

戚志宇,李志清. 黄土蠕变特性研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(3): 485-510.

QI Zhi-yu, LI Zhi-qing. Review on Creep Properties of Loess[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(3): 485-510.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.10028

·《地球科学与环境学报》更名二十周年纪念专辑·

黄土蠕变特性研究进展

戚志宇^{1,2,3}, 李志清^{1,2,3*}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049; 3. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029)

摘要:黄土地区重大工程建设引发的崩塌、滑坡、地面沉降等地质灾害, 往往与黄土蠕变特性密切相关。从黄土蠕变研究阶段、研究方法、本构模型和蠕变引发的工程灾害等方面进行梳理, 归纳总结了黄土蠕变研究的现状, 探讨了黄土蠕变研究中存在的问题以及未来研究的趋势。具体来说, ①在系统梳理国内外研究文献基础上, 将黄土蠕变研究分为 3 个阶段, 分别为黄土基本性质研究阶段、黄土工程灾害研究阶段和黄土重大工程研究阶段; ②从黄土蠕变研究方法出发, 分析讨论了黄土蠕变研究中采用的各类方法以及影响黄土蠕变的各类要素, 尤其是含水量、干密度以及荷载对黄土蠕变特性的影响; ③总结了黄土蠕变本构模型的研究特点, 评述了包括元件理论本构模型、经验本构模型及半经验半理论本构模型等 3 类模型的优缺点; ④对黄土地区常见的边坡、路(地)基、隧道等工程类型的蠕变破坏特征进行了梳理; ⑤建立考虑多因素影响的黄土蠕变本构模型、系统研究黄土蠕变微结构的动态演化和微观本构模型及动荷载作用下的蠕变特征, 是未来黄土蠕变研究的发展趋势。

关键词:黄土; 蠕变; 本构模型; 微观结构; 三轴试验; 边坡; 路基; 隧道

中图分类号: P642; TU444

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2023)03-0485-26

Review on Creep Properties of Loess

QI Zhi-yu^{1,2,3}, LI Zhi-qing^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The geological disasters such as collapse, landslides, and ground subsidence caused by major engineering projects in the loess area are often closely related to the creep properties of loess. The current research of loess creep is summarized from the aspects of research stages, research methods, constitutive models, and engineering disasters, which are caused by creep of loess; the existing problems and the future trends in the research of loess creep are discussed. Specifically, ① based on a systematic review of domestic and foreign literature, the research of loess creep is divided into three stages, including the basic properties research stage, the

收稿日期: 2022-10-14; 修回日期: 2023-03-08 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0904); 国家自然科学基金项目(42177146, 41790442); 云南省科技厅重点研发计划项目(202103AA080013)

作者简介: 戚志宇(1994-), 男, 浙江诸暨人, 中国科学院大学工学博士研究生, E-mail: qizhiyu16@mails.ucas.ac.cn.

* 通讯作者: 李志清(1981-), 男, 河北沧州人, 中国科学院地质与地球物理研究所正高级工程师, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: lizhiq-2002@163.com.

engineering disaster research stage, and the major engineering project research stage; ② starting from the research methods of loess creep, various methods used in the research of loess creep and various factors affecting loess creep, especially the influence of water content, dry density and load on creep properties of loess, are analyzed and discussed; ③ the research characteristics of loess creep constitutive models are summarized, and the advantages and disadvantages of three models, including element theory constitutive model, empirical constitutive model, and semi-empirical and semi-theoretical constitutive model are evaluated; ④ the creep failure characteristics of common engineering types, such as slopes, roadbeds and tunnels in the loess area are summarized; ⑤ establishing a loess creep constitutive model that considers the influence of multiple factors, systematically studying the dynamic evolution and microscopic constitutive models of loess creep, and studying the creep properties under dynamic load, are the future trends of loess creep research.

Key words: loess; creep; constitutive model; microstructure; triaxial test; slope; roadbed; tunnel

0 引言

黄土是一种在第四纪干旱—半干旱气候中形成的风积土,广泛分布于我国西北地区^[1]。黄土具有特殊的工程性质,如孔隙率高、结构松散、柱状节理发育、水敏性、湿陷性等^[2-3]。随着中国经济的快速发展,黄土地区的重大工程项目建设已广泛开展,如平山造城、高速铁路、高速公路等。然而这些重大工程项目往往伴随着崩滑、沉降等地质灾害,而且这些灾害风险通常与黄土的蠕变特性密切相关。

蠕变是指在常应力持续作用下,黄土的变形随着时间的推移而持续增长的过程^[4]。影响黄土蠕变性质的因素较多,包括其自身的干密度、含水量、矿物组成、粒径分布等,以及外界的温度变化、湿度变化、酸碱污染等。黄土蠕变是黄土颗粒和孔隙结构对外界应力的调整。国内外学者通常借助宏观和微观试验来研究黄土蠕变性质,并用蠕变本构模型进行阐释。黄土宏观蠕变性质通常利用一维固结蠕变试验^[5-8]、三轴蠕变试验^[9-13]或者现场蠕变试验^[7,14]等来探究,也有一部分学者利用特殊应力或者特殊条件来观察黄土蠕变情况^[10,15-19]。本构模型是研究黄土蠕变的核心,黄土蠕变本构模型主要可以分为3类,分别是元件理论本构模型^[7,12-13,20-21]、经验本构模型^[6,8,15,22-23]和半经验半理论本构模型^[24-27]。研究蠕变本构模型,可以预测黄土地区边坡、隧道、高填方等重大工程未来几年到几十年的变形规律,并有助于提出相应的防灾减灾措施。

在宏观和微观层面,黄土蠕变研究的基础理论比较丰富,而对于酸碱污染、气候效应、振动荷载等

特殊环境下的蠕变特性研究还有所欠缺。国内外学者提出了多种黄土蠕变本构模型,每种模型都有其优势所在,但目前关于微观蠕变本构模型的研究还比较薄弱,对黄土蠕变微观影响因素的研究还不够深入。基于此,本文归纳总结了目前国内外在黄土蠕变的研究方法、影响因素、作用机理和本构模型等方面的研究进展,并提出黄土蠕变研究的趋势、挑战和难点,以期对相关研究提供参考。

1 黄土蠕变研究文献统计分析

综合中国知网、万方和维普数据库查询国内有关黄土蠕变的期刊和学位论文,并结合 Web of Science 数据库统计分析了近些年来关于黄土蠕变研究的发展情况(图1)。结合中国重大工程建设节点,可以将黄土蠕变研究分为3个阶段[图1(a)]。第一阶段是1999年之前,属于黄土基本性质研究阶段;该阶段对于黄土蠕变研究较少,相对来说相关文献也比较少,主要涉及黄土基本物理力学性质以及微观结构基础理论方面的研究。第二阶段是1999年到2012年,属于黄土工程灾害研究阶段;自1999年9月国家提出“西部大开发”战略,西部地区加大了基础设施建设,随之而来的黄土滑坡、泥石流、湿陷等灾害也逐渐增加,学者开始更多地关注原状黄土的蠕变性质。第三阶段是2012年至今,属于黄土重大工程研究阶段;以国家提出“一带一路”倡议以及平山造城为时间节点,高填方机场、公路和铁路等重大工程项目蓬勃发展,黄土蠕变研究从原状黄土走向压实黄土。上述这些工程工期紧、填方量大、填方高度高,部分填方高度高达50~100 m。填方黄

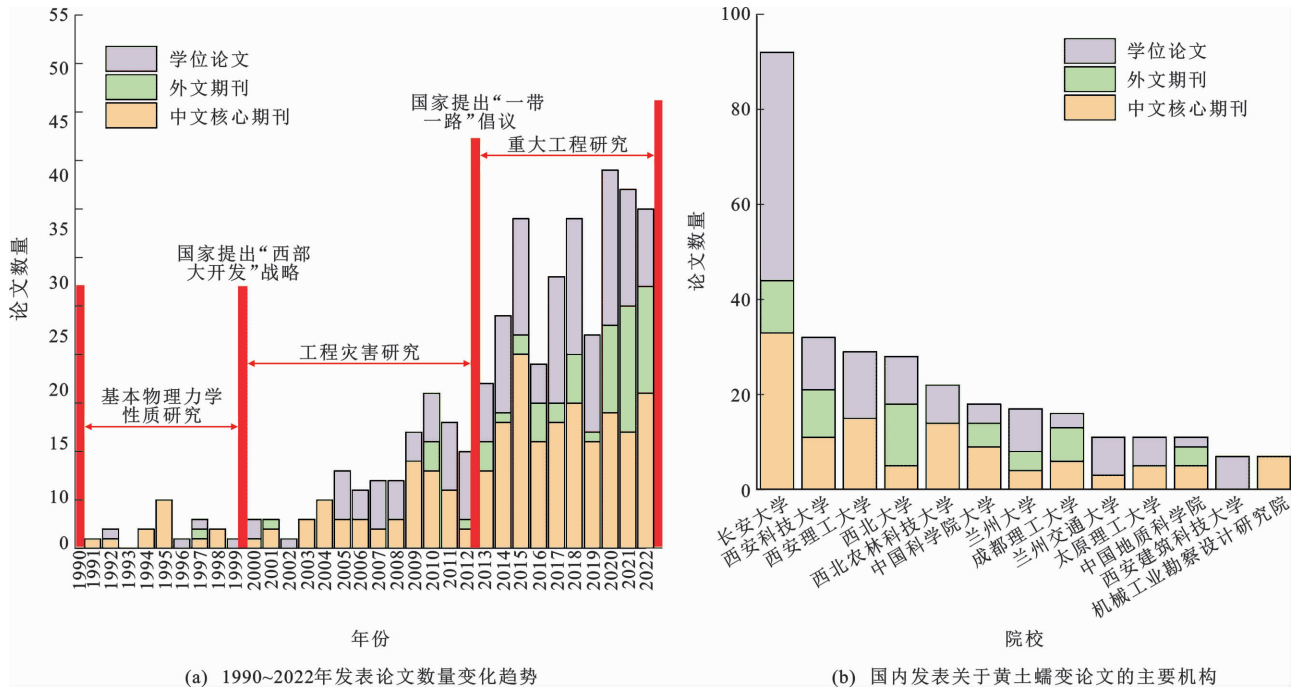


图1 黄土蠕变研究文献统计直方图

Fig. 1 Statistical Histograms of the Literature on Loess Creep

土在工程竣工后由于荷载、环境变化以及自重的作用会发生蠕变变形,持续时间长达几年甚至几十年。因此,越来越多的学者开始研究填方黄土的蠕变变形和填方工程的工后沉降以及预测,并提出了一系列黄土蠕变本构模型。从图1(b)可以看出,长安大学、西安科技大学、西安理工大学、西北大学和西北农林科技大学等地处西北地区的高等院校和科研机构自觉担负起新时代赋予的历史使命,在黄土蠕变研究方面起到了重要的科研支撑作用。

2 黄土蠕变试验方法

研究黄土蠕变特性的试验方法主要包括宏观和微观试验。宏观试验主要是通过一些土工设备研究黄土的时间-应力-应变变化特征。微观试验主要是通过光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)、压汞仪(MIP)、电子计算机断层扫描(CT)等设备或方法观察黄土蠕变过程中毫米级以下的微观结构特征。黄土宏观蠕变试验分为室内蠕变试验和现场蠕变试验。室内蠕变试验按照试验方法可分为一维固结蠕变试验、三轴/单轴蠕变试验、直剪蠕变试验、振动蠕变试验和平面蠕变试验等,具有可以严格控制试验变量、观测方便、成本低、可重复等特点。现场蠕变试验包括荷载试验、地基沉降监测、边坡位移监测、InSAR 遥感监测等,更具有针对性,贴合现场实际情况,为灾害的处理提供及时的反馈,而卫星遥感监

测则能从更大尺度上监测场地的时间-空间-位移变化。表1统计了国内外关于黄土蠕变试验方法的相关文献以及研究成果。

2.1 微观试验

黄土蠕变微观试验方法主要有光学显微镜^[28-29]、压汞仪^[30-31]、扫描电子显微镜^[32]以及电子计算机断层扫描^[33-34],可以观察黄土蠕变过程中的微观结构,揭示其机理,从而确定黄土中主要的微细观结构形式,并获取具有明确物理意义的微细观参数来反映黄土的蠕变特性^[35]。

表2总结了各种微观试验方法的优缺点。光学显微镜是利用可见光成像,观察黄土颗粒的结构和形状,具有设备小、观察灵活的优势;但放大倍数小,景深小,在视野范围内只有小部分影像清晰可见,且只能通过不同景深图像的照片合成,才能观察黄土样品的整体结构,或者将黄土样品切成薄片,通过偏光显微镜来观察黄土样品中各类矿物颗粒和孔隙的结构、形态。Xie等通过偏光显微镜观察三轴蠕变前后矿物颗粒的定向性,发现蠕变后较软的伊利石有明显的定向性,而较硬的石英和长石颗粒定向性较弱[图2(a)]^[11]。扫描电子显微镜以电子束为光源进行成像,具有分辨率高、景深大、保真度高等特点,能够较好地观察样品的表面微观结构,通过颜色的深浅展现样品表层的三维结构;扫描电子显微镜图像能直观显示黄土在蠕变前后微观结构的变化,

表1 黄土蠕变试验方法以及研究成果

Table 1 Test Methods and Research Results of Loess Creep

试验方法	试验所需设备	适用范围	研究成果	文献来源	
室内蠕变试验	一维固结蠕变	高压固结仪	高填方沉降	黄土蠕变变形占总变形的6%~23%，变形主要受到屈服强度、干密度、含水量和荷载控制	[6]和[20]
	三轴/单轴蠕变	三轴仪	边坡失稳	黄土三轴蠕变破坏应变在10%以下，三轴蠕变变形主要受试样干密度、屈服强度、含水量、偏应力以及围压控制	[9]~[11]和[13]
	直剪蠕变	直剪蠕变仪	边坡失稳	直剪蠕变破坏应变在4%以内，其他破坏因素和一维固结蠕变类似	[10]和[36]
	振动蠕变	振动三轴仪	车辆动荷载对路基的影响	在动力荷载作用下土体的循环累积应变分解为动力蠕变和弹性应变，而静偏应力能提高土体动模量，循环加载后试样振后强度提高、破坏应变变小	[18]和[37]
	平面蠕变	平面蠕变仪	黄土河堤和黄土路基的蠕变破坏等	在小剪应力条件下，平面蠕变量较三轴蠕变量明显；在大剪应力条件下，三轴蠕变量反而明显大于平面蠕变量	[38]和[39]
	K ₀ 固结蠕变	K ₀ 三轴蠕变仪	高填方沉降	在低应力条件下，呈现出典型的衰减蠕变，土体所受侧向应力与竖向应力成线性关系	[16]
	环剪蠕变	环剪仪	长距离滑坡	剪应力水平控制着阶跃型滑坡的变形行为，初始剪应力和法向应力对直线型滑坡的剪切特性影响显著	[40]
现场蠕变试验	地基沉降、边坡位移监测	位移监测系统	小区域工后沉降、滑坡监测，工程前期勘察	高填方地面沉降包括初始蠕变和稳定蠕变两个阶段；原位蠕变参数和室内蠕变试验参数有一定差异	[14]和[41]
	InSAR遥感监测	遥感卫星	大区域沉降监测	平山造城工程地面沉降的时间演化经历分为3个过程：快速、减缓、平稳；填方体厚度越大，其累计沉降量越大，沉降稳定所需时间越长	[42]和[43]
	荷载、浸水蠕变试验等	位移监测系统	湿陷蠕变	黄土地区现场湿陷变形规律分为5个阶段，即初期平缓段、浸水陡降段、中期平缓段、停水后的陡降段和后期平缓段；大厚度自重湿陷性场地20 m以下很难湿陷	[44]

表2 微观试验方法

Table 2 Microscopic Test Methods

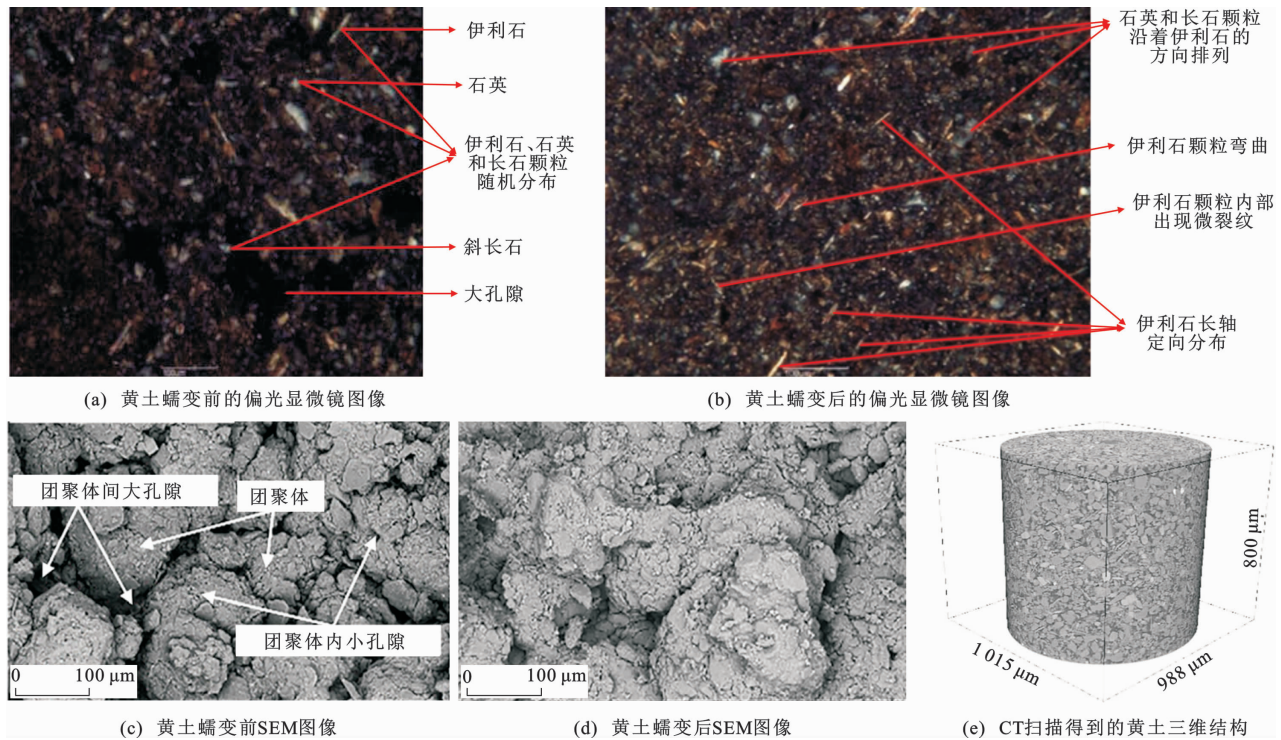
微观试验方法	原理	优点	缺点	文献来源
光学显微镜	利用可见光和透镜放大样品	观察方便、成本低	景深小，观察视野只有一部分是清晰的，分辨率只有几百纳米	[11]
扫描电子显微镜	利用电子束打到样品上，根据反射的深浅来成像	分辨率高、景深大、保真度高	样品的孔隙结构是二维或者伪三维，只能看到表层的颗粒结构	[9]、[11]、[32]和[45]
压汞仪	利用汞的不浸润性将汞压入样品中，观察孔隙的分布	真实测量各个尺寸孔隙的总体积	无法测量封闭孔隙；由于压汞设备的压力问题，部分微小孔隙和超大孔隙无法测量	[32]
电子计算机断层扫描	X射线穿透不同组成、密度、厚度的样品，其投影不一样	能直观观察到黄土颗粒和孔隙的三维结构	观察的尺寸和精度受到X射线的能量限制，试验费用比较高	[33]和[34]

过诸如 Image-pro Plus、PCAS^[46]等图像分析软件，能半定量分析得到黄土孔隙直径、孔隙数量、孔隙面积、孔隙形状比率、孔隙圆度、孔隙轮廓分形维度、方向性频率、熵的方向概率等参数的变化。压汞仪是利用汞的不浸润性，通过施加外压，将汞压入孔隙中，外压越大，汞能进入的孔隙半径越小。葛苗苗等通过压汞试验观察发现：在蠕变过程中，黄土大孔隙在应力作用下塌陷并减少，而小孔隙几乎不变^[32]。电子计算机断层扫描原理是高速电子轰击金属靶产

生的X射线穿透样品后，在后方的探测器上形成投影，投影的灰度与物质组成、密度及厚度有关；通过样品绕中心轴的不断旋转，得到不同角度的二维投影图，再利用数学方法重构出样品的三维结构，这样能直观地看到黄土内部微观尺度上的孔隙大小、形状联通方式等特征[图2(c)]。

2.2 一维固结蠕变试验

一维固结蠕变试验具有制样简便、易于操作、一次可以测试多组试样等优点。将直径61.8 mm、高



图(a)、(b)引自文献[11];图(c)、(d)引自文献[41];图(e)引自文献[47]

图2 黄土微观形态

Fig. 2 Micromorphology of Loess

20.0 mm 或其他尺寸^[48-49]的原状黄土或重塑黄土试样装在环刀里,施加覆压力,观察应力-应变-时间的关系。由于环刀限制了试样的横向变形,土体只能纵向变形,使得一维固结蠕变只有两个阶段,即衰减蠕变和稳定蠕变。谷拴成等改进了一维固结仪,将环刀尺寸由20.0 mm(高)×61.8 mm(直径)改为60.0 mm(高)×61.8 mm(直径),并在试样中心沿直径方向钻孔[图3(a)],使得传统固结仪可以得到蠕变的衰减、稳定和加速3个完整阶段^[50]。在图3(b)中,阶段Ⅰ是衰减蠕变和稳定蠕变阶段,阶段Ⅱ是加速蠕变阶段。

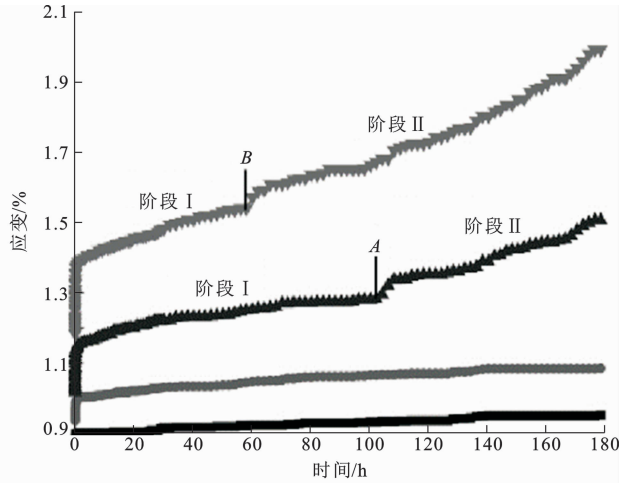
在一维固结蠕变过程中,加载初期的黄土变形速率较高,随着加载时间的增加,变形速率逐渐降低,最终趋于稳定^[14,51]。葛苗苗等发现:重塑黄土的一维固结蠕变应力-应变速率曲线上存在两个明显的转折点[图4(a)];根据转折点,整个蠕变过程可分为3个阶段,分别是瞬时变形、固结变形(衰减蠕变)和蠕变变形(稳定蠕变);蠕变变形主要发生在加载30~200 min后,并且占总变形的6%~23%^[52]。罗汀等对原状黄土进行为期72 d的一维固结蠕变试验,根据应变-时间曲线将蠕变分为5个阶段:OA段为固结变形阶段;AB段为过渡蠕变阶段;BC段为稳态蠕变阶段;CD段为再蠕变阶段;

DE段为终稳态蠕变阶段[图4(b)]^[8]。除此之外,黄土一维固结蠕变的应力-应变等时曲线具有3个特征:①应力-应变等时曲线通常为曲线,表明其变形是非线性的;②随着应力增大,应力-应变等时曲线向应力轴方向弯曲,表明随着应力水平增大,蠕变的非线性程度增大;③应力-应变等时曲线随着时间的延长而逐渐靠拢,表明其变形属于衰减型[图4(c)]^[51]。

表3展示了黄土一维固结蠕变的影响因素。从表3可以看出黄土一维固结蠕变的影响因素主要包括3个方面:黄土的干密度、含水量和上覆压力。对原状黄土而言,孔隙结构、胶结物质和裂隙发育程度对其蠕变特性也有较大影响。黄土一维固结蠕变过程中,随着上覆压力的增大,样品初始应变增大,稳定时间也随之增长,但蠕变变形却会减少^[52-53]。而在相同的上覆压力下,含水率越小,干密度越大,屈服强度就越大,蠕变量就越小,蠕变稳定时间也会更短。蒋甫等研究发现在低应力(13~130 kPa)作用下,黄土蠕变达到稳定的时间几乎是相同的^[48,54]。李金华等研究发现:在低应力(100 kPa)作用下,黄土稳定时间最短,50~70 h即可达到稳定;在高应力(2 400 kPa)作用下,黄土稳定时间比较长,需要190~290 h^[55]。



(a) 改进后的一维固结蠕变试样

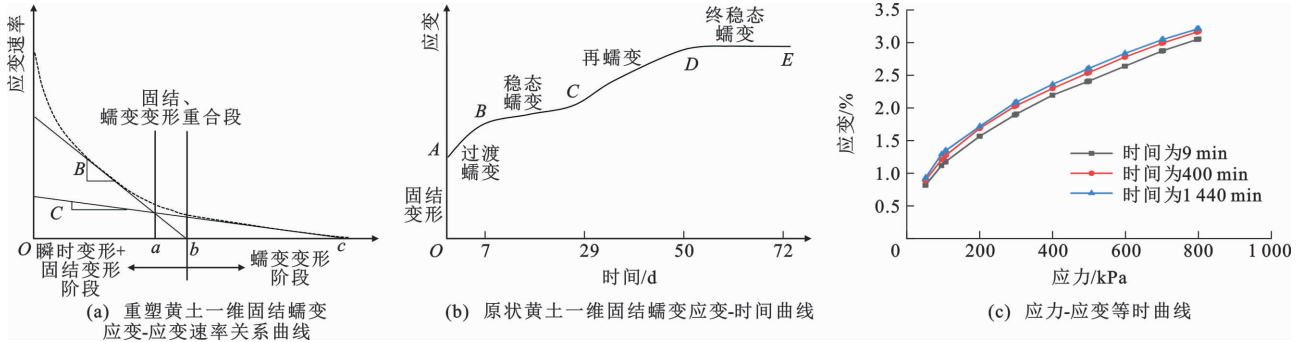


(b) 改进后试样的蠕变曲线

图片引自文献[50]

图3 改进后的一维固结蠕变试验

Fig. 3 Improved Test of One-dimensional Consolidation Creep



图(a)引自文献[52];图(b)引自文献[8];图(c)引自文献[51]

图4 一维固结蠕变曲线

Fig. 4 Curves of One-dimensional Consolidation Creep

表3 黄土一维固结蠕变的影响因素

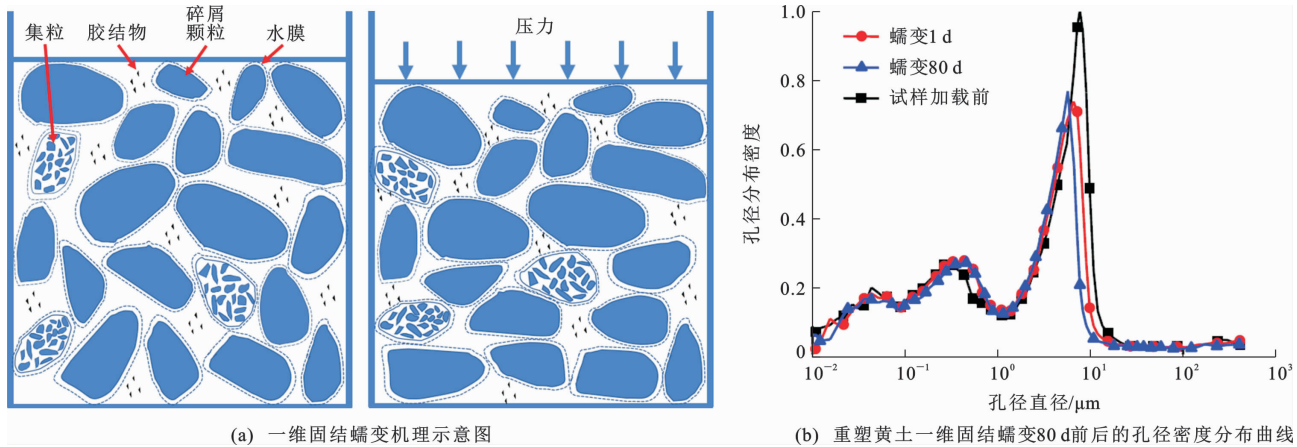
Table 3 Factors Influencing One-dimensional Consolidation Creep in Loess

影响因素状态	屈服强度	蠕变量	蠕变速率	稳定时间
干密度增加	增加	减小	减小	减小
含水量增加	减少	增加	增加	增加
上覆压力增加		减小	增加	增加

黄土是一种由土壤骨架、水分和气体等三相物质构成的疏松颗粒聚合物。随着干密度的增大,黄土颗粒之间的孔隙和自由水变少,扩散膜厚度变薄,黄土颗粒之间的静电引力随之变大。当受到外部荷载时,由于土粒之间的相互作用不易被打破,其蠕变效应相对较小。在相同的干密度下,含水量越高,黄土颗粒之间的自由水越多,则扩散膜的厚度越厚,黄土颗粒之间的相互作用随之减弱,也更容易产生滑移和蠕变,因此蠕变效应更显著^[20]。当蠕变应力大于结构屈服强度时,胶结力被破坏,荷载主要由骨架

颗粒承担,骨架颗粒之间会发生蠕滑,导致其变形不能恢复,因此,此时的变形主要表现为黏塑性蠕变^[7]。

黄土的中大孔隙是由碎屑颗粒和集粒间的孔隙构成的,而小微尺度的孔隙则是由集粒内的孔隙或者黏土颗粒间的孔隙构成^[56]。在一维固结蠕变过程中,由于侧向应变被环刀限制,所有颗粒只能上下移动或者旋转,碎屑颗粒的刚度较大,荷载主要由碎屑颗粒承担,所以在长期荷载作用下,骨架颗粒之间不断蠕滑,应力重新分布,黄土变得更加均匀,碎屑颗粒的定向性也有所增加[图5(a)]。同时,大孔隙进一步崩塌减小,而集粒内部和黏土颗粒间的小孔隙并未承受太多荷载,蠕变对其影响不大。葛苗苗等利用压汞仪观察重塑黄土一维固结蠕变前后的孔隙分布情况[图5(b)],发现在80 d左右的蠕变过程中,大孔隙明显减少,而小孔隙数量基本保持不变^[32]。



图(b)引自文献[32]

图5 一维固结蠕变机理

Fig. 5 Mechanisms of One-dimensional Consolidation Creep

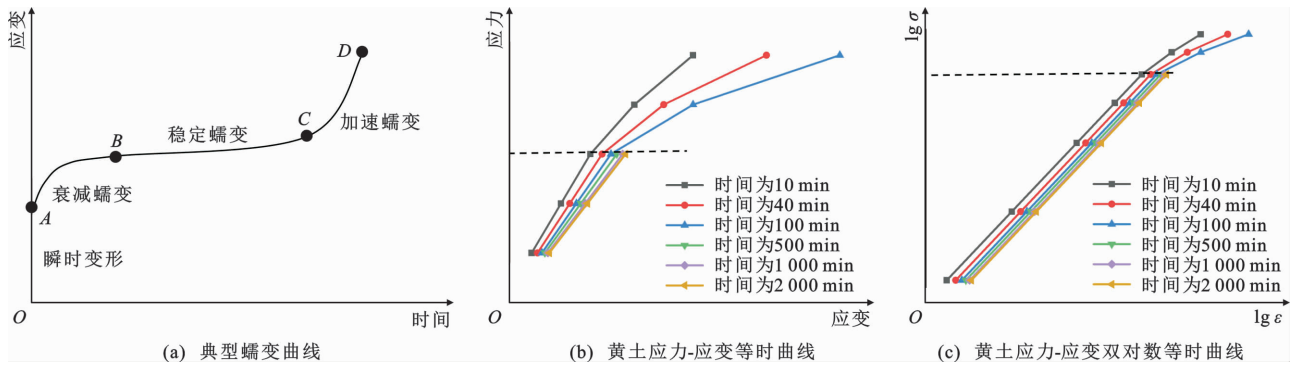
2.3 三轴蠕变试验

三轴蠕变试验主要内容是对不同围压下的试样施加一定的轴向力,观察应变与时间的关系。单轴蠕变试验是三轴蠕变试验的简化版本,即在无围压情况下进行的蠕变试验。三轴蠕变试验可以简便准确地获得蠕变曲线及其特征参数,在研究诸如边坡失稳、基坑临空面的缓慢水平移动等工程地质问题时,其受力状况也更加贴近于工程实际^[57]。根据黄土蠕变的时间-应变曲线,可以将三轴蠕变划分为衰减蠕变、匀速蠕变和加速蠕变3个阶段^[10]。图6(a)为一条典型的蠕变曲线。从图6(a)可以看出:OA段是瞬时变形阶段(在加载的瞬间,黄土变形会突然增加);AB段是衰减蠕变阶段(随着时间的增加,蠕变速率快速降低);BC段是稳定蠕变阶段(蠕变速率恒定或者趋于0);CD段是加速蠕变阶段(应变速率快速增加)。

目前,黄土边坡的稳定性评估多以其长期强度为依据,通常采用等时曲线确定黄土的长期强度。等时曲线是指在一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。不同时刻下的应力-应变等时曲线具有相似性,且各曲线随着时间的增长逐渐靠近,成为一束曲线簇,并表现出归一化的特征,这表明黄土具有较一致的非线性衰减蠕变特性。由于黄土本身为黏弹塑性的综合体,在相同条件下,随着偏应力的逐渐增大,等时曲线偏向应变轴,蠕变模量不断变小直至趋于一定值^[58]。长期强度一般是等时曲线中从直线变为曲线的拐点,也是黄土黏弹性和黏塑性的分界点^[59] [图6(b)]。在拐点不明显或者需要更精确地计算长期强度时,通过双对数等时曲线可以更明显地观

察到拐点^[60] [图6(c)]。通常情况下,黄土长期强度要比相应的应力状态下的峰值强度低30%左右^[61],同时黄土三轴蠕变破坏时,其轴向应变不会超过10%^[10]。

以往关于黄土三轴蠕变特性的研究,主要集中在干密度、含水率和围压等方面的影响。①其他条件一定时,干密度越大,黄土蠕变量越小,越容易到达稳定阶段^[10]。随着黄土干密度的增加,黄土试样内部孔隙不断变小,黄土颗粒之间的接触面积不断变大,只需要很小的蠕变量就能平衡外界的压力^[16]。黄土颗粒之间距离变小,黏土胶结面积增加,黄土颗粒咬合力也随之增加,导致长期强度提高。干密度较小时,黄土颗粒之间孔隙较多,荷载作用使得孔隙不断坍塌变形,因此稳定所需时间变长。②在其他条件相同的情况下,随着含水量的提高以及蠕变量的增大,稳定所需要的时间也相应增加,但长期强度却不断降低^[10]。这是由于在相同围压条件下,含水量的增加使黄土中自由水增多,接触界面上的水膜厚度也随之变厚,润滑作用增强,导致黄土颗粒之间的静电吸力减弱,次生胶结能力也大大降低,从而削弱了土体的力学性能。在外部荷载的影响下,黄土颗粒更易于产生滑移或错动,使其蠕变性显著增加^[58]。③偏应力相同时,随着围压的增大,蠕变量减小,稳定时间缩短,长期强度不断增加^[58,62]。这是由于在低围压条件下,土体横向约束作用较弱,黄土试样在压缩塑性破坏时鼓胀明显,且径向变形较大;而在高围压条件下,黄土颗粒被紧密压实,颗粒之间的咬合和嵌挤作用加强,从而使其具有更高的长期强度,从而降低了蠕变量^[63]。在相同应力比下,蠕变的稳定时间会随围压的增大而增大,



σ 为应力; ϵ 为应变

图6 黄土三轴蠕变曲线

Fig. 6 Triaxial Creep Curves for Loess

并且非线性度也会随之增大^[64]。这主要是因为高围压使得土体在较小的应力比下就到达土体的结构强度,产生黏性和塑性变形,并增大了其非线性变形。

在三轴蠕变过程中,黄土颗粒会发生滑动、转动、错位、破碎和团聚等不同的变形模式^[45]。在外力作用下,黄土颗粒不断发生运动变形,由点-点、点-面接触逐渐向点-面和面-面接触转化,弱胶结的黄土颗粒被剥离,部分碎屑颗粒和团聚体会发生破裂并重新聚合成新的团聚体,使黄土中的大孔隙数量减少,而小孔隙数量增多。由于土体中不规则或条状颗粒较圆颗粒更易受破坏,所以土体颗粒会逐渐变圆,并通过滑移、错位等方式在土体中形成更加稳定的结构,从而实现应力的再分配和能量的释放。

根据黄土三轴蠕变过程中偏应力的的大小和变形程度,可以将其划分为3个阶段:①当偏应力小于黄土的长期强度时,黄土颗粒不断地受到挤压,同时不断地排出空气和水分;荷载主要由较硬的石英和长石等硬质矿物颗粒承担;颗粒运动不明显,各种孔隙的数量、体积减小,胶结程度增大,颗粒与孔隙的方向性不显著[图7(a)];黄土试样内部结构调整较快,试样能在短时间内变形稳定,蠕变量较小,蠕变速度也不断降低并趋于0。②当偏应力逐渐接近黄土的长期强度时,在外荷载的作用下,颗粒之间较弱的胶结会优先断裂,较硬的石英和长石等矿物颗粒会发生一定程度的滑移、旋转,而较软的伊利石、蒙脱石等矿物颗粒重新取向,具有一定的方向性,但并不明显,同时孔隙的方向性也有所增加[图7(b)];在此过程中,土体结构损伤程度不断增加,需要更长的时间和更大的变形来重新调整内部应力和释放能量,土体开始发生黏塑性变形,即稳定蠕变阶段。③当偏应力超过黄土的长期强度时,由于土体内应

力不能及时调整,颗粒沿着剪应力方向产生大量错位和滑移,软质矿物被拉长甚至拉裂,硬质矿物沿软质矿物颗粒伸长方向重新排列,圆孔隙减少,长孔隙增加[图7(c)]。由于新平衡的建立难以协调原有平衡的崩溃速度,所以颗粒破碎加剧,孔隙变得更宽更长,土样被彻底破坏[图7(d)]。在蠕变过程中,黄土微观结构参数中的孔隙、颗粒大小和形状的变化最为明显,而其他微观结构参数的复杂性和方向变化较小;另外,蠕变期间重塑黄土的定向性明显高于原状黄土^[45]。

2.4 特殊类型蠕变试验

除常规的一维固结蠕变试验及三轴蠕变试验之外,还存在着诸如直剪蠕变、 K_0 固结蠕变及平面蠕变等特殊应力状态下的蠕变试验。在实际工程中,冻土、酸污染、纤维加固等因素都会对黄土蠕变产生显著影响。

2.4.1 直剪蠕变、 K_0 固结蠕变和平面蠕变试验

在直剪蠕变试验中,黄土的蠕变特征与三轴蠕变特征相似。在低剪切应力下,黄土为稳定的等速蠕变,且蠕变速率较小;当土体接近屈服极限时,加速蠕变持续时间非常短,随后迅速发生剪切破坏。与此同时,在蠕变破坏时,应变较低,一般低于4%,并且与蠕变破坏相对应的应变变量随着含水量的增大而减小^[10]。另外,剪应力和含水量的增加都会增大黄土的蠕变应变^[15]。黄土 K_0 固结蠕变和平面蠕变试验中,其蠕变特征也与三轴蠕变特征类似,即在固结压力低、含水量高或者偏应力较高的情况下,黄土蠕变特征明显。此外,当围压较低时, K_0 固结蠕变的黄土所受侧向应力与竖向应力存在线性关系^[16];当剪切力较小时,平面蠕变的蠕变量比三轴蠕变更大;而在剪切应力较大的情况下,三轴蠕变的蠕变量比平面蠕变更高^[38]。

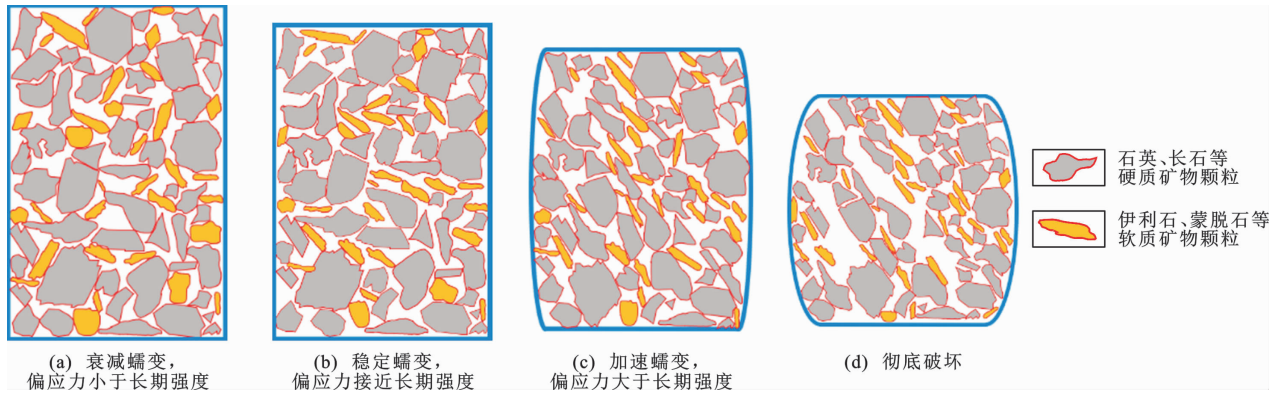


图7 黄土三轴蠕变的各个阶段

Fig. 7 All Stages of Triaxial Creep in Loess

2.4.2 酸污染蠕变试验

酸雨、工业废水等对地表及地下水源造成了严重的影响,导致黄土地区呈现酸化状态。酸性溶液可引起黄土孔隙结构的破坏、胶结物质的溶蚀、水溶盐类的损失,并使其力学性能发生显著的改变,具体表现为强度下降、湿陷变形加剧。随着酸性溶液浓度的增加,酸蚀黄土的蠕变量也随之增大,且随着应力的增大,这种增大幅度也随之增大。这主要是因为黄土与酸性物质发生了化学反应,产生了大量的水分,增加了黄土颗粒表面扩散层的厚度,削弱了黄土颗粒之间的吸引力,从而使其具有更强的润滑作用,在上覆荷载的影响下,更容易发生变形^[65]。

2.4.3 纤维加固蠕变试验

在填方工程或者地基工程建设中,为了提高土体的强度与稳定性,常常需要对其进行加固处理。除了控制含水量和压实度外,还可在土中加入纤维。常用的纤维有玄武岩纤维、聚丙烯纤维、木素纤维、布匹废料、秸秆等,这些材料来源广泛、成本低廉。Xue等利用大型剪切盒研究黄土-秸秆的剪切蠕变性能,发现秸秆能限制颗粒在剪切面的相对运动,增加黄土的长期剪切强度,秸秆最佳掺量介于0.55%~0.65%^[66-67]。汪国刚等在黄土中掺入玄武岩纤维,并研究其三轴蠕变行为,发现:加入0.25%的纤维后,抑制变形效果最佳;同时,随着含水量的增加,抑制变形效果会降低,且偏应力越大,这一现象就越明显,另外围压的增大会提高加筋效果^[68]。褚峰等利用涤纶坯布下脚料制成的纤维纱加固黄土研究其一维蠕变特性,发现:纤维纱可以有效地抑制黄土一维蠕变变形,并且随着纤维纱的加入比例和纤维纱长度的增加,纤维纱黄土的蠕变应变呈现出先降低后增加的趋势;以0.3%的掺入比例和30mm长度的纤维纱为最优;在高围压条件下,纤维纱

条加筋黄土比素黄土达到稳态蠕变所需的时间长^[69]。

上述研究表明,在黄土中加入适量的各种纤维,可以有效地提高黄土的长期强度,并对黄土的蠕变变形进行控制。这主要是因为:当纤维在黄土中受到应力影响时,不仅会表现出握裹作用,从一定程度上抑制土体变形,同时还可以在土壤中产生一些纤维网状结构(平面纤维网结构和空间纤维网结构),从而提高土样的抗变形能力^[68]。纤维材料的种类、含量、长度等对土体的蠕变变形特性有很大影响,其根源在于纤维与土体、纤维与纤维的接触关系。纤维抗拉强度高,表面粗糙,在黄土中均匀分布,可有效增强黄土的抗拉强度,控制黄土的蠕变变形,但在实际应用时,仍需综合考虑成本、施工难度、加固效果等因素。

2.4.4 冻土蠕变试验

随着我国西北地区社会经济的迅速发展,国家建设了大量的基础设施,而这些基础设施大多位于冻土区。冻土颗粒间存在冰的胶结作用,在外部荷载作用下表现出较强的蠕变特性,可能对冻土基础上的建筑结构造成不利影响。冻土三轴蠕变试验规律与常温黄土三轴蠕变试验规律相似。在低应力水平下,冻土发生衰减型蠕变,体积减小;在高应力水平下,冻土进入非衰减型蠕变,体积不断增加^[70]。然而,冷冻条件下的黄土蠕变机制与常温条件下不同。冻土是由土颗粒、冰和自由水构成的特殊三相土体,受外力作用时表现出明显的蠕变特征。同时,在应力作用下,冻土中的冰层可能发生融化或破碎,导致冰晶的胶结力下降、自由水含量增加、土体颗粒易于运动,冻土蠕变特性增强。此外,冻土中冰颗粒的再结晶还会增强冻土的力学性能,其强化程度受再结晶温度、持续时间、变形程度、应力状态等因素

的影响,对冻土力学特性的损伤演化有显著影响^[71]。张长庆等认为冻土在蠕变过程中产生的微观结构损伤与土体的组分、初始结构、含冰量、干密度等密切相关,而应力水平又是影响蠕变损伤形态特征尺度的主控因素,在不同的应力水平和蠕变持续时间下,损伤产物的形貌特征存在很大差异^[72-73]。董连成等认为:温度对冻土的影响最大,随着温度的升高,初始应变变大,破坏时的蠕变应变也越小,非稳态蠕变所占时间逐渐缩短,稳态蠕变所占时间逐渐加长;加载应力、土壤性质、温度对初始流变应变及破坏应变的影响不大^[74]。Zhou 等发现冻土蠕变速率对围压和温度十分敏感,在考虑冰晶压力破碎和融化现象的基础上,建立了冻土的速率依赖性构成模型^[75]。Li 等提出一种改进的西原模型,该模型揭示了冻土蠕变过程中温度、应力等因素对冻土蠕变的影响^[21]。Wang 等基于均质化理论,将冻土结构分为摩擦元和黏结元,从微观角度对冻土蠕变过程中冰土的破坏模型进行描述,建立了冻土的二元介质蠕变本构模型^[76]。

3 黄土蠕变本构模型

黄土蠕变本构模型的建立是土体蠕变研究的关键。只有建立起与应力-应变-时间三者相对应的本构关系,才能对土体蠕变特性进行准确描述。黄土蠕变本构关系可以分别从黄土蠕变的微细观和宏观角度建立,或把两者结合起来^[1]。在宏观上,蠕变本构模型可分为经验本构模型、半经验半理论本构模型和元件理论本构模型^[35]。表 4 总结了 3 种黄土蠕变本构模型的原理和优缺点。元件理论本构模型

通过串联或并联一些力学元件组合成不同的力学体,反映出土体黏弹塑性特性,建立黄土的力学本构方程;经验本构模型是通过统计试验数据进行分析,获得适合于特定类型的土体并具有一定实用价值的经验公式^[77];半经验半理论本构模型将经验与元件理论本构模型的优点结合起来,用元件理论本构模型描述黄土的线性特征,用经验本构模型描述黄土的非线性特征。黄土具有很强的地域性,不同的蠕变本构模型具有不同的适用范围,应根据具体情况选用。

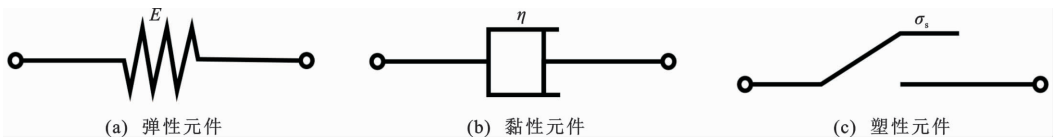
3.1 元件理论本构模型

元件理论本构模型是采用一些简单的元件来代表土体的某些性质。常见的元件有弹性元件(或称胡克体 H)、黏性元件(或称牛顿体 N、黏壶)和塑性元件(图 8)。在荷载作用下,弹性元件变形完全符合胡克定律;在应力达到屈服极限时,塑性元件产生塑性变形,即使应力不再增加,其应变也会继续增长;受外力作用时,黏性元件应力和应变速率成线性关系,符合牛顿流动规律。元件理论本构模型通常将这些元件串联或者并联在一起反映土体的黏弹塑性,用元件理论本构模型建立的本构方程概念直观简单、物理意义明确,得到了许多学者的青睐。表 5 总结了目前国内外有关黄土蠕变研究中常规元件理论本构模型,所有模型是在 Kelvin 模型(弹簧与黏壶的并联模型)的基础上修改得到的。常规元件理论本构模型通过并联或者串联多个元件,使模型描述的蠕变曲线更接近于实际情况,但这会导致待定参数过多,给工程应用带来很大不便。在选择基础模型时,不仅要考虑能够较为精确地反映黄土的实

表 4 黄土蠕变本构模型的种类和优缺点

Table 4 Types of Loess Creep Constitutive Model and Their Advantages and Disadvantages

模型类型	模型原理	优点	缺点
经验本构模型	利用数学公式来总结蠕变随各个条件的变化(非线性特征)	简单明了,参数少,工程应用比较方便	缺乏理论支持,模型适用性比较低
元件理论本构模型	利用力学元件串联或者并联组成力学体,反映土体黏弹塑性(线性特征)	模型直观,物理意义明确	公式参数比较多,拟合困难,无法描述非线性和加速蠕变
半经验半理论本构模型	对于元件理论本构模型无法解释的部分,利用公式来解释(同时描述线性和非线性特征)	能同时描述蠕变的线性和非线性特征	各个参数物理意义不明确



E 为弹性模量;η 为黏滞系数;σ_s 为结构屈服强度

图 8 基本元件

Fig. 8 Basic Elements

表 5 常规元件理论本构模型

Table 5 Conventional Element Theory Constitutive Models

模型名称	模型示意图	文献来源
麦钦特蠕变模型		[7]、 [48]、 [54]、 [78]
Burger模型		[13]、 [45]、 [57]、 [79]~ [85]
非饱和黄土加载体积流变模型		[86]
五元件广义 Kelvin 模型		[87]
黏弹塑性流变模型		[88]
Mod-Burgers模型		[14]、 [22]和 [49]
改进西元模型		[89]和 [90]
考虑瞬时损伤的统计损伤流变模型		[12]和 [91]
黏弹塑性九元件蠕变模型		[92]

注: E_i 表示第 i 个弹性元件的弹性模量; η_i 表示第 i 个黏性元件的黏滞系数; σ_i 表示第 i 个塑性元件屈服应力。

际蠕变特性,而且要使得模型中的待定参数尽可能少^[27]。

由元件组成的本构模型只能表现出线性特征。而黄土作为一种典型的非线性材料,元件理论本构模型不能全面完整地描述其蠕变特性,特别是黏塑

性和加速蠕变特征。为了能够更有效、更真实地模拟出黄土的非线性变形特点,一些学者在元件理论本构模型中引入非线性元件或者损伤变量,建立非常规元件理论本构模型^[93-94]。表 6 总结了国内外文献中非常规元件理论本构模型。非常规元件理论本构模型的核心在于非线性元件的系数并非定值,而会随着时间、应力或者其他参数的变化而变化。应用最为广泛的是 Abel 黏壶,其是一种介于理想固体和理想流体的材料介质,黏滞系数并不是定值,一般是关于时间和应力的函数。

3.2 经验本构模型

黄土蠕变经验本构模型是以蠕变试验数据为基础,对黄土蠕变曲线进行分析得到的数学表达式。该模型参数比较少,公式简单明了,在工程应用中也比较方便快捷,但由于缺乏理论依据的支撑,模型受限因素比较多,尤其是土体类型和应力状态发生变化时,经验本构模型的拟合度会大大降低^[95]。

土体蠕变本构关系的建立应遵循 4 项原则^[4,58]:①蠕变应力的合理适用范围;②能够描述某一范围的土体类型;③考虑应变随时间变化的线性或非线性关系;④参数易于确定。蠕变经验本构模型主要由应力、应变和时间组成,在分析这三者关系时,一般会对应力-应变/应变速率和时间-应变/应变速率的关系进行单独分析。获得经验本构模型公式的方法主要有两种:第一种是通过对现有公式的拟合,并求取相关参数;第二种是基于蠕变规律建立相应的经验公式。

表 7 总结了文献中出现的经验本构模型以及各个参数之间的关系。模型参数的求取都是运用数理统计的思想对试验曲线回归拟合得到的,也就是统计值,具有一定的不确定性,因此,参数越多,模型的稳定性越差^[58]。每个模型都有自己的优势。比如, Singh-Mitchell 模型瞬时变形和初期衰减蠕变拟合比较好,但后期稳态蠕变拟合较差,应力水平在 20%~80% 时拟合效果比较好;而 Mesri 模型不受应力水平的限制,且公式中各主要参数均有明确的物理意义^[64];应变-时间关系用对数拟合比用幂函数、指数函数等方法拟合得更好。各个经验本构模型具有一定的区域性,对于其他地区的黄土蠕变拟合不一定能取得理想的效果。

3.3 半经验半理论本构模型


半经验半理论本构模型综合了元件理论本构模型与经验本构模型的特点,通过元件理论本构模型描述黄土的线性特性,用经验本构模型描述黄土的

表 6 非常规元件理论本构模型

Table 6 Non-conventional Component Element Theory Constitutive Models

模型名称	模型示意图	模型说明	文献来源
非线性黏弹塑性蠕变模型		<p>引入一个非线性黏壶来描述土体加速蠕变阶段的变形。在土体衰减和稳定蠕变阶段,该黏壶黏滞系数(η_3)保持不变;在土体进入加速蠕变阶段后,黏滞系数随时间的增加而逐渐降低。</p>	[96]
改进非线性西原模型		<p>引入分数阶微积分构建的 Abel 黏壶,Abel 黏壶的类黏滞系数是应力和时间的函数。</p>	[93]
变参数黄土蠕变损伤模型/非线性含水损伤模型		<p>引入分数阶微积分构建的 Abel 黏壶,Abel 黏壶的类黏滞系数是应力和时间的函数。</p>	[97]和 [98]
考虑含水损伤的非线性蠕变模型		<p>提出两种非线性黏滞体牛顿元件,用以描述沿途材料的非线性蠕变和加速蠕变,黏滞系数分别是应力和时间的函数。</p>	[62]
改进后的黄土四元模型		<p>在 Burger 模型的基础上引入一个 Abel 黏壶。</p>	[99]
基于分数导数和连续体损伤力学的新麦克斯韦蠕变模型		<p>由弹塑性元件和 Abel 黏壶组成。当应力小于屈服强度时,弹塑性元件退化为胡克体;当应力大于屈服强度且时间趋于最终失效时间时,弹塑性元件可以描述加速蠕变阶段。</p>	[100]和 [101]
HD 蠕变模型		<p>由一个弹塑性元件、一个硬化黏壶和一个 Abel 黏壶组成。硬化黏壶在传统黏壶的基础上引入了硬化函数,反映了蠕变过程中对土壤的硬化作用。</p>	[102]
利用变参数的 Kelvin 模型		<p>模型的弹簧变量和黏壶的黏滞系数是与应力水平有关的变量。</p>	[51]
考虑瞬时塑性变形的流变模型		<p>在 Burger 模型的基础上引入一个有限硬化元件,表示瞬时塑性变形,其本构方程为 $\sigma = \varphi_p(\epsilon) \cdot \epsilon$。</p>	[103]
修正 Burgers 模型		<p>在 Burger 模型的基础上引入一个变系数的黏壶。当应力小于屈服强度时,黏壶的黏滞系数为常数;而当应力大于屈服强度时,该黏壶为加速变形。</p>	[104]
改进 Burgers 模型		<p>在 Burger 模型的基础上引入一个 Abel 黏壶以及一个应变触发器的黏壶。</p>	[105]
分数阶改进西原模型		<p>将西原模型中考虑将代表理想流体的牛顿黏壶替换为介于理想固体与理想流体之间的 Abel 黏壶。在低应力及较高应力水平作用下,选择常系数的 Abel 黏壶;而在高应力水平作用下,选择变系数的 Abel 黏壶。</p>	[94]

续表 6

模型名称	模型示意图	模型说明	文献来源
考虑基质吸力的改进 Burgers 模型		在 Burger 模型的基础上引入线性黏弹性模量 $E_2(S, t)$ (关于吸力和时间的函数) 来解释母质吸力对非饱和黄土中蠕变行为的影响和带有应变触发器的黏壶来描述加速蠕变阶段的土体变形。	[106]

注: t_s 为土体进入加速蠕变阶段的时间; n_1 为与土体本身性质有关的参数; ξ_i 为第 i 个分数阶软体元件的类黏滞系数; β_i 为第 i 个分数阶软体元件的阶数; $\lambda_1, \lambda_2, c_1, c_2, \beta_{sp}$ 为黏滞参数; ξ' 为黏弹性体的剪切模量; G 和 K 分别为胡克体的剪切模量和体积模量; α, μ 和 γ 为材料常数; η_0 为初始黏滞系数; $\varphi_p(\epsilon)$ 为有限硬化元件中的瞬时塑性变形函数; σ 为土体受到的应力; ϵ 为土体的应变; n 为反映试样加速蠕变率的非线性参数 (n 值越大, 加速蠕变率变化越快); η_{nl} 为非线性黏壶的黏滞系数; m_L 是流变学系数; c 是材料参数; η^1 和 η^2 为常系数 Abel 黏壶的黏滞系数; η^3 为变系数 Abel 黏壶的黏性系数; S 是基质吸力; t 是时间; ϵ_a 是进入加速蠕变阶段时土体的应变值。

非线性特性, 将两者组合在一起描述土体蠕变的全过程。该模型不仅可以描述黄土的线性和非线性特征, 还能描述黄土的加速蠕变过程, 在实际工程中具有一定的实用价值。表 8 总结了文献中的半经验半理论本构模型及其特点。

4 不同工程类型黄土蠕变破坏特征

4.1 黄土边坡蠕变失稳

黄土滑坡的形成是一个十分复杂的过程, 从孕育、发展到终止的整个阶段, 涉及许多外部和内部因素的影响, 同时涉及复杂多变的边界条件和各种迭代、反馈作用^[107]。黄土边坡蠕变失稳的研究主要集中在长期强度及其影响因素、机理分析、数值分析、现场监测以及边坡治理等方面。引起黄土边坡蠕变失稳的根本原因是土体受到的应力大于其长期强度。这通常是由于降雨、灌溉和渗透等因素引起土体含水量增加, 从而降低了土体的长期强度, 使土体发生蠕变变形, 最终诱发滑坡, 严重时甚至引发灾难性事故。因此, 确定不同工况下的长期强度和蠕变特性可为黄土滑坡的稳定性评价及工程防治提供参考。许强根据边坡变形-时间曲线特征, 结合岩土体流变试验结果, 将滑坡划分为稳定型、渐变型、突发型 3 种类型, 并给出了这 3 种类型变形产生的力学条件; 同时认为黄土滑坡在变形前期以颗粒与分子间的流动为主, 而在变形后期则以微破裂为主要特征, 并发挥着重要作用^[108]。滑带土受地形、地层、水文地质和侵蚀强度等影响, 其长期强度较弱, 滑带土的蠕变特性是研究黄土边坡蠕变失稳的重点^[108]。汪斌等发现滑带土表现出很强的蠕变特征, 其长期强度低于峰值强度约 30%^[61]。王新刚等发现随着黄土滑坡滑带土含水量的增大, 蠕变稳定时间变长, 试样发生鼓胀破坏, 瞬时强度和长期强度都降低, 并且两者之间的差异有增大的趋势^[59]。周静静等发现滑带土的蠕变特征在低速缓动型滑坡的

形成和演化中起着重要的控制作用, 且随着滑坡埋深的增加, 滑动速度逐渐变慢, 同时滑带土发生蠕变破坏后, 土体结构迅速破坏, 孔隙定向性降低, 孔隙数量急剧增多^[36, 109]。Lian 等发现干湿循环后的原状黄土长期强度不断降低, 不规则的大孔隙增加, 而中孔隙减少^[110]; 龙建辉等研究认为, 黄土滑带土呈现塑性破坏, 其蠕变特征与坡体失稳时间预测模型之间存在着内在联系, 并据此对滑坡的不同破坏模式进行预测^[10, 111]。也有学者通过室内实验获取土体基本参数, 并利用数值模拟软件 FLAC^{3D} 实现了对黄土滑坡的监测和预警^[80, 112]。

黄土边坡蠕变失稳是由多种因素造成的, 不能仅局限于滑带土的蠕变性质, 还要同时考虑地质地貌的多样性、人类工程的扰动、坡体表面植被以及裂缝的分布等时空变化特征^[113]。黄土边坡蠕变失稳在一定程度上具有随机性, 在早期变形缓慢, 难以排查, 因此, 需要利用 InSAR 等区域尺度的监测手段及时发现边坡的变形, 并对重点边坡进行现场监测, 另外可以通过改善边坡排水、增加边坡土体压实情况来降低蠕变破坏的风险^[114]。

4.2 路(地)基工后沉降

随着“西部大开发”战略和“一带一路”倡议的持续推进, 黄土高原高填方工程(如高速铁路、高速公路、平山造城)日益增多, 极易引发边坡失稳和路(地)基沉降, 影响当地经济发展和社会安定。针对这一现象, 广大学者主要通过室内实验、模型试验、原位监测、数值模拟、数学建模等手段, 围绕场地沉降变形规律和工后沉降预测方法等关键问题开展研究。

路(地)基工后沉降规律不仅仅和黄土自身的物理力学特性密切相关, 还与土体边界条件、环境因素和施工工艺密切相关, 但目前对这些因素的研究难以全面考虑。于永堂利用大型土工离心试验系统, 研究沟谷软硬、沟谷地形、填土厚度、填土压实度、填

表7 经验本构模型中应力-应变和时间的关系

Table 7 Relationships Between Stress-strain and Time in Empirical Constitutive Models

模型序号	应力-应变关系	应变-时间关系	其他参数和应力-应变的关系	文献来源
1	幂函数关系 $\epsilon = A\sigma^B$	双曲线函数关系 $\epsilon = \frac{t}{C+Dt}$		[16],[39],[63]、 [104],[115]和[116]
2	双曲线函数关系 $\epsilon = \frac{\sigma}{A+B\sigma}$	幂函数关系 $\epsilon = Ct^D$		[68]
3	指数函数关系 $\epsilon = A^{B\sigma}$	幂函数关系 $\epsilon = Ct^D$		[85]
4	指数函数关系 $\epsilon = A^{B\sigma}$	双曲线函数关系 $\epsilon = \frac{t}{C+Dt}$		[64]
5	对数函数关系 $\epsilon = A \ln \sigma + B$		应变速率和时间双对数曲线呈线性关系 $v = \frac{t}{C+Dt}$	[58]
6	幂函数关系 $\epsilon = A\sigma^B$		应力-应变幂函数里面的参数和时间分别呈幂函数和对数函数关系,即 $A = Ct^D$ 和 $B = E \ln t + F$	[15]
7		对数函数关系 $\epsilon = A \ln t + B$		[117]
8		$\epsilon = A + B \ln t + Ct$		[95]
9		双曲线函数关系 $\epsilon = \frac{t}{A+Bt}$	应变-时间双曲线里面的参数 A 、 B 和应力成对数关系,即 $A = C \ln \sigma + D$ 和 $B = E \ln \sigma + F$	[53]
10		双对数呈线性关系 $\ln \epsilon = A + B \ln t$	应变-时间双对数线性关系中截距和应力成对数关系,即 $A = B \ln \sigma + C$	[118]
11		对数函数关系 $\epsilon = A \ln t + B$	分数线性蠕变模型	[119]
12			应变速率和时间双对数曲线成线性关系,即 $\ln v = A + B \ln t$;其截距和应力成对数函数关系,即 $A = C \ln \sigma + D$	[22],[55]、 [69]和[120]
13			考虑时间效应的 UH 模型	[121]
14			时间和应变、应力和应变都成双对数线性关系,即 $\ln \epsilon = A + B \ln t$ 和 $\ln \epsilon = A + B \ln \sigma$	[22]
15			通过 BP 神经网络模型对应力-应变-时间模型做预测	[53]
16			时间/应变和时间成线性关系,即 $\frac{t}{\epsilon} = A + Bt$; 其截距和应力成指数关系,即 $A = C^{D\sigma}$; 斜率和应力成线性关系,即 $B = E + F\sigma$	[122]
17			应变速率与时间成幂函数的关系,即 $v = At^B$;应变速率与偏应力成对数函数关系,即 $v = C \ln \sigma + D$	[57]
18			“时间硬化”幂函数法则建立 黄土蠕变模型 $v = A\sigma^B t^C$	[123]

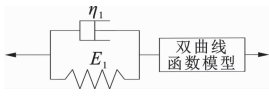
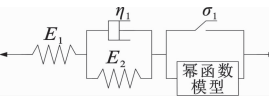
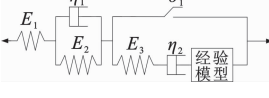
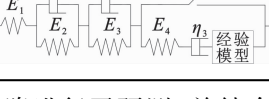
注: v 为应变速率; A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 为经验本构模型拟合参数。

土增湿等条件变化下的填方场地在施工期和工后沉降过程中的沉降变形规律^[124]。孟宪发现:高填方路基的变形主要由地基沉降和填土压缩变形构成,地基沉降占 1/4~1/3;此外,V形沟道有明显的土拱效应,使土体应力发生重分布,卸荷效应明显^[125]。邢国耀通过对黄土高填方机场沉降监测资料的分析发现:其沉降变形具有瞬时沉降大,发展迅速;后期固结和次固结沉降比例小,发展缓慢,持续

时间长;沉降最大值出现在最厚填筑区^[126]。朱才辉等通过对山西吕梁机场黄土高填方地基变形监测资料和电阻率模型进行交叉验证,得出了工后沉降以原始地基和填方顶面以下 2 m 土体的固结变形以及深层填筑体的蠕变变形为主要因素的结论,并定量分析了填土高度、填筑率、综合压实度和施工时间等与工后沉降之间的关系^[127]。Liu 等利用一维固结蠕变数据和分层总和法,对黄土高填方工程的

表 8 半经验半理论本构模型

Table 8 Semi-empirical and Semi-theoretical Constitutive Models

模型序号	模型示意图	模型特点	文献来源
1		假定土体仅发生竖向变形,而不发生侧向变形,反映应力-应变-时间的三维关系	[24]
2		利用幂函数模型反映瞬时非线性黏塑性变形	[25]
3		建立不同含水量中更新世黄土的非线性流变本构模型	[26]
4		高湿度中更新世黄土非线性流变本构模型	[27]

工后沉降进行了预测,并结合现场检测数据对其进行了验证^[116]。张豫川等利用一维固结蠕变试验获得了黄土的蠕变规律,并运用 FLAC^{3D} 软件对黄土高填方的沉降变形进行了计算,发现高填方的沉降稳定期是 3~4 年,工后沉降主要集中在填筑完成后的 1 年,同时随着填筑高度的增加,稳定期也随之延长^[128]。朱才辉等通过现场监测与室内压缩实验相结合的方法,分离出高填方黄土工后固结变形与次固结变形;并采用 FLAC^{3D} 软件对山西吕梁机场 80 m 深填土工后沉降进行了分析,预测得到深厚黄土地基上的高填方沉降稳定时间需 3~4 年,建议在竣工后 1.5~2.0 年内开展基础设施建设^[14,41]。周远强等通过 PLAXIS 软件分析填方体因素(填土高度、填土速率、填料压实度、含水量等)和原地基因因素(强夯法的强夯深度以及碎石桩法的桩长、桩间距、桩径等)对高填方工程工后沉降的影响^[129]。许强等利用 InSAR 技术在陕西延安新区开展了地面沉降分布研究,发现道路交通、水文地质、降雨量、填土厚度及工程性质等因素对工后沉降的影响较大^[42-43]。

4.3 隧道围岩蠕变

我国西北地区大量隧道穿越黄土地层。在荷载的长期作用下,隧道因蠕变发生渐进破坏,稳定性不断下降,对隧道的建设与运行造成严重影响^[94]。近几年在铁路和公路黄土隧道的建设和运行中,普遍

出现基底沉降、地表开裂和坍塌、渗漏水、衬砌开裂等问题。大截面黄土隧道的施工对围岩的干扰更大,易发生突发性坍塌、大面积地层沉降开裂、运营期衬砌开裂等灾害^[81]。

目前,国内外学者对黄土隧道的蠕变研究和稳定性分析主要以室内实验、现场实测、数值模拟及理论分析为主。李焯等以青海大西山黄土隧道施工过程中变形监测数据为基础,结合数值模拟手段,采用广义开尔文 3 单元流变力学模型反演隧道黄土黏弹性流变学参数,并研究大西山隧道围岩的长期稳定性^[130]。李玉波等在室内增湿、蠕变试验的基础上,提出了一种考虑含水量变化和蠕变效应的修正围岩压力计算方法^[131]。罗彦斌等综合运用现场测试、数值模拟和理论分析等手段,现场测试黄土隧道拱顶变形,揭示其变形规律,提出了基于隧道二次衬砌安全临界状态的最佳施作时机计算方法^[132]。朱才辉等利用单轴蠕变试验,探讨了在不同含水量条件下,中更新世原状黄土的蠕变特性和相关参数,并利用 FLAC^{3D} 软件分析隧道内围岩压力和收敛变形规律,发现随着地层原始含水量的增加,围岩压力和收缩变形的变化也随之增大,围岩压力比和收敛变形比反而呈减小趋势,同时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,放大效应更明显^[133]。欧湘萍等对甘肃定远隧道湿陷性黄土进行了研究,发现对数经验本构模型具有广泛的适用性,且拟合度较高,而 Burger 模型在湿陷性黄土隧道的长期稳定性分析和计算中有着明显的优势^[95]。同时,欧湘萍等采用 FLAC^{3D} 软件对不同条件下的围岩应力、位移变化规律及围岩稳定性进行了分析,发现隧道最大埋深处为最不利的区段,在约 230 d 后沉降基本收敛,进入稳定期^[134]。Zhang 等通过 ANSYS 软件模拟了不同条件下的隧道施工引起的工后沉降,发现隧道顶部沉降最大,大约 300 h 后沉降逐渐稳定,隧道在车辆荷载以及黄土湿陷作用下会产生一定的附加沉降,而高压旋喷加固土体后,附加沉降会明显减小^[135]。Li 等采用 PFC^{2D} 软件对高填方明挖隧道周围土压力的变化进行了数值模拟,发现隧道周围土体由于应力重分布而出现应力集中现象,但这种现象随时间的推移逐渐减弱^[136]。此外, Li 等利用 FLAC^{3D} 软件就隧道宽度和斜坡角度对隧道压力的影响进行了模拟,发现无论减小隧道宽度还是增加斜坡角度,都会对隧道顶部的应力产生影响,但是随着时间的推移,这些应力会逐渐消失^[137]。

5 黄土蠕变研究存在问题与发展趋势

5.1 存在问题

从目前研究情况来看,黄土蠕变研究始终与国家重大战略发展紧密相关。前人在试验方法和本构模型等方面已取得了大量成果,这对于黄土地区地质灾害的评价和防治及实际工程问题的解决具有积极的指导意义。目前,对其蠕变机制的认识还不够全面,部分宏观和微细观层次的蠕变问题还未得到很好的解决,比如复杂因素对黄土蠕变的局限性、黄土蠕变本构模型的局限性、黄土蠕变微观观测方法的局限性等(图9)。

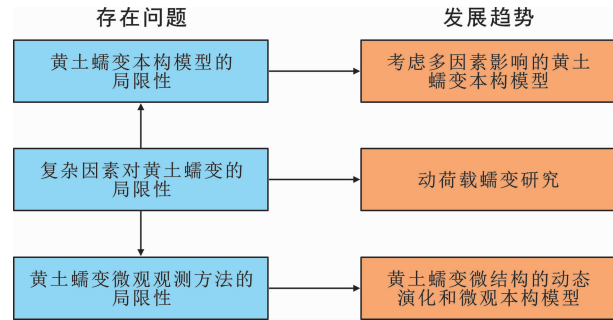


图9 黄土蠕变研究存在问题与发展趋势

Fig. 9 Problems and Development Trends in the Research of Loess Creep

5.1.1 复杂因素对黄土蠕变的局限性

影响黄土蠕变的因素很多,如含水量、荷载、干密度、冻融循环、干湿循环、开挖、堆载、振动等。同时,不同地区的黄土蠕变特征往往存在较大差异,如微观方面的黄土颗粒级配、矿物颗粒、胶结性能等,以及宏观方面的地下水渗流、填挖交界面、古土壤混杂等,对黄土蠕变都有显著影响。然而鲜有学者研究这些因素对黄土蠕变的影响。

除此之外,重塑黄土(室内将原状黄土捣碎重新制得目标含水量和干密度的黄土)、原状黄土(没有经历扰动、有较强结构性的黄土)以及填方黄土(填方工程中机械夯实的黄土)在蠕变性质上也存在一定的差异。填方黄土的微观结构与原状黄土和重塑黄土相比,存在着一定的差异:在相同干密度下,重塑黄土的大孔隙最多,其次是填方黄土,原状黄土最少;同时,重塑黄土的压缩性比填方黄土和原状黄土都要高^[138]。采用重塑黄土来研究高填方黄土的蠕变会对试验结果产生一定的误判,而目前少有学者对填方黄土的蠕变特性进行研究。

5.1.2 黄土蠕变本构模型的局限性

不同地区、不同层位的黄土颗粒级配以及黏土

矿物含量都有所不同,这会大大影响黄土的蠕变特性。各种蠕变本构模型均基于当地黄土的蠕变试验所得,各有局限性,而对于其他土层或其他地区黄土的适用性尚未得到验证。

5.1.3 黄土蠕变微观观测方法的局限性

目前对黄土蠕变微观结构的研究主要采用扫描电子显微镜、压汞仪和光学显微镜等来观察试样微结构的差异,能一定程度地反映试验前后黄土孔隙及颗粒的变化,但难以准确描述黄土蠕变过程中的颗粒运动规律。另外,扫描电子显微镜、光学显微镜都只能观察试样的一个剖面,缺乏代表性。当前对黄土蠕变的研究多集中于含水量、外部荷载及环境等宏观因素,这些因素均是通过作用于微观颗粒而影响蠕变,而颗粒之间的变形存在着很大的差异。从宏观角度来看,黄土整体变形是均匀的;而从微观角度来看,不同矿物颗粒的变形能力存在差异,变形也不均匀。因此,有必要对黄土的微细观蠕变进行系统研究。

5.2 发展趋势

5.2.1 黄土蠕变微结构的动态演化和微观本构模型

黄土主要由石英、长石、方解石、黏土等矿物组成。在水和外力的影响下,伊利石、蒙脱石等软质矿物颗粒更易发生变形,而石英、长石等硬质矿物颗粒主要发生翻滚和错动。有必要深入研究黄土微观蠕变的影响因素,尤其是胶结物的种类和含量、黄土颗粒的形状和粒度分布等。可以利用高精度的观测技术、测试手段以及图像处理方法,对黄土的蠕变演化进行研究。例如,利用微米电子计算机断层扫描,观测黄土中各种矿物颗粒的运动规律、孔隙结构的动态变化等。黄土蠕变微观本构模型的构建虽然涉及到的因素较多且复杂,但是微观本构模型能够揭示蠕变机制,并对不同条件下黄土蠕变特征有更深层次的解释。

5.2.2 考虑多因素影响的黄土蠕变本构模型

影响黄土蠕变的因素除干密度、含水量和荷载外,还与黄土的颗粒级配、矿物颗粒类型、胶结、结构等因素有关。有必要综合考虑多种影响因素,建立一种适用于多种复杂工况,更加贴近工程实际、统一的蠕变本构模型。

5.2.3 动荷载蠕变研究

在长期的动荷载作用下,黄土的内部结构将发生一定程度的改变,并产生蠕变变形。动荷载蠕变可分为两类:一种是震后蠕变破坏,主要是指滑坡在地震中没有发生破坏,但是地震作用在一定程度上

破坏了黄土的结构,产生一定数量的拉张裂缝和断续的滑动面,使得边坡处于一种准失稳状态^[139];另一种是在火车、汽车以及油田钻机^[140-141]等持续振动下产生的蠕变变形,使黄土的胶结不断断裂,颗粒不断破碎和重分布。研究黄土蠕变在动荷载作用下的响应机理,可揭示长期循环振动或地震作用下黄土边坡及路基的变形与沉降规律、强度劣化机理。

6 结 语

(1)在系统梳理国内外研究文献基础上,本文将黄土蠕变研究主要分为3个阶段,即1999年之前的黄土基本性质研究阶段,1999~2012年黄土工程灾害研究阶段,2012年以来的黄土重大工程研究阶段。

(2)土体蠕变研究方法主要有微观和宏观试验。微观试验主要观察黄土蠕变过程中的微观结构,而宏观试验主要包括一维固结蠕变试验、三轴蠕变试验、特殊应力和特殊工况的蠕变试验以及现场蠕变试验。黄土的蠕变主要受干密度、含水量、外部荷载等因素影响,其蠕变过程为外部荷载作用下黄土内部应力重分布和颗粒重排列的过程。

(3)黄土蠕变本构模型主要有元件理论本构模型、经验本构模型以及半经验半理论本构模型。元件理论本构模型简单明了,物理意义明确,但参数较多,不能准确反映黄土的非线性蠕变特征,引入非线性元件能解决这一问题。经验本构模型公式简单、参数少,工程应用方便,但缺乏理论支持,适用性较低。半经验半理论本构模型综合元件理论本构模型和经验本构模型的特点,但部分参数物理意义不够明确。

(4)黄土蠕变研究的未来发展方向主要包括考虑多因素影响的黄土蠕变本构模型、黄土蠕变微结构的动态演化和微观本构模型、动荷载条件下的蠕变特征研究等方面。

李志清:《地球科学与环境学报》在主编彭建兵院士的领导下,不断提高期刊学术影响力,积极推动地球科学和环境学科的发展,为学术交流提供了宝贵的平台!在学报更名二十周年之际,由衷地祝愿学报在未来的发展中更上一层楼,不断创新,为地球科学和环境领域的发展贡献更多的力量!建议学报进一步拓展发行渠道,加强与国内外高水平学术期刊的合作,提高学报的影响力和知名度;同时,建议加强对青年学者的支持和培养,鼓励和推动青年学者的研究和创新,为地球科学和环境领域的发展注

入新的活力!

参 考 文 献:

References:

- [1] 刘东生,安芷生,袁宝印. 中国的黄土与风尘堆积[J]. 第四纪研究,1985,6(1):113-127.
LIU Dong-sheng, AN Zhi-sheng, YUAN Bao-yin. Eolian Process and Dust Mantle (Loess) in China[J]. Quaternary Sciences, 1985, 6(1): 113-127.
- [2] 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 Xin-gang, YU Hong-ming, 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.
- [3] 陈宗基,吴海青. 我国西北黄土的基本性质及其工程建议[J]. 岩土工程学报,1989,11(6):9-24.
CHEN Zong-ji, WU Hai-qing. Fundamental Properties of Loess from Northwestern China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(6): 9-24.
- [4] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
SUN Jun. Rheology of Geotechnical Materials and Its Engineering Applications [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1999.
- [5] HUANG R B, WANG S M, GU S C, et al. A Test Method for Creep Characteristics of Loess Based on the One-dimensional Consolidator [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 6656819.
- [6] 葛苗苗,李 宁,郑建国,等. 考虑黄土时效变形特性的高填方工后沉降预测[J]. 土木工程学报,2015, 48(增2):262-267.
GE Miao-miao, LI Ning, ZHENG Jian-guo, et al. Prediction of the Post-construction Settlement of High Filled Embankment with Considering the Time Depending Deformation of Compacted Loess [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 262-267.
- [7] 庞旭卿. 基于蠕变试验的路基压实黄土流变本构模型研究[J]. 铁道科学与工程学报,2017, 14(6): 1206-1216.
PANG Xu-qing. Rheological Constitutive Model of Compacted Loess Based on Creep Test [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(6): 1206-1216.
- [8] 罗 汀,姚仰平,蔡东艳. 黄土蠕变的试验研究[J]. 西

- 安徽建筑科技大学学报, 1995, 27(3): 304-308.
- LUO Ting, YAO Yang-ping, CAI Dong-yan. Experimental Investigation of Loess Creep [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 1995, 27(3): 304-308.
- [9] YAN F, YUE X. Analysis on Creep Characteristics and Microscopic Mechanism of Loess Q_2 [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 12(3): 130-135.
- [10] 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 Jian-hui, GUO Wen-bin, 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.
- [11] XIE X, QI S W, ZHAO F S, et al. Creep Behavior and the Microstructural Evolution of Loess-like Soil from Xi'an Area, China [J]. Engineering Geology, 2018, 236: 43-59.
- [12] 谢星, 王东红, 赵法锁. Q_2 黄土流变特性及其统计损伤流变模型[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 63-68.
- XIE Xing, WANG Dong-hong, ZHAO Fa-suo. Study on Rheological Properties and Statistical Damage Rheological Model for Q_2 Loess [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 63-68.
- [13] 郭鸿, 骆亚生, 王鹏程. 分别、分级加载下压实黄土三轴蠕变特性及模型分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 117-124.
- GUO Hong, LUO Ya-sheng, WANG Peng-cheng. Triaxial Creep Characteristics and Models of Remolded Loess Under Separate and Graded Loading [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 117-124.
- [14] 朱才辉, 李宁. 基于黄土变形时效试验的高填方工后沉降研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 3023-3031.
- ZHU Cai-hui, LI Ning. Post-construction Settlement Analysis of Loess-high Filling Based on Time-dependent Deformation Experiments [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 3023-3031.
- [15] 王松鹤, 骆亚生, 杨永俊, 等. 原状黄土蠕变特性试验研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 122-124, 158.
- WANG Song-he, LUO Ya-sheng, YANG Yong-jun, et al. Experimental Study of the Creep Behavior of Unsaturated Intact Loess [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 122-124, 158.
- [16] 范涛, 顾强康, 刘少博, 等. 重塑 Q_3 黄土 K_0 三轴蠕变特性的试验研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 56-61.
- FAN Tao, GU Qiang-kang, LIU Shao-bo, et al. Experimental Study on K_0 Triaxial Creep Properties of Remolded Q_3 Loess [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(3): 56-61.
- [17] 胡连信, 骆亚生. 平面蠕变仪的改造及黄土平面蠕变试验[J]. 人民黄河, 2015, 37(5): 122-124.
- HU Lian-xin, LUO Ya-sheng. Reformation for Plane Creepmeter and Plane Creep Tests of Loess [J]. Yellow River, 2015, 37(5): 122-124.
- [18] 朱元林, 何平, 张家懿, 等. 冻土在振动荷载作用下的三轴蠕变模型[J]. 自然科学进展, 1998, 8(1): 60-62.
- ZHU Yuan-lin, HE Ping, ZHANG Jia-yi, et al. Triaxial Creep Model of Frozen Soil Under Dynamic Loading [J]. Progress in Natural Science, 1998, 8(1): 60-62.
- [19] ZHOU Z W, MA W, ZHANG S J, et al. Experimental Investigation of the Path-dependent Strength and Deformation Behaviours of Frozen Loess [J]. Engineering Geology, 2020, 265: 105449.
- [20] 葛苗苗, 李宁, 郑建国, 等. 基于蠕变试验的黄土高填方工后沉降规律数值研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(3): 295-300.
- GE Miao-miao, LI Ning, ZHENG Jian-guo, et al. Numerical Analysis of the Post-construction Settlement Regularity of Loess-high Filled Embankment Based on Creep Test [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(3): 295-300.
- [21] LI X, LIU E L, SONG B T, et al. An Improved Nishihara Model for Frozen Loess Considering the Influence of Temperature [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 9073435.
- [22] 朱才辉, 李宁, 刘俊平. 压实 Q_3 马兰黄土蠕变规律研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 392-399.
- ZHU Cai-hui, LI Ning, LIU Jun-ping. Research on the Creep Behavior of Compacted Q_3 Malan Loess [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(4): 392-399.
- [23] ZHOU Z W, MA W, ZHANG S J, et al. Effect of Freeze-thaw Cycles in Mechanical Behaviors of Frozen Loess [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 146: 9-18.
- [24] 张卫兵, 谢永利. 考虑流变特性的黄土高路堤沉降过程计算方法[J]. 公路交通科技, 2011, 28(7): 25-29.
- ZHANG Wei-bing, XIE Yong-li. Computational Method of Settlement Process of Loess-filled Embankment Considering Rheological Characteristic [J]. Jour-

- nal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(7): 25-29.
- [25] 颜斌,倪万魁,刘海松.公路黄土地基流变模型研究[J].中国公路学报,2009,22(4):15-19.
YAN Bin, NI Wan-kui, LIU Hai-song. Research on Rheological Model of Highway Loess Subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 15-19.
- [26] 谢星,赵法锁,王东红.西安地区 Q_2 黄土非线性流变模型[J].长安大学学报(自然科学版),2009,29(5):41-46.
XIE Xing, ZHAO Fa-suo, WANG Dong-hong. Nonlinear Rheological Model for Q_2 Loess in Xi'an Region [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(5): 41-46.
- [27] 郭增玉,张朝鹏,夏旺民.高湿度 Q_2 黄土的非线性流变本构模型及参数[J].岩石力学与工程学报,2000,19(6):780-784.
GUO Zeng-yu, ZHANG Chao-peng, XIA Wang-min. Nonlinear Rheological Constitutive Models and Their Parameters of High Moisture Q_2 Loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 780-784.
- [28] 陈阳,李喜安,黄润秋,等.影响黄土湿陷性因素的微观试验研究[J].工程地质学报,2015,23(4):646-653.
CHEN Yang, LI Xi-an, HUANG Run-qiu, et al. Micro Experimental Research on Influence Factors of Loess Collapsibility [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 646-653.
- [29] 郭龙晓,张常亮,杨德广,等.黄土单向固结试验微观非连续变形分析[J].长江科学院院报,2017,34(3):80-84.
GUO Long-xiao, ZHANG Chang-liang, YANG De-guang, et al. Discontinuous Deformation Analysis with Microstructural Model for Axial Odometer Test of Loess [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(3): 80-84.
- [30] 胡海军,蒋明镜,彭建兵,等.应力路径试验前后不同黄土的孔隙分形特征[J].岩土力学,2014,35(9):2479-2485.
HU Hai-jun, JIANG Ming-jing, PENG Jian-bing, et al. Pore Fractal Features of Different Kinds of Loesses Before and After Stress Path Tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2479-2485.
- [31] 蒋明镜,胡海军,彭建兵,等.应力路径试验前后黄土孔隙变化及与力学特性的联系[J].岩土工程学报,2012,34(8):1369-1378.
JIANG Ming-jing, HU Hai-jun, PENG Jian-bing, et al. Pore Changes of Loess Before and After Stress Path Tests and Their Links with Mechanical Behaviors [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1369-1378.
- [32] 葛苗苗,李宁,盛岱超,等.水力耦合作用下非饱和压实黄土细观变形机制试验研究[J].岩土力学,2021,42(9):2437-2448.
GE Miao-miao, LI Ning, SHENG Dai-chao, 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.
- [33] GAO H L, CHANG L Y, SUN L, et al. Study on Microstructure of Remolded Loess Using Computerized Tomography [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 438/439: 599-601.
- [34] LI X J, JIANG L H, TANG Y C. CT Discrimination and Image Process on Damage Process of Unsaturated Compacted Loess During Triaxial Creep [C] // WU S F, DU Z Y, DU Z Y, et al. International Conference on Image Processing and Pattern Recognition in Industrial Engineering. Xi'an: SPIE, 2010: 966-973.
- [35] 谢宁,姚海明.土流变研究综述[J].云南工业大学学报,1999(1):54-58.
XIE Ning, YAO Hai-ming. Summary of Research for Rheology in Soil [J]. Journal of Yunnan Polytechnic University, 1999(1): 54-58.
- [36] 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):107-112,126.
ZHOU Jing-jing, ZHAO Fa-suo, ZHU Yan-bo, 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, 126.
- [37] 王瑞,王雷,胡志平,等.交通荷载引起的静偏应力对压实黄土动力特性的影响[J].铁道学报,2019,41(7):110-117.
WANG Rui, WANG Lei, HU Zhi-ping, et al. Study on Dynamic Characteristics of Compacted Loess Subjected to Static Deviatoric Stress Induced by Traffic Loading [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(7): 110-117.
- [38] 胡连信,骆亚生,王鹏程,等.黄土平面蠕变特性试验研究[J].西安理工大学学报,2014,30(3):366-371.
HU Lian-xin, LUO Ya-sheng, WANG Peng-cheng, et al. Testing Research on Plane Creep Behaviors of

- Loess[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014,30(3):366-371.
- [39] 郭 鸿, 骆亚生, 胡连信. 平面应变状态下黄土蠕变研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(11):209-214.
GUO Hong, LUO Ya-sheng, HU Lian-xin. Loess Creep in Plane Strain Conditions[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2016, 44(11):209-214.
- [40] 郑 佳, 庄建琦, 孔嘉旭, 等. 基于环剪试验的黄土滑坡失稳机理研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(3):151-156.
ZHENG Jia, ZHUANG Jian-qi, KONG Jia-xu, et al. Study on Instability Mechanism of Loess Landslide Based on Ring Shear Test[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(3):151-156.
- [41] 朱才辉, 李 宁. 基于修正 FDA 方法的黄土高填方地基工后沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 1):3408-3417.
ZHU Cai-hui, LI Ning. Post-construction Settlement Analysis of Loess-high Filled Foundation Based on Modified FDA Approach[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1):3408-3417.
- [42] 许 强, 蒲川豪, 赵宽耀, 等. 延安新区地面沉降时空演化特征时序 InSAR 监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7):957-969.
XU Qiang, PU Chuan-hao, ZHAO Kuan-yao, et al. Time Series InSAR Monitoring and Analysis of Spatiotemporal Evolution Characteristics of Land Subsidence in Yan'an New District[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7):957-969.
- [43] 蒲川豪, 许 强, 蒋亚楠, 等. 延安新区地面沉降分布及影响因素的时序 InSAR 监测分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11):1728-1738.
PU Chuan-hao, XU Qiang, JIANG Ya-nan, et al. Analysis of Land Subsidence Distribution and Influencing Factors in Yan'an New District Based on Time Series InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11):1728-1738.
- [44] 王雪浪. 大厚度湿陷性黄土湿陷变形机理、地基处理及试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
WANG Xue-lang. Study on Characteristics of Collapse Deformation for Collapseable Loess, Foundation Treatment Method and Tests[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [45] LI Z X, WANG J D, YANG S, et al. Characteristics of Microstructural Changes of Malan Loess in Yan'an Area During Creep Test[J]. Water, 2022, 14(3):438.
- [46] LIU C, SHI B, ZHOU J, et al. Quantification and Characterization of Microporosity by Image Processing, Geometric Measurement and Statistical Methods: Application on SEM Images of Clay Materials[J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1):97-106.
- [47] ZHANG L X, QI S W, MA L N, et al. Three-dimensional Pore Characterization of Intact Loess and Compacted Loess with Micron Scale Computed Tomography and Mercury Intrusion Porosimetry[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):8511.
- [48] 蒋 甫, 应荣华, 姚 波. 黄土粘弹性性质的试验分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(4):63-66.
JIANG Fu, YING Rong-hua, YAO Bo. Experiment Analysis of Viscoelasticity of Loess [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19(4):63-66.
- [49] ZHU C H, LI N. Ranking of Influence Factors and Control Technologies for the Post-construction Settlement of Loess High-filling Embankments[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 118:103320.
- [50] 谷拴成, 胡春晖, 黄荣宾. 基于一维固结仪的黄土蠕变试验方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(11):91-95.
GU Shuan-cheng, HU Chun-hui, HUANG Rong-bin. Test Method of Loess Creep Based on One-dimensional Consolidation Instrument[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(11):91-95.
- [51] 程海涛, 刘保健, 谢永利. 重塑黄土变形特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(5):31-34.
CHENG Hai-tao, LIU Bao-jian, XIE Yong-li. Deformation Characteristics of Remolded Loess[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(5):31-34.
- [52] 葛苗苗, 李 宁, 郑建国, 等. 基于一维固结试验的压实黄土蠕变模型[J]. 岩土力学, 2015, 36(11):3164-3170, 3306.
GE Miao-miao, LI Ning, ZHENG Jian-guo, et al. A Creep Model for Compacted Loess Based on 1D Oedometer Test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11):3164-3170, 3306.
- [53] 王松鹤, 骆亚生, 杨静敬. 原状黄土固结蠕变特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6):72-75.
WANG Song-he, LUO Ya-sheng, YANG Jing-jing. Experimental Study on Creep Consolidation Behavior of Intact Loess [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6):72-75.
- [54] 蒋 甫, 应荣华. 黄土粘弹性性质的室内外试验分析

- [J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 269-273, 319.
- JIANG Fu, YING Rong-hua. Analysis on Loess Viscoelasticity by Laboratory and Field Tests[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 269-273, 319.
- [55] 李金华, 方华强, 吴士德. 高应力下重塑黄土蠕变特性试验[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 56-60.
- LI Jin-hua, FANG Hua-qiang, WU Shi-de. Test on Creep Characteristics of Remolded Loess Under High Stress[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 39(3): 56-60.
- [56] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学: B辑, 1987, 17(12): 1309-1318.
- LEI Xiang-yi. Pore Types and Collapsibility of Loess in China[J]. Science in China: Series B, 1987, 17(12): 1309-1318.
- [57] 王松鹤, 骆亚生. 黄土三轴剪切蠕变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1633-1637.
- WANG Song-he, LUO Ya-sheng. Study of Triaxial Shear Creep Characteristics of Loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1633-1637.
- [58] 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, 1642.
- WANG Peng-cheng, LUO Ya-sheng, HU Lian-xin, et al. Research on Triaxial Creep Characteristics and Models of Remolded Loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1627-1632, 1642.
- [59] 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 Xin-gang, LIU Kai, WANG You-lin, 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.
- [60] 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 Yan-bo, LIU Zhen-qian, LI Wen-jie, 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.
- [61] 汪斌, 朱杰兵, 唐辉明, 等. 黄土坡滑坡滑带土的蠕变特性研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(1): 49-52.
- WANG Bin, ZHU Jie-bing, TANG Hui-ming, et al. Study on Creep Behavior of Slip Band Soil of Huangtupo Landslide [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(1): 49-52.
- [62] 唐皓, 党琪, 段钊, 等. 关中咸阳地区 Q_2 黄土蠕变特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(6): 758-763, 770.
- TANG Hao, DANG Qi, DUAN Zhao, et al. Study on Creep Characteristics of Q_2 Loess of Xianyang Area in the Guanzhong Basin [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(6): 758-763, 770.
- [63] 雷恒, 杨春景, 刘子祺. 黄土三轴蠕变试验与 Singh-Mitchell 模型修正[J]. 水电能源科学, 2015, 33(10): 112-115.
- LEI Heng, YANG Chun-jing, LIU Zi-qi. Loess Triaxial Creep Test and Revised Singh-Mitchell Model [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(10): 112-115.
- [64] 张昊, 顾强康, 裴元新, 等. 高应力条件下黄土三轴蠕变试验及经验模型[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 16(5): 20-23.
- ZHANG Hao, GU Qiang-kang, PEI Yuan-xin, et al. Triaxial Creep Test on Loess and a Study of Empirical Models Under Conditions of High Stress [J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2015, 16(5): 20-23.
- [65] 刘驰洋, 唐皓, 王念秦, 等. 酸性环境下 Q_2 黄土一维固结蠕变特性[J]. 公路, 2021, 66(6): 318-324.
- LIU Chi-yang, TANG Hao, WANG Nian-qin, et al. One-dimensional Consolidation Creep Test of Acid-contaminated Q_2 Loess [J]. Highway, 2021, 66(6): 318-324.
- [66] XUE Z F, CHENG W C, WANG L. Effect of Straw Reinforcement on the Shearing and Creep Behaviours of Quaternary Loess [J]. Scientific Reports, 2021, 11: 19926.
- [67] 薛中飞, 王琳, 郑文杰. 农作废弃秸秆加筋黄土的剪切特性[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(4): 180-186.
- XUE Zhong-fei, WANG Lin, ZHENG Wen-jie. Shearing Behavior of Loess Reinforced with Post-harvest Straw [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(4): 180-186.
- [68] 汪国刚, 骆亚生, 李沛达, 等. 纤维加筋黄土的三轴蠕变试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7602-7608.
- WANG Guo-gang, LUO Ya-sheng, LI Pei-da, et al.

- Experimental Study on Three Axis Creep of Fiber Reinforced Loess[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7602-7608.
- [69] 褚峰, 邵生俊, 邓国华, 等. 纤维纱加筋黄土一维蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 1054-1066.
- CHU Feng, SHAO Sheng-jun, DENG Guo-hua, et al. Experimental Study on One Dimensional Creep Behavior of Loess Reinforced with Fiber Yarn [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(5): 1054-1066.
- [70] 蒋炼, 侯丰, 刘恩龙, 等. 冻结黄土三轴蠕变特性[J]. 人民黄河, 2019, 41(2): 148-152.
- JIANG Lian, HOU Feng, LIU En-long, et al. Triaxial Creep Characteristics of Frozen Loess [J]. Yellow River, 2019, 41(2): 148-152.
- [71] ZHOU Z W, MA W, ZHANG S J, et al. Damage Evolution and Recrystallization Enhancement of Frozen Loess [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2018, 27(8): 1131-1155.
- [72] 张长庆, 魏雪霞, 苗天德. 冻土蠕变过程的微结构损伤行为与变化特征[J]. 冰川冻土, 1995, 17(增1): 60-65.
- ZHANG Chang-qing, WEI Xue-xia, MIAO Tian-de. Microstructure Damage Behaviour and Change Characteristic in the Frozen Soil Creep Process [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(S1): 60-65.
- [73] 张长庆, 苗天德, 王家澄, 等. 冻结黄土蠕变损伤的电镜分析[J]. 冰川冻土, 1995, 17(增1): 54-59.
- ZHANG Chang-qing, MIAO Tian-de, WANG Jiacheng, et al. An Analysis on Creep Damage of Frozen Loess by Electronmicroscope [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(S1): 54-59.
- [74] 董连成, 张公, 赵淑萍, 等. 冻土蠕变指标试验研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 130-136.
- DONG Lian-cheng, ZHANG Gong, ZHAO Shu-ping, et al. Experimental Study of the Creep Indexes of Frozen Soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 130-136.
- [75] ZHOU Z W, MA W, ZHANG S J, et al. Multiaxial Creep of Frozen Loess [J]. Mechanics of Materials, 2016, 95: 172-191.
- [76] WANG P, LIU E L, SONG B T, et al. Binary Medium Creep Constitutive Model for Frozen Soils Based on Homogenization Theory [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 162: 35-42.
- [77] 董皇帅. 软黏土蠕变模型研究综述[J]. 山西建筑, 2018, 44(14): 94-96.
- DONG Huang-Shuai. A Review on Creep Model of Soft Clay [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(14): 94-96.
- [78] 裴元新, 顾强康, 张仁义, 等. 黄土压缩特性及高填方填土合理含水率控制[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 56-60.
- PEI Yuan-xin, GU Qiang-kang, ZHANG Ren-yi, et al. Compression Characteristics of Loess and Control of Reasonable Moisture Content of High Fill [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(4): 56-60.
- [79] LIU X W, ZHANG X D, FU X G, et al. Experimental Study on Creep Characteristics of Saturated Q_2 Loess [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 815275.
- [80] 张子然, 苏卫卫, 张留俊, 等. 基于蠕滑机理的黄土-红层接触面滑坡的动态趋势研究 [M] // 中国公路学会. 第二届公路基础设施防灾减灾技术国际研讨会论文集. 西安: 中国公路学会, 2016: 58-64.
- ZHANG Zi-ran, SU Wei-wei, ZHANG Liu-jun, et al. Study on the Dynamic Trend of Landslides on Loess-red Layer Contact Based on Creep-slip Mechanism [C] // China Highway & Transportation Society. Proceedings of the 2nd International Symposium on Disaster Prevention and Mitigation Technologies for Highway Infrastructure. Xi'an: China Highway & Transportation Society, 2016: 58-64.
- [81] 王永刚, 庞小冲, 陈宏斌. 大断面黄土隧道基底加固与长期稳定性分析 [J]. 公路交通技术, 2018, 34(增1): 33-40.
- WANG Yong-gang, PANG Xiao-chong, CHEN Hong-bin. An Analysis of Foundation Reinforcement and Long-term Stability of the Large Section Loess Tunnel [J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34(S1): 33-40.
- [82] 唐亦川, 江丽华, 李晓军. 重塑黄土黏弹特性试验研究与模型参数分析 [J]. 公路, 2011(6): 136-141.
- TANG Yi-chuan, JIANG Li-hua, LI Xiao-jun. Experimental Study and Parameter Analysis of Remolded Loess with Viscoelasticity [J]. Highway, 2011(6): 136-141.
- [83] 李昂, 陈建博, 孙兴华, 等. 原状黄土一维蠕变试验及蠕变模型 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8789-8796.
- LI Ang, CHEN Jian-bo, SUN Xing-hua, et al. One Dimensional Creep Test and Creep Model of Undisturbed Loess [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 8789-8796.
- [84] 董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 非饱和冻融黄土固结蠕

- 变特性研究[J]. 人民长江, 2010, 41(3): 88-91.
- DONG Xiao-hong, ZHANG Ai-jun, LIAN Jiang-bo, et al. Study on Consolidation Creep Behavior of Unsaturated Loess Suffering Freezing-thawing Cycles [J]. Yangtze River, 2010, 41(3): 88-91.
- [85] 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 Yan-lin, CHEN Xin-jian, et al. Research on Creep Constitutive Model of Loess-basic Landslide Slip Zone Soil [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 228-234.
- [86] 吴燕开, 陈红伟, 张志征. 饱和黄土的性质与非饱和黄土流变模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1143-1146.
- WU Yan-kai, CHEN Hong-wei, ZHANG Zhi-zheng. Characteristics of Saturated Loess and Rheological Model of Unsaturated Loess in Xi'an [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1143-1146.
- [87] 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 Ji-hong, 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.
- [88] 林斌, 赵法锁, 霍亮. 黄土损伤与流变耦合模型及参数研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 685-691.
- LIN Bin, ZHAO Fa-suo, HUO Liang. Coupling Study on Damage and Rheological Model of Loess and Its Parameter [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 685-691.
- [89] 李丽, 邓亚虹, 王鹏, 等. 地裂缝带 Q_3 原状黄土三维蠕变本构辨识方法[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 905-912.
- LI Li, DENG Ya-hong, WANG Peng, et al. Three Dimensional Creep Constitutive Identification Method of Ground Fissure Belt Q_3 Undisturbed-loess [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 905-912.
- [90] 邓亚虹, 李丽, 慕焕东, 等. 西安地区地裂缝带 Q_3 原状黄土流变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1847-1855.
- DENG Ya-hong, LI Li, MU Huan-dong, et al. Experimental Research on Rheological Properties of Q_3 Intact Loess Within Ground Fissures Belt in Xi'an Region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1847-1855.
- [91] 王东红, 谢星, 赵法锁. 考虑蠕变损伤的 Q_2 黄土流变本构模型[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(6): 682-686, 725.
- WANG Dong-hong, XIE Xing, ZHAO Fa-suo. Creep Damage Rheological Constitutional Model for Q_2 Loess [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(6): 682-686, 725.
- [92] 王鹏程, 骆亚生, 张希栋, 等. 分级加卸载条件下 Q_3 黄土三轴蠕变特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1237-1242.
- WANG Peng-cheng, LUO Ya-sheng, ZHANG Xi-dong, et al. Research on the Triaxial Creep Characteristics of Q_3 Loess Under Loading and Unloading by Steps [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6): 1237-1242.
- [93] 唐皓, 赵法锁, 段钊, 等. 基于分数阶微积分改进的黄土西原模型[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 50-56.
- TANG Hao, ZHAO Fa-suo, DUAN Zhao, et al. The Improved Nishihara Model of Loess Based on Fractional Calculus [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5): 50-56.
- [94] 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]. 工程地质学报, 2022, 30(4): 1077-1086.
- MU Huan-dong, DENG Ya-hong, HE Jia, et al. Study on Rheological Model of Q_3 Loess Based on Fractional Derivative Theory [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(4): 1077-1086.
- [95] 欧湘萍, 闫志濠, 李塘, 等. 湿陷性黄土的流变本构模型研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(4): 590-595.
- OU Xiang-ping, YAN Zhi-hao, LI Tang, et al. Research on Rheological Constitutive Model of Collapsible Loess [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(4): 590-595.
- [96] 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 Wan-li, ZHU Rong-sen, 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.
- [97] 唐皓, 王东坡, 段钊, 等. 基于分数阶微积分的变参数黄土蠕变损伤模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4248-4255.
- TANG Hao, WANG Dong-po, DUAN Zhao, et al. Variable Parameters Creep Damage Model of Loess Ba-

- sed on Fractional Calculus[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11):4248-4255.
- [98] 唐皓,段钊,赵法锁,等.基于分数阶微积分的 Q_2 黄土含水率损伤蠕变模型[J].长江科学院院报,2015,32(8):78-83.
TANG Hao, DUAN Zhao, ZHAO Fa-suo, et al. Creep Damage Model of Q_2 Loess in Consideration of Moisture Content Based on Fractional Calculus[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(8):78-83.
- [99] DING R H, TANG H, DUAN Z, et al. Analysis on Creep Properties of Aquiferous Loess Under a High Confining Pressure[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2021, 14(3):59-68.
- [100] TANG H, WANG D P, DUAN Z. New Maxwell Creep Model Based on Fractional and Elastic-plastic Elements[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 9170706.
- [101] TANG H, DUAN Z, WANG D P, et al. Experimental Investigation of Creep Behavior of Loess Under Different Moisture Contents[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(1):411-422.
- [102] TANG H, LUO J Z, DUAN Z, et al. Experimental Investigation of the Creep Behaviour of Remoulded Loess Under Different Levels of Compactness[J]. PLOS ONE, 2022, 17(1):e0262456.
- [103] 赵玲,葛科,刘恩龙.黄土的流变特性分析[J].建筑科学, 2011, 27(3):69-73.
ZHAO Ling, GE Ke, LIU En-long. Study on the Rheological Properties of Loess[J]. Building Science, 2011, 27(3):69-73.
- [104] 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.
- [105] LI Z X, WANG J D, ZHANG D F. Creep Behavior of Intact Loess Followed Unloading Paths[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9:744864.
- [106] CHANG Z L, GAO H X, HUANG F M, et al. Study on the Creep Behaviours and the Improved Burgers Model of a Loess Landslide Considering Matric Suction[J]. Natural Hazards, 2020, 103(1):1479-1497.
- [107] 段钊.黄土滑坡触发机理研究:以泾河下游南岸黄土塬区滑坡为例[D].西安:长安大学, 2013.
DUAN Zhao. Study on the Trigger Mechanism of Loess Landslide: A Case Study of the Loess Landslide in the South Bank of Lower Jing River[D]. Xi'an; Chang'an University, 2013.
- [108] 许强.滑坡的变形破坏行为与内在机理[J].工程地质学报, 2012, 20(2):145-151.
XU Qiang. Theoretical Studies on Prediction of Landslides Using Slope Deformation Process Data [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2):145-151.
- [109] 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 Jing-jing, ZHAO Fa-suo, YUAN Xiang-qin, et al. Creep Process and the Microstructural Evolution of Sliding-zone Soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3):115-121.
- [110] LIAN B Q, WANG X G, ZHAN H B, et al. Creep Mechanical and Microstructural Insights into the Failure Mechanism of Loess Landslides Induced by Dry-wet Cycles in the Heifangtai Platform, China[J]. Engineering Geology, 2022, 300:106589.
- [111] 龙建辉,李同录,李萍.滑带黄土的剪切蠕变实验研究[M]//黄润秋,许强.第三届全国岩土与工程学术大会论文集.成都:四川科学技术出版社, 2009:271-275.
LONG Jian-hui, LI Tong-lu, LI Ping. Experimental Study of Shear Creep in Slipband Loess [M] // HUANG Run-qiu, XU Qiang. Proceedings of the 3rd Conference of Geo-engineering. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2009:271-275.
- [112] 刘玉凤,王俊,李伟,等.土体蠕变对阴湾排土场稳定性的影响[J].煤矿安全, 2015, 46(11):223-226.
LIU Yu-feng, WANG Jun, LI Wei, et al. Effect of Soil Creep on Yinwan Dump Stability [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(11):223-226.
- [113] 兰恒星,彭建兵,祝艳波,等.黄河流域地质地表过程与重大灾害效应研究与展望[J].中国科学:地球科学, 2022, 52(2):199-221.
LAN Heng-xing, PENG Jian-bing, ZHU Yan-bo, et al. Geological and Surficial Processes and Major Disaster Effects in the Yellow River Basin [J]. Science China: Earth Sciences, 2022, 52(2):199-221.
- [114] 王松鹤,骆亚生.复杂应力下黄土蠕变特性试验研究[J].岩土力学, 2009, 30(增2):43-47.
WANG Song-he, LUO Ya-sheng. Research on Creep Characteristics of Loess Under Complex Stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2):43-47.
- [115] 杨春景,张迪.非饱和重塑黄土三轴蠕变试验研究[J].长江科学院院报, 2016, 33(6):75-78.
YANG Chun-jing, ZHANG Di. Triaxial Creep Tests of

- Unsaturated Remoulded Loess[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(6): 75-78.
- [116] LIU K, YUAN K Z, SHI B Y. Study on Prediction Method for Postconstruction Settlement of Loess Fill Foundation in Northern Shaanxi, China[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 5703420.
- [117] 胡 炜, 朱立峰, 孙萍萍, 等. 甘肃永靖黑方台地区滑坡形成的黄土时效特性[J]. 地质通报, 2013, 32(6): 910-918.
HU Wei, ZHU Li-feng, SUN Ping-ping, et al. An Analysis of the Time-dependent Properties of Loess in the Formation of Landslides at Heifangtai Area, Yongjing County, Gansu Province[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(6): 910-918.
- [118] 王松鹤, 骆亚生, 李 焱. 黄土固结蠕变特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 643-647.
WANG Song-he, LUO Ya-sheng, LI Yan. Laboratory Test of Loess for Consolidation Creep Behavior[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(5): 643-647.
- [119] 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1): 3088-3092.
WANG Song-he, LUO Ya-sheng, DONG Xiao-hong, et al. Experimental Study of Shear Creep Characteristics of Loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3088-3092.
- [120] 程海涛, 刘保健, 谢永利. 压实黄土应力-应变-时间特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(1): 6-9.
CHENG Hai-tao, LIU Bao-jian, XIE Yong-li. Stress-strain-time Behavior of Compacted Loess[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(1): 6-9.
- [121] 罗 汀, 陈 栋, 姚仰平, 等. 加载路径对重塑黄土一维蠕变特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1294-1299.
LUO Ting, CHEN Dong, YAO Yang-ping, et al. Influence of Loading Paths on One-dimensional Creep Characteristics of Remodeled Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1294-1299.
- [122] 李广冬, 骆亚生, 王志杰, 等. Q_3 黄土的三轴蠕变试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(1): 127-129, 132.
LI Guang-dong, LUO Ya-sheng, WANG Zhi-jie, et al. Research on the Triaxial Creep Characteristics of Loess of Q_3 [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(1): 127-129, 132.
- [123] 董立山, 李文强, 刘志胜. 考虑黄土长期蠕变效应的路基沉降预测方法[J]. 公路, 2022, 67(8): 1-7.
DONG Li-shan, LI Wen-qiang, LIU Zhi-sheng. Prediction Method of Subgrade Settlement Considering Long-term Creep Effect of Loess[J]. Highway, 2022, 67(8): 1-7.
- [124] 于永堂. 黄土高填方场地沉降变形规律与预测方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
YU Yong-tang. Study on Settlement Deformation Characteristics and Prediction Methods of Loess Deep Filled Ground[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [125] 孟 宪. 高填土路基沉降试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2005(1): 102-105.
MENG Xian. Study on Test of High Filling Subgrade [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2005(1): 102-105.
- [126] 邢国耀. 吕梁机场试验段黄土高填方场区沉降规律研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
XING Guo-yao. The Study of the Settlement Rule About the Test Section Loess Highfill in Luliang Airport [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [127] 朱才辉, 李 宁, 刘明振, 等. 吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 293-301.
ZHU Cai-hui, LI Ning, LIU Ming-zhen, et al. Spatio-temporal Laws of Post-construction Settlement of Loess-filled Foundation of Luliang Airport [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 293-301.
- [128] 张豫川, 高 飞, 吕国顺, 等. 基于黄土蠕变试验的高填方地基沉降的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(30): 220-227.
ZHANG Yu-chuan, GAO Fei, LU Guo-shun, et al. Numerical Simulation of High Fill Foundation Settlement Based on Creep Test of Loess[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(30): 220-227.
- [129] 周远强, 吴 宏, 朱才辉, 等. 黄土高填方工后沉降影响因素敏感性分析[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(1): 92-98.
ZHOU Yuan-qiang, WU Hong, ZHU Cai-hui, et al. Sensitivity Analysis of Influence Factors of Post-construction Settlement on Loess High Fill Embankment [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(1): 92-98.
- [130] 李 焱, 许崇帮. 大西山隧道围岩长期变形分析[J].

- 公路交通科技,2013,30(12):120-124.
- LI Ye, XU Chong-bang. Analysis of Long-term Deformation of Tunnel Surrounding Rock of Dayoushan Tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2013,30(12):120-124.
- [131] 李玉波,贺豪楠,朱才辉.不同含水率状态黄土隧道修正围岩压力算法[J].现代隧道技术,2020,57(增1):306-315.
- LI Yu-bo, HE Hao-nan, ZHU Cai-hui. Modified Calculation Method for Surrounding Rock Pressure of Loess Tunnel Under Different Water Contents[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 306-315.
- [132] 罗彦斌,陈建勋.黏弹性条件下大跨度公路黄土隧道二次衬砌施作时机[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(5):86-95.
- LUO Yan-bin, CHEN Jian-xun. Construction Time of Secondary Lining of Large Span Loess Tunnel Under Viscoelasticity Condition [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2021, 41(5): 86-95.
- [133] 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 Cai-hui, LI Yu-bo, LAN Kai-jiang, et al. Creep Effect of Loess Strata on Surrounding Rock Pressure of Tunnels[J]. Industrial Construction, 2021, 51(7): 18-24.
- [134] 欧湘萍,郭慧峰,尹航,等.基于湿陷性黄土流变特性的隧道稳定性分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(3):435-439.
- OU Xiang-ping, GUO Hui-feng, YIN Hang, et al. Tunnel Stability Analysis Based on Rheological Properties of Collapsible Loess [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2018, 42(3): 435-439.
- [135] ZHANG Q, ZHANG H X, LAI J X. Finite Element Analysis for the Displacement Characteristics of Loess Tunnel with Weak Surrounding Rock [J]. Advanced Materials Research, 2012, 487: 64-68.
- [136] LI S, HAN G Q, HO I H, et al. Analysis of Time-dependent Soil Behavior Above High-filled Cut-and-cover Tunnels Using Discrete Element Method [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(4): 2339-2355.
- [137] LI S, JIANIE Y C, HO I H, et al. Long-term Behavior of Earth Pressure Around a High-filled Cut-and-cover Tunnel[J]. Geomechanics and Engineering, 2021, 26(4): 311-321.
- [138] LI Z Q, QI Z Y, QI S W, et al. Microstructural Changes and Micro-macro-relationships of an Intact, Compacted and Remolded Loess for Land-creation Project from the Loess Plateau[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80: 593.
- [139] 邓龙胜,范文.宁夏海原8.5级地震诱发黄土滑坡的变形破坏特征及发育机理[J].灾害学,2013,28(3):30-37.
- DENG Long-sheng, FAN Wen. Deformation Breakage Characteristics and Development Mechanism of Loess Landslide Triggered by Haiyuan M 8.5 Earthquake in Ningxia[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(3): 30-37.
- [140] 江思义.钻机振动作用下黄土边坡失稳机理研究[D].西安:长安大学,2015.
- JIANG Si-yi. Study on Action of Experimental of Loess Slope Instability Mechanism Under Rig Vibration [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [141] 牛亚强.冻结粉质黏土静动力学性质的试验研究与本构模拟[D].兰州:兰州交通大学,2018.
- NIU Ya-qiang. Testing Investigation of Static and Dynamic Properties and Constitutive Modeling for Frozen Silty Clay [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.