

典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究

王新刚, 刘 凯, 王友林, 张培栋, 石 卫, 罗 力

An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content

WANG Xingang, LIU Kai, WANG Youlin, ZHANG Peidong, SHI Wei, and LUO Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄土三趾马红土滑坡滑带土的长期强度影响因素研究

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

祝艳波, 刘振谦, 李文杰, 苗帅升, 李红飞, 兰恒星 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 148-156

滑带土蠕变过程及微观结构演化分析

Creep process and the microstructural evolution of sliding zone soil

周静静, 赵法锁, 袁湘秦, 祝艳波, 宋飞 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 115-121

基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 126-136

非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究

An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models

魏建柄, 刘卫斌 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 67-73

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

渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41-47



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109025

王新刚, 刘凯, 王友林, 等. 典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 137-143.
WANG Xingang, LIU Kai, WANG Youlin, *et al.* An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 137-143.

典型黄土滑坡滑带土不同含水率下 蠕变特性试验研究

王新刚¹, 刘 凯¹, 王友林², 张培栋², 石 卫², 罗 力¹

(1. 大陆动力学国家重点实验室/西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;

2. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要: 黄土斜坡在受到降雨、人工灌溉、河流水浸润等作用后容易发生蠕变, 最终发生滑坡, 有时甚至会造成灾难性事故。以往研究中对不同含水率下黄土滑坡滑带土的蠕变性质研究较少, 更缺乏定量化的规律分析。以榆林市色草湾村黄土滑坡滑带土为例, 进行了一系列三轴蠕变试验, 得到了黄土不同含水率下 ($w=10\%$ 、 12% 、 14% 、 16% 、 18% , w 表示含水率) 的应力-应变-时间曲线与应力-应变等时曲线, 分析了含水率对黄土蠕变特性的影响, 并利用等时曲线法求取了黄土的长期强度, 得出如下结论: (1) 含水率越大, 样品蠕变破坏所需的偏应力越小, 轴向应变也越大, 含水率增大后自由水厚度增大, 土颗粒间胶结程度减小, 且水膜会对土颗粒起润滑作用易于其错动滑移; (2) 含水率越大, 施加每级荷载后样品蠕变曲线达到稳定状态所需时间越长, 水分的增加会使土体结构完整性降低, 在应力的作用下土体内部结构调整相对缓慢, 固结和蠕变过程中孔隙水压力消散需要的时间也越长; (3) 通过分析黄土试样蠕变破坏表面形态发现, 含水率较小时, 蠕变破坏后的试样有明显的剪切破坏面, 当试样含水率越大时, 越容易发生横向鼓胀, 表现出塑性破坏特征, 表明含水率较大时, 水的软化作用大于水对于土体的裂隙扩展作用; (4) 引入了黄土长期强度折损率, 揭示了不同含水率下黄土滑坡滑带土的长期强度与长期强度折损率的规律。研究成果可为黄土滑坡的长期稳定性分析提供参考依据。

关键词: 黄土滑坡; 滑带土; 蠕变; 含水率; 长期强度

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0137-07

An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content

WANG Xingang¹, LIU Kai¹, WANG Youlin², ZHANG Peidong², SHI Wei², LUO Li¹

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi

710069, China; 2. Shaanxi Hydrological Engineering Geology and Environmental Geological Survey Center,

Xi'an, Shaanxi 710068, China)

Abstract: Loess slopes are often prone to creeping after being subjected to rainfall, artificial irrigation, river water infiltration, etc. Eventually a landslide occurred, even causing a catastrophic accident. There are few studies on the creep properties of loess landslide soil under different water content in the existing literature, and there is a lack of

收稿日期: 2021-09-09; 修订日期: 2022-01-03

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902268); 中国博士后基金特别资助项目(2019T120871)

第一作者: 王新刚(1984-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害机理研究。E-mail: xgwang@nwu.edu.cn

通讯作者: 刘凯(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事黄土滑坡机理与室内试验研究。E-mail: 1367866511@qq.com

quantitative analysis of the law. A series of triaxial creep tests of sliding zone soil of loess landslide in the Secaowan Village, Yulin City have been carried. The stress-strain-time curves and isochronous stress-strain curves with different water contents ($w=10\%$, 12% , 14% , 16% , 18% , w represents the water content) are obtained and the influence of water content on the creep characteristics of loess is analyzed as well. The long-term strength of loess is obtained by using the isochronous curve method. The research results show that (1) When the water content of the sample is larger, the deviator stress required for the creep failure of the sample is smaller, and the axial strain is larger. This phenomenon can be explained by the electric double layer theory as follows: The thickness of free water increases, the degree of cementation among soil particles decreases, and the water film will lubricate the soil particles and make them easy to slip. (2) When the water content of the sample is larger, the time required for the creep strain to reach a stable state after each level of load is applied is longer. This phenomenon can be explained as follows: The increase of loess moisture reduces the structural integrity of the soil, and the adjustment of the internal structure of the soil is relatively slow under the action of stress. Therefore, it takes a longer time for the pore water pressure to dissipate during consolidation and creep. (3) By analyzing the surface morphology of the creep failure of the loess sample, it is found that when the water content is small, the sample after the creep failure has an obvious shear failure surface. When the water content of the sample is larger, the lateral swelling is more likely to occur, showing the characteristics of plastic failure, and indicating that when the moisture content is larger, the softening effect of water is greater than the effect of water on the crack expansion of the soil. (4) The long-term strength loss rate of loess is introduced. It reveals the law of long-term strength and long-term strength loss rate of loess landslide soil under different water content. The research results can provide a reference for the long-term stability analysis of loess landslides.

Keywords: loess landslide; sliding zone soil; creep; water content; long-term strength

黄土高原是世界上最大的黄土堆积区, 占我国国土面积的 6.6%^[1], 黄土蠕变现象是黄土高原地区工程建设中不可忽视的重要因素^[2], 黄土斜坡在受到人工灌溉^[3]、降雨^[4-5]、河流水浸润^[6]等作用后容易发生蠕变^[7], 最终发生滑坡, 有时甚至会造成灾难性的事故, 因此研究不同含水率下黄土蠕变特性显得尤为重要^[8]。

黄土的变形、破坏具有时间效应, 即蠕变特性, 以往学者在这方面做了大量研究, 并取得了丰硕的成果, 如葛苗苗等^[9]对压实黄土进行了常含水率压缩试验和常应力增湿试验, 发现黄土蠕变是在恒定荷载作用下由土颗粒或团聚体的蠕滑、大孔隙压缩引起的; 王松鹤等^[10]的研究表明饱和黄土的蠕变现象相较于重塑黄土与原状黄土更明显; 陈沛等^[11]对黄土-基岩开展了直剪蠕变试验并建立了蠕变模型进行定量描述, 发现蠕变阶段与滑坡的演化过程相似; 魏建柄等^[12]对非饱和粉质黏土进行三轴压缩固结排水蠕变试验, 建立了能够反映基质吸力变化的蠕变经验模型; 慕焕东等^[13]基于分数阶导数理论对 Q_3 黄土蠕变过程进行了分析, 建立了分数阶改进西原模型, 实现了对黄土蠕变各个阶段的模拟。

黄土的蠕变受多种因素影响, 含水率的变化是影

响其蠕变特性的主要因素之一。王鹏程等^[14]对泾阳县某边坡重塑黄土进行了不同含水率下的三轴固结排水试验, 试验表明含水率对蠕变特性有显著影响。王新刚等^[15]进行了基质吸力控制下的三轴蠕变试验, 讨论了偏应力、围压与基质吸力对非饱和黄土蠕变过程的影响。朱才辉等^[16]对黄土隧道地层试样进行了单轴蠕变试验, 试验结果表明地层初始含水率越大, 围岩压力及收敛变形量越大; 且随着隧道埋深的增加, 黄土蠕变引起的围岩压力比和收敛变形比增大。单帅等^[17]对延安新区压实黄土进行了不同基质吸力下的三轴蠕变试验, 试验表明不同基质吸力下土样的蠕变特性不同, 在低应力、较高应力水平下呈现衰减蠕变和稳定蠕变特性, 在高应力水平下呈现加速蠕变特性。在滑坡黄土蠕变方面, 周静静等^[18]研究黄土滑坡滑带土的蠕变特性, 发现滑带土的蠕变特性对低速缓动滑坡的形成演化起控制性作用。随着滑带土蠕变破坏的发生, 土体结构迅速破坏, 孔隙定向性减弱, 数目急剧增加^[19]。

以上学者的研究丰富了对黄土蠕变特性的认识, 然而对于黄土滑坡滑带土不同含水率下的蠕变特性仍然需要进一步的深入研究, 尤其是针对黄土滑坡滑

带土不同含水率下蠕变长期强度及长期强度折损率的研究。本文对榆林色草湾村黄土滑坡滑带土进行实地采样后,在室内进行不同含水率下的三轴蠕变试验,研究了黄土滑坡滑带土三轴蠕变过程中应力-应变-时间关系的规律,并从双电层理论和土体结构性角度对其进行了解释;此外还分析了试样蠕变破坏形态,并利用等时曲线揭示了研究区黄土滑坡滑带土的长期强度及长期强度折损率规律。

1 研究方案

1.1 试样制备

本文研究的黄土样品取自榆林市榆阳区青云镇色草湾村榆溪河支流旁发育典型黄土滑坡滑带土,如图 1(a)所示。受降雨、河水的浸润作用,该滑坡一定范围内的黄土体浸湿,含水率增大使其抗剪强度减小,增大了滑坡灾害发生的可能性。该滑坡全貌如图 1(b)所示。因黄土滑坡滑带土在不同含水率下蠕变,该滑坡具有明显多期次滑动特性,如图 1(c)~(e)所示,严重威胁其上缘的工厂、高速路和输电塔的安全。本次试验所取滑带土样品为 Q_3 黄土,其干密度为 1.50 g/cm^3 ,土粒密度为 2.70 g/cm^3 ,天然含水率 10%,液限 20.7%,塑限 12.6%。

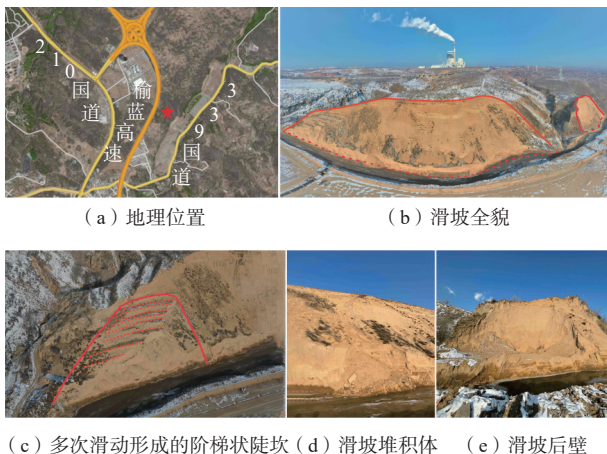


图 1 色草湾村黄土滑坡
Fig. 1 Loess landslide in Secaowan village

在室内采用水膜转移法将野外取回的黄土样品含水率(w)调整到目标值 10%、12%、14%、16% 和 18%,并削制成不同含水率下的圆柱样(图 2),样品规格为直径 61.8 mm、高度 125 mm,制样后将样品放置于保湿缸中静置 2 d 使其水分迁移均匀。

1.2 试验方案

本试验所用仪器为 FSR-60 型三轴蠕变仪,蠕变试

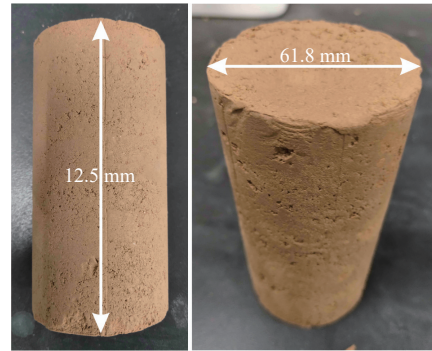


图 2 黄土样品
Fig. 2 Loess samples

验采用分级加载方式^[2],首先根据常规三轴剪切试验下剪切破坏时的偏应力(q)来设置蠕变试验偏应力荷载水平。各含水率下($w=10\%$ 、12%、14%、16%、18%)试样剪切破坏的偏应力分别为 312.5, 300.0, 275.0, 250.0, 237.5 kPa。分别取常规三轴剪切破坏时偏应力的 50%、60%、70%、80%、90% 和 95% 作为蠕变试验分级加载的偏应力大小,蠕变试验偏应力加载等级方案如表 1 所示。根据土体取样位置,本文三轴试验所采用的围压均为 100.0 kPa。

表 1 蠕变试验偏应力加载方案

Table 1 Deviator stress loading scheme for creep tests

$w/\%$	q/kPa
10	150.0, 187.5, 212.5, 250.0, 287.5, 300.0
12	150.0, 175.0, 212.5, 237.5, 262.5, 287.5
14	137.5, 162.5, 187.5, 225.0, 250.0, 262.5
16	125.0, 150.0, 175.0, 200.0, 225.0, 237.5
18	112.5, 150.0, 162.5, 187.5, 212.5, 225.0

2 结果

2.1 蠕变全过程曲线

以 $w=10\%$ 试样的蠕变全过程曲线(图 3)为例进行分析,该地区黄土滑坡滑带土蠕变特性明显,蠕变曲线呈现出 4 个阶段:瞬时弹性变形、初始衰减蠕变、稳态蠕变、加速蠕变。在施加每 1 级偏应力荷载后,轴向应变会瞬时增大,为瞬时弹性阶段;随着时间的增长,应变速率逐渐减小,曲线非线性且呈现出上凸的形态,并向直线状态过渡,为初始衰减阶段;稳态蠕变阶段应变与时间呈现出近似直线状态;在施加最后 1 级达到破坏偏应力荷载时,应变速率急剧增加,短暂时间内试样破坏,为加速蠕变阶段。

2.2 黄土蠕变应变-时间曲线

利用 Boltzmann 叠加原理^[20]对不同含水率下的蠕

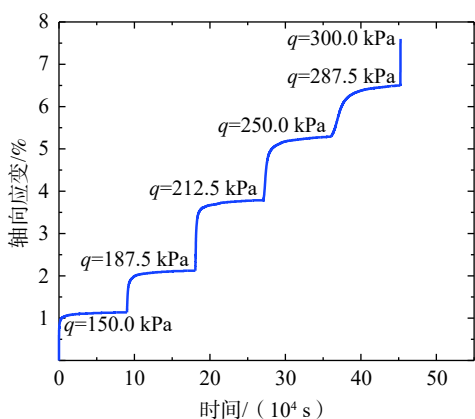


图 3 w=10% 试样蠕变全过程曲线

Fig. 3 Full-process creep curve of loess sample (w=10%)

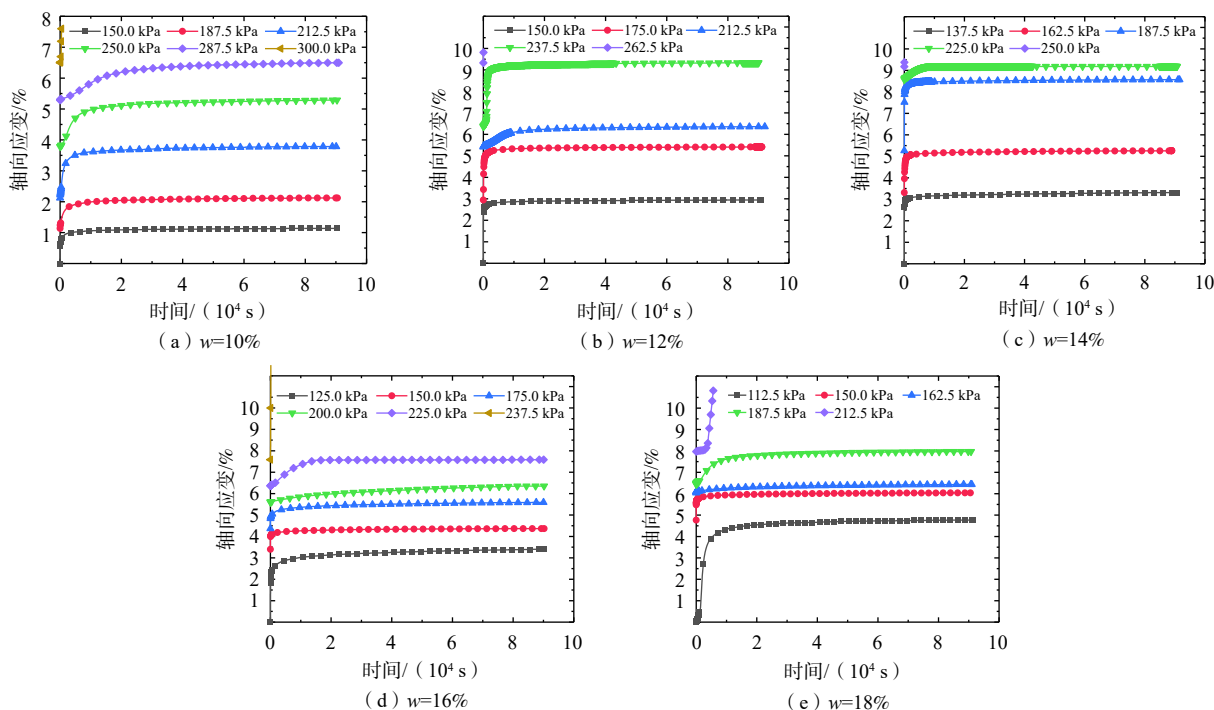


图 4 不同含水率试样分级加载蠕变曲线

Fig. 4 Creep curve of loess sample with different moisture content

含水率为 10%、12%、16%、18% 的试样轴向应变分别为 1.14%、2.94%、4.37%、6.04%。由双电层理论^[21]可知,土颗粒的表面常带有负电荷,由于表面电荷电场的作用,孔隙中的水分子和水化阳离子会向颗粒周围聚集,吸附在颗粒表面形成固定层;固定层外,水分子和水化阳离子仍受到一定程度的静电引力,形成扩散层,固定层和扩散层共同组成双电层。双电层内的水为结合水,双电层外的水为自由水,自由水可流动并具有溶解能力。因此,当含水率增大时,自由水厚度增大,土颗粒间胶结程度减小,且水膜会对土颗粒起润滑作用,使其易于错动滑移。

(3)含水率越大,施加每级荷载后蠕变曲线达

变试验曲线进行处理,如图 4 所示,其中含水率为 12%、14%、18% 的试样在施加第 5 级荷载时破坏,故图 4(b)、(c)和(e)中缺少第 6 级荷载下的曲线。不同含水率下的试样分级加载蠕变曲线具有如下规律:

(1)含水率越大,样品蠕变破坏所需的偏应力越小。如 $w=10\%$ 、12%、14%、16%、18% 试样的破坏偏应力分别为 300.0、262.5、250.0、237.5、212.5 kPa; $w=18\%$ 试样的破坏偏应力比 $w=10\%$ 试样小了 29.1%。

(2)含水率越大,轴向应变越大。如施加第 1 级荷载(破坏偏应力的 50%)时,10%、12%、14%、16% 和 18% 含水率试样稳定时的轴向应变分别为 1.14%、2.94%、3.31%、3.4% 和 4.77%;当施加偏应力至 150.0 kPa 时,

到稳定状态(即蠕变曲线的斜率为固定值时)所需时间越长。如施加第 1 级偏应力时,10%、12%、14%、16%、18% 含水率试样蠕变达到基本稳定所需时间分别为 10 641、23 575、40 221、57 275、66 214 s。这一现象可以解释为:水分的增加使土体结构完整性降低^[22],在应力作用下土体内部结构调整相对缓慢,固结和蠕变过程中孔隙水压力消散需要的时间也越长。

3 分析与讨论

3.1 黄土滑坡滑带土蠕变破坏表面形态

根据不同含水率黄土滑坡滑带土蠕变破坏后的表面形态(图 5)可知:含水率较小时,破坏后的试样有

明显的剪切破坏面, 如图 5(a) 所示; 含水率越大, 试样越容易横向鼓胀, 表现出塑性破坏的特征, 如图 5(e) 所示。这一现象可以解释为: 含水率较大时, 水的软化作用大于水对土体的裂隙扩展作用^[23]。

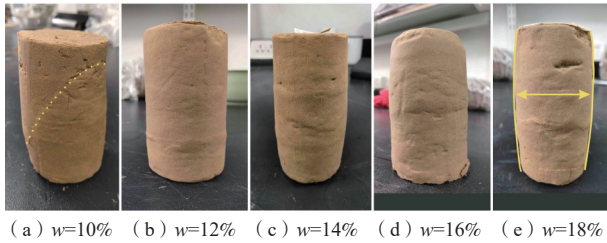


图 5 不同含水率试样蠕变破坏后表面形态

Fig. 5 Surface morphology of loess sample with different water content after creep failure

3.2 长期强度

长期强度是指岩土体在长期荷载作用下的强度, 获取长期强度最常用的方法是等时曲线法^[20]。等时曲线是指在 1 组不同应力水平的蠕变曲线中, 相等时间所对应的蠕变变形与应力的关系曲线。等时曲线法是将各等时曲线的直线向曲线转变的点识别出来, 等时曲线中的拐点为黏弹性与黏塑性的分界处, 标志着黄土试样由黏弹性阶段向黏塑性阶段转化, 其可视为长期强度点^[24]。各等时曲线拐点的连线渐近线将趋于一个稳定值, 类似屈服应力形成的渐近线所对应的应力值, 该值所对应的强度即为黄土的长期强度值。限于篇幅本文仅展示 16% 含水率试样的等时曲线图(图 6), 由图可得出该条件下的黄土长期强度值。

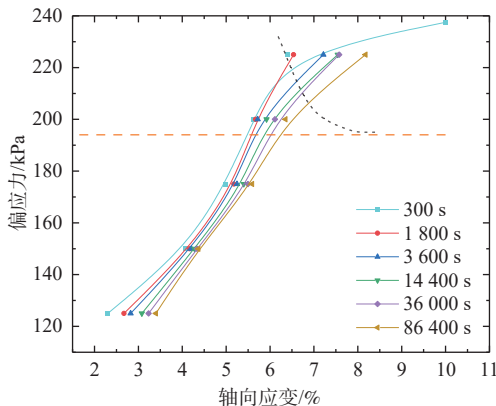


图 6 16% 含水率试样蠕变应力-位移等时曲线

Fig. 6 Isochronous stress-displacement curves of loess sample with water content 16%

表 2 为黄土滑坡滑带土不同含水率下瞬时强度(q_t)与长期强度(q'), 将不同含水率下黄土样品的瞬时强度与长期强度进行比较, 可以发现长期强度均有不同程

度减小。为了方便对比本文定义了黄土长期强度折损率(Q):

$$Q = \frac{q_t - q'}{q_t} \times 100\% \quad (1)$$

表 2 黄土不同含水率下瞬时强度与长期强度

Table 2 Instantaneous strength and long-term strength of loess sample with different water content

w/%	q_t /kPa	q' /kPa	Q /%
10	312.5	282	9.8
12	300.0	260	13.3
14	275.0	235	14.5
16	250.0	194	22.4
18	237.5	171	28.0

随着含水率的增大, 瞬时强度与长期强度均减小, 且两者差值越来越大(图 7)。根据式(1)计算黄土不同含水率下的长期强度折损率(图 8), 可以发现随着黄土含水率的增大, 长期荷载下长期强度折损率也逐渐增大, 18% 含水率样品的长期强度折损率高达 28%, 因此在黄土滑坡致滑机理中考考虑黄土含水率增大后的蠕变特性是非常必要的。对图 7、图 8 中的数值进行拟合, 黄土滑坡滑带土的长期强度随含水率的增大指数减小, 而长期强度折损率随含水率的增大指数增大, 具体关系如式(2)(3)所示。

$$q' = 582 - 152 \exp[(w + 0.062)/0.243] \quad (2)$$

$$Q = 0.032 + 0.005 \exp[(w + 0.056)/0.06] \quad (3)$$

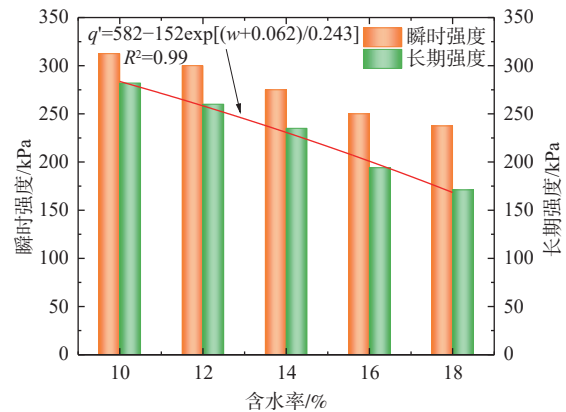


图 7 瞬时/长期强度与含水率关系

Fig. 7 Relationship between the instantaneous/long-term strength and water content

4 结论

(1) 含水率越大, 轴向应变越大, 当含水率增大时, 自由水厚度增大, 土颗粒间胶结程度减小, 且水膜会对土颗粒起润滑作用易于其错动滑移。

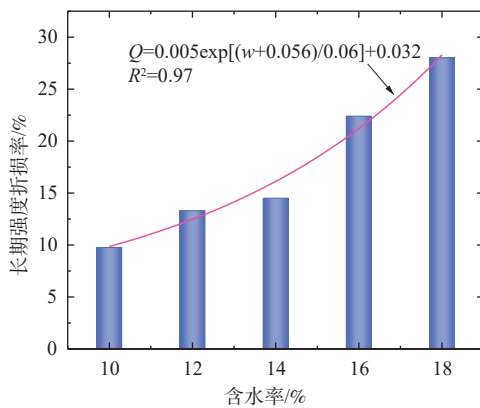


图 8 黄土长期强度折损率规律图

Fig. 8 Law of the long-term strength loss rate of loess

(2) 含水率越大, 施加每级荷载后蠕变曲线达到稳定状态(即蠕变曲线的斜率为固定值时)所需时间也越长。水分的增加会使土体结构完整性降低, 在应力的作用下土体内部结构调整相对缓慢, 因此固结和蠕变过程中孔隙水压力的消散需要的时间也越长。

(3) 含水率较小时, 蠕变破坏后的试样有明显的剪切破坏面; 试样含水率越大, 越容易发生横向鼓胀, 表现出塑性破坏特征, 说明含水率较大时, 水的软化作用大于水对于土体的裂隙扩展作用。

(4) 试样的瞬时强度和长期强度均随含水率的增大而减小, 且黄土滑坡滑带土长期强度折损率(Q)与含水率密切相关, 随含水率的变化呈现出指数增长。

参考文献 (References) :

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [LIU Dongsheng. Loess and environment[M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)]
- [2] 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)]
- [3] 许领, 李宏杰, 吴多贤. 黄土台缘滑坡地表水入渗问题分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 32 - 35. [XU Ling, LI Hongjie, WU Duoxian. Discussion on infiltration of surface water and their significance to terrace loess landslides[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 32 - 35. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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)]
- [5] 王新刚, 余宏明, 胡斌, 等. 节理控制的降雨入渗通道对黄土开挖边坡稳定性的影响[J]. 山地学报, 2013, 31(4): 413 - 417. [WANG Xingang, YU Hongming, HU Bin, et al. Impact analysis of the joint control excavation loess slope's stability under the influence of rainfall infiltration channel[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(4): 413 - 417. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 段钊, 张弘, 唐皓, 等. 泾河下游黄土台塬区侵蚀诱发滑坡机理[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 10 - 16. [DUAN Zhao, ZHANG Hong, TANG Hao, et al. Mechanism of erosion induced landslide in loess plateau area in the lower reaches of Jing River[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(6): 10 - 16. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张吉宏, 段钊, 唐皓. 蠕变对河流侧蚀型黄土滑坡影响的数值模拟[J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 142 - 146. [ZHANG Jihong, DUAN Zhao, TANG Hao. Numerical simulation of the effect of creep on loess landslide caused by lateral river erosion[J]. Yellow River, 2020, 42(2): 142 - 146. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684 - 691. [PENG Jianbing, LIN Hungchou, WANG Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 684 - 691. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 葛苗苗, 李宁, 盛岱超, 等. 水力耦合作用下非饱和压实黄土微观变形机制试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2437 - 2448. [GE Miaomiao, LI Ning, SHENG Daichao, et al. Experimental investigation of microscopic deformation mechanism of unsaturated compacted loess under hydraulic coupling conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2437 - 2448. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王松鹤, 骆亚生, 董晓宏, 等. 黄土剪切蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 3088 - 3092. [WANG Songhe, LUO Yasheng, DONG Xiaohong, et al. Experimental study of shear creep characteristics of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup1): 3088 - 3092. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈沛, 王雁林, 陈新建, 等. 黄土-基岩滑坡滑带土蠕变本构模型研究[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 228 - 234.

- [CHEN Pei, WANG Yanlin, CHEN Xinjian, et al. Research on creep constitutive model of loess-basic landslide slip zone soil[J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(4): 228 - 234. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 魏建柄,刘卫斌.非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究[J].*水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 67 - 73. [WEI Jianbing, LIU Weibin. An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(6): 67 - 73. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 慕焕东,邓亚虹,赫佳,等.基于分数阶导数理论的 Q_3 黄土流变本构模型研究[J/OL].*工程地质学报*: 1 - 10. [2021-12-12]. [MU Huandong, DENG Yahong, HAO Jia, et al. Study on rheological model of Q_3 loess based on fractional derivative theory[J/OL]. *Journal of Engineering Geology*: 1 - 10. [2021-12-12]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-125>.(in Chinese with English abstract)]
- [14] 王鹏程,骆亚生,胡连信,等.重塑黄土三轴蠕变特性研究及模型分析[J].*岩土力学*, 2015, 36(6): 1627 - 1632. [WANG Pengcheng, LUO Yasheng, HU Lianxin, et al. Research on triaxial creep characteristics and models of remolded loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1627 - 1632. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王新刚,谷天峰,王家鼎.基质吸力控制下的非饱和黄土三轴蠕变试验研究[J].*水文地质工程地质*, 2017, 44(4): 57 - 61. [WANG Xingang, GU Tianfeng, WANG Jiading. Research on the triaxial creep test of unsaturated loess under the matric suction control[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 57 - 61. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 朱才辉,李玉波,兰开江,等.黄土隧道地层蠕变效应对围岩压力的影响[J].*工业建筑*, 2021, 51(7): 18 - 24. [ZHU Caihui, LI Yubo, LAN Kaijiang, et al. Creep effect of loess strata on surrounding rock pressure of tunnels[J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(7): 18 - 24. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 单帅,谢婉丽,朱荣森,等.加卸荷条件下延安新区压实黄土蠕变特性研究[J].*干旱区资源与环境*, 2021, 35(7): 144 - 155. [SHAN Shuai, XIE Wanli, ZHU Rongsen, et al. Creep characteristics of compacted loess in Yan'an New District under loading and unloading conditions[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(7): 144 - 155. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 周静静,赵法锁,祝艳波,等.低速缓动滑坡滑带土剪切蠕变特性[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(1): 107 - 112. [ZHOU Jingjing, ZHAO Fasuo, ZHU Yanbo, et al. Shear creep properties for sliding-zone soil of the slow-moving landslides[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(1): 107 - 112. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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)]
- [20] 刘雄.岩石流变学概论[M].北京:地质出版社,1994. [LIU Xiong. Introduction to rock rheology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese)]
- [21] 叶为民,黄伟,陈宝,等.双电层理论与高庙子膨润土的体变特征[J].*岩土力学*, 2009, 30(7): 1899 - 1903. [YE Weimin, HUANG Wei, CHEN Bao, et al. Diffuse double layer theory and volume change behavior of densely compacted Gaomiaozi bentonite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 1899 - 1903. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 骆亚生,谢定义,邵生俊,等.非饱和黄土的结构变化特性[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(8): 114 - 118. [LUO Yasheng, XIE Dingyi, SHAO Shengjun, et al. Variation characteristics of soil structure of unsaturated loess[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2004, 32(8): 114 - 118. (in Chinese with English abstract)]
- [23] WANG X G, WANG J D, ZHAN H B, et al. Moisture content effect on the creep behavior of loess for the catastrophic Baqiao landslide[J]. *CATENA*, 2020, 187: 104371.
- [24] 沈明荣,湛洪菊,张清照.基于蠕变试验的结构面长期强度确定方法[J].*岩石力学与工程学报*, 2012, 31(1): 1 - 7. [SHEN Mingrong, CHEN Hongju, ZHANG Qingzhao. Method for determining long-term strength of discontinuity using shear creep test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(1): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]