

文章编号: 1000-7598-(2006) 11-1945-04

不同应力路径下非饱和黄土的结构变化特性

张 腾, 胡再强, 吴兴辉, 陈存礼

(西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048)

摘 要: 以陕西杨陵非饱和黄土为研究对象, 对不同初始含水率的原状黄土及相应的重塑黄土进行不同应力比下的等应力比加载试验, 求取非饱和黄土在不同应力状态下的综合结构势参数, 研究了黄土在等应力比压缩试验状态下的结构变化特性。结果表明, 当初始含水率不变时, 应力比($\eta=\sigma_3/\sigma_1$)对黄土的结构性有较大的影响, 表现为应力比愈小, 黄土的结构性愈弱; 当应力状态不变时, 含水率对结构性参数影响明显。含水率愈低, 同一应力状态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原状黄土的结构性。

关 键 词: 非饱和黄土; 结构性; 应力比

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Variation characteristics of soil structure of unsaturated loess under different stress paths

ZHANG Teng, HU Zai-qiang, WU Xing-hui, CHEN Cun-li

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Taking the unsaturated loess at Yangling in Shaanxi Province as the research object, the compressive tests on different stress paths are made with the intact loess and the corresponding remoulded loess under different water contents. The comprehensive structure potential parameters of unsaturated loess are calculated under different stress conditions. Based on the above, the variation characteristics of structural loess are studied under equal stress ratio condition. The result indicates: when the water content is invariable, the stress ratio($\eta=\sigma_3/\sigma_1$)influences the structural characteristics of intact loess obviously; the performance is smaller for the stress ratio; the structural characteristics of intact loess is weaker; when the stress ratio is invariable, the water content of intact loess influences the structural parameter obviously. The lower water content, the bigger structural parameter. Especially in the region of low water content, the structural characteristics of unsaturated loess are influenced by the variation of water content strongly.

Key words: unsaturated loess; structural properties; stress ratio

1 引 言

土的结构性是土体颗粒空间排列和颗粒之间联结作用的力学效应, 它的重要性早为太沙基所指出, 沈珠江曾指出对土结构性的研究已是 20 世纪土力学的核心问题^[1]。由于对土结构性的量化面临巨大困难, 土结构性的影响一直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]。谢定义、齐吉琳和骆亚生等^[3~6]认为, 土力学方法是研究土结构性及其应用的最恰当方法, 并把土的结构特征分为土颗粒的排列和联

结特征两个方面, 结合影响土结构性的这两方面因素, 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, 主要特征是含水率低、孔隙度高和碳酸盐含量高, 因其有遇水崩解湿陷的特性, 这种独特的结构性直接影响到黄土的力学性状和工程性质。因此, 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等应力比加载试验, 旨在求取黄土在不同应力比、不同初始含水率状态

收稿日期: 2005-09-30

修改稿收到日期: 2005-12-26

基金项目: 陕西高校省级重点实验室重点科研项目资助 (No. 00S004)。

作者简介: 张腾, 男, 1980 年生, 硕士研究生, 主要从事黄土力学与工程方面的研究。E-mail: zhangteng1138@tom.com

下的结构性参数,用以研究等应力比加载状态下的黄土结构变化特性,为黄土地区的工程建设提供参考。

2 试验方案与方法

土的结构性是土颗粒空间排列和粒间联结作用的力学效应,通过扰动、浸水饱和,可改变原状黄土颗粒的排列与联结结构特征,使原状黄土的结构势充分释放出来。通过等应力比加载试验,可以更好地模拟黄土在实际工程中的受力状态。试验方案是:分别对 4 组不同初始含水率的原状样及相应的重塑样和饱和样进行不同应力比($\eta = \sigma_3 / \sigma_1$)下的等应力比加载试验,控制 η 不变,其中 η 分别取 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 初始含水率 w 分别为 4%, 9%, 12% 和 17.5%,从而反映应力比、含水率对结构性的影响。

试验采用应力控制式三轴仪,压力由空气压缩机供给,用定值器调节所需要的力值,试验中可测取各级压力下的体应变和轴向应变。试验用土取自陕西杨陵高新中学对面的某工地基坑,取土深度 3~3.5 m,土样为 Q₃ 黄土,并有肉眼可以看见的大孔隙。原状黄土的主要物理力学指标如表 1 所示。

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

比重	含水率 /%	干密度 /g·cm ⁻³	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	孔隙比
2.71	17.43	1.26	30.79	18.82	11.97	1.183

不同初始含水率的原状黄土试样采用风干和滴水的方法制备,并在保湿缸中放置 24 h 以上,使水分在试样分布均匀,制备重塑黄土样时,先把风干的黄土碾碎过孔径为 0.5 mm 的筛,除去大的颗粒与杂质,在控制与原状黄土试样相应的干密度和含水率的条件下,通过压样法制备。饱和原状样采用抽气饱和法制备。

3 试验结果与分析

对于本文的黄土等应力比压缩试验资料,可根据前人对土结构性参数研究的思路^[3~5]及应力控制三轴试验的特点,从试样在不同应力状态下的体应变来研究其结构变化的特性,用不同控制条件下的原状黄土试样、重塑黄土试样以及饱和原状黄土试样等应力比压缩试验所得的 p - ε_v 曲线,由式 (1) 求出结构性参数,从而可分析非饱和原状黄土的结构变化特性。

$$m_p = \frac{m_1}{m_2} = \frac{\varepsilon_{v\text{饱}} / \varepsilon_{v\text{原}}}{\varepsilon_{v\text{原}} / \varepsilon_{v\text{重}}} = \frac{\varepsilon_{v\text{饱}} \varepsilon_{v\text{重}}}{\varepsilon_{v\text{原}}^2} \quad (1)$$

式中 m_p 为所定义的结构性参数; $\varepsilon_{v\text{原}}$, $\varepsilon_{v\text{饱}}$, $\varepsilon_{v\text{重}}$ 分别为某一应力状态下的原状土的体应变、饱和土的体应变和重塑土的体应变。从式 (1) 可看出:土的原始联结越强,由于扰动重塑后的强度损失越大,在力的作用下发生的体应变也越大,土的结构性参数越大;土颗粒的排列越不稳定,浸水后在力的作用下使土的结构破坏,发生的体应变也越大,土的结构性参数也越大,该结构性参数随着土在受力过程中的结构强度变化而变化。

3.1 应力比对非饱和黄土结构性的影响

图 1 为非饱和黄土在相同初始含水率下的不同应力比的结构性参数变化曲线。由图可以看出,结构性参数与应力比关系明显。在结构强度破坏以前,应力比 η 愈小,在相同球应力 p 作用下对应的结构性参数也愈小,反映了在小应力比状态下,土颗粒处于不稳定状态,不稳定势较大;在较小的球应力增量下,土体的结构性更容易破坏。随着 p 的增大,结构联结遭到破坏,结构性参数逐渐减小,最后基本稳定在一个水平上,而且不同应力比下的结构性参数最后几乎稳定在同一水平上,这说明在压力较大时,土颗粒的原有不稳定结构势被大大削弱。在相同的应力增量下,不会引起较大的突变,而且经过不同等应力比的压缩后,原状黄土最后几乎被压缩到同一压密状态,反映了在结构强度破坏以后,应力比对土体的结构性影响愈来愈小。在原状黄土的结构性得到有效破坏后,结构性参数对应力状态和应力变化的敏感性已大大降低。

以上的曲线变化表明,对于原状结构性黄土,当初始含水率一定时,应力路径对黄土结构性有较大的影响。在应力比较小的情况下,结构性黄土的不稳定结构势较大,更容易破坏。因此,在我国西北黄土地区进行诸如基坑开挖、隧道挖掘等工程时,要特别注意施工过程中土体应力状态的变化。因为在施工过程中,随着土方开挖,水平向应力逐渐减小,土体越来越不稳定,很容易引起工程事故。

3.2 含水率对非饱和黄土结构性的影响

图 2 为非饱和黄土在相同应力比下的不同初始含水率条件下的结构性参数变化曲线。由图可以看出,结构性参数随含水率的改变而发生变化。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 4% 时,结构性参数值明显高于其他含水率的相应值。在含水率为 4% 时,结构性参数与

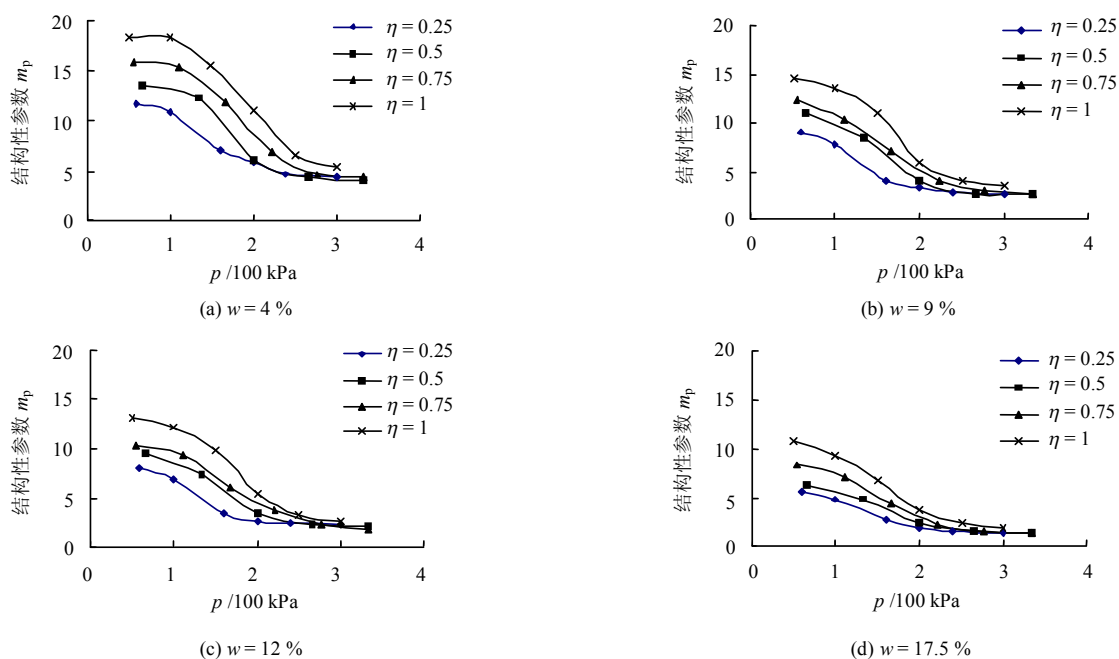


图 1 不同应力比下的结构性参数变化曲线

Fig.1 Structural parameter curves of intact loess under different stress ratios

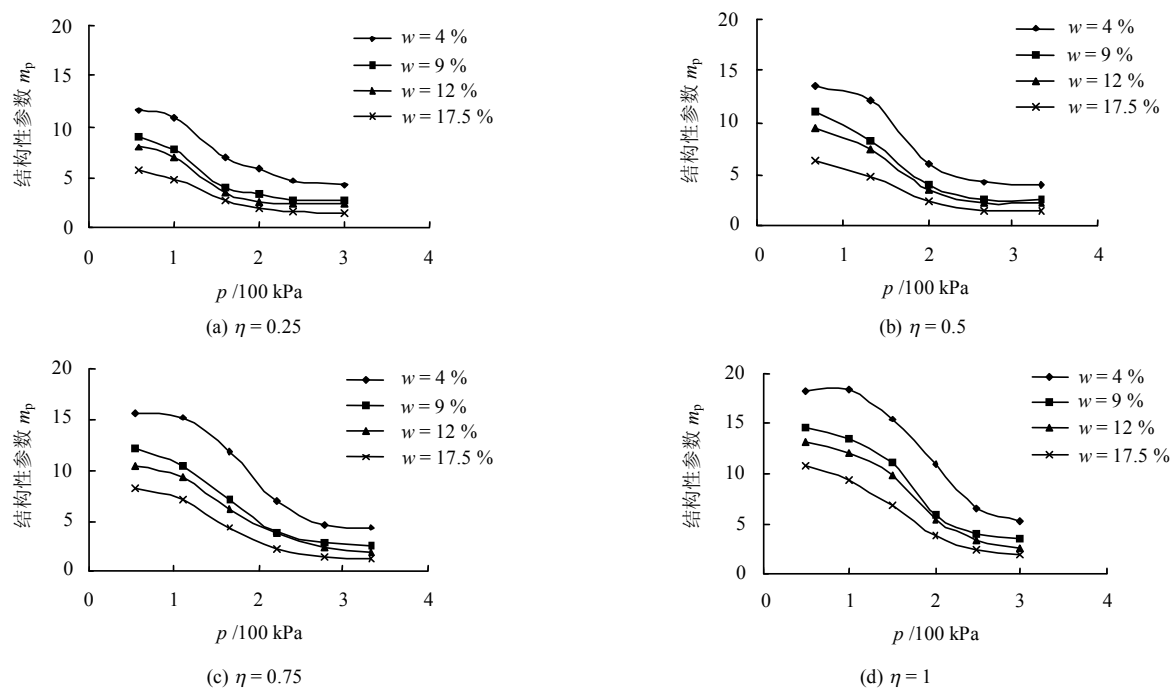


图 2 不同含水率下的结构性参数变化曲线

Fig.2 Structural parameter curves of intact loess under different water contents

球应力的关系曲线表现为相对平缓、下降和相对平缓 3 个阶段，第 1 个转折点表示黄土的结构开始大量破损；第 2 个转折点表示土体开始被压密稳定；在含水率较大时(9%，12%，17.5%)，结构性参数与球应力的关系曲线只有下降和相对平缓两个阶段，起始的平缓段消失，且含水率越大，下降段越陡。这是由于含水率增大，原状黄土的结构强度在较小的压力下就会被破坏。含水率越大越容易破坏，起始

的较平缓段很短，甚至消失，反映了结构性参数对含水率的极度灵敏性，也反映了非饱和黄土对水的敏感特性。

以上曲线变化说明，对于原状非饱和黄土，当初始含水率较低时，含水率的变化对黄土结构性影响非常强烈，含水率的少量增加，即可导致黄土结构性的骤然降低。因此，在比较干燥黄土场地上施工时，虽然可以很好地利用黄土的天然强度，但由

于黄土地少量浸水,即可使黄土的结构强度急剧破坏,引起工程事故。所以,要随时做好防护措施,以防不测。当初始含水率较高时,原状黄土的结构性已得到有效破坏,这时含水率的变化对原状黄土的结构性影响很小。

3.3 引入结构性参数的应力-应变曲线

在原状黄土的 p - ε_v 曲线中,曲线明显地分为 3 段。第 1 段为结构未被充分破坏的近似弹性变形段;第 2 段为结构大量破损的近似塑性阶段;第 3 段为次生结构生成的变形稳定段。这种应力-应变曲线很难用数学函数来描述,也很难从力学方面建立本构关系模型,应用很不方便。因此,把结构性参数 m_p 引入应力-应变关系中,建立 $m_p \varepsilon_v$ - p 的关系曲线,并把所有校正后不同应力比、不同含水率下的 $m_p \varepsilon_v$ - p 关系曲线绘在一张图上,如图 3 所示。由图可以看出,原来的 3 段式曲线转变为单调上升的双曲线形式,即经过结构性参数校正后,可使应力-应变曲线与正常固结土的应力-应变曲线形态一致,且同一应力路径下的 $m_p \varepsilon_v$ - p 关系曲线大致在一个带里,这一规律说明结构性参数对原状黄土的变形曲线有较好的归一化作用。这说明这种结构性应力-应变曲线(归一化后的曲线)可以综合反映土的湿度和黏结程度的影响,同时也表明以体应变为参量所定义的土结构性参数具有综合反映影响结构性多种因素作用的能力,表现了它的合理性和可靠性。

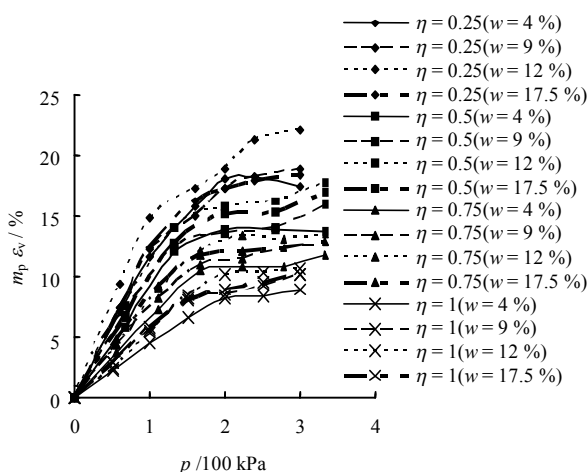


图 3 $m_p \varepsilon_v$ 与 p 的关系曲线

Fig.3 The relationships between $m_p \varepsilon_v$ and p

4 结 论

(1) 原状非饱和黄土有其特殊的结构,宏观地表现为土体保持原结构状态不被破坏的能力,是决定其力学特性的一个重要因素。所定义的结构性参数,一方面反映了土颗粒的排列和联结特征的力学

效应;另一方面也反映了土体在一定应力状态下所具有某种结构势的大小,结构性参数越大,土体具有的结构势就越大,越不容易破坏。

(2) 应力状态与原状黄土的结构性参数有关,在初始含水率一定时,不同应力路径下的结构性参数变化规律不同。在应力比较小的应力路径下,结构性黄土的不稳定结构势较大,更容易破坏。这一特点可以用来合理解释黄土地区一些边坡工程、基坑工程由于施工不当而造成的滑坡、塌方等事故。

(3) 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,含水率微小变化也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的少量浸水就有可能导致工程事故;当含水率较高时,原状黄土的结构性已得到有效破坏,含水率对结构性参数的大小影响不大。

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] 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.
- [3] 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.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 651—656.
- [4] 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.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. A constitutive laws considering soil structural properties[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(4): 35—40.
- [5] 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 Ding-yi, QI Ji-lin, ZHU Yuan-lin. Soil structure parameter and its relations to deformation and strength[J]. **Journal of Hydranlic Engineering**, 1999, (10): 1—6.
- [6] 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, 2004, 8(8): 114—118.
LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi, SHAO Sheng-jun, et al. Variation characteristics of soil structure of unsaturated loess[J]. **Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture And Forestry (Natural Science Edition)**, 2004, 8(8): 114—118.