文章编号: 1006-6616 (2015) 03-0386-07

陕西延安 Q, 原状黄土抗拉强度试验研究

孙纬宇^{1,2},梁庆国^{1,2},严松宏^{1,2},欧尔峰^{1,2},邵森林^{1,2}

(1. 兰州交通大学甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室,兰州 730070;

2. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070)

摘 要:对陕西延安新宝塔山隧道 Q_2 原状黄土进行了不同加载速率的无侧限抗压 与贯入抗拉试验,研究了 Q_2 原状黄土抗压与抗拉强度的影响因素。结果表明:加 载速率对宝塔山 Q_2 原状黄土抗压和抗拉强度影响较大,抗压强度与抗拉强度随加 载速率增大而增大;高径比对抗拉强度也有较大影响,试验时当高径比控制在 1.0 左右时,高径比对宝塔山 Q_2 原状黄土的抗拉强度影响相对较小,因此采用轴向压 裂法测量黄土的抗拉强度时,高径比宜控制在 1.0;在试验加载速率范围内,加载 速率对宝塔山 Q_2 原状黄土的压拉比影响不大,其压拉比在 9.88~13.68 范围内 变化。

关键词: Q₂ 原状黄土; 抗拉强度; 加载速率; 压拉强度比 中图分类号: TU 432 **文献标识码:** A

0 引言

由于土工建筑物的承拉能力较低,其抗拉特性常常被人们忽视。然而许多土工建筑物的 破坏与土的抗拉特性有关,如土坡滑动前坡顶几乎均先产生拉裂缝,坍塌、泻流等重力侵蚀 发生前土体表面亦先产生拉裂缝,可见土的抗拉特性在土工建筑物稳定性分析中非常重 要^[1]。黄土抗拉强度的测试实验有多种,主要包括弯曲梁试验、棱镜劈裂试验、立方对角 劈裂试验、轴向拉伸试验、煤球试验、立方侧向劈裂试验和缸劈裂试验等^[2]。在国内,骆 亚生等^[3]研究了不同含水量和不同干密度下黄土的抗拉强度;刑义川等^[4]研究了含水量、 干密度、饱和度及基质吸力与黄土抗拉强度的关系;党进谦等^[5]研究了非饱和土的抗拉强 度;孙萍等^[6]基于单轴拉伸实验研究了黄土的抗拉强度及其破裂过程的数值模拟方法;李 宝雄等^[7]对兰州马兰黄土的物理力学特性进行了研究。沈忠言等^[8]通过冻结黄土抗拉强度 的试验研究得出了拉伸的应力-应变过程,视荷载作用的快慢大致可分为粘弹—塑性、粘— 弹性和脆性破坏3类;同时对冻结黄土的抗拉、抗压强度进行分析比较后指出,其比值为 0.44~0.63。

以往有关黄土的研究主要集中在湿陷性、水敏性和强度特性上,而对原状黄土拉压比特

收稿日期: 2015-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目"黄土抗拉强度和各向异性研究"(41262010);长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1139);兰州交通大学"青蓝"人才工程项目(QL-08-19A);甘肃省基础研究创新群体资助项目(145RJIA332) 作者简介:孙纬宇(1988-),男,硕士研究生,主要从事黄土隧道工程研究。E-mail:448221362@qq.com 性及对原状黄土拉压强度影响因素的研究较少。本文对陕西宝塔山 Q₂ 原状黄土进行室内三 轴压缩试验、无侧限抗压和抗拉试验,研究加载速率对无侧限抗压与抗拉强度的影响、高径 比对原状黄土抗拉强度的影响以及原状黄土的压拉比特性。

1 试验材料及试验方法

1.1 土样来源及其物理特性

土样取自陕西延安新宝塔山隧道 DK502 +655 处、埋深约为 100 m 的上台阶中部,为了 尽量减少对土样的扰动,试样在现场制成直径 100 mm、高 150 mm 的圆柱体,标明上下方 向,用塑料纸和胶带包好,装入塑料桶,运回实验室进行试验。样品的基本物理性质见 表1。

表 1 试验用 Q₂ 黄土的物性指标

Table 1 Physical parameters of Q₂ loess

19.64 2.01 2.638 29.2 13.25 0.597 0.09	w/%	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$d_{\rm s}$	$w_{\rm L}/\%$	$w_{ m p}/\%$	e	α_v/MPa^{-1}
	19.64	2.01	2.638	29. 2	13.25	0. 597	0.09

注: w—含水量; ρ —湿密度; d_s —比重; w_L —液限; w_p —塑限; e—孔隙比; α_v —压缩系数

1.2 试验方法及试样条件

采用无侧限抗压及轴向压裂试验研究黄土的抗压与抗拉特性,其中无侧限压缩试验严格 按照铁路工程土工试验规程^[9]进行,轴向压裂试验按照文献 [2] 中所述进行。无侧限抗压 的试样高度 12.50 cm,直径 6.18 cm。试验模型与实验装置见图 1、图 2,其中作为劈裂用 的刚性小圆柱高度为 2 cm、直径 1.545 cm,采用应变控制式三轴仪施加轴向荷载,以测定 黄土抗拉强度。抗拉强度计算公式^[2]:

$$\sigma_{t} = \frac{10P}{\pi (KbH - a^{2})} \tag{1}$$

式中: σ_1 ——拉应力, kPa; P——荷载, N; K——常数, 取决于试样穿孔大小和土壤类型, 本试验取1; b——试样半径, cm; H——试样高度, cm; a——圆盘半径, cm。



图1 抗拉强度测定模型

Fig. 1 Model of tensile strength measurement



图 2 试验装置 Fig. 2 The test apparatus

2 试验结果与分析

2.1 不同速率下的无侧限抗压和抗拉特性

试验控制加载速度分别为 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 和 1.50 mm/min, 轴向压裂的拉应 力-贯入深度曲线与抗压抗拉强度随加载速率的变化关系见图 3、图 4。



图3 拉应力-贯入深度曲线







从图 3 可以看出,在轴向压裂试样破坏之前,贯入深度与拉应力有较好的线性关系,这 与 Q_2 原状黄土的形成历史有关。由于其形成年代久远,且有较大的埋深,所以 Q_2 原状黄土 具有很好的结构性。当其抗压和抗拉均达到极限强度时,试样突然破裂,且都呈脆性破坏, 破坏形态多为两瓣或三瓣劈裂。破裂为两瓣时有较平整的破裂面;当破裂为三瓣时,破裂面 有的呈螺旋状;无论破裂为两瓣还是三瓣,加载柱下均形成了楔形体。抗压破坏时破裂面规 律性不是很明显,破裂面倾角基本都大于 45° + $\phi/2$ (ϕ 为内摩擦角),无侧限抗压和抗拉破 坏形态见图 5。



(a) 抗压破坏形态



图5 抗压与抗拉破坏形态



从抗压与抗拉强度随加载速率关系曲线图(见图4)可以看出,抗压强度明显高于抗拉强度,无论是抗压还是抗拉,在试验加载速率范围内其强度均随加载速率的增大而增大,这与沈忠言等^[8]提出的冻结黄土抗拉强度随加载速度的变化规律和吴绵拔^[10]提出的加载速率 对岩石抗压和抗拉强度的影响规律相一致。

2.2 高径比对黄土抗拉强度的影响

岩石力学中已经有大量有关尺寸效应影响岩石强度的试验研究^[11~12],而关于尺寸效应 对黄土抗拉强度的影响则研究较少。本试验控制试样的高径比分别为 0.6, 0.8, 1.0 和 1.2,试样直径为 6.18 cm,故试样高度分别为 3.707, 4.944, 6.180 和 7.416 cm;试验加载 速度控制为 1.25 mm/min。试验前后的试样如图 6 所示。从图 6 可以看出,不同高径比下试 样的破坏形态与图 5 所示试样的破坏形态基本一致。





从不同高径比下拉应力与贯入深度关系(见图7)可以看出,试样高度对应力达到峰值前的变形特性没有显著影响,均能保持拉应力与贯入深度呈线性变化,而在拉应力达到峰值以后,试样突然断裂,试样再不能够承载。图8显示的是高径比与抗拉强度关系,从图8可以看出,Q2原状黄土的抗拉强度随试样高径比的增大而降低,高径比为0.6时抗拉强度最大,高径比为1.2时抗拉强度最低,也就是说,随着试样高度的增加,其抗拉强度会减小。



以高径比为 1.0 作为参考点, 用 $\delta = (\sigma_{th} - \sigma_{t6.18}) \times 100 / \sigma_{t6.18}^{[13]}$ 表示抗拉强度的降低幅度 (σ_{th}) 为不同高度时的抗拉强度, $\sigma_{t6.18}$ 为高度 6.18 cm 时的抗拉强度), 其关系曲线如图 9 所示。

从图 9 可以看出,高径比从 0.6 变为 1.0 时,抗拉强度值降低了 72.02%;而当高径比 从 0.8 变为 1.0 时,抗拉强度值降低了 22.2%;高径比自 1.0 升至 1.2 时,抗拉强度降低了 4.97%。由此可以得出,当高径比在 1.0 至 1.2 时,抗拉强度值的变化幅度不大。因此,用 轴向压裂法测黄土抗拉强度值时,试样高径比宜取为 1.0。



图9 不同高径比抗拉强度降低幅度值

Fig. 9 Reduction of the tensile strength at different height-diameter ratios

2.3 Q, 原状黄土的拉压比

在混凝土的力学特性和岩石力学的研究中,均进行过抗压强度和抗拉强度比的研究。由于岩土体材料的非均质性和不连续性,对其抗压强度与抗拉强度比的研究较少。而 Q₂ 原状黄土具有较强的结构强度,因此对其进行抗拉抗压比的研究是必要的。本试验对 Q₂ 原状黄土抗压与抗拉比的研究分别采用了加载速率 1.25 mm/min 和变加载速率二种方法。

图 10 给出了加载速率 1.25 mm/min 时抗拉强度与抗压强度之间的关系。从图中可以看出, Q₂ 原状黄土抗压强度与抗拉强度之间存在较好的线性相关性。在加载速度为 1.25 mm/min 时得出的 Q₂ 原状黄土抗压强度与抗拉强度之比的变化范围为 11.35 ~ 13.69 (经 5 组抗拉强度和 5 组抗压强度试验后得出的结论), 抗压强度和抗拉强度之间的关系可用式 $\sigma_e = 12.565\sigma_i$ 表示,其线性相关系数为 0.8963,具有很好的线性相关性。

图 11 显示的是不同加载速率下抗压抗拉强度比值与加载速率之间的关系。从图 11 可得,变加载率时 Q₂ 原状黄土的抗压强度与抗拉强度之比的范围为 9.88~13.68,其中加载 速率为 1.0 mm/min 时压拉强度比最小,为 9.88,其余试验加载速率下压拉强度比随加载速 率的变化不大。由此可得加载速率对 Q₂ 原状黄土抗压强度与抗拉强度之比影响不大,抗压强度与抗拉强度之比的变化范围在 9.88~13.68 之间。





Fig. 10 Correlation of unconfined compressive strength with tensile strength at 1.25 mm/min



Fig. 11 Relation between ratio of compressive strength to tensile strength ration and loading rates

3 结论

宝塔山 Q₂ 原状黄土的无侧限抗压强度和抗拉强度随加载速度的增大而增大,加载速度 对其无侧限抗压强度和抗拉强度均有较大的影响。

高径比对宝塔山 Q₂ 原状黄土抗拉强度有着显著的影响,当高径比在 1.0 附近时,抗拉 强度值的变化幅度不大,因此,用轴向压裂法测黄土抗拉强度值时,试样高径比宜取 为 1.0。

宝塔山 Q₂ 原状黄土的压拉强度比在 9.88~13.68 之间,加载速度对压拉强度比影响较小。

由于取样、试验和土体本身的差异等原因,这些因素对试验结果会有较大的影响,因 此,在进行原状黄土试验中应予以注意。

参考文献

- [1] 党进谦,李靖,张伯平.黄土单轴拉裂特性的研究 [J].水力发电学报,2001,7 (4):44~47.
 DANG Jin-qian, LI Jing, ZHANG Bo-ping. Uniaxial tension crack characteristics of loess [J]. Journal of Engineering, 2001,7 (4):44~47.
- [2] Fang H Y, Daniels J. Introductory geotechnical engineering: An environmental perspective [M]. London and New York: Taylor & Francis, 2006.
- [3] 骆亚生,邢义川.黄土的抗拉强度 [J].陕西水利发电,1998,14 (4):6~10.
 LUO Ya-sheng, XING Yi-chuan. Tensile strength characteristics of loess [J]. Journal of Shaanxi Water Power, 1998,14 (4):6~10.
- [4] 邢义川,骆亚生,李振.黄土的断裂破坏强度 [J].水力发电学报,1999,(4):36~44.
 XING Yi-chuan, LUO Ya-sheng, LI Zhen. The rupture failure strength of loess [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999, (4):36~44.
- [5] 党进谦,郝月清,李靖. 非饱和黄土抗拉强度的研究 [J]. 河海大学学报, 2001, 29 (6): 106~108.
 DANG Jin-qian, HAO Yue-qing, LI Jing. Study on tensile strength of unsaturated loess [J]. Journal of Hehai University, 2001, 29 (6): 106~108.
- [6] 孙萍,彭建兵,殷跃平,等.黄土拉伸试验及其破裂过程仿真分析 [J]. 岩土力学,2010,31 (2):633~637.
 SUN Ping, PENG Jian-bing, YIN Yue-ping, et al. Tensile test and simulation analysis of fracture process of loess [J].
 Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (2):633~637.
- [7] 李保雄,牛永红,苗天德.兰州马兰黄土的物理力学特性 [J].岩土力学,2007,28 (6):1077~1896.
 LI Bao-xiong, NIU Yong-hong, MIAO Tian-de. Physico-mechanical characteristics of Malan loess in Lanzhou region [J].
 Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (6): 1077~1082.
- [8] 沈忠言,彭万巍,刘永智. 冻结黄土抗拉强度的试验研究 [J]. 冰川冻土, 1995, 17 (4): 315~321.
 SHEN Zhong-yan, PENG Wan-wei, LIU Yong-zhi. Tensile strength of frozen saturated loess [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17 (4): 315~321.
- [9] 铁道部第一勘察设计院. 铁路工程土工试验规程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.

First Survey and Design Institute. Test methods of soils for railway engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.

- [10] 吴绵拔. 加载速率对岩石抗压和抗拉强度的影响 [J]. 岩土工程学报, 1982, 4 (2): 97~106.
 WU Mian-ba. The effect of loading rate on the compressive and tensile strength of rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4 (2): 97~106.
- [11] 杨圣奇,苏承东,徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究 [J]. 工程力学,2005,22 (4):112~118.
 YANG Sheng-qi, SU Cheng-dong, XU Wei-ya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material [J].
 Engineering Mechanics, 2005, 22 (4):112~118.
- [12] 张明,卢裕杰,介玉新,等.不同加载条件下岩石强度尺寸效应的数值模拟[J].水力发电学报,2011,30
 (4):147~153.

ZHANG Ming, LU Yu-jie, JIE Yu-xin, et al. Numerical simulation of strength size effect of rocks under different loading [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30 (4): 147 ~153.

[13] 梁庆国,赵磊,安亚芳,等. 兰州 Q₄ 黄土各向异性的初步研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (1): 17~23.
 LIANG Qing-guo, ZHAO Lei, AN Ya-fang, et al. Preliminary study of anisotropy of Q₄ loess in Lanzhou [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (1): 17~23.

EXPERIMENTAL STUDY ON TENSILE STRENGTH OF UNDISTUBED Q_2 LOESS FROM YANAN SHANNXI, CHINA

SUN Wei-yu^{1,2}, Liang Qing-guo^{1,2}, YAN Song-hong^{1,2}, OU Er-feng^{1,2}, SHAO Sen-lin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The unconfined compressive and penetration tensile tests were conducted with different loading rates on undisturbed Q_2 loess from Baotashan Tunnel in Yan'an, Shanxi, and the impacts on the unconfined compressive strength and tensile strength were studied. It shows that the loading rates have a great impact on the compressive strength and tensile strength, which all increase with the increase of loading speed. The ratios of height to diameter have a great influence on the tensile strength of the Q_2 loess, when the ratio of height to diameter of the samples is about 1.0, the impact on the tensile strength tends to be relatively small. Therefore, when the tensile strength of loess is to be measured by axial unconfined penetration test, the ratio of height to diameter of the samples should be 1.0. Within the scope of the test loading rates, the loading rates have little effect on the ratios of compressive strength to tensile ratio for the undisturbed Q_2 loess in Baotashan tunnel, which vary between 9. 88 and 13. 68.

Key words: undisturbed Q_2 loess; tensile strength; loading rate; ratio of compressive strength to tensile strength