

结构性对黄土压缩回弹性能影响的试验研究

张振龙¹, 徐亚利², 刘增荣¹

(1.西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2.皖西学院建筑与土木工程学院, 安徽 六安 237012)

摘要: 根据黄土的大孔隙、高强度及欠压密等特性, 对不同含水量的原状土与重塑土进行了一系列侧限压缩试验, 包括压缩试验、压缩再回弹试验和压缩回弹再压缩试验, 并对天然含水量下原状土进行 4 种不同荷载下的回弹再压缩试验。在试验的基础上详细分析了结构性对黄土的压缩和回弹性能的影响, 尤其是对原状土在结构屈服前后的力学性能变化的影响, 得出黄土的结构性对其压缩回弹性能的影响显著, 特别是在结构屈服压力前后, 原状土的回弹能力差别较大。研究成果为提出一种结构性黄土先期固结压力的推求方法奠定了基础。

关键词: 原状黄土; 重塑土; 结构性; 压缩; 回弹

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0500-05

Experimental research on the influence of the soil structure on the resilience of loess

ZHANG zhenlong¹, XU yali², LIU zengrong¹

(1.college of civil engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China;

2.School of Architecture and Civil Engineering, West Anhui University, Lu 'an Anhui 237012, China)

Abstract: According to the loess's characteristics of large pores, high strength and less compaction etc., compression-rebound test, undisturbed soil compression-rebound and compression test under four kinds of load separately for undisturbed soil and remolded soil with different moisture contents on the basis of unconfined compression test were carried out in this paper. The effect of soil structure on the compression and resilience properties of the loess especially the change of the mechanical property before and after structural yield was analyzed according to the test results. The conclusion that the structural property of loess influence the compressive and resilient properties significantly can be drawn. Especially, the undisturbed soil resilience presented large difference before and after the structural yield pressure. The study provides a basis for the method of pre-consolidation pressure of intact loess.

Key words: undisturbed loess; remolded soil; structural; compression; rebound.

自然界中的土体受地质和环境的影响, 颗粒不仅随机排列, 颗粒与颗粒之间也存在着或强或弱的联结力, 使其形成了一定的结构性。对于黄土而言, 由于经历了地质年代的第四纪, 特定的形成条件和环境, 造就了黄土特殊的颗粒联结和排列特征, 形成了明显的柱状节理和大孔隙结构, 这种特征往往表现出欠压密性, 在强度上则表现出超固结土的特性, 独特的结构使得黄土的力学性状和工程性质极为复杂。

从广义上说, 天然土绝大多数都有结构性。结构性的研究已经成为 21 世纪的核心问题^[1], 很多学者结合细观形态学理论、固体力学理论及土力学理论先后对粘土、软土以及黄土做了大量的研究, 并取得了丰硕的研究成果。如田堪良等(2011)针对不同的受力条件, 提出基于变形条件的黄土结构性参数、基于强度条件的黄土静力结构性参数和基于强

度条件的黄土动力结构性参数型^[2]。M.D.Liu 和 J.P.Carter(1999)根据土的压缩试验, 提出了土的结构性压缩模型^[3-4]。随后, 他们基于临界状态土力学理论提出了悉尼土模型^[5-6]。邵生俊等(2004)提出了一个既能反映土粒微观排列的结构性, 又能反映土粒间由于特殊的胶结结构而综合表现出的宏观力学特征, 从而可以开展对土的结构性进行研究的结构性参数^[7]。沈珠江基于损伤理论并针对结构性粘土提出了复合体模型及堆砌体模型^[8]。陈辉等在 2010 年从土力学途径出发, 在三轴试验的基础上, 提出了反映重塑黄土和原状饱和黄土结构性的定量化参数, 较为详细地研究了重塑黄土和原状饱和黄土的结构性变化特征^[9]。谢定义和齐吉林首次提出了用以反映联结特征和排列特征的两个新概念, 即可稳性和可变性, 通过这两个概念来反映土的结构性强弱和结构强度的大小^[10]。骆亚生等首

先把该思想发展到复杂应力条件下, 定义了基于强度考虑的土结构性参数, 为复杂应力条件下研究土的结构性变化特性和建立结构性本构关系奠定了基础^[11].

本文通过原状土和重塑土在不同含水量下的侧限压缩试验、原状土在不同荷载下的压缩回弹再压缩试验, 详细分析了黄土的结构性对其压缩、回

弹及再压缩性能的影响.

1 试验用土的物理力学性质

试验用土取自西安市郊区某建筑工地, 取土深度为 4.0~5.0 m. 所取土样呈褐黄色, 可塑状态, 属于典型的 Q3 黄土. 土样的物理力学性质指标如表 1 所示.

表 1 黄土的物理力学指标
Table 1 Physical and mechanical indexes of loess

土样	比重	含水率 $w/\%$	天然密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	干密度 $\rho_d/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$
Q ₃	2.71	22	1.48	1.2	31.3	18.9

根据试验需要, 采用风干法和滴水法制备了 8%、16%、22%、28% 及饱和五种不同初始含水量的原状黄土, 并放置于保湿缸中 24 h 以上, 使水分均匀分布; 制备重塑土试样时, 碾碎原状土样削样的余土, 过孔径为 1 mm 的筛, 保证与原状黄土试样相同的干密度和含水率, 通过分层压样法制备; 饱和样采用抽气饱和法制备.

2 试验设计

为了研究结构性对黄土的压缩性能、压缩回弹性能及压缩回弹再压缩性能的影响, 设计了如下四个试验: (1)原状土和重塑土的压缩试验; (2)原状土和重塑土的压缩回弹试验; (3)原状土和重塑土的压缩回弹再压缩试验, 选用荷载为 400 kPa 和 800 kPa 时卸荷回弹再压缩; (4)原状土在不同荷载下回弹再压缩, 对天然含水量下原状土分别在荷载为 50 kPa、100 kPa、400 kPa 和 800 kPa 时回弹再压缩等四个方面的原状土和重塑土侧限压缩试验.

3 试验结果及分析

3.1 不同含水量下原状土和重塑土的压缩试验

如图 1 所示, 原状土样的压缩曲线可以分为两个阶段: 第一阶段, 平缓段, 即当压力小于结构屈服压力时, 土样的压缩性较小, 表现为土体结构在外部荷载作用下基本保持不变, 只产生一定量的弹性变形和少许塑性变形 (弹性变形为主且有轻微的结构扰动, 土的孔隙变化也相对较小); 第二阶段, 陡降段, 即当压力超过其结构屈服压力后, 由于颗粒间的胶结物质产生的胶结加固强度和特定的排列特征综合形成的结构强度已经无法抗衡外界的荷载, 于是土体内部结构大量的破损, 除土体结构塌陷外, 还伴随着土颗粒的滑移, 所以土样的变形量显著增大, 且塑性变形在整体变形中所占比重随

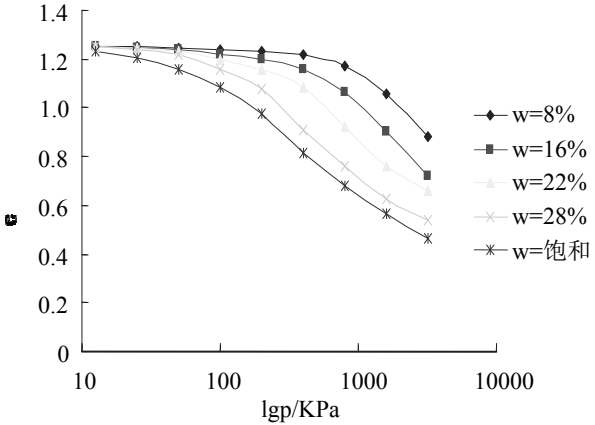


图 1 不同含水量原状土的压缩曲线
Fig.1 The compression curves of undisturbed soil at different water content

着荷载的增加而增大.

当含水量较小时, 压缩曲线在结构屈服压力前后变化较大, 压缩曲线的平缓段和陡降段的分界明显, 即黄土的结构性在结构屈服压力前后差异明显, 对压缩性能的影响显著. 当含水量相对较高时, 压缩曲线整体上相对比较平缓, 平缓段和陡降段的分界点也越来越不明显, 这一特征恰恰说明了水是削弱颗粒间联结强度的主要因素. 随着含水量的增大, 颗粒间的水膜逐渐因水分的增多而变厚, 粒间的基质吸力降低, 颗粒间的胶结加固强度也因水的胶溶作用而降低, 从而破坏了黄土的原始结构, 所以原状土的压缩曲线会随着含水量的增加而表现为在结构屈服压力前后变化不大, 压缩曲线的拐点也越加不明显. 同时, 随着含水量的增大, 压缩曲线在后期越加平缓.

当含水量和压力都较大时, 压缩曲线末尾段出现了微微的“上翘”现象. 随着含水量的增加, 曲线的上翘起点所对应的压力值也有逐渐减小的趋势, 这与文献^[2-4]中的试验结果也较为相符.

如图 2 所示, 含水量对重塑土样的压缩曲线也

有影响,但是影响很小,除了在较低含水量($w=8\%$ 和 $w=16\%$)时,微弱的次生结构使得压缩曲线拐点较为明显以外,其它含水量下重塑土的压缩曲线基本呈线性分布,没有拐点,这也说明重塑土经碾压、过筛后土样的原始结构已经完全破坏,含水量对于这种重组排列后的重塑土压缩性能影响较小。

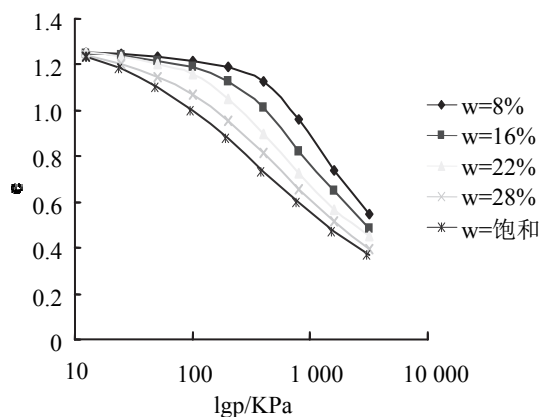


图2 不同含水量重塑土样的压缩曲线及分析

Fig.2 The compression curves of remoulded soil at different water content

综上所述可知,原状土由于颗粒间胶结物质产生的加固强度,当达到一定荷载时,土体的结构性逐渐破坏,土颗粒之间产生相互的滑移以及重新排列,所以在相同含水量、压力时,原状土的压缩变形量比重塑土要小。因此在该压力作用下,原状土的压缩曲线较重塑土的压缩曲线要平缓。当土体的结构完全被破坏时,土体的力学性质就不再受结构性的影响,其压缩曲线自然逐渐向重塑土的压缩曲线靠近,并且也与重塑土的压缩曲线形态相似^[2-5]。所以,含水量越大,原状土和重塑土的压缩曲线形态越接近,尤其表现在饱和和原状土的压缩曲线与饱和和重塑土的压缩曲线上,两者都表现为线性分布。

3.2 原状土与重塑土的压缩回弹曲线

由图3可知,相同含水量的原状土和重塑土在压力很小时,两曲线的压缩变形量基本相当。随着压力的增大,原状土的结构性逐步开始发挥作用,两曲线的变化也发生了明显的区别。在荷载还没有达到结构屈服压力之前,由于结构强度的存在,原状土的压缩变形相对较小,所以原状土的压缩曲线明显要比重塑土的压缩曲线要平缓。然而,当荷载超过结构屈服压力之后,由于其特殊的颗粒结构形式(架空式或镶嵌式形式),并伴随团粒的压碎以及内部孔隙的不均匀,导致原状土的压缩变形迅速增大,明显大于重塑土,因此原状土在荷载超

过结构屈服压力后的压缩曲线明显比重塑土的更为陡峭,即原状土的压缩指数大于重塑土。随着荷载的增加,原状土的结构性逐渐被破坏,直到完全丧失,原状土压缩曲线也逐渐向重塑土靠近。当达到一定压力时,两曲线相交于一点。此后,随着荷载的增加,重塑土颗粒的重组和排列使得其结构更加紧密,其抵抗压缩的性能又略有增强的趋势,压缩变形量很有限,因此原状土的压缩曲线位于重塑土的压缩曲线之下。

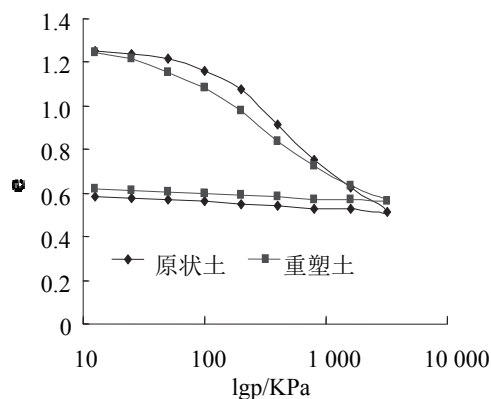


图3 原状土与重塑土的压缩回弹曲线的对比

Fig.3 The compression-resilience curves of undisturbed soil and remoulded soil

另外,从原状土和重塑土的回弹性能来看,两者在荷载加至最后一级时,由于原状土样的结构性已经完全破坏,其回弹性能也趋近于重塑土的回弹性能,即两土样的回弹曲线斜率基本一致,即回弹指数相同。

3.3 原状土的压缩曲线与压缩回弹再压缩曲线

由图4可知,含水量相同时,原状土的压缩回弹曲线与压缩回弹再压缩曲线在回弹点前,两曲线的压缩变形量基本相当。经过压缩回弹后再压缩时,回弹再压缩的曲线的变形量明显小于压缩曲线,此后的回弹再压缩曲线也变得平缓了,回弹再压缩曲线斜率比压缩曲线斜率要小一些,即压缩指数要小。另外,两者在最后一级荷载回弹的回弹曲线斜率基本一致,即回弹指数相同。但是回弹后最终孔隙比有所差别。再压缩回弹曲线的回弹起始孔隙比与最终孔隙比都比压缩回弹的要大,即最终压缩量小。显然,这正是因为原状土具有一定的结构性,而土的结构性是由其排列特征和联结特征共同作用的结果,在压缩过程中,一部分的结构性被破坏,使得颗粒发生排列和重组的调整并趋近于稳定,这种调整使得其在后期的抗压性能上发挥了积极的作用。另外一部分在回弹后又得到了恢复,两

种作用的综合结果使得其回弹再压缩曲线比压缩曲线的压缩量少。然而这部分恢复的结构性在随后的加载中又逐渐被破坏,直到结构性完全破坏,所以两者在最后一级荷载下回弹性能基本相当,即回弹指数基本一致。

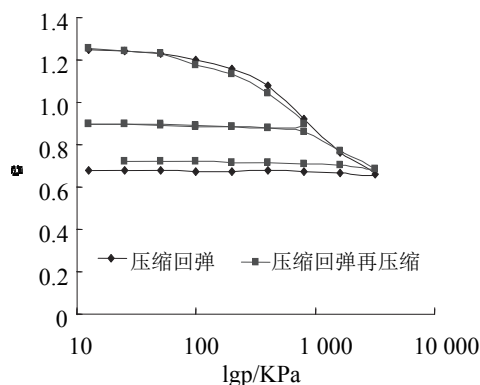


图4 原状土的压缩曲线与压缩回弹再压缩曲线的对比
Fig.4 The compression curve and compression-resilience curve of undisturbed soil

由图5可知,在相同含水量时,重塑土的压缩回弹曲线与压缩回弹再压缩曲线整体上基本重合,且其回弹再压缩曲线斜率基本与前期一致。对于重塑土而言,即便是回弹后再压缩对其抗压性能没有改变,此时重塑土也基本没有了结构性。但是,经过回弹,回弹再压缩曲线的压缩量要比压缩回弹曲线的压缩量略小一些,说明回弹过程中,由于制样造成的次生结构对其抗压性能也有所提高,不过提高的程度非常有限。

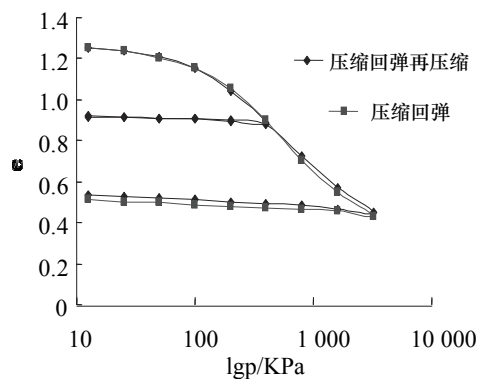


图5 重塑土的压缩回弹与压缩回弹再压缩曲线的对比
Fig.5 The compression-resilience curve and compression-resilience-recompression curve of remoulded soil

3.4 压缩回弹再压缩曲线

由图6可知,无论是对于最后一级荷载的回弹曲线还是期间任一荷载的回弹曲线来说,两者在超过结构屈服压力后的回弹能力基本相当,原状土的回弹曲线斜率与重塑土的回弹曲线斜率基本一致,即回弹指数相当。但是原状土在回弹后结构性对

其抗压性能有所提高,导致回弹再压缩曲线在回弹后的曲线比重塑土要平缓一些,即回弹后的压缩指数小一些。

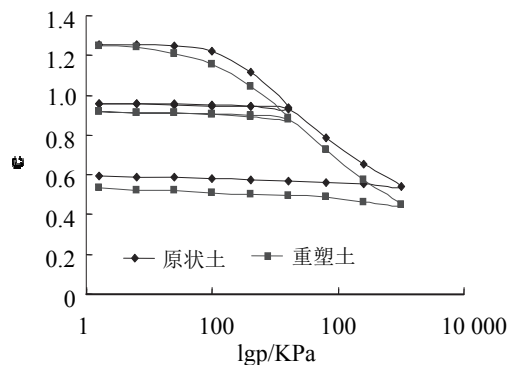
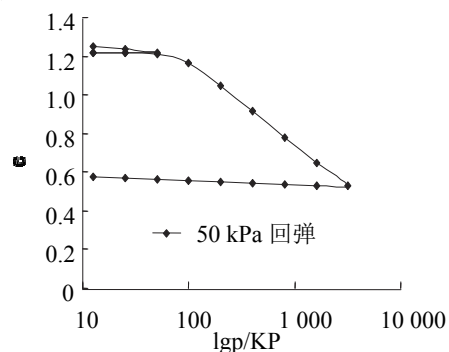


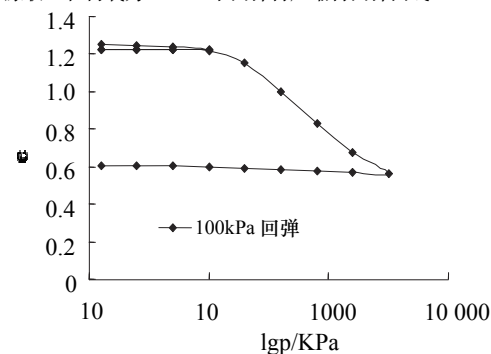
图6 原状土与重塑土的压缩回弹再压缩曲线的对比
Fig.6 The compression-resilience-recompression curve of undisturbed soil and remoulded soil

3.5 不同荷载下原状土回弹再压缩曲线

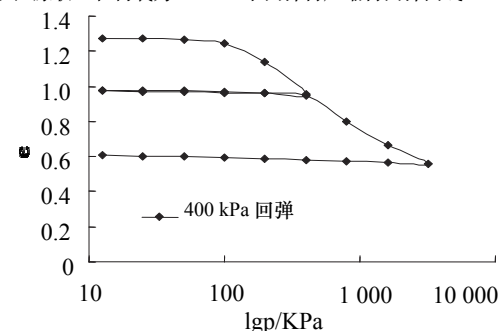
由图7(a)~(d)可知,原状土在不同荷载下回弹的性能有明显差别,尤其是在结构屈服压力前后表现尤为突出。



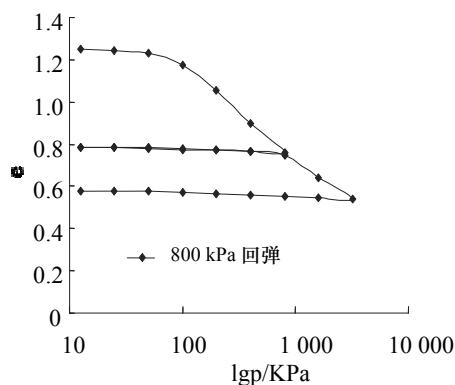
(a) 原状土在荷载为 50 kPa 下回弹再压缩再回弹曲线



(b) 原状土在荷载为 100 kPa 下回弹再压缩再回弹曲线



(c) 原状土在荷载为 400 kPa 下回弹再压缩再回弹曲线



(d) 原状土在荷载为 800 kPa 下回弹再压缩-回弹曲线

图7 原状土不同回弹点的压缩回弹再压缩曲线对比
Fig.7 The resilience-recompression curves for undisturbed soil at the load point

4 结语

依据对原状土和重塑土设计的一系列侧限压缩试验,分析了黄土的结构性对其压缩回弹性能的影响,尤其是对原状土在结构屈服前后的力学性能变化的影响,得到以下结论:

(1) 相同含水量的原状土和重塑土随着压力的增大,原状土的结构性逐步发挥作用,在压力达到结构屈服压力之前,原状土的压缩变形相对较小,其压缩曲线明显要比重塑土的压缩曲线要平缓;当压力超过结构屈服压力之后,原状土的结构被破坏,导致原状土的压缩变形迅速增大,压缩曲线明显比重塑土的更为陡峭,原状土的压缩指数比重塑土的大。

(2) 随着荷载的增加,原状黄土土的结构性逐渐丧失,原状土压缩曲线也逐渐向重塑土靠近,其回弹性能也趋近于重塑土的回弹性能。

(3) 黄土压缩回弹再压缩性能的研究结果表明:在进行原状黄土的先期固结压力推求时需要考虑其结构性的影响。

参考文献 References

- [1] 沈珠江.土体结构性的数学模型—21 世纪土力学的核心问题[J].岩土工程学报,1996,18(1): 95-97.
SHEN Zhujiang. The mathematical model for the structured soils—the key problem of soil mechanics in the 21st century[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1996,18(1):95-97.
- [2] 田堪良,马俊,李永红.黄土结构性量化参数的探讨[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):3179-3184.
TIAN Kanliang, Ma Jun, Li Yonghong. Discussion on quantitative of loess structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(1):3179-3184.
- [3] LIU M.D, CARTER, J. P. Modeling the destructuring of soils during virgin compression[J].Geotechnique, 2000. 50(4), 479-483.
- [4] LIU M.D, CARTER, J. P. Modeling compression behav-

- ior of structured geomaterials[J]. Geotechnique,2003. 3(2), 191-204.
- [5] LIU M D, CARTER J.P, DAVID W. Airey. Sydney soil model. I : Theoretical Formulation[J].International Journal of Geomechanics, 2011,11 (3), 211-224.
- [6] DAVID W AIREY,John P Carter, Martin D Liu. Sydney Soil Model. II: Experimental Validation [J]. International Journal of Geomechanics,2011,11(3):225-238.
- [7] 邵生俊,周飞飞,龙吉勇.原状黄土结构性及其定量化参数研究[J].岩土工程学报,2004, 26(4):531-536.
SHAO Shengjun,Zhou feifei,Long jiyong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004,26(4):531-536.
- [8] 沈珠江.结构性粘土的堆砌体模型[J].岩土力学,2000,21(1):1-4.
SHEN Zhujiang. A masonry model for structured clays[J].Rock and Soil Mechanics,2000,21(1):1-4.
- [9] 陈辉,刘明振,宋战平.重塑及原状饱和黄土结构性参数研究[J].地下空间与工程学报, 2010,6(3):487-497.
CHEN Hui,L Minhzen,Song Zhanping. Study on StructuralParameters of disturbed loess and saturated intactloess[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3):487-497.
- [10] 谢定义,齐吉琳,朱元林.土的结构性参数及其与变形强度的关系[J].水利学报,1999(10):1-6.
XIE Dingyi, QI Jilin,Zhu Yuanlin. Soil structure characteristics and research on its quantitative parameter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(10):1-6.
- [11] 骆亚生.非饱和黄土在动、静复杂应力条件下的结构性变化特性及结构性本构关系研究[J].岩土力学与工程学报,2004, 23(11): 1959-1959.
LUO Yasheng. Variation characteristics of soil structure and structural constitutive relation of unsaturated loess under static and dynamic complex stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1959-1959.
- [12] 郭靖,骆亚生,郭鸿,付中原.不同地区黄土的结构性试验研究[J].水土保持通报,2010, 30(1): 89-92.
GUO Jing,Luo Yasheng,Guo Hong. Experimental study on structural characteristics of loess in different regions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1): 89-92.
- [13] 田堪良,张慧莉.基于变形条件的黄土结构性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010, 29(8): 1706-1712
TIAN Kanliang, Zhang Huili. Experimental study of loess structural properties based on soil deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1706-1712.
- [14] 马秀婷,邵生俊,杨春鸣,等.非饱和结构性黄土的强度特性试验研究[J].岩土工程学报,2013, 35(S1): 68-75.
MA Xiuting, Shao shengjun,Yang chunming,et al. Experimental research on the strength characteristic of unsaturated structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 35(S1): 68-75.
- [15] 秦立科,李云璋,胡伟.非饱和黄土结构性定量试验研究[J].岩土力学,2011 32(S1): 265-269.
QIN Like,Li yunzhang,Hu wei. Experimental study of the structural parameter of unsaturated loess[J]. Rock and soil mechanics,2011 32(S1): 265-269. (编辑 沈波)