

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.02.011

蠕动型滑坡滑带土蠕变特性研究

孙淼军¹, 唐辉明², 王潇弘³, 胡新丽², 汪明元¹, 倪卫达¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院 工程勘测处, 浙江 杭州 311122; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074;
3. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450045)

摘要: 蠕动型滑坡表现为长期缓慢的变形响应, 其演化过程和稳定性受到滑坡滑带土蠕变性质的控制。选取三峡库区典型蠕动型滑坡马家沟滑坡为研究对象, 针对该滑体滑带土原状试样开展大尺寸三轴蠕变试验, 研究滑带土试样在不同围压和应力水平下的蠕变规律, 并进一步采用等时曲线法确定滑带土长期强度与常规强度的差异。研究结果表明, 马家沟滑坡滑带土具有典型的稳定蠕变材料特性, 蠕变阶段可分为衰减蠕变和稳定蠕变 2 个变形过程, 其变形趋势与滑坡宏观变形演化具有较好的一致性; 滑带土绝对蠕变量和稳定蠕变阶段的变形速率均与轴向应力值呈正相关, 而衰减蠕变阶段的持续时长随着剪应力水平增加基本呈线性增加。滑带土长期强度参数与常规强度参数比较, 其长期黏聚力 c 值和长期内摩擦角 φ 值分别下降 24.8% 和 22.4%。

关键词: 蠕动滑坡; 滑带土; 三轴蠕变试验; 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) 02-0385-08

Creep properties of sliding-zone soil from a creeping landslide

SUN Miao-jun¹, TANG Hui-ming², WANG Xiao-hong³, HU Xin-li², WANG Ming-yuan¹, NI Wei-da¹

(1. Engineering Exploration and Survey Department, Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311122, China;
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;
3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China)

Abstract: A creeping landslide shows a deformation response of long-term and small-scale, the evolution and stability of which are controlled by the creep response of sliding-zone soil. The Majiagou landslide, a typical creeping landslide in Three Gorges reservoir region, is selected as a case. A series of large-scale triaxial compression tests is conducted on the undisturbed specimens of sliding-zone soil to reveal the creep laws of sliding-zone soil under different confining pressures and stress levels. On this basis, the difference between long-term strength and conventional strength of the soil is determined by the isochronous curves. The results show that the sliding-zone soil of Majiagou landslide has steady creep characteristic, and the creep process can be divided into attenuation creep stage and constant speed creep stage. And the deformation tendency of sliding-zone soil is similar to the macroscopic deformation of the landslide. The absolute creep displacement and the strain rate of constant speed creep stage are positively correlated with the axial stress. While the duration of the attenuation creep stage increases linearly with the shear stress level. The long-term cohesion and the long-term internal frictional angle decrease by 24.8% and 22.4% respectively comparing with the conventional strength parameters.

Keywords: creeping landslide; sliding-zone soil; triaxial creep tests; creep properties; long-term strength

1 引言

蠕动滑坡是指为滑体持续、缓慢、长期变形的滑坡类型, 此类滑坡不仅会对附近设施和建筑造成不同程度危害, 而且对滑坡已有防治结构的支护效果同样产生不利影响^[1-3]。蠕动滑坡的变形演化和稳

定性受到内外因素的共同作用, 一方面滑坡物质特别是滑带土的变形和力学特性具有时间效应; 另一方面降雨、库水升降和地面荷载等不断改变坡体的渗流场和应力场。前者是滑坡变形的物质基础, 后者则是滑坡滑动的诱发因素。因此, 蠕动型滑坡的变形机制和稳定性分析应以滑坡物质的蠕变特性研

收稿日期: 2016-04-20

基金项目: 国家重点基础研究发展项目(973 计划)(No. 2011CB710604); 国家自然科学基金项目(No. 41272305)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2011CB710604) and the National Natural Science Foundation of China (41272305).

第一作者简介: 孙淼军, 男, 1987 年生, 博士后, 从事岩土工程稳定性评价、地质灾害防治等方面的科研工作。E-mail: sunmj816@163.com

究为基础。

目前,滑带土蠕变特性研究通常采用室内试验方法,但试样主要为钻孔取样的小尺寸土样,且试验前剔除了试样中粗颗粒成分^[4-8]。然而针对含有大量碎石、砾石的非均质滑带土。若在制样过程中人为剔除大粒径物质,势必影响试验结果的可靠性^[9-15]。由此可见,针对非均质滑带土开展大尺寸蠕变试验研究,对于掌握滑带土蠕变性质十分必要。

本文以三峡库区典型蠕动型滑坡马家沟滑坡为研究对象,通过采取人工挖孔竖井内的大尺寸原状土样,开展非均质滑带土在不同围压和剪切应力水平下的多级加载三轴蠕变试验。基于试验得到的滑带土蠕变曲线,对非均质滑带土的蠕变阶段划分和蠕变速率等特性进行分析。采用等时曲线方法,对滑带土长期强度和常规强度参数进行对比分析,为后续研究滑坡变形预测和长期稳定性奠定基础。

2 滑坡概况及演化特征

2.1 马家沟滑坡概况

马家沟滑坡位于长江一级支流吒溪河左岸,滑坡两侧为自然冲沟,前缘呈舌状伸入吒溪河中,后缘张拉后在地形上呈陡坡状。滑坡全长为 538 m,宽为 180 m,前、后缘高程分别为 135、280 m。根据钻探数据,滑带最大埋深为 32 m,最小埋深处仅有 11 m,总体积为 $127.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于大型滑坡。滑体主滑方向为 291° ,基本与吒溪河正交,滑坡全貌如图 1 所示。

滑坡区基岩地层为侏罗系上统遂宁组 (J_3s),岩性为泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,呈互层构造。该地层的力学性能较差,易风化,遇水后易软化、泥化,是三峡地区典型的易滑地层之一。滑体物质为

松散的崩坡积物,滑带物质为残积物,由含砾粉质黏土组成,平均厚度为 60 cm,滑带下覆基岩为紫红色粉砂质泥岩。



图 1 马家沟滑坡全貌图

Fig.1 Photo of Majiagou landslide

2.2 滑坡变形演化特征

在滑坡体上布置了一条沿着主滑剖面的监测线,5 个监测点 J01、J02、J03、J04、J05 高程分别为 182、203、222、240、250 m,采用 GPS 实现滑坡地表位移的监测。由于 2010 年后滑坡变形受到试验抗滑桩干扰,为充分呈现滑坡无有效抗滑措施前的变形演化过程,本文采用滑坡 2007 年 2 月—2009 年 12 月的表面 GPS 监测位移数据开展分析,位移曲线如图 2 所示。

分析图 2 可知,滑坡变形整体表现为快速变形、变形衰减和慢速稳定变形 3 个阶段。快速变形阶段,由于每次水位变化后引起滑坡体的渗流场发生变化,同时改变滑坡体内的应力场分布,从而引起滑坡变形迅速发展;滑坡变形衰减阶段,渗流场和应力场逐渐趋于稳定,滑坡变形的速率逐渐减小;慢速变形阶段,滑坡渗流场和应力场基本稳定,滑坡变形平稳发展,滑坡处于缓慢、持续、渐进的变形过程,体现滑坡的蠕动特性。

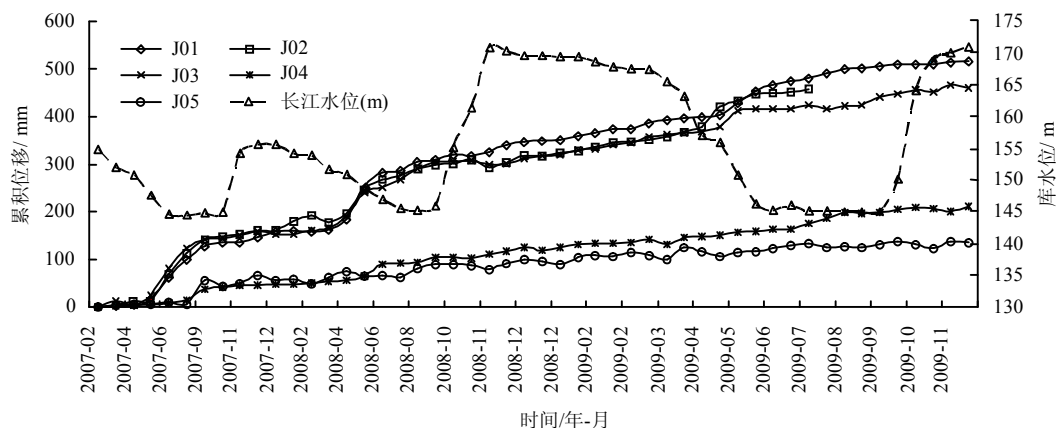


图 2 滑坡表面位移曲线

Fig.2 Surface displacement of landslide

3 试验材料和方法

3.1 试验设备及试样

试验设备为 YLSZ150-3 型三轴压缩试验仪, 该仪器轴向加载装置由原来的应变控制式改装为应力控制式^[10-11]。滑带原状土样取自滑坡人工挖孔试验桩的竖井中, 取样深度为 31.0~31.5 m, 位于滑动带与基岩交界处 (见图 3)。

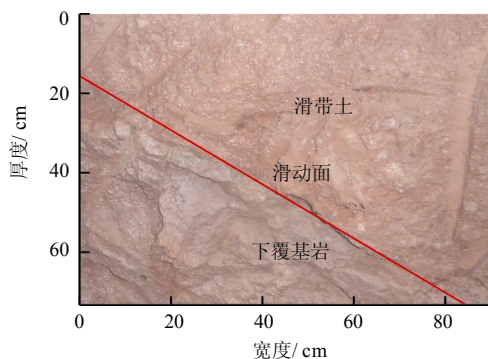


图3 滑带土取样剖面
Fig.3 Section of sliding-zone soil

试验用试样共计 4 个, 试样实际平均尺寸为 $\phi 149.8 \text{ mm} \times H 300.5 \text{ mm}$, 相应高径比为 2.01。滑带土天然状态物理性质指标见表 1, 颗粒级配见表 2。根据表 2 颗粒分析结果可知, 滑带土砾级颗粒含量平均值为 20.6%, 砾石颗粒不超过 20 mm, 满足《土工试验规程》^[16]中土样最大颗粒粒径小于试样直径 1/6 的要求。

表 1 滑带土物理性质指标表

Table 1 Physical properties of sliding-zone soil

土样 编号	含水率 /%	干密度 /(g/cm ³)	颗粒相对 密度	液限 /%	塑性 指数
CT-1	12.4	1.84	2.71	28.1	10.2
CT-2	12.7	1.86	2.73	28.5	10.3
CT-3	12.6	1.85	2.72	27.8	9.2
CT-4	12.8	1.84	2.72	29.1	11.0

表 2 滑带土级配表

Table 2 Grain size distribution of sliding-zone soils

土样 编号	不同颗粒(mm)所占百分比/%									
	砾		砂		粉粒		黏粒			
	>10	10~5	5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005		
CT-1	2.9	4.8	5.8	6.2	12.8	15.4	21.9	29.2		
CT-2	3.0	4.5	6.1	5.4	13.2	17.9	21.6	28.3		

3.2 试验方案

由于稳定变形阶段滑坡变形缓慢, 且滑带土在滑坡前缘剪出口和两侧冲沟存在排水条件, 因此,

三轴试验采用排水试验。三轴蠕变试验前首先开展常规三轴固结排水 (CD) 试验, 根据滑带土的埋深计算土样围压 σ_3 范围, 最终确定围压 σ_3 等级为 100、200、400、600 kPa, 通过常规 CD 试验分别得到滑带土试样在 100、200、400、600 kPa 围压下的破坏偏应力 q_f , 常规三轴应力应变曲线如图 4 所示。根据摩尔-库仑破坏准则计算得到滑带土常规强度参数黏聚力和内摩擦角分别为 30.4 kPa 和 20.74°。对比文献中关于三峡库区滑坡土体的三轴试验成果^[10-11], 本文由大型三轴试验得到的强度参数值明显较大, 特别是土体内摩擦角的增幅较为显著, 体现出土样中粗颗粒成分对土体剪切强度的影响^[2]。

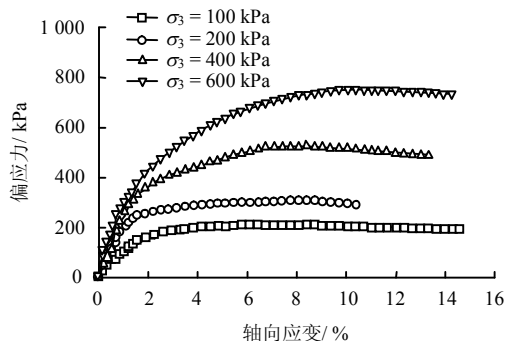


图 4 常规应力-应变关系曲线
Fig.4 Curves of conventional stress-strain

根据 CD 试验得到的破坏偏应力 q_f , 按式 $SL = (\sigma_1 - \sigma_3)/q_f$ 计算应力水平 SL 分别为 0.30、0.45、0.60、0.75 时的主应力值 σ_1 , 作为三轴试验的轴向荷载。同一围压下, 采用同一试样开展多级加载三轴排水蠕变试验。三轴试验中对土样的轴向变形和体积变形进行动态监测, 根据已有试验资料和文献的试验成果, 一般土样的体积应变相较于轴向应变先达到稳定标准^[17]。因此, 本次三轴蠕变试验中同样以轴向应变作为试验终止的控制标准。在本次蠕变试验中每级轴向荷载稳定时间 21~22 d, 实时记录试样的变形值, 当轴向变形稳定时间达到预定值后施加下一级荷载。为了降低温度变化对试验成果的影响, 实验室采用空调进行温度控制, 维持室温在 20 °C 左右。

4 试验结果与分析

4.1 滑带土蠕变规律

试验得到的分级加载曲线如图 5 所示。目前, 岩土体流变理论假设岩土体的蠕变性质符合玻尔兹曼线性叠加原理, 即固定剪切应力所引起的蠕变变形可以由各级荷载的增量引起的变形求和得到^[18]。

根据玻尔兹曼线性叠加原理对蠕变数据进行处理,得到不同围压时各级剪应力水平作用下滑带土的轴向应变-时间曲线,如图6所示。

由图6可知,滑带土具有典型的稳定蠕变材料特性,施加每一级轴向荷载后,滑带土均呈现3个阶段的变形过程:瞬时弹塑性变形、衰减变形和稳态变形。瞬时弹塑性变形阶段,由于短时间内增加轴向荷载,土样内颗粒骨架承受荷载增加,从而导致颗粒的弹性变形和颗粒间位置调整引起的塑性变形,宏观上表现为土体轴向应变短时间内增加;衰减变形阶段,土体骨架内的应力链趋于稳定,颗粒变形和位置调整逐渐减少,宏观上表现为土样的蠕变速率逐渐减小;稳态变形阶段,土体骨架的应力链基本稳定,土体宏观变形表现出缓慢和稳定的特征。相较于滑坡变形演化特征可知,滑带土的蠕变

阶段与滑坡整体的蠕变演化过程具有较好的一致性,说明滑坡整体变形演化过程受到滑带土蠕变特性的影响和控制。

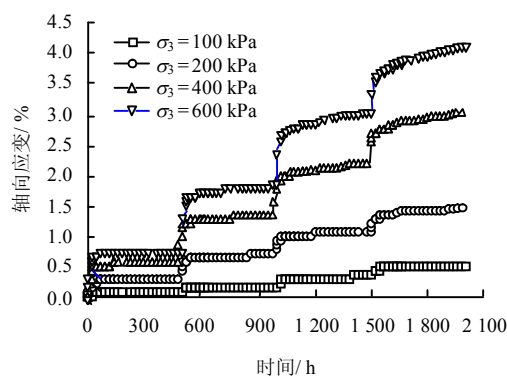


图5 叠加前轴向应变-时间曲线
Fig.5 Curves of axial strain-time before superposition

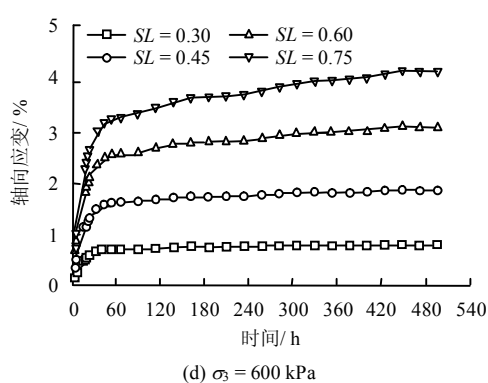
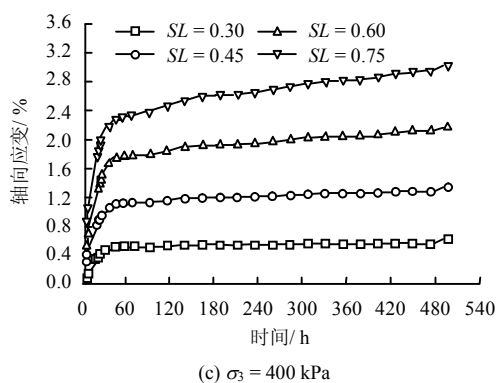
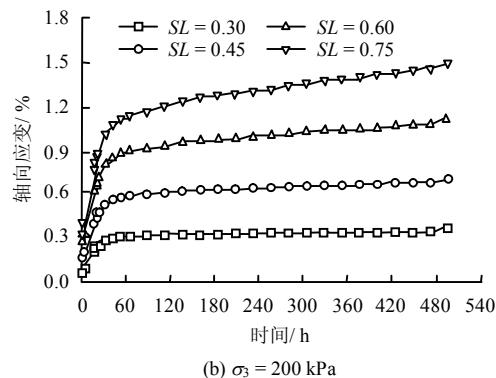
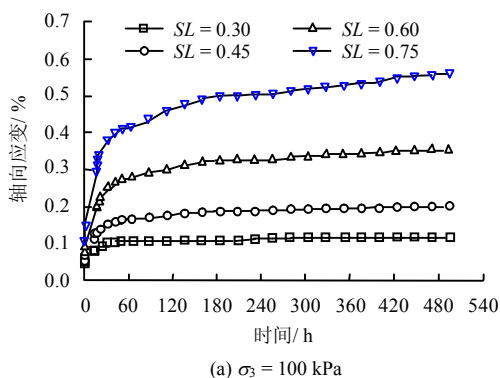


图6 不同围压下滑带土轴向应变-时间关系曲线图

Fig.6 Curves of axial strain-time of sliding-zone soil under different confining pressures

同样由图6可知,滑带土绝对蠕变量,即试验终止变形与瞬时弹塑性变形的差值,与轴向应力值呈正相关性,以围压为200 kPa时为例,应力水平分别为0.30、0.45、0.60、0.75时相应的绝对蠕变量分别为0.27%、0.48%、0.76%、1.12%;而应力水平同为0.75时,围压为100、200、400、600 kPa时相应绝对蠕变量分别为0.45%、1.12%、2.23%、

3.50%。上述数据表明,滑带土的绝对蠕变量同时受围压和剪应力水平影响,即绝对蠕变量与轴向应力值呈正相关。

根据不同围压和不同应力水平下滑带土变形稳定时的蠕变速率,可整理得到滑带土试样三轴稳定蠕变速率与围压、剪应力水平关系图,如图7所示。由图可知,滑带土的稳定蠕变速率同样与围压

和剪应力水平相关, 即稳定蠕变速率随着轴向应力值的增加呈线性增加。

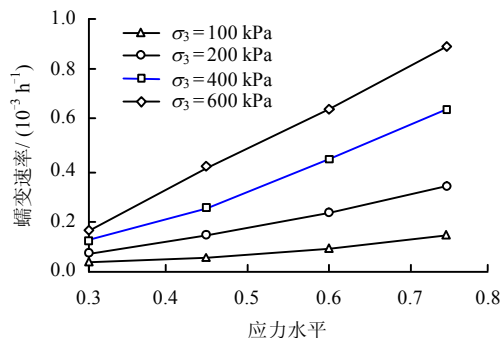


图7 不同围压下蠕变速率-应力水平曲线

Fig.7 Curves of creep rate-stress level under different confining pressures

根据每级荷载作用下稳态变形开始时间, 可整理得到滑带土衰减蠕变过程的时长, 见表3。由表可知, 滑带土衰减蠕变持续时长随着应力水平的增加而增加, 而与围压数值并不相关, 即滑带土衰减蠕变持续时长仅与偏应力值相关。

表3 衰减蠕变持续时长结果
Table 3 Durations of decayed creep stage

围压 / kPa	应力水平	时间 / h	围压 / kPa	应力水平	时间 / h
100	0.30	23.2	400	0.30	22.9
	0.45	27.5		0.45	30.4
	0.60	36.0		0.60	39.3
	0.75	39.7		0.75	43.5
200	0.30	18.4	600	0.30	26.2
	0.45	28.7		0.45	27.1
	0.60	34.6		0.60	34.6
	0.75	41.1		0.75	42.1

国内外学者就土体蠕变形成机制和演化规律已经展开广泛而深入的研究^[19-25]。根据已有研究成果, 土体产生蠕变从细观上由2个原因造成: ①土体矿物颗粒或者矿物簇体空间位置的不断调整, 即在持续增加荷载作用下土体矿物颗粒或者矿物簇体随着时间不断地产生滑动和旋转; ②矿物颗粒或者矿物簇体在固定不变荷载的持续作用下在应力集中的角点处发生破坏。前者的重点为荷载需要持续增加, 后者的重点为荷载要达到一定量级。

基于上述土体蠕变机制研究成果, 对马家沟滑坡滑体土的蠕变特征进行初步解释。由于本次三轴压缩试验中采用的最高剪应力值为1.05 MPa, 其数值远未达到使得土体中的矿物颗粒产生破坏的量

级^[19-21], 因此, 本文中滑带土的蠕变机制主要与细观颗粒的相对移动和旋转有关。试样加载初期, 荷载在短时间内持续增长, 矿物颗粒和矿物簇体的空间位置不断发生变化, 特别是接触配位数少的矿物颗粒和矿物簇体由于不均衡受力持续向土体孔隙中填充, 颗粒位置调整的结果是孔隙被不断地填充, 土体孔隙率持续减小, 此时颗粒调整幅度较大, 宏观上表现为蠕变速率较快; 随着矿物颗粒的接触配位数持续增加, 颗粒相对旋转和相互滑移的幅度亦不断减小, 宏观上表现为土体蠕变的速度不断减小; 当颗粒的配位数达到一定值时, 颗粒间形成稳定的应力链, 矿物颗粒位置只发生小幅调整, 但调整在分布于整个试样范围内, 从而使土体宏观变形的速率稳定^[22-25]。通过上述分析可知, 蠕变的速率和量值与细观颗粒的位置调整幅度密切相关, 而颗粒的调整幅度与剪应力值有关。因此, 土体的绝对蠕变量、蠕变速率和蠕变阶段划分均与剪应力值或剪应力水平相关。

4.2 滑带土长期强度

长期强度是土体经历长期荷载作用后的最小强度值, 为滑坡长期稳定性计算的一个重要参数, 与时间密切相关。目前常用以下2种方法判断滑带土的长期强度值^[2]: ①加载应力水平增加幅值很小, 荷载等级密集时, 试样轴向蠕变在某级剪切应力作用下明显由稳态流变向加速流变转化时, 该剪切应力可视为长期强度; ②加载应力水平加载等级较少, 同时轴向应变与时间曲线未出现加速段时, 可提取多个时间点的轴向应变-应力绘制等时曲线, 根据等时曲线确定长期强度。

由于本文蠕变试验中滑带土试样并未呈现加速蠕变特性, 因此, 采用等时曲线法来确定其长期强度值。等时曲线是同一围压、不同应力水平下同一时间的应力-应变关系曲线。图8为不同围压下滑带土的等时曲线。由图可知, 不同时刻的等时曲线簇表现为2种特征: 加载2 h和4 h的等时曲线表现为近线性, 表明短时间内滑带土的时间劣化效应较弱; 加载16 h开始, 随着加载时间的增长, 各曲线之间的间距逐渐减小, 等时曲线表现出明显的拐点, 根据维亚洛夫^[26]分级加载蠕变试验确定长期强度的研究, 曲线近似于双曲线形状, 且出现拐点的应力水平逐渐由高到低过渡, 表明随着时间增长滑带土劣化效应不断增强。

图8中加载时间较长时的等时曲线都具有明显转折点, 该转折点标志着滑带土由于时间劣化效应已经发生了塑性破坏。据陈宗基等^[18]的流变理论,

可以根据已有等时曲线推测 $t = \infty$ 时刻的等时曲线的拐点, 即岩土体的长期强度值。根据上述方法和滑带土等时曲线的特征, 以曲线相距最近处作为 $t = \infty$ 时刻的等时曲线的拐点较为合理可靠。因此, 可确定围压为 100、200、400、600 kPa 时长期剪切强度分别为 114、171、317、420 kPa。

上述分析表明, 滑带土长期强度均低于瞬时强度, 围压为 100、200、400、600 kPa 时所对应的长期抗剪强度相比瞬时抗剪强度分别降低 39.8%、42.9%、38.7%、44.2%。不同围压作用下滑带土的

平均长期抗剪强度约为瞬时抗剪强度的 58.6%。同样采用摩尔-库仑强度模型作为滑带土长期强度准则, 根据已得到的不同围压下滑带土蠕变试验的峰值偏应力, 计算得到滑带土长期黏聚力值与长期内摩擦角分别为 22.8 kPa 和 16.1° , 较常规值分别下降 24.8% 和 22.4%。由此可见, 由于滑带土粉粒、黏粒含量和砂、砾颗粒含量相当, 长期荷载作用下砂砾颗粒间的摩擦和嵌固作用的减弱、黏粒间的胶结破坏和吸引作用的减弱效应相当, 因此, 滑带土的长期内摩擦角和长期黏聚力的劣化幅值相近。

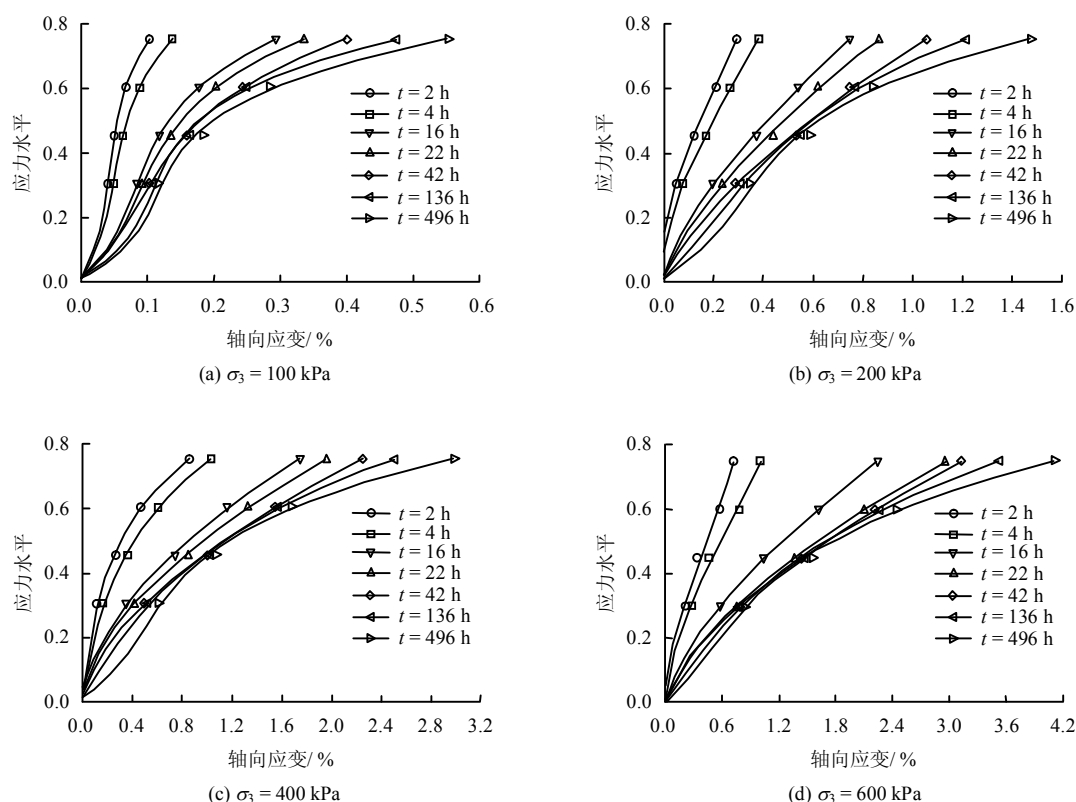


图8 不同围压下的等时曲线图

Fig.8 Isochronous stress-strain curves under different confining pressures

5 结论

(1) 马家沟滑坡滑带土为典型的稳定蠕变材料, 在荷载变化时经历了瞬时弹塑性变形、衰减蠕变变形和稳定蠕变变形 3 个阶段, 其中后两者为与时间相关的变形。滑带土在三轴蠕变加载工况下的变形趋势与滑坡宏观变形演化阶段基本相同。

(2) 滑带土绝对蠕变量和稳定蠕变阶段的蠕变速率同时受围压和剪应力水平影响, 即绝对蠕变量和稳定蠕变速率与轴向应力值呈正相关; 而滑带土衰减蠕变持续时长与围压数值并不相关, 其值随着偏应力值的增加呈线性增加。

(3) 由于短时间内滑带土的时间劣化效应较弱, 加载初期土体的等时曲线基本呈线性, 随着加载时间的增长, 土体劣化效应增强, 不同时刻等时曲线的间距逐渐减小, 曲线出现明显的拐点。由等时曲线确定滑带土长期强度值, 其长期黏聚力值与长期内摩擦角分别为 22.8 kPa 和 16.1° , 较常规值分别下降 24.8% 和 22.4%。

(4) 滑带土的变形演化阶段与滑坡整体变形阶段具有较好的一致性, 但由于室内试验条件与现场工况的区别, 试验结果的变形量级和各阶段持续时长与现场有很大差异, 后续研究将提炼滑带蠕变模型, 同时结合上部滑体土的性质, 反演滑坡整体变

形过程, 以探索蠕动型滑坡变形机制并有效预测滑坡后期变形。

参考文献

- [1] VAN DEN HAM G, ROHN J, MEIER T, et al. A method for modeling of a creeping slope with a visco-hypoplastic material law[J]. **Mathematical Geology**, 2006, 38(6): 711—719.
- [2] 孙森军. 库水作用下滑坡-抗滑桩体系变形时效规律与长期稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
SUN Miao-jun. Time-dependent deformation and long-term stability of landslide & stabilizing piles system under water level fluctuation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- [3] BOZZANO F, MARTINO S, MONTAGNA A, et al. Back analysis of a rock landslide to infer rheological parameters[J]. **Engineering Geology**, 2012, 131: 45—56.
- [4] PETLEY D N, HIGUCHI T, PETLEY D J, et al. Development of progressive landslide failure in cohesive materials[J]. **Geology**, 2005, 33(3): 201—204.
- [5] 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.
- [6] 蒋秀姿, 宝萍. 缓慢复活型滑坡滑带土的蠕变性质与特征强度试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 495—501.
JIANG Xiu-zi, BAO Ping. Creep behavior of slip zone of reactivated slow-moving landslide and its characteristic strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 495—501.
- [7] 谭福林, 胡新丽, 张玉明, 等. 不同类型滑坡渐进破坏过程与稳定性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 597—606.
TAN Fu-lin, HU Xin-li, ZHANG Yu-ming, et al. Study of progressive failure processes and stabilities of different types of landslides[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp. 2): 597—606.
- [8] 辛鹏, 吴树仁, 石菊松, 等. 簸箕山大型老滑坡滑动带的结构特征及形成机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1382—1391.
XIN Peng, WU Shu-ren, SHI Ju-song, et al. Structural characteristics of soft-rock slip zone and experimental study of its formation mechanism in Boji mountain large-scale old landslide[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(7): 1382—1391.
- [9] HAM T G, NAKATA Y, ORENSE R P, et al. Influence of gravel on the compression characteristics of decomposed granite soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(11): 1574—1577.
- [10] 胡新丽, 孙森军, 唐辉明, 等. 三峡库区马家沟滑坡滑体粗粒土蠕变试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3163—3169.
HU Xin-li, SUN Miao-jun, TANG Hui-ming, et al. Creep tests of gravel-soil of Majiagou landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(11): 3163—3169.
- [11] 简文星, 杨金. 三峡库区黄土坡滑坡 I 号崩滑体成因[J]. 地球科学, 2013, 38(3): 625—631.
JIAN Wen-xing, YANG Jin. Formation mechanism of No.1 Part slide of Huangtupo landslide in the Three Gorges reservoir area[J]. **Earth Science**, 2013, 38(3): 625—631.
- [12] REDDY B V V, LATHA M S. Influence of soil grading on the characteristics of cement stabilized soil compacts[J]. **Materials & Structures**, 2014, 47(10): 1633—1645.
- [13] ISHIKAWA T, MIURA S. Influence of freeze-thaw action on deformation-strength characteristics and particle crushability of volcanic coarse-grained soils[J]. **Soils and Foundations**, 2011, 51(5): 785—799.
- [14] 陈宇龙, 张宇宁. 非塑性细粒对饱和砂土液化特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 507—516.
CHEN Yu-long, ZHANG Yu-ning. Experimental study of effects of non-plastic fines on liquefaction properties of saturated sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 507—516.
- [15] 姜景山, 程展林, 左永振, 等. 粗粒土 CT 三轴流变试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2507—2514.
JIANG Jing-shan, CHENG Zhan-lin, ZUO Yong-zhen, et al. CT triaxial rheological test on coarse-grained soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2507—2514.
- [16] 南京水利科学研究所. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Nanjing Hydraulic Research Institute. SL237-1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water &

Power Press, 1999.

——下转第 399 页