

冲击荷载作用下干砂动力特性试验研究^①

张艳萍^{1,2}, 陈育民^{1,2}, 王维国^{1,2}

(1.土力学与堤坝教育部重点实验室,江苏 南京 210098; 2.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:对常规的霍普金森压杆装置进行改进,使其可以应用于干性砂土试样的冲击试验。针对干砂开展冲击试验,得到应变率在 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内稳定的入射波、反射波和透射波的波形图,并用橡胶膜作为波形整形器以获得更明显的透射波信号。结果表明:在较高应变率荷载作用下干砂没有明显的应变率效应;对于等厚度砂土试样,应变率随着加载气压的增大而增大,且增大趋势明显;在同等加载条件下应变率随着砂土试样厚度的增大而减小。

关键词:霍普金森压杆(SHPB);干砂;应变率;波形整形器;冲击荷载;动力特性

中图分类号:TU411.8

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2015)增刊2-0131-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.增刊2.0131

Test Study on the Dynamic Behavior of Dry Sands Subjected to Impact Loading

ZHANG Yan-ping^{1,2}, CHEN Yu-min^{1,2}, WANG Wei-guo^{1,2}

(1.Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2.College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: A split Hopkinson pressure bar (SHPB) was appropriately modified to study the dynamic behavior of dry sand. A stable, incident, reflective, and transmitted waves under the strain rates of $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ were obtained and a rubber membrane barrier was found to facilitate transmission of the pressure wave. The results showed that strain rate effect can be ignored for dry sand at high strain rate. For sand samples of the same thickness, the strain rates were increased as the load increased. The experimental results suggested an upward trend in strain rate. Under the identical loading conditions, as the thickness of sand samples was increased, the resulting strain rate decreased.

Key words: split Hopkinson pressure bar (SHPB); dry sand; strain rate; pulse shaper; impact loading; dynamic behavior

0 引言

砂土在高应变率下的动态力学响应信息在很多方面都存在很大的应用潜能,如采矿、地下工程、地下爆炸等。虽然国内外针对砂土材料动态本构关系的研究已有不少成果,但是目前已有的试验方法,如周期加荷的动三轴试验、动扭剪试验、振动台试验等,能够涉及的应变率仍主要集中在小于 10^1 s^{-1} 的

范围内^[1-4]。对较高应变率条件下土体动态力学性能的描述相对较少,试验数据的缺乏使得目前基本没有精确的理论或数值方法来准确预测土体在高应变率加载下的动态力学行为。

近些年,霍普金森压杆(SHPB)试验技术因其在 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 高应变率范围内的突出加载优势被

① 收稿日期:2015-04-21

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51379067);长江学者和创新团队发展计划(IRT1125);2012年江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目

作者简介:张艳萍(1991-),女,硕士研究生,研究方向为土动力学与岩土地震工程。E-mail: zyphehai@163.com。

引入到岩土工程领域^[5-6],然而压杆试验的开展主要集中于黏性土、冻土等。如刘俊新等^[7]测试了不同压实度和含水率泥岩粉碎土在应变率范围为 $600\sim 2\ 500\text{ s}^{-1}$ 内的动态力学性能;张海东等^[8]对人工冻土进行试验,发现其明显的应变率效应;朱志武等^[9]用石蜡包裹试样的方法对散黄土进行了冲击试验。但对更为松散的砂土,由于存在松散材料的不均匀性、波速相对较低、波阻抗低等问题,试验仍存在较大技术瓶颈。

本文通过分离式霍普金森压杆装置预制金属套筒和垫块,并采用不同波形整形器,对干性砂土在 $10^2\sim 10^3\text{ s}^{-1}$ 高应变率范围内的动态性能进行初步研究,以探讨散体材料的冲击性能及 SHPB 装置对测试散体材料性能的效果。

1 试验装置和方案

1.1 试验装置及原理

试验采用杆径为 74 mm 的直锥变截面分离式 SHPB 压杆装置^[10],如图 1 所示。

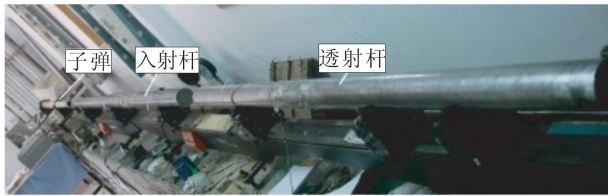


图 1 分离式霍普金森压杆实物图

Fig.1 The split Hopkinson pressure bar

试验时,子弹以一定的速度沿轴向冲击入射杆,在入射杆内产生一个弹性压缩应力波(入射波),置于两杆之间的试件在该脉冲作用下发生高速塑性变形。当应力波到达试样时,一部分将反射一个波返回到入射杆中(反射波),另一部分则经过试样透射到透射杆中(透射波),最后由阻尼器吸收。

试验中测得的入射波、反射波和透射波分别为 ϵ_i 、 ϵ_r 、 ϵ_t 。根据一维应力和均匀性假定^[11],利用二波法^[12]计算出试件上的应变率 $\epsilon'(t)$ 、应变 $\epsilon(t)$ 和动态平均应力 $\sigma(t)$,如式(1)~(3)所示。进而可得到试件材料的动态应力-应变关系。

$$\text{应变率: } \epsilon'(t) = -\frac{2c}{l_0}\epsilon_r \quad (1)$$

$$\text{应变: } \epsilon(t) = -\frac{2c}{l_0}\int_0^t \epsilon_r dt \quad (2)$$

$$\text{应力: } \sigma(t) = \frac{A}{A_0}E\epsilon_t \quad (3)$$

式中: E 为压杆弹性模量; C 为压杆弹性波速; A 为

压杆横截面积; A_0 和 l_0 分别为试件横截面积和试件长度。

1.2 试验装置改进

为了使干性砂土试样满足 SHPB 试验技术的两个基本假定的要求,利用能够限制试样侧向变形的钢制套筒和垫块对传统的分离式 SHPB 装置进行改进。改进后的压杆装置如图 2 所示。

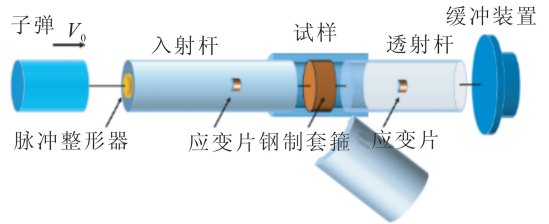


图 2 改进后的分离式 SHPB 装置示意图

Fig.2 The modified split Hopkinson pressure bar

1.3 试样制作

土体试样采用自然条件下风干的细砂,粒径区间为 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$ 。试验时,首先将套筒竖直放置于水平铁板上,将一个垫块放置于套筒下端内部,再将一定质量的试样均匀撒到套筒内,经初步锤击压实后,将另一垫块缓慢地自由滑落到贴近试样。直到垫块停止滑动,套筒内空气排出,再次轻轻击实,保证空气排尽(试验中套筒和垫块均用润滑油润滑)。通过测量计算出试样的厚度和干密度。最后将套筒装置置于入射杆和透射杆之间。

1.4 试验方案

试验共分两组,分别采用退火紫铜片(C)和橡皮膜(R)作为波形整形器。为验证试验的准确性和可靠性,设计了重复试验(RT)。具体试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案

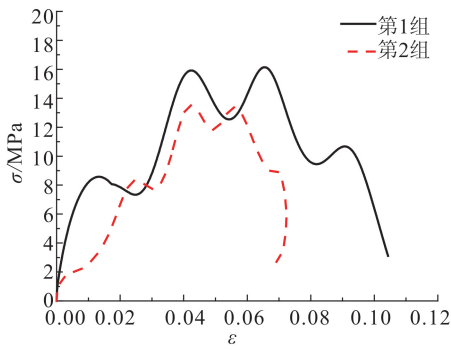
Table 1 Testing program

序号	质量/g	厚度/mm	冲击气压/MPa		
C1	60	8.92	0.35	0.4	0.45
C2	70	10.33	0.35	0.4	0.45
C3	80	11.72	0.35	0.4	0.45
R1	60	8.92	0.35	0.4	0.45
R2	70	10.33	0.35	0.4	0.45
R3	80	11.72	0.35	0.4	0.45
RT1	60	8.92	-	0.4	-
RT2	70	10.33	-	0.4	-
RT3	80	11.72	-	0.4	-

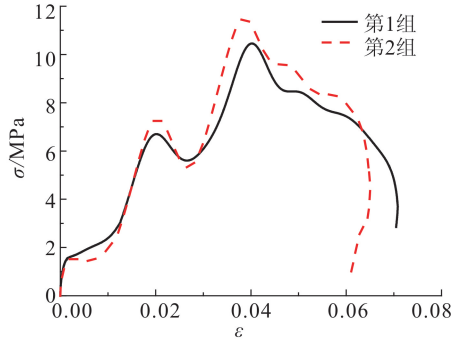
2 试验结果及分析

2.1 试验重复性的验证

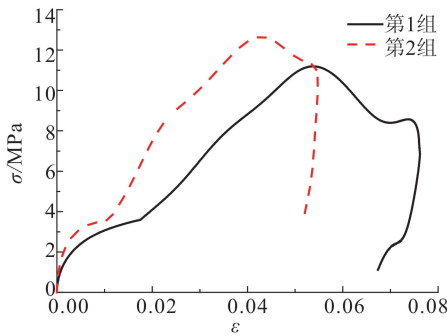
重复试验得到的应力-应变(σ - ϵ)关系曲线,如



(a) 试样厚度=8.92 mm



(b) 试样厚度=10.33 mm



(c) 试样厚度=11.72 mm

图 3 0.4 MPa 加载气压下的重复性试验(退火紫铜片为波形整形器)

Fig.3 Replicated test under a load pressure of 0.4 MPa (Using pulse shaper made of annealed red copper)

图 3 所示。从图中可以看出,重复试验中各厚度试样加载时 $\sigma-\epsilon$ 的发展规律基本一致。图 3(a)和(c)在应力幅值方面的差异主要是由于制样过程中套筒内土样不均匀或装样过程中的扰动所致,但其反映的应力随应变的规律基本一致。

2.2 试样厚度的确定

传统 SHPB 装置适宜描述金属等均一延性材料,而砂土由于其组成复杂,土颗粒堆积不能保证完全的均匀性,同时厚度较大的试样会使得应力平衡延迟并引起初始非均匀变形,因此在测定砂土冲击特性之前需先确定试样的厚度。

试验中根据经验,随机对厚度分别为 8、11、12.2、14.52 和 15.1 mm 的试样进行预试验,得到了较好的入射波、反射波和透射波的波形图,以及较好的恒应变率和 $\sigma-\epsilon$ 关系曲线。图 4 为预试验中厚度为 12.2 mm 试样的冲击加载波形图。

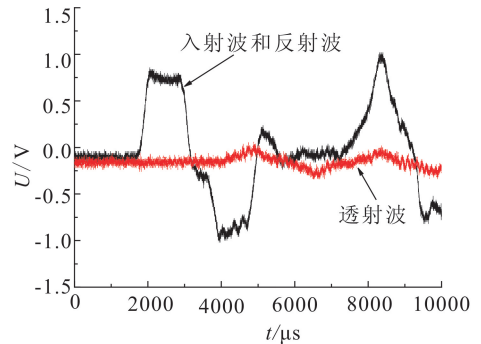
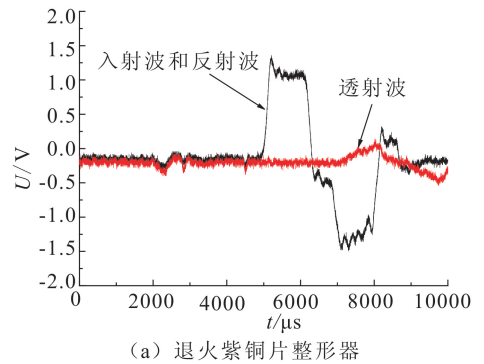
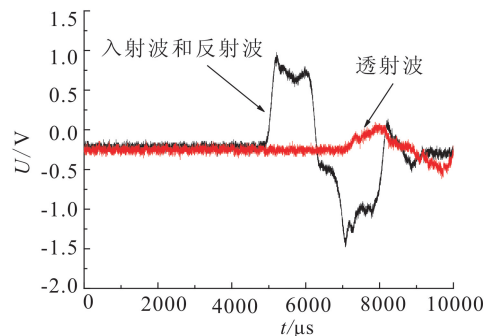


图 4 原始波形图(试样厚度 12.2 mm, 冲击气压 0.4 MPa)

Fig.4 The original waveform (Sample thickness is 12.2 mm, and impact pressure is 0.4 MPa)



(a) 退火紫铜片整形器



(b) 橡胶膜整形器

图 5 不同波形整形器波形图(试样厚度 8.92 mm, 加载气压 0.45 MPa)

Fig.5 Waveforms with different shapers (Sample thickness is 8.92 mm, and load pressure is 0.45 MPa)

再根据预试验中砂土试样的质量,进行动力冲击加载,基本确定试样的厚度为 10 mm。

2.3 波形整形器的分析

在 SHPB 试验中,为解决研究混凝土、土体等

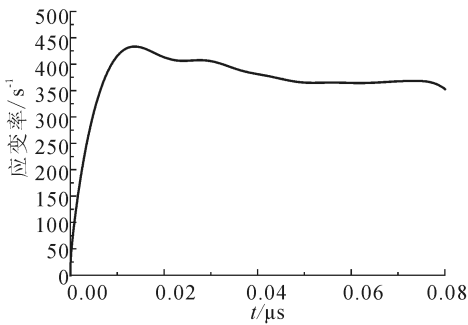
材料时的应力应变均匀性问题,往往采用波形整形技术将矩形波改造成三角波。既可消除高频振荡,拉长波的上升时间,又能明显改善加载波的质量^[13]。试验分别选用退火紫铜片和橡胶膜两种材料。下面选取一对原始波形图进行对比分析(图5)。

从图5中可以看出,加载波波型明显,上升时间较慢,说明所选用的材料均能很好地延长试样中应力波的上升时间,起到波形整形器的作用。相同条件下,用橡胶膜整形器得到的透射波信号要比退火紫铜片更加稳定,波形的效果相对较好。图5(a)中显示数据可知,相对退火紫铜片而言,选用橡胶膜作为整形器,其入射波和反射波的信号相对较弱。由于SHPB试验中透射波的信号较难捕捉,为放大透射信号,用橡胶膜作为整形器是个很好的选择。

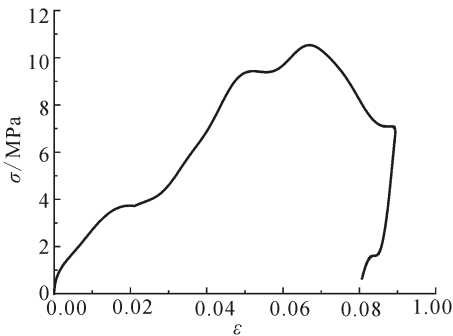
2.4 加载速率分析

2.4.1 应变率和 σ - ϵ 关系曲线

SHPB试验中 σ - ϵ 关系的处理沿用了结构研究上的SHPB软件。图6(a)为经SHPB软件光滑后得到的应变率曲线。从图中可以看到,在0.02~0.08应变率范围内可看成是恒应变率,应变率基本维持在350~375 s⁻¹。图6(b)为 σ - ϵ 关系曲线。从图



(a) 应变率随时间的变化曲线



(b) σ - ϵ 关系曲线

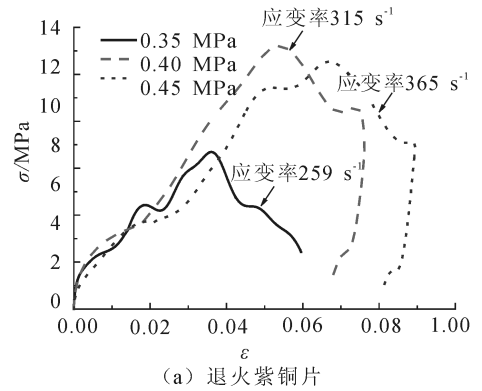
图6 数据处理图(试样厚度11.72 mm,加载气压0.45 MPa)

Fig.6 Data processing (Sample thickness is 11.72 mm, and load pressure is 0.45 MPa)

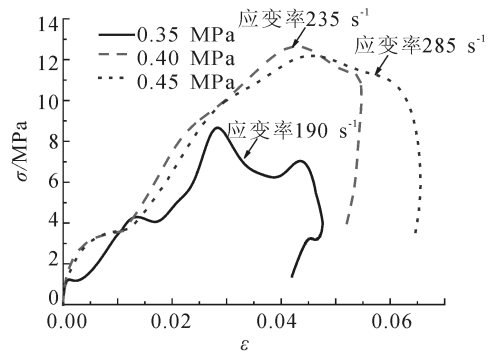
中可以看出,当试样的轴向应变达到0.07后试样便遭到破坏。

2.4.2 应力-应变关系对比分析

图7为试样厚度为11.72 mm时采用不同波形整形器获得的 σ - ϵ 曲线。从图中明显可以看出:



(a) 退火紫铜片



(b) 橡胶膜

图7 不同气压加载下的应力-应变曲线(试样厚度11.72 mm)

Fig.7 Stress-strain curves under different load pressures (Sample thickness is 11.72 mm)

(1) 加载气压较小时,试样较早进入破坏阶段,且峰值应力较小;而加载气压增大时,试样 σ - ϵ 曲线的相似性大大增加,峰值破坏应力也基本相当,可认为试样对应变率不是很敏感,即没有表现出明显的应变率效应。

(2) 应变率较低时,试样在前期的压缩性质与较高应变率时类似,但破坏应变明显变小。究其原因,主要可能是自然状态下的砂土并非完全干性。

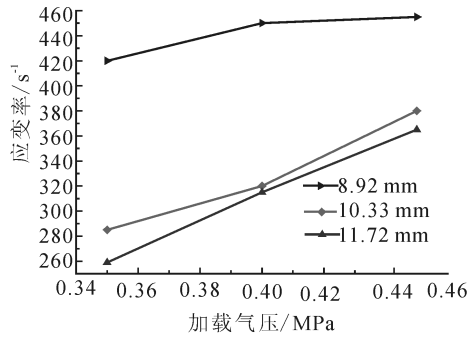
(3) 加载气压较小时的 σ - ϵ 关系曲线在上升段表现出明显的阶梯状上升特点,分析原因可能是密实度不够或制样过程中的扰动影响了试样的均匀性。

2.4.3 应变率分析

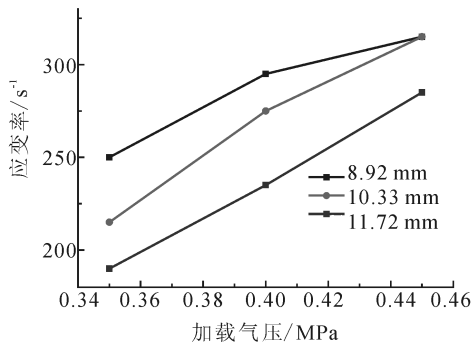
对原始波形图进行处理,获得了在不同整形器和加载气压条件下,不同厚度试样的冲击加载应变

率(图 8)。从图中可以看出:

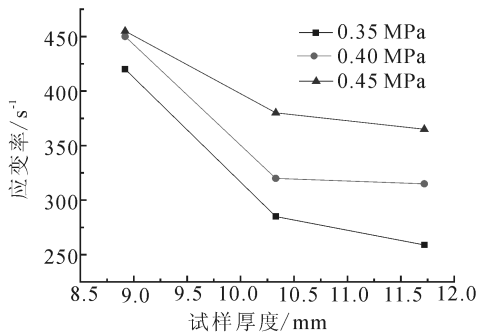
(1) 随着加载气压的增大,试样的冲击加载应变率逐渐增大。



(a) 应变率-加载气压(退火紫铜片)



(b) 应变率-加载气压(橡胶膜)



(c) 应变率-试样厚度(退火紫铜片)

图 8 应变率分析图

Fig.8 Analysis chart of strain rate

(2) 在等气压、同波形整形器的加载条件下,在一定范围内砂土试样厚度越薄,得到的恒定应变率越高,但当试样超过一定厚度时,在同等气压下加载,应变率的变化趋势逐渐减缓。

(3) 在 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内用霍普金森压杆研究干性砂土的动力学行为时,砂土试样的厚度控制在 10 mm 以下为宜。但为避免因压实度等影响因素使径向应变过大,也不可将试样制得过薄。

(4) 在同厚度、等气压加载条件下,用退火紫铜片作为整形器获得的恒定应变率要高于橡胶膜,不同

波形整形器对应变率的变化无明显影响。

3 结论

本文利用改进后的 SHPB 试验装置对干性砂土试样进行冲击试验,对砂土在 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 应变率下的各种动态力学特性以及不同波形整形器的效果作了初步研究,结论如下:

(1) 利用钢制套筒和垫块改进的 SHPB 装置对砂土进行动态冲击的试验是可行的,在 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内,建议砂土试样的厚度控制在 10 mm 以内。

(2) 自然状态下的干性砂土在较高应变率状态下,随着应变率的增大其动态峰值应力和峰值应变变化较小,没有表现出明显的应变率效应。

(3) 退火紫铜片和橡胶膜均能满足恒定应变率的要求,用橡胶膜作为波形整形器能得到更明显的透射波信号。

(4) 等厚度砂土试样,加载气压增大,其冲击加载下的应变率逐渐增大。随着砂土试样厚度的增大,在同等加载条件下得到的恒定应变率相对越小,且应变率的减小趋势逐渐减缓。

参考文献

- [1] 王星华,周海林,徐永胜.饱和砂土液化应变发展过程的研究[J].水利学报,2002,(6):118-124.
- [2] 王志华,周恩全,陈国兴.孔压增长后的饱和砂土流体特性及其孔压相关性[J].岩土工程学报,2012,34(3):528-533.
- [3] 刘汉龙,陈育民.动扭剪试验中砂土液化后流动特性分析[J].岩土力学,2009,30(6):1537-1541.
- [4] 陈育民,刘汉龙,邵国建,等.砂土液化及液化后流动特性试验研究[J].岩土工程学报,2009,30(9):1408-1413.
- [5] S Jing, F Lu, Y Lin, et al. An Experimental Study on Dynamic Constitutive Model of Clay Under Multiaxial Compression [C]//Proceedings of Dymat 2009-9th International Conferences. Published on line, 2009; 517-523.
- [6] 张伟,张海波,吕磊,等.改性岩土材料 SHPB 动力学试验研究[J].混凝土,2009(4):36-38.
- [7] 刘俊新,陈忠富,徐伟芳,等.压实度和含水率对压实黏土动态力学性能的影响试验研究[J].岩土力学,2012,33(6):1631-1639.
- [8] ZHANG Hai-dong, ZHU Zhi-wu, SONG Shun-cheng, et al. Dynamic Behavior of Frozen Soil under Uniaxial Strain and Stress Conditions[J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2013(2):229-238..
- [9] 朱志武,宁建国,刘煦.冲击荷载下土的动力学性能研究[J].高压物理学报,2011,25(5):444-450.
- [10] 胡时胜.SHPB 与混凝土材料动力学性能研究[C]//中国科学技术大学冲击动力学实验室.第三届全国爆炸力学实验技术交流会论文集.合肥:安徽省力学学会,2004:16.

- [11] 姜锡权,胡时胜.霍普金森杆实验技术发展综述[C]//中国力学学会爆炸力学委员会实验技术专业组. Hopkinson 杆实验技术研讨会会议论文集.北京:中国力学学会,2007:147-158.
- [12] B E Martin, W Chen, B Song, et al. Moisture Effects on the High Strain-rate Behavior of Sand[J]. *Mechanics of Materials*, 2009, 41(6): 786-798.
- [13] 孟益平,胡时胜.混凝土材料冲击压缩试验中的一些问题[J]. *实验力学*, 2003, 18(1): 108-112.