

文章编号: 1000-7598 (2012) 10-2953-07

# 饱和钙质砂爆炸响应动力特性试验研究

徐学勇<sup>1,2</sup>, 汪稔<sup>2</sup>, 王新志<sup>2</sup>, 李炜<sup>1,2</sup>

(1. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 杭州 310014;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要:** 钙质砂是一种特殊的海洋沉积物, 开展钙质砂在爆炸作用下动力响应特性研究具有重要的理论意义和工程实用价值。通过室内小型爆炸试验, 研究饱和钙质砂在爆炸作用下土压力、孔隙水压力和质点振动加速度等参数的变化规律。结果表明: 饱和钙质砂中爆炸应力波随距离增大而衰减, 但随爆心距增大衰减速度呈减小趋势; 随试样相对密度增大爆炸应力波的衰减速度趋缓; 爆炸引起的超孔隙水压力在 10~30 ms 内到达峰值, 在前 3 min 内快速消散, 消散幅度达 90% 以上; 双发雷管微差起爆相对于单发起爆, 最大单段起爆药量相同, 但微差起爆由于爆炸应力波的叠加, 使得钙质砂动力响应加剧。与相同试验条件下石英砂爆炸响应对比表明, 相同测点处钙质砂动力响应弱于石英砂, 应力波在钙质砂中衰减速度远比石英砂快, 说明饱和钙质砂对爆炸应力波有着极强的吸收和衰减作用; 爆炸近区钙质砂颗粒大量破碎, 形成爆炸破碎和压缩区, 形成这几个区域所耗损的爆炸冲击能量大约占总能量的 25% 左右。

**关键词:** 钙质砂; 动力特性; 爆炸试验; 衰减规律**中图分类号:** TU435; TU413.6**文献标识码:** A

## Experimental study of dynamic behavior of saturated calcareous sand due to explosion

XU Xue-yong<sup>1,2</sup>, WANG Ren<sup>2</sup>, WANG Xin-zhi<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>

(1. HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Calcareous sand is a special marine geotechnical sediment, which has unexpected physico-mechanical property due to its composition and structure. Study of dynamic characteristics of saturated calcareous sand under explosion has important theoretical and practical significance. This paper aims at studying attenuation rules of earth pressure, pore pressure and vibration acceleration in different relative density calcareous sands due to explosive load through model experiment. Results show that explosive wave attenuates as the distance increases in saturated calcareous sand, and attenuation speed decreases as the distance increases. Explosive wave attenuates slower as relative density increases; excess pore pressure due to explosion reaches the peak value within 10 to 30 millisecond, and about 90 percents excess pore pressure dissipates in the previous 3 minutes; since delay explosion is used in this experiment, dynamic behavior of saturated calcareous sand is more intensive because of explosive wave overlap. Calcareous sand has strong absorption and attenuation effect for P-wave due to its particle breakage characteristics, and about 25% explosion energy loosed to form crush zone, compression zone and damage zone.

**Key words:** calcareous sand; dynamic behavior; explosion experiment; attenuation rule

## 1 引言

钙质砂是由海洋生物成因的、富含碳酸钙或碳酸镁等特殊岩土介质, 由于其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、

粒间易胶结等特点, 使得其工程力学性质与一般陆相、海相沉积物相比有明显的差异<sup>[1-4]</sup>。

目前, 国内外学者对普通陆源砂在爆炸荷载作用下的动力特性开展了一定的研究。前苏联学者梁霍夫<sup>[5]</sup>对饱和土中爆炸应力波传播问题做了开拓性的试验和理论研究, 得出了应力波在准饱和土中传

收稿日期: 2011-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41101519); 国家自然科学基金项目(No. 51108449)。

第一作者简介: 徐学勇, 男, 1980年生, 博士后, 主要从事岩土工程和工程爆破方面的研究工作。E-mail: xxy\_cas@126.com

播及衰减的基本规律; Gohl 等<sup>[6]</sup>, Van Impe 等<sup>[7]</sup>也对爆炸应力波作用下砂土动力反应做了相关研究, 实测不同距离冲击波作用下土压力值, 绘制出砂土在爆炸荷载作用下动力压缩曲线。钱七虎等<sup>[8]</sup>研究了三相介质饱和土自由场中爆炸应力波的传播规律, 通过计算表明, 随着爆心距离的增加, 波的衰减强度依赖于所含空气的含量; 石教往等<sup>[9]</sup>根据深层药包爆炸压实试验的实测资料, 论述了饱和砂爆炸过程的基本特性及其压实机制; 燕琳等<sup>[10]</sup>进行了爆炸引起饱和砂地表沉降的试验研究, 指出在爆炸加密砂基的问题中比药量不是主要的物理参数, 爆炸振动引起砂体结构的破坏与再排列是密实的主要原因。已有砂土爆炸动力学方面的研究主要集中于两个方面<sup>[11-12]</sup>: (1) 通过总结和分析爆炸作用下砂土内部动力反应, 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。目前, 关于钙质砂爆炸动力学方面的研究尚不多见。

近年来, 由于海洋资源开发的需要, 在珊瑚岛礁上修建码头、机场跑道、集水池等各类民用及军工建筑物, 这类建筑物主要修建在稳定的礁坪上, 礁坪表层沉积物主要成分为钙质砂, 出于国防防卫和安全等方面的考虑, 有必要开展饱和钙质砂在爆炸荷载作用下动力响应特性研究。本文开展室内小型爆炸试验, 研究不同相对密度饱和钙质砂在爆炸荷载作用下土压力、孔隙水压力和质点振动加速度反应等参数的变化规律, 总结饱和钙质砂在爆炸荷载作用下响应特性以及应力波在钙质砂中传播及衰减规律, 为钙质砂介质中工程设计和施工以及防御或减轻爆炸灾害提供基础性科研资料。

## 2 试验内容与方法

### 2.1 试验方案

小型爆炸试验在自制钢板箱中完成, 试验箱采用厚度为 8 mm 钢板焊接而成, 尺寸为 100 cm × 100 cm × 100 cm。装砂制样前, 在钢板箱四周内壁垫上 2 cm 厚泡沫垫, 以减少边界约束和应力波反射对试验结果的影响。为了得到爆炸荷载作用下, 沿深度和水平径向两个方向上孔隙水压力、土压力和质点振动加速度的变化规律, 各埋设 3 支传感器, 传感器为定制的微型电阻应变式动态传感器, 采集系统采用 YE2539 高速应变仪。埋设深度依次为距箱顶 40、60、80 cm 处, 在 40 cm 处, 沿水平径向

埋设 3 个传感器, 分别距爆源 30、50、70 cm。试验箱尺寸和传感器埋设位置如图 1 所示, ky01~ky05 分别代表孔隙水压力传感器编号, 土压力传感器、质点振动加速度传感器与孔隙水压力传感器埋设位置相同。

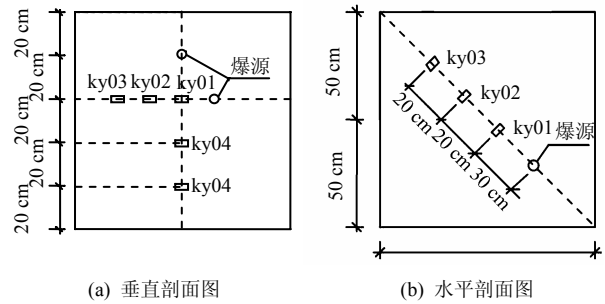


图 1 模型箱尺寸和传感器位置  
Fig.1 Size of model and position of sensors

试验用砂取自南沙美济礁, 试验前对试样进行了物性参数测定和筛分试验, 试验结果见表 1 和图 2。筛分试验结果表明, 试样大于 0.5 mm 的颗粒含量高于 50%, 不均匀系数为 7.83, 定名为粗砂。

表 1 钙质砂物性试验结果  
Table 1 Physical properties of calcareous soil

限制粒径 $D_{60}/\text{mm}$	累计含量为 10% 的有效粒径 $D_{10}/\text{mm}$	最大孔隙比 $e_{\text{max}}$	最小孔隙比 $e_{\text{min}}$	比重 $d_s$
0.876	0.579	1.405	0.766	2.76

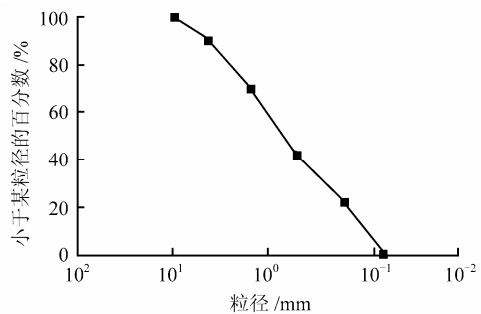


图 2 钙质砂试样初始筛分曲线  
Fig.2 Granulometric analysis of calcareous sand

### 2.2 试验参数

试验参数的确定基于 3 个方面: (1) 装样时按相对密度进行控制, 相对密度分别为 40%、56% 和 70%, 说明相对密度对饱和钙质砂爆炸响应特性的影响; (2) 起爆方式通过改变起爆药量和微差时间进行控制, 得出饱和钙质砂中不同起爆药量、微差起爆和集中起爆的作用效果; (3) 取相对密度为 56% 的钙质砂和石英砂进行对比试验, 说明钙质砂

和石英砂在相同试验条件下的不同动力特性。

表 2 试验控制参数  
Table 2 Test control parameters

试验组	相对密度	加载方式
B1	40%钙质砂	单发雷管起爆、双发雷管集
B2	56%钙质砂	中起爆、双发雷管两段微差、
B3	70%钙质砂	三发雷管三段微差。两段微
B4	56%石英砂	差为 1 段和 3 段；三段微差 雷管为 1 段、3 段、5 段

注：1 发雷管换算成 1.5 gTNT 当量。

### 3 试验结果及分析

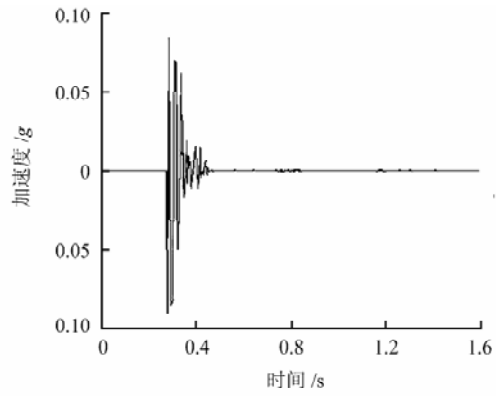
#### 3.1 加速度响应

炸药在岩土介质中爆炸，能量急剧释放，使炮孔周围介质破碎压缩，能量同时以波动形式向外传播，从而引起介质的质点振动。通过测试爆炸时钙质砂介质中不同位置质点振动加速度，可以了解和分析钙质砂在爆炸荷载作用下的动力响应特性。

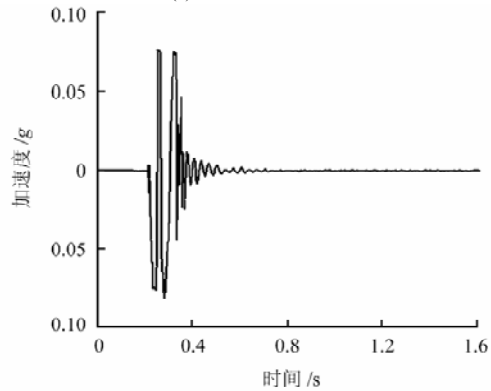
图 3 为单发雷管起爆时，相对密度为 40%的钙质砂不同深度处质点加速度响应时程曲线，不同埋深处质点振动加速度峰值分别为 0.098 g、0.082 g、0.075 g，呈减小趋势。不同相对密度砂样试验结果表明，质点振动加速度均随离爆源水平距离  $R$ 、垂直距离  $H$  的增大而衰减，而且爆炸近区的衰减速度大于爆炸远区。

图 4 为单发雷管起爆，不同相对密度砂样加速度反应峰值随水平距离增大而衰减情况对比。测试结果显示，测点 JSD01 处，质点振动加速度峰值分别为 0.098 g、0.128 g、0.132 g，相对密度为 70%的试样中质点振动加速度反应峰值较相对密度为 40%和 56%试样分别增大 37.5%和 3.12%。综合对比其他测点数据分析表明：（1）试样的密实程度对爆炸应力波的传播和衰减有较大影响；（2）相对密度大于 56%属于密实试样，爆炸应力波衰减较慢，加速度反应相差不大；（3）钙质砂中爆炸应力波衰减速度在一定的距离内相对较快，而随着爆心距增大，衰减速度逐渐趋缓。

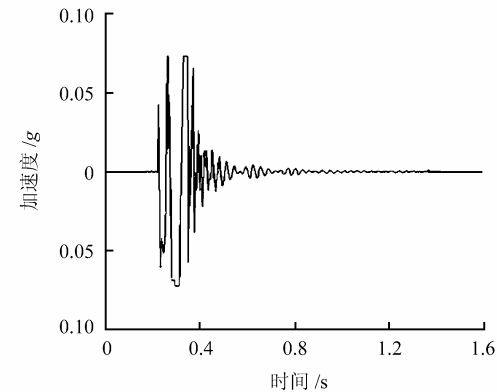
图 5 为相对密度为 40%饱和钙质砂试样，三段微差起爆(三发雷管)不同深度处质点振动加速度时程曲线，峰值分别为 0.142 g、0.127 g、0.115 g。而单发起爆加速度反应峰值分别为 0.098 g、0.082 g、0.075 g。三段微差起爆较单发起爆加速度反应峰值分别增大 55.1%、54.8%、53.3%。说明微差起爆相对于单发起爆，最大单响起爆药量相同，但由于总药量的增大，加速度反应峰值大于单发起爆，而增大幅度与总装药量的增幅不成线性比例关系。



(a) 相对密度 40%，测点 JSD01



(b) 相对密度 40%，测点 JSD04



(c) 相对密度 40%，测点 JSD05

图 3 质点振动加速度随深度衰减  
Fig.3 Acceleration responses in different depths of calcareous sand

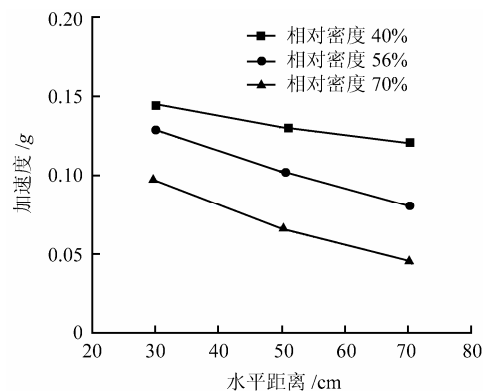


图 4 不同相对密度试样加速度反应峰值  
Fig.4 Acceleration peak values in different relative densities of calcareous sand

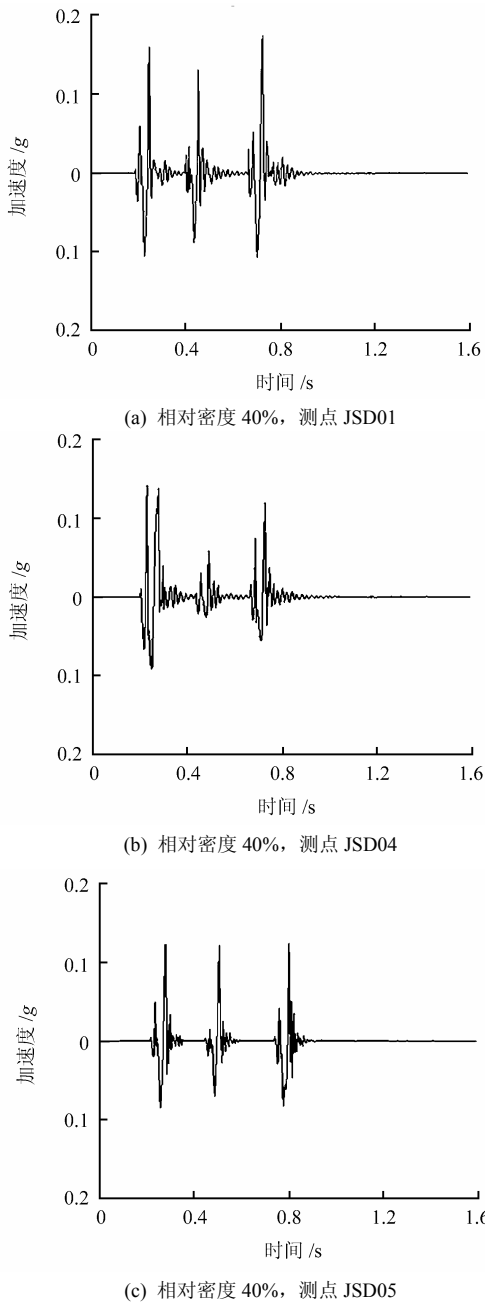


图5 三段微差起爆质点振动加速度时程曲线  
 Fig.5 Acceleration responses of calcareous sand due to delay explosion

### 3.2 超孔压的建立和消散

爆炸试验表明，钙质砂超孔隙水压力在一般10~30 ms内到达峰值，峰值持续时间很短，继而开始消散，消散时间一般为3~5 min。孔压增量峰值随爆心距增大而衰减，衰减幅度爆炸近区大于爆炸远区。

试验通过改变起爆方式，对比集中起爆与分段微差起爆的不同作用效果，图6为典型的超孔隙水压力时程曲线。试验结果表明，由于微差起爆爆炸应力波的叠加效应，使得先起爆药包产生的超孔隙水压力还来不及完全消散，后续起爆药包又产生新

的超孔隙水压力。实际工程（如饱和砂土爆炸密实）中需要兼顾工程质量和工程安全两个方面，在总装药量一定的情况下，采用合理的微差起爆技术，一方面可以有效地减小爆破地震效应，确保爆破施工安全；另一方面还可以产生更高的超孔隙水压力，为饱和砂土爆炸密实提供内因保障，这一结论可以为实际工程提供理论借鉴。

图7为孔压峰值在深度方向上随时间消散变化情况。综合多次试验数据分析表明，饱和钙质砂产生的超孔隙水压力在爆炸后2~3min内快速消散，消散幅度达90%以上。

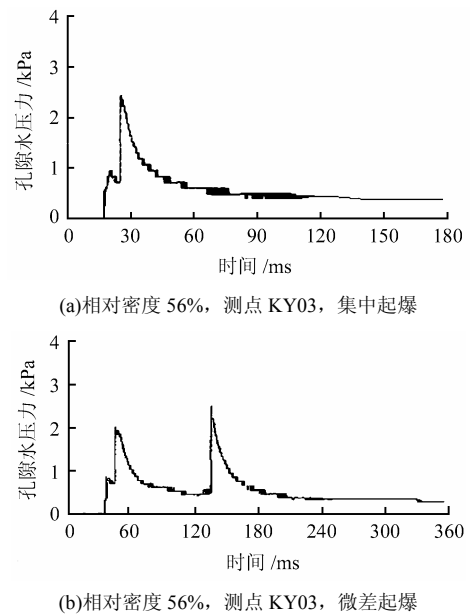


图6 超孔隙水压力时程曲线  
 Fig.6 Excess pore pressure time history curves of calcareous sand

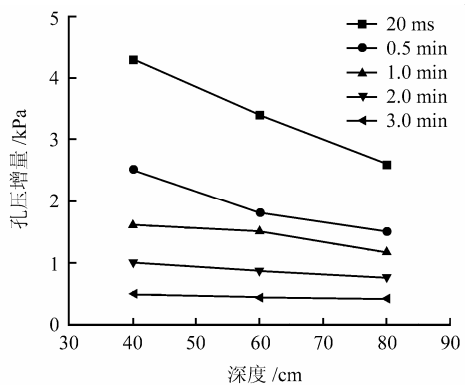


图7 钙质砂孔压峰值在深度方向消散规律  
 Fig.7 Excess pore pressure dissipating along depth direction of calcareous sand

### 3.3 土压力变化

炸药在钙质砂试样中爆炸后，在冲击压实区以

外，由于 P 波的压缩作用，从而在周围砂体中产生土压力(压应力)增量。图 8 为典型的土压力随时间衰减曲线，测试结果表明，爆炸压力在 1~6 ms 内快速达到超压峰值，然后开始衰减，并出现负压段。

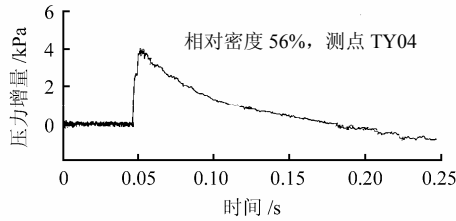


图 8 土压力随时间衰减曲线

Fig.8 Earth pressure time history curve of calcareous sand

由图 8 测试结果计算得出，在双发雷管集中起爆时，试样中 TY04 测点测试的最大土压力增量为 4.13 kPa，而根据爆炸力学中的库尔经验公式：

$$\Delta P_m = 53.3 \left[ \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right]^{1.13} \quad (1)$$

式中： $\Delta P_m$  的单位为 MPa， $R^0 = \frac{\sqrt[3]{Q}}{R}$  为相对点距离。

计算得到相同爆心距水下爆炸时的水击波超压峰值为 16.18 MPa，由此可见，饱和钙质砂对爆炸应力波有着极强的吸收和衰减作用：(1) 饱和钙质砂是由松散颗粒及孔隙水组成的不连续介质，应力波主要靠颗粒与孔隙水之间以及颗粒与颗粒之间的相互挤压来传播，松散体本身的变形、压缩及应力波传递过程中的反射、折射作用必然使爆炸应力波能量产生较大的损失；(2) 已有研究表明，饱和土体中含气量是影响爆炸能量传递的一个关键因素，由于钙质砂孔隙比较高及试样中有机质的存在，饱和后孔隙水中总会含有一定量的游离气泡，这些气泡的存在会进一步削弱爆炸能量的传递作用。

### 3.4 与石英砂的对比

选用相对密度为 56% 的石英砂进行爆炸试验，石英砂的相对密度为 2.65，最大孔隙比为 0.97，最小孔隙比为 0.492。饱和石英砂爆炸试验中采用的试验箱尺寸以及装样过程、测点位置、动力源(电雷管)及埋设位置、药量大小、起爆方式等参数与钙质砂一样。

#### 3.4.1 质点振动加速度

图 9 为单发起爆时，钙质砂和石英砂质点振动加速度峰值随深度方向距离增大而衰减的对比。测试结果表明：(1) 沿深度方向上，钙质砂振动加速度峰值在测点 JSD04 和测点 JSD05 处分别衰减了

33.6% 和 28.2%，而石英砂分别衰减了 23.9% 和 24.5%，钙质砂质点振动加速度峰值衰减速度大于石英砂；(2) 相同位置处石英砂质点振动加速度峰值大于钙质砂，说明相同荷载作用下，相同爆心距石英砂的动力响应要比钙质砂强烈。

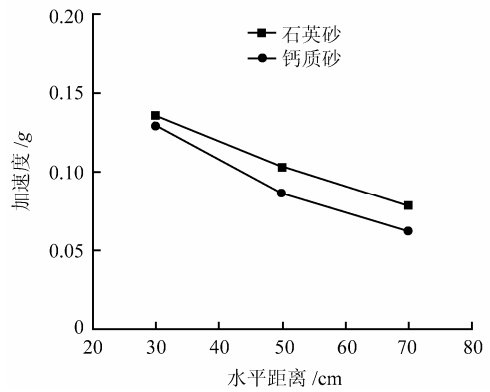


图 9 质点振动加速度衰减速度的对比

Fig.9 Contrast of particle vibration acceleration attenuation

#### 3.4.2 孔隙水压力消散时间

通过对饱和石英砂和钙质砂的爆炸响应结果对比，分析得出超孔隙水压力增长和消散规律大致相似，而两者超孔隙水压力的消散时间上存在着一定差异。

图 10 为石英砂孔压峰值在深度方向上随时间消散规律，与图 7 钙质砂测试结果进行对比，结果表明：(1) 相同位置处饱和石英砂孔压增量比钙质砂大；(2) 爆炸后 3 min 时，钙质砂超孔隙水压力平均值消散到 0.498 kPa，而石英砂超孔隙水压力消散到 0.498 kPa 大约需要 8 min，说明石英砂超孔隙水压力消散时间比钙质砂长，这主要是由于钙质砂孔隙比远大于石英砂的颗粒结构所决定的，孔隙比大更有利于超孔隙水压力的消散。

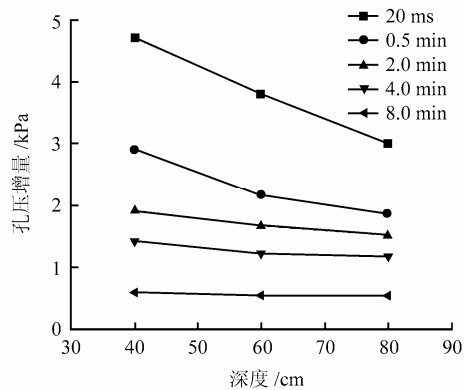


图 10 石英砂孔压峰值在深度方向上消散规律  
Fig.10 Excess pore pressure dissipating along depth direction of ordinary sand

### 3.4.3 土压力衰减

表3为饱和钙质砂和石英砂在相同起爆药量时土压力增量峰值衰减百分率对比。数据对比表明:

(1) 钙质砂土压力增量衰减百分率明显大于石英砂,表明爆炸应力波在钙质砂中衰减更快;(2) 由于爆炸荷载在爆炸近区产生超压,形成爆炸破碎和压缩区,近区快速消耗大量的爆炸能,而中远区能量消耗较慢,故随着距离增大,衰减百分率呈减小趋势,土压增量衰减越来越慢。

表3 钙质砂和石英砂土压力衰减对比

Table 3 Contrast of earth pressure attenuation between calcareous sand and ordinary sand

测点	钙质砂土压 增量/kPa	衰减 百分率/%	石英砂土压增 量/kPa	衰减 百分率/%
TY01	10.209		12.326	
TY02	5.453	46.6%	7.501	39.1%
TY03	3.375	38.6%	4.838	35.5%
TY04	5.637	45.1%	7.853	36.3%
TY05	3.531	37.5%	5.114	34.8%

### 3.4.4 能量损耗

试验时炸药的总化学能可用下式表示:

$$E_0 = mQ \quad (2)$$

式中:  $E_0$  为炸药释放的总能量;  $m$  为炸药的质量;  $Q$  为单位质量塑性炸药的爆热, 试验测定值为 3.545 kJ/g。

由一维冲击波的能量守恒关系:

$$e + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(D-u)^2 = e_0 + \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{1}{2}(D-u_0)^2 \quad (3)$$

式中:  $e_0$ 、 $p_0$ 、 $\rho_0$ 、 $u_0$  和  $e$ 、 $p$ 、 $\rho$ 、 $u$  分别为冲击波作用前、后的内能、压力、密度、质点速度;  $D$  为激波波阵面传播速度。为了便于计算, 将关系式中的密度换成比容  $v$ ,  $v = 1/\rho$ 。从而得到单位体积变化所需要的能量关系式:

$$\Delta e = \frac{1}{2}(p + p_0)(v + v_0) \approx \frac{3(1+2\gamma)p^2}{2\rho_0 E} \quad (4)$$

式中:  $\gamma$  和  $E$  分别为试样的泊松比和弹性模量;  $p$  为冲击波压力, 由此可得:

$$\Delta e = 32.5 \left( \sqrt[3]{Q/R} \right)^{2.95} \quad (5)$$

因此, 在研究区域应力波消耗的能量可以表示为

$$e = \frac{1}{2} \Delta e \frac{4}{3} \pi R_d^3 \rho \quad (6)$$

式中:  $R_d$  为球形研究区域的半径。

通过计算, 得出炸药的总能量  $E_0$  与冲击波在压碎区和损伤区消耗的能量  $E_d$ , 如表4所示。

表4 总能量与损耗能量对照表

Table 4 Reference table of all kinds of energies

$Q/g$	$E_0/kJ$	$E_d/kJ$	$E_d/E_0$	材料
1.5	5.318	1.432	0.269	钙质砂
3.0	10.636	2.675	0.252	
1.5	5.318	0.847	0.159	石英砂
3.0	10.636	1.572	0.148	

表4列出了炸药在钙质砂和石英砂中爆炸后形成压碎区和损伤区所消耗的冲击波能量对比情况。结果表明, 钙质砂中形成压碎区和损伤区所耗损的能量达 25%左右, 较石英砂高 10%左右。数据对比进一步说明饱和钙质砂对爆炸应力波有着极强的吸收和衰减作用, 钙质砂爆炸近区颗粒破碎会消耗大量的冲击能量。

## 4 结论

(1) 不同相对密度砂样试验结果表明, 质点振动加速度、孔隙水压力和土压力增量均随离爆源水平距离  $R$ 、垂直距离  $H$  的增大而衰减, 而且爆炸近区的衰减速度远远大于爆炸中远区。

(2) 多发雷管微差起爆相对于单发雷管起爆, 最大单段起爆药量相同, 但由于微差起爆爆炸应力波的叠加, 质点加速度反应峰值、孔隙水压力和土压力增量明显大于单发起爆, 而增大幅度与总装药量的增幅不成线性比例关系。

(3) 爆炸荷载作用下饱和钙质砂孔隙水压力一般在 10~30 ms 内到达峰值, 峰值持续时间很短, 继而开始消散, 在爆炸后 2~3 min 内快速消散, 消散幅度达 90%以上。爆炸后 3 min 时, 钙质砂超孔隙水压力平均值消散到 0.498 kPa, 而石英砂超孔隙水压力消散到相同量值约需要 8 min。这主要是由钙质砂孔隙比远大于石英砂的颗粒结构所决定的。

(4) 相同试验条件下, 试样内部动力响应参数测试结果对比表明, 相同测点处钙质砂动力响应弱于石英砂, 爆炸应力波在钙质砂中衰减速度远比石英砂快。说明饱和钙质砂对爆炸压缩波有着极强的吸收和衰减作用。能量消耗计算结果表明, 爆炸近区钙质砂颗粒大量破碎, 形成爆炸破碎和压缩区, 形成这几个区域所耗损的爆炸冲击能量大约占总能量的 25%左右。

## 参 考 文 献

- [1] 汪稔, 宋朝景, 赵焕庭, 等. 南沙群岛珊瑚礁工程地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] ALBA J L, AUDIBERT J M. Pile design in calcareous and carbonaceous granular materials, and historic review[C]//Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Engineering for Calcareous Sediments. [S.l.]: [s.n.], 1999: 29—44.
- [3] DONTSOV V E, NAKORYAKOV V E. Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with a liquid containing gas bubbles[J]. **International Journal of Multiphase Flow**, 2001, (27): 2023—2041.
- [4] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 钙质砂室内载荷试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 147—156.  
WANG Xin-zhi, WANG Ren, MENG Qin-shan, et al. Study of plate load test of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 147—156.
- [5] 梁霍夫著. 岩土中爆炸动力学基础[M]. 刘光寰, 王明洋译. 南京: 工程兵工程学院, 1993.
- [6] GOHL W B, JEFFERIES M G, HOWIE J A, et al. Explosive compaction: Design, implementation and effectiveness[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(6): 657—665.
- [7] VAN IMPE W F, MEYUS I. Soil compaction by blasting in the Zeebrugge Area[C]//Proceedings of 1st Iranian Int. Sem. on SMFE. Iran: [s.n.], 1989.
- [8] 钱七虎, 王明洋. 三相介质饱和土自由场中爆炸波的传播规律[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(2): 97—100.
- QIAN Qi-hu, WANG Ming-yang. Propagation of explosive wave in the free-field of three-phase saturated soil[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1994, 14(2): 97—100.
- [9] 石教往, 佟锦岳, 熊长汉, 等. 爆炸压实饱和砂土的试验研究[J]. 长江科学院院报, 1992, 9(4): 25—32.  
SHI Jiao-wang, TONG Jin-yue, XIONG Chang-han, et al. An experimental research on compaction of saturated sand soil by explosion[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1992, 9(4): 25—32.
- [10] 燕琳, 李世海, 刘以纲. 爆炸引起饱和砂地表沉降的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 50—53.  
YAN Lin, LI Shi-hai, LIU Yi-gang. A laboratory study on surface settlement of saturated sand caused by blasting[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(3): 50—53.
- [11] 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.  
MU Chao-min, REN Hui-qi, LI Yong-chi, et al. Propagation laws of blast wave in saturated soils with high saturation degree[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 875—880.
- [12] 屈俊童, 周健, 吴晓峰. 爆炸法密实砂土地基[J]. 工程爆破, 2006, 12(3): 14—17.  
QU Jun-tong, ZHOU Jian, WU Xiao-feng. Explosive compaction of sand ground foundation[J]. **Engineering Blasting**, 2006, 12(3): 14—17.

## 《建筑科学与工程学报》2013 年征订通知

《建筑科学与工程学报》是国家教育部主管, 长安大学与中国土木工程学会联合主办的学术性期刊, 是《中文核心期刊要目总览》2011 版来源期刊, 主要报道建筑科学与工程领域的最新研究成果, 包括建筑结构、地下建筑与基础工程、防灾减灾、桥梁工程、建筑材料、建筑学、市政工程、力学等专业及相关领域的科研、设计、施工方面的研究成果与工程实践总结。

《建筑科学与工程学报》的主要读者对象为: 建筑科学与工程领域的科研人员、工程技术人员、大专院校师生及管理决策人员。

《建筑科学与工程学报》为季刊, 大 16 开本, 128 页, 每期定价 10.00 元 (含邮寄费), 全年共 40.00 元, 国内外公开发行, 邮发代号: 52—140, 订阅时也可直接汇款至《建筑科学与工程学报》编辑部, 欢迎国内外读者订阅!

地 址: 西安市南二环路中段长安大学内  
电 话: (029)82334397

邮 编: 710064  
E-mail: jzxb@chd.edu.cn