

# 不同地区黄土湿陷性和结构性综合分析

胡仲有, 骆亚生, 陆鹿

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 对甘肃省兰州市、陕西省杨凌区及河南省巩义市 3 个采样地黄土进行侧限压缩试验, 分别求取了它们在不同含水率下的湿陷系数和结构性参数, 较好地揭示了黄土湿陷和结构的变化特性。结果表明, 从重塑黄土、原状饱和黄土压缩曲线的相对分布位置可以直观看出黄土的联结和排列特性对黄土结构性的贡献作用和影响; 黄土结构参数在前期随含水率变化较大且无统一变化规律, 但超过一定压力值之后, 结构性参数与湿陷系数随含水率变化分布规律一致, 即随含水率增大而减少; 各个地方黄土分界点压力值随地域变化呈现出规律性变化; 结构性参数在表示试验前期黄土结构变化方面要比湿陷系数灵敏有效。

**关键词:** 黄土结构性; 湿陷系数; 结构性参数

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)02—0063—04

中图分类号: TU411.5

## Loess Collapsibility and Structural Characteristics in Different Regions

HU Zhong-you, LUO Ya-sheng, LU Lu

(The College of Water Conservancy and Architectural Engineering,

Northwest University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The coefficients of collapsibility and the structural parameters at different water contents are obtained to show the variation characteristics of collapsibility and loess structure through confined compression tests in 3 different loess areas of Lanzhou City of Gansu Province, Yangling District of Shaanxi Province, and Gongyi City of He'nan Province. The results illustrate that the contributions of coupling and arrangement characteristics to and their effects on structural characteristics of loess can be seen directly through the distribution of the confined compression curves. Loess structural parameters change greatly with water content at the early time of test, but loess structural parameters and the coefficients of collapsibility decrease with increased water content beyond a certain compressive stress. The value at the critical point change regularly with location. The structural parameter is much more sensitive and efficient than the collapsibility coefficient to show the early structural variation of loess.

**Keywords:** structural characteristic of loess; coefficient of collapsibility; structural parameter

黄土在我国分布较广, 覆盖面积约为  $6.40 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 主要分布在中西部地区, 其中湿陷性黄土约占黄土总面积的 60%。由于各地的地理、地质及气候条件的不同, 使得不同地区黄土的湿陷性有明显的差异和变化。因此对不同地区黄土的湿陷性开展深入系统研究是探寻黄土工程性质的一个重要方向。一般对于场地评价需要对场地范围各土层取样试验以确定湿陷系数, 工作量相当大。为了节省人力和物力, 许多学者曾努力探索湿陷系数与黄土结构特征和物理性质指标(干重度、湿重度和初始含水率等)间的关系以更好地评价黄土湿陷性。但是, 黄土具有湿陷

性的根本原因是其具有粒状架空结构体系<sup>[1]</sup>, 在力和水的共同作用下架空结构破坏而形成。黄土湿陷的诱发因素是力和水(外因), 结构强度(内因)起本质作用。齐吉琳等<sup>[2]</sup>认为土的结构性是指土中颗粒或土颗粒集合体以及颗粒间孔隙的大小、形状、排列组合及联结等综合特征。所以, 只是考虑黄土某一个物性指标与湿陷性的相关关系往往不能很好地评价黄土的湿陷性, 而黄土结构性能能够综合反映黄土各项物性指标。据此, 为了使试验成果更具普遍性, 本文对不同地区黄土湿陷性和结构性的相关关系进行了初步探讨。

收稿日期: 2007-10-29

修回日期: 2007-12-05

资助项目: 国家自然科学基金(50578134); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NECT-06-0864)

作者简介: 胡仲有(1982—), 男(汉族), 广西省容县人, 在读硕士研究生, 研究方向为黄土的工程性质及应用。E-mail: huz305@163.com。

通讯作者: 骆亚生(1967—), 男(汉族), 陕西省泾阳县人, 博士, 副教授, 主要从事黄土力学与工程方面的生产和科研工作。E-mail: lyas@pub-lic.xa.sn.cn。

## 1 湿陷性和结构性的表述

(1) 湿陷系数  $s$  为评价黄土湿陷性的主要指标<sup>[3]</sup>,通过侧限压缩试验求取,其表达式为

$$s = \frac{h_1 - h_2}{h_0} \quad (1)$$

式中:  $h_1$  ——在某一级压力下,试样变形稳定后的高度(mm);  $h_2$  ——在某一级压力下,试样浸水湿陷变形稳定后的高度(mm);  $h_0$  ——试样初始的高度(mm)。

(2) 分别对 1 组黄土样(1 个原状样对应 1 个相同干密度及含水率的重塑样和 1 个相同干密度的原状饱和样)进行侧限压缩试验,其压缩曲线形状如图 1 曲线所示。

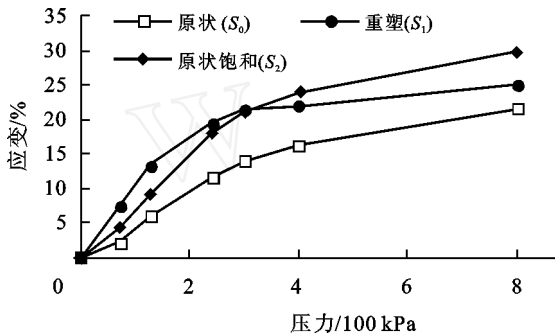


图 1 结构性参数计算原理图

齐吉琳、谢定义<sup>[2,4]</sup>提出一个简明、可靠、实用且能全面反映土结构性的几何特征和力学特征的土结构性参数  $m_p$  ( $m_1, m_2$  为过渡变量),其定义为:

$$m_1 = S_2/S_0, \quad m_2 = S_0/S_1$$

$$m_p = \frac{m_1}{m_2} = \frac{S_2/S_0}{S_0/S_1} = \frac{S_1 \cdot S_2}{S_0^2} \quad (2)$$

式中:  $S_0$  ——在某一级压力下原状黄土的应变;  $S_1$  ——在某一级压力下重塑黄土的应变;  $S_2$  ——在某一级压力下原状饱和黄土的应变。

黄土的结构性<sup>[5]</sup>是通过土粒的排列特征和联结特征来表现的,可以采用破坏土结构的方式使土结构势得以充分释放出来。如黄土浸水饱和则可以认为其联结能力遭受了破坏黄土由原状变成重塑则认为土粒的排列遭受了变动。原状饱和样和重塑样是用来求原状土结构性参数的中介。

## 2 试验方法及土样物性指标

为了使试验数据具有广泛的代表性和合理性,分别取 3 个典型黄土地区甘肃省兰州市、陕西省杨凌区、河南省巩义市的黄土样进行 5 个不同含水率状态下的侧限压缩试验,取土深度 3~5 m,属于  $Q_3$  黄土。压缩试验在三联固结仪上进行,依照齐吉琳等定义的黄土结构性参数的求取方法,1 组试样采用 1 个原状样对应 1 个相同干密度及含水率的重塑样和 1 个相同干密度的原状饱和样。试样面积为  $50 \text{ cm}^2$ ,试样高 2 cm。3 个地方黄土土样分别按各自天然含水率压制而成,然后采用风干法或水膜转移法将试样的含水率调节到试验要求值(5%,12%,18%,26%,33%)并养护 3 d 以上。饱和样直接在压缩仪上浸无气水饱和。试验按照《土工试验规程》黄土湿陷试验(SL237—016—1999)双线法进行。其中 1 组巩义黄土试样(原状黄土  $d = 1.34 \text{ g/cm}^3, W = 26\%$ )压缩曲线见图 2。兰州、杨凌、巩义 3 个地区黄土土样物理性质指标见表 1。

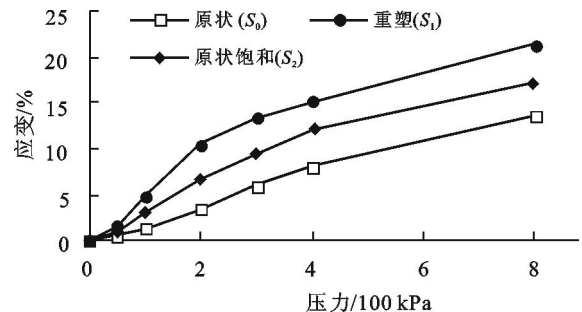


图 2 巩义市黄土压缩曲线

表 1 黄土土样的物理性质指标

采样点	天然含水率/ %	干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	比重	液限/ %	塑限/ %	塑性指数	土壤分类
兰州市	5	1.31	2.71	28.80	18.00	10.80	低液限黏土
杨凌区	18	1.32	2.69	35.20	21.56	13.64	低液限黏土
巩义市	12	1.34	2.71	30.60	17.50	13.10	低液限黏土

## 3 试验结果及分析

根据兰州、杨凌、巩义黄土压缩试验结果,按照求取湿陷系数  $s$  的式(1)及求取结构性参数  $m_p$  的式(2)分别整理出兰州、杨凌、巩义黄土在不同含水率

条件下对应的湿陷系数  $s$  和结构性参数  $m_p$ ,其曲线图成果见图 3—5。

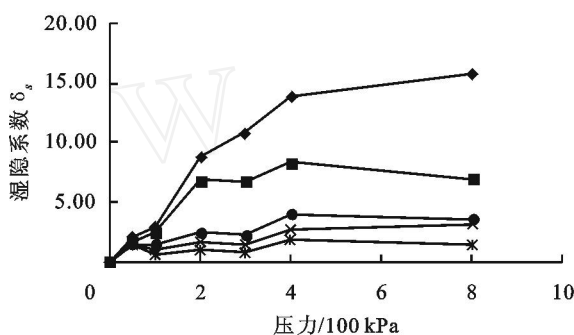
### 3.1 不同状态黄土的力学效应

在图 1—2 中原状黄土、重塑黄土、原状饱和黄土压缩曲线分别用  $S_0, S_1, S_2$  表示。从图 1—2 不同状

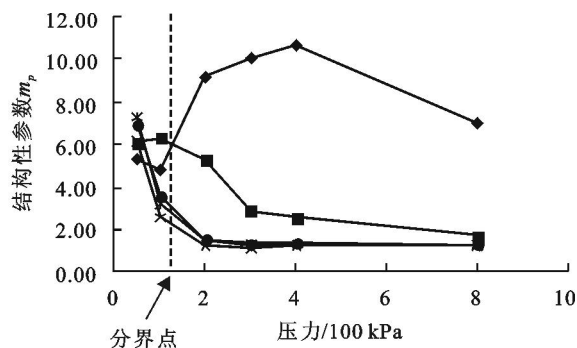
态下黄土的压缩曲线相对位置可以看出,原状黄土因为没有受到浸水或重塑的干扰破坏,它的曲线  $S_0$  是土颗粒联结和排列特征的综合力学效应表现,结构势能最强,位置总处于最下面,即要达到相同的应变,原状黄土需要最大的压力。其它组原状黄土压缩试验曲线图也表现出相同的力学效应现象。重塑黄土曲线  $S_1$  和原状饱和黄土曲线  $S_2$  则位于原状黄土曲线  $S_0$  上面,且曲线  $S_1, S_2$  可以相对地在上或在下(图 1—2),在某些情况下曲线  $S_1, S_2$  甚至可以有交叉点(图 1)。代表原状、重塑、原状饱和黄土的  $S_0, S_1, S_2$  压缩曲线的相对分布位置直观地说明了黄土结构的联结和排列特性对黄土力学特性的贡献作用和影响。如重塑黄土曲线  $S_1$  (重塑,使土排列受到破坏,主要表现出联结特性)在原状饱和黄土曲线  $S_2$  (浸水,使联结能力遭受了破坏,主要表现出排列特性)下面则

可说明在此种状态下联结所发挥的力学效应要比排列发挥的作用要强些,即要达到相同的应变,重塑黄土要比原状饱和黄土需要更大的压力。其它位置状态也可依此类推。

重塑黄土压缩曲线  $S_1$  与原状饱和黄土压缩曲线  $S_2$  有交叉点说明土颗粒的联结可稳性和排列可变性发挥作用的重要程度在相互转换。图 1 中,在重塑黄土曲线  $S_1$  (代表联结特性)与饱和原状黄土曲线  $S_2$  (代表排列特性)相交前,重塑黄土曲线  $S_1$  位于原状饱和黄土曲线  $S_2$  下面,说明在曲线  $S_1, S_2$  相交前(试验前期)黄土的联结可稳性作用比排列起的可变性作用大,这主要是由黄土较强的结构联结特性决定的,而随着试验的进行,黄土结构逐渐破坏,排列发挥的可变性作用得以进一步加强。

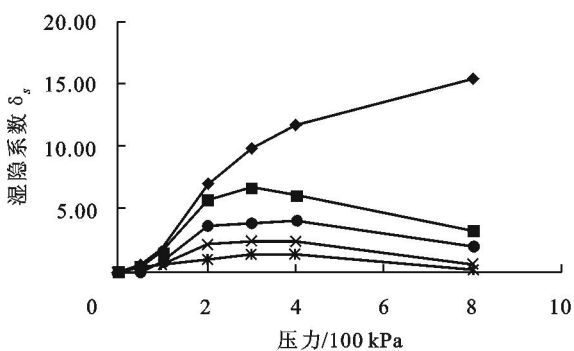


兰州黄土不同含水率下的湿陷系数  $\delta_s$

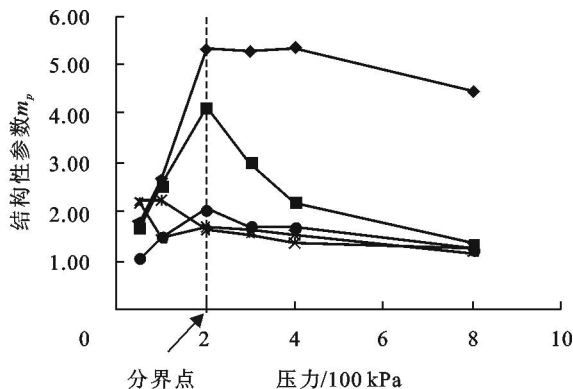


兰州黄土不同含水率下的结构性参数  $m_p$

图 3 兰州市黄土湿陷系数和结构性参数



杨凌黄土不同含水率下的湿陷系数  $\delta_s$



杨凌黄土不同含水率下的结构性参数  $m_p$

图 4 杨陵区黄土湿陷系数和结构性参数

3.2 不同地区黄土的  $\delta_s$  和  $m_p$  相关关系

(1) 从图 3—5a 图可以看出,兰州、杨凌、巩义 3 个地区黄土的湿陷系数均随含水率增大而减少。而结构性参数(如 3—5b 图所示)则在前期表现出较大的随意性,只在后期与湿陷系数随含水率变化规律一

致。前、后期大致分界点压力值是:巩义黄土 300 kPa,杨凌黄土 200 kPa,兰州黄土 120 kPa。此分界点的作用是区分黄土结构性参数是否随含水率变化的规律。分界点已用位用分界点上的竖线标明,见图 3—5 中的 b 图。

(2) 从图 3—5b 图可以看出,兰州、杨凌、巩义黄土结构性参数在试验前期(分界点以前)随含水率均无统一的变化规律,这正说明了黄土在试验前期结构侵水破坏的复杂性(土颗粒的排列和联结的综合作用),含水率的较小变化有可能导致黄土结构的急剧变化。而到了后期,土结构变化趋于稳定,结构性参数随含水率也有了规律性的变化,即随含水率增大而减小。

(3) 兰州、杨凌、巩义 3 个地方黄土结构性参数的分界点压力值随地域不同呈现出较好的规律性,即从西向东(兰州、杨凌、巩义)增大,它的变化说明黄土结构前期随含水率而急剧变化所需要的压力范围不同。如兰州黄土分界点为 120 kPa,说明在压力 120 kPa 以前黄土结构性参数随含水变动较大且无统一规律。分界点压力值随地域的变化也说明了各个地方黄土结构在前期浸水易变性的不同。如兰州黄土分界点压力值为 120 kPa,说明兰州黄土结构在较小的压力级别下就具有浸水易变性,而巩义黄土分界点

压力值为 300 kPa,说明巩义黄土浸水易变性需要的压力级别要比兰州黄土高。黄土的这种变化特性主要是由黄土所处的地理位置和黄土的形成演变过程决定的。

黄土成因以风成为主,我国地势西高东低,西北风对黄土的形成沉积影响最大,使得处在相同深度的黄土越往东沉积形成越早,加之我国雨水分布从西往东越来越丰富,黄土从西往东也越来越容易受到水分的浸湿,久而久之,东部(如巩义)黄土结构受浸水变化的影响更难,而西部(如兰州)黄土结构则更具有浸水易变性,表现在力学效应上则是各个地方黄土结构在试验前期浸水易变需要的分界点压力值的不同。

(4) 从兰州、杨凌、巩义黄土湿陷系数的曲线图 3—5a 分布可以看出,在试验前期湿陷系数  $\delta_s$  曲线随不同含水率分布紧凑,并不能有效地反映黄土结构初期随含水率的变化,从这个意义来讲,结构性参数显然要比湿陷系数灵敏有效,同时也充分说明了结构性参数反映黄土结构变化的灵敏性。

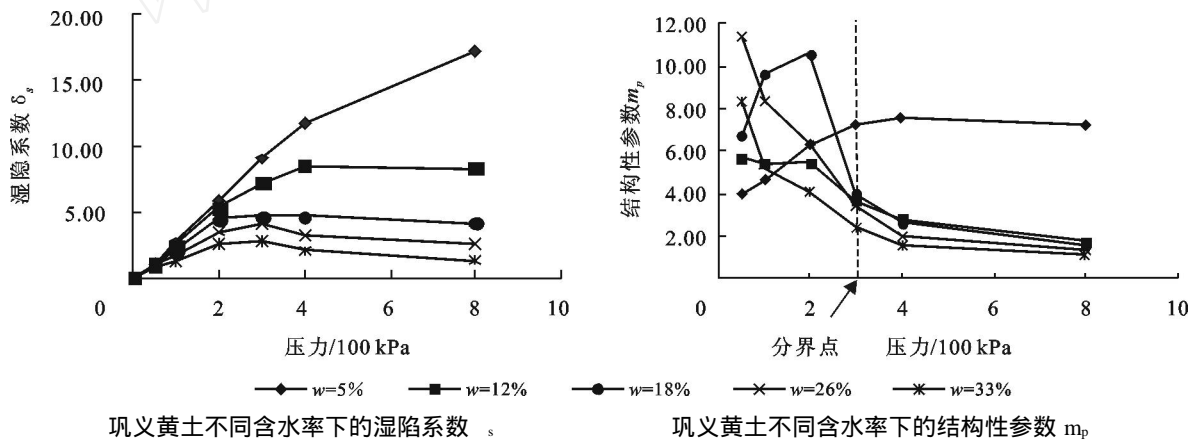


图 5 巩义市黄土湿陷系数和结构性参数

### 4 结论

通过对兰州、杨凌、巩义 3 个不同地区黄土进行侧限压缩试验,可以得出以下结论。

(1) 根据结构性参数的定义以及与原状黄土相对应的重塑黄土、原状饱和黄土的压缩曲线的相对分布位置,可以直观看出黄土结构的联结和排列特性对黄土力学效应的贡献作用和影响。

(2) 黄土结构前期随含水率的急剧变化存在一定的压力范围(分界点),这个范围随地域变化呈一定规律性,即从西向东增大,兰州、杨凌、巩义黄土分界点压力值依次为 120, 200, 300 kPa。

(3) 黄土结构在试验前期(分界点前)随含水率变化较大,结构性参数并无统一的变化规律,结构性参数在表示黄土结构前期随含水率变化方面显然要

比湿陷系数灵敏有效。

(4) 在试验后期(分界点后),结构性参数与湿陷系数分布规律一致,即随含水率增大而减少。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997: 78—79.
- [2] 齐吉琳. 土的结构性及其定量化参数的研究[D]. 西安:西安理工大学博士学位论文,1999:15—20.
- [3] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999:141—145.
- [4] 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报,1999,21(6): 651—656.
- [5] 骆亚生,谢定义,邵生俊,等. 非饱和黄土的结构变化特性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2004, 32(8): 114—118.