

不同地区黄土的结构性试验研究

郭靖, 骆亚生, 郭鸿, 付中原

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 考虑不同地区黄土的结构性差异, 选取洛川、兰州和杨凌 3 地的典型黄土, 分别进行三轴剪切试验, 测定了应力应变关系曲线。基于 Duncan-chang 双曲线模型, 提出了一种简便求取结构性参数的方法, 得出了这 3 个地区的黄土结构性参数的变化规律, 较好地揭示了它们的结构性的变化规律和影响因素。结果表明, 非饱和黄土的结构性参数随应变的增大先降低, 而后保持在一个稳定的水平。含水率与围压对黄土的结构性影响显著。在相同的围压条件下, 含水率越低, 黄土的结构性参数越大; 在相同的含水率条件下, 围压越小, 黄土的结构性参数越大。对不同地区而言, 在相同条件下杨凌黄土的结构性最强, 洛川黄土次之, 兰州黄土结构性最弱。

关键词: 黄土; 结构性; 结构性参数; 不同地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)01-0089-04

中图分类号: TU444

Experimental Study on Structural Characteristics of Loess in Different Regions

GUO Jing, LUO Ya-sheng, GUO Hong, FU Zhong-yuan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Triaxial shear tests were conducted to measure stress-strain curves under the consideration of loess structural differences in different regions. Three different typical loess areas of Luochuan, Lanzhou, and Yangling were selected. Based on Duncan-chang hyperbolic model, a simple way was adopted to determine structural parameters, which is better to reveal the changes and factors of structural parameters. The change in the structural parameters of the three regions was found. Results showed that unsaturated loess structural parameters firstly decreased with the increase in shear strain and then remained at a stable level. Water content and consolidation stress had significant influences on structural parameters. Under the same pressure condition, the lower the moisture content, the greater the structural parameters of loess and under the same moisture condition, the smaller the pressure, the greater the structural parameters of loess. As far as different regions are concerned, the strongest structural characteristic of loess under the same conditions was Yangling loess and it was followed by Luochuan loess. Lanzhou loess structure was the weakest.

Keywords: loess; structural characteristic; structural parameter; different regions

土的结构性对黄土工程性质的重要影响已逐渐被国内外的学者所认识, 被认为是“二十一世纪土力学的核心问题”^[1]。土结构性反映了土颗粒排列特征和土颗粒联结特征, 由于土本身的颗粒性状、孔隙性状、含水量和矿物成分等因素的不同组合, 土具有不同的初始结构性, 在力学性质上表现为土体保持原结构状态不被破坏的能力。黄土在形成过程中具有了特有的大孔隙骨架结构, 这种独特的结构直接影响着黄土的力学性状和工程性质。黄土结构性的不同及其变化是其发生脆性破坏、湿陷的重要原因。黄土的

应力与应变关系, 孔隙水压力与应变关系, 固结变形等都与黄土的结构性具有显著的关系。

谢定义^[2]首先提出了采用结构性参数这一定量指标来反映结构性变化的研究方法, 并基于侧限压缩试验提出了反映结构性的综合结构势 m_p 。其后邵生俊、陈存礼及骆亚生等^[3-5]学者采用不同的试验方法研究了黄土结构性的影响因素, 提出了多个结构性参数。这些参数的提出很好地反映了黄土结构性的变化。但是由于我国黄土的分布广泛, 沉积情况千差万别, 具有明显的地域特性, 不同地区的黄土具有不同的

收稿日期: 2008-12-24

修回日期: 2009-04-01

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“非饱和黄土动力结构强度变形特性研究”(50578134); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-06-0864)

作者简介: 郭靖(1984—), 女(汉族), 四川省江油市人, 硕士研究生, 研究方向为黄土的工程性质及应用。E-mail: gjgeo@sohu.com。

通信作者: 骆亚生(1967—), 男(汉族), 陕西省泾阳县人, 博士, 教授, 主要从事黄土力学与工程方面的生产与科研工作。E-mail: yt02@nwsuaf.edu.cn。

工程特性,其颗粒组成、微观结构和胶结性都有着不同,相应其结构性也具有差异性。现有的黄土结构性的研究多侧重于某一地区黄土的实验分析,研究地点各异,较为零散,缺乏系统性,未能考虑不同地区的结构差异性。因此研究不同地区黄土的结构性变化就具有一定的理论价值和工程指导价值。本文通过常规三轴试验研究洛川、兰州和杨凌黄土的应力应变曲线的变化规律,求取结构性参数,综合考虑各个因素的影响,力求从空间分布上把握结构性的变化规律。

1 试验方案与方法

考虑了黄土的地区差异性和土样选择的典型性,试验所用土样分别取自甘肃兰州、陕西洛川和陕西杨凌 3 个典型黄土地区,取土深度为 3~5 m,均属于 Q₃ 黄土。洛川、兰州和杨凌这 3 个地区黄土的天然

含水率分别为:7.1%,3.7%和 19.3%。土料的物理性质指标见表 1。扰动、加荷和浸水是改变结构性的主要作用,可以使土的结构势充分释放。本文通过每一原状土样对应一个相同干密度和含水率的重塑样和相同干密度的饱和原状土样的试验方案来测定结构性参数。原状样在黄土原状土样上直接削制而成,重塑样按压样法分 4 层匀速缓慢压制而成。试样含水率调节分别采用风干法和水膜转移法,其控制含水率为 12%,19%,26%,配水后置于密闭养护缸中养护,待土样水分均匀后备用;饱和样通过抽气饱和,并于无气水中静置 24 h,试验后测定饱和度达到 95%以上。每一含水率制备 3 个试样,分别在围压 100,200,300 kPa 下采用固结不排水剪(CU)方法试验,在典型的三轴剪切仪上测定其应力应变关系。试样的制备情况见表 2。

表 1 黄土的物理性质指标

土样类型	比重	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数/ %	按塑性 图分类	颗粒组成/ %			按颗粒组 成分类
						>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm	
兰州黄土	2.71	28.8	18.0	10.8	CL	0.0	84.0	16.0	粉质黏土
洛川黄土	2.72	31.8	19.4	12.4	CL	0.0	82.0	18.0	粉质黏土
杨凌黄土	2.70	28.7	17.5	11.2	CL	16.5	62.8	20.7	粉质黏土

表 2 黄土三轴剪切试验及试样的制备

土样类型	干密度 d ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率 w / %	$\sigma_3 = 100$ kPa		$\sigma_3 = 200$ kPa		$\sigma_3 = 300$ kPa	
			原状	重塑	原状	重塑	原状	重塑
兰州黄土	1.34	12						
		19						
		26						
		35(饱和)						
洛川黄土	1.26	12						
		19						
		26						
		38(饱和)						
杨凌黄土	1.32	12						
		19						
		26						
		41(饱和)						

2 结构性参数的转化

基于 Duncan-chang 双曲线模型及邵生俊等^[3]提出的基于应力条件考虑的结构性参数 m ,进行如图 1 所示转换,式(2)中 $\sigma_1 - \sigma_3$ 为主应力差; a, b 为式(2)直线所对应的斜率与截距。

$$\left. \begin{aligned}
 m &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_0^2}{(\sigma_1 - \sigma_3)_r (\sigma_1 - \sigma_3)_s} & (1) \\
 \sigma_1 - \sigma_3 &= \frac{1}{a + b \sigma_1} = a + b \sigma_1 & (2) \\
 m &= \frac{(\sigma_r + b \sigma_r)(a_s + b_s \sigma_s)}{(a_0 + b_0 \sigma_1)^2} & (3)
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

图 1 结构性参数转化图示

作为典型成果,图 2—3 所示为含水率 $w_1 = 19\%$, 围压 100 kPa 下的洛川原状、重塑和饱和重塑黄土应力应变关系曲线和相应的 $\varepsilon_1 / (\sigma_r - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线。 $\varepsilon_1 / (\sigma_r - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线的回归参数值见表 3。由表 3 可以看出试验曲线的回归性较好,呈现出良好的线性。

由邵生俊提出的基于应力条件的结构性参数如图 1 中式(1)所示,将式(2)代入其中得到结构性参数一种新的求取方法即式(3),这种转化解决了一般结构性参数在 $w_1 = 0$ 和 $w_1 = 15\%$ 时没有意义的缺点,同时简化了结构性参数的求取方法,不必对试验数据进行插值求取某一应变所对应的主应力差,进而推出结构性参数,而是直接通过上述变换很快地求出结构性参数。式中: a_r, a_s 和 a_0 分别是重塑样、原状饱和样和原状样 $\varepsilon_1 / (\sigma_r - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 直线的截距; b_r, b_s 和 b_0 是该直线的斜率。

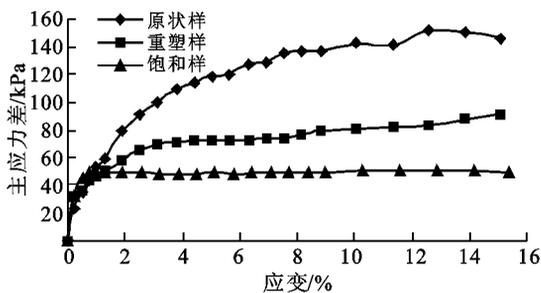


图 2 典型黄土的应力应变关系曲线

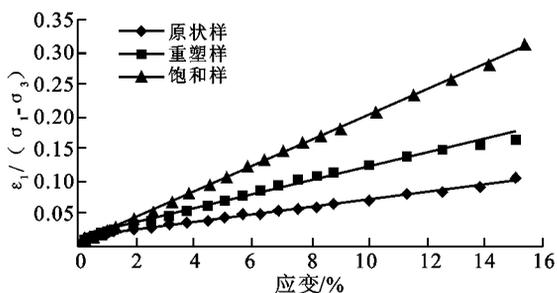


图 3 相应的 $\varepsilon_1 / (\sigma_r - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线

表 3 黄土结构性试验拟合参数

试样类型	a	b	R^2
原状黄土	0.006 1	0.005 9	0.994 3
重塑黄土	0.010 6	0.010 9	0.990 3
原状饱和黄土	0.013 2	0.020 6	0.991 5

3 区域间黄土结构性影响因素分析

3.1 结构性参数曲线随应变的变化规律

由上述方法求出的结构性参数曲线(图 4)可见,结构性参数曲线在小变形下由于土体结构初始损伤的有一个较为明显的降低过程。之后由于土体的愈

合次生结构逐渐形成,可变性减小而可稳性增强,其结构性参数到达一个较为稳定的水平。这表明土体的变形过程中土结构的初始损伤对结构性的影响较大。当变形较大时土体结构的愈合呈现出主导作用,土体次生结构的形成使得结构性参数趋于一个稳定值直到试验结束。本文依据此规律选取试验结束时 ($\varepsilon_1 = 15\%$) 的结构性参数进行分析。

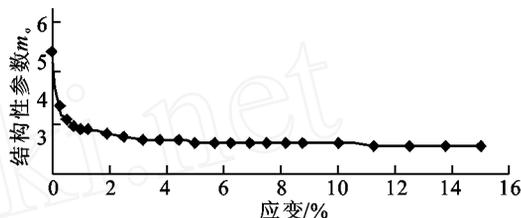


图 4 结构性参数曲线 ($w = 19\%$, $\sigma_3 = 100$ kPa)

3.2 含水率对于不同地区结构性参数的影响

3 个地区的黄土在相同围压下,结构性参数都随着含水率的增长逐步呈现降低的趋势。低含水的情况下 3 个地区的黄土具有较强的结构性,随着含水率的增大,黄土结构性参数急剧降低,结构性明显减弱(图 5)。可见,含水率对结构性参数有很大的影响。由于含水率的增大,土中孔隙进一步被水填充,土中可溶盐的进一步溶解,颗粒间的排列特征发生变化,颗粒间胶结变弱,导致结构性的减小。

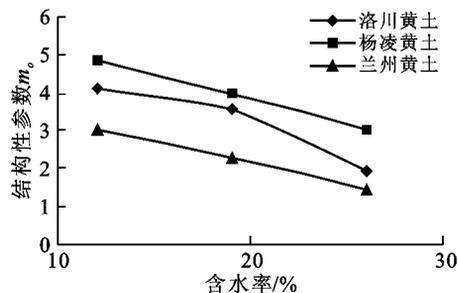


图 5 不同地区结构性参数与含水率的关系 ($\sigma_3 = 100$ kPa)

3.3 围压对于不同地区结构性参数的影响

随着围压的增大,3 个地区的结构性参数均呈减小的趋势。在同一含水率下,固结压力越大结构性参数越小,这表明黄土存在这一个结构屈服应力,使得在加荷和浸水的作用下土体结构彻底被破坏。含水率较高时 ($w = 26\%$),杨凌黄土相对于洛川和兰州黄土仍然具有较强的结构性,表明其结构屈服应力较高,结构性损伤不大;洛川及兰州黄土结构性参数均较低,表明其土体结构已发生较大损伤破坏,结构性急剧降低,结构屈服应力较低。可见洛川和兰州黄土对浸水的敏感性较大,这一变化正与洛川和兰州黄土具有较强的湿陷性一致(图 6)。

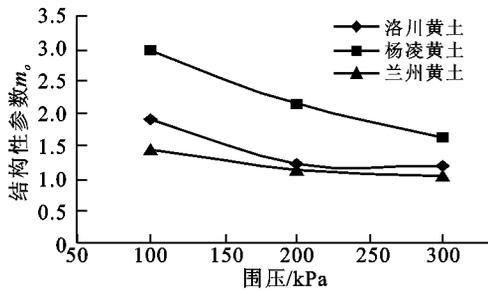


图 6 不同地区结构参数与围压的关系($w = 26\%$)

3.4 结构性参数的区域对比分析

由洛川、杨凌及兰州 3 地区的黄土结构性参数的相对位置可以看出,在同一条件下,杨凌地区黄土的结构性参数最大,其次是洛川黄土,兰州黄土最小。说明杨凌黄土的结构性最强,洛川黄土次之,兰州黄土的结构性最弱。可以看出结构性参数在空间上具有一定的分布规律即:从西北到东南方向增强。产生这种结构性变化规律的原因,笔者认为与黄土的物质成分和微结构自西北到东南存在着明显的区域性有关。黄土的黏粒含量自西北向东南不断增加。由西北向东南,黄土的“骨架”颗粒变细,黏粒等胶结物增多,胶结类型由“接触式”过渡到“基底式”,黄土的粒间空隙亦变得越来越细,其数量也愈来愈少^[6]。力学性质趋向良好,结构性逐渐增强。对于兰州黄土,其“骨架”较细,细颗粒或胶结物上应力相应分散,促使骨架颗粒周围的黏粒分布不均,有的骨架颗粒之间黏粒薄膜厚,有的则薄,黏粒本身常呈微丸粒状分布。这使得其结构强度较弱,结构性较差。且兰州黄土中存在的胶结物中含有较多的易溶盐,因而浸水后易造成强度明显降低;杨凌地区的黄土中骨架颗粒比较细而均一,分布均匀,加上其周围被厚厚的黏粒薄膜包围、胶结使其就有较大的结构强度。洛川黄土黏粒含量高于兰州黄土低于杨凌黄土,颗粒间胶结强度介于二者之间,结构性也居于两个地区之间。

我国黄土的形成以风成为主,由于风力的堆积作

用使得越往东南黄土形成的越早。并且我国的降雨量是从西北到东南逐渐增加,黄土也越容易受到水分的变化便不那么敏感。而西北地区的黄土由于降水较少,颗粒间缺少水的吸附作用,且土体中可溶盐含量较高,浸水后易发生结构破坏,结构性较弱。

4 结 论

(1) 本文采用的结构性参数转化方法表达式简单,意义明确,解决了一般结构性参数无头无尾的弊端,简化了结构性参数的求取方法。对于其它结构性参数的转化也具有参考意义。

(2) 3 个地区黄土的总体趋势是随着含水和围压的增加结构性参数减小。黏粒含量对结构性参数的影响明显,颗粒级配越好,黏粒含量越高,黄土的结构性越强。

(3) 就不同地区来讲,杨凌黄土的结构性最强,洛川黄土次之,兰州黄土的结构性最弱。考虑浸水和加荷对于结构性的影响可以看出,浸水对兰州和洛川黄土的影响更大,这与它具有较大的湿陷性是一致的。

[参 考 文 献]

- [1] 沈珠江. 土体结构性数学模型: 21 世纪土力学的核问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97.
- [2] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.
- [3] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531-536.
- [4] 陈存礼, 高鹏, 胡再强. 黄土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(7): 1353-1360.
- [5] 骆亚生. 非饱和黄土在动、静复杂应力条件下的结构变化特性及结构性本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
- [6] 刘东生, 王克鲁, 朱海之, 等. 黄土的物质成分与结构[M]. 北京: 科学出版社, 1966: 4-5.