

doi: 10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.002

爆炸荷载作用下礁砂地基信号塔 位移特性试验研究*

钟冬望^{1,2} 伍岳^{1,2} 孟庆山³ 雷学文¹ 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: 开展吹填礁砂地基上高耸结构物在爆炸作用下的稳定性研究,对钙质砂地质中的工程建设具有重要的理论意义和参考价值。针对此问题,采用高速摄影技术,进行了礁砂地基信号塔的爆炸动力响应试验研究,改变药量、爆心距和地基含水率等影响因素,动态捕捉信号塔不同特征点位移大小,分析其位移时程曲线特征及峰值的变化规律。试验结果表明:药量 Q 和地基含水率 ρ 对信号塔位移峰值影响较大,药量从 50 g 增加到 150 g,信号塔位移峰值增幅为 150% ~ 170%,全饱和砂较干砂地基上信号塔的位移峰值增大了 105% ~ 135%;信号塔位移峰值随着爆心距 R 的增加呈下降趋势,地基中爆炸应力波的衰减速度随爆心距的增加逐渐趋缓,且爆炸地震波在信号塔上传播有高层放大效应;竖直方向的位移峰值均大于水平方向的位移峰值,在实际工程中应加强礁砂地基对结构物的竖向约束。

关键词: 爆破荷载; 钙质砂; 高速摄影; 位移

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2020)02-0008-05

Experimental Study on Displacement Characteristics of Signal Tower on Calcareous Sand Foundation under Blasting Loads

ZHONG Dong-wang^{1,2}, WU Yue^{1,2}, MENG Qing-shan³, LEI Xue-wen¹, SI Jian-feng^{1,2}, DU-Quan^{1,2}

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

2. Hubei Intelligent Blasting Engineering Technology Research Center, Wuhan 430065, China;

3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: The study on the stability of high-rise structures on the reef-filled sand foundation under the action of explosion has important theoretical significance and reference value for the construction of calcareous sand geology. Aiming at this problem, this paper uses high-speed photography technology to study the explosive dynamic response test of the signal tower on the calcareous sand foundation. By changing the influencing factors such as the charge volume, the distance between blasting point and testing point (R), and the percentage of ground water content, the displacement of different characteristic points of the signal tower is dynamically captured and the characteristics of the displacement time history curve and the variation of the peak value were analyzed at same time. The results show that the charge volume (Q) and the ground water content (ρ) have a great influence on the peak displacement of the signal tower, the charge volume changes from 50 g to 150 g and the peak value increases by 150% ~ 170%. The peak value of the signal tower on the fully saturated sand is 105% ~ 135% larger than that of the dry sand foundation. The peak displacement of the signal tower decreases with the increase of the distance (R). The attenuation speed of the explosion stress wave in the foundation gradually slows down with the increase of the distance (R), and the explosion seismic wave propagates on the signal tower with a high-level amplification effect. The displacement peaks in the ver-

tical direction are larger than the displacement peaks in the horizontal direction. In actual engineering, the vertical constraint to the structure with the reef sand foundation should be strengthened.

Key words: blasting load; calcareous sand; high speed photography; displacement

作为海上丝绸之路的中继站,南海岛礁的建设意义重大。目前,我国正在进行“填岛工程”,其上修建码头、机场、楼房等各类民用建筑物及军工设施,而这些吹填岛屿表面的沉积物为礁砂。礁砂主要成分为钙质砂^[1-2]。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,具有颗粒多孔隙、形状不规则、易破碎、粒间易胶结等特点,其力学性质与一般陆相、海相沉积物相比有明显的差异^[3-5]。为确保岛礁上建筑物的稳定性与安全性,有必要开展吹填礁砂地基上高耸结构物爆炸动力响应模型试验。

对于普通陆源砂在爆炸荷载作用下的动力特性,国内外学者已开展了大量研究。前苏联学者梁霍夫对饱和土中爆炸应力波传播问题做了开拓性试验和理论研究^[6],得出了应力波在准饱和土中传播及衰减的基本规律。钱七虎等进行了三相介质饱和土自由场中爆炸实验^[7],计算结果表明: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^[8]、燕琳等分别进行了深层药包爆炸压实试验和饱和砂地表爆炸沉降的试验^[9],论述了饱和砂爆炸过程的基本特性及其压实机制。关于钙质砂的研究,大多基于其基础物理力学性质。秦月等采用室内模型试验^[10],研究了钙质砂地基中单桩在不同受力方向下的承载性状。陈海洋等通过光学拍照和图像处理方法^[11],描述了钙质砂的分形特性。徐学勇等通过控制爆炸参数,测试不同参数作用时钙质砂爆炸前后声波特性和表面沉降规律^[12],揭示了饱和钙质砂爆炸密实动力特性。目前,关于钙质砂爆炸动力学方面的研究尚不多见。

高速摄影技术具有全局化、非接触式、高精度、高帧频等优点,有较强的直观性,已被运用于许多试验研究和工程实际,并得到较好的结果。因此,根据工程现场实际情况,结合相似理论配制不同的礁砂地基形式及信号塔结构模型,进行了礁砂地基爆炸

动力响应模型试验,通过高速摄影系统来记录和捕捉礁砂地基上结构物的特征点位移和变形情况,研究不同爆破参数、不同地基形式及含水率对礁砂地基上高耸结构物的爆炸位移特性的影响。

1 爆破试验

1.1 试验地基基础及结构物

本文试验中地基采用测试用礁砂样品,取自南海某岛礁附近海域,包含粗砂、细砂两种不同颗粒大小的钙质砂,组成均匀混合细砂、上部细砂下部粗砂、上部粗砂下部细砂三种地基形式,平铺于长 3 m、宽 1 m、深 0.6 m 的室外基坑中。基坑底层 10 cm 以黄沙铺底,其上用双层防水布做隔层,以减少礁砂地基中水分的流失,控制其含水率。地基上下分层高度均为 25 cm,每铺 10 cm 厚时,使用小型夯实机对礁砂夯实。试验现场布置如图 1、图 2 所示。



图 1 试验场地现场布置图

Fig. 1 Test site layout

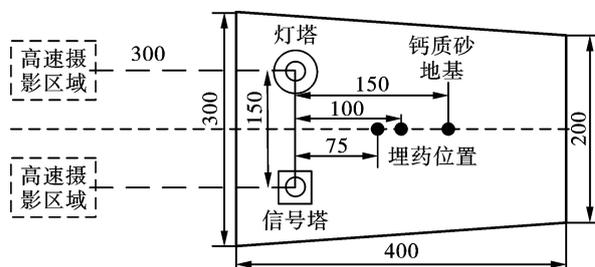


图 2 试验场地示意图(单位: cm)

Fig. 2 Test site schematic(unit: cm)

地基上的高耸结构物为塔形和筒形结构物型式,以模拟礁岛上信号塔、灯塔等结构,本文主要对信号塔结构进行了研究。塔形结构物上部结构采用钢架结构制作,高度约 85 cm,基础底板直径 17.5 cm,埋深 12.5 cm,采用 C30 混凝土浇灌制作,模型示意图如图 3 所示,将其底座埋于礁砂地基中。

收稿日期: 2020-01-06

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)

在信号塔上以相同的间距布置摄影专用动态捕捉标示点。

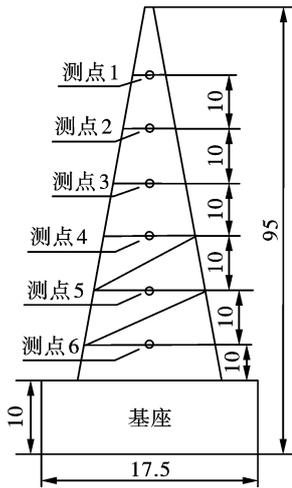


图 3 信号塔结构示意图(单位: cm)

Fig. 3 Signal tower structure diagram(unit: cm)

1.2 试验方法及试验参数

试验使用的炸药为 2#岩石化炸药,手工制成球形药包,插入单发导爆管雷管,采用耦合装药形式,炮孔用钙质砂堵塞,并用三层橡胶皮进行覆盖防护,上压沙袋,防止砂石飞溅。爆破方式为单孔爆破,炮孔布置在两结构物模型连线的中垂线上,药包埋深 0.25 m,爆心距(爆源到模型基座连线的垂直距离)分别为 0.75 m、1 m、1.5 m,可微调。炸药在砂土介质中爆炸,能量急剧释放,使炮孔周围介质破碎压缩,同时爆炸能量以波动形式向外传播,从而引起介质的质点振动。采用高速摄影机来记录塔模型上部结构的位移和变形情况,可以了解和分析礁砂地基上高耸结构物在爆炸荷载作用下的动力响应特性。高速摄影系统采用日本 NAC 公司的 GX-8 超高感光度高速相机,最高拍摄速度为 60 万幅/s,测试系统由摄影主机与装有 HX—Link 控制软件的计算机相连,通过手持型遥控器 J—Pad3 进行手动触发采集数据。拍摄时,要保证清晰拍摄到结构模型上的人工标示点,方便图像的后期处理。炮孔布置及高速摄影拍摄位置可见图 2。

试验参数基于以下 2 个方面:(1)在起爆方式上,通过改变起爆药量 Q 和爆心距 R 得出钙质砂地基中不同药量和爆心距的作用效果。(2)改变钙质砂地基的含水率 ρ 模拟岛礁涨潮、落潮时的地基形式,定义干砂、湿砂、全饱和砂(全淹没)三种含水率,得出不同含水率对信号塔结构爆炸动力响应的影响。

1.3 图像处理

试验中,高速摄影统一采用 3000 fps 拍摄帧率,

像幅 852×384 像素,将高速摄影拍摄得到的原始文件保存为 AVI 视频格式,采用配套的视频分析软件,动态捕捉模型塔上的标记点,得到不同捕捉点在拍摄平面 X 、 Y 方向上的位移时程曲线,对应导出 EXCEL 表,得出各测点位移峰值。其中, X 为拍摄平面的水平方向, Y 为竖直方向,如图 4 所示。图 5 为试验流程图。

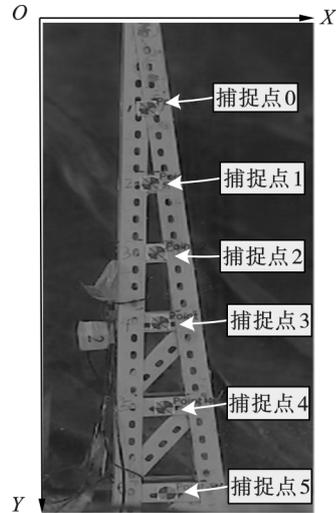


图 4 动态捕捉标示点及坐标方向示意图

Fig. 4 Dynamic capture of marker points and coordinate directions

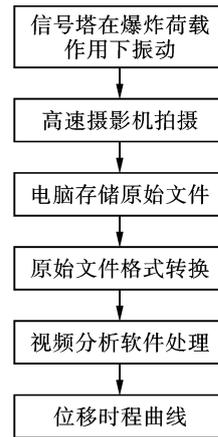


图 5 试验流程图

Fig. 5 Test flow chart

2 试验结果与分析

2.1 不同药量、爆心距对信号塔结构位移的影响

试验中有 50 g、100 g、150 g 三种炸药量,图 6 为均混干砂地基,爆心距 1.5 m,埋深 0.25 m 时,三种药量下信号塔测点 1 在 X 方向的位移时程曲线,其位移峰值分别为 0.19 cm、0.25 cm 和 0.51 cm。可看出,药量 Q 从 50 g 增大到 150 g,信号塔位移峰

值增大了 168%。如图 7 所示为均混干砂地基, 三种药量下信号塔结构上不同测点在 X、Y 方向的位移峰值趋势图。从图中可以看出, 随着药量的增加, 信号塔上三个捕捉点在 X、Y 方向上的位移峰值均呈增大趋势。且药量越大, 位移峰值的增量越大。整体上, 各捕捉点在 Y 方向上的位移峰值大于 X 方向上的位移峰值。

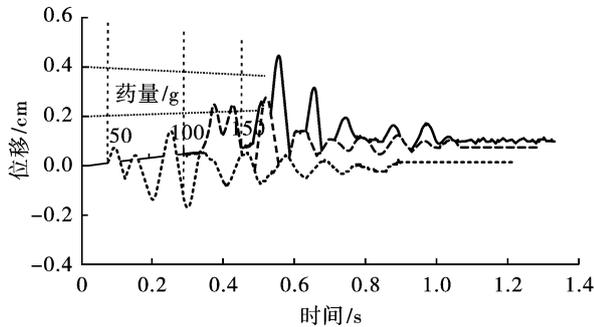


图 6 不同药量下信号塔位移时程曲线
Fig. 6 Signal tower displacement time history curve under different doses

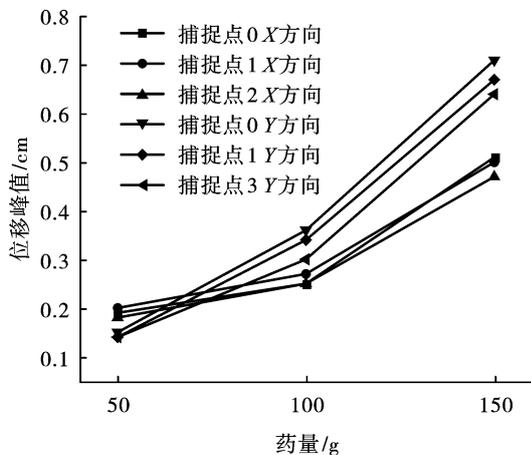


图 7 不同药量下信号塔位移峰值趋势图
Fig. 7 Peak trend of signal tower displacement under different doses

如图 8 所示为上细下粗湿砂地基, 药量 100 g, 埋深 0.25 m, 爆心距分别为 0.75 m、1 m、1.5 m 时, 信号塔测点 1 在 X 方向的位移时程曲线, 其位移峰值分别为 0.99 cm、0.53 cm 和 0.4 cm。可发现, 爆心距 R 从 0.75 m 增大到 1.5 m, 其位移峰值减小了 59.6%。图 9 为上细下粗湿砂地基, 不同爆心距下信号塔三个捕捉点在 X、Y 方向上位移峰值趋势图。测试结果显示, 随着爆心距的增加, 信号塔各捕捉点在 X、Y 方向上的位移峰值呈减小趋势。且爆心距越小, 位移峰值的差值越大, 说明钙质砂中爆炸应力波衰减速度在一定近的距离内相对较快, 而随着爆

心距增大, 衰减速度逐渐趋缓。整体上, Y 方向的位移峰值大于 X 方向的位移峰值。

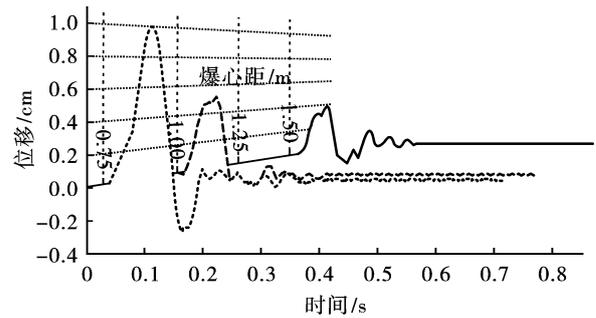


图 8 不同爆心距下信号塔位移时程曲线
Fig. 8 Time history curve of signal tower displacement under different blasting distances

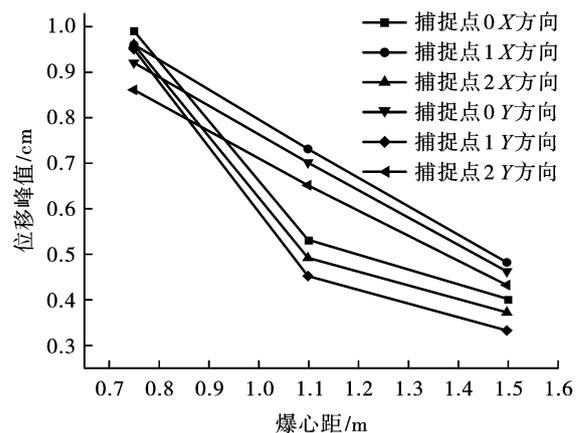


图 9 不同爆心距下信号塔位移峰值趋势图
Fig. 9 Peak trend of signal tower displacement under different blasting distances

综合对比其他地基形式下各测点数据, 分析表明: (1) 随着药量增加, 钙质砂地基上信号塔结构的位移峰值呈增大趋势; 药量 Q 从 50 g 增大到 150 g, 信号塔的位移峰值增大了 150% ~ 170%。(2) 随着爆心距增大, 信号塔的位移峰值呈减小趋势, 且钙质砂中爆炸应力波的衰减速度逐渐趋缓; 爆心距 R 从 0.75 m 增大到 1.5 m, 信号塔的位移峰值减小了 50% ~ 65%。(3) 信号塔竖直方向的位移峰值均大于水平方向的位移峰值。

2.2 不同高程下信号塔的位移特性

图 10 为上粗下细湿砂地基, 药量 100 g, 埋深 0.25 m, 爆心距 1.1 m 时, 信号塔不同高程位移峰值的变化趋势。结合多次试验数据表明, 随着信号塔的测点高度 H 的增加, 位移峰值呈增大趋势, 最高测点位移峰值较最低测点的位移峰值增大了 27% ~ 50%。整体上, 各测点在 Y 方向的位移峰值大于 X 方向的位移峰值。

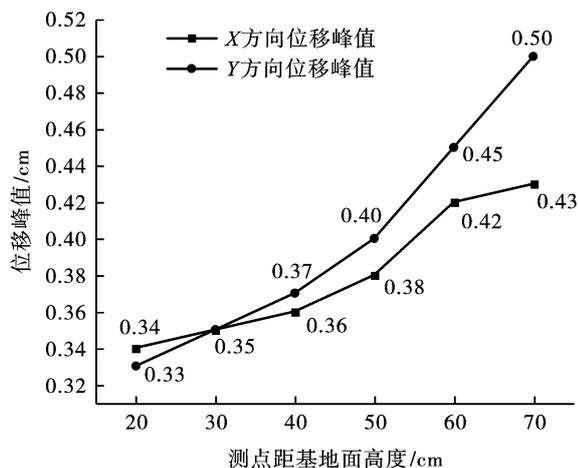


图 10 信号塔不同高程位移峰值趋势图

Fig. 10 Signal tower different elevation displacement peak trend graph

2.3 不同含水率地基下结构位移特性

图 11 为均匀混合砂地基,分别在干砂、湿砂和全饱和砂的情况下,药量、埋深一定,信号塔位移峰值随爆心距变化的情况。从图中可以看出,在 X、Y 方向上均有,全饱和砂地基上的位移峰值 > 湿砂地基上的位移峰值 > 干砂上的位移峰值。表明在有一定含水率时,礁砂地基介质内孔隙变小,同时,爆炸冲击波在水介质中的传播速度较砂土介质要快,能量衰减小,所以地基的含水率越大,信号塔的动力响应越大。在爆心距为 0.75 m 时,三种地基上信号塔在 X 方向的位移峰值分别为 0.43 cm、0.57 cm、1.01 cm,全饱和砂和湿砂地基较相对干砂地基分别增大了 32.5% 和 134.8%。综合对比其他测点数据分析,全饱和砂较干砂地基上信号塔的位移峰值增大了 105% ~ 135%。

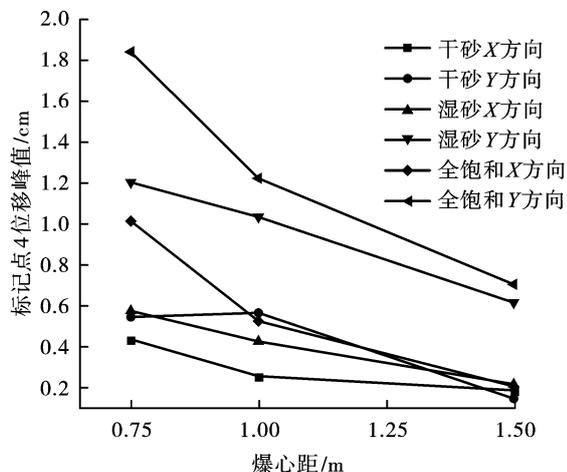


图 11 不同含水率下信号塔位移峰值趋势图

Fig. 11 Peak trend of signal tower displacement under different water cuts

3 结论

采用高速摄影系统,测量得出礁砂地基上信号塔结构在爆炸载荷作用下的位移时程曲线,分析其爆炸动力响应规律,得出以下结论:

(1) 在不同礁砂地基形式下均有,随着炸药药量 Q 、礁砂地基含水率 ρ 和测点高度 H 的增加,信号塔的位移峰值呈增大趋势;随着爆心距 R 的增加,信号塔的位移峰值呈减小趋势,且地基中爆炸应力波的衰减速度逐渐趋缓。

(2) 相比几个影响因素,礁砂地基含水率和炸药量对信号塔结构位移影响较大,药量从 50 g 增加到 150 g,信号塔位移峰值增大量为 150% ~ 170%,全饱和砂较干砂地基上信号塔位移峰值增大了 105% ~ 135%。其次,礁砂地基中的爆炸地震波在信号塔上传播有一定的高程放大效应。

(3) 信号塔在竖直方向的位移峰值均大于水平方向的位移峰值,说明礁砂地基对信号塔结构基座的竖向约束力较弱,应加强结构物与礁砂地基竖向连接形式方面的研究。

参考文献 (References)

- [1] 金宗川. 钙质砂的休止角研究与工程应用 [J]. 岩土力学 2018, 39(7): 2583-2590.
- [1] JIN Zong-chuan. Study of natural repose angle of calcareous sand and engineering application [J]. Rock and Soil Mechanics 2018, 39(7): 2583-2590. (in Chinese)
- [2] FAHEY M. The response of calcareous soils in static and cyclic triaxial test [C] // Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments. Perth [s. n.], 1988: 61-68.
- [3] 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.
- [4] DONTSOV V E, NAKORYAKOV V E. Enhancement of shock waves in a porous medium with a liquid containing gas bubbles [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001(27): 2023-2041.
- [5] 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.
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] 梁霍夫. 岩土中爆炸动力学基础 [M]. 刘光震, 王明洋, 译. 南京: 工程兵工程学院, 1993.

(下转第 19 页)

- 34(4):65-68.
- [7] DU Hong-mian, CAO Xue-you, HE Zhi-wen, et al. Analysis and verification of characteristics of air and ground shock waves in near-earth explosions [J]. Journal of Missile and Guidance 2014, 34(4):65-68. (in Chinese)
- [8] TOLBA A F F. Response of FRP-retrofitted reinforced concrete panels to blast loading [D]. Ottawa, Canada: Carleton University 2001: 12.
- [9] BRODE H L. Blast wave from a spherical charge [J]. Physics of Fluids, 1959(2):217.
- [10] 龙建华, 苏红梅, 胡八一. 小当量密闭爆炸容器的设计 [J]. 设计与计算 2005(11):86-87.
- [10] LONG Jian-hua, SU Hong-mei, HU Ba-yi. Design of small equivalent sealed explosive vessel [J]. Design and Calculation 2005(11):86-87. (in Chinese)
- [11] BRAKE W E. Explosions in air [M]. Austin: University of Texas Press, 1974: 6-10.
- [12] 叶晓华. 军事爆破工程 [M]. 北京: 解放军出版社, 1999: 8.
- [13] 张晓光. 冲击波超压场重建技术研究 [D]. 太原: 中北大学 2018.
- [13] ZHANG Xiao-guang. Research on the technique of shock wave superpressure field reconstruction [D]. Taiyuan: North China University 2018. (in Chinese)
- [14] 刘晓峰, 年鑫哲, 王希之, 等. 冲击波反射超压沿刚性墙面的分布规律 [J]. 工程爆破 2015, 21(5):28-31.
- [14] LIU Xiao-feng, NIAN Xin-zhi, WANG Xi-zhi, et al. Distribution rule of shock wave reflection overpressure along rigid wall [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(5):28-31. (in Chinese)
- [15] DAMSE R S, SIKDER A K. Role of inorganic additives on the ballistic performance of gun propellant formulations [J]. Hazardous Materials 2008, 154:888-892.
- [16] 赵宝友, 马震岳. 大型岩体洞室采用柔性垫层减震的可行性研究 [J]. 地震工程与工程振动 2011, 31(5):138-144.
- [16] ZHAO Bao-you, MA Zhen-yue. Study on the feasibility of adopting flexible cushion for shock absorption in large rock cavern [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2011, 31(2):138-144. (in Chinese)
- [17] AHMED Fahmy Farag Tolba. Response of FRP retrofitted reinforced concrete panels to blast loading [D]. Canada: Carleton University 2001.

英文编辑: 柯 波

(上接第 12 页)

- [7] 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.
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] 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.
- [8] SHI Jiao-wang, TONG Jin-yue, XIONG Chang-han, et al. An experiment research on compaction of saturated sand soil by explosion [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1992, 9(4):25-32. (in Chinese)
- [9] 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.
- [9] YAN Lin, LIU 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. (in Chinese)
- [10] 秦月, 孟庆山, 汪稔, 等. 钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(6):1714-1720.
- [10] QIN Yue, MENG Qing-shan, WANG Ren, et al. A study on bearing characteristics of single pile in calcareous sand based on model experiment [J]. Rock and Soil Mechanics 2015, 36(6):1714-1720. (in Chinese)
- [11] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35(7):1831-1836.
- [11] ZHU Chang-qi, CHEN Hai-yang, MENG Qing-shan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands [J]. Rock and Soil Mechanics 2014, 35(7):1831-1836. (in Chinese)
- [12] 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):402-406.
- [12] XU Xue-yong, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Experimental study of dynamic characteristics of saturated calcareous soil explosion compaction [J]. Rock and Soil Mechanics 2012, 33(2):402-406. (in Chinese)

英文编辑: 黄 刚