

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.03.09

恒定荷载下拉力型锚杆系统界面流变实验特性分析

徐晓阳¹, 马露², 高文华²

(1. 安徽科技学院建筑学院, 安徽 凤阳 233100; 2. 湖南科技大学, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 针对已经达到应力平衡的锚固系统开展锚固界面流变试验, 验证了锚杆系统的 4 种破坏形式。锚固系统界面的流变过程主要经历初始、稳定和加速流变 3 个阶段, 通过流变速率曲线可直接判定锚杆系统的界面流变状态。

关键词: 锚固; 剪切; 流变

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)03-0052-07

An analysis of the tensile type anchor system interface characteristic rheological experiments under constant load

XU Xiaoyang¹, MA lu², GAO wenhua²

(1. Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China; 2. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: More and more attention has been paid to the anchorage system rheology in geotechnical anchoring. Researches have been made for anchoring the mechanical properties of interface, and theory and tests of the anchoring interface shear stress distribution are obtained. But the rheology of anchorage interface of anchorage system is seldom examined to be a balanced stress influence. Based on the modified experimental device and system, in view of the anchoring interface rheology in anchorage, the interface rheological test is carried out and the anchorage system interface of rheological properties and rheological state standard are obtained. The results are of great realistic significance to adding the anchor rock mass stability control.

Keywords: anchorage; shear; rheology

锚固技术已被广泛应用于工程建设中, 尤其是在煤矿巷道支护加固、深基坑边坡支护、危岩及滑坡加固、大体积坝体与岩土边坡的稳定方面, 加固效果明显, 经济效益较显著^[1]。但是, 随着支护时间的流逝, 工程人员发现, 原本具有较好锚固效果的锚固系统锚固效果有所减弱, 少数工程甚至丧失锚固力, 因此锚固系统的长期稳定性受到了越来越多的关注^[2~4]。究其原因, 锚固系统的流变性被越来越多的学者所认同^[5~6]。

锚固体系一般可以统分为锚固材料、粘结剂和加固岩土体三部分。根据已有的锚固工程破坏实例和锚固系统工程试验结果, 锚固系统的破坏按照破坏部位

分类主要有四种形式: 一是锚杆断裂破坏; 二是第一界面 - 锚杆与粘结材料脱离引起的破坏; 三是第二界面 - 锚固粘结剂与被加固的岩土体脱离引起的破坏; 四是位于被加固的岩土体内部界面破坏。在破坏实例中尤以第二界面的破坏最为常见, 因此, 针对锚固系统界面的研究, 就显得尤为重要^[7~10]。

1 全长粘结型拉拔流变实验

1.1 试验样本制作

为反映工程施工的真实情况, 严格依照锚杆施工的顺序, 以先成孔、加锚杆、后注浆的工序进行小型锚固系统的制作。本实验所用锚固系统以混凝土圆柱为

收稿日期: 2015-08-19; 修订日期: 2015-12-31

第一作者: 徐晓阳(1985-), 男, 硕士, 助教, 主要从事岩土锚固及边坡防治研究。E-mail: xxy1231@163.com

基体岩体,以水泥砂浆为灌浆材料,以螺纹钢为锚杆组装而成。先浇筑带有孔洞的半圆形基体,并在孔洞表面由拉拔端向下依次粘贴应变片并编号 H-1 至 H-5。同时锚杆上面也是由拉拔端向下依次粘贴应变片并编号。最后浇筑成一个完整的拉拔试验体(图 1a),试验件参数见表 1。

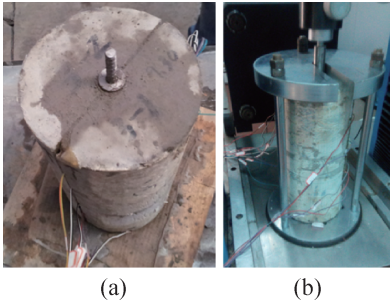


图 1 试件 (a) 及加载过程 (b) 示意图
Fig. 1 Test pieces (a) and loading process (b)

表 1 试验件参数
Table 1 Test parameters

编号	基体强度及直径	灌浆体及直径	锚杆
LB-1	C30, $\varphi 300$	M10, $\varphi 30$	$\varphi 12$
LB-2	C30, $\varphi 300$	M10, $\varphi 30$	$\varphi 12$
LB-3	C30, $\varphi 300$	M15, $\varphi 30$	$\varphi 16$
LB-4	C30, $\varphi 300$	M10, $\varphi 30$	$\varphi 16$

1.2 拉拔试验

将养护成型的试验体安装在已改装过的 RYL-600 型微机控制三轴流变试验机上(图 1b),由试验件上方拉压传感器提供恒定拉拔力加载并记录竖向总位移,界面应变数据由应变采集仪按不同时间间隔采集,由微机自行记录保存。本实验主要为了明确界面流变变化的特点,各级荷载所持续的时间,根据试件的应变速率变化情况予以确定,即当试样的 ε 在 1 h 内变化不大于 0.00001 时,认为其变形基本稳定,进行下一级荷载。具体加载方案见表 2。

表 2 加载方案
Table 2 Loading plan

试件编号	应力 水平/kN	各级荷载 时间/h	加载速率/ ($\text{N} \cdot \text{s}^{-1}$)	测量内容
LB-1 ~ LB-4	10	24(可适 当调整)	1000	ε
	20			
	30			
	40			
	45			
	50			
	55			
	60			

1.3 破坏类型分析

由锚固系统的构成分析可知,影响锚固系统破坏的主要因素并不是锚固系统中最强的元素,而是取决于锚固系统中相对最为薄弱的环节。根据已完成的锚固系统拉拔试验破坏情况分析总结得出,本实验系统的破坏类型主要有:灌浆体跟基体界面脱离导致系统破坏(LB-1),锚杆强度不够被拉断导致系统破坏(LB-2),两半圆基体粘合界面开裂导致系统破坏(LB-3),钢筋与灌浆体界面的破坏导致系统破坏(LB-4),其破坏图片见图 2。本实验的破坏类型基本上涵盖了全长粘结型锚杆在工程建设中已有破坏类型。

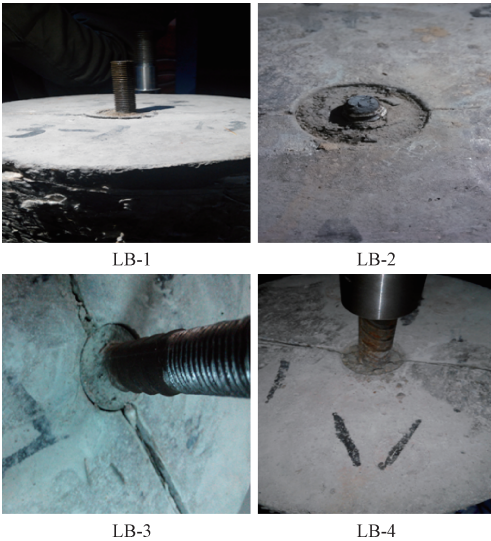


图 2 试件破坏图片
Fig. 2 Specimen damage pictures

2 锚固界面剪切流变结果分析

本实验总共获得 4 组试验数据。因灌浆质量的影响,测试数据不完整,仅对所得较好数据进行分析。图 3 为试验所得不同试件各测点在分级连续加载条件下的流变加载试验曲线。

由 4 个试件的数据结果可以看到,界面应变数值呈正负变化,在此首先说明产生这种结果的原因。由锚固系统模型组成可以得出,灌浆体跟基体之间界面是通过两部分的剪切作用来完成的,应变片是粘贴在混凝土基体上面的,受剪切作用表现出来的应变应为压应变。由图 3 中 4 个试件 20 个测点的数据可以看出,在施加拉拔荷载的作用下,界面应变片的变化趋势大多数测点为压缩应变,即应变片所测数值为负值,与理论相符合。但是,4 个试件中应变片的应变也出现

了拉应变,像试件 LB-1 中测点 H-5, LB-2 中的 H-3, LB-3 中的 H-1, H-3 和 H-4, LB-4 中的 H-5 等测点,其应变随施加拉拔荷载成拉伸应变变化,发生这种情况的原因,认为是在灌浆施工时,在对灌浆体进行振捣时,所贴应变片可能与混凝土基体脱粘,粘贴到了灌浆体上面,因此在施加拉拔荷载时,应变片表征为灌浆体的拉伸应变,应变数值为正。灌浆体的密

实度以及与应变片接触部分的均匀性亦会引起应变片拉压的不统一性。众所周知,砂浆体的抗拉形变较低,一旦与应变片接触部分灌浆体出现拉伸断裂时,应变往往会表现为先下后上的情况,这也给分析界面应变变化增加了可变性。由此仅选取了符合试验要求的压缩应变数据来分析。

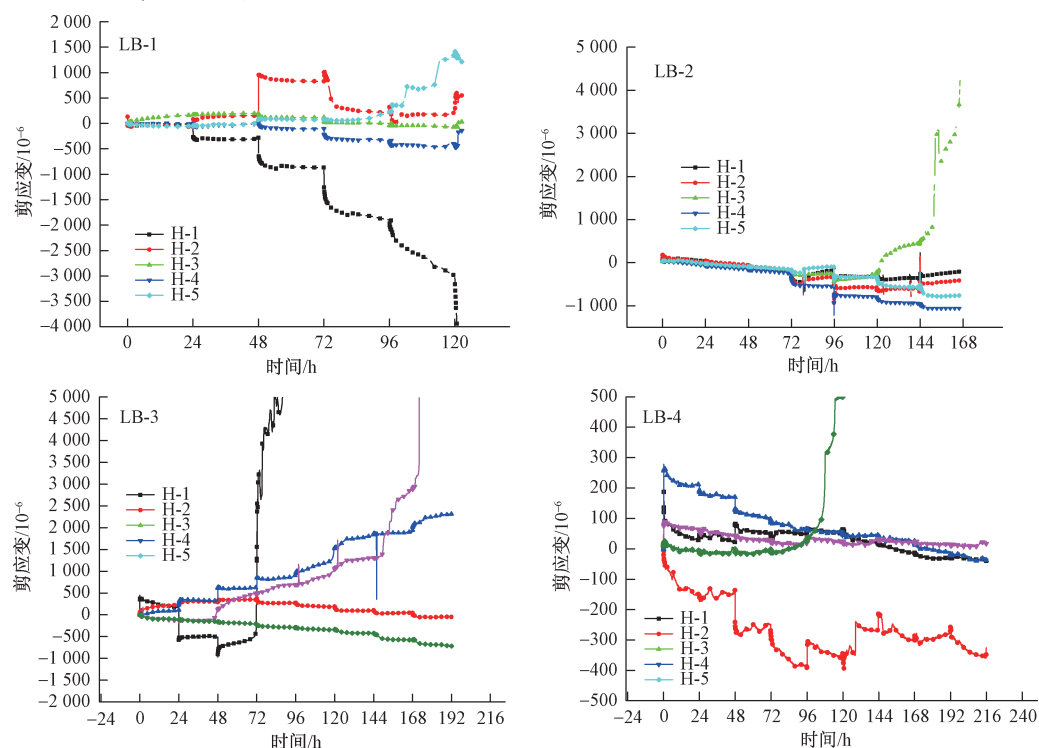


图3 分级增量加载下各试件流变曲线

Fig. 3 Rheological curve of different specimens with the graded incremental load

2.1 流变初始值分析

由4个流变试验结果可以看出,并不是荷载一开始施加测点就会发生流变现象,而是当荷载达到一定量值时,才会发生流变现象。并且流变由稳定流变状态到加速流变状态也存在一个临界荷载,称这一临界荷载为流变阈值。考虑到本实验的实际分级加载方式,无法给出每组测点发生流变时的临界荷载,但可以给出一个荷载范围,如表3所示。

表3 各测点流变荷载

Table 3 Rheological load measurement points

试件	测点	初始流变阈值/kN
LB-1	H-1	10~20
LB-2	H-4	0~10
LB-3	H-4	10~20
LB-4	H-3	50~60

界面流变阈值主要受界面两部分岩体强度特性的影响,强度越高,流变荷载越大,强度越低,流变荷载越小,且以低强度部分起决定性作用,因此,在锚杆设计时,围岩体的强度决定了灌浆体强度的大小。

2.2 界面流变全过程分析

界面流变全过程根据流变速率的不同一般可以分为3个阶段:初始剪切流变阶段、稳定剪切流变阶段和加速剪切流变阶段。

图4为LB-1中H-1测点在不同分级荷载下的流变曲线。由图4可以得出,当锚固系统施加拉拔荷载时,锚固界面会出现一个瞬时应变,并且瞬时应变的数值跟施加荷载的大小有关,界面测点在第二级荷载下(20 kN),对应瞬时应变为 251×10^{-6} ,而第四级荷载下(40 kN),对应测点瞬时应变为 1130×10^{-6} ,由此可以得出界面瞬时应变随着施加荷载的增大而增大。

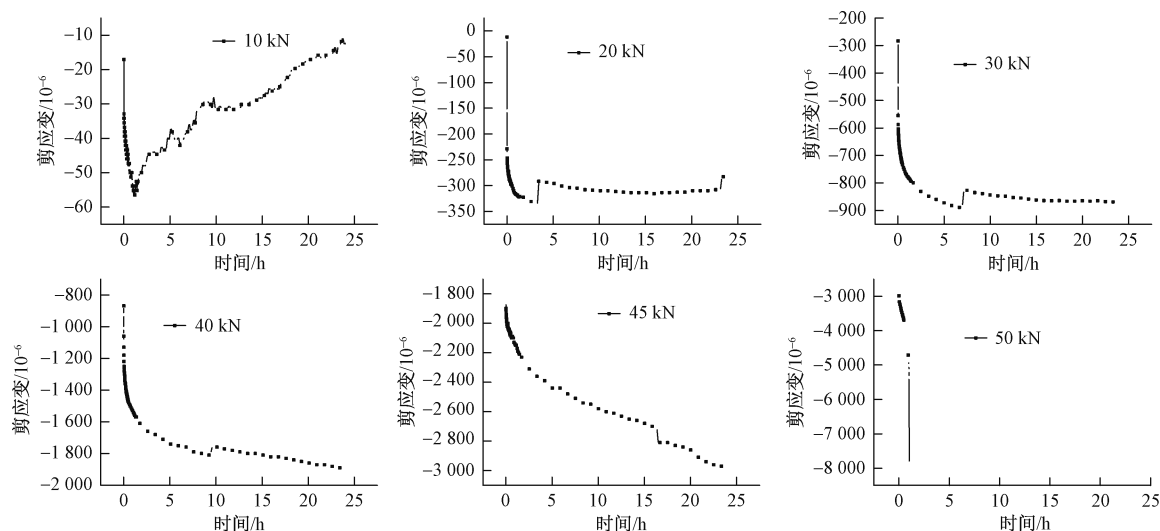


图4 LB-1中H-1测点在不同分级荷载下的流变曲线

Fig. 4 Rheological curve of the measuring points H-1 of LB-1 under the different graded loading

当施加荷载水平较低时,界面应变在加载初期变化速率较明显,随着时间的增加,变化速率放缓,最终应变随时间保持不变,表现为界面初始流变状态。以测点H-1为例,在30 kN的荷载下,界面剪应变在加载初期变化速率较高,5 h以后,变化速率逐渐减小,15 h以后,总应变随时间的增加没有变化,应变值稳定在 314×10^{-6} 这一数值。

当施加拉拔荷载较大,超过某一数值时,界面应变由稳定流变状态向等速流变状态变化,界面剪应变在达到一定数值以后,保持某一应变速率逐渐变化,并随时间的增加变化速率保持不变。并且时间足够长的话,界面应变在达到极限应变以后将发生破坏。以H-1测点应变为例,在40 kN和45 kN的拉拔荷载下都发生了等速流变状态。在40 kN的拉拔荷载下,界面应变增加到 1600×10^{-6} 这一数值以后,以20/h应变速率逐渐增加。

当施加的荷载很大时,界面应变在产生瞬时应变以后,以逐渐增加的应变速率变化,在短时间内达到应变极限,界面产生破坏。界面处于加速流变状态,这一时间很短。以H-1测点为例,在施加50 kN荷载时,界面应变在1 h内由 3070×10^{-6} 增加到 7850×10^{-6} ,测点界面发生应变破坏。

LB-2测点中的H-2和H-3测点, LB-4测点中的H-2应变随时间和荷载的变化曲线均符合上述规律。

2.3 等速流变特性分析

由试件分级荷载流变试验曲线可以看出,在整个

流变过程中,等速流变在整条曲线中占有非常重要的地位,从界面开始发生流变到界面加速流变之前的这一阶段可以作为研究的重点,这一阶段界面的发展趋势对于整个锚固系统的长期稳定性具有决定性。可以从界面应变的变化速率来研究界面的应变变化趋势。以试件LB-1为例,图5为LB-1测点H-1在分级荷载下应变速率曲线。

由图5可以看出,在施加20~45 kN拉拔荷载以后,根据数值的大小,界面流变速率可以明显分为2个部分,第一部分为施加荷载极短时间内,流变速率由极大值下降到极小值,这一现象可归结为界面在施加荷载瞬间有瞬时弹性应变的发生。第二部分则是应变发生瞬时弹性应变后的阶段,流变速率变化较第一部分较平缓,可以归为流变应变阶段。为了更好地研究流变阶段应变速率的变化,把瞬时弹性应变阶段去掉,将流变应变阶段的应变速率单独拿出来分析,图6为去掉了瞬时弹性应变的流变速率曲线。

由图6可以看出,流变阶段应变速率的总体变化趋势为由大变小,然后趋于定值状态。20 kN荷载下,流变速率在0.7 h时间内由 $-200 \times 10^{-6}/h$ 下降到 $-25 \times 10^{-6}/h$,再经过11 h后应变速率缓慢地减小到0。30 kN荷载下,流变速率在1 h时间内由 $-200 \times 10^{-6}/h$ 下降到 $-40 \times 10^{-6}/h$,再经过13 h应变速率缓慢减小到定值 $-1 \times 10^{-6}/h$ 。40 kN荷载下,流变速率在2.5 h内由 $-400 \times 10^{-6}/h$ 下降到 $-40 \times 10^{-6}/h$,并且在这段时间内,应变速率有明显大小交替变换,曲线呈锯齿状,再经过8 h后应变速率缓慢减小到定值 -10

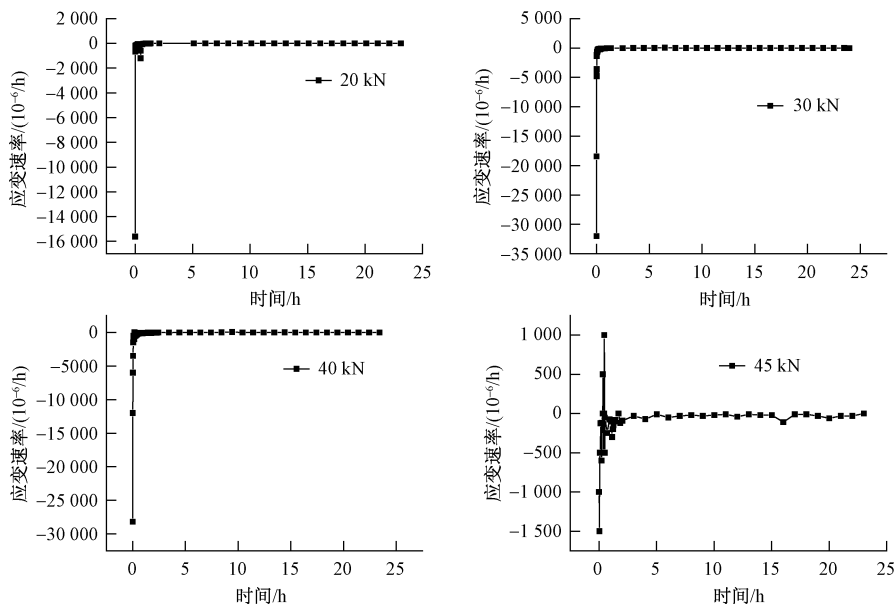


图5 LB-1中H-1测点流变速率曲线

Fig. 5 Rheological rate of H-1 of LB-1

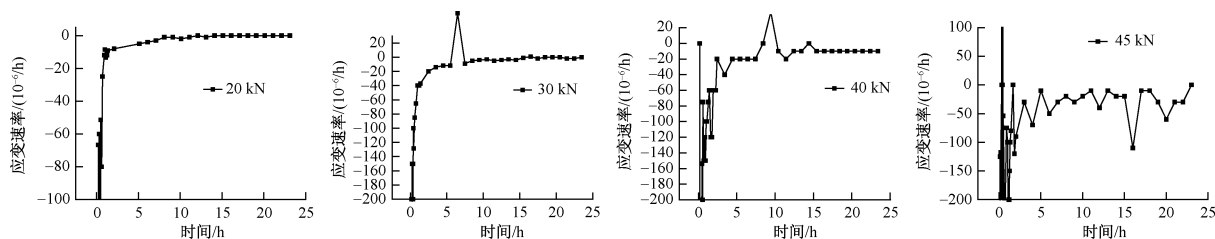


图6 LB-1中H-1测点去掉瞬时弹性应变后的流变速率曲线

Fig. 6 Rheological rate of H-1 of LB-1 with get rid of the instantaneous elastic strain

$\times 10^{-6}/\text{h}$ 。45 kN 荷载下,流变速率在 3 h 内由 $-500 \times 10^{-6}/\text{h}$ 下降到 $-30 \times 10^{-6}/\text{h}$,并且在这段时间内,应变速率有明显大小交替变换,曲线呈锯齿状,再经过 5 h 后,应变速率明显趋于一稳定值 $-15 \times 10^{-6}/\text{h}$,同时伴随着小幅度的变化。

LB-3, H-4 测点分级加载等级分别为 20, 30, 40 和 45 kN,其应变流变速率变化趋势同试件 LB-1 测点相似,流变速率在施加荷载后的一段时间内达到了相应的不为零的常值,由此可以判断,界面在经过一段时间以后均进入了等速流变阶段。

纵观分级荷载下应变速率的变化,可以得出以下认识,可以通过应变速率的变化来判断流变所处的状态,初始流变时,应变速率由大变小最后变为零值,稳定流变状态时,应变速率由大变小,最后趋于一个不为零的常值。值得指出的是,在稳定流变状态时,流变速率并不是一成不变的,可以多个常值,此常值的大小取决于施加的荷载和材料本身的强度特性。当流变速率

呈具有一定幅度变化的常值的状态时,将预示着下一个流变状态(加速流变)的即将到来。

2.4 加速流变特性分析

在 4 组试件 20 个测点中,其中 LB-1 中测点 H-1, LB-2 中测点 H-3, LB-3 中测点 H-4 均有发生加速流变状态,这里仅选择试件 LB-1 中的测点 H-1 和 LB-2 中的测点 H-3 来分析。在 LB-1 加载过程中,在 50 kN 的荷载水平下测点 H-1 发生了加速流变现象(图 7a)。在 LB-2 加载过程中,在 55 kN 的荷载水平下测点 H-3 发生加速流变现象(图 7b)。

由图 7 可知,加速流变时间较短, H-1 测点约为 0.5 h, H-3 测点约为 1 h,应变量分别为 $4\,000 \times 10^{-6}$ 和 $2\,000 \times 10^{-6}$ 。并且都是由等速流变状态向加速流变状态转变,并最终导致界面破坏。也就是说当界面发生加速蠕变以后,在一个很短的时间内,界面就将进入破坏,这对于工程加固是十分危险的,必须避免锚固系统界面处于加速流变状态。相对于 H-1 的加速流

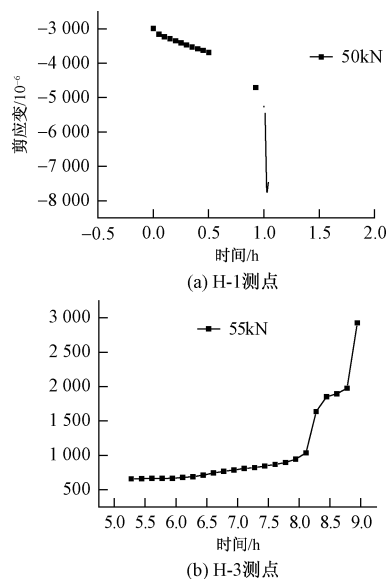


图7 不同荷载下不同测点应变曲线
Fig. 7 Strain isochronous of different test points at the different loads

变过程, H-3 中的加速流变过程中有很小一段等速流变过程, 此种现象可能是跟灌浆体材料本身的特性有关, 实验所用灌浆材料为砂浆, 是一种各向异性非均质的颗粒胶结体, 最突出的特点为在受到一段时间剪切作用时, 随颗粒之间的重新排列, 会发生剪胀现象, 从而提高了界面的抗剪强度, 导致界面有加速流变又返回到等速流变状态, 但随着流变的继续, 剪胀作用消失, 界面又会重新进入到加速流变状态。

图8为2个试件2个测点对应的应变速率曲线, 由应变速率的大小可以将曲线分2个部分, 第一部分流变速率保持不变, 对应等速流变阶段, 第二部分流变速率随时间变化很大, 对应加速流变阶段。相对于H-3加速流变中嵌套等速流变的现象, 在相应的流变速率曲线上也得到了很好的体现。由此可以从流变速率的曲线来判断界面流变所处的状态, 这对锚固系统长期稳定性的监测具有重要的意义。

3 结论

(1) 锚杆系统的破坏可归结为锚杆断裂、灌浆体与锚杆界面脱粘、灌浆体与机体界面脱粘、基体破坏四种类型, 其破坏形式主要取决于岩土体、灌浆体和锚杆的强度之比。

(2) 由界面试验数据结果显示, 界面流变随时间呈现变化趋势, 界面流变全过程包括初始流变、稳定流变和加速流变三个过程, 且在任意荷载水平下, 界面流

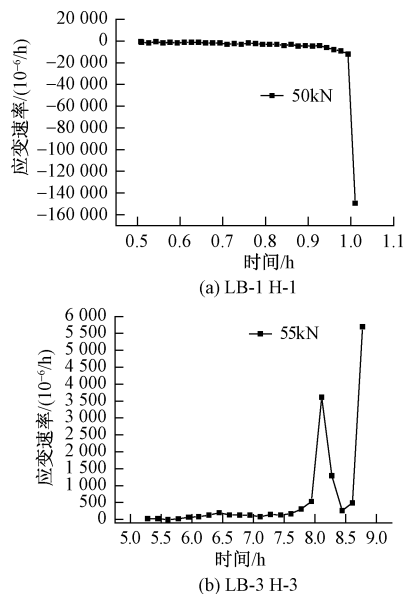


图8 不同测点流变速率曲线
Fig. 8 Rheological rate of different test points

变过程并非都要经历三个过程。尤其在荷载下流变可以不经稳定流变直接经历加速流变并破坏。

(3) 界面流变速率曲线与界面流变阶段映射, 不同阶段流变速率的曲线特征差异明显, 可以用流变速率来判断界面所处的流变状态, 从而判断锚固系统所处的流变阶段。

参考文献:

- [1] 程良奎, 范景伦, 韩军, 等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. [CHENG L K, FAN J L, HAN J, et al. Anchoring in Soil and Rock [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese)]
- [2] 伍国军, 褚以惇, 陈卫忠, 等. 地下工程锚固界面力学模型及其时效性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 237-243. [WU G J, CHU Y D, CHEN W Z, et al. Constitutive model of anchorage interface in underground engineering and its time-effect analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 28(3): 237-243. (in Chinese)]
- [3] 张发明, 刘宁, 陈祖煜, 等. 影响大吨位预应力长锚索锚固力损失的因素分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 194-197. [ZHANG F M, LIU N, CHEN Z Y, et al. Analysis of factors affected on load losses of high capacity and long rock anchors [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 194-197. (in Chinese)]
- [4] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展

- [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1081 - 1106. [SUN J. Rock Rheological Mechanics and its advance in Engineering applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1081 - 1106. (in Chinese)]
- [5] 伍国军, 陈卫忠. 岩石锚固界面剪切流变试验及模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 520 - 527. [WU G J, CHEN W Z. Shear creep experiments for anchore interface mechanics and nonlinear rheological model of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 520 - 527. (in Chinese)]
- [6] 庞正江, 胡建敏. 结构面剪切流变及其长期强度试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊2): 1179 - 1182. [PANG Z J, HU J M. Shear creep and long-term strength test research on unconformity plane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Sup 2): 1179 - 1182. (in Chinese)]
- [7] 徐景茂, 顾雷雨. 锚索内锚段注浆体与孔壁之间峰值抗剪强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3765 - 3769. [XU J M, GU L Y. Testing study on the peak shear strength between grout and bore wall in the interior bond section of prestressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3765 - 3769. (in Chinese)]
- [8] 朱焕春, 荣冠, 肖明, 等. 张拉荷载下全长粘结式锚杆工作机理试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 379 - 384. [ZHU H C, RONG G, XIAO M, *et al.* Testing study on working mechanism of full grouting bolt under tensile load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 21(3): 379 - 384. (in Chinese)]
- [9] 赵同彬, 尹延春, 谭云亮, 等. 锚杆界面力学试验及剪应力传递规律细观模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 220 - 224. [ZHAO T B, YIN Y CTAN Y L, *et al.* Mechanical test of bolt interface and microscopic simulation of transfer law for shear tress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 220 - 224. (in Chinese)]
- [10] 刘正, 高文华. 深部围岩流变特性试验研究及其模型辨识[J]. 水文地质工程地质 2012, 39(4): 43 - 48. [LIU Z, GAO W H. An experimental study of the creep properties of deep surrounding rocks and creep model identification[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 43 - 48. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞

(上接第 43 页)

- [12] 肖世国. 岩石高边坡开挖松弛区及加固支护结构研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003. [XIAO S G. Analysis on Relaxation Zone and Some Stabilizing Structures in High Rock Slope Projects [D]. Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)]
- [13] 黄润秋, 林峰, 陈德基, 等. 岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 227 - 232. [HUANG R Q, LIN F, CHEN D J, *et al.* Formation Mechanism of Unloading Fracture Zone of High Slopes and Its Engineering Behaviors [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 227 - 232. (in Chinese)]
- [14] 肖颖. 大渡河大岗山水电站左岸建基岩体开挖松弛深度综合分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. [XIAO Y. Comprehensive Analysis on the Relaxation Depth of Foundation Left Bank Rock Excavation of Dagangshan Hydropower Station on Dadu River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese)]
- [15] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998: 112 - 119. [YUAN W Z. Similarity Theory and the Statics Model Test [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998: 112 - 119. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞