

文章编号: 1007-2993(2022)01-0031-06

水运工程堆载预压处理地基动力测试应用研究

张开伟^{1,2} 聂庆科² 李志勇¹ 齐松松¹ 魏建明³

(1. 河北双诚建筑工程检测有限公司, 河北石家庄 050031; 2. 河北建设勘察研究院有限公司, 河北石家庄 050031;
3. 河北中钢岩土工程勘察有限公司, 河北石家庄 050031)

【摘要】 地基经过真空堆载预压处理后,其地基承载性状及动力参数特性都产生不同改变,这种变化会对动力基础设计产生较大影响。基于此,结合实际水运工程项目对真空堆载预压处理后旋喷桩复合地基及钻孔灌注桩基础分别进行地基动力测试,通过测试获得地基及桩基模型基础的抗压、抗剪及抗扭的刚度参数、竖向及水平转向的第一振型以及扭转向的阻尼比及参振总质量。依据各项实测数据计算出旋喷桩复合地基及钻孔灌注桩基础底面与静应力有关的振动换算系数,推算出两种不同类型基础的地基抗压、抗剪、抗扭刚度,扭转向阻尼比以及地基竖向和水平回转向第一振型的提高系数。各项实际参数测试计算结果显示,当把两种不同类型地基现场实际获得的地基动力参数用于动力机器基础振动和隔振设计时,应分别根据动力机器基础的实际使用工况换算成设计采用的地基动力参数,以免对基础设计造成偏差。

【关键词】 真空堆载预压地基;旋喷桩复合地基基础;钻孔灌注桩基础;地基动力参数测试;幅频响应曲线

【中图分类号】 TU 47

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.01.006

Dynamic Testing Application of Foundation Treated by Preloading in the Water Transport Engineering

Zhang Kaiwei^{1,2} Nie Qingke² Li Zhiyong¹ Qi Songsong¹ Wei Jianming³

(1. Hebei Shuangcheng Construction Engineering Testing Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Hebei Research Institute of Construction & Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 3. Hebei Zhonggang Geotechnical Engineering Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

【Abstract】 After the foundation is treated by vacuum stacking pre-pressure, the bearing characteristics, dynamic parameters and characteristics of the foundation are abnormal, which has a great impact on the design of dynamic foundation. Combined with the actual water transport engineering project on the vacuum stack pre-pressure treatment of the rotary jet grouting pile composite foundation and bored pile foundation, dynamic tests were conducted to obtain the stiffness parameters of compression, shear and torsion, the first vibration mode of vertical and horizontal steering, the damping ratio of torsional steering and the total vibration mass of the foundation and pile. Based on the measured data, the vibration conversion coefficients related to the static stress on the bottom surface of rotary jet grouting pile composite foundation and bored pile foundation were calculated, and the foundation compression, shear, torsional stiffness, torsional steering damping ratio and the improvement coefficient of the first vibration mode of vertical and horizontal return steering of the foundation were also calculated. The test and calculation results of various actual parameters show that when the foundation dynamic parameters actually obtained on the site of two different types of foundations are used for the vibration and vibration isolation design of power machine foundation, parameters should be converted into the foundation dynamic parameters adopted in the design according to the actual service conditions of power machine foundation, so as to avoid deviation to the foundation design.

【Key words】 vacuum preloading; composite foundation of rotary jet grouting pile; bored pile foundation; foundation dynamic parameter test; amplitude frequency response curve

0 引言

现代工业动力机器基础设计是工业建筑设计的

重要部分,尤其在沿海区域海相沉积上的大型水运工程动力机器基础参数确定更为重要^[1],这些区域软基

基金项目:河北建设科技计划项目(2014-014)

作者简介:张开伟,男,1982年生,汉族,新疆伊犁人,硕士,正高级工程师,主要从事地基基础检测、工程物探等方面的生产和科研工作。E-mail: 229326993@qq.com

在经过真空堆载预压处理后,其地基承载性状及动力参数特性都发生较大改变,地基参数的改变对动力机器基础设计也会产生较大影响^[2]。在这些区域开展动力机器基础设计时,要特别注意软基经过真空堆载预压处理后其原始地基参数也发生改变^[3],如果设计参数不随之调整,原始承载性状改变后的地基基础会产生过大的振动,这会直接影响机器的工作精度和设备仪表的正常工作状态,对使用人员身心健康也会造成影响,振动严重时机器将产生巨大破坏甚至发生不可挽回的安全事故^[4]。工业动力机器基础设计的目的主要是降低基础的振动量,获得基础参数的各项换算系数及提高系数^[5],如何确定软基真空堆载预压处理后各项地基动力参数是在这些区域开展动力机器基础设计工作的关键^[6]。近年来,刘志久对动力机器基础设计理论进行了系统研究,通过建立块体基础复合集总参数模型,研究与动力机器基础激振力频率有关的动力特性参数,并转化为与激振力频率无关的定参数,通过这些定参数利用机械多自由度振动理论计算弹性半空间上块体基础的各项动力响应参数^[7];刘建军、张志豪从对机器的激振力和基础的动刚度两个因素入手,研究了影响基础动刚度的因素及控制体系的振动措施,研究了不同因素下基础动刚度的变化规律,为动力机器基础设计和工程加固提供了科学手段^[8-9];王军、Su等对垫层地基、复合地基上的块体模型基础进行了地基动力参数测试研究,提出了通过折减系数修正地基刚度系数计算值综合确定地基刚度系数的方法,确定了垫层地基和复合地基各振型刚度系数之间的关系^[10-11]。但以上研究均没有对水运工程真空堆载预压处理后地基的地基动力参数进行讨论,国内外相关文献也未见详细阐述。基于此,本文结合实际项目,对真空堆载预压处理后旋喷桩复合地基及钻孔灌注桩基础分别进行地基动力测试,获得了实际参数,计算出与之相关的换算系数和提高系数,分析认为当真空堆载预压地基处理后地基动力参数要用于动力机器基础的振动和隔振设计时,应根据动力机器基础的设计情况换算实际使用的动力参数。

1 试验模型基础设计

测试项目位于福建沿海区域某水运工程项目压缩机装置区内,天然地基为海相沉积吹填土(淤泥质土),该地基采用真空堆载预压地基预处理。拟建压缩机棚为地上一层建筑,框架结构,长44.5 m,宽25 m,结构总高度18 m。压缩机为周期性转动的动力机器,一次机转速428.6 rpm,功率3900 kW;二次机转速214.3 rpm,功率13000 kW。旋喷桩复合地基设计参

数为:桩径500 mm,桩长平均约15 m,桩间距为1.5 m,梅花型布置,设计要求地基处理后复合地基承载力特征值不小于200 kPa,地基的抗压刚度系数应达到45000 kN/m³;钢筋混凝土钻孔灌注桩设计参数为:桩径800 mm,桩长约24 m,桩端持力层为第⑥₁层(强风化花岗岩),桩端进入持力层深度≥1.5 m,桩身混凝土强度等级C45,桩间距为2.4 m,正方形布置。基础模拟块体依据《压缩机装置动力特性测试技术要求》及《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269—2015)的相关规定设置。

旋喷桩复合地基模型基础底面设计为方形,模型基础底面积为单桩承担的面积1.95 m²,块体的尺寸(长×宽×高)采用1.4 m×1.4 m×0.8 m,混凝土强度等级不低于C20,内部配置钢筋网片,模型顶面振捣抹平。模型顶面中心埋置固定脚板及固定螺栓,测试时模型及旋喷桩均超过28 d。旋喷桩复合地基模型基础布置见图1。

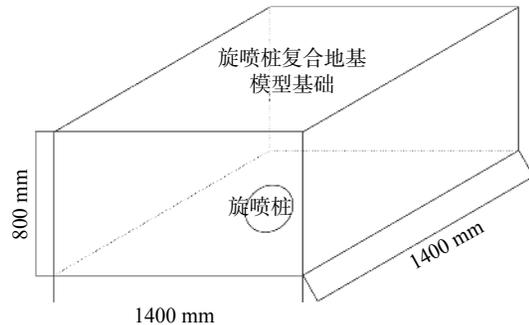


图1 旋喷桩复合地基模型基础布置示意图

桩模型基础设计为长方体,长、宽、高分别为4.8 m、2.4 m、2.0 m;两根基桩沿模型基础长度方向对称分布,桩间距2.4 m,与模型基础浇筑为一体,模型基础混凝土等级为C40,依据设计要求配置钢筋,模型顶面振捣抹平。顶面中心及侧面顶部埋设地脚螺栓,螺栓埋置深度满足设计要求,测试时模型及灌注桩均超过28 d。旋挖灌注桩模型基础布置见图2。

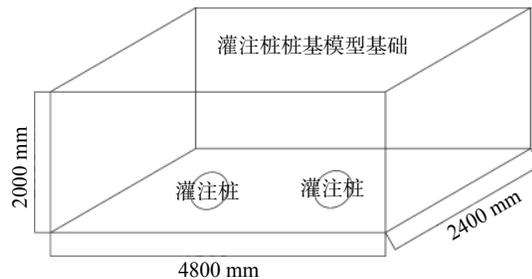


图2 旋挖灌注桩模型基础布置示意图

2 试验方法设置

依据《压缩机装置动力特性测试技术要求》及《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269—2015),旋喷桩复合地基及钻孔灌注桩模型基础动力参数测试

均进行明置与埋置两种情况下的强迫振动测试。其中,旋喷桩复合地基模型基础只进行竖向强迫振动测试,钻孔灌注桩模型基础分别进行竖向、水平回转及扭转向的强迫振动测试。

旋喷桩复合地基模型基础竖向强迫振动试验采用机械式变扰力振源激振,机械式振源通过螺栓与模型基础连接(见图3),旋喷桩复合地基模型基础测试时,在基础顶面沿长度方向轴线的两端各布置一台竖向传感器,激振设备的扰力频率间隔在共振区以外,不大于2 Hz,在共振区内为1 Hz,共振时的振幅不大于150 μm 。输出的振动波形,采用显示器监测,待波形调整为正弦时开始试验。



图3 旋喷桩复合地基模型基础布置实景图

旋挖灌注桩模型基础强迫振动试验采用电磁式常扰力振源激振,电磁式激振器采用刚性杆件与基础顶面中心连接(见图4)。竖向强迫振动试验时其竖向扰力作用点与模型基础的重心在同一竖直线上,竖向强迫振动试验基础顶面沿长度方向轴线的两端各布置1台竖向传感器;水平回转试验时在中间位置增加一台水平向传感器;扭转向振动测试时,采用两台同型号电磁激振器同时对模型基础对角进行激振,基础顶面沿长轴方向两端同相位对称布置两台水平向传感器,水平拾振方向与长轴线垂直;测试时,信号发生器在较宽的频带内输出设定频率的正弦信号,功率放大器将输出信号转化为正弦振动信号,激振器通过自身的振动带动基础产生振动。记录仪记录振动信号,读取模型基础振动线位移、绘制幅频响应曲线计算相关参数等。幅频响应测试时,激振设备的扰力频率间隔在共振区外为1~2 Hz,在共振区内为1 Hz。

3 模型基础测试数据分析

该水运工程项目拟建压缩机厂房为一层框架结构,压缩机为典型的周期性转动的高强度动力机器,压缩机基础按周期性振动动力机器基础设计,地基基础分别采用真空堆载预压地基预处理后旋喷桩复合地基及桩基础形式,其中1号压缩机基础采用旋喷桩复合地基,2号压缩机采用桩基础,地基的设计抗压刚度系数应达到45 MN/m^3 。设计要求试验提供复合地基的抗压刚度系数及桩基础的基本动力参数。



(a) 竖向



(b) 水平向



(c) 扭转向

图4 旋挖灌注桩模型基础竖向、水平及扭转布置实景图

3.1 旋喷桩复合地基模型基础测试数据分析

试验区1号压缩机基础形式为真空堆载预压地基处理后采用旋喷桩复合地基形式,在1号压缩机基础完成1组旋喷桩复合地基抗压刚度测试工作,测试时采用强迫振动方式、机械式变扰力激振器进行,分别进行了明置和埋置基础两种状态的竖向强迫振动测试,测试幅频响应曲线见图5、图6。

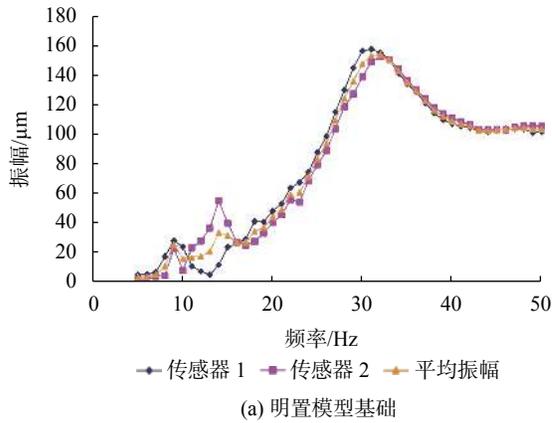
读取以上数据,分别取二者平均值作为各项参数测试的代表值,依据《地基动力特性测试规范》中各项动参数的计算取值办法,经过计算得到表1中的计算成果。

明置模型基础测试取得的地基抗压刚度系数在设计使用时应采用如下换算系数 η 进行换算:

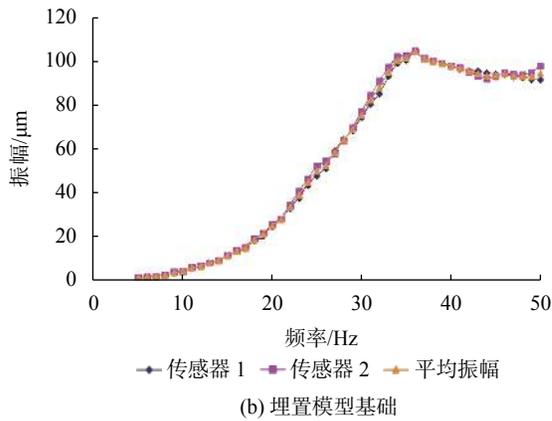
$$\eta = \sqrt[3]{\frac{A_0}{A_d}} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_d}{P_0}} = \sqrt[3]{\frac{1.95}{20}} \cdot \sqrt[3]{\frac{50}{0.8 \times 25}} = 0.625$$

式中: A_0 为模型基础的底面积, m^2 ; A_d 为设计基础的底面积, m^2 ,当 A_d 大于20 m^2 时,取 $A_d=20 \text{ m}^2$; P_0 为模型基础底面静应力,kPa; P_d 为设计基础底面静应力,kPa,当 P_d 大于50 kPa时,取 $P_d=50 \text{ kPa}$ 。

通过换算计算,得到明置状态下的抗压刚度系数为:0.625 \times 78.77=49.2 MN/m^3 ,该数据大于45 MN/m^3 ,符合设计要求。同时,通过换算得到旋喷桩复合地基模型基础埋深对地基刚度的提高系数为 $(1+0.416\delta_d)^2$, δ_d 为设计块体基础的埋深比。明置模型基础测试的地基竖向阻尼比,在动力机器基础设计使用时,按设

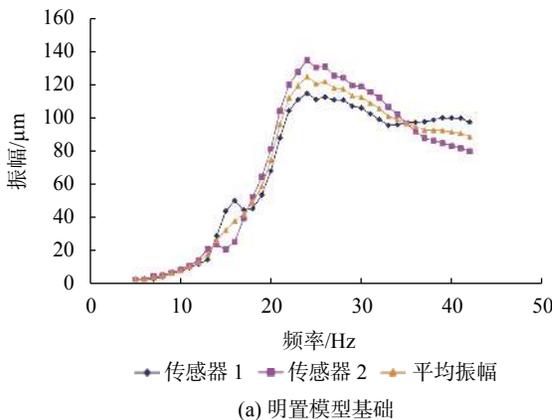


(a) 明置模型基础

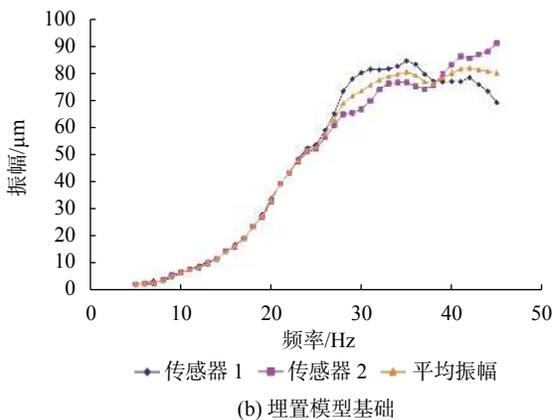


(b) 埋置模型基础

图5 1号压缩机旋喷桩复合地基模型基础竖向强迫测试幅频响应曲线图



(a) 明置模型基础



(b) 埋置模型基础

图6 2号压缩机旋喷桩复合地基模型基础竖向强迫测试幅频响应曲线图

表1 旋喷桩复合地基模型基础振动测试成果表

位置	状态	抗压刚度系数 C_d (MN·m ⁻³)	竖向参振总质量 m_d/t	竖向阻尼比 ζ_d
1号	明置	78.77	5.89	0.20
压缩机	埋置	120.64	5.76	0.30

计基础质量比进行计算,根据设计基础埋深比计算埋置基础提高系数并进行换算,通过换算可知旋喷桩复合地基模型基础的埋置基础提高系数为 $1+0.872\delta_d$ 。

由此可知,当旋喷桩复合地基模型基础现场实测得出的地基动力参数用于动力机器基础的振动和隔振设计时,应根据动力机器基础的设计情况换算成设计采用的地基动力参数。堆载预压地基经过旋喷桩复合地基进行处理后,其明置模型基础测试的复合地基抗压刚度系数,经换算后实际抗压刚度系数为 49.2 MN/m^3 ,大于 45 MN/m^3 ,是满足设计要求的,堆载预压地基经过旋喷桩复合地基处理后再进行动力机器基础的振动和隔振设计是可以满足设计要求的。同时,由明置模型基础测试的地基竖向阻尼比,用于动力机器基础设计时,应按设计基础质量比计算,并根据设计基础埋深比,计算埋置基础提高系数,对其进行换算。

3.2 旋挖灌注桩模型基础测试数据分析

试验区2号压缩机基础形式为真空堆载预压地基处理后采用桩基础地基形式,试验在2号压缩机棚位置设计基底标高完成1组桩基模型基础动力参数测试工作,测试采用强迫振动方式、电磁式常扰力激振器进行,分别完成了6种不同的扰力作用下、明置和埋置两种状态的竖向、水平回转向及扭转向振动测试。得到桩基模型基础明置和埋置两种状态下竖向、水平回转向及扭转向的强迫振动幅频响应曲线,测试幅频响应曲线见图7—图9。

当混凝土灌注桩模型基础现场实测得出的地基动力参数(见表2)用于机器基础的振动和隔振设计时,应根据机器基础的设计情况换算成设计采用的桩基动力参数。

由明置块体模型基础测试取得的地基抗压、抗剪、抗弯、抗扭刚度系数以及由明置桩基础测试取得的抗剪、抗扭刚度系数,应乘以基础底面积与基础底面静压力的换算系数,换算系数为

$$\eta = \sqrt[3]{\frac{A_0}{A_d}} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_d}{P_0}} = \sqrt[3]{\frac{4.82.4}{20}} \cdot \sqrt[3]{\frac{50}{225}} = 0.832$$

基础埋深对设计基础的地基抗压、抗剪、抗扭刚度的提高系数如表3所示。

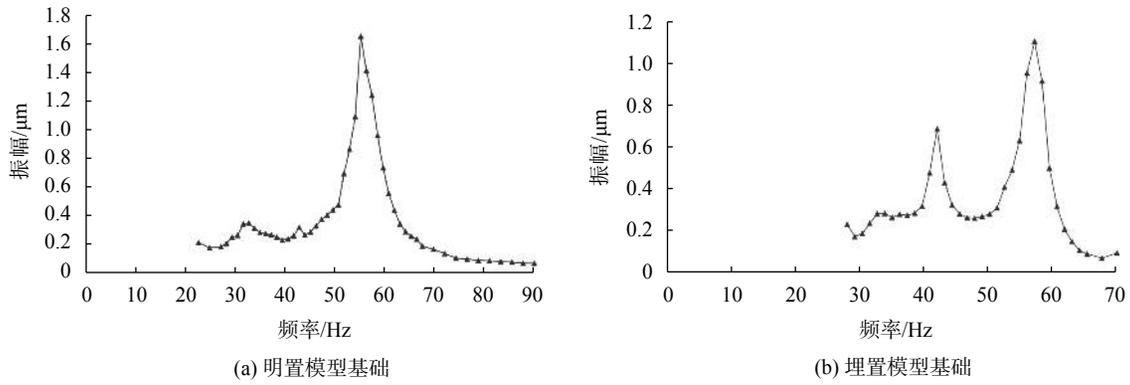


图 7 1号台双桩承台水平回转向强迫振动幅频(d-f)响应曲线图

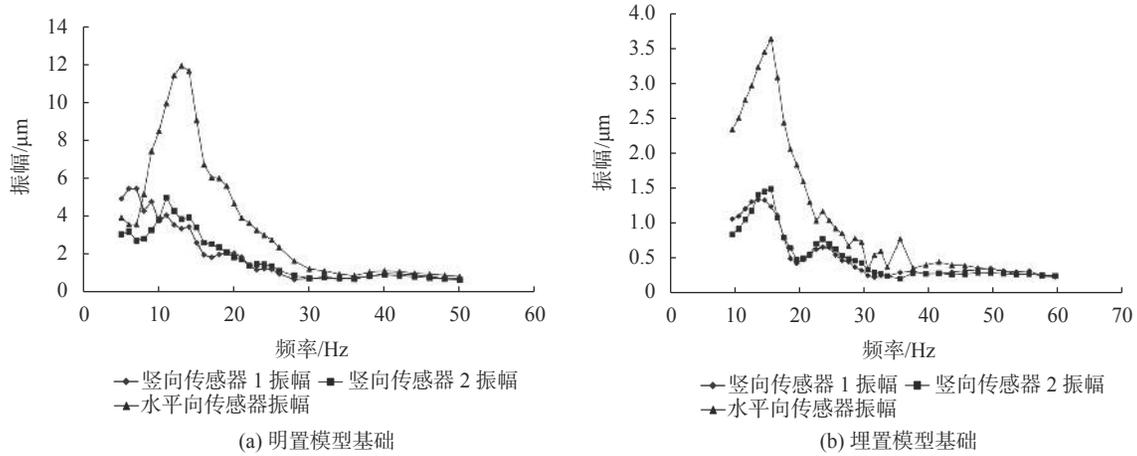


图 8 1号台双桩承台扭转向强迫振动幅频(d-f)响应曲线图

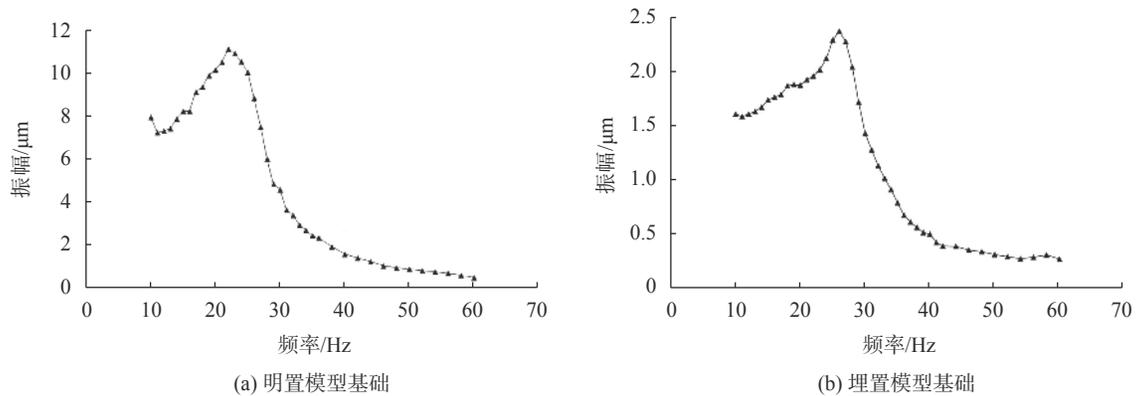


图 9 1号台双桩承台竖向强迫振动幅频(d-f)响应曲线图

表 2 旋挖灌注桩模型基础动力参数测试成果表

状态	竖向 阻尼比 ζ_z	竖向振动参振 总质量 m_z/t	单桩竖向抗压 刚度 $K_{pz}/(MN \cdot m^{-1})$	水平回转向第一 振型阻尼比 ζ_{x01}	水平回转向耦合 振动参振质量 m_{x0}/t	桩基抗剪刚度 系数 $C_s/(MN \cdot m^{-3})$	扭转向 阻尼比 ζ_ω	扭转向振动 参振总质量 m_ω/t	抗扭刚度系数 $C_\omega/(MN \cdot m^{-3})$
明置	0.067	89.0	3920	0.163	126.7	93	0.280	74.0	144
埋置	0.083	95.0	4472	0.189	185.7	203	0.281	91.3	251

由明置桩基模型基础测试的桩基竖向、水平回转向第一振型和扭转向阻尼比,用于动力机器基础设计时,应按设计基础质量比计算,并根据设计基础埋深,计算埋置基础提高系数,对其进行换算。换算结果见表 4。

由此可知,桩基动力测试结果中桩基模型基础

抗压、抗剪、抗弯、抗扭刚度系数比较旋喷桩复合地基模型基础均较大,其地基强度及刚度整体表现是优于旋喷桩复合地基的。后期在利用桩基模型基础现场实测得出的地基动力参数用于动力机器基础的振动和隔振设计时,应根据动力机器基础的设计情况换算成设计采用的地基动力参数,同时考虑费效比。同

表3 基础埋深对设计基础刚度的提高系数

桩基动力参数	基础埋深作用的刚度提高系数
抗压刚度	$(1+0.115\delta_d)^2$
抗剪刚度	$(1+0.803\delta_d)^2$
抗扭刚度	$(1+0.548\delta_d)^2$

注: δ_d 设计块体基础或桩基础的埋深比

表4 桩基础设计时阻尼比计算方法及换算系数

桩基动力参数	计算方法	埋置基础提高系数
竖向阻尼比 ζ_z^c	$0.052/\sqrt{m_{dr}}$	$1+0.386\delta_d$
水平回转向第一振型阻尼比 $\zeta_{x\phi 1}^c$	$0.125/\sqrt{m_{dr}}$	$1+0.265\delta_d$
扭转向阻尼比 ζ_{ψ}^c	$0.215/\sqrt{m_{dr}}$	$1+0.008\delta_d$

注: $\sqrt{m_{dr}}$ 为设计基础的质量比; δ_d 为设计基础的埋深比

时明置桩基模型基础测试的桩基竖向、水平回转向第一振型和扭转向阻尼比,用于动力机器基础设计时的计算方法及设计基础埋深作用对阻尼比的提高系数应采用表3及表4中经过换算后的提高系数。

4 结论

通过对实际水运工程项目真空堆载预压处理复合地基模型基础及桩基础模型基础地基动力特性参数测试结果的总结分析得到以下认识:

(1) 软基经过真空堆载预压处理后,在此基础上施做的旋喷桩复合地基及旋挖灌注桩基础各项地基动力测试参数结果,均能满足设计参数要求,地基的整体刚度系数都有所提高,桩基础优于旋喷桩复合地基。

(2) 旋喷桩复合地基模型基础现场实测得出的地基动力参数用于动力机器基础的振动和隔振设计时,应根据动力机器基础的设计情况换算成设计采用的地基动力参数。明置复合地基模型基础测试的地基竖向阻尼比,在用于动力机器基础设计时,应按设计基础质量比计算,并根据设计基础埋深比计算埋置基础提高系数,对其进行换算。

(3) 桩基模型基础试验数据显示其抗压、抗剪、抗弯、抗扭刚度系数均比复合地基模型基础相关参数大。在利用桩基模型基础现场实测得出的地基动力参数用于动力机器基础的振动和隔振设计时,同样也要进行换算并充分考虑经济效益比。

参考文献

- [1] GB/T 50269—2015 地基动力特性测试规范[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
- [2] 王杰贤. 动力地基与基础[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [3] 张开伟,聂庆科,王亮,等. 桩基模型基础地基动力参数测试应用分析[J]. 工程地球物理学报,2018,15(6): 817-825.
- [4] 张开伟,李志勇,马清洲. 基于地基动力测试中电磁激振器的改进应用研究[J]. 岩土工程技术,2018,32(3): 159-163.
- [5] 王广. 大型汽机基础动力设计参数研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2013,46(S1): 225-229.
- [6] 王锡康,李永录. 关于活塞式压缩机基础振动简化计算的讨论[J]. 工业建筑,2014,44(8): 118-120,161.
- [7] 刘志久,尚守平,徐建. 埋置基础扭转振动的实用化计算与试验的对比[J]. 岩土力学,2011,32(12): 3618-3622.
- [8] 刘建军. 动力机器基础的动刚度研究[D]. 衡阳:南华大学,2014.
- [9] 张志豪,李荣先,盛连成,等. 地基动力特性测试分析与探讨[J]. 土工基础,2013,27(6): 126-130.
- [10] 王军. 垫层地基与复合地基土动力参数的试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2006.
- [11] SU J B, LUAN S L, ZHANG L M, et al. Partitioned genetic algorithm strategy for optimal sensor placement based on structure features of a high - piled wharf[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 26(1): e2289.

收稿日期:2020-09-21