

齐东鸿,邓龙胜,范文,等. 黄土-古土壤结构面蠕变特性及分数阶非线性模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):675-687.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240431

QI Donghong, DENG Longsheng, FAN Wen, et al. Creep characteristics and fractional order nonlinear model of loess-paleosol structural surface[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(6): 675-687. DOI: 10.11956/j.issn. 1008-0562.20240431

黄土-古土壤结构面蠕变特性及分数阶非线性模型

齐东鸿¹, 邓龙胜^{1,2*}, 范文¹, 王宗斌³, 张超⁴

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 地质灾害成因机理与风险防控陕西省高等学校重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 北京建达道桥咨询有限公司, 北京 100015; 4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为揭示黄土-古土壤接触面蠕变机理, 解决传统模型难以表征加速蠕变阶段的问题, 以泾阳南塬寨头村滑坡接触面为研究对象, 开展不同围压及含水状态下土体三轴蠕变试验, 结合等时曲线法与稳态蠕变速率法确定土体的长期强度阈值, 提出以 5% 轴向应变所对应的应力作为土体长期强度。引入非线性黏壶元件与分数阶微积分理论, 构建耦合应力、时间和含水率的蠕变本构模型, 并采用 BFGS 算法对参数进行优化。研究结果表明: 增大围压可显著提高土体屈服强度, 饱水状态可降低蠕变破坏应力; 与传统模型相比, 改进的 Burgers 模型能更准确地捕捉加速蠕变阶段的蠕变特征, 揭示接触面蠕变的非线性演化规律。研究结论为黄土滑坡长期稳定性预测及工程边坡设计优化提供理论依据。

关键词: 黄土-古土壤结构面; 蠕变特性; 三轴蠕变试验; 长期强度; 分数阶微积分; 改进 Burgers 模型

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)06-0675-12

Creep characteristics and fractional order nonlinear model of loess-paleosol structural surface

QI Donghong¹, DENG Longsheng^{1,2*}, FAN Wen¹, WANG Zongbin³, ZHANG Chao⁴

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Geological Hazards and Risk Prevention and Control, Xi'an 710054, China;

3. Beijing Jianda Road and Bridge Consulting Company Limited, Beijing 100015, China;

4. Power China Northwest Survey, Design and Research Institute Company Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: To elucidate the creep mechanism of the loess-paleosol structural surface and address the limitations of traditional models in characterizing the accelerated creep stage, this study investigates the loess-paleosol interface at the Zhaitoucun village landslide (Jingyang South Plateau) by conducting triaxial creep experiments under controlled confining pressure and moisture content conditions. The long-term strength threshold was determined by using both isochronous curve method and steady-state creep rate method, with 5% axial strain-defined stress established as the long-term strength criterion. An enhanced Burgers model incorporating nonlinear viscoelastic-plastic elements and fractional-order calculus theory was developed to construct a creep constitutive model coupling stress, time, and moisture content, optimized through BFGS algorithm. Results of study demonstrate that increased confining pressure significantly enhances soil yield strength, while saturated conditions reduce creep failure stress. Compared with conventional models, the modified Burgers model more accurately captures the creep characteristics of the accelerated creep stage, effectively revealing nonlinear evolution patterns at the structural surface. The research conclusions provide theoretical foundations for long-term stability prediction of loess landslides and optimization of engineering slope designs.

收稿日期: 2024-11-26 修回日期: 2025-01-16 接受日期: 2025-01-27 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国际重点合作项目 (42220104005); 国家重点研发计划项目 (2022YFC3003403); 国家自然科学基金项目 (42472348)

作者简介: 齐东鸿 (2000-), 男, 陕西 商洛人, 硕士研究生, 主要从事地质资源与地质工程方面的研究。E-mail: qdh@chd.edu.cn

通信作者: 邓龙胜 (1981-), 男, 云南 昭通人, 博士, 教授, 主要从事黄土微结构、黄土力学和地质灾害方面的研究。E-mail: dlsh@chd.edu.cn

Keywords: loess-paleosol structural surface; creep characteristics; triaxial creep test; long-term strength; fractional calculus; modified Burgers model

0 引言

黄土-古土壤结构面是黄土沉积过程中形成的土体介质物相变异带^[1], 广泛分布于黄土地层中。作为一种典型的沉积结构面, 其两侧土体的结构特征及物理性质差异较大, 在接触带滞水效应与黄土强烈水敏性的共同作用下, 流变特性显著^[2]。在载荷、人工灌溉、降雨及地下水位升降等因素的长期作用下, 结构面可能发生蠕变破坏, 影响坡体的均匀性、连续性和稳定性^[3], 进而影响建筑的长期稳定性。研究该类结构面的蠕变特性及本构模型, 对黄土边坡防灾减灾意义重大。

蠕变效应引发的滑坡灾害隐蔽性强、危害大。陈琼等^[4]研究了不同加载方式和固结状态下滑带土体的剪切蠕变特性。WANG等^[5]揭示了滑坡滑动带土体的蠕变特性。李昂等^[6]探讨了不同应力状态下黄土的蠕变规律。葛苗苗等^[7]研究发现颗粒蠕滑及大孔隙压缩会导致黄土发生蠕变。慕焕东等^[8]基于分数阶模型模拟了土体蠕变全过程。对结构面蠕变特征、长期强度和蠕变模型的研究是岩土力学和工程领域的重要分支^[9-10]。李剑等^[11]通过剪切蠕变试验与数值模拟, 揭示了硅质板岩的蠕变时效特性及高边坡变形破坏演化规律, 并采用稳态蠕变速率法确定了长期抗剪强度参数。郭汝涛等^[12]采用自定义本构模型接口编写西原蠕变模型动态链接库, 实现了隧道围岩结构面长期蠕变变形的精确模拟与预测。宋洋等^[13]提出隐伏非贯通软弱夹层缩尺制备方法和多参数渐变损伤本构模型, 揭示了边坡蠕变滑移的力学特性及稳定性演化规律。

目前, 学界已有基于损伤力学、多尺度分析、非线性弹性理论、塑性理论及黏塑性理论的蠕变模型^[14-19]。但现有研究多聚焦于岩体或黄土等单一材料, 对黄土-古土壤结构面这一复杂界面蠕变特性的系统研究较少, 且无法详细、准确地描述其蠕变试验中加速蠕变阶段的曲线变化, 以及不同应力状态下土体的长期变形行为。此外, 当前黄土蠕变本构模型的研究大多基于经典黏弹塑性理论, 例如 Burgers 模型、黏弹性-损伤耦合模型等, 这些模型在描述均质材料的蠕变特性方面具有一定优势, 但对于接触面剪切滑动非线性特性的描述能力不足。

本文以黄土-古土壤结构面为研究对象, 通过开展不同围压条件下天然、饱和状态土体三轴蠕变试验, 系统分析黄土-古土壤结构面的蠕变特性。

采用等时曲线法和稳态蠕变速率法, 揭示接触带土体的长期强度特征及变化规律。引入非线性黏壶元件改进传统 Burgers 模型, 并与 Burgers 模型、Merchant 模型进行对比, 验证新蠕变本构模型描述黄土-古土壤结构面蠕变特性的精度和适用性, 以期区域工程设计和黄土边坡长期稳定性评价提供理论依据。

1 黄土-古土壤结构面蠕变试验

试样取自陕西省咸阳市泾阳县寨头村滑坡 L2-S2 结构面, 该接触带是滑坡滑面的主要控制带。现场调查及室内试验结果显示, 与 L2 地层相比, S2 地层的颗粒粒径更小, 密度更大。S2 顶部土体含水量较高, 滞水效应显著。取样位置见图 1。考虑滑坡体深度、结构面分布和力学性质, 采用人工刻槽法取回原状土样, 立即制样并对试样进行保湿养护, 试样直径为 39.1 mm, 高为 80 mm。预先制备三轴压缩试验第 2 组试样, 采用“真空饱和法”直至试样达到饱和含水率。

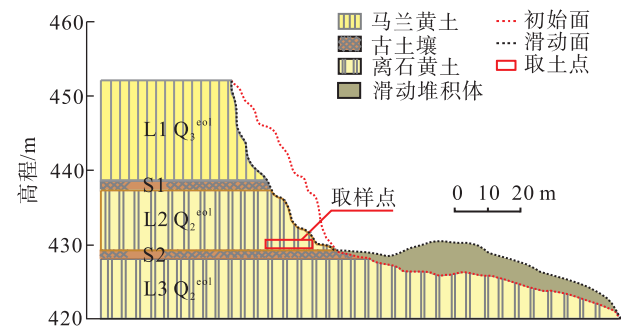


图 1 取样位置

Fig.1 sampling position

采用 Bettersize2000 激光粒度分布仪分析接触带黄土, 得到粒度级配曲线, 见图 2。由图 2 可知, 接触带土体的细粒 ($5 \sim 75 \mu\text{m}$) 含量最高, 黏粒 (小于 $5 \mu\text{m}$) 含量次之, 砂粒 (大于 $75 \mu\text{m}$) 含量极少, 属于黏黄土。土体基本物理参数见表 1。

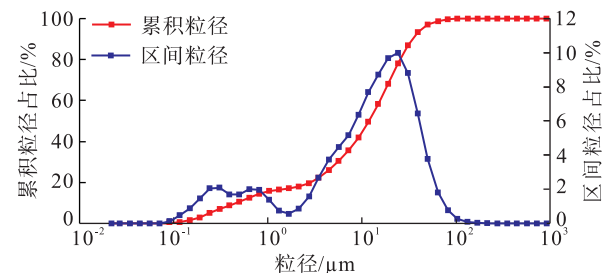


图 2 土体粒径分布

Fig.2 soil particle size distribution

表 1 土体基本物理参数				
Tab.1 basic physical parameters of soil				
含水率/%	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	塑限 w_p /%	液限 w_L /%	比重 G_s
21.68	1.80	17.26	34.76	2.5

注:含水率为质量分数。

制备两组试样,其中,第1组为未受扰动的天然黄土试样,记为N;第2组为经过真空抽气,并用蒸馏水饱和达到所需含水率的试样,记为S。采用改进的CSS-2901TS型三轴流变仪,以轴向分级加载方式开展蠕变试验,研究自然状态下结构面黄土的蠕变特性。依据取样土层深度设置5种围压,分别为100 kPa、150 kPa、200 kPa、250 kPa和300 kPa。试验机及三轴蠕变试验试样见图3。分级加载方案见表2。

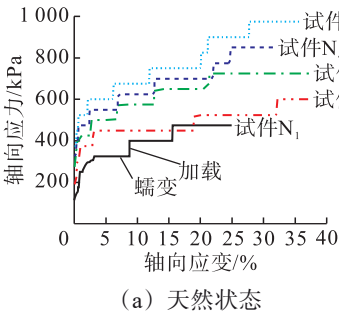


(a) 试验机



(b) 三轴蠕变试验试样

图3 试验机及三轴蠕变试验试样
Fig.3 creep test machine and triaxial creep test samples



(a) 天然状态

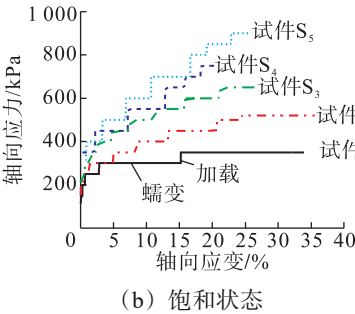
表 2 分级加载方案		
Tab.2 hierarchical loading scheme		
试样	围压 σ_3 /kPa	偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ /kPa
N ₁	100	75,150,225,300,375
S ₁	100	50,100,150,200,250
N ₂	150	75,150,225,300,375,450
S ₂	150	50,100,150,200,250,300,350,370
N ₃	200	75,150,225,300,375,450,525
S ₃	200	50,100,150,200,250,300,350,400,450
N ₄	250	75,150,225,300,375,450,525,600
S ₄	250	100,200,300,400,450,500
N ₅	300	75,150,225,300,375,450,525,600,675
S ₅	300	100,200,300,400,500,550,600

注: σ_1 为轴向应力,kPa。

2 黄土-古土壤结构面蠕变特性

2.1 应力-应变全过程曲线

采用 Boltzmann 叠加原理^[20-21],得到天然、饱和状态下土体的蠕变曲线及不同围压、不同偏应力下的应变,分别见图4~图6。由图4~图6可知,随着轴向应力的增大,结构面黄土的应变呈阶梯状对数型增长。随着偏应力的增大,蠕变应变(即图中的轴向应变)随之增大。在相同的环境条件下,较大的偏应力不仅会导致更大的蠕变应变,且会延长试样达到稳定蠕变阶段所需的时间。围压对土体蠕变行为影响显著,稳态蠕变应变与围压呈负相关,表明围压的增大会减小平衡状态下的蠕变应变。在偏应力与围压相同的条件下,与天然状态相比,饱和状态下土体的蠕变变形更显著。这是由于饱和状态下黄土结构内部摩擦较小,颗粒流动性较强,土体对蠕变的敏感性更强。



(b) 饱和状态

图4 不同状态下土体蠕变曲线
Fig.4 soil creep curve under different conditions

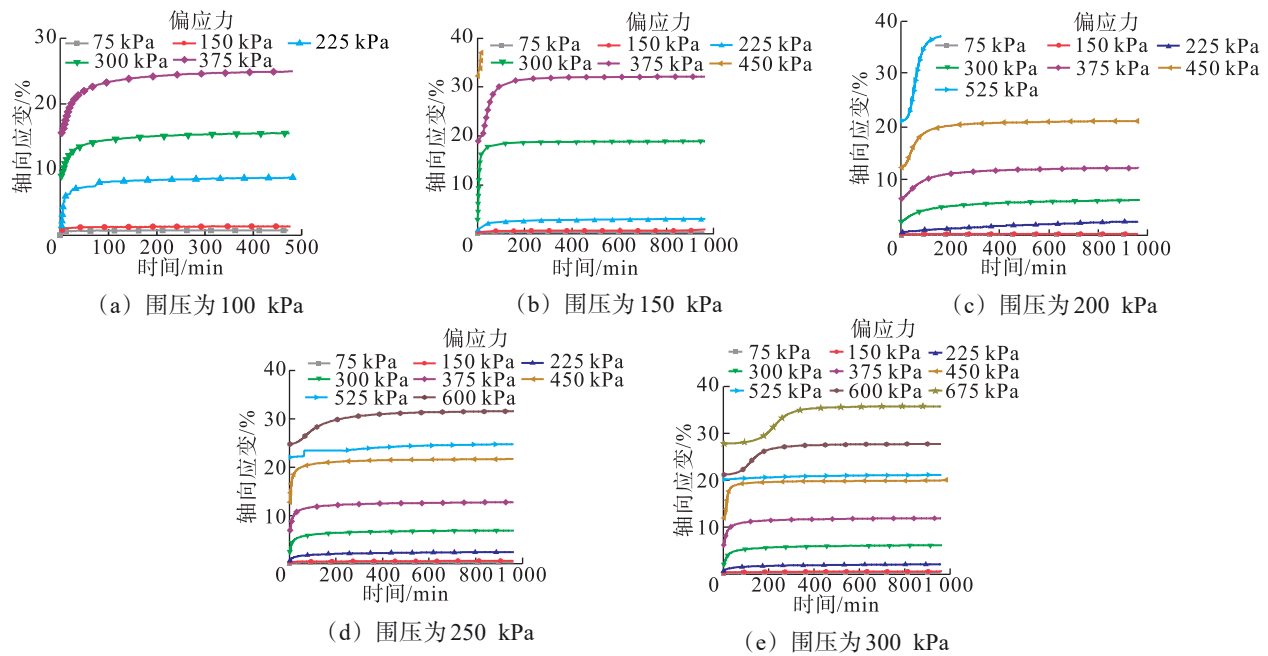


图 5 不同围压和偏应力下天然状态土体的应变

Fig.5 strain of natural soil under different confining pressures and deviatoric stresses

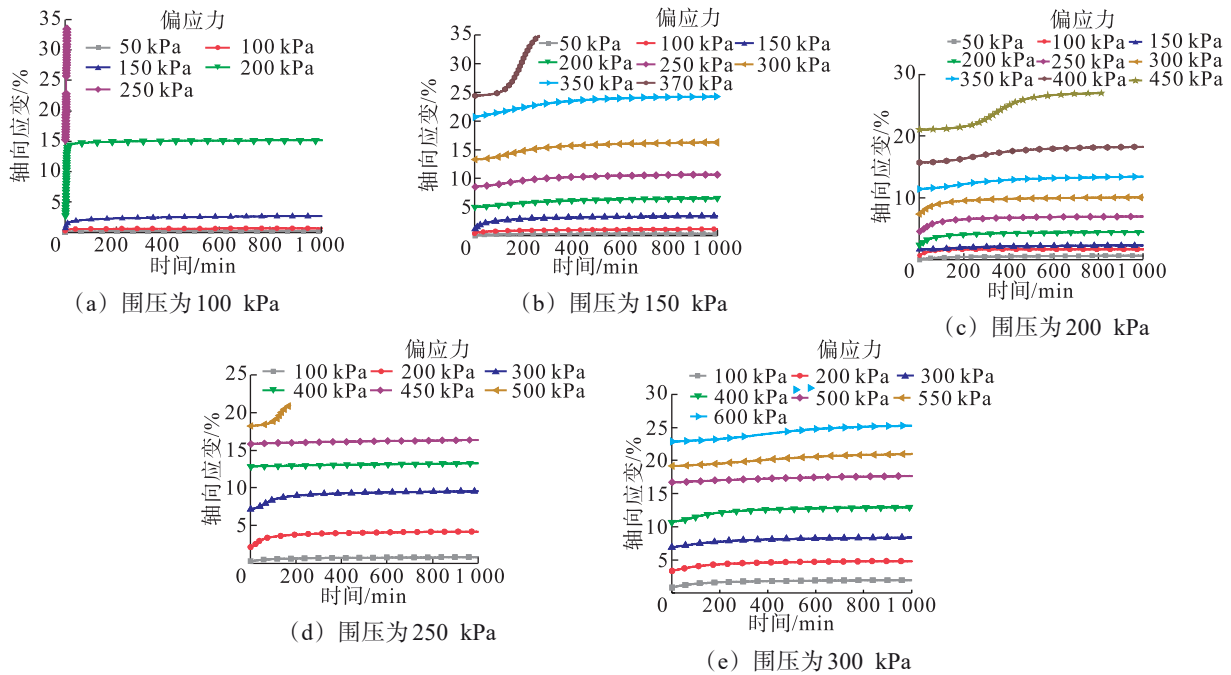


图 6 不同围压和偏应力下饱和状态土体的应变

Fig.6 strain of saturated soil under different confining pressures and deviatoric stresses

2.2 黄土-古土壤结构面长期强度

在岩土工程领域,长期强度是评估结构稳定性和安全性的关键参数,它代表材料能承受长时间载荷的最低强度,与时间和环境条件密切相关^[22]。确定滑坡接触带黄土长期强度常用两种方法,即等时曲线法和稳定蠕变速率法,其中,等时曲线法应用较广泛。天然、饱和状态下土体的应力-应变等时曲线分别见图7、图8。可以看出,

曲线均呈簇状。与天然状态相比,饱和状态下土体的应力-应变等时曲线簇更为密集。随着轴向应力的增大与作用时间的延长,曲线向纵轴逐渐弯曲,呈现出由密集到稀疏的非线性增长趋势。围压相同的条件下,与天然状态相比,饱和状态下土体应力-应变等时曲线弯曲更明显,蠕变减速阶段的离散度相对较小,表明含水率的增大会加速土体蠕变变形。

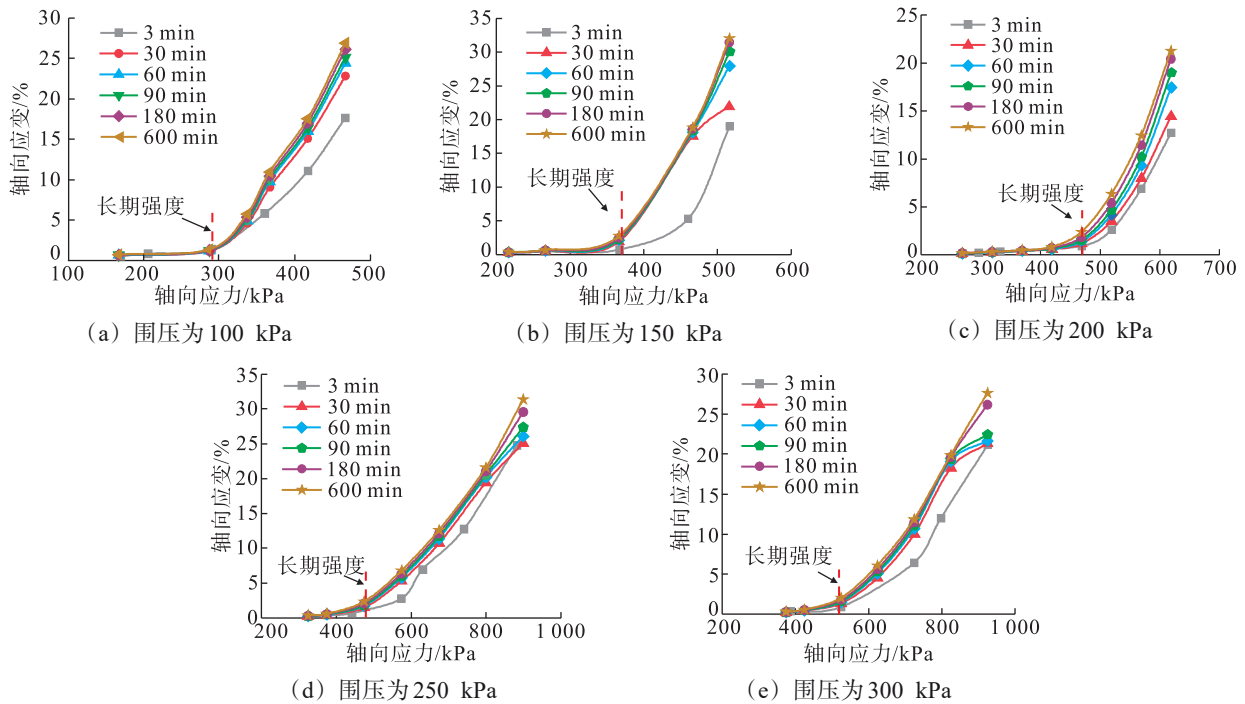


图7 不同围压下天然状态土体的应力-应变等时曲线

Fig.7 stress-strain isochronous curves of natural soil under different confining pressures

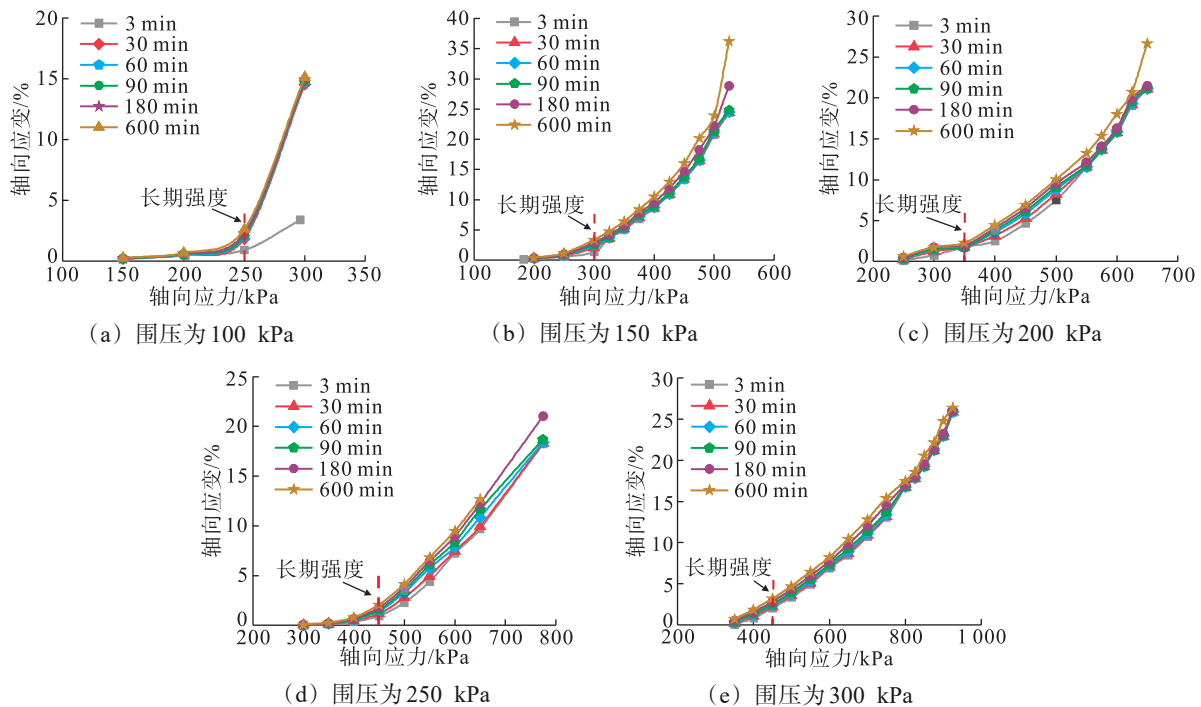


图8 不同围压下饱和状态土体的应力-应变等时曲线

Fig.8 stress-strain isochronous curves of saturated soil under different confining pressures

根据应力-应变等时曲线的形态特征,将曲线分为两段:①线性黏弹性阶段(直线段),该阶段应力与应变呈线性关系,土体具有黏弹性行为;②非线性黏塑性阶段,该阶段应力与应变呈非线性关系,土体产生塑性变形。应力-应变等时曲线

的拐点即为两阶段的分段点,拐点处所对应的轴向应力为土体的长期强度。

稳态蠕变速率法认为,土体稳态蠕变速率为0时所对应的最大蠕变载荷即为土体的长期强度。为进一步分析滑坡易发区接触带黄土的长期强度,

对围压为 100 kPa、不同轴向应力下土体轴向应变速率的试验值进行拟合,见图 9。由于刚进入稳态蠕变阶段时蠕变速率较小,几乎为 0,可将天然、饱和状态下土体蠕变速率与应力关系曲线后半部分切线(见图 9 中红色、蓝色虚线)在应力轴上的截距作为土体长期强度。稳态蠕变速率法的计算精度较依赖拐点数量,而等时曲线法主要以黏弹性阶段与黏塑性阶段的转折点作为长期强度的主要判据,稳定性和适用性较好。围压为 100 kPa 时,两种方法所得的土体长期强度差异相对较大,这可能是由于低围压下加载分级不够详细,得到的符合要求的拐点较少,拟合结果存在一定偏差。鉴于此,围压为 100 kPa 下,采用等时曲线法确定土体的长期强度,其余围压条件下取两种方法所得土体长期强度

的最小值和最大值,作为结构面黄土长期强度的变化区间。不同围压下土体的长期强度见表 3。

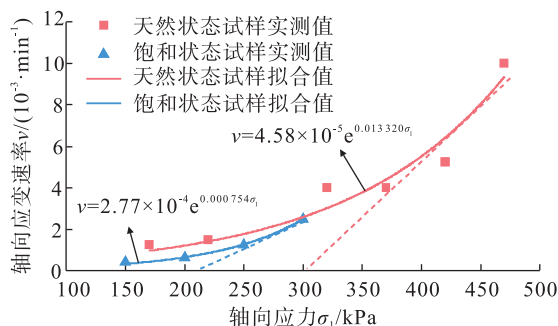


图 9 轴向应变蠕变速率与轴向应力的关系

Fig.9 relationship between axial strain creep rate and axial stress

表 3 不同围压下土体的长期强度

Tab.3 long-term strength of soil under different confining pressures

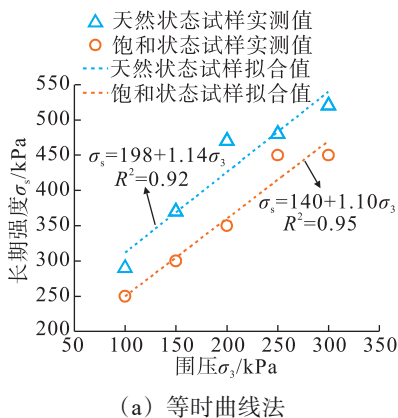
围压/kPa	天然状态土体长期强度/kPa			饱和状态土体长期强度/kPa		
	等时曲线法	稳态蠕变速率法	取值	等时曲线法	稳态蠕变速率法	取值
100	290	301	290	250	210	250
150	370	400	370~400	310	315	310~315
200	460	465	460~465	360	380	360~380
250	500	510	500~510	420	430	420~430
300	540	535	535~540	480	490	480~490

不同围压下土体长期强度对比见图 10。可以看出,围压相同的条件下,与天然状态相比,饱和状态下土体的长期强度明显降低,表明黄土-古土壤结构面具有独特的水敏性,遇水后土体强度会显著降低,易造成滑坡破坏。采用等时曲线法与稳态蠕变速率法所得到的土体长期强度虽未直接体现时间依赖性,但两种方法所得土体长期强度所对应的轴向应变均接近 5%,表明 5% 轴向应变是黄土-古土壤接触面从稳态蠕变向加速蠕变过渡的典型阈值。

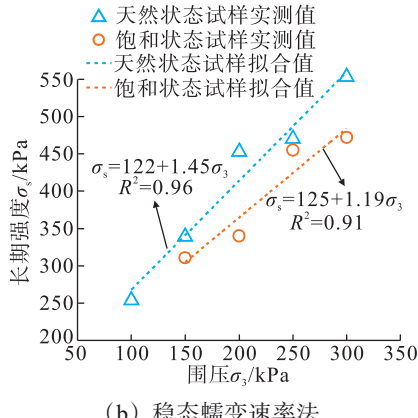
在施加应力初期,天然、饱和状态土体的长期强度均显著降低,随着时间的延长,土体长期强度逐渐趋于稳定。

不同状态下土体长期强度随时间的变化见图 11。可以看出,时间对土体长期强度的影响逐渐减弱。

根据试样在 5% 轴向应变下的轴向应力和时间,以 $1/[2(\sigma_1 + \sigma_3)]$ 为圆心, $1/[2(\sigma_1 - \sigma_3)]$ 为半径,绘制不同围压和时间下的应力莫尔圆及其公切线,公切线的斜率及与纵轴交点所对应的坐标值分别为黄土-古土壤结构面的黏聚力与内摩擦角。黏聚力和内摩擦角随时间的变化见图 12。可以看出,天然、饱和状态下土体的黏聚力和内摩擦角均逐渐减小,且符合幂函数变化规律,表明随着时间的推移,黄土-古土壤结构面稳定性逐渐减弱。



(a) 等时曲线法



(b) 稳态蠕变速率法

图 10 不同围压下土体长期强度对比

Fig.10 comparison of long-term strength of soil under different confining pressures

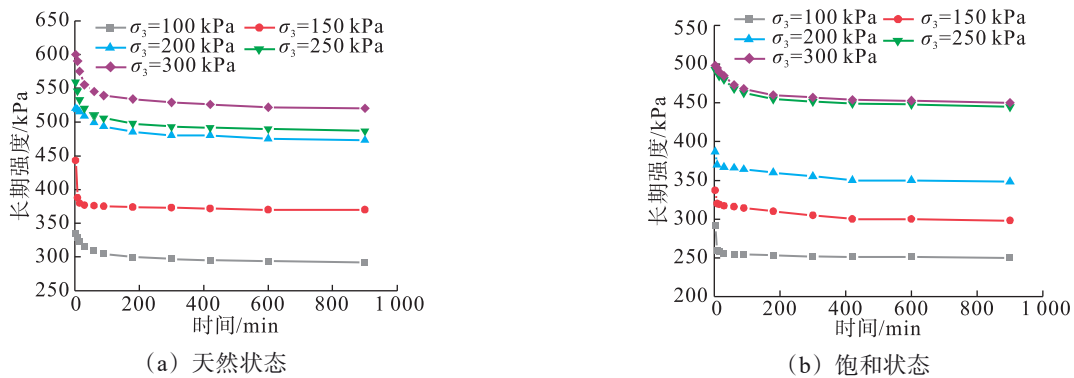


图 11 不同状态下土体长期强度变化

Fig.11 change of long-term strength of soil under different conditions

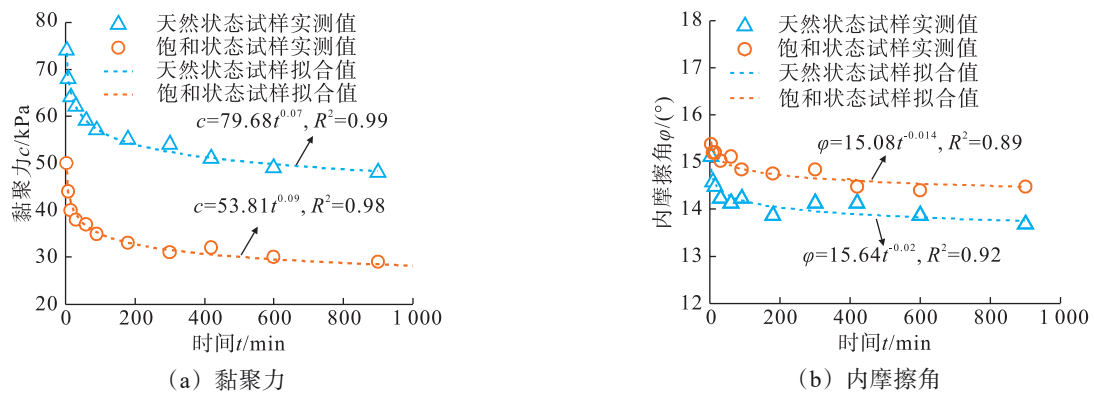


图 12 黏聚力和内摩擦角变化

Fig.12 change of cohesion and internal friction angle

3 黄土-古土壤结构面蠕变模型

3.1 模型构建

经典的土体蠕变过程可分为4个阶段,即瞬时弹性变形阶段、初始衰减蠕变阶段、稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段。以围压为150 kPa、轴向应力分别为375 kPa、450 kPa下的天然状态土体为例,对比分析指数函数模型、对数函数模型和Burgers模型的适用性,对比结果见图13。

由图13(a)可知,与对数函数模型、指数

函数模型相比,Burgers模型的相关系数 R^2 更大,拟合效果更好,可更准确地描述黄土-古土壤结构面的蠕变特性。由图13(b)可知,在加速蠕变阶段,Burgers模型的拟合效果虽优于指数函数模型和对数函数模型,但相关系数 R^2 并不大,与试验值吻合较差,表明Burgers模型在分析黄土-古土壤结构面由加速蠕变阶段至破坏阶段的适用性较差,需对Burgers模型进行改进来提高其适用性。

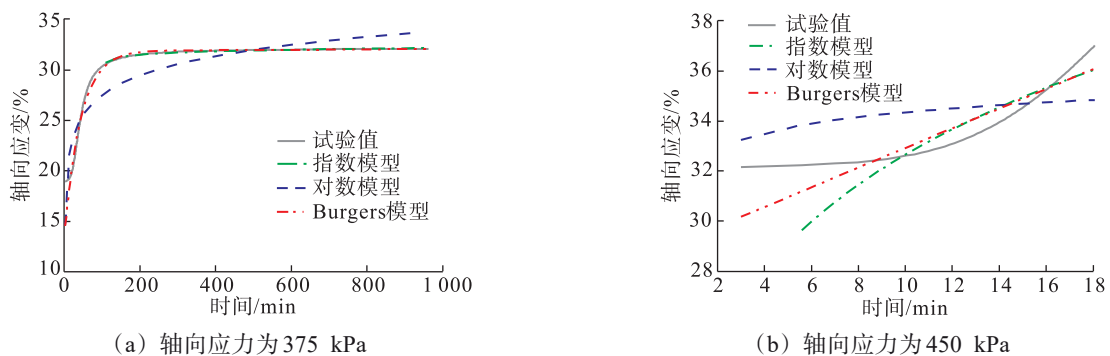


图 13 不同轴向应力下模型适用性对比

Fig.13 comparison of model applicability under different axial stresses

3.2 改进的 Burgers 模型

分数阶微积分在工程中应用广泛,是研究岩土体蠕变行为的有效方法^[23-24]。与经典整数阶模型相比,分数阶微积分可捕捉与时间相关的行为,能更好地解释在长期应力作用下,土壤、岩石等具有弹性和黏性特性的复杂材料的非线性、非局部记忆依赖行为。

Riemann-Liouville (R-L) 型分数阶微积分算子理论是目前应用最广泛的描述岩土体蠕变行为的方法。该理论基于分数阶导数和积分概念,满足

$$\frac{d^{-\beta}[f(t)]}{dt^{-\beta}} = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^t (t-\zeta)^{\beta-1} f(\zeta) d\zeta, \quad (1)$$

式中: β 为分数阶数, $\beta > 0$, 且 $N-1 < \beta \leq N$ (N 为正整数); t 为时间, min; ζ 为积分变量, min; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。

分数阶 Abel dashpot 黏壶元件是介于理想固体和理想流体之间的材料,常用于模拟土壤、岩石等材料的复杂流变特性,其本构关系为

$$\sigma_1 = \eta d\varepsilon^\beta(t)/dt^\beta, \quad (2)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为轴向应变; η 为黏度系数。

当 $\beta=1$ 时,分数阶 Abel dashpot 黏壶元件退化为传统的 Newton 元件,此时材料处于理想黏性变形状态;当 $\beta=0$ 时,分数阶 Abel dashpot 黏壶元件可简化为理想 Hooke 弹簧,此时材料处于理想弹性变形状态;当 $0 < \beta < 1$ 时,分数阶 Abel dashpot 黏壶元件可用于描述介于理想弹性状态和流体状态之间的材料的应力与应变特性。

应力不变时,采用 Riemann-Liouville (R-L) 型分数阶微积分算子理论对式 (2) 两侧进行积分,得到分数阶蠕变方程,即

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_1}{\eta} \cdot \frac{t^\beta}{\Gamma(1+\beta)} \quad 0 \leq \beta \leq 1. \quad (3)$$

在模型中引入 Abel dashpot 黏壶元件,建立适用于黄土-古土壤结构面的分数阶非线性蠕变模型,该模型在分数阶 Burgers 模型的基础上,增加 1 个开

关单元。改进的 Burgers 模型见图 14。

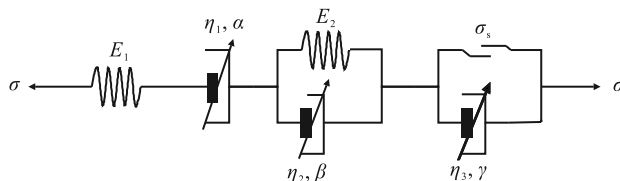


图 14 改进的 Burgers 模型

Fig.14 modified Burgers model

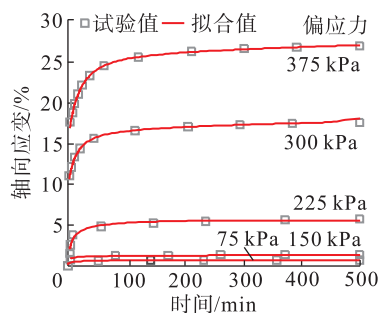
改进的 Burgers 模型的蠕变本构方程为

$$\varepsilon' = \begin{cases} \sigma/E_1 + (\sigma/\eta_1) \cdot \left\{ t^\alpha / [\Gamma(1+\alpha)] \right\} + (\sigma/E_2) \cdot \left\{ 1 - E_\beta [-tE_2/\eta_2]^\beta \right\} & \sigma \leq \sigma_s \\ \sigma/E_1 + (\sigma/\eta_1) \cdot \left\{ t^\alpha / [\Gamma(1+\alpha)] \right\} + (\sigma/E_2) \cdot \left\{ 1 - E_\beta [-tE_2/\eta_2]^\beta \right\} + \left[(\sigma - \sigma_s)/\eta_3 e^{-nt} \right] \cdot \left\{ t^\gamma / [\Gamma(1+\gamma)] \right\} & \sigma > \sigma_s \end{cases}, \quad (4)$$

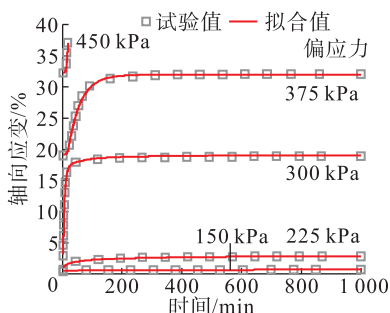
式中: ε' 为蠕变变形量; α 、 β 、 γ 为分数阶 Abel dashpot 黏壶元件的阶数; E_1 为瞬时弹性模量,反映结构面土体的瞬时弹性变形能力; E_2 为黏弹性模量,反映结构面土体的延迟弹性变形能力; η_1 、 η_2 、 η_3 为黏性系数; σ_s 为结构面土体的长期强度; σ 为土体应力; n 为材料参数; E_β 为分数阶微积分中的单参数 Mittag-Leffler 函数。

3.3 模型对比

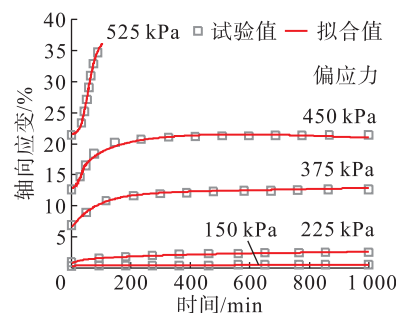
为保证模型精度,采用准牛顿法 (BFGS) 和通用全局优化算法 (UGO),利用 1stOpt 软件拟合试验值并评估模型参数。不同围压下天然、饱和状态土体轴向应变-时间拟合结果分别见图 15、图 16,拟合曲线与试验值吻合较好,表明本文蠕变模型可解决传统模型无法完全捕捉非线性蠕变行为的问题,可准确模拟黄土-古土壤结构面的蠕变特性,反映加速蠕变阶段的变形特征,在捕捉土体蠕变行为方面较为可靠、有效。限于篇幅,仅列出围压为 100 kPa 下天然状态土体轴向应变-时间曲线拟合参数,见表 4。



(a) 围压为 100 kPa



(b) 围压为 150 kPa



(c) 围压为 200 kPa

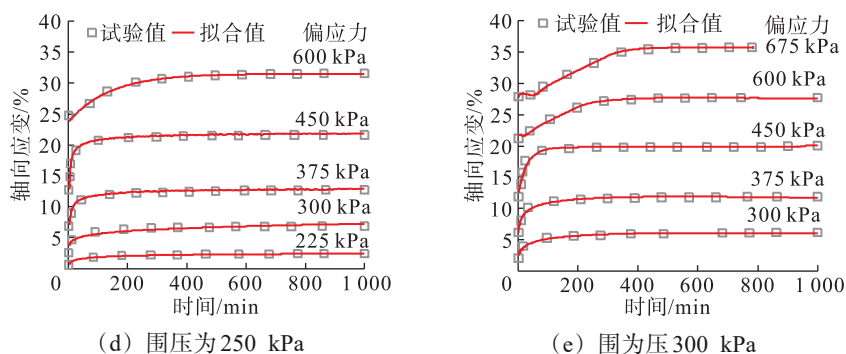


图 15 不同围压和偏应力下天然状态土体拟合结果

Fig.15 fitting results of soil in natural state under different confining pressures and deviatoric stresses

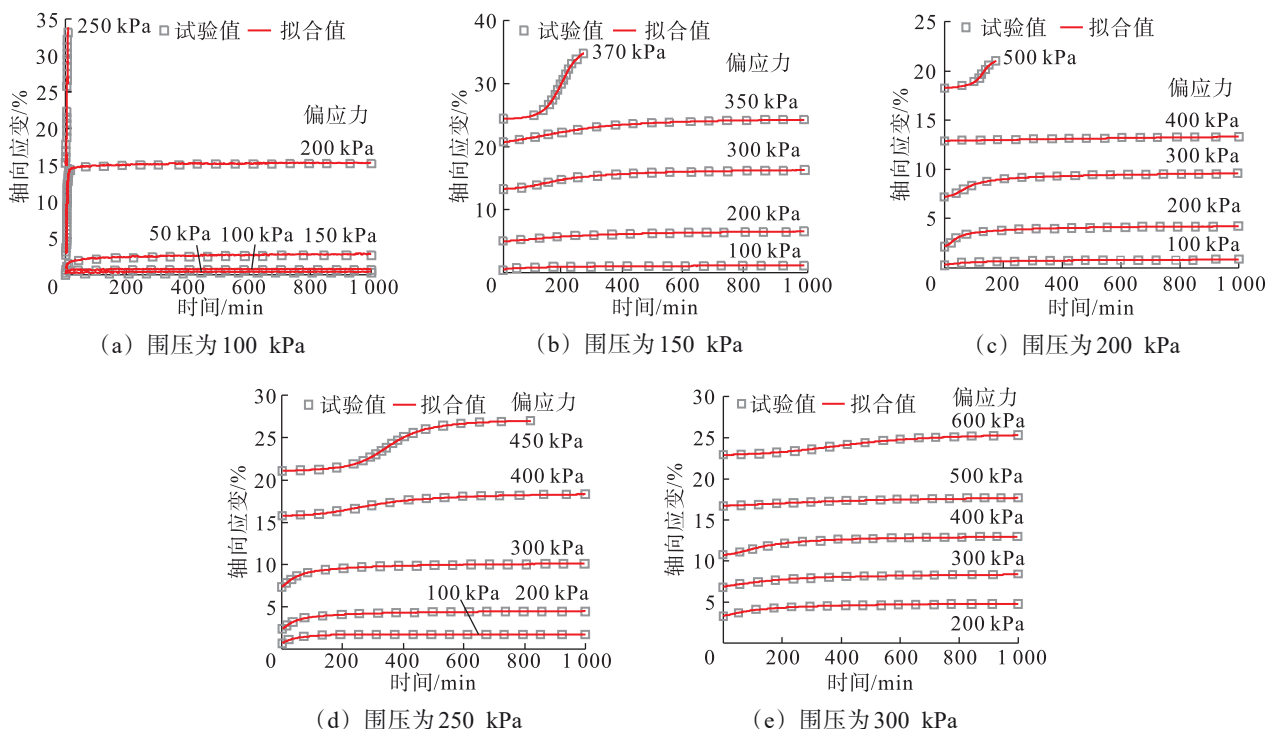


图 16 不同围压和偏应力下饱和状态土体拟合结果

Fig.16 fitting results of soil in saturated state under different confining pressures and deviatoric stresses

表 4 围压为 100 kPa 下天然状态土体轴向应变-时间曲线拟合参数
Tab.4 fitting result parameters of the sample under natural state confining pressure of 100 kPa

偏应力/kPa	α	β	γ	$\eta_1/(\text{kPa} \cdot \text{min})$	$\eta_2/(\text{kPa} \cdot \text{min})$	$\eta_3/(\text{kPa} \cdot \text{min})$	E_1/kPa	E_2/kPa	n	R^2
75	0.50	0.50	0	1 000 004.00	22 428.55	0	450.00	300.001	0	0.999 6
150	0.56	0.49	0	685 432.50	6 038.26	0	353.84	268.350	0	0.993 0
225	0.93	0.96	0	75 013.07	3 998.09	0	281.25	150.360	0	0.994 5
300	0.77	0.67	0	68 753.14	3 725.56	0	106.50	90.280	0	0.993 4
375	0.85	0.69	0	43 564.54	2 576.11	0	57.98	41.150	0	0.996 1
450	1.53	1.09	3.34	28 616.42	1 011.14	20 116.07	0.50	13.180	0.01	0.998 7

分别采用 Burgers 模型和 Merchant 模型^[25-26]对围压为 150 kPa 下的试验值进行拟合, 并与改进的 Burgers 模型的拟合结果进行对比, 见图 17。可以看出, 改进的 Burgers 模型无论是在瞬时变形阶段

还是在非线性变形阶段, 拟合效果均最优。偏应力为 300 kPa 时, 改进的 Burgers 模型的 R^2 高达 0.987 7, 表明本文提出的模型能更准确地反映黄土-古土壤结构面的蠕变特性。

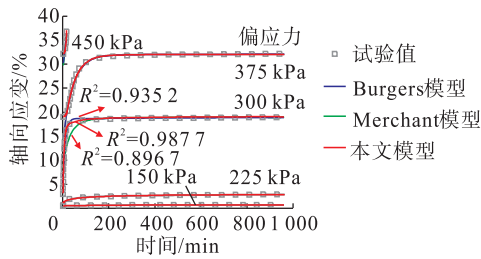


图 17 蠕变模型拟合结果对比

Fig.17 comparison of fitting results for creep model

3.4 参数敏感性分析

蠕变模型是通过简化实际材料的蠕变行为来构建的。由于现实环境条件复杂多变,通过参数敏感性分析,可识别更复杂的因素,从而改进模型,提高模型的可靠性和预测精度。将前文所得拟合参数代入式(4),采用控制变量法进行参数敏感性分析,分析结果见图18。

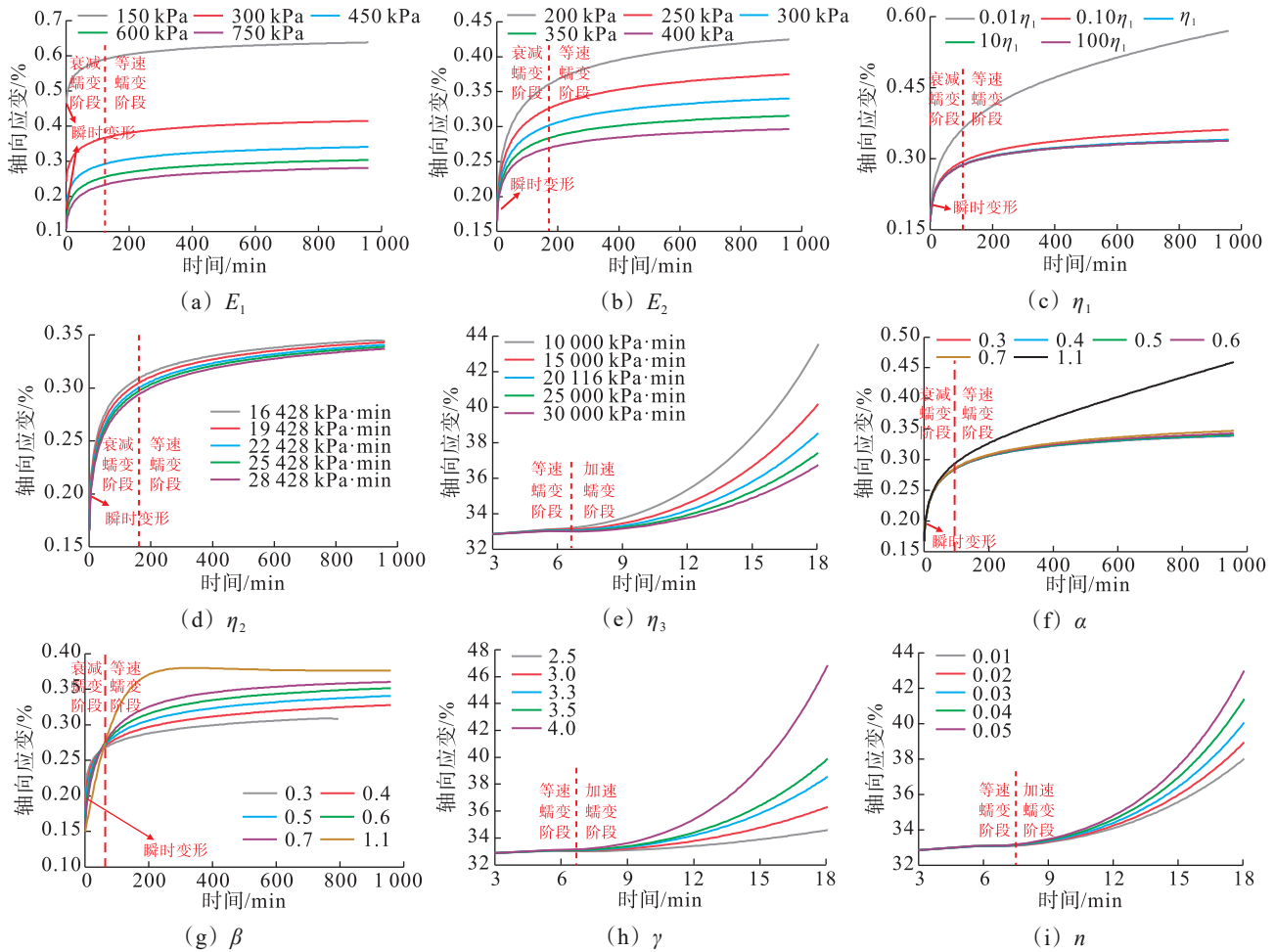


图 18 参数敏感性分析结果

Fig.18 sensitivity analysis results of parameter

由图18可见, E_1 主要影响材料初次受力时的直接变形,但对材料蠕变后期的变形无影响。 E_1 越大,瞬时弹性变形量越小, E_1 由150 kPa增至750 kPa,瞬时弹性变形量由0.44%衰减至0.10%,降幅约为77.27%。 E_2 、 η_1 和 η_2 对初始变形后蠕变行为的影响较显著。 E_2 越大,曲线越平缓,结构面黄土在蠕变过程中达到稳态所需的时间越短。 E_2 由200 kPa增至400 kPa,衰减蠕变阶段的最大变形量由0.41%衰减至0.27%,降幅约为34.15%。 η_1 、 η_2 的增大会

减小衰减蠕变阶段和稳定蠕变阶段的变形,但影响相对较小。 α 和 β 的增大会使稳定蠕变阶段的变形量增大。 α 由0.3增至0.7,稳定蠕变阶段应变的增幅小于5%。 α 为1.1时,蠕变变形持续增加,且增幅逐渐变大。 β 对衰减蠕变阶段和稳定蠕变阶段影响较大, β 由0.3增至1.1,瞬时弹性变形量由0.19%衰减至0.15%,衰减蠕变阶段的变形量由0.26%增至0.37%。 β 越大,达到稳定蠕变阶段所需的时间越长。 η_3 、 γ 和 n 对加速蠕变阶段影

响最大。 η_3 越大,加速蠕变阶段的变形越小。 η_3 由10 000 kPa·min增至30 000 kPa·min,加速蠕变阶段的应变衰减约20%。 γ 越大,加速蠕变阶段的变形量和变形速率越大, γ 由2.5增至4.0,加速蠕变阶段应变增幅约为43%。 n 越大,进入加速蠕变阶段越快,蠕变应变越大。

4 结论

本文对黄土-古土壤结构面天然、饱和状态土体开展三轴蠕变试验,采用等时曲线法和稳定蠕变速率法研究土体长期强度和蠕变特性,得出如下结论。

(1) 含水率一定的条件下,增大围压可提高黄土-古土壤结构面的屈服强度。围压一定的条件下,含水率越大,黄土-古土壤结构面的蠕变应变越小,达到蠕变破坏状态所需的应力越小。含水率的增大会降低土体内部的摩擦力,更易发生蠕变变形。

(2) 与天然状态相比,饱和状态下土体的长期强度较小,在低围压条件下,更易发生滑坡破坏。提出以应力-应变等时曲线上轴向应变为5%时所对应的应力作为黄土-古土壤结构面的长期强度。

(3) 构建基于分数阶微积分的改进蠕变模型。与Burgers模型和Merchant模型相比,改进的蠕变模型能更准确地描述不同阶段土体的蠕变行为,对加速蠕变阶段的拟合相关性系数高达0.987 7,拟合效果较好。

(4) 弹性模量 E_1 对瞬时弹性蠕变阶段的影响最大,黏性系数 η_1 对衰减蠕变阶段的影响最大,参数 β 对稳定蠕变阶段的影响最大,材料参数 n 对加速蠕变阶段的影响最大。

在未来的研究中,可进一步揭示黄土-古土壤结构面的蠕变失稳机制,构建基于多尺度和多物理场耦合的蠕变模型,拓宽在滑坡灾害预测与防治领域的应用前景。

参考文献(References):

- [1] PENG J B, FAN Z J, WU D, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China [J]. Engineering Geology, 2015, 186: 79-90.
- [2] 杨亚军, 邓龙胜, 范文, 等. 泾阳南塬黄土斜坡结构面发育特征及其影响效应[J]. 工程地质学报, 2023, 31 (1): 258-266.
- [3] YANG Yajun, DENG Longsheng, FAN Wen, et al. Developmental characteristics and effects of structural surfaces of loess slopes in southern Jing-Yang loess plateau[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 258-266.
- [4] TANG D, DENG L S, FAN W, et al. Extension mechanism and failure mode investigation on a fissured loess slope induced by loading[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83: 294.
- [5] 陈琼, 崔德山, 王菁莪, 等. 不同固结状态下黄土坡滑带土的蠕变试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1635-1642.
- [6] CHEN Qiong, CUI Deshan, WANG Jing'e, et al. An experimental study of creep characteristics of sliding zone soil of Huangtupo landslide under different consolidation stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1635-1642.
- [7] WANG S M, ZHAN Q H, WANG L, et al. Unsaturated creep behaviors and creep model of slip-surface soil of a landslide in Three Gorges Reservoir area, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(7): 5423-5435.
- [8] 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.
- [9] LI Ang, CHEN Jianbo, SUN Xinghua, et al. One dimensional creep test and creep model of undisturbed loess[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(21): 8789-8796.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] MU Huandong, DENG Yahong, 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李剑, 颜良宇, 於开炳, 等. 硅质板岩剪切蠕变特性及边坡变形机理研究[J]. 中外公路, 2024, 44(4): 29-36.
- [18] LI Jian, YAN Liangyu, YU Kaibing, et al. Shear creep characteristics and slope deformation mechanism of siliceous slate[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4): 29-36.
- [19] 郭汝涛, 赖登甲, 李升连, 等. 考虑结构面蠕变特征的隧道围岩长

- 期变形研究[J].安全与环境工程,2024,31(4):99-108
- GUO Rtao, LAI Dengjia, LI Shenglian, et al. Research on long-term deformation of tunnel surrounding rock considering the creep characteristics of structural surfaces[J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(4): 99-108.
- [13] 宋洋, 马旭琪, 赵常青, 等. 隐伏非贯通软弱夹层岩质边坡剪切蠕变特征及稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(4): 755-763.
- SONG Yang, MA Xuqi, ZHAO Changqing, et al. Shear creep characteristics and stability of rock slopes with concealed noninterpenetrated weak interlayer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 755-763.
- [14] LYU C, LIU J F, REN Y, et al. Study on very long-term creep tests and nonlinear creep-damage constitutive model of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 146: 104873.
- [15] WU F, ZHANG H, ZOU Q L, et al. Viscoelastic-plastic damage creep model for salt rock based on fractional derivative theory[J]. Mechanics of Materials, 2020, 150: 103600.
- [16] ZHOU X, JU N P, CAI J C, et al. Damage creep model of viscoelastic rock based on fractional derivative and experimental verification[J]. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: 1338016.
- [17] CAO W G, CHEN K, TAN X, et al. A novel damage-based creep model considering the complete creep process and multiple stress levels[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 124: 103599.
- [18] ZHAO Y L, ZHANG L Y, WANG W J, et al. Separation of elastoviscoplastic strains of rock and a nonlinear creep model[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(1): 04017129.
- [19] 刘朝科, 任建喜. 巷道底板砂岩三轴压缩蠕变试验与分数阶模型[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(6): 1003-1009.
- LIU Chaoke, REN Jianxi. Triaxial compression creep test of roadway floor sandstone and fractional order model[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(6): 1003-1009.
- [20] 付昱凯, 张子然. 基于蠕变试验及 Burgers 模型参数分析的三趾马红土长期强度确定[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 735-740.
- FU Yukai, ZHANG Ziran. Long-term strength determination of hipparion red clay based on creep test and parameter analysis of Burgers model[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 735-740.
- [21] 王宗斌. 泾阳南塬寨头村滑坡 L_2/S_2 接触带黄土蠕变特性及长期强度[D]. 西安: 长安大学, 2018: 28-75.
- [22] 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.
- [23] 刘开云, 薛永涛, 周辉. 基于改进 Bingham 模型的软岩参数非定常三维非线性黏弹塑性蠕变本构研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4157-4164.
- LIU Kaiyun, XUE Yongtao, ZHOU Hui. Study on 3D nonlinear visco-elastic-plastic creep constitutive model with parameter unsteady of soft rock based on improved Bingham model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4157-4164.
- [24] 虎积元, 盛冬发, 陈泰聪, 等. 岩石分数阶黏弹塑性损伤蠕变模型研究[J]. 人民长江, 2024, 55(11): 237-243.
- HU Jiyuan, SHENG Dongfa, CHEN Taicong, et al. Viscoelastic-plastic damage creep model of rock based on fractional order[J]. Yangtze River, 2024, 55(11): 237-243.
- [25] LIU Z Y, CUI P L, ZHANG J C, et al. Consolidation analysis of ideal sand-drained ground with fractional-derivative merchant model and non-darcian flow described by non-Newtonian index[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 5359076.
- [26] 郭超, 徐晨, 杜思宏. 抚顺西露天矿泥岩蠕变特性试验及介观模型研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(2): 156-162.
- GUO Chao, XU Chen, DU Sihong. Study on the creep properties test and mesoscale model of mudstone from Fushun west open-pitmine[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2024, 43(2): 156-162.