

DOI: 10.11779/CJGE2021S2044

被动围压条件下砂土动态压缩特性试验研究

张 高¹, 李 亮^{*1}, 姜锡权², 孮贻恒¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 合肥姜水动态力学实验技术有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要: 应用直径为 50 mm 的分离式霍普金森压杆 (SHPB) 试验装置开展了被动围压条件下砂土试样的动态压缩试验, 研究了具有不同相对密实度以及不同含水率的试样在中高应变率条件下的动力响应特性, 并研究了密实度状态和含水率对砂土试样的动态压缩特性的影响。试验结果表明: ①动态压缩条件下砂土的动力响应表现出明显的应变率效应。对于干砂试样, 随着应变率的增大其峰值应力呈现出逐渐升高的趋势。对含水的湿砂试样, 随着应变率的增大其峰值应力呈现出先升高后降低的趋势。随着应变率的增大, 干砂和湿砂试样的峰值应变均呈现先增大后减小的趋势。②砂土试样的密实度状态对其动态压缩特性具有较为显著的影响。随着相对密实度的增大, 试样的峰值应力和对应的峰值应变均呈现上升的趋势。③砂土试样的含水率对其动态压缩特性具有一定影响。随着含水率的增大, 试样的峰值应力和对应的峰值应变呈现先增大后减小的趋势。存在一个含水率的界限值, 在该界限值的两侧峰值应力和峰值应变随含水率的变化呈现不同的趋势。此试验条件下, 对于相对密实度为 0.9 的砂样, 该含水率的界限值为 6%。

关键词: 砂土; 动态压缩特性; 被动围压; 相对密实度; 含水率

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0184-05

作者简介: 张 高(1996—), 男, 硕士。主要从事砂土动力特性试验研究。E-mail: 519804084@qq.com。

Experimental study on dynamic compressive behaviors of sandy soil under passive confining pressures

ZHANG Gao¹, LI Liang¹, JIANG Xi-quan², LUAN Yi-heng¹

(1. Key Laboratory of Urban and Security and Disaster Engineering Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing

100124, China; 2. Jiangshui Dynamic Mechanics Experimental Technology Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract: The dynamic compressive experiments on sands specimens under passive confining pressures are carried out using a 50 mm split Hopkinson pressure bar. The dynamic response behaviors of sands with different relative densities and water content at medium high strain rates are investigated. The effects of the relative density and water content on the dynamic compressive behaviors of sand are also studied. It is indicated by the test results that: (1) The dynamic response of sands under the dynamic compressive action shows obvious strain rate effect. The peak stress of dry sand increases with the increase of strain rate, and the peak stress of wet sand first increases and then decreases with the increase of strain rate. The peak strain of dry and wet sands first increase and then decrease with the increase of strain rate. (2) The density of sand has an important effect on its dynamic compressive behaviors. The peak stress and peak strain of sand increase with the increase of relative density. (3) The water content of sand can impact its dynamic compressive properties in a certain extent. The peak stress and strain first increase and then decrease with the increase of water content. There is a dividing water content and the varying trend of the peak stress and strain are different when the water content is larger or less than the dividing water content. For the tests performed in the current study, the dividing water content is 6% for the sand specimens with the relative density of 0.9.

Key words: sand; dynamic compressive behavior; passive confining pressure; relative density; water content

0 引言

作为常见的土工材料, 砂土在各种工程场地及土工建筑物中广泛存在。其将承受多种静力和动力荷载的作用, 如自重、上部建筑结构荷载、施工荷载、地震动荷载等。在一些特殊情况下, 砂土将承受爆炸、冲击等强动载的作用, 处于高应变率的加载条件之下, 如强夯, 以砂土修筑的野战工事受到炮弹攻击时等。

砂土在高应变率加载条件下的力学响应特性与静力加载条件及中低应变率条件下有较为显著的差异, 需展开专门的研究。另一方面, 处于不同场地及环境条件中的砂土, 其物理力学状态, 如含水率、密实度状态等会具有一定的差异。砂土的物理力学状态对其在高

收稿日期: 2021-08-16

*通信作者 (E-mail: liliang@bjut.edu.cn)

速动载作用条件下动力响应特性的影响也需要开展研究。实际的工程场地中的砂土处于不同的埋置深度, 其受到一定的围压作用, 针对砂土动力特性的试验须以适当的方式对试样施加围压以模拟实际的应力状态。

分离式霍普金森压杆(SHPB)是研究工程材料在中高应变率($10^2\sim10^4\text{s}^{-1}$)条件下动态压缩性能的有效实验手段之一, 是冲击动力学实验技术的重要组成部分^[1]。近年来国内外学者利用分离式霍普金森压杆对砂土的动力力学特性进行了的研究。国外学者 Felice 等^[2]研究干砂的动力学特性后认为初始孔隙比是影响其在高应变率条件下压缩特性的主要因素, 当压缩变形不能够抵消初始孔隙时, 干砂的应变率效应并不明显。Song 等^[3]利用不同材料的套筒来改变砂土的侧限条件, 并针对不同相对密实度的干砂进行 SHPB 试验, 认为砂土的动态压缩特性主要受相对密实度和侧限条件的影响, 且套筒材料强度和试样轴向承载力成正比关系。Lu 等^[4]的研究结论也认为密实度是影响砂土动态压缩特性的主要因素; 朱志武等^[5]利用 SHPB 试验技术, 研究了土体在不同应变率条件下的冲击动力性能, 发现土体有明显的应变率效应。与静载条件相比, 冲击载荷下土的动强度和动模量均有很大的提高; 吕亚茹等^[6]分别开展了南海钙质砂和福建石英砂的 SHPB 试验, 试验结果表明冲击荷载作用下钙质砂的动力学性能与石英砂存在较大的差异。郑文等^[7]利用 SHPB, 得到不同应变率和不同预压条件下干砂的动态压缩应力-应变曲线, 并发现侧限条件下干砂的动态压缩特性受应变率影响不大, 预压会造成干砂试样压缩过程的起点平移。

由于砂土动力特性的复杂性, 目前不同学者基于试验研究得到的结论并不完全一致。本文将应用 SHPB 试验装置开展砂土试样的动态压缩试验, 研究砂土在中高应变率条件下的动力响应特性, 并研究密实度状态和含水率对砂土动态压缩特性的影响。

1 试验概述

1.1 试样的基本性质

本文试验对象为福建标准砂, 其主要成分为 SiO_2 。对试验砂样进行筛分, 选取粒径为 $1\sim2\text{ mm}$ 的粗砂进行试验。其主要的物理参数如表 1 所示。

表 1 试验砂样的物理参数

Table 1 Physical parameters of test sand specimens

G_s	ρ_{dmax} $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	ρ_{dmin} $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	d_{50} /mm
2.6	1.755	1.600	1.4

注: G_s 为相对质量密度, ρ_{dmax} 为最大干密度, ρ_{dmin} 为最小干密度, d_{50} 为中值粒径。

1.2 SHPB 试验装置

本次动态压缩试验采用合肥姜水动态力学实验技

术有限公司第一实验室的 SHPB 装置进行。该套试验装置主要包括冲击子弹、入射杆、透射杆、测速器以及应力应变量测系统等部分。该装置的组成如图 1 所示。入射杆和透射杆的直径为 50 mm, 材质为 LV4 铝合金。入射杆长度为 4000 mm, 透射杆长度为 3250 mm。杆的密度约为 2700 kg/m^3 , 波速为 5090 m/s 。冲击子弹的材质和直径与入射杆相同, 长度为 400 mm, 质量约为 8.5 kg。试件安装在入射杆与透射杆之间, 通过拉紧系于入射杆和透射杆上的橡胶皮带对试件施加预紧力, 保证试件与入射杆和透射杆的紧密接触。采用压缩空气驱动冲击子弹撞击入射杆实现对试件的动态压缩加载, 不同的冲击速度可通过采用不同的气压来实现, 冲击速度可由测速器测出。

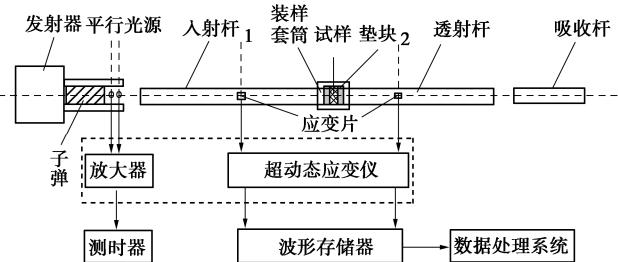


图 1 SHPB 装置组成示意图

Fig. 1 Components of SHPB device

1.3 试样的制作与安装

砂土是散粒体材料, 须置于套筒中进行动力加载试验。砂土试样受到轴向的动态压缩作用时, 其径向有膨胀的趋势, 由于套筒的约束作用, 试样处于被动围压的约束状态。本试验采用内径为 50.05mm 的钢质套筒。另采用一对直径为 50 mm 的 LV4 铝合金圆柱垫块及一对钢质底座与套筒组合来控制试样的厚度。套筒上设置螺栓用于固定。套筒、垫块及底座如图 2 所示。在 SHPB 试验中, 试件的纵向和径向的惯性效应会对应力应变结果产生一定的影响^[8], 试件的长径比宜取 0.4~0.6。根据 Song^[9]等对软材料应力平衡影响因素的分析, 试样越薄越容易达到应力平衡, 本次试验选取试样的长径比为 0.5, 即试样的长度为 25 mm。试样的长度与直径确定以后, 则试样的体积可以确定。在固定体积的条件下取不同的试样质量, 可得到具有不同密实度状态的砂土试样。不同的含水率则通过在试样中加入不同质量的水得到。

试样的装样步骤如图 3 所示: ①将套筒安装在底部支座上, 放入底部垫块; ②在套筒中装入试验的砂样, 为保证试样的均匀性, 采用分层装样法进行装样, 将称量好的砂样根据质量平均分为 3 份, 分 3 层装入, 每装一层用抹平器将试样的表面抹平, 并根据预先测定好的击实次数对试样进行击实; ③放入顶部垫块并安装顶部支座, 用击实器锤击顶部支座使其与套筒紧密接触从而达到对试样厚度的控制; ④拧紧上下螺栓

固定套筒，取下上下两个底座并将装有试样的套筒平放静置一段时间。在两个垫块的表面涂抹凡士林以减小摩擦，将装有试样的套筒两端分别套入入射杆与透射杆，并保证试样两端分别与入射杆和透射杆紧密接触，即可对试样施加冲击压缩荷载。



图 2 装样套筒及附属垫块和底座

Fig. 2 Sampling sleeve and bearing block and base

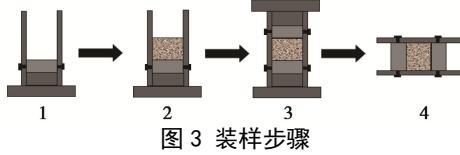


图 3 装样步骤

Fig. 3 Steps of specimen fixing

1.4 试验工况

采用不同的冲击速度对试样进行动态压缩加载，研究试样动力响应的应变率效应，并研究具有不同含水率和密实度状态的试样动力响应特性的差异。试样的密实度状态用相对密实度 D_r 进行表征， D_r 取 0.1, 0.5, 0.9 分别对应松散、中密和密实 3 种状态。试验的加载工况列于表 2 中，不同参数组合的试验工况共 40 种。为保证试验的准确性，每种加载工况的试验重复 3 次，取最优值。

表 2 试验加载工况

Table 2 Loading cases of tests

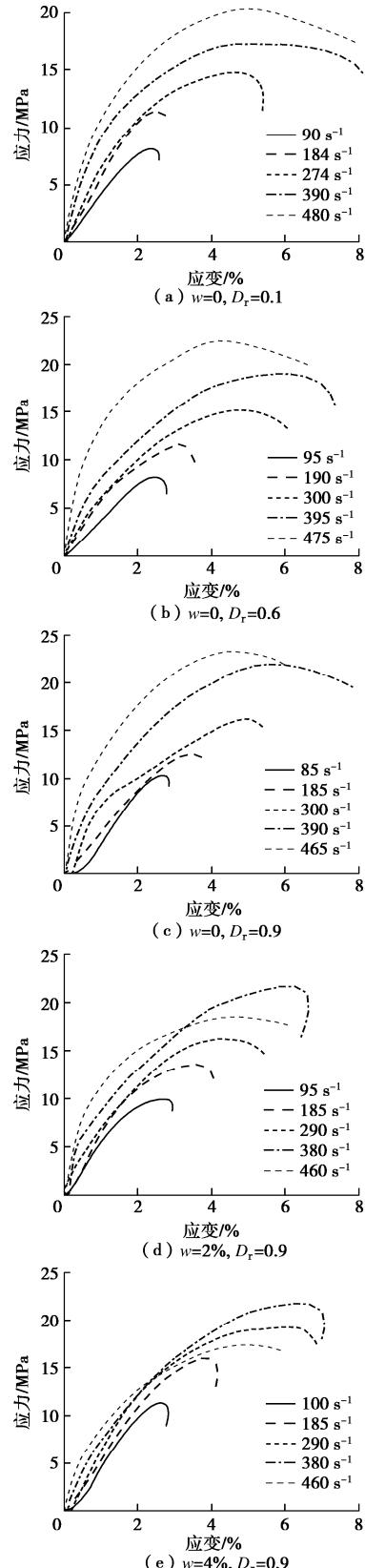
组号	含水率 $w/\%$	相对密实度 D_r	冲击速度 v $/(m \cdot s^{-1})$
1 组	0	0.1	
		0.5	6, 7, 9, 11, 12.5
		0.9	
2 组	2, 4, 6, 8, 10	0.9	6, 7, 9, 11, 12.5

2 试验结果与分析

2.1 应变率效应

不同应变率条件下砂土试样动态压缩的应力-应变曲线的对比如图 4 所示。由图可知，动态压缩条件下砂土的动力响应表现出明显的应变率效应，即在不同应变率条件下砂土的动力响应特性表现出较为显著的差异。对于干砂试样，随着应变率的增大其峰值应力呈现出逐渐升高的趋势，这反映了干砂的应变率强化效应。对含水的湿砂试样，随着应变率的增大其峰值应力呈现出先升高后降低的趋势。这是由于水的存在使砂土发生软化，使其动强度降低。另一方面，无论

是干砂还是湿砂试样，随着应变率的增大，其峰值应变呈现先增大后减小的趋势。这是由于当应变率小于一定值不会导致试样中发生大量颗粒破碎，试样的变形能力随应变率的增大而提高。当应变率过大时，导致试样中大量颗粒破碎，破碎的细小颗粒填充了试样中的部分孔隙，使其变形能力降低。



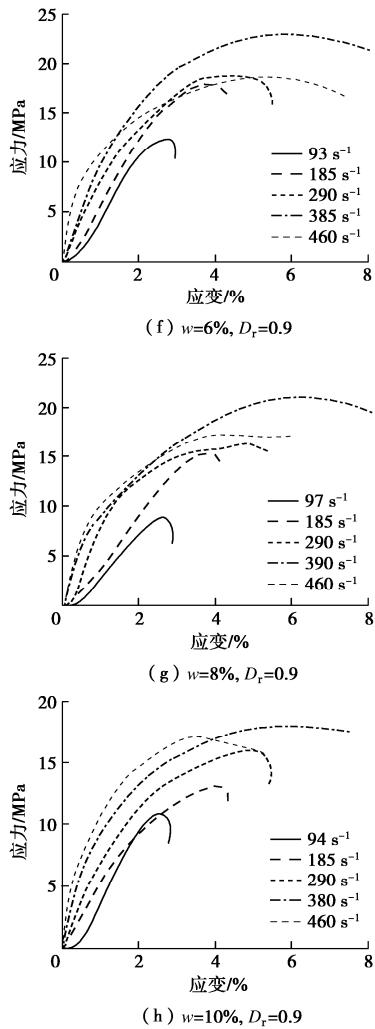


图 4 不同应变率条件下砂样应力 - 应变曲线对比

Fig. 4 Comparison of stress-strain curves of sand specimens at different strain rates

2.2 相对密实度的影响

不同相对密实度砂样的峰值应力和峰值应变随应变率的变化分别如图 5 所示。图 5 (a) 表明具有不同相对密实度的砂样其峰值应力均随应变率的增大而增大，表现出明显的应变率效应。在相同的应变率下，随着相对密实度的增大砂样的峰值应力呈现上升的趋势。这是由于随着相对密实度的增大，土体内部孔隙变小，土颗粒之间的摩擦力和咬合力均有所增强，土体强度提高，抵抗动荷载的能力增强。由图 5 (b) 可知，在试验所取的应变率范围内，随着应变率的增大，具有不同相对密实度的砂样的峰值应变呈现先上升后下降的趋势。原因在于较小的应变率条件下砂样的变形能力随应变率的增大而提高；当应变率过大时，砂样中大量的颗粒发生破碎，破碎产生的细小颗粒填充了砂样中的部分孔隙，使其变形能力降低。

2.3 含水率的影响

不同应变率条件下砂样的峰值应力及峰值应变随含水率的变化分别如图 6 所示。由图 6 可知，峰值应力和对应的峰值应变随着含水率的增大并不呈现单调

变化，而是呈现先增大后减小的趋势。即存在一个含水率的界限值，当含水率小于该值时，峰值应力和峰值应变随含水率的增大而增大；当含水率大于该值时，峰值应力和峰值应变随含水率的增大而减小。在本文的试验条件下，对于相对密实度 $D_r=0.9$ 的砂样，该含水率的界限值为 6%。

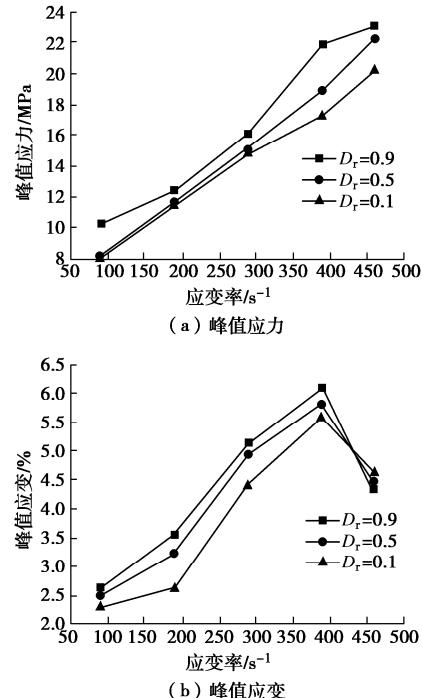


图 5 不同相对密实度的砂样动力响应随应变率的变化

Fig. 5 Dynamic response vs. strain rate for sand specimens with different relative densities

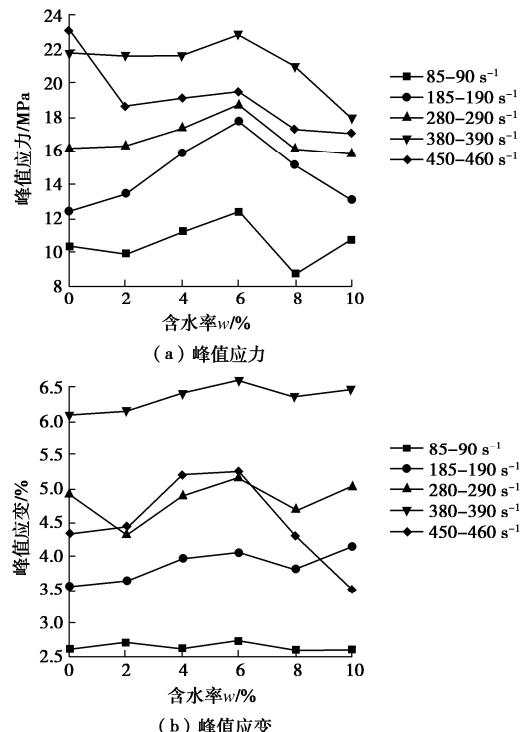


图 6 不同应变率条件下砂样动力响应随含水率的变化

Fig. 6 Dynamic response vs. water content for sand specimens at different strain rates

3 结 论

本文应用直径为 50 mm 的 SHPB 试验装置开展了被动围压条件下标准砂试样的动态压缩试验, 研究了具有不同相对密实度(0.1, 0.5, 0.9)以及不同含水率(0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%)的试样在中高应变率条件下的动力响应特性, 并研究了密实度状态和含水率对砂土试样的动态压缩特性的影响。试验结论如下:

(1) 动态压缩条件下砂土的动力响应表现出明显的应变率效应, 在不同应变率条件下其动力响应特性具有较为显著的差异。对于干砂试样, 随着应变率的增大其峰值应力呈现出逐渐升高的趋势。对含水的湿砂试样, 随着应变率的增大其峰值应力呈现出先升高后降低的趋势。无论是干砂还是湿砂试样, 随着应变率的增大, 其峰值应变呈现先增大后减小的趋势。

(2) 砂土试样的密实度状态对其动态压缩特性具有较为显著的影响。随着表征密实度状态的相对密实度 D_r 的增大, 试样的峰值应力和对应的峰值应变均呈现上升的趋势。即随着试样密实度的提高, 其抵抗动态压缩的能力增强。

(3) 砂土试样的含水率对其动态压缩特性具有一定程度的影响。随着含水率的增大, 试样的峰值应力和对应的峰值应变并不呈现单调变化, 而是呈现先增大后减小的趋势。存在一个含水率的界限值, 在该界限值的两侧峰值应力和峰值应变随含水率的变化呈现不同的趋势。在本文的试验条件下, 对于相对密实度 $D_r=0.9$ 的砂样, 该含水率的界限值为 6%。

参 考 文 献:

- [1] 卢芳云, 陈 荣, 林玉亮. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (LU Fang-yun, CHEN Rong, LIN Yu-liang. Hopkinson bar techniques[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))

- [2] FELICE C W, GAFFNEY S, BROWN J A. Extended split-Hopkinson bar analysis for attenuating materials[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, **117**(5): 1119 – 1135.
- [3] SONG B, CHEN W N, LUK V. Impact compressive response of dry sand[J]. Mechanics of Materials, 2009, **41**(6): 777 – 785.
- [4] LU H B, LUO H Y, COOPER W L, et al. Effect of particle size on the compressive behavior of dry sand under confinement at high strain rates[C]//Dynamic Behavior of Materials, Volume 1, 2013. DOI:10.1007/978-1-4614-4238-7_67.
- [5] 朱志武, 宁建国, 刘 煦. 冲击载荷下土的动态力学性能研究[J]. 高压物理学报, 2011, **25**(5): 444 – 450. (ZHU Zhi-wu, NING Jian-guo, LIU Xu. Dynamic mechanical behaviors of soil under impact loads[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, **25**(5): 444 – 450. (in Chinese))
- [6] 吕亚茹, 王明洋, 魏久淇, 等. 钙质砂的 SHPB 实验技术及其动态力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2018, **38**(6): 1262 – 1270. (LYU Ya-ru, WANG Ming-yang, WEI Jiu-qi, et al. Experimental techniques of SHPB for calcareous sand and its dynamic behaviors[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, **38**(6): 1262 – 1270. (in Chinese))
- [7] 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 Song-lin, HU Shi-sheng. Dynamic mechanical properties of dry sand under confined compression[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, **31**(6): 619 – 623. (in Chinese))
- [8] DAVIES E D H, HUNTER S C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963, **11**(3): 155 – 179.
- [9] SONG B, CHEN W. Dynamic stress equilibration in split Hopkinson pressure bar tests on soft materials[J]. Experimental Mechanics, 2004, **44**(3): 300 – 312.

(编校: 胡海霞)