

非饱和黄土的抗拉特性研究

袁志辉, 倪万魁, 王衍汇

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 710054)

摘要: 采用劈裂法试验获得了非饱和原状黄土的抗拉强度, 并用滤纸法对劈裂破坏后的黄土试样进行了基质吸力的测定, 分析了含水率和基质吸力对抗拉强度的影响, 同时探讨了抗拉强度与粘聚力的关系。试验结果表明: 非饱和原状黄土的抗拉强度很小, 抗拉强度随含水率的增大而减小, 基本为负的指数函数关系; 抗拉强度随基质吸力的增大而增大, 两者之间呈幂函数关系; 当土体含水率小于缩限时, 抗拉强度的增大幅度远远小于基质吸力; 抗拉强度随粘聚力的增大而增大, 两者之间为良好的线性关系, 此种线性关系应是土体的固有性质。

关键词: 劈裂法; 抗拉强度; 滤纸法; 基质吸力; 指数函数; 幂函数; 线性关系

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0123-04

Property of tensile strength of unsaturated loess

YUAN Zhi hui, NI Wan kui, WANG Yan hui

(College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The tensile strength of unsaturated natural loess was determined by the splitting method. The matric suction of loess sample after fracturing was measured using the filter paper method. The effects of water content and matric suction on the tensile strength were analyzed and the relationship between the tensile strength and cohesion was discussed. The results showed the tensile strength of unsaturated natural loess is very small and it decreases with the increasing of water content in a negative exponential function; the tensile strength increases with the increasing of matric suction in a power function; the increasing rate of tensile strength is far less than that of matric suction when water content is less than shrinkage limit of soil sample; and the tensile strength increases with the increasing of cohesion in a good linear relationship, and this relationship is the intrinsic characteristic of natural loess.

Key words: splitting method; tensile strength; filter paper method; matric suction; exponential function; power function; linear relationship

越来越多的研究者证实土坡的破坏和土工建筑物的破坏都与土体的抗拉强度有关。黄土的抗拉强度较低, 因而往往被忽视, 但有研究表明^[1-3], 黄土的低抗拉特性在地质灾害的孕育与发展过程中起着重要作用, 如土坡滑动前, 坡顶产生的拉张裂缝; 坍塌、泻流等重力侵蚀发生前, 土体表面产生拉裂缝。

近年来, 随着经济的日益发展, 我国西部地区公路、机场和高土石坝等工程大量出现, 在工程中黄土体的受拉破坏现象越来越多, 对黄土体的抗拉特性的研究也越来越多。

党进谦等人研究发现, 非饱和黄土的抗拉强度与初始含水率呈幂函数关系^[4], 与凝聚力存在良好的线性关系^[5]; 孙萍的试验结果显示, 非饱和原状黄土的抗拉强度与含水率之间满

足递减的负指数关系^[6]; 邢义川认为黄土的抗拉强度与基质吸力呈很好的倒数相关性^[7]; 冉龙洲等人通过对膨胀土的研究, 认为抗拉强度与吸力之间呈良好的线性相关性^[8]。可见, 人们对黄土抗拉强度与含水率、基质吸力和粘聚力的关系认识并不统一。为了更好地了解非饱和原状黄土抗拉强度随含水率、基质吸力和抗剪强度的变化规律, 本文拟采用劈裂法、滤纸法和直接快剪试验方法对非饱和原状黄土进行抗拉和抗剪试验, 建立了抗拉强度与含水率、基质吸力定量关系。

1 试验设计

1.1 试验用土的基本物理性质

试验用土取自洛川某塬边黄土, 深度为 2.0~3.0 m, 土

样呈灰黄色,富含虫孔和草根,局部带零星白色斑点状盐膜,下部有少量颗粒状钙质结核,其基本特性参数见表 1。

表 1 试验用土的基本特性参数

Tab. 1 Basic properties of experiment soil

土样	天然 含水率 (%)	干密度 $\rho_A/(g \cdot cm^{-3})$	土粒比重 G_s	塑限 $w_p(\%)$	液限 $w_L(\%)$
黄土	18.5	1.20	2.72	19.5	28.6

1.2 直接快剪试验

目前土的抗剪强度试验主要为直接剪切试验和三轴剪切试验。由于直接剪切试验和三轴试验具有可比性,同时直接剪切试验具有简单快速和易操作的特点,因此本次试验采用常规四联直剪仪,对不同含水率的非饱和原状黄土进行剪切试验。

每个含水率试样制备四个,含水率的配置分别为 7%、10%、12%、15%、18%,用水膜转移法控制试样的初始含水率,将配置好含水率的试样用至少两层塑料袋包裹密封,并将其放入保湿器中至少 2 d,以保证试样中水分的充分运移,平衡后进行剪切试验。

试验采用不固结不排水快剪试验,剪切速率为 0.8 mm/min,在试样上施加垂直压力后立即快速施加水平剪切力,使试样在较短的时间内剪坏。试验中施加的垂直压力分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa。

1.3 抗拉强度试验

土的抗拉强度试验主要分为直接拉伸和间接拉伸试验,前者包括单轴拉伸试验和三轴拉伸试验;后者主要有土梁弯曲试验、轴向压裂试验、径向压裂试验和气压劈裂试验。本文采用间接试验中的径向压裂试验法。试验仪器为自行研制的可以测量较小破坏荷载(最大荷载为 500 N,精度为 0.1 N)的抗拉试验仪器,其加载速度设置为 0.9 mm/min,仪器可以自动记录峰值。

将土样制成边长为 5 cm 的正方体试样,每个含水率试样制备三个,用水膜转移法控制试样的初始含水率,试样的含水率试样的含水率配置及试样密封、置放与前述直接快剪试验的要求相同。

1.4 基质吸力量测

测量基质吸力的方法较多,但大都是基于抗剪强度试验进行改装的,并没有在土的抗拉强度下测量基质吸力的试验,部分研究者^[8]采用的盐溶液法实际测量的是总吸力与抗拉强度的关系,且土体在盐溶液下对土体会产生一定的影响。因此,本文采用滤纸法来对劈裂后的黄土试样进行基质吸力的测量,虽然黄土试样在劈裂后的含水率和结构会发生微小的变化,但对基质吸力的影响并不大,且测量结果与劈裂时黄土试样的抗拉强度具有唯一的对应关系。

基质吸力测量采用的滤纸是杭州新华造纸厂的“双圈”牌 NO. 203 型滤纸,其率定曲线方程为^[10]

$$\lg S = 5.493 - 0.076w_f, w_f \leq 47\% \quad (1)$$

$$\lg S = 2.470 - 0.012w_f, w_f > 47\% \quad (2)$$

式中: S 为吸力(kPa); w_f 为滤纸的含水率(%)。

试验时,先将试验所用的滤纸烘干;为了保证滤纸不受

土样的污染,将滤纸 3 张一组,并用精度为 0.000 1 g 的天平称量中间一张滤纸的重量;然后将 3 张一组的滤纸放在两个劈裂后的黄土土样中间,并用胶带将土样缝隙密封好,保证滤纸量测的是基质吸力;将土样放入玻璃瓶中,加以密封,放入 26° 的恒温箱中等待平衡。为了保证滤纸与土样水分之间充分的运移,并达到平衡,平衡时间不为 7~10 d。平衡结束后,在 30 s 时间内用镊子取出中间那张滤纸称其质量^[10]。根据滤纸的干质量与湿质量之差,计算出滤纸的平衡含水率,将其代入预先确定的滤纸的率定方程中,便可求得土体的基质吸力。

2 试验结果分析

通过劈裂法、直接剪切和滤纸法分别得到了非饱和原状黄土的抗拉强度、抗剪强度和基质吸力试验数据,将所有数据经过整理成表 2,并逐个对其进行分析。

表 2 非饱和原状黄土的抗剪强度和抗拉强度参数

Tab. 2 The parameters of shear strength and tensile strength of unsaturated natural loess

干密度 $\rho_A/(g \cdot cm^{-3})$	含水率 (%)	抗剪强度参数		抗拉强度 /kPa	基质吸力 /kPa
		黏聚力/kPa	内摩擦角(°)		
1.20	7	58.80	29.81	20.26	19 971.36
1.20	10	51.99	26.33	16.50	8 152.57
1.20	12	38.60	26.20	11.07	3 667.80
1.20	15	26.76	26.06	8.37	794.53
1.20	18	21.60	24.42	5.63	94.25

2.1 含水率对抗拉强度的影响

从表 2 可知,原状黄土的抗拉强度很小,只有几 kPa 到几十 kPa,含水率从 18% 减少到 7% 时,其抗拉强度只增加了约 15 kPa。根据表 2 绘制黄土的抗拉强度与含水率的关系曲线(图 1),可以看出,土体含水率对原状黄土的抗拉强度的影响比较明显,随土体的含水率增大原状黄土的抗拉强度表现为非线性的减小。对图 1 的数据进行拟合,发现黄土抗拉强度和含水率之间呈良好的负指数关系,可表示为

$$\sigma_t = 49.08 \exp(-0.11w) \quad (3)$$

式中: σ_t 为抗拉强度(kPa); w 为含水率(%)。

这与孙萍^[3]等人对原状黄土抗拉强度的研究结果是相似的。

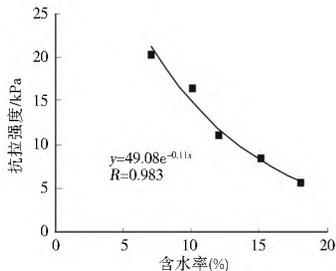


图 1 非饱和原状黄土抗拉强度与含水率关系曲线

Fig. 1 Relationship between tensile strength and water content of unsaturated natural loess

当含水率较低时,曲线斜率较陡,土体抗拉强度受含水率的变化影响较为明显;在高含水率时,土体抗拉强度受含

水率的变化影响较小,在该段含水率时,曲线斜率较缓;因此土体抗拉强度随含水率的变化在低含水率时比在高含水率时更加敏感。

对于同一种干密度的原状黄土来说,影响其抗拉强度的主要是土中胶结物质的成分、含量以及土的含水率,即:由碳酸盐、石膏和盐类薄膜等化学胶结作用形成加固凝聚力和随含水率变化的基质吸力以及毛细力形成的吸附强度。因为干密度一定的原状黄土,土体中的化学胶结物质的成分和数量是一定的,但随着黄土含水率的减小,黄土中的化学胶结物质在浓度上有所增大,其胶结作用得到增强,因此其形成的加固凝聚力有所增加;同时随着含水率的减小,黄土的基质吸力也逐渐增大。本试验中黄土含水率小于塑限(19.5%),黄土中主要存在强结合水和弱结合水,随着黄土中含水率的减小,基质吸力急剧增加,因此基质吸力形成吸附强度也得到增大;而当含水率逐渐增大时,黄土中主要为毛细水和自由水,基质吸力减小,当黄土中含水率达到饱和时,基质吸力消失。

2.2 基质吸力对抗拉强度的影响

根据表2中数据绘制出的黄土抗拉强度和基质吸力的关系图(图2),可以看出,抗拉强度随基质吸力的增大而增大,拟合曲线基本上是幂函数关系,可表示为

$$\sigma_t = 9.315(u_a - u_b)^{0.239} \quad (4)$$

式中: σ_t 为抗拉强度(kPa);($u_a - u_b$)为基质吸力(MPa)。

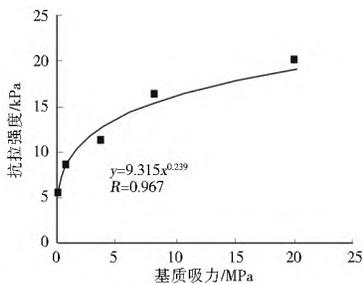


图2 非饱和原状黄土抗拉强度与基质吸力关系曲线

Fig. 2 Relationship between tensile strength and matric suction of unsaturated natural loess

在非饱和土力学中,基质吸力与含水率的关系曲线称为土水特征曲线,反映了吸力作用下土的持水性能^[1],因此土体中水的赋存状态和水土作用机制是影响土体中的基质吸力的主要因素。本次试验研究中,当土体中含水率处于塑限至缩限时,土体中的水主要为少量的弱结合水和大量的强结合水,此时土体中颗粒之间的作用力主要是负孔隙水压力和化学胶结力,基质吸力快速增大,颗粒之间吸附靠近,颗粒间接触面积和作用力增大,因此土体的抗拉强度必然增大;随着含水率的减小,土中的弱结合水膜变薄,并逐渐消失,土体中只存在强结合水,牢固吸附于土颗粒表面,其性质接近于固相^[2],此时的基质吸力也急剧增大,因此土体的抗拉强度也增大。但从图2可知,随着基质吸力的增大,尤其是基质吸力大于约8 MPa时,土体的抗拉强度增大幅度远远小于基质吸力的增大幅度,这可能是土体含水率小于缩限时,基质吸力对抗拉强度的影响有限,并非所有的基质吸力都可以转化为土体的抗拉强度。

2.3 抗拉强度和黏聚力的关系

通过整理本文表2中直接剪切试验数据和抗拉强度数据制成图3。由图3可知,原状黄土的抗拉强度随黏聚力的增大而增大,且抗拉强度远远小于黏聚力,但两者之间存在良好的线性关系,其拟合公式如下:

$$\sigma_t = a \times c - b \quad (5)$$

式中: c 为黏聚力(kPa); a 和 b 为随土的类型和试验方法而变化的参数,本次试验用土 $a = 0.372$, $b = 2.353$,相关系数 $R = 0.984$ 。

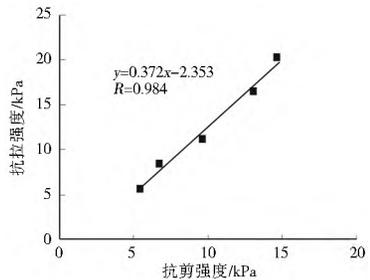


图3 非饱和原状黄土抗拉强度与凝聚力关系曲线

Fig. 3 Relationship between tensile strength and cohesion of unsaturated natural loess

对于土体的抗拉强度总是小于黏聚力,原因主要是土体在剪切试验时,其上竖直荷载使得土体在剪切时土颗粒间的接触面增多,同时颗粒间的距离大幅减小,提高了土体之间的联结,且在试样破坏过程中,破坏面还是接触的,颗粒之间仍然存在粘结作用;但在拉伸试验下,土粒间的距离增加,颗粒间的接触点数目减少,且随着拉应力的增加,颗粒接触点数目基本消失,因此土体的抗拉强度总是小于粘聚力。

根据卢宁(2006)提出的非饱和土的抗剪强度公式^[11]和基于Mohr-Coulomb破坏准则推导的吸应力与单轴抗拉强度的关系式^[12],可以得出抗拉强度与黏聚力的关系如下:

$$\sigma_t = 2 \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \frac{c' - c}{\tan \phi} \quad (6)$$

众所周知,在非饱和土力学中,认为内摩擦角 ϕ 与基质吸力的变化无关,因此内摩擦角 ϕ 可通过估算基质吸力为0时的有效内摩擦角 ϕ' 来代替,并把抗拉强度 σ_t 的负号去掉,便可以得到

$$\sigma_t = 2 \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) c - 2 \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) c' \quad (7)$$

从公式(7)可以看出,土体的抗拉强度是与土的黏聚力、有效内摩擦角和有效黏聚力有关的变量,也即是非饱和土黏聚力的线性函数,因此从理论上解释了土体抗拉强度与抗剪强度呈良好线性关系的原因。

但本文运用的是间接方法中的劈裂法得到土体的抗拉强度,其在数值上较直接拉伸试验偏小,因此无法直接套用该公式来进行计算;同时直接快剪是无法控制基质吸力的,但仍然可以显示出土体抗拉强度与黏聚力的线性关系,只是精度上存在一定的误差。虽然本次试验没有在数据上没能够很好的验证上述公式,但李积彦等人^[6]通过不同的抗拉试验方法得出黏性土的单轴拉伸法的抗拉强度是劈裂法的1.5倍,因此,对于黄土运用不同的拉伸试验方法其抗拉强度存在一定的误差,黄土的直接单轴拉伸试验与黏聚力的线性

关系,需要进一步的研究来合理解释此公式。

3 结论

(1) 黄土的抗拉强度很小,随土体含水率的增大呈非线性的减小,两者之间呈递减的负指数关系;抗拉强度的变化在低含水率时比在高含水率时敏感。

(2) 原状黄土抗拉强度随基质吸力的增大而增大,两者之间呈幂函数关系;但当土体含水率小于缩限时,基质吸力对抗拉强度的贡献是有限的,并非所有的基质吸力都可以转化为其抗拉强度。

(3) 非饱和原状黄土的抗拉强度与凝聚力存在良好的线性关系,两者之间的线性关系应是其固有特性,并对此进行了理论上的解释。

(4) 对于原状黄土抗拉强度的计算,认为在非饱和仪器下得到其抗剪强度后,可通过公式(6)和公式(7)来进行计算。

参考文献(References):

- [1] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (HU ANG Wen xi. Engineering properties of soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 1983. (in Chinese))
- [2] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [3] BISHOP A W, GARGA V K. Drained tension test on London clays[J]. Geotechnique, 1969, 19: 309-313.
- [4] 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 Hohai university, 2001, 29(6): 106-108. (in Chinese))
- [5] 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, 75(4): 44-48. (DANG Jin qian, LI Jing, ZHANG Bo ping. Uniaxial tension crack characteristics of loess[J]. Journal of Hydroelectric Engineering. 2001, 75(4): 44-48. (in Chinese))
- [6] 孙萍, 彭建兵, 陈立伟, 等. 黄土拉张破裂特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 980-984. (SUN Ping, PENG Jian bing, CHEN Li wen, et al. Experimental research on tensile fracture characteristics of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 980-984. (in Chinese))
- [7] 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, 67(4): 36-43. (XIN Yi chuan, LU O Ye sheng, LI Zhen. The rupture failure strength of loess[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999, 67(4): 36-43. (in Chinese))
- [8] 冉龙洲, 宋翔东, 唐朝生. 干燥过程中膨胀土抗拉强度特性研究[J]. 工程地质学报, 19(4): 620-625. (RAN Long zhou, SONG Xiang dong, TANG Chao sheng. Laboratorial investigation on tensile strength of expansive soil during drying[J]. Journal Engineering Geology, 19(4): 620-625. (in Chinese))
- [9] SL 237-1999, 土工试验规程[S]. (SL 237-1999, Specification of soil test[S]. (in Chinese))
- [10] 王钊, 杨金鑫, 况娟娟, 等. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 405-408. (WANG Zhao, YANG Jin xin, KUANG Juan juan et al. Application of filter paper method in field measurement of matric suction. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 405-408. (in Chinese))
- [11] Ning Lu, William J Likos. 非饱和土力学[M]. 韦昌富, 侯龙, 简文星译. 北京: 高等教育出版社, 2012. (Ning Lu, William J Likos. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Translated by WEI Chang fu, HOU Long, JIAN Wen xing. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese))
- [12] 愈培基, 陈愈炯. 非饱和土的水-气形态及其与力学性质的关系[J]. 水利学报, 1965(1): 16-24. (YU Pei ji, CHEN Yu tong. The pore air-water configurations and their effects on the mechanical properties of partially saturated soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1965(1): 16-24. (in Chinese))
- [13] 朱崇辉, 刘俊民, 严宝文, 等. 非饱和黏性土的抗拉强度与抗剪强度关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3453-3458. (ZHU Chong hui, LIU Jun min, YAN Bao wen, et al. Experimental study on relationship between tensile and shear strength of unsaturated clay earth material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp2): 3453-3458. (in Chinese))
- [14] 罗国煜, 李生林. 工程地质学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 1990. (LUO Guo yu, LI Sheng lin. Fundament of Engineering Geology[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1990. (in Chinese))
- [15] Ning Lu, F ASCE, Tae Hyung Kim, et al. Tensile Strength of Unsaturated Sand[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(12): 1410-1419.