

甘建军. 灰岩区降雨型滑坡软弱夹层的三轴试验强度研究[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 30–34, 72. [GAN Jianjun. Experimental study of the strength of weak interlayer of the rainfall induced landslide in limestone area[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(4): 30–34, 72. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2019.04.006.]

灰岩区降雨型滑坡软弱夹层的三轴试验强度研究^{*}

甘建军

(南昌工程学院, 江西 南昌 330099)

摘 要: 国道105江西赣州龙南县段穿越灰岩区, 局部边坡因含有顺向软弱夹层, 斜坡稳定差, 在降雨作用下极易发育滑坡, 对公路的建设和运营影响较大。为查明灰岩区降雨对粉质黏土软弱夹层的强度与变形特性的影响, 采用标准应力途径 GDS 三轴试验系统, 对4组不同基质吸力条件下、3组不同净围压下的试样进行试验, 分析得到基质吸力与最大剪应力的关系曲线、应变与偏应力的关系曲线、净围压与偏应力的关系曲线, 采用非饱和土双应力变量强度理论进行分析。结果表明: 低围压向高围压转变过程中, 滑带土应力应变曲线由加工软化型向加工硬化型转变; 在相同围压条件下, 基质吸力由低向高变化过程中, 滑带土在低吸力条件下表现为应变软化, 在高吸力时表现为加工硬化; 总粘聚力与基质吸力呈线性增长关系, 其增长斜率夹角为基质吸力相关角 $\varphi^b = 15.5^\circ$; 当基质吸力为 0 kPa、30 kPa、60 kPa、90 kPa 时, 其总粘聚力分别为: 22.7 kPa、33.4 kPa、43.8 kPa 和 46.9 kPa, 内摩擦角 φ' 分别为 21.8°、23.6°、26.2° 和 24.5°; 最后根据 Fredlund 非饱和土双应力强度理论, 提出了该滑坡滑带土的抗剪强度修正公式。

关键词: 滑坡; 非饱和土; 软弱夹层; 强度理论; 基质吸力

中图分类号: TU411.3; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2019)04–0030–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2019.04.006

105 国道是中国的一条国家级南北主干道, 起点为北京, 终点是澳门, 其中部分路段穿越江西省龙南县的石炭系灰岩地层, 该路段岩层破碎, 多为顺向地层且含有粉质黏土等滑带土, 几十年来经常崩滑地质灾害, 影响了主干道的建设与运营。由于研究区与广东接壤, 属于亚热带季风温暖湿润型气候, 极端暴雨常有发生。公路沿线斜坡软弱夹层部分滑带土往往在非饱和状态下, 受到降雨入渗作用后, 基质吸力发生变化, 导致软弱夹层产生强度劣化现象, 从而加速滑坡的发生, 对国道交通及行人的安全产生较大威胁^[1]。

对于土质软弱夹层的强度研究, 以往许多学者多采用直剪试验、常规三轴试验来分析滑带土的力学特性^[2–4], 但由于直剪试验和三轴试验剪切面是固定的, 而且很难以考虑到基质吸力的影响, 对于雨水充沛的南方地区滑带强度、变形及稳定

性评价而言, 加强基质吸力对滑带土的强度研究尤显重要。利用 GDS 三轴剪切试验可从设定不同围压来模拟不同深度、不同吸力对软弱夹层中的非饱和粉质黏土的受力环境, 此方法已经成为研究非饱和土强度及变形的重要手段。GDS 三轴试验可以设定基质吸力及应力路径以符合现实工况, 可以更好地研究非饱和黏土的强度问题^[5–6]。目前, 国内外对黄土、红黏土、黏土等非饱和土强度研究得较多^[7–10], 研究内容主要集中于变基质吸力或变围压作用下的抗剪强度研究方面, 但在降雨入渗对灰岩接触面(带)粉质黏土的剪切强度方面影响比较少见。本文利用 STDTAS–HKUST 试验系统, 设置变基质吸力和变围压, 对南亨大桥东侧古堆积体滑坡滑带土强度开展了研究, 获取不同降雨入渗工况下的软弱夹层力学参数, 分析粉质黏土的抗剪强度与基质吸力的相关性。

^{*} 收稿日期: 2019–04–09 修回日期: 2019–06–19

基金项目: 江西省教育厅科技研究项目(GJJ151124); 江西省科技厅第一批科技计划项目(20161BBG70051; 20171BBG70046); 江西省水工程安全与资源利用工程研究中心开放基金项目(OF201603); 国家自然科学基金项目(51869012; 41641023)

作者简介: 甘建军(1975–), 男, 汉族, 江西永新人, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程和边坡稳定性的研究和实践工作。

E-mail: sedkj2006@126.com

1 非饱和土强度理论

一些学者认为颗粒结构和吸力对孔隙气压力的变化具有重要影响, 认为非饱和土体颗粒孔隙中存在孔隙气压力 u_a 和负孔隙水压力 u_w , 它们可能存在一定的差值, 即基质吸力 $u_a - u_w$, 它可以使土颗粒之间的有效应力不仅由颗粒骨架的粒间压力单独承担。他们认为饱和土的强度理论不再适用降雨入渗工况下软弱夹层。为此, 许多学者针对软弱夹层的强度问题, 充分考虑基质吸力的影响, 提出和改进了一些非饱和土的强度理论和计算公式^[11-12]。

具有代表性的是 Bishop 通过试验提出的非饱和土有效应力强度理论公式(式 1), 该公式引入有效应力参数来反映抗剪强度与基质吸力的相关性, 这个公式适用于饱和度 > 20%、粉土含量 > 40% ~ 50%、黏土含量 > 85% 的土, 因此, 这个理论中的有效应力参数不是一个独立的参数, 而是一个与土体性质、饱和度密切相关相关的参数, 用来讨论粉质黏土的强度具有不确定性。

$$\begin{aligned}\tau_f &= c' + [\sigma - u_a] + \chi(u_a - u_w) \tan\varphi' \\ &= c' + (\sigma - u_a) \tan\varphi' + \chi(u_a - u_w) \tan\varphi'.\end{aligned}\quad (1)$$

式中: τ_f 是非饱和土的抗剪强度, c' 是饱和土有效粘聚力, u_a 是非饱和土的孔隙气压力, χ 是有效应力参数, u_w 是非饱和土孔隙水压力, φ' 是饱和土的有效内摩擦角; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; $(\sigma - u_a)$ 为净法向应力。由于 Bishop 强度理论未能反映基质吸力对黏聚力、内摩擦角的影响, 难以用来准确计算分析软弱夹层中非饱和和粉质黏土的抗剪强度。

应用得比较广泛的是 Barden^[3] 和 Fredlund^[4] 利用基质吸力来考虑非饱和土孔隙气压的影响, 假设土粒为固体不能压缩, 颗粒之间的受力由孔隙气压和基质吸力引起的表面张力组成, 即存在如下计算公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan(\varphi') + (u_a - u_w) \tan(\varphi^b). \quad (2)$$

式中: φ^b 为基质吸力相关角, 其它符号代表意义同式(1)。此公式反映非饱和土的抗剪强度是由 c' 、 $(\sigma - u_a)$ 产生的强度与 $(u_a - u_w)$ 三个微观力共同引起的, 其中土的结构变化由净法向应力控制, 而土的饱和度由基质吸力控制, 这两个应力可以通过控制吸力的三轴试验来测试。 $\tan\varphi'$ 就是偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与净围压 $(\sigma - u_a)$ 关系曲线的斜率; $\tan\varphi^b$ 即为基质吸力 $(u_a - u_w)$ 与抗剪强度关系曲线的斜率。为此, 通常利用变基质吸力和变围压的 GDS 三轴试验, 分别绘制出偏应力与净围压、基质吸力与抗剪强度的关系曲线, 计算分析出以上

两个关系曲线的斜率, 最后通过 Fredlund 理论公式可以计算出研究区滑坡软弱夹层粉质黏土的非饱和土抗剪强度。

2 滑带土取样与实验设计

2.1 试验土样

南亨大桥滑坡在 28 个钻孔中都可见到灰褐色粉质黏土。考虑到软弱夹层上部、下部的粉质黏土在取样过程中受到扰动程度比较大的特点, 利用环刀法在扰动较少的②-2 地层土样中部开展物理力学性质室内试验, 结果如表 1。

试验所用非饱和滑带土试样为直径 38 mm、高度 76 mm 的圆柱体, 扰动土分 5 层连续用同一击数击实, 每击实完一层, 在衔接用小刀划痕后堆土击实, 防止分层现象, 击实度以 0.9 的压实度和 1.82 g/cm³ 的干密度作为试样质量控制指标。土样用真空饱和器抽气排空, 放入密封桶水饱和 24 h, 结合滑坡临空面排水畅通的工况, 选择固结排水抗剪试验(CD)。试验控制净围压 100 kPa、200 kPa、300 kPa, 基质吸力分别为 0 kPa(非饱和土的特殊工况)、30 kPa、60 kPa、90 kPa, 共 12 个试样。

2.2 试验仪器

本次试验采用可以全自动控制的 STDTAS - HKUST 三轴试验系统装置。该装置主要组成部件有 1 个 Bishop - Wesley 压力室、3 个 GDS 压力/体积自控控制器和 1 个 GDSLAB 控制软件。该设备在常规三轴试验装置的基础上进行了如下的改进和创新: 增加了压力室底座的液压控制锤, 可以对轴向应力进行自动控制, 从而模拟标准应力途径下的轴向应变与抗剪强度的变化规律; 通过 3 个压力/体积自动控制器来调节孔隙气压和反压实现变吸力和变围压, 从而模拟不同应力途径、低频循环和 k_0 试验等不同条件的强度劣化规律; 运用 GDSLAB 软件, 可以在电脑终端上自动设置基质吸力条件, 全过程自动记录实验产生的轴向应变、最大剪应力、剪应变及偏应力等重要参数, 有利于实验过程的现场分析。

STDTAS - HKUST 三轴试验的三轴压力室可以最大直径 50 mm, 高 76 mm 的标准试样进行测试, 最大承受的轴向荷载可达 2 000 kPa; 该装置设有 3 个压力/体积控制器, 并分别与电脑终端的控制软件(GDSLAB)连接, 最大加压可达到 4 MPa; 自控控制软件系统(GDSLAB)可在电脑上设置饱和固结、标准三轴、标准应力途径及其它应力路径、非饱和土三轴剪切、 k_0 固结及渗透等多种实验。为模拟降雨入渗基质吸力和不同受荷工况的实际条件, 本文采用标准应力途径下的等应变速率固结排水条件三轴剪切试验。

表 1 龙南滑坡软弱夹层粉质黏土主要物性指标

| 含水率 /% | 湿密度 /(g/cm ³) | 干密度 /(g/cm ³) | 孔隙比 e | 塑限 WP/% | 液限 WL/% | 粘聚力 c/kPa | 内摩擦角 ψ/(°) | 压缩模量 Es/MPa |
|-----------|------------------------------|------------------------------|-------|------------|------------|--------------|---------------|----------------|
| 25.3 | 1.98 | 1.82 | 0.79 | 22.3 | 37.9 | 24.3 | 26.9 | 12.6 |

表 2 研究区粉质黏土试验方案

| 加载方式 | 过程模拟 | 基质吸力 U_a /kPa | 围压 (σ_3)/kPa | 净围压 ($\sigma_3 - U_a$)/kPa | 组号 |
|-------------|-----------|-----------------|-----------------------|------------------------------|-----|
| 剪切破坏(应力控制式) | 固结排水剪(CD) | 0 | 100, 200, 300 | 100, 200, 300 | S-1 |
| | | 30 | 130, 230, 330 | 100, 200, 300 | S-2 |
| | | 60 | 260, 360, 460 | 100, 200, 300 | S-3 |
| | | 90 | 390, 490, 590 | 100, 200, 300 | S-4 |

2.3 试验方案

试验先进行固结平衡,按照表 2 的试验方案施加围压,并按照方案变化孔隙气压及水压,使之达到变基质吸力和变围压的试验要求。为让滑带土在固结中压力和孔隙气压及时消散,试样固结试验完成时间设为 72 h。固结完成后,开始剪切试验,先按照表 2 的要求严格控制好孔隙气压、孔隙水压、轴压等参数,依据该滑坡降雨入渗滞后时间较长、排水路径较长、变形速率较慢的实际,将剪切速率取 0.005 mm/min。具体试验方案见表 2。

以 S-2 组为例,该滑带土基质吸力($u_a - u_w$)设为 30 kPa、净围压($\sigma - u_a$)分别设为 100 kPa、200 kPa、300 kPa,由于是排水剪,设置孔隙气压 u_a 为 0 kPa,孔隙水压力 u_w 为 -30 kPa,通过自动控制器和 GDSLAB 控制软件分别对 S2-1、S2-2、S2-3 土样施加 100 kPa、200 kPa、300 kPa 法向应力来开展试验。该试验以每两小时的变形量 ≤ 0.01 mm 为稳定标准;排水的稳定标准为,每两小时的排水量不超过 0.012 mm^3 ;排水及轴向位移都稳定表示固结完成。其它吸力条件下操作与 S-2 组相同。

3 试验结果分析

3.1 变围压条件的抗剪强度分析

图 1 所示为基质吸力为定值时,变轴压 σ_1 条件下粉质黏土的偏应力-应变曲线,其中图 1a~图 1e 是基质吸力分别为 0 kPa、30 kPa、60 kPa、90 kPa 时在变净围压下(100 kPa、200 kPa、300 kPa),分别作出的偏应力-应变关系曲线。从图 1 中可以看出,当基质吸力为定值时,净围压随着抗剪强度增加和递增。从南亨大桥滑坡滑带土应力-应变曲线在初始变形阶段斜率较大,说明其在刚开始变形时强度增大较快。当剪应变超过 10% 以后,抗剪强度缓慢增长速度减缓,土体在一定的强度作用下持续发生变形。在低基质吸力条件,该滑带土具有蠕变特征,而在高基质吸力条

件,滑带土具有一定的硬化特征。

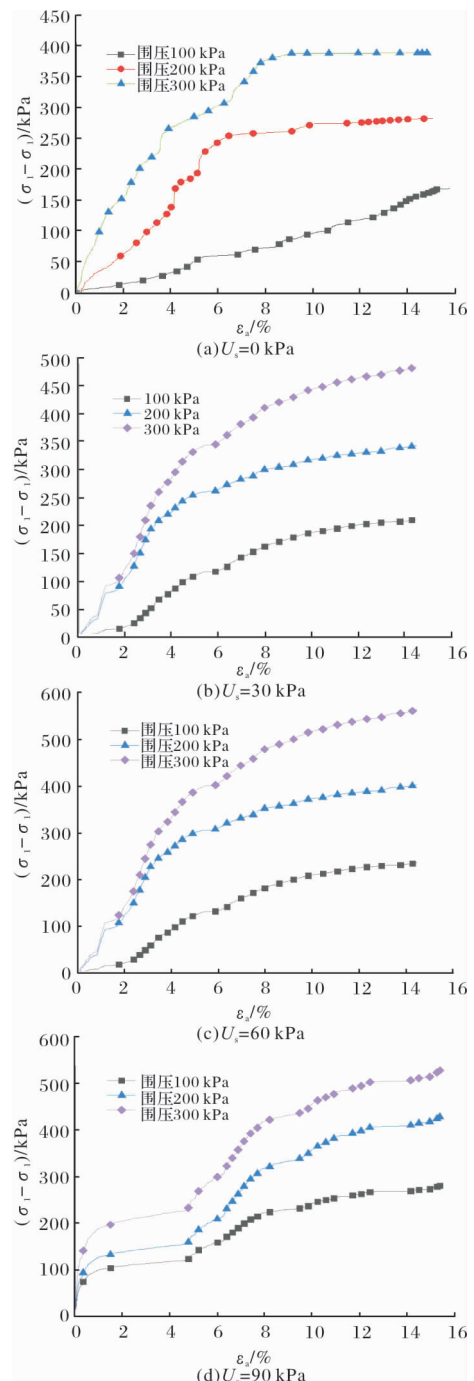


图 1 变围压条件下的偏应力-剪应变曲线

3.2 变吸力下的抗剪强度

通过 GDS 三轴剪切试验, 比较分析相同围压的抗剪强度, 验证相同围压作用下不同基质吸力的应力-应变关系。试验结果如图 2 所示。相同取样深度、相同饱和度、相同孔隙比的土样, 在其受到相同净围压试验过程中, 剪切强度与吸力呈正相关性, 即抗剪强度/偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)随着基质吸力的增大而递增。

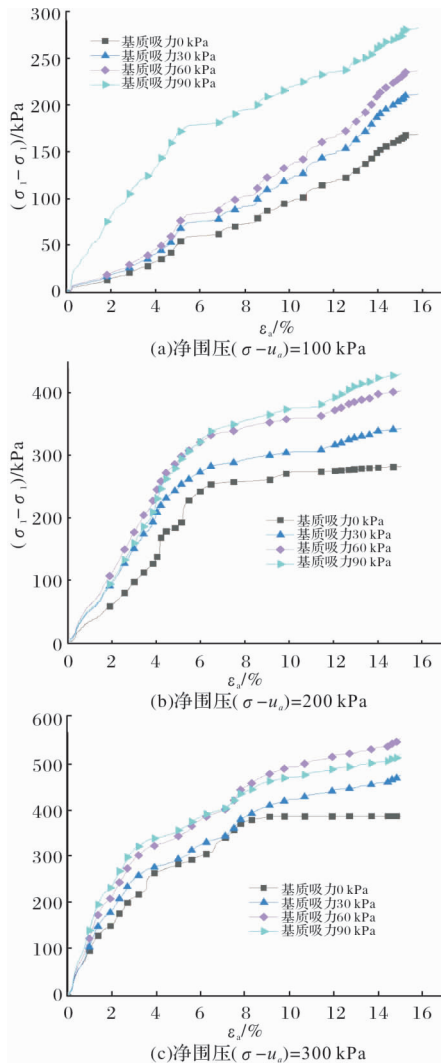


图2 变吸力条件的应力-应变关系曲线

图 2 所示, 在恒定净围压和变基质吸力条件下, 滑带土的抗剪强度与基质吸力呈正相关。当基质吸力饱和条件下($U_a = 0$ kPa), 抗剪强度一般为最低, 说明降雨入渗后到滑带土饱水工况时, 滑带土强度迅速降低, 当滑体下滑力超过滑带土的抗剪强度时, 斜坡发生变形破坏。图 2a 所示低围压($\sigma - u_a = 100$ kPa)偏应力-剪应变曲线, 由图可知在 3 种不同围压时均表现出加工硬化型, 即随着轴向应变 ε_a 增加滑带土的抗剪强度有所增大。表明低围压固结后非饱和滑带土, 无论基质吸力如何, 其 CD 剪切强度与饱和滑带土类似, 表现为

加工硬化型。在低围压条件下, 滑带土应力硬化现象较为明显, 且基质吸力越小, 应力硬化越接近直线型^[13]。

图 2b 及图 2c 为高围压条件下($\sigma - u_a > 100$ kPa), 偏应力-应变曲线接近于加工软化型, 关系曲线前段近似斜直线, 后段趋于水平线, 表明当剪应变达到一定阶段后, 抗剪强度增长缓慢, 随之出现塑性变形现象。同时也反映了滑带土出现塑性变形的剪应力随着吸力的增大而递增。当土体饱和后, 曲线在后段甚至有向下弯曲现象, 表现为加工软化型, 说明土体在饱和后或接近饱和时, 滑带土抗剪强度随着垂直应变 ε_a 的增长而减小, 即滑面已经贯通, 抗剪强度随之减弱。

3.3 Fredlund 非饱和土强度理论分析

参照水利行业的《土工试验规程》(SL237 - 1999)中有关常规三轴试验抗剪强度取值的相关规定^[14], 若以应变 $\varepsilon \leq 15\%$ 时的应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)的峰值作为破坏点, 选取其作为最大主应力 σ_{1max} , 则可得到如表 3 所示的三轴试验剪切参数。

表 3 南亨大桥滑带土三轴试验应力参数(单位: kPa)

| 样号 | U_a | σ_3 | $\sigma_3 - U_a$ | σ_{1max} | $\sigma_{1max} - U_a$ |
|-------|-------|------------|------------------|-----------------|-----------------------|
| S1-01 | 0 | 100 | 100 | 269.34 | 269.34 |
| S1-02 | 0 | 200 | 200 | 482.48 | 482.48 |
| S1-03 | 0 | 300 | 300 | 794.27 | 794.27 |
| S2-01 | 30 | 130 | 100 | 341.94 | 311.94 |
| S2-02 | 30 | 230 | 200 | 573.81 | 343.81 |
| S2-03 | 30 | 330 | 300 | 814.38 | 784.38 |
| S3-01 | 60 | 160 | 100 | 397.09 | 337.09 |
| S3-02 | 60 | 260 | 200 | 663.78 | 603.78 |
| S3-03 | 60 | 360 | 300 | 936.41 | 876.41 |
| S4-01 | 90 | 190 | 100 | 472.56 | 382.56 |
| S4-02 | 90 | 290 | 200 | 720.55 | 630.55 |
| S4-03 | 90 | 390 | 300 | 919.83 | 829.83 |

根据图 2 及表 3 中得到的 GDS 三轴剪切试验的应力参数, 把净法应力($\sigma - u_a$)作为横坐标, 把抗剪强度作为纵坐标, 绘制出 4 种不同基质吸力、3 种不同净围压作用下的抗剪强度包络线如图 3, 通过强度包络曲线可以求得各基质吸力条件下, 滑带土的总内摩擦角 φ 和总粘聚力 c 。

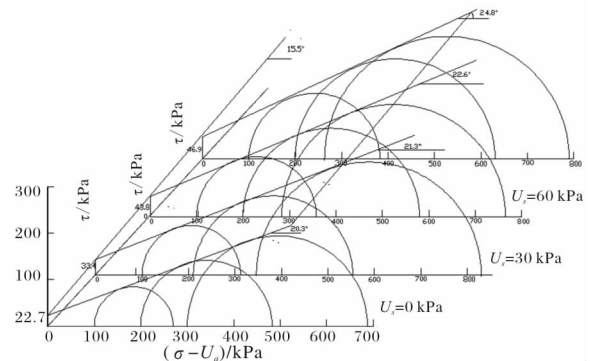


图3 基质吸力不同的摩尔库仑破坏包络线

从图 3 可以看出,在基质吸力为 0 kPa、30 kPa、60 kPa 和 90 kPa 时,其总粘聚力 c 分别为 22.7 kPa、33.4 kPa、43.8 kPa 和 46.9 kPa,内摩擦角 φ 分别为 20.3°、21.3°、22.6°和 24.8°。其中,图 3 为饱和工况下的破坏包络线,包强线的倾角即为饱和有效内摩擦角 $\varphi' = 20.3^\circ$,而饱和有效粘聚力就是 y 轴上的截距,即 $c' = 22.7$ kPa。

考虑到非饱和土双应力变量公式(2),再绘制出净围压($\sigma - u_a$)与总粘聚力的关系曲线(即破坏包络线)如图 4 拟合曲线。对该曲线开展拟合分析,其斜率即为 $\tan\varphi^b$ 。利用反正切函数可求得 $\varphi^b = 15.5^\circ$,因此,得到龙南县南亨大桥滑坡滑带土的固结排水抗剪强度计算公式如下:

$$\tau_f = 22.7 + (\sigma - u_a) \tan(20.3^\circ) + (u_a - u_w) \tan(15.5^\circ) \quad (3)$$

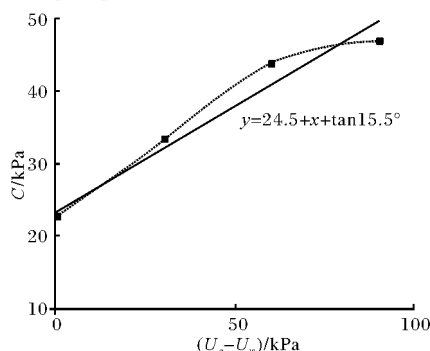


图 4 变吸力总粘聚力破坏包络线

综上所述,在不同围压条件下,滑带土的应变与应力具有正相关性,抗剪强度会随着围压增大而递增;当围压较低时,该滑坡滑带土的偏应力-垂直应变关系曲线表呈加工硬化型,但围压增大到一定值后,应力应变曲线由稳定值型向加工软化型转变。变吸力条件下,低吸力时应力-应变曲线为加工软化型,即偏应力增加到一定时间很少增加,但应变一直在增大,说明已经发生剪切破坏;高吸力条件下,应力-应变曲线为稳定值型或加工硬化型,说明滑带土试样当基质吸力一定时,滑带土受剪切变形过程经历快速剪切变形和缓慢变形两个阶段。反映三轴试验过程中,土体颗粒孔隙被挤压,空隙减小,压力越大,颗粒骨架之间的表面张力起到主导作用,阻止变形的力越大。

4 结论

本文在采用 GDS 三轴试验方法,对非饱和粉质黏土在复杂应力条件下的强度特性及理论进行了分析,得出以下结论:

(1)粉质黏土作为龙南南亨大桥滑坡滑带土在

等加载速率和变围条件下,滑带土三轴剪切的偏应力-垂直应变关系有所不同,在 100 kPa 作用下粉质黏土应力-应变关系曲线表现为应变软化型;200 kPa 作用下粉质黏土应力-应变曲线趋于稳定值型;在 300 kPa 作用下表现为加工硬化型。

(2)非饱和粉质黏土在等加载速率条件和变吸力条件下,在低吸力时,滑带土应力-应变曲线表现为加工软化型;而在中高吸力时,表现为由稳定值型向加工硬化型转变,表明降雨入渗使滑带土吸力变化会对其抗剪强度产生重要影响。

(3)通过 Fredlund 抗剪强度理论分析表明,该滑带土基质吸力为 0 kPa~90 kPa 时,其内摩擦角为 20.3°~24.8°总粘聚力为 22.7 kPa~46.9 kPa。

(4)三轴剪切试验结果表明,黏土的强度与吸力基本呈正相关线性关系,其基质吸力相关角为 $\varphi^b = 15.5^\circ$,处于低吸力范围内。

参考文献:

- [1] 缪林昌,殷宗泽. 非饱和土的剪切强度[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 1-6
- [2] 李广信. 实用主义与土力学[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1879-1886.
- [3] Barden L, Pavlakis G. Air and water permeability of compacted unsaturated cohesive soil[J]. Journal of Soil Science. 1971, 22(3): 302-308.
- [4] Fredlund D G, Ralaadjo H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [5] Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. Geotechnique, 1963, 13(3): 177-197.
- [6] 王宇,李晓,张博,等. 降雨作用下滑坡渐进破坏动态演化研究[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 416-426
- [7] MESRI G, Thierno Kane. Process-response model of denudation at different spatial scales[J]. Catena supplement, 1987, 10(2): 31-50.
- [8] FRANCIS, S. C. Slope development through the threshold concept. In: M. G. Anderson and K. S. Richards (eds) slope stability[J]. Geotechnical Engineering and Geomorphology. Wiley, Chichester and New York, 1987, 5(1): 401-421.
- [9] 郑国锋,郭晓霞,邵龙潭,等. 基于状态曲面的非饱和土强度准则及其验证[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1-8.
- [10] 高海波. 路基边坡降雨入渗过程研究[J]. 公路, 2017, (12): 124-128.
- [11] 张玉浩,彭光辉,闫蕊,等. 南阳邓州段高速公路非饱和膨胀土边坡稳定性分析[J]. 公路, 2015, (4): 72-76.
- [12] 曹岳嵩. 非饱和膨胀土三轴试验结果及分析[J]. 中国公路, 2013, 33(5): 28-32.
- [13] 刘小平,袁腾方,杨迎科. 湖南非饱和红黏土工程性质的试验研究[J]. 公路工程, 2011, 36(2): 48-53.
- [14] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[Z]. 北京: 中华人民共和国水利部, 1999-04-15.

(下转第 72 页)