

文章编号:1673-2049(2017)01-0099-06

黄土塬非饱和黄土增湿变形特性及结构性研究

周茗如^{1,2}, 王晋伟^{1,2}, 王 腾^{1,2}, 杨 鑫^{1,2}

(1. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为了研究黄土塬地区非饱和黄土增湿变形特性及其与结构性的关系,选取庆阳市西峰区某建筑场地土样,对其进行了不同含水率下的黄土固结试验研究,讨论了湿陷系数与压力、初始含水率及初始结构强度的关系。结果表明:不同浸水压力作用下,湿陷系数随初始含水率的增大基本呈现递减趋势;高压处增湿湿陷性强,低压处增湿湿陷性弱;黄土结构强度随初始含水率的增大呈降低趋势,且在含水率增大初期,黄土结构强度降低速率较大,后期速率减缓;黄土湿陷前后土体的微结构发生了明显变化,形成了较稳定的次生结构。

关键词:黄土塬地区;非饱和黄土;结构特性;增湿试验

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A

Study on Moistening Deformation Characteristic and Structure of Unsaturated Loess in Loess Tableland

ZHOU Ming-ru^{1,2}, WANG Jin-wei^{1,2}, WANG Teng^{1,2}, YANG Xin^{1,2}

(1. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In order to study the moistening deformation characteristics of unsaturated loess in loess tableland area and its relation to structure, the soil samples of a building site in Xifeng district of Qingyang city were selected to study the loess consolidation under different water contents. The relations between collapsibility coefficient and pressure, initial moisture content and initial structural strength were discussed. The study results show that the collapsibility coefficient has a decreasing trend with the increase of initial water content under different soaking pressures. The humectation collapsibility is strong with high pressure, and weak with low pressure. The structural strength of loess decreases with the increase of initial water content. The structural strength of loess decreases quickly at the early stage of water content increasing, and decreases slowly at later stage. The microstructure of loess soil has changed obviously after collapsibility, and a more stable secondary structure is formed.

Key words: loess tableland area; unsaturated loess; structural characteristics; moistening test

0 引言

随着西部大开发战略的继续发展,越来越多的

工程建设开始向黄土区域扩展^[1]。甘肃省陇东地区位于中国最大的黄土塬——董志塬地貌区域,是大厚度黄土分布最典型、最广泛的地区。与大多数黄

收稿日期:2016-07-14

基金项目:甘肃省建设科技攻关项目(JK2014-34)

作者简介:周茗如(1962-),男,陕西凤翔人,教授,E-mail:zhoumr@lut.cn.

土场地不同,陇东黄土塬地区黄土结构性能稳定,是主要的建筑与工程场地^[2]。目前对其研究较少,给陇东地区工程设计及建设带来非常大的困扰。

资料显示,对于大厚度湿陷性黄土地区,其地基设计主要考虑黄土湿陷性的影响,而含水率的变化是造成黄土湿陷的主要原因,影响黄土的强度和变形性能。由于陇东地区降水较少,地下水位较深,其饱和湿陷很难达到,所以通过增湿变化对黄土湿陷进行预测,更符合陇东地区黄土研究的实际意义。谢定义^[1]指出,黄土湿陷的研究应该放在湿陷的可能性和增湿湿陷的实际预测上。

在陇东地区进行工程设计时,一般以陕西地区作为参考对象,但陇东黄土塬的黄土层厚度大,地下水位深,地基达到浸水饱和湿陷水平的可能性小,在这样的地区用完全饱和情况下的湿陷变形进行工程设计,必然会给工程带来不必要的浪费^[3-4]。因此,研究陇东地区黄土结构特性成为当前陇东地区工程建设研究的重点。

本文通过对原状黄土在不同湿度(逐级增湿直至完全饱和)下进行侧限压缩试验,研究不同含水率(质量分数,下同)下黄土的增湿湿陷特性随外力变化的特性及其与结构性之间的内在联系,获得关于

陇东地区非饱和黄土的变形和强度特性,为陇东黄土塬地区工程设计及建设提供理论基础。

1 研究方法

1.1 机理分析

黄土是形成于干旱或半干旱环境下具有结构强度的欠压密土^[5],由于其特殊的生成环境,使得其具有独特的结构特征,黄土的结构性和欠压密性是造成其湿陷的最基本原因^[6-7]。Rogers 等^[8-13]从各角度(包括热动力学、相变、流变学、孔隙结构、颗粒接触和分布等)分析了黄土的湿陷变形和结构破坏过程,研究结果显示黄土的湿陷性与其结构性有密切的关系;周凤玺等^[14-16]从本构关系方面对黄土进行了研究,并提出了相应的本构模型;胡再强^[17]引入数值分析方法对黄土的浸水试验进行了研究;陈存礼等^[18-20]重点探讨了黄土的湿陷性以及结构性;陈正汉等^[21-24]引入 CT 扫描技术,指出黄土的湿陷过程是其颗粒结构重新排列的过程。

1.2 试样选择及制备

本文试验土样取自庆阳市西峰区某建筑场地,取土深度在地面以下 5~9 m,为 Q3 黄土,土质较均匀。场地原状土样的基本物理指标见表 1。

表 1 试验土样基本参数
Tab. 1 Basic Parameters of Test Soil Sample

含水率 $w/\%$	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	相对密度 G_s	天然孔隙比 e	塑限 $W_p/\%$	液限 $W_L/\%$
13.12	1.53	1.39	2.70	0.885	19.14	29.22

在试样制备过程中,为减少试验误差,需控制同一组试样的误差在一定范围之内,即密度差值在 $0.03\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的范围内且含水率的差值在 2% 的范围内。

增湿、减湿含水率计算公式如下

$$m_w = \frac{m_0}{1+0.01w_0} \times 0.01(w_1 - w_0) \tag{1}$$

式中: m_w 为制备试样增加或减少的水量; m_0 为试验前环刀内土样的质量; w_0 为土样的初始含水率; w_1 为试样要求的含水率。

当试样含水率低于 w_0 时,将原状土试样风干至试验要求含水率,当试样含水率高于 w_0 时,利用水膜转移法即对原状土试样采用天然原状样滴定注水的方法提高含水率,为了避免一次加水过多造成试样体胀,当加水量超过 10 g 时,应分 2 次加水。等到试样含水率达到试验控制含水率后,用保鲜膜包裹 2 层放在保湿缸中密闭放置 24 h 以上,使水分扩散均匀,以便控制试样初始含水率。

1.3 试验方案

张苏民等^[6]提出了黄土增湿变形的概念,即黄土在某一外力作用下达到变形稳定后,由于浸水增湿而引起的附加变形为增湿变形。现行黄土规范中对黄土饱和湿陷试验有 2 种规定的试验方法,即单、双线法,其试验结果都可以用来对黄土的湿陷性进行评价。本文增湿湿陷试验选用双线法,仪器选用江苏永昌科教仪器制造有限公司生产的 GJ-32 型三联高压固结仪。试验控制的试样含水率为 3.22%, 8.22%, 13.22% (试样初始含水率) 和 18.22%, 23.22%, 28.22%, 31.35% (试样饱和含水率)。试验的加载等级为 25, 50, 100, 200, 300, 400, 800, 1 600 kPa。试验过程参照《土工试验规程》^[25] 及《公路土工试验规程》^[26]。

2 试验结果与分析

2.1 湿陷系数与压力的关系

湿陷系数是表征黄土湿陷变形的重要指标之

一,也是评价场地湿陷性不可或缺的重要参数,指在一定压力下,土样浸水前后高度之差与土样原始高度之比,其大小反映了黄土对水的敏感程度。

湿陷系数计算公式如下

$$\delta_s = \frac{h_p - h'_p}{h_0} \quad (2)$$

式中: δ_s 为湿陷系数; h_p 为保持天然湿度和结构的土样加压到一定值时下沉稳定后的高度; h'_p 为加压稳定后的土样在浸水作用下下沉稳定后的高度。

图 1 为不同初始含水率下湿陷系数与压力的关系曲线。从图 1 中可以看出:在初始含水率一定的情况下,随压力的增加,湿陷系数 δ_s 表现为先增大后减小趋势;在压力一定的情况下,随着初始含水率 w_0 的增大,湿陷系数 δ_s 曲线整体呈下降趋势,表明黄土的湿陷敏感性受初始含水率 w_0 的影响较大,即呈现随减湿而增大、随增湿而减小的趋势。

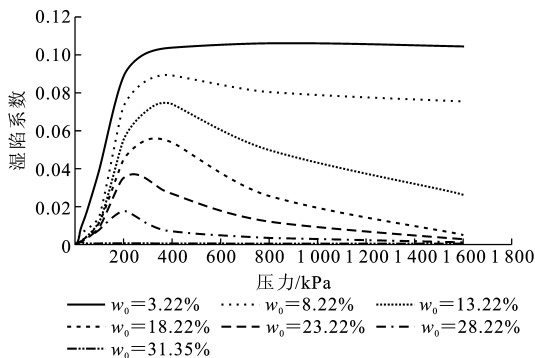


图 1 不同初始含水率 w_0 下湿陷系数与压力的关系曲线

Fig. 1 Relation Curves of Collapsibility Coefficients and Pressures with Different Initial Water Contents w_0

湿陷性黄土结构呈现为多孔介质特征,当黄土遇水增湿后,颗粒之间的连接在荷载作用下发生软化、溃散,土体本身结构发生变化,土体颗粒由于连接软化发生重新排列。随含水率的增大,土体结构慢慢趋于稳定,最终当黄土达到饱和状态时,湿陷量基本消失,呈现为曲线与横坐标基本重合。

为了深入研究增湿对原状黄土湿陷变形的影响,本文选取了 2 种初始含水率,引用增湿湿陷系数 $\Delta\delta_s$ 来反映黄土湿陷随增湿含水率的退化程度。图 2 为增湿湿陷系数 $\Delta\delta_s$ 与浸水压力 P 的关系。

现行黄土规范中把湿陷系数 $\delta_s = 0.015$ 时所对应的压力定义为湿陷起始压力 P_{sh} ,该值标志着湿陷的开始,是黄土湿陷性评价中的一个重要参数,类似地,将 $\Delta\delta_s = 0.015$ 对应的最小压力称为增湿湿陷起始压力 P_{sh} 。由图 2 可以看出:随压力增大,增湿湿陷系数经历了平缓增长、快速增长、平缓下降的过

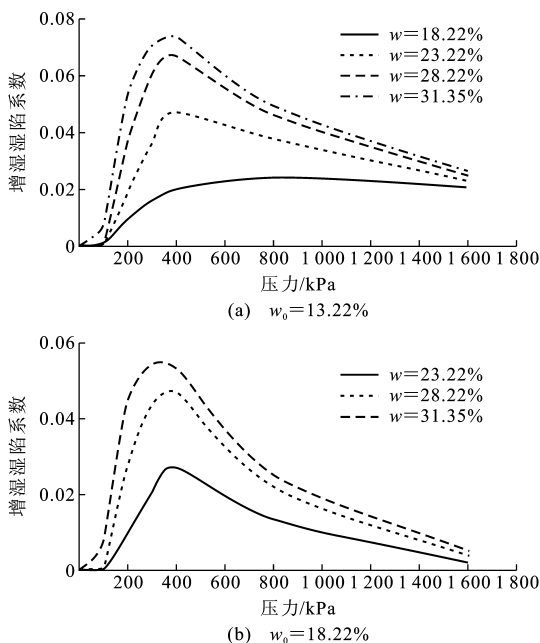


图 2 不同初始含水率下 $\Delta\delta_s$ 与 P 的关系曲线

Fig. 2 Relation Curves of $\Delta\delta_s$ and P with Different Initial Water Contents

程;当压力一定时, $\Delta\delta_s$ 随增湿含水率的增大而增大,土样达到含水率饱和时, $\Delta\delta_s$ 达到最大值,说明当试样饱和时,湿陷退化程度最大。同时发现,随着增湿含水率的增大, P_{sh} 呈减小趋势,且随初始含水率的增大而增大。

2.2 湿陷系数与初始含水率的关系

图 3 为湿陷系数与初始含水率的关系曲线。从图 3 中可以看出:随初始含水率 w_0 的增大, δ_s 基本表现为递减趋势;当浸水压力 P 较小时 ($P < 100$ kPa), δ_s 随 w_0 增大而呈减小趋势,并且浸水压力越大,减小速率越大;当含水率大于 8% 时, δ_s 减小趋势变缓;当浸水压力在 200~400 kPa 区间时,随 w_0 的增大, δ_s 减小速率增加,且呈近似直线的关系;在浸水压力等于 200 kPa 时,湿陷系数曲线段出现一个凸起,超出了浸水压力 P 为 300,400 kPa 时的湿陷系数值,说明压力 200 kPa 是 $w_0 \approx 28\%$ 的峰值湿陷压力,对比图 1 可以看到此种现象;当浸水压力 $P \geq 800$ kPa 时,随浸水压力的增大, δ_s 变化速率随 w_0 的增加先增大后趋于变缓,因为此时黄土初始结构已被破坏,形成较稳定的次生结构。

2.3 黄土增(减)湿与初始结构强度的关系

为了进一步分析含水率变化对原状黄土结构强度的影响规律,将不同含水率条件下的 $e-P$ 绘制成曲线(图 4)。

从图 4 可以看出:原状黄土的压缩曲线随 P 的

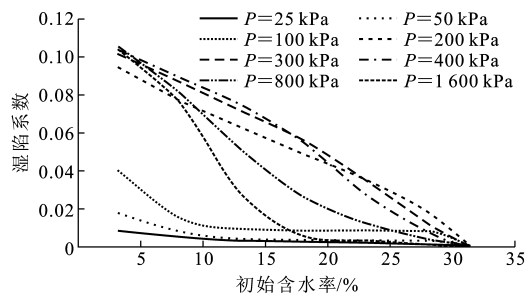


图 3 湿陷系数与初始含水率的关系曲线

Fig. 3 Relation Curves of Collapsibility Coefficients and Initial Water Contents

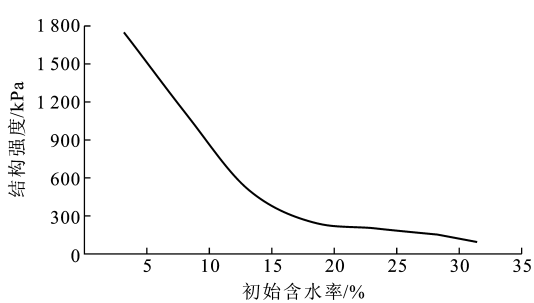


图 5 黄土结构强度与初始含水率的关系曲线

Fig. 5 Relation of Structural Strength of Loess and Initial Water Contents

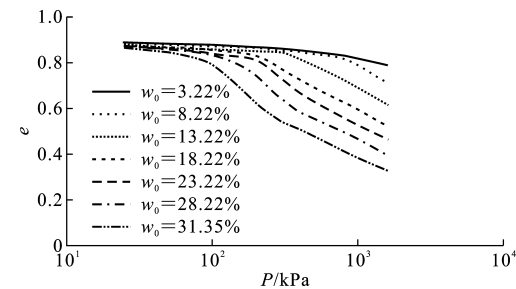


图 4 不同初始含水率下的压缩曲线

Fig. 4 Compression Curves with Different Initial Water Contents

增大由平缓转为陡降,平缓段 e 表现为随增湿减小和随减湿而增大的趋势。每条曲线在经历了前期的平缓段后会出现一个转折点,此点为黄土结构强度 P_c 点,即黄土结构开始破坏时的压力点。通过 Casagrande 方法求出各曲线的结构强度 P_c [10-11],如表 2 所示。结构强度 P_c 与初始含水率 w_0 的关系如图 5 所示。

表 2 不同初始含水率下黄土的结构强度

Tab. 2 Structural Strength of Loess with Different Initial Water Contents

初始含水率 w_0 / %	结构强度 P_c / kPa
3.22	1 750
8.22	1 100
13.22	500
18.22	250
23.22	200
28.22	150
31.35	90

从图 5 可以看出,黄土的结构强度随初始含水率增大呈减小趋势,且当初始含水率 w_0 小于液限 w_L (29.22%) 时,在低压力条件下 ($P \leq 150$ kPa),不同初始含水率增湿到 w_L 的过程中压力 P 始终小于结构强度 P_c ,说明在此过程中黄土的结构未发生破坏,对含水率的敏感性较弱,黄土结构的稳定性较

强。随着湿度的继续增加,黄土的结构开始急速减弱,当压力增大到超过结构强度 P_c 时,黄土结构开始遭到破坏,稳定性减弱。作用压力 P 越大,在较高 w_0 条件下黄土结构破坏越严重,当 $P \geq P_c$ 时,甚至在增湿前黄土的初始结构已遭到破坏,轻微增湿条件即可产生较大的变形。由此可见,黄土增湿变形发展受结构强度 P_c 与增湿时作用压力 P 的影响非常明显。

2.4 黄土湿陷过程中的微结构变化

在干旱半干旱环境条件下,黄土主体骨架以粗粉颗粒为主,并与微小的黏土颗粒、可溶盐及腐殖质胶体等物质形成固化连接,这就构成了黄土的结构强度。为了进一步研究陇东地区黄土湿陷后的结构特点,对天然含水率下黄土湿陷前后的试样进行了电镜扫描试验,图 6 为黄土湿陷前后的电镜扫描图像。

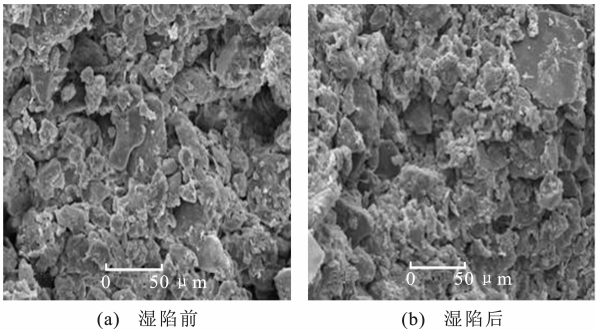


图 6 湿陷前后微结构电镜扫描图像

Fig. 6 Scanning Electron Microscopy Image of Microstructure Before and After Collapsibility

从图 6 可以看出:黄土湿陷前土体颗粒排列较为疏松,颗粒间可见大量孔隙,呈胶结连接状 [13];湿陷后土体的微结构发生了明显变化,胶结状孔隙消失,形成了以镶嵌孔隙为主的结构体,可以看到土体结构变得比湿陷前密实。实际上,由于天然状态下的非饱和黄土由固、液、气三相构成,土体内部有较

强的吸力作用,但当黄土内部含水率增加后,就会造成内部吸力减小,水分使得颗粒间的摩擦因数降低,削弱了颗粒之间的连接强度,从而使土体结构强度呈明显降低趋势,这就是含水率增加会造成黄土结构强度降低的原因。

3 结 语

(1)黄土的湿陷敏感性受初始含水率的影响较大,呈现随减湿而增大、随增湿而减小的趋势。

(2)增湿湿陷系数随含水率的增大呈增大趋势,反映了增湿过程中湿陷退化的趋势越来越大。

(3)黄土结构强度随初始含水率的增大呈降低趋势,在含水率增大初期,黄土结构强度降低速率较大,后期速率减缓。

(4)对比天然含水率状态下原状黄土湿陷前后的电镜扫描照片发现,黄土湿陷前后土体的微结构发生了明显变化,胶结状孔隙消失,形成了以镶嵌孔隙为主的结构体,形成较稳定的次生结构,土体结构变得比湿陷前密实。

参考文献:

References:

[1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报,2001,23(1):3-13.
XIE Ding-yi. Exploration of Some New Tendencies in Research of Loess Soil Mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,23(1):3-13.

[2] 周茗如,杨 鑫,王晋伟,等. 陇东黄土塬场地高层建筑复合桩基应用研究[J]. 建筑技术,2016,47(9):812-815.
ZHOU Ming-ru, YANG Xin, WANG Jin-wei, et al. Research on Application of Composite Piles Foundation of High-rise Buildings in Longdong Loess Tableland Area[J]. Architecture Technology,2016,47(9):812-815.

[3] 高 帅,骆亚生,胡海军,等. 非饱和原状黄土增湿条件下力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(7):1313-1318.
GAO Shuai, LUO Ya-sheng, HU Hai-jun, et al. Tri-axial Tests on Water Immersion of Unsaturated and Undisturbed Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(7):1313-1318.

[4] 王 腾,周茗如,王晋伟,等. 陇东地区非饱和原状黄土的三轴力学特性[J]. 工业建筑,2016,46(11):122-126.
WANG Teng, ZHOU Ming-ru, WANG Jin-wei, et al.

Experimental Study of Unsaturated Intact Loess in Qingyang Area of Gansu Under Triaxial Condition[J]. Industrial Construction,2016,46(11):122-126.

[5] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2015.
XIE Ding-yi. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. Beijing:Higher Education Press,2015.

[6] 张苏民,郑建国. 湿陷性黄土(Q₃)的增湿变形特征[J]. 岩土工程学报,1990,12(4):21-31.
ZHANG Su-min, ZHENG Jian-guo. The Deformation Characteristics of Collapsible Loess During Moistening Process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1990,12(4):21-31.

[7] 张彤伟,邓永锋,刘松玉,等. 渗透吸力对重塑黏土的压缩和渗透特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(12):2260-2266.
ZHANG Tong-wei, DENG Yong-feng, LIU Song-yu, et al. Experimental Investigation of Osmotic Suction Effect on Hydro-mechanical Behaviour of Remolded Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(12):2260-2266.

[8] ROGERS C D F, DIJKSTRA T A, SMALLEY I J. Hydroconsolidation and Subsidence of Loess: Studies from China, Russia, North America and Europe: In Memory of Jan Sajgalik[J]. Engineering Geology, 1994,37(2):83-113.

[9] DERBYSHIRE E, DIJKSTRA T A, SMALLEY I J, et al. Failure Mechanisms in Loess and the Effects of Moisture Content Changes on Remoulded Strength[J]. Quaternary International,1994,24:5-15.

[10] DIJKSTRA T A, SMALLEY I J, ROGERS C D F. Particle Packing in Loess Deposit and the Problem of Structure Collapse and Hydroconsolidation[J]. Engineering Geology,1995,40(1/2):49-64.

[11] DIBBEN S C, JEFFERSON I F, SMALLEY I J. The “Loughborough Loess” Monte Carlo Model of Soil Structure[J]. Computers & Geosciences, 1998, 24(4):345-352.

[12] ASSALLAY A M, ROGERS C D F, SMALLEY I J. Formation and Collapse of Metastable Particle Packings and Open Structures in Loess Deposits[J]. Engineering Geology,1997,48(1/2):101-115.

[13] DERBYSHIRE E, DIJKSTRA T A, SMALLEY I J. Genesis and Properties of Collapsible Soils[M]. Berlin:Springer,1995.

[14] 周凤玺,米海珍,胡燕妮. 黄土湿陷变形本构关系研究[J]. 兰州理工大学学报,2005,31(4):116-119.
ZHOU Feng-xi, MI Hai-zhen, HU Yan-ni. Study of

- Constitutive Law for Collapsible Deformation of Loess[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005, 31(4): 116-119.
- [15] 王朝阳, 许强, 倪万魁, 等. 非饱和原状黄土的非线性损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1108-1111.
- WANG Zhao-yang, XU Qiang, NI Wan-kui, et al. A Nonlinear Damage Constitutive Model of Unsaturated Undisturbed Loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1108-1111.
- [16] 陈正汉, 周海清, FREDLUND D G. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 603-608.
- CHEN Zheng-han, ZHOU Hai-qing, FREDLUND D G. Nonlinear Model for Unsaturated Soils and Its Application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 603-608.
- [17] 胡再强. 黄土结构性模型及黄土渠道的浸水变形试验与数值分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2000.
- HU Zai-qiang. Inundation Deformation Test and Numerical Analysis on Loess Structural Model and Loess Canal[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000.
- [18] 陈存礼, 高鹏, 胡再强. 黄土的增湿变形特性及其与结构性的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1352-1360.
- CHEN Cun-li, GAO Peng, HU Zai-qiang. Moistening Deformation Characteristic of Loess and Its Relation to Structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1352-1360.
- [19] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 775-779.
- HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Research on Structural Behavior of Unsaturated Loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 775-779.
- [20] 张宁宁, 骆亚生. 非饱和黄土的结构性与强度特性的关系[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(5): 1838-1844.
- ZHANG Ning-ning, LUO Ya-sheng. Relationship Between Structure and Strength Property of Unsaturated Loess[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(5): 1838-1844.
- [21] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272.
- CHEN Zheng-han. On Basic Theories of Unsaturated Soils and Special Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272.
- [22] 李加贵, 陈正汉, 黄雪峰. 原状 Q_3 黄土湿陷特性的 CT-三轴试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1288-1296.
- LI Jia-gui, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng. CT-triaxial Test for Collapsability of Undisturbed Q_3 Loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1288-1296.
- [23] 石刚. 黄土地基承载力的试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(11): 51-54.
- SHI Gang. Experimental Research on Bearing Capacity of Loess Foundation[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(11): 51-54.
- [24] 米峻, 李爱国, 李伟. 湿陷性黄土路基强夯法施工工艺探讨[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(12): 68-71.
- MI Jun, LI Ai-guo, LI Wei. Discussion of Power Ramming Technology for Collapsed Loess Subgrade[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(12): 68-71.
- [25] SD 128—84, 土工试验规程[S].
- SD 128—84, Specification of Soil Test[S].
- [26] JTJ 051—93, 公路土工试验规程[S].
- JTJ 051—93, Test Methods of Soils for Highway Engineering[S].