

无固定连接式压缩机基础动力试验研究

任兴文¹, 郑娅娜¹, 杨 丽¹, 刘小军²

(1. 西安长庆科技工程有限责任公司, 陕西 西安 710018; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为获得无固定连接式压缩机基础的动力特性, 试验以某天然气集气站实际工程为依托, 采用现场地基基础压力监测、原位动力测试相结合的方法对该类型压缩机基础进行了研究。研究表明: (1) 无固定连接式压缩机基础底部的压力受压缩机动力作用的影响较小且其影响随深度的增加而减小; (2) 各土层压力波动随时间推移约 20 d 后趋于稳定, 稳定后的压力与静压力差值较小; (3) 基础设计采用的碎石垫层吸收了大量振动能量, 具有明显的减振效果, 削弱了动力作用对地基基础的影响; (4) 基槽侧边的碎石垫层在限制机组位移的同时降低了振动对基础的影响。

关键词: 无固定连接式压缩机基础; 碎石垫层; 动力特性

中图分类号: TU755

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0802-07

Dynamic test study of non-fixed connecting compressor foundation

REN Xingwen¹, ZHENG Yana¹, YANG Li¹, LIU Xiaojun²

(1. Xi'an Changqing Technology Engineering Co., Ltd., Xi'an 710018, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to obtain dynamic properties of non-fixed compressor foundation, the field monitoring and in-situ dynamic test were used to study the compressor foundation according to actual gas gathering station project. The results show that: (1) The bottom pressure of the non-fixed compressor foundation is less affected by the dynamic action of the compressor; (2) Its influence decreases with the increase of the depth. 20 days later the soil pressure tends to be stable, and the difference between the steady pressure and the static pressure is small; (3) The gravel cushion adopted in the foundation design absorbs a great deal of vibration energy, which has obvious damping effect and could weak the influence of the dynamic action on the foundation; (4) The side of the gravel cushion can reduce the influence of vibration on the basis and limit the displacement of compressor.

Key words: non-fixed connecting compressor foundation; gravel cushion; dynamic properties

大型压缩机是保证天然气处理厂增压站正常工作的核心部分, 也是天然气开发与运输中的重要环节^[1], 地基基础又是压缩机正常工作的关键, 一般基础设计方法为桩基础或大块式钢筋混凝土基础。学者们对如何优化传统压缩机基础进行了大量研究。何欢等^[1]通过分析大型压缩机的质量风险, 从控制水泥水化热、提高地脚螺栓安装精度等方面提出了风险预防措施。侯兴民等^[3]引入一般集中参数模型计算了振动台基础的动力响应。裴欲晓等^[4]指出对大型块体基础动力计算时应考虑到地基刚度系数的偏差和变化性且应对阻尼比的取值进行限制。蒋东旗等^[3]将动力机器的扰动荷载及基础形状作等效处理后, 进行了动力有限元计算, 说明了数值分析方法的优越性, 但仅从计算结果

的多样性上进行了说明, 没有将计算结果与实际工程作对比。叶昆等^[6]通过建立有限元模型, 分别进行了隔震基础在水平地震单独作用和水平竖向地震联合作用下的动力分析。刘晶波等^[7]提出了考虑土—结构相互作用计算大型机器基础动力反应的三维有限元方法, 用于基础与成层地基的动力相互作用分析。姚群凤等^[8]通过模型试验用有限元法对动力机器基础平台动力特性进行了分析, 确立了较为合理的力学模型。文波等^[9]通过建立考虑设备—结构相互作用的变电站主厂房有限元计算模型, 通过模态分析, 找出了主厂房结构及设备的动力特性, 以及考虑二者相互作用后系统的动力特性变化。

国内外对如何优化传统的动力机器基础设计

收稿日期: 2017-11-07

修改稿日期: 2018-11-21

基金项目: 西安长庆科技工程有限责任公司研究项目(CTEC(2015)Z-KY-004)

第一作者: 任兴文(1961—), 男, 高级工程师, 主要从事结构及地基基础设计与研究工作。E-mail: rxwl_cq@petrochina.com.cn

(桩基础、大块式基础)就行了大量研究,取得了一定成果,但未能改变这类基础构造复杂、浇筑困难、工程量大、周期长等弊端。砂土地基在持久振动荷载作用下易发生变形失稳,进行基础设计时应控制动力作用使地基产生的变形。郭和等^[10]在苏里格气田使用了无固定连接式压缩机基础,该基础设计降低了压缩机基础的施工周期、建设难度,避免了二次灌浆,减少了钢筋和混凝土的消耗,提高了气田开发的经济效益。工程实践表明,无固定连接式压缩机基础可应用于松散砂层场地,但是国内尚无相关理论和规范,经验资料缺乏,也未有人做过相关试验研究,故需对无固定连接式压缩机基础动力特性等进行研究。

本文以位于陕西省榆林市的天然气集气站实际工程为依托,通过现场监测压缩机运行初期各土层的压力变化,研究压缩机振动对地基基础的影响,初探其动力特性;利用原位动力测试采集的压缩机底橇及基础的位移参数,进一步研究该基础形式的动力特性。

1 工程概况

试验场地土层以砂土为主,如图1。主要设备为ZTY630大型活塞式压缩机,额定转速440 r/min,主要设备总重量为82.5 t,压缩机组如图2。



图1 试验场地情况

Fig. 1 Test site situation

本工程采用的是无固定连接式压缩机基础形式,从平面图上看,压缩机与底橇固定后放置于钢筋混凝土基础槽内,且底橇周边铺设一定厚度的碎石垫层,基础槽为适应压缩机组的形状设计为多边形,如图3。从剖面图上看,基坑开挖后从下至上依次为级配砾石垫层、素混凝土垫层、钢筋混凝土基础、中粗砂垫层、碎石垫层及压缩机底橇,如图4。本工程投产运行十九个月以来,一切正常。



图2 ZTY630大型活塞式压缩机

Fig. 2 ZTY630 large piston compressor

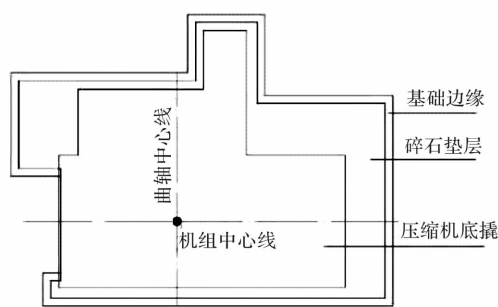


图3 基础平面图

Fig. 3 Foundation plan

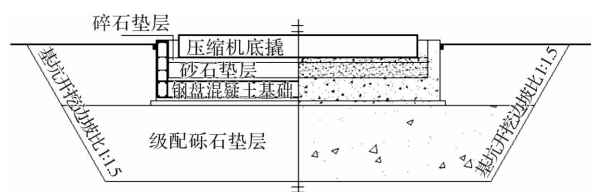


图4 基础剖面图

Fig. 4 Foundation profile

2 压力监测

为得到压缩机振动对地基、基础产生的影响,对压缩机底橇和基础下部及其侧边的压力进行监测。通过监测数据了解压缩机运行过程中各土层压力随时间及深度的变化规律,得到压缩机运行前后各土层静压力、最大压力及稳定压力之间的关系,分析底橇周边碎石层的压力变化判断其位移程度,初步了解无固定连接式压缩机基础的动力特性。

2.1 监测内容

2.1.1 监测仪器

试验仪器采用常州金土木工程仪器有限公司生产的振弦式土压力计以及JTM-V10E智能编码振弦读数仪。现场土压力传感器布设时应精确记录每个传感器的位置及编号,以便于今后的数据

采集及故障检查,且应设计凹槽放置传感器线路避免线路在施工过程中损坏。土压力计放置完成后,测量其初始频率,作为后续监测的零点。

2.1.2 测点布置

研究压缩机振动对各土层压力的影响以及底撬周边的压力变化时,采取以下方式布置土压力计:(1)对同一平面,在压缩机底部及各角点均匀布置压力计,监测同一平面不同位置压力随时间的变化(如图5);(2)在剖面方向,分五层布置压力计,一层最深、五层最浅,其中四、五层位于压缩机底撬及钢筋混凝土基础之间的中粗砂及碎石层中,一至三层布置于钢筋混凝土基础下部了解动力响应随深度的变化规律;(3)在压缩机底撬周边,沿基础内边缘布置压力计,监测基础侧边的压力变化(如图6)。

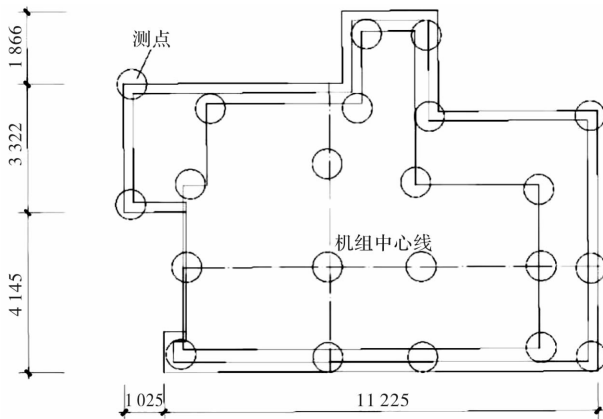


图5 压力计平面布置图

Fig. 5 The lane layout of the pressure gauge

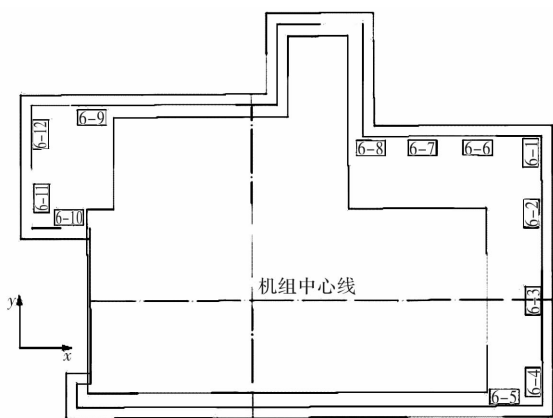


图6 侧边压力计布置图

Fig. 6 The layout of the side pressure gauge

2.2 测试结果及分析

试验通过观测压缩机启动后压力随时间的变化评价动力影响的时间效应;通过量测压缩机启动前和稳定后各土层的压力变化考虑压缩机动荷载对各土层压力的影响;通过对比不同深度土层

的压力变化判断压缩机的动力影响随深度的变化;通过分析底撬周边压力的变化判断振动使底撬产生的位移程度。

(1) 压力随时间变化规律分析

第四层各压力盒压力随时间的变化曲线如图7所示。

图9中,静力值、稳定值、最大值分别指的是压缩机运行前的静压力、运行一个月后的稳定压力以及运行过程中的最大压力。由图9可知,压缩机运行过程中会出现高于稳定值的最大值,但二者差距较小,最大值也不会影响机组正常工作;静力值和稳定值相差不大,差值小于5 kPa,说明压缩机的动力作用对土层压力的影响较小。

(2) 不同深度压力变化规律分析

以图8中的B位置为例,对不同深度的压力变化进行分析,如图10。

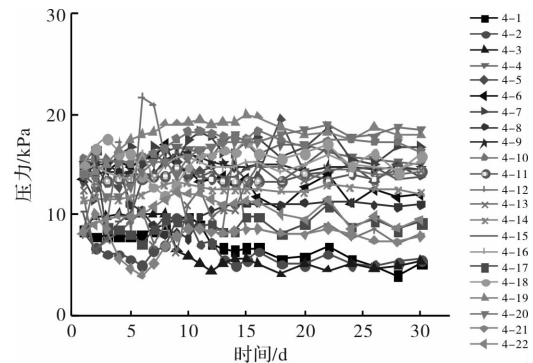


图7 第四层压力盒压力随时间的变化

Fig. 7 The variation of pressure in the fourth layer pressure box with time

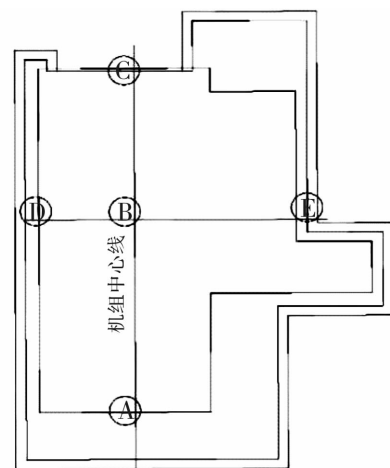


图8 代表性位置分布图

Fig. 8 The distribution map of representative position

由图10可知,一至五层稳定后的土压力随深度的增加依次增加,说明深度仍是影响各土层压力的最主要因素,压缩机的动力作用对稳定后的土层压力影响较小;从各条曲线的波动程度看,第

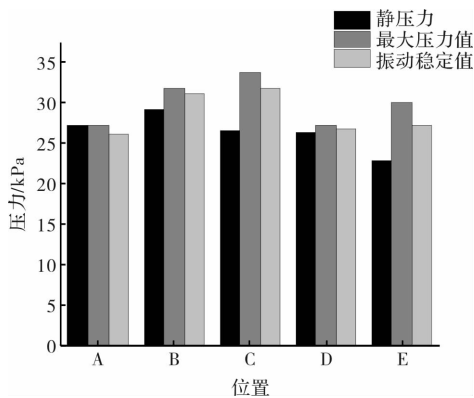


图9 第三层不同位置各阶段压力对比图

Fig. 9 The comparison of pressure in different stages of the third layer at different positions

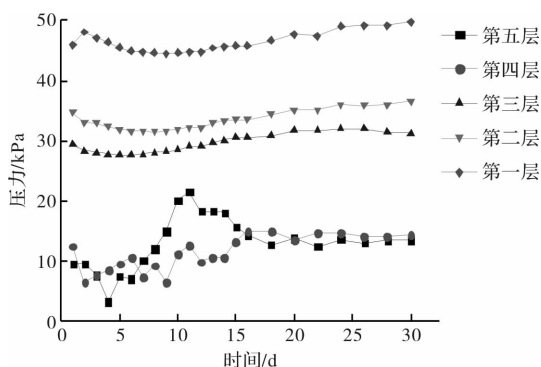


图10 B位置不同深度压力随时间的变化

Fig. 10 The pressure variation with time at different depth in B position

五层土压力前期波动最大,第四层次之,其余各层压力的波动较小,曲线在20 d左右趋于稳定,第五层、第四层之间为中粗砂垫层及碎石垫层,说明垫层吸收了压缩机的振动能量,减小了振动的影响。

(3) 底撬周边压力变化分析

底撬周边各压力盒压力变化曲线如图11。

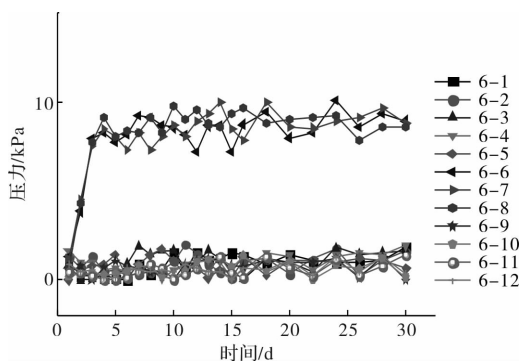


图11 底撬侧边压力随时间的变化

Fig. 11 The variation of side pressure on bottom sled with time

由图11可知,6-6、6-7、6-8位置处压力明显大于其他位置,压力数值小于10 kPa,说明压缩机有向y轴正向的位移且位移量很小,结合侧

边压力计布置图(图5)可知,压缩机侧向位移时会挤压周边碎石,受到挤压后的碎石会吸收机组的振动能量降低机组的位移,较厚的碎石可以减小压缩机振动对基础及周围环境的影响。基槽周边碎石的填充可在明显降低动力作用对基础影响的前提下限制机组的位移。

3 动力测试

为进一步获得无固定连接式压缩机基础动力特性,在现场压力监测之后对压缩机基础及底撬进行原位动力测试。

3.1 测试内容

3.1.1 测试仪器

动力测试采用的仪器设备主要有:(1) 891-2型低频传感器6个(频率范围0.5~80 Hz);(2) 891型六线放大器1台;(3) INV306(便携式)智能信号采集和处理分析系统;(4) INV306DF型智能信号采集处理分析仪1台;(5) 数据、图像处理仪(DASP系统平台软件工程版)。

3.1.2 测点布置

为获得压缩机运行过程对基础和底撬的影响,在基础周边及底撬的对应位置设置了9个测点,试验仪器可测定每个测点三个方向(X, Y, Z)的位移情况,进一步探明无固定连接式压缩机基础动力特性,测点布置如图12所示。

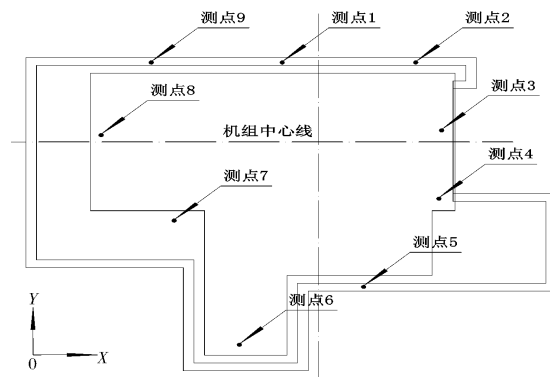


图12 动力测试测点布置图

Fig. 12 The dynamic test point layout

3.2 测试结果及分析

动力测试所采集的基础和底撬各方向的位移如表1所示。

(1) 基础与底撬Z向位移分析

由表1可以看出基础Z方向(竖向)的位移远小于底撬,数值大致是底撬位移的十分之一,说明基础槽内的碎石垫层具有较好的减振效果,大大削弱了压缩机动力作用对基础及地基的影响,从而避免砂土地基在振动荷载下发生变形失稳。

(2) 基础与底撬水平向位移分析

由表 1 可知：除测点 3、4 外的其他位置，基础 X 向、Y 向的位移均小于底撬，原因在于测点

3、4 处没有放置碎石，底撬与基础会发生直接接触，从而该处的基础位移较大，其他位置处碎石的减振作用大大降低了机组振动向基础的传递。

表 1 动力测试各测点的位移

Tab. 1 The dynamic test of displacement of each measuring points

测试内容	测试方向	测点位置								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
底撬位移/mm	X	0.185	0.064	0.001	0.001	0.079	0.082	0.052	0.064	0.064
	Y	0.000	0.215	0.001	0.001	0.065	0.074	0.253	0.215	0.218
	Z	0.289	0.402	0.245	0.385	0.257	0.136	0.305	0.402	0.402
基础位移/mm	X	0.015	0.01	0.01	0.005	0.008	0.008	0.003	0.01	0.01
	Y	0.004	0.009	0.036	0.008	0.002	0.003	0.004	0.009	0.009
	Z	0.031	0.021	0.029	0.004	0.017	0.012	0.004	0.021	0.021

(3) 位移时程图分析

每个测点的各个方向的位移随时间的变化曲线称为时程图，以测点 2 为代表对位移时程图进行研究，测点 2 三个方向的位移时程图如图 13 所示。

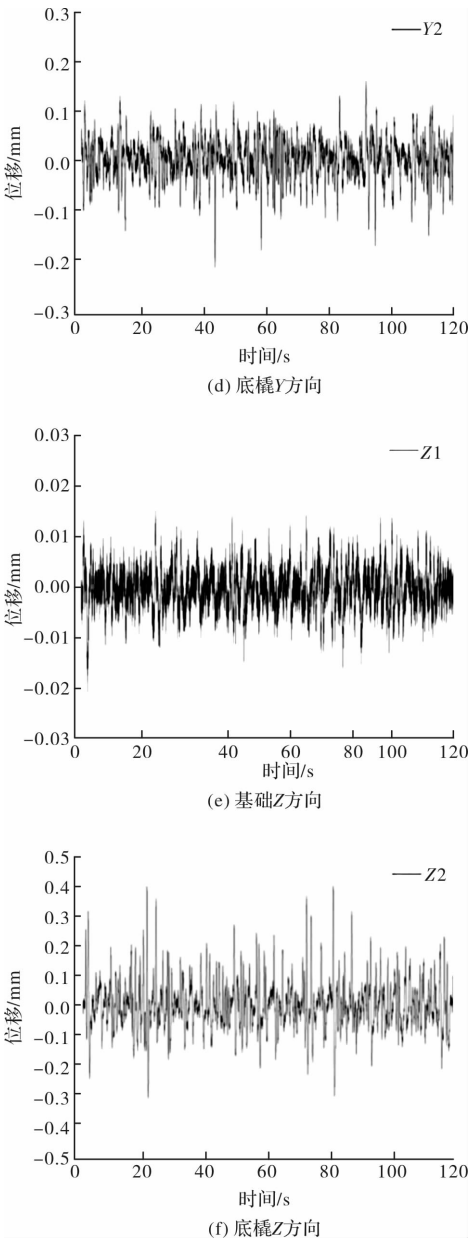
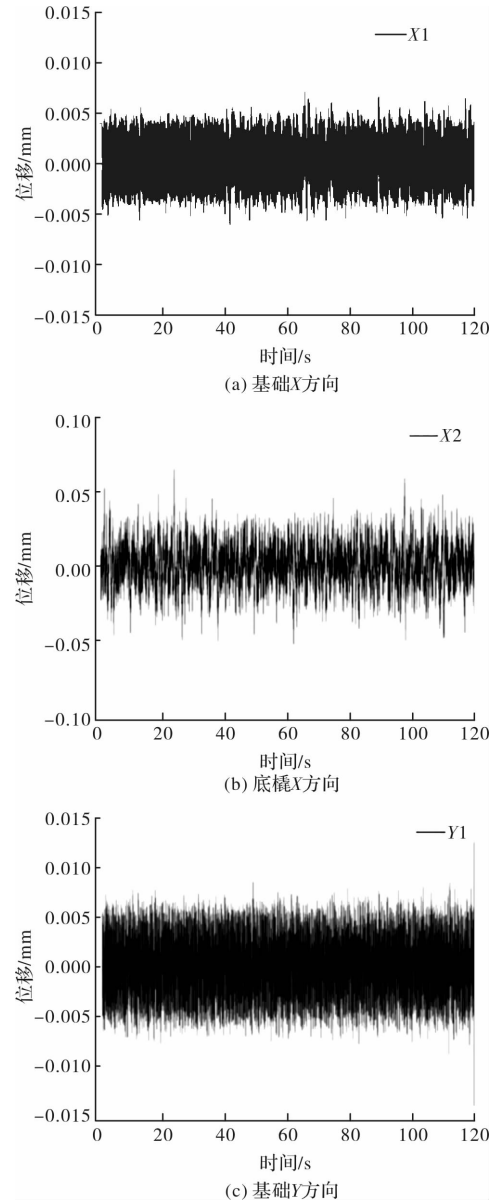


图 13 测点 2 位移时程图

Fig. 13 The time-history diagram of displacement at measuring point 2

由图 13 可知:测点 2 位移随时间大致呈正、余弦曲线变化与动荷载变化规律相同,说明压缩机运行一个月后基础与底橇的振动已进入稳定状态。基础三个方向的振幅均较小,说明动力作用对基础的影响较小;压缩机底橇 z 方向的振幅均远远大于基础,二者之间为碎石垫层,说明碎石垫层吸收了大量振动能量,具有较好的减振效果。

4 结论

通过现场监测压缩机运行初期各土层的压力变化,利用原位动力测试设备采集压缩机底橇及基础的动位移,通过试验手段较为细致的研究了无固定连接式压缩机基础的动力特性,得到以下几点结论:

(1) 采用无固定连接式压缩机基础代替大块式、承台式等传统压缩机基础形式后,基础底部的压力受振动的影响较小。现场监测结果表明:随深度的增加,压力随时间的波动程度降低,说明压缩机的动力作用随深度的增加而降低;

(2) 各土层压力随时间的推移(20 d 左右)逐渐稳定,稳定后的压力与静压力差值较小,随深度增加各土层压力逐渐增加,深度仍是影响土层压力的最主要因素,说明压缩机的动力作用对其下部土层压力的影响较小,即该基础设计明显降低了机械的动力响应;

(3) 压缩机基础的位移与底橇相比有明显降低且二者的位移均较小,满足压缩机组长期运行的要求。动测结果表明:压缩机底橇和基础的竖向位移均较小,且基础位移远小于底橇,说明基础槽内的碎石及砂垫层吸收了大量振动能量,具有较好的减振效果;

(4) 底橇周边碎石层的压力较小,底橇未产生较大水平位移,说明周边碎石层受到挤压后会吸收机组的振动能量降低机组的位移,削弱了动力作用对基础和周围环境的影响,在减小基础振动的情况下限制了机组的位移。

参考文献 References

[1] 赵京艳,葛凯,褚晨耕,等.国产天然气压缩机应用现状及展望[J].天然气工业,2015,35(10):151-156.
ZHAO Jingyan, GE Kai, CHU Chengeng, et al. Current application and prospects of China-made natural gas compressors[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35 (10): 151-156.

[2] 何欢,任涛,蒋春林,等.大型压缩机组基础施工质量风险和预防措施[J].油气储运,2009,28(8):39-41.
HE Huan, REN Tao, JIANG Chunlin, et al. Quality risk in foundation construction of large-scale compressor Set and Risk Prevention Measures[J]. Oil & Gas Storage And Transportation, 2009, 28(8):39-41.

[3] 侯兴民,马小燕,吴汉生,等.动力机器基础振动与设计若干问题的讨论[J].地震工程与工程振动,2008,28(3):131-137.
HOU Xingmin, MA Xiaoyan, WU Hansheng, et al. Some problems about vibration and design of dynamic machine foundation[J]. Journal of Earthquake Engineering & Engineering Vibration, 2008, 28 (3): 131-137.

[4] 裴欲晓,张克峰,戴康德.大型活塞式压缩机基础的动力分析及设计[J].建筑结构,2003,33(11):36-38.
PEIYuxiao, ZHANG Kefeng, DAI Kangde. Dynamic analysis and design of large piston compressor foundation[J]. Building Structure, 2003, 33(11):36-38.

[5] 蒋东旗,项民生,谢定义.数值方法在动力机器基础设计中的应用[J].工业建筑,2001,31(6):46-48.
JIANG Dongqi, XIANG Minsheng, XIE Dingyi. Application of numerical simulation method to dynamic machinery foundation design[J]. Industrial Construction, 2001, 31(6):46-48.

[6] 叶昆,张子翔,朱宏平.近场地震竖向分量对 LRB 基础隔震结构地震响应影响分析[J].工程力学,2016,33(4):49-57.
YE Kun, ZHANG Zixiang, ZHU hongping. Influence of near-field vertical ground motions on the seismic response of lrb base-isolated structures[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4):49-57.

[7] 刘晶波,王振宇,张克峰,等.考虑土-结构相互作用大型动力机器基础三维有限元分析[J].工程力学,2002,19(3):34-38.
LIU Jingbo, WANG Zhenyu, ZHANG Kefeng, et al. 3D finite element analysis of large dynamic machine foundation considering soil-structure interaction [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(3):34-38.

[8] 姚群凤,卢国强.动力机器基础平台动力特性试验研究及数值分析[J].力学季刊,1997,18(1):84-90.
YAO Qunfeng, LU Guoqiang. An experimental research and numerical analysis of the dynamic properties of a machine-foundation platform[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 1997, 18(1):84-90.

- sized sandy gravels[J]. China Civil Engineering Journal. 1981(2):55-60.
- [17] 郭庆国,刘贞草. 超径粗粒土最大干密度的近似测定方法[J]. 水利学报,1993(10):70-78.
GUO Qingguo, LIU Zhencao. The approximate determination method of maximum dry density of overdiameter coarse-grained earth[J]. Shui Li Xue Bao, 1993(10):70-78.
- [18] 蔡铭,岳祖润,叶朝良. 粗颗粒土混合料最大干密度及压实度研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(3):103-106.
CAI Ming, YUE Zurun, YE Chaoliang. Research on Maximum Dry Density and Compaction of Coarse Soil Mixture[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science). 2013,26(3):103-106.
- [19] 左永振,张伟,潘家军,等. 粗粒料级配缩尺方法对其最大干密度的影响研究[J]. 岩土力学,2015(S1):417-422.
ZUO Yongzhen, ZHANG Wei, PAN Jiajun, et al. Effects of gradation scale method on maximum dry density of coarse-grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics. 2015(S1):417-422.
- [20] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程土工试验规程:TB10102-2004[S]. 北京:中国铁道出版社. 2005.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for Soil Test of Railway Engineering: TB10102-2004[S]. Beijing: China Railway Publishing House. 2005.
- [21] 中华人民共和国建设部,国家质量技术监督局. 土工试验方法标准:GB/T50123-1999[S]. 北京:中国计划出版社. 1999.
Ministry of Construction of the People's Republic of China, The Quality and Technology Supervision Bureau. Standard for soil test method: GB/T50123-1999[S]. Beijing: China Planning Press. 1999.
- [22] 石刚强,赵世运,李先明,等. 严寒地区高速铁路路基冻胀变形监测分析[J]. 冰川冻土,2014,36(2):360-368.
SHI Gangqiang, ZHAO Shiyun, LI Xianming, et al. The frost heaving deformation of high-speed railway subgrades in cold regions: Monitoring and analyzing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology. 2014,36(2):360-368.
- [23] 吴镇. 深季节冻土区高速铁路路基填料冻胀特性试验研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2013.
WU Zhen. Experimental study on frost heave properties of high-speed railway subgrade fillings in deep seasonal frozen regions[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University. 2013.

(编辑 吴海西)

(上接第 807 页)

- [9] 文波,徐浩轩,侯聪霞,等. 考虑结构-设备相互作用的变电站主厂房系统动力特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2012,44(5):620-626.
WEN Bo, XU Haoxuan, HOU Congxia, et al. Analysis on the dynamic characteristics of equipment-structure interaction for the main building of a transformer substation[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2012,44(5):620-626.
- [10] 郭和,刘银春,王登海,等. 无固定连接压缩机基础在苏里格气田的应用[J]. 石油规划设计,2014,25(3):32-34.
GUO He, LIU Yinchun, WANG Denghai, et al. Application of non-fixed connection compressor foundation in sulige gas field[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2014, 25(3): 32-34.

(编辑 吴海西)