

https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.050



开挖工况下黄土-红黏土复合边坡 土体蠕变特性及长期强度研究

宋欢^{1,2}, 王新刚^{1,2*}, 滕宏泉³, 叶旭光⁴, 刘凯^{1,2}, 石卫³, 杨金水^{1,2}

1. 西北大学地质学系, 陕西西安 710069
2. 数字孪生与重大设施灾害防控陕西省高等学校重点实验室, 陕西西安 710069
3. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西西安 710068
4. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北武汉 430074

摘要: 在黄土高原地区, 开挖卸荷易引发边坡失稳灾害, 而黄土的水敏性与蠕变特性是开挖边坡变形的关键因素。为探究开挖工况下黄土、红黏土和复合土体的蠕变特性及长期强度, 依托天水市中梁镇某开挖边坡工程, 通过三轴卸荷蠕变试验, 研究了黄土、红黏土及界面试样在不同含水率(12%、18%和24%)和围压(100 kPa、200 kPa和300 kPa)条件下的卸荷蠕变特性。结果表明:(1)试样均呈现“衰减蠕变—稳态蠕变—加速蠕变”三阶段蠕变特征, 围压越大土体对卸荷越敏感, 含水率升高加剧了试样蠕变, 并使试样更易破坏; 相同卸荷条件下, 红黏土应变略低于黄土, 界面会增加蠕变应变; 界面试样临界卸荷量最低, 且试样更易沿界面破裂;(2)长期强度指标(c 、 φ)随围压增大而提高、随含水率升高而降低, 界面试样 φ 最小, 为12.54°;(3)界面试样的蠕变应变随着卸荷量的加剧而加速增加, 界面是抗剪薄弱环节。研究可为开挖工况下黄土-红黏土复合边坡稳定性防控提供试验依据。

关键词: 开挖; 卸荷蠕变试验; 复合边坡; 蠕变曲线; 长期强度; 边坡稳定性。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2026)02-398-09

收稿日期: 2026-01-22

Study on Creep Characteristics and Long-Term Strength of Soil in Loess-Red Clay Composite Slopes Under Excavation Conditions

Song Huan^{1,2}, Wang Xingang^{1,2*}, Teng Hongquan³, Ye Xuguang⁴, Liu Kai^{1,2}, Shi Wei³, Yang Jinshui^{1,2}

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China
2. Digital Twin and Major Facility Disaster Prevention and Control Key Laboratory of Higher Education in Shaanxi Province, Xi'an 710069, China
3. Shaanxi Hygrogeology Engineering Environment Geology Survey Center, Xi'an 710068, China
4. Water Diversion Engineering Design and Research Institute, Wuhan 430014, China

Abstract: In the Loess Plateau region, excavation-induced unloading is prone to triggering slope instability disasters, and the water sensitivity and creep characteristics of loess are key factors governing the deformation of excavated slopes. To investigate the

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2023YFC3008401)陕西省自然科学基金重点项目(No. 2024JC-ZDXM19).

作者简介: 宋欢(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事地质灾害机理与风险评估研究。ORCID:0009-0001-8456-035X. E-mail:202422082@stumail.nwu.edu.cn

* **通讯作者:** 王新刚, ORCID:0009-0009-9894-4571. E-mail:xgwang@nwu.edu.cn.

引用格式: 宋欢, 王新刚, 滕宏泉, 叶旭光, 刘凯, 石卫, 杨金水, 2026. 开挖工况下黄土-红黏土复合边坡土体蠕变特性及长期强度研究. 地球科学, 51(2):398-406.

Citation: Song Huan, Wang Xingang, Teng Hongquan, Ye Xuguang, Liu Kai, Shi Wei, Yang Jinshui, 2026. Study on Creep Characteristics and Long-Term Strength of Soil in Loess-Red Clay Composite Slopes Under Excavation Conditions. *Earth Science*, 51(2):398-406.

creep characteristics and long-term strength of loess, red clay, and composite soil under excavation conditions, this study relies on an excavated slope project in Zhongliang Town, Tianshui City. Through triaxial unloading creep tests, the unloading creep behaviors of loess, red clay, and interface specimens were studied under different moisture contents (12%, 18%, and 24%) and confining pressures (100 kPa, 200 kPa, and 300 kPa). The results show that: (1) All specimens exhibit three-stage creep characteristics, namely attenuated creep, steady-state creep, and accelerated creep. Higher confining pressure makes the soil more sensitive to unloading; an increase in moisture content exacerbates the creep of specimens and renders them more susceptible to failure. Under the same unloading conditions, the creep strain of red clay is slightly lower than that of loess, while the interface increases the creep strain. The interface specimens have the lowest critical unloading amount and are more likely to fracture along the interface. (2) The long-term strength parameters (cohesion c , internal friction angle φ) increase with the rise in confining pressure and decrease with the increase in moisture content. The φ value of the interface specimens is the smallest, reaching 12.54° . (3) The creep strain of the interface specimens increases acceleratively with the intensification of unloading amount, and the interface is a shear-weak zone. This study can provide experimental basis for the stability control and prevention of loess-red clay composite slopes under excavation conditions.

Key words: excavation; unloading creep test; composite slope; creep curve; long-term strength; slope stability.

0 引言

在黄土高原地区,随着基础设施建设的持续推进,开挖卸荷引发的边坡失稳灾害频发,成为了制约工程安全的突出问题(Peng *et al.*, 2019; 彭铭等, 2025). 已有研究表明,黄土的蠕变特性和水敏性是驱动边坡变形乃至失稳的关键因素(许强, 2012; 张茂省等, 2016; 王新刚等, 2024). 例如, 2011年发生在陕西西安的“9·17”灞桥滑坡, 由于长期人为开挖的影响与区域性强降雨的驱动, 最终导致边坡失稳, 造成32人死亡(庄建琦等, 2015). 值得注意的是, 黄土-红黏土这一地层组合在黄土高原地区广泛存在, 这种复合地层的滑坡约占黄土滑坡的55%(文宝萍等, 1997). 由于黄土与红黏土形成的沉积环境存在显著差异, 二者的物理力学特征也表现出明显的分异特征(李泽坤等, 2023), 这一特性使该类复合边坡的失稳机制更为复杂. 例如, 青海省乐都区的高家湾古滑坡在气候和人类工程扰动的作用下重新复活, 导致红黏土层内的隧道被毁, 造成约22.5亿元的经济损失, 威胁650名居民的安全(王玉峰等, 2025; Xie *et al.*, 2025). 因此, 在开挖工程背景下研究黄土-红黏土复合边坡土体蠕变特性及长期强度具有重要意义.

黄土具有蠕变特性, 在外部荷载持续的作用下, 其变形会随着时间不断地发展(陈琼等, 2020). 黄土的蠕变具有三阶段特征, 这种蠕变特性对边坡的影响显著, 会使坡体变形呈现出持续且缓慢的时间效应, 为边坡失稳埋下隐患(龙建辉等, 2010). 此外, 含水率的增加对黄土的长期强度有明显的弱化

效应(王新刚等, 2022). 然而相较于单一黄土边坡, 黄土高原广泛存在的黄土-红黏土复合边坡, 其蠕变特征研究依然不足(Zhu *et al.*, 2022). 红黏土因高粘粒含量($>15\%$)有较强抗变形能力, 但与黄土界面由于特殊的“二元结构”常形成薄弱带, 往往会演化为滑坡滑带(吴玮江等, 2014). 例如, 陈龙飞等(2017)提出黄土质地疏松, 裂隙发育, 遇水软化, 红黏土结构致密, 透水性差, 降雨入渗时, 在边坡结构面处容易形成饱和状态, 导致其力学性质急剧降低; 朱建东等(2019)发现在两种不同类型的降雨作用下, 黄土-红黏土复合边坡发生失稳时, 滑动均沿界面产生, 且滑动初期普遍呈现蠕变特征; 李媛等(2001)发现降雨可使黄土-红黏土界面强度衰减40%以上. 综上, 黄土-红黏土复合边坡也具有蠕变特性, 且相较于单一土体边坡易在界面处发生失稳破坏. 在开挖工况下, 学者们已针对黄土边坡的蠕变变形开展了一些研究, 例如, 张子东等(2018)认为, 在黄土高原地区开挖会显著改变边坡土体的受力状态, 导致水平向支撑力大幅减小, 使得坡体容易向临空方向发生牵引式蠕滑; 单帅等(2021)指出围压每降100 kPa, 黄土蠕变应变增加1.5~2.0倍, 但复合土体卸荷时的界面弱化机理仍不明确.

前人们对于黄土的蠕变特性以及黄土-红黏土复合边坡的失稳模式开展了大量的研究, 但存在两方面局限, 一是多因素(含水率、围压)耦合作用下室内试验结果与实际工程开挖工况的关联机制不明; 二是土体的长期强度弱化机理缺失. 鉴于此, 本文以天水市中梁镇某开挖边坡工程作为研究对

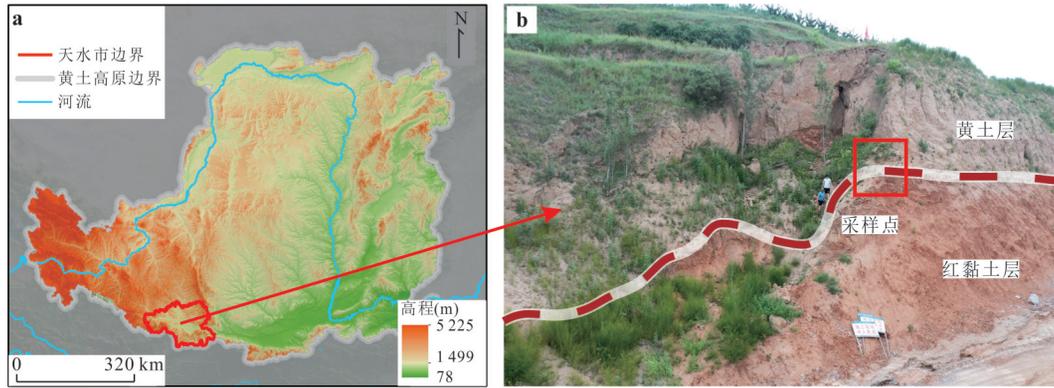


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

a. 研究区位置; b. 采样现场

象,开展了野外调研和室内试验,通过一系列三轴卸荷蠕变试验探究黄土、红黏土及界面试样的强度和变形特性,分析了黄土、红黏土和界面试样的蠕变变形规律、试样宏观变形特征,探究了不同试样的长期强度特性,在此基础上揭示了黄土—红黏土复合坡体的变形机理,以期为黄土—红黏土复合边坡稳定性防控提供依据。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省天水市秦州区中梁镇,地处黄土高原与西秦岭过渡带(图1),属温带半湿润—半干旱气候,年均降水量432.8~546.9 mm,地形以黄土丘陵和河谷阶地为主,海拔1460~1657 m,地层分布有第四系黄土和下伏新近系红黏土,形成“黄土—红黏土”复合边坡,藉河与罗峪沟贯穿其间,工程区因高填深挖形成大面积复合边坡。

2 试验方案

为深入探究开挖工况下黄土—红黏土复合边坡土体的蠕变行为,本文基于已有研究(吴玮江等,2014),开展了三轴卸荷蠕变试验。

试验土样取自天水市中梁镇某黄土—红黏土复合边坡,包括黄土与红黏土。土样基本物理性质如表1所示。其中,黄土中粒径在0.250~0.075 mm之间的沙砾含量为3.6%,粒径在0.005~0.075 mm之间的粉粒含量为84.1%,粒径在0.005 mm之下的粘粒含量为12.3%;红黏土中粒径在0.250~0.075 mm之间的沙砾含量为1.6%,粒径在0.005~0.075 mm之间的粉粒含量为83.2%,粒径在0.005 mm之

表1 试验土样的基本物理性质

Table 1 The basic physical properties of the test soilsamples

试样类型	天然密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	干密度 (g/cm ³)	土粒相对密度	孔隙比
黄土	1.631	12.11	1.455	2.68	0.976
红黏土	1.656	11.75	1.482	2.73	0.982

下的粘粒含量为15.2%。二者的颗粒级配曲线如图2所示。

考虑到研究区土体含水率平均范围,本试验将黄土和红黏土试样的含水率设置为12%、18%和24%三个梯度。为探究黄土—红黏土复合边坡土体界面在开挖过程中的变形规律,同步设置了界面试样。所有试样均为重塑样,采用分层压制法制备,尺寸统一为 $\Phi 61.8 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ 。针对研究区黄土与红黏土呈30°角不整合接触的地质特征,界面在制备过程也同步将二者的接触夹角设置为30°,以最大程度还原真实工况。试验设备选用FSR-60型非饱和土三轴蠕变仪,具体方案如表2所示。试验采用分级卸荷方式,其中轴压保持恒定,围压按等级逐级减小(100 kPa试样每级卸荷12.5 kPa,200 kPa试样每级卸荷25 kPa,300 kPa试样每级卸荷37.5 kPa)。

3 试验结果与分析

3.1 卸荷蠕变应变—时间关系曲线

根据 Boltzmann 叠加原理(Xiao *et al.*, 2021),绘制了各类试样在不同卸荷状态下的卸荷蠕变应变—时间关系曲线(图3至图5),可得到以下结果:

(1)同一类型试样的蠕变应变随卸荷量的增大呈逐步递增趋势,当卸荷量超过该试样的临界卸

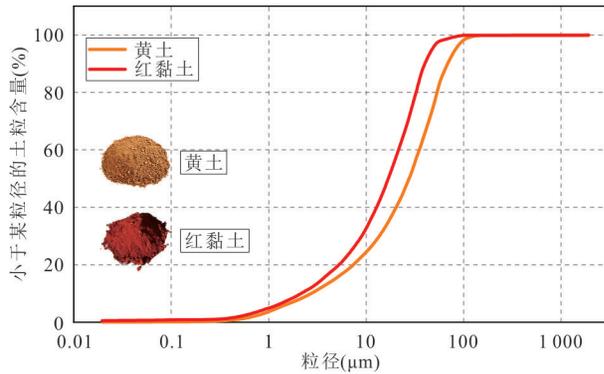


图2 黄土和红黏土的颗粒级配曲线

Fig.2 Particle size distribution curves of loess and red clay

表2 三轴卸荷蠕变试验方案

Table 2 Unloading Creep Test Scheme

试样类型	含水率(%)	围压(kPa)	卸荷量(kPa/级)
黄土试样	12/18/24	100	12.5
		200	25.0
		300	37.5
红黏土试样	12/18/24	100	12.5
		200	25.0
		300	37.5
界面试样	18	100	12.5
		200	25.0
		300	37.5

荷值时,土体结构无法维持稳定,随即发生破坏.以初始围压300 kPa、含水率18%的试验条件为例,黄土试样(图3f)、红黏土试样(图3f)与界面试样(图5f)的蠕变特征分析可验证这一规律:在相同时间维度下,三类试样每完成一级卸荷后产生的蠕变应变,均大于上一级卸荷对应的应变值,体现出卸荷量与应变量的正相关关系.从破坏临界值来看,当卸荷量达到225 kPa时,黄土试样(图3f)与界面试样(图5c)的结构率先失稳并发生破坏;而红黏土试样(图4f)因粘粒含量较高、颗粒间联结更强,抗卸荷能力更优,直至卸荷量达到300 kPa时才发生破坏,反映出不同类型土体在抗卸荷破坏能力上的差异.

(2)试样在卸荷过程中呈现出明显的“衰减蠕变—稳态蠕变—加速蠕变”三阶段特征.卸荷初期为衰减蠕变阶段,应变随时间快速增长,但速率急剧降低.随着卸荷过程的持续,试样进入稳态蠕变阶段,此阶段应变随时间近似线性增长,速率稳定,土体结构进入相对稳定的调整状态.当卸荷超过临界值后,进入加速蠕变阶段,应变速率不断增加,试样短时间内破坏.例如,在初始围压100 kPa,含水

率为18%的条件下,红黏土试样(图4d)的蠕变过程呈现出典型的三阶段特征:a.衰减蠕变阶段:当卸荷量较小时,试样应变随时间快速增长,但蠕变速率呈现显著递减趋势.该现象的原因是,卸荷作用打破了土体原有的应力平衡,颗粒在应力调整过程中快速重新排列,孔隙结构随之发生重组,土体内部逐渐向新的应力状态过渡,因此应变增长速度不断放缓;b.稳态蠕变阶段:随着颗粒排列与孔隙结构的调整趋于稳定,试样进入应变匀速发展的稳态阶段.例如卸荷75 kPa时,试样蠕变速率在7.13~24.00 h维持在稳定水平,表明土体内部结构已进入相对平衡状态;c.加速蠕变阶段:蠕变速率急剧攀升,进入加速蠕变阶段.例如卸荷87.5 kPa时,试样在9.94~9.96 h应变骤增,直至破坏.这一阶段持续时间极短,由于前期蠕变累积已超出土体结构的承载临界值,内部微裂隙快速贯通形成宏观剪切面,最终导致试样在短时间内发生破坏.

(3)当初初始围压与卸荷量保持一致时,试样的蠕变应变量随含水率的升高呈递增趋势.以黄土试样为例:在初始围压100 kPa、卸荷量75 kPa的条件下(图3a,3d,3g),含水率高的试样,其蠕变应变量始终大于低的试样,这直观地体现出含水率会加剧土体的蠕变变形.

(4)试验条件相同时,不同土体类型发生蠕变破坏的临界卸荷量差异明显.例如,在初始围压200 kPa,含水率为18%的条件下,黄土试样(图3e)卸荷175 kPa即发生破坏,而红黏土试样(图4e)卸荷200 kPa仍然处于稳态蠕变阶段,而界面试样(图5b)仅卸荷150 kPa即发生破坏,体现出界面的显著弱化效应.

3.2 试样的长期强度

长期强度指土体在长期荷载作用下不发生破坏的最大临界应力值,是衡量土体长期稳定性的关键指标(戚志宇等,2023).等时曲线法是确定长期强度的常用方法,其确定方法为:选取蠕变曲线中0.083 h、0.5 h、4 h、10 h及24 h时刻对应的应变值为x坐标,以各时刻对应的应力值作为y坐标,在同一坐标系中绘制应力—应变等时曲线,统计该曲线上拐点对应的应力值,即为试样的长期强度(陈宗基,1982),各类试样的长期强度如图6所示.在此基础上,以其初始围压和已求得的长期强度为基准绘制应力莫尔圆,可进一步确定该试样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,这两项指标共同构成了土体的长期强度

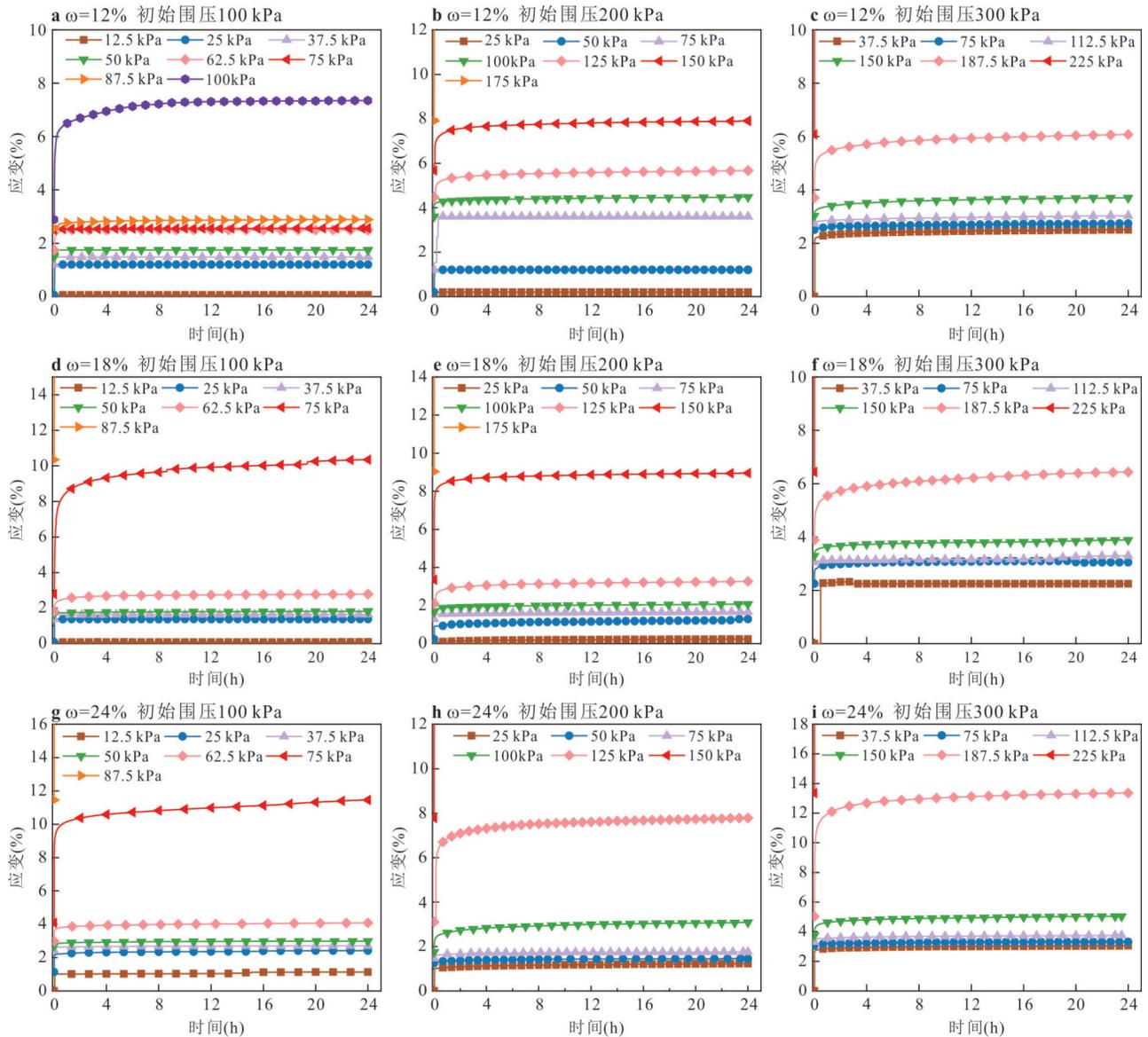


图3 黄土试样的卸荷蠕变应变—时间关系曲线

Fig 3 Unloading creep strain-time curves of loess samples

指标(郑颖人等,2006),各类试样的长期强度指标如图7所示.分析表明, c 和 φ 的变化与含水率、试样类型密切相关,直接反映了土体内部结构的稳定性.

所有试样的长期强度指标随着含水率的增大而减小,因此含水率对长期强度指标的影响表现为显著的弱化效应,例如:对于红黏土试样,12%含水率时, $c=18.2$ kPa、 $\varphi=22.1^\circ$,24%含水率时, $c=12.5$ kPa、 $\varphi=16.8^\circ$.这一现象源于高含水率下土体颗粒之间的强结合水向自由水转化,水膜增厚不仅削弱了颗粒间的黏结作用,降低土体的黏聚力 c ,还增加了润滑效应,减小了颗粒咬合摩擦,使内摩擦角 φ 降低(吴俊杰等,2004).

试样类型对长期强度指标的影响呈现明显差

异.18%含水率条件下,黄土试样的 $c=9.03$ kPa,为所有试样中最小值;红黏土试样 $c=15.68$ kPa,高于黄土,因其粘粒含量更高,颗粒间电化作用力更强.此外,界面试样的 $\varphi=12.54^\circ$,仅为黄土的68.5%,虽 $c=20.45$ kPa高于黄土,但界面处结构的不连续改变了界面处颗粒原有的结合状态,令颗粒间咬合作用急剧弱化,使得黄土—红黏土界面成为抗剪薄弱结构面.

3.3 界面对试样蠕变的影响

通过上述分析,可见黄土—红黏土界面试样的物理力学性质与单一土体试样存在显著差异,具有特殊的蠕变变形规律.本节基于18%含水率下不同初始围压(100 kPa、200 kPa、300 kPa)的三轴卸荷

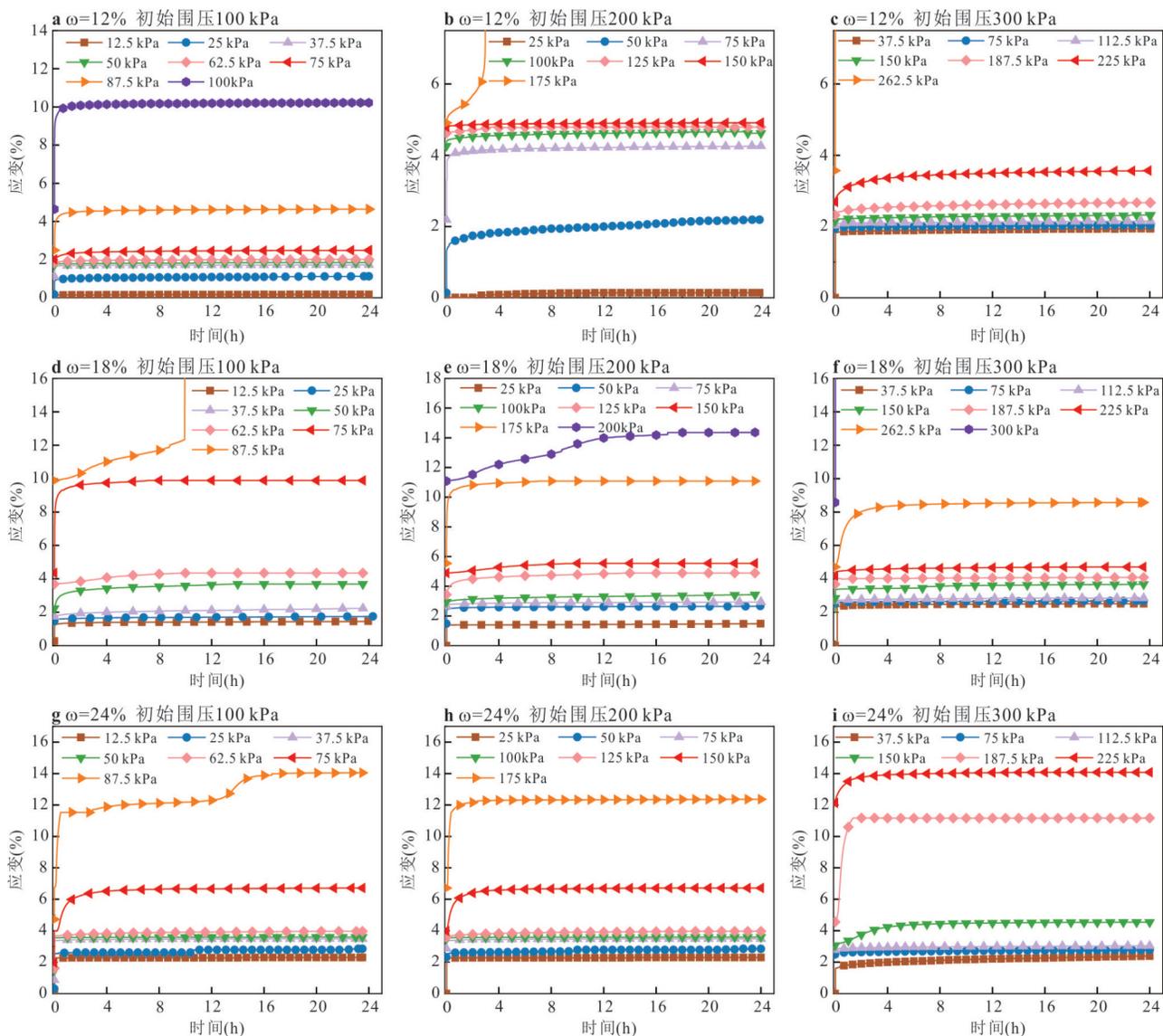


图 4 红黏土试样的卸荷蠕变应变-时间关系曲线

Fig 4 Unloading creep strain-time curves of red clay samples

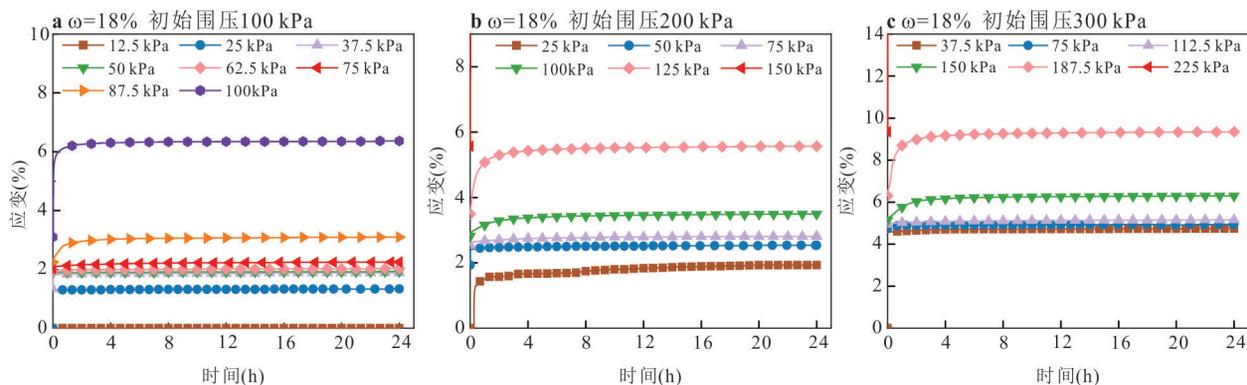


图 5 18% 含水率下界面试样的卸荷蠕变应变-时间关系曲线

Fig 5 Unloading creep strain-time curves of bounded interface samples under 18% moisture content

蠕变试验结果,结合界面试样与黄土、红黏土试样 的对比分析,系统探究界面对蠕变应变、临界卸荷

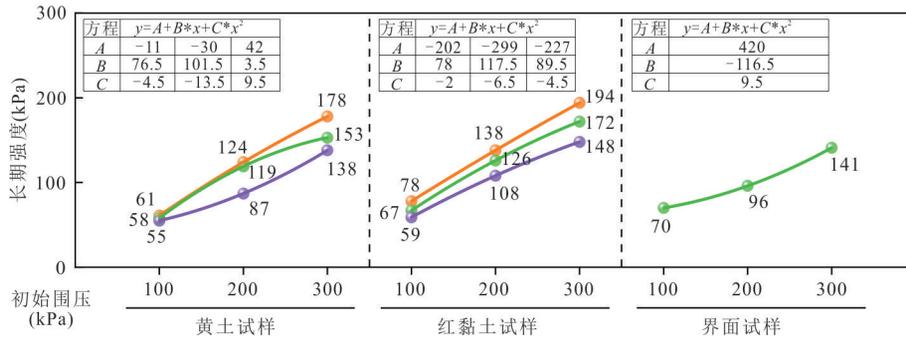


图 6 各类试样的长期强度

Fig. 6 Long-term strength of various samples

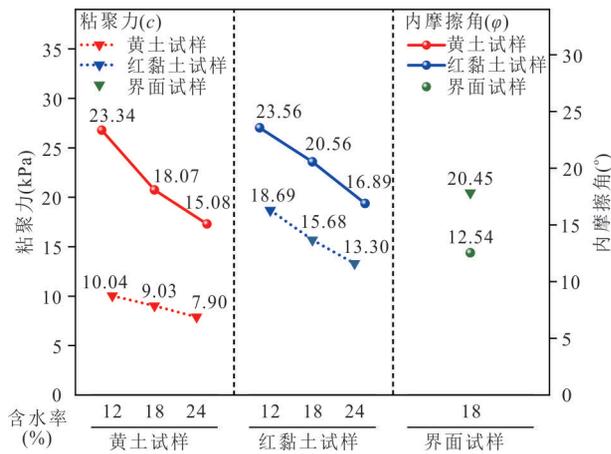


图 7 各类试样的长期强度指标

Fig. 7 Long-term strength indices of various samples

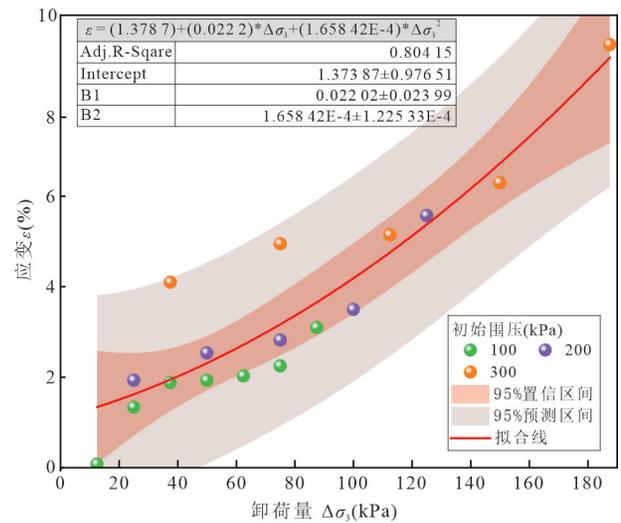


图 8 界面试样的卸荷量—应变最佳拟合曲线

Fig. 8 Unloading amount-strain curve of the interface specimen

量及蠕变发展模式的影响机制。

3.3.1 界面对蠕变应变的影响 为量化界面对蠕变变形的影响规律,基于不同围压下界面试样的卸荷量与试样达到稳定状态的蠕变应变数据,通过对比多种拟合模型,发现二次多项式模型可以最好地表征界面试样的应变—卸荷量关系,可用式(1)表示,其最佳拟合曲线如图8所示。从拟合曲线的趋势可见,界面试样的蠕变应变与卸荷量呈非线性正相关,且随着卸荷量的加剧,曲线斜率不断增加,表明蠕变应变呈加速上涨趋势。

$$\epsilon = 1.37387 + 0.02202\Delta\sigma_3 + (1.65842 \times 10^{-4})\Delta\sigma_3^2 \quad (1)$$

3.3.2 界面对试样破坏的影响 通过对比各类试样的宏观破坏形貌(图9),可发现界面试样的破坏模式与单一土体存在本质差异:黄土和红黏土试样多表现为整体或部分的剪切破坏,破坏面随机分布;而界面试样的破坏则沿着黄土—红黏土的接触面发生滑动破坏,且破坏面平整,与预设的30°接触夹角一致,证实界面是复合土体的抗剪薄弱环节。

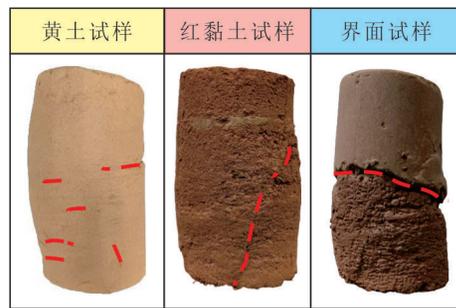


图 9 各类试样的宏观破坏

Fig. 9 Macroscopic failure of various specimens

4 结论

通过对天水市某黄土—红黏土复合边坡土体开展的一系列三轴卸荷蠕变试验的结果分析,得出以下结论:

- (1) 试样在卸荷蠕变过程呈现“衰减蠕变—稳态蠕变—加速蠕变”三阶段特征;卸荷初期应变快

速增长但速率递减,随后进入应变稳定增长阶段,当卸荷量超过临界值后,应变速率不断增大并发生破坏.围压和含水率对蠕变变形影响显著:初始围压越大,相同卸荷条件下蠕变变形更明显;含水率升高会加剧蠕变变形.不同类型试样蠕变差异明显,红黏土因粘粒含量高、颗粒联结强,同条件下蠕变应变略低于黄土;界面试样临界卸荷量最低,界面颗粒咬合作用弱,易形成变形集中带,弱化效应突出.

(2)长期强度指标(黏聚力 c 、内摩擦角 φ)与围压、含水率及试样类型密切相关:随围压增大,指标显著提高;随含水率升高,指标呈弱化趋势,这是由于高含水率削弱了颗粒间黏结与摩擦作用.此外,红黏土的 c 值高于黄土,因其粘粒含量高、颗粒间电化学作用力强;界面试样的 φ 最小,虽 c 值较高,但界面结构不连续导致颗粒咬合作用弱化,使得黄土-红黏土界面成为抗剪薄弱结构面.

(3)界面试样的蠕变应变可用二次多项式模型量化表示,试样的蠕变应变与卸荷量呈正相关关系,且随着卸荷量的加剧,蠕变应变加速增加.

References

- Chen, L. F., Liu, G., Tian, H., et al., 2017. Reliability Analysis on Loess-Red Mudstone Interface Landslide Stability. *Geological Science and Technology Information*, 36(2): 244—248(in Chinese with English abstract).
- Chen, Q., Cui, D. S., Wang, Q. W., et al., 2020. An Experimental Study of Creep Characteristics of Sliding Zone Soil of Huangtupo Landslide Under Different Consolidation Stresses. *Rock and Soil Mechanics*, 41(5): 1635—1642(in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. J., 1982. The Mechanical Problems for the Long-Term Stability of Underground Galleries. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1(1): 1—20(in Chinese with English abstract).
- Li, Z. K., Ma, P. H., Peng, J. B., et al., 2023. The Permeability Characteristics of Loess and Red Clay Interface in Heifangtai Area. *Journal of Engineering Geology*, 31(5): 1516—1527(in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Wu, Q., 2001. Study on the Failure Mechanism of the Loess-Red Stratum Contact Surface Landslide in Mengjiashan. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 28(1): 52—54(in Chinese with English abstract).
- Long, J. H., Guo, W. B., Li, P., et al., 2010. Creep Property of Soil in the Sliding Zone of Loess Landslides. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 32(7): 1023—1028(in Chinese with English abstract).
- Peng, J. B., Fan, Z. J., Wu, D., et al., 2019. Landslides Triggered by Excavation in the Loess Plateau of China: a Case Study of Middle Pleistocene Loess Slopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 171: 246—258. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.11.014>
- Peng, M., Wang, Y., Ma, C. Y., et al., 2025. Review of Risk Assessment and Prevention for Valley Landslide Disaster Chains. *Earth Science*, 50(10): 3723(in Chinese with English abstract).
- Qi, Z. Y., Li, Z. Q., 2023. Review on Creep Properties of Loess. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 45(3): 485—510(in Chinese with English abstract).
- Shan, S., Xie, W. L., Zhu, R. S., et al., 2021. Creep Characteristics of Compacted Loess in Yan'an New District under Loading and Unloading Conditions. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 35(7): 144—155. (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. F., Cheng Q. G., Lin Q. W., et al., 2025. Research on Rock Avalanches in Tibetan Plateau: From Field Observations to Dynamic Mechanisms. *Earth Science*, 50(10): 4071—4095. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.207>
- Wang, X. G., Liu, K., Lian, B. Q., et al., 2022. An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 49(5): 137—143(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. G., Liu, K., Lian, B. Q., et al., 2024. Study on the Unloading Creep Characteristics of Loess and the Mechanism of Typical Excavated Loess Landslide. *Journal of Engineering Geology*, 32(2): 513—521(in Chinese with English abstract).
- Wen, B. P., 1997. Study on Prediction and Forecast of Typical Landslides and Disaster Mitigation Measures in Loess Areas. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wu, J. J., Wang, C. H., Li, G. X., 2004. Influence of Matric Suction in Unsaturated Soils on Slope Stability. *Rock and Soil Mechanics*, 25(5): 732—736+744(in Chinese with English abstract).
- Wu, W. J., Su, X., Liu, W., et al., 2014. Loess-Mudstone Interface Landslides: Characteristics and Causes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36(5): 1167—1175(in Chinese with English abstract).
- Xiao, B., Hu, M. Y., Zhou, P. J., et al., 2021. Creep Behavior of Saturated Clay in Triaxial Test and a Hyperbolic Model. *Geofluids*, 2021(1): 7882046. <https://doi.org/10.1155/2021/7882046>
- Xie, Q. Y., Huang, Q. B., Zhao, J. Y., et al., 2025. Key

- Factors in the Reactivation of Thick Loess Mudstone Ancient Landslides: A Case Study of the Gaojiawan Landslide, China. *Environmental Earth Sciences*, 84(6): 169. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12161-z>
- Xu, Q., 2012. Theoretical Studies on Prediction of Landslides Using Slope Deformation Process Data. *Journal of Engineering Geology*, 20(2): 145–151(in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. S., Hu, W., Sun, P. P., et al., 2016. Advances and Prospects of Water Sensitivity of Loess and the Induced Loess Landslides. *Journal of Earth Environment*, 7(4): 323–334(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. D., Pei, X. J., Zhang, X. C., et al., 2018. Study on Mechanical Response and Failure Mechanism of Excavation Unloading in Loess Slope. *Journal of Engineering Geology*, 26(3): 684–693(in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. R., Zhao, S. Y., Deng, C. J., et al., 2006. Development of Finite Element Limit Analysis Method and its Applications in Geotechnical Engineering. *Engineering Science*, 8(12): 39–61+112(in Chinese with English abstract).
- Zhu, J. D., Yan, H., Li, S. H., et al., 2019. Laboratory Model Experiment of Landslides Along Loess-Mudstone Interface Induced by Rainfall Patterns. *Journal of Engineering Geology*, 27(3): 623–631(in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. B., Miao, S. S., Li, H. F., et al., 2022. An Empirical Shear Model of Interface between the Loess and Hipparion Red Clay in a Loess Landslide. *Frontiers in Earth Science*, 9: 806832. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.806832>
- Zhuang, J. Q., Peng, J. B., Li, T. L., et al., 2015. Triggered Factors and Motion Simulation of “9·17” Baqiao Catastrophic Landslide. *Journal of Engineering Geology*, 23(4): 747–754(in Chinese with English abstract).
- 工程学报, 1(1): 1–20.
- 单帅, 谢婉丽, 朱荣森, 等, 2021. 加卸荷条件下延安新区压实黄土蠕变特性研究. *干旱区资源与环境*, 35(7): 144–155.
- 李媛, 吴奇, 2001. 孟家山黄土—红层接触面滑坡破坏机理研究. *水文地质工程地质*, 28(1): 52–54.
- 李泽坤, 马鹏辉, 彭建兵, 等, 2023. 黑方台区域黄土红黏土界面渗透特性研究. *工程地质学报*, 31(5): 1516–1527.
- 龙建辉, 郭文斌, 李萍, 等, 2010. 黄土滑坡滑带土的蠕变特性. *岩土工程学报*, 32(7): 1023–1028.
- 彭铭, 王悦, 马晨议, 等, 2025. 河谷滑坡灾害链风险评估及防控研究进展. *地球科学*, 50(10): 3723–3760.
- 戚志宇, 李志清, 2023. 黄土蠕变特性研究进展. *地球科学与环境学报*, 45(3): 485–510.
- 王新刚, 刘凯, 连宝琴, 等, 2024. 黄土卸荷蠕变特性与典型开挖型黄土滑坡机理研究. *工程地质学报*, 32(2): 513–521.
- 王新刚, 刘凯, 王友林, 等, 2022. 典型黄土滑坡滑带土不同含水量下蠕变特性试验研究. *水文工程地质*, 49(5): 137–143.
- 王玉峰, 程谦恭, 林棋文, 等., 2025. 青藏高原高速远程滑坡研究: 从地质现象到动力学机理. *地球科学*, 50(10): 4071–4095.
- 文宝萍, 1997. 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究. 北京: 地质出版社.
- 吴俊杰, 王成华, 李广信, 2004. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响. *岩土力学*, 25(5): 732–736+744.
- 吴玮江, 宿星, 刘伟, 等, 2014. 黄土—泥岩接触面滑坡的特征与成因. *冰川冻土*, 36(5): 1167–1175.
- 许强, 2012. 滑坡的变形破坏行为与内在机理. *工程地质学报*, 20(2): 145–151.
- 张茂省, 胡炜, 孙萍萍, 等, 2016. 黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望. *地球环境学报*, 7(4): 323–334.
- 张子东, 裴向军, 张晓超, 等, 2018. 黄土边坡开挖卸荷力学响应与破坏机理研究. *工程地质学报*, 26(3): 684–693.
- 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等, 2006. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用. *中国工程科学*, 8(12): 39–61+112.
- 朱建东, 鄢好, 李绍红, 等, 2019. 黄土—泥岩接触面滑坡的两种雨型模型试验. *工程地质学报*, 27(3): 623–631.
- 庄建琦, 彭建兵, 李同录, 等, 2015. “9·17”灞桥灾难性黄土滑坡形成因素与运动模拟. *工程地质学报*, 23(4): 747–754.

中文参考文献

- 陈龙飞, 刘高, 田华, 等, 2017. 黄土—红层接触面滑坡稳定性可靠性分析. *地质科技情报*, 36(2): 244–248.
- 陈琼, 崔德山, 王菁莪, 等, 2020. 不同固结状态下黄土坡滑坡滑带土的蠕变试验研究. *岩土力学*, 41(5): 1635–1642.
- 陈宗基, 1982. 地下巷道长期稳定性的力学问题. *岩石力学与*