$z_c = \frac{s_0 + ct}{\frac{s_0}{w} + D} = \frac{150 + 1.75 \times 10}{\frac{150}{4.95} + 15} = 3.7 \text{ (m)}$$

由此可知，膨胀土的裂隙的理论计算结果与现场观测到的地裂开展深度、现场静力触探曲线确定的活动区深度较为接近。也是膨胀土活动区深度确定的一种行之有效的方法。

4 广西依托工程原位膨胀土地基变形预测

4.1 广西依托工程膨胀土的固结试验

图 4 为广西白色—乐业公路(K58+100 深度：1.60~1.85 m)膨胀土恒体积固结试验曲线。初始孔隙比 $e = 0.61$ ，膨胀指数 $C_s = 0.05$ ，由恒体积试验中校正的膨胀压力 $\sigma'_{sc} = 180$ kPa。

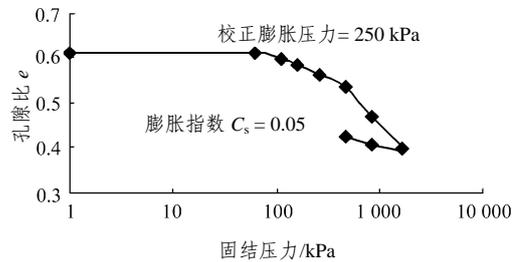


图 4 白色—乐业公路膨胀土恒体积固结试验曲线
Fig.4 Curve from constant volume consolidation test of expansive soil of Baile highway

4.2 试验点工程地质状况

试验场地位于百色—乐业二级公路百色西北乐村，属丘陵地貌，试验点为一小山丘。以残坡积土为主。土质致密，切口光滑细腻。地表有 0.5 m 左右的灰色耕植土，含少量植物根、虫孔等，未见地下水。地质柱状情况见表 1。

表 1 百乐路 K58+100 地质柱状情况
Table 1 Geological column for Baile highway at chainage K58+100

分层厚度/m	柱状图	岩性描述
4.95		膨胀土：红、黄、白、灰色斑杂状，稍湿，硬塑，夹有黑色铁锰质结核，微裂隙较发育，3.6 m 有一竖向裂隙最为发育，裂隙间充填一层青灰色粘土
8.35		泥岩：灰黄色，稍湿，强风化，有竖向裂隙，新鲜面呈青灰色，细腻光滑，质地坚硬，手握难碎

4.3 试验点膨胀土的基本物理力学性质

试验点的膨胀土物理力学性质如表 2 所示。

根据文[9]，膨胀土的分类标准指标^[10]和分类结果如表 3 所示。

4.4 试验点膨胀土地基变形计算结果

最终应力状态假定为在常净法向应力作用下，膨胀土完全饱和，土的最终基质吸力变为 0， $\sigma'_f = \sigma'_0 = 19.7 \times 1.8 = 35.5$ (kPa)。

表 2 膨胀土物理力学性质

Table 2 Character indexes of expansive soil

取样地点	取样深度 /m	含水量 /%	湿密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	干密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%	塑指 /%	缩限 /%	孔隙比	c_d /kPa	φ_d /($^\circ$)
K58+100	0.9~1.1	21.3	1.97	1.63	83	50.3	23.9	26.4	19.4	0.72	22.6	27.8

表 3 广西依托工程膨胀分类成果

Table 3 Classification result for Guangxi expansive soil

测试样名称	自由膨胀率 F_s /%	塑性指数 I_p /%	标准吸湿含水率 /%	膨胀潜势分类
K58+100	50	24.6	3.17	弱

假定场区膨胀土土层是均匀的，按 1 层土来考虑，建筑场区膨胀土地基总变形按式(1)计算：

$$\rho = \sum_{i=1}^n \Delta z_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_i}{(1 + e_0)_i} z_i = \sum_{i=1}^n \frac{C_s z_i}{(1 + e_0)_i} \lg \left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{sc}} \right)_i = \frac{0.05 \times 3.6}{(1 + 0.62)} \times \lg \frac{35.5}{250} = 94 \text{ (mm)}$$

膨胀土地基的评价，应根据地基的膨胀、收缩变形对构造物的影响程度进行。以膨胀土地基变形变形量 ρ 作为分类指标对膨胀土地基进行分类。由于 $40 \text{ mm} \leq \rho < 100 \text{ mm}$ ，膨胀土地基分类等级为 III 级，地基变形较大，基础必须加大埋深和采取保湿措施。在坡顶和坡腰的建筑物产生破坏的可能性较大。整体结构厂房和筒仓可采用筏板基础。

5 结 论

(1) 膨胀土地基的活动区可用现场静力触探试验确定，也可用膨胀土的裂隙的定量描述来确定，结果与现场探坑观测结果基本一致，能够满足膨胀土地基变形计算的精度的要求。

(2) 利用建立在膨胀土的恒体积固结试验基础之上的膨胀土地基变形计算方法，能够很好地反映膨胀土地基的天然状态，可以用做天然地基分类的指标。膨胀土地基分类对膨胀土基础选型具有重要意义。

参考文献(References):

[1] Hamberg D J. A simplified method for predicting heave in expansive soils[M. S. Thesis][D]. Colorado: Colorado State Univ., Fort Collins, 1985. 275.
 [2] Jennings J E. The prediction of amount and rate of heave likely to be

experienced in engineering construction on expansive soils[A]. In: Proc.2nd Int. Conf. Expansive Clay Soils[C]. Austin: Texas A & M Univ., College Station, 1969. 26 - 30.
 [3] Fredlund D G, Husan J U. One-dimensional consolidation theory: unsaturated soils[J]. Can. Geotech. J., 1979, 16(3): 521 - 531.
 [4] Nelson J D, Miller D J. Expansive Soils: Problems and Practice in Ground and Pavement Engineering[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1992. 105 - 116.
 [5] 姚海林, 程平, 吴万平. 基于收缩试验的膨胀土地基变形预测方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1 688 - 1 692.(Yao Hailin, Cheng Ping, Wu Wanping. A simplified method for predicting heave in expansive soils grounds based on three-dimensional shrinkage tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1 688 - 1 692.(in Chinese))
 [6] Fredlund D G. Prediction of ground movements in swelling clays[A]. In: the 31st Annu. Soil Mech. Found. Eng. Conf.[C]. Minneapolis: Univ. of Minnesota, 1983. 62 - 68.
 [7] Yao H L, Xu Y Z, Ge X R. Assessment of slope stability of expansive soils due to infiltration of rain[A]. In: Proc. Int. Symposium on Water Resources and the Urban Environment[C]. Wuhan: [s. n.], 2003. 615 - 618.
 [8] Morris P H, Graham J, Williams D. Cracking in drying soil[J]. Can. Geotech. J. 1992, 29(1): 263 - 277.
 [9] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路路基设计规范(JTGD30 - 2004)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. 146 - 150.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Subgrades(JTGD30 - 2004)[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. 146 - 150.(in Chinese))
 [10] 姚海林, 杨洋, 程平, 等. 膨胀土壤标准吸湿含水率及其试验方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 856 - 859.(Yao Hailin, Yang Yang, Cheng Ping, et al. Standard moisture absorption water content of soil and its testing standard[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 856 - 859.(Chinese))