

不同含水率下滑带土的力学特性研究

张小林,韩爱果,任光明

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都 610059)

摘要:通过中剪试验和侧限压缩试验,研究同一干密度、不同含水率条件下滑带土的抗剪强度、内聚力、摩擦系数和侧限压缩试验中孔隙比、压缩系数、压缩模量的变化规律等。结果表明:随着含水率的增加,抗剪强度呈线性减小,内聚力和摩擦系数减小,可用对数方程表示。孔隙比、压缩系数和压缩模量变化显著,但敏感性有所不同。

关键词:滑带土;中剪试验;侧限压缩试验;含水率

中图分类号:TU432

文献标识码:A

Study on mechanical properties of sliding zone under different water contents

ZHANG Xiao-lin, HAN Ai-guo, REN Guang-ming

(State Key Lab. of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University Of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China)

Abstract: Through the shear test and the confined compression test, this paper studied the change rule of the shear strength of soil, cohesion, friction coefficient and confined compression test of void ratio, compression coefficient and compression modulus under the condition of same dry density and different moisture content. Results show that with the increase of moisture content, the shear strength linearly decreases, and cohesion and friction coefficient decreases, which can be expressed by logarithmic equation. Void ratio, compression coefficient and compression modulus changes significantly, but the sensitivity is different.

Key words: sliding zone; shear test; confined compression test; water content

滑带土是滑坡物理力学作用(温度、压力、剪应力)和水-岩(土)化学作用的产物,存在于多数滑坡的滑床与滑体之间,其结构破碎、厚度不等使滑带受力特殊和形成过程复杂,使得其结构特征和物理力学、地球化学等性质与滑坡体中其他部位的岩土体存在较大的差异^[1-2],并且成为滑坡中力学强度最低的软弱带。其力学特性一直是土力学与岩土工程领域的重要研究课题,与滑坡的发展变形、稳定性评价有着密切的关系^[3-4]。因此,获取正确可靠的滑带土力学参数对准确预报滑坡地质灾害及确定滑坡治理方案至关重要。西藏、青海等高海拔、高严寒、交通不便地区的工程项目,要采取原状土进行室内试验非常困难,要进行现场试验更是需要很大的投资。所以,国内外

对扰动滑带土研究甚多,尤其是不同含水率下滑带土的力学特性研究,取得了可喜的成果。如王海东等^[5]使用WF循环单剪试验系统研究了含水率对非饱和砂土力学特性影响,陈伟等^[6]用室内三轴剪切试验研究青海地区重塑黄土力学性能影响,Zhang Dingwen等^[7]研究压实非饱和土的模量与含水率关系,Athanasopoulos^[8]对经过土工膜加固的高饱和度淤泥质黏土进行了大型直剪试验研究,分析了随着剪应力的不断增大,加固土剪切损伤变形行为以及土与土工膜间接触摩擦力的发展变化过程,吴民晖等^[9]利用侧限压缩固结仪研究了不同含水率重塑黄土变形特性分析,分析了含水率对于重塑黄土的变形影响。根据含水率对土力学特性影响的复杂性和试验规模的大小在某种

程度上影响到试验成果的准确性。综合考虑,本文采用室内试验的方法,进行了同一干密度、不同含水率下的中剪试验和压缩试验研究,着重研究了西藏芒康县巴塘水电站一滑坡滑带土力学特性,探讨了滑带土抗剪强度、内聚力、摩擦系数、孔隙比和压缩模量等的变化规律,并为选择适合的滑面强度参数、进行库岸稳定性评价奠定了基础。

1 试验内容

试验用土取自西藏芒康县巴塘水电站一滑坡前缘钻孔所揭露的岩芯,通过滑带土颗粒分析知其物质成分为级配良好的含细粒土砂,其中小于0.075 mm的细粒含量占13.46%,2~0.075 mm的砂粒含量占58.00%,2~20 m的砾粒占28.54%。图1为中剪试验和侧限压缩试验用土的颗粒累积曲线,基本物理性质测试得滑带土天然含水率7.95%,天然密度为2.11,液限32.13,塑限19.69,干密度1.95 g/cm³。

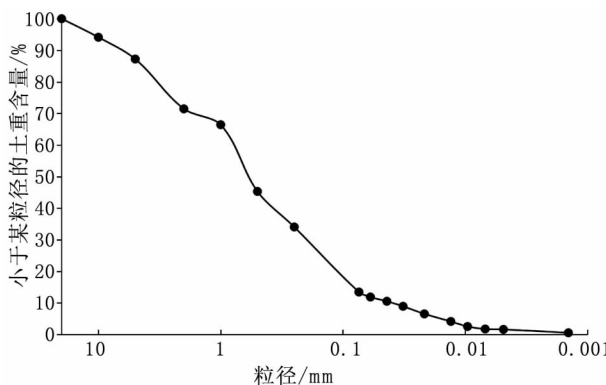


图1 滑带土颗粒分析曲线

Fig.1 Grain-size analysis curve of sliding zone soil

1.1 中剪试验

按环刀容积(14 cm × 15 cm × 16 cm)及干密度,计算得到所需要的土质量和加水量,将称取的土样平铺于搪瓷盘中,并将称取好的水均匀喷洒于土样中,充分拌匀后装入盛土容器内盖紧,润湿24 h。根据环刀容积及干密度计算所需要的湿土,将盒底面垫上滤纸,在盒内侧铺薄纸板,采用击样法将土样分三层装入盒内,每层试样装填仪器高度的1/3,逐层捣实。依次试样顶部放上滤纸、试样盖板、滚珠轴承,将水平加载系统前板紧贴下剪切盒推板。设计8.27%、10.43%、12.60%、14.96%、16.73%等五组试样,每组5个样,垂直压力分别为2.789、5.64、8.5、11.35、14.26 kPa。分别在不同的垂直压力下,施加水平剪应力,求得

破坏时的剪切应力,试验结果如表1所示。

表1 不同含水率下对应的抗剪强度指标

Tab.1 The corresponding shear strength indexes under different water contents

含水率/%	8.27	10.43	12.60	14.96	16.73
剪切密度/ kN · m ⁻³	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
内聚力/kPa	63.4	55.9	41.5	33.8	23.9
摩擦系数	0.533	0.506	0.403	0.346	0.291

1.2 侧限压缩试验

将土烘干,筛选小于2 mm的扰动土做高压固结试验,设计7.98%、16.41%、18.56%、24.31%、28.00%、31.35%等6种不同含水率试样,结合压缩固结试验的要求,施加1 kPa的预压力使试样与仪器上下各部件之间接触,将百分表调整到测读初始读数,然后施加压力等级为12.5、25、50、100、200、300、400、800 kPa。试验采用慢速固结稳定的方法,即施加每级压力后24 h记录百分表读数,研究不同含水率对滑带土的变形影响。

2 试样结果整理与分析

2.1 含水率对滑带土抗剪强度的影响

图2给出了6条不同含水率下滑带土抗剪强度的试样曲线,可见滑带土的抗剪强度值与正应力均表现出良好的线性关系,用摩尔库伦关系式进行描述如下:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \tag{1}$$

式中: τ 为剪应力; σ 为正应力; c 为粘聚力; φ 为内摩擦角;摩擦系数 $f = \tan \varphi$ 。

从图2可以看出,滑带土的抗剪强度随着含水率的增加而整体下降,这是由于随着含水率增加,土颗粒之间的胶结物质开始迅速溶解,抗剪强度减小。

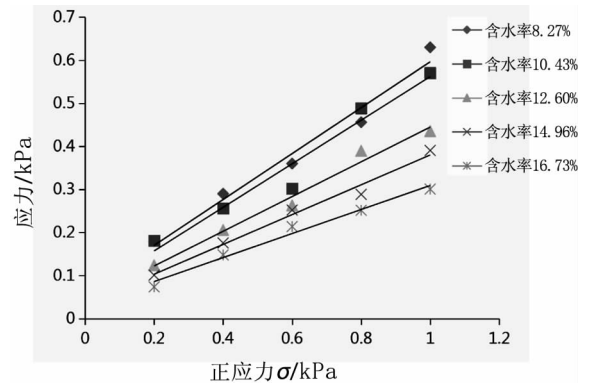


图2 不同含水率下 τ - σ 关系曲线

Fig.2 The curves of τ - σ under different water contents

2.2 含水率与内聚力和摩擦系数的关系

滑带土的内聚力和含水率的关系如图3所示,从图中和表1可以看出,内聚力随着含水率增加而减小。现有的文献资料中对粘聚力多采用指数拟合和对数拟合^[10],为了使拟合结果相关性更高,本文用对数来进行回归分析,得到如下关系式:

$$C = -56.32\ln(w) + 184.65 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.9778$$

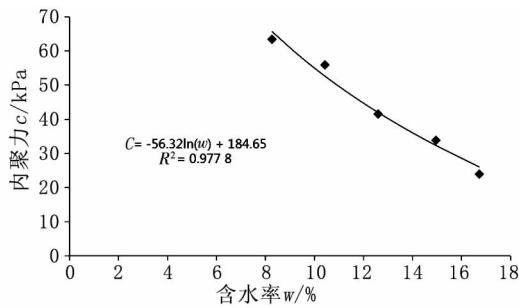


图3 内聚力与含水率的关系曲线

Fig. 3 The curve of cohesion and water content

滑带土的摩擦系数随着含水率的变化如图4所示,其随着含水率的增大而减小,得到如下回归方程式:

$$f = -0.358 \ln(w) + 1.3109 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9578$$

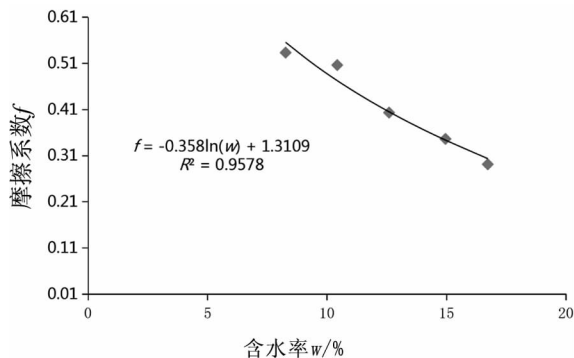


图4 摩擦系数与含水率的关系曲线

Fig. 4 The curve of frictional coefficient and water content

根据滑带土的天然含水率为7.95%,将其带入公式(2)、(3),即可求出天然状态下滑带土的摩擦系数为0.569,内聚力为67.89 kPa,该滑坡滑带土天然状态下具有较高的强度参数值。

2.3 含水率对滑带土变形参数的影响

文献资料显示, $e-p$ 曲线近似于对数曲线,而去掉0点后则拟合效果明显改善^[11]。根据不同含水率,得到曲线如图5。不同含水率下孔隙比与垂

直压力的关系式如表2。

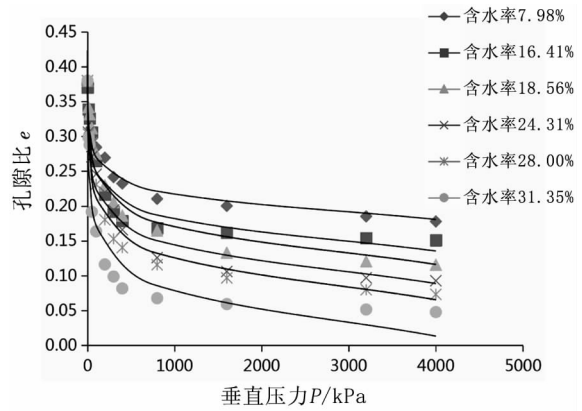


图5 $e-p$ 关系曲线

Fig. 5 The curves of $e-p$

表2 不同含水率下孔隙比与垂直压力的关系式

Tab. 2 The curves of void ratio and vertical pressure under different water contents

含水率 $w/\%$	孔隙比与垂直压力关系式	相关系数 R^2
7.98	$e = -0.025\ln(w) + 0.3876$	0.9734
16.41	$e = -0.032\ln(w) + 0.3989$	0.9207
18.56	$e = -0.037\ln(w) + 0.4234$	0.9462
24.31	$e = -0.038\ln(w) + 0.4029$	0.9730
28.00	$e = -0.041\ln(w) + 0.4062$	0.9602
31.35	$e = -0.045\ln(w) + 0.3827$	0.9357

从图5和表2可看出,试样在同一干密度 1.95 g/cm^3 下初始孔隙比都为0.37左右,随着含水率的增加, $e-p$ 曲线变化明显,尤其是在接近液限(含水率31.35%)时,压缩曲线急剧下降,若用公式 $e = A\ln(w) + B$ 来表示曲线情况,可明显看出A随含水率增加整体下降, $B > 0$ 。并根据实验数据,得垂直压力12.5~800 kPa内滑带土的压缩系数、压缩模量变化如表3。

从表2中可以看出,土样含水率在天然状况下时,压缩系数较低,土体表现出了较低的压缩性,此时土样具有较高的强度,与之前算出的天然状况下摩擦系数为0.569,内聚力为67.89 kPa可相互印证。由于压缩模量是在侧限条件下竖向压应力与竖向总应变之比,可得压缩系数愈小,压缩模量 E_s 愈大,图6、图7是压缩模量、压缩系数与含水率关系曲线,从中可看出,含水率在12.5 kPa时,压缩模量随着含水率的增大而先减小后增加,又缓慢减小,在25~300 kPa时,压缩模量随含水率的增加,其变化幅度较大,说明不同压力下含水率增加可降低土体的压缩性,尤其是在400~800 kPa时随含水率增大压缩模量变化更是显著。

表3 不同含水率下压缩系数及压缩模量随压力的变化

Tab.3 Changing with the pressure of compression coefficient and compression modulus under different water content

压力 /kPa	$w = 7.98\%$		$w = 16.41\%$		$w = 18.56\%$		$w = 24.31\%$		$w = 28.00\%$		$w = 31.35\%$	
	aV	E_s	aV	E_s	aV	E_s	aV	E_s	aV	E_s	aV	E_s
12.5	2.62	0.52	2.70	0.51	1.67	0.82	6.39	0.21	6.69	0.21	7.02	0.20
25	2.85	0.48	1.05	1.31	1.15	1.19	0.90	1.52	0.56	2.45	0.31	4.46
50	0.28	4.90	0.80	1.71	0.79	1.72	0.72	1.91	0.22	6.33	0.72	1.91
100	0.26	5.35	0.82	1.67	0.69	2.00	0.50	2.75	1.19	1.16	1.79	0.77
200	0.15	9.13	0.48	2.84	0.40	3.40	0.26	5.31	0.51	2.72	0.22	6.19
300	0.28	4.91	0.25	5.46	0.21	6.60	0.25	5.41	0.27	5.03	0.29	4.78
400	0.09	14.93	0.20	6.83	0.15	8.85	0.28	4.90	0.12	11.05	0.10	13.61
800	0.06	24.84	0.08	17.09	0.12	11.10	0.10	13.75	0.06	22.41	0.08	16.77

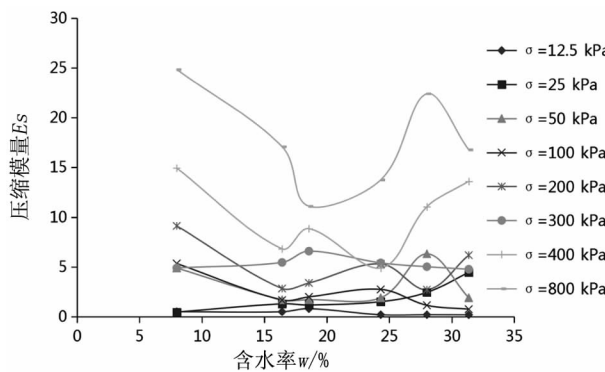


图6 压缩模量与含水率的关系曲线

Fig.6 The curves of compression modulus and water contents

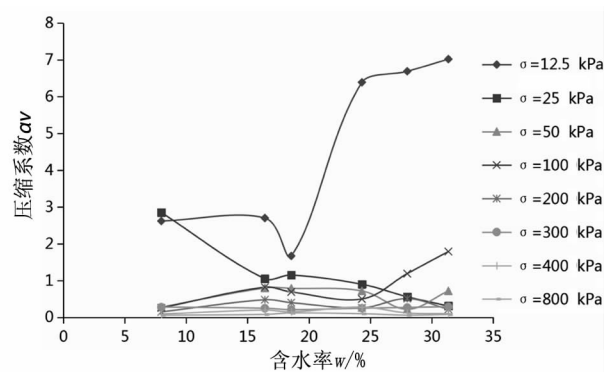


图7 压缩系数与含水率的关系曲线

Fig.7 The curves of compression coefficient and water contents

3 结论

1) 抗剪强度、内聚力和摩擦系数随着含水率的增加而减小。其中内聚力 $C = -56.32 \ln(w) + 184.65$, 摩擦系数 $f = -0.358 \ln(w) + 1.3109$, 只需采取少量土样测得天然含水率, 就能推算出天然含水率下滑带土的黏聚力、内摩擦角。

2) 土样含水率由低变高, 垂直压力较小时, 压缩模量先减小后增加再减小。随着垂直压力增大, 压缩模量变化越来越明显, 而压缩系数与压缩模量相反。

3) 初始孔隙比都为 0.37, $e-p$ 曲线随着含水率的增加变化明显。很多水电站滑坡受现场勘探工作量的控制, 不能获得较系统的深部土样进行试验, 需取接近液态时试验做高压固结试验。

参考文献:

[1] F C DAI, J H DENG, L G THAM, et al. A large landslide in Zigui County, Three Gorges area[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41: 1233-40.
 [2] R W W ANSON, A B HAWKINS. Analysis of a sample containing a shear surface from a recent landslide South Cots-

wolds, UK[J]. Geotechnique, 1999, 49: 33-41.

[3] 李晓, 梁运收, 郑国东. 滑带土的研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(5): 484-90.
 [4] 宋炳辉, 谌文武, 吴玮江, 等. 锁儿头滑坡滑带土不同含水率大剪试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 77-84.
 [5] 王海东, 高昌德, 刘方成. 含水率对非饱和砂土力学特性影响的试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(1): 90-6.
 [6] 陈伟, 张吾渝, 马艳霞, 等. 压实黄土强度的三轴试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(2): 239-42.
 [7] ZHANG DINGWEN, LIU SONGYU, ZHANG TAO. Water content and modulus relationship[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2012, 28: 209-14.
 [8] GEORGE A. ATHANASOPOULOS. Results of direct shear tests on geotextile reinforced cohesive soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, 14: 619-44.
 [9] 吴民晖, 许德鲜, 祝学文. 不同含水率重塑黄土变形特性分析[J]. 路基工程 2015 (1): 55-9.
 [10] 张婉璐, 谢军, 徐锴, 等. 不同初始条件下高液限土的力学特性研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(4): 8-11.
 [11] 杜秀忠, 杨光华. 软土 $e-p$ 曲线的分析-拟合及应用[J]. 广东水利水电, 2005(6): 2-20.

(责任编辑 李 军)