

# 桩基础与红层泥岩接触面剪切特性试验研究

韩依婷<sup>1\*</sup>, 肖锐<sup>2</sup>, 胡俊卿<sup>3</sup>

<sup>1</sup>兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

<sup>2</sup>甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州

<sup>3</sup>甘肃建投建设有限公司, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年6月19日; 录用日期: 2024年7月9日; 发布日期: 2024年7月22日

## 摘要

桩基础与红层泥岩接触面剪切特性研究是桩基承载机理研究的基础。本文以实际工程为例, 通过桩基础与红层泥岩接触面剪切试验, 研究不同粗糙度及不同法向应力作用下桩基础与红层泥岩接触面的剪切力学特性, 试验结果表明: 不同法向应力下接触面的剪切力随剪切位移的增大而增大, 达到峰值剪应力后逐渐减小并趋于稳定, 符合典型的剪切位移软化规律; 接触面的抗剪强度随粗糙度的增加而增大, 抗剪强度的均值差与粗糙度增值成正线性相关; 可根据不同法向应力与粗糙度来确定实际桩基础与红层泥岩接触面抗剪强度。

## 关键词

桩基础, 红层泥岩, 接触面抗剪强度, 粗糙度, 法向应力

# Experimental Study on Shear Characteristics of Contact Surface between Pile Foundation and Red Mudstone

Yiting Han<sup>1\*</sup>, Rui Xiao<sup>2</sup>, Junqing Hu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>Gansu Provincial Transportation Planning Survey and Design Institute Co., LTD, Lanzhou Gansu

<sup>3</sup>Gansu Jiantou Construction Co., LTD, Lanzhou Gansu

Received: Jun. 19<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 9<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2024

\*第一作者。

文章引用: 韩依婷, 肖锐, 胡俊卿. 桩基础与红层泥岩接触面剪切特性试验研究[J]. 土木工程, 2024, 13(7): 1204-1216.  
DOI: 10.12677/hjce.2024.137130

## Abstract

The shear characteristics of the contact surface between pile foundation and red mudstone is the basis of the research on the bearing mechanism of pile foundation. Taking practical projects as an example, this paper studies the shear mechanical properties of the contact surface between pile foundation and red mudstone under different roughness and different normal stresses through shear tests on the contact surface between pile foundation and red mudstone. The test results show that: under different normal stresses, the shear force of the contact surface increases with the increase of shear displacement, and gradually decreases and tends to be stable after reaching the peak shear stress, which accords with the typical softening law of shear displacement. The shear strength of contact surface increases with the increase of roughness, and the mean difference of shear strength has a positive linear correlation with the increase of roughness. The actual shear strength of the contact surface between pile foundation and red mudstone can be determined according to different normal stress and roughness.

## Keywords

Pile Foundation, Red Mudstone, Shear Strength of Contact Surface, Roughness, Normal Stress

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国红层泥岩分布广泛,总面积 826,398 km<sup>2</sup>,随着环境和土地的制约,是工程中不可避免的岩土体[1]。甘肃省地处西北地区,地质地貌复杂多变,除河西地区以外,其余各地均有大量红层泥岩分布。针对红层泥岩的物理力学特性,国内外学者已进行了大量研究,在物理特性方面:众多研究人员通过成分分析[2],浸水试验[3][4],干湿循环试验[5]-[10],研究了泥岩的遇水易崩解特性,并将红层泥岩按崩解特性分为强、中、弱及不崩解四类[11]。在力学性质方面:研究人员开展了单轴抗压试验[12]-[14]、三轴试验[15][16]、直剪试验[17],指出红层泥岩具有强度低、应变软化等特性。红层泥岩的不良工程性质,是困扰我国岩土工程建设的难题之一。

红层泥岩作为地基或基础时,因其特有的吸水易膨胀、软化等物理力学特性的发生使得地基承载力达不到工程要求的情况,在实际工程中往往会采用桩基础来改善该情况,提高地基承载力。桩基承载力大小是由桩身侧面与地基土相互摩擦作用决定的[18][19],因此桩基承载力是否发挥完全与桩-土界面特性存在紧密联系,其中桩-土界面的问题又可归结为土与结构接触面问题。桩-岩接触面指的是在实际工程中桩基与泥岩接触部分,由于泥岩与结构物在物理力学特性上的差异较大,使得二者在接触面处更容易发生破坏,对实际工程的安全性和稳定性造成危害,因此探究接触面的破坏机理在设计和分析工程结构中至关重要。国内外学者通过开展直剪、环剪试验及 DEM 等数值仿真计算,研究了粗糙度、颗粒级配、含水率及法向应力等因素对接触面力学特性的影响[20]-[25]。在诸多影响因素中,粗糙度一直被认为是影响接触面剪切强度的重要因素之一,不同学者对于粗糙度的划分方式也不相同,如早在 1981 年 Kishida [26]就提出根据接触面表面轮廓的表面起伏来判定粗糙度,其将沿 2.5 mm 长度上轮廓表面的最高峰和最低谷之间安定相对高度定义为粗糙度;张嘎、张建民和赵联桢等[27]-[30]在研究接触面粗糙度时均采用梯形结

构突起,前者通过不同钢板表面的峰谷距来定义接触面粗糙度,后者则是利用突起边长  $R$  来定义。但现有对接触面的研究中,大多以砂土、粉质黏土及冻土等为研究对象,对红层泥岩的研究较少[31]-[34]。

目前针对桩基础与红层泥岩接触面的研究相对较少,需进一步通过试验分析探究基于红层泥岩物理力学特性的桩基础与红层泥岩接触面剪切特性。鉴于此,本文依托于临夏州临夏市某一在建幼儿园工程,选取桩基础与红层泥岩接触面为研究对象,通过室内大型直剪试验,分析不同粗糙度及不同法向应力下的桩基础与红层泥岩接触面力学特性和剪切破坏规律。

## 2. 试验概况

### 2.1. 试样制备

本论文依托于临夏州临夏市某一在建幼儿园工程。该场地地层自上而下分别为杂填土、卵石、强风化砂岩及强风化泥岩。于拟建区域采用钻机钻芯取样用于后续试验,因所取原状泥岩大多为片状结构,故本试验采用重塑泥岩进行制样。

本试验所采用材料为红层泥岩与混凝土试块,根据规范《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266-2013 [35]要求制备  $150 \times 150 \times 150$  mm 正方体试验,其中红层泥岩、混凝土试样各占一半,为  $150 \times 150 \times 75$  mm。

Table 1. Basic parameters of red mudstone

表 1. 红层泥岩基本参数

	液限	塑限	塑性指数	最大干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	最优含水率	弹性模量/(GPa)	泊松比
红层泥岩	31.26%	19.82%	11.44	1.83	14.99%	8.69	0.3

表 1 为通过试验测得的红层泥岩基本参数,试验中选取红层泥岩含水率为 15%,干密度为  $1.83 \text{ g/cm}^3$ 。提前准备不同压实度要求的土样,分三次导入模具内并压实至要求高度;通过事先准备好的不同凹槽的亚克力板对接触面进行粗糙度处理。

根据实际工程项目,本文研究选取 C35 混凝土,根据规范《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2011) [36]进行混凝土配合比计算。本次试验共计 15 个试样,另设 3 个混凝土试块用于检测混凝土强度,共计  $0.0355 \text{ m}^3$ ,预准备  $0.046 \text{ m}^3$  混凝土。混凝土配合比如表 2 所示。

Table 2. Concrete mix ratio

表 2. 混凝土配合比

水/kg	水泥/kg	砂子/kg	石子/kg	外掺剂/kg
31.26	19.82	11.44	1.83	14.99

### 2.2. 工况设计

本试验开展了不同法向应力及不同粗糙度条件下的桩-岩接触面单向直剪试验。针对接触面粗糙度的划分方法,本文采用 R.D. Hryciw 和 M. Irsyam 方法,通过不同的槽深和槽宽对接触面粗糙度进行划分,且为方便探讨不同粗糙度对接触面的影响,本文通过下式对接触面进行量化:

$$R = \frac{V_0}{A_0} \quad (1)$$

式中:  $R$  ——粗糙度;

$V_0$  ——粗糙表面上标准砂体积;

$A_0$  ——混凝土与红层泥岩的接触面积。

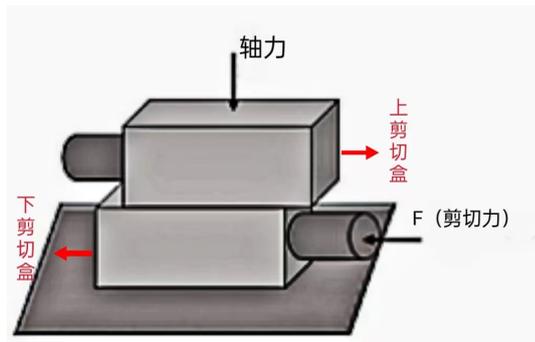
试验共预设 4 种法向应力、3 种粗糙度，共 12 种工况。具体试验方案如下表 3:

**Table 3.** Direct shear test scheme of pile-rock contact surface  
**表 3.** 桩 - 岩接触面直剪试验方案

粗糙度	量化 R	截面尺寸	法向应力/kPa	剪切作用位置
I	R = 0		100,150 250,350	混凝土
II	R = 0.197		100,150 250,350	混凝土
III	R = 0.340		100,150 250,350	混凝土

### 2.3. 试验过程

试验采用自制剪切盒进行直剪，剪切盒分为上剪切盒、下剪切盒以及盖子部分，在试验时，考虑到试样制作会有一定的误差，将盖子做为活动可拆卸的并充当传力板以更均匀地传导轴力。具体剪切盒示意图见图 1。



**Figure 1.** Schematic diagram of the shear box  
**图 1.** 剪切盒示意图

将提前准备好的土样通过预制板进行粗糙度处理，浇筑混凝土后放入养护室养护 28 d (另外制备三个纯混凝土试样，以检验混凝土在养护后是否达到所需强度)，图 2 为养护后的试样。



**Figure 2.** Sample after release curing  
**图 2.** 脱模养护后的试样

利用剪切方向千斤顶将安装好的试样缓慢推至上剪切盒刚好接触上剪切盒顶杆处，再将法向应力施

加至预定值，剪切过程中保持法向应力恒定的同时缓慢加载剪切应力。百分表每转一周就需记录下当时的剪切位移、法向位移以及剪应力，试样发生破坏后持续进行加载，直至百分表读数趋于稳定。剪切全局图如图 3 所示。



Figure 3. Cut the global diagram  
图 3. 剪切全局图

为减少试验误差，每种工况下至少进行五次直剪，选择三组最具有代表性的数据，根据数据分析处理结果来研究接触面粗糙度、法向应力与峰值抗剪强度、峰值位移、残余抗剪强度等因素之间的关系。

### 3. 试验结果及分析

本文主要研究桩-岩接触面在不同法向应力及粗糙度下侧摩阻力的大小与剪切规律，所以从剪位移-剪应力关系、接触面剪切破坏强度两方面进行分析。

#### 3.1. 剪位移-剪应力关系分析

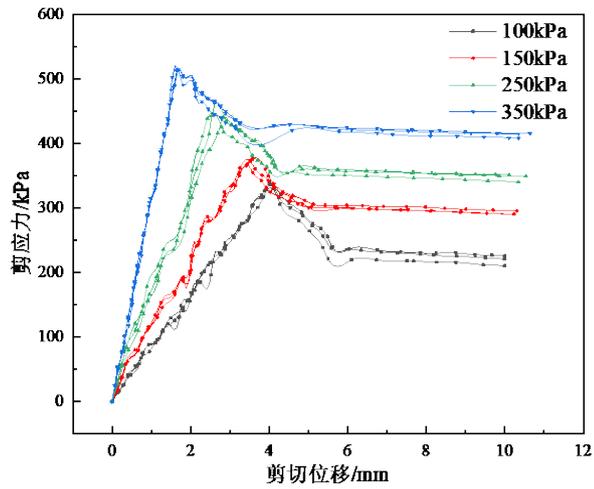
##### 3.1.1. 不同法向应力下剪位移-剪应力关系分析

从图 4 中可以看出，不同法向应力下的剪位移-剪应力曲线均呈相似趋势，剪应力随剪位移的增大而增大，达到峰值剪应力后逐渐减小并趋于稳定，符合典型的剪切位移软化规律。从图中可得，不同法向应力下的峰值抗剪强度的重合部分较小，基本为完全独立于某个区域内。当粗糙度相同时，法向应力越大，其达到峰值抗剪强度对应的剪切位移越小。在低应力状态下即 100 kPa 时，接触面粗糙度的变化对峰值抗剪强度有着重要的影响，特别为从 I 级到 II 级时，而 II 级与 III 级的差值相差不大，推测当接触面的粗糙度不再为单纯的光滑面，而是具有一定的凹槽，且凹槽的间隔相同仅深度不同时，法向应力对接触面的峰值抗剪强度的影响就会具有一定的规律。因此，提前预制的模型在某种程度上是导致这一现象的主要原因。

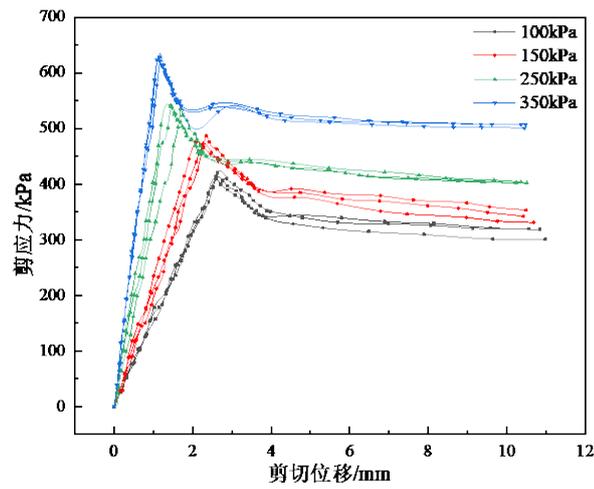
##### 3.1.2. 不同粗糙度下剪位移-剪应力关系分析

在保证其他条件不变的情况下，分别改变桩-岩接触面的粗糙度，不同粗糙度下接触面的剪位移-剪应力曲线表现形式不同。将不同粗糙度下的剪位移-剪应力曲线整理如图 5 所示。

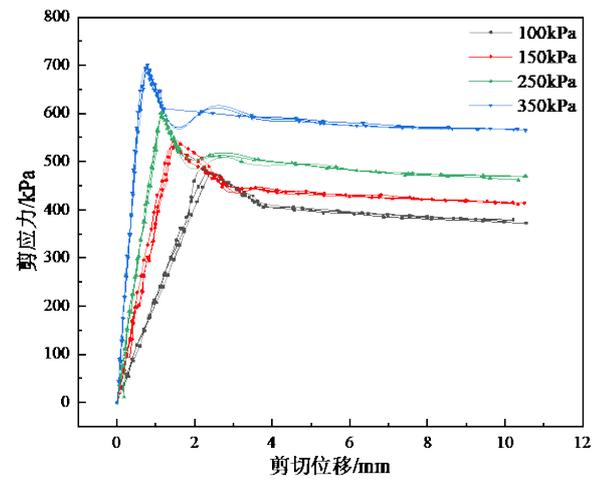
由图 5 可知，不同粗糙度时桩-岩接触面的剪位移-剪应力曲线可大致划分为三个部分：线弹性阶段、塑性阶段、残余阶段。分析图可得随着接触面粗糙度由 I 到 III，线弹性阶段及塑性阶段的斜率(绝对值)均逐渐增大。在残余阶段，粗糙度 I 与粗糙度 II 的残余抗剪强度的差值在 106~193 kPa 之间，粗糙度 II 与粗糙度 III 的残余抗剪强度的差值在 54~70 kPa，可以看出相同法向应力下，接触面从 I 变为 II 对接触面的残余抗剪强度影响较为明显，这与峰值抗剪强度的规律相似。



(a) 粗糙度 I



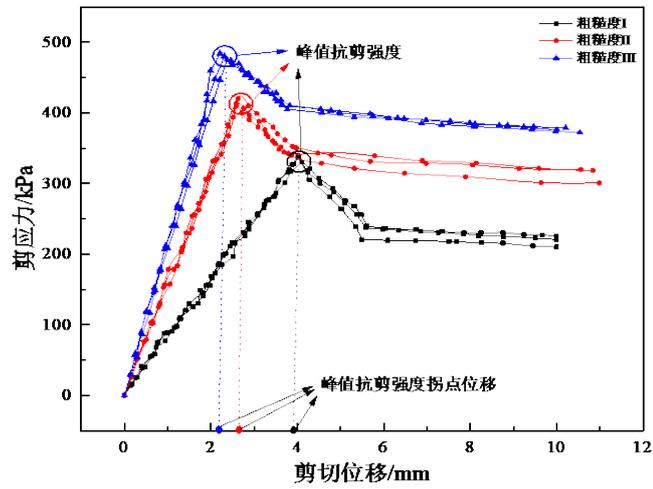
(b) 粗糙度 II



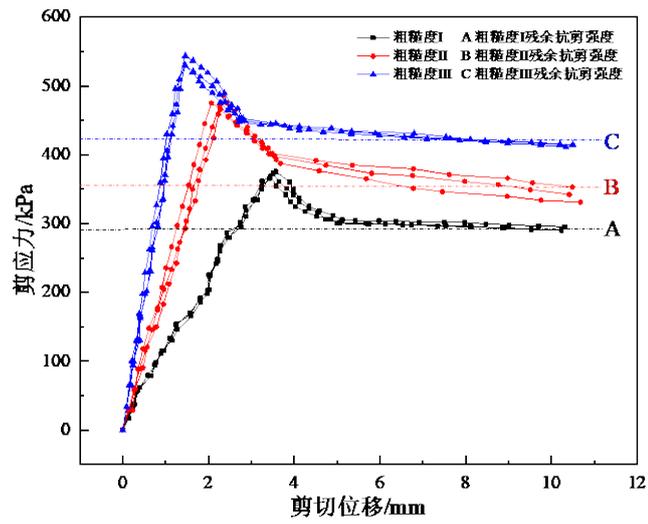
(c) 粗糙度 III

Figure 4. Shear displacement-shear stress curves of pile-rock contact surface under different normal stresses

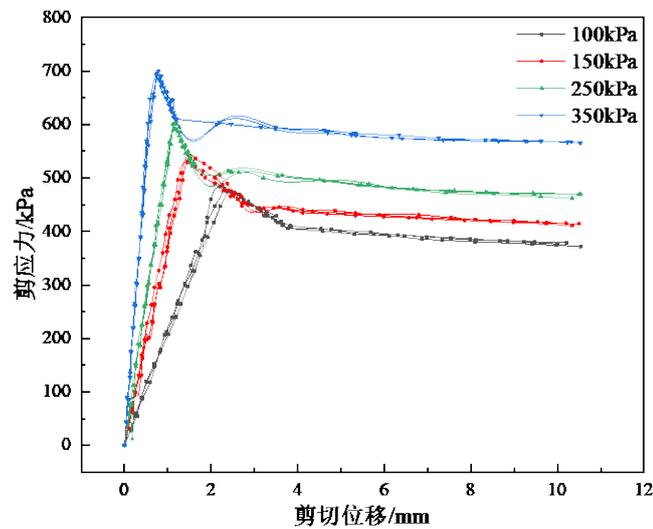
图 4. 不同法向应力下桩 - 岩接触面的剪切位移 - 剪应力曲线



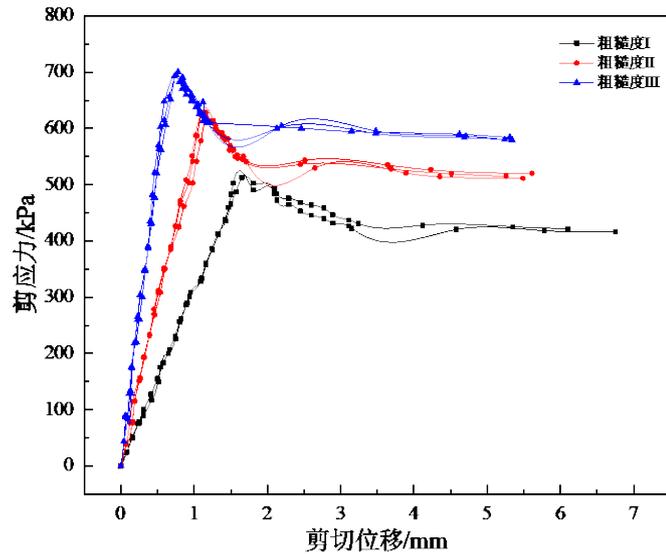
(a) 100 kPa



(b) 150 kPa



(c) 250 kPa



(d) 350 kPa

Figure 5. Shear displacement-shear stress curve of pile-rock contact surface with different roughness

图 5. 不同粗糙度时桩 - 岩接触面的剪位移 - 剪应力曲线

### 3.2. 剪切面破坏强度

因试验试样为固定尺寸，在直剪试验过程中，随着剪切盒受剪切力而带动试样前推，实际剪切接触面面积逐渐减小，从而导致个别的曲线残余抗剪强度呈现微弱减小趋势而非恒定值，且残余强度拐点位移不能明确确定。根据试验的记录数据分析，综合所有剪切位移 - 抗剪强度曲线来看，大部分剪切曲线在 6 mm 后残余抗剪强度均已出现稳定趋势，且剪切盒每前进 1 mm，剪切力约下降 0.18 kN，即 8.0 kPa。因此假设剪切位移在 6 mm 以后所对应的抗剪强度下降是因接触面的面积减小所造成的，故针对拐点不明显的曲线，选取 10 mm 处的抗剪强度加上 32 kPa (4 mm × 8.0 kPa) 对应抗剪强度附近最近点作为残余拐点，其强度作为残余强度，位移作为残余强度拐点位移。各个工况下的峰值抗剪强度及拐点位移如图 5(a) 所注。各个工况下的参数如下表所示。

Table 4. Statistical table of shear strength parameters under different roughness. (a) Peak shear strength parameters; (b) Residual shear strength parameters

表 4. 不同粗糙度下抗剪强度参数统计表。(a) 峰值抗剪强度参数；(b) 残余抗剪强度参数

		(a)					
		峰值抗剪强度/kPa			峰值强度拐点位移/mm		
法向应力/kPa		光滑面	较粗糙面	粗糙面	光滑面	较粗糙面	粗糙面
100		329.74	420.50	484.35	4.10	2.67	2.25
		338.97	410.37	480.13	4.01	2.58	2.37
		336.48	415.86	476.85	4.03	2.62	2.45
150		372.95	475.35	530.46	3.51	2.11	1.47
		375.62	470.22	541.72	3.57	2.24	1.51
		368.56	486.54	528.97	3.45	2.31	1.42

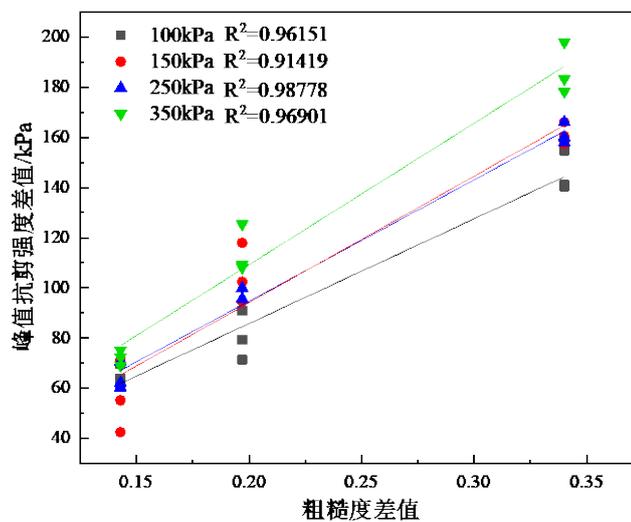
续表

250	442.85	538.58	600.72	2.54	1.45	1.12
	438.67	534.15	604.88	2.43	1.67	1.18
	440.69	540.56	600.83	2.84	1.42	1.14
350	512.48	620.67	695.71	1.65	1.14	0.75
	502.43	627.88	700.24	1.53	1.17	0.78
	514.27	623.45	692.43	1.68	1.20	0.73

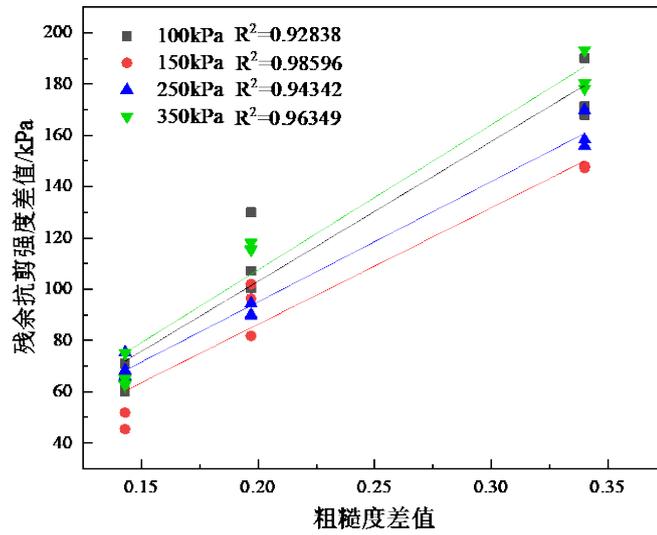
(b)

法向应力/kPa	残余抗剪强度/kPa			残余强度拐点位移/mm		
	光滑面	较粗糙面	粗糙面	光滑面	较粗糙面	粗糙面
100	220.52	350.47	410.45	5.50	3.98	3.67
	239.40	339.68	410.68	5.61	3.87	3.83
	237.35	344.43	405.22	5.58	3.69	3.77
150	301.25	397.54	449.35	5.07	3.54	2.84
	305.51	387.26	452.72	5.12	3.68	2.80
	300.14	402.13	447.56	5.01	3.49	2.71
250	365.48	455.23	521.33	4.16	2.25	1.58
	355.96	450.36	525.73	4.02	2.34	1.62
	362.57	452.63	520.87	4.13	2.19	1.58
350	430.48	545.69	610.67	3.24	1.65	1.18
	422.67	540.76	615.85	3.15	1.71	1.16
	431.64	547.13	609.79	3.27	1.59	1.21

从表 4 可以看出,同一法向应力下,抗剪强度随粗糙度的增加而增大,取各法向应力下抗剪强度的均值差与粗糙度差值进行拟合,得到图 6。



(a) Peak shear strength  
(a) 峰值抗剪强度



(b) Residual shear strength  
(b) 残余抗剪强度

Figure 6. Fitting of shear strength difference and roughness difference under different normal stresses

图 6. 不同法向应力下抗剪强度差值与粗糙度差值拟合

从图 6 中可以看出无论是峰值抗剪强度还是残余抗剪强度，其差值均与粗糙度差值成一定的正线性关系，可以用式(2)表示：

$$\tau = aR_D + b \tag{2}$$

对抗剪强度取平均值作差再次与粗糙度拟合，得到的拟合系数如表 5 所示。

Table 5. Fitting coefficients of mean difference of shear strength and roughness difference

表 5. 抗剪强度均值差与粗糙度差值拟合系数

	100 kPa		150 kPa		250 kPa		350 kPa	
	峰值	残余	峰值	残余	峰值	残余	峰值	残余
a	417.89	545.42	504.52	454.47	483.86	469.06	564.57	566.10
b	2.20	-6.05	-6.80	-4.63	-2.07	1.22	-3.70	-5.75
R <sup>2</sup>	0.99	0.94	0.91	0.95	0.99	0.99	0.98	0.95

从表 5 中可以看出，除了 150 kPa 下的峰值抗剪强度均值差与粗糙度差值的拟合为 0.91，其他拟合系数均在 0.95 以上，证明本文红层泥岩桩 - 岩接触面的抗剪强度会随着粗糙度的增加而增大，且其抗剪强度的增值与粗糙度增值成线性关系。因此对不同法向应力下抗剪强度差值及粗糙度差值取平均值进行拟合(如图 7 所示)。得到不同粗糙度及法向应力下的综合公式。

$$\tau = 492.712R_D - 3.805 \tag{3}$$

$$\tau = 508.761R_D - 2.593 \tag{4}$$

式(3)、(4)分别为峰值抗剪强度差值、残余抗剪强度差值与粗糙度差值公式。代入试验所得数据验证可得理论值与试验值误差均在 20 kPa 以内，故可根据相对应的法向应力和粗糙度来确定接触面峰值抗剪强度及残余抗剪强度的范围，对实际工程进行指导。

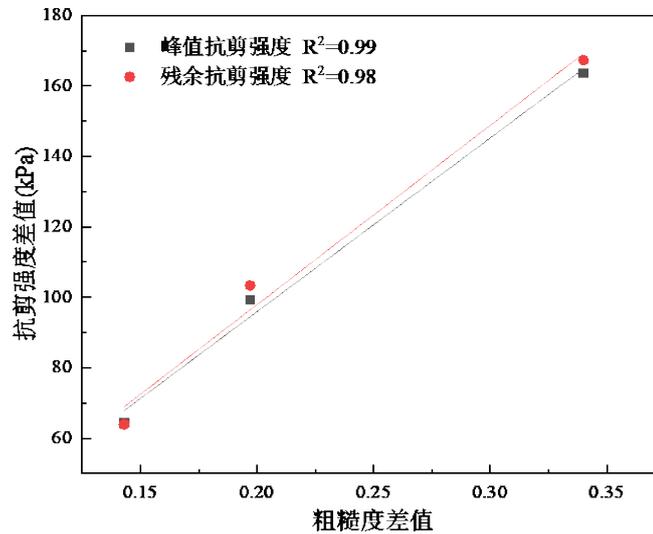


Figure 7. Fitting of mean difference of shear strength and mean difference of roughness

图 7. 抗剪强度均值差与粗糙度均值差拟合

#### 4. 结论

1) 本文通过对三种不同粗糙度进行量化分析, 得到三种粗糙度分别为: 0、0.197、0.34, 方便后期数值模拟中对接触面能够进行有效的改变以探讨不同粗糙度对接触面的影响, 但在目前已有的研究中, 关于粗糙度度量方法都有一定的局限性, 亟需建立粗糙的统一定义及量化方法。

2) 粗糙度相同时, 不同法向应力下剪切力随剪切位移的增大而增大, 达到峰值剪应力后逐渐减小并趋于稳定, 符合典型的剪切位移软化规律。

3) 在同一法向应力下, 随着粗糙度的增加, 接触面的抗剪强度会增大, 且抗剪强度的均值差与粗糙度增值成正线性相关, 拟合推导出了不同粗糙度及法向应力下的综合公式, 可根据相对应的法向应力和粗糙度来确定接触面抗剪强度的范围, 对实际工程进行指导。

#### 基金项目

甘肃省自然科学基金(22JR11RA161); 甘肃省住房和城乡建设厅建设科技项目(JK2023-14); 甘肃省交通厅科研项目(2020-02)。

#### 参考文献

- [1] 郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 67-71.
- [2] 余云燕, 罗崇亮, 包得祥, 等. 兰州地区红层泥岩物理力学特性试验[J]. 兰州交通大学学报, 2019, 38(5): 1-6.
- [3] 沈照理, 王焰新. 水-岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2002, 27(2): 127-133.
- [4] 张志敏, 高文华, 张宗堂. 荷载-水化耦合下红层泥岩的变形特性[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(6): 68-72.
- [5] 李安润, 邓辉, 王小雪, 等. 饱水-失水循环条件下红层泥岩蠕变特性及本构模型研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 843-850.
- [6] 赖远超, 李朋伟, 邓辉. 饱水-失水循环下泥岩的剪切蠕变特性研究[J]. 水利水电技术, 2018, 50(7): 195-201.
- [7] 曹雪山, 额力素, 赖喜阳, 等. 崩解泥化过程中泥岩强度衰减因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1936-1942.
- [8] Kholghifard, M., Ahmad, K., Ali, N., Kassim, A. and Kalatehjari, R. (2014) Collapse/Swell Potential of Residual Late-

- rite Soil Due to Wetting and Drying-Wetting Cycles. *National Academy Science Letters*, **37**, 147-153.  
<https://doi.org/10.1007/s40009-013-0221-4>
- [9] 陈纪昌. 干湿循环及地震耦合作用下的库区红层泥岩边坡稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 133-136, 203.
- [10] 陈纪昌. 库区红层泥岩水化特性及干湿循环作用下的渐进损伤研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(3): 143-147, 152.
- [11] 吴道详, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 4173-4179.
- [12] 谭新, 蒲瑜, 彭伟. 红层泥岩力学参数与声速相关性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(11): 51-55.
- [13] 孙意. 成贵铁路宜兴段红层泥岩强度试验统计分析[J]. 路基工程, 2012(1): 82-84.
- [14] 刘清扬, 李林, 马显春. 四川盆地红层路堑岩质边坡天然单轴抗压强度和软化性的对比分析[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2015, 11(3): 62-67.
- [15] 周应华, 周德培, 封志军. 三种红层岩石常规三轴压缩下的强度与变形特性研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(4): 477-480.
- [16] 张家铭, 刘宇航, 罗昌宏, 等. 巴东组紫红色泥岩三轴压缩试验及本构模型研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 138-142.
- [17] 刘颖, 赵天宇, 王发旺, 等. 新近系红层岩体力学参数与隧道围岩分级探讨[J]. 工程勘察, 2016, 44(8): 11-18.
- [18] 刘源, 张可能, 刘创, 等. 微型 CFG 桩侧阻力提高系数试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 184-190.
- [19] 刘念武, 龚晓南, 俞峰, 等. 大直径扩底嵌岩桩竖向承载性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(2): 541-547.
- [20] 陈琛, 冷伍明, 杨奇, 金子豪, 聂如松, 邱莹. 混凝土桩-泥皮-砂土接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2461-2472.
- [21] Abu-Farsakh, M., Coronel, J. and Tao, M. (2007) Effect of Soil Moisture Content and Dry Density on Cohesive Soil-Geosynthetic Interactions Using Large Direct Shear Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **19**, 540-549.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2007\)19:7\(540\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:7(540))
- [22] DeJong, J.T. and Westgate, Z.J. (2009) Role of Initial State, Material Properties, and Confinement Condition on Local and Global Soil-Structure Interface Behavior. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**, 1646-1660. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2009\)135:11\(1646\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2009)135:11(1646))
- [23] Martinez, A. and Frost, J.D. (2017) The Influence of Surface Roughness Form on the Strength of Sand-Structure Interfaces. *Géotechnique Letters*, **7**, 104-111. <https://doi.org/10.1680/jgele.16.00169>
- [24] Jing, X., Zhou, W., Zhu, H., Yin, Z. and Li, Y. (2017) Analysis of Soil-Structural Interface Behavior Using Three-Dimensional DEM Simulations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **42**, 339-357. <https://doi.org/10.1002/nag.2745>
- [25] Kou, H.L., Diao, W.Z., Zhang, W.C., et al. (2021) Experimental Study of Interface Shearing between Calcareous Sand and Steel Plate Considering Surface Roughness and Particle Size. *Applied Ocean Research*, 107, Article 102490.  
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102490>
- [26] Kishida, H. and Uesugi, M. (1987) Tests of the Interface between Sand and Steel in the Simple Shear Apparatus. *Géotechnique*, **37**, 45-52. <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.1.45>
- [27] 张嘎, 张建民. 土与土工织物接触面力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 51-55.
- [28] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面三维本构关系及数值模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 288-292.
- [29] 赵联楨, 杨平, 王海波. 大型多功能冻土-结构接触面循环直剪系统研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 707-713.
- [30] Chen, X., Zhang, J., Xiao, Y. and Li, J. (2015) Effect of Roughness on Shear Behavior of Red Clay—Concrete Interface in Large-Scale Direct Shear Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, **52**, 1122-1135.  
<https://doi.org/10.1139/cgi-2014-0399>
- [31] 路伟亚, 王吉良, 李祥飞. 粉质黏土-混凝土界面剪切特性研究[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(5): 17-20, 25.
- [32] 路伟亚, 刘松涛, 王阳, 等. 砂土-混凝土界面剪切特性实验研究[J]. 广东建材, 2023, 39(3): 74-76, 32.
- [33] 陈琛, 冷伍明, 杨奇, 等. 考虑粗糙度和相对密度下砂土-混凝土桩接触面力学特性试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 225-236.

- [34] 陈航杰, 何菲, 王旭, 等. 粗糙度对冻土-结构接触面剪切特性的影响研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(9): 186-192, 213.
- [35] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 水电水利规划设计总院, 中国电力企业联合会. GB/T 50266-2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2013.
- [36] 中国建筑科学研究院, 北京建工集团有限责任公司, 中国建筑材料科学研究总院, 重庆市筑科学研究院, 辽宁省筑科学研究院. JGJ 55-2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
<https://www.soujianzhu.cn/NormAndRules/NormContent.aspx?id=1498>