Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220409001

颗粒材料在三轴试验中滞滑现象的研究*

陈 波1,李永强1,2,3,刘旭锋1,周仰新1,许 言1

(1. 东华理工大学土木与建筑工程学院,江西南昌 330013; 2. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重 点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 南昌市应急管理局,江西南昌 330038)

摘要:球形玻璃砂和不锈钢珠是两种典型的颗粒材料,采用这两种材料进行不同围压下的常规三轴排水和不排水 试验,研究颗粒材料在三轴试验中的滞滑现象。研究工作表明,两种材料在三轴排水试验中都存在明显的滞滑现 象,围压大小会直接影响滞滑时应力值跌落的幅度,但两种材料在滞滑中的表现却有明显不同,并且玻璃砂样中的 滞滑现象随着玻璃砂样的重复使用而减弱至基本消失,表明玻璃砂试样的制备历史对其滞滑现象的发展具有重要 影响。玻璃砂和钢珠不同的表面特征是影响两种材料滞滑现象差异性的一个重要因素。重复使用的玻璃砂颗粒 表面特征会发生明显改变,这是其滞滑现象逐渐减弱的重要原因。试验结果对玻璃砂和钢珠等颗粒材料滞滑现象 发生机制的深入研究提供一定参考,为滞滑演变规律的微观机制探究提供思考方向。

关键词:颗粒体系;滞滑现象;离散材料;三轴试验 中图分类号:TU43 文献标识码:A 文章编号:1672-2132(2023)03-0568-08

Study on Stick-slip Behaviour of Granular Materials in Triaxial Test

CHEN Bo¹, LI Yongqiang^{1,2,3}, LIU Xufeng¹, ZHOU Yangxin¹, XU Yan¹

School of Civil and Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
 Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;
 Nanchang Emergency Management Bureau, Nanchang 330038, China)

Abstract: Spherical glass sand and stainless-steel beads are two typical granular materials. These two materials are used for conventional drained triaxial compression tests and undrained triaxial compression tests under different confining pressures to examine the stick-slip behavior of granular materials during triaxial tests. The research work shows that both materials exhibit obvious stick-slip behavior in drained triaxial compression tests, and the confining pressure directly affects the amplitude of stress drop during stick-slip behavior. However, the two materials demonstrate noticeable differences in their stick-slip behavior. Moreover, repeated drying of the glass sand sample significantly reduces or even eliminates the stick-slip behavior. The results show that the preparation history of glass sand samples has an important influence on the development of the stick-slip behavior. The different surface

^{*} 收稿日期:2022-04-09;修回日期:2022-06-07

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(LH2019E095)、国家自然科学基金项目(52068002)、江西省"双千计划"项目(JX-SQ2020101041)、江西省自然科学基金项目(20202BABL204064)、中国地震局工程力学研究所基本科研业务 费专项资助项目(2019C06)资助

作者简介:陈波(1995—),男,硕士研究生。主要从事土体各向异性及其数值模拟方面的研究。E-mail: anti7321@126.com 通讯作者:李永强(1983—),男,副研究员,硕导,博士。主要从事岩土地震工程与波动数值模拟等方面的研究。 E-mail: lyqiem@163.com

characteristics of glass sand and steel beads are important factors contributing to the dissimilar stickslip behaviors between the two materials. The surface characteristics of reused glass sand particles change obviously, which is an important reason for the gradual weakening of its stick-slip behavior. The test results provide valuable insights for a deeper understanding of the stick-slip behavior in granular materials such as glass sand and steel beads. In addition, they provide potential directions for exploring the micro-mechanism of stick-slip evolution.

Keywords: granular system; stick-slip behavior; discrete material; triaxial test.

0 引 言

颗粒物质广泛存在于自然界和日常生活中,但 由于颗粒物质的离散性导致表现出一些独特特性, 如粮仓效应、挤压膨胀现象等^[1],人们对颗粒物质的 认识也不如常规固体物质那样深入和深刻。对颗 粒固体进行深入研究有利于人们对地震、山体滑坡 等自然灾害形成机制的理解,从理论上,这些灾害 都和岩土这类颗粒物质体系中力的急剧变化相关, 表现出突发性的特点,所以对颗粒固体颗粒体系展 开系列研究对防灾减灾有重要意义^[2]。

砂土作为一种粗粒土是比较典型的岩土类颗 粒散体材料,其宏观力学行为比较复杂[3]。现如今 采用颗粒材料模拟研究粗粒土的力学性质是一种 比较可行的方法,国内外也有相关研究者开展了一 些试验研究和机理分析。孔德志等[4]用不同粒径的 钢珠模拟堆石料进行常规三轴排水试验,该试验结 果反映了颗粒之间滑移对试样强度的影响,钢珠模 拟料表现出明显的剪胀性,并且应力一应变曲线在 试验后期表现出较大波动,其波动程度与围压的高 低密切相关,围压越高波动也越大。张祺等55采用 玻璃珠进行直剪实验,探究了颗粒粒径以及直剪盒 纵横比对实验结果的影响。Y.M.Jiang等^[6]用颗粒 固体流体动力学理论研究不同剪切速率对颗粒体 系力学特性的影响。T.Doanh等^[7]采用玻璃珠进行 三轴试验,研究了三轴排水条件下的滞滑现象以及 不同应变率对滞滑的影响。董启朋等[8]采用钢珠和 玻璃珠两种颗粒材料进行常规三轴试验,从围压、 粒径、孔隙比等几方面研究其对粗粒土强度和变形 特性的影响,并指出当试验仪器直径与试样颗粒最 大直径之比较小时,应力一应变曲线会有明显波 动。应力一应变曲线中出现锯齿状波动的现象可 称之为滞滑现象。可以发现在使用玻璃珠等散体 材料进行室内模型试验时,容易发生滞滑现象。目

前国内较少对滞滑现象进行系统的试验研究,滞滑现象的发生机制、演变规律等还有待进一步研究。

滞滑现象在地震学中是一个常见概念,人们也 常将滞滑与地震的发生机理相联系,本研究中的滞 滑是指应力一应变曲线中不断跌落和抬升的波动现 象。在用球形玻璃砂和不锈钢珠进行三轴试验过程 中,出现了明显滞滑现象,并且在玻璃砂样中,随着 材料的反复使用其滞滑现象逐渐消失,遂对这一奇 特现象进行了初步研究。研究成果可为球形玻璃砂 和不锈钢珠中滞滑现象的深入研究提供参考。

1 室内三轴试验

1.1 试验材料

试验采用球形玻璃砂和球形不锈钢珠两种材 料作为试验土样。球形玻璃砂和钢珠在制样、饱和 及固结等各环节更容易保持稳定,试样参数也更容 易保持一致^[9]。两种材料都为单一粒径,成圆率都 比较高,不锈钢珠的最大干密度(ρ_{dmax})、最小干密度 (ρ_{dmin})分别为5.098 g/cm³和4.762 g/cm³。两种材料 的具体参数见表1,图1为材料样品。

表 1 基本材料参数 Table 1 Basic material parameters

	•			
材料	始次/******	$ ho_{ m dmax}/$	$ ho_{ m dmin}/$	相对
名称	检徑/㎜	$(g \cdot cm^{-3})$	$(g \cdot cm^{-3})$	密度
玻璃砂	1.000	1.606	1.479	2.508
不锈钢珠	1.000	5.098	4.762	7.930



Fig.1 Glass sand and stainless steel bead samples

1.2 试样的制备与饱和

试验仪器采用应力路径三轴仪,可进行常规的 不固结不排水(UU)、固结排水(CD)和固结不排水 (CU)三轴试验。试验所制备试样为圆柱状,直径 为39.1 mm,高度为80 mm。

试样制备采用烘干后的玻璃砂和钢珠进行干 装制样,试验土样可重复利用,即在恒温鼓风干燥 箱烘干后可再次进行试验。烘干条件采用土工试 验方法标准(GB/T 50123—2019)¹⁰⁰中要求,每次烘 干温度控制在106~108℃,恒温烘干8~9h。装样 时根据设计好的密度称出相应质量的烘干样,将其 均分为4份,分层装入套有橡胶膜的对开装样筒中, 相对密实度控制在60%左右。该对开装样筒中, 相对密实度控制在60%左右。该对开装样筒为一 种可高度复现的装样装置,其装置图和试样初始应 力状态以及密实度控制效果参见文献[9]。干样在 10kPa负压作用下保持直立,随后往压力室注入脱 气水,并施加10kPa围压,撤掉10kPa负压后将围 压调至20kPa使试样完全成型。

制作饱和试样时,为提高其饱和度,从试样底 部通入二氧化碳以置换其内部空气,通入压力在 5 kPa左右, 通入时间控制为 30 min, 以保证试样内 部绝大多数空气被二氧化碳置换。而后从试样底 部通入超过试样体积数倍的脱气水,通水时间约为 1.5~2h,以充分排出通入的二氧化碳。再分级施加 反压进行饱和,少量未被排出的二氧化碳在反压作 用下将会溶于脱气水,最后一级反压饱和时间不少 于30 min。通过以上饱和方法,试样所测B值均在 0.96及以上。实际上,施加在试样中的反压具有明 确物理意义,它代表初始静孔隙水压力,并且土体 的初始静孔隙水压力随水深而改变,即施加的反压 是反映不同水深的初始静水压力^[11]。在剪胀性土 体中,反压的大小会影响CU试验结果,但对CD试 验影响不大[12],本试验中每个试样的反压の保持一 致,剪切前都为215 kPa。

1.3 试验设计

采用不同烘干批次的玻璃砂样进行固结排水 剪试验,而后采用多次烘干样进行固结不排水剪试 验,并采用同一烘干批次的不锈钢珠进行一组相同 试验条件的CD和CU试验,与玻璃砂样结果进行对 比。试样的有效围压考虑50、100、200、300 kPa四 种情况。各试样的具体试验条件见表2。

表 2 CD 试验工况 Table 2 Conditions of the consolidated drainage tests

试样编号	烘干样编号	反压 $\sigma_{\rm b}/{\rm kPa}$	围压 σ_3/kPa
B - 1	HG-1	215	265
B-2	HG-2	215	265
B-3	${ m HG}\!=\!14$	215	265
B-4	${ m HG}-15$	215	265
B - 5	HG-1	215	315
B-6	HG-2	215	315
B-7	$\mathrm{HG}-14$	215	315
B-8	${ m HG}-15$	215	315
В-9	HG-1	215	415
B - 10	HG-2	215	415
B - 11	${ m HG}\!=\!14$	215	415
B - 12	${ m HG}-15$	215	415
B - 13	HG-1	215	515
B - 14	HG-2	215	515
B - 15	$\mathrm{HG}-14$	215	515
B-16	$\mathrm{HG}-14$	215	515
B - 17	$\mathrm{HG}-15$	215	515
$G\!-\!1$	HGY-1	215	265
G-2	HGY-1	215	315
G - 3	HGY-1	215	415
G-4	HGY-1	215	515

注:试样编号中"B"代表玻璃砂试样,"G"为钢珠试样,烘干样编号中的数字代表该试样烘干次数,即试样重复使用次数,"HG"和 "HGY"分别代表玻璃砂、钢珠烘干样

试样固结和剪切的具体操作皆按照土工试验 方法标准(GB/T 50123—2019)^[10]中要求。剪切速 率在 CD 试验中取 0.008 mm/min,即剪切应变速率 为 0.01%/min。玻璃砂样试验终止条件为轴向应 变 ε_a 达到 20%,钢珠取轴向应变 ε_a 达到 25%,试样 的有效围压 σ_3 '由围压 σ_3 和反压 σ_b 的差值决定。以玻 璃砂样 HG-15-B-17 为例,图 2展示了玻璃砂标准试 样和鼓胀的典型图片。



Fig.2 Typical photographs of the glass sand sample

2 试验结果与分析

2.1 玻璃砂试验结果分析

图 3 为玻璃砂样在不同有效围压下的 CD 试验 结果,每级围压都采用不同批次的烘干样进行试验。 其中试样编号为 B-1 和 B-9 的应力一应变曲线在应 变初始段为直线或出现空白,是因为在剪切初始阶 段试样帽与传力轴接触不良导致,但对于研究滞滑 现象影响不大,因此这两组数据依然具有研究价值。 可发现第一次烘干试样,应力一应变曲线中偏应力 q 出现了剧烈波动,而第二次烘干样波动得以削弱,烘 干若干次后的玻璃砂样其应力一应变曲线基本看不 到波动。随着玻璃砂样的反复使用,滞滑呈现逐渐 消失的发展趋势:从连续大的滞滑到大滞滑小滞滑 交替出现到最后基本消失。玻璃砂试样应力一应变 总体呈现软化型,且前两次烘干样软化非常明显。 在玻璃砂第一次烘干样的CD试验中,各有效围压下 的应力一应变曲线均出现剧烈波动,曲线呈现密集 锯齿状,并且波动幅度随着有效围压的提高而加剧。 玻璃砂第二次烘干样不同有效围压下的应力值波动 明显削弱,滞滑呈现出大滞滑中夹带一系列小滞滑 的现象,有效围压越大,该现象越明显,而第一次烘 干样中绝大多数为大滞滑。反复使用后的玻璃砂则 基本看不到明显的滞滑现象,应力一应变软化效应 也被弱化,甚至表现出与密度大的砂土类似的性质, 多次烘干样偏应力峰值点也会发生滞后。滞滑现象 一般在临近偏应力峰值点处开始出现,在玻璃砂样 第一次烘干样中会略早些。因为滞滑的发生,q-p' 曲线(p'为平均有效应力)在尾部会出现一段滞回(往 复叠加)的现象。



Fig.3 Results of glass sand under different effective confining pressures in consolidated drainage tests

玻璃砂第一次烘干样中,应力跌落最大值按 围压从小到大依次约为20、40、85、140 kPa,第二 次烘干样应力跌落最大值在低围压下(50、 100 kPa有效围压)有所下降,依次为6、10 kPa,高 围压下应力跌落最大值与第一次烘干样相当甚至 会更大,依次为70、150 kPa。玻璃砂第二次烘干 样应力曲线与第一次比较明显有所下降,多次烘 干样应力下降得更大,不同有效围压下,下降幅度 从 20 kPa 到 200 kPa不等。但应力一应变曲线总 体趋势是随着轴向应变的增加而趋于稳定,在多 次烘干样中比较明显,多次烘干样的应力虽然下 降很多,但基本稳定在前两次烘干样发生滞滑时 应力跌落的最低点附近,说明多次烘干样已达到 玻璃砂的稳定状态。

以HG-2-B-14试样为例,图4为其偏应力、体积 应变与轴向应变关系曲线。可以看出在剪切初始 试样发生剪缩,但很快进入剪胀状态,应力值在临 近峰值时滞滑现象开始明显,相邻大滞滑之间总是 伴随着系列小滞滑。滞滑一般可分为两个阶段^[2], 先是滑动造成应力值急速跌落,随后快速恢复一定 强度再慢慢回升到与之前相当的强度,在大滞滑中 这两个阶段尤其明显。可以看到体积应变曲线其 实也有明显波动,它的每一次跌落和抬升与滞滑的 发生密切相关。从图4可以看到应力值发生较大跌 落时,试样体积压缩也很明显。本试验与孔德志 等^[4]试验中不同的是,在大滞滑发生时,体积应变几 乎在应力值跌落时同步减小。



图4 偏应力、体积应变与轴向应变关系曲线(HG-2-B-14) Fig.4 TRelationship curve between deviatoric stress, volumetric strain and axial strain (HG-2-B-14)

江亚洲等^[9]采用球形玻璃砂进行了不同围压下的CU试验,同样也发生了应力值在不断跳动的情况,该试验剪切速率为0.4 mm/min。但将本试验的玻璃砂样进行CU试验时却并未发现应力一应变曲线有明显波动,如图5所示。本试验的玻璃砂样CU试验的制样、饱和、固结等过程与玻璃砂样CD试验一致,但所用玻璃砂样为多次烘干样,剪切速率取0.08 mm/min,即剪切应变速率为0.1 %/min。推测 江亚洲等^[9]采用的球形玻璃砂应该是全新样品,没有重复使用过,同时剪切速率的快慢也会影响滞滑发生。

2.2 钢珠试验结果分析

图 6 为钢珠在不同围压下的 CD 试验结果,虽然 4 个钢珠试样都是用全新同一批次烘干样,却和玻



Fig.5 Stress-strain relationship of glass sand in consolidated undrained test





璃砂的结果有所不同,从偏应力波动频率上看其滞 滑现象明显没有玻璃砂第一批烘干样剧烈,但应力 值的跌落幅度在同一有效围压下要比玻璃砂要大。 从体积应变来看,钢珠剪胀现象更加明显,剪切刚 开始发生剪缩而后迅速往剪胀发展。应力一应变 软化效应不锈钢珠也会比玻璃砂强烈许多,随着轴 向应变不断发展,钢珠应力曲线会逐渐趋于平缓。 总体表现出在剪切过程中钢珠的性质要比玻璃砂 更加稳定些。不锈钢珠 q-p'曲线的情况与玻璃砂 样没有太大区别,虽在滞滑上的表现会有所不同, 但总体上玻璃砂和不锈钢珠这两种球形颗粒材料 表现出相类似的一些力学特性。





Fig.7 Stress-strain relationship of stainless steel beads in consolidated undrained tests

与玻璃砂样类似,将钢珠也进行一组CU试验, 不同的是,考虑到玻璃砂样CU试验采用的是多次 烘干样,钢珠试样采用全新干样。从图7不锈钢珠 应力一应变关系中可以看到有轻微滞滑,可见反复 烘干试样确实会影响滞滑发生。高围压和低围压 下的偏应力值相差较大,是因为不排水条件下孔压 (超静孔隙水压力)也不断下降,试样有效应力便会 增大,孔压下降速度会影响有效应力的大小,高围 压下孔压下降会快一些,试样的强度主要受到孔压 影响。

3 机理分析

从力学角度看,颗粒体系因其离散性表现出远 比普通液体和弹性固体等一般材料体系更为复杂 的力学行为^[13]。在颗粒体系中分布着强弱不同的 接触力链,其分布也极其不均匀。图8展示了在一 个单粒径的颗粒体系边界上施加各向同性径向压 应力^[13]的力链分布,体系所受压应力并没有均匀被 颗粒分担,并且不均匀分布的强力链将承担大部分 力。可以认为在单粒径颗粒体系中,即便受到各向 同性的应力,体系中的力链分布也存在一定各向异 性,当受到不均匀应力时,力链的各向异性将会更 加复杂,且具有一定随机性。在强力链中的某个或 多个颗粒一旦发生错动,整个力链体系将会重组, 部分强力链会断裂,而试样的剪切强度主要是由强 力链承担^[14],这也意味着颗粒体系的力学响应会受 到颗粒中强力链的影响。滞滑现象是试样内部应 力动态变化的具体表现,从细观角度上看,其与颗 粒体系中强力链的变化紧密相关。



图 8 单粒径颗粒体系力链分布 Fig.8 Distribution of the force chain in the single-particle size system

与孔德志等[4]试验中类似,玻璃砂和钢珠试 样在发生大的滞滑时,可以明显听到试样内部颗 粒摩擦撞击发出的声响。若玻璃砂颗粒存在缺 陷,那么在剪切过程中也容易发生破碎,在玻璃砂 多次烘干样试验中,将试验结束后的玻璃砂过两 次筛,筛子孔径分别为1mm和0.5mm,基本看不 到破碎的颗粒。同样,钢珠也未发生破碎。这说 明在剪切过程中,可以认为颗粒没有发生破碎,本 试验中滞滑的发生并非颗粒破碎导致,而与试样 中的颗粒在动态调整相对位置密切相关。在调整 过程中,试样体积、应力和球颗粒内部强弱力链都 会发生突然改变。玻璃砂和不锈钢珠两种颗粒材 料都为球形、单粒径,但在表面特征上依然存在差 别,玻璃砂的成圆率要比不锈钢珠低一些。在水 溶液中长时间浸泡,玻璃砂的稳定性也不如钢珠, 玻璃砂颗粒间的摩擦会有所增加,这些差别都会 导致两者的滞滑现象有所区别。玻璃砂多次烘干 样与前两次烘干样表现出来的差异性,包括滞滑 的削弱和强度峰值的降低,与颗粒间的咬合力和 摩擦的变化有很大关系。如图9所示,发生滞滑 后的玻璃砂表面会有一些划痕[15],意味着玻璃砂 滑动过程中表面粗糙度会有所增加。部分玻璃砂 发生滞滑后会形成"双倍体"形态[7],如图10所



图 9 滞滑后玻璃珠的表面划痕^[15] Fig.9 Surface scratches of glass beads after stick-slip^[15]





示,并且重复使用的玻璃珠中这种形态会更多^[7], 这种现象与滞滑的发生及削弱也有一定关系。玻 璃砂样在反复使用过程中,表面摩擦的改变使得 其性质有向一种稳定状态发展的趋势,玻璃砂表 面摩擦得到一定提高后,剪切时颗粒间的咬合力 也会变大,这使整个颗粒体系的平衡不再容易被 打破,强力链基本稳定不再发生频繁的断裂与重 组,滞滑现象也就不再明显。

4 结 论

本试验选取玻璃砂材料,开展了一系列不同围 压和不同烘干批次的CD试验及一组多次烘干样的 CU试验,并采用不锈钢珠进行了一组CD和CU试 验与之比较,重点探讨两种材料在试验中出现的滞 滑现象,得到以下结论:

(1)玻璃砂和不锈钢珠两种材料在固结排水剪 试验中都存在明显滞滑现象,并随着有效围压的不 断提高而加剧。但玻璃砂在水溶液中的稳定性不 如钢珠,两种材料表面特征也会有一些差异,两者 的滞滑表现会有所不同。在试验材料都是全新的 条件下,玻璃砂的滞滑是接连不断的大滞滑,钢珠 则是系列的大滞滑中夹带若干小的滞滑,并且钢珠 会更快达到残余强度。在后续相关研究中可以深 入讨论颗粒材料表面特性的差异性对试验结果的 影响。

(2)对于玻璃砂,多次烘干样的滞滑现象会被 削弱甚至基本消失,即玻璃砂样的滞滑现象受其制 备历史的影响。颗粒间的咬合力增强和摩擦阻力 大小变化幅度的减小是多次烘干样滞滑现象减弱 的主要原因。本试验结果表明试样制备历史对滞 滑的演变规律有着重要影响,为后续深入探究滞滑 现象演变的微观机制提供方向。

(3)剪切速率的大小可能是两种颗粒材料在三 轴排水和不排水试验中滞滑现象差异性的一个重 要影响因素。剪切速率较慢时似乎更容易发生滞 滑,具体的影响机制还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 王美美.岩土散体介质固态一流态临界转化力学机理研究[D].北京:北京科技大学,2022.
 Wang M M. Study on mechanical mechanism of solid fluid critical transformation of geotechnical bulk media
 [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2022. (in Chinese)
- [2] 周志刚.颗粒固体的力学响应和声波传播的研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院物理研究所),2017.
 Zhou Z G. Study on mechanical response and sound wave propagation of granular solids [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Physics CAS), 2017. (in Chinese)
- [3] 戴北冰,杨峻,周翠英.颗粒摩擦对颗粒材料剪切行为 影响的试验研究[J].力学学报,2013,45(3):375-383.
 Dai B B, Yang J, Zhou C Y. Experimental study on the effect of particle friction on the shear behavior of granular materials[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(3): 375-383. (in Chinese)
- [4] 孔德志,张丙印,孙逊.钢珠模拟堆石料三轴试验研究
 [J].水力发电学报,2010,29(2):210-215,221.
 Kong D Z, Zhang B Y, Sun X. Triaxial experimental study on steel ball simulated rockfill[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 210-215,221. (in Chinese)
- [5] 张祺,厚美瑛.直剪颗粒体系的尺寸效应研究[J].物理 学报,2012,61(24):348-353.
 Zhang Q, Hou M Y. Study on size effect of direct shear particle system [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61 (24): 348-353. (in Chinese)
- [6] Jiang Y M, Liu M. Stress- and rate-controlled granular rheology[J]. AIP Conference Proceedings, 2013, 1542 (1): 52-59.
- [7] Doanh T, Hoang M T, Roux J N, et al. Stick-slip behaviour of model granular materials in drained triaxial compression[J]. Granular Matter, 2013, 15(1): 1-23.

- [8] 董启朋,姚海林,詹永祥.钢珠和玻璃珠模拟粗粒土的 三轴试验研究[J].人民长江,2016,47(8):88-93.
 Dong Q P, Yao H L, Zhan Y X. Triaxial experimental study on steel ball and glass ball simulating coarsegrained soil[J]. Yangtze River, 2016, 47(8): 88-93. (in Chinese)
- [9] 江亚洲,李永强,汪刚,等.轴向应力控制偏差对砂土液 化特性影响研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39 (增):3023-3031.
 Jiang Y Z, Li Y Q, Wang G, et al. Study on the influence of axial stress control deviation on sand liquefaction characteristics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup): 3023-3031. (in Chinese)
- [10] 土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [11] 许成顺,李艳梅,潘霞,等.初始静孔隙水压力对砂土静 动力剪切特性影响的试验研究[J].岩土工程学报, 2019,41(6):1050-1057.

Xu C S, Li Y M, Pan X, et al. Experimental study on the effect of initial static pore water pressure on static and dynamic shear properties of sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1050-1057. (in Chinese)

- [12] 黄博,汪清静,凌道盛,等.饱和砂土三轴试验中反压设置与抗剪强度的研究[J].岩土工程学报,2012,34(7): 1313-1319.
 Huang B, Wang Q J, Ling D S, et al. Study on back pressure setting and shear strength of saturated sand in triaxial test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engi-
- [13] 孙其诚,程晓辉,季顺迎,等.岩土类颗粒物质宏-细观 力学研究进展[J].力学进展,2011,41(3):351-371.
 Sun Q C, Cheng X H, Ji S Y, et al. Research progress of macro meso mechanics of geotechnical granular materials[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(3): 351-371. (in Chinese)

neering, 2012, 34(7): 1313-1319. (in Chinese)

[14] 陈庆,高燕,袁泉,等.密实砂土剪切过程中的微观结构
 响应[J].水利水电技术(中英文),2021,52(6):
 178-187.

Chen Q, Gao Y, Yuan Q, et al. Microstructure response of dense sand during shear[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(6): 178-187. (in Chinese)

[15] Cui D S, Wu W, Xiang W, et al. Stick-slip behaviours of dry glass beads in triaxial compression [J]. Granular Matter, 2017, 19(1): 1-18.

(本文编辑:周小潭)