

文章编号: 1007-2993(2023)04-0449-06

颗粒材料粘滑现象及其物理机制的试验研究

刘建生^{1,2} 熊文勇^{1,2} 邓翔浩^{1,2} 傅力³ 童立红³

(1. 江西省交通工程集团有限公司, 江西南昌 330028; 2. 江西省桥梁智能养护工程技术研究中心, 江西南昌 330028;
3. 华东交通大学土木建筑学院岩土工程研究所, 江西南昌 330013)

【摘要】 颗粒材料系统在剪切过程中存在应力突变的情况, 为了探究颗粒材料在剪切过程中的宏观力学响应与其细观参数的内在联系, 通过室内直剪试验, 研究了颗粒材料系统在受压剪作用下的粘滑(stick-slip)行为。将玻璃微珠作为颗粒材料进行了不同正应力下的直剪试验, 并引入速率摩擦模型(RSF)对试验结果进行了定量分析, 通过强度阶跃试验得到了速率摩擦模型相关参数。试验结果表明: (1) 不同正应力下的粘滑曲线变化趋势基本相同, 并呈现周期性的规律, 但粘滑导致的应力降和周期随正应力的减小而减小; (2) 在施加的压力范围内, 通过计算得到其刚度比 κ 均小于 1, 且 κ 随正应力的增大而减小, 这说明该颗粒材料满足失稳判据, 试验现象与理论预测相符。成果为研究地震发生机理提供了思路, 据此可推测断层的粘滑失稳及地震发生是由于断层面的滑移速度瞬时改变引起的, κ 值越小其峰值粘滑速率越大, 同时产生的应力降和粘滑周期越大。

【关键词】 颗粒材料粘滑现象; 直剪试验; 速率状态摩擦模型; 失稳破坏模式

【中图分类号】 TU 43

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.04.013

Experimental Study on the Stick-slip Phenomenon in Granular Materials and Its Physical Mechanism

Liu Jiansheng^{1,2} Xiong Wenyong^{1,2} Deng Xianghao^{1,2} Fu Li³ Tong Lihong³

(1. Jiangxi Transportation Engineering Group Co., Ltd., Nanchang 330028, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Intelligent Maintenance Engineering Technology Research Center of Bridge, Nanchang 330028, Jiangxi, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

【Abstract】 In order to explore the internal relationship between the macro mechanical response of granular materials in the shear process and their micro parameters, the stick-slip behavior of granular materials under compression and shear was studied through indoor direct shear test. Glass beads were used as granular materials to conduct direct shear test under different normal stresses, and the rate state friction model (RSF) was introduced to quantitatively analyze the test results, and the relevant parameters of the rate state friction model were obtained through the strength step test. The experimental results show that: (1) the variation trend of the stick-slip curve under different normal stresses is basically the same and shows a periodic pattern, but the stress drop and period caused by stick-slip decrease with the decrease of normal stress; (2) within the applied pressure range, the stiffness ratio κ is calculated to be less than 1, and κ decreases with the increase of normal stress. This indicates that the granular material meets the instability criterion, and the experimental phenomenon is consistent with theoretical predictions. This provides ideas for studying the mechanism of earthquake occurrence, and based on this, it can be inferred that the stick-slip instability of faults and the cause of earthquakes are caused by the instantaneous change of slip velocity at the fault plane. The smaller the κ value, the greater the peak stick-slip rate, and the greater the stress drop and stick-slip period generated.

【Key words】 particle stick-slip phenomenon; direct shear test; rate state friction model; instable destruction mode

0 引言

颗粒材料在工程中应用广泛, 涉及到农业、化工、

土木建筑等行业, 其宏观力学性质受到颗粒材料自身细观参数及系统组构的影响。颗粒材料具有各向异

基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(2021H0004); 江西省教育厅课题(GJJ210618); 江西省科技合作专项项目(20212BDH81034)

作者简介: 刘建生, 男, 1977 年生, 汉族, 江西萍乡人, 大学本科, 高级工程师, 从事公路工程管理。E-mail: 724641276@qq.com

通讯作者: 童立红, 男, 1988 年生, 汉族, 安徽淮南人, 博士, 教授, 从事土动力学相关研究。E-mail: lhtong@ecjtu.edu.cn

性、剪胀性等,不同于固体、流体和气体的特殊性质^[1-3],目前针对颗粒材料的研究主要是通过室内实验和离散元数值模拟。

Yang等^[4]通过研究颗粒形状与临界状态的关系,提出了一种新的形状指数,证明了改变颗粒形状可以改变整体响应及应力空间的临界状态。Fu等^[5]利用离散元方法对颗粒剪切强度、剪切带状和剪切诱导各向异性进行研究,阐明了颗粒细观结构与材料变形破坏之间的联系。Tournat等^[6]采用高频剪切声脉冲探测了三维颗粒介质中接触力的分布。Nasuno等^[7]通过观察颗粒材料在滑移前的微观重排,认为颗粒重新排列会导致蠕变发生,并使得应力增大、能量累积,当接近滑移时,重排频率会显著增加。Dalton等^[8]将颗粒材料试样上部设置一块可以旋转的环形板用以施加剪切荷载,通过试验发现,在粘滑事件发生前后,可以监测到大量的声发射(AE)信号。

成熟断层的显著特征之一是在其断层面上分布有碎散颗粒物质。颗粒材料的压剪力学响应对理解粘滑效应起着关键性作用,越来越多的学者利用具有粘滑特性的剪切颗粒层研究颗粒材料对剪切力的响应情况,并得以在空间和时间维度上分析颗粒系统的力学行为^[9-10]。Ferdowsi等^[11]用三维离散元方法模拟了颗粒材料在剪切过程中的粘滑特性,结果表明微滑移与滑动接触数量的增加以及颗粒层动能的增加有关。Gao等^[12-13]首次利用有限离散单元法(FDEM)显式地模拟了剪切颗粒断层系统的动力学行为,结果表明随着载荷的增加,断层颗粒系统的动能增大;并通过建立地层声发射与速度偶极子场之间的联系,得到了断层活动与远离断层的地层活动的关系。

本文对不同围压下的颗粒材料进行了一系列的室内剪切试验,得到了全阶段颗粒材料粘滑曲线,并对试验结果进行分析,得到粘滑周期、滑动速度、应力降大小等随压力的关系。最后,基于速率-状态摩擦定律(RSF)^[14-15],对颗粒粘滑现象进行了理论阐释,找到了应力降与颗粒粘滑的内在关联。而具有粘滑特性的剪切颗粒层被广泛地应用于研究地震发生的物理和动力学机理研究,这一理论参考为研究地震发生机理提供了思路:以颗粒介质在压剪作用下的力学响应模拟地震发生过程。

1 速率摩擦定律

定量分析岩石摩擦试验中获得的力学数据通常使用Dieterich^[14]和Ruina^[15-16]提出的速率-状态摩擦定律(以下简称RSF定律)。Dieterich^[14]认为摩擦强度是随摩擦速率和接触状态而改变的,并且速率影响

主要体现在对真实滑动接触面积的影响。当速度增大时,稳态时接触面积也增大,出现速度强化;反之接触面积减小,出现速度弱化,其数学模型为^[15,17]:

$$\mu = \mu_0 + a \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) + b \ln\left(\frac{v_0 \theta}{D_c}\right) \quad (1)$$

式中: μ 为瞬时摩擦系数; μ_0 为在参考速度 v_0 下的参考摩擦系数; v 为瞬时滑动速度; a 为反映直接效应大小的系数; b 反映了与演化效应相关的应力降的大小; D_c 为状态演化的特征滑移距离; θ 是滑动面的(微)物理状态变量。

当滑动面速度由 v_0 突变至 v 时, θ 将向着稳定状态演化: $\theta_s = D_c/v$ 。 $a-b$ 是通过测量滑动速度由 v_0 变化到 v ,稳定状态下摩擦的变化而确定的。在稳定阶段有 $v\theta/D_c = 1$,则式(1)变为:

$$\mu = \mu_0 + (a-b) \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (2)$$

因此可以得到 $a-b$ 的关系式:

$$a-b = \frac{\Delta\mu_{ss}}{\ln(v/v_0)} \quad (3)$$

式中: $\Delta\mu_{ss}$ 为速度改变前后摩擦系数的变化量。 $a-b$ 为正值时,表示该摩擦系统属于速度强化型,即系统滑动速度增大,其摩擦强度随之增大,最终系统会趋于稳定; $a-b$ 为负值时,表示该摩擦系统属于速度弱化型,这可能是颗粒粘滑失稳的必要条件^[15]。

Ruina等^[15-16]证明滑移失稳判据应从力平衡出发,若试样剪切滑移失稳破坏,则要求加载系统的弹性刚度 k (剪应力/位移)必须小于临界刚度 k_c 。在速率摩擦模型(RSF)^[15]的框架下,失稳判据可写为:

$$k < k_c = \frac{(b-a)\sigma'_n}{D_c} \quad (4)$$

式中: σ'_n 为有效正应力; $b-a$ 为RSF参数,并且 $b-a > 0$ 。

本研究用玻璃微珠代替砂土作为剪切材料进行室内直剪试验,测定其RSF参数并探究颗粒粘滑行为,试图从理论上揭示颗粒粘滑发生的物理机制,为探究颗粒材料宏观力学特性与细观变形机制理论研究提供思路。

2 小尺度颗粒直剪试验研究

2.1 试样与试验仪器

为了探究颗粒材料的粘滑现象,采用颗粒较为均匀的球形玻璃珠材料模拟颗粒材料系统(玻璃微珠主要成分为 SiO_2)。直剪仪采用的是电动控制式,主要由电子控制仪表盘、剪切盒、垂直加荷构件、剪切

力施加构件和百分表等组成,如图 1 所示。剪切盒尺寸为内径 61.8 mm,高 20 mm,有效剪切面积 30 cm²。垂向荷载通过施加的砝码质量控制,剪切力大小可通过百分表读取。试验时,向剪切盒内定量倒入 100 g 颗粒材料,为了保证应力的均匀,在试验材料上部加装一块平整透水石,再施加法向荷载。试验开始前,先让试样在所加载的应力作用下静置 15 min,保证颗粒系统充分重排并进入平衡状态。

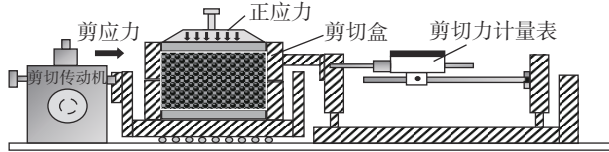


图 1 试验仪器示意图

2.2 强度阶跃试验

通过强度阶跃试验测定(RSF)参数 $(b-a)$ 和 D_c [15,18]。在颗粒材料系统达到稳定滑动摩擦状态时,通过改变滑移速率,记录系统摩擦系数的阶跃状态。通过试验发现,颗粒材料系统在有效正应力为 0.05 MPa 的条件下可以达到相对稳定滑动状态。因此设置初始剪切速率为 2 $\mu\text{m/s}$,并施加 0.05 MPa 的正应力,当摩擦系数到达稳定后,将剪切速率瞬间提升至 10 $\mu\text{m/s}$,记录摩擦系数 μ 随剪切位移的变化情况,具体试验结果如图 2 所示。由试验结果可知,当颗粒系统在剪切速度 $v_1=2 \mu\text{m/s}$ 时达到稳定滑动状态 AB 阶段后,将速率瞬间增大至 $v_2=10 \mu\text{m/s}$ 时,由于滑动面的状态发生改变(颗粒间的接触状态改变),其摩擦系数发生阶跃,立刻由 B 点的稳定状态下降到 C 点,其值瞬间降低了 $\Delta\mu_1$,并且此后随滑移距离的增大,摩擦系数也逐渐增大,以近似线性提升的形式增大至 D 点,最终达到新的稳定滑动状态 DE 阶段,但这个稳态值相较前一阶段更小。可以得到 $\Delta\mu_{ss} = \Delta\mu_2 - \Delta\mu_1 = -0.0202$, 因此 $a-b = \Delta\mu_{ss} / \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = -0.0126$, 即 $b-a = 0.0126$ 。由此可判断该颗粒系统属于速度弱化型,即速率的增大会弱化系统强度。特征距离 D_c 是在速度阶跃后,摩擦系数重新演化到距稳态值为 $\Delta\mu_2/e$ 时所经历的滑移 [19], e 为自然指数,如图 2 所示,通过计算可得 $D_c = 26.3 \mu\text{m}$ 。

2.3 颗粒粘滑现象

为深入研究颗粒粘滑现象的运动规律,并探寻其物理机制,采用平均粒径为 0.3 mm 的玻璃微珠作为剪切试样,进行了不同正应力下的小尺度室内剪切试验。试验设置剪切速率为 $v=20 \mu\text{m/s}$,所施加的各个正应力分别为 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa、0.4

MPa 和 0.6 MPa,试验结果如图 3 所示。

由图 3 的粘滑曲线可以看出,不同正应力下的粘滑曲线变化趋势基本相同。在剪切初期,即发生粘滑现象之前,剪应力随剪切位移的增大而增大(系统能量积累过程),但应力-位移曲线斜率逐渐变小,表明所研究的颗粒材料系统在产生粘滑之前也并非完全遵循莫尔-库仑强度理论。当剪切位移继续增大,剪切面的强度不足以提供继续增长的剪应力时,颗粒材料试样发生第一次粘滑失稳,与此同时剪应力突然减小,伴随着剪切面明显的错动。此后,剪应力随剪切位移增大继续增大,但增加更为迅速,并且会增加到较前一阶段更高的强度,然后再一次发生粘滑。随后粘滑现象一直循环往复发生并出现周期性的规律,这与 Leeman 等 [18] 的发现一致。后续的粘滑失稳后再次达到的峰值强度也逐步维持在一个较为稳定的值。在这里如果不考虑失稳导致的应力降,将每个失稳前的峰值用平滑曲线连接,如图 4 所示,可以得到与童立红等 [20] 相类似的试验结果,即在试验初期剪应力随剪切位移逐渐增大,增大到一定程度后达到峰

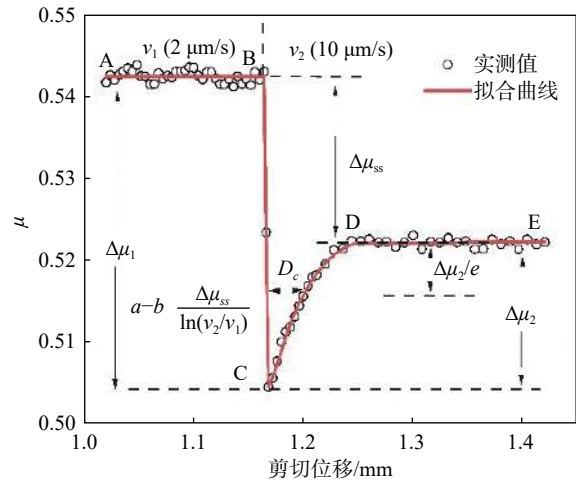


图 2 稳态摩擦系数随速度从 2 $\mu\text{m/s}$ 变为 10 $\mu\text{m/s}$ 的响应情况

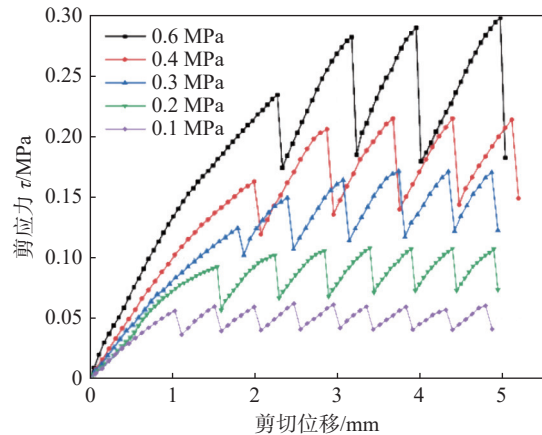


图 3 颗粒材料粘滑状态曲线

值极限并保持稳定。由于童立红等^[20]所采用的颗粒粒径为 0.15 mm,且应力应变曲线未出现明显的粘滑特性,本研究颗粒尺寸为 0.3 mm,控制其余条件保持不变,得到了具有粘滑现象的应力应变曲线,因此认为颗粒平均粒径对颗粒强度发展起至关重要的作用^[21],在此不做论述。另外,随着正应力的增大,材料试样发生首次粘滑所需位移增大,说明剪切面法向应力的增大会在一定程度上增大颗粒材料的韧性,使其能够承受更高的剪切位移。和预期相同的是,当法向应力增加,首次粘滑失稳对应的强度将增大。

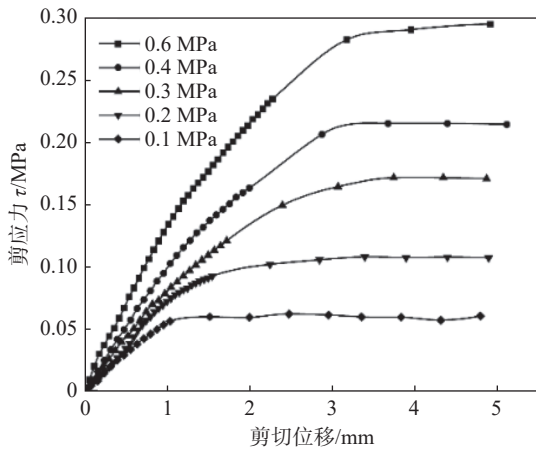


图4 将每个失稳前的峰值用平滑曲线连接得到的应力-位移曲线

进一步分析粘滑现象发生的周期可以发现,法向应力越大,发生粘滑失稳的周期越长且应力降的幅度更大,如图5和图6所示。图5为平均应力降与正应力的关系,随着正应力的增大,发生粘滑现象时对应的应力降几乎呈线性增加。图6为粘滑平均滑移周期与正应力的关系,随着正应力的增大,发生粘滑的周期也随着增大,即相同时间内发生粘滑的次数减少。以上结果表明:增大正应力会改变颗粒剪切面的接触状态,粘滑曲线由相对平稳状态变为波动较大的不稳定态,并且其粘滑周期变长。在剪切初期,发生粘滑所需要的剪应力是逐渐增大的,剪切摩擦强度逐渐增强,在几个周期后逐步达到峰值,与此同时导致应力降的增大。这意味着粘滑现象一方面可以增大颗粒剪切面的峰值摩擦强度,另一方面使粘滑失稳发生时的应力降增大,弹性势能释放增加。

2.4 试验结果分析

为了研究粘滑事件的力学特性,测量了弹性加载刚度 k 和临界刚度 k_c ,以验证粘滑失稳现象是否满足理论要求。通过强度阶跃试验,得到了该颗粒材料的(RSF)参数 $b-a=0.0126$ 以及 $D_c=26.3\ \mu\text{m}$,因此可以通过式(4)直接计算出各个正应力下的系统临界

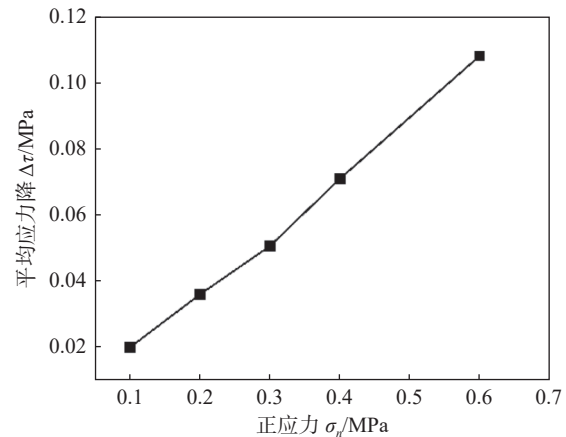


图5 平均应力降与正应力关系曲线

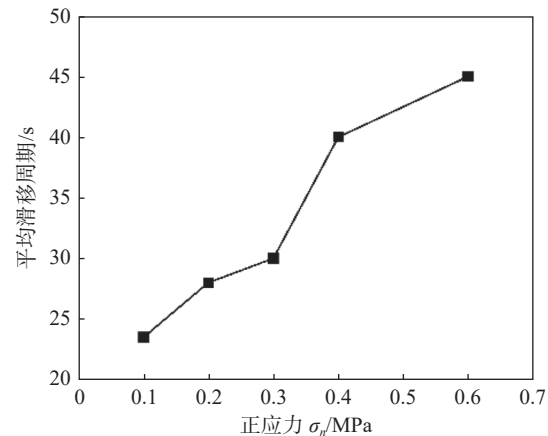


图6 粘滑平均滑移周期与正应力关系曲线

刚度 k_c 。另外可以直接从粘滑事件的加载曲线(见图3)量测粘滑曲线的斜率即可得到弹性加载刚度 k 。这里定义刚度比 $\kappa=k/k_c$ ^[16],用来判断颗粒试样是否稳定。若 $\kappa < 1$ 表示试样粘滑破坏, $\kappa > 1$ 表示试样将保持稳定滑动。图7为刚度比 κ 与正应力关系曲线。结果表明,在试验施加的压力范围内,其刚度比 κ 均小于1,这表示着该材料满足式(4)给出的失稳判据,因此试验现象与理论预测一致^[16]。图8、图9分别为刚度比 κ 与应力降以及滑移周期的关系曲线。随着 κ 的增加,应力降减小,滑移周期减小,即粘滑事件发生频率增加。随着向稳定阈值靠近,即 κ 值趋近于1时,系统趋于稳定,振幅减小,累积和释放的应变能减小。另外,随着正应力的增大, κ 逐渐减小,当正应力为0.6 MPa时, κ 值接近0.4,通过对比图3与图7发现,刚度比 κ 越小,粘滑现象愈发明显,即表明法向应力的越大,粘滑破坏越明显。

具有粘滑特性的剪切颗粒层被广泛地应用于研究地震发生的物理和动力理研究,以颗粒介质在压剪作用下的力学响应可以模拟断层粘滑失稳和地震发生过程。

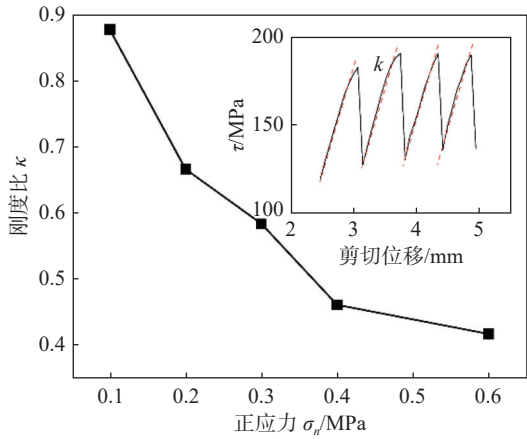


图7 刚度比 κ 与正应力关系曲线,插图是通过剪应力-位移图(黑线)与线性拟合曲线(红色虚线)以获取 κ 值

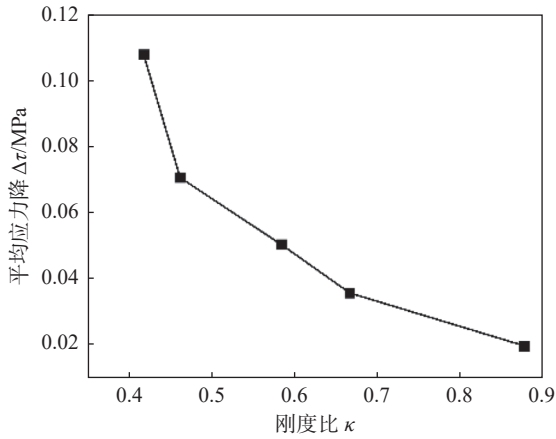


图8 刚度比 κ 与应力降关系曲线

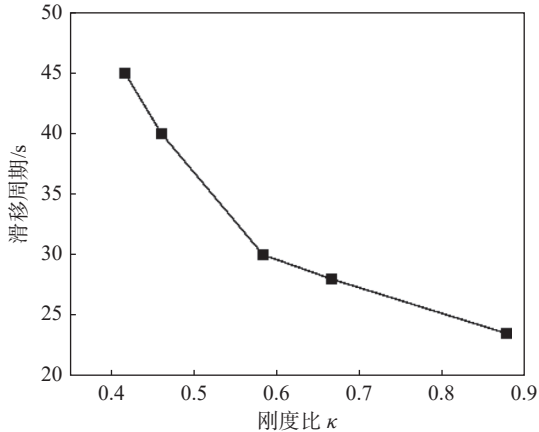


图9 刚度比 κ 与滑移周期关系曲线

导致断层失稳从而产生应力降的原因有待进一步分析,断层系统在地震周期的间歇期累积应变能的过程正类似于剪切颗粒断层在粘滑周期里的“粘”这一阶段^[22-23],而地震的发生则对应于“滑”这一阶段。参考图2的强度阶跃试验,断层的失稳可能是由于断层面的滑移速度瞬时改变引起的。若断层材料系统属于速度弱化系统,当滑移速度增大时,系统强度会降低。求解峰值滑移速率 v_s 时,可以先通过图3

计算不同刚度比时的摩擦系数阶跃值(如图10插图所示应力为0.6 MPa时的摩擦系数阶跃值 $\Delta\mu$,对应刚度比接近0.4);在已知初始剪切速率和(RSF)参数的前提下,则可利用式(3)计算各个应力状态下粘滑事件发生时,其瞬态滑移速率。图10为粘滑发生时的峰值滑移速率与刚度比关系曲线。计算结果表明:断层发生粘滑时的滑移速率为加载速率的上百倍甚至千倍,随着刚度比 κ 的减小即正应力增大,滑移速率增大,特别是以刚度比 $\kappa=0.6$ 作为分界,大于0.6时,滑移速率很小并且变化幅度不大,引起的强度变化较小,这类慢滑现象类似于地质环境中断层发生的慢震(Slow Earthquakes)。然而在小于0.6的范围内随着 κ 减小,其峰值滑移速率 v_s 陡增,从而导致断层快速滑动,强度显著降低,累积的能量短时间内得到释放。随后强度随着滑移逐渐增加,应力积累达到一定程度后再次发生快速滑动。

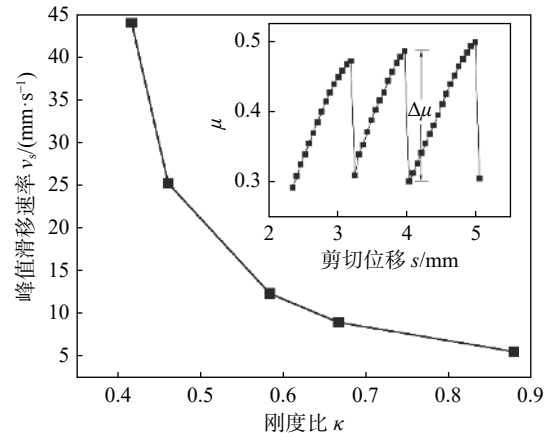


图10 峰值滑移速率与刚度比 κ 的关系,插图是摩擦系数 μ 与剪切位移关系图

3 结论

为了探究颗粒材料粘滑失稳特性,阐释粘滑现象的普遍性及其规律性,以颗粒材料进行室内直剪试验,得出结论如下:

(1)通过强度阶跃试验测量(RSF)参数的具体数值, $b-a=0.0126$,并据此判断所用的颗粒材料系统为速度弱化型。

(2)建立了刚度比 κ 与有效正应力的关系,结果表明,随着正应力的增大,其刚度比减小,其对应的粘滑周期变长。

(3)再次验证了导致粘滑的关键因素: k_c 必须保持足够小,不能远超过断层刚度 k ,即要保证刚度比 κ 接近于1。同时,可以利用刚度比 κ 来找到与颗粒滑移的大小、周期等之间的联系,即颗粒材料粘滑失稳破坏模式。以刚度比 $\kappa=0.6$ 作为分界,当 $\kappa>0.6$ 时,

滑移速率相对较小并且变化幅度不大,引起的强度变化较小;而 $\kappa < 0.6$ 时,随着 κ 减小,其滑移速率陡增并伴随强度显著降低。随着 κ 的增加,滑移周期减小,即粘滑事件发生频率增加。

(4)这一理论参考为研究断层破坏行为模式提供了依据,断层发生地震时的粘滑现象,认为导致断层失稳破坏的物理机理本质上是当断层能量累积达到一定程度后,滑动速度瞬时增大而引起强度骤减,从而发生失稳破坏。

参 考 文 献

- [1] HANOTIN C, KIESGEN D R S, MARCHAL P, et al. Vibration-induced liquefaction of granular suspensions[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(19): 198301.
- [2] KOU B, CAO Y, LI J, et al. Granular materials flow like complex fluids[J]. *Nature*, 2017, 551(7680): 360-363.
- [3] NGUYEN V B, DARNIGE T, BRUAND A, et al. Creep and fluidity of a real granular packing near jamming[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(13): 138303.
- [4] YANG J, LUO X D. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2015, 84: 196-213.
- [5] FU R, HU X, YANG B, et al. An insight into the meso-scale topological structure nature of granular materials subjected to quasi-static shearing[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 137: 104257.
- [6] TOURNAT V, ZAITSEV V, GUSEV V, et al. Probing weak forces in granular media through nonlinear dynamic dilatancy: clapping contacts and polarization anisotropy[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(8): 085502.
- [7] NASUNO S, KUDROLLI A, GOLLUB J P. Friction in granular layers: hysteresis and precursors[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 79(5): 949-952.
- [8] DALTON F, CORCORAN D. Earthquake behaviour and large-event predictability in a sheared granular stick-slip system[J]. *ArXiv Preprint Physics*, 2002: 0211060.
- [9] DE ARCANGELIS L, CIAMARRA M P, LIPPIELLO E, et al. In micromechanics and statistics of slipping events in a granular seismic fault model[C]. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2011.
- [10] 王怡舒, 刘斯宏, 沈超敏, 等. 接触摩擦对颗粒材料宏观细观力学特征和能量演变规律的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(2): 412-422.
- [11] FERDOWSI B, GRIFFA M, GUYER R, et al. Microslips as precursors of large slip events in the stick - slip dynamics of sheared granular layers: A discrete element model analysis[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(16): 4194-4198.
- [12] GAO K, EUSER B J, ROUGIER E, et al. Modeling of stick-slip behavior in sheared granular fault gouge using the combined finite-discrete element method[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(7): 5774-5792.
- [13] GAO K, GUYER R, ROUGIER E, et al. From stress chains to acoustic emission[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(4): 048003.
- [14] DIETERICH J H. Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip[J]. *Rock Friction and Earthquake Prediction*, 1978: 790-806.
- [15] RUINA A. Slip instability and state variable friction laws[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, 88(B12): 10359-10370.
- [16] GU JC, RICE J R, RUINA A L, et al. Slip motion and stability of a single degree of freedom elastic system with rate and state dependent friction[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1984, 32(3): 167-196.
- [17] KILGORE B D, BLANPIED M L, DIETERICH J H. Velocity dependent friction of granite over a wide range of conditions[J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(10): 903-906.
- [18] LEEMAN J, SAFFER D, SCUDERI M, et al. Laboratory observations of slow earthquakes and the spectrum of tectonic fault slip modes[J]. *Nature communications*, 2016, 7(1): 11104.
- [19] SCUDERI M, MARONE C, TINTI E, et al. Precursory changes in seismic velocity for the spectrum of earthquake failure modes[J]. *Nature geoscience*, 2016, 9(9): 695-700.
- [20] 童立红, 温斌强, 徐长节, 等. 基于率态模型的颗粒材料剪切强度理论[J]. *中国科学:技术科学*, 2022, 52(3): 489-498.
- [21] 朱 遥, 刘 春, 刘 辉, 等. 颗粒形态对砂土抗剪强度影响的试验和离散元数值模拟[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(3): 490-499.
- [22] BRACE W F, BYERLEE J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes[J]. *Science*, 1996, 153(3739): 990-992.
- [23] JOHNSON T, WU F T, SCHOLZ C H. Source parameters for stick-slip and for earthquakes[J]. *Science*, 1973, 179(4070): 278-280.