

文章编号:1000-582X(2011)02-120-05

## 非饱和 $Q_2$ 原状黄土工程特性试验

钟祖良<sup>a,b</sup>, 张 建<sup>a</sup>, 刘新荣<sup>a,b</sup>, 方金炳<sup>a</sup>, 周 杨<sup>a</sup>

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘 要:** 为了研究非饱和  $Q_2$  原状黄土的破坏形式、变形、强度和屈服特性, 采用 SJ-1A 型三轴剪力仪改造的非饱和土三轴剪切试验测试系统进行了 5 组非饱和  $Q_2$  原状黄土的三轴固结排水剪切试验。试验结果表明: 非饱和  $Q_2$  原状黄土在三轴条件下, 呈剪切破坏, 破裂角一般在  $55^\circ \sim 61^\circ$ ; 非饱和  $Q_2$  原状黄土在低围压下呈剪胀性, 在高围压下呈剪缩性; 随着围压增大, 应力应变曲线由软化向硬化发展。此外, 通过  $\epsilon_v-q/p$  关系曲线可以较好的确定非饱和  $Q_2$  原状黄土在各围压下的屈服应力 ( $p_y, q_y$ ), 且研究发现随着围压的增加, 屈服偏应力  $q_y$  与屈服球应力  $p_y$  呈对数关系。

**关键词:** 非饱和;  $Q_2$  原状黄土; 屈服应力; 压缩试验; 力学特性

**中图分类号:** TU411.3

**文献标志码:** A

## Test on engineering properties of unsaturated undisturbed loess $Q_2$

ZHONG Zu-liang<sup>a,b</sup>, ZHANG Jian<sup>a</sup>, LIU Xinrong<sup>a,b</sup>, FANG Jinbing<sup>a</sup>, ZHOU Yang<sup>a</sup>

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** A series of triaxial shear tests with controlled constant confining pressure are conducted to study the failure modes, effects of deformation, strength and yield properties of unsaturated undisturbed loess  $Q_2$ , with improved SJ-1A triaxial shear equipment. The test results show that the failure mode of unsaturated undisturbed loess  $Q_2$  is shear failure with the rupture angle between 55 and 61 degree; Shear dilatancy is shown under low confining pressure, and shear shrinkage is shown under high confining pressure; The stress-strain curves of undisturbed loess  $Q_2$  will change from perfectly plastic to weak strain softening as the confining pressure increases; A effective method is suggested to identify the field stress of undisturbed loess  $Q_2$  under triaxial shear condition with the curves of  $-q/p$ ; when the confining pressure increases, the deviatoric yield stress  $q_y$  has a logarithmic relationship with net mean yield stress  $p_y$ .

**Key words:** unsaturated; undisturbed loess  $Q_2$ ; yield stress; compression testing; mechanical properties

黄土古称“黄壤”, 本源于土地之色, 是一种第四纪沉积物, 有一系列内部物质成分和外部形态的特征, 不同于同期的其他沉积物, 在地理分布上也有一定的规律性。我国黄土的分布较广, 面积为 60 多万  $km^2$ , 占国土面积的 6.%, 主要集中在黄河流域。随着我国西部大开发战略的实施, 西部地区的基础设

施建设、生态环境改善和国防建设中经常遇到各类黄土工程, 如《中长期铁路网规划》中的客运专线郑西线设计了多条黄土隧道、1999 年施工的甘肃省新庄岭黄土公路隧道<sup>[1]</sup>; 2003 年修建的青岛至银川国道主干线山西省汾阳~离石高速公路离石隧道以及 2005 年修建的王家会黄土连拱隧道等。要做好黄

收稿日期: 2010-10-31

基金项目: 重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTC, 2009BB6350); 国家自然科学基金创新群体基金(50621403)

作者简介: 钟祖良(1980-), 男, 重庆大学博士, 主要从事隧道工程及地下工程研究, (E-mail) haiou983@126.com.

土工程的建设,这就需要对原状黄土工程特性进行深入研究。

统计表明<sup>[2]</sup>,这些黄土工程主要穿越  $Q_2$  黄土层为主。目前国内外学者对黄土进行了一些研究,Xing, Yi-Chuan, Li, Yong-Le, Han, B, Sun Ping, Ying Jie, Bowders, Nouaouria 等人<sup>[3-7,10-13]</sup> 对非饱和黄土进行了试验研究,获得了非饱和黄土的破坏准则及剪切、拉伸等力学特性。Wang, D<sup>[9]</sup> 对冻融黄土进行了研究,获得了在冰冻环境下黄土的变形特性。Jie Ying<sup>[10]</sup> 等人对 K-G 模型进行了研究,获得了非饱和黄土的 K-G 本构模型的相应参数。夏旺民等<sup>[14]</sup> 通过对宝鸡火车站地下商场工程所在场地的室内单轴和三轴流变试验,建立了高湿度  $Q_2$  黄土的非线性流变本构模型,并确定了相应的模型参数。谢星等<sup>[15]</sup> 通过对  $Q_2$  黄土的单轴压缩和常规三轴试验研究,用文献[2]建议的函数对  $Q_2$  黄土应力-应变关系进行拟合,取得较好的效果。陈正汉等<sup>[16]</sup> 用非饱和土的观点和方法探讨重塑黄土的变形、强度、屈服、水量变化特性,取得了大量可靠的试验数据,并建立了非线性本构关系。方祥位等<sup>[17]</sup> 通过研究吸力对非饱和原状  $Q_2$  黄土性质的影响,提出了不同吸力条件下屈服偏应力和屈服净平均应力的关系。

由于大部分黄土工程穿越的第四系中更新统离石组( $Q_2$ )黄土一般位于水位线之上,含水率低,结构性强,在黄土工程建设中用上述方法获取力学参数比较复杂,或用重塑黄土力学参数用于工程设计偏差较大。文中以王家会黄土连拱隧道隧址处  $Q_2$  黄土为研究对象,以三轴固结排水剪切试验为手段,研究非饱和  $Q_2$  原状黄土工程力学特性,为  $Q_2$  黄土工程设计及其本构关系研究等提供参考。

## 1 $Q_2$ 原状黄土试验方法

### 1.1 试样的选取与制作

为了研究非饱和  $Q_2$  原状黄土工程特性,在山西省离石至军渡高速公路王家会黄土连拱隧道内,埋深 60 多 m 处的上台阶中部取得土样。该处土体为第四系中更新统离石组( $Q_{21}$ )浅棕黄色亚粘土夹薄层亚砂土,柱状节理发育,夹古土壤层及钙质结核层,呈巨块状整体结构,具有一定的强度,略显脆性。该处围岩稳定性较好,无地下水,围岩级别为 IV 级。为了尽量的减少对土样的扰动,试样在现场挖成 200 mm×200 mm×200 mm 的立方体,标明上下方向,并用塑料纸和胶带包好,装入铁箱,并在铁箱的盖子处用透明胶布密封,如图 1 所示,并采取减震措

施运回实验室。

土样取回后,剥去塑料纸和胶带,检查土样结构,看是否扰动或土样质量是否符合试验要求,若土样保持完好,按照土工试验规程要求利用专用的削土器将土样削制成高度为 80 mm,直径为 39.1 mm 的圆柱形试样。为减小黄土干密度差异带来的影响,控制试样干密度差值不大于 0.03 g/cm<sup>3</sup>,同一组试样控制含水量差值不大于 2%。在室内制样时可以看出黄土内含极小的细砂、石英颗粒等,部分存在钙质结核层,试样土样见图 2 所示。



图 1  $Q_2$  原状黄土土样搬运



图 2  $Q_2$  原状黄土试件

### 1.2 物理性质试验

对王家会黄土连拱隧道隧址处取得  $Q_2$  原状黄土进行物理性质试验,主要包括含水率试验、密度试验、土粒比重试验和界限含水率试验(液限和塑限),每项试验进行了 3 组,取 3 次测值的平均值作为最终值,得到  $Q_2$  原状黄土的物理参数如表 1 所示。

表 1  $Q_2$  黄土土样的物理性质

天然含水率 $W/\%$	天然密度 $\sigma/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	相对密度 $G_s$	液限 $\omega_L$	塑限 $\omega_p$	孔隙率 $n$
16.28	1760	2.422	25.1	16.7	0.375

### 1.3 $Q_2$ 原状黄土的力学性质试验

#### 1) 试验仪器

试验仪器采用经过重庆后勤工程学院陈正汉教

授改进后的南京水利电力仪表厂的 SJ-1A 三轴剪力仪,由电动马达和变速箱进行传动的螺旋千斤顶,通过仪器台架上的固定横梁的反作用,将荷载直接加到贯通压力室的顶盖活塞杆上,最后施加于试样。体变的量测采用自制的由百分表和针管所构成的体变管,压力的量测使用量力钢环和压力传感器测定,量程和灵敏度同时满足试验要求。三轴试验系统见图 3 所示。

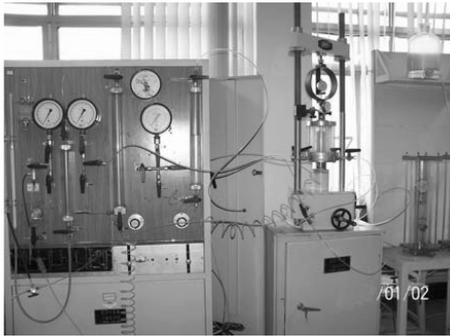


图 3 非饱和土三轴试验仪

## 2) 试验方案

为了获得非饱和  $Q_2$  原状黄土在不同围压条件下的应力-应变关系曲线,峰值强度与残余强度随围压的变化规律,以及  $Q_2$  原状黄土屈服点随围压的变化规律等,非饱和  $Q_2$  原状黄土力学室内试验方案设计如下:在保持围压  $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$  的情况下,试件在三轴仪上固结 24 h 后,进行排水剪切试验,剪切速率取 0.033 mm/min。围压分别取 50、100、200、250、350 kPa。试验时记录每次的量力环百分表读数,体变管读数和轴向变形百分表读数。剪切以轴向应变达到 15%,或试件完全破坏时关机,以便获得峰值强度和残余强度。

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 试件破坏过程及破坏模式

试验结果表明:在各围压条件下进行三轴剪切试验,从试验加载直至试件破坏,试件一般经历如下阶段:1)压密阶段。由于原状黄土试件内部具有一定的孔隙,在轴向荷载作用下颗粒与颗粒之间的孔隙被压小,土体被压密,试件体积减小,在应力应变曲线上表现为初期阶段应力-应变曲线向上凹;2)压缩阶段。试件被压密后,在外荷载的作用下,土体颗粒被压缩,试件体积减小,应力应变曲线呈直线,为弹性变形,而后为曲线,为非线性变形;3)微裂缝开展阶段。当轴向应变达到一定时,试件应力达到屈服,从

压力室外可以看到试件有微裂纹出现;4)剪切破坏阶段。随着轴向应变的进一步增大,裂纹增多和增大,部分微裂纹相继贯通,试件的剪切破坏面逐渐形成,最后试件发生破坏。从各组试件破坏结果来看,见图 4 所示, $Q_2$  原状黄土破裂角一般在  $55^\circ \sim 61^\circ$ 。

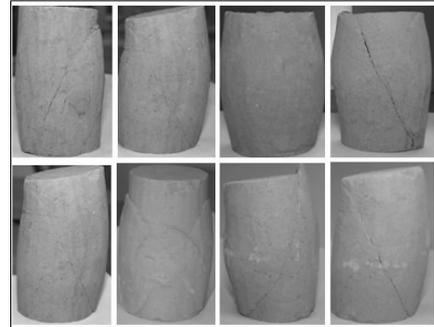


图 4 各围压下破坏后的试件

### 2.2 应力应变关系曲线

通过上述  $Q_2$  原状黄土的室内力学性质试验,通过对数据整理,可以获得体应变  $\epsilon_v$  与偏应变  $\epsilon_s$  的关系曲线和偏应力  $q$  与偏应变  $\epsilon_s$  的关系曲线,如图 5、6 所示。

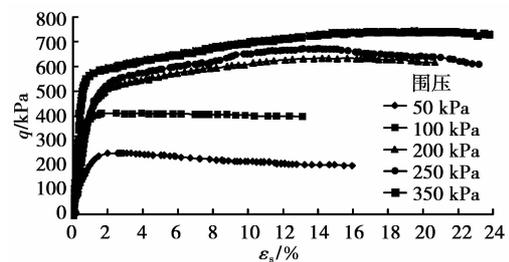


图 5 不同围压下偏应力  $q$  与偏应变  $\epsilon_s$  的关系图

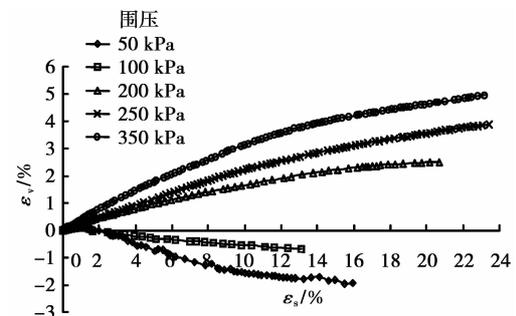


图 6 不同围压时体应变  $\epsilon_v$  与偏应变  $\epsilon_s$  的关系图

在不同的围压下,非饱和  $Q_2$  原状黄土的变形规律如下:

1)在围压较低时(围压为 50~100 kPa),体缩应变增大到一定程度不再增大,反而转向减小即体胀;

随轴向应变的继续增大,体胀进一步增大,但偏应力增加缓慢。

2)在围压较高时,黄土的体积变形一直保持为压缩状态,随着偏应变的增大,体积变形也随着增大。当体积变形增大到一定值时,变化很小,此时,偏应力出现峰值,随着围压的增加,偏应力峰值也随着增大。

3)从应力-应变关系图中可以看出,随着围压的增大,应力-应变曲线由软化向硬化发展。

4)此外,从应力应变关系曲线还可以看出,由于受原状黄土结构性的影响,应力应变曲线有一定的交叉现象。

### 2.3 强度特性

根据 5 组非饱和  $Q_2$  原状黄土三轴剪切试验可以得到  $Q_2$  原状黄土在不同围压下的峰值应力和残余应力如表 2 所示。根据表 2 数据,用 Rockdata 软件可画出  $Q_2$  原状黄土的峰值强度和残余强度包络线如图 7、8 所示,计算得出其特征参数分别为:

$$c = 79.834 \text{ kPa}, \varphi = 25.546^\circ;$$

$$c_r = 73.501 \text{ kPa}, \varphi_r = 24.627^\circ.$$

表 2  $Q_2$  原状黄土在不同围压条件下的峰值应力和残余应力值 kPa

围压值	峰值强度	残余强度
50	298.589	247.226
100	510.889	495.238
200	833.524	815.082
250	993.602	937.831
350	1020.420	957.549

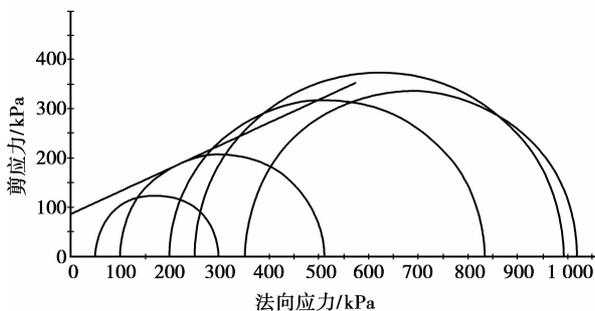


图 7 峰值强度莫尔圆和强度包络线图

考虑到非饱和  $Q_2$  原状黄土在三轴应力条件下,其屈服应力不仅受到偏应力的影响,还受到球应力的影响。因此利用  $\varepsilon_v - q/p$  关系曲线,采用 Joes et al. 法来确定屈服点  $(p_y, q_y)$ ,如图 9 所示,各围压下

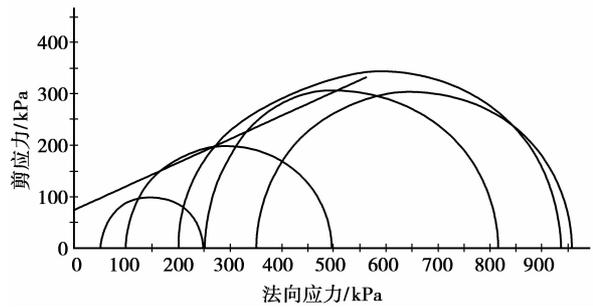


图 8 残余强度莫尔圆和强度包络线图

屈服应力见表 3。此外,在  $q-p$  平面上绘出各围压下的屈服应力  $(p_y, q_y)$ ,得到在各围压下屈服应力的关系曲线,见图 10。

表 3 黄土的屈服应力

围压/kPa	$q/p$	$q_y/kPa$	$P_y/kPa$
50	1.797	224.068	124.689
100	1.671	377.020	225.687
200	1.339	483.608	361.263
250	1.236	519.113	420.002
350	1.046	562.120	537.363

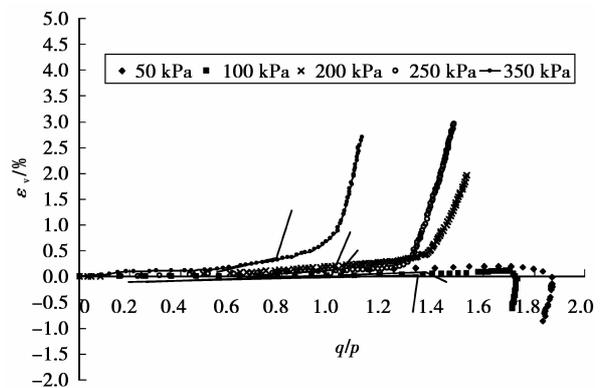


图 9  $q/p \sim \varepsilon_v$  的关系曲线

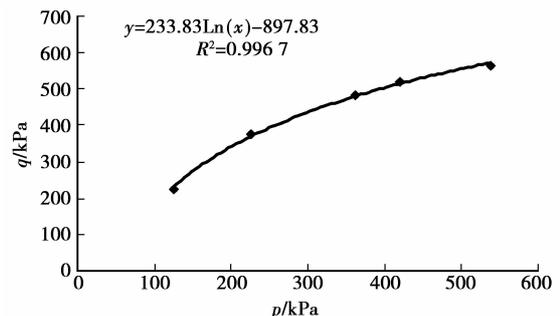


图 10 屈服点在  $p-q$  平面上的分布

### 3 结 论

1) 在各围压条件下,非饱和  $Q_2$  原状黄土试件从加载直至破坏,一般经历压密阶段、压缩阶段、裂缝开展阶段、剪切破坏阶段,试件的破裂角一般在  $55^\circ \sim 61^\circ$ 。

2) 非饱和  $Q_2$  原状黄土在低围压下具有剪胀特性,在高围压下呈剪缩特性。随着围压的增加,应力-应变曲线从软化性向硬化性发展。受原状黄土结构性的影响,应力应变曲线有一定的交叉现象。

3) 利用  $\epsilon_v-q/p$  关系曲线可以较好的确定非饱和  $Q_2$  原状黄土在各围压下的屈服应力 ( $p_y, q_y$ )。随着围压的增加,屈服偏应力  $q_y$  与屈服球应力  $p_y$  呈对数关系。

#### 参考文献:

- [1] 来弘鹏, 杨晓华, 林永贵. 黄土公路隧道病害分析与处治措施建议[J]. 公路, 2006(6): 197-202.  
LAI HONG-PENG, YANG XIAO-HUA, LIN YONG-GUI. Disease analysis for highway tunnel in loess and treatment countermeasures [J]. Highway, 2006, (6): 197-202.
- [2] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996.
- [3] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 原状  $Q_2$  黄土三轴剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 383-389.  
FANG XIANG-WEI, CHEN ZHENG-HAN, SHEN CHUN-NI, et al. Triaxial shear properties of undisturbed loess  $Q_2$  [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 383-389.
- [4] XING Y C, XIE D Y, LI Z. Failure criterion for unsaturated loess [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21 (2): 167-172.
- [5] LI Y L, ZHANG H F, SHI X G. Experimental study of triaxial test of undisturbed unsaturated loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2859-2863.
- [6] FRANCISCA, FRANCO M. Evaluating the constrained modulus and collapsibility of loess from standard penetration test [J]. International Journal of Geomechanics, 2007, 7 (4): 307-310.
- [7] HAN B. Study on stress-strain relationship of loess [J]. Key Engineering Materials, 2004, 276 (1): 241-246.
- [8] SUN P, PENG J B, CHEN, L W. Weak tensile characteristics of loess in China - An important reason for ground fissures [J]. Engineering Geology, 2009, 108(1): 153-159.
- [9] WANG D. Analyses of behavior of stress-strain of frozen Lanzhou loess subjected to  $K_0$  consolidation cold regions [J]. Science and Technology, 2004, 40(1-2) 19-29.
- [10] YING J, LIAO J, YIN H. Non-linear K-G constitutive model for unsaturated loess [J]. Geotechnical Special Publication, 2006, (147): 2004-2014.
- [11] YING J, LIAO H J, YIN J H. An experimental study on the shear strength of undisturbed loess [J]. Geotechnical Special Publication, 2006, (148): 127-135.
- [12] BOWDERS, JOHN J, LOEHR J, et al. Shear behavior of compacted silty loess [C]. Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000-Advances in Unsaturated Geotechnics, GSP 99, 2000, (287): 235-246.
- [13] NOUAOURIA, M S, GUENFOUD M, LAFIFI B. Engineering properties of loess in Algeria [J]. Engineering Geology, 2008, 99, (1-2): 85-90.
- [14] 夏旺民, 郭增玉.  $Q_1$  黄土的弹塑性损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1423-1426.  
XIA WANG-MIN, GUO ZENG-YU. Elastoplastic damage model of  $Q_1$  loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1423-1426.
- [15] 谢星, 赵法锁, 王艳婷, 等. 结构性  $Q_2$ 、 $Q_3$  黄土的力学特性对比研究[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(4): 451-455, 468.  
XIE XING, ZHAO FA-SUO, WANG YAN-TING, et al. Comparative study on mechanical features of structural  $Q_2$  and  $Q_3$  loess [J]. Journal of Xi' An University of Science and Technology, 2006, 26(4): 451-455, 468.
- [16] 陈正汉, 周海清, FREDLUND D G. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 603-608.  
CHEN ZHENG-HAN, ZHOU HAI-QING, FREDLUND D G. Nonlinear model for unsaturated soils and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 603-608.
- [17] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 原状  $Q_2$  黄土三轴剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 383-389.  
FANG XIANG-WEI, CHEN ZHENG-HAN, SHEN CHUN-NI, et al. Triaxial shear properties of undisturbed loess  $Q_2$  [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 383-389.

(编辑 陈移峰)