

非饱和黄土结构特性变化的主要影响因素

骆亚生^{1,2}, 谢定义², 李鹏¹

(1. 西北农林科技大学 水建学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西安理工大学 岩土所, 陕西 西安 710048)

摘要: 黄土是一种典型的结构性土, 对黄土结构性的研究是土结构性研究的重要组成部分, 有助于土结构性研究的进一步深入和向实用转化。通过非饱和黄土(原状黄土和人工结构性黄土)的侧限压缩试验资料, 探讨了土结构性的各主要因素对非饱和黄土结构特性变化的影响。分析结果表明, 随着垂直压力、含水率和密实程度的增长, 非饱和黄土的结构性表现出逐渐减弱的趋势; 水泥含量的增加对黄土的结构性起到了一定的加强作用; 黏粒含量对黄土结构性的影响不是单一的, 黏粒含量过高或过低都难以得到较强的结构性。

关键词: 非饱和黄土; 结构特性; 影响因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2005)02-0036-04

中图分类号: S152

Main Influence Factors on Structural Property Changes of Unsaturated Loess

LUO Ya-sheng^{1,2}, XIE Ding-yi², LI Peng¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling District 712100, Shaanxi Province, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China)

Abstract: Loess is a typically structured soil. The study on loess soil structure is an important aspect of soil structure research, contributing to the broader understanding of soil structural properties. This paper draws on primary data collected from confined compression tests of unsaturated loess, including intact loess and anthropogenic modified loess, and discusses the key influences on changes in the structural properties of unsaturated loess. Research results indicate that increasing vertical pressure, increasing water content and increasing soil density promote gradual structural weakening of unsaturated loess; and the structural integrity of the loess is reinforced in some instances by the increasing of cementing agents. Other important findings are that the key influences on loess structure are not uniform across loess regions, and that achievement of higher loess structural integrity is difficult under very high and very low clay content.

Keywords: unsaturated loess; structural property; influencing factor

土的结构性是影响土力学特性的诸要素中一个最为重要的要素^[1]。过去人们对土结构性的研究主要集中在土的微观显微结构研究和微观力学模型研究^[2-3], 这些研究成果在应用于具体工程和模拟复杂的土体结构上困难重重。而以往用土力学试验的方法研究土的结构性大多仅就土结构性的某一个方面进行探讨^[4-5], 尚不足以较全面地认识和反映土的结构性, 应用起来带有较大的片面性。谢定义和齐吉琳(1999)等人^[6]依据土力学研究的方法, 通过压缩试验, 提出了判断土结构性强弱的标准, 提出了一个简明、可靠、实用而且能全面反映土结构性几何特征和力学特征的土结构性参数。

土的结构特征是土体中颗粒的排列特征和联结特征的综合性反映。尽管如此, 弄清各个单一因素对于土结构变化特性的影响规律对于该问题的把握和深化研究依然是一项相当重要的工作。非饱和黄土是一种典型的结构性土体, 对非饱和黄土结构性及其变化规律的研究是土结构性研究不可或缺的重要组成部分。本文以非饱和黄土的压缩试验资料为基础, 求取几种不同类型黄土在不同结构状态下的土结构性参数, 从而进一步探讨了影响土结构性的各主要因素(这些因素有: 周围压力 p , 含水率 w , 初始干密度 ρ_d , 胶接情况和黏粒含量等)对非饱和黄土结构特性变化的影响。

收稿日期: 2004-11-27

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(10172070); 西北农林科技大学青年科研专项资助

作者简介: 骆亚生(1967-), 男(汉族), 陕西泾阳人, 博士, 高级工程师。主要从事黄土力学与工程方面的生产和科研工作。电话(029) 87081358, E-mail: lyas@public.xa.sn.cn。

1 试验的材料与方法

1.1 试验材料及制备

试验所用黄土土料主要取自陕西杨凌,作为比较部分使用了陕西铜川龙潭黄土和新疆三坪黄土。其中杨凌黄土取自杨凌渭河二级阶地的杨凌某制砖厂,取土深度3.5~4.0 m,属于Q₃黄土。比重为2.71,

烘干法测得的天然含水量为17.8%,天然干密度为1.26 g/cm³,天然孔隙比为1.151,天然饱和度为41.9%;龙潭黄土取自铜川龙潭水库,工程场地位于陕北黄土高原南缘,属黄土残积源,以Q₂风积黄土状壤土类古土壤为主,上部有Q₃风积黄土;三坪黄土取自新疆引额济克工程三坪水库料场。3种黄土土料的物理性质指标见表1。

表1 黄土土料的物理性质指标

黄土种类	比重	液限/ %	塑限/ %	塑性指数/ %	颗粒组成/ %			按颗粒组成分类	按塑性图分类
					> 0.05 mm	0.05~ 0.005 mm	< 0.005 mm		
杨凌	2.71	30.5	18.6	11.9	6.5	61.4	32.1	粉质黏土	CI
龙潭	2.72	33.6	17.7	15.9	16.3	61.9	21.8	轻粉质壤土	CI
三坪	2.69	33.0	18.8	14.2	9.8	42.2	48.0	粉质黏土	CL

试样制备分为原状样、重塑样和人工结构性样3类,其中仅对杨凌黄土采用了原状结构样。试验用黄土的原状试样由杨凌黄土原状土样直接削制而成;黄土重塑试样由黄土风干、碾碎、过筛后的土料压制而成;人工结构性黄土试样由在重塑样相同的黄土土料中分别加入0.5%、1.0%、1.5%秦岭牌普通硅酸盐水泥(42.5)后,混合均匀压制而成。重塑黄土试样和人工结构性黄土试样的干密度控制值分别为:杨凌黄土1.26(天然干密度),1.4,1.5 g/cm³,龙潭黄土和三坪黄土1.4 g/cm³。黄土压缩试样制样时,含水量按12%配制,待水分均匀后,用压样器缓慢、匀速一次压制而成。采用较低的制样含水率,水分转移快,缩短了制样时间,以免水泥在制样前完全凝结,同时,压制的样亦比较均匀。制成的试样先放入养护缸内养护3~5 d,然后再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,并用保鲜膜包裹放入饱和缸内备用。饱和样试验时在压缩仪上直接浸水饱和,干密度为1.26 g/cm³,1.40 g/cm³,1.50 g/cm³时对应的饱和含水率分别为:42.5%,35.4%和29.8%,试验后测得的饱和度均大于95%。

1.2 试验仪器及方法

压缩试验在三联固结仪上进行。试样面积为50 cm²,试样高为2 cm。仪器所配备的加压砝码及量程为10 mm的百分表均经过计量认证。试验方法依据中华人民共和国行业标准《土工试验规程》SL1999—237的规定步骤进行。

2 土结构性各主要影响因素的讨论

对于本文的黄土压缩试验资料,可根据文献[6]中土结构性参数的定义,用不同控制条件下的原状黄土(或人工结构性黄土)试样、重塑黄土试样以及饱和

原状黄土试样压缩试验所得的压力变形曲线,由式(1)求土结构性参数,从而用于对非饱和黄土结构变化特性进行进一步的分析探讨。

$$m_p = S_r \cdot S_s / S_0^2 \quad (1)$$

式中: m_p ——所定义的土结构性参数; S_0 ——压力 p 下原状黄土的压缩应变; S_s ——压力 p 下饱和原状黄土的压缩应变; S_r ——压力 p 下人工结构性黄土的压缩应变。

文献[7]曾以杨凌非饱和黄土压缩试验资料介绍了非饱和黄土的结构变化特性。本文则侧重于探讨压力 p 、含水率 w 、初始干密度 ρ_d 、胶结情况(水泥含量)和黏粒含量等因素对非饱和黄土结构特性变化的影响。图1—8为根据试验资料整理的可反映各因素影响的代表性土结构性参数曲线,通过这些曲线,对非饱和黄土构成影响的上述主要因素可做以下说明。

2.1 压力变化对黄土结构性的影响

一般来讲压力的增大引起的压密会使黄土结构的可变性减小而使其结构可稳性增强。由于可变性减小较快而可稳性增加较慢,这种影响的不同步性,使得压力增大时黄土的结构性总体变弱(图1,2)。但对于杨凌原状黄土来说,当含水率较低时具有较强的初始结构强度,这种初始结构强度能够承受较大的外部压力而不会被破坏,这时压力的增大主要使黄土结构的可变性有所增高从而一定程度上增强了黄土的结构强度,这种情况一直持续到某一含水率下初始结构强度被破坏为止,这一含水率也可称作是结构起始破坏含水率。大于这一含水率值之后,压力对原状黄土和重塑黄土结构性的影响将维持同样的趋势。

2.2 含水率变化对黄土结构性的影响

在黄土工程中,含水率一般被认为是一种广义的力,因此含水率对黄土结构性的影响规律与压力对其

的影响规律基本相似,即随着含水率的增大黄土的结构性参数值变低。但是,含水率对黄土结构性的影响程度与压力对黄土结构性的影响程度密切相关,压力低时,压力对黄土结构性的破坏较小,此时含水率变化对黄土结构的影响明显;随着压力的逐渐变大,压力对黄土结构性的破坏逐渐加强,相应的含水率变化对黄土结构性的影响逐渐减弱(图 1, 2)。

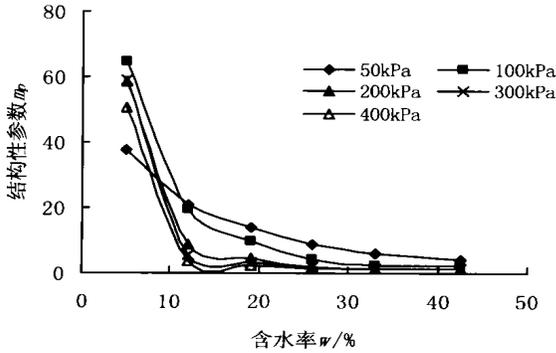


图 1 杨凌原状黄土($\rho_d = 1.26 \text{ g/cm}^3$)不同压力下的结构性参数与含水率关系曲线

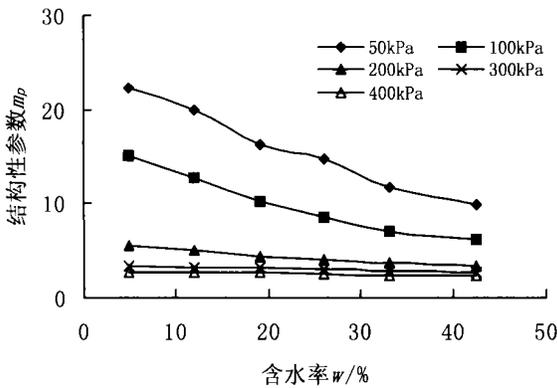


图 2 杨凌人工结构性黄土(1.0%水泥, $\rho_d = 1.26 \text{ g/cm}^3$)不同压力下结构性参数与含水率关系

2.3 密实程度对黄土结构性的影响

密度的增大会使黄土的结构可变性减弱而使其结构可稳性加强。试验证明,密度对黄土结构可变性的影响程度大于其对结构可稳性的影响程度。所以,随着密度的增加,同一条件下黄土的结构性其实表现出走弱的趋势(图 3, 4)。

2.4 颗粒间胶结程度对黄土结构性的影响

试验中黄土结构的可稳性主要由它的密实程度来维持,颗粒间胶结物质的增加,虽然也能增加黄土结构的可稳性,但对黄土结构的可变性增强更多。因此,从总体上来说,黄土粒间胶结水泥量的增加对黄土的结构性起到了一种加强作用(图 5, 6)。

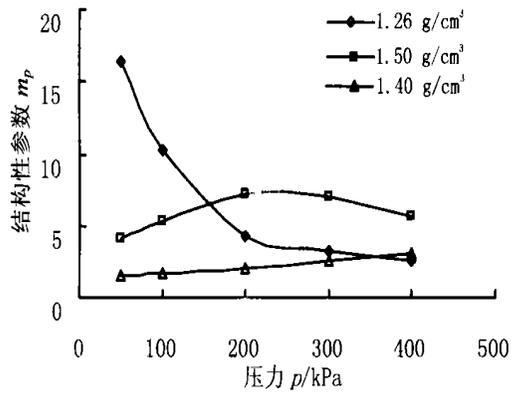


图 3 杨凌人工结构性黄土(水泥 1.0%, $w = 19\%$)不同密实状态下结构性参数曲线

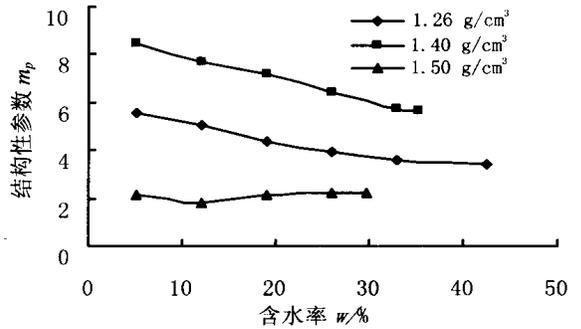


图 4 杨凌人工结构性黄土(水泥 1.0%, $p = 200 \text{ kPa}$)不同密度下结构性参数与含水率关系

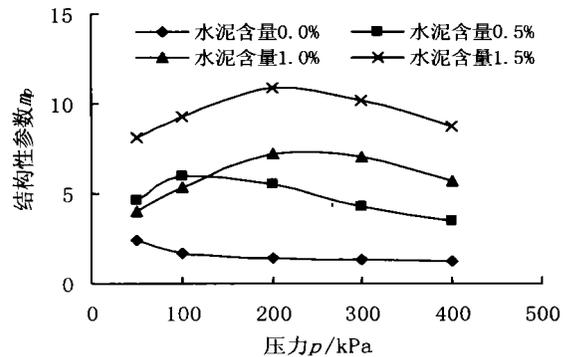


图 5 杨凌人工结构性黄土($w = 19\%$, $\rho_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$)不同胶结状态下结构性参数曲线

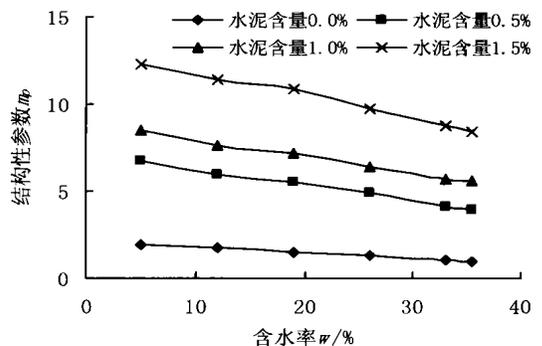


图 6 杨凌人工结构性黄土($p = 200 \text{ kPa}$, $\rho_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$)不同胶结状态下结构性参数与含水率关系

2.5 黏粒含量对黄土结构性的影响

通常认为,黏粒的胶结作用也应是影响黄土结构性的因素之一。上述杨凌黄土、龙潭黄土与三坪黄土的黏粒含量分别为 32.1%、21.8% 和 48.0%,其它指标基本相近,故它们可用于对比分析黏粒含量对结构性的影响。图 7 和图 8 表示出了不同黏粒含量的黄土分别以压力和含水率为参量的结构性参数曲线。

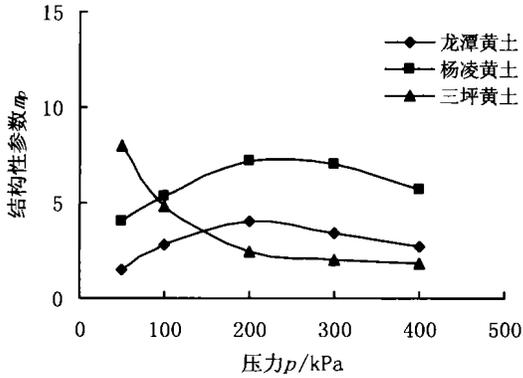


图 7 人工结构性黄土(水泥 1.0%, $w=19\%$, $\rho_d=1.40\text{ g/cm}^3$)
不同黏粒含量下结构性参数曲线

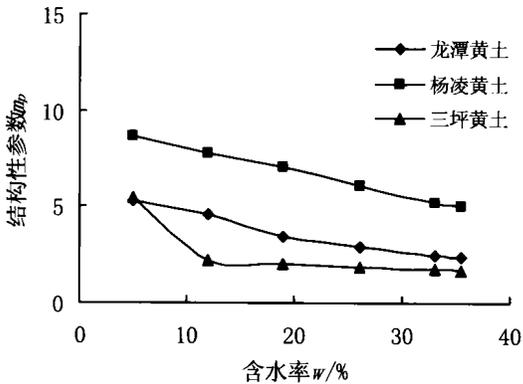


图 8 人工结构性黄土($p=300\text{ kPa}$, 水泥 1.0%, $\rho_d=1.40\text{ g/cm}^3$)
不同黏粒含量下结构性参数与含水率关系

图中可见,随着含水率增大,不同黏粒含量黄土的结构性参数均相应减小,表现出含水率对结构性削弱的一贯性(图 8);而随着压力的增大,不同黏粒含量黄土的结构性参数曲线形态变化不一,在黏粒含量较高时(三坪黄土)表现为高开低走,在黏粒含量较低时(龙潭黄土、杨凌黄土)表现为先升后降(图 7)。同时图中的试验结果也表明,黏粒含量

对黄土结构性的影响不是单一的,实际上应是土骨架中黏粒胶结作用和粉粒骨架作用的综合反映,有点类似于级配对土体稳定和强度的影响,只有一定含量的黏粒搭配才能获得较高的结构强度,黏粒含量过高或过低都难以得到较强的结构性。

3 结 论

本文以非饱和黄土压缩试验资料为基础,探讨了侧限压缩条件下各相关主要因素对非饱和黄土结构特性变化的影响。分析结果表明:垂直压力、含水率和密实程度的增长,均较大程度影响非饱和黄土土样结构可稳性一面,从而使非饱和黄土的结构性表现出逐渐减弱的大趋势;相反水泥含量的增加,加强了土颗粒间的胶接能力,使土体结构可变性的潜力增大,从而对黄土的结构性起到了一种加强作用;试验结果也表明,黏粒含量对黄土结构性的影响不是单一的,实际上应是土骨架中黏粒胶结作用和粉粒骨架作用的综合反映,有点类似于级配对土体稳定和强度的影响,只有一定含量的黏粒搭配才能获得较高的结构强度,黏粒含量过高或过低都难以得到较强的结构性。

[参 考 文 献]

- [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.
- [2] Gao Guorui. Microstructure of loess soil in China relative to geologic environment[M]. A special publication on geologic environment and soil properties. ASCE Convention, Houston, TX, 1983. 121—136.
- [3] 吴义祥. 工程黏性土微观结构的定量评价[J]. 中国地质科学院院报, 1991(23): 143—150.
- [4] 郑建国, 张苏民. 湿陷性黄土的结构强度特性[J]. 水文地质与工程地质, 1990(4): 22—25.
- [5] 李作勤. 有结构强度的欠压密土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 34—45.
- [6] 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. 水利学报, 1999(10): 1—6.
- [7] 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): 112—118.