

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.05.010

残余强度状态下原状滑带土蠕变特性试验研究

刘清秉^{1,2}, 王 顺³, 夏冬生⁴, 项 伟¹, 苏爱军¹, 王菁莪¹, 刘 晓¹

(1. 中国地质大学 教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 维也纳农业科技大学 岩土工程研究所, 奥地利 维也纳; 4. 武汉市测绘研究院, 湖北 武汉 430022)

摘 要: 三峡库区许多古滑坡在重力等内、外地质营力作用下呈现出长期而缓慢的变形特征, 具有明显的蠕变属性。复活型古滑坡的滑带常处于残余强度状态, 其运动特征主要受滑带土力学性质和应力状态控制, 研究原状滑带土在残余强度状态下的蠕变特性, 对于了解复活型古滑坡滑动机制及预测其运动趋势具有重要意义。针对三峡库区黄土坡滑坡原状滑带土开展环剪试验, 研究了不同应力水平条件下滑带土在残余强度状态下的蠕变变形规律。结果表明, 滑带土的蠕变速率与剪切应力比 R_{CSR} (蠕变剪切应力与残余强度的比值) 呈正相关变化, 当 R_{CSR} 接近蠕变阈值 1 时, 滑带土等速蠕变明显, 部分试验条件下继而发生加速蠕变, 在相同 R_{CSR} 条件下, 土样法向应力越大, 其蠕变速率也越大。采用 Burger 模型对蠕变过程进行模拟, 获取了模型的各项参数。通过分析滑带土等时蠕变曲线, 获得滑带土长期抗剪强度约为 0.95 倍的残余强度。此外, 滑带土蠕变速率受固结时间影响, 蠕变速率随固结时间增加而减小, 滑带土剪切强度随着固结时间和剪切位移的增加可发生一定程度的恢复。

关 键 词: 原状滑带土; 环剪; 残余强度状态; 蠕变特性; 长期强度

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)05-1305-09

Experimental study of residual-state creep behavior of intact sliding-zone soil

LIU Qing-bing^{1,2}, WANG Shun³, XIA Dong-sheng⁴, XIANG Wei¹,
SU Ai-jun¹, WANG Jing-e¹, LIU Xiao¹

(1. Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Educations, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna 1190, Austria; 4. Wuhan Research Institute of Surveying & Mapping, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: A large number of ancient landslides in the Three Gorges Reservoir Area present long term and slow deformation characteristics with significant creep properties when undergoing internal and external geological agents. It is commonly thought that the soil on the slip plane of a reactive ancient landslide have already reached the residual state. Mechanical properties and stress state of the soil in the rupture zone dominate the main kinematic feature of a slow-moving landslide. Creep behavior, therefore, has an important value for evaluating reactivation potential and landslide prediction. In this paper, intact soil samples are collected from a reactive ancient landslide. Residual strength of intact sliding zone soil is studied and residual-state creep test is performed afterward. Various R_{CSR} (the ratio of the applied constant creep stress to the residual strength) levels are chosen to study the correlation between R_{CSR} and creep rate. The results show that creep rate of soil is positively dependent on R_{CSR} . As R_{CSR} approaches 1, a pronounced secondary creep occurs in a short time followed by an accelerative creep stage for some tests, namely tertiary creep. At the same R_{CSR} , soil with higher normal stress level has larger creep rate. Burger's model is employed to simulate the creep behavior and the parameters of Burger's model are obtained. The long-term shearing resistance is investigated by analyzing the isochronal curves, and the value of long-term shear strength of intact sliding zone soil is found to be approximately 0.95 times as much as that of residual strength. Additionally, consolidation duration can affect the creep rate, which decreases with increasing consolidation duration. This reveals that the mobilized shear strength and residual strength are regained to some extent during consolidation or with shear

收稿日期: 2015-06-04

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41572286, No. 41202199, No. 41672297); 湖北省自然科学基金 (No. 2015CFB247); 中国博士后科学基金 (No. 2013M542098)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41572286, 41202199, 41672297), the Natural Science Foundation of Hubei Province of China (2015CFB247) and the China Postdoctoral Science Foundation (2013M542098).

第一作者简介: 刘清秉, 男, 1984 年生, 博士(后), 副研究员, 从事特殊土工程性质方面的科研工作。E-mail: liuqingbing_1357@163.com

displacement.

Keywords: intact sliding zone soil; ring shear; residual strength state; creep behavior; long term strength

1 引言

滑坡是三峡库区主要的地质灾害类型之一,近年来,随着库区人类活动的加剧,尤其在库区水位的周期性升降和季节性降雨影响下,古滑坡的复活和新滑坡的增生日趋严重^[1-2]。库区库岸斜坡的形成经历了漫长地质时期,通常多处于自然的稳定平衡状态,在不考虑极端情况下(譬如高强度地震等),绝大多数库岸斜坡的破坏失稳(包括古滑坡的复活)以渐进破坏滑坡为主^[3],表现为缓慢的阶梯式运动^[4],具有明显的蠕变特性。

黄土坡滑坡是三峡库区重大滑坡之一,位于巴东县库岸段,新的调查结果表明^[5],黄土坡是由多个相对独立的滑坡组成的大型复活型古滑坡体,其结构复杂,滑体沿着主破裂面及若干层间滑动面发生滑动。在黄土坡滑坡的4个主要组成部分中,临江崩滑体直接与江水接触,其稳定性受库水位影响较大,是黄土坡滑坡的主体,也是最危险的区域^[6]。针对临江崩滑体的数值模拟分析认为^[7],在库水位周期影响下,滑体变形快慢变化将长期显现,其深层滑带则以长期的蠕滑变形为主,表现为明显的剪切塑性变形。长期原位监测数据表明^[8],滑体处于稳定的蠕变阶段,前沿和后缘年平均位移量分别为25~30、12 mm。了解和预测黄土坡滑坡变形破坏可以从模拟滑带土的剪切响应得到启示。研究表明,滑带土的力学强度特性的时间效应往往是控制滑坡变形的因素^[9],且滑带土经多次反复的运动已经达到或接近残余强度^[10]。现有的蠕变试验大多采用三轴仪器或者直剪仪进行^[9, 11-12],由于受仪器剪切行程限制,土样无法达到残余状态,很难真实模拟滑带土处于残余状态下的剪切响应。有学者考虑采用反复剪切达到残余状态下的土样开展蠕变试验^[13],其中 Bhat 等^[10]采用环剪仪研究了残余状态下混合纯黏土矿物的蠕变特性。目前,滑带土残余强度下的蠕变试验资料较少,尤其是原状滑带土残余强度下的蠕变特性研究,因此,研究原状滑带土在残余强度下的蠕变特性,能更真实、准确地获取滑带土力学性质参数,对于滑坡预报预测、稳定性分析与防治、揭示古滑坡复活机制以及研究边坡渐进式破坏模式等具有重要的意义。

环剪仪是一种研究土体在大剪切位移条件下力学特性的土工设备^[14],在开展土样残余强度测试及分析残余状态下的相关力学性质方面具有独特优

势^[15-16],本文以三峡库区黄土坡滑坡原状滑带土为对象,在浸水条件下对样品进行残余状态下的蠕变试验,分析剪切应力比 R_{CSR} (蠕变剪切应力与残余强度比值)、固结时间等因素对蠕变速率的影响,采用 Burger 模型对蠕变试验结果进行模拟,并通过蠕变等时曲线确定滑带土长期强度特征。

2 环剪试验

2.1 试验仪器

试验采用德国 Wille Geotechnik 公司的 ARS 全自动闭合回路控制环剪仪。该环剪仪试样规格为内径为 100 mm,外径为 150 mm,高为 30 mm 的圆柱环形样,有效剪切面积为 98.17 cm²。剪切速率和轴向荷载由高精度电机控制,试验机提供最大轴向压力为 10 kN,最大剪切应力为 1 000 kPa,最大剪切速率为 32 mm/min。剪应力、轴向应力由安装在加压系统中的传感器测定,试验数据通过自动采集装置传输至计算机。

为避免蠕变试验过程中电机控制剪切力的不稳定性,试验过程中解除电机控制剪切力(加压装置控制法向应力稳定性高,可不解除),并利用重物施加扭力获得相应恒定的剪应力,如图 1 所示,在重力作用下,施力重物通过绳索对下剪切盒下的转子施加扭矩,并利用杆件将扭矩传递到下剪切盒,经计算可以获得剪切面的剪应力。环剪过程中,剪切面的剪切变形是随半径变化的,考虑到剪切面内径和外径较为接近,一般采用平均剪应力和平均剪切位移进行计算分析^[17]。

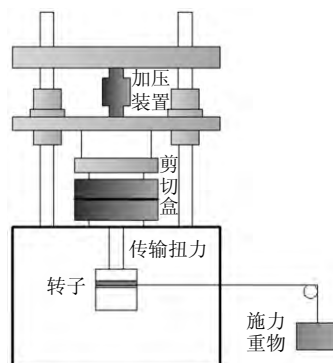


图 1 ARS 型全自动闭合回路控制环剪仪改装简图
Fig.1 Modification of fully automatic ring-shear apparatus

2.2 试验土样

中国地质大学(武汉)依托“长江三峡库区地质灾害研究”985 优势学科创新平台,开展了巴东

野外大型综合试验场的建设，在黄土坡滑坡临江 I 号崩滑体内建成了滑坡试验隧洞群及三维立体多场信息监测系统。本次试验取样点位于综合试验场内 3 号试验支洞，揭露的滑动带由碎石堆积层、滑带土及风化灰岩组成。试验滑带土样及取样点如图 2 所示，滑带土颜色呈黄褐、灰褐及灰白色，结构密实，可塑至硬塑状，主要成分为粉质黏土夹碎石，碎石成分主要为泥质灰岩及泥灰岩角砾，直径为 2~4 cm。滑带土基本物理性质参数见表 1，级配曲线见图 3。



图 2 滑带土取样点及试验试样
Fig.2 Sampling locations and test specimen of sliding zone soil

表 1 滑带土基本物理性质指标
Table 1 Physical properties of sliding zone soil

天然 含水率 /%	天然密度 /(g/cm ³)	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	压缩 系数 /MPa ⁻¹	压缩 模量 /MPa
13.9~20.5	2.30~2.49	39.5	18.7	20.8	0.4	2.5

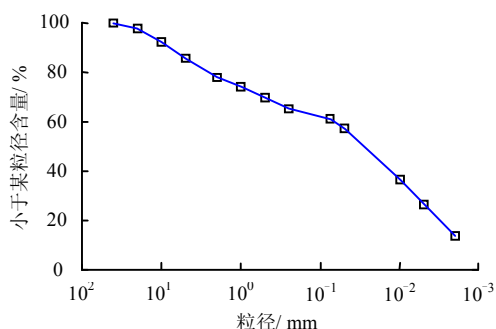


图 3 滑带土颗粒级配曲线
Fig.3 Grain size distribution of sliding zone soil

考虑到环剪仪对试样粒径尺寸的限制，现场取样时，尽量选取粗颗粒含量较低的滑带位置，利用定制的圆形模具切取原状土饼后在实验室制成环刀样。此外，制样过程中，对于个别原状样中包含的粒径大于 1 cm 的碎石，须小心剔除后用细颗粒土填补。考虑到滑带土受地下水水位及地表水入渗影响，认为滑带土处于饱和状态，试验前对样品进行抽气饱和，使饱和度达到 96% 以上。

2.3 试验方案

为研究滑带土残余状态下蠕变特性，须先将土样剪切至残余状态，本次试验共选取了 3 组土样，并有针对性的保持样品处于浸水环境开展如下试验：

(1) 残余强度试验：控制法向应力分别为 100、300、508、762 kPa，其中，762 kPa 为取样点的换算上覆土压力，样品至少固结 24 h 至垂直沉降量保持不变，保持轴向压力不变并以 0.05 mm/min 的剪切速率进行剪切至样品达到初始稳定残余强度 τ_0 。

(2) 残余状态下的蠕变试验：对 300、508 kPa 轴压下的试样，剪切结束后将样品固结至少 24 h 至垂直沉降量保持不变，控制剪切应力比 R_{CSR} 范围为 0.9~1.5、剪切应力增量为 $0.05 \tau_0$ 逐级进行蠕变试验，每级荷载加载前固结 2 h。待蠕变试验完成后，再次对样品进行剪切试验，获得滑带土反复剪切强度。

(3) 固结-蠕变试验：在法向应力为 300 kPa 下，对残余强度下蠕变试验样品固结 3、12 d，分别以剪切应力比为 1.05、1.10 进行蠕变试验和环剪试验，并与初始状态下蠕变试验及环剪试验结果对比，以此分析固结时间对滑带土蠕变特性及残余强度的影响。

3 试验结果与分析

3.1 滑带土残余强度特性

图 4 为不同轴压下的剪切应力-位移曲线，如图所示，762 kPa 法向应力下，滑带土表现明显的应变软化现象，即在应力-应变关系曲线中表现为土的抗剪强度随着剪切位移的增加而历经峰值、完全软化、残余抗剪强度等强度衰减过程，但 508 kPa 与 300 kPa 法向应力下并没有明显的软化现象，试样达到峰值强度和残余强度时的剪切位移相对较长，且剪切强度随剪切位移衰减缓慢，其强度特性与一些细粒土^[15]有较大差异。刘动^[18]和陈晓平^[19]等通过对不同粗颗粒含量滑带土进行环剪试验发现，颗粒级配对滑带土的应变软化现象影响明显，随着粗颗粒含量的增加，滑带土的应变软化特性减弱，达到残余强度所需的剪切位移增加。表 2 为不同法向应力

下的剪切强度数值,整体上看,随着法向应力减小,峰值剪切强度至残余剪切强度的衰减程度降低。

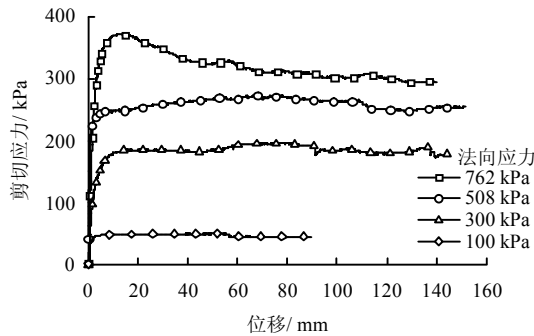


图4 不同轴压下环剪试验 τ - s 曲线
Fig.4 τ - s curves under different normal stresses

表2 不同法向应力下剪切强度

Table 2 Shear strengths under different normal stresses

法向应力 /kPa	峰值剪切强度 /kPa	残余剪切强度 /kPa	强度衰减程度 /%
762	371	292	21.3
508	272	220	19.1
300	195	180	7.7
100	51	46	9.8

此外,从剪切强度包络线(见图5)可以看出,滑带土的峰值剪切强度和残余剪切强度均随法向应力的增大而增加,对于峰值强度包络线,环剪试验的内摩擦角为 23.70° ,略高于直剪试验结果(22.62°),黏聚力为 44.71 kPa ,低于直剪试验(61.88 kPa)。总体上看,环剪试验与直剪试验结果基本吻合。残余强度包络线在低法向应力下呈曲线,而在高应力下趋近于直线。Bishop^[20]和Lupini^[21]研究表明,有效法向应力较小(低于 150 kPa)时,残余强度与有效法向应力呈较强的曲线关系,他们认为,黏土颗粒定向排列程度随有效法向应力的增大而增加,当颗粒定向排列完成后,残余强度与有效法向应力为线性对应关系。

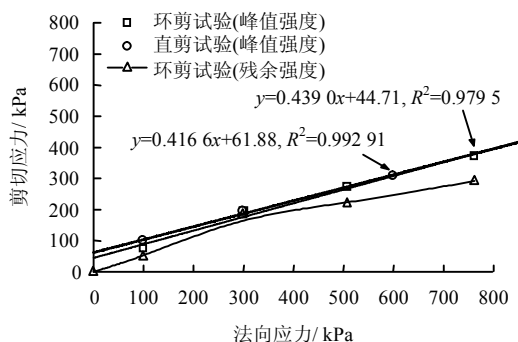


图5 滑带土剪切强度包络线
Fig.5 Shear strength envelopes of sliding zone soil

3.2 不同应力状态下的蠕变特征

渐变型滑坡从斜坡变形到失稳破坏,一般需经历初始变形、等速变形和加速变形3个阶段(见图6),变形-时间曲线总体分为衰减型和非衰减型^[22]。

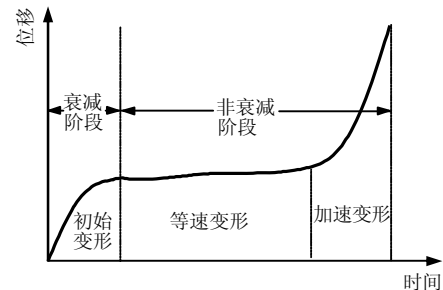
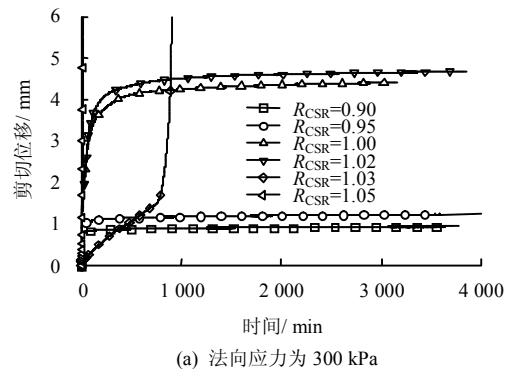
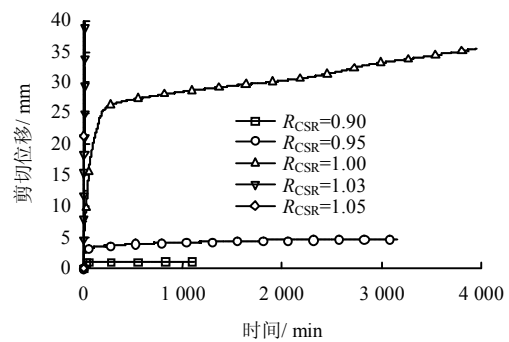


图6 渐变型滑坡变形3阶段演化图^[20]
Fig.6 Three-phase deformation development of gradual change type landslide^[20]

图7为滑带土残余强度状态下,在不同剪切力条件下的位移-时间曲线。由图可见,当剪应力比 R_{CSR} 较低时,蠕变曲线表现为衰减型,变形以瞬时变形为主,并最终趋于稳定值,且随着剪切力的增大,蠕变达到稳定的时间也相应增长。当剪应力比达到一定程度(如图7(a)中的 $R_{CSR} = 1.03$ 和图7(b)中的 $R_{CSR} = 1.00$)时,试样经过相对短暂的黏滞流动后进入加速阶段并发生破坏。



(a) 法向应力为 300 kPa



(b) 法向应力为 508 kPa

图7 不同法向应力下蠕变曲线
Fig.7 Creep curves under different normal stresses

图 8 为不同剪应力条件下试样垂直位移变化曲线。由图可见，由于剪切变形的不断积累，在蠕变破坏临界阶段，试样发生鼓胀，随着试样进一步破坏，由于剪切面上的粗颗粒向试样上下部运移、少量土颗粒结构的破坏以及部分土样被剪出剪切盒，沉降量有较大程度的增加。

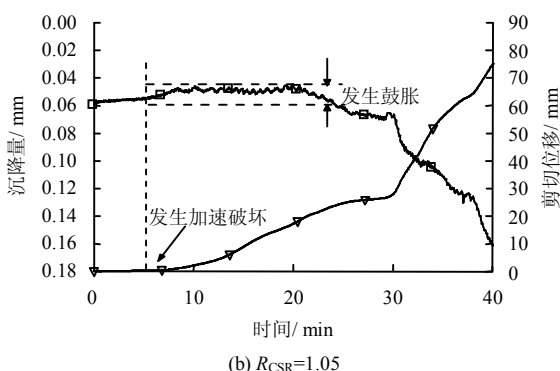
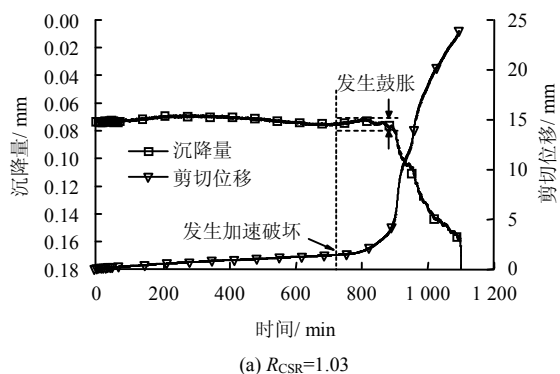


图 8 不同剪切应力比下沉降曲线

Fig.8 Settlement curves under different shear stress rates

3.3 Burgers 蠕变模型及模型参数

从不同应力状态下的蠕变曲线可以看出，当剪切力较小时，蠕变曲线表现瞬时和减速变形阶段，呈负指数形式趋近某渐近线，随着剪切力的增大，曲线将出现匀速蠕变阶段并很快进入加速阶段。利用 Kelvin 体与弹性元件的串联能模拟试样的瞬时和减速变形过程，在此模型的基础上串联一个黏性元件，则能对曲线的等速蠕变进行模拟，即构成 Burgers 蠕变模型（见图 9）。

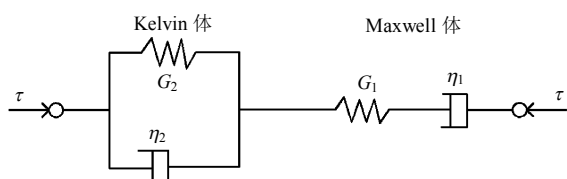


图 9 Burgers 模型元件模型

Fig.9 Burgers component model

其本构方程为

$$\tau + \left(\frac{\eta_1}{G_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{G_2} \right) \dot{\tau} + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1 G_2} \ddot{\tau} = \eta_1 \dot{\gamma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_2} \ddot{\gamma} \quad (1)$$

式中： γ 为切向应变； τ 为剪应力； G_1 、 G_2 、 η_1 、 η_2 分别为 Maxwell 体和 Kelvin 体的剪切模量和黏滞系数。

对于剪应力 τ 为常数时，求解本构方程可以得到 Burgers 模型的蠕变方程为

$$\gamma(t) = \tau \left[\frac{1}{G_1} + \delta \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{G_2} \left(1 - e^{-G_2 t / \eta_2} \right) \right] \quad (2)$$

式中： δ 为折减系数，对于衰减型蠕变，由于变形以瞬时形变为主，时间对变形的影响很小，取 $\delta = 0$ ；对于有加速蠕变阶段的非衰减蠕变，变形随着时间的增长明显，取 $\delta = 1$ 。

根据不同的蠕变情况，利用 Origin8.6 自定义不同的函数作为回归计算模型，对不同应力状态下的蠕变数据进行拟合计算，得到不同应力状态下 Burgers 蠕变模型参数，如表 3 所示。

表 3 Burgers 模型蠕变参数
Table 3 Creep parameters of Burgers model

P /kPa	τ /kPa	G_1 /MPa	G_2 /MPa	η_1 /(GPa·min)	η_2 /(GPa·min)
300	162	68.90	12.30		5.86
300	171	48.60	10.20		4.09
300	180	3.70	7.78		0.90
300	184	3.18	10.00		0.87
300	186	30.30	-749.00	-13.6	108.00
508	198	59.60	13.50		0.87
508	209	7.78	4.18		2.61
508	220	0.53	2.16		0.34

图 10 为不同法向应力下各级剪切力的蠕变试验实测数据点与拟合曲线对比图。环剪试验中，剪切应变值为平均剪切位移与 2 倍试样高度的比值^[23]。Burgers 模型对于衰减型蠕变拟合程度较高，仅在初始变形阶段有较小偏差，随着时间的增加，实测数据点与拟合曲线接近一致。对于具有加速破坏阶段的非衰减型蠕变（图 10(a)中 186 kPa 蠕变曲线），利用 Burgers 模型拟合效果较差，因此，仅仅采用黏弹性蠕变模型很难真实反映这一复杂过程。总体上，Burgers 模型能较真实地模拟滑带土试样的衰减蠕变过程，而在描述具有加速破坏阶段的非衰减蠕变过程方面略显不足。

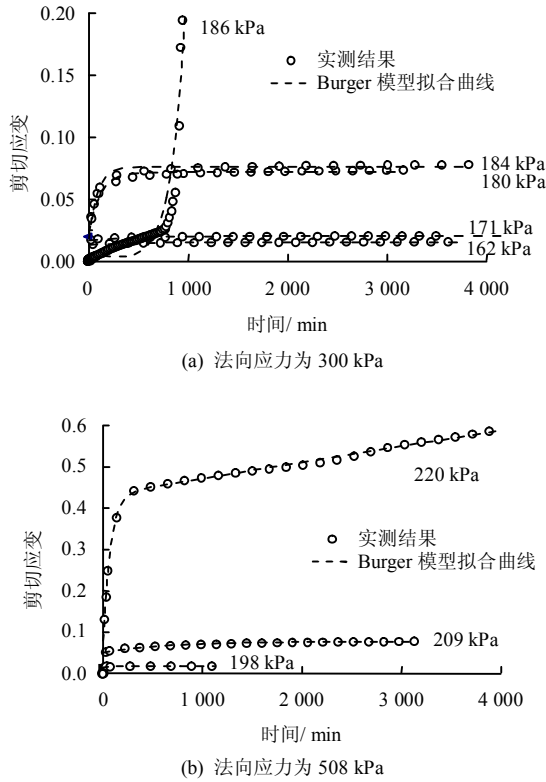


图 10 不同法向应力下蠕变实测点与拟合曲线
Fig.10 Creep tests points and fitting curves of different normal stresses

3.4 剪切应力对蠕变速率的影响

图 11 为不同法向应力下的蠕变速率-剪切应力比单对数曲线。从图中可以看出，当剪切应力比 R_{CSR} 小于 0.95 时，蠕变速率随剪切应力比的增大而缓慢增大，呈现出非线性增长趋势，随着剪切应力比进一步增大，部分试验会迅速进入加速蠕变阶段而发生破坏，呈现出剪切流动状态，此时剪切速度随剪切应力比的增大而近似线性增大。整体上，同一剪切应力比下，法向应力为 508 kPa 下的蠕变速率均高于 300 kPa 的，表明法向应力越大，滑带土中颗粒更容易发生“流动”。

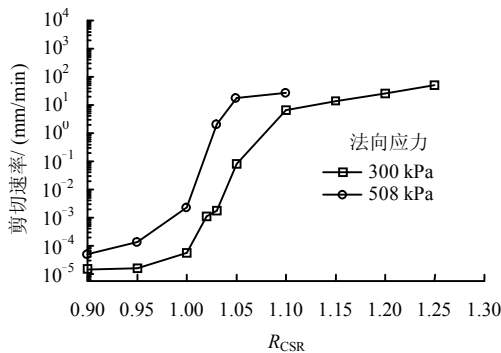


图 11 不同法向应力下蠕变速率-剪切应力比曲线
Fig.11 Creep rate-shear stress curves under different normal stresses

3.5 固结时间对蠕变及残余强度影响

图 12 为法向应力为 300 kPa 下不同剪应力、不同固结时间下的蠕变曲线。可以看到，在相同的应力状态下，滑带土的蠕变速率随着固结时间的增加而减小，其稳定阶段的蠕变速率如表 4 所示，试样固结 3 d 后蠕变速率有较大幅度的降低，蠕变曲线已由非衰减型过渡为衰减型，这一结果预示着，当滑动活动停止后滑带土滑面在经过较长时间的再固结作用后，其变形状态可从蠕变破坏临界阶段转化为破坏强度更高（临界 R_{CSR} 值更大）的稳定蠕滑阶段。为真实地再现复活型滑坡的强度特性，对滑带土进行固结-环剪-重复固结-重复环剪试验，获得法向应力为 300 kPa 下的重复环剪 $\tau-s$ 曲线，见图 13。可以看到，固结 12 d，试样的剪切峰值强度和残余强度均高于初始状态，且曲线波动性较初始状态更明显。

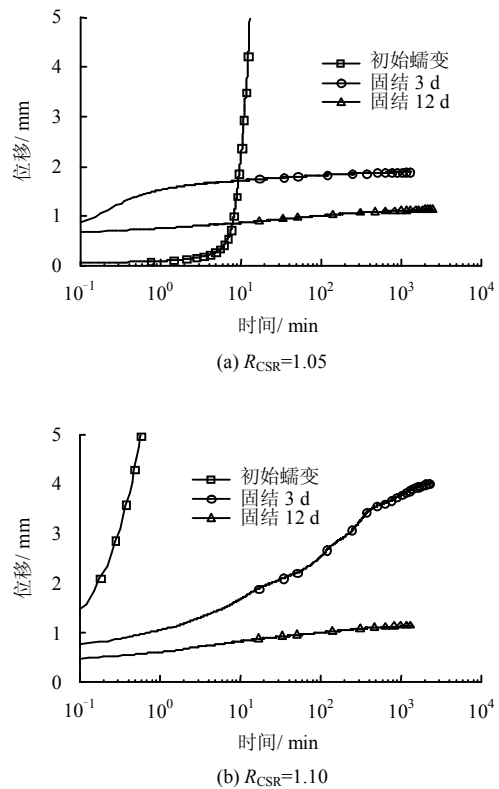


图 12 不同固结时间下蠕变曲线
Fig.12 Creep curves under different consolidation time

表 4 不同固结时间下蠕变速率（单位：mm/min）
Table 4 Creep rates under different consolidation time (unit: mm/min)

R_{CSR}	固结时间/d		
	1	3	12
1.05	0.038	1.96×10^{-5}	1.33×10^{-5}
1.10	7.130	8.83×10^{-5}	4.16×10^{-5}

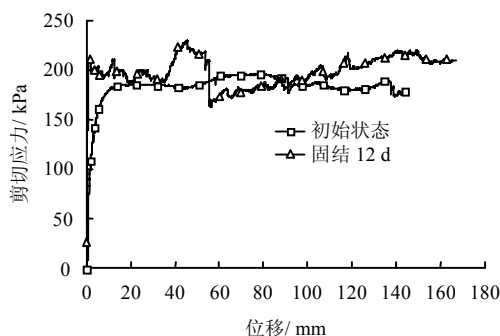


图 13 重复环剪 τ - s 曲线

Fig.13 τ - s curves of repeating ring-shear test

一般来说，黏土排水残余强度与剪切面附近颗粒成分、含量及定向排列性状等密切相关^[24-26]，重复慢剪条件下，随剪切位移的增加，剪切面细颗粒含量减少，粗颗粒间摩擦力增大导致曲线更为粗糙，残余强度表现为随着剪切位移的增加而增大^[27]。此外，排水条件下，随着固结时间的增加，试样内孔隙水压力逐步消散，土颗粒间有效应力增加，亦导致残余剪切强度的增加。

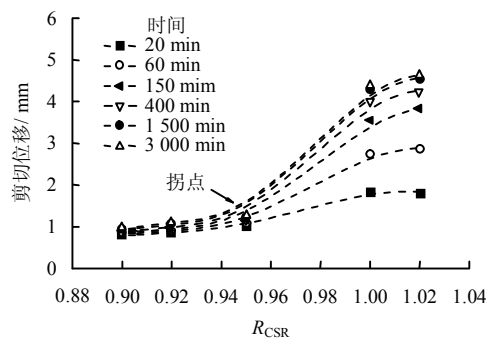
上述结果表明，滑带土在自重或其他条件下发生再次固结时，随着滑动面相互嵌合、黏结，滑带土残余强度可发生再生现象^[28-29]，即滑坡再次滑动之前，滑带土的抗剪强度有一个稳定的恢复阶段，这可能是三峡库区许多古滑坡和季节性滑坡在经历长时间变形后停止运动，表现为缓慢的阶梯式蠕变的一个重要原因。正确认识滑带土残余强度的再生现象，对于复活型滑坡滑面强度参数的正确选取以及提高稳定性评价的精度具有重要科学意义。

3.6 长期强度的确定

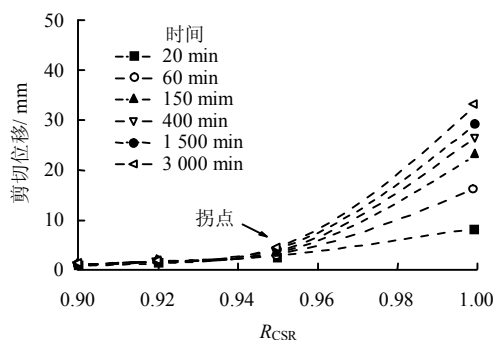
滑带土长期强度是区别衰减蠕变和非衰减蠕变的界限值，对滑带土长期强度进行研究可为滑坡的稳定性分析及演变预测提供理论依据。一般情况下，获取长期强度最直接的方法是通过设置不同剪切力对多个平行样进行蠕变试验，并对各级荷载破坏的时间进行处理后获取。但由于平行样之间可能存在较大的差异性，导致试验结果有较大的离散性。因此，沈明荣等^[30]提出了利用蠕变等时曲线确定长期强度的 3 种方法，本文利用 3 种方法之一的等时曲线法确定滑带土的长期强度。

图 14 为法向应力分别为 300、508 kPa 时剪切位移-剪切力等时曲线。从等时曲线可以看出，在低剪切应力下，曲线接近于重合，可认为在低应力条件下样品的蠕变无明显时间效应。随着剪切应力的增大，曲线簇之间的距离逐渐增加，应力-应变的时

间效应不断增强，并在某一剪切应力下，曲线簇出现明显的弯曲，可认为该点为土样的长期强度^[31]。由图可知，法向应力分别为 300、508 kPa 时土样的长期强度大小均在 0.95 倍的残余强度左右，类似地，Bhat 等^[10]通过对残余强度状态下的 4 种黏性土开展蠕变试验，也发现长期强度均接近残余强度。



(a) 法向应力为 300 kPa



(b) 法向应力为 508 kPa

图 14 不同法向应力下剪切位移-剪切应力等时曲线

Fig.14 Isochronal curves under different normal stresses

汪斌等^[9]曾通过蠕变试验得出黄土坡滑坡滑带土的长期强度高于相同应力状态下残余强度的结论，与本次试验得出长期强度低于残余强度的结果相悖。究其原因在于，该文中蠕变试验针对的是完整状态滑带土，与本次控制在残余强度状态下蠕变试验条件不同，即蠕变试验前滑带土并未剪切至残余状态，因此，其得到的长期强度作为土结构未破坏条件下表现的内摩擦力和黏聚力，往往高于仅受摩擦力和较小黏聚力制约的残余强度。比较文献^[9]与本次试验结果的差异，不难发现，滑带土表现的长期强度特性同样受到其先期运动变形状态影响，对于已经历大位移变形的滑坡（滑带土已接近或达到残余强度），其长期强度往往低于残余强度，反之则可能高于残余强度。因此，准确把握滑坡运动位移状态及滑带土受力特征，对合理选取强度参数及提高滑坡稳定性分析精度具有重要作用。

4 结 论

通过对典型复活型古滑坡——黄土坡滑坡原状滑带土开展环剪试验及残余强度状态下的蠕变试验,对滑带土基本剪切特性及蠕变过程中位移、速率、长期强度等特征进行分析,得到如下结论:

(1) 峰值强度和残余强度均随法向应力的增大而增加,相对于细粒土,试样达到峰值强度和残余强度时的剪切位移相对较长且剪切强度随剪切位移衰减缓慢。在低法向应力下,残余强度破坏包络线呈曲线,随着有效法向应力的增加,残余强度与有效法向应力呈线性关系。

(2) 滑带土表现明显的蠕变特征,蠕变试验中,低剪切应力下,蠕变曲线表现为衰减型,减速蠕变持续时间主要由剪切应力水平决定,随着剪切应力增加至残余强度左右时,蠕变曲线过渡为非衰减型,试样发生加速破坏。剪切应力比相同时,蠕变速率随法向应力的增大而增加。运用 Burgers 模型能较真实地模拟试样的衰减蠕变过程,但对于具有加速破坏阶段的非衰减蠕变的描述略显不足。利用位移-剪切应力等时曲线获取滑带土不同法向应力下的长期强度均约为 0.95 倍残余强度。滑坡经历不同的滑动位移,滑带土表现不同的长期强度,合理选取强度参数对提高滑坡稳定性分析精度具有重要作用。

(3) 不同固结时间下,试样表现为不同的蠕变特征。随着固结时间的增加,蠕变曲线由非衰减型过渡为衰减型。随着固结时间和剪切位移的增长,试样的峰值剪切和残余强度均有所增强,这可能是三峡库区许多古滑坡和季节性滑坡在经历了漫长的蠕滑位移后停止运动或间歇性运动的一个原因。正确认识滑带土残余强度的再生现象,合理利用再生残余强度参数对滑坡进行治理,可避免仅仅利用残余强度参数保守估计滑坡稳定性带来的工程投资浪费。

参 考 文 献

- [1] 陈剑, 李晓, 杨志法. 三峡库区滑坡的时空分布特征与成因探讨[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 305—309.
CHEN Jian, LI Xiao, YANG Zhi-fa. On the distribution and mechanism of landslides in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13(3): 305—309.
- [2] 张玉成, 杨光华, 张有详, 等. 古滑坡滑带土的力学特性与库水位变化对其稳定性影响及加固措施[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 43—52.
ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, ZHANG You-xiang, et al. Influence of mechanical properties of sliding zone and water level changes on ancient landslide stability and its reinforcement measures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Supp.2): 43—52.
- [3] 李远耀. 三峡库区渐进式库岸滑坡的预测预报研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2010.
LI Yuan-yao. Research on Prediction and forecast of progressive bank landslide in the Three Gorges Reservoir [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2010.
- [4] MIAO H, WANG G, YIN K, et al. Mechanism of the slow-moving landslides in Jurassic red-strata in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Engineering Geology*, 2014, 171(8): 59—69.
- [5] TANG H, LI C, HU X, et al. Evolution characteristics of the Huangtupo landslide based on in situ tunneling and monitoring[J]. *Landslides*, 2015, 12(3): 511—521.
- [6] 王菁莪. 黄土坡滑坡滑带土的结构特征与水-力相互作用性质研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2012.
WANG Jing-e. Study on structure and hydro-mechanical properties of sliding zone soil in Huangtupo landslide[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2012.
- [7] 陈松, 陈国金, 徐光黎. 黄土坡滑坡形成与变形的地质过程机制[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2008, 33(3): 411—415.
CHEN Song, CHEN Jin-guo, XU Guang-li. Mechanism of geological processes of formation and deformation of Huangtupo landslides[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(3): 411—415.
- [8] TANG H, LI C, HU X, et al. Deformation response of the Huangtupo landslide to rainfall and the changing levels of the Three Gorges Reservoir[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2015, 74(3): 939—942.
- [9] 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 Huangtupo landslides[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, 25(1): 49—52.
- [10] BHAT D R, BHANDARY N P, YATABE R. Residual-state creep behavior of typical clayey soils[J]. *Natural Hazards*, 2013, 69(3): 2161—2178.
- [11] BECKER S T, DOVE E J. Experimental creep behaviour and modelling of silicified sand[J]. *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, 2013, 166(2): 115—124.
- [12] 赖小玲, 叶为民, 王世梅. 滑坡滑带土非饱和蠕变特性

- 试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 32(2): 286—293.
- LAI Xiao-ling, YE Wei-min, WANG Shi-mei. Experimental study on unsaturated creep characteristics of landslide soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 32(2): 286—293.
- [13] DI MAIO C, VASSALLO R, VALLARIO M. Plastic and viscous shear displacements of a deep and very slow landslide in stiff clay formation[J]. **Engineering Geology**, 2013, 162: 53—66.
- [14] 孙涛, 洪勇, 栾茂田, 等. 采用环剪仪对超固结黏土抗剪强度特性的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2000—2004.
- SUN Tao, HONG Yong, LUAN Mao-tian, et al. Shear strength behavior of overconsolidated clay in ring shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2000—2004.
- [15] 王顺, 项伟, 崔德山, 等. 不同环剪方式下滑带土残余强度试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2967—2972.
- WANG Shun, XIANG Wei, CUI De-shan, et al. Study of residual strength of slide zone soil under different ring-shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(10): 2967—2972.
- [16] WANG S, WU W, XIANG W, et al. Shear behaviors of saturated loess in naturally drained ring-shear tests[M]. *Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows*. [S. l.]: Springer International Publishing, 2015, 19—27.
- [17] 郭长宝, 张永双, 孟庆伟, 等. 重塑硅藻土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 109—114.
- GUO Chang-bao, ZHANG Yong-shuang, MENG Qing-wei, et al. Research on shear strength of remolding diatomite by ring shear test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(1): 109—114.
- [18] 刘动, 陈晓平. 滑带土环剪剪切面的微观观测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1827—1834.
- LIU Dong, CHEN Xiao-ping. Microscopic observation and analysis of ring shear surface of slip zone soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1827—1834.
- [19] 陈晓平, 黄井武, 尹赛华, 等. 滑带土强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3212—3218.
- CHEN Xiao-ping, HUANG Jing-wu, YIN Sai-hua, et al. Experimental study of strength property of slip zone soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3212—3218.
- [20] BISHOP A W. A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength[J]. **Geotechnique**, 1971, 21(4): 273—328.
- [21] LUPINI J F. The drained residual strength of cohesive soils[J]. **Geotechnique**, 1981, 31(2): 181—213.
- [22] 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.
- [23] TER-STEPANIAN G. Creep of clay during shear and its rheological model [J]. **Geotechnique**, 1976, 25(2): 299—320.
- [24] GIBO S, EGASHIRA K, OHTSUBO M. Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1987, 34(3): 456—462.
- [25] STARK T D. Drained residual strength of cohesive soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 120(5): 856—871.
- [26] DI M C, FENELLI G B. Residual strength of kaolin and bentonite: The influence of their constituent pore fluid[J]. **Geotechnique**, 1994, 44(2): 217—226.
- [27] LI Y R, WEN B P, AYDIN A, et al. Ring shear tests on slip zone soils of three giant landslides in the Three Gorges Project area[J]. **Engineering Geology**, 2013, 154(2): 106—115.
- [28] 李妥德, 张颖均. 国内外滑坡土残余强度的研究现状[M]//滑坡文集(二). 北京: 中国铁道出版社, 1979: 8—10.
- LI Tuo-de, ZHANG Ying-jun. Research advance on the residual strength of landslide soils[M] //Landslide Corpus(2). Beijing: China Railway Press, 1979: 8—10.
- [29] 任光明, 聂德新, 左三胜. 滑带土结构强度再生研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(3): 7—12.
- REN Guang-ming, NIE De-xin, ZUO San-sheng. Study on regeneration of structural strength of slide zone soil[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 1996, 7(3): 7—12.
- [30] 沈明荣, 谌洪菊, 张清照. 基于蠕变试验的结构面长期强度确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 1—7.
- SHEN Ming-rong, CHEN Hong-ju, ZHANG Qing-zhao. Method for determining long-term strength of discontinuity using shear creep test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(1): 1—7.
- [31] 严绍军, 项伟, 唐辉明, 等. 大岩淌滑坡滑带土蠕变性质研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 58—62.
- YAN Shao-jun, XIANG Wei, TANG Hui-ming, et al. Research on creep behavior of slip band soil of Dayantang landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 58—62.