

压实膨胀土的膨胀变形规律与计算模式

张爱军¹, 哈岸英², 骆亚生¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 宁夏水利水电勘测设计院, 宁夏 银川 750000)

摘要: 以陕西安康压实膨胀土为对象, 通过不同初始干重度、初始含水率和上覆压力的一系列膨胀量试验, 得到了人工压实膨胀土的膨胀变形随以上 3 种因素变化的规律, 并总结提出了考虑初始含水率、初始干重度和上覆压力 3 种因素的耦合变化, 满足工程精度要求的膨胀量计算模式, 并对该计算模式进行了验证, 证实了其正确性。结果表明: 在实际工程中, 可以通过有限的几组膨胀量试验得到计算模式的参数, 用文中提出的计算模式直接计算任意初始干重度、初始含水率的土体在任意压力下的膨胀变形量, 具有重要的实用价值。

关键词: 土力学; 膨胀土; 压实; 计算模式; 规律

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)07-1236-06

SWELLING DEFORMATION AND CALCULATION METHODS OF COMPACTED EXPANSIVE SOIL

ZHANG Ai-jun¹, HA An-ying², LUO Ya-sheng¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture & Forestry, Yangling 712100, China; 2. Ningxia Reconnaissance Design Institute of Water Conservancy and Hydraulic Power, Yingchuan 750000, China)

Abstract: With compacted expansive soil in Ankang city of Shanxi province, by a series of swelling capacity laboratory tests with different initial dry densities, moisture contents and pressures, the characteristics of swelling deformation with the above three parameters were found. The calculation methods of swelling capacity of compacted expansive soils, which can fulfil the accuracy requirements of engineering and take into account the coupling effects between initial dry density, initial moisture content and pressure are summarized. The correctness of the pattern has been confirmed too. In engineering, the pattern can be utilized to calculate swelling deformation of compacted expansive soil, which can have any initial dry density, initial moisture content and pressure, with several swelling capacity tests to obtain the parameters.

Key words: soil mechanics; expansive soil; compaction; calculate pattern; rules

1 引言

膨胀土的胀缩性、超固结性和裂隙性, 以及其强度的水敏感性对其上的结构产生较为强烈的影响, 给工程建设带来了极大的危害。据统计, 全世

界每年由于膨胀土的这种危害造成的损失可达近百亿元。研究膨胀土的膨胀变形规律及其计算的模式, 对于认识膨胀土的性质、优化工程设计, 从而进一步提出工程处理措施, 具有十分重要的经济意义和工程实践价值。

在公路、水利和土木建筑工程中, 大量遇到用

收稿日期: 2004-07-27; **修回日期:** 2004-10-19

作者简介: 张爱军(1964-), 男, 1985年毕业于武汉水利电力学院农田水利系, 现为博士研究生, 高级工程师, 主要从事水利工程岩土力学方面的研究工作。E-mail: zaj@nwsuaf.edu.cn.

人工压实膨胀土作为基础的情况,而这部分压实膨胀土一般与建筑物紧密接触,其遇水性质改变对建筑的安全造成了极大的影响。研究人工压实膨胀土的膨胀规律是进行膨胀土与建筑物相互作用研究的关键。人工压实膨胀土与原状膨胀土性质有所不同,由于在压实过程中的结构再排列,使得其膨胀性较原状膨胀土大几倍甚至更多^[1,2]。

文[3~5]通过在固结仪上对压实膨胀土的膨胀量试验得出了膨胀土的膨胀变形量与含水率呈直线关系、膨胀量与上覆压力呈指数关系的结论,并给出了相应的拟合关系模式,用这种模式分析了宁夏渠道的浸水膨胀量得到了与实测较为一致的结果。但是文中给出的计算模式只是针对单变量而言的。实际上,膨胀土的膨胀量与土体的矿物成分、结构、初始含水率、初始干重度、上覆压力等多个因素有关^[2,5-9]。对于特定的土体而言,膨胀量与初始含水率、初始干重度和上覆压力有关,这些因素对膨胀量的影响是耦合的。给出单个因素与膨胀量的关系不能很好地反应这种耦合作用。其他诸多文献对于膨胀量与各因素之间的关系,也只是给出单因素计算模式,本文以陕西安康膨胀土为对象,通过不同密度、不同含水率和上覆压力的一系列膨胀量试验,得到了人工压实膨胀土的膨胀变形与各因素的变化规律,并总结提出考虑初始含水率、初始干重度和上覆压力三因素耦合变化,满足工程精度要求的膨胀量计算模式,并对该模式进行了验证,证实了其正确性。该计算模式可以直接应用于工程实际,来估算人工压实膨胀土的膨胀变形量,具有

重要的实用价值。

2 膨胀土的膨胀变形试验

试样取自陕西安康刘家梁,为中膨胀性棕黄色黏土。试验总取得 3 组试样,同一组均取得 5~10 个样品。取样深度为 1.0~2.0 m。土化学分析(包括:易溶、中溶和难溶盐测定, pH 值和有机质测定)表明:3 组试样的易溶盐含量均在 0.053% 以下,其中溶盐和难溶盐的含量极其微小,有机质含量为 1.35%, pH 值为 6.9~7.3。这说明南方地区膨胀土由于气候温和湿润,上部土体受到雨水的长期淋滤,盐分含量较少,与北方膨胀土有一定差别。黏土矿物成分分析(包括:差热分析、X 衍射分析、硅铝率、半倍氧化物比值和阳离子交换总量分析等)表明:3 组土的差热曲线基本相似,深吸热谷为 130~150, X 衍射晶面间距的最大峰值在 3.36~3.37 Å, 硅铝率为 3.96~4.70, 硅和倍半氧化物的比值为 2.81~3.33。这些结果证明,土样黏土矿物质以伊利石为主,并含有少许的高岭石、蒙脱石和石英。用半定量的方法得到 3 组土样的矿物组成如表 1 所示。从黏土矿物组成可以看出 3 种土样均是以伊利石和伊利石-蒙脱石混层为主的膨胀土。土样的物理试验结果见表 2 所示。试验表明土样自由膨胀量均超过 40%, 根据威廉姆斯(Williams, 1958)分类图以及自由膨胀量的数据可以判定该土为中膨胀性黏土。

总共进行了 38 组不同初始含水率、不同初始干

表 1 土样黏土矿物成分组成表

Table 1 Clay mineralogical constitution of soil samples

土样 编号	<0.002 mm 粒径在全 土中百分比含量/%	<0.002 mm 粒径中黏土矿物成分含量/%				全土中黏土矿物成分含量/%			
		伊利石	高岭石	蒙脱石	石英	伊利石	高岭石	蒙脱石	石英
1	9.0	55	25	15	5	5.0	2.3	1.4	0.5
2	29.5	55	25	15	5	16.2	7.4	4.4	1.5
3	26.7	60	22	15	3	16.0	5.9	4.0	0.8

表 2 土样基本物理力学指标汇总表

Table 2 Basic physical parameter of soil samples

土样 编号	取样深 度/m	比重	含水率 /%	干重度 /kN·cm ⁻³	液限/%	塑限/%	缩限/%	收缩率/%	饱和度/%	自由膨胀量/%	分类
1	1.3	2.72	17.6	17.2	40.3	20.2	11.3	33.6	82.6	55.4	CI
2	1.3	2.73	20.3	15.9	42.9	22.2	9.9	39.9	77.7	64.7	CH
3	2.0	2.73	23.8	15.6	45.6	23.1	11.9	38.2	86.6	58.8	CH

重度的无荷载单向膨胀量试验，试验结果表明，膨胀土的垂直单向膨胀量随初始含水率的增加而减少，随土样干重度的增加而增加。通过不同含水率和干重度的有荷载单向膨胀试验表明，膨胀量随着上覆压力的增大而减少。

3 膨胀量计算模式

3.1 考虑初始含水率和初始干重度 2 个因素耦合的无荷载膨胀量计算模式

膨胀土的单向膨胀变形大小用膨胀量 V_h 表示如下：

$$V_h = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (1)$$

式中： H_0 为土样原始高度， ΔH 为膨胀后土样高度的变化。

文[3~5]研究表明，膨胀量与初始含水率之间呈直线关系。为了反映不同干重度的影响，这里用饱和含水率与初始含水率差与饱和含水率之比，即 $w_r = \frac{w_m - w_0}{w_m}$ (姑且定义为容势含水比)对无荷载膨胀量试验结果进行归一，其中， w_m 为饱和含水率， w_0 为初始含水率，得到如图 1 所示的关系。

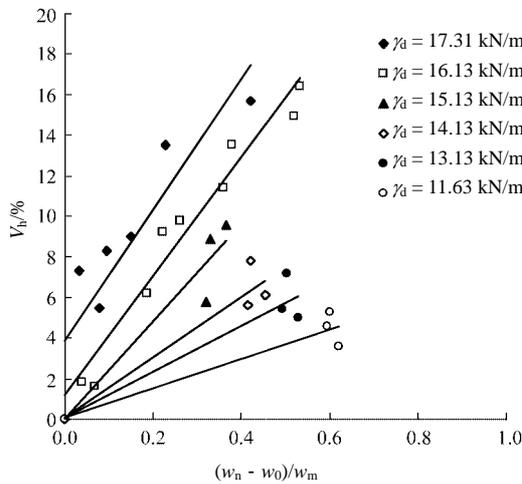


图 1 含水比 w_r 与无荷载膨胀量 V_h 的关系曲线
Fig1 Curves of no pressure swelling capacity with w_r

含水比实际上是土体原始孔隙中空气占用的孔隙能够充填的孔隙水量与饱和含水率的比值，表征孔隙中可能再含孔隙水的能力，可以很好地表征膨胀土的膨胀潜势，是膨胀土研究中一个较为简单而有效的指标。从图 1 中可以看出，同一干重度的土样膨胀量随含水比的增加而增加，两者的关系可以用直线表示，其形式如下：

$$V_h = aw_r + b \quad (2)$$

式中： V_h 为垂直膨胀量(%)； w_r 为含水比， $w_r = \frac{w_m - w_0}{w_m}$ ， w_m 为饱和含水率； w_0 为初始含水率； a ， b 为试验参数。

从以上试验结果得到试验参数 a ， b 的值如表 3 所示。

表 3 试验参数 a ， b 值
Table 3 Testing parameter a ， b

干重度/ $kN \cdot m^{-3}$	a	b
17.31	32.30	3.87
16.13	29.24	1.19
15.13	23.96	0.02
14.13	14.99	0.04
13.13	11.40	0.05
11.63	7.34	0.04

将 a 值、初始干重度 γ_d 与水的密度 γ_w 之比的关系绘制成关系曲线如图 2 所示；将 b 值、初始干重度 γ_d 与水的比重 γ_w 之比的关系绘制成关系曲线如图 3 所示。

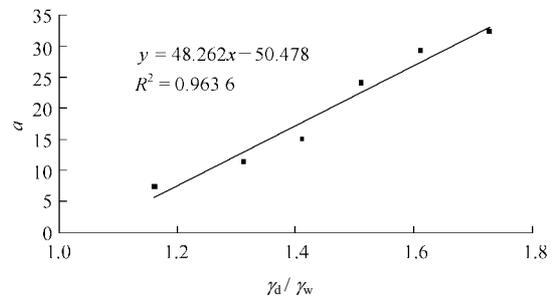


图 2 γ_d / γ_w 与参数 a 的关系曲线图
Fig.2 Curve of γ_d / γ_w and parameter a

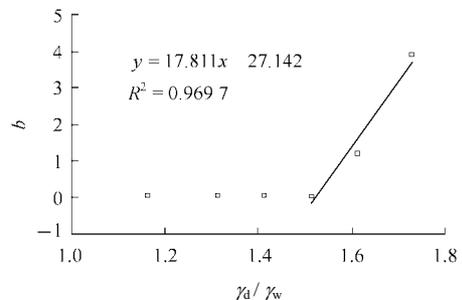


图 3 γ_d / γ_w 与参数 b 的关系曲线图
Fig.3 Curve of γ_d / γ_w and parameter b

从图中可以得到， γ_d / γ_w 与 a 可以用直线方程表

征如下：

$$a = c \frac{\gamma_d}{\gamma_w} + d \quad (3)$$

式中： c, d 为试验参数，对于本次试验而言，其值分别为 48.3 和 -50.5。

$$b = \begin{cases} 0 & (\gamma_d \leq \gamma_m) \\ e \frac{\gamma_d}{\gamma_w} + f & (\gamma_d > \gamma_m) \end{cases} \quad (4)$$

式中： e, f 为试验参数，对于本次试验而言，其值分别为 17.8 和 -27.1； γ_m 为界限干重度，对于本次试验而言，其值为 15.23 kN/m³。

这样无荷载膨胀量与含水率、干重度的关系可以用如下统一的公式表征为

$$V_h = \begin{cases} \left(c \frac{\gamma_d}{\gamma_w} + d \right) w_r & (\gamma_d \leq \gamma_m) \\ \left(c \frac{\gamma_d}{\gamma_w} + d \right) w_r + e \frac{\gamma_d}{\gamma_w} + f & (\gamma_d > \gamma_m) \end{cases} \quad (5)$$

式中： γ_m, c, d, e, f 为需要试验得到的参数，可通过试验得出。

对于本次试验而言，其公式可表示为

$$V_h = \begin{cases} \left(48.3 \frac{\gamma_d}{\gamma_w} - 50.5 \right) w_r & (\gamma_d \leq 15.23 \text{ kN/m}^3) \\ \left(48.3 \frac{\gamma_d}{\gamma_w} - 50.5 \right) w_r + 17.8 \frac{\gamma_d}{\gamma_w} - 27.1 & (\gamma_d > 15.23 \text{ kN/m}^3) \end{cases} \quad (6)$$

3.2 上覆压力与膨胀量的计算模式

关于上覆压力与膨胀量的关系目前已经提出了许多计算公式。文[10]的一维膨胀理论认为，在弹性范围内，在有侧限的情况下，根据弹性理论和经验公式可以得到垂直向的膨胀量可以用以下公式计算：

$$V_{hp} = V_h \left(1 - \frac{\ln \sigma_z}{\ln \sigma_{\max}} \right) \quad (7)$$

式中： V_{hp} 为在压力作用下的膨胀量， σ_z 为作用于土体的垂直向的应力， σ_{\max} 为膨胀变形为 0 时的最大膨胀压力。

文[2]提出压力作用下膨胀变形按照以下公式计算：

$$V_{hp} = A \ln \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_z} \quad (8)$$

式中： A 为参数，与含水率有关，对于同一种土，其只与初始含水率有关。

文[3]提出膨胀量与压力的关系为

$$V_{hp} = A \left(\frac{\sigma_z + P_a}{P_a} \right)^{-B} \quad (9)$$

式中： A, B 为试验参数， P_a 为大气压力。

文[1]提出的计算公式为

$$V_{hp} = 10^{A+B\sigma_z} \quad (10)$$

式中： A, B 为试验参数。

式(7)各参数均有明确的物理意义，能较好地地表征膨胀量随压力减少的规律，但是公式在上覆压力为 0 时无意义，不能反应无荷载膨胀量的计算问题；式(8)同样不能反应压力为 0 时的膨胀量的计算问题。式(9)，(10)均可以表示膨胀量随压力增加而减少的规律，但是式(10)将压力作为指数项，其值的少许变化对膨胀量的影响极大，不利于拟合参数的稳定性；式(9)将压力通过与大气压力的比值使之无量纲化，且可以反应压力为 0 时膨胀量的情况，因此本文以式(9)来对膨胀量与上覆压力的关系进行拟合。

式(9)中当压力为 0 时，膨胀量值等于参数 A ，因此 A 值的物理意义应该是无荷载膨胀量值，这样 A 值就可以确定了。而 B 值随初始含水率、初始干重度的不同而不同，需要由试验确定。这样实际上式(9)中只有 1 个参数。文[3]已经证明该式可以很好地反应膨胀量与压力的关系。用式(9)对本次试验结果进行拟合如图 4 所示。图中也表明式(9)可以很好地拟合试验结果，说明了式(9)是合理的。

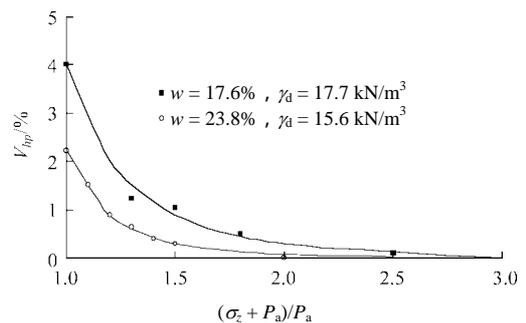


图 4 不同上覆压力下的膨胀量试验值以及对试验值的拟合曲线

Fig.4 Testing value of swelling capacity under different pressures and its fitting curves

3.3 膨胀量的计算模式

将式(5)，(9)联立，就可以得到考虑初始含水率、初始干重度和上覆应力耦合作用的膨胀量计算模式如下：

$$\left. \begin{aligned}
 V_{hp} &= \left(c \frac{\gamma_d}{\gamma_w} + d \right) w_r \left(\frac{\sigma_z + P_a}{P_a} \right)^{-B} \quad (\gamma_d < \gamma_m) \\
 V_{hp} &= \left[\left(c \frac{\gamma_d}{\gamma_w} + d \right) w_r + e \frac{\gamma_d}{\gamma_w} + f \right] \left(\frac{\sigma_z + P_a}{P_a} \right)^{-B} \quad (\gamma_d > \gamma_m)
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中： c, d, e, f, B 为试验参数。

4 计算模式的验证

为了验证以上计算模式的正确性，用式(5)对文[3]所给出的 10 kPa 压力下的试验结果进行了拟合，得到的计算模式如下：

$$V_{hp} = \left(56.136 \frac{\gamma_d}{\gamma_w} - 80.862 \right) w + 0.806 \frac{\gamma_d}{\gamma_w} - 5.947 \quad (12)$$

用以上计算式计算得到的膨胀量与实际试验数据的比较见表 4 所示。从表中可以看出，计算数据与试验数据符合的很好，两者的最大误差为 1.113%，证明本文提出的计算模式是正确的。

5 计算模式的应用

以上计算公式可以直接应用于工程计算中。应用时先进行不同初始干重度、初始含水率土样在不同压力下的膨胀量试验，然后根据不同的目的用

式(5)，(9)或(11)进行拟合，得到相应的试验参数，从而可以用得到的计算式计算任意初始干重度、初始含水率的土体在任意压力下的膨胀量值。

文[3]中表 7 列出了宁夏盐环定工程渠道渠底膨胀土浸水膨胀的实测资料。其中土体干重度为 16.2 kN/m³，含水率为 23.3%，上覆压力为 10.6 kPa，浸水饱和土层的厚度为 470 mm，实测得到的垂直方向的总膨胀量为 37 mm。而用式(12)计算得到的总膨胀量为 35.63 mm，两者相差不大，同样证明本文所提出的计算模式是可行的。

6 结 论

(1) 对于特定的人工压实膨胀土而言，影响其膨胀量的主要因素是土体的初始含水率、初始干密度和上覆压力。其膨胀量随初始含水率的增加而减少，随干重度的增加而增大，随上覆压力的增加而减少。

(2) 本文提出了综合考虑初始含水率、初始干密度和上覆压力 3 个因素耦合变化的膨胀变形计算模式，该模式形式简单、无量纲化、准确性高、便于工程实践应用，具有重要的应用价值。

(3) 在实际工程中，可以通过有限的几组膨胀量试验得到计算参数，用文中提出的计算模式直接计算任意初始干重度、初始含水率的土体在任意压力下的膨胀变形量。

表 4 计算与试验结果比较表
Table 4 Result of calculation and testing

编号	干重度/kN · m ⁻³	含水率/%	含水比	试验膨胀量/%	计算膨胀量/%	误差/%
1	15.1	17.3	0.402	7.8	7.800 355	0.005
		19.3	0.332	7.5	7.530 336	0.404
		21.3	0.263	7.3	7.260 317	- 0.544
		23.3	0.194	7.0	6.990 298	- 0.139
		25.3	0.125	6.7	6.720 278	0.303
2	16.1	17.3	0.302	9.9	9.916 936	0.171
		19.3	0.222	9.2	9.149 389	- 0.550
		21.3	0.141	8.3	8.381 842	0.986
		23.3	0.060	7.7	7.614 294	- 1.113
		25.3	0.000	7.0	7.039 260	0.561

(4) 本次试验是在固结仪上进行的, 试验结果适用于半无限介质膨胀量的计算。其进一步的推广需要在三轴仪上研究。

参考文献(References) :

- [1] 李献民, 王永和, 杨果林等. 击实膨胀土工程变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5) : 826-830.(Li Xianmin, Wang Yonghe, Yang Guolin, et al. Test study on engineering deformation characteristics of compacted expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5) : 826-830.(in Chinese))
- [2] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(Luo Tehong. The Problems of Expansive Soils in Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [3] 徐永福, 史春乐. 宁夏膨胀土的膨胀变形规律[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3) : 95-98.(Xu Yongfu, Shi Chunle. Research on the expansive characteristics of expansive soils in Ningxia[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3) : 95-98.(in Chinese))
- [4] 徐永福. 宁夏膨胀土膨胀变形特征的试验研究[J]. 水利学报, 1997, 9 : 90-95.(Xu Yongfu. Test on the expansive characteristics of expansive soils in Ningxia[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 9 : 90-95.(in Chinese))
- [5] 徐永福. 膨胀土的击实条件与膨胀变形的相关性研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(3) : 58-60.(Xu Yongfu. Relativity between compaction conditions and swelling deformation of expansive soils[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(3) : 58-60.(in Chinese))
- [6] 袁俊平, 陈剑. 膨胀土单向浸水膨胀时程特性试验与应用研究[J]. 河海大学学报, 2003, 31(5) : 43-49.(Yuan Junping, Chen Jian. Experimental research on swelling characteristics of expansive soil under one side immersion and its application[J]. Journal of Hohai University, 2003, 31(5) : 43-49.(in Chinese))
- [7] 翟礼生, 李姍林, 邓红灯等. 茂名民房裂缝分布特征与膨胀土性质关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 4(增) : 50-55.(Zhai Lisheng, Li Shanglin, Deng Hongdeng, et al. Expansive soil-geological hazard to the civil building of Maoming region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, 4(Supp.) : 50-55.(in Chinese))
- [8] 刘松玉, 季鹏, 方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1) : 81-88.(Liu Songyu, Ji Peng, Fang Lei. Approach to cyclic swelling behavior of compacted expansive clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1) : 80-88.(in Chinese))
- [9] Bao Chenggang, Gong Biwei, Zhan Liangtong. Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soils[A]. In: Proc. the Second International Conference on Unsaturated Soils[C]. Beijing: [s. n.], 1998. 71-98.
- [10] Gysel M. Design methods for structure in swelling rock[J]. ISRM, 1975, 18 : 377-381.