

## 黄土三趾马红土滑坡滑带土的长期强度影响因素研究

祝艳波, 刘振谦, 李文杰, 苗帅升, 李红飞, 兰恒星

### Experimental investigation of influencing factors on the long-term strength of sliding zones of the Loess-Hipparion laterite landslide

ZHU Yanbo, LIU Zhenqian, LI Wenjie, MIAO Shuaisheng, LI Hongfei, and LAN Hengxing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104012>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 临夏盆地巴谢河流域晚更新世以来滑坡发育历史重建

Reconstruction of the landslide history since late Pleistocene of the Baxie River Catchment in Linxia Basin

侯圣山, 李昂, 陈亮, 王立朝, 刘艺璇, 朱玉晶, 王惠生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 26-33

#### 人工制备结构性软黏土长期变形特性试验研究

An experimental study of the long-term deformation characteristics of artificial structured soft clay

杨爱武, 郑宇轩, 肖敏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 133-133

#### 基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究

An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique

何攀, 许强, 刘佳良, 蒲川豪, 陈达, 赵宽耀 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 142-149

#### 冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115

#### 基于等速线模型的一维黄土动荷载响应分析

Dynamic load response analysis of 1-D loess based on the equal speed line model

王文丽, 王兰民 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 113-119

#### 东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104012

祝艳波, 刘振谦, 李文杰, 等. 黄土-三趾马红土滑坡滑带土的长期强度影响因素研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 148-156.

ZHU Yanbo, LIU Zhenqian, LI Wenjie, *et al.* Experimental investigation of influencing factors on the long-term strength of sliding zones of the Loess-Hipparion laterite landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 148-156.

## 黄土-三趾马红土滑坡滑带土的 长期强度影响因素研究

祝艳波, 刘振谦, 李文杰, 苗帅升, 李红飞, 兰恒星  
(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 西北地区三趾马红土广泛分布, 其蠕变特性强、变形后强度衰减明显, 为典型的易滑地层。以往研究较少关注三趾马红土的长期强度衰减规律, 为探讨三趾马红土强度时间效应, 文章开展三趾马红土蠕变试验研究, 获取其蠕变全过程曲线; 利用等时曲线法求取其长期强度, 并分析影响因素对长期强度影响的敏感性。结果表明: 三趾马红土蠕变特性强, 蠕变特性受初始条件影响显著, 试样干密度越小、含水率越高、围压越小, 其蠕变变形量越大; 三趾马红土蠕变变形后强度衰减明显, 强度损失率为 6.67%~34.58%, 干密度越小、含水率越高、围压越小其长期强度越低; 三趾马红土长期强度衰减随影响因素变化敏感性不同, 随含水率变化最为敏感, 随围压变化敏感性次之, 随干密度变化敏感性最低; 三趾马红土强度损失率变化则呈现不同规律, 干密度越小、含水率越高、围压越低, 其强度损失率越大, 且其变化幅度随围压变化最为敏感, 随含水率变化次之, 随干密度变化敏感性最低。

**关键词:** 三趾马红土; 蠕变曲线; 长期强度; 滑坡; 黄土

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0148-09

## Experimental investigation of influencing factors on the long-term strength of sliding zones of the Loess-Hipparion laterite landslide

ZHU Yanbo, LIU Zhenqian, LI Wenjie, MIAO Shuaisheng, LI Hongfei, LAN Hengxing  
(College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** The Hipparion laterite with strong creep characteristics and obvious strength attenuation after deformation is widely distributed in northwest China. However, previous studies have paid little attention to the long-term strength attenuation of the Hipparion laterite. In order to investigate the time effect of strength of the Hipparion laterite, the creep test of samples under different influence factors is carried out. The long-term strength is calculated by using the isochronal curve method based on the creep curves, and the sensitivity of influencing factors to the long-term strength is analyzed. The results indicate that the Hipparion laterite has strong creep characteristics, which are affected by the density, moisture content of samples and confining pressure. The smaller the dry density, the higher the moisture content of the samples, and the smaller the confining pressure, the greater the deformation of the sample in the creep process. After creep deformation, the strength of the Hipparion laterite decreases obviously with a strength loss rate of 6.67%–34.58%, which varies with the influence factors. The

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-06-08

投稿网址: [www.swdzgdz.com](http://www.swdzgdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41877247); 国家自然科学基金重大项目(41790443)

第一作者: 祝艳波(1985-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土力学方面科研与教学工作。E-mail: [zhuyanbo@chd.edu.cn](mailto:zhuyanbo@chd.edu.cn)

sensitivity of the long-term strength attenuation of the Hipparion laterite is different with the change of the influencing factors. The long-term strength is the most sensitive to the change of water content, followed by the change of confining pressure, and is the lowest with the change of dry density. The change of the strength loss rate of the Hipparion laterite presents different rules. The smaller the dry density is, the higher the water content is, and the lower the confining pressure is, the greater the strength loss rate is. The change range of the long-term strength loss rate is the most sensitive to the change of confining pressure, followed by the change of water content, and the long-term strength loss rate is the lowest with the change of dry density.

**Keywords:** Hipparion laterite; creep curve; long-term strength; landslide; loess

黄土地区大中型滑坡大部分沿黄土-三趾马红土接触层面产生<sup>[1]</sup>, 此类滑坡称为黄土与三趾马红土(基岩)复合滑坡<sup>[2]</sup>, 约占黄土滑坡的 55%<sup>[3]</sup>。三趾马红土往往成为此类滑坡频繁发生与复活的基本控制因素<sup>[4-5]</sup>。三趾马红土黏粒含量高, 蠕变性强<sup>[6]</sup>, 蠕变后强度随时间不断衰减, 常演化为黄土滑坡滑带。因此研究三趾马红土蠕变变形后的长期强度, 对于揭示此类滑坡形成演化机制具有重要意义。

滑坡滑带土长期强度是滑坡稳定性分析计算的重要指标参数<sup>[7-8]</sup>。基于滑带土蠕变试验曲线, 可用蠕变速率-应力关系法、等时曲线法<sup>[9]</sup>求取长期强度。通过对比可知土体长期强度较瞬时强度降低很多<sup>[10-12]</sup>。影响岩土体长期强度的因素很多<sup>[13]</sup>, 如含水量<sup>[14]</sup>、密实度<sup>[15]</sup>、试验条件<sup>[16]</sup>。其中水是一个重要因素, 如龙建辉等<sup>[17]</sup>定量研究了水对岩土体长期强度指标的影响, 结果均表明含水量增加影响岩土体蠕变过程, 使初始蠕变值和稳态蠕变值增大, 进而降低岩土体长期强度<sup>[18]</sup>, 尤其是滑坡滑带土<sup>[19]</sup>。土体密实度对土体长期强度也具有显著影响<sup>[20]</sup>, 表现为土样长期强度随密实度增大而增大<sup>[21]</sup>。Vasconcellos 等<sup>[22]</sup>对吹填土的蠕变特性进行研究, 发现吹填土对时间的敏感性显著。辛鹏等<sup>[23]</sup>开展了围压对滑坡滑带土长期强度影响研究, 表明低围压使土体蠕变进程加速, 降低土体长期强度<sup>[24]</sup>。卢连长等<sup>[25]</sup>通过对多种类土在反复冻融作用下的试验研究, 发现高岭土的密度随冻融次数增加而下降, 长期强度先缓慢增加而后显著降低。杨爱武等<sup>[26]</sup>研究结构性对黏土长期变形特性的影响, 发现在相同偏应力作用下, 土体结构性越强, 各时刻的蠕变变形量也越小。Li 等<sup>[27]</sup>针对南方红黏土开展了蠕变试验, 表明红黏土的蠕变随基质吸力的增大而减小。Lon 等<sup>[28]</sup>研究了压实红黏土的蠕变特性, 发现压实红黏土具有蠕变衰减特性, 其应力应变等时曲线表现出明显的非线性特征, 而在排水条件下, 应力应变等时曲线呈现线性关系。

综上所述, 以往学者针对各类土蠕变行为开展了大量研究, 并讨论了长期强度的影响因素, 但关于三趾马红土长期强度的研究不多<sup>[29]</sup>, 尤其是三趾马红土因赋存环境及外界条件差异导致其上覆压力、密实状态有差异、含水状态多变, 而针对其长期强度影响因素研究更是鲜见。因此本文以典型黄土-三趾马红土复合型滑坡的三趾马红土滑带为研究对象, 开展蠕变特性试验研究, 求取长期强度, 分析长期强度影响因素。研究成果可为此类滑坡启动机制及稳定性分析提供试验参考, 具有一定的实用价值。

## 1 试验土料与试验方案

试验土料取自陕西西安白鹿原陈家坡滑坡滑带, 为新近系三趾马红土(N<sub>2</sub>) (图 1), 呈砖红色, 其物性指标如表 1 所示。土样风干碾碎, 过 2 mm 筛后称取一定质量的干土, 添加蒸馏水, 闷料 24 h 后利用制样器分五层压实, 制备成直径 39.1 mm、高度 80 mm 的重塑样, 以备试验。

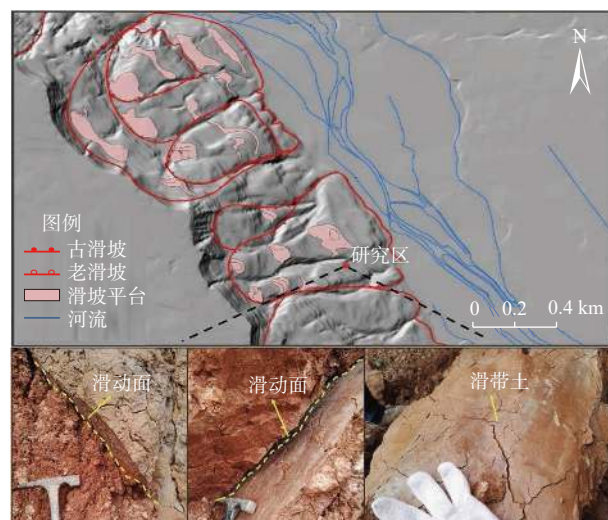


图 1 研究区及试验土料 (据文献 [30] 修改)  
Fig. 1 The study area and the test soil (modified from Ref. [30])

表 1 基本物理性质参数

Table 1 Basic physical property indexes

土样	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
三趾马红土	2.73	58.68	28.72	29.96	2.32

为探讨三趾马红土长期强度影响因素,利用FSR-20型三轴流变仪开展不同干密度、不同含水率以及不同围压下三趾马红土蠕变试验,基于蠕变曲线获取

其长期强度,分析了干密度、含水率、围压对三趾马红土强度衰减影响规律,详细试样方案如表2所示。蠕变试验采用分级加载方法,加载之前确定试样剪切强度 $q_f$ ,确定分级加载标准,每个试样均分5~6级加载,试样在每一级荷载 $q$ 作用下蠕变变形稳定标准为连续24h的轴向位移变形小于0.01mm,即可施加下一级荷载,直到土样蠕变破坏。

表 2 蠕变试验加载方案

Table 2 Loading schemes for the creeping test

试样编号	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	围压/kPa	剪切强度 $q_f$ /kPa	荷载 $q$ /kPa
1	1.5	20	100	587	125.00, 250.00, 375.00, 500.00, 625.00, 750.00
2	1.6	20	100	680	156.00, 312.00, 468.00, 624.00, 780.00
3	1.7	20	100	1 121	218.75, 437.50, 656.25, 875.00, 1 091.25
4	1.8	20	100	1 229	218.75, 437.50, 656.25, 875.00, 1 093.75, 1 312.50
5	1.8	15	100	2 260	500.00, 1 000.00, 1 500.00, 2 000.00, 2 500.00, 3 000.00
6	1.8	18	100	1 620	375.00, 750.00, 1 125.00, 1 500.00, 1 875.00, 2 250.00
7	1.8	20	100	1 229	218.75, 437.50, 656.25, 875.00, 1 093.75, 1 312.50
8	1.8	23	100	600	125.00, 250.00, 375.00, 500.00, 625.00, 750.00
9	1.8	20	100	1 229	218.75, 437.50, 656.25, 875.00, 1 093.75, 1 312.50
10	1.8	20	200	1 380	250.00, 500.00, 750.00, 1 000.00, 1 250.00, 1 500.00
11	1.8	20	300	1 500	281.25, 562.50, 843.75, 1 125.00, 1 406.25, 1 687.50

## 2 试验结果与分析

### 2.1 三趾马红土强度特性

完成不同干密度、含水率、围压下试样的强度试验,获取其应力应变曲线,如图2—4所示。干密度对三趾马红土强度特性影响显著,密度较低时试样应力应变曲线呈现硬化型,应力随应变快速增大并趋于稳定(图2)。由图2(a)可见,密度较大时试样应力应变曲线呈现软化型,密度越高应力降越明显;且干密度越大,应力应变曲线起始段斜率越高,表明试样变形模量越大,试样越不易变形。由图2(b)可知,试样相同应变下土样干密度越大,剪切过程中应力值越大,土样峰值强度也越大,表明三趾马红土峰值强度随密度增大提高明显。

图3为含水率对三趾马红土强度特性的影响。由图3(a)可见,不同含水率下试样应力应变曲线类型均为应变软化型,含水率越低应力降越明显,低含水率下试样脆性剪断特征明显,高含水率下应力应变曲线强度硬化阶段更长,试样塑性流动特征显著。由图3(b)可见,随着含水率增大,试样峰值强度呈线性降低,表明三趾马红土强度随含水率增大强度衰减较为明显。

图4为围压对三趾马红土强度特性的影响,可见不同围压下试样应力应变曲线均为应变软化型,但曲

线强度硬化阶段均较长,且围压越大曲线起始段变形模量越大,试样越不易变形,同时可见随围压增大试样压应力逐渐增强。试样破坏峰值强度随围压增大而增大,但增加幅度有所减小。

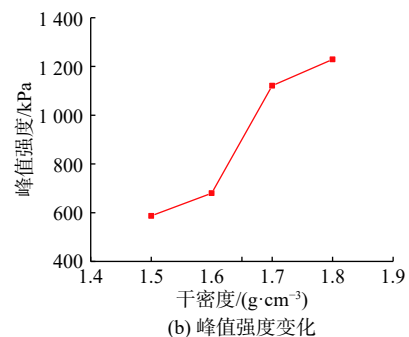
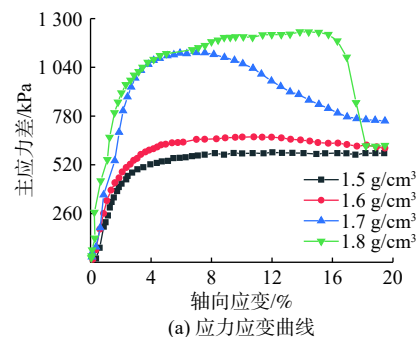


图 2 干密度对试样强度的影响

Fig. 2 Effect of dry density on strength of specimen

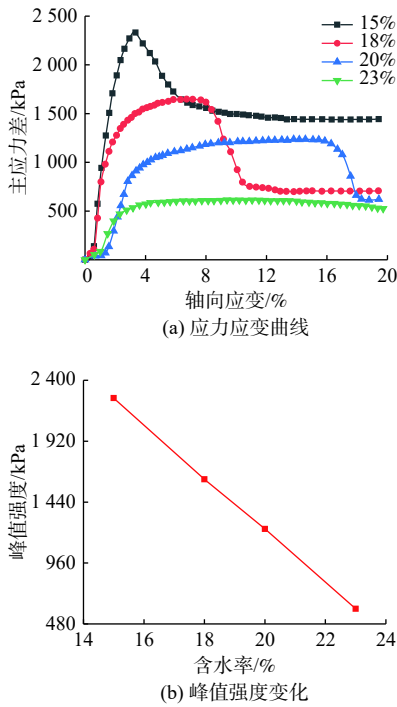


图 3 含水率对试样强度的影响

Fig. 3 Effect of moisture content on strength of specimen

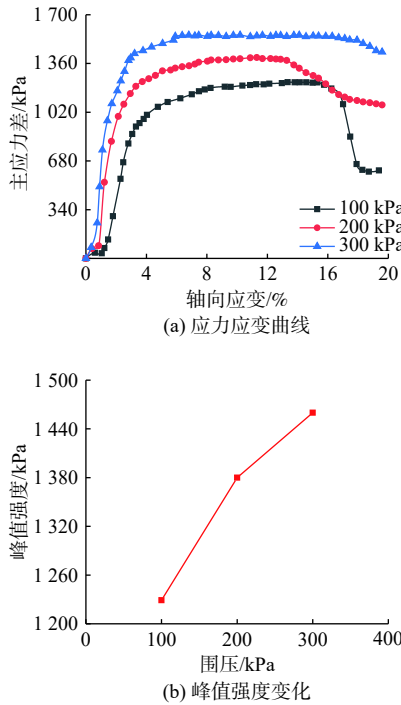


图 4 围压对试样强度的影响

Fig. 4 Effect of confining pressure on strength of specimen

2.2 三趾马红土蠕变特性

完成不同干密度、含水率、围压下试样的蠕变试验, 获取其蠕变全过程曲线, 采用陈氏法对分级加载的蠕变曲线进行叠加处理, 得到试样不同条件下的应力应变-时间蠕变曲线, 限于篇幅, 仅给出部分试样蠕

变结果, 如图 5—7 所示。

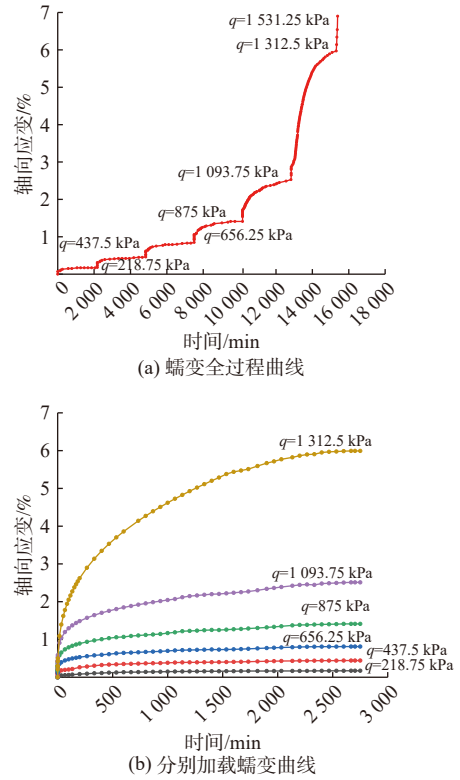


图 5 干密度 1.8 g/cm³ 试样蠕变曲线

Fig. 5 Creep curves of the sample with dry density of 1.8 g/cm³

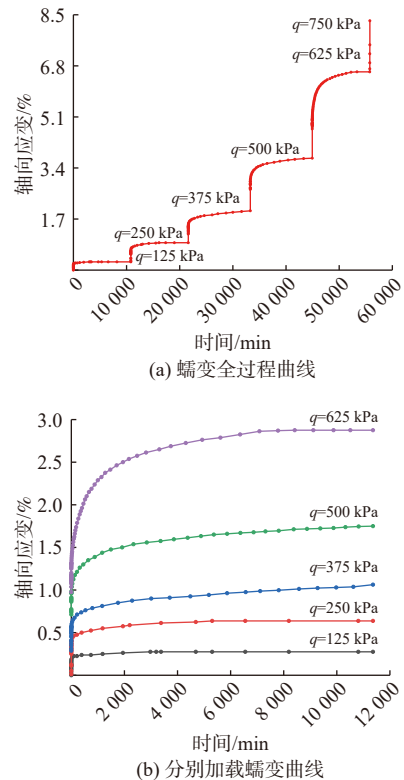


图 6 含水率 23% 试样蠕变曲线

Fig. 6 Creep curves of the sample with moisture content of 23%

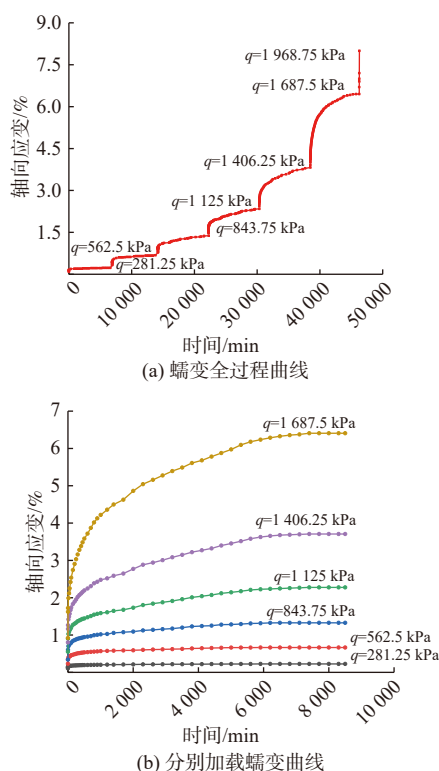


图 7 围压 300 kPa 试样蠕变曲线  
Fig. 7 Creep curves of the sample with confining pressure of 300 kPa

由图可见,各条件下三趾马红土试样的蠕变行为明显,蠕变曲线非线性特征显著。试样蠕变曲线分为 5~6 级,当施加最后一级荷载后,试样轴向变形快速上升,试样迅速破坏。试样在前两级荷载下产生的蠕变变形较小,蠕变稳定时间也较短。当偏应力施加到第三级以上时,试样蠕变变形量不断增大,尤其是第 4~6 级偏应力荷载下,试样产生的蠕变变形量最大。同时蠕变曲线均呈明显阶段性,蠕变开始阶段产生一定量的瞬时变形,随后蠕变速率不断增大,变形快速增长。并且偏应力水平越高,产生的瞬时蠕变越大;衰

减蠕变阶段蠕变速率不断减小,蠕变变形减速发展,并且偏应力水平越高,衰减蠕变特征越明显;等速蠕变阶段试样以较低的蠕变速率增长,蠕变变形增量有限。

### 3 长期强度变化规律

本文采用等时曲线法<sup>[31]</sup>确定三趾马红土的长期强度,首先绘制试样不同干密度、不同含水率、不同围压下的应力-应变等时曲线,将等时曲线进行双对数坐标变换,根据曲线拐点位置即可确定试样长期强度。

#### 3.1 等时曲线

限于篇幅仅给出部分试样等时曲线(图 8),可见等时曲线非线性特征明显,均呈上凹状,试样蠕变变形量随偏应力增大而快速增大。同时,随时间增长,试样蠕变变形量不断增大,但变形增量增大幅度逐渐减小,反映了不同阶段蠕变变形发展演化规律。

为分析三趾马红土蠕变行为受干密度、含水率、围压的影响,绘制试样典型的等时曲线变化(图 9),可见试样蠕变变形量均随偏应力增大而增大,但变形增长幅度又受试样条件影响。由图 9(a)可知,当干密度较高时,相同偏应力下试样产生的蠕变变形量越小,这是由于密实度增大缩小了试样孔隙、提高土体强度,试样更不易变形。由图 9(b)可知,相同偏应力下试样蠕变变形量均随试样含水率增加而增大,且含水率越高蠕变变形量增长幅度越大,这是由于水分软化试样内部土体颗粒间的黏聚强度与摩擦强度,因此试样更易变形,因为含水率的增加而减小,故而土样在施加应力作用下更易发生形变。由图 9(c)可知,相同偏应力下试样蠕变变形量均随围压增加而变小,土样的变形量随着围压的增加而减小,这是因为围压侧向限制土体变形,提高试样压硬性,试样更不易变形。总体可见试样干密度越小、含水率越高、围压越小,试样蠕变变形量越大,且高偏应力时变化更为明显。

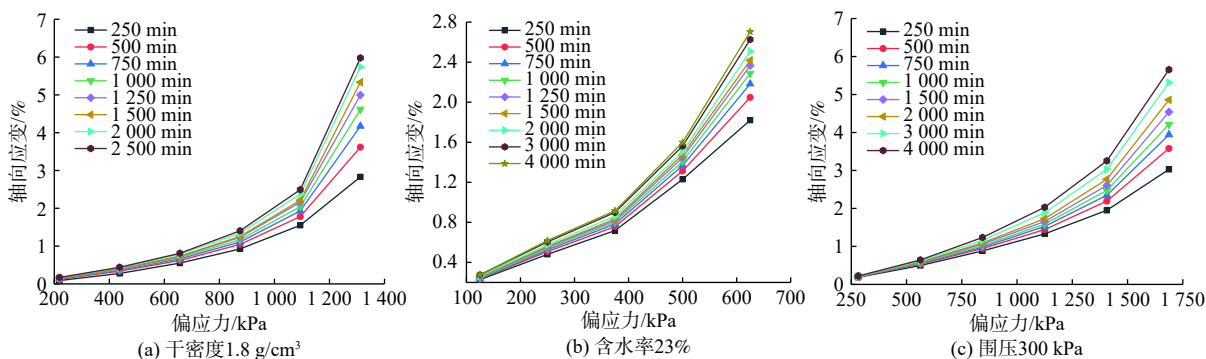


图 8 蠕变等时曲线  
Fig. 8 Creep isochronous curve

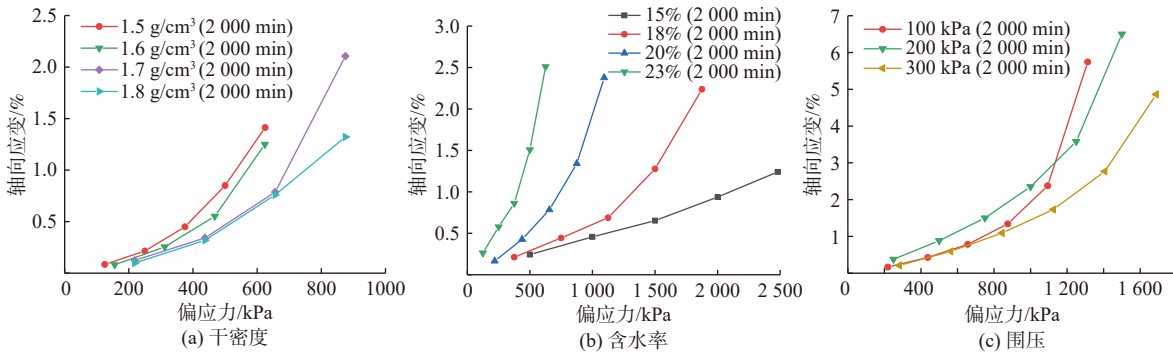


图 9 不同影响因素对试样等时曲线的影响

Fig. 9 Isochron curves of the specimens under different conditions

3.2 长期强度变化

由上节可知等时曲线非线性特征显著, 且均存在拐点, 为更准确确定拐点位置, 求取试样长期强度, 绘

制对数坐标形式的等时曲线(图 10), 可见每条等时曲线上的拐点均较明显, 拐点对应的偏应力荷载即为土样的长期强度值。

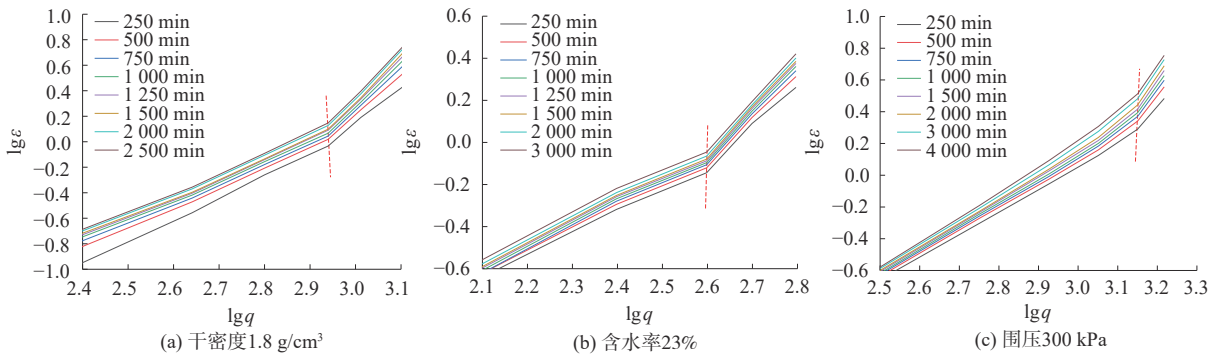


图 10 双对数等时曲线

Fig. 10 Double logarithmic isochronous curve

由图 10 确定曲线拐点对应的偏应力值, 最终确定试样长期强度值, 并定义强度损失率为土体在荷载长期作用下蠕变后的长期强度与瞬时强度的差值与瞬时强度之比。

绘制试样不同条件下长期强度演化规律(图 11)。由图 11(a)可知, 试样长期强度随干密度增大近似呈线性增大, 但试样长期强度较瞬时强度大幅度下降,

强度产生折损, 强度损失率 29.29% ~ 34.58%。且干密度越小, 强度损失率越高。由图 11(b)可知, 试样长期强度随含水率增大呈线性降低, 且长期强度较瞬时强度又大幅降低, 强度损失明显, 损失率 25.58% ~ 31.33%, 且含水率越高, 损失率越大。由图 11(c)可知, 试样长期强度随围压增大而增大, 长期强度损失率为 6.67% ~ 29.29%, 且围压越大强度损失率越小。

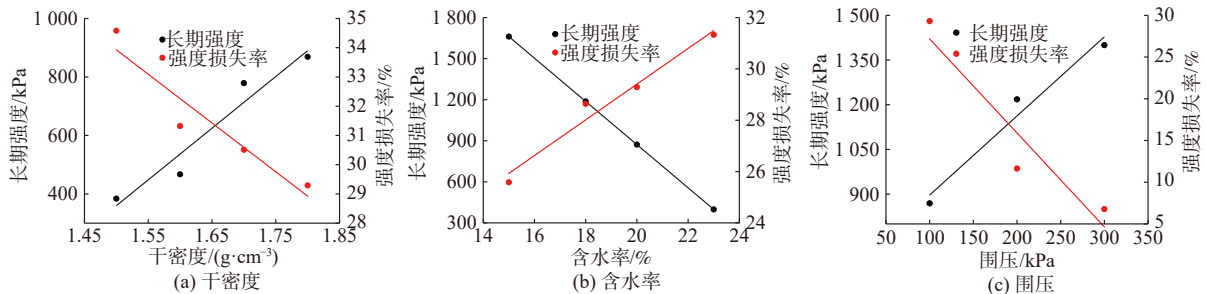


图 11 不同因素对试样长期强度及强度损失率的影响

Fig. 11 Effect of different factors on the long-term strength and strength loss rate of the specimen

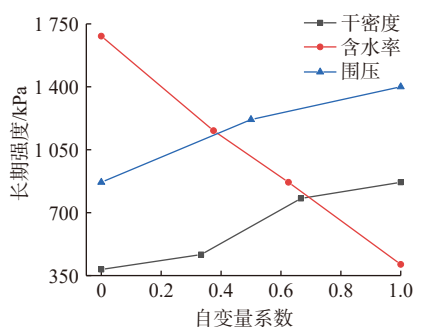
### 3.3 长期强度随影响因素变化敏感性

为分析长期强度随各影响因素变化的敏感性,利用式(1)对各影响因素进行无量纲处理,获取各影响因素的自变量系数,以综合对比试样强度损失率随其变化规律:

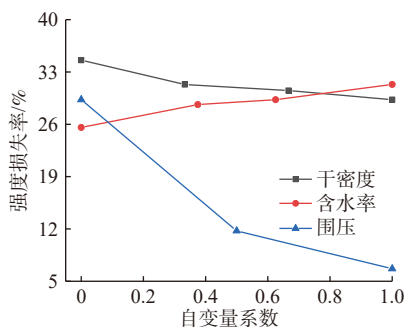
$$X = \frac{X_k - X_0}{X_n - X_0} \quad (1)$$

其中,  $X$  为自变量系数,  $X_k$  为影响因素数值取值,  $X_0$  为影响因素的最小值,  $X_n$  为影响因素的最大值。

利用式(1)对各影响因素进行无量纲处理后得到其自变量系数  $X$ , 各影响因素量值越大, 自变量系数越大。将其对试样长期强度及强度损失率影响关系绘制于图 12 中。由图 12(a) 可见, 当自变量系数小于 0.38 时, 不同含水率试样长期强度最大, 不同围压下试样长期强度次之, 不同干密度试样长期强度最小; 当自变量系数大于 0.69 时, 不同围压下试样长期强度最大, 不同干密度试样长期强度次之, 不同含水率试样长期强度最小。总体呈现出试样长期强度随含水率变化最为敏感, 随围压变化敏感性次之, 随干密度变化敏感性最低。



(a) 试样长期强度随自变量变化



(b) 试样强度损失率随自变量变化

图 12 试样长期强度随影响因素变化敏感性  
Fig. 12 Variation of the strength loss rate of the specimen with influence factors

图 12(b) 为试样强度损失率随影响因素变化敏感性, 可见不同条件下试样长期强度较瞬时强度均降

低, 但强度损失率变化幅度又随影响因素变化。总体可见试样强度损失率随围压变化最为敏感, 随含水率变化次之, 随干密度变化敏感性最低。表明围压越高, 试样长期强度较瞬时强度降低幅度越小; 试样含水率越高, 长期强度较瞬时强度降低幅度越大; 干密度越大, 试样长期强度较瞬时强度降低幅度降低。

## 4 结论及建议

(1) 通过开展三趾马红土蠕变试验, 获取其蠕变行为随影响因素变化规律, 结果表明三趾马红土蠕变特征显著, 试样干密度越小、含水率越大、试验围压越小, 其蠕变变形量越大。

(2) 三趾马红土蠕变后长期强度较瞬时强度降低明显, 并受干密度、含水率、围压影响显著。干密度越小试样长期强度越低, 强度损失率 29.29% ~ 34.58%; 含水率越高试样长期强度越低, 强度损失率 25.58% ~ 31.33%; 围压越小试样长期强度越低, 强度损失率 6.67% ~ 29.29%。

(3) 三趾马红土长期强度衰减随影响因素变化敏感性不同, 随含水率变化最为敏感, 随围压变化敏感性次之, 随干密度变化敏感性最低。但强度损失率变化幅度呈现不同规律, 强度损失率随围压变化最为敏感, 随含水率变化次之, 随干密度变化敏感性最低。

因此在分析黄土-三趾马红土复合型边坡稳定性时, 要充分考虑三趾马红土因蠕变而产生的强度损失问题, 关注不同影响因素变化下其长期强度的变化规律, 综合选取稳定性分析计算时的强度参数, 以保证边坡稳定性评价结果的安全可靠。

### 参考文献 (References):

- [1] 曲永新, 张永双, 覃祖森. 三趾马红土与西北黄土高原滑坡[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 257-265. [QU Yongxin, ZHANG Yongshuang QIN Zumiao. Hipparrion laterite and landslide hazards on loess plateau of northwestern China[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(3): 257-265. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 文宝萍, 王思敬, 王恩志, 等. 黄土-红层接触面滑坡的变形特征[J]. 地质学报, 2005, 79(1): 144. [WEN Baoping, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Deformation characteristics of loess red contact surface landslide[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(1): 144. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张栋平, 胡平. 杜家坪隧道进口红黏土土层作用下滑



- 坡体机理分析[C]/第十二届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会论文集. 峨眉山: 中国土木工程学会, 2013: 1 - 5. [ZHANG Dongping, HU Ping. Mechanism analysis of sliding slope under the action of laterite at Dujiaping tunnel entrance[C]/Proceedings of the 12th Cross Strait Symposium on tunnel and underground engineering. Emeishan: Chinese Society of Civil Engineering, 2013: 1 - 5. (in Chinese with English abstract)]
- [ 4 ] 孙萍萍, 张茂省, 谷天峰, 等. 吸力可控条件下的北方红黏土蠕变特性[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 500 - 509. [SUN Pingping, ZHANG Maosheng, GU Tianfeng, et al. Creeping characteristics of northern laterite under controlled matric suctions[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 500 - 509. (in Chinese with English abstract)]
- [ 5 ] 余小龙, 安玉科. 甘肃徽-成盆地红层工程滑坡特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(3): 31 - 35. [YU Xiaolong, AN Yuke. Characteristics of engineering landslide in red bed rock area of the Hui-Cheng basin in Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3): 31 - 35. (in Chinese with English abstract)]
- [ 6 ] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530 - 540. [ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530 - 540. (in Chinese with English abstract)]
- [ 7 ] 刘虎虎, 缪海波, 陈志伟, 等. 三峡库区侏罗系顺层滑坡滑带土的剪切蠕变特性[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1573 - 1580. [LIU Huhu, MIAO Haibo, CHEN Zhiwei, et al. Shear creep behaviors of sliding-zone soil of bedding landslide in Jurassic stratum in Three Gorges Reservoir area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1573 - 1580. (in Chinese with English abstract)]
- [ 8 ] 周静静, 赵法锁, 袁湘秦, 等. 滑带土蠕变过程及微观结构演化分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 115 - 121. [ZHOU Jingjing, ZHAO Fasuo, YUAN Xiangqin, et al. Creep process and the microstructural evolution of sliding-zone soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 115 - 121. (in Chinese with English abstract)]
- [ 9 ] 罗庆姿, 陈晓平, 袁炳祥, 等. 基于等时曲线的软黏土弹黏塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊2): 142 - 146. [LUO Qingzi, CHEN Xiaoping, YUAN Bingxiang, et al. Elastic visco-plastic model for soft clay based on isochronous curves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Sup2): 142 - 146. (in Chinese with English abstract)]
- [ 10 ] 汤连生, 桑海涛, 罗珍贵, 等. 土体抗拉张力学特性研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(3): 297 - 309. [TANG Liansheng, SANG Haitao, LUO Zhengui, et al. Advances in research on the mechanical behavior of the tensile strength of soils[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(3): 297 - 309. (in Chinese with English abstract)]
- [ 11 ] YIN P H, VANAPALLI S K. Model for predicting tensile strength of unsaturated cohesionless soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(9): 1313 - 1333.
- [ 12 ] 徐筱, 蔡国庆, 李舰, 等. 非饱和土的峰值强度特性及破坏包线模型[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1211 - 1219. [XU Xiao, CAI Guoqing, LI Jian, et al. Peak strength characteristics and failure envelope model of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1211 - 1219. (in Chinese with English abstract)]
- [ 13 ] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 滑带土长期强度参数的衰减特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5827 - 5834. [CHENG Dongxing, LIU Da'an, DING Enbao, et al. Study on attenuation characteristics of long-term strength for landslide soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup 2): 5827 - 5834. (in Chinese with English abstract)]
- [ 14 ] DENG H F, ZHOU M L, LI J L, et al. Creep degradation mechanism by water-rock interaction in the red-layer soft rock[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(12): 1 - 12.
- [ 15 ] 李娜, 陈昌富, 朱世民, 等. 考虑干密度影响的红黏土蠕变特性及蠕变模型研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(8): 2174 - 2182. [LI Na, CHEN Changfu, ZHU Shimin, et al. Research on creep characteristics and creep model of laterite considering effect of dry density[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(8): 2174 - 2182. (in Chinese with English abstract)]
- [ 16 ] SONE H, ZOBACK M D. Time-dependent deformation of shale gas reservoir rocks and its long-term effect on the in situ state of stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 69: 120 - 132.
- [ 17 ] 龙建辉, 郭文斌, 李萍, 等. 黄土滑坡滑带土的蠕变特性[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1023 - 1028. [LONG Jianhui, GUO Wenbin, LI Ping, et al. Creep property of soil in sliding zone of loess landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1023 - 1028.

- (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 杨秀荣, 姜谱男, 江宗斌. 含水状态下软岩蠕变试验及损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 1): 167 - 174. [ YANG Xiurong, JIANG Annan, JIANG Zongbin. Creep test and damage model of soft rock under water containing condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup 1): 167 - 174. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 古鹏翔, 骆俊晖, 刘先林, 等. 考虑滑带土蠕变特性的边坡长期稳定性分析[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(4): 94 - 101. [ GU Pengxiang, LUO Junhui, LIU Xianlin, et al. Long-term stability analysis of slope considering creep behaviors of sliding zone soils[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(4): 94 - 101. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 陈琼, 崔德山, 王菁莪, 等. 不同固结状态下黄土坡滑带土的蠕变试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1635 - 1642. [ CHEN Qiong, CUI Deshan, WANG Qing'e, et al. An experimental study of creep characteristics of sliding zone soil of Huangtupo landslide under different consolidation stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1635 - 1642. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 陈秀吉, 陈群, 周承京, 等. 不同相对密实度含软岩堆石料的蠕变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 118 - 122. [ CHEN Xiuji, CHEN Qun, ZHOU Chengjing, et al. Creep behavior of rockfill with soft rock under different relative densities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup 2): 118 - 122. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] VASCONCELLOS J F V, SINGH S, SIVAKUGAN N. Sensitivity analysis of time dependent settlements in hydraulic fills[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28(4): 351 - 360.
- [23] 辛鹏, 吴树仁, 石菊松, 等. 簸箕山大型老滑坡滑动带的结构特征及形成机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1382 - 1391. [ XIN Peng, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Structural characteristics of soft-rock slip zone and experimental study of its formation mechanism in Boji mountain large-scale old landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(7): 1382 - 1391. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 杨果岳, 徐运龙, 李良吉, 等. 压实红黏土三轴蠕变特性试验及模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 727 - 735. [ YANG Guoyue, XU Yunlong, LI Liangji, et al. Research on triaxial creep characteristics test and models of compacted laterite[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(3): 727 - 735. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 卢连长, 张泽, 冯文杰, 等. 冻融循环作用下冻结黏土矿物物理力学性质研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 118 - 123. [ LU Lianchang, ZHANG Ze, FENG Wenjie, et al. Research on variability of freezing-thawing cycle on basic physical and mechanics properties of clay minerals[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 118 - 123. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 杨爱武, 郑宇轩, 肖敏. 人工制备结构性软黏土长期变形特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 133 - 140. [ YANG Aiwu, ZHENG Yuxuan, XIAO Min. An experimental study of the long-term deformation characteristics of artificial structured soft clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 133 - 140. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] LI J Z, YANG Y L. Matric suction creep characteristics of reticulated laterite[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(10): 3837 - 3842.
- [28] LONG Z L, CHENG Y Z, YANG G Y, et al. Study on triaxial creep test and constitutive model of compacted laterite[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2020: 517 - 531.
- [29] 付昱凯, 张子然. 基于蠕变试验及Burgers模型参数分析的三趾马红土长期强度确定[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(2): 735 - 740. [ FU Yukai, ZHANG Ziran. Long-term strength determination of hipparion laterite based on creep test and parameter analysis of Burgers model[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(2): 735 - 740. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 何晓磊. 西安市灞河左岸滑坡形成机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014. [ HE Xiaolei. Research on the formation mechanism of landslide on the left bank of Bahe River in Xi'an: A case study on Chendongpo landslide[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] 陈宗基, 康文法. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4): 299 - 312. [ TAN Tjong-kie, KANG Wenfa. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1991, 10(4): 299 - 312. (in Chinese with English abstract) ]