

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.04.012

# 不同结构性黄土的单轴抗压试验及破坏模式

罗爱忠<sup>1,2</sup>, 邵生俊<sup>2</sup>, 方娟<sup>1</sup>, 陈昌禄<sup>1</sup>

(1. 毕节学院 土木建筑工程学院, 贵州 毕节 551700; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048)

**摘要:**结合室内单轴压缩实验, 对不同初始结构性黄土在单轴应力条件下的结构性变化特性进行研究。研究发现, 在同一含水率条件下, 原状黄土试样的单轴抗压强度要明显高于重塑黄土试样的单轴抗压强度; 当含水率较低时, 土样的破坏主要表现为脆性拉裂破坏, 破坏呈现突然性; 当初始含水率较低时, 含水率对黄土结构亚稳定状态的影响减小, 初始结构强度的损失也相对减小, 结构的可变性相对较大, 黄土在该状态条件下所具有的初始结构性较强。构度结构性参数指标随初始含水率的增大出现骤减, 说明在这一阶段试样的初始含水率对黄土的初始结构性的影响较明显; 当黄土的初始含水率达到一定值以后, 含水率的增大使得黄土试样在沉积过程中初始结构性相比低含水率下沉积的黄土试样, 土样的初始结构性已经部分减小, 从而对构度结构性参数指标的影响相对较小。

**关键词:**黄土; 结构性; 单轴抗压试验; 构度; 破坏模式

**中图分类号:** TU444    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2014)04-0074-07

## Single Compression Experimental Analysis and Failure Mode of Loess with Different Structural

Luo Aizhong<sup>1,2</sup>, Shao Shengjun<sup>2</sup>, Fang Juan<sup>1</sup>, Chen Changlu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Bijie University, Bijie 551700, GuiZhou, P. R. China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P. R. China)

**Abstract:** Based on the single compression experiments in laboratory, the structural change characteristic of loess with different initial structural in single compression stress conditions was studied. The conclusions are: compared to the single axial compression strength between intact loess and remold loess in the same moisture conditions, strength of intact loess was way bigger than remold loess; when the water content was low, all of a sudden, the destruction model of loess samples was mainly brittle tensile failure; when the water content was low, there was relative little effect on metastable of structural and was relative little loss of initial structural strength, and relative more variability; and then, there was way higher initial structural strength. The structural index decreased sharply with the moisture increase of intact loess, and the effect of water content on initial structural is obvious; when the water content reached a certain value, moisture effect on initial structural of intact loess become more and more unobvious, and structural index of loess was relative small. In other words, the initial structural has been fully released by remolding and saturating; the reasonability of structural index which was quantitative described the initial structural of

收稿日期: 2013-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(41272320); 贵州省自然科学基金(黔科合J字LKB[2012]13号); 贵州省教育厅自然科学重点项目(黔教合KY字[2013]179)

作者简介: 罗爱忠(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学与防灾减灾与防护工程研究, (E-mail) aizhongluo@126.com。

loess was verified.

**Key words:** loess; structural; single compression experiments; structural index; failure model

黄土结构性的主要来源是黄土骨架及颗粒之间的胶结<sup>[1]</sup>。基于黄土的微结构特征,从力学强度及稳定性两个方面分析,黄土骨架颗粒是整个黄土骨架架空结构的主体,其稳定性很大程度上由黄土颗粒的排列方式所确定,力学强度由黄土颗粒间连接形式所确定<sup>[2-4]</sup>,土的结构性主要是通过土颗粒的排列特征和联结特征来表征,以往的研究表明,这两个方面对结构性土的力学特性有着显著的影响,决定着土结构性的强弱,而孔隙比和联结强度是反映土的颗粒排列特征和联结特征的两个重要指标,通过一定的指标来量化土的结构性及其变化对土的宏观力学特性显示影响的性质是结构性研究的根本出发点。结构性可以随着土中初始含水率及所承受荷载的变化不断产生变化,这种结构性变化的结果一方面是原生结构的损伤,另一方面是结构的重新定向排列造成的次生结构生成及土体结构的强化。土体最终走向软化破坏或者是压密强化实际取决于以上两种趋势的相互影响。中国著名的土力学家沈珠江将这种转变称之为土力学特性研究的第二次飞跃<sup>[5]</sup>。土力学的奠基人 Terzaghi<sup>[6]</sup>指出了土的结构在评价土的强度和变形时的重要性。Soga<sup>[7]</sup>结合 Michell 等对土体微观结构的认识,第一次给出了土结构性的定义,即土的结构性是指土的微观结构的连接效应及其稳定性。岩土体在天然沉积环境下所形成的结构性,正如其在天然荷载作用下所表现出的压硬性和剪胀性一样,它是天然岩土材料的一种基本特性。谢定义等<sup>[8]</sup>于1999年在考察土结构性研究历史的基础上,提出了一个通过原状黄土、重塑黄土及饱和黄土的宏观应力或应变来描述土体结构性变化的量化参数,这就是基于结构可稳性和结构可变性的综合结构势思想。这一研究的核心思想是研究土粒骨架结构的主动作用力和被动抵抗力之间的核心关系。邵生俊等<sup>[9-11]</sup>、骆亚生等<sup>[12]</sup>、陈存礼等<sup>[13]</sup>、冯志炎<sup>[14]</sup>、邓国华等<sup>[15-16]</sup>和罗爱忠等<sup>[17-19]</sup>等开展了相应的研究,并提出可以考虑结构性的相应的黄土应力应变关系。笔者主要基于综合结构势思想,以黄土为研究对象,以黄土结构性为切入点,重点研究3种不同黄土在单轴压缩条件下的结构性损伤演化规律,并寻求黄土初始结构性的准确描述及其对单轴压缩条件下黄土宏观力学特性的反映。

## 1 黄土的单轴压缩试验及结构性变化分析

黄土结构性的存在受诸多因素影响,如颗粒形状、骨架结构粒组构成、组成骨架结构的大孔隙性状、体中含水率的分布、颗粒中原生矿物成分及形成过程中的沉积环境与历史等,因而在宏观上表现出不同的力学性质及反应。长期以来,对土的基本物理性质的描述仅仅局限于粒度、密度和湿度等几个方面,这种描述中忽视了结构性的存在对黄土宏观力学特性的影响。笔者从黄土的单轴压缩试验着手,寻找土体初始结构性量化的合理描述,研究构度结构性参数描述黄土初始结构性的可行性和合理性。

### 1.1 黄土的单轴压缩试验研究方案

为了研究不同初始结构性黄土的结构性对其力学特性的影响,比较不同密度和湿度条件下黄土的构度变化与其基本力学特性之间的关系,进行了3种黄土的单轴压缩试验。试验所用的黄土①(loess ①)、黄土②(loess ②)和黄土③(loess ③)分别取自西安南郊曲江民风园地下一探槽内和东郊白鹿塬的两直立边坡,取土深度距地表分别为6~7 m、9~10 m,黄土①中砂质成分较多、比较松散,黄土②和黄土③土中钙质结核较多,通过初始孔隙比及现场观测可以看出,黄土③较黄土②密实,在原状试样制备过程中尽量做到对土样的扰动最小。3种黄土的基本物性指标如表1所示。按照标准常规三轴试样(39.1 mm×80 mm)尺寸制备试样后,按照试验计划,分别对2种黄土进行滴水、风干等措施配置不同的含水量,在室内放置一定时间在常规应变控制式三轴仪上进行单轴压缩试验。对3种黄土分别配置试验初始含水率为10%、15%、18%、22%、25%,平行进行原状黄土和干密度相同的水膜转移法增加其含水量,减少或增加的水的质量通过式(1)计算。

$$\Delta m_w = \frac{\omega - \omega_0}{\omega + \omega_0} m_0 \quad (1)$$

式中： $\Delta m_w$ 为增加或减少的试样含水率； $w$ 为试样含水率； $w_0$ 为天然含水率； $m_0$ 为天然含水率所对应的试样质量。

对于重塑黄土试样的制备，首先将取回的天然含水率试样碾碎过筛，按需要的设计含水率配置不同水分的散状土样，将散状土样在恒温保湿缸中静置5 d，待水分均匀后使用分层制样器均匀分5层制样。

为了保证原状黄土试样及重塑黄土试样的水分均匀，制完后的试样在恒温保湿缸中静置2 d后使用。

表1 3种黄土的基本物理性质指标

物性指标	$\rho_d$	$w_0/\%$	$w_l/\%$	$w_p/\%$	$I_p/\%$	$e_0$
黄土①	1.363	15.65	38.1	23.4	14.7	0.986
黄土②	1.464	15.85	36.9	21.4	11.8	0.840
黄土③	1.520	14.75	37.3	23.9	13.4	0.824

### 1.2 黄土的单轴抗压试验结果分析

黄土单轴压缩试验仪器选择常规应变控制三轴仪。为获得较多的、均匀的试验数据和记录峰值强度，试验中百分表每间隔0.01读数一次。试验完成标准为：量力环出现峰值后继续读数，当应变持续3%~5%后停止试验；当读数无峰值时，试验应进行到应变达15%为止。依据试验结果给出轴向应变与单轴压缩应力之间的关系，3种黄土的单轴压缩试验结果整理如图1~图3所示。

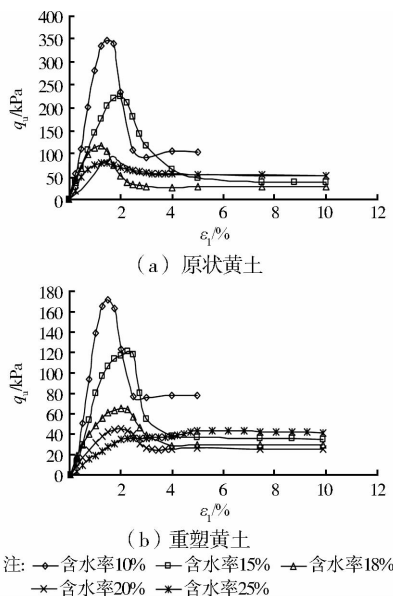


图1 不同含水率条件下黄土①单轴压缩试验结果对比

图1~图3给出了不同含水率条件下原状黄土和相同条件下的重塑黄土、以及饱和黄土之间的单

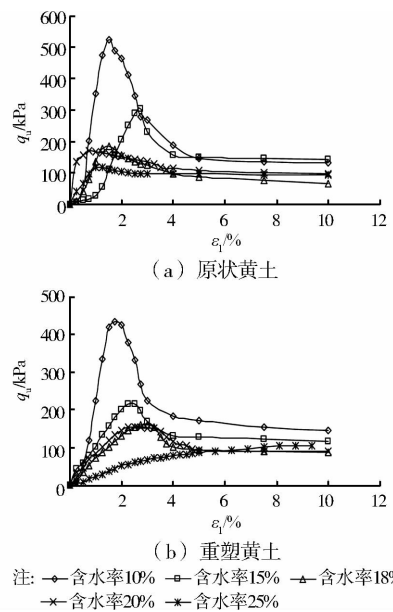


图2 不同含水率条件下黄土②单轴压缩试验结果对比

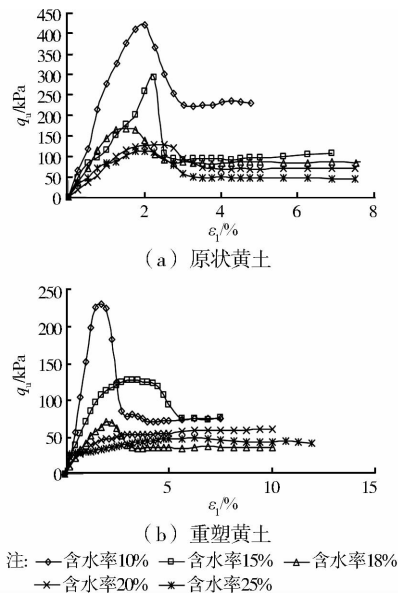


图3 不同含水率条件下黄土③单轴压缩试验结果对比

轴压缩试验应力应变关系曲线。从图1~图3可以看出，在单轴压缩应力条件下，具有不同初始结构状态黄土的应力应变关系均表现出一定的应变软化特性，从材料类型上来说属于典型脆性破坏材料，在强度特性上具有明显的峰值强度现象。分析认为，在变形发展的初期，由于轴向压缩荷载的大小还不足以对土结构造成破坏，单轴压缩应力应变关系曲线呈现出陡直的上升阶段，变形较小，变形处于弹性变形阶段，可以认为土单元未进入屈服状态，塑性变形未发展。当轴向压缩荷载产生的应力大小有足够能力破坏土体的原生结构时，土体的综合结构势开始发生衰减变化，黄土颗粒所构成的架空骨架结构开

始发生变化,最终走向破坏,在应力应变关系曲线形态上,表现出峰值开始出现,并伴随单轴压缩应力的急剧降低。基于塑性理论的观点,随着轴向压缩荷载的增大,土体变形由弹性状态转向塑性屈服,土骨架颗粒之间滑移变形增大,部分颗粒之间联结破坏并同时伴随出现骨架颗粒之间微裂隙出现,随着微裂隙发展及其在土单元内形成贯通,骨架颗粒最终破坏,土中剪切带产生。依据综合结构势的思想,扰动重塑和浸水饱和一定程度上能破坏土的原生结构性,从而使土骨架颗粒之间的联结和排列发生改变,黄土的综合结构势得到充分释放。从图1~图3还可以看出,不同含水率的原状样、重塑样及饱和原状样在抵抗轴向荷载的能力上表现出明显差异,且其基本随含水率的增大而减小,这同时也是综合结构势思想的在黄土的单轴压缩试验上的一个验证。

在同一含水率条件下,原状黄土试样的单轴压缩强度要明显高于重塑黄土试样,重塑黄土试样的单轴压缩强度又明显高于饱和黄土试样。依据综合结构势思想的观点分析,试样重塑过程实际上是土体颗粒排列的重分布过程,重塑过程中黄土试样单元的结构性扰动势得到有效释放,扰动重塑使得土体颗粒的排列更加均匀化,粒间大孔隙及竖向裂隙愈合,从而影响到了黄土结构性的改变。试样在饱和过程中,原状黄土试样结构性的水敏势得到充分释放,水膜的楔入,改变了原生矿物的粒间结合,次生黏土矿物颗粒形成的粒间胶结发生分解,从而使土结构性发生了明显的改变,单轴压缩结构强度表现出明显的降低;骨架颗粒间胶结的丧失及颗粒的均匀排列,形成了一种新的稳定的次生结构。

当含水率较低时,土样破坏主要表现为脆性拉裂破坏,破坏呈现突然性,单轴压缩峰值强度一般在轴向应变达到2%出现;随着含水率的增大,应力应变关系也表现为应变软化型,但是,峰值强度到达后,强度较小的速率逐渐减慢,峰值点后曲线形态较为平缓。重塑黄土试样峰值强度出现的时间大多晚于原状试样,也即是峰值强度出现时对应的轴向应变大于相同条件下的原状样峰值强度出现时轴向应变,同时由于压密作用的影响,会在轴向变形发展到一定值时出现强度超过原状样的现象。

## 2 黄土的构度变化规律

已有结构性参数描述的是土在变形过程中的结构性损伤演化规律,它们不能反映土初始结构性的特点。邵生俊等<sup>[20]</sup>在考察压缩变形过程中结构性参数变化规律(如三轴、真三轴剪切变形过程中的

结构性参数)的基础上,从能够反映土结构性的抗剪切效应及方便试验测试的角度出发,基于综合结构势的思想,提出通过原状黄土、重塑黄土和饱和黄土的单轴压缩试验强度来定义黄土的初始结构性,从而建立了构度结构性参数。试验中原状样与重塑样的峰值强度比值反映重塑造成的结构损失,由饱和样与原状样的峰值强度比值反映排列的变化引起的结构损失,二者的比值综合起来反映土的初始结构性-构度指标,计算式为

$$m_u = \frac{m_1}{m_2} = \frac{(q_u)_o / (q_u)_r}{(q_u)_s / (q_u)_o} = \frac{(q_u)_o^2}{(q_u)_r \cdot (q_u)_s} \quad (2)$$

式中: $m_u$ 为构度; $m_1$ 为结构可稳性参数, $m_2$ 为结构可变性参数; $(q_u)_o$ 、 $(q_u)_r$ 、 $(q_u)_s$ 分别为原状黄土、重塑黄土和饱和黄土的无侧限抗压强度。土的结构性的不同,一定程度上是由于颗粒形状、颗粒构成、孔隙性状、矿物成分、沉积环境与应力历史等因素的不同造成的。长期以来土体的结构性由于缺乏一个定量描述其初始结构性的参数,使其游离于土的基本物理力学性质研究的框架之外(土的物理力学性质的研究仅仅局限于粒度、密度和湿度3个方向上描述)。因此,将构度结构性参数作为初始结构性的状态量,与土的粒度、密度和湿度一起作为土体物理力学性质研究的框架内容,将更能反映结构性土的强度、变形等基本宏观力学性质,如果进一步将其反映到结构性宏观力学行为中,必将为实际工程应用带来很好的发展前景。王帅<sup>[21]</sup>、陶虎<sup>[22]</sup>等研究了构度与湿度、密度、粒度之间的相互关系,认为构度作为一个基本的物理量,可以独立、合理地反应土的初始结构性。单轴压缩条件下,整理构度与单轴压缩强度的关系如图4、图5所示,从图4、图5中可以看

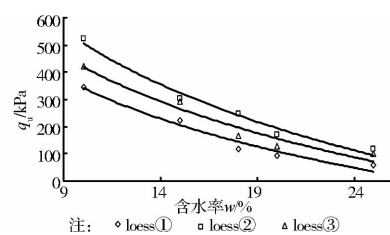


图4 黄土的单轴抗压强度与初始含水率关系

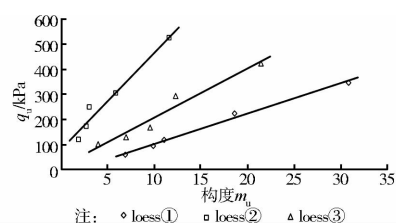


图5 黄土的单轴抗压强度与构度关系

出, 构度与单轴压缩强度之间具有较好的相关性, 随着构度的增大, 3 种黄土的单轴抗压强度值近似线性增大, 3 种黄土所表现出的规律具有一定的一致性, 这也体现了构度定义的合理性和用其描述土初始结构性具有一定的优势。

图 6 给出了 3 种黄土的构度随初始含水率变化的规律。从图 6 可以看出, 3 种黄土的构度随初始含水率的变化曲线规律比较相似, 含水率对初始结构性的影响在图 6 中可以分为 2 个不同的阶段: 当初始含水率较低时, 含水率对黄土的结构亚稳定状态的影响较小, 初始结构强度的损失也相对减小, 结构的可变性相对较大, 黄土的初始结构性较强, 在构度随后续含水率的变化方面, 构度指标随含水率的增大出现骤减, 说明初始含水率对黄土的初始结构性影响明显; 当黄土的初始含水率达到一定值以后, 构度指标受含水率的影响变化较小, 可以理解为含水率的增大使得黄土试样在沉积过程中初始结构性相对于低含水率下沉积的黄土试样, 土样的初始结构性已经较小, 从而对构度指标的影响相对减小。通过图 4~图 6 所显示出的规律可以看出, 除了黄土物质成分、特性状态、相对含量的变化外, 它们之间的相互作用也是构成土体的初始结构性具有典型时空变异性的根本原因, 土体在外部环境变化条件下所表现出的宏观力学特性的变化仅仅是土体结构在不同力系作用下综合表现。它一方面受制于土体粒度、密度及湿度的变化, 另一方面还取决于土体所赋存的初始结构状态, 它在土的生成过程及生成环境中形成。

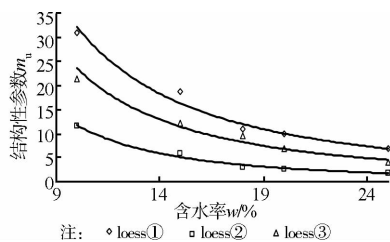


图 6 构度结构性参数与初始含水率的关系

对岩土工程实践来说, 岩土体材料的宏观理论及其微观机理分析研究的目的是为了工程实际应用及对各种工程现象分析。为了便于理论分析构度及其应用与理论实际的需要, 结合构度所描述的初始结构性的特点, 考虑含水率及土体基本物理性质变化关系, 黄土构度可以用式(3)描述。

$$m_u = f(e_0, \rho_d, \omega, I_p) \quad (3)$$

式中:  $m_u$  表征土的构度结构性参数;  $e_0$  为土的初始孔隙比;  $\rho_d$  为土的干密度;  $\omega$  为土体的初始含水率;

$I_p$  为塑性指数。

土密度是土体固相特性的反映, 它是衡量固相大小的指标。当土体结构中水分完全丧失时, 土密度被称为干密度; 当气相全部被液体充满时, 其为饱和土, 其密度称为饱和密度; 孔隙中既有水也有空气时, 称为非饱和土, 此时土的密度介于干密度和饱和密度之间。影响密度大小的主要因素除了颗粒的物质成分之外, 还与孔隙的大小有关, 即初始孔隙比  $e_0$  直接影响到土的密实度。黄土是在干湿交替的环境下风积而成, 因此其结构性和欠压密性是其重要特征, 在荷载作用下, 结构性土往往表现出超固结土特性。王帅<sup>[21]</sup>、陶虎<sup>[22]</sup>等研究了密度、粒度、湿度与构度之间的关系。

对于某一特定的某一区域性场地土类, 初始孔隙比  $e_0$  及干密度  $\rho_d$  一般是一定的, 场地土体初始结构性的不同主要表现在含水率的不同, 式(3)可以进一步简化为初始含水率的函数

$$m_u = f(\omega) \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 对于初始密度、粒度一定的结构性土, 式(3)实际上回归到初始含水率的单值函数, 考察式(4), 结合图 6 所给出的构度随含水率的变化关系曲线, 构度指标可以进一步表示为式(5)所示的经验关系式。

$$m_u = a_1 \omega^{-b_1} \quad (5)$$

式中:  $m_u$  为构度;  $\omega$  为土体的初始含水率,  $a_1$ 、 $b_1$  为与土类相关的材料参数。对于所研究的 3 种黄土, 表 2 给出了 3 种黄土的材料参数变化。这 2 个土类相关的材料参数  $a_1$ 、 $b_1$  一方面与黄土体的粒度、密度相关, 另一方面还与黄土体的孔隙比变化及孔隙的赋存状态密切相关。但是限于篇幅及研究目的, 不再进行初始孔隙比及干密度与土体结构性之间的相关性分析, 在表 2 中仅仅给出了所研究的 3 种黄土的相关材料参数。

表 2 3 种黄土构度结构性参数相关材料参数

黄土类别	$a_1$	$b_1$
黄土①	0.667 3	-1.684 1
黄土②	0.381 3	-1.792 2
黄土③	0.105 5	-2.048 1

### 3 单轴压缩条件下黄土试样破坏形态

土样破坏形态与土结构性变化发展及强度特性密切相关。在试验过程中, 试样在外部荷载作用过程中有明显的剪切带形成时, 土体结构性破坏实际上集中于土样的剪切带发展部位, 在试样其它部位,

结构性变化发展程度则相对减小;反之,如果试样在外部荷载作用时没有明显剪切带形成,那么整个土样结构性在加载过程中都有可能遭到了破坏,显然,破坏局部的结构性要比破坏整体结构性耗散更少的功。因此,用不同破坏方式土样试验结果来研究土的结构性及其力学效果存在一定误差。

对于土体试样的2种破坏形态,其结构性变化发展规律存在明显的差异。图7、图8给出了相应含水率条件下单轴压缩应力条件下的黄土试样破坏形态。通过图7、图8可以看出,在单轴压缩条件下黄土试样破坏方式多为脆性破坏,有明显剪切带出现,当含水率较高时,土样的破坏形态转变为塑性鼓胀(侧胀)直至整体的破坏。

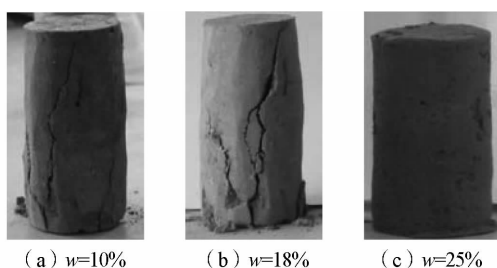


图7 原状黄土单轴压缩试样的破坏形态

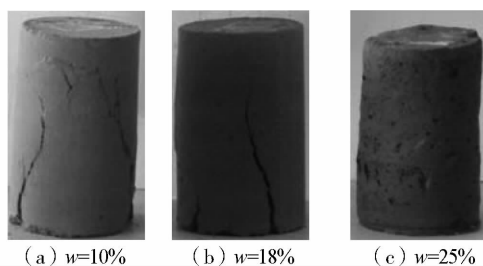


图8 重塑黄土单轴压缩试样的破坏形态

对于原状黄土试样,当初始含水率较低时,试验过程中呈现明显剪切带,其破坏形态为锥形,随着试样初始含水率的增大,剪切破坏带现象逐渐减弱,并伴随着黄土试样剪切面数量的减少,最后只形成一个较为完整的剪切面,当初始含水率较高时,剪切带逐渐消失,并带有侧向的鼓胀现象出现,试样呈现整体破坏形态。

对于重塑黄土试样,当含水率较低时,由于扰动成样原因,使得土样颗粒排列规整、均匀。整个土体结构稳定性较好,故其结构破坏面较明显,均为一个较为完整的剪切破坏面,当试样初始含水率较高时,重塑土样的结构受到水膜的移动及分子迁移的影响,其结构的稳定性减弱,可变性能增加,强度有所降低,结构的破坏面明显减弱,进而形成侧胀等破坏方式。总体而言,重塑土样的破坏方式较为简单,含

水率较低时为一剪切面,随着含水率的增大,剪切面消失、鼓胀形成。

从图7、图8可以看出,在单轴压缩条件下黄土的破坏方式有3类,即侧胀破坏、多缝锥形破坏面和有一明显剪切破坏面的剪切破坏。破坏方式与含水率有着密切联系,含水率是研究结构性土试样破坏方式的第一要务。含水率较大时不易产生剪切带,破坏形式表现为侧胀破坏;含水率较小时,易形成剪切带,破坏形式表现为倾斜破坏面,当原状黄土在较低含水率时,其结构由于受到各项异性的影响,结构产生多个虚弱面,最后在单轴限压缩条件下,形成多条的剪切带,破坏形式为多缝锥形破坏面。考虑到土结构性的变化规律,不难看出,结构性强的土,在外部荷载作用下,易形成明显的破坏轨迹;结构性弱的土,在外部荷载的作用下,不易形成明显的破坏痕迹,表现为侧胀破坏。

## 4 结 论

通过3种不同黄土的单轴压缩试验,研究了3种原状黄土、重塑黄土和饱和黄土的单轴压缩应力应变关系特性,基于综合结构势思想,在总结前人研究成果的基础上,分别对3种黄土总结了构度指标的变化规律,论述了构度指标作为土初始结构性定量描述的合理性。

1)在单轴压缩应力条件下,具有不同初始结构状态黄土应力应变关系均表现出一定的应变软化特性,属于典型脆性破坏材料,在强度特性上有明显的峰值强度现象。

2)构度与单轴压缩强度之间具有较好的相关性,随着构度的增大,3种黄土的单轴抗压强度值近似线性增大,3种黄土所表现出的规律具有一定的一致性,这也体现了构度定义的合理性和其描述土体初始结构性具有一定的优势。

3)3种黄土的构度随含水率的变化曲线规律比较相似,含水率对初始结构性的影响有2个不同的阶段,并提出了构度的具体数学描述。

4)在单轴压缩条件下,黄土的破坏方式有侧胀破坏、多缝锥形破坏面和有一明显剪切破坏面的剪切破坏,其破坏方式与含水率有着密切联系。

### 参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997:9-11.
- [2] 刘东升. 黄土的物质成份和结构[M]. 北京:科学技术出版社,1985.

- [3] 高国瑞. 黄土的显微结构分类和湿陷性[J]. 中国科学, 1980(12):1203-1207.
- [4] 高国瑞. 中国黄土的微结构[J]. 科学通报, 1980(20): 945-948.
- [5] 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 Z J. Structured mathematic model of soil-core of soil mechanics in 21st century [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1):95-97.
- [6] Terzaghi K. Theoretical soil mechanics [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc. 1943.
- [7] Soga K. Mechanical behavior and constitutive modeling of natural structured soils [D]. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, California, 1994.
- [8] 谢定义, 齐吉林. 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.  
Xie D Y, Qi J L. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6):651-656.
- [9] 邵生俊, 龙吉勇, 杨生, 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 S J, Long J Y, Yang S, et al. Analysis of structural deformation properties of collapsible loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10):1668-1672.
- [10] 邵生俊, 龙吉勇, 于清高, 等. 湿陷性黄土结构性参数本构模型[J]. 水利学报, 2006, 39(11):1315-1322.  
Shao S J, Long J Y, Yu Q G, et al. A constitutive model of collapsible loess with structural parameter [J]. Shuili Xuebao, 2006, 37(11):1315-1322.
- [11] 邵生俊, 罗爱忠, 于清高, 等. 加荷增湿作用下 Q3 粘黄土的结构损伤特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2077-2082  
Shao S J, Luo A Z, Yu Q G, et al. Structural damage properties of Q3 loess under triaxial loading and moistening [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2077-2082.
- [12] 骆亚生, 谢定义. 复杂应力条件下土的结构性本构关系 [J]. 四川大学学报:工学版, 2005, 37(5):14-18.  
Luo Y S, Xie D Y, Structural constitutive relation of soil under complex stress conditions [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2005, 37(5):14-18.
- [13] 陈存礼, 高鹏, 胡再强. 黄土的增湿变形记其与结构性的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7):1352-1360.  
Chen C L, Gao P, Hu Z Q. Moistening deformation characteristic of loess and its relation to structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7):1352-1360.
- [14] 冯志炎. 非饱和黄土的结构性量化参数与结构性本构关系研究[D]. 西安:西安理工大学, 2008.
- [15] 邓国华. 真三轴条件下结构性黄土的强度变形本构关系研究[D]. 西安:西安理工大学, 2009.
- [16] 邓国华, 邵生俊, 余芳涛. 结构性黄土的修正剑桥模型 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5):834-841.  
Deng G H, Shao S J, She F T, Modified Cam-clay model of structured loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5):834-841.
- [17] 罗爱忠, 邵生俊. 结构性黄土损伤演化规律试验研究 [J]. 太原理工大学学报, 2011, 42(1):79-82.  
Luo A Z, Shao S J. Study on structural damage of structural loess [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2011, 42(1):79-82.
- [18] 罗爱忠, 邵生俊, 许萍. 湿载条件下黄土结构性损伤演化特性研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2012, 40(3): 200-204.  
Luo A Z, Shao S J, Xu P. Research on structural damage development of loess under stress and moisture [J]. Journal of Northwest Science-Technology University of Agriculture and Forest, 2012, 40(3):200-204.
- [19] 罗爱忠, 邵生俊. 湿载耦合作用下黄土结构性损伤演化及本构关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 841-847.  
Luo A Z, Shao S J. Structural damage evolution and constitutive relationship of loess under coupling of stress and moisture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4):841-847.
- [20] 邵生俊, 郑文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1):15-19.  
Shao S J, Zheng W, Wang Z H, et al, Structural index of loess and its testing method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1):15-19.
- [21] 王帅. 黄土构度指标的力学特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2010.
- [22] 陶虎. 黄土的构度及其描述结构性演变的本构模型研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2012.