

结构性黄土扭剪特性及联合强度破坏应力修正算法

骆建文¹, 李荣建^{2*}, 王治军¹, 朱桥川¹, 杜志伟¹, 闫蕊²

1. 西安长庆科技工程有限责任公司, 西安 710021

2. 西安理工大学岩土工程研究所, 西安 710048

摘要 中国西北地区存在大量的陡峭黄土边坡, 降雨或扰动均会导致黄土的结构性大大降低, 可能导致滑坡的产生。通过新型扭剪强度测试仪分析了结构性黄土在扭剪试验过程中的破坏特征, 基于扭剪试验结果对可以综合考虑结构性黄土抗拉及抗剪特性的联合强度公式进行了验证, 并基于联合强度研究了土体破坏应力的修正算法。结果表明, 原状黄土、重塑黄土的破坏扭矩随含水率增大而逐渐减小, 且原状黄土的破坏扭矩大于重塑黄土; 扭剪强度试验中破坏应力圆与联合强度破坏线相切, 验证了联合强度公式具有合理的试验基础; 基于联合强度提出的土体破坏应力修正算法, 可为黄土边坡灾害评价提供更加切合实际的强度理论。

关键词 结构性黄土; 抗拉强度试验; 扭剪强度试验; 三轴强度试验; 联合强度

在干旱和半干旱带区域内, 受气候条件和地质环境的影响, 存在着一些具有特殊性质的非饱和土, 如膨胀土、黄土和残积土等, 统称为“特殊土”^[1-2]。其中, 黄土不仅具有非饱和土的基本特性, 而且具有一些特殊的结构性, 因此必须充分认识黄土的这些特性, 才能合理地评价实际中经常出现的黄土边坡灾害。

在工程中结构性黄土边坡大多为直立或陡峭的边坡, 有的高达数十米甚至更高, 黄土的结构性是这些黄土边坡可以直立并且保持长期稳定的原因^[3]。但是由于经常受到河谷的冲沟侵蚀、切割, 黄土边坡的临空条件远比其他土质边坡恶劣。降雨入渗或坡顶受到荷载扰动均会导致黄土的结构性大大降低, 最终可能导致

滑坡的发生。因此, 合理地研究黄土的结构性具有十分重要的理论意义。

土的结构是指土颗粒的排列特征和联结特征, 土的结构性是土的结构及其变化所产生的力学效应。Burland^[4]、Callisto 等^[5]通过大量试验证明了土的结构性对土的力学性质的影响。针对结构性黄土, 国内外学者从细观力学、固体力学和土力学方面对其结构性及力学性质进行了深入的探索, 其中比较有代表性的研究有扰动状态概念^[6]、岩土破损力学^[7]、四维空间理论^[8]及综合结构势^[9], 目前建立的黄土结构性参数有应力结构性参数 m_σ ^[10]、模量结构性参数 m_E ^[11]等。以上研究为黄土结构性的研究奠定了基础。

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2019-03-31

基金项目: 陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(14JS064); 西安长庆科技工程有限责任公司项目(CTEC14Z-KY-013)

作者简介: 骆建文, 高级工程师, 研究方向为工程地质及岩土工程勘察, 电子信箱: 1879878040@qq.com; 李荣建(通信作者), 教授, 研究方向为黄土力学、岩土工程抗震及边坡工程, 电子信箱: lirongjian@xaut.edu.cn

引用格式: 骆建文, 李荣建, 王治军, 等. 结构性黄土扭剪特性及联合强度破坏应力修正算法[J]. 科技导报, 2019, 37(14): 86-92; doi: .3981/j.issn.1000-7857.2019.14.011

针对结构性黄土的强度特性,袁志辉等^[12]系统地开展黄土的常规三轴试验,提出了黄土结构强度和衰减强度的求取方法。陈昌禄等^[13]在对多种不同结构性原状黄土的真三轴试验基础上,分析了不同结构性原状黄土的强度变化规律。Lamb^[14]和Seed等^[15]研究了压实土的结构强度特性,提出了片堆结构和片架结构的分散排列结构类型。以上研究推动了结构性黄土强度特性的研究,但这些研究主要集中在探讨黄土在压剪条件下的强度特性,而尚未涉及到黄土扭剪试验和抗拉试验的相关研究,因此针对黄土扭剪试验和抗拉试验开展相关研究是目前黄土强度特性研究的一个重要方向。本文通过结构性黄土的扭剪强度试验,分析结构性黄土的扭剪破坏特征及其强度特性,验证联合强度公式的合理性,并基于联合强度进一步研究结构性黄土破坏应力的修正算法。

1 联合强度公式

试验用土为陕北黄土高原探槽中的 Q_3 黄土,取土深度大约为5.5~6.5 m,颜色呈黄色、褐黄色,孔隙较发育,部分有白色钙质胶结。经室内常规试验测定,该黄土的天然含水率18.5%,天然密度1.88 g/cm³,干密度1.59 g/cm³。本研究对含水率14%条件下的黄土进行了抗拉强度试验和三轴剪切试验,试验结果如表1、图1及图2所示。

表1 结构性黄土的抗拉强度

Table 1 Tensile strength of structured loess

试样	含水率 <i>w</i> /%	压力 <i>P</i> /N	抗拉强度 σ /kPa
原状黄土	14	14.14	157.1
重塑黄土	14	8.74	97.1

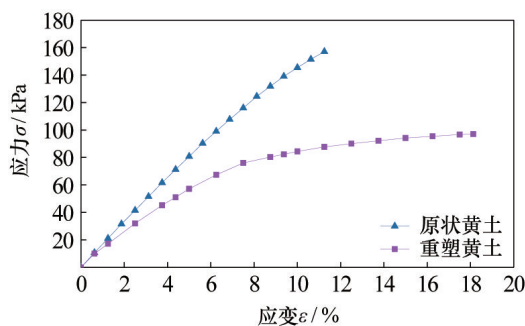


图1 原状黄土和重塑黄土的拉伸应力应变曲线
Fig. 1 Tensile stress-strain curves of structured loess

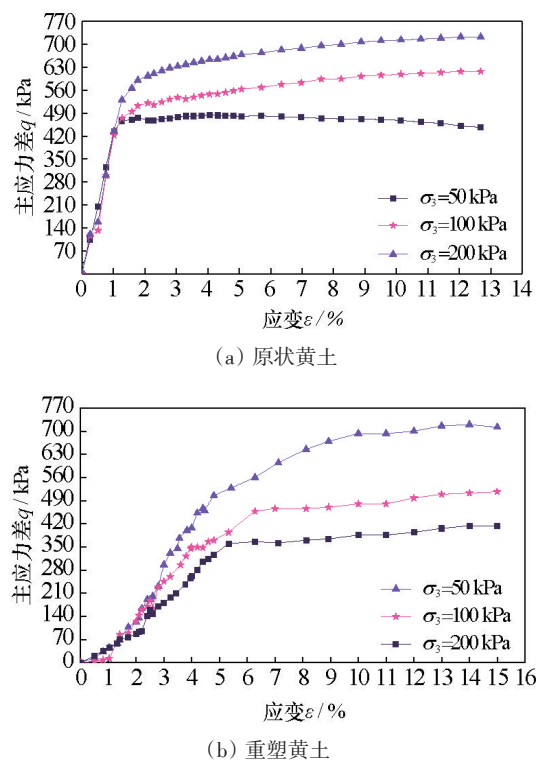


图2 原状土与重塑土的三轴剪切应力应变关系

Fig. 2 Stress-strain relation of structured loess in triaxial compression tests

根据结构性黄土的抗拉试验、三轴剪切试验,整理得出基于抗拉特性、抗剪特性的原状土与重塑土的破坏应力圆和强度破坏线,其中14%含水率条件下原状土与重塑土的破坏应力圆和强度破坏线如图3所示。

针对结构性黄土的拉伸破坏应力圆和三轴破坏应力圆,如果采用曲线光滑处理,则可能在拉剪应力区和压剪应力区通过曲线拟合得到一条联合强度破坏线^[16],该强度线既可以反映拉剪应力破坏,也可以反映压剪应力破坏。在 σ - τ 平面内采用一条双曲线进行试验数据的拟合(如图3(a)、(b)中虚线部分),设拟合的双曲线与水平轴的截距为 σ ,以Mohr-Coulomb强度线为渐近线,通过数学运算推导得出结构性黄土的联合强度公式为

$$\tau_r^2 = (c + \sigma \tan \varphi)^2 - (c + \sigma_1 \tan \varphi)^2 \quad (1)$$

式中, τ_r 为抗剪强度; σ 为正应力; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

基于Mohr-Coulomb强度线,可以确定14%含水率条件下原状土、重塑土的抗拉强度值分别为340 kPa和185 kPa,而根据结构性黄土抗拉试验得到的原状土、重塑土的实际抗拉强度值分别为157.1 kPa和97.1 kPa。对比二者可知,基于Mohr-Coulomb强度理论确定的结

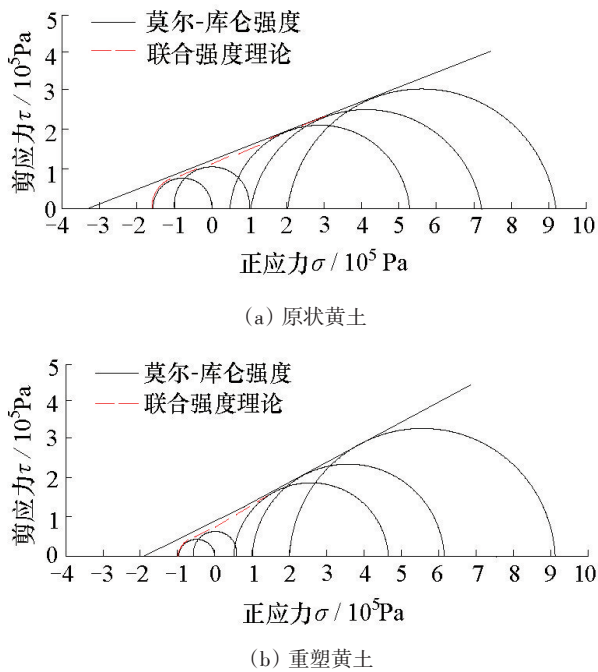


图3 原状、重塑黄土的拉伸与剪切破坏

Fig. 3 Failure diagrams of intact loess and remolded loess

构性黄土抗拉强度值大约是试验实测值的2倍。因此,基于Mohr-Coulomb强度线确定的抗拉强度值明显夸大了结构性黄土的实际抗拉强度,而依据拉伸破坏应力圆、三轴破坏应力圆拟合确定的联合强度参数,能够真实反映黄土体的抗拉强度。以上分析说明结构性黄土的联合强度公式(式(1))是合理的,利用该算法能够获得结构性黄土的实际强度。

2 黄土扭剪试验及破坏特征

2.1 扭剪试验装置

研制的新型扭剪试验测试仪是通过在土样上施加扭矩来测定土体的剪切强度。如图4所示,该装置主要由试样定位操作系统、加载系统、量测系统、配套制样模具等部分组成,具有结构简单、操作方便、控制稳定、数据可靠、安全经济等特点^[7]。该装置解决了现有技术中土体强度测试设备存在的仪器功能单一、试验应力路径过于简单、以及不能完成试样的拉扭(剪)强度测试功能的问题。

新型扭剪试验测试仪的加载室内径为240 mm,试样为直径39.1 mm、高80 mm的圆柱试样,扭转角范围为 $0^{\circ}\sim 120^{\circ}$,极限扭矩为127.57 N·m。

2.2 黄土扭剪强度试验

本研究对陕北结构性黄土进行了纯扭剪试验,试

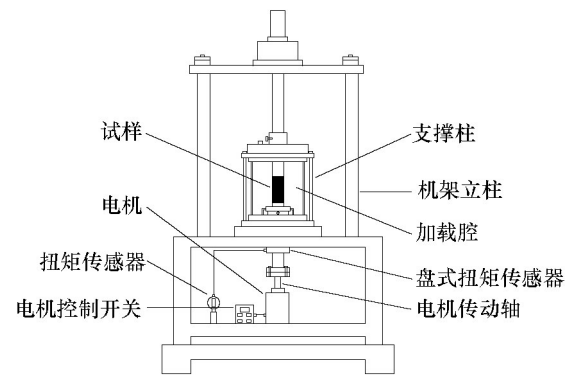


图4 扭剪试验装置

Fig. 4 Test device of torsion shear test

样均采用直径39.1 mm、高80 mm的圆柱形试样。配置含水率为2%、4%、6%、8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%、22%、24%、26%、27.2%的原状土和重塑土试样,对应每一含水率制备2个试样进行平行试验。图5为14%含水率的原状土和重塑土扭剪试验强度曲线。

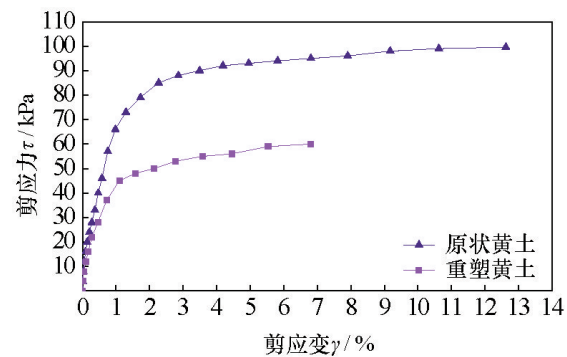


图5 扭剪试验应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain relation in torsion shear test

根据扭剪试验原理,施加扭转时扭转盘发生转动,扭转盘边缘的线位移为 l ,则圆柱试样两端产生的相对扭转角 β 为

$$\beta = \frac{l}{r} \quad (2)$$

式中, r 为扭转盘的半径, $r=150$ mm。

在扭转过程中,圆柱试样破坏时的强度条件为

$$\tau = \frac{T}{W_t} \quad (3)$$

式中, W_t 为抗扭截面模量, $W_t = \frac{\pi D^3}{16}$; T 为圆柱试样的破坏扭矩; D 为试样直径, $D=39.1$ mm。

2.3 黄土扭剪破坏特征

不同含水率条件下试样发生破坏时的形态如图6所示。由图6可知,试样在破坏过程中主要是形成与纵

轴线成一定角度的张性裂纹,当土样含水率较低时,剪切破坏面出现后土样失去连续性;随着土样含水率的增大,破坏过程有较大的变形,裂纹缓慢扩展直至贯通最终破坏,呈现渐进性破坏特点,强度完全丧失后土体崩落,土样完整性丧失。当初始含水率较高时,土样在扭剪状态下几乎丧失了强度,几乎没有抵抗变形的能力。

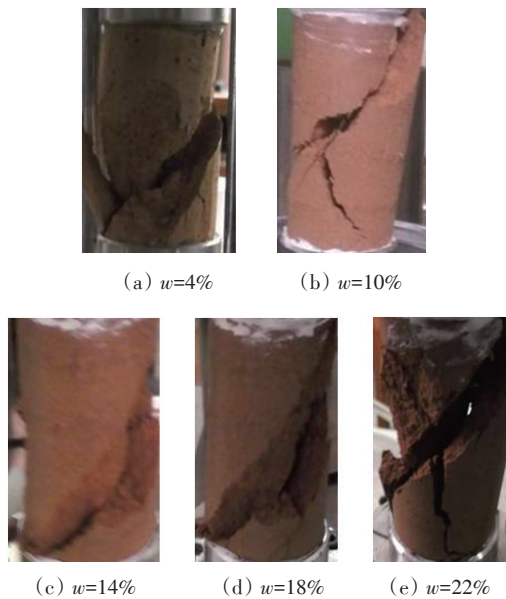


图6 不同含水率条件下试样破坏形态

Fig. 6 Failure modes of loess with different water contents

3 黄土扭剪试验结果分析

3.1 黄土破坏扭矩与含水率关系

针对不同含水率的黄土试样,可以得到原状黄土、重塑黄土的破坏扭矩与含水率关系曲线,如图7所示,含水率对黄土的扭剪破坏特性具有显著的影响。

分析图7可知,原状黄土、重塑黄土的破坏扭矩随

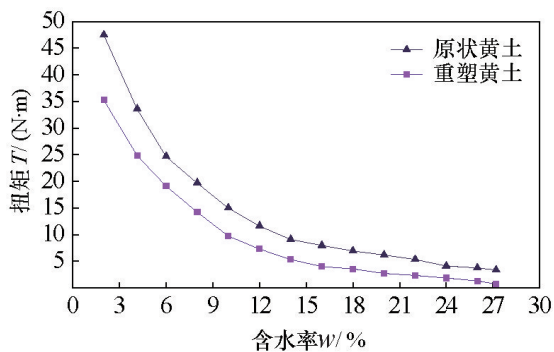


图7 原状黄土及重塑黄土的破坏扭矩与含水率关系曲线

Fig. 7 Relation curves of water content and the torque of intact and remolded loess

含水率的增大均呈现逐渐减小的趋势。当含水率较低时,破坏扭矩随含水率的增大而减小较快。当含水率逐渐增大时,破坏扭矩随含水率的变化减小较慢。当含水率接近饱和含水率时,破坏扭矩趋近于零。

试样含水率16%是原状黄土、重塑黄土的破坏扭矩与含水率关系曲线快速变化和缓慢变化的分界点。当试样含水率为2%~16%时为快速变化阶段,随着试样含水率的增大,破坏扭矩减小较快。这是由于在一定干密度条件下,低含水率时土体之间的联结强度较高,初始结构强度也就较高,土体表现出较高的剪切强度,破坏扭矩就越大。当试样含水率大于16%时,随着含水率的增大,破坏扭矩变化较慢,最后逐渐趋于平缓。这是由于在一定干密度条件下,高含水率时水分导致土颗粒间联结减弱,已经大大弱化了土的联结强度,土体抵抗扭剪变形的能力降低,导致破坏扭矩随含水率的增大而缓慢减小。

3.2 黄土破坏能与含水率关系

扭剪破坏能是指试样在扭剪作用过程中在达到破坏时所做的功。从能量角度出发讨论含水率对原状土样和重塑土样在扭剪破坏过程中能量损耗的影响,可深入理解含水率对试样抗扭剪破坏能力的削弱程度。试样横截面上的扭矩 T 在端截面的角位移(扭转角)上作功,即破坏能,可表示为

$$E = \frac{1}{2}TB \quad (4)$$

式中, E 为破坏能; T 为圆柱试样的破坏扭矩; β 为试样端截面的角位移(扭转角)。

原状黄土、重塑黄土的含水率与破坏能的关系曲线,如图8所示。分析图8可知,无论是原状黄土还是重塑黄土,破坏能随着含水率的增大均呈非线性减小

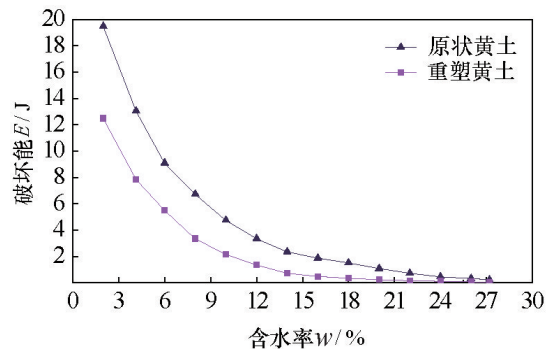


图8 原状和重塑黄土含水率与破坏能关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between water content and failure energy of intact and remolded loess

的趋势,当含水率增大到一定程度时,破坏能随含水率的增大趋于缓慢变化,并逐渐接近于零。当含水率为2%,即试样接近干燥时,其破坏能最高,当含水率高达27.2%时,其破坏能趋近于零。

试样含水率为16%是曲线快速变化和缓慢变化的分界点。当试样含水率小于16%时,随着含水率的增大,破坏能减小较快,呈现一个快速变化的阶段。当试样含水率大于16%时,随着含水率的增大,破坏能减小较慢,趋于缓慢变化状态,并逐渐接近于零。

3.3 黄土扭剪过程中剪切强度与验证

含水率14%的原状黄土、重塑黄土在扭剪状态下的剪切破坏强度如表2所示,同一含水率时,扭剪状态下原状黄土的强度大于重塑黄土。原状黄土未经扰动时其结构保持不变,结构性强,抵抗剪切变形的能力强,扭剪状态下的强度高。由于受到浸水扰动,重塑黄土改变了原有的结构及物理学状态,土颗粒间的联结作用也受到了破坏,抵抗剪切变形的能力越弱,强度越低。含水率为14%时,扭剪状态下的强度,相对于原状土,重塑土的强度降低了39.76%。

表2 结构性黄土的扭剪状态下剪切强度

Table 2 Shear strengths under torsion of structural loess

试样	含水率 w/%	破坏扭矩 T/(N·m)	剪切强度 τ _t /kPa
原状黄土	14	11.7	99.6
重塑黄土	14	7.0	60.0

在图3(a)、(b)中,左侧第二个应力圆分别是在14%含水率条件下原状黄土、重塑黄土试样扭剪试验的破坏应力圆(即纯剪状态应力圆),原状黄土、重塑黄土扭剪试验中纯剪状态破坏应力圆均与联合强度破坏线相切。因此,通过扭剪试验的验证进一步表明联合强度公式具有合理的试验基础。

4 基于联合强度的破坏应力修正

在岩土工程数值计算中,当试算应力 Mohr 圆超过联合强度破坏线时,需要通过计算确定极限应力圆与联合强度线的切点,即将超限的 Mohr 圆修正到与联合强度破坏线相切的状态,如图9所示。

假定σ_z不变,由图9中的修正前后的 Mohr 圆的几何关系,可推导得到如下修正后的应力公式:

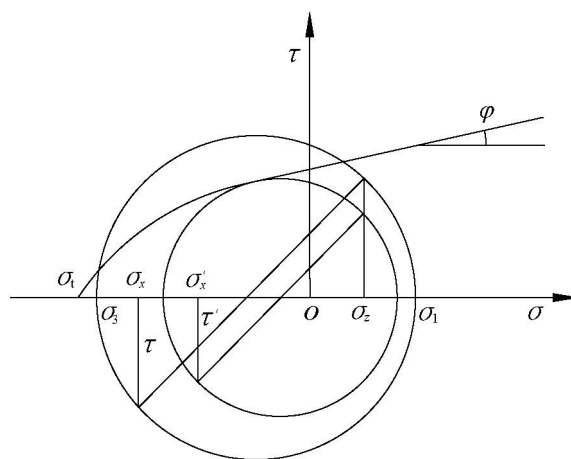


图9 基于联合强度公式的破坏应力修正

Fig. 9 Modification mode of failure stress based on joint strength

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x' &= \sigma_z - a(2\sigma_z - \sigma_1 - \sigma_3) \\ \tau' &= a\tau \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中

$$a = \frac{\sqrt{(s \cdot f \cdot \sin 2\varphi)^2 - 4f^2(1 - \sin^2\varphi)(r^2 - s^2 \cos^2\varphi)} - s \cdot f \cdot \sin 2\varphi}{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - f^2 \sin^2\varphi}$$

$$s = c + \sigma_z \tan\varphi$$

$$r = c + \sigma_1 \tan\varphi$$

$$f = 2\sigma_z - (\sigma_1 + \sigma_3)$$

式中,σ₁,σ₃为修正前的大、小主应力;σ_z为竖向正应力;σ_x,τ为修正前的水平正应力和剪应力;σ_x',τ'为修正后的水平正应力和剪应力。

5 结论

基于结构性黄土的抗拉和三轴剪切试验,评价了可综合考虑结构性黄土抗拉和抗剪特性的联合强度公式的合理性;通过新研制的新型扭剪强度测试仪,开展结构性黄土在扭剪状态下的剪切强度试验,分析了结构性黄土在扭剪试验过程中的破坏特征及其特性,并利用黄土扭剪破坏对联合强度公式进行验证;基于联合强度进一步研究了土体破坏应力的修正算法。结论如下。

1) 在黄土扭剪试验中,试样在破坏过程中主要形成与纵轴线成一定角度的张性裂纹,当初始含水率较低时,剪切破坏面出现后土样很快失去连续性,随着含水率的增大,试样裂纹缓慢扩展直至贯通最终破坏,呈现渐进性破坏特点;当初始含水率较高时,土样在扭剪

状态下几乎没有抵抗变形的能力。

2) 原状黄土与重塑黄土的破坏扭矩随含水率的增大均逐渐减小,当含水率较低时,破坏扭矩随含水率的增大而减小较快;含水率逐渐增大时,破坏扭矩随含水率的变化减小较慢;含水率接近饱和含水率时,破坏扭矩逐渐趋近于零。

3) 原状黄土与重塑黄土的破坏能随含水率的增大均呈非线性减小,当含水率增大到一定程度时,破坏能随含水率的增大趋于稳定变化,并逐渐接近于零;含水率为2%时,即试样接近干燥时,其破坏能最高;含水率接近饱和含水率时,其破坏能趋近于零。

4) 扭剪试验中破坏应力圆与联合强度破坏线相切,证明联合强度公式具有合理的试验基础。

5) 结构性黄土联合强度可以真正意义上较全面地反映结构性黄土的抗拉及抗剪的强度特性,为黄土边坡灾害的评价提供更加切合实际的强度理论。

参考文献(References)

- [1] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 141-161.
Kong Lingwei, Chen Zhenghan. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 141-161.
- [2] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272.
Chen Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272.
- [3] 李荣建, 郑文, 刘军定, 等. 考虑初始结构性参数的结构性黄土边坡稳定性评价[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 143-150.
Li Rongjian, Zheng Wen, Liu Junding, et al. Evaluation of stability of structural loess slope considering initial structural parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 143-150.
- [4] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329-378.
- [5] Callisto L, Calabresi G. Mechanical behaviour of a natural soft clay[J]. Geotechnique, 1998, 48(4): 495-513.
- [6] Desai C S, Toth J. Disturbed state constitutive modeling based on stress-strain and nondestructive behavior[J]. International Journal of Solids and Structures, 1996, 33(11): 1619-1650.
- [7] 沈珠江, 陈铁林. 岩土破坏力学: 基本概念, 目标和任务[C]//中国岩石力学与工程学会第七届学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 9-12.
Shen Zhujiang, Chen Tielin. The rock damage mechanics: basic concept, purpose and task[C]//Proceedings of the Seventh Conference of the Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2002: 9-12.
- [8] Liu M D, Carter J P. Volumetric deformation of natural clays [J]. International Journal of Geomechanics, 2003, 2(3): 236-252.
- [9] 谢定义, 齐吉林. 土的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 Dingyi, Qi Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651-656.
- [10] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊. 复杂应力状态下的土结构性参数 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4248-4251.
Luo Yasheng, Xie Dingyi, Shao Shengjun. Structural parameter of soil under complex stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4248-4251.
- [11] 夏旺民. 黄土弹塑性损伤本构模型及工程应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
Xia Wangmin. The elasto-plastic damage constitutive model of loess and its engineering application[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
- [12] 袁志辉, 倪万魁, 唐春, 等. 干湿循环下黄土强度衰减与结构强度[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1-10.
Yuan Zhihui, Ni Wankui, Tang Chun, et al. Structure strength and strength attenuation value of loess under wetting-drying cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1-10.
- [13] 陈昌禄, 邵生俊, 罗爱忠, 等. 结构性对原状黄土强度影响规律的真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2322-2327.
Chen Changlu, Shao Shengjun, Luo Aizhong, et al. True triaxial tests on structural effects on strength of intact loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2322-2327.
- [14] Lambe T W. The structure of compacted clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1958, 84(2): 1-34.
- [15] Seed A B, Chen C K. Structure and strength characteristics of compacted clay and evolution during consolidation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984(21): 21-25.
- [16] Li R J, Liu J D, Yan R, et al. Characteristic of structural loess strength and its preliminary framework of joint strength

- formula[J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(3): 319–330.
- [17] 李荣建, 刘军定, 李海涛, 等. 一种基于拉压扭剪耦合的应力路径三轴仪: 201310064907X[P]. 2013-02-28.

Li Rongjian, Liu Junding, Li Haitao, et al. A device of stress path triaxial based on tension-compression-torsion-shear coupling: 201310064907X[P]. 2013-02-28.

Torsional shear property and algorithm of failure stress in joint strength of structural loess

LUO Jianwen¹, LI Rongjian^{2*}, WANG Zhijun¹, ZHU Qiaochuan¹, DU Zhiwei¹, YAN Rui²

1. Xi'an Changqing Technology Engineering CO., LTD., Xi'an 710021, China
2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract There are a large number of steep loess slopes in the northwestern region of China. The loess structure would be greatly reduced by rainfall or disturbance, which may lead to the occurrence of landslides. Therefore, it is of great theoretical significance to carry out the researches on torsional shear strength test and tensile strength test of structural loess. In this paper, firstly, the failure characteristics of structural loess are analyzed using a newly developed test device for torsion shear test. Secondly, based on the results of torsional shear test, the joint strength formula which can comprehensively consider the tensile and shear properties of structural loess is validated. Finally, an algorithm of calculating failure stress is derived based on the joint strength. The results show that the failure torques of intact loess and remolded loess gradually decrease with the increase of water content, and the failure torque of intact loess is greater than that of remolded loess. In the torsional shear test, the failure stress circle is tangent to the joint strength failure line, which verifies that the joint strength formula has a reasonable experimental basis. The joint strength and the derived algorithm of calculating failure stress can provide a more realistic way for the evaluation of loess slope disasters.

Keywords structural loess; tensile strength test; torsional shear strength test; triaxial strength test; joint strength ●



(责任编辑 韩星明)