

武鸣红黏土轴向压裂与单轴拉伸抗拉强度试验对比研究

曾召田^{1,2}, 徐云山¹, 唐双慧¹, 莫红艳¹, 张锦锦²

(1. 桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 广西大学 土木建筑工程学院防灾减灾研究所, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对红黏土抗拉特性正确认识的不足, 通过轴向压裂法和单轴拉伸法分别测定了武鸣红黏土的抗拉强度, 并对比分析了两种试验方法及其测定结果, 研究结果表明两种试验方法均能有效测定红黏土的抗拉强度, 且具有很好的一致性, 二者各有优缺点, 在此基础上, 探讨了武鸣红黏土抗拉强度与含水率之间的关系。试验结果可为正确认识红黏土的抗拉特性及裂缝处理方案设计提供合理的抗拉强度指标和相应依据。

关键词: 红黏土; 抗拉强度; 轴向压裂试验; 单轴拉伸试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0025-05

Comparative Study on Tensile Strength of Red Clay in Wuming Between Axial Fracture Test and Uniaxial Tension Test

ZENG Zhaotian^{1,2}, XU Yunshan¹, TANG Shuanghui¹, MO Hongyan¹, ZHANG Jinjin²

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving,
Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Research Institute of Preventing and Mitigating Disasters, College of Civil Engineering,
Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: Focusing on lacking of the correct understanding of tensile properties of red clay, the tensile strength of red clay from Wuming was measured by axial fracture test and uniaxial tension test respectively; and the similarities and differences between the two test methods and their results were compared. The result shows that both of them can determine the tensile strength effectively and the results have a good consistency, even though they have advantages and disadvantages. Furthermore, the relationship of tensile strength and water content of red clay was discussed. The results may provide the reference for a correct understanding of the tensile properties of the red clay and crack treatment program design.

Keywords: red clay; tensile strength; axial fracture test; uniaxial tension test

在土体强度特性研究中, 以往都比较侧重抗剪和抗压强度, 往往忽略对抗拉强度的研究。然而, 工程实践中常常出现的土体裂缝、土石坝心墙水力劈裂和土坡崩塌等破坏现象, 往往都与黏性土的抗拉特性有关。众多工程实践表明^[1], 黏性土的抗拉强度对土工建筑物的稳定性影响很大。

目前, 测定黏性土的抗拉强度一般采用以下方法: 单轴拉伸; 三轴拉伸; 径向压裂^[2]; 轴向压裂; 土梁弯曲法^[3]。在上述 5 种方法中, 前 2 种属于直接拉伸试验, 后 3 种属于间接拉伸试验。近年来, 许多学者对此进行了相关研究, 取得一定的研究成果: 张小江等^[4]利用单轴静动力拉压试验机研究了击实黏

收稿日期: 2015-10-28

修稿日期: 2015-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502284, 51568014); 广西自然科学基金项目(2013GXNSFBA019233); 广西建筑新能源与节能重点实验室资助课题(桂科能 15-1-21-1)

作者简介: 曾召田(1981—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 高级实验师, 主要从事特殊土的工程特性与微观机制研究。

E-mail: zengzhaotian@163.com

性土和纤维加筋土的静、动力抗拉和断裂特性;党进谦等^[5]研制了一台卧式单轴土工拉伸仪,并利用该仪器研究了非饱和黄土抗拉强度的特性^[6];朱俊高等^[7]通过试验研究了 3 种土料在不同击实功、试样由非饱和变化到饱和状态、不同制样含水率时的抗拉强度;张辉等^[8]研究了 3 种砾质土的抗拉强度随试样干密度、前期固结压力和含水率等的变化规律;曾召田^[9]和吕海波^[10]等利用研制的土工单轴拉伸仪研究了胀缩性土的抗拉强度;李春清等^[11]用轴向压裂系统研究了黄土在不同的加载速率、试样高度、制样方法、加载圆柱直径时的抗拉强度;王惠敏等^[12]研究了黏性土试样高度对抗拉强度的影响;周美丽等^[13]通过自制的单轴抗拉仪进行了氯盐渍土抗拉特性试验。

上述研究成果促进了土体抗拉强度在工程中的应用,但也表明对黏性土体抗拉特性的认识和了解有待于进一步深入,特别是测定黏性土抗拉强度的试验方法与设备亟待完善。本文采用轴向压裂法和单轴拉伸法分别测定了武鸣红黏土的抗拉强度,并

对比分析了两种试验方法及测定结果,为正确认识红黏土的抗拉特性及裂缝处理方案设计提供合理的抗拉强度指标和相应依据。

1 试验土样

试验用土取自广西南宁武鸣县里建华侨投资区域,取土深度大约 3.0 m,属于碳酸盐岩形成的典型残坡积红黏土,黏性较强,呈硬塑状态^[10]。

试验土样的基本物理力学指标如表 1 所示。由此可知,武鸣红黏土的液塑限、塑性指数和天然含水率均较高;抗剪强度不高,压缩系数较低;胀缩性主要表现为收缩,含水比 α_w 为 0.41,属坚硬型红黏土;取土时偶见裂隙,属致密状红黏土;其液限大于 50%,应判定为原生红黏土; ω_L/ω_p 大于 $(1.4 + 0.0066\omega_L)$,属于 I 类红黏土;红黏土复水后随着含水率增大而解体,胀缩循环呈现胀势,缩后土样高大于原始高,胀量逐次积累以崩解告终;风干复水,土的分解性、塑性恢复、表现出凝聚与胶溶的可逆性。

表 1 红黏土基本物理力学性质指标

密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	比重	孔隙比	饱和度 /%	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性 指数	含水比 α_w	稠度	饱和渗透 系数/(cm·s ⁻¹)
1.70	34.3	1.27	2.75	1.17	80.50	83.0	54.1	28.9	0.41	1.68	1.95×10^{-4}
压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	自由膨 胀率/%	无荷载 膨胀率/%	50 kPa 膨胀 率/%	膨胀力 /kPa	缩限 /%	线缩率 /%	体缩率 /%	收缩 系数
0.28	7.53	18.56	12.64	24	0.09	-2.7	5	32.5	0.38	3.68	0.21

2 试验原理和仪器设备

2.1 轴向压裂试验原理

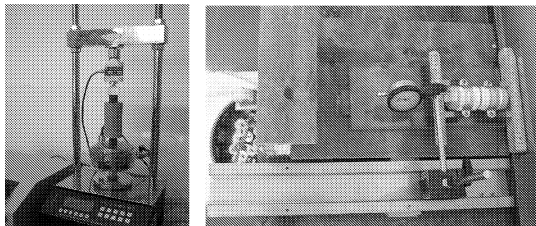
图 1(a) 中,压力 P 通过短柱衬垫持续施加到圆柱体试样,直至试样沿垂直轴压裂,抗拉强度计算公式^[14] 为:

$$\sigma_t = \frac{10P}{\pi(bh - a^2)}$$

(1)

式中: σ_t 为土体抗拉强度, kPa; a 为短柱衬垫半径, cm; b 为圆柱试件半径, cm; h 为圆柱试件高度, cm; P 为轴向所施加的荷重, N。

试验中,采用应变控制式三轴仪进行试验,通过加载荷载发生轴向匀速位移获取应力和加载圆柱的贯入深度;因此,选择合适尺寸的加载圆柱是至关重要的。



(a) 轴向压裂试验 (b) 单轴拉伸试验

图 1 试验仪器

为了选择合适尺寸的加载圆柱,笔者在试验前预先进行了圆柱直径大小对抗拉强度影响的尺寸效应试验:按相同含水率(34.3%)、相同干密度(1.27 g/cm³)制备 15 个中三轴试样,分成 5 组分别用直径 2 cm、2.5 cm、2.8 cm、3.0 cm 和 3.8 cm 的加载圆柱进行贯入,取每组 3 个值的平均值作为抗拉强度,试验结果见表 2。

表 2 抗拉强度与加载圆柱直径的关系

直径/cm	2.0	2.5	2.8	3.0	3.8
抗拉强度/kPa	40.51	55.75	57.59	59.25	75.6

由此可知,红黏土的抗拉强度随着加载圆柱直径的增加而递增,但直径在 2.6 cm~3.0 cm 之间变化时,抗拉强度变化比较平缓,因此可认为在此区间,抗拉强度受加载圆柱直径的影响较小。结合文献[15],冲压件的合适尺寸定为 2.8 cm。

2.2 单轴拉伸试验原理

如图 1(b)所示,单轴拉伸试验仪通过砝码施加拉力,土样拉断时的砝码重量即为土体能承受的最大拉力 $F(N)$;土样截面积为 $S(cm^2)$;则抗拉强度 $P_t(kPa)$ 的计算公式为:

$$P_t = \frac{F}{S} \tag{2}$$

单轴拉伸法的试验装置和方法详见文献[9]。

3 试样制备

3.1 轴向压裂试验

采用武鸣红黏土(过 0.5 mm 筛),按自然状态(干密度 1.27 g/cm³,含水率 34.3%)分 5 层制备 26 个中三轴试样:高度 $h = 125\text{ mm}$,直径 $d = 61.8\text{ mm}$ [16]。分别通过吸湿和脱湿过程使试样达到控制含水率(5%、8%、11%、14%、17%、20%、23%、26%、29%、32%、34%、38%、40%),焖 48 h(使土中水分均匀);每个含水率 2 个试样。

3.2 单轴拉伸试验

3.2.1 制样方法探讨

第 1 种方法:按三轴试验重塑土的制样标准,分 4 层制备高 $h = 8\text{ cm}$,直径 $\varphi = 3.91\text{ cm}$ 的试样,称为试样 1,制取的重塑样不用修剪直接可做试验,如图 2 所示。

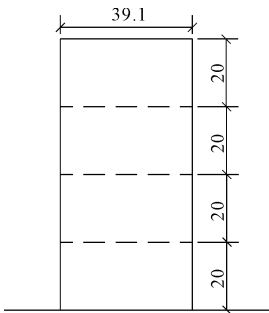


图 2 第 1 种方法制取重塑样分层尺寸(单位:mm)

第 2 种方法分两个步骤:第一步,采用 WJ-1 型手提击实仪分 2 层制备土饼(高 $h = 5\text{ cm}$,直径 $\varphi = 10$

cm);第二步,利用三轴取样器制取高 $h = 8\text{ cm}$,直径 $\varphi = 3.91\text{ cm}$ 的试样(如图 3 所示),称为试样 2。

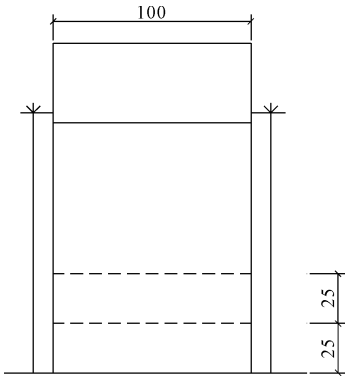


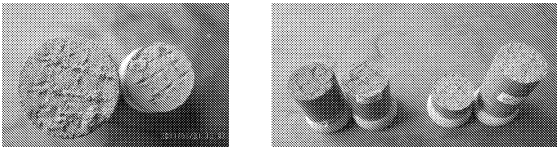
图 3 第 2 种方法制取重塑样分层尺寸(单位:mm)

采用武鸣风干红黏土(过 2.0 mm 筛),根据天然含水率 $\omega = 34.3\%$ 、干密度 $\rho_d = 1.27\text{ g/cm}^3$ 分别按上述 2 种方法制备试样,试样 1 制备 3 组,试样 2 制备 2 组,每组制备 3 个平行试样。

将制备好的 3 组试样 1 和 2 组试样 2 分别进行单轴拉伸试验,编号依次为试样 1-1、试样 1-2、试样 1-3、试样 2-1、试样 2-2,取每组试样的平均值作为试验结果,见表 3 和图 4。

表 3 单轴拉伸试验结果

试样编号	抗拉强度/kPa	破坏面距离试样顶面位置/cm
1-1	51.80	1.9~2.1
1-2	64.35	3.9~4.1
1-3	37.28	1.9~2.1
2-1	66.41	2.8~3.2
2-2	66.49	3.1~3.4



(a) 试样1-1 (b) 试样1-2、1-3

图 4 试样 1 的破坏面

分析上述制样方法和试验过程可知,试样 1 的分层面由于垂直于受拉方向的缘故,试验过程中该处往往成为整个试样的软弱界面,试样基本上在这些分层面处发生破坏(图 4),换句话说,分层面的黏结强度决定了试样的极限抗拉强度,从而致使 3 组试样的试验结果离散,抗拉强度值较低。相反,试样 2 由于分层面与受拉方向平行,消除了分层面的影响,因此 2 组试样的抗拉强度均较高且差异性小。综上所述,红黏土的单轴拉伸试验应采用第 2 种方

法制备试样。

3.2.2 试样制备

按上述第 2 种方法制备小三轴试样($\omega = 35\%$, $\rho_d = 1.27\text{ g/cm}^3$)。试样准备好后,让其自然风干到设定的控制含水率;为保证实验时各试样内的水分均匀分布,将风干好的试样放置于保鲜袋内并静置于保湿缸里密封 48 h;其中,控制含水率分别为 35%、33%、28%、24%、18%、11%、9%、6%,每个含水率 2 个试样。

4 试验步骤

4.1 轴向压裂试验

取制备好的中三轴试样,按图 1(a)所示装好试样和加载圆柱;启动电机,记录施加压力 P 和竖向变形 s ;直至试样沿垂直轴压裂,停止试验;试验过程如图 5 所示。

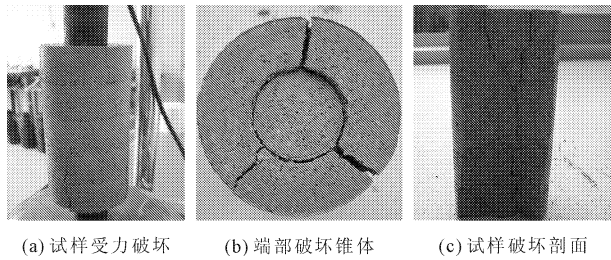


图 5 轴向压裂试验

试验完毕,采用烘干法测定每个试样的实际含水率;取每组 2 个试样的平均值作为该实际含水率下土样的抗拉强度。

4.2 单轴拉伸试验

取制备好的小三轴试样,按图 1(b)所示在拉伸仪上装好试样;通过砝码分级施加荷载,直到试样拉断为止;试样断裂时砝码盘和所施加砝码的重量即为试样所承受的拉力,通过公式(2)计算出土体的抗拉强度。

试验完毕,采用烘干法测定每个试样的实际含水率;取每组 2 个试样的平均值作为该实际含水率下土样的抗拉强度。

5 试验结果及分析

5.1 轴向压裂试验

试验结果见表 4。

由表 1 可知:(1) 含水率在 0.0% ~ 28.2% 之间变化时,武鸣红黏土的抗拉强度随着含水率的增加而线性递增;抗拉强度在含水率 28.2% 时出现峰值点,随后其值随着含水率的增加而线性急剧递减;

(2) 红黏土的抗拉强度较高,在含水率 5% ~ 30% 之间,抗拉强度在 100 kPa ~ 200 kPa 间变化。

表 4 轴向压裂试验结果

含水率/%	39.03	34.30	30.21	28.20	24.93	21.02
抗拉强度/kPa	6.66	51.25	189.97	226.02	195.23	157.27
含水率/%	16.97	12.23	9.67	5.29	2.68	—
抗拉强度/kPa	172.75	147.03	127.37	124.37	108.41	—

5.2 单轴拉伸试验

试验结果见表 5。

表 5 单轴抗拉试验结果

含水率/%	34.90	33.33	33.01	28.44	28.14	24.03
抗拉强度/kPa	61.11	109.28	144.86	196.63	216.81	196.00
含水率/%	18.18	11.29	10.94	8.77	5.84	—
抗拉强度/kPa	170.10	152.49	148.46	144.33	141.83	—

从表 5 可知,单轴拉伸试验与轴向压裂试验的试验结果反映的规律相一致:(1) 含水率在 0.0% ~ 28.14% 之间变化时,武鸣红黏土的抗拉强度随着含水率的增加而线性缓慢递增;抗拉强度在含水率 28.14% 时出现峰值点,随后其值随着含水率的增加而线性急剧递减;(2) 红黏土的抗拉强度较高,在含水率 5% ~ 33% 之间,抗拉强度在 100 kPa ~ 200 kPa 间变化。

5.3 两种试验方法的比较分析

5.3.1 试验方法评价

(1) 单轴拉伸试验需用专门的方法固定试件(本试验同时采用机械夹具法和黏结法),该法原理简单、操作简便、试验过程清晰明了、可直接观察试件拉伸、变形情况;但是该方法需要避免试验中产生的偏心作用力和靠近试件两端的应力集中等缺陷。

(2) 轴向压裂法试验操作方便,结果稳定,是测量土体抗拉强度一种主要的间接方法;但试验过程中需要注意选择合适的衬垫尺寸和试件高径比。

5.3.2 破坏方式比较

(1) 单轴拉伸试验中的试样在达到抗拉强度峰值后,从破坏面处瞬间断裂成两截,致使后续的应力和应变测试无法进行(应力 - 应变曲线见图 6)。

(2) 轴向压裂法试验中的试样由于是加载圆柱贯入,在达到抗拉强度峰值后,试样没有瞬时破坏,而是有一个缓慢渐进的破坏过程,其应力 - 应变曲线见图 6。

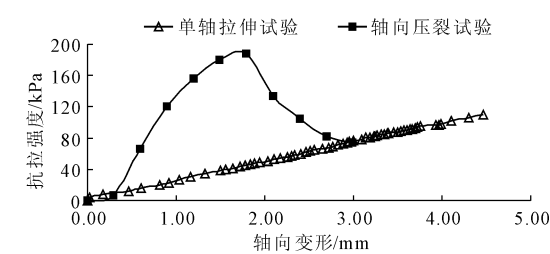


图 6 应力 - 应变曲线

5.3.3 试验结果比较

刘华贵^[17]对武鸣红黏土(过 5 mm 筛)进行了重型击实试验,试验结果见图 7,由图 7 可知红黏土最优含水率为 28.3%。

因此,对于不同含水率下红黏土的抗拉强度,单轴拉伸试验和轴向压裂试验的结果相近,且两者具有一致的变化规律:抗拉强度的峰值出现在最优含水率 28.3%附近;含水率低于 28.3%时,随着含水率的递增,抗拉强度缓慢增加;反之,含水率高于 28.3%时,随含水率的递增,抗拉强度迅速减少,如图 8 所示。由此可知,单轴拉伸试验和轴向劈裂试验都能有效测定红黏土抗拉强度。

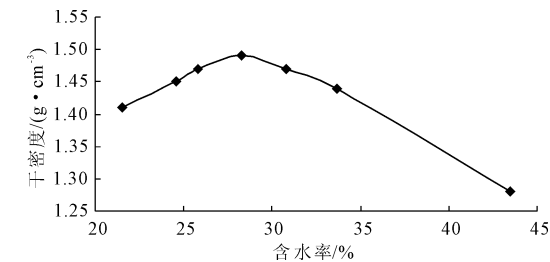


图 7 击实曲线

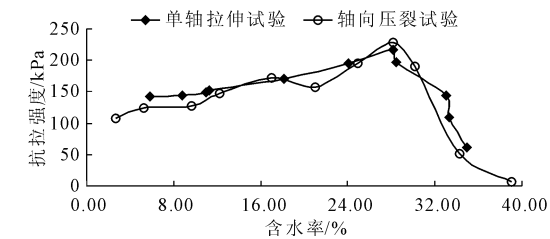


图 8 抗拉强度与含水率的关系曲线

图 8 反映了红黏土的抗拉强度与含水率的关系,笔者在文献[10]中详细探讨了出现上述变化规律的原因。

6 结 论

(1) 轴向压裂法试验成果稳定,重现性好,且具有制样方便、设备简单等优点,是一种测量土体抗拉强度的常用间接方法;试验过程中需要注意选择合适的衬垫尺寸和试件高径比。

(2) 单轴拉伸试验直接测得试样的拉应力和拉应变,具有操作方便、试验数据易处理等特点;但试验中易产生偏心力和应力集中现象;同时应采用第 2 种方法制备试样,减弱分层面面对试验结果的影响。

(3) 单轴拉伸试验和轴向压裂试验都能够有效测定红黏土的抗拉强度。

参考文献:

[1] 黄文熙.土的工程性质[M].北京:水力电力出版社,1983.

[2] Chen W F. Limit Analysis and Soil Plasticity[M]. New York, USA: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.

[3] 李广信,张丙印,介玉新.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.

[4] 张小江,周克骧,周景星.单轴静动拉压试验仪的研制和纤维加筋土断裂特性试验[J].大坝观测与土工测试,1997,21(4):35-38.

[5] 党进谦,张伯平,熊永.单轴土工拉伸仪的研制[J].水利水电科技进展,2001,21(5):31-32.

[6] 党进谦,李靖,张伯平.黄土单轴拉裂特性的研究[J].水力发电学报,2001(4):44-48.

[7] 朱俊高,梁彬,陈秀鸣,等.击实土单轴抗拉强度试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2007,35(2):186-190.

[8] 张辉,朱俊高,王俊杰,等.击实砾质土抗拉强度试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增2):4186-4190.

[9] 曾召田,吕海波,赵艳林,等.简单元轴拉伸仪的研制及制样方法探讨[J].工程地质学报,2012,20(suppl.):622-626.

[10] 吕海波,曾召田,葛若东,等.胀缩性土抗拉强度试验研究[J].岩土力学,2013,34(3):615-620.

[11] 李春清,梁庆国,吴旭阳,等.重塑黄土抗拉强度试验研究[J].地震工程学报,2014,36(2):233-238,248.

[12] 王惠敏,张云,鄢丽芬.粘性土试样高度对抗拉强度的影响[J].水文地质工程地质,2012,39(1):68-71.

[13] 周美丽,侯炜.氯盐渍土抗拉强度特性的试验研究[J].郑州轻工业学院学报(自然科学版),2012,27(4):21-25,39.

[14] Fang H Y, Chen W F. Further study of double-punch test of tensile strength of soils[C]//Proc. the 3rd Southeast Asian Conference on Soil Engineering. [s.l]:[s.n], 1972.

[15] 郭飞,何昌荣,朱安龙,等.黏性土抗拉强度的轴向压裂法试验研究[J].水电站设计,2005,21(2):66-68,77.

[16] 中华人民共和国建设部.土工试验方法标准:GB/T50123-1999[S].北京:中国计划出版社,1999.

[17] 刘华贵.土中水的形态对物理力学性质的影响[D].南宁:广西大学,2010.