

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.005

基于一种重塑性制样方法的节理黄土力学特性 试验研究*

王丽丽^{1,2}, 李 宁^{1,3}, 何 敏¹, 刘青霞³

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 中国地震局兰州地震研究所 黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 黄土节理是控制黄土地基、边坡和地下工程破坏与稳定性的重要因素, 探讨节理性黄土的破坏特性对于了解边坡后缘拉裂演化过程、滑动面的生成具有重要意义。针对原状节理性黄土室内试验试样制备困难的问题, 考虑节理面低强度、弱胶结的特点, 以一种接触面模拟材料为载体, 结合重塑制样的方法, 提出一种节理性黄土室内三轴试样的制样方法, 通过重塑试样与原状试样的节理面抗拉强度对比分析, 验证该方法的合理性和有效性。在此基础上, 开展节理性黄土的无侧限抗压强度试验和三轴压缩试验, 讨论节理性黄土试样的强度与破坏规律。研究表明: 节理的存在对试样强度和破坏的影响与节理倾角和围压大小有关, 表现为低围压和45°倾角时的低强度效应; “沿节理面滑动破坏”与“破裂面与节理面呈X型共轭剪切破坏”是无侧限和三轴条件下的含单条贯通型节理性试样的两种典型破坏模式; 非贯通型节理性试样的抗压破坏主要为“破裂面与节理面贯通型破坏”与“破裂面与节理面非贯通型破坏”两种类型。

关键词: 黄土节理; 倾角效应; 节理尺寸; 破坏特性

中图分类号: TU411.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0035-08

Experimental Study on Mechanical Properties of Jointed Loess based on a Remoulding Sample Method

WANG Lili^{1,2}, LI Ning^{1,3}, HE Min¹, LIU Qingxia³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730070, China;
3. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Loess joint is an important factor to affect the failure mechanism and stability of loess foundation and slope. Discussing the failure characteristics of jointed loess is of great significance for understanding the evolution process of tensile crack at the back edge of slope and the generation of sliding surface. In view of the difficulty in preparation of undisturbed jointed loess samples, considering the characteristics of low strength and weak cementation of jointed surface, a method of remodling jointed

* 收稿日期: 2018-11-26; 修回日期: 2019-02-15

基金项目: 中国地震局地震预测所基本科研业务费专项资金(2019IESLZ05)、中国地震局地震预测所基本科研业务费专项(2016IESLZ04)、国家自然科学基金项目(11572246, 51779207)资助

作者简介: 王丽丽(1988-), 女, 助理研究员, 博士研究生。主要从事岩土工程防灾减灾方面的研究工作。

Email: wll_11539@163.com

通讯作者: 李 宁(1956-), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩石力学研究。Email: ningli@xaut.edu.cn

triaxial samples is proposed by using a kind of interface simulation material as a carrier and combining with remolding method. The rationality and validity of the method are verified by comparing the tensile strength of the joint surface between the remolded samples and the original samples. On this basis, the unconfined compressive strength test and triaxial compressive test of jointed loess are carried out, and the strength and failure law of jointed loess samples are discussed. The results show that the influence of joints on the strength and failure of specimens is related to the dip angle and confining pressure, which shows the effect of low strength at low confining pressure and large dip angle. sliding failure along the joint plane and X-shaped conjugate shear failure between the fracture surface and the joint plane are two typical failure modes of samples with one single through joint under unconfined and triaxial conditions. The compressive failure of non-penetrating jointed samples is mainly divided into "through-type failure of fracture surface and joint surface" and "non-penetrating -type failure of fracture surface and joint surface".

Keywords: loess joints; obliquity effect; joint size; failure characteristics

引 言

节理和裂隙广泛的存在于黄土中,是控制黄土地基、边坡和地下工程破坏与稳定性的重要因素^[1],对节理性黄土,彭建斌等^[2-6]从节理的成因、分布、和形态到节理性黄土的强度、变形、类型等^[7-10]方面做了分析和探究。黄土中存在大量不同长度、不同倾角和走向的节理,节理的倾角效应一直是学术界和工程界关注的重点。然而直接从自然界中获得不同倾角的节理性原状黄土非常困难,需耗费大量的人力与财力进行勘探与取样,采用按照试验所需不同节理倾角对含有某方向节理的试样进行削样是一种获得不同倾角节理试样的主要制样手段。卢全中等^[11]将裂隙性土样削制成原裂隙与主应力 σ_1 面不同夹角的试样,以此研究三轴围压下试样的破坏特征。胡卸文等^[7]沿用此方法研究了裂隙与主应力方向夹角 α 在 $30^\circ\sim 50^\circ$ 变化时的三轴抗压强度。孙萍等^[9]将原状节理性黄土的倾角变化范围进一步扩展,研究了4种不同裂隙性原状黄土三轴压缩试验,得出了黏聚力随节理倾角 α 的增大而增大的结论。

由于原状黄土是明显各向异性土,将节理性原状土样按不同倾角削制圆柱形试样时,对其抗压强度的准确性和合理性有影响,徐善常等^[12]与罗传庆等^[13]研究了土样的三轴抗剪强度在与标准面呈 45° 或 90° 水平方向时最小,竖向为 0° 时最大。高围压时,原状黄土各向异性强度差别在10%左右。节理的尺寸效应是影响黄土渗流、变形与强度的关键因素,在室内三轴试样中,采用对原状样削样的方式

只适合于贯通型节理试样,对于不同节理尺寸的非贯通试样已不能满足试验需求。因此,采用对含有某方向节理的试样进行削样来获得不同倾角节理性试样的方法存在局限性。重塑样能够有效消除黄土结构性的影响,如果能够研发一种重塑制样的方法来模拟不同节理倾角、不同节理尺寸的室内三轴试样,对于提高节理性黄土室内试验的准确度具有重要意义。

在模拟天然节理方面,王铁行等^[14]采用砂质打磨原状黄土和不规则钢丝锯锯条切割原状黄土的方法形成节理面,研究了节理面粗糙度对抗剪强度影响的相关研究,但所测强度很大程度上取决于切割条纹的深度及密度,人为影响因素较难控制。夏才初等^[15]认为采用重塑制样的方法模拟节理面时,模拟面的强度很大程度取决于模拟面及模拟材料的粗糙程度,过于光滑或粗糙的模拟材料都不能反映真实的节理面接触关系。因此,采用重塑制样的方法模拟节理性试样时,节理面黏结强度的合理模拟是反映真实黄土节理接触关系的关键。

基于以上分析,在考虑光滑度、强度等因素的基础上,设置多种节理面模拟材料,来模拟天然节理面间的接触关系。尝试总结提出一种重塑制样的方法来模拟天然节理性黄土的物理力学特性,并在此试验方法基础上制作了含不同节理倾角的节理性黄土三轴试样,开展了室内三轴压缩强度试验,总结分析不同节理分布特性下试样的强度特性与典型破坏特征,与原状节理性黄土试验结果进行对比分析,验证了该方法的有效性和合理性。

1 节理面的模拟

1.1 试验土体物理力学参数

试验土样取自甘肃岷县2013年6.6级地震滑坡永光村附近。根据土工试验结果,塑限为17.83%,液限为23.33%,最优含水率为16.5%,最大干密度为1.68 g/cm³。该黄土的天然平均含水率为6.3%。

1.2 节理面模拟材料的选择

节理性黄土的抗拉强度取决于其节理面的黏结程度。在采用重塑制样模拟黄土节理的过程中,考虑采用一种强度低、粗糙度适中的材料置于黄土节理面中间,来模拟节理面间的接触关系,要求既能反映天然节理面真实的黏结关系,又能避免材料的“加筋作用”。尝试分别采用“特氟龙塑料薄膜”、“打印纸”、“单层抽纸”等三种材料置于节理面间制作节理性黄土试样。

以节理面的抗拉强度为检验指标,对节理面不同模拟材料处理方式下的黏结强度采用直接拉伸法进行了测试,并与文献[9]的结果进行对比分析。

试验试样含水率和干密度与文献[9]中保持一致, $w=11.5\%$, $\rho_d=1.5 \text{ g/cm}^3$ 。设置含不同节理面模拟材料的试样,采用特氟龙塑料薄膜和打印纸对节理面两侧土体进行黏结时,试样在自重作用下发生脱离,因此根据土的密度与试样的体积,计算两种材料作用下的节理面黏结强度小于0.65 kPa。由于单层抽纸的透水性好,且强度极低,避免了材料对土体的“加筋作用”,以45°节理性试样为例,定制夹具,在拉伸仪上测定试样的抗拉强度将单轴拉伸法测得的抗拉强度与文献[9]进行对比分析,其应力应变曲线如图1所示,试样从节理面处断开,抗拉强度为4.77 kPa。由此可知,采用铺设单层抽纸隔离材料的方式测得的单轴抗拉强度与原状裂隙性黄土的抗拉强度近似,因此采用此种制样方法和材料能够很好的模拟原状黄土节理面间的接触关系。

2 制样方法

对传统的击实制样装置s进行改造,在击实锤底部加置不同倾角、不同直径的底盘,可制作0°~90°与不同节理长度的贯通型与非贯通型三轴试验

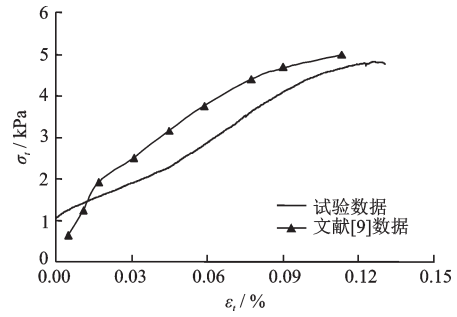


图1 节理性试样制样方法可行性对比分析

Fig.1 Comparative analysis of sample preparation method for jointed samples

试样。定义节理倾角 α :节理面与垂直方向的夹角。图2(a)为节理性试样击实装置模拟,图2(b)为实体。

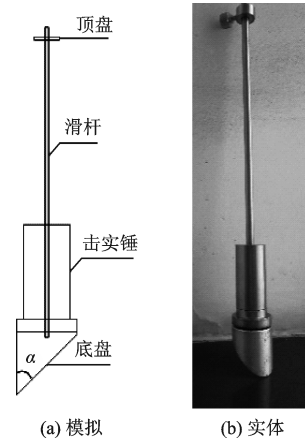


图2 节理性试样击实装置

Fig.2 The instrument for making jointed samples

制样过程简介:以制作含45°的0.3倍试样直径长度节理、60°的0.5倍试样直径长度节理、75°贯通型节理为例,试样制作方法示意如图3所示。每个节理制作完毕后,节理面可铺设隔离材料,其他接触面做刮毛处理。图4为不同节理倾角的贯通型节理试样。

3 试验方法的初步应用

3.1 单条贯通型节理黄土无侧限抗压强度与破坏特征

试样 $w=10.0\%$, $\rho=1.69 \text{ g/cm}^3$, 每种节理倾角试样都进行了3组以上平行样试验。对试样的典型破坏方式及应力—应变关系进行探讨如下。

单条贯通型节理黄土试样的无侧限抗压破坏

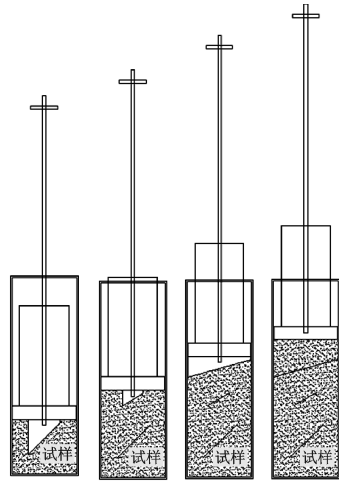


图3 试样制作过程示意

Fig.3 Schematic diagram of sample preparation process

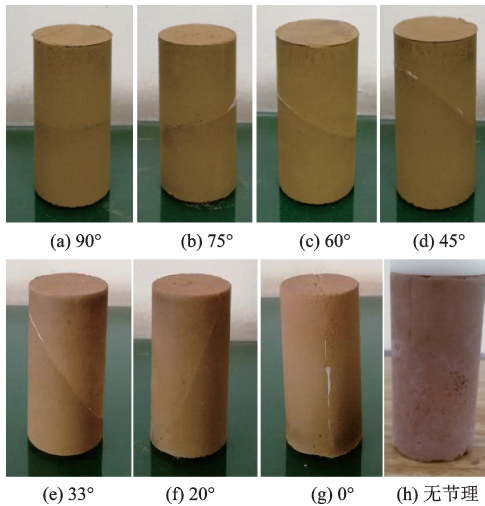


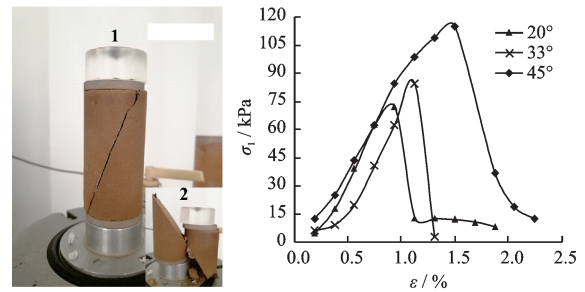
图4 不同倾角贯通型节理试样

Fig.4 Penetrating jointed samples with different joint dip

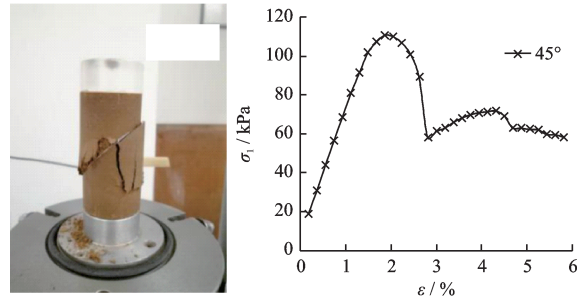
主要分为:沿节理面滑动破坏、滑动+剪切破坏、节理面与破坏面斜角破坏、节理面与破坏面呈X型共轭剪切破坏共4种典型破坏类型。以下为各破坏类型的表现形式及特点:

(1)沿节理面滑动破坏:节理面上的抗滑力小于下滑力,试样沿节理面发生整体性的滑塌破坏,强度迅速下降到0 kpa,此破坏类型主要集中在节理倾角 α 为 $20^\circ \sim 45^\circ$ 的节理性试样,33°节理性试样的破坏模式全部为沿节理面滑动破坏。如图5(a)所示。

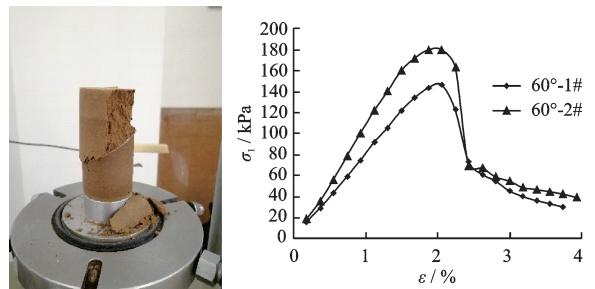
(2)滑动+剪切破坏:当下半部分试样剪切破坏后,强度下降,然后试样沿着节理面发生缓慢的相对滑动,节理面处产生压胀破坏,残余强度较大,残余应力消散较慢,残余强度主要来源于节理面的摩擦强度,残余强度为峰值强度的50%左右,此破坏类型主要集中在节理倾角 α 为 45° 的节理性试样,



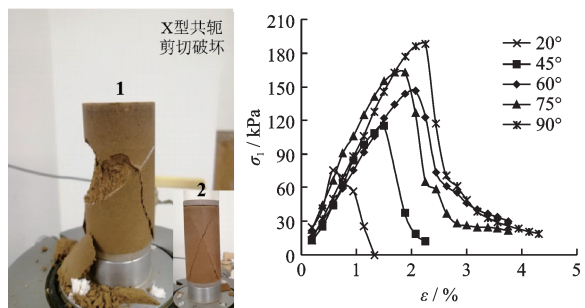
(a) 滑动破坏



(b) 滑动+剪切破坏



(c) 节理面与破坏面斜交破坏



(d) X型共轭剪切破坏

图5 含单条贯通型节理性试样无侧限抗压强度与破坏特点
Fig.5 The unconfined compressive strength stress and failure characteristics of samples with one penetrating joint

如图5(b)所示。

(3)节理面与破坏面斜交破坏:表现为试样的破裂面倾向与节理面同向相交形成某锐角交角。如图5(c)所示。

(4)X型共轭剪切破坏:节理面与剪切破裂面呈X型交叉,试验中节理面间无相对滑动,但节理面下半部分偶有张开(如20°节理试样)。节理面与破裂面的竖向夹角随着节理倾角 α 的增大而增大。此破坏类型涉及的节理倾角种类较多,除33°节理性试样外基本都有此破坏类型,典型破坏及应力应变曲线如图5(d)所示。

对单条不同节理倾角的无侧限抗压强度进行总结分析,如图6所示。节理的无侧限抗压强度随节理倾角 α 的增大呈先减小后增大的变化过程,垂直节理与水平节理的存在对试样的抗压强度影响较小,节理倾角 $\alpha=20^\circ$ 附近时,抗压强度最小。

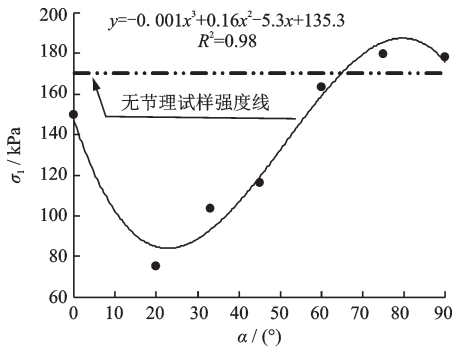


图6 含单条贯通型节理性试样节理倾角 α 与无侧限抗压强度 σ_1 关系

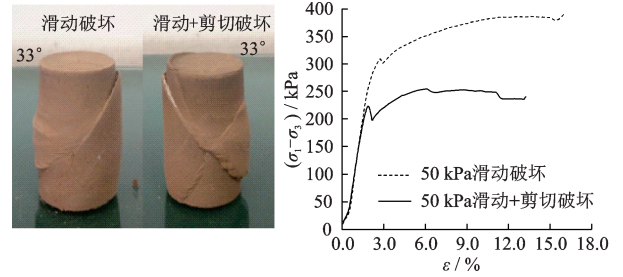
Fig.6 The relationship between α and unconfined compressive strength of samples with one penetrating joint

3.2 单条贯通型节理黄土的三轴压缩强度与破坏特征

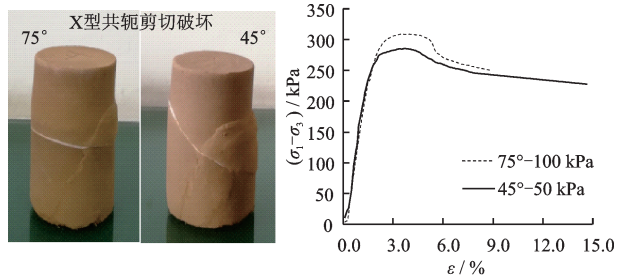
在应变式三轴仪上进行了不固结、不排水三轴压缩试验,速率为0.6 mm/min,围压为50 kPa、100 kPa、150 kPa。破坏主要分为:沿节理面滑动破坏、滑动+剪切破坏、X型共轭剪切破坏、压弯+X型共轭剪切破坏4种类型。图7为不同围压条件下各节理倾角试样的典型破坏情况。

将围压作用下的节理性黄土试样的破坏类型总结为:沿节理面滑动破坏、滑动+剪切破坏、X型共轭剪切破坏、压弯+X型共轭剪切破坏4大类。引起破坏特点不同的原因主要有两点:一为节理倾角的变化,二为围压的变化。

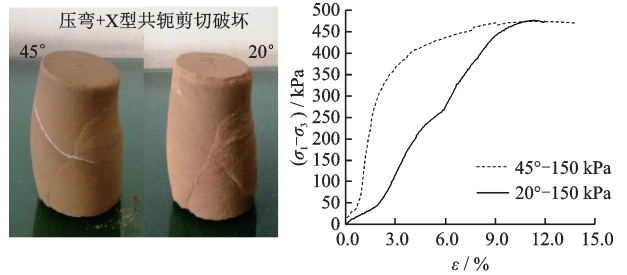
节理倾角一定时,随着围压的增大,试样的抗压强度增强,试样的破坏逐渐由应变软化型转变为应变硬化型破坏。节理面随着围压的增大而逐渐被压密,节理面与垂直方向的夹角也随之增大。围压一定时,随着节理倾角的增大,破坏由“沿节理面



(a) 滑动破坏与滑动+剪切破坏



(b) X型共轭剪切破坏



(c) 压弯+X型共轭剪切破坏

图7 不同围压下含单条贯通型节理性试样强度与破坏特点

Fig.7 Failure diagrams under different confining pressures of samples with one penetrating joint

滑动破坏”逐渐转变为“X型共轭剪切破坏”为主,并伴随有节理面处的压胀。随着围压与节理倾角的变化,沿节理面的滑动量和X型共轭剪切破坏交角会发生变化。节理倾角较小时易发生压弯+X型共轭剪切破坏,节理倾角较大时易发生X型共轭剪切破坏。现将主要的几种破坏类型总结如下:

(1)沿节理面滑动破坏:与无侧限抗压的 $20^\circ \sim 45^\circ$ 皆有发生滑动破坏的情况不同,在围压的作用下,只有 33° 节理性试样在围压作用下发生了沿节理面的滑动破坏。

(2)滑动+剪切破坏:根据剪切破裂面与节理面的方向位置不同,分为“滑动+X型共轭剪切破坏”与“滑动+破裂面平行于节理面破坏”两种破坏形式。在围压较小时, 33° 节理性试样除发生沿节理面的滑动破坏,同时还与节理面产生呈X型共轭剪切破裂面;在围压较大时, 33° 节理性试样在沿节理

面下滑的同时,还易产生与节理面方向平行的剪切破裂面。

(3)X型共轭剪切破坏:主要表现为剪切破裂面与节理面不再重合,破裂面与节理面呈X型交角。与无侧限破坏不同之处在于:由于围压的作用,试样上半部分的下倾角节理面处未发生掉块现象,但在此处有一定的剪胀。

(4)压弯+X型共轭剪切破坏:表现为试样上顶面倾斜,且倾斜方向与节理方向一致,与剪切破裂面方向斜交。

对不同围压下节理性试样随节理倾角的变化如图8所示,图中虚线分别表示三种围压下无节理试样的强度。

由图8可知,在不同围压条件下,节理的存在及倾角变化对剪切强度 $\sigma_1-\sigma_3$ 有影响。

在50 kPa围压下,抗剪强度随节理倾角先减小后增大,与无侧限抗压强度的变化类似,变化曲线呈“对勾”状。在节理倾角 $\alpha=20^\circ$ 时强度最小。节理倾角在超过 45° 后强度接近于无节理试样强度。

在100 kPa围压下,抗剪强度仍然是在 $\alpha=20^\circ$ 时最小,在倾角 33° 后强度趋于无节理试样强度。

在150 kPa围压下,不同节理倾角试样之间的强度差别较小,说明在围压150 kPa作用下,试样的均匀性增强,节理面和倾角效应已经不再是影响强度的主要控制因素,由此可知,随着节理埋深的增加,节理的存在对边坡稳定性的影响降低。

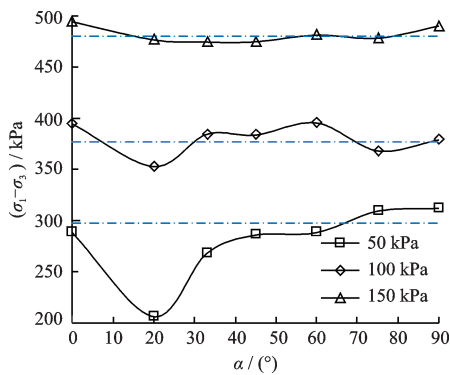


图8 含单条贯通型节理性试样 α 与抗剪强度关系曲线
Fig.8 The relationship between α and $\sigma_1-\sigma_3$ of samples with one penetrating joint

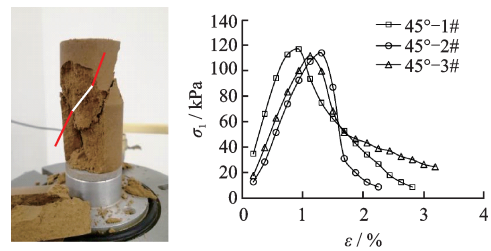
3.3 单条非贯通型节理黄土强度与破坏特征

在本文提出的重塑节理性试样的制作方法的基础上,还可制作含非贯通节理的试样。现以含节

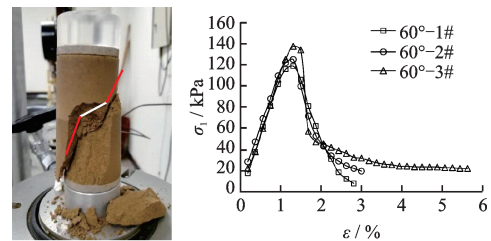
理直径为0.5倍试样直径的试样为例,来说明非贯通型节理试样的强度与破坏特点。倾角 α 变化范围为 $20^\circ\sim 90^\circ$,试样高度为80 mm,直径为39.8 mm。

对无侧限抗压强度破坏主要类型如图9所示。主要分为“破裂面与节理面贯通型破坏”与“破裂面与节理面非贯通型破坏”两种。其中,贯通型破坏又分为“沿节理面剪切破坏”与“剪切面与节理面呈交角破坏”两种。破坏类型的不同主要是受节理倾角的影响。

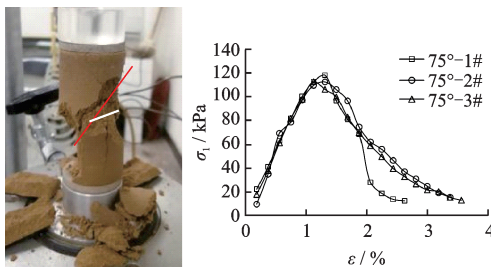
(1)沿节理面剪切破坏:试样的破裂面与节理面基本平行,交角介于 $170^\circ\sim 180^\circ$,此类破坏主要发生在节理倾角 $\alpha=33^\circ\sim 45^\circ$ 时的试样。已知均匀试样在进行单轴抗压时,理论上其发生压剪破坏的破裂面与水平应力的夹角 $\beta=45^\circ+\frac{\varphi}{2}$,而本试验无节理试样的内摩擦角 $\varphi=21.3^\circ$,所以 $\beta=55.7^\circ$,则与竖向应力夹角应为 34.3° 。当节理倾角 $\alpha=45^\circ$ 时,此时节理面与破裂面的夹角应为: $135^\circ+34.3^\circ=$



(a) 沿节理面剪切破坏



(b) 剪切面与节理面呈交角破坏



(c) 破裂面与节理面非贯通破坏

图9 非贯通型节理试样无侧限抗压强度试验破坏特征
Fig.9 The unconfined compressive strength test failure characteristics of samples with one non-penetrating joint

169.3°。计算结果基本与试验结果吻合,符合剪切破坏的破裂发展规律。

(2)剪切面与节理面呈交角破坏:此类破坏主要表现为节理面与剪切破裂面呈交角破坏,主要发生在节理倾角 $\alpha=20^\circ、60^\circ$ 时的试样。以 60° 为例,此时,节理面与剪切面间的夹角介于 $152^\circ\sim 158^\circ$ 。由压剪破坏定律知,理论上节理面与破裂面的夹角应为: $120^\circ+34.3^\circ=154.3^\circ$ 。因此,试验结果与计算结果是基本吻合的。

(3)破裂面与节理面非贯通破坏:节理试样剪切破坏时,破裂面与节理面不再贯通,节理面与破

裂面的交角与方向随机,说明此长度和倾角节理作用下,试样的结构性降低。此类破坏主要发生在节理倾角 $\alpha\geq 75^\circ$ 时的试样。

三轴围压作用下的非贯通型节理试样的破坏如图10所示。与无侧限破坏类似,主要分为“破裂面与节理面贯通型破坏”与“破裂面与节理面非贯通型破坏”两种。沿节理面剪切破坏主要发生在节理倾角 $\alpha=20^\circ\sim 33^\circ$ 时的试样;剪切面与节理面呈交角破坏主要发生在节理倾角 $\alpha=45^\circ$ 时的试样;当节理倾角 $\alpha=60^\circ$ 时,破裂面与节理面不再贯通。



图10 围压作用下含单条非贯通节理试样典型破坏特点

Fig.10 Failure diagrams under different confining pressures of samples with one non-penetrating joint

对不同围压作用下试样的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 以及等效内摩擦角 φ' 随节理倾角的变化如图11所示。

由于黏聚力与内摩擦角的变化趋势相反,为了明确强度的变化趋势,对三种围压下的等效内摩擦角平均值 φ' 进行总结。由图11可知,节理倾角的变化对强度的影响明显。随着节理倾角的增大,非贯通节理性试样的等效内摩擦 φ' 先减小后增大,在 $\alpha=45^\circ$ 时达到最小值。

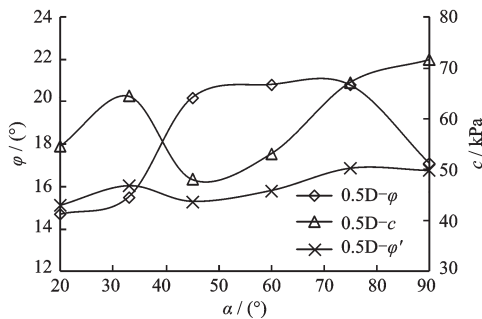


图11 非贯通0.5D型节理抗剪强度与 α 关系曲线

Fig.11 The relationship between α and $\sigma_1-\sigma_3$ of non-penetrating samples of 0.5D

4 结 论

本文在提出了一种节理性三轴试验土样制作方法的基础上,通过无侧限抗压强度试验与三轴压缩试验,探究了节理倾角变化和节理贯通性对于黄土强度与破坏特点的影响,主要得到以下结论:

(1)节理倾角的大小对试样的抗压强度有较大影响。随着节理倾角的增大,抗压强度先减小后增大,但是这种影响随着倾角和围压的增大而逐渐降低。

(2)贯通型节理性试样的抗压破坏主要为“沿节理面滑动破坏”与“破裂面与节理面呈X型共轭剪切破坏”2种类型。非贯通型节理性试样的抗压破坏主要为“破裂面与节理面贯通型破坏”与“破裂面与节理面非贯通型破坏”两种类型。

(3)基于节理面合理载体的重塑制样方法对于模拟天然黄土节理性土体是合理和有效的。该方法的提出对于提高试验效率,节约勘察取样成本极具意义。

文中对于节理倾角对强度和变形影响的相关结论是基于单一含水量和干密度条件,对单条节理三轴试样的强度与破坏特点进行的总结分析,其最初的目的

是为了验证该方法的有效性。试验结果与卢全中等^[11]的三轴压缩条件下的原状裂隙性黄土的试验结果吻合度极高,验证了该方法的合理性和准确性。

参考文献:

- [1] 梁庆国,李洁,李德武,等.黄土隧道围岩分级研究的若干问题[J].岩土工程学报,2011,33(增1):177-183.
Liang Q G, Li J, Li D W, et al. Some problems on surrounding rock classification of Loess tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup 1): 177-183. (in Chinese)
- [2] 孙广忠,孙毅.地质工程原理[M].北京:地质出版社,2004:158-161.
Sun G Zh, Sun Y. Principle of geotechnical engineering [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 158-161. (in Chinese)
- [3] 骆进,项伟,吴云刚,等.陕北黄土垂直节理形成机理的试验研究[J].长江科学院院报,2010,27(3):38-41,45.
Luo J, Xiang W, Wu Y G, et al. Experimental study on formation of Loess vertical joints in north Shanxi province [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(3):38-41,45. (in Chinese)
- [4] 王正贵,康国瑾,马崇武,等.关于黄土垂直节理形成机制的探讨[J].中国科学(B辑),1993,23(7):765-770.
Wang Zh G, Kang G J, Ma Ch W, et al. Discussion on formation mechanism of vertical joints in Loess [J]. Science in China (B series), 1993, 23(7):765-770. (in Chinese)
- [5] 李同录,王红,付昱凯,等.黄土垂直节理形成机理的试验模拟[J].地球科学与环境学报,2014,36(2):127-134.
Li T L, Wang H, Fu Y K, et al. Test simulation on the forming mechanism of Loess Vertical Joints [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(2):127-134. (in Chinese)
- [6] 冯连昌,郑晏武.中国湿陷性黄土[M].北京:中国铁道出版社,1982.
Feng L Ch, Zheng Y W. Collapsible loess in China [M]. BeiJing: China Railway Publishing House, 1982. (in Chinese)
- [7] 胡卸文,李群丰,赵泽三,等.裂隙性粘土的力学特性[J].岩土工程学报,1994,16(4):81-88.
Hu X W, Li Q F, Zhao Z S, et al. Mechanical properties of fissured clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(4):81-88. (in Chinese)
- [8] 赵中秀,王小军.超固结状态下裂隙粘土的强度特性[J].中国铁道科学,1995,16(4):56-62.
Zhao Zh X, Wang X J. The Shearing strength behaviours of over consolidated fissure clays [J]. Chinese Railway Science, 1995, 16(4):56-62. (in Chinese)
- [9] 孙萍,彭建兵,吴树仁,等.裂隙性黄土力学特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(6):2188-2195.
Sun P, Peng J B, Wu Sh R, et al. An experimental study on mechanical properties of fractured Loess [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(6):2188-2195. (in Chinese)
- [10] 卢全中,彭建兵.黄土体结构面的发育特征及其灾害效应[J].西安科技大学学报,2006,26(4):446-450.
Lu Q Zh, Peng J B. Characteristics of structure plan of loess mass in loess plateau of China and its hazard effect [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(4):446-450. (in Chinese)
- [11] 卢全中,陈树峰,彭建兵,等.三轴压缩条件下裂隙性黄土应力-应变特性及变形破坏机制[J].中国公路学报,2015,28(1):8-16.
Lu Q Zh, Chen Sh F, Peng J B, et al. Stress-strain features and deformation failure mechanisms of fissures Loess under triaxial compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(1):8-16. (in Chinese)
- [12] 徐善常,梁庆国,李帅帅,等.甘肃定西原状Q₃黄土各向异性试验研究[J].地质力学学报,2015,21(3):378-385.
Xu Sh Ch, Liang Q G, Li Sh Sh, et al. Experimental study on anisotropic characteristics of undisturbed Q₃ Loess from Dingxi, Gansu [J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21(3):378-385. (in Chinese)
- [13] 罗传庆,张吾渝,李辉,等.西宁地区原状黄土强度各向异性试验研究[J].工程地质学报,2016,24(6):1327-1332.
Luo Ch Q, Zhang W Y, Li H, et al. Experimental study on the anisotropic strength of intact Loess in Xining [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(6):1327-1332. (in Chinese)
- [14] 王铁行,王娟娟,方江峰.垂直节理影响的黄土隧道洞口段稳定性分析[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):65-70.
Wang T X, Wang J J, Fang J F. Stability analysis of loess tunnel entrance section considering the impact of vertical joints [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1):65-70. (in Chinese)
- [15] 夏才初,宋应龙,唐志成,等.反复直剪试验节理强度与粗糙度变化的研究[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(9):3589-3594.
Xia C Ch, Song Y L, Tang Zh Ch, et al. Shear strength and morphology characteristic evolution of joint surface under cyclic loads [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(9):3589-3594. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)