DOI: 10.11883/bzycj-2017-0179
文章编号: 1001-1455(2018)06-1262-09

钙质砂的 SHPB 实验技术及其动态力学性能*

吕亚茹[1,2,3],王明洋[3],魏久淇[3],廖 斌[3]
(1. 河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098;
2. 香港科技大学土木与环境学系,香港 999077;
3. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室,江苏 南京 210007)

摘要: 开展了 11 组南海钙质砂和福建石英砂的分离式霍普金森压杆(SHPB)实验,试样相对密实度为 90%,厚度分别为 10、30 和 50 mm,得到了冲击荷载下钙质砂和石英砂的应变率时程曲线、应变时程曲线和应力应变关系。实验结果表明:通过严格装样技术可以减小实验设备产生的误差,改变试样厚度、子弹长度、整形器等是实现钙质砂应力平衡和恒应变率的主要手段。在相同的密实度和加载条件下,钙质砂的体积模量和剪切模量约为石英砂的 10%,压缩强度和抗剪强度约为石英砂的 30%。冲击荷载作用下钙质砂的动态力学性能与石英砂存在较大的差异,因此不能将已有石英砂的研究结果直接用于钙质砂。

关键词: 钙质砂;霍普金森压杆;冲击特性;应力应变曲线
中图分类号: O347.4 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)实验是研究中高应变率下材料力学性能最主要、可靠的实验方法之一,是冲击动力学实验技术的重要组成部分,利用霍普金森杆不仅可以实现高应变率(10^2~10^4 s^{-1})单轴压缩、剪切加载,还可实现动态压-剪复合加载,主、被动围压复杂加载,以及 10^0~10^1 s^{-1}中应变率加载[1]。早在 1967 年,E. Fletcher 等[2]首次通过 SHPB 研究了土的动态特性,由于土体为散体材料,实验时需要通过套筒和垫块将土样固定,土样夹在垫块之间如同“三明治”,通过粘贴在入射杆和透射杆上的高灵敏度应变片采集试样的应力、应变时程曲线[3]。由于土为低阻抗材料,SHPB 实验时常常出现下列问题:(1)试样前后面的应力难以达到平衡;(2)透射杆的信号十分微弱。为了满足 SHPB 应力均衡和恒应变率的假设,常采用以下手段:(1)在入射杆端部添加整形器以拉长入射波上升沿的时间,延长试样达到应力平衡的“历程”;(2)选择匹配的子弹长度;(3)合理选取试样长度[4-5]。B. Song 等[6]认为软材料达到应力平衡的两个关键因素是试样长度和应变速率,试样越长应力越难达到平衡,应变速率越低试样越容易达到平衡,通过建立 SHPB 软材料的理论模型,估算试样达到应力平衡所需时间。当不能实现应力平衡时,所得到的应力应变曲线往往反映结构特性而非材料特性。

通过 SHPB 实验已经对砂土的动力特性有了初步认识。C. W. Felice 等[7]认为干砂的初始孔隙比是决定其在高应变率荷载下应力应变特性的关键因素,当压缩变形不足以抵消初始孔隙时,干砂对应变速率不敏感。A. D. Barr 等[8]开展了 SHPB 动态实验和 MTS 准静态对比实验,发现应变率在 10^{-3}~10^3 s^{-1}之间变化时压缩模量随着应变率的增大而增大,但体积模量变化甚微,与此同时,轴向应力随着应变率的增大而增大,但试样表面的环向应力却随之减小,因此,干砂刚度随应变率增大的现象可能来源于套筒产生的影响。A. M. Bragov 等[9]得到了相似的结论,即应变率对砂土动态应力应变特性影响甚微,但皮爱如等[10]认为应变率影响砂土的动态特性。B. Song 等[11]开展了不同侧限条件下砂土的 SHPB 实验,发现砂土的动态特性主要受相对密实度和侧限的影响。郑文等[12]开展了干燥砂的准静态 MTS 和动态 SHPB 压缩实验,研究了压缩速率和压缩过程的影响。然而,上述研究的对象均为陆相的

* **收稿日期**: 2017-05-22; **修回日期**: 2017-06-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(51779264,51408607);江苏省自然科学基金面上项目(BK20171399);2016 年香江学者计划(XJ2016063);青年人才托举工程(17-JCJQ-QT-021)
第一作者: 吕亚茹(1987—),女,博士; **通信作者**: 王明洋,wmyrf@163.com。

石英砂，针对海相钙质砂的研究十分稀少。

钙质砂通常是指由海洋生物（珊瑚、海藻、贝壳等）成因的、富含碳酸钙或碳酸镁等物质的特殊岩土介质[13]，主要分布于 S30°和 N30°之间的热带海洋地区，而我国大部分南海海域遍布着钙质砂。由于钙质砂的沉积过程大多未经长途搬运，保留了原生生物骨架中的细小孔隙等原因，形成了颗粒多孔隙、形状不规则、易破碎、粒间易产生胶结等特点，使其力学性质与一般陆相、海相沉积物相比有较明显的差异。关于地基承载力和变形特性的钙质砂静力学研究已经取得了一定的成果[14-18]。中高应变率下钙质砂力学响应的研究对打桩、强夯、采矿爆破、地震、飞机降落、爆炸冲击等至关重要，徐学勇等[19]通过爆炸实验初步研究了爆炸波在钙质砂中的传播衰减规律，Y. Xiao 等[20]通过落锤实验研究了钙质砂颗粒破碎与试样高度和落锤参数的关系，赵凯等[21]研究了多孔材料中的应力波传播规律，为多孔钙质砂冲击特性的实验研究提供技术参考。然而，目前的研究仍十分有限，不能得到中高应变率下钙质砂的应力应变关系。本文中开展相对密实度为 90％的钙质砂与福建石英砂的对比实验，通过对比分析两种砂对冲击荷载的不同响应，初步探讨钙质砂的工程应力应变特性，为钙质砂的工程防护提供理论依据。

1　SHPB 实验

1.1　实验装置及传感器布置

如图 1 所示，实验采用钢制 SHPB 压杆，直径 100 mm、密度约 7 950 kg/m^3、波速约 5 213 m/s、子弹质量 37.5 kg。试样的应力、应变时程曲线通过粘贴在入射杆和透射杆上的应变片测得，入射杆上粘贴一组半桥电阻应变片，其灵敏系数约为 2.22，由于砂土的波阻抗小，透射杆上粘贴半导体应变片，灵敏系数约 110.00。入射杆端头中部（子弹冲击面上）采用凡士林粘贴卡片纸作为该实验的波形整形器。通过在套筒上粘贴应变片测量试样径向应力、应变时程。实验采用压缩空气作为子弹的动力来源，本文中选择 0.1 MPa 压缩空气冲击子弹，子弹的速度为（7.8±0.5）m/s。

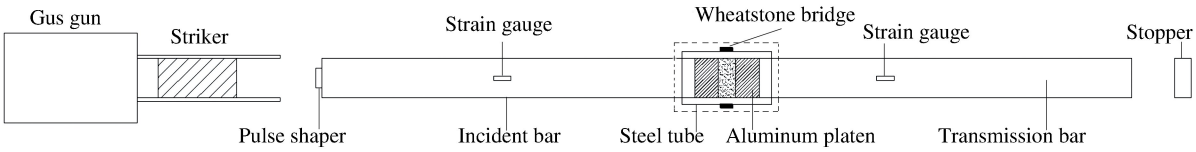


图 1　SHPB 实验布置

Fig. 1　SHPB experimental setup

1.2　实验砂样

钙质砂来源于我国南海某珊瑚岛礁，对比实验选用福建标准砂。图 2(a)～(b)分别为钙质砂试样和福建石英砂试样，钙质砂为乳白色带有红色杂质，主要成分为 $CaCO_3$，颗粒的骨架密度约 2.81。福建标准砂为典型的石英砂，主要成为 SiO_2，颗粒骨架密度约 2.63。砂样的原始颗分曲线如图 3 所示，为便

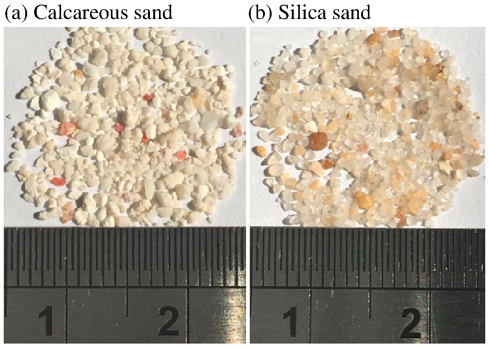


图 2　实验砂样

Fig. 2　Tested sand samples

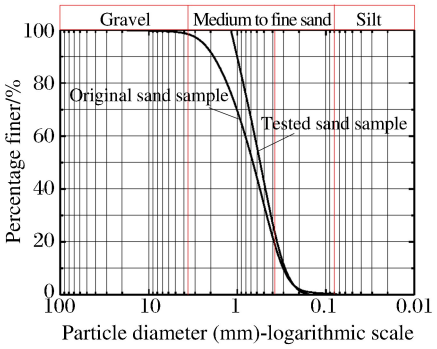


图 3　实验砂样颗分曲线

Fig. 3　Particle size distribution

于实验分析,将砂样中粒径小于 0.15 mm 和大于 1.18 mm 的颗粒剔除,剔除后的砂样组分不变,则试样的平均粒径 $D_{50}=0.55$ mm,不均匀系数 $C_u=1.86$,曲率系数 $C_c=0.95$。由于两种砂的骨架密度和颗粒形状不同,两种试样的最大、最小干密度(最小、最大孔隙比)不同,钙质砂的最小、最大孔隙比分别为 1.389 和 1.049,石英砂试样的最小、最大孔隙比分别为 0.843 和 0.618。实验选用的砂样相对密实度 $D_r=90\%$,对应钙质砂和石英砂的密度分别为 1 356、1 628 kg/m^3。

1.3 试样安装

作为散体材料,砂样通过套筒和两个垫块固定,套筒内径为 100.05 mm,与杆子、垫块的外径吻合。装样前对套筒内部进行处理,内壁涂抹一层高压油,减小杆子与套筒的摩擦。装样前根据试样相对密实度标定每层试样所需的锤击高度和锤击数。具体装样步骤如图 4 所示:第 1 步,通过螺栓将一个垫块固定于套筒内,固定位置与试样厚度相匹配;第 2 步,根据试样密度和装样厚度计算装样质量,称取所需质量的试样,将试样按 10%递减分为 3 份,将第 1 份缓慢倒入套筒内,平整试样后采用带有底座(直径为 100 mm)的小锤自由落体锤击垫块使第 1 层砂样达到理论高度。依次倒入第 2 层和第 3 层试样,采用预先标定好的锤击高度和锤击数锤击试样,使其达到相应高度,装样完成;第 3 步,放入第 2 个垫块并固定;第 4 步,在入射杆和透射杆靠近试样一段涂一薄层凡士林,将试样缓缓安装在杆子上,压紧杆子和垫块使其中间的凡士林充分挤压。待试样准备完成后,去掉套筒上的固定螺栓。

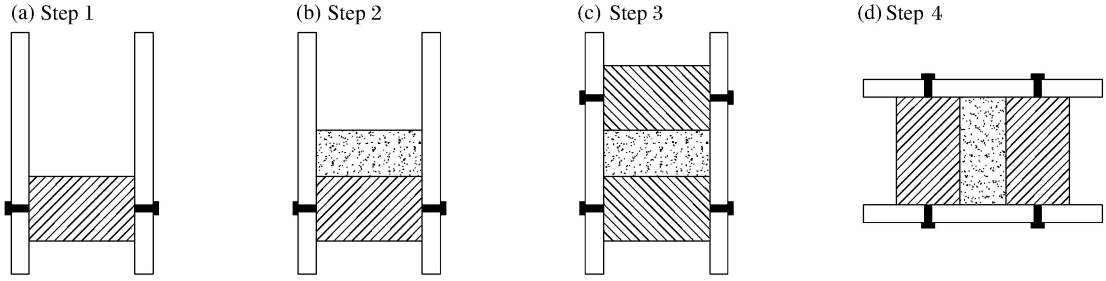


图 4 装样步骤

Fig. 4 Specimen preparation

实验工况见表 1。共 3 组 11 个实验,每个实验至少重复 3 次:第 1 组为 3 个标定实验,分别标定杆子、整形器、套筒和垫块的影响;第 2 组为直径 100 mm 钢制 SHPB 实验,包括 3 个钙质砂实验和 3 个传统石英砂实验;第 3 组为直径 37 mm 铝制 SHPB 实验,包括 1 个钙质砂实验和 1 个传统石英砂实验。由于质点加速引起的纵向和径向惯性会对应力应变结果产生一定的影响[22],试样的长径比宜取 0.4~0.6,故直径 100 mm 钢制 SHPB 实验和 37 mm 铝制 SHPB 实验试样直径分别取为 50、18 mm。由于砂土的波阻抗小,透射信号弱,入射杆上入射信号和反射信号基本重合,因此入射信号与反射信号的差

表 1 实验工况

Table 1 Summary of the SHPB tests

实验组号	SHPB 杆	编号	厚度/mm	厚径比	实验内容
第 1 组	∅100 mm	T1	—	—	空杆+整形器
		T2	—	—	空杆+整形器+套筒
		T3	—	—	空杆+整形器+套筒+垫块
第 2 组	∅100 mm	T4	10	0.1	钙质砂
		T5	30	0.3	钙质砂
		T6	50	0.5	钙质砂
		T7	10	0.1	石英砂
		T8	30	0.3	石英砂
		T9	50	0.5	石英砂
第 3 组	∅37 mm	T10	18	0.5	钙质砂
		T11	18	0.5	石英砂

值与透射信号比较时，误差很大。根据 B. Song 等[6]对软材料应力平衡影响因素的分析，试样越薄，试样前后应力越容易达到平衡，因此，另取 30、10 mm 两个试样厚度进行直径 100 mm 钢制 SHPB 实验，研究试样厚度的影响。

2　钙质砂 SHPB 实验技术

2.1　设备标定

本文中没有具体分析波的弥散和惯性效应，相应的影响包含在了实验结果内。图 5 为实验前对 SHPB 设备和砂样固定装置的标定结果，显示结果为无量纲的采集信号，其中，U_0 为采集到的应变片电压，f 为增益，U_{EX} 为输入电压，0.5 为半桥应变片系数。图 5(a)为空杆上加整形器的实验结果，从图中可以看出入射杆和透射杆信号基本重合，入射杆和透射杆接触面处基本没有反射信号产生，说明杆子调平较好。上升沿时间接近 150 μs，说明选用卡片纸作为整形器整形效果较好。与图 5(a)相比，图 5(b)在空杆上加上了固定砂样的钢套筒，该实验的目的是标定套筒与杆子相互摩擦对实验结果的影响。从图中可以看出，入射波在平台段和下降沿明显大于透射波，且在套筒上测得一定的应变，说明套筒对实验结果存在影响。由于标定套筒时未对套筒内壁进行润滑处理，图 5(b)产生的误差可能来源于内部摩擦，因此在标定垫块时对套筒内壁涂抹一层高压油润滑(见图 5(c))，垫块和入射杆、透射杆接触面上涂上一薄层凡士林，用力挤压入射杆和透射杆，使杆子与垫块间充分贴合。从实验结果可以看出套筒和垫块对实验结果的影响十分有限，套筒上应变片采集到的应变很小。综上所述，固定砂样的套筒和垫块对实验结果的影响可忽略不计。

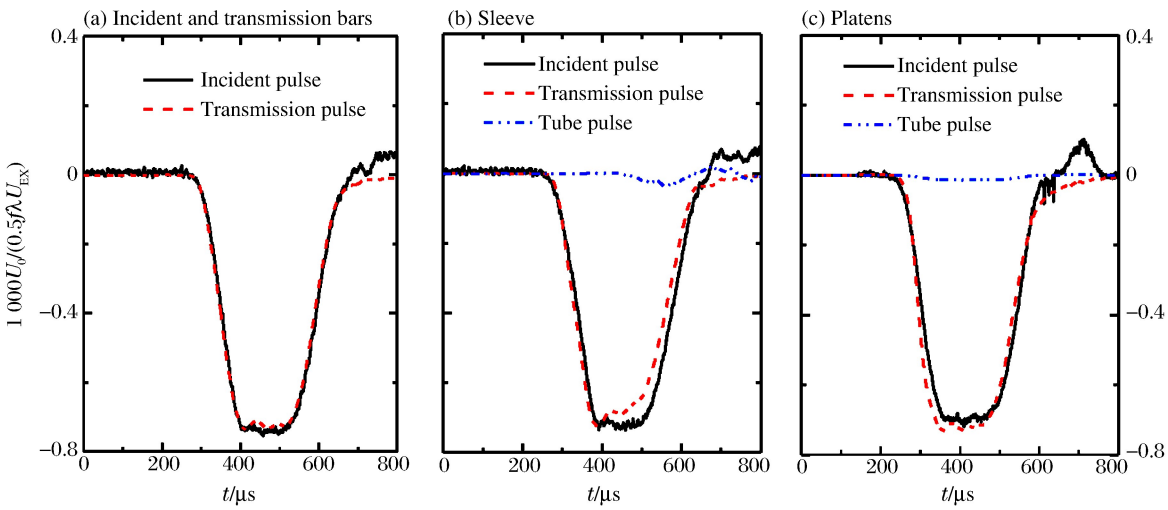


图 5　标定结果

Fig. 5　Results of calibration

2.2　应力平衡

试样一维压缩应力可以通过透射波计算得到：

$$\sigma_z(t)=(A_t/A_s)E_0\varepsilon_t(t) \tag{1}$$

式中：z 表示试样轴向方向，A_t 和 A_s 分别表示透射杆和试样的截面面积，E_0 表示杆子弹性模量，ε_t 为透射杆上应变片测得的应变。

试样轴向应变速率可通过下式计算得到：

$$\dot{\varepsilon}_z(t)=(2c_0/L_s)\varepsilon_r(t) \tag{2}$$

式中：c_0 表示杆子波速，L_s 表示试样轴向长度，ε_r 表示入射杆上测得的反射应变波。

对应变率沿时间积分，即可得到试样的轴向应变：

$$\varepsilon_s(t)=(2c_0/L_s)\int_0^t\varepsilon_r(t)\mathrm{d}t \tag{3}$$

图 6 为 10 mm 厚钙质砂和石英砂试样的应变率及应变时程曲线，从图中可以看出，加载历程约为 450 μs，其中上升沿和下降沿时间均约为 150 μs。选用的卡纸整形器可将上升沿的时间从传统的 10 μs 延长到 150 μs 左右，为试样前后面达到应力平衡提供了条件。钙质砂样的应变率在 150～300 μs 间稳定在 560 s^{-1}，对应时间段内的应变从 0.03 发展到 0.12；石英砂样的应变率在 200～350 μs 间稳定在 490 s^{-1}，对应时间段内的应变从 0.03 发展到 0.10。换言之，试样在约 150 μs 的时间区间内实现了恒应变率，进一步证明了 10 mm 厚砂样实验结果的可靠性。10 mm 厚石英砂的平行实验应变率在 150～300 μs 间稳定在 503 s^{-1}，对应时间段内的应变从 0.03 发展到 0.11，平行实验说明文中实验具有可重复性。由于通过压缩空气控制子弹撞击速度时存在偏差，导致实验时钙质砂的入射波和反射波稍小于石英砂。

一维 SHPB 压缩实验中，只有当试样两端面的应力达到平衡，才认为实验有效。图 7 为 10 mm 厚钙质砂样和石英砂样的前后面应变信号，其中黑色为入射应变信号与反射应变信号的叠加计算结果，表示试样前端面上的质点应变时程曲线，红色为透射应变信号，表示试样后端面上的应变时程曲线。对比前后面应变信号可知，两时程曲线变化规律相同，特别是石英砂试样，试样前后面的应变时程曲线基本重合，证明试样内基本实现了应力平衡。钙质砂试样前后面质点应变时程曲线存在明显差异，前端面波形叠加结果规律性差，然而，两者差异在合理范围内，波形变化规律基本吻合，说明实验试样满足应力平衡的假设。

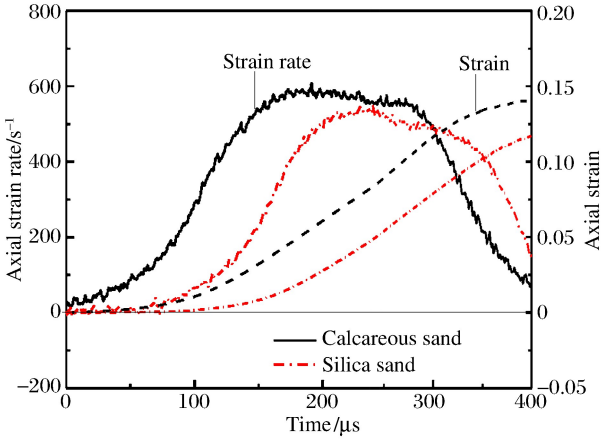


图 6 T4 和 T7 的应变率和应变时程

Fig. 6 Strain rate and strain histories of T4 and T7

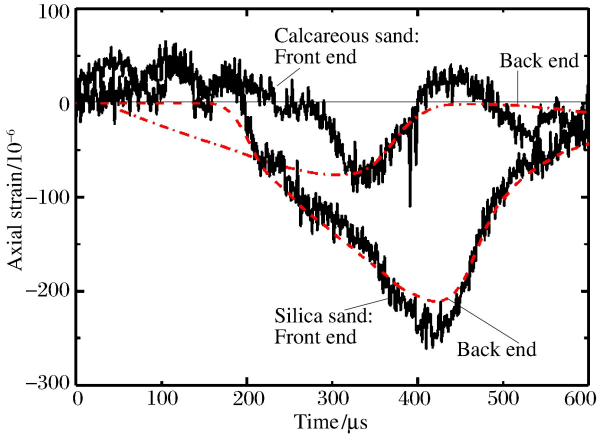


图 7 T4 和 T7 的应力平衡

Fig. 7 Stress equilibrium of T4 and T7

对于厚度为 30、50 mm 两种试样，实验结果很难达到平衡，究其原因有 3 点：(1)由于电阻应变片灵敏系数仅有 2.22，测得的入射波和反射波基本重合，两波的叠加结果(差值)会产生较大的计算误差，10 mm钙质砂试样前端面应力计算误差大于后端面就是这个原因。此原因为测试误差所致，实际应力是否达到平衡难以准确判断，后续可借助压电薄膜或半导体应变片进行校验；(2)砂样厚度越大达到应力平衡所需的时间越长，上升沿时间内不足以使波在试样内循环 3～5 次，试样难以达到应力平衡。为了降低惯性效应，试样厚度与直径的最优比值为 0.4～0.6，然而文中实验采用 100 mm 直径的 SHPB 装置，试样厚度的增大大大降低了应力平衡的可能性，因此可选用直径较小的杆子开展砂土的动力特性实验；(3)子弹长度有限，导致入射波脉冲宽度不够，为拉长上升沿时间，过度整形会产生三角波，因此可在适当增加子弹长度的前提下拉长上升沿时间；(4)钢制 SHPB 杆与砂土的刚度差异太大，可采用刚度较小的铝合金杆或尼龙杆。

为了验证上述结论的正确性，开展了直径 37 mm 的铝合金杆实验，入射杆和透射杆长度为 2 000 mm，子弹长度为 400 mm。入射杆和透射杆信号全部采用半导体应变片采集。试样厚度18 mm，

厚径比约 0.5。试样整形器采用弹性更好的橡胶片。实验应变率和应变时程曲线如图 8 所示，采用长 400 mm的子弹和橡胶整形器后，入射波上升沿时间为 100 μs，应变时程基本为直线，可以判定实现了恒应变率，恒应变持续时间为 150 μs。图 8 中给出了 3 个重复实验的应变率和应变时程，发现 3 个实验结果较好重合，证明了实验的可重复性。试样前后端面应力对比如图 9 所示，由于入射杆和透射杆均采用半导体应变片，试样后端面的应力时程曲线明显比电阻应变片采集的结果光滑，计算误差小。采用铝制 SHPB 杆后，即使厚径比为 0.5 的试样前、后端面应力时程仍很好吻合，加载初期和结束后应力误差主要来源于结构影响。综上所述，选择杆子材质、增加子弹长度、改变整形器等是实现钙质砂应力平衡和恒应变率的主要手段。

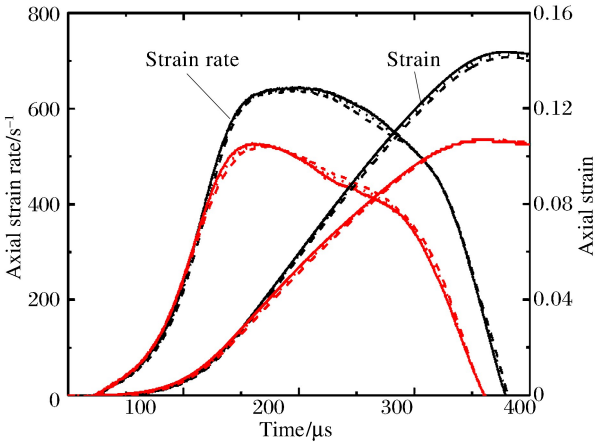


图 8　T10 和 T11 的应变率和应变时程

Fig. 8　Strain rate and strain histories of T10 and T11

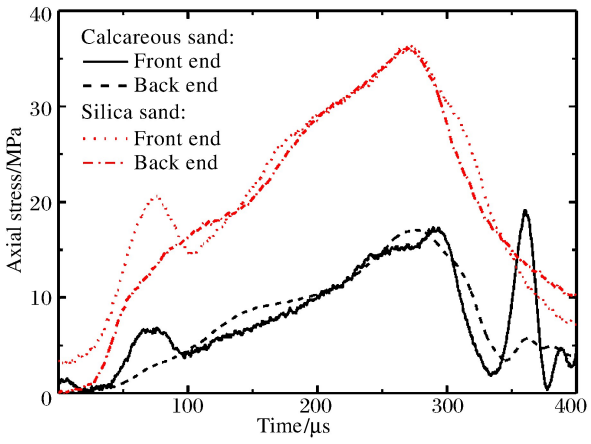


图 9　T10 和 T11 的应力平衡

Fig. 9　Stress equilibrium of T10 and T11

3　钙质砂冲击特性初探

3.1　轴向应力应变

图 10 给出了实验轴向应力应变曲线，由于文中实验砂样的相对密实度 D_r = 90%，故实验的应变范围较低，厚度 30、50 mm 试样的应变率和应变水平更低，结构对实验结果影响非常大，误差较大。结构影响使得应力应变曲线出现明显的下降段和二次上升段，下降段内试样强度降低，上升段强度又一次升高。B. Song 等[6]将这一现象归结于砂颗粒的振动和套筒内壁的摩擦，另一主要原因可能是加载初期的惯性效应。

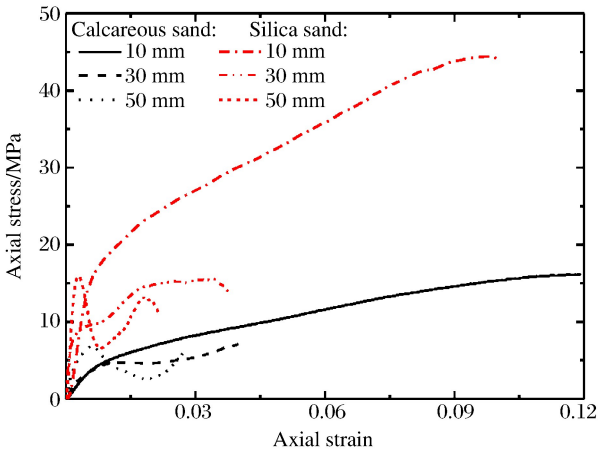


图 10　轴向应力应变曲线

Fig. 10　Axial stress-strain curves

对于厚度为 10 mm 的试样，测试最大应变不超过 0.12，在测试范围内应力应变表现出硬化特性，说明砂样处于弹塑性阶段，粒间孔隙被压实，但尚未达到破碎压实的指数增长阶段。这一结果与已有砂土 SHPB 实验结果相似[6]，即在加载初期，应力应变整体表现为线性，而后出现塑性压实阶段，最后达到破碎压实阶段。然而，已有实验荷载等级较高，砂样应变可达到 0.3。在本文中，由于进一步提高应变率难以实现试样应力平衡，文中实验尚未做到颗粒大量破碎后重分布压实阶段。对比石英砂和钙质砂，石英砂的压缩模量（初始加载段斜率）约为钙质砂的 10 倍，强度约为石英砂的 3 倍。

3.2 体积与剪切应力应变

实验时砂样通过刚性套筒固定,套筒上粘贴应变片,通过套筒上应变片可检测试样径向应力时程变化 。根据参考文献[23],结合套筒弹性模量 E_c、泊松比 ν_c 和测得的环向应变 ε_h,可计算得到套筒径向应力 σ_r 与环向应力 σ_θ、套筒径向应变 ε_r 与环向应变 ε_θ。计算时用到套筒的外径与内径比 α,套筒内径 100.05 mm,外径 133.33 mm,则系数 α 约为 1.33。文中套筒采用 4340 钢,材料的弹性模量为 205 GPa,泊松比约为 0.29[23]。为了进一步分析冲击荷载作用下一维压缩引起的钙质砂应力、应变特性,依托测得的轴向和环向应力、应变结果得到试样的平均应力 σ_m 和体积应变 ε_m,进一步得到试样最大的剪应力 τ_e 和最大剪应变 γ_e。

图 11 为试样[20]的平均应力-体积应变和剪应力-剪应变关系曲线。从图中可知,钙质砂的表观体积模量和剪切模量均明显小于石英砂,特别是初始压缩阶段,石英砂的体积模量和剪切模量为钙质砂的 10 倍以上。随着荷载的增大,应力应变进入屈服和硬化阶段,此时钙质砂和石英砂的体积模量分别约为 38、168 MPa,而剪切模量分别约为 50、195 MPa,石英砂的压缩模量和剪切模量是钙质砂的 4 倍。

综上所述,冲击荷载作用下钙质砂的动态力学性能与石英砂存在较大的差异,不能将已有石英砂的研究结果直接用于钙质砂。此外,砂土的相对密实度、颗粒级配和含水率对其力学性能影响较大,因此不同相对密实度、颗粒级配和含水率下钙质砂的动态力学性能有待进一步研究。

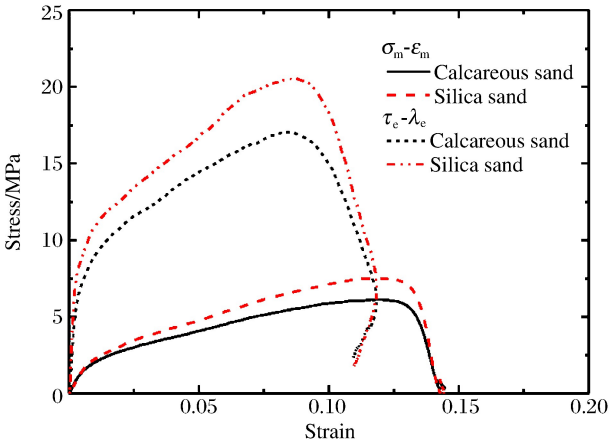


图 11 平均应力与体积应变、剪应力与剪应变曲关系

Fig. 11 Relationships between mean stress and volumetric strain and between shear stress and shear strain

4 结论与建议

开展了南海钙质砂和福建石英砂的对比 SHPB 实验,探讨了实现钙质砂试样应力平衡和恒应变率的条件,初步分析了一维压缩状态下钙质砂的动态特性,得到以下主要结论:

(1)通过严格装样技术可以减小实验设备产生的误差,减小试样厚度、增加子弹长度、选择合适的 SHPB 杆和整形器等是实现砂样应力平衡和恒应变率的主要手段。

(2)由于试样相对密实度 $D_r=90\%$,试样的应变范围小于 0.12,粒间孔隙被压实,应力应变表现出硬化特性,但尚未达到颗粒大量破碎重分布产生的压实阶段。试样厚度越大,应力应变的非线性特性越明显,厚度为 50 mm 的试样出现震荡,主要原因可能是套筒结构和惯性效应的影响。在相同的密实度和加载条件下,钙质砂压缩模量约为钙质砂的 10%,强度约为石英砂的 30%。

(3)弹性阶段石英砂的体积模量和剪切模量均为钙质砂的 10 倍以上,随着荷载的增大,塑性段石英砂的体积模量和剪切模量是钙质砂的 4 倍。

(4)冲击荷载作用下钙质砂的动态力学性能与石英砂存在较大的差异,因此,不能将已有石英砂的研究结果直接用于钙质砂。

参考文献:

[1] 卢芳云,陈荣. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京:科学出版社,2013.

[2] FLETCHER E, POOROOSHASB H. Response of a clay sample to low magnitude loads applied at high rate[C]// Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials. Albuquerque, New Mexico, 1967:781-86.

[3] EINAV I. Breakage mechanics—Part I: theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007,55(6): 1274-1297.

[4] LU H, LUO H, KOMADURI R. Dynamic compressive response of sand under confinements[C]// The SEM Annual Conference. Albuquerque, New Mexico, 2009.

[5] MARTIN B E, CHEN W. The high-rate behavior of a fine grain sand[C]// Proceedings of the SEM Annual Conference. Albuquerque, New Mexico, 2009:1-6.

[6] SONG B, CHEN W. Dynamic stress equilibration in split Hopkinson pressure bar tests on soft materials[J]. Experimental Mechanics, 2004,44(3):300-312.

[7] FELICE C W, GAFFNEY E S, BROWN J A, et al. Dynamic high stress experiments on soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 1987,10(4):192-202.

[8] BARR A D, CLARKE S D, PETKOVSKI M, et al. Modelling split Hopkinson pressure bar tests on quartz sand [C]// The Annual Postgraduate Research Student Conference-2015. Sheffield, UK, 2015:38-42.

[9] BRAGOV A M, LOMUNOV A K, SERGEICHEV I V, et al. Determination of physicomechanical properties of soft soils from medium to high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(2008):967-976.

[10] 皮爱如，沈兆武，王肖钧. 土壤冲击特性的实验研究[J]. 振动与冲击，2003,22(3):28-29.
PI Airu, SHEN Zhaowu, WANG Xiaojun. Experimental study of impact characteristic of soil[J]. Journal of Vibration and Shock, 2003,22(3):28-29.

[11] SONG B, CHEN W, LUK V. Impact compressive response of dry sand[J]. Mechanics of Materials, 2009,41 (6):777-785.

[12] 郑文，徐松林，胡时胜. 侧限压缩下干燥砂的动态力学性能[J]. 爆炸与冲击，2011,31(6):619-623.
ZHENG Wen, XU Songlin, HU Shisheng. Dyanmic mechanical properties of dry sand under confined compression[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(6):619-623.

[13] 江浩. 钙质砂中桩基工程承载形状研究[D]. 武汉：中国科学院武汉岩土力学研究所，2009.

[14] 佘殷鹏，吕亚茹，李峰，等. 珊瑚砂剪切特性试验分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版)，2017,18(1):29-35.
SHE Yinpeng, LYU Yaru, LI Feng, et al. Experimental analyses of shearing mechanism of coral sand[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017,18(1):29-35.

[15] 单华刚，汪稔. 钙质砂中的桩基工程研究进展述评[J]. 岩土力学，2000,21(3):299-308.
SHAN Huagang, WANG Ren. Development of study on pile in calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000,21(3):299-308.

[16] 张家铭，蒋国盛，汪稔. 颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学，2009,30(7):2043-2048.
ZHANG Jiaming, JIANG Guosheng, WANG Ren. Research on influences of particle breakage and dilatancy on shear strength of calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(7):2043-2048.

[17] 袁征，余克服，王英辉，等. 珊瑚礁岩土的工程地质特性研究进展[J]. 热带地理，2016,36(1):1-7.
YUAN Zheng, YU Kefu, WANG Yinghui, et al. Research progress in the engineering geological characteristics of coral reefs[J]. Tropical Geography, 2016,36(1):87-93.

[18] LV Y, LI F, LIU Y, et al. Comparative study of coral sand and silica sand in creep under general stress states [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017,54(11):1601-1611.

[19] 徐学勇，汪稔，王新志，等. 饱和钙质砂爆炸响应动力特性试验研究[J]. 岩土力学，2012,33(10):2953-2959.
XU Xueyong, WANG Ren, WANG Xinzhi, et al. Experimental study of dynamic behavior of saturated calcareous sand due to explosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(10):2953-2959.

[20] XIAO Y, LIU H, XIAO P, et al. Fractal crushing of carbonate sands under impact loading[J]. Géotechnique Letter, 2016,6(3):1-6.

[21] 赵凯，王肖钧，刘飞，等. 多孔材料中应力波的传播[J]. 爆炸与冲击，2011,31(1):107-112.
ZHAO Kai, WANG Xiaojun, LIU Fei, et al. Propagation of stress wave in porous material[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(1):107-112.

[22] DAVIES E D, HUNTER S C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hokinson

pressure bar[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963,11(3):155-179.

[23] LUO H, LU H, COOPER WL, et al. Effect of mass density on the compressive behavior of dry sand under confinement at high strain rates[J]. Experimental Mechanics, 2011,51(9):1499-1510.

Experimental techniques of SHPB for calcareous sand and its dynamic behaviors

LYU Yaru[1,2,3], WANG Mingyang[3], WEI Jiuqi[3], LIAO Bin[3]

(1. *College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing* 210098, *Jiangsu, China*;

2. *Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong* 999077, *China*;

3. *State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*)

Abstract: This paper conducted 11 split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests on the calcareous sand sampled from a calcareous reef in China and silica sand sampled from Fujian Provence of China. The relative density is 90%. The strain-rate history, strain history, and stress-strain curves were obtained for sand specimens with three thicknesses including 10 mm, 30 mm and 50 mm. It is found that test error can be reduced by standard procedure in sand preparation. The stress equilibrium and constant strain rate can be achieved by changing the thickness of specimen, the length of striker and the pulse shaper. With an identical relative density and loading condition, the volumetric modulus and shear modulus of calcareous sand is approximately 10% of the silica sand; and the strength of the calcareous sand is approximately 30% of the silica sand. Therefore, the results of existing silica sand can not be directly applied to calcareous sand because of their large discrepancies.

Keywords: calcareous sand; split Hopkinson pressure bar; impact behavior; stress-train curve

(责任编辑 曾月蓉)