

冲击能对钙质砂砾颗粒级配影响试验研究*

王 帅¹ 雷学文¹ 孟庆山² 孙 超¹ 徐亚飞¹

(1. 武汉科技大学城市建设学院, 武汉 430065;

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: 岛礁工程中常规化采用冲击法加固钙质砂砾回填料地基。对钙质砂砾试样进行冲击试验, 研究不同总冲击能对试样颗粒级配、变形、颗粒破碎的影响。结果表明: 随着总冲击能的增大, 试样孔隙比逐渐减小, 并最终呈稳定趋势, 二者满足指数函数关系; 试样相对破碎率随总冲击能的增大而逐渐增大, 但存在一临界总冲击能, 超过该值后, 相对破碎率增幅逐渐减弱; 冲击能能改变试样粒径的构成, 其不均匀系数、曲率系数随总冲击能增大而增大, 并呈二项式函数关系; 试样平均粒径随总冲击能的增大而减小, 二者呈线性负相关; 钙质砂砾经过冲击作用后, 粒组百分含量变化较为明显, 含砂量增大, 砂砾比例发生变化, 其中原粒组下一级粒径区间质量百分含量增量尤为明显。利用钙质砂砾进行规模化地基填筑时, 应充分考虑冲击能对其颗粒级配、砂砾比变化的影响, 选择合理的施工工艺。

关键词: 冲击作用; 钙质砂砾; 颗粒级配; 地基处理; 颗粒破碎

DOI: 10.13204/j.gyjz201705019

EXPERIMENTAL RESEARCH ON INFLUENCE OF IMPACT ENERGY ON MECHANICAL COMPOSITION OF CALCAREOUS SANDY GRAVEL

Wang Shuai¹ Lei Xuewen¹ Meng Qingshan² Sun Chao¹ Xu Yafei¹

(1. Institute of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. State Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The effect of different impact energy E on the mechanical composition, deformation and grain breakage of the calcareous sandy was studied by impact test. The results showed that with the increase of the total impact energy, the void ratio of the specimen decreased gradually and finally tended to be stable. Both of them content the exponential function. The relative grain breaking ratio of the specimen mechanical composition increased gradually with the total impact energy. The impact energy had an effect on the specimen mechanical composition, and its nonuniform coefficient C_u and the curvature coefficient C_c were related with the total impact energy, C_u and C_c increased with the total impact energy E increased by the binomial function. The average particle size d_{50} of the specimen decreased with the increase of the total impact energy E , which was a linear negative correlation. After the impact of calcareous sandy gravel, the content of sand increased, the proportion of sand and gravel changed, and the change in the next smaller grain diameter range than the primary grain diameter range was more obvious. When the foundation was filled with calcareous sandy gravel, the effect of impact energy on the mechanical composition should be taken into full consideration, and the reasonable construction technique should be selected.

Keywords: impact effect; calcareous sandy gravel; mechanical composition; foundation treatment; grain breakage

钙质砂多出现于北纬 30° 至南纬 30°, 我国南海海域珊瑚岛礁、澳大利亚西部大陆架、巴斯海峡、红海等地都有分布, 其主要成分为碳酸钙, 含量通常在 50% 以上, 它具有疏松多孔、形状不规则, 有别于陆源砂。钙质砂在常规应力水平下容易发生颗粒破碎, 引起工程性质变化。近年来, 随着我国海洋战略的实施, 岛礁工程建设种类日益丰富, 我国学者对钙质

砂进行了相关研究, 取得一系列成果^[1-5], 其中岛礁的地基处理对工程的基础环境的影响至关重要。由

* 国家重大科学研究计划(2013CB956104); 国家自然科学基金重点项(41330642); 国家自然科学基金面上项目(41372316)。

第一作者: 王帅, 男, 1989 年出生, 博士研究生。

电子信箱: 356797825@qq.com

收稿日期: 2016-10-12

于岛礁地理位置远离大陆、材料匮乏,交通运输不便,工程人员希望利用岛礁自身的珊瑚料进行地基回填,节约工程建设成本,开展工程建设。

我国研究人员对珊瑚岛礁的工程建设特性开展了系列研究,初步研究和工程实践表明:利用珊瑚料作为岛礁地基填料是可行的,钙质砂砾料作为地基填料广泛应用于岛礁工程中,但实际地基处理中,由于钙质砂砾的形状各异、棱角度大,天然砂砾往往呈松散状态不能直接作为地基填料,需要对钙质砂砾进行加固处理,通常需要用强夯、振冲碾压等方法使得珊瑚料地基得以密实平整。围绕钙质砂砾地基的冲击加固问题,贺迎喜研究了利用吹填珊瑚礁砂砾作为工程填料的可行性和合理的施工碾压方法,研究表明钙质砂砾可以作为海岸工程的填料应用推广,其工程性质和压实效果良好^[6]。余东华等结合苏丹新港建设中珊瑚礁地基填筑工程,研究了利用强夯联合振动碾压的方法对珊瑚料地基的处理效果,结果表明该方法可达到施工要求效果,并指出冲击在地基中形成的冲击力使得珊瑚料被击碎、改善了回填料级配,但并未对其进行深入探讨分析^[7]。朱晓亮等对块状礁盘、贝壳、珊瑚三类钙质砂砾样进行冲击破碎试验,分析冲击能、冲击次数对砾样颗粒级配的影响,并对其颗粒破碎程度进行了划分,对冲击过程中土粒类型演变和颗粒破碎的分选性进行了总结^[8]。秦月对钙质砂砾进行了高压侧限压缩试验,分析钙质砂砾高压下的侧限压缩变形和颗粒破碎^[9]。王新志通过模型试验方法,采用不同荷载板型,对不同相对密度的钙质砂进行室内荷载试验研究,分析了钙质砂的压缩特性、承载力特性和荷载板荷载传递模式^[10]。姜璐研究了典型级配条件的钙质砂对其力学性质的影响,进行了钙质砂的三轴剪切力学特性试验,探讨各级配钙质砂的应力-应变关系曲线^[11]。莫洪韵通过对岛礁砂-岩混合料压缩、剪切、击实和渗透试验,分析了级配混合料的工程性质影响,对钙质砂的基本力学性能进行分析^[12]。

上述研究主要集中在利用钙质砂砾作为工程建设填料可行性分析和压实效果的研究,大多考虑的是振冲或碾压对珊瑚料压实度、最优含水率、承载力等工程性质方面的影响。根据已有岛礁研究,如此大规模应用冲击方法加固的钙质砂填料地基时,钙质砂砾受到冲击作用,必然会导致钙质砂砾颗粒的破碎、其自身级配会发生改变,粒组百分含量相应改变。而已有研究表明:颗粒级配会对土体抗液化性质^[13]、管涌^[14]、静态液化^[15]、渗透性^[16]、结构性^[17]、压实性^[18]、剪切特性^[19]等产生影响,对其工

程特性影响颇多。

此外地基填筑不仅要考虑地基压实度和承载特性等问题,还要考虑地基在受到外部荷载作用时的动力响应问题,尤其是现有研究表明:当地基填料中细砂含量增多时,更易导致地基液化,对岛礁上机场道路承受动荷载十分不利。此外珊瑚岛礁周围复杂的海洋环境,例如在潮汐水位波动条件下细小颗粒更容易在土体骨架内随水流动迁移,引起已填路基中砂砾结构的变化,容易造成路基内部颗粒骨架“缺陷”,易引起道路损坏。考虑路基填料的级配问题也十分重要。冲击加固是作为岛礁地基处理中规模化使用的施工手段,对易破碎的钙质砂砾回填料的颗粒级配会产生影响,对其工程性质的影响问题不容忽视。有鉴于此,围绕地基处理时冲击对钙质砂砾回填料的级配改变问题,开展不同冲击能对钙质砂砾料变形、颗粒破碎、级配、粒组百分含量、砂砾比例影响的试验。

1 试验概况

1.1 试样情况

试样取自我国南海附近某海域,是一种松散的未胶结碎屑物,试验前进行清洗、烘干、筛分待用。试样为 2~5 mm、5~10 mm、10~20 mm 的三种不同粒径钙质砂砾,试验按照 SL 237—1999《土工试验规程》^[20]中规定的土颗粒相对密度测定方法测定试样最大孔隙比 e_{max} 和最小孔隙比 e_{min} ,试样的基本物理性质如表 1。

表 1 试样基本物理性质

Table 1 Physical properties of specimens

粒组/ mm	最小孔隙比 e_{min}	最大孔隙比 e_{max}	天然孔隙比 e_0	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	平均粒径 d_{50}/mm	含水率/%
2~5	1.232	1.678	1.508	1.652	0.962	3.5	0.20
5~10	1.734	2.348	2.114	1.455	0.956	7.5	0.16
10~20	2.180	2.905	2.630	1.454	0.952	15.0	0.11

1.2 试验方案

试验在改进的马歇尔击实仪上进行,总冲击能分别为:100 200 300 500 600 900 1 000 1 500 N·m。开展平行试验 3 次,取 3 次试验平均值作为试验结果。试验主要从冲击能、初始级配考虑冲击作用对钙质砂砾颗粒级配的影响,试样尺寸为 $\phi 200 \times 100$,设置相对密度为 $D_r = 0.38$,根据相对密度控制式(1),计算装填填土的孔隙比 e_0 ,根据式(2)试样尺寸计算控制干密度 ρ_d ,并由试样尺寸得到装填质量,填料分 5 次加入,控制每层高度为 20 mm,试验加入后用振动叉敲击模型盒侧壁,填筑到试样制定高度,试验完

毕后 将试样从模具中小心取出 ,进行颗粒筛分试验 ,筛分时间为 15 min。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

$$\rho_d = \frac{e_0 + 1}{\rho_w G_s} \quad (2)$$

式中: ρ_w 为水的质密; G_s 为土颗粒相对密度。

2 试验结果

2.1 试样变形量

图 1 为试样在冲击作用下孔隙比 e 与总冲击能 E 的关系曲线 ,可以看出: 整体而言 ,随着冲击能的增大 ,孔隙比逐渐减小 ,其孔隙比变化前主要发生在冲击加载前期 ,变化幅度较大 ,后期变化幅度逐渐减小 ,最终试样孔隙比 e 趋于稳定。对于单粒组而言 ,相同总冲击能条件下 ,平均粒径越小 ,其孔隙比变化量越小 ,主要是因为试样变形由颗粒重新排列和颗粒破碎造成 ,平均粒径越小 ,所需破碎应力越大 ,颗粒破碎造成的试样变形量越小。通过对曲线分别拟合 ,发现其均满足式 (3) ,且相关性良好 ,方程相关参数如表 2 所示。

$$e = A_1 \exp\left(-\frac{E}{t_1}\right) + y_0 \quad (3)$$

式中: e 为试样孔隙比; E 为冲击能; A_1 、 t_1 、 y_0 为试验参数。

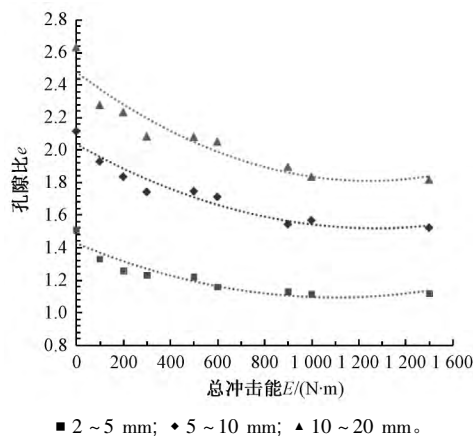


图 1 孔隙比 e 与总冲击能 E 关系曲线

表 2 函数拟合参数

Table 2 Functional fitting relation equation

粒组/ mm	y_0	A_1	t_1	相关系数 R^2
2~5	1.099 6	0.278 5	419.84	0.939 7
5~10	1.451 5	0.531 1	667.26	0.916 1
10~20	1.696 7	0.656 1	789.55	0.927 8

2.2 试样颗粒破碎

利用 Hardin 相对破碎率模型对钙质砂颗粒破

碎进行定量化描述 ,该模型利用粒径 $D = 0.074$ mm 竖线与颗粒破碎前、后颗粒分曲线之间所围面积为总破碎势 B_t ,与初始颗粒分曲线所围面积为初始破碎势 B_p ,二者之比定义为相对破碎率 B_r :

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (4)$$

图 2 为试样在不同总冲击能 E 下的颗粒破碎率 ,从中可以看出: 相同总冲击能 E 下 ,粒径对试样相对颗粒破碎率 B_r 影响显著 ,粒径越大其相对破碎率 B_r 越大 ,是因为随着粒径的增大 ,颗粒棱角角度增大 ,内部孔隙数量增多 ,更容易发生颗粒破碎。此外 ,随着总冲击能 E 增大 ,试样相对破碎率 B_r 逐渐增大 ,但存在弱化趋势。这主要是因为冲击力的作用下 ,颗粒骨架间棱角大 ,颗粒间点点接触多 ,冲击对骨架造成破坏致使试样相对破碎率 B_r 增长较快。随着总冲击能 E 的增大 ,颗粒破碎程度增大 ,与此同时钙质砂砾颗粒破碎形成细小颗粒也填充到骨架中 ,共同分担了冲击应力 ,使得颗粒骨架稳定性重新得到增强 ,反过来减弱颗粒破碎趋势 ,相对破碎率 B_r 增长弱化。可见存在临界总冲击能 E_{cr} ,总冲击能 E 超过该值后 ,试样相对破碎率 B_r 增长开始减缓。

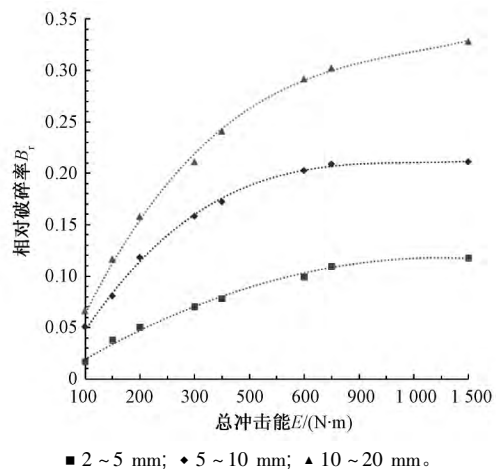


图 2 相对破碎率 B_r 与总冲击能 E 关系曲线

Fig. 2 Relation curves of relative crushing ratio B_r and total impact energy E

2.3 粒组百分含量与冲击能 E 关系

图 3 是试样在不同总冲击能 E 下的颗粒破碎情况 ,从中可以看出: 随着总冲击能 E 的增大 ,各粒组百分含量在发生变化 ,随着总冲击能 E 的增大 ,其原始颗粒含量百分比持续下降 ,新形成粒组百分含量变化越大。在相同总冲击能 E 下 ,试样平均粒径越大 ,其原始粒组百分含量变化越明显 ,例如 2~5 mm 组试样在总冲击能达到 1 500 N·m 时 ,其百分含量约为 12% ,而 5~10 mm 组试样的

粒组百分含量变化为 18% ,10 ~ 20 mm 粒组百分含量变化达到 32% ,差异性非常明显。此外 ,颗粒百分含量增大较为明显的 ,均为原始粒组最大粒径的下一级粒径区间 ,其余粒组百分含量变化基本呈现出依次减弱趋势。可见冲击作用对粒组百分含量变化有显著影响 ,钙质砂砾破碎后形成更细小的颗粒。

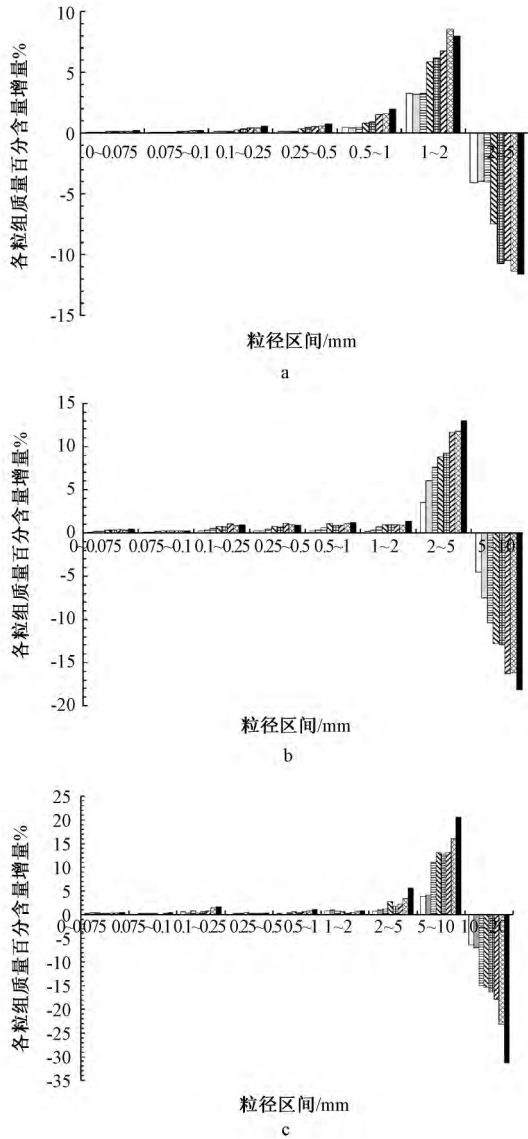


图 3 粒组百分含量与总冲击能 E 关系曲线
 a—2 ~ 5 mm; b—5 ~ 10 mm; c—10 ~ 20 mm。
 □ 100 N·m; □ 200 N·m; ▨ 300 N·m; ▩ 500 N·m;
 ▪ 600 N·m; ▫ 900 N·m; ▧ 1 000 N·m; ■ 1 500 N·m。

图 3 Relation curves of percent particle size and total impact energy E

图 4 为试样含砂量 $w_{砂}$ 与总冲击能 E 关系曲线 ,以 SL 237—1999 中^[20]砂粒径介于 0.075 ~ 2 mm 的标准计算试样中含砂量 $w_{砂}$ 值。由图 4 可以看出:在冲击作用下 ,含砂量 $w_{砂}$ 值随冲击能 E 增加而增

大 ,且平均粒径越小 ,含砂量 $w_{砂}$ 值越大 ,例如粒径相对较小的 2 ~ 5 mm 粒组试样 ,其含砂量 $w_{砂}$ 变化较大。在 $E = 1 500 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时 ,砂砾中含砂量 $w_{砂}$ 达到 11.6% ,且从图 3 可发现其下一粒径区间 1 ~ 2 mm 增量明显 ,对 5 ~ 10 mm 和 10 ~ 20 mm 粒组的试样其含砂量 $w_{砂}$ 分别增至 5.1%、4.8% ,相对 2 ~ 5 mm 粒组含砂量 $w_{砂}$ 变化较小。

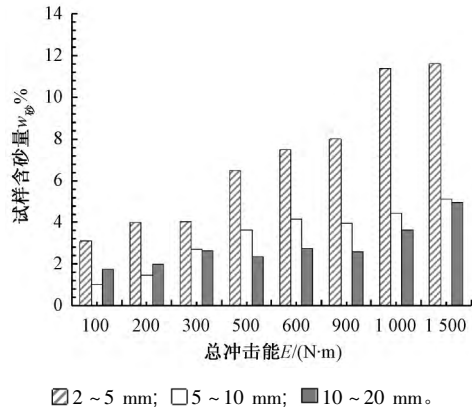


图 4 试样含砂量 $w_{砂}$ 与总冲击能 E 关系曲线

Fig. 4 Relation curve of sand content and total impact energy E

2.4 试样颗粒级配 C_c 、 C_u 与冲击能 E 关系

钙质砂在冲击作用下导致颗粒破碎 ,试样粒组百分含量发生变化 ,其不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 也会发生改变。图 5、图 6 分别为试样不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 与总冲击能 E 的关系。

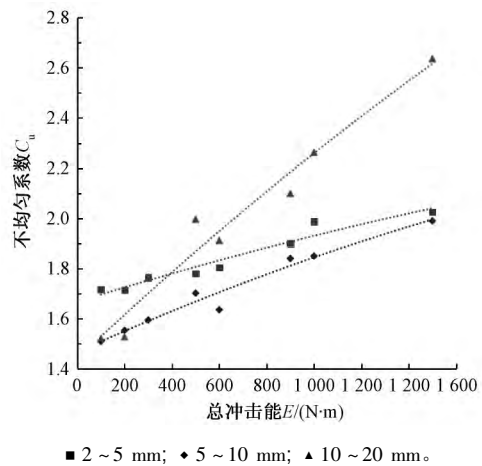


图 5 试样 C_u 值与总冲击能 E 关系曲线

Fig. 5 Relation curves of C_u value and the total impact energy E

从图 5、图 6 可以发现:总体来看 ,对单粒组而言 ,其 C_u 、 C_c 随着总冲击能 E 的增大逐渐增大 ,表明随着总冲击能 E 的增大 ,试样颗粒级配变得越来越良好。10 ~ 20 mm 粒组试样的 C_u 、 C_c 值变化幅度比 2 ~ 5 mm、5 ~ 10 mm 试样的粒组变化更为明显 ,可见相同总冲击能 E 条件下 ,试样平均粒径越大 ,其 C_u 、 C_c 值变化幅度越明显。对 C_u 、 C_c 与总冲击能 E

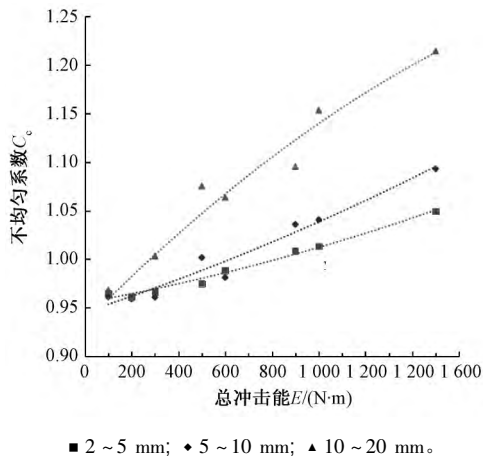


图6 试样 C_c 值与总冲击能 E 关系曲线

Fig. 6 Relation curves of C_c value and the total impact energy E

进行拟合发现,其满足二项式函数关系式(5),且相关性较好,方程基本参数如表3、表4所示。

$$C = A_1 E^2 + A_2 E + A_3 \quad (5)$$

式中: C 为曲线系数或不均匀系数。

表3 C_u 值与 E 拟合方程基本参数

Table 3 C_u value and E fitting equation basic parameters

粒组/mm	A_1	A_2	A_3	相关系数 R^2
2~5	-3×10^{-8}	3×10^{-4}	1.666 9	0.944 8
5~10	-5×10^{-8}	4×10^{-4}	1.466 7	0.965 2
10~20	-7×10^{-8}	9×10^{-4}	1.440 0	0.962 0

表4 C_c 值与 E 方程基本参数

Table 4 C_c values and E equation basic parameters

粒组/mm	A_1	A_2	A_3	相关系数 R^2
2~5	1×10^{-8}	4×10^{-5}	0.955 1	0.986 1
5~10	1×10^{-8}	8×10^{-5}	0.945 5	0.958 6
10~20	-4×10^{-8}	2×10^{-4}	0.934 9	0.958 4

2.5 试样平均粒径 d_{50} 与冲击能 E 关系

图7为单粒组平均粒径 d_{50} 与总冲击能 E 的关系,从中可以看出:试样平均粒径 d_{50} 随总冲击能的增大有减小趋势,对二者进行函数拟合,呈线性负相关性,从中还可看出:初始平均粒径越大,总冲击能 E 对其平均粒径 d_{50} 变化影响越大,例如对于2~5 mm 粒组而言,随着总冲击能 E 的增大,其平均粒径 d_{50} 变化十分微弱,当 $E = 1\ 500\ \text{N}\cdot\text{m}$ 时其变化量才仅为0.3 mm,此时5~10 mm 粒组平均粒径 d_{50} 变化为0.5 mm,而10~20 mm 粒组其平均粒径 d_{50} 变化量达到2.2 mm。这主要是由于颗粒平均粒径越大,其自身孔隙数量越多,相同总冲击能 E 作用下越容易发生颗粒破碎,形成细小颗粒,致使试样平均粒径 d_{50} 减小。

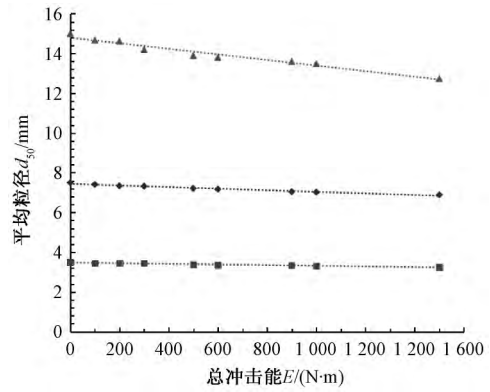


图7 平均粒径 d_{50} 与总冲击能 E 关系曲线

Fig. 7 Relation curves of mean particle size d_{50} and total impact energy E

3 结束语

1) 试样孔隙比随总冲击能增大而逐渐减小。在冲击作用前期孔隙比减小较快,随后变化减缓,后期趋于稳定。相同总冲击能条件下,试样平均粒径越小,孔隙比变化量越小,孔隙比变化越容易出现稳定,对孔隙比与总冲击能进行曲线拟合,两者的指数函数相关性较好。

2) 随着总冲击能的逐渐增大,试样相对破碎率逐渐增大,但其增加幅度逐渐减弱。颗粒破碎形成细小颗粒,有增强颗粒骨架稳定性,减弱颗粒破碎趋势。相同总冲击能时,平均粒径越大,其相对破碎率值越大。存在临界总冲击能,总冲击能超过该值后,试样相对破碎率增长开始减缓。

3) 随着总冲击能的增大,不均匀系数、曲率系数逐渐增大,其拟合值与总冲击能具有较好的二项式函数相关性,冲击作用对钙质砂的级配具有改良作用。

4) 冲击致使钙质砂砾粒组百分含量发生明显变化,其下一级粒径粒组百分含量变化最为明显,随着总冲击能的增大,含砂量增大,相应含砾量减小,且平均粒径越小,含砂量变化越明显。平均粒径随总冲击能 E 的增大逐渐减小,线性负相关性较好,相同总冲击能下,初始平均粒径越大,平均粒径变化越明显。利用钙质砂组作为回填料时,应充分考虑冲击能大小对钙质砂砾颗粒级配的影响和砂砾比例的变化,确定合理的施工工艺。

参考文献

[1] 孙宗勋,赵焕庭.珊瑚礁工程地质学:新学科的提出[J].水文地质工程地质,1998,25(1):4-7.

(下转第157页)

爆面正压区效应的影响,同时端部的复杂构造会加剧爆炸冲击波的反射叠加及作用时间,不利于结构的抗爆。结构设计时应注意等边角钢构件规格的选择及端部连接的优化。

3) 在比例距离 $1.456\ 0\ \text{m}/\text{kg}^{1/3}$ 的静爆试验中,测量了试件迎爆面及自由场中的超压时程曲线。各工况测点的超压时程曲线呈现出明显的三角形荷载分布特征,同一工况中迎爆面各处受到的爆炸冲击荷载差异较小。

4) 在比例距离 $0.145\ 6\ \text{m}/\text{kg}^{1/3}$ 的静爆试验中,测量了试件中部的残余变形。等边角钢试件的两肢中部均呈现出局部弯曲变形的特征。工况 G3-3 中规格 $\angle 100 \times 6$ 等边角钢试件的纵向残余变形达到了 $42.2\ \text{mm}$, 横向残余变形达到了 $28.4\ \text{mm}$, 较规格 $\angle 70 \times 6$ 和 $\angle 50 \times 6$ 的等边角钢试件同比增大了 145% 和 335% 。各工况中试件迎爆面中部的残余变形随着试件宽厚比的增大而迅速增大。

参考文献

- [1] Zineddin M Z. Behavior of Structural Concrete Slabs Under Localized Impact [D]. USA: The Pennsylvania University, 2002.
- [2] Davidson J S, Fisher J W, Hammons M L, et al. Failure Mechanisms of Polymer-Reinforced Concrete Masonry Walls Subjected to Blast [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131 (8): 1194-1205.
- [3] Michael G O. Blast Simulator Wall Tests: Experimental Methods and Mitigation Strategies for Reinforced Concrete and Concrete Masonry [D]. Sandiego: University of California, 2009.
- [4] Pedro F S P E, Binggeng L. Blast Resistance Capacity of Reinforced Concrete Slabs [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135 (6): 708-716.
- [5] Langdon G S, Yuen S C K, Nurick G N. Experimental and Numerical Studies on the Response of Quadrangular Stiffened Plates. Part II: Localized Blast Loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005: 85-111.
- [6] 孙珊珊. 爆炸荷载下钢管混凝土柱抗爆性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [7] Salim H, Muller P, Dinan R. Response of Conventional Steel Stud Wall Systems Under Static and Dynamic Pressure [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19 (4): 267-276.
- [8] 刘彦东. 爆炸冲击荷载作用下简支圆板的动力响应分析 [D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [9] 张想柏, 杨秀敏, 陈肇元, 等. 接触爆炸钢筋混凝土板的震塌效应 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46 (6): 756-768.
- [10] 陈肇元, 高健, 王志浩. 人防工程抗爆隔墙的设计 [J]. 防护工程, 1992 (4): 1-17.
- [11] 师燕超, 李忠献. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的动力响应与破坏模式 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29 (4): 112-117.
- [12] Shi Y C, Hao H, Li Z X. Numerical Derivation of Pressure-Impulse Diagrams for Prediction of RC Column Damage to Blast Loads [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35 (11): 1213-1227.
- [13] 马云玲, 谢冰, 何大治, 等. 圆钢管混凝土爆炸响应的数值模拟 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32 (14): 120-126.
- [14] 阎石, 刘蕾, 齐宝欣, 等. 爆炸荷载作用下方钢管混凝土柱的动力响应及破坏机理 [J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31 (5): 477-482.
- [15] Ahmed Fahmy Farag Tolba. Response of FRP-Retrofitted Reinforced Concrete Panels to Blast Loading [D]. Ottawa, Canada: Carleton University, 2001.
- [16] 乔少蕾. 爆炸冲击波在复杂地下结构内传播规律的研究 [D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2009.
- [1] Zineddin M Z. Behavior of Structural Concrete Slabs Under Localized Impact [D]. USA: The Pennsylvania University, 2002.
- [2] Davidson J S, Fisher J W, Hammons M L, et al. Failure Mechanisms of Polymer-Reinforced Concrete Masonry Walls Subjected to Blast [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131 (8): 1194-1205.
- [3] Michael G O. Blast Simulator Wall Tests: Experimental Methods and Mitigation Strategies for Reinforced Concrete and Concrete Masonry [D]. Sandiego: University of California, 2009.
- [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.
- [3] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂在三轴剪切中颗粒存在评价及其能量公式 [J]. 工程地质学报, 1999, 7 (4): 366-371.
- [4] 张家铭. 钙质砂基本力学性质及颗粒破碎影响研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2004.
- [5] 张家铭, 张凌, 蒋国盛, 等. 剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (10): 2789-2793.
- [6] 贺迎喜, 董志良, 杨和平, 等. 吹填珊瑚礁砂(砾)用作海岸工程填料的压实性能研究 [J]. 中外公路, 2010, 30 (6): 34-37.
- [7] 余东华, 黄俊文, 贺迎喜. 强夯联合振动碾压加固珊瑚礁回填料地基 [J]. 中国水运, 2015 (2上): 283-285.
- [8] 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.
- [9] 秦月, 姚婷, 汪稔, 等. 基于颗粒破碎的钙质沉积物高压固结变形分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (11): 3123-3128.
- [10] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 钙质砂室内荷载试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (1): 147-156.
- [11] 姜璐. 击实条件下颗粒级配对钙质砂的力学特性影响研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [12] 莫洪韵. 岛礁钙质砂、岩混合料工程力学性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [13] 马玲. 黏粒含量对砂土抗液化能力影响的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [14] 姚志雄, 周健, 张刚, 等. 颗粒级配对管涌发展的影响试验研究 [J]. 水利学报, 2016, 47 (2): 200-208.
- [15] 李声立. 颗粒级配对砂土静态液化行为的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [16] 苏立君, 张宜健, 王铁行. 不同粒径级砂土渗透特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (5): 1289-1294.
- [17] 李广信. 论土骨架与渗透力 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (8): 1522-1528.
- [18] 高成雷, 严战友, 李建军, 等. 颗粒级配对无黏性土压实性的影响分析 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016 (2): 227-232.
- [19] 刘映晶, 李罡, 尹振宇, 等. 颗粒级配对粒状材料不排水力学特性的影响 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (2): 423-429.
- [20] SL 237-1999 土工试验规程 [S].