

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0117

钙质砂介质中爆炸波传播规律的试验研究*

潘亚豪, 宗周红, 钱海敏, 黄杰, 单玉麟

(东南大学爆炸安全防护教育部工程研究中心, 江苏 南京 211189)

摘要: 开展了一系列钙质砂和石英砂的地面爆炸试验, 主要对比分析了两种砂土介质中爆炸波的传播规律, 包括峰值压力、弹塑性波速及升压时间、爆坑尺寸等。试验结果表明, 爆炸波在钙质砂中的传播与在石英砂中存在较大差异: 地面爆炸作用下钙质砂爆坑较石英砂爆坑的直径和深度更小, 且成坑形状为两阶同心圆; 钙质砂中弹性波速为 236~300 m/s, 石英砂中弹性波速为 218~337 m/s, 弹性波速和塑性波速均随炸药质量增加而增大; 爆炸波在钙质砂中的升压时间随比例距离的增加而增加, 而在石英砂中升压时间随比例距离变化不明显, 且较钙质砂中升压更迅速; 在地面爆炸作用下, 低含水率钙质砂的衰减系数为 2.86, 石英砂为 2.79。

关键词: 钙质砂; 石英砂; 地面爆炸; 地冲击

中图分类号: 0382 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Experimental study on blast wave propagation in calcareous sand

PAN Yahao, ZONG Zhouhong, QIAN Haimin, HUANG Jie, SHAN Yulin

(*Engineering Research Center of Safety and Protection of Explosion & Impact of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China*)

Abstract: Calcareous sand is widely distributed in coastal areas, and its engineering and mechanical properties are significantly different from terrestrial sands. To study the blast wave propagation in calcareous sand, a series of explosion tests with various charge weights on the ground surface were carried out in calcareous sand and silica sand. Pressure time-history curves at positions directly below the explosion center were measured. The propagation laws of two kinds of sands were investigated, including peak pressure, wave velocities of elastic and plastic waves, the rise time of pressure and size of crater. The results show that the blast wave propagation in calcareous sand differs from that in silica sand. Tests under 0.2 kg and 0.8 kg charge weight were conducted twice. And the results show that the explosion experiment is repeatable. Crater produced by the surface explosion in calcareous sand has a smaller size than in silica sand, and the shape of the crater is two-tier concentric circles, one of which is small in diameter and large in depth, and the other is large in diameter and small in depth. The elastic velocity in calcareous sand is 236 m/s to 300 m/s, and that in silica sand is 218 m/s to 337 m/s, while the elastic wave and plastic wave velocity increase with the increase of the explosive charge. The rise time of the blast wave pressure in calcareous sand increases with the increase of scaled distance. In silica sand, rise time does not change with the scaled distance and is much smaller than that in calcareous sand. The measured peak pressures are fitted by using a power function of scaled distance. The attenuation laws of peak pressure in calcareous sand and silica sand are derived. The attenuation coefficient of calcareous sand with low moisture content is 2.86, and 2.79 for silica sand.

Keywords: calcareous sand; silica sand; ground explosion; ground shock

* 收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-12-26

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3100700)

第一作者: 潘亚豪(1995—), 女, 博士研究生, panyahao@seu.edu.cn

通信作者: 宗周红(1966—), 男, 教授, zongzh@seu.edu.cn

钙质砂通常是指由海洋生物形成的、 CaCO_3 含量超过 50% 的颗粒状材料, 具有孔隙多、形状不规则、易破碎、易胶结等特点, 其工程力学性质与一般陆源砂有明显差异^[1-2]。目前, 对陆源砂抗爆性能已有较为系统的研究, 如美军的《TM5-855-1》手册提供了不同密实程度砂土中爆炸波传播的经验公式^[3]。已有砂土爆炸动力学方面的研究主要集中在两个方面^[4-7]: (1) 通过总结和分析爆炸作用下砂土内部的动力反应, 得出应力波在砂土中的传播和衰减规律; (2) 通过模型试验和数值分析, 开展不同试验参数情况下, 饱和砂土的爆炸密实特性和机制研究。钙质砂作为一种特殊的岩土介质, 其工程力学性质与普通的石英砂有显著的差别, 当前对钙质砂低应变率下的力学性质已经有了较为充分的研究^[8-10], 对钙质砂中高应变率下的研究多集中在颗粒破碎和耗能^[11-14]上。Lv 等^[15]对钙质砂与石英砂开展的三轴试验显示, 钙质砂的体积蠕变和剪切蠕变均明显大于石英砂; 对钙质砂开展的霍普金森压杆实验显示, 钙质砂的体积模量、压缩强度、平均波速均明显小于石英砂, 对应力波的衰减效果更显著^[16-17], 因此不能将当前石英砂的研究结果直接用于钙质砂。

伴随着我国海洋发展战略的实施, 人们对强动载下钙质砂的动力特性研究愈加感兴趣, 而钙质砂的爆炸试验研究刚刚起步。徐学勇^[18]通过饱和钙质砂和石英砂的爆炸密实试验对爆炸波特性和表面沉降规律进行了研究。赵章泳等^[19-20]对钙质砂进行了平面装药和球形装药试验研究, 给出了非饱和钙质砂中爆炸波的弹塑性波速和应力衰减系数。石晗^[21]进行了钙质砂地基野外爆炸试验, 分析了钙质砂中土压力和孔隙水压力的变化规律, 并比较了不同浸水状态下钙质砂的衰减作用。

本文中通过开展钙质砂和石英砂的野外爆炸试验, 对比分析两种砂在地面爆炸下的爆坑、爆炸波在介质中的弹塑性波速、升压时间、压力和冲量峰值, 并给出钙质砂和石英砂的爆炸波衰减系数, 研究成果可供相关工程地基设计和加固作参考。

1 试验概况

1.1 砂土试样

试验所用钙质砂(图 1(a))取自南海某岛, 主要成分为 CaCO_3 , 外观偏黄, 且含有贝壳和珊瑚碎块。用作对比试验的石英砂(图 1(b))主要成分为 SiO_2 , 外观为白色。钙质砂和石英砂试样的级配曲线如图 2 所示, 由级配曲线可得钙质砂平均粒径 $d_{50} = 0.48 \text{ mm}$, 不均匀系数 $C_u = 9.43$, 石英砂平均粒径 $d_{50} = 0.40 \text{ mm}$, 不均匀系数 $C_u = 5.08$ 。试验当天对回填砂取样测得钙质砂的密度为 1.32 g/cm^3 , 含水率为 3.5%, 石英砂的密度为 1.39 g/cm^3 , 含水率为 2.3%。

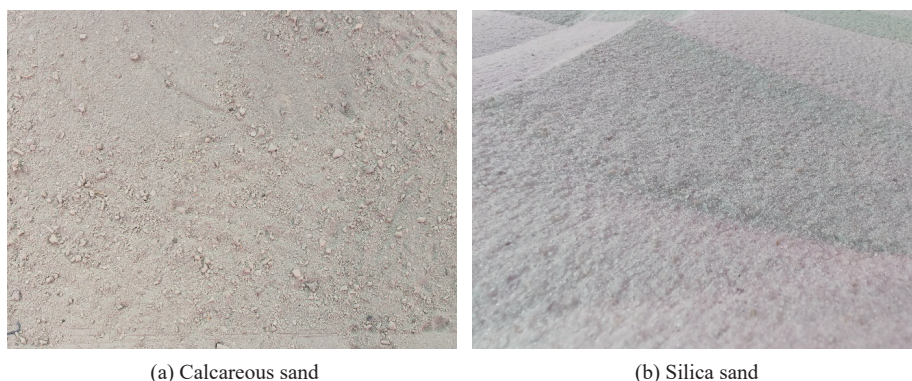


图 1 砂土试样

Fig. 1 Sand specimen

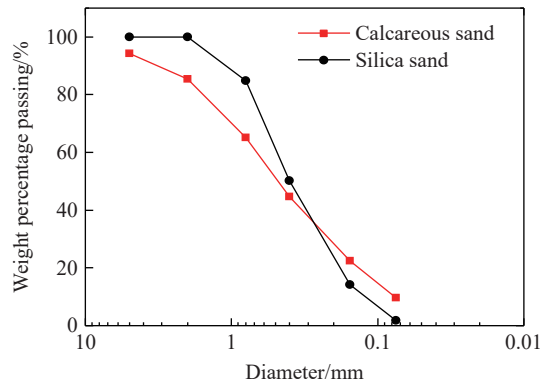


图 2 试验用砂土级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution

1.2 试验设计

坑底底部埋设有管廊结构模型, 上方填土高度为 0.83 m、宽度为 4.0 m、总长度为 6.0 m, 其中长度方向每 2.0 m 为一节段, 分别分层回填钙质砂、石英砂和黄土(见 图 3), 每层厚度约为 15 ~ 20 cm, 并人工夯实, 边缘处均用彩条布进行分隔。本文试验在钙质砂和石英砂回填段进行。

起爆点设在各段长度方向中心点, 炸药采用军用 TNT 药块, 平放于地面。在爆心正下方距离地面 0.35、0.50、0.65、0.83 m 处放置土压力传感器(见 图 4)。

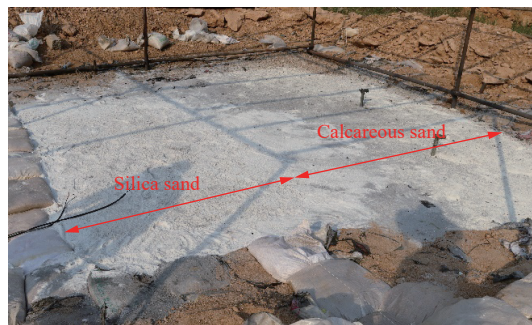


图 3 试验现场

Fig. 3 Test site

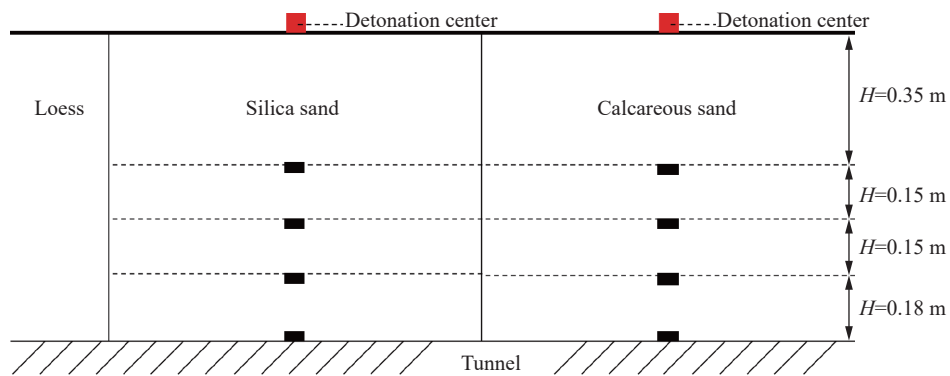


图 4 土压力传感器布置

Fig. 4 Locations of pressure sensors

1.3 传感器布置

试验采用土压力传感器, 量程为 5~25 MPa。传感器输出的信号由泰斯特测试公司的 TST5910N 动态信号测试分析系统采集, 采用瞬态采样, 采样频率为 1 MHz。

1.4 试验工况

表 1 汇总了本次爆炸试验的实际参数, 钙质砂和石英砂因装药形状不同, 爆心距有微小差距。

表 1 爆炸试验参数设计表
Table 1 Measured parameters of explosion test

试验编号	土体类型	装药质量/kg	比例距离/(m·kg ^{-1/3})		
			H = 0.35 m	H = 0.50 m	H = 0.65 m
CS-1	钙质砂	0.2	0.64	0.90	1.15
CS-2		0.4	0.52	0.72	0.93
CS-3		0.8	0.45	0.61	0.78
CS-4		1.6	0.33	0.46	0.59
SS-1	石英砂	0.2	0.62	0.88	1.13
SS-2		0.4	0.51	0.71	0.92
SS-3		0.8	0.40	0.57	0.73
SS-4		1.6	0.34	0.47	0.60
SS-5		3.2	0.27	0.37	0.48

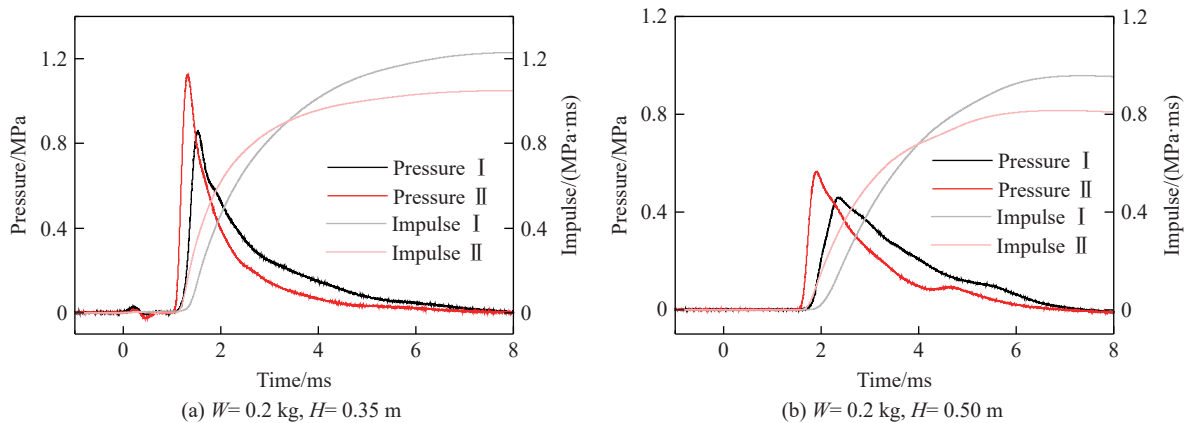
2 重复性验证

为验证试验重复性及数据的可靠性,对装药 0.2、0.8 kg 的爆炸试验分别进行两次,图 5 为两次试验在同一测点的压力和冲量时程曲线。表 2 中计算了两次重复试验的相对差值,可见第 2 次峰值压力略微大于第 1 次试验,且爆炸波波阵面到达时间更早,压力上升更快,原因可能是第 2 次试验的砂土密度较第 1 次试验的更高。炸药爆炸产生的能量会破坏砂土颗粒的初始结构,使砂土孔隙水压力升高,颗粒结构在自重或其他外荷载作用下排列成更紧密的状态,这一原理已广泛应用于砂土地基处理^[5]。另外,考虑到钙质砂颗粒易碎、在常应力下就有颗粒破碎发生的特性^[22],在爆炸前后分别进行了采样筛分试验,绘制出原始砂样和多次爆炸后砂样的颗粒级配曲线(见图 6),爆炸后大粒径颗粒含量明显减少,平均粒径 $d_{50} = 0.42 \text{ mm}$,小于初始试样平均粒径 $d_{50} = 0.48 \text{ mm}$,表明钙质砂颗粒在冲击荷载作用下发生了破碎,对峰值压力的衰减效果减弱。

表 2 相同爆炸药量同测点峰值压力对比
Table 2 Comparison of peak pressure at the same location

W/kg	试验	H = 0.35 m		H = 0.50 m		H = 0.65 m	
		峰值压力/MPa	相对差值/%	峰值压力/MPa	相对差值/%	峰值压力/MPa	相对差值/%
0.2	1	0.86	31.07	0.46	22.93	0.34	19.49
	2	1.13		0.57		0.40	
0.8	1	3.99	1.87	1.65	3.59	1.07	2.49
	2	4.06		1.71		1.10	

注: 相对差值 = (第2次峰值压力-第1次峰值压力)/第1次峰值压力×100%。



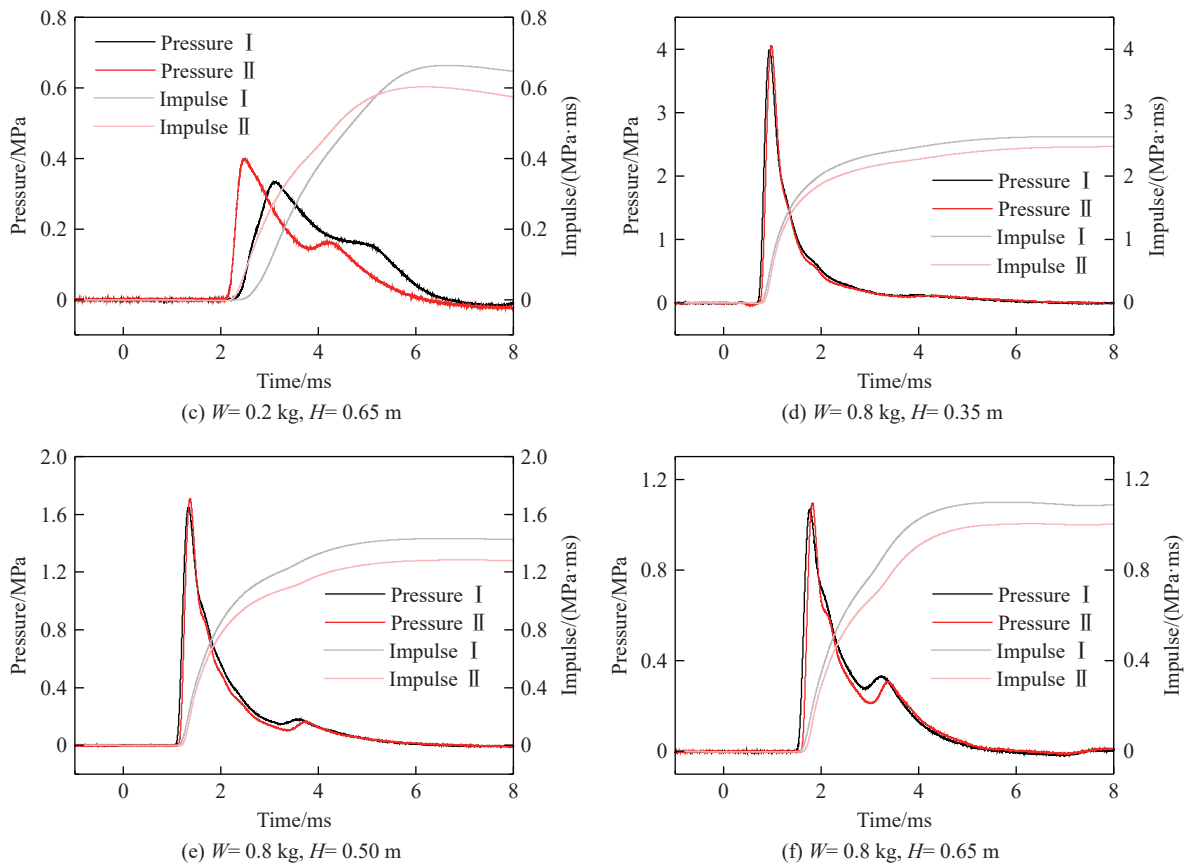


图 5 相同爆炸药量同测点压力和冲量时程曲线对比图

Fig. 5 Comparison of pressure time-history and impulse time-history curves at the same location

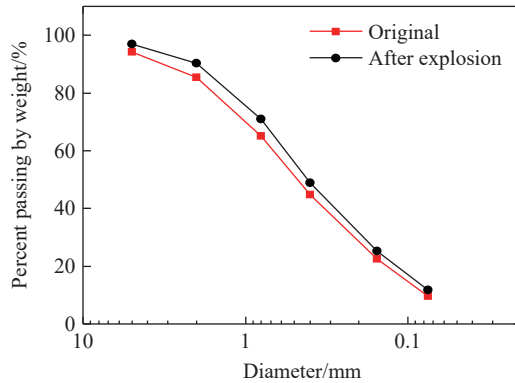


图 6 爆炸试验前后钙质砂颗粒级配曲线

Fig. 6 Particle size distribution before and after the explosion

3 试验结果分析

3.1 爆坑

图 7 为试验后钙质砂和石英砂表面形成的爆坑, 俯视呈两阶同心圆, 爆坑断面示意图及尺寸定义见图 8。一般来说, 地面爆炸后, 部分抛掷物会落回中心爆坑, 应移除后测量深度 h ^[23], 表 3 列出了钙质砂和石英砂在 $W=0.2, 0.4, 0.8$ kg 工况下的爆坑数据。爆坑尺寸通常与炸药质量、起爆深度和土体特性相关^[24], 根据本文试验结果, 相同药量地面爆炸下, 钙质砂爆坑总体直径和深度普遍小于石英砂, 且钙质砂爆坑

呈现出更加明显的分层现象。一般情况下, 迅速膨胀的爆炸产物推动砂体运动形成周边隆起的抛掷型爆坑, 而钙质砂由于颗粒易碎和形状不规则导致孔隙比较高, 在爆炸近区的初始骨架结构被爆炸冲击压力破坏, 形成深度较浅的塌陷区。

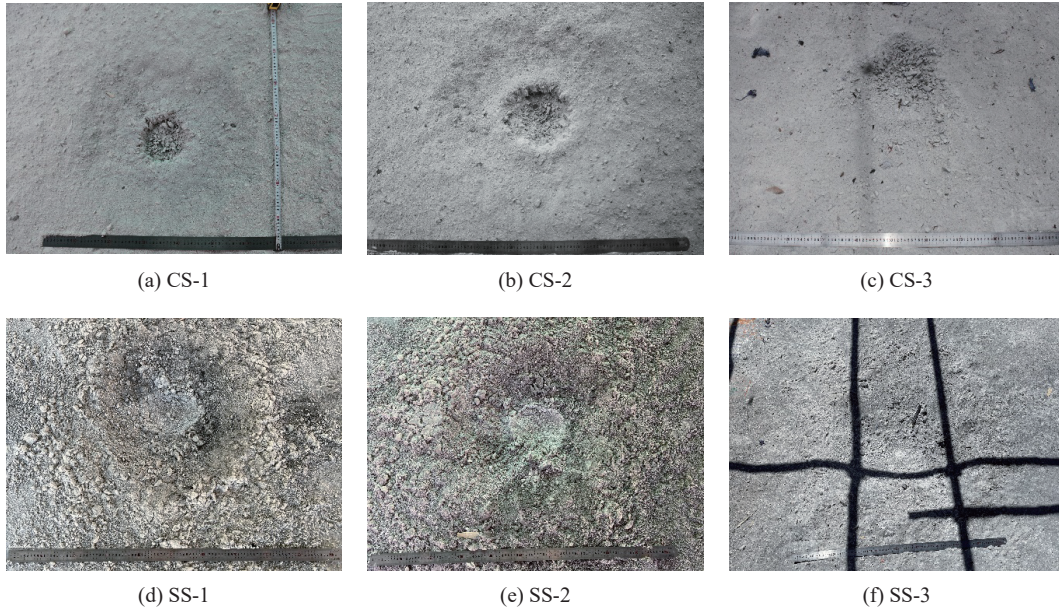


图 7 爆炸后钙质砂和石英砂表面形成的爆坑

Fig. 7 Craters on the surface of calcareous sand and silica sand after the explosions

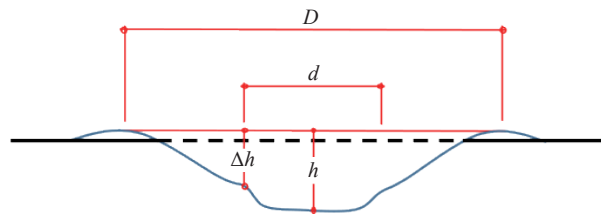


图 8 爆坑尺寸定义

Fig. 8 Definition of crater sizes

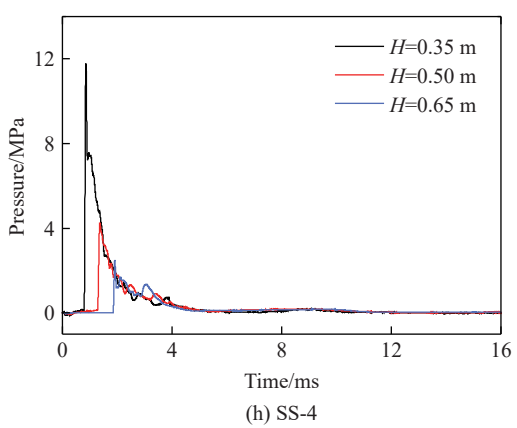
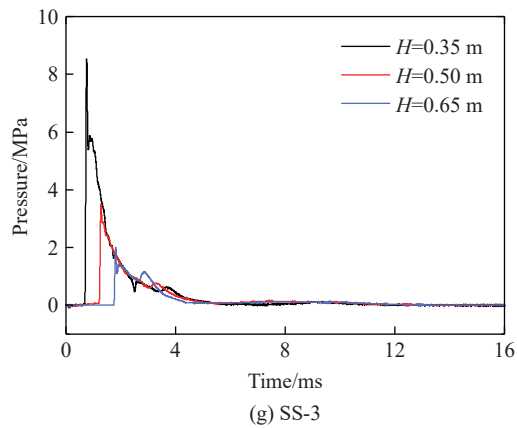
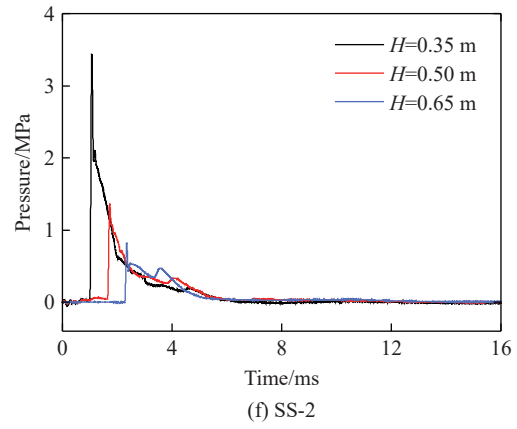
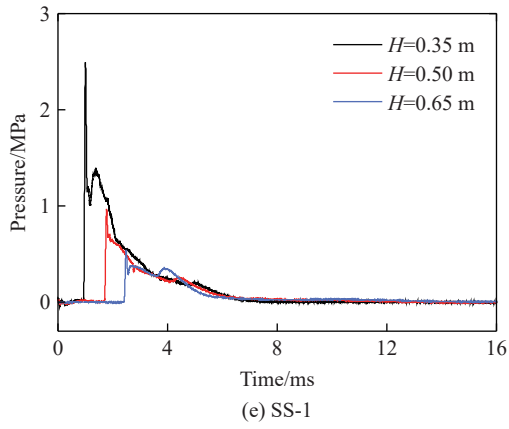
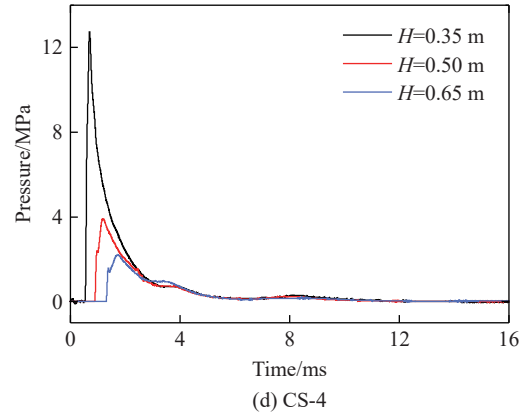
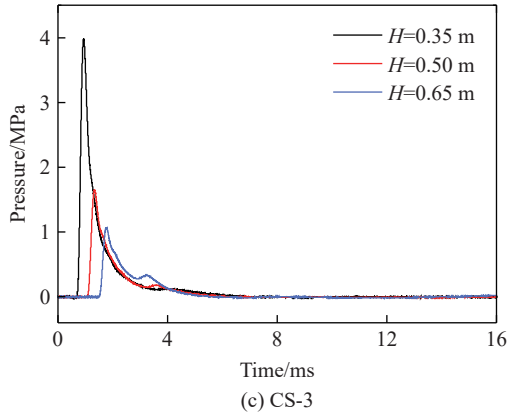
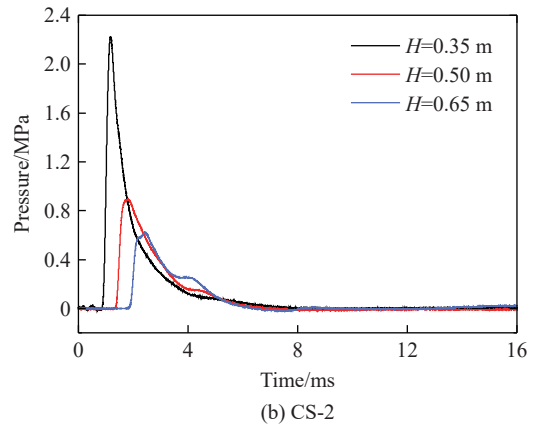
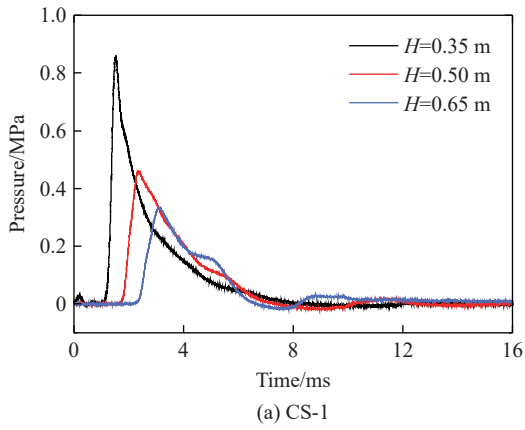
表 3 钙质砂和石英砂爆坑尺寸

Table 3 Crater sizes of calcareous sand and silica sand

W/kg	材料	d/mm	D/mm	h/mm	$\Delta h/\text{mm}$
0.2	钙质砂	164	560	68	18
	石英砂	195	590	111	90
0.4	钙质砂	236	673	91	29
	石英砂	195	670	125	90
0.8	钙质砂	288	700	105	30
	石英砂	-	850	150	-

3.2 压力和冲量

图 9 为本试验采集到的原始土压力时程曲线, 钙质砂比例距离有效数据范围为 $0.33 \sim 1.46 \text{ m/kg}^{1/3}$, 石英砂比例距离范围为 $0.27 \sim 1.44 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。当深度达到 0.65 m 时, 压力时程曲线出现第 2 个峰值, 为下方管廊顶板反射所致。



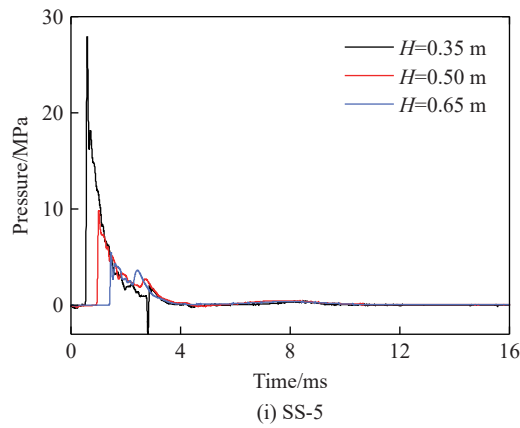


图 9 爆心正下方不同深度的压力时程曲线

Fig. 9 Pressure time-history curves at different depths directly below the explosion center

接近底面的测点反射波较为明显, 计算冲量时会产生巨大误差, 因此对每个工况取前两层测点的压力时程曲线进行积分, 得到对应位置的冲量时程曲线。图 10 为试验所得钙质砂和石英砂各点的比例冲量稳定值及拟合曲线, 可以看出, 在对数坐标系下, 比例冲量随比例距离呈线性衰减, 拟合公式如下:

$$\frac{I_{CS}}{W^{1/3}} = 1.26 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-1.40} \quad (1)$$

$$\frac{I_{SS}}{W^{1/3}} = 1.78 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-1.21} \quad (2)$$

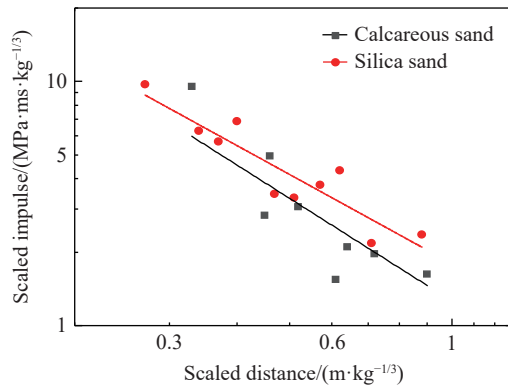


图 10 冲量试验结果及其拟合曲线

Fig. 10 Experimental results and fitting curves of the scaled impulse

3.3 波速和上升时间

由于波阵面到时及压力峰值到时的特征与弹塑性波传播规律一致, 根据弹塑性球面波的传播理论, 可以将爆心距-波阵面到达时刻的斜率视为弹性波速, 爆心距-压力到达峰值时刻的斜率视为塑性波速^[19]。图 11~12 对钙质砂和石英砂爆炸工况的数据进行了线性拟合, 波速拟合值汇总于表 4, 其中 CS-3 塑性波速明显异常, 将其剔除。根据表中数据可知: 钙质砂中弹性波速为 236~300 m/s, 塑性波速为 188~294 m/s; 石英砂中弹性波速为 218~337 m/s, 塑性波速为 234~285 m/s。在相同爆炸工况下, 弹性波速和塑性波速随深度变化不明显, 但是伴随着多次爆炸试验, 中远区砂土密实度会略微提高, 实测弹性和塑性波速较前一工况略微提高。本文试验所用钙质砂含水率为 3.5%, 高于石英砂含水率(2.3%), 因此相同药量下, 钙质砂的弹性波速均略高于石英砂的。

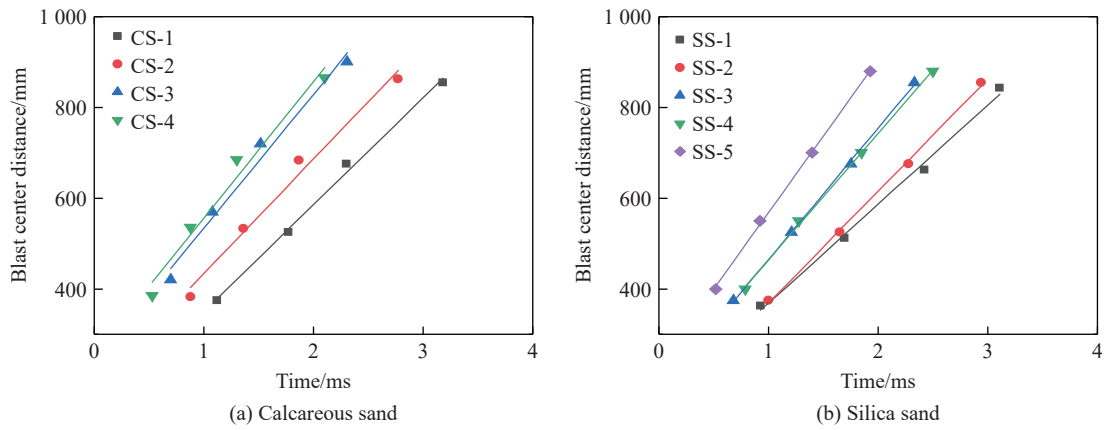


图 11 爆心距与波阵面到达时刻线性拟合曲线

Fig. 11 Linear fitting curves of explosion center distance and arrival time of wave front

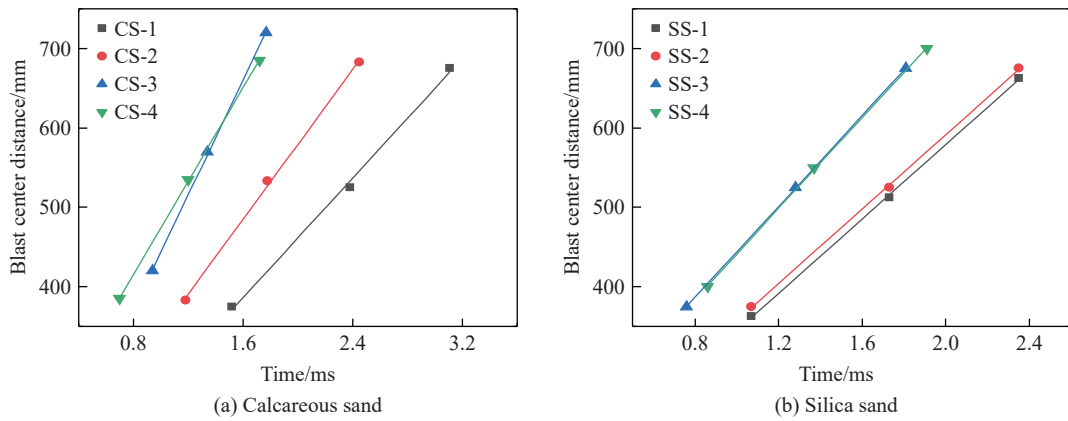


图 12 爆心距与压力峰值到达时刻线性拟合曲线

Fig. 12 Linear fitting curves of explosion center distance and arrival time of pressure peak

表 4 波速拟合结果

Table 4 Fitting results of blast wave velocity

试验	弹性波速/(m·s ⁻¹)	拟合优度	塑性波速/(m·s ⁻¹)	拟合优度
CS-1	236	0.996	188	0.998
CS-2	253	0.987	236	0.999
CS-3	294	0.982	361*	1.000
CS-4	300	0.976	294	1.000
SS-1	218	0.995	234	1.000
SS-2	247	0.998	234	1.000
SS-3	290	0.999	285	1.000
SS-4	279	0.999	285	1.000
SS-5	337	0.999	-	-

注: *为异常值。

图 13 为爆炸波升压时间与比例距离的关系。可以发现, 在钙质砂中爆炸升压时间随比例距离的增加而增加, 从 0.17 ms 增加至 0.81 ms; 在石英砂中爆炸升压时间在 0.07~0.09 ms 之间, 与比例距离无明显关系, 且升压时间均小于钙质砂的, 这是由于, 随着传播距离的增加, 钙质砂表现出较石英砂更强的衰减效应, 使得爆炸波的应力上升过程变缓。

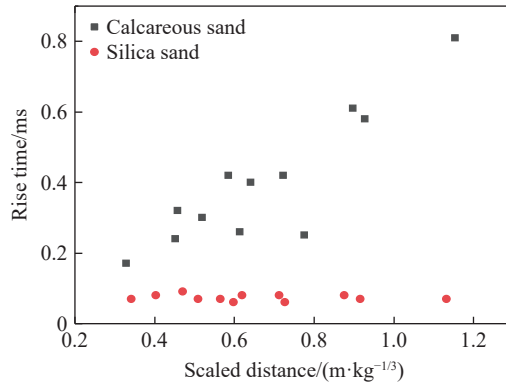


图 13 爆炸波升压时间与比例距离关系

Fig. 13 The relationship between rise time and scaled distance

3.4 衰减系数

美国陆军技术手册《常规武器防护设计原理》(TM5-855-1)^[3] 中对地面常规爆炸给出了土中自由场峰值压力的半经验半理论计算公式:

$$p_0 = 48.77f\rho c \left(\frac{5.4R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (3)$$

式中: p_0 为峰值压力, f 为耦合系数; ρc 为土介质的波阻抗; R 为目标点到爆心的距离; W 为装药质量; n 为衰减系数。

其中, 耦合系数 f 定义为: 近地面爆炸与封闭爆炸在同一介质中所产生的地冲击大小的比值, 可表示为:

$$f = \frac{(\sigma, v, d, I, a)_{\text{near}}}{(\sigma, v, d, I, a)_{\text{contained}}} \quad (4)$$

对式(1)两边同时取对数可得:

$$\lg p_0 = -n \lg \left(\frac{5.4R}{W^{1/3}} \right) + \lg(48.77f\rho c) \quad (5)$$

由式(3)可知, 在对数坐标系下, 峰值压力和比例距离的直线斜率即为衰减系数 n , 截距与土介质的波阻抗相关。图 14 为对数坐标系下钙质砂和石英砂试验测点的峰值压力与比例距离的关系, 线性拟合可得:

$$\lg(p_{\text{CS0}}) = -2.859 \lg \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right) - 0.386 \quad (6)$$

$$\lg(p_{\text{SS0}}) = -2.786 \lg \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right) - 0.180 \quad (7)$$

因此钙质砂和石英砂峰值压力衰减可分别按下式计算:

$$p_{\text{CS0}} = 0.41 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-2.859} \quad (8)$$

$$p_{\text{SS0}} = 0.66 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-2.786} \quad (9)$$

由式(6)~(7)可知, 试验所用的钙质砂衰减系数为 2.86, 石英砂为 2.79, 因此在钙质砂中的爆炸波衰减速度大于在石英砂中的。将试验得到的钙质砂和石英砂密度、平均波速和衰减系

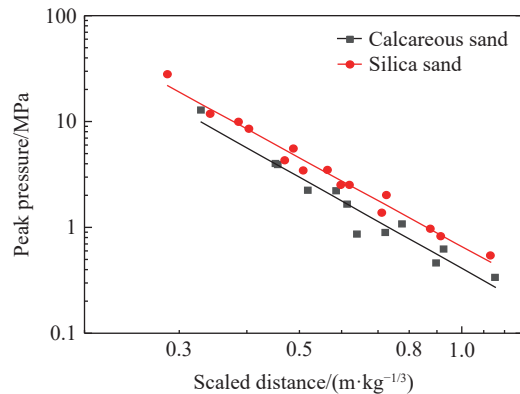


图 14 峰值压力实测值和拟合曲线

Fig. 14 Experimental results and fitting curves of peak pressure

数代入式(3), 试验为地面爆炸, 耦合系数 f 均取 0.14。具体参数如表 5。图 15 为钙质砂和石英砂试验值和公式计算值的线性拟合曲线。由图可知, 计算值明显小于试验值, 因此直接使用 TM5 公式(式(3))计算钙质砂和石英砂的峰值压力会存在较大误差。

表 5 计算参数
Table 5 Parameters of calculation

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	n	f
钙质砂	1 320	271	2.859	0.14
石英砂	1 390	272	2.786	0.14

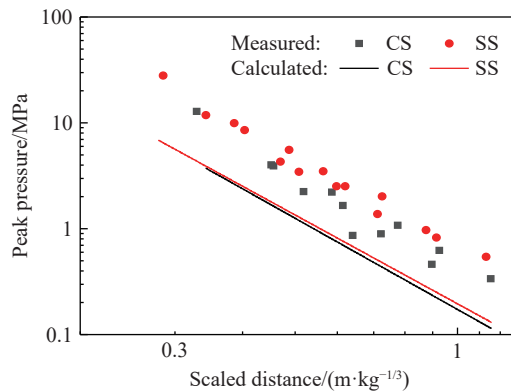


图 15 峰值压力试验值与计算值对比

Fig. 15 Comparison of peak pressures measured value and calculated value

4 结 论

(1) 爆炸荷载作用下钙质砂颗粒发生了破碎, 大粒径颗粒含量减少, 试验后平均粒径 $d_{50} = 0.42 \text{ mm}$, 小于初始试样平均粒径 $d_{50} = 0.48 \text{ mm}$ 。

(2) 地面爆炸作用下, 钙质砂表面形成的爆坑在俯视下呈两阶同心圆, 分别为小而深的抛掷型内坑及大而浅的塌陷型外坑。装药质量相同时, 钙质砂爆坑直径和深度普遍小于石英砂。

(3) 钙质砂中爆炸波弹性波速范围为 236~300 m/s, 塑性波速为 188~294 m/s; 石英砂中弹性波速为 218~337 m/s, 塑性波速为 234~285 m/s。弹性波速和塑性波速均随炸药质量的增加而提高, 本文试验所用钙质砂含水率稍高于石英砂, 钙质砂中的弹性波速稍大于石英砂中的。

(4) 爆炸波在钙质砂中升压时间随比例距离增加而增加, 当爆炸比例距离从 $0.329 \text{ m/kg}^{1/3}$ 增加至 $1.154 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 升压时间从 0.17 ms 增加至 0.81 ms; 石英砂中升压时间基本保持不变, 在 0.07~0.09 ms 之间, 且较钙质砂中升压更快。

(5) 对于本文中使用的低含水率砂样, 钙质砂衰减系数为 2.859, 峰值压力按照 $p_{\text{CS0}} = 0.41(R/W^{1/3})^{-2.859}$ 衰减; 石英砂衰减系数为 2.786, 峰值压力按照 $p_{\text{SS0}} = 0.66(R/W^{1/3})^{-2.786}$ 衰减; TM5 手册峰值压力公式计算值小于试验值。

参考文献:

- [1] 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): 299-304, 308. DOI: 10.16285/j.rsm.2000.03.027.
SHAN H G, WANG R. Development of study on pile in calcareous sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(3): 299-304, 308. DOI: 10.16285/j.rsm.2000.03.027.

- [2] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂物理力学性质初探 [J]. *岩土力学*, 1998, 19(1): 32–37, 44. DOI: 10.16285/j.rsm.1998.01.006.
LIU C Q, WANG R. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1998, 19(1): 32–37, 44. DOI: 10.16285/j.rsm.1998.01.006.
- [3] US, Department of the Army. Fundamentals of protective design for conventional weapons: TM5-855-1 [S]. Washington: US Department of the Army, 1986.
- [4] 穆朝民, 任辉启, 李永池, 等. 爆炸波在高饱和度饱和土中传播规律的研究 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(3): 875–880. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.03.051.
MU C M, REN H Q, LI Y C, et al. Propagation laws of blast wave in saturated soils with high saturation degree [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(3): 875–880. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.03.051.
- [5] 屈俊童, 周健, 吴晓峰. 爆炸法密实砂土地基 (I)——研究现状 [J]. *工程爆破*, 2006, 12(3): 14–18. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2006.03.003.
QU J T, ZHOU J, WU X F. Explosive compaction of sand ground foundation (I)-review [J]. *Engineering Blasting*, 2006, 12(3): 14–18. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2006.03.003.
- [6] 屈俊童, 周健, 吴晓峰. 爆炸法密实砂土地基 (IV)——设计方法 [J]. *工程爆破*, 2007, 13(2): 1–6. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2007.02.001.
QU J T, ZHOU J, WU X F. Explosive compaction of sand foundation (IV)-design method [J]. *Engineering Blasting*, 2007, 13(2): 1–6. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2007.02.001.
- [7] 屈俊童, 周健, 吴晓峰. 爆炸法密实砂土地基 (II)——现场试验 [J]. *工程爆破*, 2006, 12(4): 4–8. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2006.04.002.
QU J T, ZHOU J, WU X F. Explosive compaction of sand foundation (II)-in situ trails [J]. *Engineering Blasting*, 2006, 12(4): 4–8. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2006.04.002.
- [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. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:2(201).
- [9] 曹梦, 叶剑红. 中国南海钙质砂蠕变-应力-时间四参数数学模型 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(5): 1771–1777. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1267.
CAO M, YE J H. Creep-stress-time four parameters mathematical model of calcareous sand in South China Sea [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(5): 1771–1777. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1267.
- [10] LADE P V, LIGGIO JR C D, NAM J. Strain rate, creep, and stress drop-creep experiments on crushed coral sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(7): 941–953. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000067.
- [11] XIAO Y, LIU H, XIAO P, et al. Fractal crushing of carbonate sands under impact loading [J]. *Géotechnique Letters*, 2016, 6(3): 199–204. DOI: 10.1680/jgele.16.00056.
- [12] LV Y R, LI X, WANG Y. Particle breakage of calcareous sand at high strain rates [J]. *Powder Technology*, 2020, 366: 776–787. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.02.062.
- [13] 朱晓亮. 冲击荷载及大荷载作用下钙质砂颗粒破碎特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015: 1–6.
ZHU X L. Study on the crushing characteristics of calcareous sand particles under impact load and large load [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 1–6.
- [14] 魏久淇, 吕亚茹, 刘国权, 等. 钙质砂一维冲击响应及吸能特性试验 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(1): 191–198, 206. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1235.
WEI J Q, LV Y R, LIU G Q, et al. One-dimensional impact responses and energy absorption of calcareous sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(1): 191–198, 206. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1235.
- [15] LV Y R, LI F, LIU Y W, 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. DOI: 10.1139/cgj-2016-0295.
- [16] 吕亚茹, 王明洋, 魏久淇, 等. 钙质砂的 SHPB 实验技术及其动力学性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1262–1270. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0179.
LV Y R, WANG M Y, WEI J Q, et al. Experimental techniques of SHPB for calcareous sand and its dynamic behaviors [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1262–1270. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0179.
- [17] 于潇, 陈力, 方秦. 珊瑚砂中应力波衰减规律的实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(6): 1520–1529. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0147.

- YU X, CHEN L, FANG Q. Experimental study on the attenuation of stress wave in coral sand [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1520–1529. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0147.
- [18] 徐学勇. 饱和钙质砂爆炸响应动力特性研究 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院 (武汉岩土力学研究所), 2009: 1–13.
- [19] 赵章泳, 王明洋, 邱艳宇, 等. 爆炸波在非饱和钙质砂中的传播规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(8): 083201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0389.
- ZHAO Z Y, WANG M Y, QIU Y Y, et al. The propagation laws of blast wave in unsaturated calcareous sand [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(8): 083201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0389.
- [20] 赵章泳, 邱艳宇, 王明洋, 等. 非饱和钙质砂中平面爆炸波传播试验研究 [J]. *防护工程*, 2017, 39(3): 22–28.
- ZHAO Z Y, QIU Y Y, WANG M Y, et al. Experimental study on plane explosive wave propagation in unsaturated calcareous sand [J]. *Protective Engineering*, 2017, 39(3): 22–28.
- [21] 石晗. 钙质砂地基爆炸响应动力特性试验研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020: 1–6. DOI: 10.27380/d.cnki.gwkju.2020.000474.
- SHI H. Experimental study on dynamic characteristics of explosion response of calcareous sand foundation [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020: 1–6. DOI: 10.27380/d.cnki.gwkju.2020.000474.
- [22] 张家铭. 钙质砂基本力学性质及颗粒破碎影响研究 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院 (武汉岩土力学研究所), 2004: 1–9.
- ZHANG J M. Study on the fundamental mechanical characteristics of calcareous sand and the influence of particle breakage [D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences (Institute of Rock & Soil Mechanics), 2004: 1–9.
- [23] AMBROSINI R D, LUCCIONI B M, DANESI R F, et al. Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface [J]. *Shock Waves*, 2002, 12(1): 69–78. DOI: 10.1007/s00193-002-0136-3.
- [24] AMBROSINI R D, LUCCIONI B M. Craters produced by explosions on the soil surface [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2006, 73(6): 890–900. DOI: 10.1115/1.2173283.

(责任编辑 曾月蓉)