

文章编号: 1000-7598-(2013) 08-2231-07

人工制备结构性黄土的真三轴试验研究

陈昌禄^{1,2}, 邵生俊³, 张 喆³

(1. 山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 太原 030006;
2. 毕节学院 建筑工程学院, 贵州 毕节 551700; 3. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048)

摘 要: 研制一种室内制备人工结构性黄土的方法, 在改进原真三轴仪的不足的基础上进行人工制备结构性黄土的真三轴试验研究。结果表明, 人工制备结构性黄土的方法合理可靠。同时, 分析了结构性黄土在复杂应力条件下的破坏强度及残余强度变化规律, 当固结围压小于结构性黄土的结构强度时, 土的应力-应变曲线为软化型, 反之则为硬化型; Mohr-Coulomb 强度准则在描述结构性充分发挥后的残余强度时变化规律较好, 在描述峰值破坏强度时则明显偏小, 存在较大误差。

关 键 词: 结构性黄土; 人工制备; 真三轴试验; 强度规律

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of artificial structural loess under true triaxial tests

CHEN Chang-lu^{1,2}, SHAO Sheng-jun³, ZHANG Zhe³

(1. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Ministry of Transport, Shanxi Provincial Research Institute of Communication, Taiyuan 030003, China, 2. Architecture and Civil Engineering, Bijie University, Bijie, Guizhou 551700, China;
3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Structural characteristic is an important basic property of natural loess. The authors have developed an artificial preparation of structural loess, improved the deficiencies of the original true triaxial apparatus and carried out the true triaxial tests of artificial structural loess. The results show that the method of artificial structural loess is reasonably reliable. At the same time, the variation of failure strength and residual strength of structural loess under complex stress conditions is analyzed. When the confining pressure is less than the structural strength of the structural loess soil, the stress-strain curves is softening, and on the contrary hardening. Mohr-Coulomb strength criterion is better to describe the residual strength variation of structural loess and significantly worse to describe the peak breaking strength variation of structural loess.

Key words: structural loess; artificial preparation; true triaxial test; strength variation

1 引 言

天然土在沉积形成过程中一般都具有一定的结构性。由于土结构性的存在, 使得在相同密度和含水率条件下的结构性土与室内重塑土两者之间在力学特性上具有较大差异, 与临界土力学形成了较大的差异。大量试验证明, 土的结构性对土的力学行为特性具有较大影响^[1]。沈珠江^[2]认为, 为了更好地模拟具有结构性土的真实强度与变形特性, 人们应当从传统理论建立的弹塑性模型转向结构性模型研究, 土的结构性本构模型研究是 21 世纪土力学的核心问题^[3]。

土的结构性与粒度、密度、湿度等物理性质, 是天然土力学性质的本质属性。谢定义等^[4]认为, 结构性研究一般有 3 种方法和途径: 微结构形态学^[5-7]、固体力学的研究方法^[2, 8-11]和土力学的研究方法^[12], 其中土力学试验的研究方法是研究结构性土的力学行为特性最基本、最直接的方法。通过土力学试验研究结构性土, 一个重要的问题就是需要解决土源问题, 如何取得结构性土, 并在取土过程中保持土结构性的完整性就成为一难题。一般结构性土的获得有两种方式: 一种是直接取自天然结构性土, 另一种是人工制备结构性土。

对于直接取天然结构性土, 一方面不容易获取

收稿日期: 2012-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 41272320); 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题资助 (No. KLTLR-Y12-3); 贵州省教育厅优秀科技创新人才项目资助 (黔教合 KY 字[2012]096)。

第一作者简介: 陈昌禄, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 从事黄土力学研究。E-mail: changlu@139.com

结构性较强的土,而结构性较弱的土在取土过程中扰动后易使土的结构释放较大。另一方面,取土扰动对土结构性的影响以及如何考虑这种影响尚未得到充分的研究和论证。室内人工制备结构性土可以消除天然土中的砾石、树根等杂质,比取自天然的结构性土更具有较好的均匀性和规律性,因此,国内外一些学者人工制备出与天然结构性土性状相同的试样,利用人工制备的结构土进行室内结构性试验研究。

室内制备人工结构性土主要模拟结构性土的可变性和可稳性两方面,即土颗粒之间的胶结和土颗粒之间的排列^[4]。本次用室内人工模拟结构性黄土,利用改进后的真三轴仪开展试验研究。

2 人工制备结构性土的现状分析

室内制备人工结构性土的主要方法是通过在重塑土中添加一些物质,改变土的性状,人工模拟天然土的结构性,改变后土的性状和天然结构性土的性状具有一定的相似性,以此来模拟结构性土。

1987年,英国伦敦大学 Maccarini 等^[13]开始制备人工结构性土,利用“燃烧法”人工制备出结构性砂土。2001年杜伦大学 Malandraki 利用混有少量高岭土砂的高温灼烧法制备。国内学者在人工制备结构性土方面也取得了诸多成果,如蒋明镜等^[14]通过在原料土中掺入冰粒和微量水泥,或加入 CaO 和 CO₂^[15]制备人工结构性土。刘恩龙等^[16-17]在粉质黏土在加入水泥、高岭土、盐粒的方法制备结构性土。胡再强^[18-19]利用在重塑均匀黄土中添加南京水利科学研究所研制的 Ca(OH)₂ 和 CO₂ 制备人工结构性土。田堪良等^[20]、曾军军等^[21]在重塑黄土中加少量水泥模拟结构性土。李建红等^[22]利用在粉土中加入水泥、食用盐来制备人工结构性土。

由以上制备人工结构性土的方法可以看出,室内制备人工结构性土基本上是利用在重塑土中添加介质,通过介质的物理化学反应模拟结构性土的两个重要特性——联结特征和排列特征,即与其相关的可稳性和可变性。但以上模拟土结构性的方法中都存在一定的问题或难度,比如,利用冰粒需要在低温实验室完成,有的方法没有全面模拟土的结构性,如只加入水泥模拟土颗粒之间的胶结,没有考虑结构性土的孔隙。

本文针对以上人工制备结构性土的方法,全面考虑土的结构性,提出了一种新的人工制备结构性黄土的方法。

3 人工结构性黄土的制备方法

本次制备的人工结构性黄土是利用在重塑黄土中添加 CaO、高岭土、CO₂、水泥以及 CaCl₂ 来制备人工结构性土。其原理主要是利用 CaO、CO₂ 和水反应,形成 CaCO₃ 以及和水泥的作用形成土颗粒之间的胶结,模拟结构性黄土的联结特征。高岭土的主要作用是增加土的均匀性和可塑性,利用高岭土和碱性物质 Ca(OH)₂ 之间形成的分子筛模拟结构性黄土的大孔隙。为了加快成样速度,加速水泥的反应时间,加入适量的 CaCl₂,起到速凝剂的作用。各个添加剂的配量一般为 CaO 占 1%,高岭土占 10%,CO₂ (充足),水泥占 5%,CaCl₂ 占 0.5%,这些百分比为质量比,各个配比可根据制样的要求进行适当调整。

制备人工结构性黄土具体步骤:①首先,将原状黄土破碎,筛分,配水得到一定含水率的土料后依次加入 CaO、CaCl₂、水泥、高岭土形成混合黄土材料。将混合黄土土料按照一定的干密度要求压制成样,装入饱和器中浸水。在这个过程中,CaO 和水反应形成 Ca(OH)₂,同时水泥也将和水反应形成胶结。②将浸水后的试样放入一个密闭容器中并进行抽气,以便抽取土中的气体;向密闭容器中充入 CO₂ 气体,保持数小时并维持一定的气压,以便 CO₂ 气体能充分进入土颗粒之间的孔隙与 Ca(OH)₂ 充分接触反应,这个过程中 Ca(OH)₂ 进一步反应形成 CaCO₃ 并与土颗粒黏接结合。③将试样从密闭容器中取出,在空气自然风干到一个特定的含水率的试样。由于试样中添加的添加剂剂量较少,故以上制样过程不考虑整个化学反应过程中所消耗掉的水和所产生的水量,以方便测得各个时期土样的含水率。

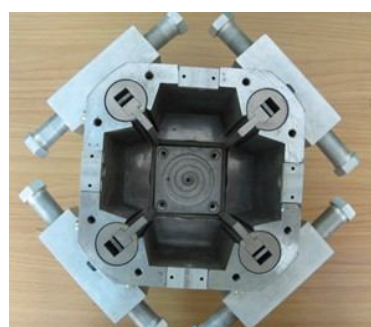
4 人工制备结构性黄土的真三轴试验

4.1 真三轴仪的改进

西安理工大学岩土工程研究所独立研制的 XGT-1 真三轴仪采用的是刚柔复合加载式的加载方式^[23],该仪器在轴向 σ_1 采用刚性加载方式,在侧向 σ_2 、 σ_3 采用柔性加载方式,试样采用 70 mm×70 mm×70 mm 的方样。研究表明,该尺寸试样对于研究土的强度存在一定的试验误差,主要是由试样的尺寸或者说是压力腔的大小引起。由于该真三轴仪器采用的是方样,而轴向加载采用的是刚性加载方式,使得试样剪切过程中在刚性加载这个方向的上下两个端面上存在较大的端部约束。根据圣维南

原理 (Saint-Venant's principle), 该端部约束力需要有一定长度距离才能基本上消除, 所以采用的方样在试验过程中并不能很好地消除该约束力。当中主应力比 $b=0$ 时, 与常规三轴试验相比, 真三轴试验结果还是偏大, 试样破坏面也因此约束而呈现较多的破坏模式^[23]。

为了更有效地消除端部约束对试验结果的影响, 将原来采用的真三轴方样在轴向增加试样高度, 改为 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 140\text{ mm}$ 高样, 同时对压力室也进行了改造, 见图 1。



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图 1 高样压力室结构

Fig.1 The structure of pressure chamber with big sample

对局部细节进行了优化处理, (1) 高样真三轴仪液压囊与液压管连接部分加入三通连接, 可以方便地进行液压囊排气、注水, 装样时不会出现液压囊过于鼓胀等不利于装样现象, 待试样装好后, 从三通连接液压管注水, 解决了高围压、高 b 值情况下液压囊、液压缸中传压介质体积不足的问题, 施加压力时不再过多受限于液压缸行程。(2) 压力室相邻压力腔之间设置了径向弹性伸缩、水平向弹性转动的竖向隔板, 将其中弹簧内置于套管中 (见图 1)。该部件还可作为搬动压力室的手柄, 保证了实用性与美观性。(3) 原设计的真三轴仪的伺服步进电机采用卧式横向排列, 但排列方式占用较大的空

间, 不方便美观, 现改进为立式排列于标准控制机柜中, 将相应控制、采集系统布置其中, 形成标准化整体系统, 同时控制程序操作界面也进行优化, 更加易懂, 易操作。

4.2 真三轴高试样的破坏模式

人工制备结构性黄土的土源取自西安南郊曲江三爻村民风园西安地铁勘察的一个地质探槽, 探槽内为 Q_3 黄土, 在室内重塑后作为人工制备试样的土料。

进行真三轴试验之前, 为检验该人工制备结构性土的合理有效性, 首先对人工制备结构性黄土进行了较为简单的试验验证, 即分别进行了相同含水率和干密度下的人工结构性黄土和重塑黄土的压缩试验, 压缩试验结果如图 2 所示。从图中可以看出, 通过上述方法制备得到的人工结构性土具有与天然结构性土基本一致的压缩曲线, 都具有一定的结构强度, 说明该方法制备的结构性土具有较好的结构性。

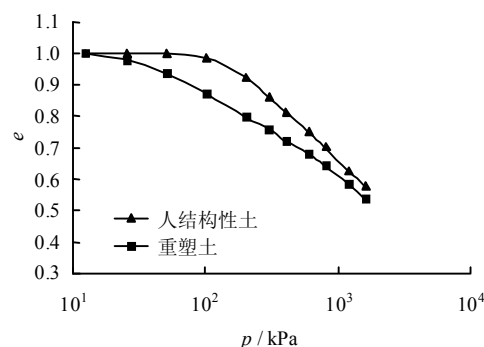


图 2 人工结构性土和重塑土的压缩曲线比较

Fig.2 Compression curves of artificial structural loess and remolded loess

本次人工制备结构性黄土试验进行了 5 种围压 (50、100、150、200、300 kPa), 1 个含水率 (12%), 1 个干密度 (1.35 g/cm^3), 5 个中主应力比 ($b=0$ 、0.25、0.50、0.75、1.00), 共计 25 个试样。

改进后的真三轴仪, 试样破坏形式也呈现出较大的不同。文献[24]中给出了原真三轴试验方样的破坏方式, 如图 3 所示, 图中的试样尺寸为 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 。图 4 为高样 ($70\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 140\text{ mm}$) 真三轴试样破坏形式。由图 4 可见, 与低样真三轴试样的破坏形式多样化相比, 高样真三轴试样的破坏形式更趋于简单一致, 在不同中主应力比 b 值下, 其破坏面基本上都在大主应力和小主应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 的平面内, 且随着中主应力比 b 值的变化呈现出多尺度、多角度的变化。

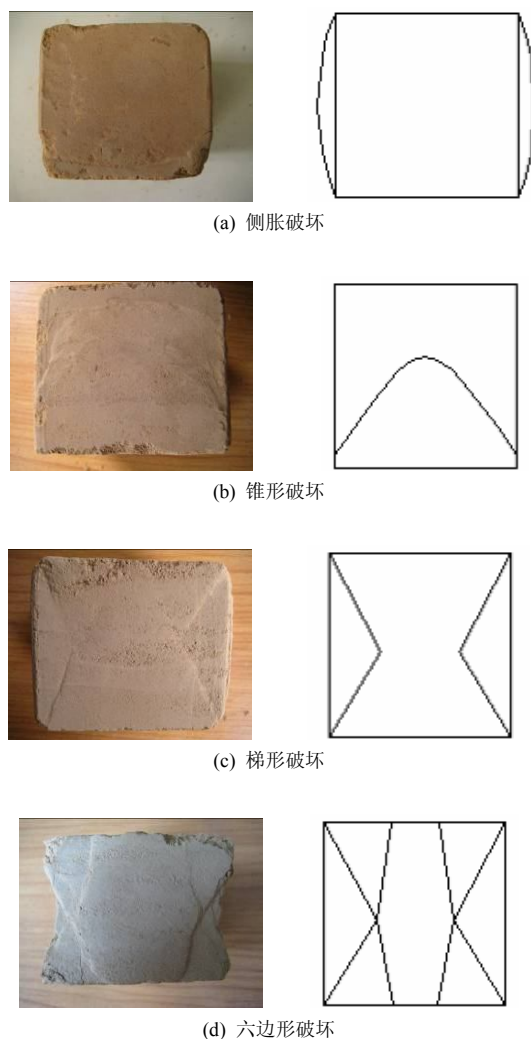


图3 真三轴试样的破坏形式
Fig.3 Failure modes of true triaxial samples

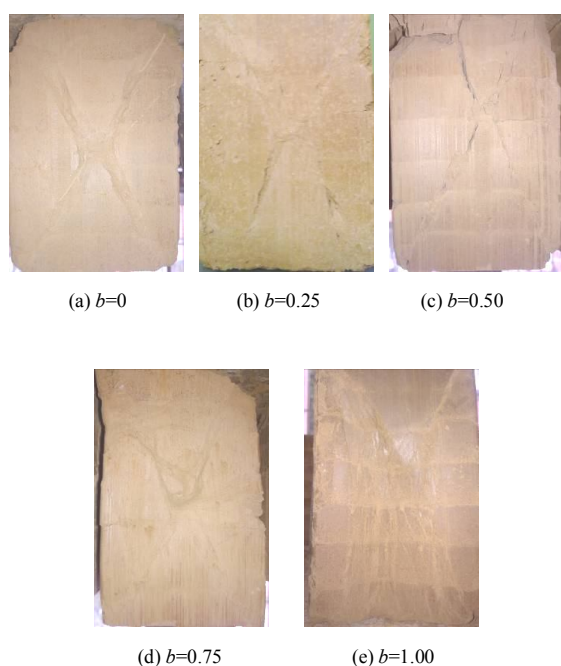


图4 真三轴试样的破坏形式
Fig.4 Failure modes of true triaxial samples

5 人工结构性黄土真三轴试验结果分析

5.1 应力-应变曲线分析

图5为该人工制备结构性黄土在真三轴试验下相同围压 σ_{3c} 不同中主应力比 b 值的大主应力 σ_1 和大主应变 ε_1 曲线(σ_1 - ε_1 曲线)。从图中可以看出,人工制备的结构性黄土应力-应变曲线规律性较好,也再次说明通过以上制备人工结构性黄土的方法是合理可行的。从图中可以得出如下规律:(1)低围压($\sigma_{3c}=50$ 、100、150 kPa)作用下结构性黄土的应力-应变曲线呈现软化形式;较大围压($\sigma_{3c}=200$ 、300 kPa)作用下,其应力-应变曲线呈现硬化形式。这是由于较低围压不足以在固结阶段破坏土的结构,此时结构性土的应力-应变曲线就呈现软化形式。当固结围压大于结构性土的结构强度时,固结围压将破坏土的弱结构,土在剪切过程中强度主要由压应力作用下的摩擦抗剪强度和强胶结组构部分的结构强度提供,此时结构性土的应力-应变曲线也将由软化向硬化曲线过渡。(2)同一围压下,随着中主应力 b 值的增大,土强度也在逐渐增大,土的球应力 p 也在相应增大,根据土的压硬特性,球应力 p 的增大将引起土的强度也增大,只是在不同围压的情况下,随着球应力 p 的增大,强度呈现出不同的增大幅度。这是因为随着球应力 p 的增大,一方面由于土的压硬特性的存在,土的结构性将逐渐遭到破坏,结构强度逐渐降低而引起土总体强度的降低;另一方面,根据土的压硬性特点,球应力 p 的增大又会引起土强度的提高,两者之间的此消彼长的过程就体现在土的强度增长变化规律上。

(3)在同一中主应力比 b 值下,随着围压的增大,土的强度也在增大,但增加的趋势并不是呈现线性规律变化,这是由于土的压硬性和压损性两者交叉影响的结果。

根据规律(2)、(3)可以发现,影响土强度的中主应力比 b 值和围压这两方面的实质都是土的压硬性和压损性相互交叉作用的结果,只是在围压和中主应力比 b 值这两个因素之间,围压对压硬性和压损性的影响要大于中主应力比 b 值这一因素。

5.2 强度分析

图6为人工制备结构性黄土的真三轴试验结果在 p - q 面和 π 平面上的强度破坏曲线。从图6中可以看出,人工制备结构性黄土在 p - q 平面和 π 平面上的强度破坏线规律性较好。不同球应力 p 也在不断增大。球应力的增大使得土的压硬性得到较大

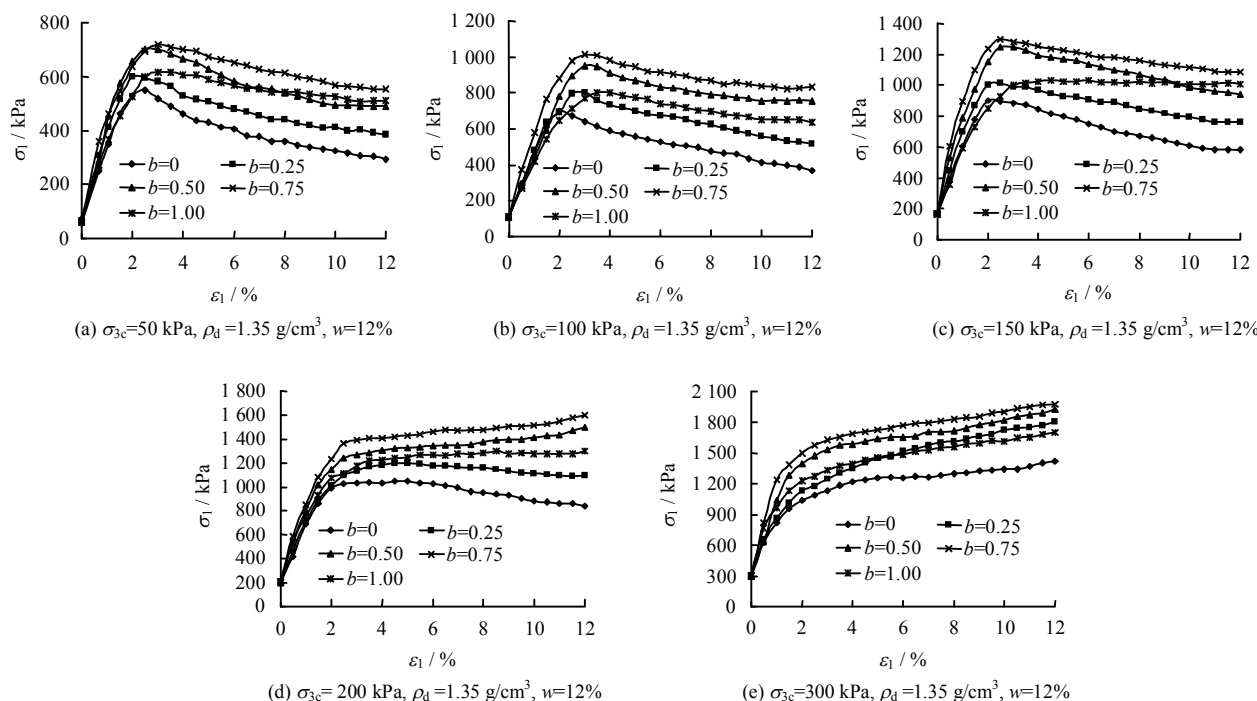


图 5 人工制备结构性黄土的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of artificial structural loess

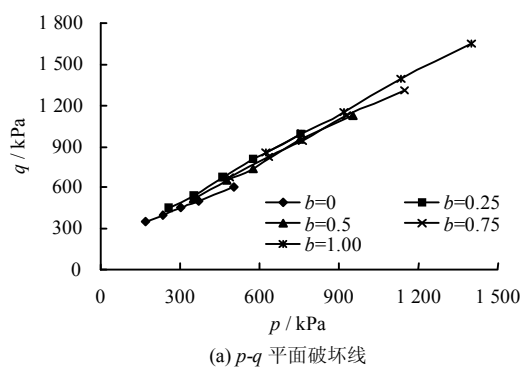
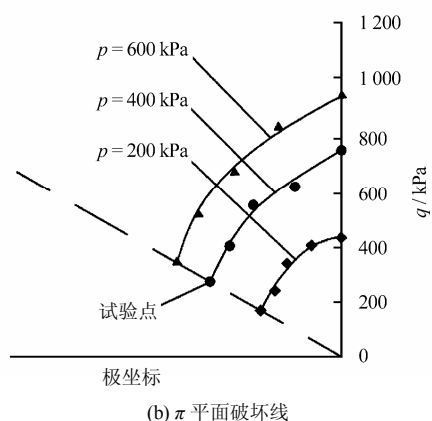
(a) p - q 平面破坏线(b) π 平面破坏线

图 6 人工结构性黄土的强度破坏线

Fig.6 Failure line of artificial structural loess

发挥，土颗粒间的摩擦强度得到较大加强。

对于人工制备结构性黄土，在围压和中主应力 p 下 π 平面上的破坏线，随着球应力 p 的增大，剪

比 b 值较小时其应力-应变曲线为软化型。根据已有对土结构性的认识，土的剪切过程也是土结构性变化的过程，随着剪切过程的深入，土的结构性逐渐减弱。对于应力-应变软化曲线，在峰值强度后，随着剪切变形的进一步进行，土强度为残余强度。此时结构性也在逐渐发挥，直到变形继续加大，结构性完全发挥。

为了进一步分析土结构性和黄土强度之间的关系，具有软化特性的人工制备结构性黄土的残余强度（此时土的结构性可以认为充分发挥）在 π 平面上的破坏线如图 7 所示。

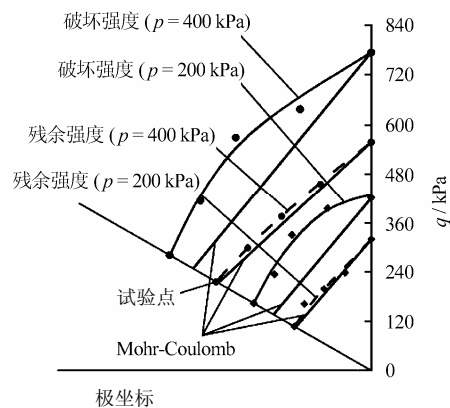


图 7 人工结构性黄土残余强度和破坏强度的破坏线
Fig.7 Failure line and residual strength failure line of artificial structural loess

从图 7 的人工结构性黄土残余强度和破坏强度的破坏线对比可以看出, 由于结构性黄土的残余强度为土结构性充分发挥后的强度, 在 π 平面内人工制备结构性黄土的破坏强度和残余强度破坏线的线型变化规律差异性较大, 土结构性充分发挥后的残余强度破坏规律更接近于 Mohr-Coulomb 准则描述的线性破坏规律, 而破坏强度的变化规律则与 Mohr-Coulomb 准则描述的强度变化规律相差较大, Mohr-Coulomb 准则描述的强度明显小于结构性黄土的破坏强度。从 π 平面上的破坏线可见, 结构性土的结构性充分发挥后, 其残余强度的破坏线接近于直线, 而其破坏强度线表现为明显的非线性变化规律。

6 结 语

(1) 提出了一种新的室内人工制备结构性黄土的方法, 并通过真三轴试验验证了该方法的合理有效性。

(2) 对原真三轴压力室的改进, 研制了高样压力室。与方样比较, 高样真三轴试验可减少试样上下两个端部约束对土强度测试结果的影响, 使试验结果更加合理可靠。

(3) 结构性黄土的强度与其结构的压损性、压硬性、剪损性发展的密切相关, 当压损性较小且剪损过程中压硬性增长较小时, 土的强度随着围压的增大而增大, 当压损明显时, 压硬性反映出的摩擦强度增长较大。在压硬性起主导作用时, 土的强度变化表现为随着中主应力比 b 值的增大而一直增大的变化趋势; 当压剪损伤起主导作用时, 随着中主应力比 b 值的增大, 土的强度表现为先增大后减小的变化趋势。

(4) 具有软化特性的人工制备结构性黄土的残余强度研究分析表明, 结构性黄土的残余强度在 π 平面上的破坏线基本上为一直线, 与 Mohr-Coulomb 准则较为吻合。而结构性黄土的峰值破坏强度在 π 平面上的破坏线明显表现出非线性变化特性, 与 Mohr-Coulomb 准则相差较大, Mohr-Coulomb 准则描述的强度破坏规律明显偏小。

参 考 文 献

[1] 王国欣, 肖树芳. 土结构性本构模型研究现状综述[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 621—626.
WANG Guo-xin, XIAO Shu-fang. Review on current situation of soil structural constitutive models[J]. **Journal**

of Engineering Geology, 2006, 14(5): 621—626.

- [2] 沈珠江. 现代土力学的基本问题[J]. 力学与实践, 1998, 20(6): 1—6.
SHEN Zhu-jiang. Fundamental problems in the modern soil mechanics[J]. **Mechanics and Engineering**, 1998, 20(6): 1—6.
- [3] 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.
SHEN Zhu-jiang. Mathematical model of soil structure characteristics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 95—97.
- [4] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量参数研究的新途径[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, 20(2): 651—656.
- [5] 胡瑞林. 黏性土微结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [6] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980, 31(12): 1203—1208.
GAO Guo-rui. The microstructure classification of loess and its collapsibility[J]. **Chinese Science**, 1980, 31(12): 1203—1208.
- [7] 施斌. 黏性土击实过程中微观结构的定量评价[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 57—62.
SHI Bin. Quantitative assessment of changes of microstructure for clayey soil in the process of compaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(4): 57—62.
- [8] YONG R N, SHEERAN D E. Fabric unit interaction and soil behavior[C]//Proceedings of the International Symposium on Soil Structure, Gothenburg. Sweden: [s. n.], 1973: 176—183.
- [9] KRUYT N P, ROTHENBURG D E. Micromechanical definition of the strain tensor for granular materials[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1996, 118: 711—711.
- [10] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1—9.
SHEN Zhu-jiang. Generalized suction and unified

- deformation theory for unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(2): 1—9.
- [11] 苗天德, 王正贵. 考虑微结构失稳的湿陷性黄土变形机理[J]. 中国科学(B), 1990, 41(1): 86—96.
- MIAO Tian-de, WANG Zheng-gui. The deformation mechanism of loess considered its micro-structural instability [J]. **Chinese Science(B)**, 1990, 41(1): 86—96.
- [12] 张诚厚. 两种结构性黏土的土工特性[J]. 水利水运科学研究, 1983, 4(4): 65—71.
- ZHANG Cheng-hou. The geotechnical characteristics of two kinds of structural clay[J]. **Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute**, 1983, 4(4): 65—71.
- [13] MACCARINI M. Laboratory studies of weakly bonded artificial soil[D]. London: University of London, 1987.
- [14] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性粘土试样人工制备方法研究[J]. 水利学报, 1997, 42(1): 56—61.
- JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. A method of artificial preparation of structured clay samples[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1997, 42(1): 56—61.
- [15] JIANG M J, SHEN Z J. Preparation of artificial structured collapsible loess and its behaviour in oedometer test[C]// 2nd International Conference on Unsaturated Soils. Beijing: [s. n.], 1998.
- [16] 刘恩龙. 不同应力路径下结构性土的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2058—2064.
- LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Mechanical behavior of structured soils under different stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(10): 2058—2064.
- [17] 刘恩龙, 沈珠江. 人工制备结构性土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 679—683.
- LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Experimental study on mechanical properties of artificially structured soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 679—683.
- [18] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 775—779.
- HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Research on structural behavior of unsaturated loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(6): 775—779.
- [19] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4142—4146.
- HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Deformation properties of structural loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(24): 4142—4146.
- [20] 田堪良, 张慧莉, 张伯平, 等. 黄土的结构性及其结构强度特性研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(2): 64—67.
- TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li, ZHANG Bo-ping. Research on structural characteristics and strength of loess[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2005, 24(2): 64—67.
- [21] 曾军军, 卢廷浩. 考虑土体结构性的弹塑性软化模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1091—1102.
- ZENG Jun-jun, LU Ting-hao. An elastoplastic softening model of structured soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1091—1102.
- [22] 李建红, 张其光, 孙逊, 等. 胶结和孔隙比对结构性土力学特性的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(9): 51—55.
- LI Jian-hong, ZHANG Qi-guang, SUN Xun. Effect of bonding and void ratio on the mechanical behavior of structured soil[J]. **Journal of Tsinghua University (Science and Technology)**, 2008, 48(9): 51—55.
- [23] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1172—1179.
- SHAO Sheng-jun, LUO Ai-zhong, DENG Guo-hua. Development of a new true triaxial apparatus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(8): 1172—1179.
- [24] 邓国华. 真三轴条件下结构性土的强度变形本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.