

# 花岗岩残积土抗拉强度试验研究\*

汤连生<sup>1</sup>, 桑海涛<sup>2,3</sup>, 侯涛<sup>4</sup>, 宋晶<sup>1,3</sup>, 罗珍贵<sup>1,3</sup>, 陈浩昆<sup>1,3</sup>

(1. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东广州 510275;

2. 中山大学工学院, 广东广州 510275;

3. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东广州 510275;

4. 广东省工程勘察院, 广东广州 510510)

**摘要:** 在传统工程地质环境及土力学性质的研究中, 土体的抗拉强度常常被忽略, 而其实抗拉张强度在评估非饱和红土的崩岗、崩塌及土坝、堤防、路基、垃圾填埋场等边坡的稳定性方面, 起着决定性的作用。文章利用自行研制的土体单轴抗拉强度试验仪, 对华南地区广泛分布的两种花岗岩残积土的抗拉强度进行了试验研究, 同时通过快剪试验得到了黏性花岗岩残积土的抗剪强度参数, 并对花岗岩残积土的抗拉强度机理进行了分析。试验结果表明, 花岗岩残积土抗拉强度与含水量呈负相关关系, 并且随着含水量的增大, 抗拉强度的减小幅度会随干密度大而增大; 抗拉强度与干密度呈正相关关系, 并且随着干密度的增大, 抗拉强度的增大幅度会随含水率增大而增大; 砂质花岗岩残积土(粉黏土质砂)的抗拉强度普遍低于黏性花岗岩残积土(含砂黏土)的抗拉强度; 黏性花岗岩残积土(含砂黏土)的抗拉强度与其粘聚力呈正相关关系, 与内摩擦角相关性不大。花岗岩残积土的抗拉强度机理分析表明, 土颗粒间的联结作用力是土体抗拉强度主要来源, 包括土颗粒间的直接接触联结作用力、土颗粒间的微观非接触联结作用力和通过胶结物或气液收缩膜作用产生的间接接触联结作用力。

**关键词:** 花岗岩残积土; 抗拉强度; 单轴抗拉强度试验仪; 抗拉强度机理

**中图分类号:** TU432; TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2014)06-0098-08

## Experimental Study on Tensile Strength of Granite Residual Soil

TANG Liansheng<sup>1</sup>, SANG Haitao<sup>2,3</sup>, HOU Tao<sup>4</sup>, SONG Jing<sup>1,3</sup>, LUO Zhengui<sup>1,3</sup>, CHEN Haokun<sup>1,3</sup>

(1. School of Earth Sciences and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Guangdong Province Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Guangzhou 510275, China;

4. Guangdong Engineering Investigation Institute, Guangzhou 510510, China)

**Abstract:** Tensile strength is often ignored in traditional research of engineering geology and soil mechanics, however, tensile strength plays a critical role in the stability assessment of red soil collapse, soil dam, embankment, subgrade and rubbish buried field. The tensile strength test apparatus developed by authors is used to explore two types of granite residual soil existing widely in South China, and shear strength parameters of cohesive granite residual soil are obtained through direct shear test, then the mech-

\* 收稿日期: 2014-08-10

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40872205); 全国高等学校博士学科专项科研基金资助项目(20120171110031); 广东省自然科学基金资助项目(07003738); 广东省科技计划资助项目(2008B030303009)

**作者简介:** 汤连生(1963年生)男; 研究方向: 地质工程、岩土力学、岩土化学力学; 通讯作者: 桑海涛; E-mail: 772192033@qq.com

anism of granite residual soil's tensile strength is analysed. The results show that granite residual soil's tensile strength increases with the rising water content and dry unit weight, however the range becomes less with the rising dry unit weight and water content; the tensile of sandy granite residual soil is usually lower than that of cohesive granite residual soil, and cohesive granite residual soil's tensile strength increases with cohesion, but has little relation with angle of internal friction. The analysis of granite residual soil's tensile strength indicates that joining forces between soil particles are the main source of tensile strength, which includes joining forces with direct contact, microcosmic joining force without direct contact, and joining force aroused through cement or Gas-Liquid shrink film.

**Key words:** granite residual soil; tensile strength; uniaxial tensile strength tester; mechanism of tensile strength

在传统工程地质环境及土力学性质的研究中,通常土体不主动作为抗拉材料使用,认为土的抗拉强度很小或几乎视为零<sup>[1]</sup>,实际工程中土体的抗拉强度常常被忽略,多侧重于抗压、抗剪,对抗拉张的研究较少<sup>[2-3]</sup>。然而,许多工程问题中的土体会发生开裂现象,诸如花岗岩残积土中常见的崩岗及滑坡孕育过程中坡顶几乎都产生的张拉裂缝,都与其抗拉张特性有关。抗拉张强度在评估非饱和红土的崩岗、崩塌及土坝、堤防、路基、垃圾填埋场等边坡的稳定性方面,起着决定性的作用,黄文熙(1983)早就指出抗拉张性质是黏性土的一个比较重要的力学性质<sup>[4]</sup>。以往试验研究表明<sup>[3,5]</sup>天然非饱和黏性土的抗拉强度一般可达到十几到几十 kPa,从抗拉力学角度,土体的抗拉强度几乎相当于同等面积距锚杆的抗拔力。由此可见,抗拉强度在土体稳定性中起着相当重要的作用,忽略土的抗拉张强度显然是对土的强度认识上的不全面。

土的抗拉张特性的研究始于 20 世纪 50 年代,兴趣点主要在探索土的抗拉强度基本测试方法上<sup>[6-9]</sup>,该阶段从 20 世纪 50 年代至 70 年代。Tchbotarioff 等(1953)最早采用单轴拉伸试验,对矿物组成不同的黏性土开展了试验研究,得出了主要几种黏土矿物抗拉强度的基本特性<sup>[6]</sup>。而后不久,三轴拉伸试验被用于测试研究黏性土拉伸过程中的应力应变特征<sup>[9-21]</sup>,混凝土抗拉强度间接测试方法—巴西劈裂法试验也被引进研究含水率对土体抗拉强度的影响<sup>[12]</sup>。Snyder 等采用气动断裂法技术测量了非饱和土的拉伸强度<sup>[13]</sup>。进入 21 世纪后,人们更加重视探索和研究新的抗拉强度测试方法,如研发了新型卧式单轴土工拉伸仪<sup>[14-15]</sup>、新型卧式三轴拉伸仪<sup>[16-17]</sup>、圆环内壁施加径向压应力的拉裂法<sup>[18-19]</sup>、直剪仪上改制卧式单轴拉伸试验仪<sup>[20]</sup>、改进无侧限渗透仪器<sup>[21-22]</sup>等、改装超微型贯入仪等<sup>[23]</sup>。

从已有的研究可以看出,目前关于土体抗拉强度的测试,与抗剪强度相比,到还没有一个统一的标准试验仪器,而且研究对象多集中在压实黏土、加筋土、黄土、膨胀土和土石坝中的堆土料等土体,对其他的特殊土体还缺乏研究。本文在目前已有的测量方法的基础上,自行研制了土体单轴抗拉强度试验仪,并用此仪器对华南地区广泛分布的两种花岗岩残积土的抗拉强度进行了研究,同时通过快剪试验得到了黏性花岗岩残积土的抗剪强度参数,最后对花岗岩残积土的抗拉强度机理进行了分析。

## 1 土体单轴抗拉强度试验仪<sup>[24]</sup>

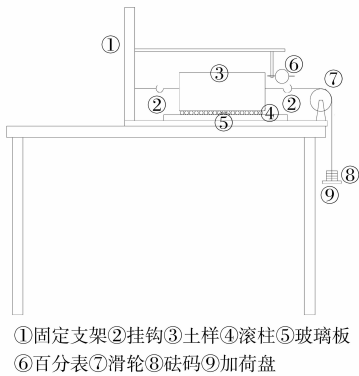
### 1.1 试验仪

本试验仪是一种采用直接拉伸试验测试土体抗拉强度的方法,属于土体抗拉强度测试的创新技术。整个试验仪器装置如图 1 所示,可分为:固定装置、加荷装置和模具三个部分,主要由支架、滑轮、砝码、挂钩、加荷盘、百分表、玻璃板和滑柱等组成。

总结以往土体单轴抗拉强度的试验方法,试验能否成功或能否取得好的效果,主要看如何将拉力施加在土样上。目前,采用最多的方法是将土样两端固定在施加拉力的仪器上,对土样两端的固定有三种方式,机械夹具法、粘结剂固定法和冻结端头法。机械夹具法是根据试样的规格制作相应的夹具,使试样两端固定在施力仪器上,该方法在固定试样时操作较为复杂。胶结法是用环氧树脂等胶结材料将试样两端固定在施力仪器上,由于土样可能不平整,会使胶结效果不佳,并且使用后不易清除。冻结端头法是采用冻结的方法对试样两端固定,由于所需制冷设备较为复杂,在实际当中应用不多。对于将试样两端固定在施加拉力的设备上,无论采取何种方法,都有可能在施加拉力过程中沿

着夹具或胶结部位发生破坏。

为了避免土样在施加拉力过程中沿着夹具或胶结部位发生破坏的现象发生, 本发明设计了一种专用的模具, 根据土工试验规程的规定, 在进行土工试验时, 制作试样的最短边长度不应小于土料最大粒径 (直径) 的 5 倍, 本发明中直接拉伸试样受拉部位尺寸为  $3.5\text{ cm} \times 5.0\text{ cm}$ , 两端固定段尺寸为  $7.0\text{ cm} \times 5.0\text{ cm}$ 。试样模具如图 2 所示, 将土样制成“中间窄两边宽”的规格, 这样能够使试样在中间发生断裂, 避免了以往由于固定端头时在试样两端发生的破坏。并且该模具使土样在模具内完成制作, 直接进行拉伸试验, 这样就消除了以往人们先制好试样, 再将试样取出进行拉伸试验带来的应力释放。同时在模具的下方有底板支撑, 减少了以往卧式拉伸试验时, 在土样中部由于土体自重的影响导致试样的压断。



①固定支架②挂钩③土样④滚柱⑤玻璃板  
⑥百分表⑦滑轮⑧砝码⑨加荷盘

图 1 单轴抗拉强度试验装置

Fig. 1 Uniaxial tensile strength tester

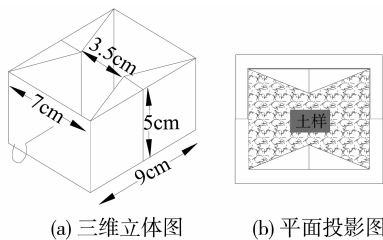


图 2 试验模具

Fig. 2 Test mold

## 1.2 试验方法

1) 将装有试样的模具放在光滑玻璃板上, 为了减小试样与玻璃板间的摩擦, 在玻璃板顶部放置滚柱, 并保证试样的轴线处于拉伸的正中心线上, 一端通过挂钩固定在支架上, 另一端通过挂钩与穿过滑轮的细线连接在加荷盘上, 安装百分表并调

零。通过试验发现, 整个拉伸过程中细绳与滑轮之间, 模具与滚柱之间产生的摩擦效应很小, 可以不计拉伸过程中摩擦力的影响。

2) 拉伸试验是通过添加砝码来实现对试样的拉伸, 确定添加砝码的大小至关重要。添加砝码的等级根据不同土样制定。加载时, 先添加大的砝码, 并逐渐减少, 每添加一级砝码, 等试样稳定  $2 \sim 3\text{ min}$  后, 再进行下一级加载。

3) 逐级添加砝码进行拉伸试验, 试验过程中, 测定每次加载的荷载重, 观察试样在拉伸过程中的变化, 直至试样断裂, 停止试验。由于试样断裂是突然发生的, 当添加最后一个砝码, 土体立刻断裂。

4) 为了能更准确测出破坏时的最大荷载, 将最后一级荷载 (假设为  $n\text{ kg}$ ) 算成一半, 再将先前荷载 (假设为  $m\text{ kg}$ ) 累加, 求出最大拉力值, 在该拉力下计算出的轴向应力即为土样的抗拉强度。

5) 试验结束后, 记录相关数据, 拆除挂钩装置和荷载盘, 取下试样, 清理模具。

6) 进行土样抗拉强度及其变动范围的计算。根据公式

$$\sigma_t = \frac{T}{A_0} \times 10 \quad (1)$$

可以计算出土样的抗拉强度为

$$\sigma_t = \frac{(m + n/2)g}{A_0} \times 10 \quad (2)$$

式中,  $g$  为重力加速度, 取为  $9.8\text{ N/kg}$ 。

若土样的破坏是突然发生的, 其抗拉强度的可能变动范围为

$$\left[ \frac{mg}{A_0} \times 10, \frac{(m + n)g}{A_0} \times 10 \right] \quad (3)$$

7) 综合考虑公式 (2) 计算得出的抗拉强度  $\sigma_t$  和公式 (3) 得出的土样抗拉强度可能的变动范围, 讨论强度值  $\sigma_t$  的可信程度。

## 2 花岗岩残积土的抗拉强度

### 2.1 试样制备

采样点位于广州市东北部的凌塘新村附近, 根据广东省区域地质资料, 此处地表出露着燕山二期的侵入花岗岩, 花岗岩残积土分布广泛。本次选取一处风化程度较为完整的坡体进行取样, 选取了黏性土和砂性土两种土性不同的风化层。将土样带回实验室按照土工试验标准进行相关试验<sup>[25]</sup>, 得出土样物理特性见表 1, 粒度成分分析见表 2。根据

参考文献 [26] 所提供的综合定名法，将不同风化层的两种花岗岩残积土分别定名为含砂黏土和粉黏土质砂。

对取回的两种不同土样，本次试验每种土样分别配置 3 组不同含水率和不同干密度的试样，每组

包括同种条件下的 4 个试样，分别进行拉伸试验，试验结果取平均值。设定干密度分别为  $1.4 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.5 \text{ g/cm}^3$  和  $1.6 \text{ g/cm}^3$ ，含水率分布为 14%、18%、20%、和 24%。

表 1 土样物理特性指标  
Table 1 Physical properties of soils

土样名称	天然含水量 $\omega/\%$	天然干密度 $\rho/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	天然孔隙比 $e$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	土粒比重 $G_s$
含砂黏土	20.52	1.51	0.74	17.93	-0.10	2.63
粉黏土质砂	22.26	1.57	0.66	14.69	-0.07	2.61

表 2 土样粒度成分分析  
Table 2 Particle size composition of soils

土样类别	粒组百分含量/%				
	$\geq 2$	2 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	0.25 ~ 0.075	$\leq 0.075$
	砂砾组				粉黏粒组
含砂黏土	5.9	8.2	10.16	9.83	66
粉黏土质砂	10.18	19.65	21.54	18.1	30.53

根据土工试验规程<sup>[25]</sup> 预先将土样烘干、捣碎并过筛（对黏性土过 2 mm 筛，对砂性土过 5mm 筛），根据已知干密度和模具的体积，按公式 (4)，计算出所需干土质量，再根据求出的干土质量和已知的含水率，按公式 (5)，计算出加人的质量，将需要添加的水量均匀洒入风干土样，配好水后，将土样放入不吸水的托盘中，并用保鲜膜将其包住，放置在室温的保温箱内养护 2 ~ 3 天，待土样养护好后，采用分层击实法，将试样压入模具中，压实结束后，将试样模具用保鲜膜包起来，在室温下静置一段时间。

$$m_s = \rho_d \times V \quad (4)$$

$$m_w = m_s \times w \quad (5)$$

式中： $m_s$  为干土质量 (g)； $\rho_d$  为预先设定的干密度 ( $\text{g/cm}^3$ )； $V$  为模具的体积 ( $\text{cm}^3$ )，本次试验  $V = 201.875 \text{ cm}^3$ ； $m_w$  为加水量 (g)； $w$  为预先设定的含水量。

按照上述步骤分别制备不同干密度和不同含水率的试样。制备不同干密度的试样时，对于干密度大的采用重击并多分层击实，对于干密度小的采用轻击并少分层击实。制成的试样如图 3 所示。

## 2.2 试验方法

2.2.1 抗拉强度试验 采用上文介绍的土体单轴抗拉强度试验仪按照相应的试验方法进行试验，针对本次的试验条件和土样，制定级加载的砝码等级分别为 0.1、0.282、0.321、0.347 和 0.412 kg。

2.2.2 抗剪强度试验 抗剪强度试验采用 ZJ-2 型应变控制式直剪仪进行快剪试验。试样采用已完成抗拉强度试验所用的黏性花岗岩残积土（含砂黏土），按照土工试验标准重新制备干密度为  $1.5 \text{ g/cm}^3$ ，含水率分别为 14%、18%、20% 和 24% 的 4 组重塑土样<sup>[25]</sup>，试样的制备过程主要包括烘干、击实等程序。对每组试样得到的剪应力，按照库伦-摩尔公式求出粘聚力与内摩擦角，试验结果如表 3。

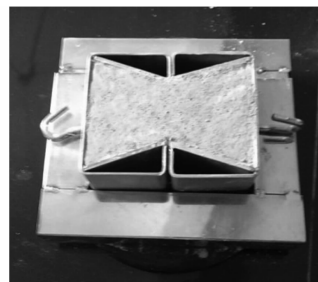


图 3 制成的试样

Fig. 3 Processed sample

表 3 抗剪强度试验成果表  
Tab. 3 Shear strength test results

试样 编号	含水率 / %	干密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )
1	13.67	1.5	25.13	10.93
2	17.96	1.5	23.13	9.21
3	19.90	1.5	17.23	9.55
4	23.68	1.5	13.61	9.47

## 2.3 试验结果

2.3.1 含水量对土体抗拉强度的影响 自然界中土体的含水量受降雨或地下水变化等因素影响, 会经常发生改变。土中含水量的变化会导致土体粒间吸力发生变化, 并影响土颗粒之间相互接触关系, 进而影响土体的抗拉强度, 因此分析含水量对土体抗拉强度的影响具有重要意义。整理试验结果得到两种花岗岩残积土样含水量与其抗拉强度的关系如图 4。

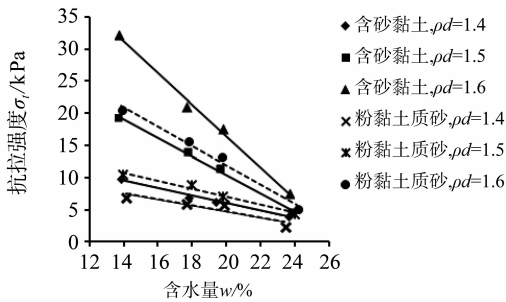


图 4 两种花岗岩残积土样含水量与其抗拉强度的关系  
Fig. 4 Relationship between two kinds of granite eluvial soil samples' moisture content and their tensile strength

从图 4 可以看到, 对于两种不同类型的花岗岩残积土, 其抗拉强度与含水量呈负相关关系, 并且随着含水量的增大, 抗拉强度的减小幅度会随干密度大而增大。这是由于在干密度相近的条件下, 土中含水量的增大, 一方面使土颗粒间的接触距离增大, 从而导致土颗粒间存在的吸力降低, 进而使土体抗拉强度降低; 另一方面含水率的增大也加大了土颗粒间相互接触的润滑程度, 当土体受到拉应力作用时, 土颗粒间易于滑动, 从而导致抗拉强度降低。这反映了水土作用对花岗岩残积土力学性质具有重要影响<sup>[27-28]</sup>。

2.3.2 干密度对土体抗拉强度的影响 干密度可以反映土体的密实度, 决定着土颗粒之间的相互接触距离和土颗粒周围相接触的颗粒数目, 对分析土体强度有重要意义。

从图 5 可以看到, 对于两种不同类型的花岗岩残积土, 其抗拉强度与干密度呈正相关关系, 并且随着干密度的增大, 抗拉强度的增大幅度会随含水率增大而增大。这是由于在含水率相近的条件下, 干密度增大, 一方面使土体孔隙度降低, 土体颗粒间接触距离变短, 导致土颗粒间的相互作用力增强, 进而使土体抗拉强度增大; 另一方面由于干密度的增大, 使单位面积土体内土颗粒间的接触数增多, 接触数目越多, 土颗粒间的相互作用力越强, 从而使抗拉强度增大。

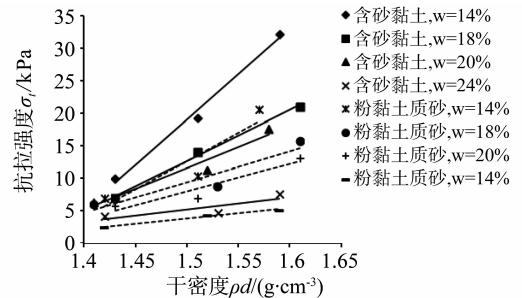


图 5 两种花岗岩残积土样干密度与其抗拉强度的关系  
Fig. 5 Relationship between two kinds of granite eluvial soil samples' dry density and their tensile strength

2.3.3 两种花岗岩残积土抗拉强度的对比分析 从图 4 和图 5 可以看到, 在干密度和含水率相同的条件下, 砂质花岗岩残积土 (粉黏土质砂) 的抗拉强度普遍低于黏性花岗岩残积土 (含砂黏土) 的抗拉强度。

这是由于土体中土颗粒的大小和排列方式对土体强度有重要影响。一般情况下, 黏性土中, 黏土颗粒半径较小, 这样使得单位面积内, 土颗粒间接触数目较多, 土颗粒间接触距离较短, 导致颗粒间的作用力较大, 从而抗拉强度较大; 对于砂性土, 土颗粒半径较大, 比表面积较小, 土颗粒间相互作用力较小, 因此, 抗拉强度较小。

2.3.4 抗拉强度与抗剪强度参数之间的关系 土体抗剪强度参数粘聚力一般由三部分组成, 即原始粘聚力、固化粘聚力和毛细粘聚力<sup>[29]</sup>, 而从土体受拉伸破坏的微观机理来说, 土体拉伸破坏需要克服的力, 主要是指土中的颗粒之间的原始粘聚力和固化粘聚力。同时由于土颗粒形状是不规则, 所以, 土体在拉伸破坏过程中会受到土颗粒之间摩擦作用产生摩擦阻力的影响。因此, 有必要探讨土体抗剪强度参数与其抗拉强度之间的关系。

由图 6 可以看出, 黏性花岗岩残积土 (含砂

黏土)的抗拉强度与其黏聚力呈正相关关系,与内摩擦角相关性不大。这反映出,对于黏性土而言,其抗拉强度的主要组成部分是凝聚力。

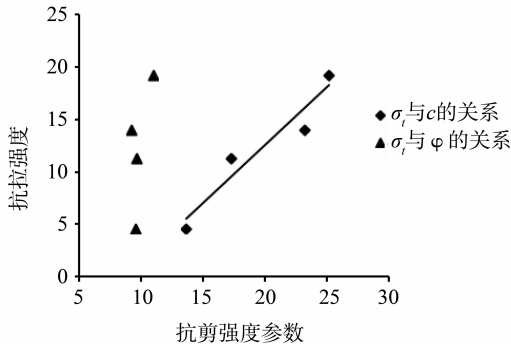


图 6 黏性花岗岩残积土抗拉强度与其抗剪强度参数关系  
Fig. 6 Relationship between adhesive granite eluvial soil samples' tensile strength and shear strength parameters

### 3 花岗岩残积土抗拉强度机理

花岗岩残积土的抗拉强度主要源于土颗粒间的联结作用,包括土颗粒间的直接接触联结、土颗粒间的微观非接触联结和通过胶结物或气液收缩膜作用产生的间接接触联结,如图 7 所示。一般情况下,前两种联结对土体强度特征影响不大,而后一种联结则控制着土体的强度特征。

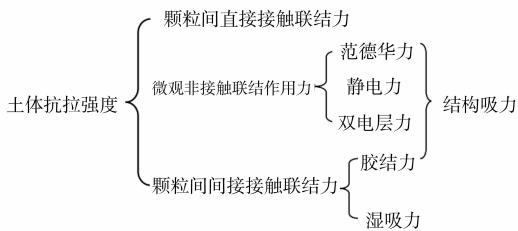


图 7 花岗岩残积土抗拉强度构成

Fig. 7 Granite eluvial soil tensile strength structure

当土体受到拉张破坏时,主要是指土颗粒间的联结处发生破坏。本次试验时土体拉伸破坏后的断裂面如图 8 所示,其拉伸破坏的断裂面并不是平直的,而是凹凸不平的,说明土体拉伸破坏时并没有破坏土颗粒本身,而是沿着土颗粒间的联结作用力最小方向发生的,从而进一步表明土颗粒间的联结作用力是土体抗拉强度主要来源。

湿吸力和结构吸力是作者在 2000 年为研究非饱和土强度理论提出的<sup>[30-31]</sup>。湿吸力是土体中气、液、固三相共同作用的结果,其作用示意如图 9 所

示,其中  $T_s$  为表面张力。图 9 中,固液接触处形成的表面张力  $T_s$  可以分为竖向分量和水平分量,其中竖向分量  $N$ ,并不直接对土颗粒产生作用,它对土体的强度特征没有贡献。而水平分量,即为湿吸力  $S_a$ <sup>[32]</sup>。它能够作用于土颗粒之间,使土颗粒之间产生一个附加的压应力,它对土体的抗拉强度特征有重要影响。

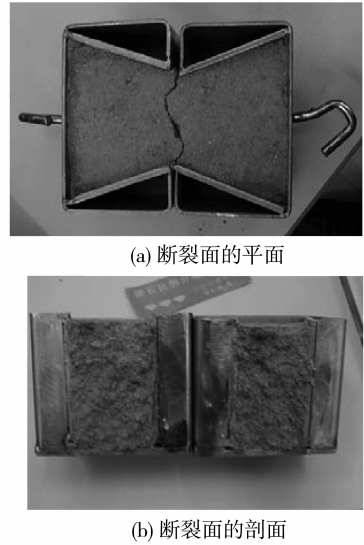


图 8 土体拉伸破坏断裂面特征

Fig. 8 Soil tensile fracture characteristics

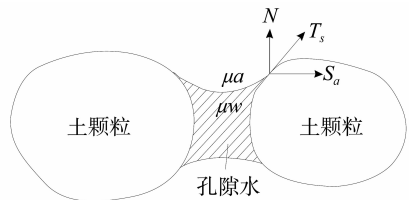


图 9 土体中湿吸力作用示意图

Fig. 9 Absorbed suction and in soil

结构吸力是土颗粒间内拉应力的表征,主要包括胶结力、偶极力、磁性力、表面力(双电层间吸力)及离子-静电力等,都受到含水量、土体颗粒组成和排列以及孔隙水溶液的化学性质等因素的影响,但各力受到的影响程度大小不一。根据结构吸力的大小是否受到含水量的变化影响,可将结构吸力划分为本征结构吸力与可变结构吸力<sup>[29-30]</sup>。本文主要探讨其中的胶结力。

土体内的胶结联结作用力是指土颗粒间被胶结物所联结而产生的内拉应力。对于花岗岩残积土的胶结联结作用,主要是指以游离氧化铁作为胶结物与粘土矿物通过氢键联结,并且两者之间主要以点

接触的方式进行联结<sup>[33]</sup>, 如图 10 所示。虽然这种胶结联结作用范围小, 但产生的键能却很高, 能够形成很高的联结力, 对土体强度特征起着重要作用。

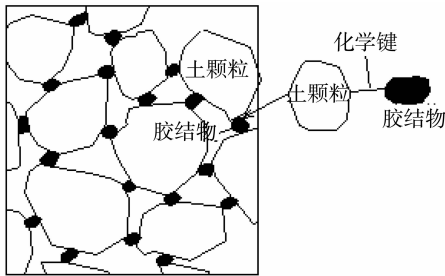


图 10 土体内的胶结联结作用

Fig. 10 Cementation coupling effect in soil

关于花岗岩残积土形成的胶结氢键联结作用, 目前研究较多的是游离氧化铁中针铁矿与粘土矿物中高岭土之间的氢键联结, 在花岗岩残积土中将单个针铁矿团粒与单个高岭土单晶的联结称为胶结单元<sup>[33-35]</sup>, 土中的胶结联结作用力实质上就是所有胶结单元作用力的总和。

## 4 结 论

1) 抗拉强度在土体稳定性中起着相当重要的作用, 应充分重视和加强土的抗拉张强度的研究。

2) 花岗岩残积土抗拉强度与含水量呈负相关关系, 并且随着含水量的增大, 抗拉强度的减小幅度会随干密度大而增大; 抗拉强度与干密度呈正相关关系, 并且随着干密度的增大, 抗拉强度的增大程度会随含水率增大而增大; 砂质花岗岩残积土(粉黏土质砂)的抗拉强度普遍低于黏性花岗岩残积土(含砂黏土)的抗拉强度; 黏性花岗岩残积土(含砂黏土)的抗拉强度与其粘聚力呈正相关关系, 与内摩擦角相关性不大。

3) 花岗岩残积土的抗拉强度主要源于土颗粒间的联结作用, 包括土颗粒间的直接接触联结、土颗粒间的微观非接触联结和通过胶结物或气液收缩膜作用产生的间接接触联结。

### 参考文献:

[1] 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.

[2] 汪明元, 于嫣华, 龚晓南. 含水量对加筋膨胀土强度与变形特性的影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版,

2009, 48(6): 138-142.

[3] 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.

[4] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.

[5] 李积彦, 何昌荣, 唐辉. 粘性土抗拉强度试验对比研究[J]. 路基工程, 2007, 12(2): 104-105.

[6] TCHBOTARIOFF G P, WARD E R, DEPHILIPPE A A. The tensile strength of distributed and recompacted soils [C] // Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1953.

[7] LEONARD G A, NARAIN J. Flexibility of clay and cracking of earth dams[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(S2): 47-70.

[8] FANG H Y, CHEN W F. New method for determination of tensile strength of soils[J]. Highw Res Rec, 1971, 34(20): 62-68.

[9] BISHOP A W, GARGE V K. Drained tension test on London clay[J]. Geotechnique, 1969, 19(2): 310-313.

[10] PARRY R H G. Triaxial Compression and extension tests on remolded saturated clay [J]. Geotechnique, 1960, 4(10): 160-180.

[11] 陈沛然, 张亚芳, 李根. 基体强度对钢纤维单丝拉拔性能的影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(6): 68-75.

[12] NARAIN J, RAWAT P C. Tensile strength of compacted soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(6): 2185-2190.

[13] SNYDER V A, MILLER R D. Method for measuring the tensile strength of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(6): 1369-1374.

[14] TAMRAKAR S B, MITACHI T, TOYOSAWA Y, et al. Development of a new soil tensile strength test apparatus[J]. Geotechnical Special Publication, 2005, 25(1): 2291-2300.

[15] IBARRA S Y, MCKYES E. Measurement of tensile strength of unsaturated sandy loam soil[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 8: 115-123.

[16] 张琰. 高土石坝张拉裂缝开展机理研究与数值模拟[D]. 北京: 清华大学. 2009.

[17] 天砾, 许婷华, 赵铁军, 等. 应变硬化性水泥基复合材料-SHCC 韧性性能试验研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(S): 181-182.

[18] TANG G X, GRAHAM J. A method for testing tensile strength in unsaturated soils [J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(3): 377-382.

- [19] MOSADDEGHI M R, HAJABBASI M A. Tensile strength of sand, palygorskite and calcium carbonate mixtures and interpretation with the effective stress theory[J]. *Geoderma* 2006, 134:160-170.
- [20] 党进谦,张伯平,李靖. 黄土单轴拉裂特性的研究[J]. *水力发电学报*,2001,26(4):44-48.
- [21] KIM T H, KIMFACTORS T H. Influencing crack-Induced tensile strength of compacted soil[J]. *American Society of Civil Engineers*. 2012,24:315-320.
- [22] KIM T H, KIM E C K. Tensile strength characteristics of contaminated and compacted sand-bentonite mixtures [J]. *Environ Geol*,2007,52:653-661.
- [23] 冉龙洲,宋翔东. 干燥过程中膨胀土抗拉强度特性研究[J]. *工程地质学报*,2011,19(4):620-625.
- [24] 汤连生. 土体抗拉强度测试方法:中国, CN2013105460030[P]. 2013-10-29.
- [25] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京:水利水电出版社,1999.
- [26] 吴能森. 花岗岩残积土的分类研究[J]. *岩土力学*, 2006,27(12):2299-2304.
- [27] 王洋,高全臣,汤连生. 水土作用对基坑支护结构可靠度分析的影响[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2006,45(2):109-114.
- [28] 王洋,汤连生,高全臣,等. 水土作用模式对残积红粘土力学性质的影响分析[J]. *中山大学学报:自然科学版*,2007,46(1):128-132.
- [29] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [30] 汤连生,王思敬. 湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J]. *岩土工程学报*,2000,22(1):83-88.
- [31] 汤连生. 结构吸力及非饱和土的总有效应力原理探讨[J]. *中山大学学报:自然科学版*,2000,39(6):95-100.
- [32] 汤连生. 从粒间吸力特性再认识非饱和土的抗剪强度理论[J]. *岩土工程学报*,2001,23(4):412-418.
- [33] 程昌炳,刘少军,王远发,等. 胶结土的凝聚力的微观研究[J]. *岩石力学与工程学报*,1999,18(3):322-326.
- [34] 程昌炳,陈琼,刘少军,等. 土中胶结强度的微观研究[J]. *华中农业大学学报*,1998,17(2):144-149.
- [35] 姚海林,刘少军,程昌炳. 一种天然胶结土粘聚力的微观本质[J]. *岩石力学与工程学报*,2001,20(6):871-874.

(上接第97页)

#### 参考文献:

- [1] 张宗贵,王润生,郭小方,等. 基于地物光谱特征的成像光谱遥感矿物识别方法[J]. *地学前缘*, 2003,10(2):437-443.
- [2] 陈文霞,陈安升,蔡之华. 基于高光谱吸收特征参数的分类研究[J]. *计算机工程与应用*,2008,44(28):230-232.
- [3] ZHU Guobin, BLUMBERG Dan G. Classification using ASTER data and SVM algorithms: The case study of Beer Sheva, Israel[J]. *Remote Sensing of Environment*,2002,80(2):233-240.
- [4] ANDERS Knudby, ELLSWORTH LeDrew, ALEXANDER Brenning. Predictive mapping of reef fish species richness, diversity and biomass in Zanzibar using IKONOS imagery and machine-learning techniques [J]. *Remote Sensing of Environment*,2010,114(6):1230-1241.
- [5] BJOM Waske, JON Atli Benediktsson. Fusion of support vector machines for classification of multisensor data, *Geoscience and Remote Sensing*[J]. *IEEE Transactions on*, 2007,45(12):3858-3866.
- [6] MATTIA Marconcini, GUSTAVO Camps-Valls, LORENZO Bruzzone. A composite semisupervised SVM for classification of hyperspectral images[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*,2009,6(2):234-238.
- [7] 梁亮,杨敏华,李英芳. 基于ICA与SVM算法的高光谱遥感影像分类[J]. *光谱学与光谱分析*,2010,30(10):2724-2728.
- [8] 杨佳佳,姜琦刚,赵静,等. 基于改进的SVM技术和高光谱遥感的标准矿物定量计算[J]. *吉林大学学报:地球科学版*,2012,42(3):864-871.
- [9] 徐元进,胡光道,张振飞. 包络线消除法及其在野外光谱分类中的应用[J]. *地理与地理信息科学*,2005,21(6):11-14.
- [10] 黄婷婷,韦志辉,修连存,等. 基于吸收峰加权的岩矿光谱匹配方法研究[J]. *岩矿测试*,2011,30(5):584-589.
- [11] Vladimir Naumovich Vapnik. *The nature of statistical learning theory*[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [12] 谭琨,杜培军. 基于支持向量机的高光谱遥感图像分类[J]. *红外与毫米波学报*,2008,27(2):123-128.
- [13] 唐发明. 基于统计学习理论的支撑向量机算法[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
- [14] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. *自动化学报*,2000,26(1):36-46.