

# 多重因素影响下的土 - 岩界面剪切试验强度研究

黄振华<sup>1\*</sup>, 李洪<sup>2#</sup>, 杨亚荣<sup>1</sup>, 刘潜宁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>怀化职业技术学院建筑工程学院, 湖南 怀化

<sup>2</sup>浙江交通资源投资集团有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年10月19日; 录用日期: 2025年11月12日; 发布日期: 2025年11月19日

## 摘要

降雨引起的含水率急剧增长会降低土 - 结构界面的剪切强度。为探讨不同条件下土 - 结构界面的力学性能, 本文开展了一系列剪切试验, 分析了剪应力 - 位移曲线特征、法向应力、界面粗糙度及含水率对界面性能的影响。结果表明, 在最佳含水率和饱和含水率下, 土 - 岩界面的剪应力 - 位移曲线均表现出明显的软化特征, 且随着界面粗糙度的增加, 软化程度愈发明显。在同一界面粗糙度条件下, 土 - 结构界面的剪切峰值强度和残余强度均随法向应力的增加而显著提高, 法向应力被确认是影响土 - 结构界面剪应力 - 位移曲线特征的关键因素。土 - 结构界面的剪切强度受界面粗糙度和含水量的双重影响: 当土体处于最佳含水率时, 提升界面粗糙度有助于增强土 - 结构界面强度, 而在饱和含水率下, 粗糙度的增加则会降低土 - 结构界面强度。在高含水率和高粗糙度的双重条件下, 水分的增加对土 - 结构界面抗剪强度具有显著的弱化效应。

## 关键词

土 - 岩界面, 土 - 结构界面, 含水率, 粗糙度, 剪切强度, 力学性能

# Study on the Shear Test Strength of Soil-Rock Interface under Multiple Influencing Factors

Zhenhua Huang<sup>1\*</sup>, Hong Li<sup>2#</sup>, Yarong Yang<sup>1</sup>, Qianing Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Huaihua Vocational and Technical College, Huaihua Hunan

<sup>2</sup>Zhejiang Transportation Resources Investment Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 黄振华, 李洪, 杨亚荣, 刘潜宁. 多重因素影响下的土-岩界面剪切试验强度研究[J]. 渗流力学进展, 2025, 14(2): 13-22. DOI: 10.12677/apf.2025.142002

## Abstract

The rapid increase in moisture content caused by rainfall reduces the shear strength at the soil-structure interface. To investigate the mechanical properties of the soil-structure interface under different conditions, a series of shear tests were conducted in this paper. The effects of shear stress-displacement curve characteristics, normal stress, interface roughness, and moisture content on interface performance were analyzed. Results indicate that at both optimum moisture content and saturated moisture content, the shear stress-displacement curves of the soil-rock interface exhibit pronounced softening characteristics, with the degree of softening increasing as interface roughness rises. At the same interface roughness, both the peak shear strength and residual strength of the soil-structure interface significantly increased with rising normal stress. Normal stress was confirmed as the key factor influencing the characteristics of the shear stress-displacement curve at the soil-structure interface. The shear strength at the soil-structure interface is influenced by both interface roughness and moisture content: when the soil is at optimum moisture content, increasing interface roughness enhances soil-structure interface strength; however, at saturated moisture content, increased roughness reduces soil-structure interface strength. Under the dual conditions of high moisture content and high roughness, increased moisture exhibits a significant weakening effect on the shear strength of the soil-structure interface.

## Keywords

Soil-Rock Interface, Soil-Structure Interface, Moisture Content, Roughness, Shear Strength, Mechanical Properties

Copyright © 2025 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

在岩土工程领域，边坡稳定性分析是保障工程安全与可靠性的关键环节，而土-结构界面的剪切强度则构成该分析的核心要素。由于土体与岩体之间的接触行为在实际工程中不可避免，土-岩界面的力学特性逐渐成为学术研究和工程实践中的热点问题。已有研究表明，土体与岩体在强度及物理性质上存在显著差异，这种差异在工程应用中可能导致边坡不稳定现象的发生。尤其在水分作用下，土体和岩体的强度与硬度均显著降低，土-岩界面的剪切强度随之减弱，进而引发界面破坏，成为边坡失稳的主要诱因[1]-[4]。因此，深入探讨土-结构界面的剪切强度及其力学特性，对于提升边坡稳定性分析的准确性和工程安全性具有重要意义。

在试验研究方面，Potyondy [5]通过系统的剪切试验发现，影响土-结构界面剪切强度的主要因素包括土的类型、界面含水率、法向应力及界面粗糙度。Wang 等[6]的研究进一步揭示了界面粗糙度对土-结构界面力学特性的显著影响，结果表明界面剪切强度随着粗糙度的增加而呈显著上升趋势。Chen 等[7]通过对不同含水率条件下土-结构界面的动态剪切特性进行分析，发现基质吸力随着含水率的增加呈非线性下降，导致界面剪切强度显著减弱。石熊等[8]利用大型直剪试验，针对不同界面粗糙度的红黏土-混凝土界面进行了剪切特性分析，探讨了多种影响因素对界面剪切强度的作用机制。汪优等[9]通过室内直

剪试验系统研究了不同工况下土 - 结构界面的变形特征及应力路径, 构建了兼顾界面粗糙度的本构模型, 试验结果显示法向应力和界面粗糙度是影响界面剪切特性的关键因素。Lin 等[10]的研究指出, 随着界面含水率的升高, 土 - 结构界面的黏聚力和摩擦角均出现下降趋势, 从而削弱了界面的整体剪切强度。王伯昕等[11]在不同工况下开展的土 - 结构界面直剪试验表明, 界面剪切强度随含水率的增加呈现衰减趋势, 且含水率和压实度的提升使界面应变软化及剪胀特征更加明显。Zhu 等[12]的黏性土 - 混凝土界面剪切试验发现, 当含水率低于最佳含水率时, 低法向应力条件下的剪切破坏主要表现为沿界面滑动, 而在高法向应力下, 破坏面则转移至土体内部。周怡等[13]通过大型直剪试验进一步验证了含水率变化对土 - 结构界面剪切强度、剪切刚度及剪切破坏形式具有显著影响, 均表现为随着含水率的增加而递减的趋势。综上所述, 现有研究普遍认为水分含量和界面粗糙度对土 - 结构界面剪切强度有重要影响, 但针对水分和界面粗糙度双重作用下土 - 结构界面剪切强度及剪应力 - 位移曲线特征的系统研究仍较为缺乏, 亟需进一步开展深入探讨。

本研究以随机型界面粗糙度的土 - 结构界面为对象, 以界面含水率、法向应力、界面粗糙度为自变量, 通过室内剪切试验, 系统分析多因素耦合下的界面剪切力学行为。为还原土 - 岩力学特性, 试验采用两种方法构建随机型土 - 结构界面粗糙度: 一是在基座表面随机制造凹痕, 二是在基座表面随机嵌入不同粒径碎石, 以此模拟天然土 - 岩界面的复杂形态。研究重点围绕界面含水率与粗糙度的双重影响机制, 开展系列室内剪切试验, 旨在揭示二者对界面剪切强度及剪应力 - 位移特性的耦合效应, 为深入理解界面力学行为、优化工程设计提供理论依据与实验支持。

2. 试验设计及制作

2.1. 试验方案

为系统研究土体与不同粗糙度结构表面界面的强度特性, 本研究采用界面直剪试验方法开展。具体试验步骤如下: 首先, 利用混凝土制备不同粗糙度的基座表面; 随后, 在基座上安装填充饱和土样的剪切盒。试验过程中, 在土样上方施加四组法向应力  $\sigma_n$ , 分别为 50 kPa、75 kPa、100 kPa 及 125 kPa。剪切盒固定后, 通过向基座施加水平推力以实现剪切作用。试验装置如图 1 所示, 主要包括剪切盒、基座、加载系统、位移传感器、应力传感器及水平滑轮滚动轴等组成部分。试验中, 剪切速率严格控制为 1 mm/min。当剪应力趋于稳定且不随剪切位移继续上升时, 视为达到界面强度极限, 试验随即终止。该试验方法能够准确反映饱和土体与不同粗糙度结构表面界面的力学行为特征, 具备良好的工程实用性, 为相关地质及土工工程设计提供科学依据。

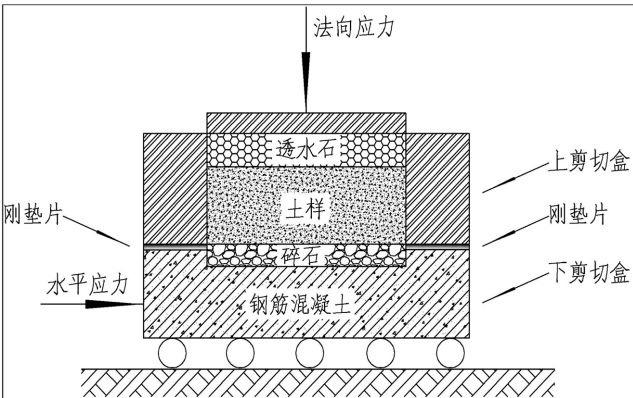


Figure 1. Test device  
图 1. 试验装置

2.2. 试验土样制备

试样选用黏土，采自湖南省麻阳县 038 县道隆家堡隧道边坡。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430-2020)规范，进行了土工试验及土样制备。通过土工试验获得了土样的基本物理与力学参数，相关数据汇总于表 1。土样制备过程中，配制含水率分别为 11% (接近最佳含水率) 和 29% (接近饱和含水率) 的土样，土样制作后用塑料袋密封 12 小时，以保证土样含水率均匀。29% 土样在进行试验过程中，为了防止土样中的含水率流失，采用继续补充水源的方式进行。

Table 1. Basic physical parameters of soil samples  
表 1. 土样基本物理参数

| 含水率 $\omega/\%$ | 黏聚力 $c/\text{kPa}$ | 内摩擦角 $\varphi/^\circ$ | 最大干密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 最佳含水率 $\omega_{op}/\%$ |
|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------------------------------------|------------------------|
| 15.6            | 27                 | 36                    | 1.77                                       | 11                     |

2.3. 基座制备

试验基座采用 C30 强度混凝土进行浇筑，剪切盒尺寸为 200 mm (长)  $\times$  200 mm (宽)  $\times$  100 mm (高)，基座尺寸为 300 mm (长)  $\times$  240 mm (宽)  $\times$  100 mm (高)。本试验将结构表面粗糙度定义为界面峰谷之间的线性距离，并通过两种方式实现调控：一是在混凝土基座表面随机制造凹痕，二是嵌入不同粒径的碎石颗粒。基座的制作流程为：筛选碎石、搅拌、浇筑、振捣、界面处理、养护等步骤，得到随机型界面粗糙度的混凝土试块，待其抗压强度达到试验要求后采用灌砂法测量基座表面粗糙度，并开展剪切试验。为减少试验干扰，采取了针对性控制措施。考虑到基座表面凸起部分可能阻碍剪切盒的移动并引发额外摩擦，故在基座与剪切盒接触区域预埋光滑垫片，并在试验前于垫片接触面均匀涂抹润滑油，从而有效降低界面摩擦对试验结果的影响。如图 2 所示。

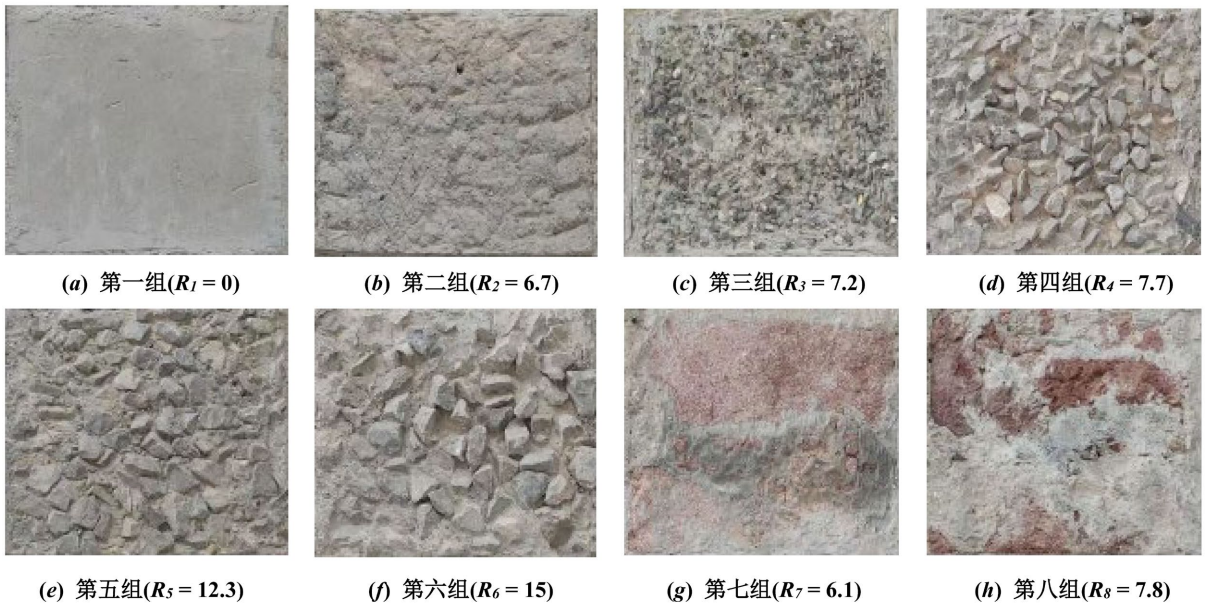


Figure 2. Simulation of the roughness of the base surface at the soil-rock interface  
图 2. 模拟土-岩界面基座表面粗糙度

本次试验共制备了 8 种不同表面粗糙度的混凝土基座：1#基座采用抹光处理，因其粗糙度超出铺砂

法测量范围, 故在分析中视为粗糙度为 0; 2#基座通过随机凹痕形成中等粗糙表面; 3#至 6#基座为梯度样本, 分别嵌入粒径为 5~10 mm、10~15 mm、15~20 mm 及 20~31.5 mm 的碎石; 7#和 8#基座则嵌入来自工程现场的天然岩块, 以模拟实际工程中土 - 岩界面形态。各基座实物见图 2, 基座表面粗糙度见表 2。该制备方法成功模拟了不同粗糙界面, 为深入研究饱和土体与结构界面力学特性提供了坚实的试验基础。

本文采用灌砂法定义结构表面粗糙度, 即采用平均灌砂深度对结构表面粗糙度  $R_n$  进行定量评价:

$$R_n = \frac{V}{A} \quad (1)$$

式中:  $R_n$  为粗糙度,  $A$  为标准砂平铺面积,  $V$  为标准砂的体积。各组基座表面粗糙度测量后, 结果如表 2 所示。

**Table 2.** Surface roughness of the base

**表 2.** 基座的表面粗糙度

| 编号              | I | II  | III | IV  | V    | VI | VII | VIII |
|-----------------|---|-----|-----|-----|------|----|-----|------|
| $R_n/\text{mm}$ | 0 | 6.7 | 7.2 | 7.7 | 12.3 | 15 | 6.1 | 7.8  |

注: I#基座的粗糙度超出了铺砂法的最小量程, 假设其粗糙度为 0, 非实测值。

### 3. 试验结果与分析

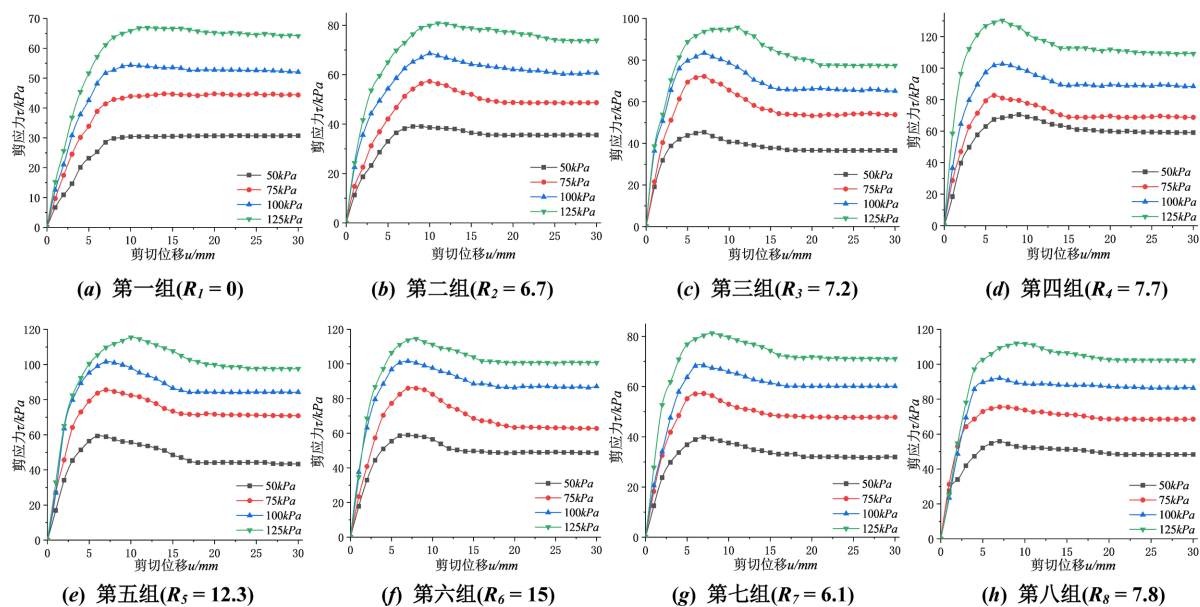
由于剪切试验所采用的结构表面粗糙度为随机型, 土 - 岩界面不同位置的粗糙度存在差异, 导致凹槽深度不均匀, 进而使土体与结构表面的接触面积随着剪切位移的增加而发生动态变化。尽管接触面积会有所变化, 但其变化幅度并不显著。为简化试验分析过程, 假设土 - 岩界面的接触面积保持恒定, 不考虑因接触位置变化引起的接触面积变化对试验结果的影响。

#### 3.1. 剪应力 - 位移曲线特征

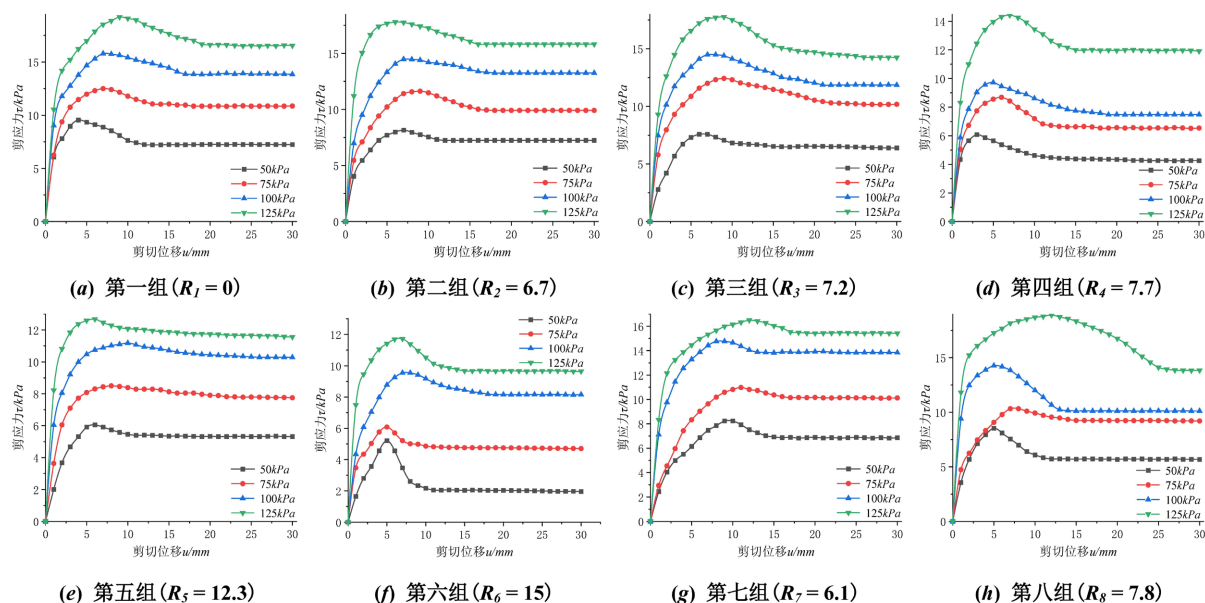
基于数据采集仪获取的剪切试验结果, 系统分析了不同含水率土样(11%、29%)在不同结构表面粗糙度及法向应力条件下的土 - 结构界面剪应力与位移关系, 其典型曲线如图 3 所示。图中显示, 剪切初期界面剪应力随剪切位移的增加迅速上升; 随后, 剪应力达到峰值后呈现不同程度的下降趋势, 直至趋于稳定, 达到残余强度水平, 表现出典型的应变软化特征。不同粗糙度及法向应力条件下, 剪应力峰值对应的剪切位移虽存在一定差异, 但整体变化范围较小。基于曲线形态, 可将剪应力 - 位移关系划分为四个阶段: 1) 线性增长阶段(OA 段), 2) 非线性增长阶段(AB 段), 3) 软化减弱阶段(BC 段), 以及 4) 平稳阶段(CD 段) [14]。此分段特征为后续的力学机理分析提供了重要的理论依据。

#### 3.2. 法向应力的影响

在同一粗糙度作用下, 土 - 岩界面的剪切峰值强度和残余强度均随着法向应力的增大而显著提高。从图 3 和图 4 可知, 土 - 岩界面粗糙度为  $R_n = 6.7$  时, 含水率 11% 土样在剪切试验中, 法向应力  $\sigma_n = 125$  kPa 的剪切峰值和残余强度分别为  $\sigma_n = 50$ 、75、100、125 kPa 的 2.07、1.41、1.18 倍和 2.07、1.52、1.22 倍; 含水率 29% 土样在剪切试验中, 法向应力  $\sigma_n = 125$  kPa 的剪切峰值和残余强度分别为  $\sigma_n = 50$ 、75、100、125 kPa 的 2.18、1.53、1.23 倍和 2.18、1.59、1.19 倍。法向应力的增大能够压缩土颗粒间的孔隙, 提升土体的密实度, 进而增强土体内部摩擦力, 有效提升其抗剪强度。因此, 法向应力是影响剪应力 - 位移曲线特征的重要因素, 对界面力学性能的评估具有关键作用。



**Figure 3.** Shear stress-displacement curve of soil-rock interface with 11% moisture content  
**图 3.** 11%含水率土-岩界面剪切应力-位移曲线



**Figure 4.** Shear stress-displacement curve of soil-rock interface with 29% moisture content  
**图 4.** 29%含水率土-岩界面剪切应力-位移曲线

### 3.3. 界面粗糙度对剪切强度的影响

对于含水率为 11% 的土样, 当基座表面粗糙度较小时, 剪应力-位移曲线表现出的剪切峰值及应变软化特征并不显著。然而, 随着界面粗糙度  $R_n$  的逐渐增大, 界面剪应力-位移曲线中的软化特性和剪切峰值愈发明显, 且剪切峰值与残余强度呈现逐步提升的趋势。具体而言, 在法向应力为 125 kPa 的条件下, 八组不同基座表面粗糙度( $R_n$  分别为 0.78、6.1、6.7、7.2、7.7、7.8、12.3、15 mm)对应的界面剪切峰

值分别为 66.89、81.2、80.99、95.51、130.24、110.98、115.24、114.65 kPa，界面残余强度分别为 65.13、71.12、73.49、77.52、110.33、102.61、97.62、99.92 kPa。由此可见，随着界面粗糙度的提升，剪切峰值与残余强度分别增加了约 94.71%和 69.4%。这主要是由于基座粗糙度提升导致表面不规则凹槽深度加大，从而显著增强了界面摩阻力，这些额外的摩阻力有效增强了土体与岩体间的界面阻力，进而提高了土 - 岩界面的剪切强度。因此，可以明确得出，土 - 岩界面的剪切强度随着界面粗糙度的增加而显著增强。

**Table 3.** Strength parameter of soil-rock interface with 11% moisture content  
**表 3.** 11%含水率土 - 岩界面强度参数

| 编号   | 粗糙度 $R_n/\text{mm}$ | 剪切峰值 $\tau_p$              |       |        |        |                             |                         |
|------|---------------------|----------------------------|-------|--------|--------|-----------------------------|-------------------------|
|      |                     | 法向应力 $\sigma_n/\text{kPa}$ |       |        |        | 内摩擦角<br>$\varphi_p/(\circ)$ | 黏聚力<br>$c_p/\text{kPa}$ |
|      |                     | 50                         | 75    | 100    | 125    |                             |                         |
| I    | 0.78                | 30.69                      | 44.75 | 54.35  | 66.89  | 25.45                       | 7.60                    |
| II   | 6.7                 | 39.86                      | 56.65 | 67.58  | 80.99  | 28.63                       | 13.64                   |
| III  | 7.2                 | 45.61                      | 72.15 | 83.32  | 95.51  | 32.37                       | 18.91                   |
| IV   | 7.7                 | 70.82                      | 80.88 | 102.39 | 130.24 | 36.45                       | 26.71                   |
| V    | 12.3                | 59.25                      | 85.44 | 101.46 | 115.24 | 36.24                       | 26.42                   |
| VI   | 15                  | 58.90                      | 85.39 | 101.02 | 114.65 | 36.26                       | 26.51                   |
| VII  | 6.1                 | 39.85                      | 57.25 | 68.42  | 81.20  | 25.70                       | 13.31                   |
| VIII | 7.8                 | 55.82                      | 75.90 | 95.08  | 110.98 | 36.13                       | 19.26                   |

| 编号   | 粗糙度 $R_n/\text{mm}$ | 残余强度 $\tau_r$              |       |       |        |                             |                         |
|------|---------------------|----------------------------|-------|-------|--------|-----------------------------|-------------------------|
|      |                     | 法向应力 $\sigma_n/\text{kPa}$ |       |       |        | 内摩擦角<br>$\varphi_r/(\circ)$ | 黏聚力<br>$c_r/\text{kPa}$ |
|      |                     | 50                         | 75    | 100   | 125    |                             |                         |
| I    | 0.78                | 30.61                      | 44.51 | 52.92 | 65.13  | 24.12                       | 6.5                     |
| II   | 6.7                 | 35.02                      | 48.77 | 60.62 | 73.49  | 26.98                       | 10.85                   |
| III  | 7.2                 | 36.57                      | 53.69 | 65.22 | 77.52  | 29.55                       | 14.47                   |
| IV   | 7.7                 | 59.32                      | 69.22 | 88.47 | 110.33 | 31.42                       | 20.58                   |
| V    | 12.3                | 43.65                      | 70.69 | 84.37 | 97.62  | 31.38                       | 20.31                   |
| VI   | 15                  | 48.86                      | 64.14 | 86.46 | 99.92  | 31.95                       | 20.86                   |
| VII  | 6.1                 | 32.05                      | 47.96 | 60.11 | 71.12  | 25.91                       | 9.53                    |
| VIII | 7.8                 | 48.40                      | 68.49 | 86.46 | 102.61 | 31.99                       | 15.28                   |

对于含水率为 29%的土样，剪切峰值和残余强度随着基座表面粗糙度的增加呈现出明显的下降趋势。具体数据见表 3 中八组不同粗糙度( $R_n = 0.78、6.1、6.7、7.2、7.7、7.8、12.2、15 \text{ mm}$ )对应的剪切峰值依次为 19.23、17.8、17.76、14.43、12.68、11.72、16.49 及 18.97 kPa，残余强度依次为 16.54、15.82、14.26、11.98、11.66、9.68、15.45 及 13.85 kPa。在法向应力 125 kPa 的条件下，界面剪切峰值和残余强度分别较低粗糙度水平下降了约 64.08%和 70.86%。该现象的形成机制主要归因于饱和土体与不同粗糙度界面间的接触特性差异。当饱和土与粗糙度较低的平滑表面接触时，由于界面缺乏明显的凹凸结构，土颗粒与界面的接触面积较小，微观摩擦力相对有限，导致土体内部颗粒间的摩擦贡献较大，从而维持较高的剪切强度。相反，粗糙度较大的表面拥有更多不规则凹槽，促使土颗粒嵌入凹槽中，显著增加了界面接触

面积及微观摩阻力。这种增强的摩阻虽然增加了局部阻力，但限制了土颗粒间的相对滑动，降低了整体土体的剪切强度。

由此可见，界面粗糙度对土-岩界面剪切峰值及残余强度均有显著影响，且该影响受到土体含水率的调控。具体表现为，含水率较低(如 11%)时，界面粗糙度提升有利于增强剪切强度；而含水率较高(如 29%)时，界面粗糙度提升则反而导致剪切强度减弱。因此，在实际工程设计与土-岩界面力学性能评估中，应综合考虑含水率与界面粗糙度的耦合效应，以获得更加准确和合理的预测结果。

3.4. 水对界面强度特性的弱化性

根据表 4 的数据分析，含水率为 11%和 29%的土样在不同粗糙度条件下的土-结构界面强度指标( $\phi$ 、 $c$ )比值显示，低含水率样品的界面强度显著高于高含水率样品，说明含水率对土体及其与岩石界面的强度具有显著的软化效应。进一步的试验结果表明，在最佳含水率与饱和含水率条件下，土-结构界面抗剪强度存在明显差异。随着土体含水率由最佳状态提升至饱和状态，界面强度指标呈现显著下降，界面强度的最小降幅由 30.72 kPa 降至 9.55 kPa，减幅高达 68.91%；最大降幅由 70.31 kPa 降至 6.08 kPa，减幅更是高达 91.35%。这一结果表明，含水率的增加会导致土-结构界面强度指标( $\phi$ 、 $c$ )显著降低，降幅通常超过三分之二，个别界面甚至达到九成以上。进一步分析发现，界面粗糙度的增长会加强含水率变化所导致的强度软化效应，即粗糙度越大，水化作用对界面力学性能的不利影响越突出。因此，提高土体含水率不仅直接削弱了土体本身的强度，也显著降低了土-结构界面在不同粗糙度条件下的抗剪强度。在实际工程设计及土-结构界面力学性能评估过程中，应综合考虑含水率与界面粗糙度的耦合影响，合理控制填土的含水率，优化界面形态，以保证土-结构界面的强度和稳定性。

Table 4. Optimum soil-rock interface strength ratio with moisture content to saturated moisture content  
表 4. 最佳含水率与饱和含水率土-岩界面强度比值

| 编组       | I    | II   | III   | IV    | V     | VI    | VII  |
|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| $\phi_p$ | 3.43 | 4.17 | 4.98  | 5.83  | 7.05  | 7.21  | 3.52 |
| $c_p$    | 2.58 | 7.03 | 11.53 | 18.81 | 24.69 | 28.82 | 6.86 |
| $\phi_r$ | 3.41 | 4.36 | 5.06  | 5.61  | 6.38  | 6.57  | 3.85 |
| $c_r$    | 2.78 | 9.77 | 14.19 | 21.00 | 28.61 | 34.20 | 8.36 |

当土-结构界面的含水率过高时，界面基质吸力明显减弱，剪切强度主要依赖于摩擦力维持。试验结果显示，在相同法向压力和粗糙度下，含水率从 11%升至 29%时，八组试验的内摩擦角分别下降了 71.12%、74.71%、77.14%、83.70%、85.82%、85.49%、73.44%和 78.11%。这一现象主要源于土颗粒孔隙被水充分填充，颗粒表面形成包裹水膜，水的润滑效应降低了颗粒间的直接接触力，从而显著降低了黏聚力和内摩擦角。具体来说，黏聚力在上述条件下分别下降了 61.18%、84.82%、91.62%、96.14%、96.17%、96.51%、80.54%和 95.63%。这是由于高含水率下，土颗粒间以自由水为主，弱结合水较少，颗粒间距离增大，黏聚作用明显减弱[15]。由此可见，含水率的升高不仅削弱了土-结构界面的基质吸力，还通过润滑作用和减弱颗粒间结合力，使界面的内摩擦角和黏聚力大幅下降，最终导致界面剪切强度降低。因此，在工程实践中应严格控制土体含水率，以免过高含水率不利于土-结构界面力学性能。

此外，当土样处于饱和状态时，土体内部剪切强度往往低于土-结构界面剪切强度。这主要是由于土-结构界面剪切强度在很大程度上受到土体中水分对土颗粒与岩石表面间吸附力的影响。当土体含水量较低时，水分不足以在土颗粒与岩石表面间形成有效吸附，界面剪切强度较低。反之，含水率较高时，

吸附作用增强, 界面剪切强度提高, 而土体自身因高含水率黏聚力快速减弱, 导致其强度显著降低, 最终出现土体内部剪切强度低于土-结构界面的现象[16]。这一结果表明, 水分对土-结构界面的力学性能具有双重影响: 既能增强界面吸附力, 又能减弱土体内部强度, 需在实际工程中充分考虑。

由此得知, 水分对土-结构界面抗剪强度具有显著的弱化效应, 且该效应在界面粗糙度较大时更加明显。水分不仅抑制了土颗粒间的胶结连接, 还对土-结构界面产生了显著的润滑作用。随着含水率升高, 结合水膜增厚, 胶结力减弱[15]。当含水率为 29% 时, 土体接近饱和, 孔隙中自由水含量较高, 剪切过程中水分难以排出, 部分水分聚集于土-结构界面。界面粗糙度越大, 吸附水分越多, 润滑效应越强, 抗剪强度下降更为显著[16]。因此, 水分对土-结构界面剪切强度的影响非常显著, 特别是在高含水率和高粗糙度条件下, 其对界面力学性能的削弱作用不可忽视。在土-结构界面工程设计与稳定性分析中, 应充分重视水分含量与界面粗糙度的耦合作用, 优化设计, 避免因水分导致界面强度大幅下降。

#### 4. 结论

本文在随机性界面粗糙度的基础上开展了土样最佳含水率和饱和含水率的土-结构界面剪切试验, 分析了法向应力、界面粗糙度、水分对界面剪切强度的影响, 主要结论有:

1) 最佳含水率和饱和含水率下的土-岩界面剪应力-位移曲线表现出明显的软化特征, 且随着界面粗糙度的增加, 软化特征愈发显著, 这表明粗糙度对界面力学性能的影响不可忽视。

2) 在同一界面粗糙度条件下, 土-结构界面的剪切峰值强度和残余强度均随法向应力的增加而显著提高。此外, 土样的密实度和内部摩擦力也随之增加, 法向应力被确定为影响土-结构界面剪应力-位移曲线特征的重要因素。

3) 土-结构界面的剪切强度受界面粗糙度和含水量的双重影响, 最佳含水率时提升界面粗糙度有利于增强剪切强度, 饱和含水率时界面粗糙度的增加会导致剪切强度的降低; 土-岩界面力学性能的实际工程设计中, 应考虑含水率与界面粗糙的耦合效应。

4) 水分对土-结构界面抗剪强度的弱化效应十分显著, 特别是在高含水率和高粗糙度双重条件下, 界面粗糙度的增长会加剧含水率变化造成的界面强度软化效应; 在工程设计和土-结构界面力学性能评估中, 合理控制土体含水率, 优化界面形态, 以确保土-结构界面的强度和稳定性。

#### 基金项目

湖南省教育厅科研项目(24B1117), 2024 年度怀化职业技术学院“揭榜挂帅”项目(JBYB202410)。

#### 参考文献

- [1] Vangla, P. and Latha Gali, M. (2016) Effect of Particle Size of Sand and Surface Asperities of Reinforcement on Their Interface Shear Behaviour. *Geotextiles and Geomembranes*, **44**, 254-268.  
<https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.11.002>
- [2] Saberi, M., Annan, C. and Konrad, J. (2019) Implementation of a Soil-Structure Interface Constitutive Model for Application in Geo-Structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **116**, 714-731.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.001>
- [3] 李永辉, 王卫东, 黄茂松, 等. 超长灌注桩桩-土界面剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1981-1988.
- [4] 邓波. 非饱和土边坡与支挡结构相互作用机理及稳定性分析方法[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [5] Potyondy, J.G. (1961) Skin Friction between Various Soils and Construction Materials. *Géotechnique*, **11**, 339-353.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.4.339>
- [6] Wang, Y., Liu, X., Zhang, M. and Bai, X. (2020) Effect of Roughness on Shear Characteristics of the Interface between Silty Clay and Concrete. *Advances in Civil Engineering*, **2020**, Article ID: 831759.  
<https://doi.org/10.1155/2020/831759>

- 
- [7] Chen, K. and Liang, F. (2024) Experimental Investigation on the Dynamic Shear Behavior of the Unsaturated Soil-Concrete Interface under Cyclic Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **176**, Article ID: 108325. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108325>
- [8] 石熊, 张家生, 邓国栋, 等. 循环荷载作用下红黏土与混凝土接触面剪切特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(3): 88-93.
- [9] 汪优, 任加琳, 李赛, 等. 土-结构接触面剪切全过程本构关系研究[J]. 湖南大学(自然科学版), 2021, 48(3): 144-152.
- [10] Lin, C., Wang, G., Guan, C., Feng, D. and Zhang, F. (2023) Experimental Study on the Shear Characteristics of Different Pile-Soil Interfaces and the Influencing Factors. *Cold Regions Science and Technology*, **206**, Article ID: 103739. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103739>
- [11] 王伯昕, 彭星麟, 王天略, 等. 土-结构界面剪切特性的临界状态判别——以松嫩平原为例[J]. 吉林大学学报(地理科学版), 2025(55): 1-11.
- [12] Zhu, Y., Li, G., Mi, Z., Wei, K. and Chen, Z. (2022) Experimental Investigation on the Shear Behavior of Interface between High Plastic Clay and Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2022**, Article ID: 9313881. <https://doi.org/10.1155/2022/9313881>
- [13] 周怡, 彭振斌, 尹泉, 等. 板岩质砂土-混凝土界面剪切特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2233-2241.
- [14] Drucker, D.C. and Prager, W. (1952) Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. *Quarterly of Applied Mathematics*, **10**, 157-165. <https://doi.org/10.1090/qam/48291>
- [15] Janbu, N. (1973) Slope Stability Computations. Wiley.
- [16] Bishop, A.W. (1955) The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Géotechnique*, **5**, 7-17. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>