

极端干湿交替作用下浅层黄土剪切强度特性对比*

邱明明, 李晓敏

延安大学建筑工程学院, 陕西 延安 716000

摘要: 探明极端干湿交替气候条件下黄土的力学性质是地质体稳定性分析与评价的基础依据。以延安新区某工点路堑边坡 Q_3 黄土为研究对象, 开展原状与重塑黄土多次干湿循环试验和直剪试验, 揭示干湿循环次数、路径、幅度以及法向压力对黄土抗剪强度及其指标的影响规律。研究表明: 不同法向压力条件下干湿循环黄土剪应力与剪切位移关系曲线呈应变软化型, 其峰值特征随干湿循环次数增加而逐渐减弱; 原状黄土在干湿循环条件下抗剪强度衰减相较于重塑黄土更为显著, 经历3次干湿循环后抗剪强度衰减幅度达77.82%以上; 高、低压力段下干湿循环黄土的抗剪强度及其指标存在明显差异, 在直剪试验时应考虑低压力段; 黄土抗剪强度指标随干湿循环次数呈快速衰减-缓慢衰减-渐进稳定的发展趋势, 干湿循环作用对黏聚力的影响大于内摩擦角; 黄土抗剪强度指标与干湿循环幅度呈负相关关系, 干湿循环幅度越大, 高压力段的黏聚力和低压力段的内摩擦角衰减越快; 黄土抗剪强度指标的绝对劣化度曲线发展过程可描述为快速增长阶段(1~3次)、缓慢增长阶段(3~5次)和渐进稳定阶段(5~7次), 快速增长阶段占比达78.77%以上; 基于试验数据统计分析, 建立了干湿循环黄土黏聚力和内摩擦角的绝对劣化度预测模型。

关键词: 路堑边坡; 浅层黄土; 极端干湿交替作用; 剪切强度; 劣化模型

中图分类号: TU41 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2025)03-0092-11

The shear strength characteristics of shallow loess under extreme dry-wet alternating

QIU Mingming, LI Xiaomin

School of Architectural Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, China

Abstract: Understanding the mechanical properties of loess under extreme dry-wet alternating climatic conditions is essential for analyzing and evaluating the stability of geological bodies. Focusing on the Q_3 loess of a cutting slope in the Yan'an new area, we conducted repeated dry-wet cycle tests and direct shear tests of undisturbed and remolded loess to investigate how factors, such as dry-wet cycles, cycling path, amplitude, and normal pressure, affect loess' shear strength and its associated properties. The results indicate that the relationship curve between shear stress and shear displacement for dry-wet cycle loess, under different normal pressures, exhibits a strain-softening behavior; Furthermore, the peak characteristics of the curve gradually diminish as the number of dry-wet cycles increases. The shear strength attenuation of undisturbed loess during dry-wet cycles is more pronounced than that of remolded loess, with shear strength decreasing by 77.82% after three dry-wet cycles. Significant

* 收稿日期: 2024-07-12 录用日期: 2025-01-14 网络首发日期: 2025-04-02

基金项目: 陕西省教育厅服务地方专项计划(21JC035); 延安市重点研发计划(2019ZCSY-006);
延安大学科研计划(2023KXJ-010, 2021ZCQ011)

作者简介: 邱明明(1985年生), 男; 研究方向: 黄土力学与工程;

E-mail: sxdfqiuming@163.com

全文阅读



ZR20240229

differences exist in both shear strength and its parameters in dry-wet cycle loess across high- and low-pressure conditions, with the low-pressure condition requiring careful consideration in direct shear tests. The shear strength parameter of loess declines rapidly with the increasing number of dry-wet cycles initially, then decreases slowly before stabilizing. Notably, the impact of dry-wet cycles on cohesion is greater than that on internal friction angle. Additionally, the shear strength parameter of loess is negatively correlated with the amplitude of dry-wet cycles, cohesion in high-pressure conditions and internal friction angle in low-pressure conditions showed more significant deterioration at larger dry-wet cycle amplitudes. The evolution of the deterioration curve for the loess shear strength parameter can be divided into three stages: a rapid growth stage (1-3 times), a slow growth stage (3-5 times), and a gradual stability stage (5-7 times), with over 78.77% occurring during the rapid growth stage. Based on the statistical analysis of the experimental data, we have established a predictive model for the absolute deterioration degree of cohesion and internal friction angle in dry-wet cycle loess.

Key words: cutting slope; shallow loess; extreme dry-wet alternating; shear strength; deterioration model

全球极端气候变化如高温、持续干旱和强降雨事件频繁发生, 由此而引发的地质灾害和环境问题已成为岩土工程界亟待解决的科学难题(李峰平等, 2013)。在干湿交替气候环境下, 土体力学性质因经历反复降雨和蒸发作用(李梦寻等, 2018)而发生显著改变对地质体稳定性极为不利。黄土干旱区气候环境复杂多变, 尤其是反复的干湿循环作用(谢定义等, 2016)深刻地影响着黄土的微观结构和宏观工程性质。在干燥条件下, 黄土呈现出相对致密的颗粒骨架, 抗剪强度较高, 而在湿润环境下, 黄土结构软化(叶万军等, 2015), 抗剪强度显著降低。因此, 干湿循环作用是引起黄土力学性质改变的重要因素之一, 系统研究极端干湿交替作用下黄土的强度特性, 有助于黄土干旱区地质体稳定性分析和灾害防治。

针对干湿循环土的工程性质研究已广泛开展, 众多学者从微观结构、宏观力学特性和强度劣化模型等方面来揭示干湿循环原状与重塑黄土的强度特性。在微观结构方面, 众多学者表明研究表明黄土的宏观剪切行为实质上是其微结构体系在加载和增湿作用下不断调整变形和变化的结果(叶万军等, 2017; 潘振兴等, 2020; 刘禹阳等, 2022; Nan et al., 2021)。在此基础上, Wei et al. (2022)利用SEM和CT扫描对比分析非饱和黄土及重塑黄土的微观结构差异, 揭示了土结构对强度特性的影响; 张浩等(2024)发现膨胀土经干湿-冻融影响后微观结构逐渐破碎, 孔隙体积增加, 裂隙的产生使土颗粒间的相互作用力减小, 导致黏聚力明显降低;

樊培培等(2024)通过电镜SEM扫描分析发现, 干湿循环作用下孔隙大小及其角度是影响黄土剪切强度的主要因素。微观结构是影响土体抗剪强度的内因, 而干湿循环条件是影响土体宏观力学特性的重要外因。因此, 学者们分别对不同干湿循环次数(吕海波等, 2013)、路径(刘禹阳等, 2022; 郝延周等, 2021)及幅度(程富阳等, 2017)条件下的土体力学特性进行了试验研究。现有研究表明多次干湿循环作用下原状黄土的力学特性向重塑黄土发展(袁志辉等, 2017; 胡江洋等, 2023), 且干湿循环条件下红土(张祖莲等, 2018; 袁志辉等, 2022)和膨胀土(杨和平等, 2014; 肖杰等, 2019; 胡旭辉等, 2022)的剪切强度也具有类似的衰减特性。考虑边坡的浅层滑坡特征, 段君义等(2024)对比分析了高、低应力条件对干湿循环膨胀土强度指标的影响, 指出高、低压力段下的强度指标值存在显著差异。在强度劣化模型方面, 杨志全等(2019)指出孔隙率对黄土抗剪强度影响显著, 并提出了考虑孔隙率的黄土抗剪强度模型; 胡长明等(2018)基于三轴试验结果, 采用双曲线函数表征土体劣化度, 并建立了考虑干密度、干湿循环幅度、干湿循环下限含水量的压实黄土强度劣化模型; Xu et al. (2020)分析了含盐黄土在干湿循环作用下的剪切强度特性, 采用黏聚力损伤比分别定量评价干湿循环和盐风化的损伤, 指出干湿循环作用的损伤率高于盐风化作用。

综上所述, 学者们对于干湿循环条件下黄土、红土、膨胀土等不同类型土体的力学特性已开展

了一定的研究工作,但综合考虑极端干湿交替环境与法向压力条件对黄土剪切强度的影响,以及建立相应的强度劣化模型的试验研究少有报道。鉴于此,本文以延安新区某工点路堑边坡 Q_3 黄土为研究对象,模拟陕北地区雨季经历的极端干湿交替气候环境,开展原状与重塑黄土多次干湿循环试验和直剪试验,对比分析不同法向压力条件下干湿循环黄土的抗剪强度变化规律,探究干湿循环次数、路径、幅度以及法向压力对黄土抗剪强度指标的影响,采用数理统计方法建立干湿循环黄土的抗剪强度指标劣化度模型,以期对旱区黄土工程设计和稳定性评估提供理论参考。

1 试验方案设计

1.1 试验用土

试验用土取自延安新区某工点路堑边坡,为晚更新世(Q_3)黄土,土体呈褐黄-黄褐色,土质较均匀,取样深度0.5~1.0 m。基于室内基本土工试验测试分析,土体天然密度为 1.5 g/cm^3 ,天然含水率为11.8%,孔隙率为50.5%,土粒比重为2.71,塑限为17.1%,液限为30.3%,最优含水率为15.3%,最大干密度为 1.75 g/cm^3 。

1.2 试验条件

1.2.1 脱湿温度 延安地区属于暖温带半湿润易旱气候区,全年气候变化受制于季风环流。该地夏季炎热多雨(6~8月),季降水量312.3 mm,占年总量的57%,季内月平均气温 $21.1\sim 22.9 \text{ }^\circ\text{C}$,季内最高气温可达 $40.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。通常该区域降雨期多集中在6~10月份,且多发暴雨。可见,该地区黄土经受干湿循环作用最强烈的时间段为酷热多雨的夏

季。参照区域气温观测数据,脱湿温度设定为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,以模拟延安地区黄土在雨季所经历的极端气温环境。

1.2.2 干湿循环条件 干湿循环试验采用烘箱烘干及喷淋增湿的方式,将试样脱湿或增湿至各试验组设定的含水率状态,干湿循环过程详见图1。根据室内土工试验可知,土样初始含水率为11.8%,试样干燥的下限含水率约为3.0%~5.0%,试样增湿近似饱和的含水率(上限含水率)约为30.0%。本次试验干湿循环次数设定为0、1、3、5、7次,先将黄土试样先增湿至近似饱和状态,达到上限含水率30.0%,再设定 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度条件下烘干24 h以上,达到设定的下限含水率5%,即为1次干湿循环。考虑区域气候环境下可能经历的干湿循环路径和幅度,试验设置两种干湿循环路径,路径一为先增湿后烘干,循环幅度为30.0%~11.8%,路径二为先烘干后增湿,循环幅度为5.0%~11.8%;试验设置3种可能经历的干湿循环幅度,依次为5.0%~11.8%、5.0%~15.0%和5.0%~20.0%。

1.2.3 制样方式 干湿循环原状黄土制样:采用环刀取样法进行现场取样,取样完成后应立即用密封袋保存备用,各试样质量差值应不超过 $\pm 0.5 \text{ g}$,对原状黄土试样按照预定干湿循环条件进行增减湿处理,进而得到不同干湿循环条件下的原状黄土试样。

干湿循环重塑黄土制样:将已取回的扰动黄土经风干、碾碎处理后过孔径为 2.0 mm 筛,按11.8%的含水率要求配置成湿土,密封保存24 h使水分均匀扩散后开始制样,制样时需检查试样含

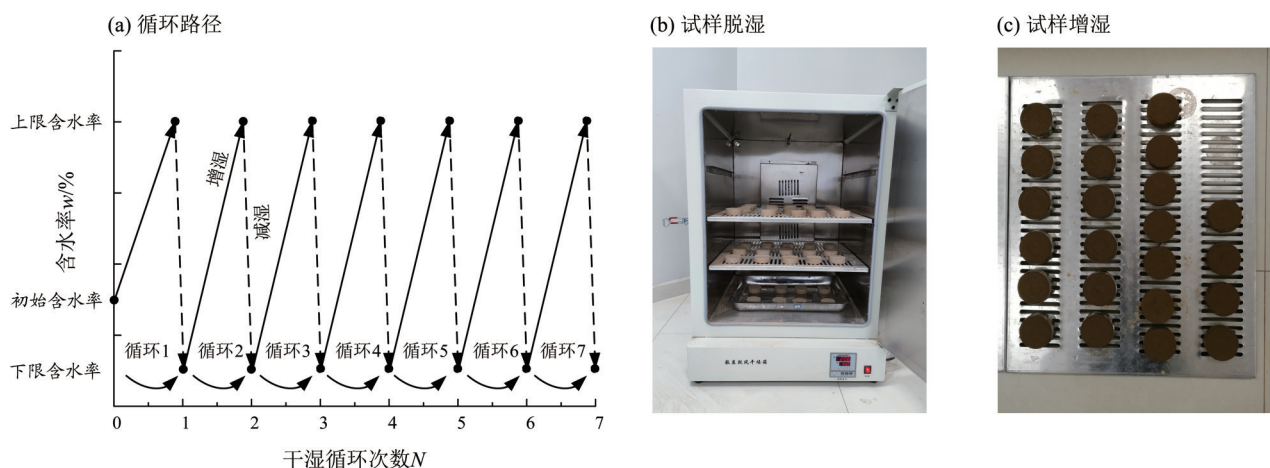


图1 干湿循环黄土制备过程

Fig. 1 Preparation process of wet-dry cycle loess

水率误差不超过 $\pm 0.5\%$ 。将黄土依据试样密度来计算所需土体质量, 称取计算所得理论质量黄土通过制样器静压来制备重塑试样若干, 试样质量实测值与计算值误差不超过 $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ 。对重塑黄土试样按照预定干湿循环条件进行增减湿处理, 得到不同干湿循环条件下的重塑黄土试样。

1.2.4 直剪试验的法向压力 考虑旱区黄土边坡失稳多为浅层滑塌破坏, 坡体潜在滑动面上所受的垂直压力为低压力条件, 一般小于 50 kPa , 而规范《土工试验方法标准 GB/T50123—2019》(2019) (以下简称《规范》) 针对直剪试验建议的最小法向压力 p 为 100 kPa , 与实际边坡破坏条件存在差异。因此, 本试验在《规范》建议的法向压力 $100\sim 400 \text{ kPa}$ 基础上, 增加法向压力 $p=6.25, 12.5, 25, 50 \text{ kPa}$, 以模拟浅层滑坡剪切面土体所受的低压力上覆压力条件, 小于 50 kPa 以下的法向压力通过等效配重施加。为便于区分, 将 $6.25\sim 50 \text{ kPa}$ 称为低压力段, $100\sim 400 \text{ kPa}$ 称为高压力段, $6.25\sim 400 \text{ kPa}$ 称为全压力段。

1.3 试验方案

直剪试验采用改进的全自动 ZJ 型应变控制式直剪仪, 通过加装电子百分表、数据采集器并与计算机连接组成测试系统, 以实现试验数据自动采集与储存。根据《规范》相关规定进行直剪试验, 试样直径为 61.8 mm , 高度为 20.0 mm , 试验加载速率取 0.8 mm/min 。为便于对比分析不同试验条件下原状与重塑黄土的剪切强度特性, 共设

置 5 个试验组, 其中法向压力 p 分别为 $6.25, 12.5, 25, 50, 100, 200, 300$ 和 400 kPa , 试验方案包括干湿循环路径、幅度和次数详见表 1。其中, 试验组 A 为原状黄土试样, 干湿循环次数 $N=0$ 时, 则为未经干湿循环作用的试样 A0; 试验组 B、C 为重塑黄土试样, 考虑干湿循环路径的差异; 试验组 C、D、E 为重塑黄土试样, 考虑干湿循环幅度的差异。

表 1 试验方案
Table 1 Test schemes

试验组	循环路径	幅度/%	N
A	增湿-烘干	30.0~5.0	0, 1, 3, 5, 7
B	增湿-烘干	30.0~11.8	0, 1, 3, 5
C	烘干-增湿	5.0~11.8	0, 1, 3, 5
D	烘干-增湿	5.0~15.0	0, 1, 3, 5
E	烘干-增湿	5.0~20.0	0, 1, 3, 5

2 试验结果与分析

2.1 不同法向压力条件下的直剪试验结果

1) 剪应力-剪切位移关系曲线。不同干湿循环次数下原状黄土试样剪应力(τ)与剪切位移(ΔL)关系曲线如图 2 所示。不同法向压力条件下干湿循环黄土 τ 与 ΔL 呈非线性关系, 应力应变关系曲线呈应变软化型, τ_{\max} (剪应力峰值) 随 p 增加而增大; 未经干湿循环的原状黄土试样($N=0$) 峰值特征最明显, 随着干湿循环次数的增加, 峰值特征逐渐减

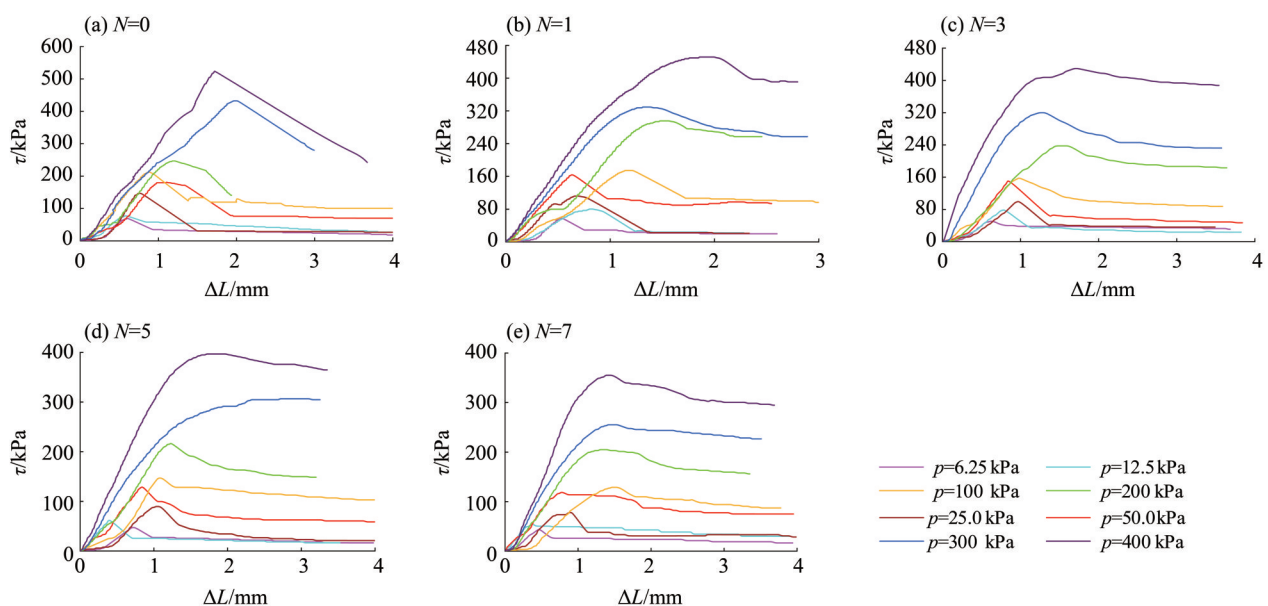


图 2 不同干湿循环次数下原状黄土试样剪应力与剪切位移关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between shear stress and shear displacement of undisturbed loess under different dry-wet cycles

弱；低应力条件下 τ_{\max} 对应的 ΔL 为 0.5~1.0 mm，高应力条件下 τ_{\max} 对应的 ΔL 为 1.0~2.0 mm； ΔL 为 2.0~3.0 mm 后 τ 逐渐趋于稳定。

2) 抗剪强度与干湿循环次数关系曲线。为反映不同法向压力条件下黄土的抗剪强度变化，通

常抗剪强度取 τ - ΔL 关系曲线的剪应力峰值，若无明显峰值则取剪切位移为 4.0 mm 所对应的剪应力作为抗剪强度。不同 p 条件下原状与重塑黄土抗剪强度随干湿循环次数的变化如图 3 所示。

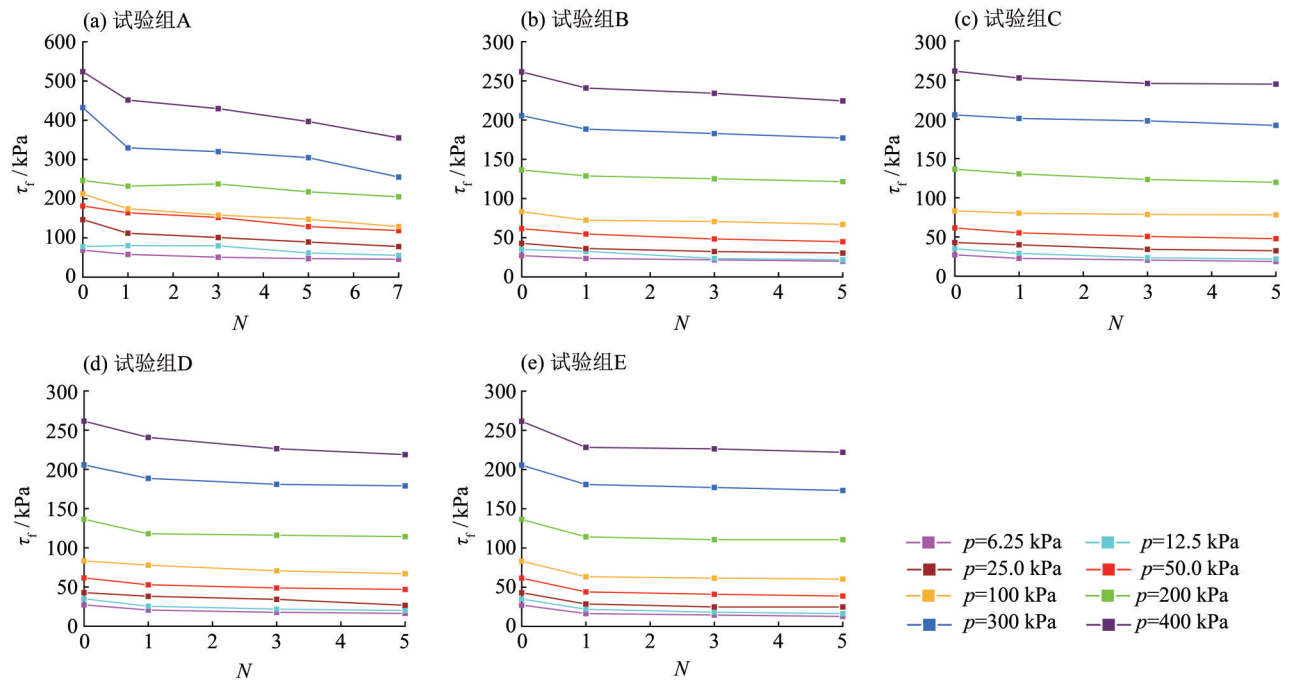


图 3 不同法向压力下原状与重塑黄土抗剪强度随干湿循环次数的变化

Fig. 3 Variations of shear strength of undisturbed and remolded loess with the dry-wet cycles under different normal pressures

2.2 试验结果分析

2.2.1 干湿循环条件下黄土抗剪强度衰减 根据图 3 可得，相同法向压力条件下，随着干湿循环次数的增加，黄土的抗剪强度呈现出先快速衰减，再到缓慢衰减，最后趋于平稳的趋势；由于原状黄土具有天然的沉积特性，在原状黄土未经扰动时具有较高的初始抗剪强度，而经历干湿循环后其初始结构被破坏，故原状黄土的抗剪强度衰减相较于重塑黄土更为显著，这也是图 3a 曲线衰减变化较其他情况更为明显的原因；此外，除原状黄土在高应力条件下经 7 次干湿循环后抗剪强度仍有明显衰减外，其他试验条件下黄土的抗剪强度均在 3 次干湿循环后逐渐趋于稳定。袁志辉等 (2017) 指出多次干湿循环引起原状黄土的结构强度消失，最终使得原状黄土与重塑黄土具有基本相同土体结构和强度特性，此结论与本文试验结果基本一致。

以 $p=25$ kPa 和 $p=100$ kPa 条件下黄土的抗剪强度测试结果为例进行对比分析 (图 4)，第 1 次

干湿循环后抗剪强度衰减程度最明显，随着干湿循环次数增加，试样抗剪强度不断衰减而后逐渐趋于稳定，由此说明干湿循环初期对土体初始结构破坏作用较大；经历 3 次干湿循环后，黄土抗剪强度衰减幅度已达稳定后衰减幅度的 77.8% 以上。以未经干湿循环试样 ($N=0$) 为参照，在低应力条件下，试验组 A、B、C、D、E 经历 5 次干湿循环后的黄土抗剪强度相较于未经干湿循环试样衰减范围依次为 20.76%~38.96%、26.67%~38.78%、22.21%~37.78%、23.84%~42.96%、37.11%~53.44%，而在高应力条件下的相应值则依次为 11.86%~30.56%、10.91%~19.59%、6.35%~12.24%、12.96%~19.59%、15.11%~27.56%；高压段抗剪强度与低压力段相比，干湿循环黄土在低压力段抗剪强度更易发生衰减。这说明浅层黄土易受干湿循环气候影响导致土体强度劣化，对于旱区黄土塬坡应在开挖完成后及时做好坡面防护，防止反复降雨和蒸发作用引起土体性质锐减而诱发边

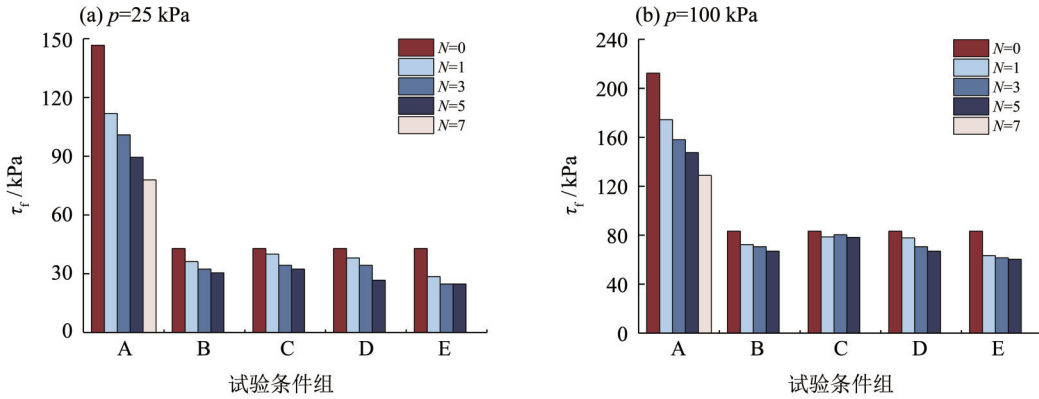


图4 不同法向压力 p 条件下干湿循环黄土抗剪强度统计值

Fig. 4 Statistical values of shear strength of dry-wet cycles loess under different normal pressures

坡灾害, 同时改善浅层坡体约束状态(增大法向压力)亦可降低黄土边坡浅层灾变。

2.2.2 低应力条件对黄土抗剪强度的影响 直剪试验的规范中, 建议的最小法向压力为 100 kPa, 未包含低压力段条件。因此, 根据图3试验数据, 采用库伦强度公式分别对低压力段、高压力段及全压力段进行直线拟合分析可得, 干湿循环条件下原状黄土抗剪强度与法向压力的关系曲线如图5。不同压力段所获得的拟合抗剪强度线存在显著差异。为进一步分析压力条件对抗剪强度的影响, 取高压力段4组数据进行直线拟合并计算 c 和 φ 值, 再根据拟合关系式计算得出低压力段对应的抗剪强度, 计算结果详见表2。

以原状黄土第0次干湿循环为例, 原状黄土抗剪强度计算值与试验值对比($N=0$)如图6所示。在低压力段, 试样的抗剪强度试验值依次为 68.89、77.79、146.61 和 181.44 kPa; 按照库伦强度公式拟合得到的计算值依次为 80.80、87.80、101.80 和 129.80 kPa, 分别为试验值的 1.17、1.13、0.69 和

0.72倍。当经历7次干湿循环后, 相同法向压力下试样的抗剪强度计算值与试验值的比值依次为 1.31、1.14、0.92 和 0.76倍。可见, 在低压力段的原状土抗剪强度试验值与计算值之间存在显著差异, 且试验值直线斜率更大。由此说明, 干湿循环黄土抗剪强度与法向压力条件密切相关, 在进行土体抗剪强度指标试验时宜包含低压力段。

2.2.3 干湿循环次数对黄土抗剪强度指标的影响 为定量描述黄土经历干湿循环后抗剪强度指标的变化, 将未经历干湿循环试样的抗剪强度指标和经历 N 次干湿循环试样的抗剪强度指标之差, 与未经历干湿循环试样的抗剪强度指标的比值, 定义为该试样的抗剪强度指标绝对劣化度 β_c 或 β_φ (杨和平等, 2014), 其表达式为

$$\begin{cases} \beta_c = \frac{c_0 - c_N}{c_0} \times 100\%, \\ \beta_\varphi = \frac{\varphi_0 - \varphi_N}{\varphi_0} \times 100\%, \end{cases}$$

式中 c_0 和 φ_0 分别表示试样未经历干湿循环时的黏聚

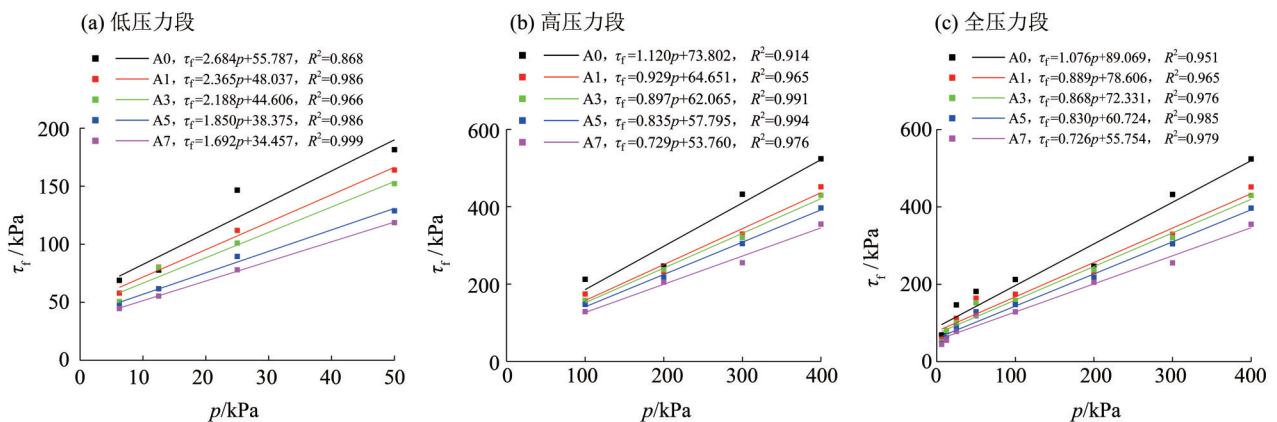


图5 干湿循环条件下原状黄土抗剪强度与法向压力的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between shear strength and normal pressure of undisturbed loess under dry-wet cycles

表2 低压力(p)条件下原状黄土抗剪强度(τ_f)的试验值与计算值对比

Table 2 Comparison of tested and calculated shear strength of undisturbed loess under low stress conditions kPa

p	τ_f (试验值)					τ_f (计算值)				
	$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=5$	$N=7$	$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=5$	$N=7$
6.25	68.89	57.89	50.65	47.03	44.56	80.80	70.46	67.66	63.01	58.32
12.50	77.79	80.21	79.77	61.64	55.38	87.80	76.26	73.27	68.23	62.87
25.00	146.61	111.86	100.91	89.49	77.93	101.80	87.88	84.48	78.67	71.99
50.00	181.44	163.88	152.18	128.77	118.60	129.80	111.10	106.91	99.55	90.21

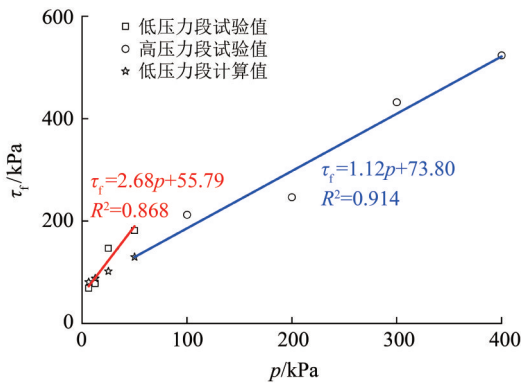


图6 原状黄土抗剪强度试验值与计算值对比($N=0$)

Fig. 6 Comparison of tested and calculated shear strength of undisturbed loess ($N=0$)

力和内摩擦角; c_N 和 φ_N 分别表示试样经历 N 次干湿循环后的黏聚力和内摩擦角; N 为干湿循环次数。

干湿循环次数对原状黄土抗剪强度指标的影响如图7所示。在不同法向压力段条件下, c 和 φ 随干湿循环次数呈快速衰减(1~3次)、缓慢衰减(3~5次)和渐进稳定(5~7次)的发展趋势; 低压力、高压力和全压力段试样的抗剪强度指标对比发现, c 表现为全压力段>高压力段>低压力段, 而 φ 的表现则为低压力段>高压力段>全压力段, 且全压力段 φ 略低于全压力段, 可见, 高、低压力段试样的抗剪强度指标存在一定的差异, 低压力条件下干湿循环黄土 c 较小, 但具有较高的 φ , 而高压力条件下干湿循环黄土 c 较大, φ 相对较小; β_c 和 β_φ 随 N 呈增加趋势, 其变化趋势可采用Michaelis-Menten函数描述, 即

$$\beta_{c(\varphi)} = aN/(b + N),$$

式中 a 、 b 均为拟合系数; 该函数具有较好的拟合优度(R^2), 拟合结果见表3。

以经历7次干湿循环为例, 低压力、高压力和全压力段 β_c 分别为38.24%、27.16%和37.40%, β_φ 分别为14.59%、25.18%和23.61%, 对比发现, $\beta_c > \beta_\varphi$, 其中低压力和全压力段 β_c 大于高压力段, 而高

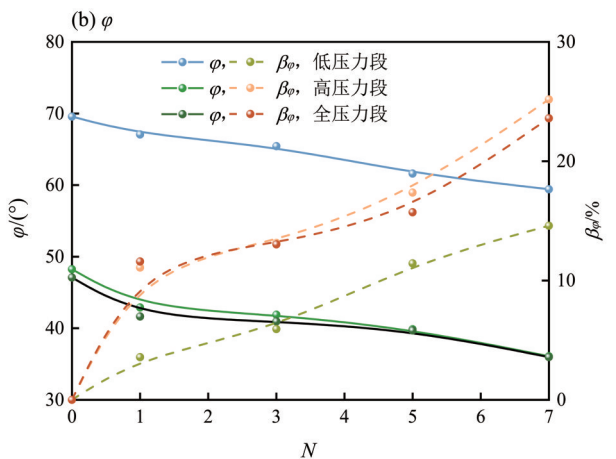
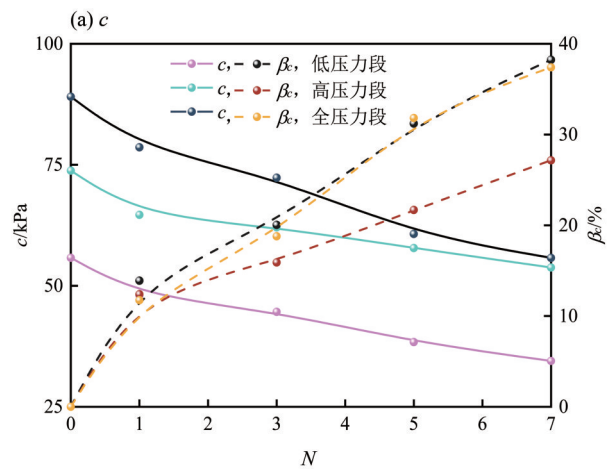


图7 干湿循环次数对原状黄土抗剪强度指标的影响

Fig. 7 Effect of the dry-wet cycles on the shear strength parameters of undisturbed loess

压力和全压力段 β_φ 大于低压力段。综上所述, 原状黄土在干湿循环作用下 c 的衰减较 φ 更显著; 在低压力条件下, φ 对干湿循环黄土抗剪强度贡献较大, 而在高压力条件下, c 对干湿循环黄土抗剪强度贡献较大。

2.2.4 干湿循环路径对黄土抗剪强度指标的影响

干湿循环路径对重塑黄土抗剪强度指标的影响如图8所示。试验组B和C条件下, 重塑黄土抗剪强度指标随干湿循环次数变化规律与原状黄土基本

表3 试验组A条件下黄土抗剪强度指标的绝对劣化度拟合结果

Table 3 Absolute deterioration of loess shear strength parameters fitted for test group A

组别	压力条件	函数表达式	R^2
A	低压力段	$\beta_c=67.72N/(5.77+N)$	0.961
	高压力段	$\beta_c=34.05N/(2.48+N)$	0.939
	全压力段	$\beta_c=81.82N/(8.33+N)$	0.973
	低压力段	$\beta_\phi=91.22N/(36.55+N)$	0.976
	高压力段	$\beta_\phi=33.16N/(3.35+N)$	0.874
	全压力段	$\beta_\phi=25.36N/(1.84+N)$	0.841

一致; 在1~3次干湿循环阶段, 抗剪强度指标衰减速度较快, 在3~5次干湿循环阶段, 抗剪强度指标衰减速度减缓并逐步趋于稳定; 经历5次干湿循环后, 试验组B条件下高压力、低压力段 c 分别为 15.49、15.48 kPa, ϕ 分别为 27.83°、30.41°, 试验组C条件下高压力、低压力段 c 分别为 15.59、14.26 kPa, ϕ 分别为 29.81°、34.14°。说明两种干湿循环路径条件下, 高压力、低压力段试样的抗剪强度指标衰减变化存在一定的差异, 尤其是在0~3次干湿循环期间, 而经历5次干湿循环后, 这种差异性逐渐缩小。主要原因是, 在干湿循环初期(0~3次), 由于干湿循环路径的不同, 引起试样的物理性质和土结构发生变化, 故两种干湿循环路径下的抗剪强度指标存在差异; 随着干湿循环次数增加, 土结构在干湿循环作用下逐渐趋于稳定, 影响土体性质的主控因素, 由干湿循环作用转变为含水率状态, 而两种干湿循环路径下试样的最终含水率均为 11.8%, 因此, 经历5次干湿循环后试样抗剪强度指标差异较小, 尤其是 c 值非常接近。经历5次干湿循环后, 试验组B条件下高、低压力段 c 的变化幅度分别为 25.16%、35.08%, ϕ 的变化幅度分别为 10.59%、18.16%; 试验组C条件下高压力、低压力段 c 的变化幅度分别为 24.71%、40.22%, ϕ 的变化幅度分别为 4.24%、8.14%, 即在两种干湿循环路径下, c 的衰减较 ϕ 更明显, 由此进一步说明, 干湿循环作用下黄土抗剪强度锐减的主要原因是 c 显著降低。

干湿循环路径对重塑黄土抗剪强度指标绝对劣化度的影响如图9所示。在两种干湿循环路径条件下, 试样抗剪强度指标的绝对劣化度随干湿循环次数符合 Michaelis-Menten 函数增长趋势, 其拟合结果见表4; 经历5次干湿循环后, 试验组B条件下, 低压力、高压力和全压力段的 β_c 依次为

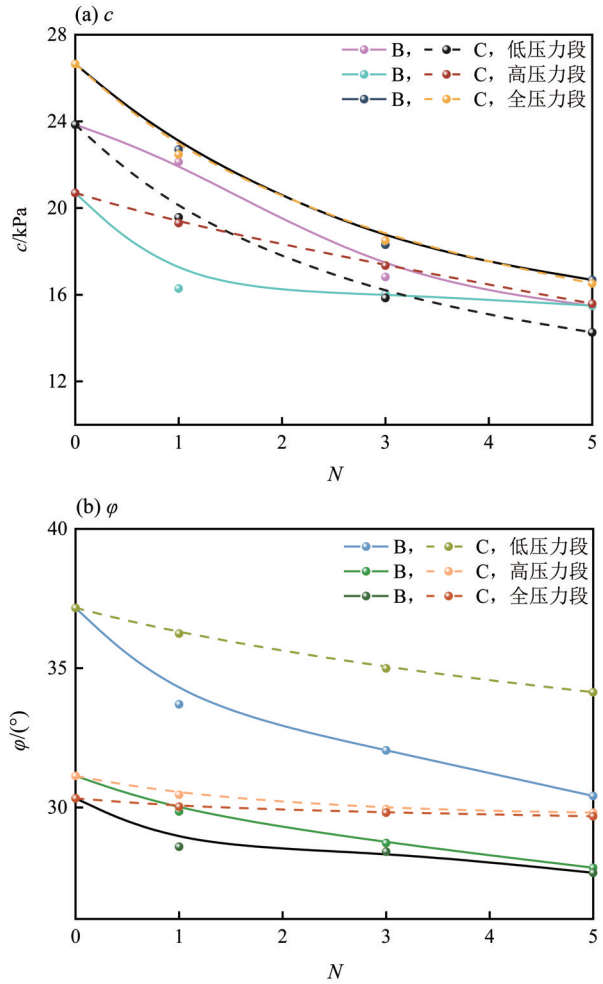


图8 干湿循环路径对重塑黄土抗剪强度指标的影响
Fig. 8 Effect of dry-wet cycle path on the shear strength parameters of remolded loess

35.08%、25.16% 和 37.41%, β_ϕ 依次为 18.16%、10.59%和 8.81%, 试验组C条件下, 低压力、高压力和全压力段的 β_c 依次为 40.22%、24.71%和 38.02%, β_ϕ 依次为 8.14%、4.24%和 2.13%。对比发现, 两种干湿循环路径下 $\beta_c > \beta_\phi$, 且试验组B对 ϕ 的影响大于试验组C。

2.2.5 干湿循环幅度对黄土抗剪强度指标的影响

干湿循环幅度对原状黄土抗剪强度指标的影响如图10和图11所示。在5.0%~11.8%、5.0%~15.0%和5.0%~20.0%三种干湿循环幅度条件下, 试样的抗剪强度指标随干湿循环次数呈衰减趋势; 干湿循环幅度对 c 的影响, 其表现为干湿循环幅度5.0%~20.0%最大, 5.0%~11.8%次之、5.0%~15.0%最小, 即 c 随干湿循环幅度的增大而减小, 而干湿循环幅度对 ϕ 的影响规律则不明显。 β_c 与 β_ϕ 随 N 符合 Michaelis-Menten 函数增长趋势, 拟合结果见表5。经历5次干湿循环后, 5.0%~11.8%、5.0%~15.0%

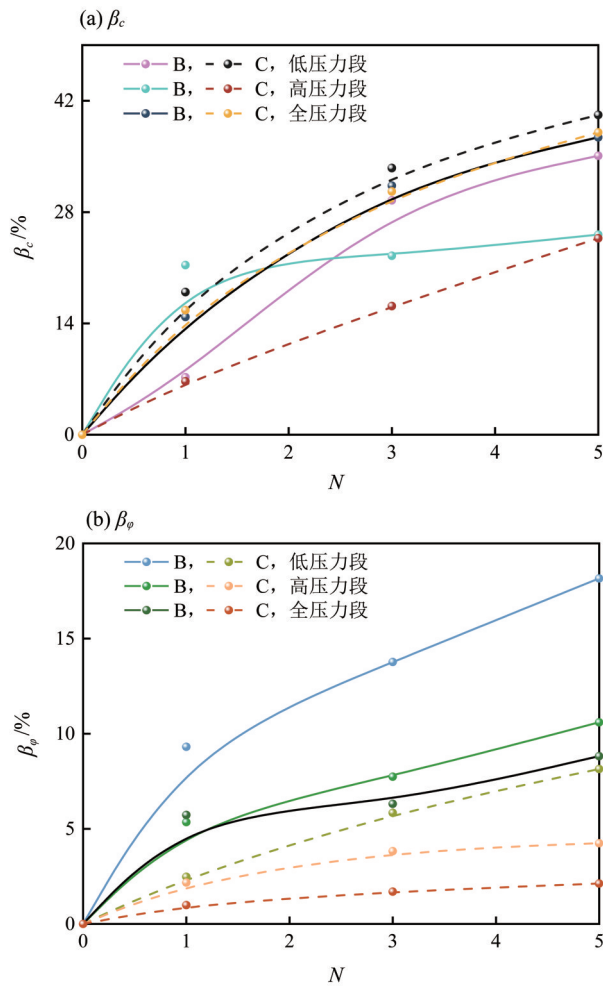


图9 干湿循环路径对重塑黄土抗剪强度指标绝对劣化度的影响

Fig. 9 Effect of dry-wet cycle path on the absolute deterioration degree of shear strength parameters of remolded loess

表4 试验组B、C条件下黄土抗剪强度指标的绝对劣化度拟合结果

Table 4 Absolute deterioration of loess shear strength parameters fitted for test groups B and C conditions

组别	压力条件	函数表达式	R^2
B	低压力段	$\beta_c=92.98N/(7.72+N)$	0.955
	高压力段	$\beta_c=25.19N/(0.20+N)$	0.992
	全压力段	$\beta_c=59.72N/(2.88+N)$	0.998
	低压力段	$\beta_\phi=23.23N/(1.66+N)$	0.981
	高压力段	$\beta_\phi=13.67N/(1.78+N)$	0.971
	全压力段	$\beta_\phi=9.16N/(0.70+N)$	0.929
C	低压力段	$\beta_c=58.34N/(2.24+N)$	1.000
	高压力段	$\beta_c=89.89N/(13.30+N)$	0.999
	全压力段	$\beta_c=59.15N/(2.79+N)$	1.000
	低压力段	$\beta_\phi=19.28N/(6.86+N)$	1.000
	高压力段	$\beta_\phi=5.62N/(1.53+N)$	0.998
	全压力段	$\beta_\phi=2.98N/(2.10+N)$	0.997

和 5.0%~20.0% 的干湿循环幅度下, β_c 在低压力段依次为 40.22%、53.91%、61.82%; 在高压力段依次为 24.71%、29.16%、77.61%。可见, β_c 与干湿循环幅度呈正相关性, 且干湿循环幅度越大, 对高压力段的 β_c 影响越显著。相同条件下, β_ϕ 在低压力段依次为 8.14%、5.74%、17.02%; 在高压力段则依次为 4.24%、11.75%、7.74%。由此得出, 干湿循环幅度越大, 对低压力段的 β_ϕ 影响越显著, 而高压力段的 β_ϕ 变化规律不明显。

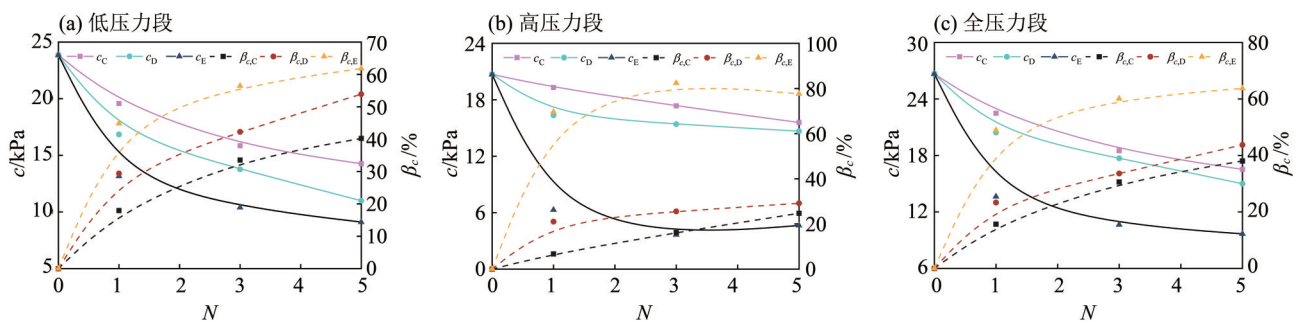


图10 干湿循环幅度对重塑黄土c的影响

Fig. 10 Effect of dry-wet cycle amplitude on the cohesion of remolded loess

3 讨论

考虑干湿循环条件对黄土抗剪强度指标绝对劣化度影响的差异性, 基于不同试验条件下的实测数据对抗剪强度指标绝对劣化度进行统计分析

显得十分必要。由于测试结果具有一定的随机性, 假定参数服从正态分布规律, 因此在数据统计时取 95% 的置信区间进行分析, 依次得到 95% 置信界上下限和均值预测模型, 计算结果如图 12 所示。黄土抗剪强度指标的绝对劣化度曲线发展过程可

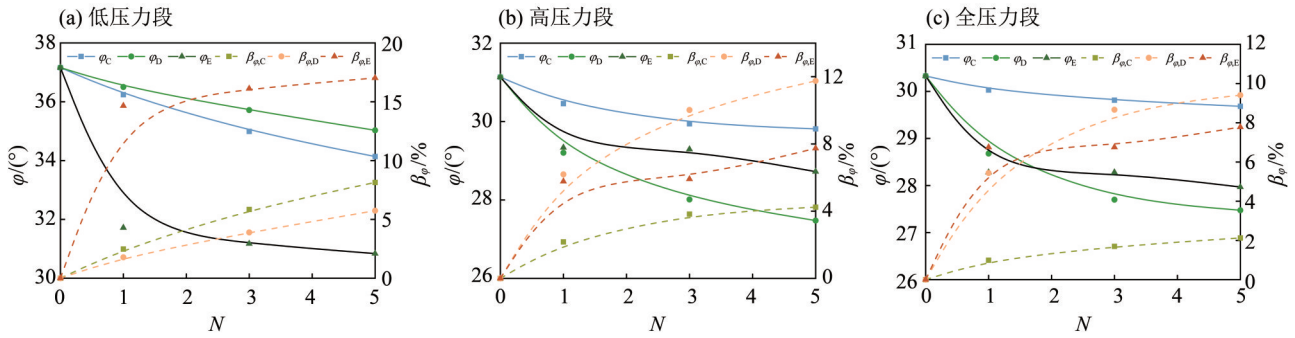


图 11 干湿循环幅度对重塑黄土 φ 的影响

Fig. 11 Effect of dry-wet cycle amplitude on the internal friction angle of remolded loess

表 5 试验组 D、E 条件下黄土抗剪强度指标的绝对劣化度拟合结果

Table 5 Absolute deterioration of loess shear strength parameters fitted for test groups D and E conditions

组别	压力条件	函数表达式	R^2
D	低压力段	$\beta_c = 65.98N / (1.36 + N)$	0.985
	高压力段	$\beta_c = 31.18N / (0.51 + N)$	0.994
	全压力段	$\beta_c = 54.19N / (1.46 + N)$	0.982
	低压力段	$\beta_\varphi = 14.75N / (7.99 + N)$	0.997
	高压力段	$\beta_\varphi = 15.07N / (1.46 + N)$	1.000
	全压力段	$\beta_\varphi = 11.65N / (1.12 + N)$	0.999
E	低压力段	$\beta_c = 67.26N / (0.51 + N)$	0.999
	高压力段	$\beta_c = 83.59N / (0.19 + N)$	0.992
	全压力段	$\beta_c = 68.63N / (0.41 + N)$	1.000
	低压力段	$\beta_\varphi = 17.46N / (0.20 + N)$	0.999
	高压力段	$\beta_\varphi = 7.60N / (0.37 + N)$	0.946
	全压力段	$\beta_\varphi = 7.59N / (0.14 + N)$	0.984

描述为快速增长阶段(1~3次)、缓慢增长阶段(3~5次)和渐进稳定阶段(5~7次), 抗剪强度指标衰减变化主要发生在快速增长阶段, 其占比达 78.77% 以上; 经历 7 次干湿循环后, 黄土的 β_c 上限值、下限值和平均值依次为 51.21%、43.31%、34.54%, β_φ 上限值、下限值和平均值依次为 12.96%、10.30%、7.93%; 对比发现, c 和 φ 的劣化发展趋势与干湿循环次数有显著的相关性, 且 c 随干湿循环次数衰减程度明显较 φ 高。同时, 考虑统计的试验数据有限, 且试验数据有一定的随机性, 文中提出的预测模型需进一步验证, 包括在不同干湿气候条件和不同类型黄土中测试其适用性。

4 结论

1) 不同法向压力下, 干湿循环黄土的剪应力

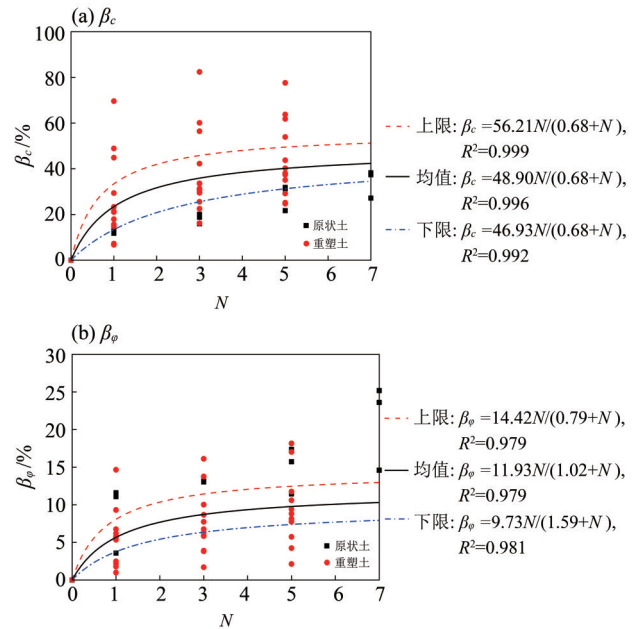


图 12 干湿循环作用下黄土抗剪强度指标绝对劣化度统计预测模型

Fig. 12 Prediction model of absolute deterioration degree for loess shear strength parameters under dry-wet cycles

与剪切位移关系曲线呈应变软化型, 剪应力峰值随法向压力增加而增大, 但随着循环次数增加, 峰值特征逐渐减弱。原状黄土的抗剪强度较重塑黄土在干湿循环下衰减更显著, 初期衰减速率较快, 经过 3~5 次循环后趋于稳定, 衰减幅度超过 77.82%。

2) 高、低压力段下干湿循环黄土的抗剪强度及其指标存在明显差异, 在直剪试验时应考虑低压力段。建议对旱区的裸露黄土坡面进行防护和加固, 以防止降雨和蒸发引发边坡灾害。

3) 黄土抗剪强度指标随干湿循环次数呈快速衰减-缓慢衰减-渐进稳定的发展趋势, c 的衰减较 φ 更明显; 在低压力条件下, φ 对干湿循环黄土抗剪强度贡献较大, 而在高压条件下, c 对干湿循

环黄土抗剪强度贡献较大。

4) 干湿循环路径不同, 黄土的抗剪强度指标也存在差异, 试验组 B 对 φ 的影响大于试验组 C; 随着循环幅度增加, 抗剪强度指标逐渐降低, 干湿循环幅度越大, 对高压力段 β_c 和低压力段 β_p 的影响越显著。

参考文献:

- 程富阳, 黄英, 周志伟, 等, 2017. 干湿循环下饱和红土不排水三轴试验研究[J]. 工程地质学报, 25(4): 1017-1026.
- 段君义, 吴俊江, 粟雨, 等, 2024. 浅层膨胀土及其纤维改良土的剪切强度特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 58(3): 547-556+569.
- 樊培培, 张凌凯, 丁旭升, 2024. 干湿-冻融循环条件下湿陷性黄土剪切及压缩特性的劣化规律[J]. 岩土力学, 45(7): 2050-2060.
- 郝延周, 王铁行, 汪朝, 等, 2021. 干湿循环作用下压实黄土三轴剪切特性试验研究[J]. 水利学报, 52(3): 359-368.
- 胡长明, 袁一力, 王雪艳, 等, 2018. 干湿循环作用下压实黄土强度劣化模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 37(12): 2804-2818.
- 胡江洋, 郭志豪, 潘涛, 等, 2023. 干湿循环作用下伊犁黄土强度劣化试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 19(S1): 181-191.
- 胡旭辉, 张坤勇, 聂美军, 等, 2022. 干湿循环条件对膨胀土强度指标的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 53(1): 269-279.
- 李峰平, 章光新, 董李勤, 2013. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学, 33(4): 457-464.
- 李梦寻, 王冬梅, 任远, 等, 2018. 不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响[J]. 生态学报, 38(5): 1542-1549.
- 刘禹阳, 安驰, 来弘鹏, 等, 2022. 不同干湿循环路径下 Q_2 原状黄土强度与微观结构演化试验[J]. 中国公路学报, 35(12): 168-180.
- 刘禹阳, 王耕, 来弘鹏, 等, 2022. 干湿循环作用下原状黄土宏-微观参数关系研究[J]. 水利学报, 53(4): 421-432.
- 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等, 2013. 胀缩性土强度衰减曲线的函数拟合[J]. 岩土工程学报, 35(S2): 157-162.
- 潘振兴, 杨更社, 叶万军, 等, 2020. 干湿循环作用下原状黄土力学性质及微观损伤研究[J]. 工程地质学报, 28(6): 1186-1192.
- 肖杰, 杨和平, 林京松, 等, 2019. 模拟干湿循环及含低围压条件的膨胀土三轴试验[J]. 中国公路学报, 32(1): 21-28.
- 谢定义, 邢义川, 2016. 黄土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 杨和平, 王兴正, 肖杰, 2014. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 36(5): 949-954.
- 杨志全, 丁攀, 雨德聪, 等, 2019. 基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型[J]. 山地学报, 37(3): 392-399.
- 叶万军, 李长清, 杨更社, 等, 2017. 增湿-减湿作用下黄土裂隙演化规律研究[J]. 工程地质学报, 25(2): 376-383.
- 叶万军, 赵志鹏, 杨更社, 等, 2015. 土体含水状态对黄土边坡剥落病害产生的影响[J]. 中国公路学报, 28(7): 18-24.
- 袁志辉, 春唐, 杨普济, 等, 2022. 干湿循环下红土力学性质劣化的多尺度试验[J]. 水力发电学报, 41(2): 79-91.
- 袁志辉, 倪万魁, 唐春, 等, 2017. 干湿循环下黄土强度衰减与结构强度试验研究[J]. 岩土力学, 38(7): 1894-1902+1942.
- 张浩, 张凌凯, 2024. 干湿-冻融循环条件下膨胀土剪切特性的劣化机制研究[J]. 工程力学, 41(4): 94-105.
- 张祖莲, 梁谏杰, 黄英, 等, 2018. 干湿循环作用下红土抗剪强度与微结构关系研究[J]. 水文地质工程地质, 45(3): 78-85.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社.
- NAN J J, PENG J B, ZHU F J, et al, 2021. Shear behavior and microstructural variation in loess from the Yan'an area, China[J]. Eng Geol, 280: 105964.
- WEI Y Z, YAO Z H, CHONG X L, et al, 2022. Microstructure of unsaturated loess and its influence on strength characteristics[J]. Sci Rep, 12(1): 1502.
- XU J, LI Y F, WANG S H, et al, 2020. Shear strength and mesoscopic character of undisturbed loess with sodium sulfate after dry-wet cycling[J]. Bull Eng Geol Environ, 79(3): 1523-1541.

(责任编辑 秦社彩)