

文章编号: 1000-7598(2014)10-2875-06

考虑基础刚度影响的风机梁板式桩筏 基础模型试验研究

李婉^{1,2}, 木林隆^{1,2}, 连柯楠^{1,2}

(1. 同济大学 岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 梁板式桩筏基础作为新型风机基础, 前景广阔, 适当优化结构, 可节约成本。采用大型室内模型试验, 研究了梁板式桩筏基础在不同筏板刚度情况下的受力变形特性, 同时讨论了桩土荷载分担比的关系。研究表明, 在工作荷载范围内, 适当增大筏板刚度, 桩平均轴力增加, 外圈桩承担的荷载增大, 内圈桩的轴力减小, 环梁及肋梁弯矩减小, 但继续增加刚度, 对桩身轴力、环梁弯矩、肋梁弯矩的影响并不大; 随着荷载的增大, 土体承担的荷载比逐步增大, 趋于稳值。随着梁板式基础刚度增加, 基础内外差异沉降减少, 但是达到一定刚度后再增加刚度对变形影响较小。梁板式基础刚度的变化会影响基底反力分布的均匀性, 且存在一个最优刚度, 使基础底部反力分布最为均匀, 本次试验中 12 梁的梁板式基础基底反力比 6 梁和实体基础更均匀。桩基的分布和梁的分布存在相互影响, 改变梁的分布会影响桩顶力, 而桩基在梁底下又会使梁的应力产生重新分布。研究成果可为设计桩筏基础提供参考依据。

关键词: 桩筏基础; 模型试验; 筏板刚度; 承载特性

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Model test on piled beam-slab raft foundation for wind turbines considering raft rigidity

LI Wan^{1,2}, MU Lin-long^{1,2}, LIAN Ke-nan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As a new foundation for wind turbine on land, piled beam-slab foundation has a broad prospect. The optimized structures properly can reduce costs. To investigate the bearing and deformation characteristics of piled beam-slab foundation under vertical loads under different raft rigidities, a large-scale model test is carried out, which also research the ratio of the force carried by pile and that carried by soil. The research shows that within the range of work load, average pile axial force increases with the increase of the raft rigidity; the axial force of the outer-ring-piles increases while the axial force of inner-ring-piles reduces. The moment of the ring beam and the ribbed beam decrease when the rigidity continues to increase after a certain value, there is little effect on axial force, moment of the ring beam and ribbed beam. With the increase of the stiffness of the beam-slab foundation, the differential settlement of the foundation decreases. However, this trend will become insignificant as the stiffness increases to a certain value. The variety of rigidity of the piled beam-slab foundation could make a difference on the uniformity of subgrade reaction. Besides, there is an optimal stiffness that can make the foundation reaction distribution most uniform. In the experiment, the subgrade reaction distribution of the piled-beam-slab foundation with 12 beams is more uniform comparing to the foundation with 6 piles and block foundation. And there is an optimal rigidity for piled beam-slab foundation, which makes the soil beneath the foundation beared more loads while piles do less. The distribution of piles and beams produces mutual effects on each other. When the distribution of beams changes, the forces of the pile top will be affected. And piles under the beams will also result in beam stress redistribution. In actual project, the rigidity of caps should be optimized and the research results can provide reference for the design of piled beam-slab foundation.

Key words: piled raft foundation; model test; raft rigidity; bearing characteristic

收稿日期: 2014-06-04

基金项目: 国家 973 计划课题(No. 2013CB036304); 国家自然科学基金(No. 51208378)。

第一作者简介: 李婉, 女, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究工作。

通讯作者: 木林隆, 男, 1984 年生, 讲师, 主要从事岩土力学与岩土工程的研究工作。E-mail: mulinlong@tongji.edu.cn

1 引言

相比于传统的实体桩筏基础,梁板式桩筏基础作为新型的风机基础,有其良好的优势:在不明显降低筏板刚度的前提下,大量节材,节省成本。目前,风机多采用桩筏基础,重力式扩展基础等形式,有许多学者^[1-5]采用现场试验、模型试验、数值模拟等方法,对桩筏基础进行受力特性的研究。由于风机能源孕育着巨大潜力,近几年,风电场发展迅速,技术发展较快,梁板式风机基础作为一种新型风电基础具有很大的发展潜力,但目前针对风机梁板式桩筏基础的研究相对较少。何杰等^[6]依托尚义风电场实际工程,对比分析了梁板式筏形基础和扩展基础的差异性。连柯楠等^[7]针对国华通辽风电场工程,用有限元分析了耦合荷载作用下风机的管桩轴力、环梁弯矩、肋梁弯矩的特性,并得出规范设计方法偏于保守的结论。李大钧等^[8]采用有限元软件分析了8种工况,进一步得出上覆土层、筏板刚度、土体模量等因素会对管桩内力产生影响。在这些研究中,学者认识到,筏板的刚度对风电梁板式桩筏基础的承载特性具有较强的影响。然而针对这一问题,目前的研究仅限于有限元分析,缺乏有效的实测或试验数据来支持其研究的准确性,也导致了针对该问题的理论研究也严重滞后于生产实践。

本文通过室内大比尺梁板式桩筏基础模型试验,采用改变梁数来反应筏板刚度的变化,分析了竖向荷载作用下,筏板刚度对基桩的轴力、环梁及肋梁的受力特性以及桩土分担情况的影响。

2 试验

2.1 试验设备

采用同济大学软土物理模型试验系统,模型槽3.0 m(长)×2.1 m(宽)×3.0 m(高),槽底及槽壁采用钢筋混凝土结构,壁厚为30 cm,模型槽地下1.8 m,地上1.2 m(见图1),具体加载装置、传感器等设备可参见文献[9]。

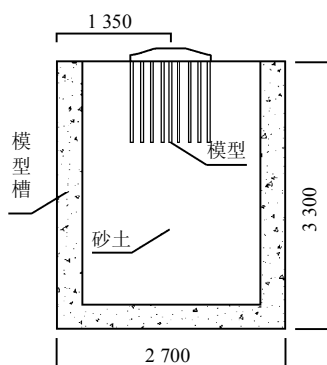


图1 模型槽布置剖面图(单位: mm)

Fig.1 Cross-sectional view of test model (unit: mm)

2.2 试验对象及制备

试验所用对象是由铝合金材质制成的筏板和桩,并通过螺栓而组成的,相似比为1:20的大比尺模型^[9]。中心桩、边桩分别长1.1 m, 1.2 m, 其有效桩长均为1 m, 其余为连接长度;管桩外径为30 mm, 内径为17 mm。桩内部贴应变片, 需将模型桩对半剖开, 布置应变片后用AB胶重新粘贴, 应变数据线由靠近桩顶部侧开口处引出, 用环氧树脂密封。为探究不同筏板刚度引起的风机梁板式桩筏基础承载特性的影响效应, 设计了3种不同刚度的筏板, 分别为6梁梁板式桩筏基础、12梁梁板式桩筏基础及实体筏板桩筏基础(见图2)。其中, 以6梁梁板式基础为基本模型, 通过增加加劲肋(见图3)实现12梁基础, 然后通过浇筑混凝土实现实体基础。为保证混凝土不开裂采用C30的强度, 水泥为42.5级硅酸盐, 水泥、水、砂及碎石并按照1:0.53:1.84:3.42的比例进行配制。为保证所填混凝土处刚度和其他部位抗弯刚度一致, 在混凝土中加入一块4 cm厚的钢板。

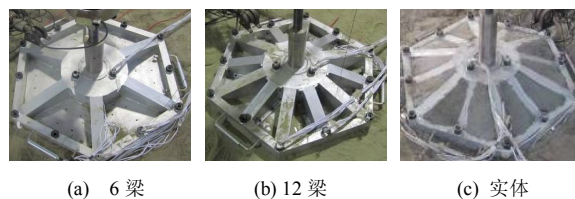


图2 梁板式基础

Fig.2 Beam-slab foundations



图3 加劲肋实物图

Fig.3 Layout of stiffening rib

试验上部荷载取值为30 kN, 采用慢速维持荷载法, 按上部加载值得1/10分级施加荷载, 即每级加载3 kN。认为沉降 $s < 0.1$ mm/15 min时沉降稳定, 开始施加下一级荷载。分别在两根基桩: 边桩(桩1)和中心桩(桩2)和一根肋梁和一段环梁上部粘贴应变片。每根基桩粘贴8枚应变片, 每侧4个; 每根肋梁粘贴6片, 贴在肋梁侧面; 每根环梁粘贴6枚应变片, 粘贴在环梁侧面, 见图4。土体内部布置土压力盒测筏板底部土体应力, 见图5。

土体采用分层压实方法铺填，其土体参数控制如表 1 所示。

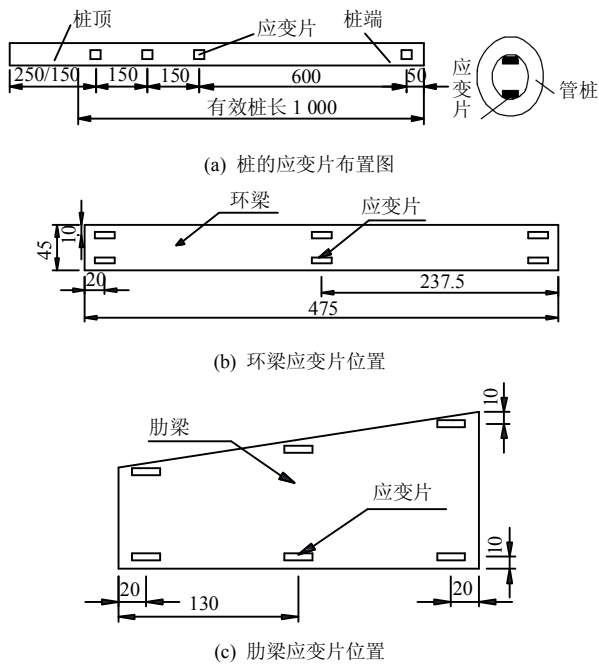


图 4 应变片位置图 (单位: mm)
Fig.4 Layouts of strain gauge (unit: mm)

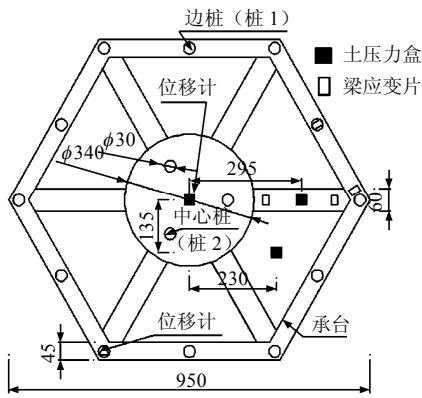


图 5 基础平面图 (单位: mm)
Fig.5 Layout of foundation (unit: mm)

表 1 砂土物理性参数			
Table 1 Physical parameters of sand soil			
取样位置	含水率/%	干密度/(g/cm ³)	压缩模量/MPa
地表处	6.7	1.349	6.394
距地表 0.5 m 处	6.0	1.207	5.721
距地表 1.0 m 处	6.5	1.267	4.096

2.3 试验流程

具体操作步骤如下：
本试验采用砂土，先晾晒后过筛；在模型槽内分层填砂土，捣实整平，填土中埋桩；当土体填至预定位置，并充分压实，布置土压力盒，整平模型

槽面；安装梁板式基础筏板，固定筏板与桩基，连接数据应变采集仪，定位加载设备。需注意每填埋 30 cm 需进行一次压密。

- 整个试验共分 3 种工况：
- 工况 1：6 梁梁板式桩筏基础的试验；
 - 工况 2：安加劲肋，进行 12 梁梁板式桩筏基础试验；
 - 工况 3：筏板空隙处浇混凝土，进行无梁桩筏试验。

3 筏板刚度影响的结果分析

3.1 沉降差

表 2 是在上部荷载为 30 kN 时，根据位于基础筏板顶部处的位移计的测量结果所计算出来的沉降值。由于不同工况下桩基础布置形式和材料相同，因而筏板刚度的变化造成了这种差异。6 梁基础筏板中央处和角桩处差异沉降值较大，此时增加梁的数量可以显著增加基础刚度，减少差异沉降。当梁数超过 12 根以后，再增加梁数对基础刚度影响较小，差异沉降基本一致。可见当刚度超过一定值后，再增加刚度对基础抗变形能力没有显著帮助。

表 2 沉降差值表			
Table 2 Difference values of settlements			
桩筏基础类型	筏板中央处 沉降量/mm	角桩处沉降量 /mm	筏板中央处与角桩 处沉降差值/mm
6 梁基础	-7.42	-5.920	1.500
12 梁基础	-3.07	-2.490	0.580
实体基础	-1.75	-1.145	0.605

3.2 管桩

图 6、7 为 3 种工况下，上部荷载为 30 kN 时，桩 1、2 的轴力。其中，基桩轴力 N_i 由下式计算：

$$N_i = A_p(E_i \varepsilon_i + E_{i+1} \varepsilon_{i+1})/2 \tag{1}$$

式中： A_p 为桩截面面积； E_i 和 E_{i+1} 分别为同一截面第 i 和 $i+1$ 应变片的标定常数； ε_i 和 ε_{i+1} 分别为同一截面第 i 和 $i+1$ 应变片的绝对应变值。其中， $E_i = E_{i+1} = E$ 。

由图 6 可知，对于边桩：12 梁桩的轴力依次小于 6 梁小于实体桩筏基础。由图 7 可见，对于中心桩：12 梁桩承担的轴力依次小于实体基础小于 6 梁基础。这可能是因为梁板式桩筏基础荷载传递顺序是荷载通过肋梁并沿肋梁的方向向四周传递，而 12 梁基础多埋置了 6 根加劲肋，造成基底反力重分布。

表 3 为 3 种工况下基础在顶部受荷为 30 kN 时，各桩顶的轴力分布状况。从表可见，12 梁时内外圈

桩基的轴力较为接近,说明在 12 梁对应的刚度时,内外圈桩基受力较为均衡,而实体基础时内外圈桩基的受力差异最大。

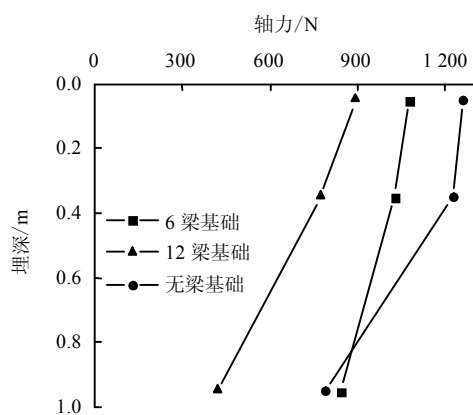


图 6 桩 1 轴力
Fig.6 Axial force of pile 1

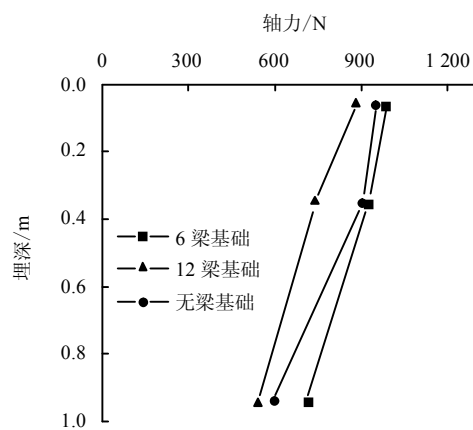


图 7 桩 2 轴力
Fig.7 Axial force of pile 2

表 3 3 种工况轴力对比
Table 3 Axial force of 3 conditions

桩号	6 梁基础内力/N			12 梁基础内力/N			实体基础内力/N		
	实测值	平均值	比值/%	实测值	平均值	比值/%	实测值	平均值	比值/%
桩 1	1075.5			889.7			1259.0		
桩 2	991.5	1033.5	8.5	889.7	889.7	0	955.1	1107.0	31.8

注:表中比值系极差与最小值的百分比。

图 8、9 为桩基荷载分担比。计算时认为,6 根边桩轴力相同、3 根中心桩轴力相同,分别计算两类桩的总和,其值与施加荷载的比值,即为各类桩荷载承担比。从图 8 不同工况桩基荷载分担比上看到,随着荷载逐步增大,在筏板变形稳定且土体压密后,桩基荷载分担比维持一个常数。在初始加载时,6 梁边桩所承担的荷载最大,随着荷载的施加,

所分担的比重出现先陡降随后基本保持不变的情况,其值小于实体基础。因为 6 梁和 12 梁基础相比于实体来说,柔度相对较大,土压力发挥较明显,在同等荷载作用下,柔性筏板下的桩基所承担的轴力就整体小于实体的。可见,筏板刚度对桩筏基础底部桩基的荷载分担比有较大的影响。实体基础桩基承担荷载最多,而 12 梁时桩基承担的荷载最少。

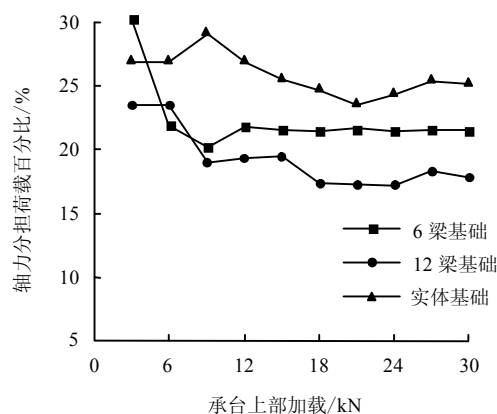


图 8 边桩荷载分担比
Fig.8 Load sharing ratio of side pile

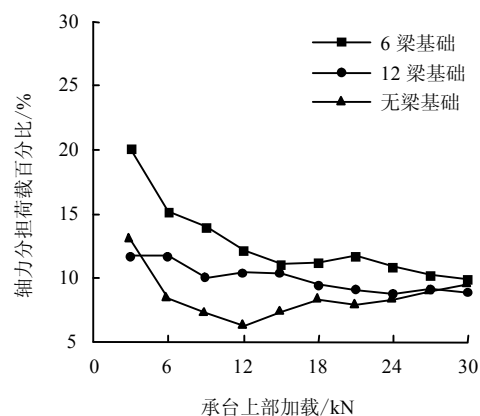


图 9 中心桩荷载分担比
Fig.9 Load sharing ratio of center pile

图 8 可知,筏板柔度越大,中心桩所承担的百分比越大。这是由于中心桩靠近荷载施加点,在筏板-桩-土的共同作用机制下,对于 6 梁柔性基础,筏板刚度小,因而受力小,所以使得中心桩分担的就大。但随着荷载的增加,中心桩分担比都缓降,趋于 10%,土承担的比重增大。

3.3 土压力

图 10 为桩筏基础底部各处土压力随荷载的变化曲线。表 4 为当基础顶部加载为 30 kN 时根据实测桩顶轴力及土压力估算的近似桩土分担比例。其中,12 根边桩轴力加上 3 根中心桩的轴力,其总和与基础顶部荷载的比值,即为桩承担的百分比。

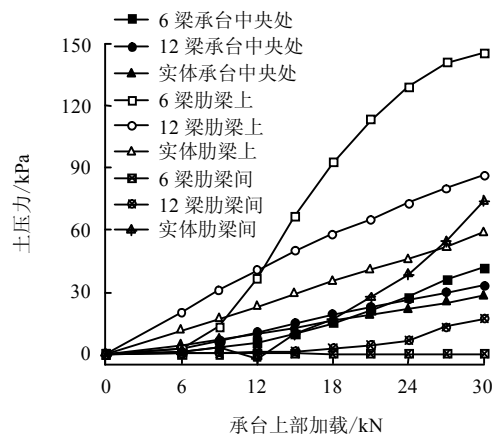


图 10 筏板土压力
Fig.10 Soil pressure of cap

表 4 桩土分担比
Table 4 Ratio of piles and soils

分担比	6 梁基础/%	12 梁基础/%	实体基础/%
桩	53.6	44.5	59.9
土	46.4	55.5	40.1

由图 10 可知, 3 种工况下, 筏板中央处的土压力值较为近似, 土压力也随着多级加载几乎成线性增长的趋势。从图上也可以看到, 虽然最大土压力出现在 6 梁基础的梁底部, 但其底部的土压力分布极不均匀, 在肋梁间的土压力几乎不承受荷载。而 12 梁基础与实体基础土基底土压力分布较为均匀, 但 12 梁基础土压力基本上大于实体基础底部的土压力。从表 4 桩土分担比可以看到, 由于 12 梁基础底部土压力分布均匀, 虽然最大土压力出现在 6 梁基础底部, 但 12 梁基础的土体承担总荷载要大于 6 梁基础。说明, 存在一个最优筏板刚度使基础底部反力分布最为均匀, 可使土体发挥最大效应, 刚度过大或过小都不利于基底土压力的发挥。

3.4 环梁

图 11 为 3 种工况下, 上部荷载为 30 kN 时, 环梁的弯矩沿环梁的变化曲线。弯矩由材料力学公式计算得:

$$\sigma = My / I_z + N / A \quad (2)$$

式中: M 为所求弯矩; I_z 为梁截面的惯性矩; N 为梁截面的轴力; A 为梁的截面面积。

通过上下 2 个应变片, 算出 2 个应力值, 联立方程, 求解未知量 M 和 N 。其中, 下部受拉为正, 受压为负。对比 6 梁和 12 梁两工况的环梁内力, 可看出, 随着环梁中部设置加劲肋, 环梁中部弯矩减

小。当基础环梁间填满混凝土时, 环梁以上受拉为主。

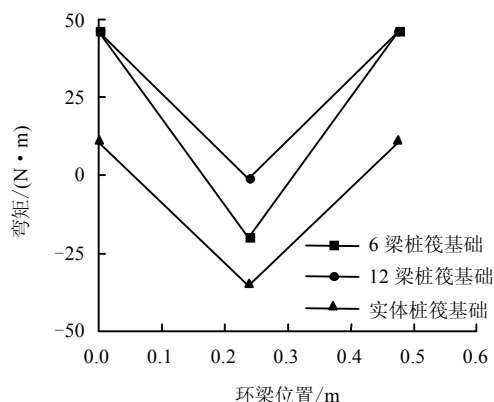


图 11 环梁弯矩
Fig.11 Moment on ring beam

3.5 肋梁

图 12 为 3 种工况下, 上部荷载为 30 kN 时肋梁的弯矩值, 亦是根据式 (2) 算得的。由图得知, 随基础筏板刚度的增大, 肋梁弯矩值减小, 当在环梁每个桩处均设置肋梁后, 再增大基础刚度, 对肋梁内力的影响较小。且当基础从实体基础改为 6 梁梁板式基础时, 肋梁最大弯矩约为增加实体基础弯矩的 1.4 倍。

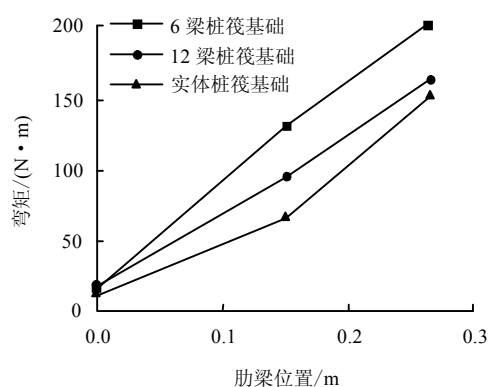


图 12 肋梁不同位置处弯矩
Fig.12 Moment on ribbed beam at different locations

图 13 为桩筏基础 3 种工况下肋梁弯矩随荷载变化曲线。在肋梁外侧梁端, 弯矩在 20 kN 内变化, 变化量很小, 且基本一致。而在内侧梁端, 荷载较小时无梁基础的弯矩首先发挥, 几乎线性增长; 而对于较柔的筏板, 随着变形的发展弯矩迅速增长, 当荷载较大时梁板式基础的弯矩大于实体基础的弯矩。且基础刚度越小, 弯矩增长速度越快。

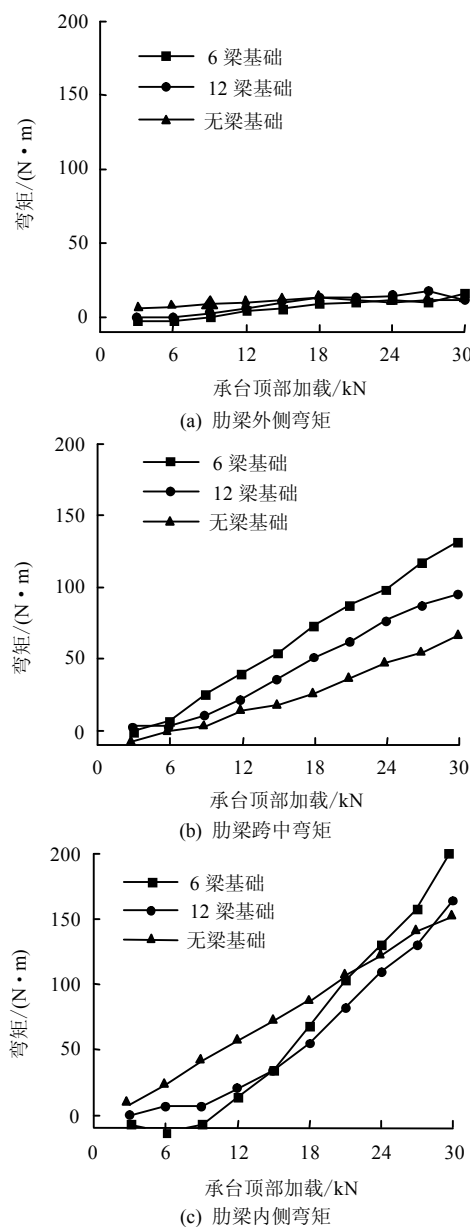


图 13 肋梁弯矩

Fig.13 Moments on ribbed beam

4 结 论

(1) 随着梁板式基础刚度增加, 基础内外差异沉降减少, 但当达到一定刚度后再增加刚度对变形影响较小。

(2) 梁板式基础刚度的变化会影响基底反力分布的均匀性, 且存在一个最优刚度, 当达到最优刚度时, 基础底部土体承载效应发挥最好, 基础底部反力分布最为均匀, 桩基承担的荷载最低。本次试验中 12 梁的梁板式基础基底反力最为均匀。

(3) 桩基的分布和梁的分布存在相互影响, 改变梁的分布会影响桩顶力, 而桩基在梁底下又会使梁的应力产生重新分布。

(4) 当梁遍布所有外圈桩基顶部后, 再增加基础刚度对梁内力影响较小。

综上试验结果, 在实体筏板基础上适度减小基础刚度有利于减小基础构件的内力, 当减小的刚度超过最优刚度时, 反而会增加内力。因此, 梁板式基础的设计过程中, 应注意到最优刚度的存在。

参 考 文 献

- [1] COOKE R W. Piled raft foundations soil stiff clays-a contribution to design philosophy[J]. *Geotechnique*, 1986, 36(2): 169—203.
- [2] CHOW Y K, YONG K Y, SHEN W Y. Analysis of piled raft foundation using a variational approach[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2001, 1(2): 129—147.
- [3] 王曙光. 竖向荷载作用下梁板式筏形基础基底反力及变形特征研究[D]. 北京: 中国建筑科学院, 2002.
- [4] 王曙光. 均匀柱荷载作用下梁板式筏形基础破坏性状的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(10): 97—101.
WANG Shu-guang. Experimental study on the failure behavior of waffle-slab raft foundations under uniform column loads[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(10): 97—101.
- [5] 张武. 高层建筑桩筏基础模型试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2002.
- [6] 何杰, 陶铁铃, 陈玉梅. 新型梁板式风机基础数值模拟研究[J]. *人民长江*, 2011, 42(3): 43—46.
- [7] 连柯楠, 木林隆, 黄茂松, 等. 国华通辽风电场三期工程梁板式桩筏基础性状数值分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(增刊 1): 290—296.
LIAN Ke-nan, MU Lin-long, HUANG Mao-song, et al. Numerical analysis of piled beam-raft foundation of third-phase project of Guohua Tongliao wind farms[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Supp. 1): 290—296.
- [8] 李大钧, 连柯楠, 木林隆. 耦合荷载作用下桩筏基础性状数值分析[J]. *建筑科学*, 2012, 28(增刊 1): 024—028.
LI Da-jun, LIAN Ke-nan, MU Lin-long. Finite element analysis of piled raft foundation under coupling load[J]. *Building Science*, 2012, 33(Supp. 1): 290—296.
- [9] 木林隆, 连柯楠, 黄茂松, 等. 风机梁板式桩筏基础承载特性大型模型试验研究[J]. *岩土力学*, 录用待刊.
MU Lin-long, LIAN Ke-nan, HUANG Mao-song, et al. Large-scale model test on piled beam-slab foundation for wind turbine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, to be published.
- [10] 王伟, 杨敏. 竖向荷载下桩筏基础通用分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2008, 31(1): 106—112.
WANG Wei, YANG Min. General analysis method of piled raft foundation under vertical loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 31(1): 106—112.
- [11] OTTAVIAN M. Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups[J]. *Geotechnique*, 1975, 25(2): 159—174.