

锚杆灌浆体与黏性土界面剪切特性试验研究

戴自航^{1, 2, 3}, 周冲², 陈财焕⁴, 陈忠源¹

(1. 福州外语外贸学院 智能建造学院, 福建 福州 350202; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 3. 福建省地质工程勘察院 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室和福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350002; 4. 福建省交通科研院有限公司, 福建 福州 350101)

摘要: 锚杆广泛应用于岩土锚固工程中, 当在有限锚固段长度下锚杆入不了岩时, 锚固在稳定黏性土中的锚杆就很常见, 但由于目前对锚杆灌浆体与黏性土界面的剪切特性认识不足, 致使锚杆设计承载力往往与实测结果存在较大差距。为此, 对常规应变控制式直剪仪加以改装, 开展此类界面在不同的接触压力、土样表面粗糙程度、土中含水率、灌浆体水灰比下的剪切试验, 揭示这些条件下界面剪切破坏的表观形态和界面剪应力-剪切位移的关系。结果表明: (1) 界面的剪应力-剪切位移常呈非线性强软化关系, 且土体表面越粗糙, 这种关系越明显, 但软化程度随接触压力的增大而降低; (2) 界面的峰值和残余抗剪强度与接触压力均呈非线性关系; (3) 界面达峰值和残余抗剪强度时的剪切位移分别不超过 4 和 6 mm。因此, 黏性土中增大锚孔孔壁粗糙程度, 适当增大灌浆压力 (或采用二次高压灌浆), 可增大锚固体与土的接触压力, 有助于提高锚杆承载力。研究成果为采用数学函数直接表征灌浆体与黏性土界面剪应力-剪切位移关系或采用弹塑性力学理论建立准确描述该类界面的本构模型奠定了基础。

关键词: 土力学; 灌浆体; 黏性土; 界面; 剪应力-剪切位移关系; 抗剪强度

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)08-2153-11

Shearing behavior of interface between anchor bolt grouted body and cohesive soil

DAI Zihang^{1, 2, 3}, ZHOU Chong², CHEN Caihuan⁴, CHEN Zhongyuan¹

(1. School of Intelligent Construction, Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou, Fujian 350202, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 3. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Natural Resources and Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention, Geological Engineering Survey in Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350002, China; 4. Fujian Provincial Transportation Research Institute Co., Ltd, Fuzhou, Fujian 350101, China)

Abstract: Anchor bolts are widely used in geotechnical anchorage engineering. In situations where anchorage segments of limited length cannot be embedded into a rock layer, anchor bolts are typically installed in stable cohesive soils. However, the shear behavior of the interface between the cohesive soil and the grouted anchorage body of an anchor bolt is not yet fully understood, often resulting in a significant discrepancy between the design bearing capacity and the measured capacity of the anchor bolt. To address this, a slight modification was made to

收稿日期: 2024-09-26; **修回日期:** 2025-04-25

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2021J01600); 福建省交通运输厅基金项目 (202213); 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室 (福建省地质灾害重点实验室) 开放基金 (FJKLGH2023K001)

Supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province (Grant No. 2021J01600), the Foundation of Fujian Provincial Department of Transportation (Grant No. 202213) and the Opening Fund of Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Natural Resources (Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention) (Grant No. FJKLGH2023K001)

作者简介: 戴自航 (1966-), 男, 博士, 1990 年毕业于焦作矿业学院矿山测量专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事滑坡治理和边坡稳定分析等方面的教学与研究工作。E-mail: dzhang@fzu.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0746

the conventional strain-controlled direct shear apparatus. Subsequently, shear tests were conducted on this interface under varying contact pressures, different surface roughnesses, moisture contents of the soil, and cement mortars with varying water-cement ratios. The modes of shear failure and the shear stress-shear displacement relationships of the interfaces under these conditions were examined. The key findings are: (1) the shear stress-shear displacement relationship at the interface typically exhibits a nonlinear strong softening behavior, with rougher soil surfaces showing a more pronounced relationship; however, the degree of softening decreases with increasing contact pressure; (2) the peak and residual shear strengths demonstrate a nonlinear relationship with respect to contact pressure; (3) the shear displacements corresponding to the peak and residual shear strengths generally do not exceed 4 mm and 6 mm, respectively. Therefore, in cohesive soils, increasing the roughness of the anchor bolt hole wall and moderately increasing the grouting pressure (or re-grouting at a higher pressure to enhance the contact pressure between the soil and the anchorage body) can improve the bearing capacity of the anchor bolt. This experimental study provides a foundation for accurately representing the shear stress-shear displacement relationship at the interface between cohesive soil and the grouted body using a mathematical function, or for establishing an accurate constitutive model for this type of interface using elastoplastic mechanics theory.

Key words: soil mechanics; grouted body; cohesive soil; interface; shear stress-shear displacement relation; shear strength

1 引言

近 50 多年来, 锚固结构在滑坡灾害治理和边坡加固工程中得到了广泛应用^[1-2]。人们在实践中提出和发展了形式多样的边坡抗滑锚固结构, 如预应力锚杆框架梁或肋梁、预应力锚杆抗滑桩等。与传统抗滑结构, 如边坡重力式抗滑挡墙、无锚拉普通抗滑桩等相比, 边坡抗滑锚固结构具有主动加固、造价低、轻巧美观、施工安全等优点, 因而成为当今世界各国在大、中型滑坡治理和边坡支护中优先考虑的结构^[2]。

近年来, 我国已成为全球锚杆或锚索(以下除特别区分外, 均统称锚杆)用量和岩土锚固工程数量最多的国家^[2-3]。黏性土(即塑性指数 $I_p > 17$ 的黏土和 $10 < I_p \leq 17$ 的粉质黏土)在自然界分布十分广泛, 而锚杆的长度通常很有限, 很多情况下其锚固段不能入岩, 以致锚固于稳定黏性土中的锚杆在实际工程中很常见。当水泥浆或水泥砂浆满足设计强度要求时, 灌浆锚固体(简称灌浆体或锚固体)与锚杆筋体之间具有足够的黏结强度, 而锚固体与黏性土界面就成了一个薄弱环节, 致使土层锚杆(以下简称土锚)的破坏形式主要是锚固体的拔出破坏^[2]。或者说, 二者界面往往是整个锚固结构体系的一个关键环节^[4], 亦即土锚的抗拔承载力受控于该界面的抗剪强度。因此, 能否准确计算灌浆体与黏性土界面所能提供的抗剪切应力是提高锚固结构设计计算精度和水平的关键, 而要做到这一点, 就必须弄清灌浆体与黏性土界面的剪切特性。

O. Reul^[5]的直剪试验表明: 当以较大剪切位移

(15 或 25 mm 左右)作为剪切试验中止控制标准时, 砂土与预制混凝土结构界面剪应力 τ 与剪切位移 s 呈非线性关系, 具有弱软化曲线的特征(见图 1^[6]), 可用界面弹塑性本构模型来描述。为克服常规应变式直剪仪在剪切过程中实际剪切面积不断减小^[7]、上下盒边缘处的应力集中明显等问题, 胡黎明^[8]采用改进的直剪仪对砂与不同粗糙程度的钢板界面进行了剪切试验, 试验结果表明界面 τ - s 也呈非线性弱软化关系。卢廷浩等^[9]采用改进的直剪仪对不同含水率的黏土与预制混凝土块、砖、石界面进行了剪切试验, 结果表明: 由于结构表面颗粒对土中水的吸附力使得界面表现出一定的黏聚力; 随含水率的不同, 界面抗剪强度可小于或大于土自身的抗剪强度; τ - s 呈非线性弱软化关系, 少数呈弱硬化关系。笔者认为, 弱硬化关系的出现与其试验终止控制标准仅为 6 mm 有关。赵春风等^[10]的大型直剪试验结果表明, 黏土与预制混凝土界面的剪切特性

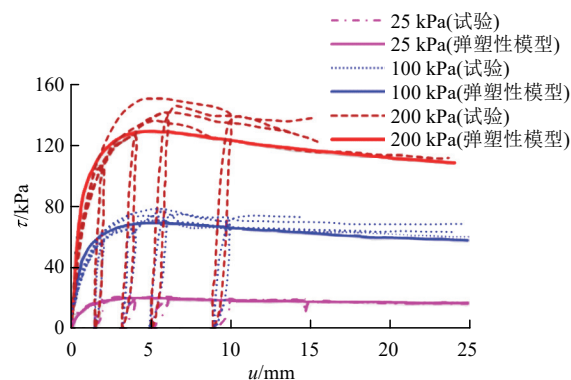


图 1 砂土与预制混凝土界面 τ - s 的关系^[6]

Fig.1 τ - s relations on interface of sand and fabricated concrete^[6]

受法向应力历史或大小的影响显著。石熊等^[11]的直剪试验表明,黏性土-预制混凝土接触面的应力-应变特性受法向应力和接触面粗糙程度等因素的影响。

值得注意的是,工程中的锚杆锚固体通常为钻孔后原位注入水泥浆或水泥砂浆后形成的结石体。笔者认为,浆液与其孔壁土因胶结作用致使土与锚固体界面具有一定的黏着强度,但锚杆受拉使界面剪应力达到一定大小时,胶结键易断裂,致使黏着强度完全散失,只剩下残余摩擦强度,使得 τ - s 呈现图2所示非线性强软化关系(注:图中 τ_p 和 τ_r 分别为峰值抗剪强度和残余摩擦强度),不同于图1所示无胶结作用的砂土与预制混凝土界面的非线性弱软化关系。

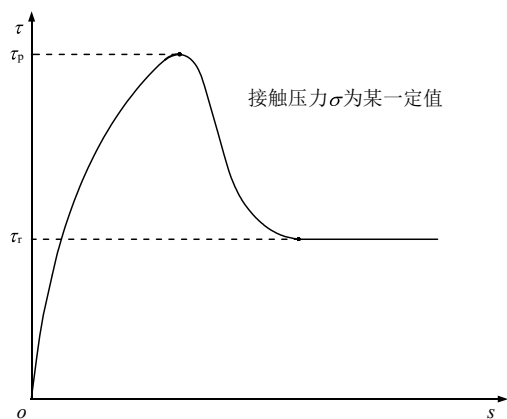


图2 锚杆灌浆体与黏性土界面 τ - s 关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of τ - s relation on interface of anchor bolt grouted body and cohesive soil

然而,目前国内外专门针对锚杆灌浆体与岩土界面剪切特性的研究尚不多见。对于岩层锚杆,尤春安等^[4, 12]以混凝土基体代替岩体率先开展了岩体与灌浆体界面的室内模型抗拔试验,其研究表明,岩体与灌浆体的界面是一个具有一定厚度(50~100 μm)的界面层,且界面层中存在称为“弱谷”的最薄弱区,是受力后首先引起破坏的薄弱区,界面的拉拔荷载-位移关系可按4分段线性强软化形式来表征。对于土层锚杆,陈昌富等^[13]采用自制土锚界面测试仪开展了灌浆体与黏土界面的室内模型抗拔试验,结果表明界面剪应力与剪切位移呈非线性强软化关系。但上述锚杆灌浆体与岩体和土体界面剪切特性的室内模型试验均无法测试拉拔荷载与接触压力(法向压力) σ 的大小关系,而实际工程的锚杆的抗拔承载力无疑与二者界面接触压力大小有关。此外,界面的胶结作用强弱与界面的粗糙程度、土中含水率、水泥或水泥砂浆水灰比等因素有关,但上述室

内模型试验也未考虑。因此,开展这些影响因素下锚杆灌浆体与黏性土界面的剪切试验,全面揭示其剪切特性,对于采用数学函数直接拟合试验曲线的方法建立 τ - s 全过程本构关系^[13]或采用弹塑性力学理论建立描述该关系的界面本构模型^[6, 12],具有重要的理论和现实意义,有望显著提高土锚及其锚拉结构的理论计算与数值模拟分析水平。

2 研究对象的工程背景

图3为福州市高新区某花岗岩残积黏性土路堑边坡支护中拉力型锚杆施工时的情形。其施工工序为:(1)按锚杆设计孔径和长度钻进锚杆孔(工程实践表明,稳定性较好的黏性土中钻孔成型好,无塌孔,但孔壁并非光滑的,通常具有一定粗糙度);(2)将安装有注浆管、耐压止浆塞和对中支架的锚杆筋体(锚索或钢筋)置入锚杆孔;(3)采用压力灌浆泵和孔底返浆法对锚固段按设计灌浆压力注入配制好的水泥砂浆或水泥浆;(4)某些锚固工程,为增大黏性土中土锚接触压力和灌浆体直径以提高锚杆锚固力,在浆液初凝后(初次灌浆2h左右)进行二次或重复高压劈裂灌浆。

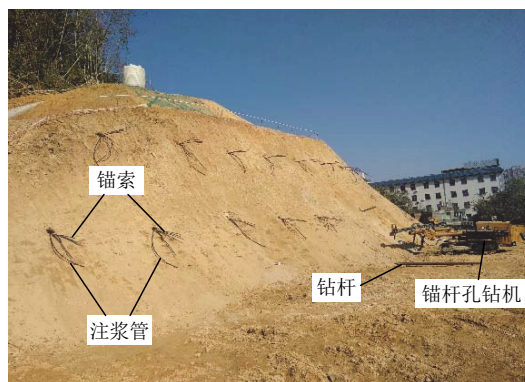


图3 某边坡土锚施工

Fig.3 Construction of soil anchor bolts in a slope

以图3最左边的锚杆为例,图4为其灌浆结石形成锚固体后的示意图。由于黏性土的低渗透性,在土力学中被视为不透水层。笔者认为,锚固工程中浓稠的灌浆液渗透性更低,且在较短时间内凝结,不会渗透至钻孔壁的黏性土中,不同于渗透性大的无黏性土(砂土、碎石土)。但是,与岩层中锚杆灌浆锚固体与岩体间会形成0.05~0.1 mm薄层水化膜界面层^[4, 12](由氢氧化钙、钙矾石、水泥凝胶、黏土颗粒、水等物质组成)类似,锚杆灌浆体与黏性土间也会形成这样的水化膜界面层,界面剪切特性由这层水化膜决定。

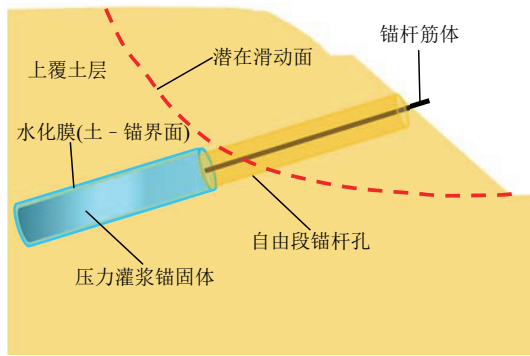


图4 土-锚界面示意图

Fig.4 Schematic diagram of interface between soil and anchor bolts

3 灌浆体与黏性土界面直剪试验

由图4可知,虽然工程中土-锚界面形状常为圆柱状,但相同粗糙程度的界面的剪切特性与界面形状无关,故可通过制作室内水泥砂浆体(简称砂浆体)与土平面状接触面的直剪试样来揭示实际工程中土-锚界面的剪切特性,而并非一定要采用土与圆柱状灌浆体界面的拉拔试验^[13],正如不管土与预制混凝土等结构接触面形状如何,均可采用平面状接触面的直剪试验来探索其界面的剪切特性^[5·8-11·14-16]。

3.1 试验材料

试验中灌浆体采用拌制水泥砂浆,由水、水泥(425 快硬硅酸盐水泥)、细砂按不同设计配合比充分搅拌而成。所用黏性土取自福州市闽侯县南通镇某公路边坡场地的黄土,由液塑限联合测试仪测得其塑限 $w_p = 22.3\%$,液限 $w_L = 40.7\%$,故其塑性指数 $I_p = 18.4 > 17$,属于黏土。室内轻型击实试验结果(见图5)确定其最优含水量为 $w_{op} = 22\%$,对应最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.64 \text{ g/cm}^3$ 。

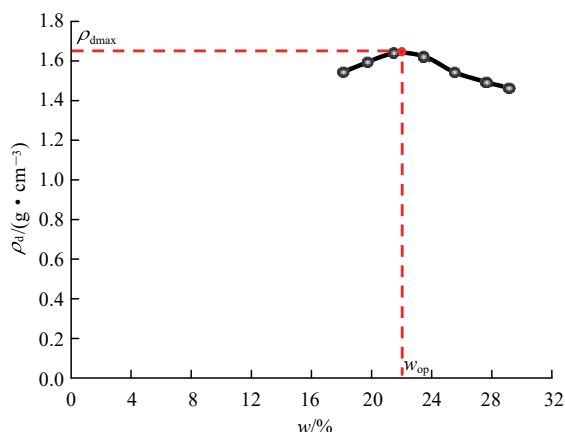


图5 试验用黄土的击实曲线

Fig.5 Compaction curve of loess used in the tests

3.2 直剪仪改装

试验采用自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室的 ZJ 型应变控制式四联直剪仪,为南京土壤仪器厂生产,由电机驱动下盒产生水平位移进行试样的剪切。通常 1 组平行试样为 4 个,分别在竖向(法向)施加不同压力的同时进行剪切,剪切速率范围为 $0.02 \sim 2.4 \text{ mm/min}$,可无级调速,本文试验设置为 0.8 mm/min 。该仪器采用高精度位移传感器,能够精确测量试件的位移变化,确保试验数据的准确性。该组仪器在该重点实验室长期用于生产和科学试验,且定期送权威检测机构进行了鉴定与校正,精度和稳定性良好。

为克服常规直剪仪在剪切过程中剪切面积不断减小、上下盒边缘处的应力集中问题,对直剪仪进行了改装。具体方法是取下盒的内框拆除并以定制的有机玻璃模具(长×宽×深 = $81 \text{ mm} \times 81 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,壁厚 3 mm)替换,其原理如图6所示,图中左上角为平面投影。经此改装的直剪仪,最大水平剪切位移可达到 12 mm 。显然,这样的改装不影响直剪仪原有精度和稳定性。

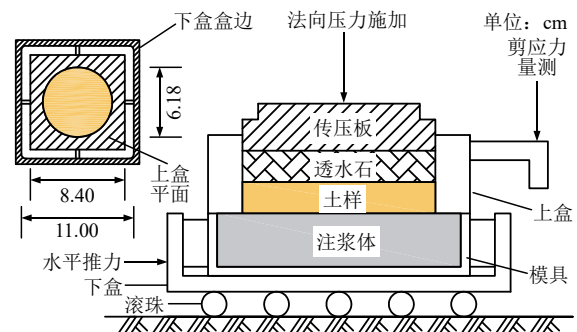


图6 改装直剪仪上灌浆体-黏性土界面剪切试验示意图

Fig.6 Schematic diagram of shear test of interface between grouted body and cohesive soil using refitted direct shear apparatus

3.3 试样制备

如图7所示,剪切试样制备的步骤如下:

(1) 参照相关标准^[17]并根据试验含水率与压实度要求采用专用环刀压样器制备高 20 mm 、直径 61.8 mm 的黏土试样,然后用保鲜膜将试样密封保存 $1 \sim 2 \text{ d}$,使黏土充分吸收水分并避免水分蒸发损失。

(2) 为使有机玻璃模具可重复使用,在模具内壁先均匀涂抹一层凡士林作为脱模剂,再垫上一薄层保鲜膜,然后将按设计配合比配制并搅拌均匀的水泥砂浆注入模具内,并用刮线将水泥砂浆表面刮平。

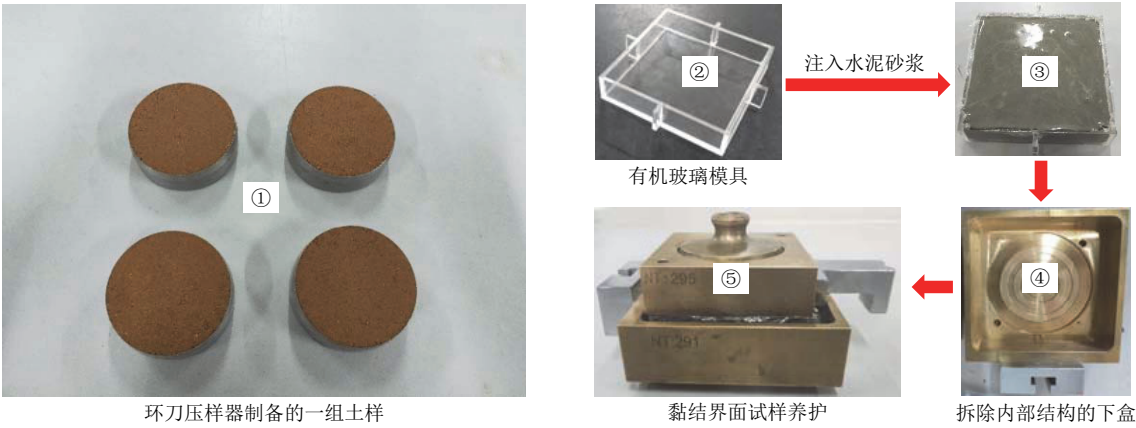


图 7 灌浆体与黏土黏结界面试样制备过程

Fig.7 Preparation procedures of interface specimen of grouted body and clay

(3) 立即将步骤(2)中盛满水泥砂浆的模具置入下剪切盒中, 将上剪切盒轻轻置于模具正上方(模具四壁支撑了上盒), 轻轻按压上剪切盒盖帽(传压板), 感受到轻微阻力后停止按压, 此时黏土试样与现浇水泥砂浆恰好接触但不陷入, 砂浆与黏土将因胶结作用而相互黏结, 然后将其置于潮湿密闭空间一体养护 2 周以上。

3.4 试验方案

考虑到灌浆体与黏土接触面的剪切特性受法向应力、土体表面粗糙程度、土体含水率和灌浆体水灰比等因素影响。采用改装直剪仪在竖向压力(即界面法向应力或接触压力)100, 200, 300 或 400 kPa 下, 对不同含水率 w (基于图 5 击实曲线选取 16%, 22%或 28%)的黏土与不同水灰比(水:水泥:细砂 = 0.35:1:0.8, 0.4:1:0.8 或 0.45:1:0.8)的水泥砂浆胶结界面共进行了 12 组剪切试验, 试验设计方案如表 1 所示。值得说明的是, 由图 7 可见, 环刀压样器制备的土样表面比一般黏性土中锚杆钻孔壁光滑, 视为较光滑土样, 相应界面称为较光滑界面, 但为模拟较粗糙的钻孔壁, 将 10 组环刀压样器土样与水泥砂浆接触的一面用 240 目的砂纸进行了均匀打磨, 使其表面较粗糙, 与钻孔表面接近, 相应界面

称为较粗糙界面。同时, 为了对比, 还进行了较粗糙表面土样与预制砂浆体(配合比 0.4:1:0.8)接触面的直剪试验。每组的 4 个试样养护后一并安装到前述全自动四联直剪仪上, 通过砝码施加表 1 设计竖向压力后, 由电机驱动同时进行剪切。试验数据由连接直剪仪的电脑实时自动采集。

4 试验结果分析

4.1 界面剪切破坏表观形态分析

4.1.1 不同接触压力下界面剪切破坏形态

以试验方案①, 即土样表面较粗糙、含水率等于最优含水率 $w_{op} = 22\%$ 、浆液水灰比为 0.4:1:0.8 的一组试样为代表, 灌浆体与黏土界面剪切破坏表观形态如图 8 所示。可见, 该组的 4 个试样的界面最终剪切破坏形态特征有明显区别, 在 σ 较低, 如 $\sigma = 100$ kPa 时, 灌浆体表面有较多的残余黏土, 随着法向应力增大, 黏土的残余量逐渐减少, 当 $\sigma = 400$ kPa 时, 灌浆体表面几乎没有残余黏土, 表明剪切破坏面表观形态与接触压力大小有关。笔者认为, 微观上, 较粗糙土体表面存在微小起伏^[6],

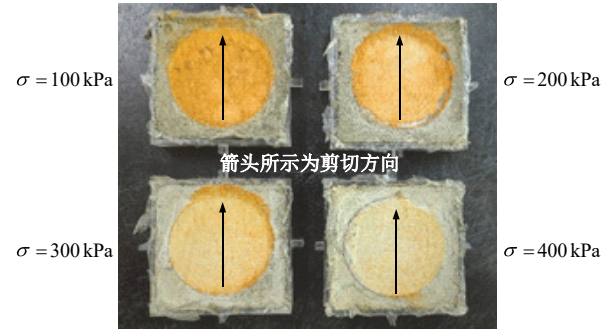


图 8 不同接触压力下较粗糙界面剪切破坏表观形态

Fig.8 Superficial forms of shear failure of relatively rough interfaces under various contact pressures

表 1 试验设计方案

Table 1 Experimental design schemes

序号	竖向压力 $\sigma/(10^2 \text{ kPa})$	含水率 $w/\%$	水灰比	土表面	组数
①	1, 2, 3, 4	22	0.4:1:0.8	较粗糙	2
②	1, 2, 3, 4	22	0.4:1:0.8	较光滑	2
③	1	16, 22, 28	0.4:1:0.8	较粗糙	2
④	3	16, 22, 28	0.4:1:0.8	较粗糙	2
⑤	1	22	变量	较粗糙	2
⑥	3	22	变量	较粗糙	2

当接触压力较低时,水平剪切应力会引起微突土体的“啃断”破坏^[3, 6],以致灌浆体表面残留较多的黏土,而接触压力较高时,主要为较大竖向压力和水平剪应力作用下的摩擦(“刮擦”)剪切破坏,故在灌浆体表面少有黏土残留。同时可见,浆液并未渗入到其上方的黏土试样中,与前文的观点相符。

4.1.2 土表面粗糙程度对剪切破坏形态的影响

试验方案②,即土样表面较光滑,含水率为22%,水灰比为0.4:1:0.8,不同法向应力下灌浆体与黏土界面剪切破坏表观形态如图9所示。与图8所示土样表面较粗糙的情况相比,不同接触压力下剪切破坏形态差异不甚明显,但相较后者,在低接触压力,如100 kPa时,灌浆体表面残留的土明显少些,且随接触压力增大,残留量更少些,在高接触压力,如400 kPa时,灌浆体表面上几乎没有黏土残留,表明低接触压力下土表面的粗糙程度对剪切破坏表观形态的影响较大,而高接触压力下影响很小。

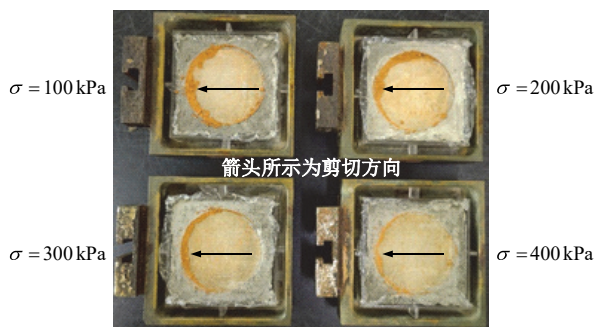


图9 不同接触压力下较光滑界面剪切破坏表观形态
Fig. 9 Superficial forms of shear failure of relatively smooth interfaces under various contact pressures

4.1.3 土的含水率对剪切破坏形态的影响

以试验方案③,即土样表面较粗糙、含水率分别为16%、22%和28%、浆液水灰比为0.4:1:0.8及接触压力100 kPa的试样为代表,灌浆体与黏土界面剪切破坏表观形态如图10所示。可见,3个试样剪切破坏表观形态差别不大,但随着含水率的增加,灌浆体表面上黏土的残留量增大,视觉上残留土的潮湿度增大。

4.1.4 灌浆体水灰比对剪切破坏形态的影响

以试验方案⑤,即土样表面较粗糙、含水率等于最优含水率 $w_{op}=22\%$ 、浆液水灰比为0.35:1:0.8,0.40:1:0.8和0.45:1:0.8及接触压力100 kPa的试样为代表,灌浆体与黏土界面剪切破坏表观形态如图11所示。可见,3个试样剪切破坏表观形态有明显差别,水灰比 $W/C=0.35$ 的试样剪切破坏后在

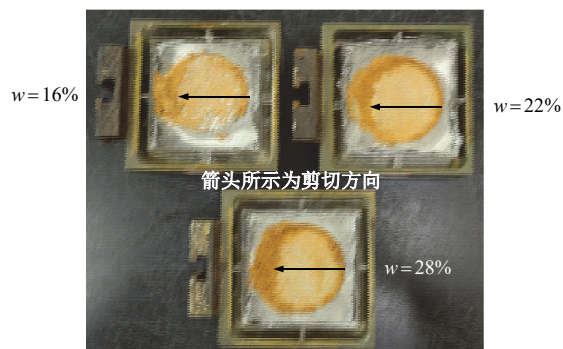


图10 不同含水率下较粗糙界面剪切破坏表观形态
Fig. 10 Superficial forms of shear failure of relatively rough interfaces under various water contents

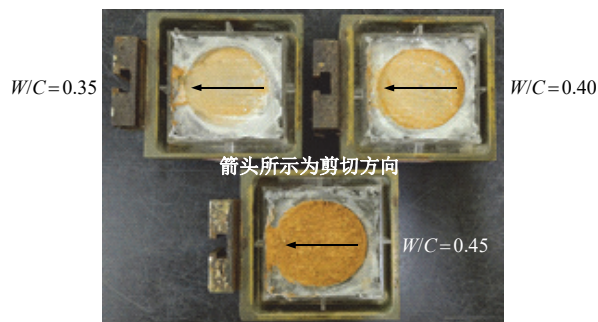


图11 不同灌浆体水灰比下较粗糙界面剪切破坏表观形态
Fig. 11 Superficial forms of shear failure of relatively rough interfaces with various water-cement ratios in grouted bodies

灌浆体表面上几乎没有黏土残留,而随着水灰比的增加,黏土残留量增大,水灰比 $W/C=0.45$ 的试样剪切破坏后灌浆体表面上黏土的残留量很多,覆盖了整个表面,表明剪切破坏的表观形态受水灰比的影响显著。

4.1.5 界面有无胶结对剪切破坏形态的影响

除灌浆体单独养护后形成的预制砂浆体与黏土试样接触外(二者界面无胶结作用),其他同表1中的试验方案①,得到无胶结作用下灌浆体与黏土界面剪切破坏表观形态如图12所示。可见,与前文

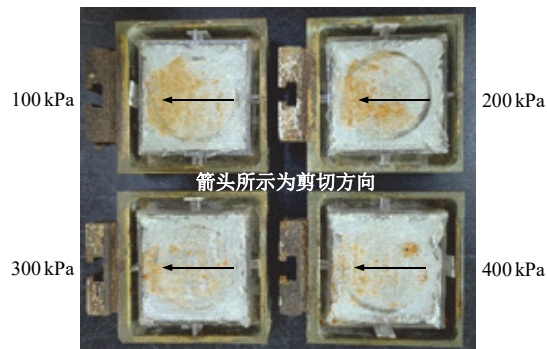


图12 无胶结较粗糙界面剪切破坏表观形态
Fig. 12 Superficial forms of shear failure of relatively rough interfaces without cementation

有胶结界面的图 8 有明显差别, 预制砂浆体表面总体上明显更干净, 少有黏土残留, 且接触压力越大, 表面越干净。理论上, 无胶结作用的土与预制砂浆体界面的剪切破坏是二者单纯的摩擦剪切破坏。

4.2 界面剪应力 - 剪切位移曲线特性分析

4.2.1 不同法向应力下剪应力 - 剪切位移曲线

由试验方案①得到不同法向应力下灌浆体与黏土界面 τ - s 曲线如图 13 所示。可见, 在每一接触压力下均呈非线性强软化型, 形如图 2 所示曲线。每条曲线可分为 3 个不同的阶段:

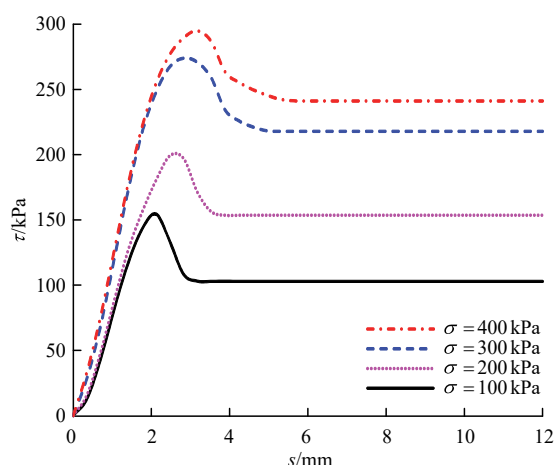


图 13 不同法向应力下界面 τ - s 关系

Fig.13 τ - s relationships of relatively rough interfaces under different normal stresses

(1) 弹塑性阶段: 界面层的剪应力随剪切位移的增大非线性增大, 为硬化弹塑性阶段。此阶段, 抗剪应力由界面层的胶结和摩擦作用共同提供, 直至剪切位移达到一定值(一般不超过 4 mm)时, 其值达到最大, 即达到峰值剪应力(界面层的峰值抗剪强度)。

(2) 强软化阶段: 在达到峰值强度后, 界面层的胶结键已断裂^[4, 17], 胶结作用提供的黏着强度已消失, 只有摩擦强度, 以致抗剪强度急剧降低, 但剪切位移继续增长, 呈现出强软化现象, 为软化弹塑性阶段。

(3) 残余摩擦阶段: 强软化阶段结束(一般剪切位移不超过 6 mm)后, 只剩下残余摩擦强度, 其特征是在法向应力不变的条件下, 剪应力保持不变而剪切位移继续增大, τ - s 呈水平直线关系, 即产生塑性滑移, 为理想塑性阶段。

对比 4 种不同接触压力下的曲线可见, 随着法向应力的增大, 界面初始剪切刚度略有增大, 界面峰值抗剪强度与残余抗剪强度及其对应剪切位移均

增大, 软化程度逐渐降低, τ - s 曲线过峰值抗剪强度后“跌落”越慢, 即由峰值强度过渡到残余强度的速率降低。

根据图 13 所示曲线形状, 一方面, 可采用陈昌富等^[13]类似单一数学函数直接拟合试验曲线的方法建立 τ - s 全过程本构关系, 或与郭锐剑等^[18]采用 3 段直线的本构模型类似, 采用 2 段非线性函数与 1 段线性函数来建立 τ - s 全过程本构关系, 但函数中应包含接触压力 σ (陈昌富等^[13, 18]仅是对锚杆模型拉拔试验曲线的直接拟合, 并未考虑接触压力变化对锚杆承载力的影响); 另一方面, 与 P. Wriggers^[6]建立的图 1 所示砂土与预制混凝土界面的接触压力依赖的非线性弹塑性本构关系的方法类似, 采用弹塑性理论建立图 13 所示黏性土与现浇灌浆体界面的接触压力依赖的非线性强软化本构关系。在此基础上, 就可推导出考虑接触压力大小影响的锚杆锚固段计算解析解, 以及获得锚杆及其锚拉结构计算的高精确度数值解。限于篇幅, 有关这 2 个方面的理论研究笔者将另文撰述。

4.2.2 粗糙程度对剪应力 - 剪切位移曲线的影响

对于试验方案②, 即土样表面较光滑、含水率、水灰比和法向应力同方案①的试样, 其 τ - s 曲线如图 14 中的虚线所示。可见, 各曲线仍呈软化型, 且仍存在随接触压力的增大, τ - s 曲线过峰值抗剪强度后“跌落”越慢的现象。但与图中实线所示土样表面较粗糙试样的曲线(同图 13 的曲线)相比, 软化现象不甚明显, 属于弱软化型, 以致峰值和残余强度相差不大, 这是由于土体表面较光滑时界面层的胶结作用较弱, 致使黏着强度较低, 以致抗剪强度受较弱胶结键断裂的影响不甚显著的缘故。此外,

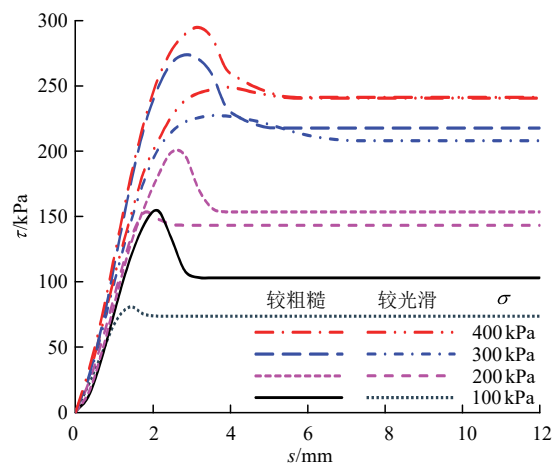


图 14 不同法向应力下较光滑界面 τ - s 关系

Fig.14 τ - s relationships of relatively smooth interfaces under various normal stresses

不难发现, 相同接触压力下较粗糙界面的峰值强度显著高于较光滑界面, 但随接触压力增大, 二者残余强度的差值降低。表明界面的抗剪强度特别是峰值抗剪强度, 随界面粗糙程度的增大而增大。

4.2.3 含水率不同时剪应力-剪切位移曲线

对于试验方案③和④, 即土样表面较粗糙、浆液水灰比均为 0.4:1:0.8, 但土样含水率分别为 16%, 22% 或 28% 的灌浆体与黏土界面, 在 $\sigma = 100$ 和 300 kPa 下 τ - s 的关系曲线如图 15 所示。可见, 在试验含水率范围内, 随着黏土含水率的增大, 界面的初始剪切刚度略有增大, 界面的峰值和残余抗剪强度相应增大, 达残余强度时的剪切位移逐渐增大。分析认为, 随着土的含水率增加, 水化作用增强, 浆液中的水泥凝胶^[4](称水化硅酸钙或 C-S-H 凝胶)数量相应增加, 从而水泥凝胶与黏土表面接触点增多, 增大了界面层胶结作用, 致使界面的黏着强度增大, 抗剪强度提高。同时可见, 相同含水率下, 界面的峰值和残余抗剪强度随法向应力的增加而增大。然而, 低含水率(如 $w=16\%$)时, 随法向应力的增加, 界面的 τ - s 曲线由强软化型逐渐变为弱软化型。值得说明的是, 含水率和法向应力分别为 22% 和 100 kPa 的黑线与图 13 中对应黑线的形状存在稍大不同。这是由于图 13, 15 中的试样不是同一组试样而存在的正常差异。

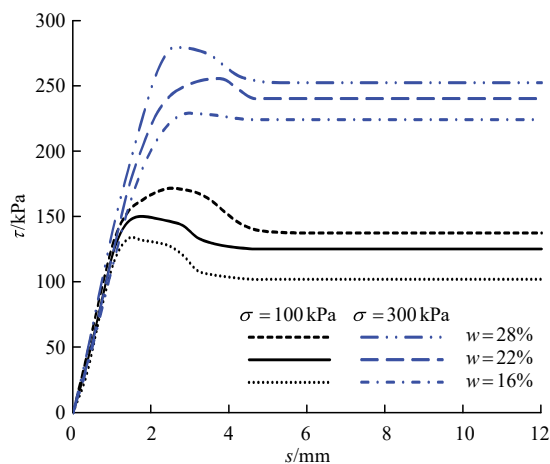


图 15 不同含水率下较粗糙界面 τ - s 关系

Fig.15 τ - s relationships of relatively rough interfaces with various water contents

4.2.4 灌浆体水灰比不同时剪应力-剪切位移曲线

对于试验方案⑤和⑥, 即土样表面较粗糙、土样含水率均为 22%, 但浆液水灰比分别为 0.35:1:0.8, 0.40:1:0.8 或 0.45:1:0.8 的灌浆体与黏土界面, 在 $\sigma = 100$ 和 300 kPa 下 τ - s 关系曲线如图 16 所示。可见, 在试验水灰比范围内, 随着水灰比的

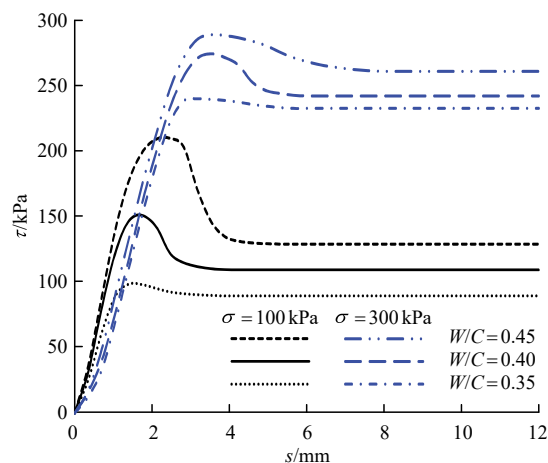


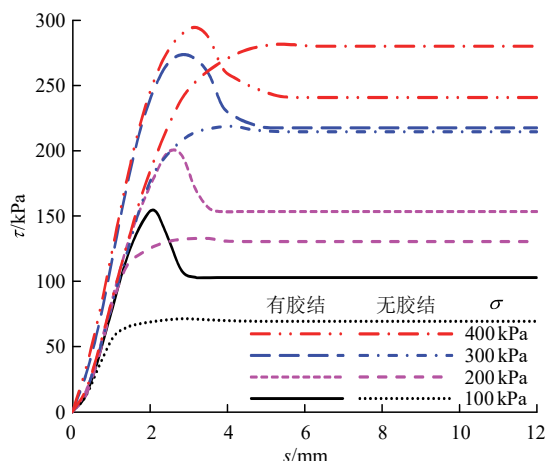
图 16 不同灌浆体水灰比下较粗糙界面 τ - s 关系

Fig.16 τ - s relationships of relatively rough interfaces with various water-cement ratios in grouted bodies

增加, 界面初始剪切刚度基本保持不变, 而峰值和残余抗剪强度及其所对应的剪切位移随之增大。分析认为, 当水灰比太小时, 因水泥砂浆过干, 水化作用弱, 水化硅酸钙数量少, 界面层的胶结作用弱, 而随着水灰比增大, 水化作用增强, 浆液中的水化硅酸钙数量增加^[4], 其与黏土表面接触点增多, 增大了界面层胶结作用, 使界面的黏着强度增大, 抗剪强度提高。同时, 更多的砂颗粒靠近界面层, 增大了摩擦强度, 使得界面的峰值和残余抗剪强度增大。此外, 随着接触压力增大, 高水灰比试样的 τ - s 曲线由强软化型逐渐变为弱软化型; 低水灰比试样的 τ - s 曲线则始终呈弱软化型。这是因为在实验过程中发现, 水灰比为 0.35 时, 浆液过干, 与土间少有胶结作用, 故其曲线不会有胶结键断裂出现明显的“跌落”, 以致其残余强度稍低于峰值强度, 是界面剪切破坏前的静摩擦转变为动摩擦的反映。然而, 工程中不宜采用过高水灰比, 这是因为浆液太稀, 不利于结石体的形成。试验研究表明, 工程中水泥砂浆灌浆体常采用 0.4~0.45 的水灰比是科学合理的。

4.2.5 界面有无胶结对剪应力-剪切位移曲线的影响

不同接触压力下黏土与预制砂浆体, 即无胶结作用界面 τ - s 关系曲线如图 17 中的虚线所示。可见, 均呈弱软化型, 其残余强度与峰值强度差别甚微, 是界面剪切破坏前的静摩擦转变为动摩擦的反映, 这些曲线与图中相应实线所示有胶结作用的黏土与现浇砂浆体界面的强软化型曲线(同图 13 的曲线)有显著差别。相同接触压力作用下, 有胶结界面峰值抗剪强度均大于无胶结的, 接触压力为 100 kPa

图 17 有胶结较粗糙界面 τ - s 关系Fig.17 τ - s relations of relatively rough interfaces without cementation

时,有最大增幅,达 97.3%。此外,当接触压力为 100 kPa 时,有胶结界面的残余抗剪强度较无胶结的增大了 48.0%,但随着接触压力增大,增幅减小,甚至当接触压力为 400 kPa 时,前者较后者反而降低了 14.0%,分析认为,这是由于有无胶结界面的结构的差异以及受接触压力影响所造成的。

4.3 界面的抗剪强度分析

众所周知,目前,土与结构界面的抗剪强度理论中不考虑土与界面胶结作用的经典库仑摩擦理论,即

$$\tau = \mu\sigma \quad (1)$$

式中: μ 为界面的摩擦因数。该理论已被 Abaqus, Ansys 等有限元软件的接触问题分析本构模型采用。另一个是考虑土与界面胶结作用的莫尔-库仑理论,即

$$\tau = c + \mu\sigma \quad (2)$$

式中: c 为界面的黏着力。该理论被 Diana, Plaxis 等有限元软件的接触问题分析本构模型采用。

可见,上述界面的 2 种抗剪强度理论均为线性强度理论,界面的抗剪强度 τ 与接触压力 σ 成正比。将试验方案①,即界面较粗糙试样的图 13 中不同接触压力 σ 对应各曲线上的峰值剪应力 τ_p 和残余剪应力 τ_r 分别点绘到 σ - τ 坐标系中,可拟合得到如图 18 所示的峰值和残余抗剪强度包线。同时,为反映界面粗糙程度对其抗剪强度的影响,由试验方案②,即界面较光滑试样的图 14 虚线对应的峰值剪应力也绘出了相应的峰值强度包线。从图 18 可见,无论是峰值强度还是残余强度,均与接触压力不成正比,即并非线性关系,具有显著的非线性特征;界面较光滑的峰值强度包线位于界面较粗糙的下侧,且与

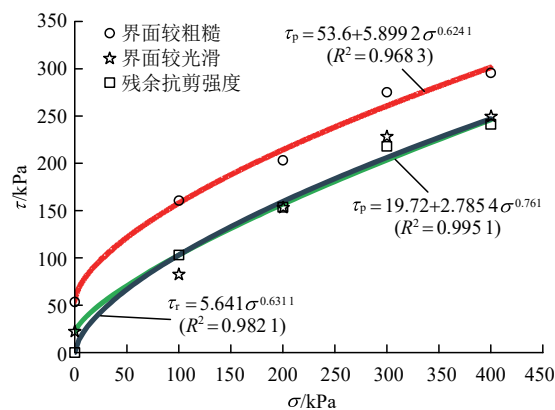


图 18 灌浆体与黏土界面峰值和残余抗剪强度包线

Fig.18 Peak and residual shear strength envelopes of interface of clay and grouted body

后者的残余强度很相近。因此,灌浆体与黏性土界面的抗剪强度不宜采用经典的线性莫尔-库仑理论来描述。

图 19 给出了表面粗糙程度相同的黏土与有胶结作用的灌浆体界面的峰值强度(见图 13)及黏土与无胶结作用的预制砂浆体峰值抗剪强度(见图 17 中虚线)包线对比。可见,预制砂浆体与黏土界面的抗剪强度仍符合经典的线性莫尔-库仑理论,这种与接触压力大小近似为成正比的关系也可从图 17 中的虚线看出,而灌浆体与黏土界面的抗剪强度与接触压力大小的非线性关系不仅可从图 18, 19 看出,也可从图 13 中看出。

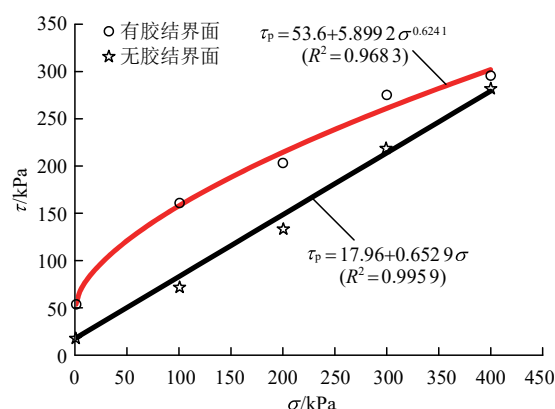


图 19 有、无胶结界面峰值抗剪强度包线

Fig.19 Peak shear strength envelopes of clay and interfaces with and without cementation

从图 19 可见,灌浆体与黏土界面的抗剪强度大于其与预制砂浆体界面的抗剪强度。黏土与预制砂浆体界面也有一定的黏着力,与卢廷浩等^[9]测试的黏土与预制混凝土块界面剪切试验结果类似,但其黏着力 $c = 17.96$ kPa 显著小于灌浆体与黏土界面的 $c = 50.07$ kPa。笔者认为,黏土与预制砂浆体界

面的黏着力是由土中水与干燥的预制砂浆体表面的吸附力所引起的,且这种吸附力在整个剪切试验过程中保持不变,故其界面 τ - s 关系曲线在达峰值以后常呈弱软化,主要是由界面脱黏前的静摩擦过渡至动摩擦系的反映。但是,当剪切位移达到一定值时,灌浆体与黏土界面的黏着力随界面的胶结键断裂而丧失,故其剪应力-剪切位移在到达峰值以后常呈强软化关系。

由前文所述,较粗糙界面强软化型剪应力-剪切位移曲线呈硬化、强软化和理想弹塑性 3 阶段特征。笔者认为,黏性土-灌浆体界面抗剪强度可用下式表达:

$$\tau = c + \mu(A)\sigma^a \quad (3)$$

式中: $\mu(A)$ 为界面的摩擦因数,是硬化或软化参数 A 的函数; a 为接触压力的幂指数。

显然,当 $a=1$ 则表示抗剪强度与接触压力呈线性关系。且当 $\mu(A)$ 为常数时,式(3)所示非线性抗剪强度理论即退化为式(2)所示经典莫尔-库仑理论。在残余摩擦即理想塑性阶段,界面已脱黏, $c=0$,于是退化为式(1)。图 18 中的 τ_p 和 τ_r 的表达式是式(3)在峰值点或残余阶段的具体形式。

5 结 论

(1) 为克服常规应变式直剪仪的缺点,文中提出的改装方法简单经济,便于在类似直剪试验中推广,也可从仪器厂家定制改装下盒的直剪仪,更好地满足长期使用之需。

(2) 当土的表面较粗糙时,低接触压力下,灌浆体与黏性土界面剪切破坏后,灌浆体表面有较多土体残留,而高接触压力下残留较少。随着土的含水率和灌浆体水灰比的增加,灌浆体表面上黏土的残留量增大。土与预制砂浆体界面剪切破坏后,黏土残留较少,且接触压力越大,黏土残留越少。

(3) 锚杆灌浆体与黏性土界面的剪应力与剪切位移常呈非线性强软化关系,可分为硬化弹塑性、强软化和残余摩擦 3 个阶段。达峰值抗剪强度时的剪切位移一般不超过 4 mm,而达残余抗剪强度的位移不超过 6 mm。界面的抗剪强度与接触压力也呈非线性关系,可采用文中提出的非线性抗剪强度理论来准确描述。

(4) 随着接触压力的增大,界面强软化的程度逐渐降低;随着界面粗糙度的增加,界面强软化的程度增大,界面的黏着力与摩擦强度增大,导致界面

的抗剪强度特别是峰值强度明显增大;在一定含水率或水灰比范围内,随着含水率或水灰比的增大,界面的峰值和残余抗剪强度及其对应的剪切位移增大,且随法向应力增大,高水灰比试样界面的剪应力-剪切位移由强软化变为弱软化关系,但水灰比太大则因浆液过稀不利于结石体的形成,低水灰比试样界面的剪应力-剪切位移则因胶结作用难以形成始终呈弱软化关系。因此,黏土层中增大锚孔孔壁粗糙程度,适当增大灌浆压力(或采用二次高压灌浆,可增大结石体与周边土体的接触压力)和浆液水灰比,有助于提高锚杆的承载力。

(5) 工程应用中,可通过采集原状土并将其表面按锚孔壁粗糙程度加工,然后制备与灌浆体胶结的试样进行文中所述直剪试验,获得实际工程中锚杆灌浆体与黏性土界面剪切特性。本文的试验研究为采用数学函数直接表征灌浆体与黏性土界面剪应力-剪切位移关系或采用弹塑性力学理论建立准确描述该类界面本构模型奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 2 版. 北京: 人民交通业出版社, 2010: 465 - 489.(ZHENG Yingren, CHEN Zuyu, WANG Gongxian, et al. Engineering treatment of slope and landslide[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2010: 465 - 489.(in Chinese))
- [2] 程良奎,李象范. 岩土锚固·土钉·喷射混凝土——原理、设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 11 - 21.(CHENG Liangkui, LI Xiangfan. Rock and soil anchoring, soil nailing, shotcrete—principle, design, and application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008: 11 - 21.(in Chinese))
- [3] 庄 茁,朱万旭,彭文轩,等. 预应力结构·锚固-接触力学与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 213 - 215.(ZHUANG Zhuo, ZHU Wanxu, PENG Wenxuan, et al. Prestressed structures, anchorage, contact mechanics, and engineering applications[M]. Beijing: Science Press, 2006: 213 - 215.(in Chinese))
- [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 Yubao. 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] REUL O. In-situ-messungen und numerische studien zum tragverhalten der kombinierten pfahlplattengründung. technical report 53, institut und versuchsanstalt für geotechnik[R]. Technische : Technische

- Universität Darmstadt, 2000.
- [6] WRIGGERS P. Computational contact mechanics[M]. 2nd ed. New York, US: Springer, 2006: 76 - 79.
- [7] 张敏江, 郭尧, 张丽萍, 等. 直剪试验中对土抗剪强度的一种修正方法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2005, 21(2): 96 - 98.(ZHANG Minjiang, GUO Yao, ZHANG Liping, et al. A revising method of shear strength of soil in direct shear test[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2005, 21(2): 96 - 98. (in Chinese))
- [8] 胡黎明. 土与结构物接触面力学特性研究和工程应用[博士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 2000.(HU Liming. Study on mechanical properties of soil-structure interface and engineering application[Ph. D. Theses][D]. Beijing: Tsinghua University, 2000.(in Chinese))
- [9] 卢廷浩, 王伟, 王晓妮. 土与结构接触界面改进直剪试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2006, 22(1): 82 - 85.(LU Tinghao, WANG Wei, WANG Xiaoni. Experimental study on soil-structure contact surface behavior by improved direct shear tests[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2006, 22(1): 82 - 85. (in Chinese))
- [10] 赵春风, 龚辉, 赵程, 等. 考虑法向应力历史的黏土-混凝土界面弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 848 - 855.(ZHAO Chunfeng, GONG Hui, ZHAO Cheng, et al. Elastoplastic analysis of interface between clay and concrete considering effect of normal stress history[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 848 - 855.(in Chinese))
- [11] 石熊, 张家生, 刘蓓, 等. 红黏土与混凝土接触面剪切特性试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(5): 1 826 - 1 831. (SHI Xiong, ZHANG Jiasheng, LIU Bei, et al. Experiential research on shearing properties of interface between red clay and concrete[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(5): 1 826 - 1 831.(in Chinese))
- [12] 尤春安, 战玉宝, 刘秋媛, 等. 预应力锚索锚固段的剪滞-脱黏模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 800 - 806.(YOU Chun'an, ZHAN Yubao, LIU Qiuyuan, et al. Shear lag-debonding model for anchorage section of prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 800 - 806.(in Chinese))
- [13] 陈昌富, 梁冠亭, 汤宇, 等. 锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1 115 - 1 122.(CHEN Changfu, LIANG Guanting, TANG Yu, et al. Anchoring solid-soil interface behavior using a novel laboratory testing technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1 115 - 1 122.(in Chinese))
- [14] MAGHSOODI S, CUISINIER O, MASROURI F. Thermal effects on mechanical behaviour of soil-structure interface[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(1): 32 - 47.
- [15] 林沛元, 郭潘峰, 郭成超, 等. 钢板、高聚物、土不同材料界面剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 85 - 93.(LIN Peiyuan, GUO Panfeng, GUO Panfen, et al. Experimental study on interfacial shear properties of steel plate, polymer and soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(1): 85 - 93.(in Chinese))
- [16] 张先伟, 孔令伟, 王静. 针对黏性土胶质联结特征的 SEM-EDS 试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增2): 195 - 203.(ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, WANG Jing. Experimental study of SEM-EDS for cementation bond characteristics of Zhanjiang clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Supp.2): 195 - 203.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical test method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.(in Chinese))
- [18] 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, 43(10): 4 003 - 4 009.(GUO Ruijian, CHEN Wenwu, DUAN Jian, et al. Pullout mechanical analysis of soil anchorbased on softening behavior of interface[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(10): 4 003 - 4 009.(in Chinese))