

基于风化红层泥岩蠕变特性的滑坡时效变形分析

赵建磊, 王涛, 梁昌玉, 张泽林, 刘甲美, 王浩杰, 辛鹏

Analysis on time-dependent deformation of landslide based on creep characteristics of weathered red mudstone: A case study of the Luobao landslide in Tianshui of Gansu Province

ZHAO Jianlei, WANG Tao, LIANG Changyu, ZHANG Zelin, LIU Jiamei, WANG Haojie, and XIN Peng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202112027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例

Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example

贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 裴来政 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 96-103

基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例

Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province

侯圣山, 李昂, 陈亮, 冯振, 王立朝, 曹鹏, 刘军友, 郑浩, 李阳光, 黄鑫, 郭伟, 魏新平 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 47-53

甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文伦, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202112027

赵建磊, 王涛, 梁昌玉, 等. 基于风化红层泥岩蠕变特性的滑坡时效变形分析——以天水雒堡村滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 30-39.

ZHAO Jianlei, WANG Tao, LIANG Changyu, et al. Analysis on time-dependent deformation of landslide based on creep characteristics of weathered red mudstone: A case study of the Luobao landslide in Tianshui of Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 30-39.

基于风化红层泥岩蠕变特性的滑坡时效变形分析 ——以天水雒堡村滑坡为例

赵建磊^{1,2,3}, 王 涛^{1,2,3}, 梁昌玉^{1,2,3}, 张泽林⁴, 刘甲美^{1,2,3}, 王浩杰^{1,2,3}, 辛 鹏^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081; 3. 自然资源部陕西宝鸡地质灾害野外科学观测研究站, 陕西 宝鸡 721001; 4. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 风化红层泥岩蠕变是我国黄土高原区边坡变形失稳的重要原因之一。选取天水市雒堡村巨型多级旋转滑坡, 利用 KTL 全自动三轴仪和基于连续介质力学的离散单元方法 (CDEM) 数值模拟手段, 开展了风化红层泥岩蠕变本构模型和滑坡时效变形研究。通过 0.1 ~ 0.7 MPa 不同围压下的分级加载蠕变试验, 揭示了风化红层泥岩试样瞬时弹性变形、衰减蠕变和稳态蠕变三阶段的蠕变行为; 同一围压下, 轴向变形量随应力水平的增大而增大, 且增长速率也逐渐增大; 同一应力水平下, 轴向变形量随围压的增大而增大, 且增长速率也缓慢增大。拟合建立了试样 Burgers 蠕变本构模型方程。在此基础上, 通过数值模拟揭示了自重应力下 1 a 尺度的滑体时效变形特征: 约 98.6% 的变形发生在 60 d 内, 随后进入稳态蠕变阶段; 滑体水平位移量由浅及深逐渐减小, 变形主要集中在后缘 I 级滑体, 最大位移约 54.1 cm, 滑坡变形模式表现为推移式; 剪应变主要位于每一级滑体后缘滑带陡-缓转折处, 最大剪应变约 0.23 %, 但未整体贯通, 总体处于较稳定状态。

关键词: 红层泥岩; 滑坡; 蠕变; Burgers 模型; 时效变形; 天水

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)01-0030-10

Analysis on time-dependent deformation of landslide based on creep characteristics of weathered red mudstone: A case study of the Luobao landslide in Tianshui of Gansu Province

ZHAO Jianlei^{1,2,3}, WANG Tao^{1,2,3}, LIANG Changyu^{1,2,3}, ZHANG Zelin⁴,
LIU Jiamei^{1,2,3}, WANG Haojie^{1,2,3}, XIN Peng^{1,2,3}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Beijing 100081, China; 3. Observation and Research Station of Geological Disaster in Baoji, Shaanxi Province, Ministry of Natural Resources, Baoji, Shaanxi 721001, China; 4. College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2021-12-26; 修订日期: 2022-04-06

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41972301; 41572313); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221738); 国家重点研发计划课题 (2018 YFC1504601)

第一作者: 赵建磊 (1997-), 男, 山东德州人, 地质工程专业, 硕士研究生, 主要从事滑坡机理研究。E-mail: 819347952@qq.com

通讯作者: 王 涛 (1982-), 男, 山东枣庄人, 地质工程专业, 博士, 研究员, 主要从事滑坡形成机理及风险评估研究。

E-mail: wangtaoig@cags.ac.cn

Abstract: Creep of weathered red mudstone is one of the important reasons inducing slope deformation and instability in loess plateau of China. Creep constitutive model of weathered red mudstone and time-dependent deformation characteristics of landslide were performed by using the KTL automatic triaxial instrument and CDEM, in giant -scale multiple rotational landslide of Luobao village in Tianshui City. Under different confining pressures between 0.1–0.7 MPa, the stepwise-loading creep tests on weathered red mudstone samples was performed. The creep process and creep characteristics were analyzed. The results show that the samples have experienced instantaneous elastic deformation stage, attenuation creep stage and steady creep stage. Under the same confining pressure, the increment of elastic deformation varies with different stress levels. The increasing rate of deformation is also increased gradually. At a certain stress level, the final creep of the samples under different confining pressures increases gradually with the increase of confining pressures. The increasing rate of deformation is increased slowly. The fitting results show that Burgers creep constitutive model is in high coincidence with the experimental data. On this basis, time-dependent deformation characteristics and the pattern at 1-year scale under gravity stress were revealed by numerical simulation. The results show that almost 95% of deformation occurred within 60 days, and then it entered the steady creep stage. The horizontal displacement of the slide mass decreases with the increase of the depth. The deformation is mainly concentrated on the slide mass I, the maximum displacement is about 54.1 cm. The landslide shows a thrust load-caused deformation pattern. Shear strain occurs at the steep-slow junction of the trailing part of each slidemass, the maximum shear strain is about 0.23%, but no transfixion occurred. The whole slope is stable.

Keywords: red mudstone; landslide; creep; Burgers model; time-dependent deformation; Tianshui

0 引言

我国西北地区广泛分布新近系泥岩^[1], 在水一秦安地区保存有较为完整的沉积序列。该套岩层根据其成岩时间、胶结程度、单轴抗压强度等工程地质特性可归类为“硬土—软岩”^[2], 综合“红层”等命名习惯^[3], 本文将其称为“红层泥岩”。红层泥岩具有承载力较低、渗透性弱、蠕变特性明显等特点, 是典型的易滑地层, 常发生大型滑坡灾害^[4-5]。红层泥岩蠕变与该地区滑坡的形成和发展有较大关联^[6-7], 此类案例比比皆是, 如秦州区关子镇温家坪滑坡^[8]、太京镇郑家磨滑坡^[9]、甘谷县磐安滑坡^[10]等, 研究红层泥岩的细观蠕变特性和坡体时效变形规律, 对于该区滑坡灾害的研究和防治具有重要意义。

蠕变试验和数值分析是开展蠕变本构模型及边坡变形失稳机理研究的主要手段。其中 Nishihara 模型和 Burgers 模型是常用的岩土体蠕变元件本构模型^[11-14]。谌文武等^[15]对甘肃引洮输水工程 7# 试验平硐红层软岩开展了一系列单轴压缩蠕变试验, 发现试样在各级荷载作用的瞬时轴向应变与轴向荷载大小呈线性关系, 试验曲线符合 Burgers 模型。吴礼舟等^[16]对天水甘谷裂隙泥岩进行了直剪流变试验, 发现裂隙和轴向荷载对裂隙泥岩蠕变特性具有重要影响, 并基于改进的 Nishihara 模型分析了泥岩流变行为, 获取流变特征的本构模型参数。周小棚等^[17]对天水武山泥岩进行三轴压缩蠕变试

验, 确定了泥岩的长期强度, 试验曲线与改进的 Nishihara 模型拟合良好。

数值模拟是边坡长期稳定性及蠕变特性研究的重要手段之一^[18-19], 其中有限差分法和有限元方法广泛应用于含有红层软岩、含泥岩软弱夹层的边坡稳定性研究。刘天翔等^[20]通过 FLAC 建立了复杂数值模型对比分析了边坡开挖、支护等多工况下的时效变形特性状态。古鹏翔等^[21]应用滑带土非线性黏弹塑性模型结合有限元模拟, 预测了边坡一年后软弱夹层变形的发展规律。张晓奇等^[22]应用有限元模拟, 基于滑带土蠕变特性的 Burgers 蠕变模型的计算结果, 对特大型水库滑坡岩土体蠕变特性进行了研究, 对比了常规强度折减法与考虑蠕变的强度折减法的滑坡稳定性系数。上述研究为应用数值模拟解决边坡长期稳定性问题提供了借鉴, 但是对于滑坡体渐进破坏过程和时效变形刻画较少。鉴于此, 本文以天水秦安县雒堡村巨型深层滑坡为例, 通过不同围压、不同应力加载等级下的重塑软岩滑带土试样三轴固结不排水蠕变试验, 开展本构模型研究, 结合连续介质力学离散元方法 (CDEM) 对雒堡村滑坡 1 a 尺度的蠕变特性和时效变形特征进行了分析, 为深化陇东南地区红层泥岩本构认识, 开展滑坡变形特征和稳定性研究提供借鉴。

1 滑坡概况

雒堡村滑坡位于黄土梁峁区陇东南天水盆地秦安

县城西侧,渭河一级支流葫芦河支流西小河左岸,为历史地震滑坡。该滑坡后壁高程约 1 630 m,整体高差约 400 m,滑坡长约 1 800 m,宽约 1 000 m,整体坡度约 15°,平均厚约 70 m,体积约 $1.26 \times 10^8 \text{ m}^3$,滑向 139°(图 1)。滑坡平面形态呈圈椅状,后壁陡坎高 30~40 m,侧壁总体形态保存完好。滑坡后壁出露 Qp 马兰黄土,侧壁出

露新近系 N_2 杨集寨组泥岩^[23]倾角近水平,与上覆黄土呈不整合接触,属巨型深层泥岩滑坡。坡体发育五级主滑体,Ⅲ级滑体后缘陡坎、V级滑体处、左侧壁等处可见多个新滑体,新老滑体之间存在相互切割关系。双沟同源现象明显,地表可见多处裂隙、落水洞,滑坡脚下和坡体上有数千民宅,且新建的平绵高速从滑坡体穿过。

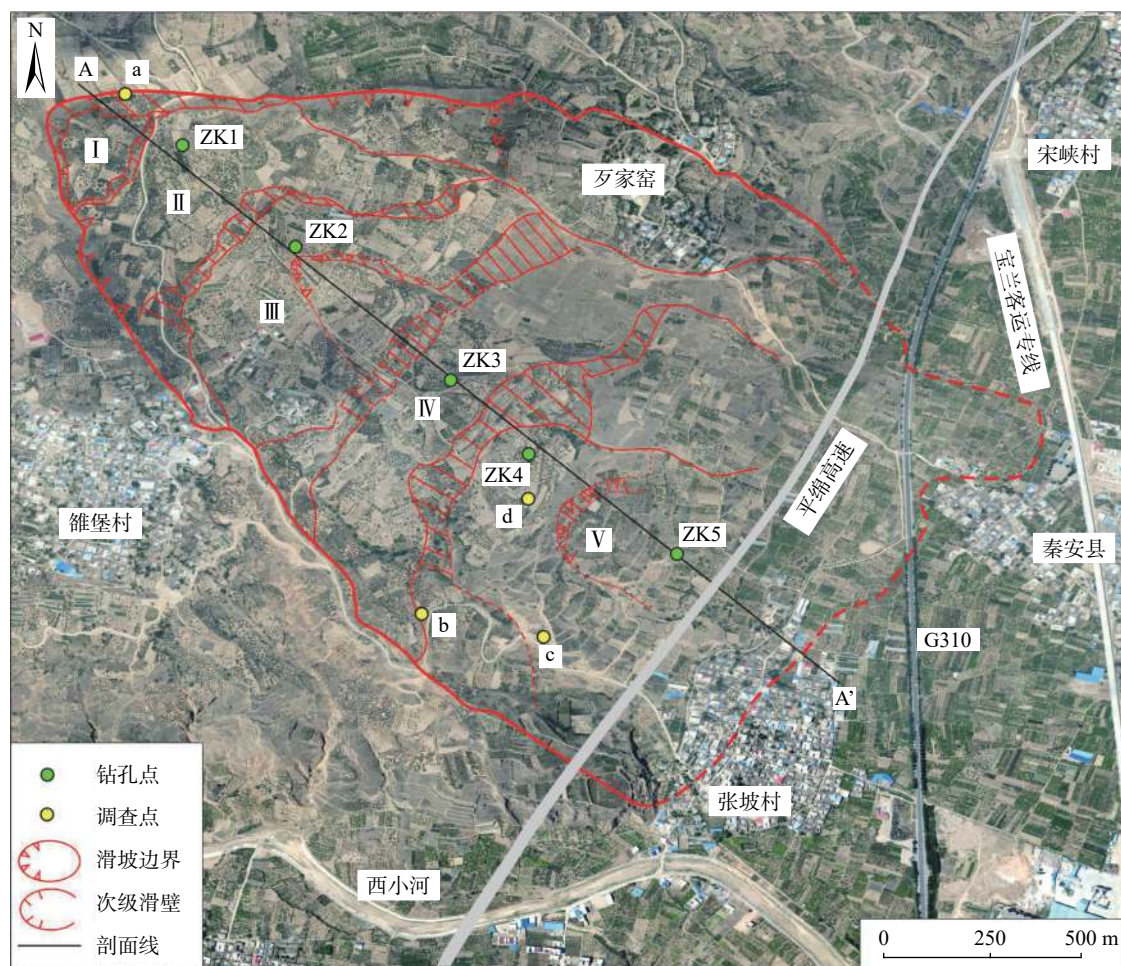


图 1 雒堡村滑坡平面图

Fig. 1 Plan of Luobao landslide

经调查测绘、工程地质钻孔(图 1)揭示,雒堡村滑坡主要由深部主滑带和五个次级滑体组成,滑坡多级滑体的组合关系和变形特征总体受风化红层泥岩滑带控制,且各级滑带均发育在红层软岩中,见图 2(a)。滑坡前缘受浅层滑带剪出扰动影响,泥岩岩层发生反翘变形,见图 2(b);滑体物质主要为风化碎裂的红层泥岩,上部红层软岩内可见次级滑面,深度 40~55 m,断面光滑,擦痕明显,见图 2(c);深部主滑带位于下部 N_1 尧店组泥岩地层中,深度 80~100 m,见图 2(d),厚 3~4 m,整体形态呈近弧形,前缘角度较缓,滑带呈高度塑性

化、劈理化,见图 2(e);滑体后缘呈“阶梯状”,前缘地层反翘,整体为多级旋转型滑坡(图 3)。

2 试验与分析

2.1 试验样品

试样取自滑坡 ZK3 工程地质钻孔滑带附近,见图 2(d),取样深度 84~89 m,为风化的新近系红层泥岩,浅棕红色,岩质较均匀,稍湿稍硬,含少量的结核及灰绿色斑点。重塑试样尺寸为 $\Phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ (图 4),基本物理力学参数如表 1 所示。



图2 雒堡村滑坡现场调查照片

Fig. 2 Photos of Luobao landslide obtained from site investigation

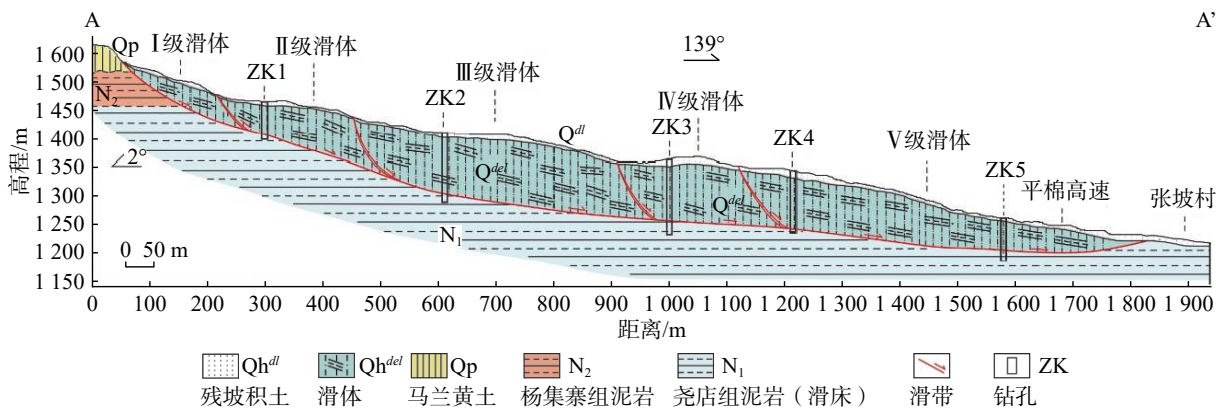


图3 Engineering geological profile of Luobao landslide

2.2 试验设备与方法

试验采用 KTL 全自动三轴仪进行(图 4), 其中围压和反压体积压力控制器最大压力 2 MPa, 最大体积 200 mL; 压力精度 0.2 %, 压力分辨率 0.1 kPa; 体积精度 0.15 %, 体积分辨率 0.062 5 mm³。为了避免温度变化对试验成果的影响, 试验室采用空调进行温度控制, 试验过程中温度控制在 20 ℃ 左右。试验前通过固结不排水剪(CU)试验确定试样的变形模量以及不同围压下的

破坏偏应力, 根据 Mohr-Coulomb 强度破坏准则计算得到黏聚力为 4.9 kPa, 内摩擦角 32.6 °。

蠕变试验过程中以轴向变形作为控制标准, 每级轴向荷载稳定时间约 12 d。依据强度指标, 按围压 0.1 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa 计算各级应力水平(施加应力与最大应力之比) $S=0.30、0.50、0.70、0.85$ 下的偏应力竖向荷载。在已知三轴应力条件下, 稳定应力状态若干时间(约 12 d), 记录不同时刻试样变形, 当

表 1 泥岩基本物性参数

Table 1 Basic physical parameters of mudstone

参数	干密度/(g·cm ⁻³)	湿密度/(g·cm ⁻³)	颗粒密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%	软化系数
数值	2.13 ~ 2.34	2.17 ~ 2.36	2.59 ~ 2.74	10.8 ~ 22.0	0.3 ~ 0.97(0.70*)

注: *为均值。

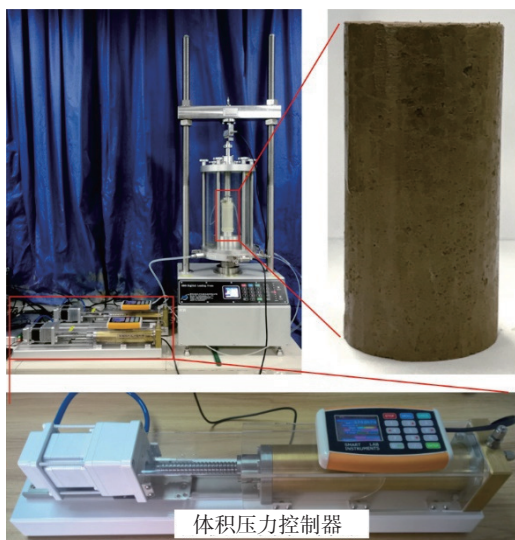


图 4 KTL 全自动三轴仪及样品照片

Fig. 4 The KTL automatic triaxial instrument and the sample

达到预定时间后施加下一级荷载。

2.3 试验结果与分析

按照上述试验条件进行三轴蠕变试验, 得到轴向应变与时间的关系如图 5 所示。该区泥岩蠕变曲线具有如下特征: 试样均经历了瞬时弹性变形阶段、衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段。在任一应力水平下, 加载瞬间均发生瞬时弹性响应, 随后产生随时间逐渐增长的蠕变变形, 约 13 h 后变形速率逐渐降低, 约 36 h 后变形不再增长, 在 288 h 试验阶段内试样的最终变形趋于一个稳定值。

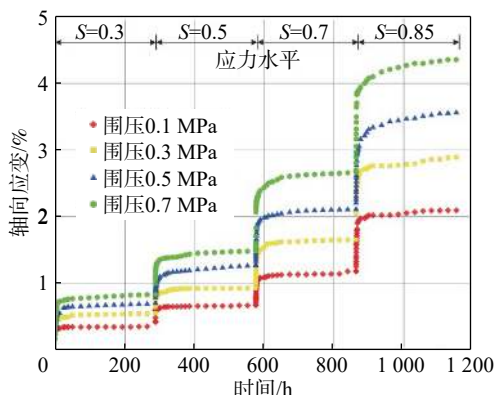


图 5 不同围压下分级加载试样蠕变曲线

Fig. 5 Creep curves under gradation loading and different confining pressures

应用 Origin 软件绘制不同围压及应力水平条件下稳态蠕变阶段轴向应变分布如图 6 所示。分析显示: 在同一围压下, 轴向变形量随应力水平的增大而增大, 增长速率也在逐渐增大。以 0.7 MPa 围压为例, 应力水平由 0.3 增至 0.5 时, 轴向应变增加 0.65 %, 由 0.5 增至

0.7 时, 轴向应变显著增加 1.18 %。在同一应力水平, 轴向变形量随围压的增大而增大, 增长速率同样在缓慢增大。以 0.5 应力水平为例, 试样由 0.1 MPa 增至 0.3 MPa 围压, 轴向变形量增加 0.26 %, 由 0.3 MPa 继续增大至 0.5 MPa 围压, 轴向变形量增加 0.34 %。

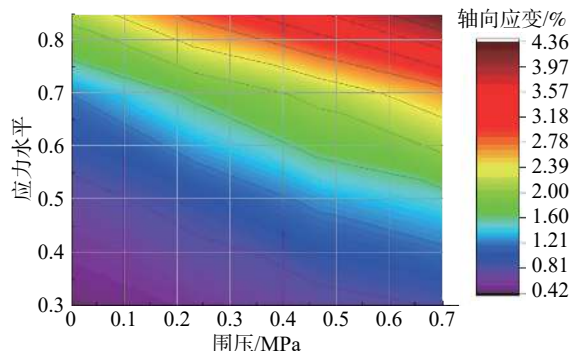


图 6 围压-应力水平条件下试样轴向应变分布图

Fig. 6 Axial strain distribution of samples under confining pressure-stress level conditions

3 蠕变模型分析

上文分析可知, 所有试样均经历了瞬时弹性变形阶段、减速蠕变阶段和稳态蠕变阶段, 推断与 Burgers 模型的蠕变特征相符。Burgers 模型由 Kelvin 模型和 Maxwell 模型串联而成, 其元件模型如图 7 所示。其中, Maxwell 体描述材料的弹性和黏性特征, 反映岩石在加载阶段的瞬时变形以及稳态蠕变阶段的常速率的蠕变变形; Kelvin 体描述材料的黏弹性特性, 反映岩石的衰减蠕变。

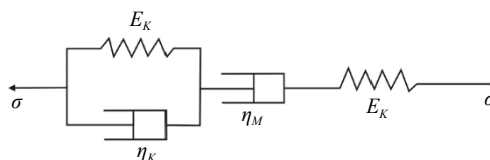


图 7 Burgers 模型示意图

Fig. 7 Burgers model diagram

一维条件下, Burgers 蠕变模型的公式为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1}{E_K} + \frac{\sigma_1}{\eta_K} t + \frac{\sigma_1}{E_M} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_M}{\eta_M} t\right) \right] \quad (1)$$

三维条件下, 假定试样体积变化是弹性的, 蠕变变形主要由偏差应力引起, 当有效应力小于偏屈服应力时, 等围压三轴剪切应力状态下的 Burgers 模型蠕变方程可表示^[24]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3E_K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_K} t + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3E_M} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_M}{\eta_M} t\right) \right] \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_3 ——第一和第三主应力/MPa;
 E_K 、 E_M ——弹性参数/MPa;
 η_K 、 η_M ——黏性参数/(MPa·h);
 ε ——模型的应变/%;
 t ——蠕变时间/h。

利用泥岩蠕变的各阶段应变-时间数据,经计算拟合求出蠕变参量 E_i 、 η_i ($i=K、M$),模型参数拟合相关系数方差(R)均在 0.95 以上(图 8),表明模型拟合曲线和试验数据吻合度高,模型拟合曲线能够很好地描述试样衰减蠕变过程中的减速蠕变和等速蠕变特征。

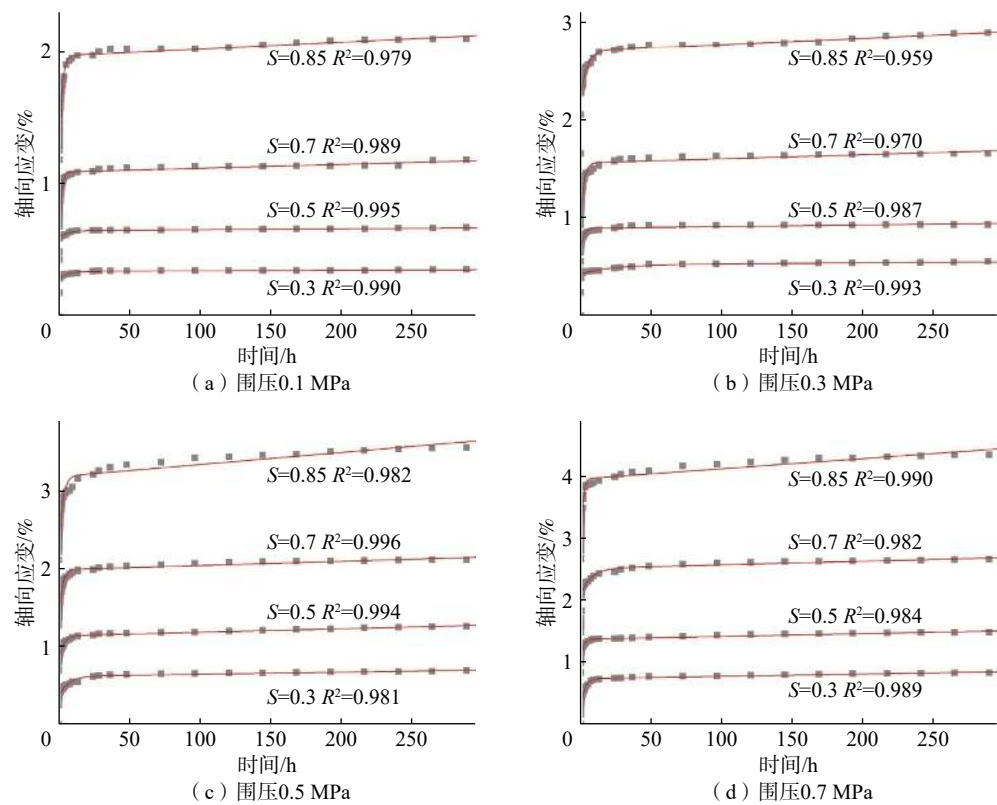


图 8 泥岩蠕变试验数据与拟合曲线
Fig. 8 Testing date and fitting curves obtained by mudstone creep tests

4 滑坡时效变形

基于雒堡村滑坡剖面图,建立滑坡二维数值分析模型(图 9)。本次利用基于连续介质力学的离散单元方法(CDEM)开展雒堡村滑坡的时效变形模拟,并在滑体表层(I a—V a₂)、各次级滑带(II b—V b)、深部主滑带

(I c₁—V c)建立监测点,监测滑体位移及滑带剪应变演化规律,深入分析宏观尺度下泥岩蠕变性质对滑坡时效变形的影响。模型边界条件采用静态边界,左右两侧约束水平速度,底部约束垂直速度。后壁黄土及滑床泥岩采用摩尔—库伦本构模型,滑体及滑带采用 Burgers 本构模型。

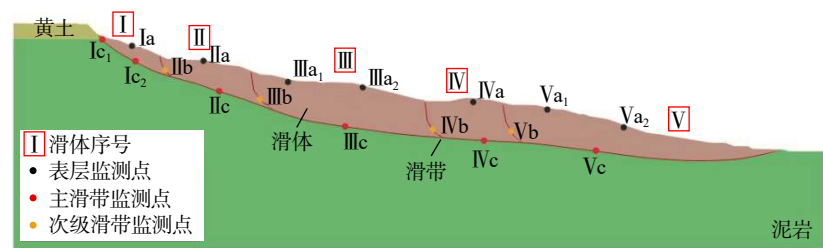


图 9 雒堡村滑坡数值模型
Fig. 9 Numerical model of Luobao landslide

根据取样测试分析结果及区内同类岩土样品前期研究基础^[25-30],岩土体的基本物理力学参数及蠕变模型参数取值如表2、表3所示。考虑到岩土体长期强度一般大于残余强度^[31-33],滑带土蠕变模型黏弹性参数取值由固结不排水剪试验残余强度适当调整得出。

表 2 岩土体物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

序号	材料	密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)
1	滑体	2.08	171.0	0.25	15.0	32
2	滑带土	2.00	106.0	0.26	10.0	23
3	黄土	1.60	56.2	0.28	36.4	25
4	泥岩	2.13	1 920.0	0.20	5 130.0	34

根据水平位移模拟结果,滑坡时效变形趋势整体上符合软岩蠕变变形的基本特征,滑体水平位移量增长率随时间的增加逐渐减小。(1)初始蠕变阶段,见图10(a),变形主要集中在坡体表层,水平位移量随滑体深度的增大而减小。后缘Ⅰ级滑体发生强变形,水平位移量达到21.1 cm;Ⅲ、Ⅴ两级滑体中浅部发生中等变

表 3 滑坡滑体及滑带土蠕变参数
Table 3 Creep parameters of landslide deposits and the sliding body

序号	材料	E_K/MPa	$\eta_K/(\text{MPa}\cdot\text{h})$	E_M/MPa	$\eta_M/(\text{MPa}\cdot\text{h})$
1	滑体	68.4	342 000	68.4	300
2	滑带土	40.6	176 000	40.6	85

注:表中变量参照式(2)变量解释。

形,水平位移量约15 cm;而Ⅱ、Ⅳ两级滑体变形量较小,水平位移量约10 cm,见图12(a)。(2)衰减蠕变阶段,见图10(b)、(c),蠕变变形60 d内,随着时间增长,坡体水平位移逐渐增大,变形速率逐渐降低。主要变形区域集中在Ⅰ级滑体,并向前缘扩展,最大位移量由21.1 cm增长到53.4 cm,约占1 a总体变形量的98.6%。(3)稳态蠕变阶段,见图10(d),最大位移位于Ⅰ级滑体,约54.1 cm;Ⅱ级滑体浅部在Ⅰ级滑体的推动下水平位移量次之,约27.9 cm;Ⅳ级滑体及滑坡坡脚变形量最小,水平位移量约11.5 cm。Ⅲ、Ⅴ两级滑体在坡角及Ⅱ、Ⅳ两级滑体的阻滞作用下10 d内便进入稳态阶段,水平位移量约17.2 cm。

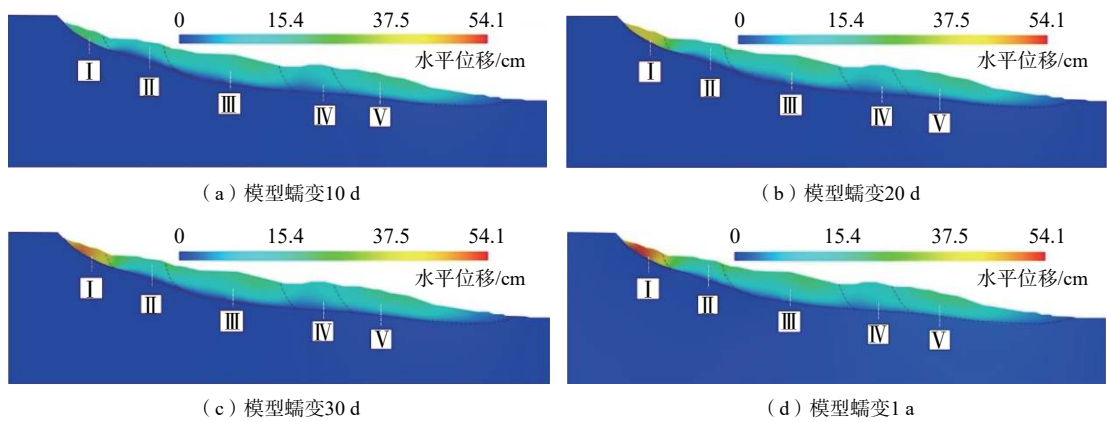


图 10 雒堡村滑坡数值模型水平位移云图
Fig. 10 Horizontal displacement nephogram of the numerical model of Luobao landslide

根据塑性剪应变模拟结果,等速蠕变阶段,剪应变出现在Ⅰ级滑体滑带、Ⅲ级滑体和Ⅴ级滑体后缘滑带与缓倾主滑带转折处,各级滑体尚未贯通(图11),最大剪应变位于滑坡后缘主滑带位置,达到0.23%,其他部位塑性剪应变均小于0.05%,见图12(b),Ⅱ、Ⅳ两级滑体及坡脚对坡体起到阻滑作用,滑体总体处于较稳定状态。
综合分析水平位移和剪应变可知,滑坡具有沿各级滑带分级滑动的特征,最大主应变位于坡体后缘滑带位置,与最大位移分布一致,因此坡体在蠕变作用下的主

要变形模式总体表现为后缘滑体主动变形推移、中前部滑体相对稳定阻滞的推移式特征。此类滑坡如在蠕变作用下形成宏观裂隙,则易在降雨入渗或上部载荷作用下使裂隙与深部缓倾滑带贯通,有发生整体缓慢滑动的可能。

5 结论

通过对天水雒堡村巨型多级旋转滑坡风化红层泥岩试样的三轴蠕变试验,拟合了Burgers模型,结合基于连续介质力学的离散单元方法(CDEM),对泥岩蠕变特

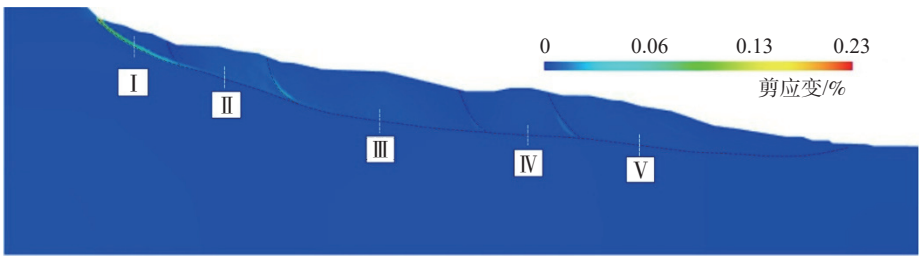


图 11 雒堡村滑坡数值模型蠕变 1 a 后剪应变云图

Fig. 11 Shear-strain nephogram of the numerical model of Luobao landslide after creep for 1 year

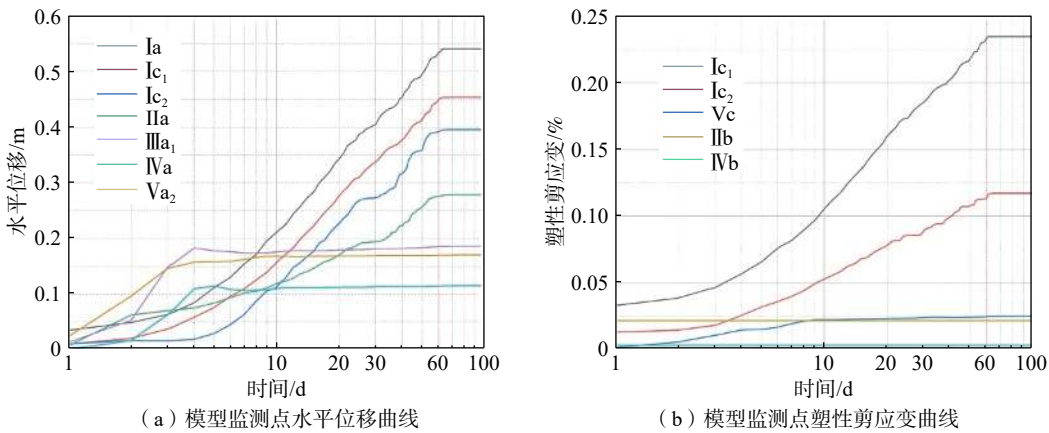


图 12 雒堡村滑坡数值模型监测点水平位移、塑性剪应变曲线

Fig. 12 Monitoring curve of plastic shear strain and X-displacement of monitor point of the numerical model of Luobao landslide

性及多级滑体 1 a 尺度下时效变形特征进行了研究, 结论如下:

(1)试样蠕变试验过程经历了瞬时弹性变形阶段、衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段。同一围压下, 轴向变形量随应力水平的增大而增大, 增长速率也在逐渐增大; 同一应力水平, 轴向变形量随围压的增大而增大, 增长速率同样在缓慢增大。通过拟合建立了试样 Burgers 蠕变本构模型方程。

(2)基于 Burgers 蠕变本构模型的数值模拟研究可以合理地描述该地区红层泥岩边坡多级滑体的时效变形特征。蠕变过程中 98.6% 的变形量集中在数值模型自重应力平衡后 60 d 内, 随后滑体进入稳态蠕变阶段。变形主要集中在后缘 I 级滑体, 最大位移约 54.1 cm, 水平位移量随滑体深度的增大而减小; 最大剪应变位于后缘主滑带处, 约 0.23%。

(3)结合数值模拟结果, 总结了秦安地区此类多级旋转软岩滑坡蠕变变形模式: 滑坡变形模式总体表现为后缘滑体主动变形推移、中前部滑体相对稳定阻滞的推移式特征; 剪应变出现在 I 级滑体滑带、III 级滑体和 V 级滑体后缘滑带与缓倾主滑带转折处, 各级滑体尚未贯通, II、IV 两级滑体及坡脚对坡体起到阻滑作用, 滑

坡整体处于较稳定状态。

致谢: 本文在应用 CDEM 方法开展数值模拟研究过程中得到中国科学院力学所冯春老师的帮助, 在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

[1] 张军. 陇中盆地秦安—天水地区新近纪沉积物成因与环境变化 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008. [ZHANG Jun. Formation cause of the Neogene sediments in Tianshui-Qin'an area in Longzhong Basin and the paleoenvironmental change [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. (in Chinese with English abstract)]

[2] 张永双, 曲永新. 硬土—软岩的厘定及其判别分类 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 77–80. [ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Definition of hard soil-soft rock and its discrimination and classification [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(1): 77–80. (in Chinese with English abstract)]

[3] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征 [J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34–40. [CHENG Qiang, KOU Xiaobing, HUANG Shaobin, et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 34–

40. (in Chinese with English abstract)]
- [4] WANG Tao, LIU Jiamei, SHI Jusong, et al. Probabilistic seismic landslide hazard assessment: A case study in Tianshui, Northwest China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(1): 173 – 190.
- [5] 窦晓东, 张泽林. 甘肃舟曲垭豁口滑坡复活机理及成因探讨 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 9 – 18. [DOU Xiaodong, ZHANG Zelin. Mechanism and causal analysis on the Yahuokou landslide reactivation and causes(Zhouqu County, Gansu, China) [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 9 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李滨, 殷跃平, 吴树仁, 等. 多级旋转黄土滑坡形成机理及失稳模式 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 760 – 769. [LI Bin, YIN Yueping, WU Shuren, et al. Failure mode and formation mechanism of multiple rotational loess landslides [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 760 – 769. (in Chinese with English abstract)]
- [7] FURUYA G, SASSA K, HIURA H, et al. Mechanism of creep movement caused by landslide activity and underground erosion in crystalline schist, Shikoku Island, southwestern Japan [J]. *Engineering Geology*, 1999, 53(3/4): 311 – 325.
- [8] 张泽林. 典型黄土滑坡启动机制及成灾模式研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2016. [ZHANG Zelin. The initiating mechanism and runout pattern of typical seismic loess landslides [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [9] ZHANG Zelin, WANG Tao, WU Shuren, et al. Dynamics characteristic of red clay in a deep-seated landslide, northwest China: An experiment study [J]. *Engineering Geology*, 2018, 239: 254 – 268.
- [10] SUN Ping, LI Rongjian, JIANG Hao, et al. Earthquake-triggered landslides by the 1718 Tongwei earthquake in Gansu Province, northwest China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76(4): 1281 – 1295.
- [11] 卢萍珍, 曾静, 盛谦. 软黏土蠕变试验及其经验模型研究 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(4): 1041 – 1044. [LUPingzhen, ZENG Jing, SHENG Qian. Creep tests on soft clay and its empirical models [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 1041 – 1044. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 万玲, 彭向和, 杨春和, 等. 泥岩蠕变行为的实验研究及其描述 [J]. *岩土力学*, 2005, 26(6): 924 – 928. [WAN Ling, PENG Xianghe, YANG Chunhe, et al. An investigation to the creep of claystone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(6): 924 – 928. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 甘肃天水泥岩剪切蠕变行为及其模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增刊 2): 3603 – 3617. [ZHANG Zelin, WU Shuren, WANG Tao, et al. Study on shear creep behavior and its model of mudstone in Tianshui, Gansu Province [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Sup 2): 3603 – 3617. (in Chinese with English abstract)]
- [14] LI Anrun, DENG Hui, ZHANG Haojie, et al. The shear-creep behavior of the weak interlayer mudstone in a red-bed soft rock in acidic environments and its modeling with an improved Burgers model [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2021: 1 – 18.
- [15] 谌文武, 原鹏博, 刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊 1): 3076 – 3081. [CHEN Wenwu, YUAN Pengbo, LIU Xiaowei. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup 1): 3076 – 3081. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 吴礼舟, 李部, 孙萍. 甘肃甘谷裂隙泥岩剪切蠕变行为及其修正模型研究 [J]. *地质力学学报*, 2017, 23(6): 923 – 934. [WU Lizhou, LI Bu, SUN Ping. Study on shear creep behavior of mudstone and its correction model of Gangu fissure in Gansu [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(6): 923 – 934. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 周小棚, 李部, 吴礼舟, 等. 甘肃天水泥岩压缩蠕变特性试验及模型研究 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(2): 139 – 145. [ZHOU Xiaopeng, LI Bu, WU Lizhou, et al. Gansu Tianshui mudstone rock compression creep property test and model research [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(2): 139 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [18] PUZIRIN A M, SCHMID A. Evolution of stabilised creeping landslides [J]. *Geotechnique*, 2012, 62(6): 491 – 501.
- [19] WANG Yanchao, CONG Lu, YIN Xiaomeng, et al. Creep behaviour of saturated purple mudstone under triaxial compression [J]. *Engineering Geology*, 2021, 288: 106159.
- [20] 刘天翔, 杜兆萌, 程强, 等. 红层软岩高边坡的时效变形特性 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(27): 11315 – 11322. [LIU Tianxiang, DU Zhaomeng, CHENG Qiang, et al. Time-dependent deformation characteristics of high slope in red layer soft rock [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(27): 11315 – 11322. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 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)]
- [22] 张晓奇, 胡新丽, 刘忠绪, 等. 岷爬滑坡滑带土蠕变特性

- 及其稳定性 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(6): 145–153. [ZHANG Xiaoqi, HU Xinli, LIU Zhongxu, et al. Creep properties and stability of sliding zone soil in Gapa landslide [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(6): 145–153. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 陈鹏, 施伟, 杨家喜, 等. 天水盆地晚新生代构造演化: 对青藏高原北东向扩展的指示意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(2): 308–322. [CHEN Peng, SHI Wei, YANG Jiaxi, et al. Late cenozoic tectonic evolution of Tianshui Basin: Implications for the northeast growth of Tibetan Plateau [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(2): 308–322. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张治亮, 徐卫亚, 王伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 132–140. [ZHANG Zhiliang, XU Weiya, WANG Wei. Study of triaxial creep tests and its nonlinear visco-elastoplastic creep model of rock from compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 132–140. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 孙萍, 祝恩珍, 张帅, 等. 地震作用下甘肃天水地区黄土-泥岩接触面滑坡机理 [J]. 现代地质, 2019, 33(1): 218–226. [SUN Ping, ZHU Enzhen, ZHANG Shuai, et al. Mechanism of earthquake-triggered loess-mudstone interface landslide in Tianshui area, Gansu Province [J]. Geoscience, 2019, 33(1): 218–226. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 王浩杰, 孙萍, 韩帅, 等. 甘肃通渭“9·14”常河滑坡成因机理 [J]. 现代地质, 2021, 35(3): 732–743. [WANG Haojie, SUN Ping, HAN Shuai, et al. Failure mechanism of the Changhe landslide on September 14, 2019 in Tongwei, Gansu [J]. Geoscience, 2021, 35(3): 732–743. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 张泽林, 王涛, 吴树仁, 等. 泥岩中软弱夹层的剪切力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 713–724. [ZHANG Zelin, WANG Tao, WU Shuren, et al. Study on shear mechanical properties of mudstone with weak intercalation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 713–724. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 闫玉平, 肖世国. 考虑滑带强度参数分区取值的堆积层滑坡稳定性分析方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 44–49. [YAN Yuping, XIAO Shiguo. Stability analysis method for bedrock-talus landslides considering strength parameter partition of slip shear band [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 44–49. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 杨玉茹, 李文平, 王启庆. 上新世红土微观结构参数与渗透系数的变化关系研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 153–160. [YANG Yuru, LI Wenping, WANG Qiqing. A study of the relationship between the coefficient of permeability and microstructure of the pliocene laterite [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 153–160. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 张海清, 贾会会, 聂庆科. 土体抗拉强度对均质边坡稳定性的影响 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1324–1337. [ZHANG Haiqing, JIA Huihui, NIE Qingke. Influence of soil tensile strength on stability of homogeneous slope [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1324–1337. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 李滨. 多级旋转型黄土滑坡形成演化机理研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009. [LIBin. Research on formation evolution mechanism of multiple rotational loess landslides [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 赵洲, 宋晶, 刘锐鸿, 等. 各向异性对软土力学特性影响的离散元模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 70–77. [ZHAO Zhou, SONG Jing, LIU Ruihong, et al. Discrete element simulation of the influence of anisotropy on the mechanical properties of soft soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 70–77. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 曹海莹, 郭毅磊, 杜量. 动、静载环境下界面土直剪试验 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1381–1390. [CAO Haiying, GUO Yilei, DU Liang. Direct shear test of soil interfacial layer under dynamic and static load [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1381–1390. (in Chinese with English abstract)]