

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.002

爆炸荷载作用下礁沙地基钢塔架结构 动力响应试验探究*

钟冬望^{1,2}, 戴炯岚^{1,2}, 孟庆山³, 雷学文¹, 何理^{1,2}, 司剑峰^{1,2}, 杜泉^{1,2}

(1. 武汉科技大学, 武汉 430065; 2. 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065;
3. 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: 爆炸荷载作用下礁沙地基钢塔架结构动力响应的研究, 对我国的国防和岛礁工程建设具有重要的参考和现实意义。通过模型试验对不同礁沙地基类型、药量、爆心距等工况下钢塔架结构加速度动力响应信号进行测试, 结合量纲分析与 π 定理, 得到钢塔架结构模型的加速度动力响应计算公式, 并利用试验所采集的数据对计算公式进行参数拟合, 得出了在礁沙地基下钢塔架模型的加速度动力响应经验公式。

关键词: 礁沙地基; 量纲分析; π 定理; 加速度动力响应

中图分类号: TU391 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)01-0008-06

Experimental Study on Dynamic Response of Steel Tower Frame Structure on Reef Sand Foundation under Explosion Loading

ZHONG Dong-wang^{1,2}, DAI Jiong-lan^{1,2}, MENG Qing-shan³, LEI Xue-wen¹,
HE Li^{1,2}, SI Jian-feng^{1,2}, DU Quan^{1,2}

(1. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;
2. Hubei Province Intelligent Blasting Engineering Technology Research Center,
Wuhan 430065, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
State Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Wuhan 430071, China)

Abstract: The research on the dynamic response of steel tower frame structure on reef sand foundation under explosion loading has important practical significance for our national defense and reef engineering construction. In this work, the acceleration dynamic response signals of steel tower frame structure for different reef sand foundation types, explosive charges, distances to blasting center and other working conditions were tested through model tests. Combined with dimensional formula and π theorem, the acceleration dynamic response calculation formula of the steel tower frame structure model is obtained. Then this formula is fitted by using the data collected from the tests to determine the related parameters. Finally, the acceleration dynamic response empirical formula of steel tower frame model on reef sand foundation is obtained.

Key words: reef sand foundation; dimensional analysis; π theorem; acceleration dynamic response

收稿日期: 2020-12-16

作者简介: 钟冬望(1963-), 男, 博士、教授, 从事矿山工程力学、爆炸理论及其应用等方面的教学与科研工作, (E-mail) 1057831589@qq.com。

通讯作者: 孟庆山(1974-), 男, 研究员、博士生导师, 从事珊瑚岛礁工程地质和力学特性方面的研究工作, (E-mail) qsmeng@whrsm.ac.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574184, 51404175); 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20181109); 冶金工业过程系统工程湖北省重点实验室开放基金项目(Y201717)

随着我国海洋战略的提出, 利用开发海洋资源与维护我国的海洋权益日趋成为人们关注的一个焦点, 海洋安全不仅关系到我国的国防安全, 更使我国由一个传统的陆地强国逐步转型为一个新兴的海洋强国, 如何提高海洋科技被逐渐提上日程。海洋技

术的提高离不开各种海洋工程尤其是岛礁工程的建设,而礁砂地基是岛礁工程建设的主要地基环境,因此开展以礁砂地基为地基基础的构筑物的加速度响应规律有着极其重要的意义。

与传统的陆砂地基不同的是,礁砂地基由钙质砂构成^[1-3],其物理力学性质与陆砂有很大的不同,国内许多学者对礁砂地基特性做了研究。如徐学勇、孟庆山等学者对爆炸密实动力特性做了分析^[3],通过测量设置在距爆源不同距离处的礁砂地基的声波速度来表征爆炸冲击波对礁砂地基的密实作用,在距离爆源近点处测得的声波纵波速度越高,爆炸密实性越好。汪稔、胡明鉴等学者开展了钙质砂爆炸密实动力特性研究^[1,4,5],试验证明:礁砂地基介质的密度对爆炸应力波的传播和衰减有着很大的影响,在相对密度不大于 56% 时,由于爆炸波的密实作用,爆炸冲击波的衰减的较快。通过前人的研究可以得知在相对密度较小时礁砂地基介质对爆炸波的传播衰减规律有很大的影响,并且爆炸地震波通过礁砂地基对结构物的基础输入效率与相对密度有关。吴琪、丁选明等利用振动台研究了礁砂地基中不同振动强度下桩-土-结构的地震响应^[6],并通过福建砂模型与礁砂地基模型对比,结果表明:在 0.2 g 的正弦波激励作用下,两种砂均发生液化,但礁砂地基与福建砂地基相比仍有一定的剪切传递力和刚度,并发现在不同振动强度下结构物的沉降、水平位移和立柱的弯矩比福建砂要小。

通过相关的试验结论可得,钙质砂对爆炸波的传播衰减规律与普通砂有明显不同,不同的振动强度、密实性以及含水率等因素都会影响爆炸波的传播^[7-12],进而影响建立在礁砂地基上的构筑物的动力响应。基于以上结论,开展礁砂地基爆炸荷载下构筑物的动力响应模型试验,通过正交试验分析在不同影响因素下高耸构筑物模型的加速度动力响应,为岛礁工程建设提供参考。

1 加速度动力响应试验

1.1 试验场地及设计

如图 1、2 所示,试验模型为塔型钢结构模型,其尺寸均通过现实工况相似得到。其中塔型钢结构模型设置了四个测点,分别为测点 1、2、3、4。测点分别距离模型底部的距离 10 cm、35 cm、57.5 cm、97.5 cm,其中基座的高度为 10 cm。本试验在不同药量、不同爆心距、不同礁砂地基工况下测得塔型钢结构沿高程各个测点的加速度峰峰值的响应规律。其中单次起爆药量分别设置为 50 g、100 g、150 g 三种情况,爆

心距分别设置为 75 cm、100 cm、150 cm 三种起爆距离,根据礁砂地基含水率分为干砂(含水率 0)、湿砂(含水率 50%)、饱和砂(含水率 100%) 三种情况,模型距离礁砂地基的前边界均为 50 cm。

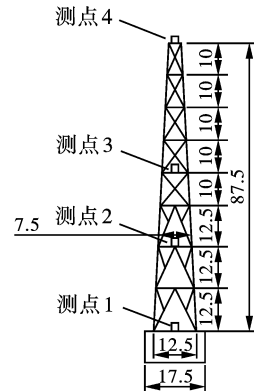


图 1 塔型钢结构模型示意图(单位:cm)

Fig. 1 Schematic diagram of tower steel structure model(unit:cm)

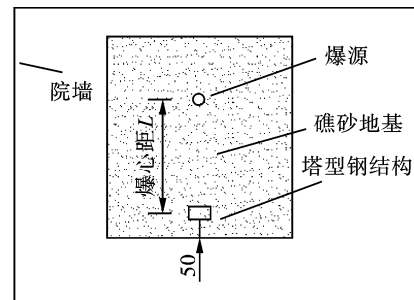


图 2 场地布置示意图(单位:cm)

Fig. 2 Site layout diagram(unit:cm)

本实验选用优泰超动态应变仪,其采样频率为 512 kHz,通道数为 16 通道。所使用的加速度传感器数量为 6 个,通过刚性连接在对应测点位置,并采集在爆炸荷载下塔型钢结构模型的加速度时程曲线,然后通过优泰软件及小波分析对比,读取各测点加速度的峰值。

1.2 不同工况下构筑物加速度峰值

查阅文献[2]可知,炸药在礁砂地基中爆炸时,在极短的时间内迅速释放大量的能量,炸药爆炸后的瞬间气体压力可以达到十几到几十万个大气压,在礁砂地基中距离药包较近的炮孔周围的介质将被压碎,但随着与药包的距离的增大,波阵面上的压力迅速衰减,由冲击波波衰减为为应力波,最后衰减为为地震波。

礁砂地基在地震波荷载下会产生附加应力,由于礁砂地基成分为饱和、半饱和的钙质砂土,而爆炸地震波波具有频率高、速度快、历时短等特点,钙质

砂中的孔隙水来不及流动,可以近似视为不排水条件,因此礁砂地基在附加应力的作用下会产生超静孔隙水压力直接作用于结构物基础上,引起结构物上部发生振动。根据斯开普顿三轴试验,得出孔隙水压力的计算公式为

$$\Delta u = \Delta u_1 + \Delta_2 = B[\Delta\sigma_3 + A\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)] \quad (1)$$

$$\Delta u_1 = B\Delta\sigma_3 \quad (2)$$

$$\Delta u_2 = \frac{1}{1 + \frac{nC_f}{C_{sk}}} A\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{1 + \frac{nC_f}{C_{sk}}} \quad (4)$$

式中: A 、 B 均为孔压系数,礁砂地基等软黏土 A 取值大于 $1/3$ 甚至是 1 ; C_f 、 C_{sk} 分别为土骨架的体积压缩系数和孔隙流体的体积压缩系数; n 为土的孔隙率。

图3是塔型钢结构模型测点1、测点2、测点3、测点4处测得加速度峰值随着药量增加的变化规律,此时模型与药包的爆心距为 150 cm ,地基工况为干砂,药量分别设置为 50 g 、 100 g 、 150 g 。从图3可以看出测点加速度峰值随着药量增加而增大,并且在爆心距一定范围内随着药量增加测点1的加速度峰值增大的趋势变慢,并且其他测点也有相同规律,这是因为在一定的药量条件下,炸药爆炸产生的地震波通过钙质砂传播作用到结构物基础,但是当工况为干砂时钙质砂是含水率为 0 的松砂,其颗粒表面没有毛细结合力,干砂的粘聚力 c 仅由颗粒之间的咬合力和排列方式来提供^[13,14],因此根据莫尔-库伦强度理论 $\sigma = \tan\varphi + c$,含水率为 0 工况时的钙质砂抗剪强度不是非常大,所以炸药爆炸时的药量超过一定范围后,炸药产生的地震波超过含水率为 0 的钙质砂的抗剪强度,使土颗粒之间结构发生破坏,颗粒之间类似于流体一样流动耗散能量,使得作用于地基上的载荷增加趋势大大减小,所以钢塔架结构物加速度峰值趋势随着药量增加趋势并不是很大。

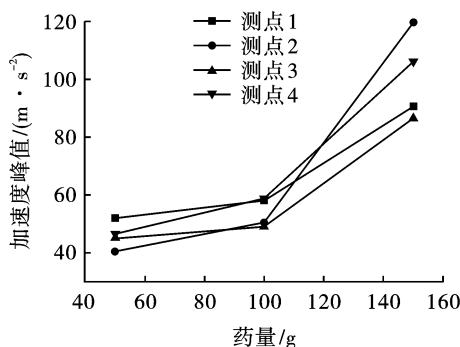


图3 测点加速度峰值随药量变化规律

Fig. 3 Peak value of acceleration with dosage

图4是模型测点1、测点2、测点3、测点4加速度峰值随着爆心距变化的衰减规律。此时单次起爆药量为 100 g ,礁砂地基工况为饱和砂即地基含水率为 100 ,模型与药包之间的爆心距分别设置为 75 cm 、 100 cm 、 150 cm 三种情况。从图3可以得到在饱和地基、单次起爆药量为 100 g 情况下,测点1、测点2的加速度峰值随着爆心距的增大而减小,并且随着爆心距增大减小的速度越来越慢,对比其他两个测点由相同的变化规律,根据式(1)与斯开普顿的三轴试验,爆炸地震波作为瞬时激励作用于地基上并产生附加应力,附加应力分别由土骨架的有效应力 $\Delta\sigma_3'$ 和超静孔隙水压力 Δu 共同承担,但是由于地震波激励持续时间很短,因此土骨架来不及发生变形产生有效应力^[15-17],所以地震波荷载基本是通过饱和和钙质砂地基中的孔隙水压力作用于结构物基础上,因此在饱和钙质砂地基中冲击波的传播衰减规律类似于药包在水中爆炸衰减规律,随着距离增大冲击波峰值呈现指数下降的趋势,因此结构物上部分的加速度动力响应随着爆心距的增加也呈现下降减缓的趋势。

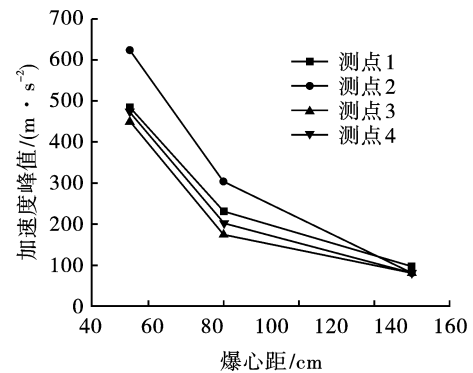


图4 测点加速度峰值随爆心距变化规律

Fig. 4 Peak value of acceleration of with distance

表1是模型沿高程测点1、测点2、测点3、测点4分别在地基工况为干砂(含水率 0)、湿砂(含水率 50%)、饱和砂(含水率 100%)时的加速度峰值,单次起爆药量均为 100 g ,爆心距分别为 150 cm 和 100 cm ,从表1可以看出各测点加速度峰值随着高程变化的规律不是非常明显,沿高程变化值变化不大。图5、图6分别为在上述两种工况下各个测点的加速度峰值随地基含水率变化的规律图。从图5、图6中可以看出,在爆心距为 150 cm 与 100 cm 的情况下,总体上各测点的加速度峰值随着礁砂地基含水率的增加呈现增加的趋势,根据密度-有效应力-抗剪强度唯一性关系,存在单一的有效应力强度包络线,且破坏时土样的含水率(密度)和强度间存

在唯一性关系,与排水路径无关,即钙质砂地基的有效应力抗剪强度随着密度的增大而增大,所以地震波在礁砂地基中的传播效率随密度也呈正相关的关系,因此地震波通过礁砂地基对结构物基础的激励输入随着密度增大而增强,结构物上部分的加速度动力响应越大。

表 1 各测点加速度峰值随含水率变化规律

Table 1 peak value of acceleration with water content

测点	爆心距/ cm	加速度峰值/(m·s ⁻²)		
		干砂	湿砂	饱和砂
1	150	58.583	64.778	97.243
2		50.468	66.041	82.168
3		49.186	57.921	81.173
4		58.826	67.136	82.168
1	100	145.49	165.67	231.55
2		144.74	152.76	304.45
3		155.89	199.55	231.16
4		170.40	177.91	187.52

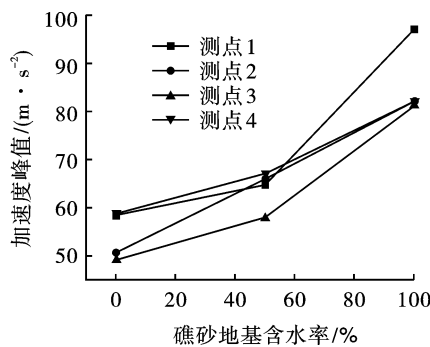


图 5 爆心距 150 cm 峰值随含水率变化

Fig. 5 Peak value with water content in 150 cm

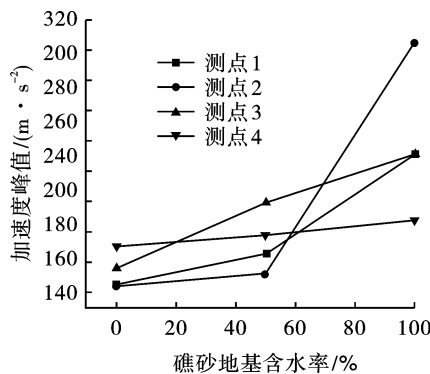


图 6 爆心距 100 cm 峰值随含水率变化

Fig. 6 Peak value with water content in 100 cm

2 动力响应分析

2.1 动力响应量纲分析

由于在实物进行试验需要耗费大量的人力、物力,所以可以把现实需要研究的对象通过相似理论

简化成具有一定比例的模型,通过研究模型的性质可以反映实际物体在相似条件下的物理规律。利用相似研究高耸结构物的动力响应,必须考虑到几何相似、运动相似、动力相似三个主要方面的相似性,应满足线性尺寸相同比例。利用相似性确定试验塔型钢结构模型的物理参数,然后结合试验研究目的,可以选择爆心距 L 、礁砂地基密度 ρ 、塔型钢结构模型高程 H 、药量 Q 、材料弹性模量 E 、测点加速度峰值 a 六个物理参数作量纲分析,其中加速度 ρ (m/s²) 由高程 H (m)、最大单响药量 Q (kg)、塔型钢结构模型弹性模量 E (Pa)、爆心距 L (m)、礁砂地基密度 ρ (kg/m³) 来表征在爆炸荷载下高耸结构物在礁砂地基条件下加速度动力响应规律。

由量纲定理可得,导出量的可以通过选择的基本量纲组合来表示,所选择的基本量纲组合需要满足包含 M 、 L 、 t 这三个基本量,所以可以选择 Q 、 E 、 L 为量纲分析中的基本量纲组合,由 π 定理可知,所研究的物理量可通过基本量纲组合化为量纲一的公式

$$\pi = Q^m E^n L^z \quad (5)$$

由式(5)可分别得到 ρ 、 a 与 H 的量纲一的公式

$$\pi_1 = \frac{\rho L^3}{Q} \quad (6)$$

$$\pi_2 = \frac{aQ}{EL^2} \quad (7)$$

$$\pi_3 = \frac{H}{L} \quad (8)$$

由式(6)、(7)、(8)可以得到如下关系

$$\frac{\rho L^3}{Q} = F\left(\frac{aQ}{EL^2}, \frac{H}{L}\right) \quad (9)$$

由式(9)得出试验各个参数之间满足的关系,通过其中 ρ 是礁砂地基在各个工况下的密度,可以在试验之前通过测量计算得到, Q 是每一次起爆时的单响药量, E 是试验模型钢结构塔的弹性模量,试验之前可以查知, L 是每次起爆时的爆心距。加速度时程曲线在起爆后通过优泰软件测得,并且通过滤波后可以读取加速度峰值 a ,式(9)中每一个物理量均可以通过测量计算得到,因此可以通过数学拟合的方式找到上述关系的具体表达式。

通过文献[18]可得式(9)中的表达式具体形式应满足以下关系

$$\frac{\rho}{QL^{-3}} = k\left(\frac{aQ}{EL^2}\right)^\alpha \left(\frac{H}{L}\right)^\beta \quad (10)$$

2.2 礁砂地基动力响应经验计算公式

利用 matlab 软件对式(9)在礁砂地基不同工况形式下进行多自变量参数拟合,将式中的 k 、 α 、 β

三个参数通过拟合得出。

1) 均匀混合干砂地基

拟合后其中的 α 取值为 -0.7287 , k 值为 0.000331 , β 值 -0.08377 。将上面的参数带入到式(10)中,并且将表达式整理可得

$$\frac{\rho L^3}{Q} = 0.000331 \left(\frac{aQ}{EL^2} \right)^{-0.7287} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.08377} \quad (11)$$

式(11)为礁砂地基在均匀混合干砂条件下,通过试验数据得到的拟合经验公式,其中干砂的密度 ρ 为 1.4615 kg/m^3 ,材料弹性模量为 E 为 $2 \times 10^{11} \text{ Pa}$,通过拟合得到的相关系数 R^2 为 0.7635 ,并且有比较高的可信度。

2) 均匀混合湿砂地基

通过式(10)的表达式形式,代入均匀混合湿砂地基下的密度 ρ ,密度 ρ 为 $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,得出 α 取值为 -0.5185 , k 值为 0.1214 , β 值 -0.02937 。通过拟合得到的相关系数 R^2 为 0.95 ,并且有比较高的可信度。

$$\frac{\rho L^3}{Q} = 0.1214 \left(\frac{aQ}{EL^2} \right)^{-0.5185} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.02937} \quad (12)$$

3) 均匀混合全饱和地基

通过式(10)的表达式形式,代入均匀混合湿砂地基下的密度 ρ ,密度 ρ 为 $1.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,得出 α 取值为 -0.5214 , k 值为 0.1246 , β 值 -0.06422 。通过拟合得到的相关系数 R^2 为 0.8412 ,并且有比较高的可信度。

$$\frac{\rho L^3}{Q} = 0.1246 \left(\frac{aQ}{EL^2} \right)^{-0.5214} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.0642} \quad (13)$$

从式(11)、(12)、(13)可得随着药量的增加,加速度的峰值也增加,峰值增加的速度呈幂函数趋势,各个测点的加速度由公式可得理论上是沿着高程的增加而减小的,但本次试验由于最大高程为 0.975 m ,最小高程为 0.1 m ,最大爆心距为 1.5 m ,最小爆心距为 0.75 m ,所以根据拟合公式的右边项分析,将高程与爆心距的比值带入到公式中,右边括号第二项的取值在 $1 \sim 1.1$ 左右,取值变化的幅度不是非常的明显,因此在误差范围内,实测的加速度峰值随着高程变化幅度应相接近,减少或者增加的幅度不大。

3 结论

(1)在礁砂地基作用下,钢塔架结构的加速度动力响应在一定药量下随着药量的增加而增加,但当超过某一药量时,产生的地震波激励大于钙质砂

的抗剪强度,此时药量对结构物的加速度峰值影响减小。

(2)构筑物的加速度峰值与爆心距的关系为随着爆心距的增加而减小,并且在一定药量下的条件下减小的速度趋势为越来越慢,特别是在饱和钙质砂工况下,由于土骨架来不及压缩变化,地震波的传播衰减主要由饱和砂中的水来承担,因此地震波在礁砂地基中传播衰减后对结构物的激励力类似于在水中传播衰减规律。

(3)在不同地基工况下,各测点加速度峰值随着含水率的增加而增加的规律,原因是根据根粘性土密度-有效应力-抗剪强度唯一性关系,对于同一种正常固结黏土,存在单一的有效应力强度包络线,因此礁砂地基的抗剪强度随着含水率(密度)增加而增加,地震波对结构物基础的激励力输入效率也增加。

参考文献 (References)

- [1] 徐学勇,汪 稔,胡明鉴,等. 饱和钙质砂爆炸密实动力特性试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(2):402-414.
- [1] XU Xue-yong, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Experimental study of dynamic behavior of saturated calcareous sand due to explosion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(2):402-414. (in Chinese)
- [2] 徐学勇. 饱和钙质砂爆炸响应动力特性研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2009.
- [2] XU Xue-yong. Study on dynamic behavior of saturated calcareous soil due to explosion [D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences, P. R. China, 2009. (in Chinese)
- [3] 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):147-151.
- [3] WANG Xin-zhi, WANG Ren, MENG Qing-shan. Study of plate load test of calcareous sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(1):147-151. (in Chinese)
- [4] 袁 泉,李文龙,高 燕,等. 钙质砂颗粒特征及其对压缩性的影响的试验研究[J]. 水力发电学报,2019,22(8):1-11.
- [4] YUAN Quan, LI Wen-long, GAO Yan, et al. Experimental research on the particle characteristics of calcareous sand and effect on compressibility [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019,22(8):1-11. (in Chinese)
- [5] 纪文栋,张宇亭,裴文斌,等. 钙质珊瑚钙质砂液化特性的动三轴试验研究[J]. 水道港口,2018,39(1):101-

- 106.
- [5] JI Wen-dong, GHANU Yu-ting, PEI Wen-bin, et al. Study on the coral sand liquefaction characteristics by dynamic triaxial test [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2018, 39(1):101-106. (in Chinese)
- [6] 吴 琪,丁选民,陈志雄,等 不同地震强度下珊瑚礁沙地基中桩-土-结构地震响应试验探究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(2):5-9.
- [6] WU Qi, DING Xuan-min, CHEN Zhi-xiong, et al. Experimental study on seismic reponse of pile-soil-structure in coral sand under different earthquake intensity [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(2):5-9. (in Chinese)
- [7] 刘汉龙,肖 鹏,肖 杨,等. MICP 胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(1):38-45.
- [7] LIU Han-long, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(1):38-45. (in Chinese)
- [8] 王 丽,鲁晓兵,时忠民. 钙质砂地基中桶形基础垂直动载响应实验研究[J]. *中国海洋平台*, 2009, 24(1):40-45.
- [8] WANG Li, LU Xiao-bing, SHI Zhong-min. Experimental study on vertical dynamic load response of barrel foundation in calcareous sand foundation [J]. *China Offshore Platform*, 2009, 24(1):40-45. (in Chinese)
- [9] 虞海珍,汪 稔. 钙质砂动强度试验研究[J]. *岩土力学*, 1999, 20(4):6-11.
- [9] YU Hai-zhen, WANG Ren. Experimental study on dynamic strength of calcareous sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(4):6-11. (in Chinese)
- [10] 刘爱军. 吹填区珊瑚地基层压实技术研究[J]. *工程技术*, 2019, 23(59):105-107.
- [10] LIU Ai-jun. Study on compaction technology of coral sand foundation in hydraulic fill area [J]. *Engineering Technology*, 2019, 23(59):105-107. (in Chinese)
- [11] 李彦斌,李 飒,刘小龙,等. 颗粒破碎对钙质砂压缩特性影响的试验研究 [J]. *工程地质学报*, 2019, 12(6):1-15.
- [11] LI Yan-bin, LI Sa, LIU Xiao-long, et al. Study on effect of particle breakage on compression properties of calcareous sands with oedometer tests [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 12(6):1-15. (in Chinese)
- [12] 侯贺营,曹永勇,张绍栋. 密度及应力水平对珊瑚砂强度变形特性影响[J]. *水利工程学报*, 2020(1):92-97.
- [12] HOU He-ying, CAO Yong-yong, ZHANG Shao-dong. Analysis of strength-deformation behavior of coral sand with different densities and stress levels [J]. *Hydr-Science and Engineering*, 2020(1):92-97. (in Chinese)
- [13] 高运昌,彭晓东,高 盟,等. 南海钙质砂的液化特性动三轴试验研究 [J]. *山东科技大学学报*, 2020, 39(2):70-75.
- [13] GAO Yun-Chang, PENG Xiao-dong, GAO Meng, et al. Dynamic triaxial test on liquefaction characteristics of calcareous sand in South China Sea [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology*, 2020, 39(2):70-75. (in Chinese)
- [14] 黄宏翔,陈育民,土建平,等. 钙质砂抗剪强度特性的环剪试验 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(6):2082-2088.
- [14] HUANG Hong-xiang, CHEN Yu-min, WANG Jian-ping, et al. Ring shear tests on shear strength of calcareous sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(6):2082-2088.
- [15] 任玉宾,王 胤,杨 庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(2):491-497.
- [15] REN Yu-bin, WANG Yin, YANG Qing. Effects of particle size distribution and shape on permeability of calcareous sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2):491-497. (in Chinese)
- [16] 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.
- [16] ZHANG Jia-ming, ZHANG Ling, JIANG Guo-sheng, et al. Research on particle crushing of calcareous sands under triaxial shear [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(10):2789-2793. (in Chinese)
- [17] 刘艺博. 南海吹填礁砂地基力学性质研究 [D]. 天津:中国民航大学, 2018.
- [17] LIU Yi-Bo. Study on mechanical properties of sand-filled reefs in the South China Sea [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018. (in Chinese)
- [18] 何 理,钟冬望,陈 晨,等. 岩质高边坡开挖施工的爆破振动监测与分析 [J]. *金属矿山*, 2017:1-5.
- [18] HE Li, ZHONG Dong-wang, CHEN Chen, et al. Monitoring and analysis of blasting vibration in high rocky slope excavation [J]. *Metal Mine*, 2017, 484:1-5. (in Chinese)