

DOI: 10.11779/CJGE2019S2062

西宁地区不同深度原状黄土湿陷性及微观机理研究

崔靖渝, 张吾渝*, 解邦龙, 纪 曜, 季港澳

(青海大学土木工程学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 通过室内浸水压缩试验对不同深度西宁地区原状黄土的湿陷性进行了研究, 并结合扫描电子显微镜 (SEM) 和颗粒及裂隙图像识别分析系统 (PCAS), 分析了不同埋深、不同上覆压力下的原状黄土湿陷性与内部微观结构的关系。结果表明: 土体内部的大孔隙, 架空结构及大量的直接点接触是本地区黄土具有湿陷性的内部条件; 随着埋深的增大, 在相同上覆压力及浸水条件下, 湿陷性有逐渐减小的趋势, 而在相同埋深情况下, 在一定范围内, 随着上覆压力的增加并给予浸水条件, 黄土的湿陷性有着明显的提高, 证明了外部荷载和浸水是黄土发生湿陷性的外部条件。

关键词: 原状黄土; 湿陷系数; 微观结构

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0249-04

作者简介: 崔靖渝(1993—), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事地基处理的研究。E-mail: tycjy123@163.com。

Collapsibility and microscopic mechanism of intact loess at different depths in Xining area

CUI Jing-yu, ZHANG Wu-yu, XIE Bang-long, JI Xi, JI Gang-ao

(School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: The collapsibility of the intact loess at different depths in Xining area is studied through the laboratory immersion compression tests. Combined with the scanning electron microscopy (SEM) and the particle and crack image recognition and analysis system (PCAS), the relationship between the collapsibility of intact loess and the internal microstructure under different overburden pressures is analyzed. The results show that the large pores, overhead structure and a large number of direct contact points are the internal conditions of loess with collapsibility in this region. With the increase of the buried depth, the collapsibility tends to decrease gradually under the same overlying pressure and immersion condition. However, at the same buried depth, within a certain range, with the increase of the overlying pressure and the given immersion condition, the collapsibility of loess is obviously improved, which proves that the external load and immersion are the external conditions of collapsibility of loess.

Key words: intact loess; coefficient of collapsibility; microstructure

0 引言

黄土的湿陷性在建筑工程领域有着严重危害, 常常会引起建筑物地基的不均匀沉降, 建筑物开裂等一系列严重后果。因此, 黄土湿陷性一直为岩土工程领域相关从业人员所密切关注。

目前, 中国很多学者对于黄土湿陷性进行了深入的研究。刘海松等^[1]从黄土的结构强度角度出发, 研究了初始含水率与湿陷性的关系; 高国端等^[2], 胡再强等^[3]通过研究黄土内部的粒状架空结构体系, 从而解释了黄土湿陷性的内部条件。从微观角度而言, 潘蕾等^[4]、陈阳等^[5]通过对土样进行电镜扫描, 分析了非饱和黄土孔隙率与湿陷系数的关系。武文举等^[6]、常立君等^[7]运用 GDS 动三轴系统对西宁黄土的动力学特性进行了进一步研究; 张吾渝等^[8]通过空心圆柱

扭剪仪对中主应力轴旋转条件下的重塑黄土进行了分析。湿陷性黄土受不同的风化作用, 沉积作用, 应力历史水平等因素影响, 其湿陷性具有很强的区域性, 局限性, 对于不同地区的黄土湿陷性并不能一概而论。因此, 本文以西宁地区黄土为研究对象, 通过室内浸水压缩试验并结合微观电镜扫描 (SEM) 和颗粒及裂隙图像识别分析系统 (PCAS) 进行分析, 以期进一步研究本地区的黄土湿陷机理, 为本地区工程提供相应的理论依据。

基金项目: 青海省科技厅项目 (2017-ZJ-792, 2018-ZJ-T01); 国家自然基金项目 (51768060); 青海大学创新基金项目 (TC2019-02)

收稿日期: 2019-04-30

*通讯作者 (E-mail: qdzwy@163.com)

1 室内湿陷试验

本次湿陷试验的原状土样取自西宁市城北区青海大学南部在建锅炉房场地内, 取样深度为 3~6 m, 土颗粒以粉粒为主。经室内试验测得土样的基本物理力学性质指标, 见表 1。

表 1 原状黄土基本物理力学性质指标

Table 1 Physical properties of intact loess samples

土粒相对密度	天然含水率/%	密度/(g cm ⁻³)	液限/%	塑限/%
2.71	10.50	1.43	26.11	15.78

1.1 试验方法

本次试验利用 WG 型三联固结仪, 对原状黄土进行室内浸水压缩试验。选用面积为 50 cm², 高度为 2 cm 的环刀, 采用单线法进行试验, 试验中采用的压力等级分为 5 级, 分别为 25, 50, 100, 200, 300 kPa; 每级压力固结稳定的标准为每小时变形量不大于 0.01 mm。

1.2 试验结果分析

根据《湿陷性黄土地带建筑规范》(GB50025—2004) 计算湿陷系数结果^[9], 得到不同深度下的西宁地区原状黄土的 $p - \delta_s$ 曲线如图 1 所示。

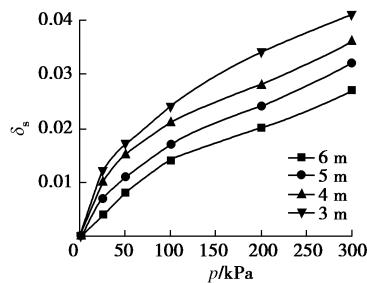


图 1 原状黄土不同上覆压力及湿陷系数关系曲线

Fig. 1 Relationship between overburden pressure and collapsibility coefficient of intact loess

根据规范界定, 本次试验用土为轻微及中等湿陷性黄土。

由图 1 可知, 西宁地区原状黄土在上覆压力为 0~300 kPa 的范围内, 随着上覆压力 p 的增加, 湿陷系数有着显著的提高; 上覆压力与湿陷系数表现出良好的正相关关系, 证明了外荷载是影响土体湿陷性的重要因素, 土中原有的大孔结构在荷载作用下被逐渐破坏, 孔隙比逐渐减小, 土体趋于密实。图 1 同时清楚地表明了不同深度原状黄土的湿陷系数与上覆压力的关系具有非常规律的差异性关系, 3 m 与 6 m 的土受长期不同上覆压力的应力历史作用, 其内部结构必然会有所差异, 浅层土的孔隙比会比深层土的大, 大孔结构更多, 土体更为松散, 因此造成湿陷性更强的结果。

2 微观试验

2.1 试验方法

将不同试验条件下的土样分别编为 1~16 号, 将每个编号的土样从中间部分取出一小块并切取尺寸为 2 cm×1 cm×1 cm (长×宽×高) 的试样, 再将所有试样烘干并进行扫描。

2.2 试验结果分析

利用电子显微镜对所有试样进行放大倍数为 300 的电镜扫描, 选取试样 1、试样 4、试样 13 的图像见图 2。

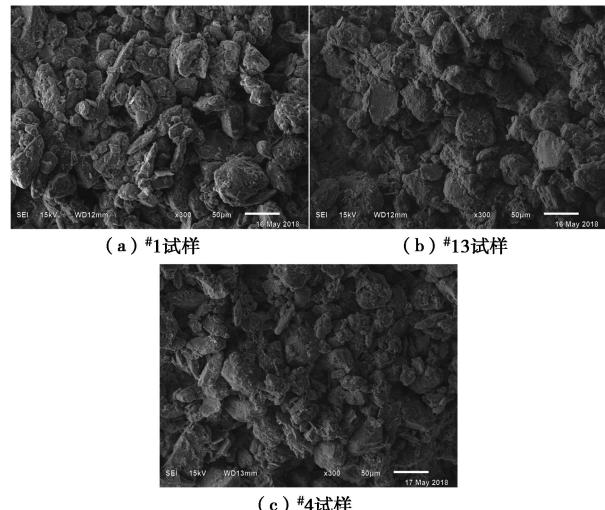


图 2 土体试样扫描电镜图

Fig. 2 SEM pictures of samples

图 2(a) 为 3 m 处原状黄土无上覆压力时的微观电镜扫描图像, 根据图像所示, 土体的骨架颗粒形态以粒状为主, 同时包含有少量由细颗粒聚集而成的集粒; 在连接形式上主要以直接点接触和直接面接触为主, 同时有很多明显可见的大孔隙。

图 2(b) 为 6 m 处原状黄土无上覆压力时的微观电镜扫描图像, 随着深度的增加, 6 m 处的原状黄土相较于 3 m 处的原状黄土, 在骨架颗粒形态上虽仍以粒状颗粒为主, 但出现少量凝块状颗粒, 同时, 颗粒形态更加趋于圆滑; 在连接形式上出现更多的直接面接触和胶结连接; 在孔隙上虽有大孔结构, 但数量上已明显减少, 更多为粒间孔隙。

图 2(c) 为 3 m 处原状黄土在完成上覆压力为 200 kPa 的湿陷试验后的微观电镜扫描图像, 如图所示, 相较于 3 m 处的原状黄土而言, 骨架颗粒形态上同样以粒状颗粒为主, 但减少了聚集而成的大集粒; 连接方式上主要以直接面接触和胶结连接为主; 孔隙上大孔结构大大减少, 孔隙主要以粒间孔隙和粒内孔隙为主。由此可见外部荷载作用及浸水条件对于原状黄土

的内部结构影响是非常明显的。

2.3 微观定量参数

(1) 孔隙面积比例 (P)。即为微观图像中土体内部孔隙所占的比例, P 值范围为 0~1, 越接近 1 代表土体中孔隙越多。

(2) 平均形状系数 (K)。其含义为用以描述孔隙形态的定量参数, 平均形状系数越大, 孔隙形状越趋于圆滑, 反之则越狭长。

(3) 概率熵 (H_m)。用以描述土体孔隙及颗粒分布有序性的参数, 其值范围在 0~1 之间, 越接近 1 代表孔隙颗粒分布越无序, 越不规则。其计算公式为

$$H_m = -\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M} \times \frac{\ln(m_i/M)}{\ln n}, \quad (1)$$

式中, m_i 为在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内的 n 个区位中第 i 个区位中的孔隙数量; M 为孔隙总个数。

(4) 分布分维 (D_v)。分布分维反映对象的分布密度和复杂性。采用盒计 (box-counting) 法计算^[10]:

$$D_v = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln r} = -K, \quad (2)$$

式中, r 为正方形盒子边长, $N(r)$ 为含有对象盒子数, K 为线性斜率。

由上述微观参数指标及其与上覆压力的关系曲线 (见图 3) 可以得知:

(1) 平均形状系数。埋深越深的土体其 K 值越小, 同时 K 值也随着上覆压力的增大而减小, 平均形状系数代表着孔隙的形态, 也就表明经过上覆荷载作用及浸水条件后, 土体的孔隙由更加偏向圆滑状转变为更加偏向狭长状, 表现出大孔结构逐渐消失的过程。

(2) 概率熵。同一深度下的土体在不同上覆压力作用下, 其概率熵随着上覆压力的增大而逐渐减小, 同时, 对于不同深度的土体, 在相同上覆压力作用下, 其概率熵也随着土体埋深的增加而渐渐降低; 从这两个点来说, 虽然概率熵值都呈现规律性缓慢降低, 表示颗粒孔隙分布逐渐稳定; 但其值变化都非常微小, 数值仍然非常靠近 1, 也就表明了土体因应力浸水作用条件下, 其颗粒孔隙排列仍然非常无序, 不规则。

(3) 分布分维。在 3 m 处且无上覆压力时, 土样的分布分维最大, 随着土体埋深及上覆压力的增加, 土样的分布分维值逐渐减小; 表明埋深越深及上覆压力更大的土其颗粒分布更加集中, 并呈现出一种凝粒的状态。

(4) 孔隙面积比例。上覆压力的增加, 使得土体中的孔隙面积比例逐渐的减小, 同时也意味着颗粒的面积比例是在逐渐的增加的, 埋深越深的土体, 孔隙面积比例也逐渐减小。表明上覆压力的增大及埋深的增加, 土体中的孔隙是在明显的减小, 土体更加密实

(图 3)。

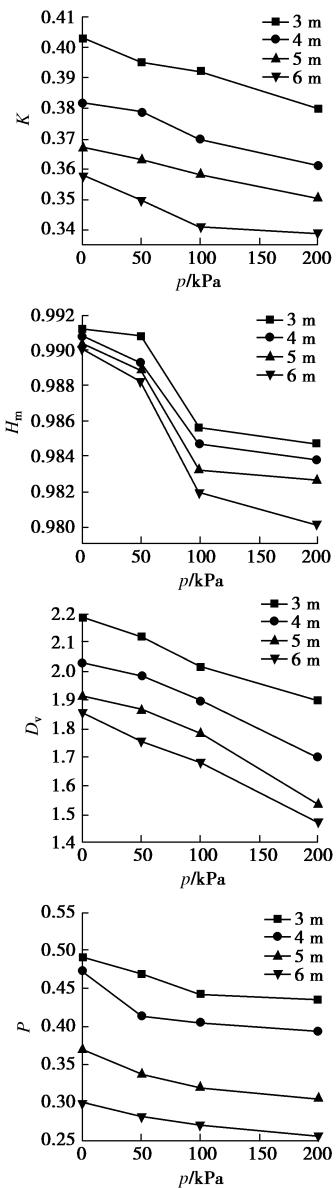


图 3 微观定量参数与上覆压力关系变化曲线

Fig. 3 Curves of microstructural quantitative parameters and overlying pressure

通过上述数据分析可以得知: 西宁地区原状黄土内部本身具有很多的大孔结构, 越靠近表层的土体这一趋势表现得越为明显, 而随着埋深的增加, 其土体内部的大孔结构渐渐减少, 架空结构渐渐消失, 转变为更多的胶结连接结构, 颗粒与颗粒间的接触方式, 由主要为直接点接触转变为更多的直接面接触。证明了埋深越深的土体, 其内部更加密实, 可压缩变形量越小。

同时, 以 3 m 深度的土样为例, 随着上覆压力的增大, 土体的压缩变形量随之显著增大, 而加入浸水条件后, 很快便再次发生一个明显的附加变形。借鉴微观结构定量参数来看, 经过不同上覆压力和浸水条

件作用的土体其反映内部孔隙分布，颗粒排列等一系列指标均存在明显规律性变化。因此，微观试验与宏观试验结果有良好的对应关系。

3 结 论

(1) 通过微观试验定性分析得知，西宁地区原状黄土的颗粒主要以粒状颗粒为主，颗粒在连接方式上，主要为直接点接触和直接面接触，架空结构较多，且上部土层的点接触明显较下部土层要多，下部土层主要以面接触为主。

(2) 通过微观试验定量分析得知，随着深度和上覆压力的增加，土样的概率熵值并没有非常显著的变化，依然接近 1，代表着黄土的孔隙颗粒分布是随机的，不规则的；而平均形状系数、分布分维和孔隙面积比例则呈现出规律性的减小，这些都表示土体在受到荷载和浸水作用下，土体在朝着更加稳定，密实的状态下运动。

(3) 室内浸水压缩试验前后的土样微观结构的变化对于宏观的试验结果有着良好的对应与解释，黄土内部的大孔隙，架空结构，脆弱的颗粒点点触是造成黄土湿陷性的重要原因。

本文通过室内浸水压缩试验并结合电镜扫描对西宁地区的原状黄土进行有关其湿陷性及微观结构变化机理的研究，可为本地区的湿陷性黄土地基处理提供一定的试验基础和理论依据。

参 考 文 献：

- [1] 刘海松, 倪万魁, 颜斌, 等. 黄土结构强度与湿陷性的关系初探[J]. 岩土力学, 2008(3): 722 - 726. (LIU Hai-song, NI Wan-kuai, YAN Bin, et al. Discussion on relationship between structural strength and collapsibility of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(3): 722 - 726. (in Chinese))
- [2] 高国端. 中国黄土湿陷性质的形成研究[J]. 南京建筑工程学院学报, 1994(2): 1 - 8. (GAO Guo-duan. The formation of collapsibility of loess soils in China[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1994(2): 1 - 8. (in Chinese))
- [3] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的显微结构与湿陷性[J]. 水利水运科学研究, 2000(2): 68 - 71. (HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Micro-structure and inundation of unsaturated loess[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000(2): 68 - 71. (in Chinese))
- [4] 潘蕾, 张远芳, 陈敬知, 等. 湿陷系数与黄土宏观结构的关系研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 220 - 224. (PAN Lei, ZHANG Yuan-fang, CHEN Jing-zhi, et al. Research on the relationship between loess macro-structure and collapsibility coefficient[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(3): 220 - 224. (in Chinese))
- [5] 陈阳, 李喜安, 黄润秋, 等. 影响黄土湿陷性因素的微观试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 646 - 653. (CHEN Yang, LI Xi-an, HUANG Run-qi, et al. Micro experimental research on influence factors of loess collapsibility[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 646 - 653. (in Chinese))
- [6] 武文举, 张吾渝, 马艳霞, 等. 基于 GDS 动三轴试验的西宁地区原状黄土微观结构研究[J]. 青海大学学报, 2018, 36(1): 54 - 60. (WU Wen-ju, ZHANG Wu-yu, MA Yan-xia, et al. Experimental study on microstructure change of intact loess based on GDS dynamic triaxialtest[J]. Journal of Qinghai University, 2018, 36(1): 54 - 60. (in Chinese))
- [7] 常立君, 张吾渝, 马艳霞, 等. 青海地区非饱和黄土强度特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2015(4): 117 - 121. (CHANG Li-jun, ZHANG Wu-yu, MA Yan-xia, et al. Experimental study on strength characteristics of unsaturated loess in Qinghai area[J]. Railway Engineering, 2015(4): 117 - 121. (in Chinese))
- [8] 张吾渝, 陈伟, 常立君, 等. 中主应力对击实黄土强度和变形特性的影响[J]. 地震工程学报, 2016, 38(4): 554 - 557, 587. (ZHANG Wu-yu, CHEN Wei, CHANG Li-jun, et al. Effect of intermediate principal stress on strength and deformation characteristics of compacted loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(4): 554 - 557, 587. (in Chinese))
- [9] GB 50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (GB 50025—2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese))
- [10] 方祥位, 申春妮, 李春海, 等. 陕西蒲城黄土微观结构特征及定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1917 - 1925. (FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, LI Chun-hai, et al. Quantitative analysis of microstructure characteristics of Pucheng loess in Shanxi province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1917 - 1925. (in Chinese))

(责编: 黄贤沙)