

# 伊犁那巴公路滑坡区黄土的强度特性

张艳<sup>1</sup>,朱林楦<sup>2\*</sup>,谢宏丽<sup>2</sup>,田叶青<sup>2</sup>,任玉波<sup>2</sup>,隋忠瞳<sup>2</sup>

1. 西咸新区沣西新城开发建设集团有限公司,陕西 西安 712000;2. 长安大学公路学院,陕西 西安 710064

**摘要:**为探究伊犁黄土的强度特性,选取新疆伊犁那巴公路沿线黄土滑坡区的重塑黄土作为试验对象,通过三轴剪切试验、环形剪切试验以及径向压裂试验对比分析不同含水率对土体抗剪强度、残余强度、抗拉强度的影响,并结合扫描电镜试验,观察土样经环形剪切破坏后的微观形貌。研究结果表明:1)相同含水率下,土样抗剪强度随围压增大而显著增大;相同围压条件下,土样抗剪强度随含水率增大而显著减小;围压不大于200 kPa时,土样应力-应变曲线在达到峰值强度后,抗剪强度随轴向应变的增大而衰减,最终趋于残余强度;围压大于200 kPa时,土样应力-应变曲线无明显峰值点,抗剪强度随轴向应变的增大而渐进式增大,含水率增至20%后,应力-应变曲线由应变硬化型变为应变软化型;含水率由14%增至17%时,土样抗剪强度降幅最大。2)当法向应力为100~400 kPa时,峰值强度和残余强度随法向应力的增大而增大,同一含水率下各曲线形态相似;不同含水率下,剪切强度随剪切位移的增大先快速增至峰值强度后缓慢减小;含水率不大于17%时,曲线呈应变软化特征,含水率不小于20%时,曲线仅包含应变硬化与残余强度两个阶段,无应变软化现象。3)土样的残余强度与法向应力线性正相关,抗拉强度随含水率的增大而减小,原状土样与重塑土样的抗拉强度在含水率不小于17%时趋于一致,并缓慢减小;土样的抗拉强度与残余黏聚力相近,表明黏聚力是抗拉强度的主要来源。

**关键词:**边坡工程;伊犁黄土;抗剪强度;残余强度;抗拉强度

**中图分类号:**U655.54<sup>+</sup>4;TU444

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2025)06-0062-08

**引用格式:**张艳,朱林楦,谢宏丽,等. 伊犁那巴公路滑坡区黄土的强度特性[J]. 山东交通学院学报,2025,33(6):62-69.

ZHANG Yan, ZHU Linxuan, XIE Hongli, et al. Strength characteristics of loess in the landslide area of Ili Naba Highway[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(6):62-69.

## 0 引言

伊犁地区是我国唯一受大西洋西风控制的地区,三面环山开口朝西的特殊地形促进了风积黄土的广泛发育,总体呈条带状分布且厚度从数米到近百米不等<sup>[1-2]</sup>。区别于我国其他地区的黄土,伊犁黄土具有颗粒较大、粉粒质量分数较高、湿陷变形较大、力学性质较差等特点,大气降水充沛且环境温差较大,均为滑坡的发生创造有利条件<sup>[3-6]</sup>。1985—2020年,研究区共发生地质灾害超1700起,其中黄土滑坡约占86.24%<sup>[7-8]</sup>。该类型灾害以高频次、高破坏性为特征,造成区域重大人员伤亡与经济损失。

了解伊犁黄土的强度特性是探究滑坡的成因机制、分析边坡稳定性的前提。抗剪强度是土的主要力学性质之一。伊学涛等<sup>[9]</sup>分析伊犁河谷原状非饱和黄土的抗剪强度参数演化规律,发现试样的黏聚力与基质吸力间显著线性正相关。汪凯凯<sup>[10]</sup>、尚彦军等<sup>[11]</sup>结合伊犁黄土的抗剪强度特性,总结伊犁地区黄土滑坡的类型、破坏模式以及影响因素。考虑黄土滑坡的蠕变特性,滑带土残余强度也是滑坡稳定性分

收稿日期:2025-04-11

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-024)

第一作者简介:张艳(1980—),女,西安人,高级工程师,主要研究方向为黄土边坡稳定性及防护措施,E-mail:1991265132@qq.com。

\*通信作者简介:朱林楦(1996—),女,山东潍坊人,工程师,工学博士,主要研究方向为黄土边坡稳定性,E-mail:zhulinxuan@chd.edu.cn。

析的重要参数<sup>[12]</sup>。Kanji<sup>[13]</sup>总结残余强度与塑性指数的关系。Edi等<sup>[14]</sup>、Liu等<sup>[15]</sup>通过环剪试验研究法向应力、黏粒质量分数、液塑限以及剪切速率等对黄土残余强度的影响。王家鼎等<sup>[16-17]</sup>结合室内试验提出饱和黄土蠕动液化的黄土滑坡机理。拉-剪应力耦合作用下的边坡失稳破坏模式较常见,土体的抗拉强度常被忽视<sup>[18]</sup>。Haefeli<sup>[19]</sup>采用直接拉伸试验研究饱和黏性土在不同围压条件下的抗拉强度特性和试样破坏模式。此后单轴拉伸试验、轴向压裂试验以及径向压裂法等方法广泛应用于黄土抗拉强度研究<sup>[20]</sup>。

黄土强度及变形与含水率的变化关系密切<sup>[21]</sup>。吕倩俐等<sup>[3]</sup>指出伊犁黄土的抗剪强度随含水率的增大先增大后减小。刘叶等<sup>[22]</sup>对伊犁黄土进行干湿循环试验,发现土体抗剪强度衰减幅度与干湿循环幅度及系数显著正相关。黄维等<sup>[23]</sup>采用拉伸强度测定仪,从宏观角度分析伊犁黄土抗拉强度与含水率间的关系,发现黄土抗拉强度随含水率的减小而增大,且存在界限含水率。国内关于黄土的研究主要聚焦于黄土高原区域的西安、兰州等地,针对伊犁黄土强度特性的研究仍显不足,大多单独分析黄土的某一强度特性,将黄土的抗剪强度、残余强度以及抗拉强度进行综合分析的研究较少<sup>[24]</sup>。

本文选取新疆伊犁地区那巴公路沿线黄土滑坡体中的重塑土,制备不同含水率土样并开展三轴不固结不排水剪切试验、环形剪切试验及径向压裂试验,探求滑坡区伊犁黄土在增湿过程中的强度特性变化规律,并结合扫描电镜试验分析土体的微观形貌,为伊犁地区黄土滑坡防治问题提供参数支持。

## 1 研究区概况

那巴公路研究区段位于新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州新源县和巴音郭楞蒙古自治州和静县境内,地形地貌如图1所示。由图1可知:区域内平面滑坡形态明显,横向宽度约440 m,纵向长度约245 m,主滑方向7°,属巨型滑坡。滑坡后壁为基岩陡坎,坡脚为一封闭洼地,中部为宽缓滑坡斜坡,前缘伸入巩乃斯河谷。

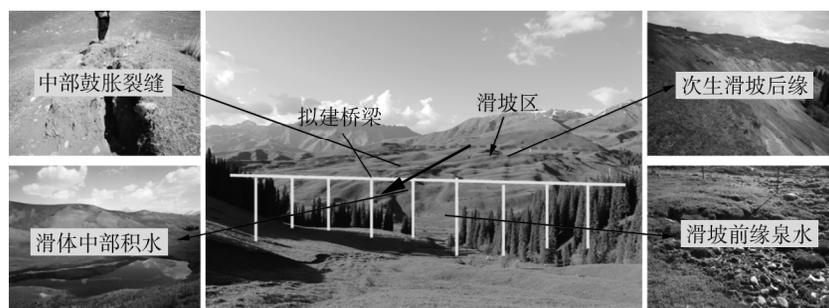


图1 研究区地形地貌

通过室内试验,测得滑坡区黄土液限为30.4%,塑限为18.5%,密度为 $2.74 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,天然含水率为13.2%,最佳含水率为17.0%,天然密度为 $1.49 \text{ g/cm}^3$ 。计算得到土体塑性指数为11.9,孔隙比为1.048。滑坡区黄土天然密度较低,孔隙比较大。土体内部结构疏松多孔,渗透性较强,强度较低,遇水软化较快,极易形成黄土滑坡。

## 2 研究方法

### 2.1 室内三轴剪切试验

为得到边坡快速失稳破坏条件下的伊犁黄土抗剪强度参数,采用GDS非饱和土三轴仪对重塑土样进行不固结不排水剪切试验。制备直径39 mm、高80 mm的标准圆柱形三轴土样。将原状土样碾碎过筛,筛孔等效孔径(边长)为2 mm,将其置于恒温烘箱中充分干燥处理24 h,待质量恒定后取出。根据预设含水率14%、17%、20%、23%分别配置土体试样,重塑土样干密度 $\rho_d = 1.45 \text{ g/cm}^3$ ,在击实器内分4层

压实制备土样。试验时控制围压分别为 100、200、300 kPa, 剪切速率为 0.8 mm/min。

## 2.2 环形剪切试验

为模拟滑坡土体的蠕变滑动、长距离剪切等实际情况, 采用 SRS-150 型环剪仪对滑坡区重塑土样进行环形剪切试验。土样含水率分别为 14%、17%、20%、23%, 分析不同含水率条件下滑坡区伊犁黄土残余强度特性。土样干密度为  $1.45 \text{ g/cm}^3$ 。采用单级剪, 剪切速率为 1 mm/min, 控制法向应力分别为 100、150、200、400 kPa。

## 2.3 径向压裂试验

采用万能试验机对伊犁黄土试样进行径向压裂试验, 测试滑坡区黄土的抗拉强度特性。制备标准圆柱体土样, 直径  $d$  为 50 mm, 高度  $h$  为 40 mm。采用线荷载的方式加载, 即上下夹板各固定直径为 1 mm 的钢丝, 抗拉强度试验夹具如图 2 所示。

分别采用滑坡区原状土以及重塑土进行试验, 制备含水率分别为 11%、14%、17%、20%、23% 的土样, 保持土体干密度为  $1.45 \text{ g/cm}^3$ 。为避免偶然性, 每种含水率重复 3 次试验, 故原状土样、重塑土样各 15 组, 取每组抗拉强度的平均值作为各组数据的最终抗拉强度。

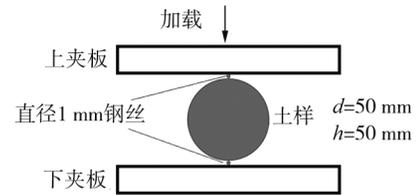


图2 抗拉强度试验夹具示意图

## 3 结果与分析

### 3.1 抗剪强度

不同围压  $\sigma_c$ 、含水率  $\omega$  下, 土样的三轴剪切应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ -轴向应变  $\varepsilon_1$  曲线如图 3 所示。

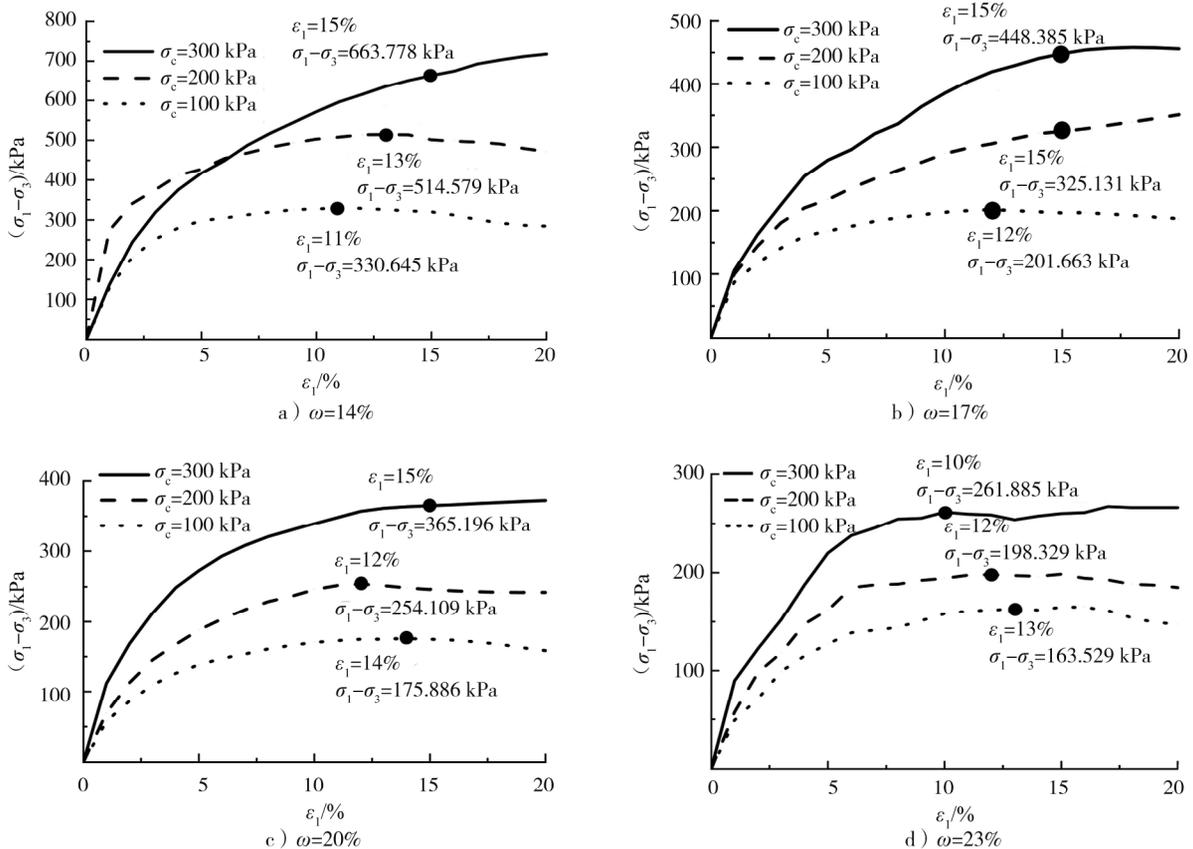


图3 不同围压、含水率下土样三轴试验的应力-应变曲线

由图 3 可知: 1) 相同含水率条件下, 土样抗剪强度随围压增大而显著增大, 原因是黄土压缩变形较

大,高围压作用导致孔隙率减小,土颗粒间接触面积增大,土体骨架对外部变形的抵抗能力增强。2)相同围压条件下,土样抗剪强度随含水率的增大而显著减小,原因是黄土的高渗透性导致水分快速渗入颗粒孔隙,浸水饱和后土体结构性被破坏,颗粒间胶结作用弱化,孔隙水压力增大,有效应力削弱,抗剪强度急剧衰减。3)在低围压( $\sigma_c \leq 200$  kPa)作用下,土体应力-应变曲线在达到峰值强度后,抗剪强度随轴向应变的增大而衰减,最终趋于残余强度。4)在高围压( $\sigma_c > 200$  kPa)作用条件下,曲线无明显峰值点,抗剪强度随轴向应变的增大而渐进式增大,应力-应变曲线的斜率随含水率的增大逐渐减小,当含水率大于 20%时,曲线呈应变软化特征,且含水率由 14%增至 23%后,土样抗剪强度减小约 60%,其中,含水率由 14%增至 17%时,土样抗剪强度降幅最大。

土样三轴剪切试验的破坏判定方式分为两种:若应力-应变曲线存在峰值,取该峰值点对应的主应力差作为破坏强度;若无显著峰值,取轴向应变为 15%时对应的主应力差作为破坏强度<sup>[25]</sup>。依据 Mohr-Coulomb 准则得出不同含水率土样的三轴抗剪强度参数如表 1 所示。

由表 1 可知:随含水率的增大,土样的黏聚力整体减小,内摩擦角减小,且减速趋缓。含水率由 14%增至 17%后,土样的黏聚力减小约 48.27%;随含水率的继续增大,黏聚力整体波动减小。含水率为 14%~17%时,含水率增大,水膜的润滑与软化作用严重削弱黄土颗粒间的胶结作用,破坏黄土的结构性,黏聚力显著减小。含水率增至 17%、20%、23%的土样的内摩擦角比含水率为 14%的土样分别减小 18.52%、40.74%、48.15%,高含水率土样削弱了土颗粒间的摩擦作用。

表 1 三轴抗剪强度参数

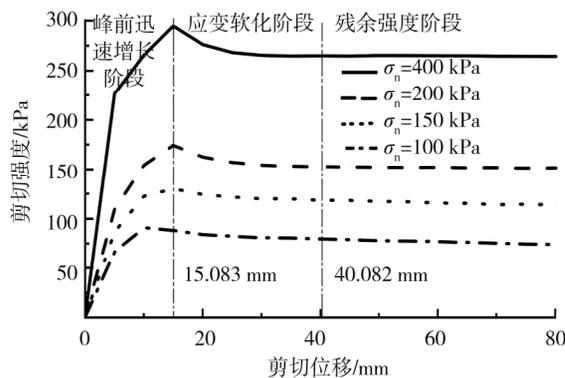
$\omega/\%$	黏聚力 $c_u/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi_u/(\circ)$
14	55.75	27
17	28.84	22
20	38.39	16
23	27.74	14

### 3.2 残余强度

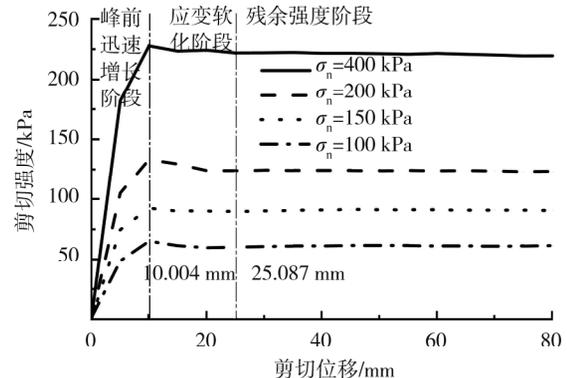
#### 3.2.1 环剪强度-位移变化规律

不同法向应力  $\sigma_n$ 、含水率条件下环剪试验所得剪切强度-剪切位移曲线如图 4 所示。由图 4 可知:1)当法向应力为 100~400 kPa 时,峰值强度和残余强度随法向应力的增大而增大,且在同一含水率条件下,各曲线形态相似,表明法向应力对剪切强度的影响一致。2)不同含水率下,剪切强度随剪切位移的增大先快速增至峰值强度后缓慢减小,趋于残余强度。3)含水率不大于 17%时,曲线呈应变软化特征,剪切位移为 10~15 mm 时达到峰值强度,随后剪应力随剪切位移的增大而缓慢减小,最后进入残余强度阶段;含水率不小于 20%时,曲线仅包含应变硬化与残余强度两个阶段,剪切位移为 20 mm 时达到峰值强度,随后直接进入残余强度阶段,无应变软化现象。

观察含水率分别为 17%、23%的土样经环剪试验后的剪切面微观结构,如图 5 所示。由图 5 可知: $\omega = 17\%$  土样的剪切面较平整,表面裂缝较小,破碎集粒分布较分散; $\omega = 23\%$  土样的剪切面较粗糙,孔洞、裂缝发育,破碎集粒呈团状分布。高含水率土样的微观结构更不稳定,土颗粒间的联结破坏加剧,呈架空-镶嵌排列,土体剪切强度减小。



a)  $\omega = 14\%$



b)  $\omega = 17\%$

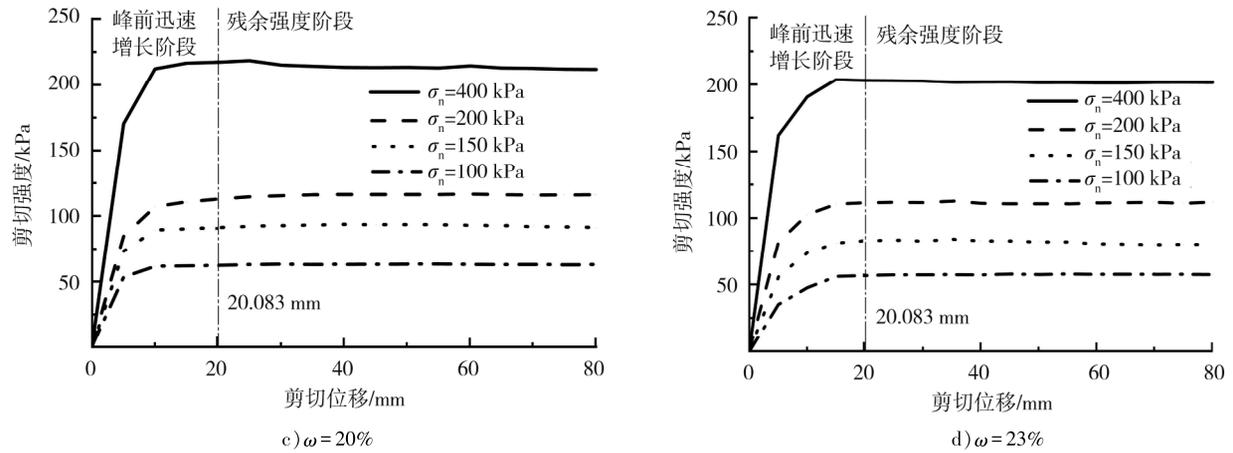


图4 不同法向应力下环剪试验剪切强度-剪切位移曲线

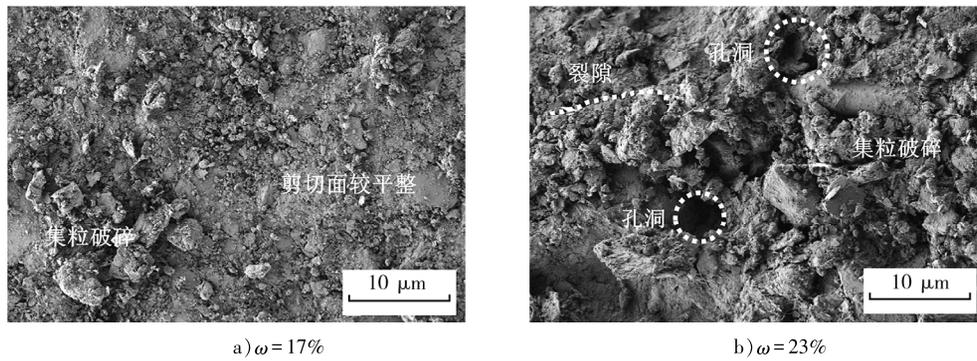


图5 环剪试验后不同含水率土样微观结构

### 3.2.2 应变软化现象

由图3可知滑坡区黄土在剪切过程中的软化特性不同。试验完成后土样的应变软化率

$$s = 100\% \times (\tau_p - \tau_r) / \tau_p,$$

式中： $\tau_p$  为土样的峰值强度， $\tau_r$  为土样的残余强度。

计算不同含水率条件下土样的剪切曲线应变软化率后，采用 Boltzmann 曲线进行拟合，如图6所示。由图6可知：法向应力分别为100、400 kPa条件下，拟合曲线的决定系数  $R^2$  均大于0.990，表明拟合效果较好。当法向应力为100、400 kPa时，应变软化现象存在临界含水率  $\omega_0$ ，即当  $\omega > \omega_0$  时，土体应变软化程度微小。原因是高含水率会破坏黄土的结构性，导致其剪切强度减小。当达到剪切强度极限值时，形成的剪切面十分软弱，不足以继续发生软化，甚至出现贯通的剪切裂缝（如图7所示），土体直接达到残余强度。取滑坡区伊犁黄土土样的  $\omega_0 = 17\%$ 。

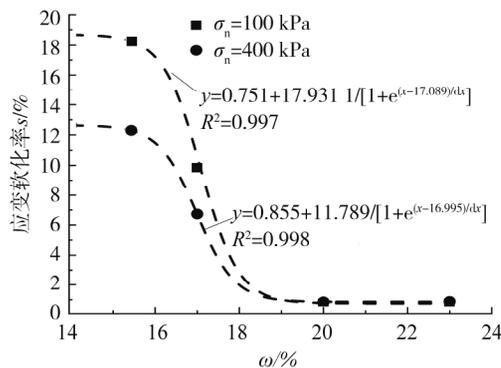


图6 不同法向应力下应变软化率-含水率拟合曲线

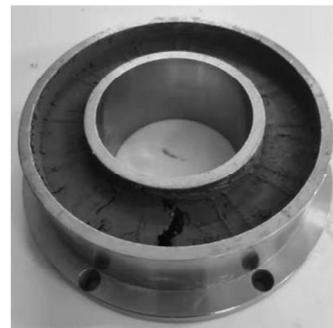


图7 高含水率土样剪切完成后的贯通裂缝

### 3.2.3 残余强度参数

对不同含水率土样的残余强度与法向应力关系进行拟合,如图 8 所示。不同含水率条件下土样的残余强度-法向应力拟合方程及残余强度参数如表 2 所示。由图 8、表 2 可知: $R^2$  均超过 0.980,拟合效果较好,土样的残余强度与法向应力线性正相关;随含水率的增大,土样残余强度参数均整体减小,其中残余有效黏聚力变化显著。

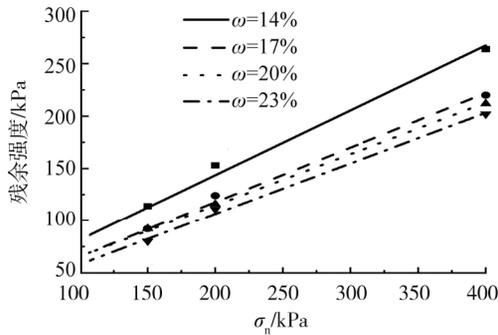


图 8 不同含水率土样残余强度- $\sigma_n$  拟合曲线

表 2 不同含水率土样的残余强度-法向应力拟合方程及残余强度参数

$\omega/\%$	拟合方程	$R^2$	残余有效黏聚力 $c_r/\text{kPa}$	残余有效内摩擦角 $\varphi_r/(\circ)$
14	$y = 19.602 + 0.620x$	0.988	19.6	31.8
17	$y = 13.289 + 0.522x$	0.993	13.3	27.6
20	$y = 16.446 + 0.491x$	0.998	16.4	26.1
23	$y = 9.783 + 0.483x$	0.996	9.8	25.8

滑坡区黄土残余强度随含水率的变化关系如图 9 所示。由图 9 可知:随含水率的增大,土样的残余强度缓慢减小。当法向应力为 400 kPa 时,含水率由 14% 增至 23% 后,土样残余强度减小 62 kPa,其中,当含水率由 14% 增至 17% 时,残余强度减小 44 kPa,约占总降幅的 70.97%。当法向应力较低时,含水率增至 17% 后,残余强度的降幅在总降幅中的占比大于 70%。滑坡区黄土的残余强度临界含水率为 17%。

采用负指数函数对滑坡区黄土的残余内摩擦角与含水率的关系进行拟合,如图 10 所示。由图 10 可知: $R^2 = 0.998$ ,拟合效果较好,残余内摩擦角与含水率负相关。含水率大于 17% 时,曲线下降速度放缓,与残余强度随含水率变化规律相似,说明含水率主要通过影响土体残余内摩擦角影响土体残余强度。

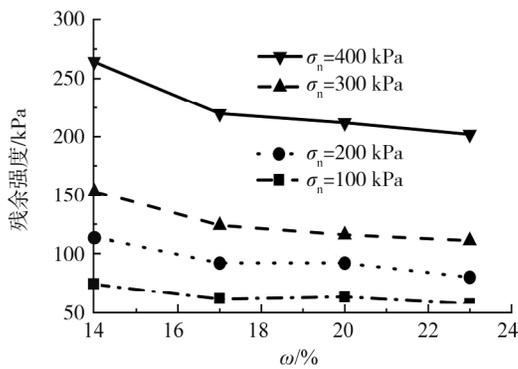


图 9 不同法向应力下残余强度-含水率变化曲线

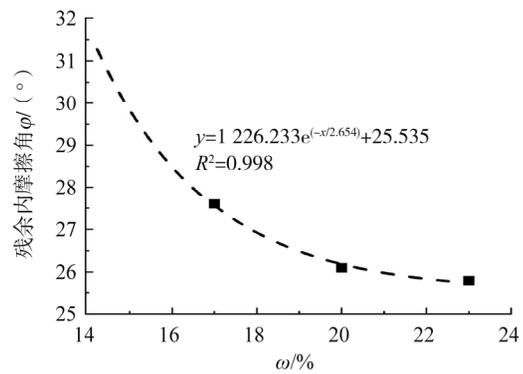
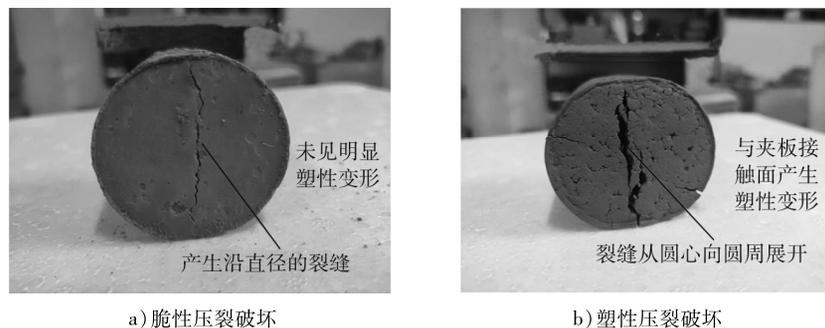


图 10 含水率-残余内摩擦角拟合曲线

### 3.3 抗拉强度

滑坡区黄土试样破坏形态一般分为脆性压裂和塑性压裂两种,如图 11 所示。



a) 脆性压裂破坏

b) 塑性压裂破坏

图 11 滑坡区黄土试样破坏形态

1)脆性压裂。当含水率不大于17%时,土样在荷载增加到一定数值时突然产生沿直径垂直于夹板的裂缝,此时万能试验机的压力示数突然减小,取该峰值压力计算抗拉强度。

2)塑性压裂。当含水率不小于20%时,土样与上下夹板接触面先被缓慢压平,而后从圆柱体内部圆心附近处产生裂缝,并向圆周扩展。代入万能试验机的拐点压力,土样的抗拉强度

$$\sigma_t = 2P / (\pi dh),$$

式中: $P$ 为土样破坏时的极限压力,N; $d$ 为土样的直径,mm; $h$ 为土样的高度,mm。

滑坡区黄土的抗拉强度-含水率关系曲线如图12所示。由图12可知:滑坡区黄土抗拉强度随含水率的增大而减小,当 $\omega \geq 17\%$ 时,抗拉强度减小趋势放缓,且原状土样与重塑土样抗拉强度趋于一致。

黄土黏聚力与其抗剪强度线性正相关,黏聚力是抗拉强度的主要来源。滑坡区伊犁黄土三轴黏聚力、残余黏聚力以及抗拉强度与含水率的关系如图13所示。由图13可知:1)伊犁黄土抗剪强度远大于土体抗拉强度,黄土自身结构强度、土中化学物质的胶结力以及颗粒间的咬合力主要表现为土体的抗剪强度。2)伊犁黄土残余黏聚力与抗拉强度非常接近,土颗粒间的黏聚力是土体抗拉强度的主要来源之一。3)含水率的增大会不同程度地削弱土样的抗剪强度,含水率不小于17%时,土样的抗剪强度变化趋势放缓,应变软化现象消失,残余黏聚力与抗拉强度减速变慢,土体强度对含水率增大的响应不敏感,一方面说明滑坡区黄土在含水率高于17%后越来越接近饱和,另一方面说明该含水率条件下黄土内部结构已被水破坏,黄土结构强度已被土-水耦合结构强度替代。

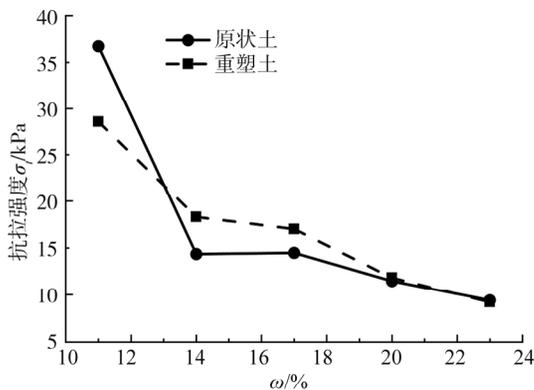


图12 原状土与重塑土含水率对抗拉强度的影响曲线

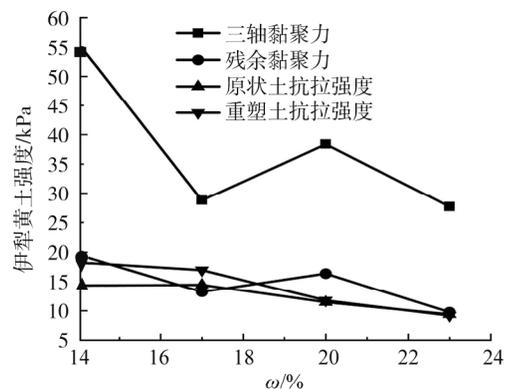


图13 伊犁黄土强度-含水率变化曲线

## 4 结论

- 1)伊犁黄土的抗剪强度随含水率的增大而减小,在含水率由14%增至17%时,黏聚力下降最显著。
- 2)伊犁黄土残余强度临界含水率为17%,大于17%时,剪切强度-剪切位移曲线应变软化现象消失,残余内摩擦角显著减小。
- 3)在径向压裂作用下,伊犁黄土破坏形式包括脆性压裂与塑性压裂。含水率大于17%时,黄土的抗拉强度减速趋缓,原状土与重塑土抗拉强度趋于一致。伊犁黄土抗剪强度远大于抗拉强度,但残余黏聚力与抗拉强度接近,土颗粒间的黏聚力是伊犁黄土抗拉强度的主要来源之一。

### 参考文献:

- [1] 包卫星,吴倩,吴谦,等.冻融循环作用下伊犁盐渍化黄土力学特性[J].岩石力学与工程学报,2024,43(7):1775-1787.
- [2] 乔国文.天山山区边坡冻融成灾机理及岩体质量评价体系研究:以G0711乌鲁木齐至尉犁段为例[D].成都:成都理工大学,2019.
- [3] 吕倩俐,张艳阳,张天栋,等.不同冻融循环次数及含水率条件下伊犁地区黄土力学强度损伤特性[J].工程地质学报,2023,31(4):1269-1281.
- [4] 尹光华,王兰民,袁中夏,等.新疆伊犁黄土的物性指标、动力学特性与滑坡[J].干旱区地理,2009,32(6):899-905.

- [5] 敬广秀,吴绍英,涂勇刚. 伊犁地区喀拉亚尔奇黄土滑坡群类型及发育特征研究[J]. 新疆地质, 2024, 42(3): 486-492.
- [6] 李志,陈宁生,侯儒宁,等. 基于机器学习的伊犁河谷黄土区泥石流易发性评估[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 129-140.
- [7] 马莉,叶尔哈力·胡斯曼,刘学军,等. 大温差环境下新疆伊犁黄土变形特性[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(6): 1630-1647.
- [8] 周昌,黄顺. 新疆伊犁黄土工程地质特征及致灾机理研究综述[J]. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1247-1260.
- [9] 伊学涛,尚彦军,孟庆森,等. 不同吸力下伊犁河谷原状非饱和黄土强度特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(3): 760-771.
- [10] 汪凯凯. 多次冻融循环下伊犁黄土斜坡稳定性机制[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
- [11] 尚彦军,金维浚,伊学涛,等. 新源县加朗普特特大型滑坡地质结构探测及老滑坡影响综合研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(3): 760-771.
- [12] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. Géotechnique, 1985, 35(1): 3-18.
- [13] KANJI M A. The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils[J]. Géotechnique, 1974, 24(4): 671-674.
- [14] EID H T, RABIE K H, WIJEWICKREME D. Drained residual shear strength at effective normal stresses relevant to soil slope stability analyses[J]. Engineering Geology, 2016, 204: 94-107.
- [15] LIU Z C, DAI S, NING F L, et al. Strength estimation for hydrate-bearing sediments from direct shear tests of hydrate-bearing sand and silt[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(2): 715-723.
- [16] 王家鼎,张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 670-674.
- [17] 王家鼎,肖树芳,张倬元. 灌溉诱发高速黄土滑坡的运动机理[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 241-246.
- [18] 吴旭阳,梁庆国,罗从双,等. 原状与重塑黄土抗拉强度差异性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(5): 1362-1370.
- [19] HAEFELI R. Investigation and measurements of the shear strengths of saturated cohesive soils[J]. Géotechnique, 1951, 2(3): 186-208.
- [20] 孙萍,彭建兵,殷跃平,等. 黄土拉伸试验及其破裂过程仿真分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 633-637.
- [21] LI Y R. A review of shear and tensile strengths of the Malan Loess in China[J]. Engineering Geology, 2018, 236: 4-10.
- [22] 刘叶,周志军,谢宏丽,等. 干湿循环作用下伊犁黄土的强度及微观特性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(13): 5500-5510.
- [23] 黄维,陶亚坤,刘清秉,等. 新疆伊犁谷地重塑黄土抗拉强度试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 92-97.
- [24] 潘明,全飞. 基于不同含水率下重塑黄土强度特性试验研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 208-211.

## Strength characteristics of loess in the landslide area of Ili Naba Highway

ZHANG Yan<sup>1</sup>, ZHU Linxuan<sup>2\*</sup>, XIE Hongli<sup>2</sup>, TIAN Yeqing<sup>2</sup>,  
REN Yubo<sup>2</sup>, SUI Zhongtong<sup>2</sup>

1. Xixian New Area Fengxi New City Development and Construction Group Co., Ltd., Xi'an 712000, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China

**Abstract:** To explore the strength characteristics of the loess in Ili, remolded loess from the landslide area along the Naba Highway in Ili, Xinjiang is selected as the test object. Through triaxial shear tests, ring shear tests,

(下转第 113 页)

shear stress first increased and then decreased. Under confined conditions, both initial and failure resistivity values exhibited negative exponential relationships with moisture content. As the vertical stress increased, the degree of reduction in failure resistivity decreased across different moisture contents. Under different moisture contents, the failure resistivity of the specimen generally decreases with increasing vertical pressure.

**Keywords:** cement-improved soil; electrical resistivity; shear strength; experimental study (责任编辑:王惠)

(上接第44页)

visualized. The results indicate that the vessel types in the Pearl River Estuary are diverse, with large sizes and high speeds; the main outbound navigation route from Guangzhou Port, the secondary outbound route from Guangzhou Port to the Dagang outbound route (passing through Lujing Bay), and the Shunde waterway to the Liansha Rong waterway are the three major routes, while the others are general routes. During different time periods, Route 3 has the highest number of routes, while Route 5 has the least. Route 3 is bimodal, with a higher number of vessels navigating during the noon and nighttime. Routes 2, 4, 6, and 7 are unimodal, and Routes 1, 5, 8, and 9 are stable regions with no significant peaks or troughs and little variation. In Route 3, the distribution of collision risk among vessels varies significantly, with higher collision risks present at the intersections of public channels and in the turning areas of the public channel.

**Keywords:** multi-source data; waterborne traffic safety; risk of collision; data mining; accident prevention

(责任编辑:王惠)

(上接第69页)

and radial fracturing tests, the impact of different moisture capacity on the shear strength, residual strength, and tensile strength of the soil is analyzed. Combined with scanning electron microscope tests, the microscopic morphology of the soil samples after ring shear failure is observed. The research results indicate that: 1) Under the same moisture capacity, the shear strength of the soil samples significantly increases with the increase of confining pressure; under the same confining pressure, the shear strength of the soil samples significantly decreases with the increase of moisture capacity; when the confining pressure is not greater than 200 kPa, the stress-strain curve of the soil samples shows that after reaching peak strength, the shear strength decreases with the increase of axial strain, eventually approaching the residual strength; when the confining pressure is greater than 200 kPa, the stress-strain curve of the soil samples has no obvious peak point, and the shear strength gradually increases with the increase of axial strain. After the moisture capacity reaches 20%, the stress-strain curve changes from strain hardening to strain softening; when the moisture capacity increases from 14% to 17%, the reduction of the shear strength of the soil samples is the greatest. 2) When the normal stress changes from 100 kPa to 400 kPa, both peak strength and residual strength increase with the increase of normal stress, and the curves are similar under the same moisture capacity conditions; under different moisture capacity, the shear strength increases rapidly to the peak strength and then slowly decreases with the increase of shear displacement; when the moisture capacity is not greater than 17%, the curves exhibit strain softening characteristics, while the moisture capacity is not less than 20%, the curves only include two stages: strain hardening and residual strength, without strain softening phenomena. 3) The residual strength of the soil samples is linearly positively correlated with normal stress, and the tensile strength decreases with the increase of moisture capacity. The tensile strength of undisturbed soil samples and remolded sample tends to be consistent when the moisture capacity is not less than 17%, and slowly decreases; the tensile strength of the soil samples is close to the residual cohesion, indicating that cohesion is the main source of tensile strength.

**Keywords:** slope engineering; Ili loess; shear strength; residual strength; tensile strength

(责任编辑:王惠)