

黄土的三轴剪切吸力变化特性与结构性的分析

蔡东艳¹, 邵生俊², 王桃桃²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 黄土的结构性与其骨架中存在的吸力作用有密切关系, 吸力作用提高了土骨架的结构稳定性. 黄土表现出的结构性不仅仅与其内在吸力作用有关, 而且与土骨架中存在的胶结作用相关. 本文通过原状黄土、重塑土的非饱和三轴试验, 揭示了它们的基质吸力随着剪切变形的发展规律, 以及原状黄土应力结构性参数随剪切变形的变化规律. 表明原状黄土较重塑土的基质吸力小, 但其抗剪切能力较大, 它的结构性在较低应变条件即发挥到了峰值. 随着剪切变形发展, 黄土的结构性逐渐衰减, 而其基质吸力却不断增长. 非饱和黄土的基质吸力对其抗剪强度有增强作用, 但不能反映黄土的结构性. 结构性参数及其变化能明确地反映黄土的结构性演变.

关键词: 黄土; 结构性; 黄土强度; 吸力作用; 结构性参数

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)01-0076-08

黄土是一种典型的结构性土. 人们从细观考察黄土的结构虽然对认识其成因及结构性具有一定的作用, 但是, 由于不能定量反映黄土结构的力学效应, 使其在土的变形和强度分析中难以应用. 也就是说, 不能综合表征黄土结构性在排列和胶结两方面的指标, 定量地引入本构关系的研究^[1]. 近年来, 人们从损伤力学出发, 通过土的结构损伤变化机理来反映土结构性的力学效应, 进而研究结构性土的强度变形特性; 从土力学出发, 揭示结构性土及结构势释放后力学性质的差异, 来定量分析土的结构性. 前者如沈珠江提出的破损力学模型, 建立了黄土的二元介质模型^[2]; 后者如谢定义提出了土的结构可稳性和可变性及其综合结构势^[3], 建立了土的压缩变形结构性参数, 邵生俊等又建立了三轴剪切应力结构性参数^[4-5], 并将它们引入了黄土的强度变形特性研究, 开辟了土力学特性中有效地反映土结构性变化影响的新途径. 本文通过黄土的非饱和三轴试验, 进一步分析影响黄土结构性的吸力作用和胶结作用, 进而考察结构性与吸力特性之间的关系, 以便深化黄土结构性变化机理的认识.

1 结构性参数与基质吸力分析

1.1 黄土结构性参数与基质吸力测试方法

本文试样采自西安南郊大唐芙蓉园南, 取土深度为地面下 7 m 深, 属于 Q₃ 黄土, 其物理性指标如下表 1 所示.

表 1 黄土的物理性指标
Tab.1 Physical index of loess

取土深度/m	含水率/%	塑限/%	液限/%	干密度/g·cm ⁻³	孔隙比
7.0	19.6	19.4	33.9	1.385	0.964

配制 5 种不同含水率的原状样, 分别是 10%、15%、19.6%、26%、饱和样. 对含水率低于天然含水率的土样采用自然风干法制备, 达到目标含水率后, 将其放入养护缸中养护数天, 待试样内部水分均匀后即可进行试验. 对含水率大于天然含水率的土样制备采用水膜转移法. 用滴定管将所需加入的水量均匀缓慢的滴入试样表面, 然后在保湿缸中养护数天, 让水分均匀分布于试样内部. 饱和样采用抽气饱和法制备.

将原状土碾碎过 0.5 mm 筛, 控制干密度和含水率, 用压样器分层压实制备成重塑样. 制好后的试样在保湿缸中静置 24 h 后, 即可进行试验.

试验所用仪器为应变控制式非饱和土三轴仪 (江苏溧阳永昌工程试验仪器厂, FSY30 型). 试验前, 检查陶土板饱和度, 并确定陶土板传压的滞后时间 (经试验陶土板在加压阶段滞后时间约为 1 min 左右). 安装试样, 量测试样的初始吸力.

收稿日期: 2013-07-11 修改稿日期: 2014-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779054; 10872161)

作者简介: 蔡东艳 (1961-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事黄土力学方面的研究. E-mail: psw_tea@163.com

初始吸力稳定后, 压力室中注水, 加压固结, 固结时排气不排水. 固结围压分别取 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa. 围压分级施加, 每级压力 50 kPa, 每级压力下体积变形稳定后施加下一级压力.

在围压下固结稳定后, 关闭排气排水阀门, 直至孔隙水压力和孔隙气压力稳定为止, 然后开始剪切. 剪切时不排气不排水 (饱和土采用固结排水剪). 剪切速率设定为 0.016 mm/min.

1.2 基质吸力与应变的关系

对非饱和土基质吸力特性的研究是非饱和土力学特性研究的基础. 以往, 在非饱和土的固结变形、应力应变关系及强度变化规律研究中吸力状态量均得到了应用. 因此, 人们往往把非饱和土的基质吸力作为非饱和土力学特性研究的纽带, 给予了高度重视. 工程实践已经表明, 不同含水率的粘性土其抗剪强度差异较大, 而粘性土的含水率不同其基质吸力也不同, 为了揭示不同含水率非饱和土的强度特性, 研究者几乎不约而同的都应用到了基质吸力状态量. 最具代表性的是 A. W. Bishop(1960)提出的单应力变量强度理论和 D. G. Fredlund(1978)提出的双应力变量强度理论公式.

为了揭示黄土中吸力作用对其结构性的影响, 首先比较分析了原状土和重塑土剪切过程的吸力的变化规律. 图 1~3 分别为不同含水率原状土及重塑土在给定围压条件下基质吸力与应变的关系曲线. 比较含水率 10% 的原状土和重塑土, 当固结围压小于 300 kPa 时, 原状土的基质吸力总是小于重塑土的基质吸力; 当固结围压达到 300 kPa 时, 原状土的基质吸力却大于重塑土的基质吸力. 可见, 原状黄土在固结围压 300 kPa 作用下其结构性将被压缩破坏后, 原状土结构性的显著改变影响了其基质吸力特性; 在固结围压作用下原有结构没有遭到压缩破坏前, 随着固结围压增大, 重塑土与原状土的基质吸力差越大. 比较含水率 15% 的原状土与重塑土, 当固结围压小于 300 kPa 时, 原状土的基质吸力总是略小于重塑土的; 当固结围压达到 300 kPa 时, 原状土的基质吸力随轴向应变的变化曲线与重塑土的曲线相交, 两者相差亦较小. 比较含水率 19.6% 的原状土与重塑土, 各级固结围压作用下, 重塑土的基质吸力变化曲线总是高于原状土的基质吸力变化曲线. 由于含水率的变化也显著影响原状黄土的结构性, 因此, 与含水率 10% 的原状土和重塑土的基质吸力变化比较, 含水率 15%、19.6% 条件下的原状土、重塑土基质吸力变化规律也反映了它们对土结构性变化的影响.

从图中还可看出, 在围压相同、含水率相同情况下, 土的基质吸力随轴向应变总是呈现出递增的变化趋势; 含水率越小土的基质吸力越大, 且随着围压的增大吸力也是增大的.

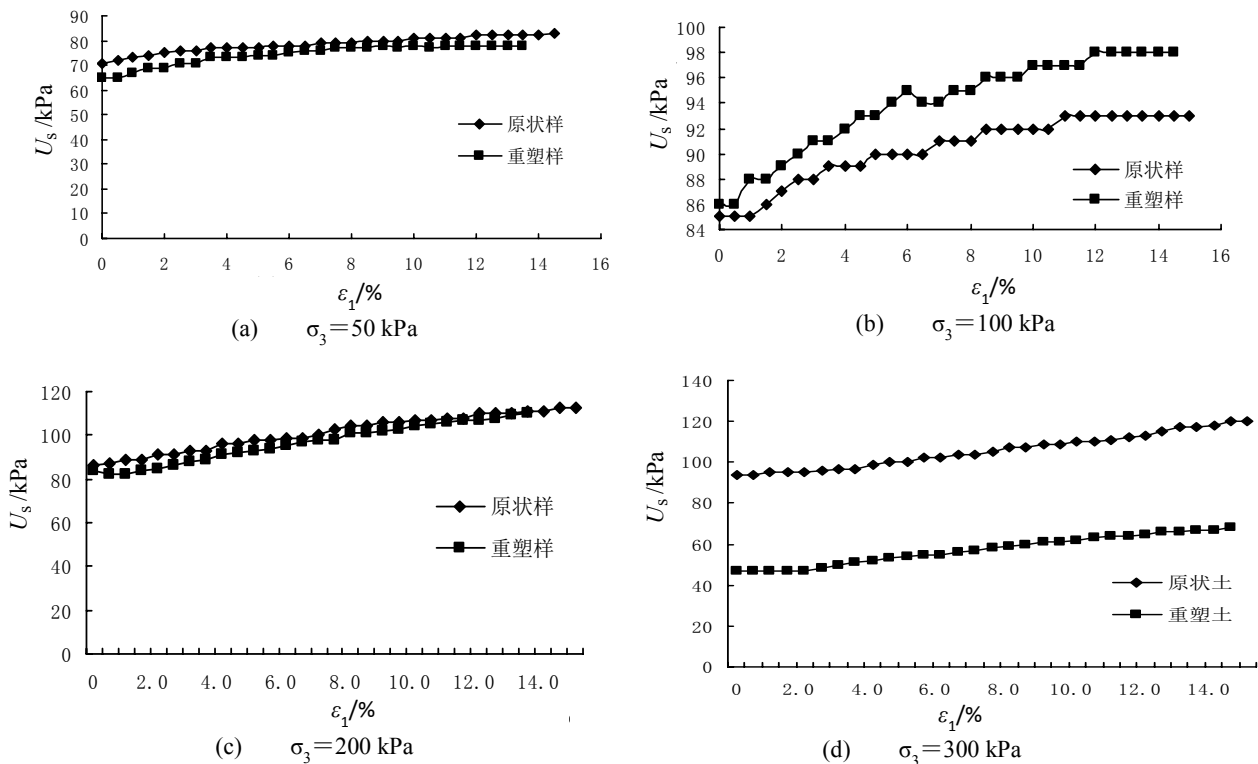
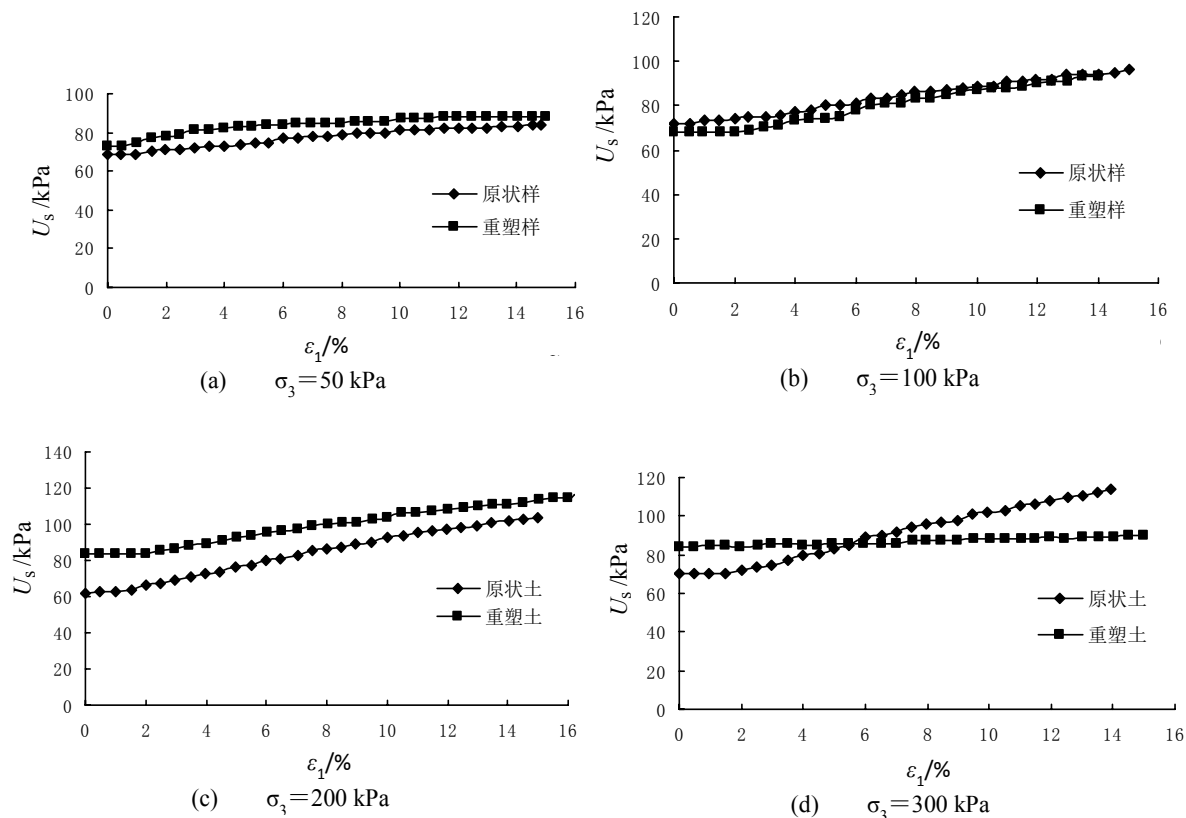
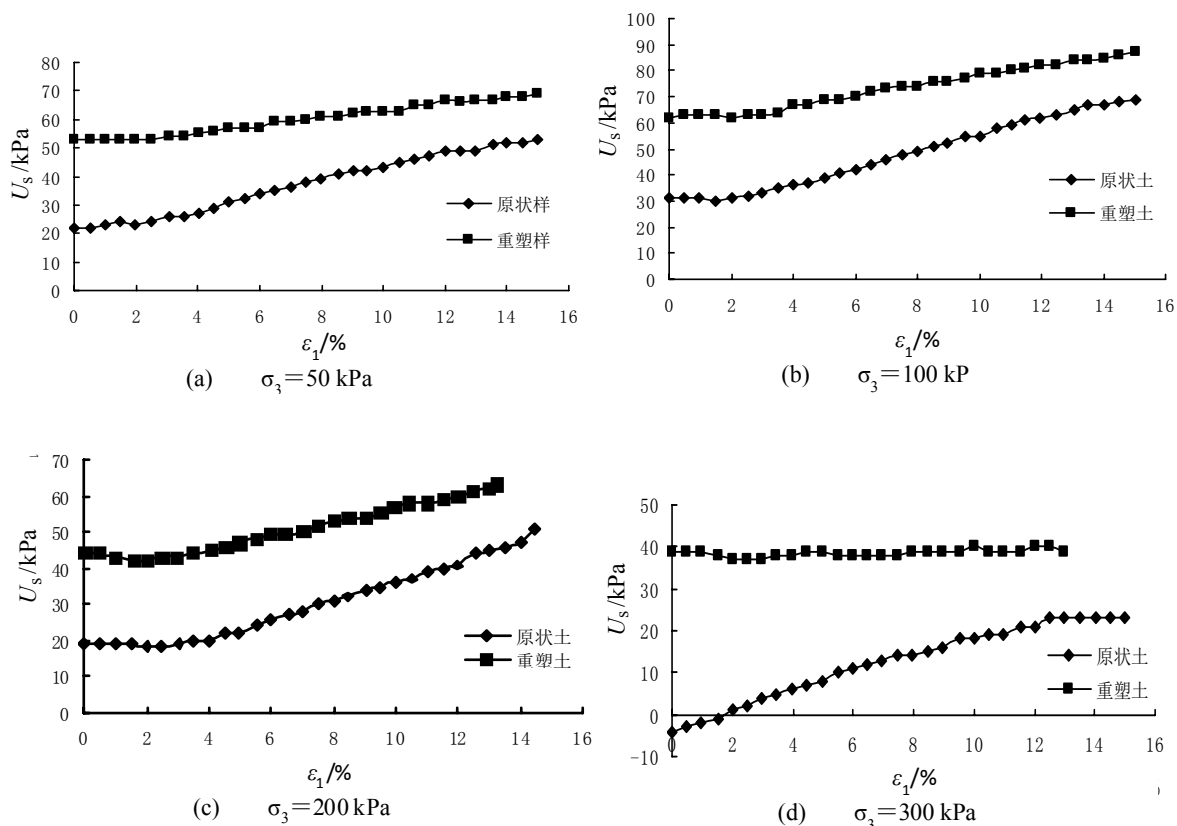


图1 基质吸力与轴向应变关系曲线 ($w=10\%$)

Fig.1 Suction of intact and remold loess changing with axial strain ($w=10\%$)

图2 基质吸力与轴向应变关系曲线 ($w=15\%$)Fig.2 Suction of intact and remold loess changing with axial strain ($w=15\%$)图3 基质吸力与轴向应变关系曲线 ($w=19.6\%$)Fig.3 Suction of intact and remold loess changing with axial strain ($w=19.6\%$)

从基质吸力与应变的关系曲线图4可知,非饱和黄土在含水率相同的情况下,随着围压的逐渐增大,土的基质吸力由低到高排列,基质吸力随轴向应变的增加呈上升趋势.在含水率较小($w=10\%$, 15%)时,围压的增大,使得土的基质吸力相差不是很大;当含水率较大($w=19.6\%$)时,围压的增大,可引起土的基质吸力相差很大;可见土的初始含水率的大小决定着其基质吸力的高低.

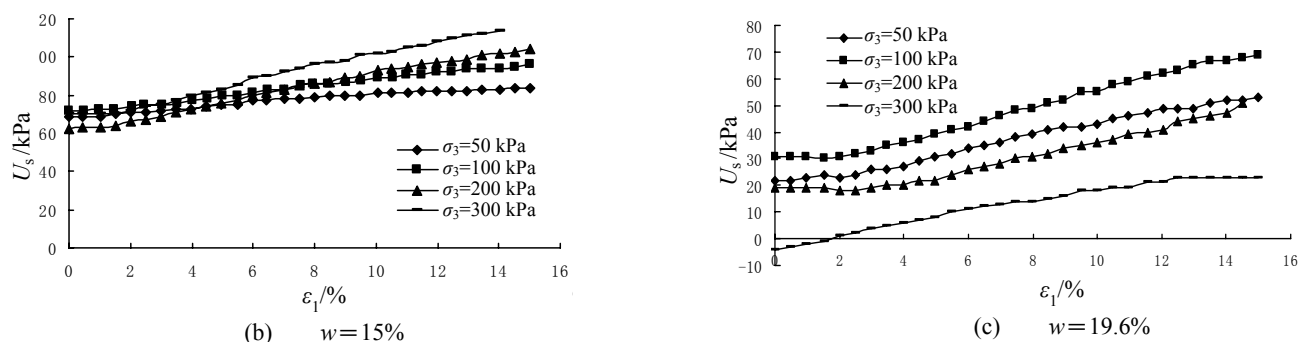


图4 不同固结围压下原状土的基质吸力与轴向应变关系

Fig.4 Suction of intact loess changing with axial strain under different consolidation pressure

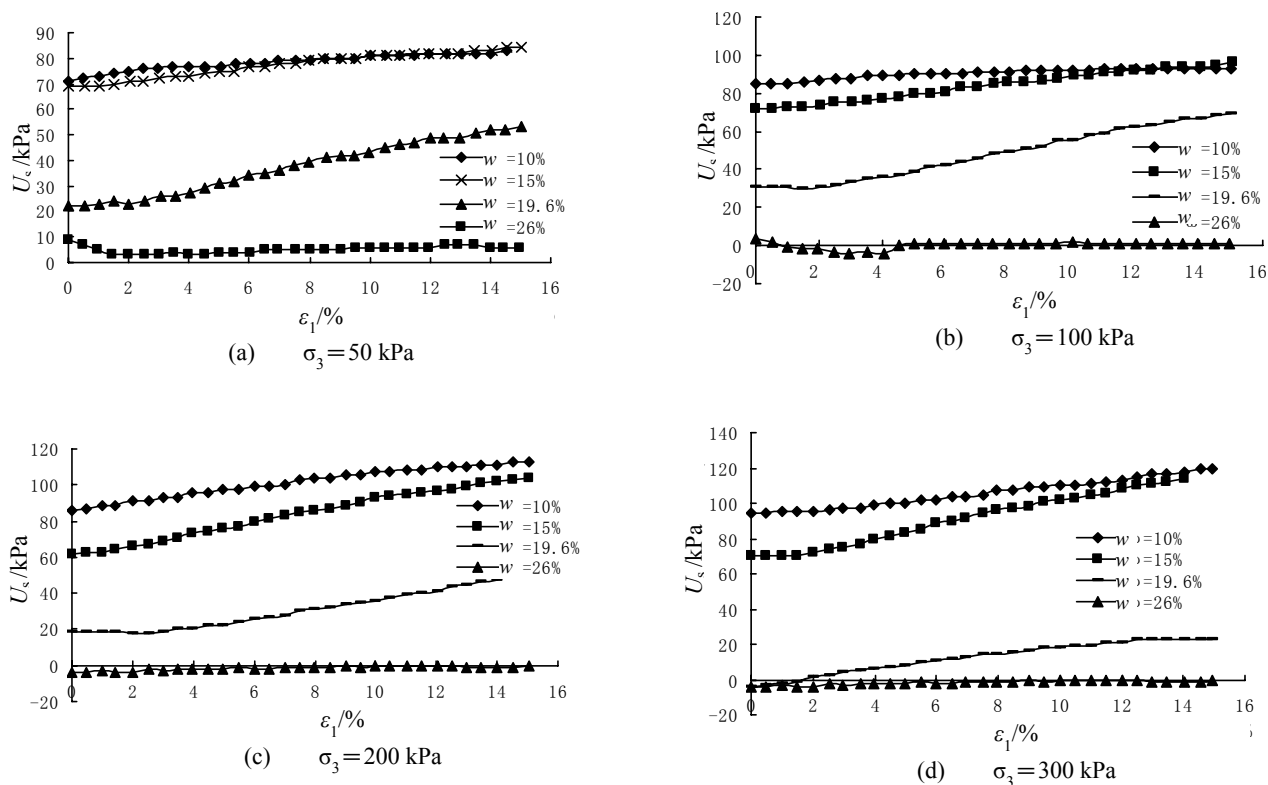


图5 不同含水率原状土的基质吸力与轴向应变关系曲线

Fig.5 Suction of intact loess changing with axial strain under same consolidation pressure

从含水率不同围压相同的基质吸力与应变的关系曲线(图5)可知,含水率越小对应的土的基质吸力值越大,相应的基质吸力与轴向应变的关系曲线越高,含水率小的基质吸力值远大于含水率大的基质吸力值.当土样的含水率达19.6%以上,土样的基质吸力大幅度下降.当含水率增加到很大($w=26\%$)接近饱和时,土的基质吸力趋于零,甚至出现负值.基质吸力随轴向应变的增加呈上升趋势.

综上所述,土的含水率对基质吸力影响非常大,含水率低,基质吸力大,随着含水率的逐渐增高,基质吸力迅速变小,由图 5 可看到,含水率低的土($w=10\%$, 15%)与含水率高($w=19.6\%$, 26%)的土基质吸力相差很大.当土样的含水率增大至接近饱和土时,基质吸力趋于零.对含水率较低($w=10\%$, 15%)的非饱和土,基质吸力随围压的增大而增大.

1.3 黄土应力结构性参数的变化规律

根据邵生俊等提出的应力结构性参数,分析了三轴剪切过程的结构性变化规律.

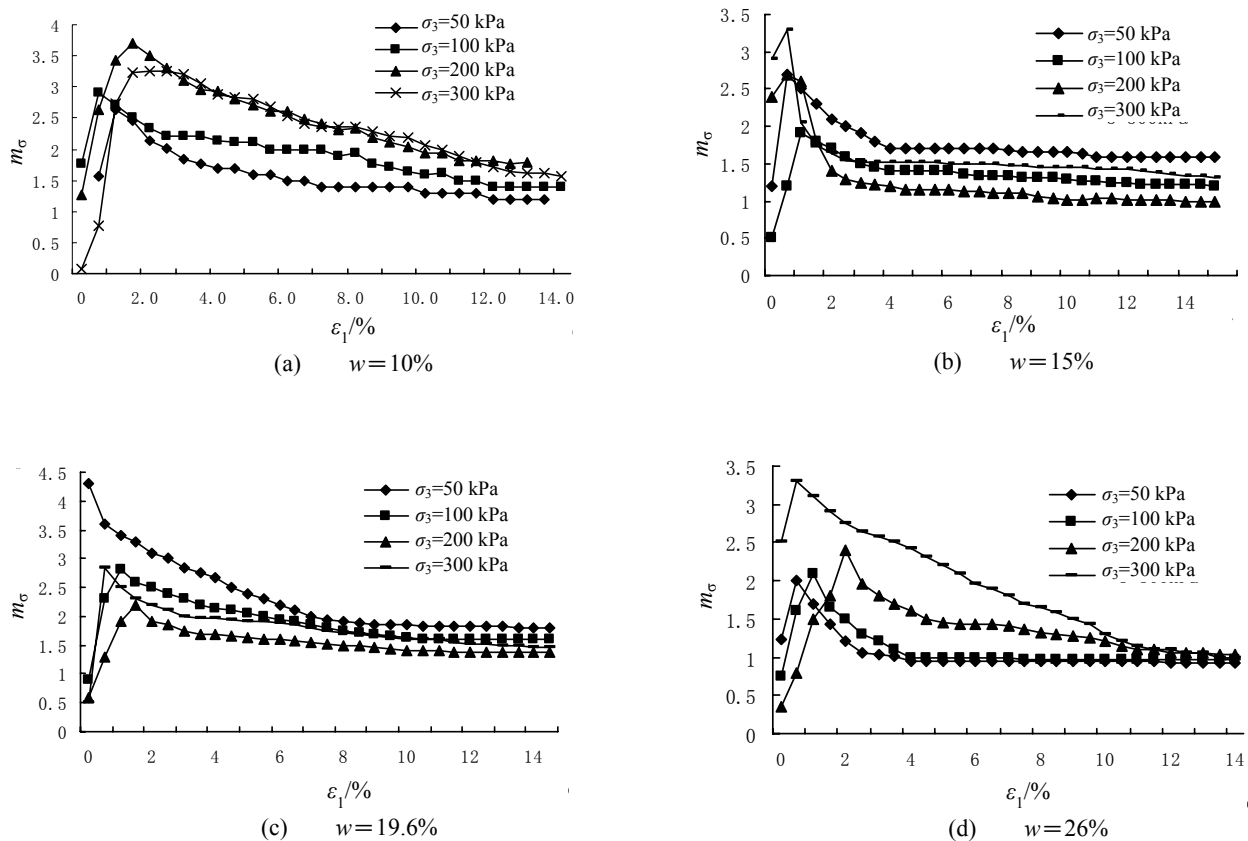


图 6 同一初始含水率黄土的结构性参数变化规律

Fig.6 Structural parameter of loess changing with axial strain with same initial water content

图 6 为同一含水率原状黄土在不同围压下的应力结构性参数变化曲线.由图可知,结构性参数随轴向应变的关系曲线呈规律性变化,在应变较小时,由于原状土样初始结构不同,其受围压作用的损伤程度不同,使得结构性参数的峰值不同.当轴向应变较大时,结构性参数随轴向应变呈衰减的变化规律.高围压作用下原状土的结构压损破坏显著,应力结构性参数峰值显著降低.含水率越高,压损破坏土结构的固结围压越小.比较不同含水率原状土的结构性参数变化规律,随着含水率的增大,土结构性参数值减小,表明初始含水率的加大,使得土颗粒之间的胶结作用被充分软化,土颗粒之间的联结被破坏,土体本身所具有的结构势大大减小.依据图 6 中初始含水率较小的情况可看出,结构性参数的变化曲线先迅速上升,过峰值点后逐渐下降.表明原状黄土的结构性参数在应力未达到其结构强度之前,结构性参数逐渐上升,当应力超过其结构强度后,结构性参数逐渐降低,这也反映出黄土的结构性在应力小于结构强度时随应变的增加逐渐发挥出来,随着施加的应力值增大,超过其结构强度后,黄土的结构开始大量破坏,结构性参数逐渐减小.

图 7 为同一固结围压下不同含水率黄土结构性参数的变化曲线,表明不同固结围压作用下原状黄土的结构性参数达到峰值后随着剪切应变增大均呈衰减变化规律;土的含水率和固结围压变化对黄土的结构性参数有一定的影响;本文黄土试样的结构性参数较小,结构性参数均小于 5.0.

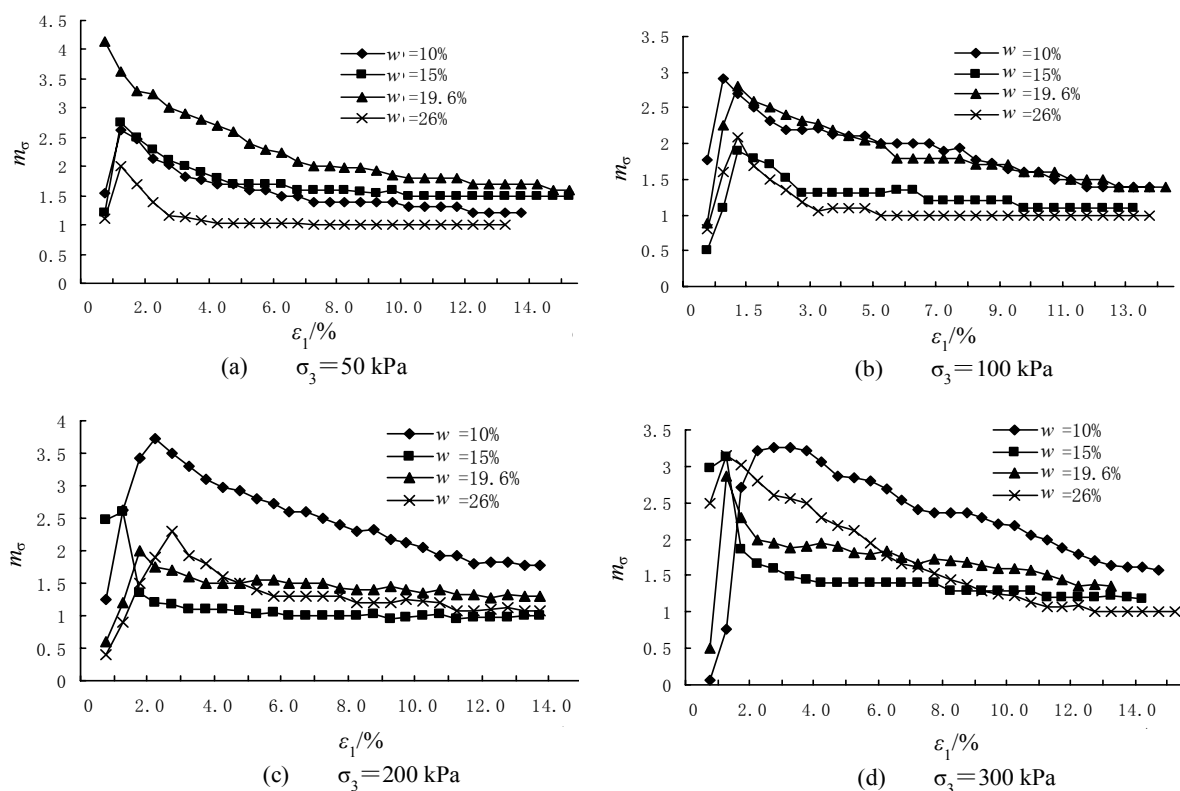


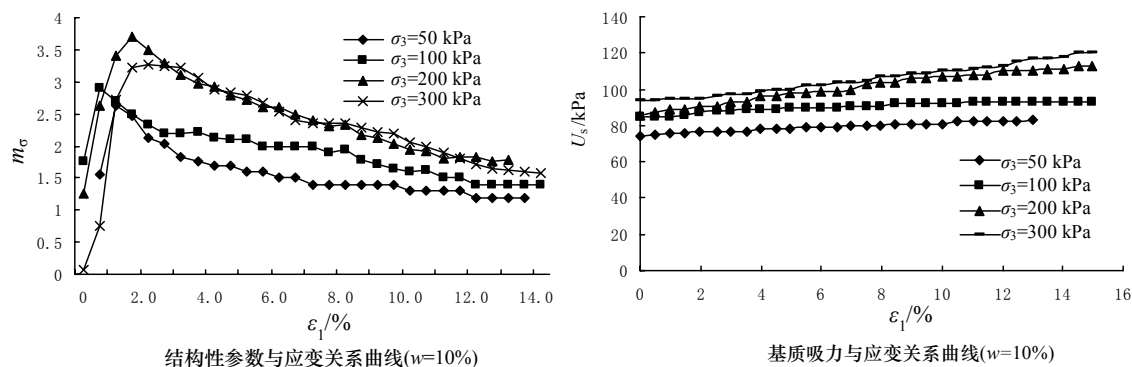
图7 不同初始含水率黄土的结构性参数变化曲线比较

Fig.7 Structural parameter changing with axial strain of loess with different initial water content

1.4 基质吸力与结构性参数的关系

非饱和土收缩膜对土骨架具有加固作用,提高了非饱和土的抗压、抗剪强度.收缩膜两侧的压差大小就是非饱和土的基质吸力,因此基质吸力对非饱和土抗剪强度有增强作用.天然沉积的非饱和土不仅具有吸力的加固作用,同时往往具有显著的胶结作用.

分析图8可看出,含水率10%的原状黄土的结构性参数达到峰值后均呈递减的变化规律,但基质吸力呈递增的变化规律.尽管土的基质吸力作用在加强,但其结构性在逐渐减小,表明影响黄土结构性的其它因素的作用强于基质吸力的加固作用,除基质吸力作用之外的矿物胶结作用和土粒骨架排列稳定作用起着结构性的决定作用.分析图9可看出,同一固结围压下,不同初始含水率黄土的结构性参数达到峰值后均呈递减的变化规律,但基质吸力呈递增的变化规律.也表明除基质吸力之外的胶结作用和土骨架排列稳定性变化对结构性起主导作用;含水率增大,基质吸力降低,土的结构性却不依次衰减.尽管不同含水率土的结构性不同,但结构性均随轴向应变的发展而衰减.

图8 结构性参数与基质吸力变化曲线的比较 ($w=10\%$)Fig.8 Structural parameter and suction of loess changing with axial strain ($w=10\%$)

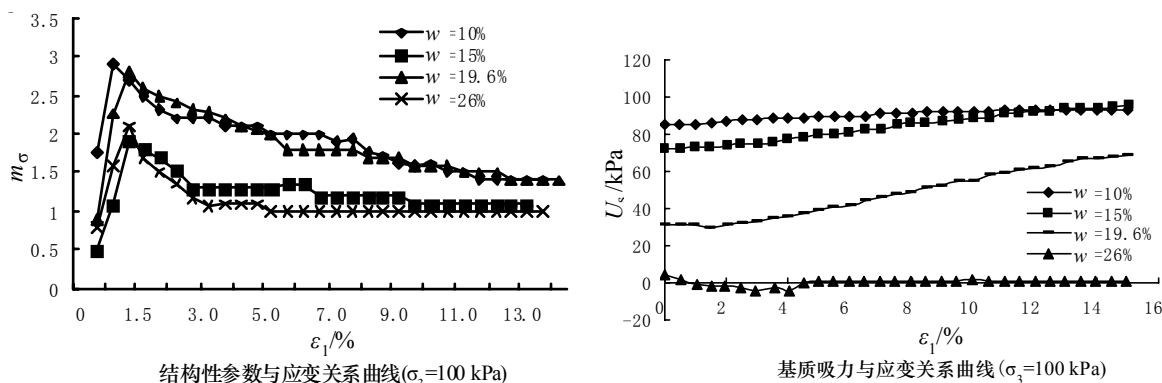


图9 同一固结围压下黄土结构性参数与基质吸力变化曲线的比较

Fig.9 Structural parameter and suction of loess changing with axial strain under the same consolidation pressure

比较结构性参数变化曲线图6~7与基质吸力曲线图4~5可知,当含水率较小(在 $w=10\% \sim 19.6\%$ 范围内)时,基质吸力与结构性参数均呈规律性变化,随着吸力的增大,结构性参数呈下降趋势,降到一定程度,结构性参数趋于稳定状态,其数值范围为1~5之间。表明当土的结构未破坏前具有一定的强度。这也反映出黄土的结构性在固结应力小于压缩结构强度时,不会大量破坏,其结构强度随应变的增加逐渐发挥出来,随着施加的轴向应力增大,超过其剪切结构强度(即过峰值点)后,黄土的结构开始大量破坏,结构性参数逐渐减小,结构性参数呈下降趋势,含水率是影响基质吸力和结构性参数的主要因素,含水率小,基质吸力大,结构性参数也大。当含水率一定时,围压的增大,引起基质吸力升高,结构性参数降低(当含水率较低时 $w=10\%$,结构性参数升高)。

比较基质吸力与结构性参数曲线图8~9可知,非饱和黄土的基质吸力对其抗剪强度有增强作用,但不能反映黄土的结构性。结构性参数能明确的反映黄土的结构性。结构性参数的变化曲线先逐渐上升,过峰值点后逐渐下降。表明原状黄土的结构性参数在应力未达到其结构强度之前,结构性参数逐渐上升,当应力超过其结构强度后,结构性参数呈单调下降趋势。

2 结论

(1) 土的含水率对其基质吸力影响大。含水率越低,基质吸力越大;当含水率增加到接近80%的饱和度时,土的基质吸力趋近于零。固结围压对非饱和土的基质吸力有明显影响,含水率10%时固结围压越大,土的基质吸力越大。三轴剪切条件下,不同含水率原状黄土及其重塑土的基质吸力均随轴向应变的增大而增大。

(2) 在相同含水率、相同固结围压条件下,原状黄土的孔隙分布不均匀,尽管结构性强,但由于大孔隙存在的影响,其基质吸力较小;重塑土破坏了原状土结构,孔隙分布较均匀,一般不存在大孔隙,其基质吸力较大。三轴剪切条件下,随着剪切变形发展,重塑土的基质吸力均高于原状土的基质吸力。

(3) 通过对基质吸力与结构性参数曲线的比较,随着剪切应变的发展,非饱和黄土的基质吸力不断增长,但基质吸力不能反映黄土的结构性,结构性参数能明确的反映黄土的结构性。结构性参数在达到峰值点后呈现单调衰减的变化规律,反映出黄土的结构性在压缩应力小于压缩结构强度时,土的结构不会遭到大量破坏,其结构强度随应变的增加逐渐发挥出来,随着施加的固结应力增大,超过其压缩强度后,黄土的结构开始大量破坏结构性参数逐渐减小。剪切过程中基质吸力增长加强其对土骨架的加固作用,但由于土结构性的逐渐丧失,原状非饱和土的抗剪能力在不断下降。

参考文献 References

- [1] 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 Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13.
- [2] 沈珠江. 黄土的二元介质模型[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97.
SHEN Zhujiang Binary medium model for loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 18(1): 95-97.
- [3] 谢定义, 齐吉林. 土的结构性及其定量化参数研究新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 20(2): 651-656.
XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structural characteristics and new approach in research on its Quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651-656.

- [4] 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.
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.
- [5] 邵生俊, 龙吉勇, 于清高, 等. 湿陷性黄土结构性变形特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1668-1672.
SHAO Shengjun, LONG Jiyong, YU Qinggao, et al. A Constitutive model of collapse loess with its structural parameter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1668-1672.

Analysis on structure and suction property of loess under tri-axial compression

CAI Dongyan¹, SHAO Shengjun², WANG Taotao²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710055, China;)

Abstract: The structural property of loess is related to the suction of its fabric, which improves the stability of soil structure. The shear strength of loess increases with suction and cementation of particles of loess, which can't be reflected by suction of unsaturated soils. The changing laws of suction and stress structural parameter with shear strain are analyzed by the triaxial tests of unsaturated intact and remolded loess. The structural property of loess reveals the peak value in the low strain condition, and after that, along with the development of the shearing deformation, the loess structural property weakens gradually. The suction is growing unceasingly with the development of the shearing deformation. The suction of intact loess is smaller than the remolded loess. Comparing structural parameter with the suction of loess, the structure effect weakens with shearing deformation and the suction growing unceasingly. Furthermore, the structural property of loess is one of the important mechanical properties. The suction of unsaturated soil reinforces the shear strength of soil particles structure, but it can't reflect the loess's structural property. The structural parameters can reflect the change of loess structure.

Key words: unsaturated loess; structural properties; strength of loess; suction; structural parameters

(本文编辑 桂智刚)

中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊 收录证书

西安建筑科技大学学报. 自然科学版

依据文献计量学的理论和方法, 通过定量与定性相结合的综合评审,
贵刊被收录为中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊, 特颁发此证书。

证书编号: CSCD2013C-0746

有效期: 2013 年-2014 年

发证日期: 2013 年 7 月

查询网址: www.sciencechina.ac.cn

