

DOI: 10.11779/CJGE201506018

# 锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法

陈昌富, 梁冠亭, 汤 宇, 徐优林

(湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 为了更真实地反映锚杆受拉时锚固体与土体界面的特性, 较准确地获得包含界面剪切残余段的剪应力-位移( $\tau-s$ )全过程曲线, 自行研发了一种锚-土界面摩阻性能测试仪及相应的锚杆拉拔试样制作装置和方法。该测试仪器和测试方法简便易行, 可成批模拟多种环境条件进行室内锚杆拉拔试验。利用该仪器完成了4批次27个不同条件的锚固体拉拔试验, 深入研究了锚固体养护龄期、拉拔速率等因素对锚-土界面剪切强度特性的影响, 提出了一种锚-土界面 $\tau-s$ 全过程本构模型。研究结果表明: 界面剪切强度在锚固体养护14 d后增长缓慢; 锚杆以0.1~2.5 mm/min拉拔时, 速率对剪切强度的影响不大; 提出的锚-土界面模型计算曲线与试验曲线吻合良好。

**关键词:** 锚杆; 锚-土界面模型; 拉拔试验仪; 加载速率

中图分类号: TU476 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)06-1115-08

**作者简介:** 陈昌富(1963-), 男, 湖南祁东人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事边坡工程及支护工程、地基处理等方面的研究。E-mail: cfchen@163.com。

## Anchoring solid-soil interface behavior using a novel laboratory testing technique

CHEN Chang-fu, LIANG Guan-ting, TANG Yu, XU You-lin

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** A testing system composed of pull-out testing apparatus simulating frictional behavior of anchoring solid-soil interface and the corresponding devices and techniques of specimen preparation are developed to study the real response of the anchoring solid-soil interface for anchor system under tension, especially to obtain more accurately the whole journey curve of shearing stress and displacement containing the shearing residual portion. This testing apparatus and techniques are simple and operable, which can be adopted to simulate the laboratory pull-out tests on anchoring system in bulk under multiple circumstances. Four groups of pull-out tests under twenty-seven different circumstances are completed on this testing system, and a novel whole-journey constitutive model for the anchoring solid-soil interface is proposed after investigating deeply the influences of curing period of anchor solid, pull-out speed and other factors on the interface shearing strength. The results indicate that the interface shearing strength increases slowly after curing for fourteen days, that the pull-out speed affects slightly the interface shearing strength in the range of 0.1~2.5 mm/min, and that the proposed constitutive model for the anchoring solid-soil interface is able to give calculated curves with good agreement with the test ones.

**Key words:** anchor; anchoring solid-soil interface model; pull-out testing apparatus; loading speed

## 0 引言

锚固技术大量用于水利、水电、公路、铁路、房建、市政、矿业、港口等领域中岩土体的加固和支护。由于锚杆(索)的锚固性能不仅是锚固工程设计的依据, 而且还决定着工程的长期安全性, 因此锚固体与土体、岩体或混凝土界面(分别简称锚-土界面、锚-岩界面和锚-混凝土界面)的剪切变形特性, 以及锚杆(索)的受力变形规律, 一直是工程中关注的焦点。鉴于锚-土(岩或混凝土)界面与桩-土(岩)界面的形成及锚杆和桩的荷载传递方式都存在相似性, 国内外许多学者借鉴桩基工程中的研究成果, 对锚-土(岩

或混凝土)界面模型(即锚-土界面的剪应力 $\tau$ -剪切位移 $s$ 之间的关系)和锚杆锚固体的受力变形特性进行了大量的试验和理论研究。

Su等<sup>[1]</sup>通过长方体和圆柱体两种模型箱进行了室内锚杆拉拔试验, 并结合直剪试验结果提出了一种指型锚-土界面模型; 而张培胜等<sup>[2]</sup>通过在混凝土柱(尺寸为0.2 m×0.2 m×1.2 m)中心制作一直径为80 mm的锚固体, 并根据布设在锚固体中钢筋上的应变

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878082)

收稿日期: 2014-08-25

片测试结果解析出各测点剪应力-剪切位移曲线, 提出了一种由指数函数与双曲函数组合而成的锚-混凝土界面模型。Benmokrane 等<sup>[3]</sup>通过在直径为  $\phi 200$  mm 的混凝土长柱中央设置直径为  $\phi 38$  mm 的锚固体进行拉拔试验, 得到了三折线软化型锚-混凝土界面模型; 而尤春安等<sup>[4]</sup>则通过在直径为  $\phi 160$  mm 的混凝土长柱中央设置直径为  $\phi 40$  mm 的锚固体进行拉拔试验, 得到了四折线跌落锚-混凝土界面模型, 试验中因混凝土柱的直径小、外围没有约束, 出现了纵向整体劈裂现象。Laura 等<sup>[5-6]</sup>通过在大直径岩样中钻孔设置锚固体进行拉拔试验, 得到了三折线软化型锚-岩界面模型。此外, Su 等<sup>[7]</sup>、Yin 等<sup>[8]</sup>、Hossain 等<sup>[9-10]</sup>通过室内模型试验和改进的直接剪切试验装置对注浆土钉中的钉-土界面(实际上就是锚-土)特性进行了系统的试验研究, 结果表明: 土钉上覆应力对钉-土抗拉强度没有影响, 因为土钉孔在钻孔过程中其应力已完全释放; 但若采用压力注浆, 钉-土界面的抗剪强度则会随注浆压力增大而增加。

同时, 张季如等<sup>[11]</sup>、杨庆和等<sup>[12]</sup>假定锚-土界面模型为线性增长型, 张洁等<sup>[13]</sup>假定其为双折线硬化型, 孔宪宾等<sup>[14]</sup>、陈棠茵<sup>[15]</sup>假定其为双曲线硬化型, 魏新江等<sup>[16]</sup>、彭世明等<sup>[17]</sup>假定其为理想弹塑性型, Cai 等<sup>[18]</sup>、何思明等<sup>[19]</sup>、段建等<sup>[20]</sup>、刘晓明等<sup>[21]</sup>、谷拴成等<sup>[22]</sup>假定其为一次跌落型, 何思明等<sup>[23]</sup>、肖淑君等<sup>[24]</sup>、Ren 等<sup>[25]</sup>、许宏发等<sup>[26]</sup>、郭锐剑等<sup>[27]</sup>假定其为三折线软化型, 陈国周等<sup>[28]</sup>假定其为四折线软化型, 蒋良滩等<sup>[29]</sup>假定其为由直线与指数曲线组合而成的软化型, 分别对锚杆锚固体的受力变形特性进行了理论分析, 得到了沿锚固体长度方向上各自的剪切力分布规律。

综上所述, 现有锚-土界面模型大都通过室内模型试验或现场试验得到, 试验繁琐, 重复性和再现性差, 很难用于成批试验和系统研究不同因素对锚-土界面抗剪强度特性的影响; 而且由于模型试验或现场试验中设置的锚固体通常较长, 得到的锚-土界面  $\tau - s$  关系反映的是这一长锚固段的平均特性, 而进行锚杆的受力变形理论分析时, 却又视它为一微段的  $\tau - s$  关系, 这在理论上不合理。为此, 本文研发一种可成批模拟多种环境条件的锚-土界面摩阻性能测试仪和相应的锚杆拉拔试样制作装置和方法, 通过进行不同条件下的锚杆拉拔试验, 研究了锚固体养护龄期、拉拔速率等因素对锚-土界面剪切强度特性的影响, 并提出新的锚-土界面  $\tau - s$  全过程本构模型。

## 1 试验原理与装置

本文的核心思想是利用室内重塑土或现场原状

土, 制作一种如图 1 所示锚固体试样, 以模拟工程锚杆中锚固体任一微段。由于试样的高度很小, 锚固体的刚度又很大, 因此可认为锚固体受拉时自身不产生变形, 且锚-土界面剪应力分布均匀。于是, 只需测试锚固试样的轴力  $Q$  和位移  $s$ , 就能很容易得到锚-土界面剪应力-位移 ( $\tau - s$ ) 曲线, 这不仅避免了传统锚杆试验中先大量布置应变片或钢筋应力计以测试锚杆轴力, 再分段计算锚-土界面剪应力的麻烦, 而且可大大减少误差源, 还可模拟不同实际工况和环境条件。但值得注意的是, 锚固试样(图 1)半径  $R$  应比锚固体半径  $r$  足够大(一般要求  $R/r \geq 5 \sim 10$ ), 以减少边界约束效应; 而且锚固体有一定凸出, 以保证试验过程中剪切面积基本恒定。

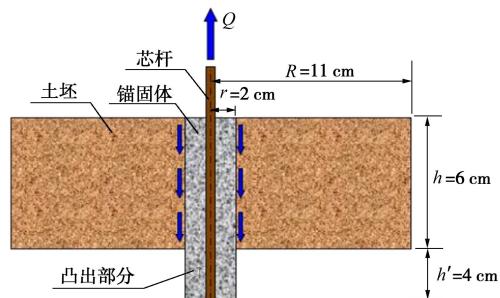


图 1 试样拉拔示意图

Fig. 1 Schematic of pull-out of specimen

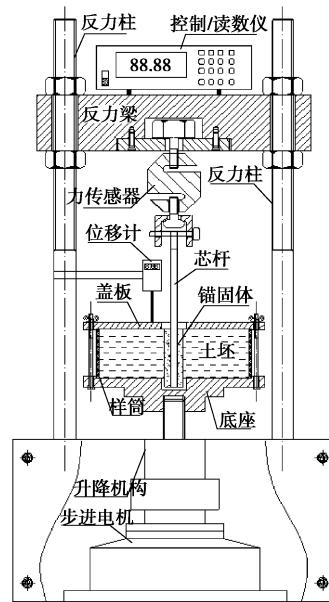


图 2 锚杆拉拔试验仪

Fig. 2 Pull-out testing apparatus for anchors

为实现成批进行室内锚杆拉拔试验, 自行开发了如图 2 所示锚-土界面摩阻性能测试系统, 其基本原理为: 利用盖板和 4~8 组与之相连的螺栓副, 将试样固定于与动力系统的升降机构相连的底座上; 锚杆杆体

(芯杆)上部的弯钩挂到一个万向扣上, 万向扣通过一个椭球状大头螺栓与力传感器连接, 而力传感器与反力梁连接, 并与反力柱组成一个反力架系统; 试验时, 由控制/读数仪启动步进电机带动升降机构下移, 并经由底座、螺栓副和盖板迫使锚固试样土坯(即锚固体周边土体)下移, 而锚固体维持不动, 于是可利用位移和力传感器自动量测出锚-土界面的剪切位移 $s$ 和剪应力 $\tau$ , 直至完成锚杆的整个拉拔试验, 并得到 $\tau-s$ 全过程关系曲线。

## 2 试验方法及步骤

### 2.1 土料特性

试验所用的土料为长沙丘陵地带典型的坡积土。经测试, 土样的相对密度 $G_s$ 根据颗粒粒径的不同, 其范围为2.68~2.71, 平均值为2.69; 土样细颗粒(小于0.5 mm)的液限 $w_L$ 为33.2%, 塑限 $w_P$ 为22.3%。土样的级配曲线如图3所示, 从图中可知土颗粒不均匀系数 $C_u$ 为40, 曲率系数 $C_c$ 为0.76, 属于级配不良, 这与坡积土分选性差, 粗细颗粒混杂的特性吻合。根据文献[30]的规定, 该土样应定名为粗粒混合土。由室内击实试验结果(表1)得知土的最佳含水率为16.4%, 最大干密度约为1.89 g/cm<sup>3</sup>。

表1 室内土样击实试验结果

Table1 Compaction test results of soils

含水率 w/%	11.6	13.8	16.4	18.1	20.5
干密度 $\rho_d$ (g·cm <sup>-3</sup> )	1.78	1.82	1.89	1.85	1.78

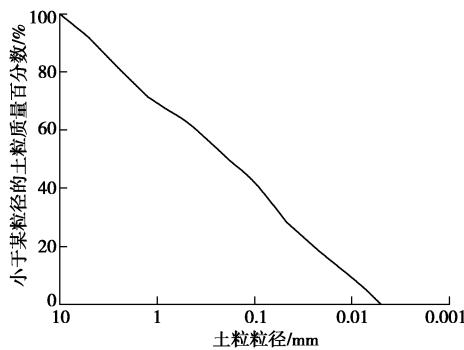


图3 土的级配曲线

Fig. 3 Grading curve of soils

### 2.2 试样制作

锚-土界面摩阻性能测试所用的试样制作过程分为两步, 先制备试样的土坯, 再制作锚固体。

#### (1) 试样土坯制备

试样土坯制作装置如图4, 其制作方法如下:

a) 在圆形的带凹槽底座上, 依次放入有机玻璃制成的垫筒、击实筒和增高筒, 筒与筒之间有卡槽卡紧;

两侧有两根螺杆旋入底座, 螺杆、螺母和压片配合使用, 并将位于最上面的增高筒压紧固定; 一个柱状的定位器通过螺纹与底座连接, 一根高 $H$ 为60 cm的空心管内壁与定位器外壁紧密贴合, 使空心管准确居中定位。

b) 称取约7.5 kg试样, 分5份倒入筒内, 参照文献[31]中击实试验方法, 以轻型击实试验的单位体积功592.2 kJ/m<sup>3</sup>为标准, 通过锤重及落高反算所需击实的次数。击实时依次放入样土、纱布以及直径略小于筒内径的垫板, 通过反复提升穿心锤击打垫板来击实土层。纱布的作用是避免垫板与土体直接接触, 形成黏着力和吸力, 导致垫板取出困难。每击实完一层土, 依次取出重锤、垫板和纱布, 将交界处的土面刨毛, 倒入另一份样土, 如此循环, 完成土坯的击实。

c) 将击实土坯中间的空心管拔出, 土坯中就形成一个圆柱状孔洞, 以此模拟钻孔形状。最后制成的土坯高为10 cm、直径为22 cm, 中间孔洞直径为4 cm。

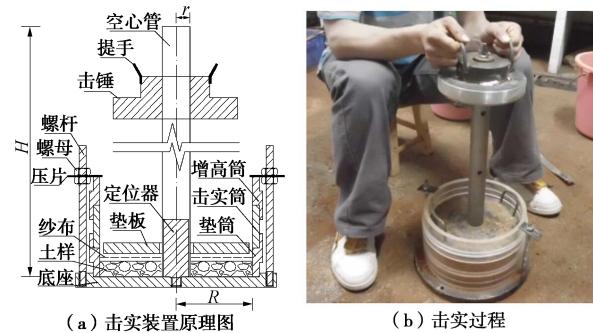


图4 试样土坯制作装置原理及实物图

Fig. 4 Principle and picture of specimen preparation devices

#### (2) 锚固体制作

为保证锚固体中芯杆居中, 本文特制了如图5所示的芯杆对中装置。锚固体制作步骤如下:

a) 将击实筒和垫筒及其包裹的土坯转移到下盘(图5)中, 在土坯孔洞内放入一个中间带小孔的对中垫片, 垫片中间有一小孔, 将一根 $\phi 8$ 带肋钢筋伸入到土坯的孔洞内, 并且确保钢筋端部嵌入到垫片的小孔中。在土坯上方套入上盘(图5), 上盘有一支架托举的凹形卡槽, 卡槽中有一对中夹片可以从上部夹紧固定钢筋。

b) 将配置好的水泥砂浆注入到土坯的孔洞中, 水泥砂浆具体配比为:P.O 42.5水泥, 粒径小于2 mm的砂子, 灰砂比1:1, 水灰比0.45。注浆时还须用小棒振捣水泥砂浆, 挤出其中的气泡, 以避免锚固体成型后出现孔洞或麻面。注浆完毕后用塑料袋密封养护, 以防止土中水分的蒸发, 如图6(a)所示。

c) 为实现本文第2节中提及的锚固体要有一凸出

部分, 以保证锚杆在拉拔过程中等面积受力的目的, 在养护完毕后拉拔试验前, 还须切削顶部的不平整部分以及底部的4 cm厚土样, 此时试样的有效高度为6 cm, 如图6(b)所示。

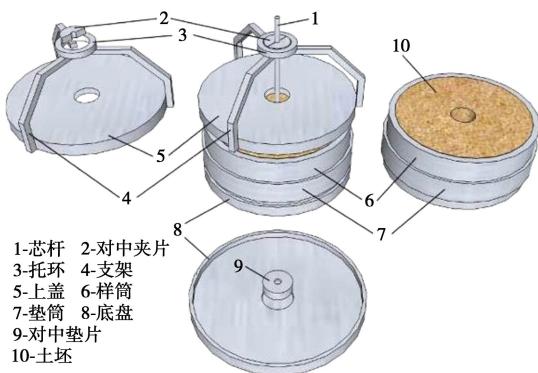


图5 芯杆对中装置

Fig. 5 Core-rod centering devices

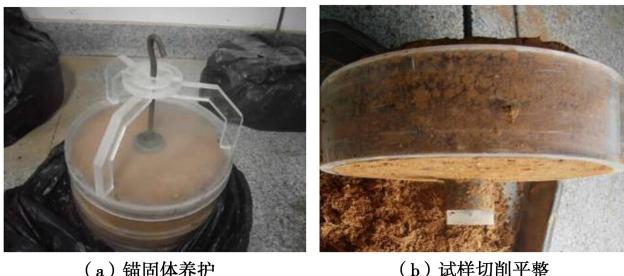


图6 试样制备

Fig. 6 Specimen preparation

### 2.3 锚杆试样拉拔试验

拉拔试验采用图2所示试验装置, 将切削后的试样转移到试验装置的底座上, 并放置盖板, 利用8组螺栓副穿过盖板和底座对应的小孔, 上下夹紧试样, 再将芯杆上端与万向扣相连。在读数/控制仪中设定拉拔速率 $v$ 和试验终止的控制条件(本试验定为锚固体被拔出长度达到锚固体有效长度的40%, 即24 mm), 启动步进电机, 由升降机构带动底座及固定在底座上的试样本体匀速下降, 而锚固体及其握裹的杆体则相对静止, 锚固体与土体的界面出现剪切破坏。试样组装和拉拔过程见图7(a)、(b), 试样破坏的情况和被拔出的锚固体外观见图7(c)、(d)。

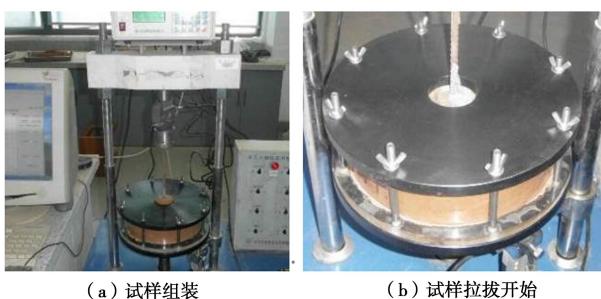


图7 拉拔试验过程

Fig. 7 Pull-out testing process

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试验结果

本试验进行了4批共计27个试样的拉拔试验(表2), 得到了各试样的锚-土界面剪应力-位移( $\tau-s$ )全过程曲线(图8为部分试样的 $\tau-s$ 全过程曲线)以及其剪应力峰值 $\tau_f$ 和峰值点位移 $s_f$ , 结果见表2。

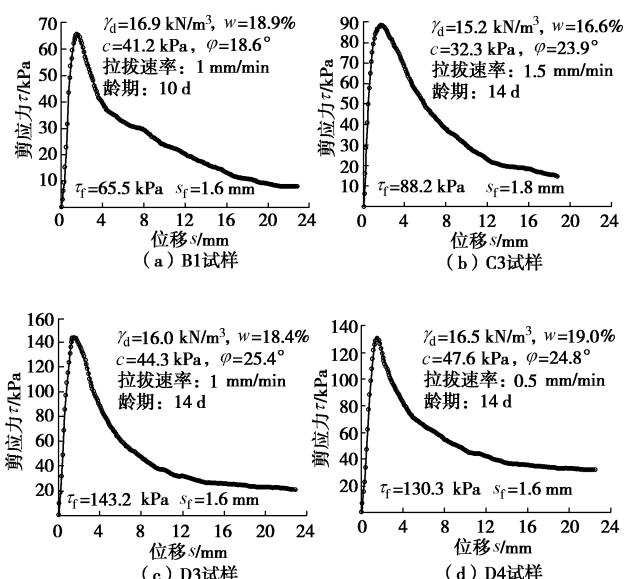


图8 部分试样试验实测曲线

Fig. 8 Test curves of part of samples

表2中所列各试样含水率, 是在试样测试完后取锚固体周围3个不同部位土体得到的含水率平均值。而在制样时, A、B、C、D各批次的土样则分别按20%, 18%, 16%, 18%的含水率配制试验用土。由表2可知各个土样的最终含水率 $w$ 与该批次预定的含水率十分接近。同批次土样的干密度 $\gamma_d$ 、直剪试验得到的黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 也相差不大, 这证明人工击实的土坯具有较好的均匀性, 可满足批量重复试验的要求。同时, 表2中还详细列出了试样养护龄期、试样拉拔速率等试验条件, 以及剪应力峰值点强度 $\tau_f$ 及其对应位移 $s_f$ 等试验结果。

表 2 试验条件及结果

Table 2 Test conditions and results

编号	干密度 $\gamma_d$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	黏聚力 $c$ (kPa)	内摩擦角 $\varphi$ ( $^{\circ}$ )	含水率 $w$ (%)	锚固体龄期 $d$	拉拔速率 $v$ ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	峰值点位移 $s_f$ (mm)	峰值强度 $\tau_f$ (kPa)
A1	16.2	45.4	20.6	19.7	3	1.00	3.4	58.6
A2	16.5	43.0	19.8	20.5	3	1.00	2.8	51.8
A3	16.1	46.7	17.0	20.4	7	1.00	2.3	55.2
A4	16.0	42.6	17.4	20.4	7	1.00	2.8	64.8
A5	16.5	47.5	18.2	20.2	14	1.00	2.5	83.2
A6	16.1	43.1	17.2	20.2	14	1.00	2.8	70.4
A7	16.2	45.8	18.9	20.1	28	1.00	2.4	88.0
A8	16.3	44.3	18.5	20.0	28	1.00	2.4	70.8
B1	16.9	41.2	18.6	18.9	10	1.00	1.6	65.5
B2	17.1	43.9	17.5	18.8	10	0.50	2.7	58.9
B3	17.0	42.5	17.2	18.6	10	0.25	2.6	50.1
B4	16.9	40.3	19.4	18.9	10	0.10	2.7	49.4
C1	14.5	35.8	24.8	16.7	14	2.50	2.1	93.0
C2	15.0	32.7	24.3	16.4	14	2.00	2.1	71.9
C3	15.2	32.3	23.9	16.6	14	1.50	1.8	88.2
C4	14.7	35.6	21.8	16.5	14	1.00	1.6	91.0
C5	15.4	36.3	22.5	16.4	14	0.50	2.8	101.4
C6	15.0	34.9	21.2	16.5	14	0.10	2.6	99.8
C7	14.5	32.8	22.2	16.6	14	1.00	2.5	109.9
C8	15.0	35.6	24.0	16.3	14	1.00	2.6	108.5
D1	16.4	46.7	24.7	18.6	14	2.00	1.7	114.1
D2	16.2	43.0	26.5	18.9	14	1.50	2.7	138.6
D3	16.0	44.3	25.4	18.4	14	1.00	1.6	143.2
D4	16.5	47.6	24.8	19.0	14	0.50	1.6	130.3
D5	16.4	45.8	27.9	18.8	14	0.10	1.8	114.8
D6	16.1	44.6	26.8	18.9	14	1.50	2.8	126.8
D7	16.0	43.9	27.4	18.7	14	1.50	2.1	113.4

为定量反映试验结果的平均值和离散性, 表 3 分别列出了各批次试样土体的干密度  $\gamma_d$ 、黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、含水率  $w$  以及剪应力峰值点对应位移  $s_f$  的平均值  $\gamma_{d,m}$ ,  $c_m$ ,  $\varphi_m$ ,  $w_m$ ,  $s_{f,m}$ , 标准差  $\sigma_{\gamma_d}$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_\varphi$ ,  $\sigma_w$ ,  $\sigma_{s_f}$  和变异系数  $V_{\gamma_d}$ ,  $V_c$ ,  $V_\varphi$ ,  $V_w$ ,  $V_{s_f}$ 。结果表明: 干密度的变异系数范围为 0.006~0.022, 含水率的变异系数范围为 0.008~0.013, 两者的变异性很小; 而黏聚力的变异系数范围为 0.036~0.047, 内摩擦角的变异系数范围为 0.048~0.069, 两者的变异性相对较大一些, 原因是直剪试验的方法较干密度和含水率的测定方法较为复杂, 造成误差的因素也更多。剪应力峰值对应位移的变异系数为 0.134~0.251, 其值较大的原因可能是锚固体与土体两种介质之间的接触面剪切破坏情况更为复杂。但总的来说, 按本文前述方法制作的土坯, 其均匀性是有保证的, 这为同一批次

的试样在不同条件下进行试验奠定了坚实的基础。

### 3.2 不同龄期对锚-土界面剪切强度的影响

为探讨养护龄期对锚-土剪切强度的影响, 采用 A 批次的 8 个试样, 2 个一组, 分别在注浆完毕后的 3, 7, 14, 28 d 进行平行试验, 相应的结果见图 9。由图中可得, 在 14 d 之前剪应力峰值随龄期的增长而有较快增长, 14~28 d 剪应力峰值随龄期增长缓慢, 这与水泥砂浆的强度随龄期增长的规律相一致。因此, 为缩短试验周期, 加快效率, 建议类似试验的水泥砂浆养护龄期以 14 d 为宜。

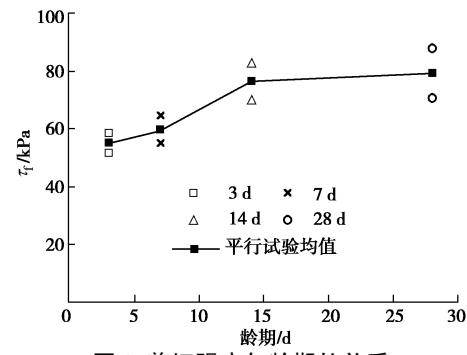


图 9 剪切强度与龄期的关系

Fig. 9 Relationship between shearing strength and curing period

### 3.3 不同加载速率对锚-土界面剪切强度影响

为研究拉拔速率对锚-土界面剪切强度的影响, 对 B、C、D 三个批次的 19 个试样进行不同速率拉拔条件下的试验, 试验拉拔速率  $v$  变化范围为 0.1~2.5 mm/min。为便于比较, 将各试样的剪应力峰值  $\tau_f$  除以该批次各试样剪应力峰值的平均值  $\tau_{f,m}$ , 所得试验结果见图 10。从图 10 中可知, 在试验的速率范围内, 在不同拉拔速率下的剪切强度平均值随拉拔速率的增大, 其变化不是很大, 波动范围在 16.3% 之内。

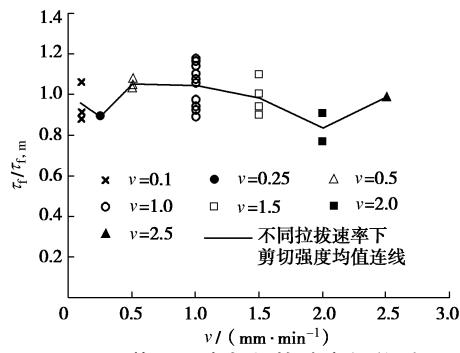


图 10 剪切强度与拉拔速率的关系

Fig. 10 Relationship between shearing strength and pull-out speed

表 3 试样物理力学性质统计结果

Table 3 Statistical results of physical and mechanical properties of samples

	$\gamma_{d,m}$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$\sigma_{\gamma_d}$	$V_{\gamma_d}$	$w_m$ (%)	$\sigma_w$	$V_w$	$c_m$ (kPa)	$\sigma_c$	$V_c$	$\varphi_m$ ( $^{\circ}$ )	$\sigma_\varphi$	$V_\varphi$	$s_{f,m}/$ mm	$\sigma_{s_f}$	$V_{s_f}$
A 批次	16.24	0.185	0.011	20.19	0.259	0.013	44.80	1.831	0.041	18.45	1.281	0.069	2.68	0.358	0.134
B 批次	16.98	0.096	0.006	18.80	0.141	0.008	41.98	1.569	0.037	18.18	1.014	0.056	2.40	0.535	0.223
C 批次	14.91	0.323	0.022	16.50	0.131	0.008	34.50	1.625	0.047	23.09	1.323	0.057	2.26	0.427	0.189
D 批次	16.23	0.206	0.013	18.76	0.207	0.011	45.13	1.635	0.036	26.21	1.267	0.048	2.04	0.513	0.251

表 4 各试样的归一化结果与计算曲线的对比

Table 4 Comparison between normalized results and calculated curves for each specimen

编号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B1	B2	B3	B4	C1	C2
$s_f/s_{f,m}$	1.271	1.047	0.860	1.047	0.935	1.047	0.897	0.897	0.667	1.125	1.083	1.125	0.928	0.928
$\tau_f/\tau_{f,m}$	1.062	0.938	0.920	1.080	1.083	0.917	1.108	0.892	1.170	1.052	0.895	0.883	0.974	0.753
$r$	0.989	0.965	0.957	0.949	0.992	0.974	0.983	0.987	0.973	0.987	0.975	0.934	0.960	0.920
编号	C3	C4	C5	C6	C7	C8	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	平均
$s_f/s_{f,m}$	0.796	0.707	1.238	1.149	1.105	1.149	0.856	1.360	0.806	0.806	0.705	1.410	1.058	1.000
$\tau_f/\tau_{f,m}$	0.924	0.954	1.062	1.046	1.151	1.136	0.906	1.101	1.138	1.035	0.912	1.007	0.901	1.000
$r$	0.978	0.959	0.939	0.976	0.961	0.959	0.986	0.991	0.996	0.993	0.971	0.986	0.978	0.971

#### 4 锚-土界面 $\tau-s$ 全过程本构关系

为便于对比分析,须对试验结果进行归一化处理,即将如图 8 所示的各时刻锚-土界面剪应力  $\tau$  和位移  $s$  分别除以剪应力峰值  $\tau_f$  和峰值点位移  $s_f$ , 得剪应力比  $y$  和位移比  $x$ , 有

$$y = \tau / \tau_f , \quad (1)$$

$$x = s / s_f . \quad (2)$$

于是可得如图 11 所示归一化曲线(即  $\tau/\tau_f - s/s_f$  曲线)。

通过对所有试验的  $\tau/\tau_f - s/s_f$  曲线形态分析发现,如下有理分式可以给出  $\tau/\tau_f - s/s_f$  曲线的最佳逼近:

$$y = [Ux + (V-1)x^2] / [1 + (U-2)x + Vx^2] , \quad (3)$$

式中,  $U$  和  $V$  为待定系数。

将式(1)、(2)代入式(3), 可得锚-土界面  $\tau-s$  全过程本构关系的表达式为

$$\tau = \tau_f [Us_f s + (V-1)s^2] / [s_f^2 + (U-2)s_f s + Vs^2] . \quad (4)$$

锚-土界面残余剪切强度  $\tau_r$  对式(4)求极限得出

$$\tau_r = \lim_{s \rightarrow +\infty} \tau = \tau_f (V-1) / V . \quad (5)$$

一般情况下, 锚-土界面残余剪切强度  $\tau_r$  不为 0, 因此  $V$  尚需满足  $V \neq 1$  的要求。通过对前述各批次试验结果进行拟合分析发现, 当  $U=1$ ,  $V=1.15$  时拟合效果最佳(相关系数  $r \geq 0.92$ , 均值为 0.971), 于是得本次试验锚-土界面  $\tau-s$  全过程本构关系为

$$y = (x + 0.15x^2) / (1 - x + 1.15x^2) , \quad (6)$$

$$\tau = \tau_f (s_f s + 0.15s^2) / (s_f^2 - s_f s + 1.15s^2) . \quad (7)$$

各试样临界位移  $s_f$  与该批次临界位移均值  $s_{f,m}$  之比, 剪应力峰值  $\tau_f$  与该批次剪应力峰值平均值  $\tau_{f,m}$  之比, 以及与拟合曲线的相关系数见表 4, 部分拟合曲线与实测曲线对比图如图 11。由表 4 和图 11 可知: 本文提出的锚-土界面  $\tau-s$  全过程本构模型对所有试验测试曲线都有比较理想的拟合精度。

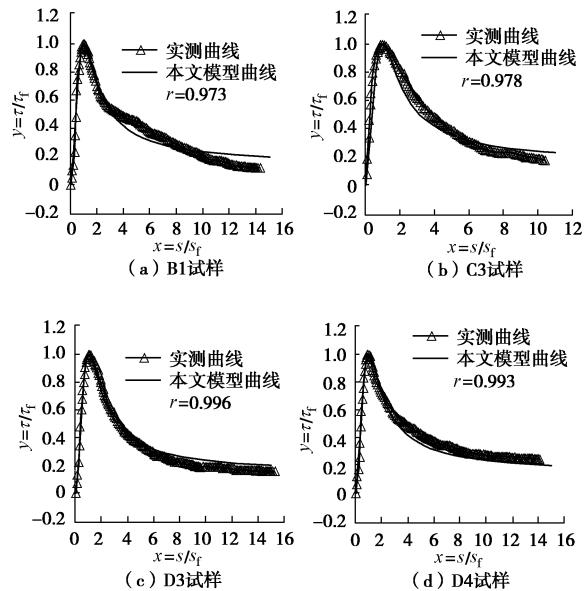


图 11 本文计算曲线与实测曲线对比  
Fig. 11 Comparison between computed and measured curves

#### 5 结 论

(1) 自行研发了一整套室内锚杆拉拔试验仪器, 可完成锚杆试样的制样、成孔和拉拔等过程, 将扁短的锚杆试样视为锚杆的任一“微段”, 为锚杆锚固体与岩土体界面剪应力-位移 ( $\tau-s$ ) 关系的测定提供了新思路和新方法。

(2) 试验结果表明, 剪应力峰值点强度在锚固体养护 14 d 后增长缓慢; 锚杆以 0.1~2.5 mm/min 拉拔时, 速率对剪应力峰值点强度的影响不大。

(3) 提出了一种锚固体与岩土体界面  $\tau-s$  全过程本构关系模型, 模型计算曲线与试验曲线吻合良好, 能较好地反映锚-土界面受力变形的实际情况。

#### 参 考 文 献:

- [1] SU W Z, RICHARD J F. Uplift testing of model anchors[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114: 961~983.

- [2] 张培胜, 阴可. 拉力型锚杆锚固段传力机理的全过程分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 716 - 723. (ZHANG Pei-sheng, YIN Ke. An analysis method of the whole working course for the force transferring mechanism in fixed segment of tensile-type anchor bar[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 716 - 723. (in Chinese))
- [3] BENMOKRANE B, CHENNOUF A, MITRI H S. Laboratory evaluation of cement-based grouts and grouted rock anchors[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1995, 32: 633 - 642.
- [4] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 1976 - 1985. (YOU Chun-an, ZHAN Yu-bao. Analysis of interfacial slip mesomechanics in anchorage section of prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 1976 - 1985. (in Chinese))
- [5] LAURA B M, MICHEL T, FAOUZI H H, et al. Assessment of the bolt-grout interface behavior of fully grouted rock bolts from laboratory experiments under radial loads[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 63: 50 - 61.
- [6] LAURA B M, MICHEL T, FAOUZI H H. A new analytical solution to the mechanical behaviour of fully grouted rock bolts subjected to pull-out tests[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 749 - 755.
- [7] SU L J, TERENCE C F C, YIN J H, et al. Influence of overburden pressure on soil-nail pullout resistance in a compacted Fill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(9): 1339 - 1348.
- [8] YIN J H, ZHOU W H. Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(9): 1198 - 1209.
- [9] MD A H, YIN J H. Influence of grouting pressure on the behavior of an unsaturated soil-cement interface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(2): 193 - 203.
- [10] MD A H, YIN J H. Behavior of a pressure- grouted soil-cement interface in direct shear tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(1): 101 - 109.
- [11] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 188 - 192. (ZHANG Ji-ru, TANG Bao-fu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 188 - 192. (in Chinese))
- [12] 杨庆, 朱训国, 莱茂田. 全长注浆岩石锚杆双曲线模型的建立及锚固效应的参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 692 - 698. (YANG Qing, ZHU Xun-guo, LUAN Mao-tian. Development of hyperbolic model for fully grouting rock bolt and parameters analysis for anchoring effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 692 - 698. (in Chinese))
- [13] 张洁, 尚岳全, 叶彬. 锚杆  $p-s$  曲线的双折线荷载传递解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1072 - 1076. (ZHANG Jie, SHANG Yue-quan, YE Bin. Analytic calculation of  $p-s$  curve of bolts based on bilinear load-transfer function[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1072 - 1076. (in Chinese))
- [14] 孔宪宾, 余跃心, 李伟, 等. 土-锚杆相互作用机理的研究[J]. 工程力学, 2000, 17(3): 80 - 86. (KONG Xian-bin, SHE Yue-xin, LI Wei, et al. The mechanism study of soil-anchor interaction[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(3): 80 - 86. (in Chinese))
- [15] 陈棠茵. 剪切位移传递法分析抗浮锚杆应力状态[J]. 水文地质工程地质, 2008(1): 36 - 39. (CHEN Tang-yin. Shear displacement transfer analysis on stress of anti-float anchor[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(1): 36 - 39. (in Chinese))
- [16] 魏新江, 危伟, 张世民. 理想弹塑性锚杆拉拔理论分析[J]. 力学与实践, 2006, 28(3): 56 - 59. (WEI Xin-jiang, WEI Wei, ZHANG Shi-min. Heoretic analanalysis of bolt pullout based on perfect elasto-plastic model[J]. Mechanics in Engineering , 2006, 28(3): 56 - 59. (in Chinese))
- [17] 彭世明, 赵明华. 基于佐藤悟双折线模型的灌浆锚杆抗拔承载特性分析[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2009, 31(1): 104 - 108. (PENG Shi-ming, ZHAO Ming-hua. Analysis of bearing characteristics anti-full for grouted bolt based on KEZDI's double-broken-line model[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2009, 31(1): 104 - 108. (in Chinese))
- [18] CAI Y, ESAKI T, JIANG Y J. An analytical model to predict axial load in grouted rock bolt for soft rock tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19: 607 - 618.
- [19] 何思明, 李新坡. 预应力锚杆作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1876 - 1880. (HE Si-ming, LI

- Xin-po. Study on mechanism of prestressed anchor bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1876 - 1880. (in Chinese))
- [20] 段 建, 言志信, 郭锐剑, 等. 土层锚杆拉拔界面松动破坏分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 936 - 941. (DUAN Jian, YAN Zhi-xin, GUO Rui-jian, et al. Failure analysis of soil anchors induced by loose interface under pullout load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 936 - 941. (in Chinese))
- [21] 刘晓明, 张亮亮. 考虑自由段受荷的锚杆变形和承载特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(6): 7 - 12. (LIU Xiao-ming, ZHANG Liang-liang. Research on the deformation and bearing characteristics of anchor considering the load bearing or free section[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(6): 7 - 12. (in Chinese))
- [22] 谷拴成, 丁 潘. 岩体离层对锚固体荷载影响的弹塑性分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2649 - 2654. (GU Shuan-cheng, DING Xiao. Elastoplastic analysis of effect of bed separation on anchored mass loading in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2649 - 2654. (in Chinese))
- [23] 何思明, 田金昌, 周建庭. 胶结式预应力锚索锚固段荷载传递特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 117 - 120. (HE Si-ming, TIAN Jin-chang, ZHOU Jian-ting. Study on load transfer of bond prestressed anchor rope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 117 - 120. (in Chinese))
- [24] XIAO S J, CHEN C F. Mechanical mechanism analysis of tension type anchor based on shear displacement method[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(1): 106 - 111.
- [25] REN F F, YANG Z J, CHEN J F, et al. An analytical analysis of the full-range behavior of grouted rockbolts based on a tri-linear bond-slip model[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24: 361 - 370.
- [26] 许宏发, 王 武, 江 猛, 等. 灌浆岩石锚杆拉拔变形和刚度的理论解析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1511 - 1515. (XU Hong-fa, WANG Wu, JIANG Miao, et al. Theoretical analysis of pullout deformation and stiffness of grouted rockbolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1511 - 1515. (in Chinese))
- [27] 郭锐剑, 谌文武, 段 建, 等. 考虑界面软化特性的土层锚杆拉拔受力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 34(10): 4003 - 4009. (GUO Rui-jian, CHEN Wen-wu, DUAN Jian, et al. Pullout mechanical analysis of soil anchor based on softening behavior of interface[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 34(10): 4003 - 4009. (in Chinese))
- [28] 陈国周, 贾金青. 拉力型锚杆应力分布的非线性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 45 - 50. (CHEN Guo-zhou, JIA Jin-qing. Nonlinear analysis of stress distribution of tension anchor[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(1): 45 - 50. (in Chinese))
- [29] 蒋良淮, 黄润秋, 蒋忠信. 锚固段侧阻力分布的一维滑移-软化半数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 2187 - 2193. (JIANG Liang-wei, HUANG Run-qi, JIANG Zhong-xin. One-dimensional semi-numerical analysis of lateral shear distribution of anchorage segment considering slipping and softening effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 2187 - 2193. (in Chinese))
- [30] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范(2009年版)[S]. 2009. (GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering (2009 Edition) [S]. 2009. (in Chinese))
- [31] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))