DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.07.018 2013,30(07):91-94,100

滑带土含水率与力学参数关系试验研究

齐剑峰[1],张成兵[2],宋雪琳[1],李 铎[1]
(1.河北省水资源可持续利用与开放重点实验室,石家庄 050031;
2.河北省地矿局 第四水文工程地质队,河北 沧州 061000)

摘要:为研究降雨型滑坡滑带土力学性质的变化规律,通过三轴剪切试验,在不同含水率下对某滑坡滑带土的应力-应变关系、抗剪强度与变形模量以及强度指标进行了初步研究。研究表明,含水率对滑带应力-应变关系发展模式影响显著。当含水率小于塑限时,应力-应变关系的发展模式为弹性变形→应变硬化→出现峰值→应变软化,出现剪切破坏面;而当含水率大于塑限时,应力-应变关系发展模式基本上是应变硬化,出现鼓胀破坏。随含水率增大,滑带土抗剪强度降低,可分为3个阶段:塑限含水率以前,抗剪强度变化不明显;塑限含水率至17%(液限与塑限含水率的平均值附近)时,抗剪强度下降速率最大;随后变缓。随含水率增大,滑带土黏聚力降低,近似符合双线性关系。

关 键 词:滑带土;含水率;应力-应变关系;破坏模式;强度指标
中图分类号:TU 43 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-5485(2013)07-0091-04

1 研究背景

我国西南山区雨季常发生滑坡,其中由松散、软弱的残坡积土层组成的浅层滑坡众多。滑坡发生的原因往往是降雨入渗使土体含水率和土体重度增大,进而导致土体的强度和刚度等力学性质改变,最终造成斜坡失稳。在该地区,常形成风化残坡积土带—半风化岩土带—新鲜岩石的渐变结构,其中残坡积土组成复杂、土性差异大、空间分布起伏显著,该类斜坡的构成介质从表面上看属于砂性土或黏性土,但土体中存在软弱结构面、局部孔洞或使其呈现各向异性力学性质的不连续面[1-2]。

滑带(面)位置的确定是进行斜坡稳定性分析与合理评价的基础,滑带(面)土的形成演化过程及其工程性质是认识该类斜坡滑动机理的关键。目前对残坡积土工程性质的研究较多,李维树等通过原位试验研究了滑带土的抗剪强度参数[3],江洎洧等通过CT扫描和仿真试验研究了滑带土的力学参数[4]。倪万魁等通过对实际降雨强度模拟,研究了降雨入渗后含水率在黄土剖面的分布和对土体强度的影响[5]。田斌等通过工程实例对滑带土强度参数的取值进行了研究,指出含水率是强度参数的主要影响因素之一[6]。然而针对残坡积滑坡滑带土应力-应变关系等力学特性的研究成果相对不够丰富。为研究滑带土在雨水入渗条件下力学性质的变化规律,针对云南某滑坡滑带土,采用应变控制式三轴剪切仪等土工试验设备,进行了多组不同含水率条件下的三轴剪切试验,并基于试验分析结果,对滑带土的应力-应变变化特征和强度参数的变化规律进行了研究。

2 试验概况

滑带土试样取自哀牢山地区嘎洒镇青树村某滑坡,滑坡处于滑动后固结阶段,滑带厚约0.5~1.0 m,主要在滑坡的右侧缘滑带附近和滑坡的中下部滑带处分别采用钻孔和探槽方式获取土样,取2份扰动土样重25 kg,为获得土的天然含水率,每份扰动土样中均取约1 kg的土样用塑料袋密封。滑带物质主要为黑色泥、粉土夹少量碎石。其基本物理性质指标如表1所示,2处滑带土物理性质指标较为接近,表中ρ,w,w_l,w_p,I_p,G_s分别为密度、含水率、液限、塑限、塑性指数、土粒相对密度。当进行力学性质试验时,通过烘干、研磨后过2 mm土工筛,粒度累积曲线如图1所示。为研究不同含水率条件下滑带土的力学性质,对干土进行分层击实、加水,配制成干密度为1.77 g/cm^3、含水率和饱和度均不相同的重塑试样,如表2所

收稿日期:2012-10-3;修回日期:2012-11-04
基金项目:973专项(2010CB428805-1);国家科技支撑项目(2006BAC04B01);国家大坝安全工程技术开放基金(NDSKFJJ1201)
作者简介:齐剑峰(1975-),男,河南太康人,副教授,博士,主要从事土力学基本理论、地质灾害及其防治等方面的研究,(电话)15833311974(电子信箱)jianfengluck@163.com。

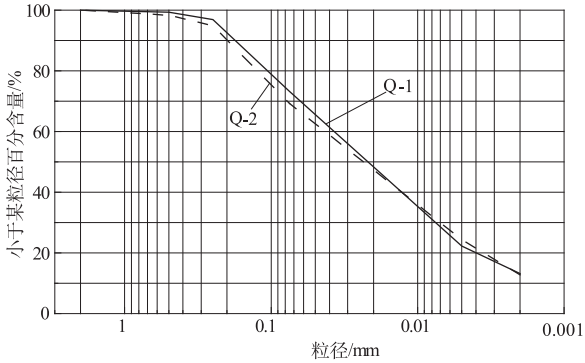


图1 粒径累积线

Fig.1 Cumulative grain size curve

表1 滑带土基本物理性质指标

Table 1 Physical properties of soil in the sliding-zone

编号	ρ/(g·cm^{-3})	w/%	w_l/%	w_p/%	I_p	G_s
Q-1	1.93	8.9	24.7	12.6	12.1	2.76
Q-2	1.97	9.6	25.4	13.1	12.3	2.73

表2 重塑土样的含水率与饱和度值

Table 2 Values of water content and saturated degree of remolded specimens %

	含水率	8	11	13	15	17	19	21
饱和度	土样 Q-1	40.1	51.7	59.9	66.8	74.4	80.6	86.5
	土样 Q-2	42.7	55.8	63.6	70.9	76.7	84.2	89.1

示。为了使试样的含水率能够均匀,将制备好的土样放在塑料袋里密封闷置24 h。试验采用KTG全自动三轴仪进行不固结不排水(UU)试验,剪切速率控制为0.5%/min,围压为50,100,200,300 kPa,试验前后均测定试样的含水率,表2中所给含水率值为2次测定含水率的平均值。

3 应力-应变关系特性

通过三轴剪切试验,获得在相同围压、不同含水率条件下的应力-应变关系,如图2、图3所示。当试样的含水率小于塑限含水率时,应力-应变关系的发展模式为弹性变形→塑性应变硬化→出现峰值→应变软化→残余强度出现;而当试样的含水率大于塑限含水率时,应力-应变关系的发展模式基本上是应变硬化,没有出现应力峰值。2种不同的应力-应变关系发展模式对应的破坏方式也不相同,前者能够观察到明显的剪切破坏面,后者主要是试样的压缩变形和底部鼓胀,没有明显的剪切破坏面。前者(在应力达到峰值偏差应力前)与后者具有相同的特点是:随着含水率的升高,主应力差和切线模量随应变的上升速率都相应降低。

当含水率小于塑限时,一般在应变达到约5%,出现峰值偏差应力,而后随应变增大而应力急速减

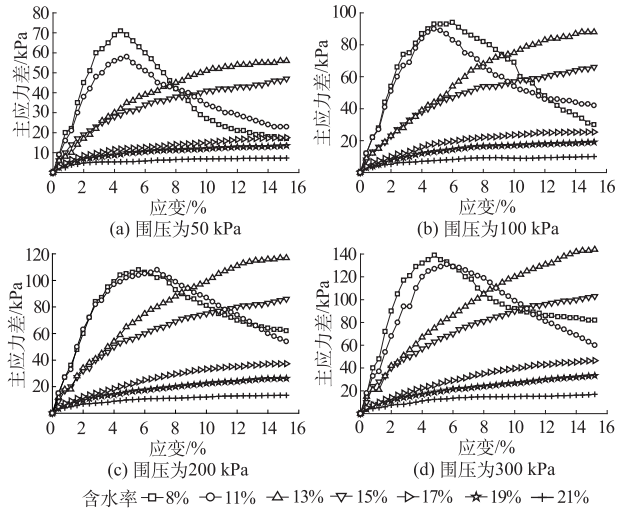


图2 Q-1试样的应力-应变关系

Fig.2 Stress-strain relations of specimen Q-1

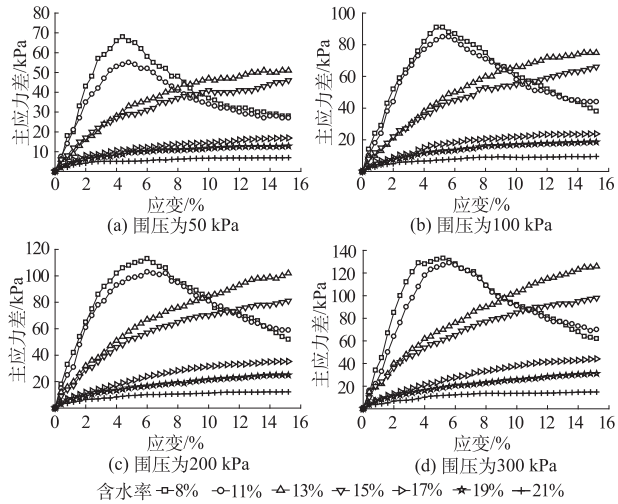


图3 Q-2试样的应力-应变关系

Fig.3 Stress-strain relations of specimen Q-2

小;在应变超过10%以后,偏差应力降速有减缓趋势。当含水率(13%和15%)稍大于塑限时,即使应变达到15%以后,偏差应力增大趋势明显;而当含水率(>17%)远大于塑限时,应变达到5%以后,偏差应力增加量很小,可近似作理想塑性处理。

应力-应变关系发展破坏模式出现上述现象,反映了该滑带土的物理力学变化特征:当土体的含水率小于塑限含水率时,土体稠度状态处于固态或半固态,土颗粒之间的扩散层存在较薄的薄膜水,使土颗粒间连结力显著增大,这种连接力形成了固化内聚力。因而当初始加载时,主要是固化内聚力抵抗施加应力,应力-应变关系基本呈线性关系,当荷载达到临塑荷载后,土粒之间的摩擦力发挥作用,此时应力-应变关系呈线应变硬化,随着荷载和变形增大,固化内聚力遭到破坏迅速降低,类似于非饱和黄土的结构性破坏[7],因而应力-应变关系在应变

达到5%左右出现峰值,以后呈应变软化。当土体的含水率大于塑限含水率时,土样初始处于硬塑状态,土粒间的结合水膜增厚,胶结力仍较高,此时由黏聚力和颗粒间的摩擦力共同抵抗施加的应力,随着荷载和变形加大,破碎的颗粒增大了摩擦系数,应力－应变关系呈应变硬化。随着含水率增大,土样处于可塑状态,较厚的结合水膜为颗粒的重新排列调整提供了条件,当受到较大的竖向压力作用时,土样出现鼓胀,随着变形加大,土体吸收了应变能,应力－应变关系呈应变硬化。

根据滑带土的天然含水率大小,得出应力－应变关系的变化模式,进而判断土体是沿剪切面迅速破坏或者是渐进的压缩变形破坏,对于滑坡的稳定性分析和工程治理具有重要的意义。

4　强度与刚度

为研究滑带土的强度随含水率的变化特征,当应力－应变关系出现峰值时,取峰值偏差应力之半作为抗剪强度;无峰值时,取应变值达到 15% 时的偏差应力之半作为抗剪强度。滑带土的抗剪强度随含水率的变化关系如图 4 所示,当含水率相同时,随围压增大抗剪强度增大;在相同的围压条件下,抗剪强度总体趋势是随着含水率的增大而减小,由抗剪强度减小的速率来看,可以分为 3 个阶段:① 在达到塑限含水率前,抗剪强度变化不明显;② 在超过塑限含水率后,抗剪强度降低明显;③含水率达到 17%(液限与塑限含水率的平均值附近)以后,抗剪强度下降变缓。而且在含水率接近液限时,无论围压大与小,抗剪强度最终趋向相同。因此对于暴雨工况下滑坡稳定性分析时,如果土体的含水率达到或接近液限时,所使用的饱和抗剪强度参数可以通过同 1 个围压下的 UU 三轴试验获得。

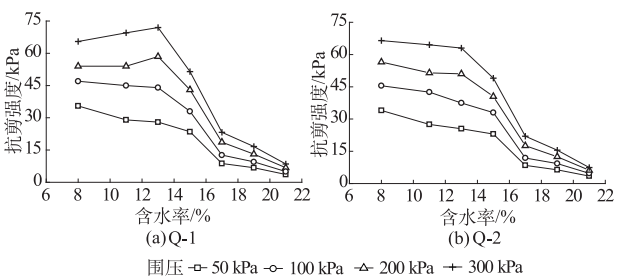


图 4　滑带土抗剪强度随含水率的变化曲线

Fig. 4　Variations of shear strength against water content of soils in the sliding-zone

在土坡稳定性评价中,滑带土的抗剪强度指标是最重要的基本力学参数。在不同的含水状态下,土体的抗剪强度指标存在显著差异,特别对于含有大量亲水性黏土矿物成分的岩土材料,含水率的变化将导致其抗剪强度的显著变化。

4.1　黏聚力随含水率变化

滑带土黏聚力与含水率的关系曲线如图 5 所示。由图可见,随着含水率的增大,黏聚力总体呈减小趋势,但减小速率具有阶段性,当含水率从 8% 增至 17% 时,黏聚力从 45 kPa 减到 3 kPa,减小了 42 kPa,而当含水率由 17% 增至 21% 时,黏聚力仅减小了 2 kPa。黏聚力出现阶段性降低,当含水率增大时,结合水膜逐步增厚,胶结力降低,但含水率达到大于塑限含水率的某一值时,颗粒之间的结合水膜增厚,胶结作用逐渐丧失。滑带土黏聚力与含水率的经验关系符合双线性,可用式(1)表示:

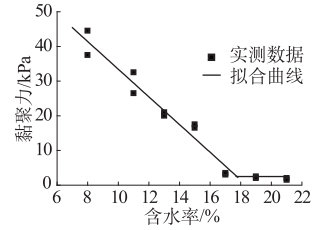


图 5　实测数据与拟合曲线

Fig. 5　Test data and the fitted curve

$$\begin{cases} c = A - Bw, & 8\% < w < 17\%; \\ c = 2.5\ \text{kPa}, & 17\% \leqslant w < 21\%。 \end{cases} \tag{1}$$

式中:A,B 为试验参数。通过对实测数据的拟合,得到滑带土的试验参数 $A=73.33$,$B=3.99$,相关系数 $R=0.98$。拟合曲线如图 5 所示,实测数据与拟合曲线较为一致。

4.2　内摩擦角随含水率变化

滑带土内摩擦角与含水率的关系曲线如图 6 所示。由图可见,相对于黏聚力,含水率对内摩擦角的影响较小,当滑带土的含水率由 8% 增至 21% 时,内摩擦角仅在 2°～6° 范围内变化。整个变化过程中,内摩擦角先增大,在塑限含水率(13% 附近)达到峰值,随后降低。这能够解释图 4(a)中在塑限含水率附近抗剪强度较高的原因,尽管在塑限含水率附近粘聚力降低,但内摩擦角增大。由于滑带土细粒成分含量多,因而土的内摩擦角的绝对值也不大,而且从含水率 8% 至塑限 13% 之间的内摩擦角为 4°～6°,内摩擦角变化主要集中在塑限含水率以后。

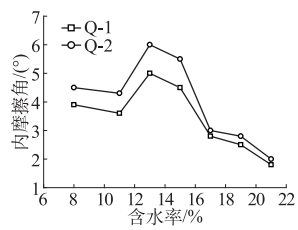


图 6　内摩擦角随含水率的变化曲线

Fig. 6　Variations of internal frictional angle against water content

5　结　论

(1) 滑带土以塑限含水率为界限,应力－应变关

系的发展破坏模式存在显著差异。当试样的含水率小于塑限时,其发展破坏模式为弹性变形→应变硬化→峰值→应变软化,并可见剪切破坏面;而当试样的含水率大于塑限时,其发展破坏模式一直表现为塑性应变硬化,没有出现应力峰值,并可见鼓胀变形破坏。

(2) 滑带土抗剪强度随着含水率的增大而减小,可分为3个阶段,塑限含水率以前,抗剪强度变化不明显,塑限含水率至17%(液限与塑限含水率的平均值附近)时,抗剪强度下降速率最大,随后变缓。

(3) 随含水率增大,滑带土黏聚力降低,近似符合双线性关系。内摩擦角最大值在塑性含水率附近,大于塑性含水率后内摩擦角降低较快。

参考文献:

[1] 蒋 刚, 林鲁生, 刘祖德. 降雨渗流作用下残积土边坡的数值分析[J]. 南京工业大学学报, 2005, 27(5): 27 - 31. (JIANG Gang, LIN Lu-sheng, LIU Zu-de. Numerical Analysis on Residual Soil Slope under Rainfall Infiltration[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2005, 27(5): 27 - 31. (in Chinese))

[2] 赵晓彦, 胡厚田, 时延兵. 类土质边坡研究初探[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 81 - 83. (ZHAO Xiao-yan, HU Hou-tian, SHI Yan-bing. Preliminary Study on a Soil-Like Slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1):81 - 83. (in Chinese))

[3] 李维树, 邬爱清, 丁秀丽, 等. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的影响因素研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 56 - 60. (LI Wei-shu, WU Ai-qing, DING Xiu-li, *et al*. Study on Influencing Factors of Shear Strength Parameters of Slide Zone Clay in Three Gorges Reservoir Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 56 - 60. (in Chinese))

[4] 江洎洧, 项 伟, 张雪扬. 基于CT扫描和仿真试验研究黄土坡滑坡原状滑带土力学参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1025 - 1033. (JIANG Ji-wei, XIANG Wei, ZHANG Xue-yang. Research on Mechanical Parameters of Intact Sliding Zone Soils of Huangtupo Landslide Based on CT Scanning and Simulation Tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1025 - 1033. (in Chinese))

[5] 倪万魁, 牛富俊, 刘东燕. 降雨入渗对非饱和黄土强度的 影响分析[J]. 工程勘察, 2002, (3): 15 - 18. (NI Wan-kui, NIU Fu-jun, LIU Dong-yan. An Analysis on Rainfall Infiltration into the Strength of Unsaturated Loess [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2002, (3): 15 - 18. (in Chinese))

[6] 田 斌, 戴会超, 王世梅. 滑带土结构强度特征及其强度参数取值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2887 - 2892. (TIAN Bin, DAI Hui-chao, WANG Shi-mei. Strength Characteristic of Soil in Slide Zone and Determination of Its Parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2887 - 2892. (in Chinese))

[7] 党进谦, 李 靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报, 2001, (7): 79 - 83. (DANG Jin-qian, LI Jing. The Structural Strength and Shear Strength of Unsaturated Loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (7): 79 - 83. (in Chinese))

(编辑:姜小兰)

Experimental Study on the Relation Between Water Content and Mechanical Properties of Soils in Sliding-Zone

QI Jian-feng[1], ZHANG Cheng-bing[2], SONG Xue-lin[1], LI Duo[1]

(1. Hebei Provincial Open Laboratory of Sustained Development and Utilization of Water Resource, Shijiazhuang 050031, China; 2. The Fourth Team of Hydro-Engineering of Hebei Provincial Bureau of Geo-exploration Mineral Development, Cangzhou 061000, China)

Abstract: To research the mechanical properties of soil in the sliding-zone of rainfall-induced landslide, we investigated the stress-strain relation, shear strength index and initial deformation modulus by triaxial shear tests. The results indicated that the water content has remarkable impact on the development mode of stress-strain relations. When the water content is smaller than the plastic limit, the stress-strain relation experienced a process from elastic deformation to strain hardening, to peak value emergence, then to strain softening, and finally to shear failure surface; while when the water content is larger than the plastic limit, the mode of strain-stress relations generally developed from strain hardening swell at the bottom of the sample. With the increase of water content, the shear

(下转第100页)