

非饱和黄土的结构变化特性*

骆亚生^{1,2}, 谢定义¹, 邵生俊¹, 张爱军^{1,2}

(1 西安理工大学 岩土研究所, 陕西 西安 710048;

2 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 以陕西杨凌原状黄土和人工结构性黄土为研究对象, 通过非饱和黄土的压缩试验获取的基本资料, 求取非饱和黄土在不同结构状态下的综合结构势参数, 研究了黄土在压缩试验状态下的结构变化特性。结果表明, 对于原状结构黄土, 含水率对结构性参数影响明显, 含水率愈低同一压力下对应的结构性参数愈大, 尤其在低含水率区域, 含水率变化强烈影响黄土的结构性; 对于人工结构性黄土, 黄土的结构性受密度、含水率和水泥含量的耦合因素影响, 总体表现为干密度愈低、含水率愈小、水泥含量愈高, 黄土的结构性愈强。

[关键词] 非饱和黄土; 结构性参数; 土结构性

[中图分类号] TU 444

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)08-0114-05

土的结构性是影响土力学特性诸要素中一个最为重要的要素, 被认为是“21 世纪土力学的核心问题”^[1]。由于对土结构性的定量化面临巨大困难, 土结构性的影响一直只能隐含在土性参数之中, 只能由微观形态学和化学分析等结果对土性规律的变化作出一些定性的解释, 但距解决工程实际问题的要求相差甚远^[2,3]。谢定义和齐吉琳等^[4~6]认为, 土力学方法是研究土结构性及其应用的最好方法, 利用这种方法, 可以将土结构的颗粒排列特征和颗粒联结特征两个方面结合起来, 从而提出了判断土结构性强弱的标准。根据这一标准建议的土结构性参数, 不但简明、可靠、实用, 而且能全面反映土结构性的几何特征和力学特征, 同时与土的变形和强度特征具有密切而规律性的联系。

黄土是干旱半干旱地区的沉积物, 由于其特定的生成环境和存在的历史环境, 形成其明显的柱状

节理和大空隙结构, 这种独特的结构性直接影响黄土的力学性状和工程性质, 对黄土结构性及其变化规律的研究具有重要的理论意义和应用价值。本研究通过非饱和黄土的压缩试验, 旨在求取黄土在不同结构状态下的综合结构势参数, 用以研究压缩试验状态下黄土结构的变化特性, 从而为土结构性研究成果在黄土工程中的进一步应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试黄土 试验所用黄土土料取自陕西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 Q₃ 黄土。烘干法测得其天然含水率为 17.8 g/kg, 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%。黄土土料的物理性质指标见表 1。

表 1 黄土土样的物理性质指标

Table 1 Physical character index of loess samples

土样来源 Sample sources	液限/% Liquid limit	塑限/% Plastic limit	塑性指数/% Plasticity index	按塑性图分类 Plasticity classification chart	颗粒组成/% Grain composition			按颗粒 组成分类 Grain composition classification
					> 0.05 mm	0.05~ 0.005 mm	< 0.005 mm	
陕西杨凌 Shaanxi, Yangling	30.5	18.6	11.9	CI	6.5	61.4	32.1	粉质粘土 Silty clay

1.1.2 试样制备 试样制备分为原状土样、重塑土样和人工结构性土样 3 类。试验用原状黄土试样由

* [收稿日期] 2004-02-09

[基金项目] 国家自然科学基金项目(10172070); 西北农林科技大学青年科研专项基金项目“黄土结构性对其动、静力学特性的影响研究”

[作者简介] 骆亚生(1967-), 男, 陕西泾阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事黄土力学与工程研究。

杨凌黄土原状土样直接削制而成; 重塑黄土试样由风干、碾碎、过筛后的黄土土料压制而成; 人工结构性黄土试样是在重塑土样相同的黄土土料中分别加入 5, 10, 15 g/kg 秦岭牌普通硅酸盐水泥(P. 042 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(天然干密度)分别为 1.26, 1.40, 1.50 g/cm³。黄土压缩试样制样时, 含水量按 120 g/kg 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, 避免水泥在制样前完全凝结, 同时, 压制的土样比较均匀。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。试验时, 饱和样在压缩仪上直接浸水饱和, 干密度为 1.26, 1.40, 1.50 g/cm³

表 2 加入水泥后黄土土料的界限含水率

Table 2 Physical character index of loess samples				
土样来源 Samples source	水泥含量/(g · kg ⁻¹) Cement content	液限/% Liquid limit	塑限/% Plastic limit	塑性指数/% Plasticity index
陕西杨凌 Shaanxi, Yangling	0	30.5	18.6	11.9
	5	39.2	19.8	20.4
	10	42.0	20.2	21.8
	15	43.7	21.3	22.4

2 结果与分析

对于本文的黄土压缩试验资料, 可根据应力综合结构势参数的定义^[4~6], 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)求结构性参数, 从而可以分析非饱和黄土的结构变化特性。

$$m_p = S_r \cdot S_s / S_o^2, \tag{1}$$

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

2.1 非饱和原状黄土的结构性变化特性

图 1 为陕西杨凌原状结构黄土的结构性参数曲线。由图 1 可以看出, 结构性参数与含水率关系明显。含水率愈低, 同一压力下对应的结构性参数愈大, 尤其是含水率为 50 g/kg 时, 结构性参数值达 60 左右, 远高于其他含水率的对应值。在低含水率下, 结构性参数值较大, 随压力的变化曲线表现为先升后降(含水率 50 g/kg 时, 结构性参数值由 38 升到 65)。当含水率由 120 g/kg 增大到 425 g/kg 时, 结

时对应的饱和含水率分别为 425, 354 和 298 g/kg, 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, 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》SL 1999-237 的规定步骤进行。

试验用人工结构性黄土试样在不同水泥含量下测得的界限含水率见表 2。从表 2 可以看出, 加入一定量水泥后, 各种土样的液限、塑限均较原始土样有所增大, 以液限增加最多。测试结果表明, 人工结构性黄土的界限含水率与土料的含粘量和水泥掺入量存在明显的正增长关系, 含粘量和水泥含量增大则土料的塑性增强而液性减弱。

构性参数值相对较小, 随压力的变化曲线呈由大到小的缓变曲线。

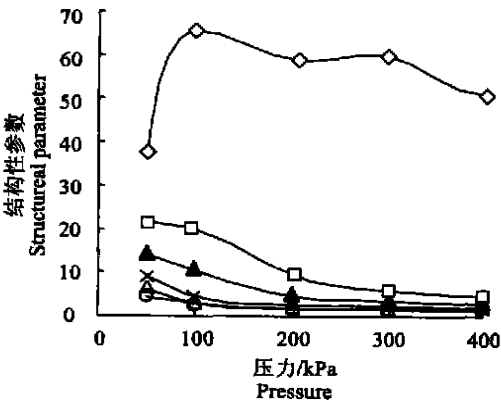


图 1 不同含水率下原状黄土的结构性参数曲线($\rho_d = 1.26 \text{ g/cm}^3$)

- ◇ - . 含水率 50 g/kg; - □ - . 含水率 120 g/kg;
- ▲ - . 含水率 190 g/kg; - × - . 含水率 260 g/kg;
- △ - . 含水率 330 g/kg; - ○ - . 含水率 425 g/kg

Fig 1 Structural parameter curve of intact loess under diffirent water content ($\rho_d = 1.26 \text{ g/cm}^3$)

- ◇ - . Water content 50 g/kg; - □ - . Water content 120 g/kg;
- ▲ - . Water content 190 g/kg; - × - . Water content 260 g/kg;
- △ - . Water content 330 g/kg; - ○ - . Water content 425 g/kg

以上曲线变化说明, 对原状黄土, 当含水率较低

时,含水率的变化对黄土结构性的影响最为剧烈,含水率的少量增加即可导致黄土结构性的骤然降低。因此,建在比较干燥黄土场地上的建筑物,虽然能够很好利用黄土的天然强度,但由于黄土场地少量浸水即可能使黄土的结构性急剧丧失,导致黄土基础突然发生较大的不均匀沉降,上部结构应力难以调整,引起黄土工程事故。当含水率较高时,原状黄土的结构性已得到有效破坏,这时结构性参数对含水率和压力变化的敏感性已经大大降低。

2.2 人工结构性黄土的结构性变化特性

对于较小干密度(1.26 g/cm^3)的人工结构性黄土,其结构可变性较大而可稳性较低,结构性曲线的

形态主要由可变性支持的不稳定势控制,一律表现为随压力增大的下降曲线(图 2)。当压力小于 200 kPa 时,含水率对结构性参数的影响表现得十分明显,并随水泥含量的增多而加强;当压力大于 200 kPa 时,黄土颗粒所具有的不稳定势被完全削弱,此后的含水率和压力变化已难以使黄土进一步压密,因而结构性参数也就稳定在一个水平上。在这一密度水平,水泥含量对各结构性曲线的峰值影响很大,以图 2 中含水率为 50 g/kg 的人工结构性黄土土样为例,随水泥含量增加,其结构性参数可由 15.5 , 22.5 增大到 55 。

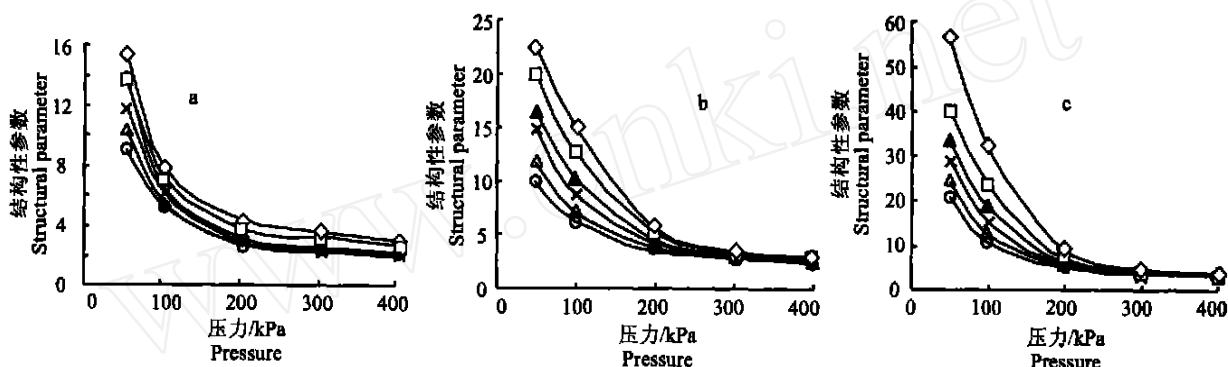


图 2 $\rho_d = 1.26 \text{ g/cm}^3$ 时人工结构性黄土结构性参数曲线

a 水泥含量 5 g/kg ; b 水泥含量 10 g/kg ; c 水泥含量 15 g/kg
 - $\diamond$ - 含水率 50 g/kg ; - $\square$ - 含水率 120 g/kg ; - $\triangle$ - 含水率 190 g/kg ; - $\times$ - 含水率 260 g/kg ;
 - ∇ - 含水率 330 g/kg ; - $\circ$ - 含水率 425 g/kg

Fig 2 Structural parameter curve of man-made structural loess ($\rho_d = 1.26 \text{ g/cm}^3$)

a Cement content 5 g/kg ; b Cement content 10 g/kg ; c Cement content 15 g/kg ;
 - $\diamond$ - Water content 50 g/kg ; - $\square$ - Water content 120 g/kg ;
 - $\triangle$ - Water content 190 g/kg ; - $\times$ - Water content 260 g/kg ;
 - ∇ - Water content 330 g/kg ; - $\circ$ - Water content 425 g/kg

当干密度为 1.40 g/cm^3 时,黄土同时具有较大的可变性和可稳性,两种因素的此消彼涨决定着结构性曲线的形态(图 3),故在含水率较低时一般表现为随压力增大而先升后降的曲线形态,体现了低压力时压力增大使可稳性加强,高压力时压力增大使可变性减弱的本质。在这一干密度水平上,水泥含量对各结构性曲线的峰值仍然有较明显的影响(对 50 g/kg 含水率的人工结构性黄土土样,其结构性参数值可由 7.85 到 12),但含水率的变化及其与压力、水泥含量的耦合,使结构性的变化出现了更加复杂的形态。这种情况下,总的趋势仍然是含水率愈低,黄土的可稳性愈强;含水率愈高,黄土的可稳性愈弱,含水率的这种影响使含水率愈低对应的结构性曲线愈高也就成了一种必然。

对于更大的干密度(1.50 g/cm^3),黄土的可稳性较大,可变性已退居次要地位,土的结构性曲线形态主要由可稳性控制,此时,含水率、密度与水泥含量的耦合变化也影响到结构性曲线的形态,但它的总趋势已改变为随压力增大的上升曲线(图 4)。此时,较大的干密度已使黄土基本失去了变形的空间,含水率和水泥含量已不足以使黄土的可变性进一步增大,对黄土结构性的影响已经很小,而水泥含量对黄土结构性参数表现出的较小增强作用,也是由于其胶结作用对可稳性的微小贡献而得到的。

总的说来,黄土干密度的变化对可变性的影响大于对可稳性的影响,所以随干密度的增加,在相应情况下对结构可变性的削弱大于对结构可稳性的增强,黄土的结构性也相应的由强变弱。

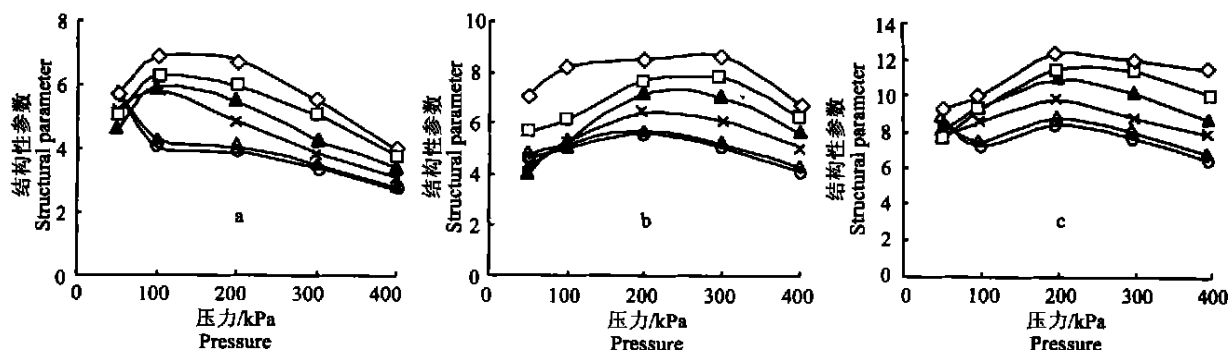


图3 $\rho_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$ 时人工结构性黄土结构性参数曲线

a 水泥含量 5 g/kg; b 水泥含量 10 g/kg; c 水泥含量 15 g/kg

- ◇ - . 含水率 50 g/kg; - □ - . 含水率 120 g/kg; - ▲ - . 含水率 190 g/kg; - × - . 含水率 260 g/kg;

- ▴ - . 含水率 330 g/kg; - ○ - . 含水率 354 g/kg

Fig 3 Structural parameter curve of man-made structural loess ($\rho_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$)

a Cement content 5 g/kg; b Cement content 10 g/kg; c Cement content 15 g/kg;

- ◇ - . Water content 50 g/kg; - □ - . Water content 120 g/kg; - ▲ - . Water content 190 g/kg; - × - . Water content 260 g/kg;

- ▴ - . Water content 330 g/kg; - ○ - . Water content 354 g/kg

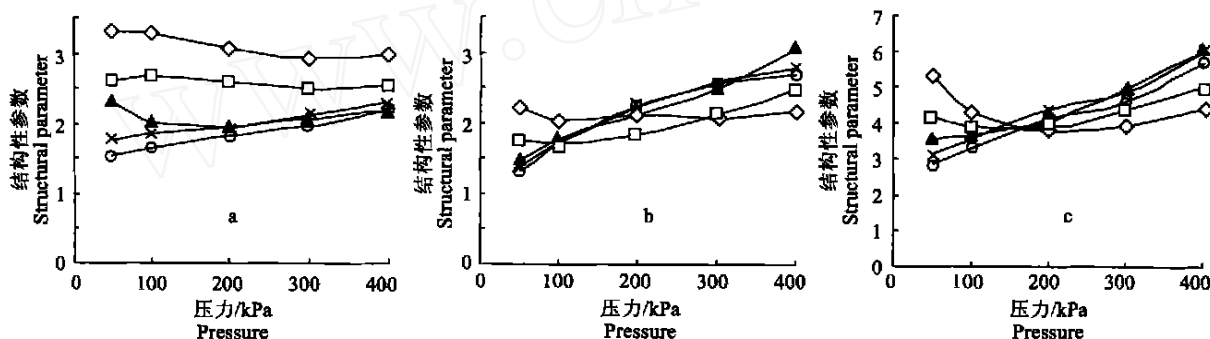


图4 $\rho_d = 1.50 \text{ g/cm}^3$ 时人工结构性黄土结构性参数曲线

a 水泥含量 5 g/kg; b 水泥含量 10 g/kg; c 水泥含量 15 g/kg

- ◇ - . 含水率 50 g/kg; - □ - . 含水率 120 g/kg; - ▲ - . 含水率 190 g/kg; - × - . 含水率 260 g/kg; - ▴ - . 含水率 298 g/kg

Fig 4 Structural parameter curve of man-made structural loess ($\rho_d = 1.50 \text{ g/cm}^3$)

a Cement content 5 g/kg; b Cement content 10 g/kg; c Cement content 15 g/kg;

- ◇ - . Water content 50 g/kg; - □ - . Water content 120 g/kg; - ▲ - . Water content 190 g/kg; - × - . Water content 260 g/kg;

- ▴ - . Water content 298 g/kg

3 结 论

1) 陕西杨凌原状结构黄土的结构性参数与含水率关系明显, 含水率愈低同一压力下对应的结构性参数愈大。在低含水率区域时, 含水率的变化对黄土结构性的影响最为剧烈, 含水率较小增加即可导致黄土结构性的骤然降低, 这一特点可以解释黄土场地少量浸水是导致黄土工程事故的诱因; 当含水率较高时, 原状黄土的结构性已得到有效破坏, 结构性参数对含水率和压力变化的敏感性大大降低。

2) 对于人工结构性黄土, 其结构变化特性因密度的不同而有较明显的差异。当干密度 (1.26 g/cm^3) 较小时, 黄土的可变性较大而可稳性较低,

结构性曲线的形态主要由可变性支持的不稳定势控制, 含水率对结构性参数的影响主要表现在小压力阶段。在这一干密度水平, 水泥含量对各结构性曲线的峰值大小影响很大。

对于较大干密度 (1.40 g/cm^3) 而言, 黄土同时具有较大的可变性和可稳性, 在含水率较低时一般表现为随压力增大而先升后降的曲线形态, 体现了低压力时压力增大使可稳性加强, 高压力时压力增大使可变性减弱的本质。在这一干密度水平下, 水泥含量对各结构性曲线的峰值仍然有较明显的影响, 但含水率的变化与压力、水泥含量的耦合使结构性的变化更加复杂。

对于更大的干密度 (1.50 g/cm^3), 黄土的可稳

性较大,可变性已退居次要地位,黄土的结构性曲线形态主要由可稳性控制,结构性曲线形态的总趋势改变为随压力增大而增大的上升曲线。此时,较大的干密度已使黄土基本失去了变形的空间,含水率和

水泥含量已不足以使黄土的可变性进一步增大,其对黄土结构性的影响已经很小,而水泥含量对黄土结构性参数表现出的较小增强作用也是由于其胶结作用对可稳性的微小贡献而所得。

[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] 高国瑞. 黄土显微结构分析及其在工程勘察中的应用[J]. 工程勘察, 1980, (6): 25- 28.
- [3] 胡瑞林, 李向全, 官国琳, 等. 粘性土微结构定量模型及其工程性质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [4] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其量化研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651- 656.
- [5] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35- 40.
- [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[J]. 水利学报, 1999, (10): 1- 6.

Variation characteristics of soil structure of unsaturated loess

LUO Ya-sheng^{1,2}, XIE Ding-yi¹, SHAO Sheng-jun¹, ZHANG Ai-jun^{1,2}

(1 Research Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With the primary data obtained in the confined compression tests of unsaturated loess including Yangling intact loess and man-made structural loess, the comprehensive structure potential parameters of unsaturated loess are calculated under different structure conditions in this paper. Based on the above, the variation characteristics of soil structure of unsaturated loess are studied under the condition of confined compression test, and thereby, the useful quest using the research outcomes of characteristics of soil structure to solve the engineering problem of loess is made out. The research results show that the water content in intact structural loess influences the structural parameter obviously, i.e., the lower water content, the bigger structural parameter according to same pressure, especially at the areas of low water content, the structural characteristics are influenced by the variation of water content strongly; and for the man-made structural loess, the structural characteristics of loess are influenced by the coupling factors including density, water content and cement content, etc. The collective performance is that, the lower is the dry density, the smaller is the water content, the higher is the cement content, and the stronger are the structural characteristics of loess.

Key words: unsaturated loess; structural parameter; structural characters of intact loess