

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0015

钙质砂的准一维应变压缩试验研究*

文 祝¹, 邱艳宇^{1,2}, 紫 民³, 赵章泳², 王明洋^{1,2}

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 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;

3. 海军 91058 部队, 海南 三亚 572000)

摘要: 利用 $\varnothing 100$ mm 的 Hopkinson 压杆研究了不同预压力条件下, 受侧限约束的钙质砂在 $500 \sim 800 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围、 $0 \sim 200$ MPa 压力范围内的动态力学特性, 并利用 HUT106D 万能材料试验机研究了相同条件钙质砂在 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 应变率、 $0 \sim 120$ MPa 压力范围内的静态力学特性。研究发现, 当再次加载超过一定值后, 预压力对钙质砂力学特性的影响不大; Tait 物态方程可以描述钙质砂的静态容变关系及高压下的动态容变关系; 钙质砂的体积压缩过程存在应变率效应。

关键词: 钙质砂; Hopkinson 压杆; 预压; 物态方程; 应变率效应

中图分类号: O341 **国标学科代码:** 13015 **文献标志码:** A

钙质砂是富含碳酸钙或其他难溶碳酸盐类物质的一种海洋沉积物, 普遍分布于我国南沙群岛珊瑚礁坪和潟湖表层。20 世纪 70 年代中期, 一系列岛礁工程地质性质的现场测试和室内试验中发现钙质砂的土力学性质与陆相沉积的石英砂有很大差异, 主要表现为高孔隙率、高内摩擦角、低强度值和颗粒易破碎等^[1]。作为岛礁上的主要岩土类介质之一, 钙质砂的基本物理/力学性质、地基/桩基工程特性和动力学特性也越来越受到人们的关注^[2]。对钙质砂的研究主要集中在静力学性质^[3-5]和颗粒破碎^[6-7]等方面, 动力学研究主要是针对循环荷载的作用^[8-10]以及钙质砂场地的液化特性^[11-12]等。但从军事防御和灾害预防的角度, 岛礁工程在爆炸、冲击和地震等荷载作用下的响应与钙质砂在高应变率作用下的动态力学特性密切相关, 而国内外对钙质砂的动态力学特性的研究很少^[13]。

分离式霍普金森压杆 (SHPB) 被认为是 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内研究材料动态力学特性最有效的实验技术, 近年来广泛被用来研究砂土的冲击力学性能。Song 等^[14]利用 SHPB 试验技术研究了约束条件对干燥石英砂动态力学特性的影响, Brogov 等^[15]利用 SHPB 试验技术研究了细颗粒软土在应变率为 $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 范围内的一维压缩特性, 郑文等^[16]利用 SHPB 试验技术研究了预压条件对干燥石英砂一维压缩特性的影响, 发现应变率对干燥石英砂的压缩性能影响不大。虽然 SHPB 试验技术已广泛应用于动态加载下陆相沉积砂土的力学特性研究, 但针对钙质砂动态力学特性的研究未见报道。

本文中, 参考李英雷等^[17]测量吉帕量级及以下低体积量材料压力-体应变关系的被动围压 SHPB 试验方法, 利用 $\varnothing 100$ mm SHPB 装置进行了不同预压力的钙质砂在高应变率下的动态一维压缩试验, 并将结果与钙质砂的静态一维压缩试验进行对比, 分析预压力对钙质砂力学特性的影响以及钙质砂的静态容变关系和高压下的动态容变关系。

1 试验准备

1.1 钙质砂原样

试验所使用的钙质砂取自南海岛礁, 主要成分是珊瑚和贝类的破碎沉积物。钙质砂原样含大量海

* 收稿日期: 2018-01-11; 修回日期: 2018-03-22

基金项目: 岩土力学与工程国家重点实验室资助课题 (Z017015)

第一作者: 文 祝 (1990—), 男, 博士研究生, wenzhu@njust.edu.cn;

通信作者: 赵章泳 (1992—), 男, 博士研究生, zhaozhangyong1@126.com。

水及许多大直径的珊瑚和贝类等,为控制钙质砂的均匀性,试验前先将原样自然风干,然后对原样进行筛选,保留以上粒径为 0.075~2 mm 的成分,经过筛分的钙质砂如图 1 所示,含水率为 0.56%。根据《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999)中颗粒分析试验的筛分法测得筛选后钙质砂的颗分曲线见图 2。根据该规范进行钙质砂的相对密度试验,测得其最大和最小干密度分别为 1.317 和 1.136 g/cm³。



图 1 钙质砂样

Fig. 1 Calcareous sands

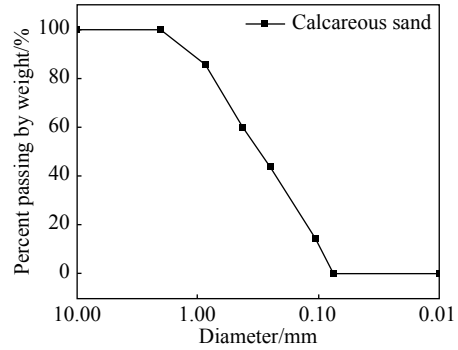


图 2 钙质砂颗分曲线

Fig. 2 Particle distribution curve of calcareous sands

1.2 一维压缩原理

钙质砂为散体介质,制备钙质砂试样需要对其约束成型。本文使用厚壁圆筒约束钙质砂,形成钙质砂试样在一维压缩下的应力应变状态,如图 3 所示,主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 和主应变 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为:

$$\sigma_1 = \sigma_x, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_x, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \approx 0 \quad (1)$$

式中: σ_x 和 ε_x 分别是由实验得到的钙质砂试样的轴向应力和应变, σ_r 是对应的径向应力。

钙质砂试样在动态一维压缩下的轴向应力可由 SHPB 试验中透射杆上的应变数据换算得到,静态一维压缩下的轴向应力可由静态一维压缩试验中轴向力数据换算得到,但钙质砂试样的径向应力不能直接测得。为了在平面应变条件下得到一维压缩状态下钙质砂试样的径向应力, Ravi-Chandar 等^[18] 使用弹性理论中无限长厚壁圆筒的计算方法,求得筒壁内压 p_i 与外表面应变满足以下关系:

$$p_i = [(r_o/r_i)^2 - 1]E_c\varepsilon_h/2 \quad (2)$$

式中: E_c 为厚壁圆筒的弹性模量, ν_c 为泊松比, ε_h 为厚壁圆筒外壁对应钙质砂试样中心位置的应变计测得的环向应变, r_o 和 r_i 分别为厚壁圆筒的外径和内径。假设约束试样的厚壁圆筒处于弹性状态,则其环向应变 ε_θ 与厚壁圆筒外表面环向应变 ε_h 的关系如下^[19]:

$$\varepsilon_\theta = 0.5\varepsilon_h[(1-\nu_c) + (1+\nu_c)(r_o/r_i)^2] \quad (3)$$

但是在试验过程中厚壁圆筒实际上是有限长的,根据 Forquin 等^[20] 的分析,处于被动围压受力状态的试样还会导致厚壁圆筒不均匀凸出变形,因此需要通过数值模拟对平均压力和体应变的测量结果进行参数修正,李英雷等^[17] 也采用数值模拟对金属材料的准一维应变试验进行了修正。本文中为了得到钙质砂试样中的径向应力 σ_r ,选用高强度钢制厚壁圆筒,在确保试样准一维应变和厚壁圆筒弹性变形的前提下,根据式(2)计算内筒壁压力 p_i ,然后通过数值模拟的方法考虑该计算值与实际内筒壁压力之间折算系数 k ,得到钙质砂试样中的径向应力为:

$$\sigma_r = p_i/k \quad (4)$$

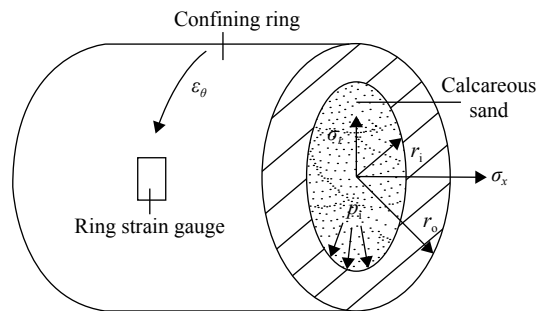


图 3 一维压缩应力应变示意图

Fig. 3 One dimensional compressive of stress-strain

假设侧向压力系数 $\xi=\sigma_r/\sigma_x$, 则试件中的最大剪应力 τ 和平均应力 p 可写成仅与轴向应力 σ_x 和侧向压力系数 ξ 相关的形式:

$$\begin{cases} \tau = (\sigma_x - \sigma_r)/2 = \sigma_x(1 - \xi)/2 \\ p = (\sigma_x + 2\sigma_r)/3 = \sigma_x(1 + 2\xi)/3 \end{cases} \quad (5)$$

1.3 钙质砂装样

本次试验制备钙质砂试样时, 使用厚壁圆筒 (confining ring) 加上、下两个钢垫块的形式约束钙质砂试样成型, 如图 4 所示。厚壁圆筒内径为 100 mm, 外径 150 mm, 高 110 mm, 使用 45 号钢制作并淬火。钢垫块两端平整, 外径为 $\varnothing 100$ mm, 公差为 0.1 mm, 高 60 mm, 可沿着厚壁圆筒内壁轴向自由滑动。钢垫块均使用 35CrMnSiA 制作, 与所用 100 mm SHPB 装置入射杆及透射杆的材料相同。限位环 (limit ring) 高 20 mm, 内径为 100 mm, 主要作用是下面的钢垫块预留一定高度, 方便预压后进行 SHPB 试验。钙质砂试样的装样直径与厚壁圆筒的内径相同, 为了进行对比, 本文所有试验中钙质砂试样的初始装样密度均为 1.263 g/cm^3 。

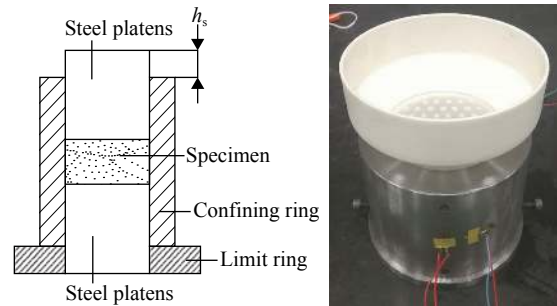


图 4 钙质砂装样示意图

Fig. 4 Calcareous sand sample

依据图 4 进行装样。先在平台上依次放置限位环、下钢垫块以及厚壁圆筒, 钢垫块与厚壁圆筒之间紧密接触并涂抹凡士林进行润滑, 然后称取定量钙质砂利用“砂雨法”^[21]进行装样, 抹平钙质砂试样表面并放置上钢垫块, 用橡胶锤轻敲厚壁圆筒及上面的钢垫块, 边敲击边用游标卡尺测量上面的钢垫块表面的高度 h_s , 通过多点测量控制钙质砂试样的高度, 进而控制钙质砂试样的装样密度, 并调整上、下两块钢垫块表面平行。

2 试验过程

2.1 静态一维压缩试验

静态一维压缩试验和 SHPB 试验中的预压试验都在 HUT106D 微机控制电液伺服万能试验机上进行, 如图 5 所示。为了进行对比, 所有工况的加载速率均为 3 mm/min, 换算得钙质砂试样的应变率为 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。该试验机采集到的原始数据为轴向力 $F(t)$ 和位移 $L(t)$, 根据钙质砂试样的横截面积 A_s 和初始高度 L_s 换算出钙质砂试样中的轴向应力 σ_x 和应变 ε_x 分别为:

$$\sigma_x(t) = F(t)/A_s, \quad \varepsilon_x(t) = L(t)/L_s \quad (6)$$

静态一维压缩过程中, 钙质砂试样对应厚壁圆筒外侧的环向应变 ε_h 由该位置处的环向应变计测得, 但是由于钙质砂高孔隙率、低强度值和颗粒易破碎的基本力学特性, 所以钙质砂试样的可压缩性很强,

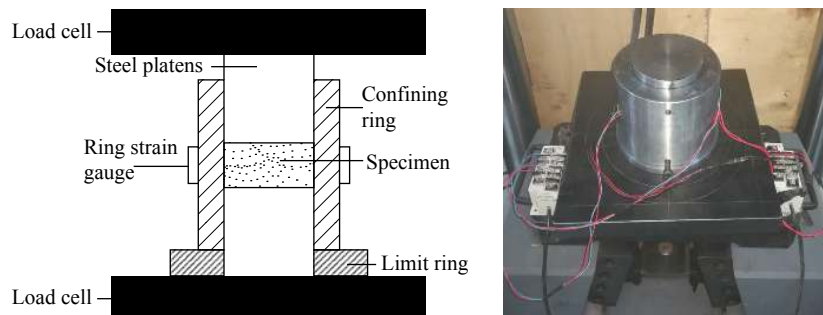


图 5 静态试验示意图

Fig. 5 Static test

这导致厚壁圆筒外部的环向应变很小。为提高应变计的信噪比,在静态和动态一维压缩试验中,厚壁圆筒外侧布置的环向应变计均使用中航电测的 SB3.8-120-P-2 高灵敏度半导体应变计,应变极限为 6×10^{-3} 。应变采集仪为 DH5922 动态信号测试分析系统。静态一维压缩试验包括单调加载试验和加卸载试验,考虑到 HUT106D 微机控制电液伺服万能试验机的加载能力,单调加载试验的轴向峰值压力为 120 MPa,加卸载试验进行了峰值压力依次为 10、20、30、60、120 MPa 的重复加载。

2.2 SHPB 试验

SHPB 试验基本过程为: SHPB 系统初始静止,当子弹杆以某一速度撞击入射杆时,会在入射杆中产生一个入射脉冲 $\varepsilon_i(t)$,当入射脉冲到达入射杆与钙质砂试样的界面时,一部分脉冲作用在试样并透过透射杆产生一个透射脉冲 $\varepsilon_t(t)$,另一部分脉冲 $\varepsilon_r(t)$ 反射回入射杆。根据一维弹性波假设和均匀性假设,可得到试样的轴向平均应力 $\sigma_x(t)$ 、应变 $\varepsilon_x(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}_x(t)$:

$$\begin{cases} \sigma_x(t) = [A/(2A_s)]E[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \\ \varepsilon_x(t) = (c/L_s) \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \\ \dot{\varepsilon}_x(t) = (c/L_s)[\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: E 和 c 分别为杆的杨氏模量和弹性波速, $c=(E/\rho)^{1/2}$, A 为杆的横截面积。

本次试验所用钙质砂含有较大颗粒的成分,为保证试样均匀性,动态一维压缩试验使用陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室的 $\varnothing 100$ mm SHPB 系统。此外还采用了波形整形技术,如图 6 所示,通过延长入射脉冲的上升沿时间实现钙质砂试样的动态应力平衡。该 $\varnothing 100$ mm SHPB 系统的子弹杆、入射杆和透射杆分别长 800、4 000 和 2 800 mm,均使用 35CrMnSiA 制作,密度 $\rho=7.85$ g/cm³,杨氏模量 $E=218$ GPa,一维应力弹性波速 $c=5\,282$ m·s⁻¹。由于钙质砂的声阻抗远低于 SHPB 试验系统入射杆和透射杆的声阻抗,因此透射杆中的透射脉冲很小,为了提高信噪比,入射杆和透射杆也使用 SB3.8-120-P-2 高灵敏度半导体应变计并分别置于各自中点处。在进行 SHPB 试验前分别对钙质砂试样进行 0、10、20 和 30 MPa 的预压,经预压后的钙质砂试样再次测量高度,然后通过预留螺栓锁紧上、下钢垫块,待将钙质砂试样置于入射杆和透射杆之间之后再松开螺栓,并将上、下钢垫块分别对齐入射杆和透射杆,如图 7 所示。SHPB 试验工况如表 1 所示,每个工况均至少进行一次有效重复试验。

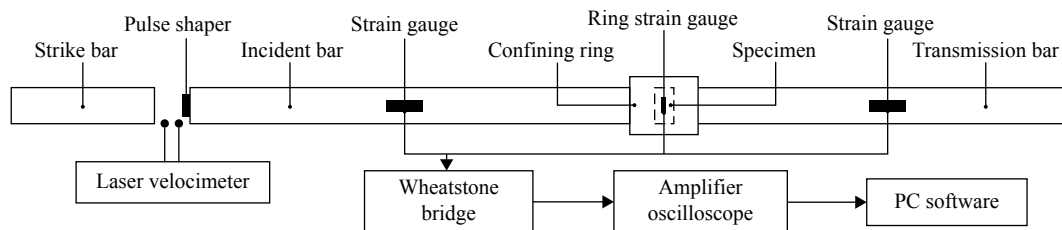


图 6 SHPB 系统示意图

Fig. 6 The SHPB test system

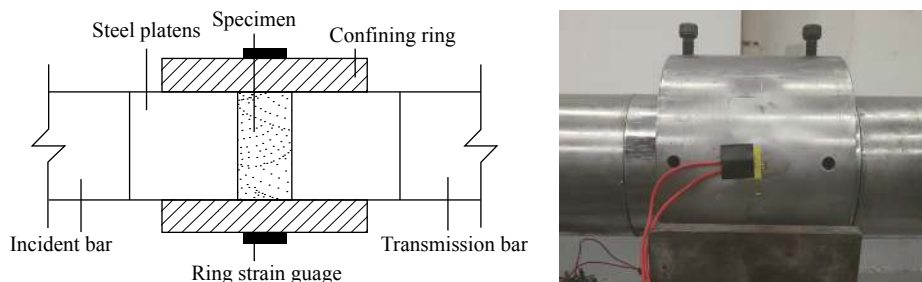


图 7 SHPB 系统上的钙质砂试样

Fig. 7 Calcareous sand sample on SHPB system

表 1 SHPB 试验工况表
Table 1 SHPB test table

工况	质量/g	初始长度/mm	预压力/MPa	压后长度/mm	压后密度/(g·cm ⁻³)	子弹速度/(m·s ⁻¹)	应变率/s ⁻¹
1	125	12.6	0	12.6	1.263	7.1	778
2	125	12.6	0	12.6	1.263	7.13	797
3	250	25.2	20	19.7	1.616	15.61	513
4	250	25.2	20	19.7	1.616	15.59	506
5	250	25.2	10	21.3	1.494	15.71	569
6	250	25.2	10	21.3	1.494	15.68	551
7	250	25.2	20	19.4	1.641	21.55	647
8	250	25.2	20	19.4	1.641	21.52	626
9	250	25.2	30	18.4	1.73	21.41	590
10	250	25.2	30	18.4	1.73	21.38	561

3 试验结果分析

图 8 为工况 10 的原始波形中 SHPB 试验得到的原始数据为入射杆、透射杆和环向的应变时程数据。该工况是应变测量值最大的工况, 其最大值接近 2×10^{-3} , 而所使用应变计的极限应变为 6×10^{-3} , 因此应变数据有效。图 9 给出了预压值分别为 0、10、20 和 30 MPa 工况下的钙质砂应力平衡状态。

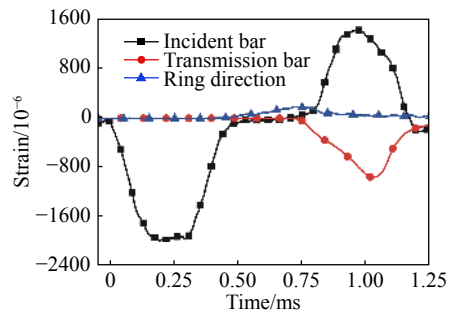


图 8 典型原始波形图

Fig. 8 Typical original waveforms

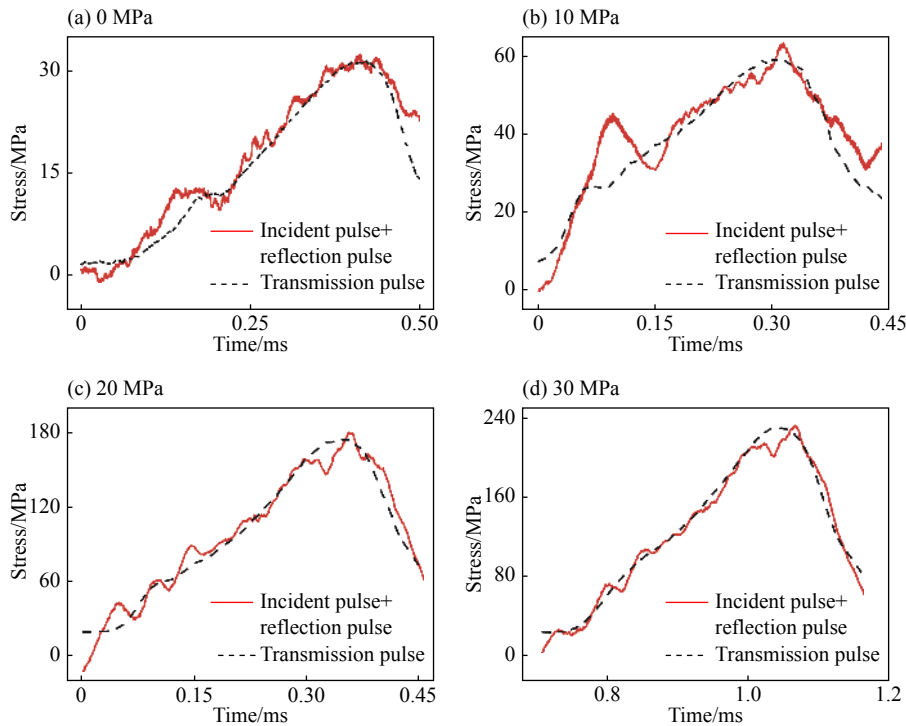


图 9 不同预压值工况下钙质砂的动态应力平衡状态

Fig. 9 Dynamic stress balance state of calcareous sand under different preloading conditions

3.1 预压对钙质砂压缩特性的影响

静态一维压缩试验得到单调加载和加卸载条件下钙质砂的应力应变关系,如图10所示。加卸载条件下的再次加载相当于经过预压后的加载,每次加载对应初始应变均不同,但是当再次加载超过上次加载的峰值压力后,钙质砂的应力应变关系与单调加载的试验结果完全重合。这说明在静态一维压缩条件下,当再次加载应力超过钙质砂的预压力后,钙质砂的应力应变关系与其受预压力的过程无关。

假设动态一维压缩下钙质砂也有上述特征,通过不同预压力下钙质砂的 SHPB 试验得到了钙质砂在高应力和高应变率条件下的应力应变关系,如图11所示,应变率范围为 $500\sim 800\text{ s}^{-1}$ 。观察各个试验工况发现当应力超过约2倍预压力的时候,钙质砂进入较为一致的应力应变趋势,且预压力值相邻的工况之间的应力应变关系具有一定的重复性,说明钙质砂在高应力作用下的应力应变关系与前面经历的较低应力的静态加卸载过程无关。

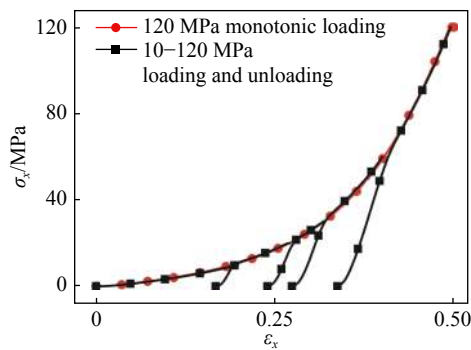


图10 静态试验的应力应变关系

Fig. 10 Stress-strain relationship of the static test

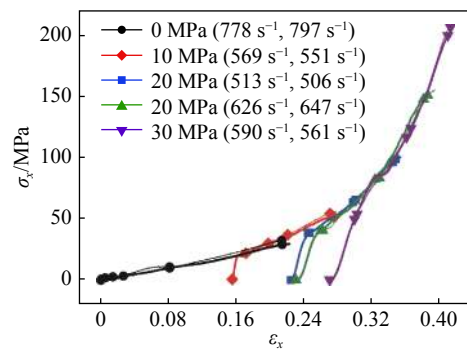


图11 SHPB试验的应力应变关系

Fig. 11 Stress-strain relationship of SHPB test

3.2 侧压力系数

试验中厚壁圆筒使用45钢制作并淬火,屈服强度为355 MPa,而试验工况中最大的轴向应力约为200 MPa,因此可认为厚壁圆筒处于弹性状态。45钢的泊松比 $\nu_c=0.3$,则根据式(3)可由厚壁圆筒外表面测得的环向应变 ε_θ 计算得到钙质砂试样的环向应变 ε_θ ,以工况10为例,计算得到 $\varepsilon_\theta=0.34\times 10^{-3}$,而该工况中钙质砂试样的轴向应变 $\varepsilon_x=0.41$,将其余所有工况均进行如上相同的计算并对比,发现钙质砂的轴向应变比环向应变至少大3个数量级,因此可以认为本次试验中钙质砂试样处于准一维应变状态。

在厚壁圆筒的弹性假设和试样准一维应变状态的条件下,本文中使用的 ANSYS 中的弹性模型对厚壁圆筒进行建模。厚壁圆筒材料为45钢,体积模量为151 GPa,剪切模量为82 GPa。设置厚壁圆筒为自由边界,圆筒内壁施加不同厚度的径向均布荷载模拟试样实时厚度 h 。结合本次试验中钙质砂试样的厚度,模拟试验工况中取 h 为1.2~2.6 cm,间隔0.2 cm进行数值计算,并根据数值计算点拟合得到折算系数 k 与试样实时厚度 h 的关系:

$$k = -0.0248h^2 + 0.2466h - 0.0587 \quad (8)$$

根据式(2)、(4)和(8),结合 SHPB 试验中各个试验工况下钙质砂试样的实时厚度 h 可计算钙质砂试样的径向应力 σ_r ,将其与对应工况中钙质砂试样的轴向透射应力 σ_x^* 进行对比,就可得到该工况下侧压力系数 ζ ,以工况10的对比为例,如图12所示。

根据该方法, SHPB 试验的每个试验工况都可以得到一个侧压力系数 ζ ,将各个试验工况的侧压力系数与动态加载峰值压力的关系进行统计,如图13所示。Bragov 等^[22] 总结大量砂土的试验数据认为在一定压力范围内,砂土的平均应力与最大剪应力的比值可认为是一定值,则结合式(3)可知侧压力系数也可以取为一定值。因此由图13的拟合结果可知本次 SHPB 试验的侧压力系数可取 $\zeta_1=0.495$ 。静态一维压缩试验侧压力系数的计算方法与 SHPB 试验相同,经计算得到 $\zeta_2=0.38$ 。

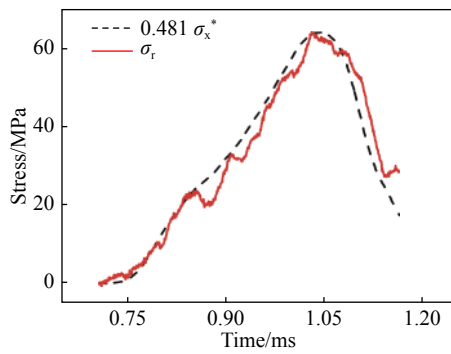


图 12 径向应力和轴向透射应力

Fig. 12 Comparison of radial stress and axial transmission

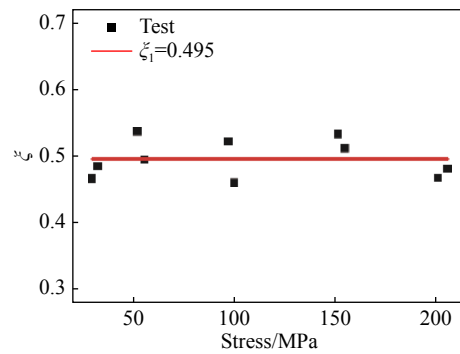


图 13 侧压力系数

Fig. 13 Side pressure coefficient

3.3 钙质砂静-动态压缩特性对比

对于岩土类材料, 温度变化对其压力影响不大, 这类介质一般称为正压性介质, 因此其压力-密度关系式(也可换算为压力与体应变的关系式)即为其完整的物态方程。Tait 物态方程最早由苏格兰物理学家 Tait 提出并用于描述液体的压力密度关系, 后续学者研究发现该物态方程也适合于描述许多固体材料, 其压力与体应变的一般关系形式为^[23-26]:

$$p = p_0 + K_0[(1 - \varepsilon_v)^{-n} - 1]/n \quad (9)$$

式中: p_0 为标准大气压, ε_v 为体应变, K_0 是体积模量, n 为材料常数。

根据图 10 和 11, 结合式(3)和侧压力系数 $\zeta_1=0.495$ 及 $\zeta_2=0.38$, 可以分别计算得到钙质砂在动态和静态一维压缩下的平均应力和体积应变的关系如图 14 所示。

结合式(9)对动态和静态一维压缩下的钙质砂的平均压力和体应变关系进行拟合, 分别得到动态和静态的物态方程:

$$\begin{cases} p_1 = 0.101 + 6.42[(1 - \varepsilon_v)^{-5.85} - 1], & R_1^2 = 0.9952 \\ p_2 = 0.101 + 5.38[(1 - \varepsilon_v)^{-3.846} - 1], & R_2^2 = 0.9979 \end{cases} \quad (10)$$

对于静态一维压缩试验, 在试验结果的应力范围内基本符合 Tait 物态方程; 对于动态一维压缩, 在低压范围内由于土骨架“来不及”变形, 因此显示出了“屈服”的特征, 土骨架屈服后, 其受力变形特征又显示出“硬化”特征, 此时采用 Tait 物态方程可以完全描述其容变关系。由图 14 可以看出, 在相同变形的条件下, 动态一维压缩下钙质砂的平均应力明显高于静态一维压缩。对于密实固体而言, 一般认为其畸变律是应变率相关, 而容变律是与应变率无关的^[27]。但是钙质砂是高孔隙率、易破碎的颗粒材料, 在强荷载作用下, 钙质砂的变形主要来自于颗粒的破碎以及颗粒的滑移、滚转而导致的结构重组, 而这些现象都是与颗粒运动变形速度相关的, 因此钙质砂的体积压缩过程表现出应变率效应。

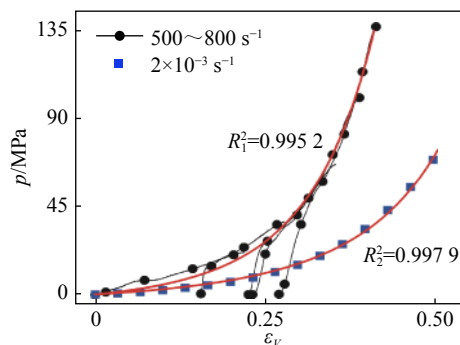


图 14 平均应力和体积应变的关系

Fig. 14 The relationship between the average stress and the volumetric strain

4 结 论

本文进行了钙质砂的 SHPB 试验和静态一维压缩试验研究发现: (1) 在动态或静态一维压缩条件下, 当再次加载超过一定值之后可以认为钙质砂的应力应变关系与初始受压状态无关; (2) Tait 物态方程可以描述钙质砂的静态容变关系及高压下的动态容变关系; (3) 钙质砂动、静态容变关系对比表明钙质砂的体积压缩过程存在应变率效应。

参考文献:

- [1] 刘崇权, 单华刚, 汪稔. 钙质土工程特性及其桩基工程 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1999(3): 331–335.
LIU Chongquan, SHAN Huagang, WANG Ren. The geotechnical characters of calcareous soils and the pile foundation engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999(3): 331–335.
- [2] 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.
- [3] COOP M R. The mechanics of unconsolidated carbonate sands [J]. *Géotechnique*, 1990, 40(40): 607–626.
- [4] AIREY D W. Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119(9): 1379–1398.
- [5] 刘崇权, 杨志强, 汪稔. 钙质土力学性质研究现状与进展 [J]. *岩土力学*, 1995, 16(4): 74–84.
LIU Chongquan, SHAN Huagang, WANG Ren. The present condition and development in studies of mechanical properties of calcareous [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1995, 16(4): 74–84.
- [6] 张家铭, 汪稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展 [J]. *岩土力学*, 2003(s2): 661–665.
ZHANG Jiaming, WANG Ren, ZHANG Yangming, et al. Advance in studies of soil grain crush [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003(s2): 661–665.
- [7] 张家铭, 邵晓泉, 王霄龙, 等. 沉桩过程中钙质砂颗粒破碎特性模拟研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(1): 272–278.
ZHANG Jiaming, SHAO Xiaquan, WANG Xiaolong, et al. Discrete element simulation of crushing behavior of calcareous sands during pile jacking [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(1): 272–278.
- [8] KAGGWA W S, BOOKER J R, CARTER J P. Residual strains in calcareous sand due to irregular cyclic loading [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117(2): 201–218.
- [9] KNODEL P C, AL-DOURI R H, POULOS H G. Static and cyclic direct shear tests on carbonate sands [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1992, 15(2).
- [10] 虞海珍, 汪稔, 赵文光, 等. 波浪荷载下钙质砂孔压增长特性的试验研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2006, 28(11): 86–89.
YU Haizhen, WANG Ren, ZHAO Wenguang, et al. Experimental research on development pattern of pore water pressure of carbonate sand under wave loads [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006, 28(11): 86–89.
- [11] 虞海珍. 复杂应力条件下饱和钙质砂动力特性的试验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. DOI: 10.7666/d.d048504.
- [12] 刘汉龙, 胡鼎, 肖杨, 等. 钙质砂动力液化特性的试验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2015(6): 707–711.
LIU Hanlong, HU Ding, XIAO Yang, et al. Test study on dynamic liquefaction characteristics of calcareous sand [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015(6): 707–711.
- [13] 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): 402–414.
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): 402–414.
- [14] SONG B, CHEN W, LUK V. Impact compressive response of dry sand [J]. *Mechanics of Materials*, 2009, 41(6): 777–785.
- [15] BRAGOV A M, LOMUNOV A K, SERGEICHEV I V, et al. Determination of physic mechanical properties of soft soils from medium to high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(9): 967–976.
- [16] 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. Dynamic mechanical properties of dry sand under confined compression [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(6): 619–623.
- [17] 李英雷, 叶想平, 张祖根, 等. 一种适用于低体模量材料的被动围压 SHPB 实验设计 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(6): 667–672.
LI Yinglei, YE Xiangping, ZHANG Zugen, et al. A design of passive confined SHPB experiment for materials with low bulk modulus [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(6): 667–672.
- [18] RAVI-CHANDAR K, MA Z. Inelastic Deformation in Polymers under Multi axial Compression [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2000, 4(4): 333–357.
- [19] LUO H, LU H, COOPER W L, 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.

- [20] FORQUIN P, GARY G, GATUINGT F. A testing technique for concrete under confinement at high rates of strain [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(6): 425–446.
- [21] JACKSON J J G. Uniaxial Strain Testing of Soils for Blast-Oriented Problems [J]. 1968.
- [22] BRAGOV A M, GRUSHEVSKY G M, LOMUNOV A K. Use of the Kolsky Method for Studying Shear Resistance of Soils [J]. 1994, 1: 253–259.
- [23] LYAKHOV G M, LUCHKO I A, PLAKSII V A, et al. Spherical detonation waves in a solid multi component viscoplastic medium [J]. *Soviet Applied Mechanics*, 1986, 22(5): 490–495.
- [24] VOVK A A, LUCHKO I A, LYAKHOV G M, et al. Cylindrical blast waves in soils [J]. *Journal of Applied Mechanics & Technical Physics*, 1986, 27(4): 571–576.
- [25] HENRYCH J, ABRAHAMSON G R. The dynamics of explosion and its use [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979: 73–74.
- [26] KRYMSKII A V, LYAKHOV G M. Waves from an underground explosion [J]. *Journal of Applied Mechanics & Technical Physics*, 1984, 25(3): 361–367.
- [27] 王礼立, 胡时胜, 杨黎明, 等. 材料动力学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017: 95–120.

Experimental study on quasi-one-dimensional strain compression of calcareous sand

WEN Zhu¹, QIU Yanyu^{1,2}, ZI Min³, ZHAO Zhangyong², WANG Mingyang^{1,2}

- (1. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*
2. *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China;*
3. *Navy 91058 Force, Sanya 572000, Hainan, China*)

Abstract: The 100 mm split Hopkinson pressure bar was used to study the dynamic mechanical properties of the calcareous sand confined by confinement at strain rates ranging from 500 to 800 s⁻¹ and pressures ranging from 0 to 200 MPa under different pre-pressures. The static mechanical properties of calcareous sand under the same conditions were investigated in the strain rate of 2×10⁻³ s⁻¹ and the pressure range of 0–120 MPa by using HUT106D universal material testing machine. It is found that the pre-pressure value has little effect on the mechanical properties of calcareous sand when the load is more than a certain value; Tait equation of state can describe the relationship between hydrostatic pressure and volume strain of calcareous sand in static state and the dynamic state under high pressure; the volumetric compression process of calcareous sand shows a strain rate effect.

Keywords: calcareous sand; split Hopkinson pressure bar; pre-pressure; equation of state; strain rate effect

(责任编辑 王小飞)