

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.06.004



五星形桩与圆桩水平承载性能对比 模型试验研究

任连伟¹, 詹俊峰¹, 杨权威¹, 王新泉²

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 浙江大学 城市学院, 杭州 310015)

摘要:五星形桩是一种横截面异形桩,是在圆桩的基础上向内切割 5 个圆弧,形成截面类似五星形的异形桩。按其截面性质分为周长最大化五星形桩 F_1 、周长面积比最大化五星形桩 F_2 两种桩型,为掌握五星形桩的水平承载性能进行了与圆桩的对比模型试验研究。试验用土为干砂,砂雨法土样制作,模型桩为预制钢筋混凝土桩,相似比为 1:8。模型试验桩包括:五星形桩 F_1 、五星形桩 F_2 、与五星形桩 F_2 截面周长相同的圆桩 C_1 、与五星形桩 F_2 截面面积相同的圆桩 C_2 。由于五星形桩水平承载性能具有方向性,试验采用理论计算中水平承载力最大的方向施加水平荷载,试验结果表明: F_1 、 C_1 和 F_2 的水平极限承载力相当,但 F_2 的截面面积最小,仅为 C_1 的 0.44 倍;与 C_2 相比, F_2 的水平极限承载力是其 1.63 倍,可见,合理截面形式的五星形桩可以提供更大的水平承载能力;五星形桩与圆桩弯矩分布规律基本一致,都在 4 倍直径左右(五星形桩为外接圆直径)达到最大,但五星形桩截面面积小,抗弯刚度不足,容易折断,总体水平承载性能不及截面周长相同的圆形桩,但优于截面面积相同的圆形桩。

关键词:五星形桩;模型试验;水平承载力;砂雨法;弯矩

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)06-0024-08

Model test analysis of the horizontal bearing capacity between five-star-shaped piles and ordinary round pile

Ren Lianwei¹, Zhan Junfeng¹, Yang Quanwei¹, Wang Xinquan²

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China;

2. Department of Civil Engineer, school of City College Zhejiang University, Hangzhou 310015, P. R. China)

Abstract: Five-star-shaped-pile is a new type of cross section special shaped pile, which is formed by cutting five circular arcs in a circle pile. Five-star-shaped-pile is divided into two categories according to the nature of its cross section, the circumference of the maximum of five star shaped piles F_1 and the perimeter area ratio of the maximum of the five-star pile F_2 . The experimental research on the comparison of four single piles in dry sand by sand pouring method is carried out to explore the horizontal bearing capacity of five-star-shaped piles. Similarity ratio is 1:8. These four single piles are: Maximum ratio of perimeter and area

收稿日期:2016-05-23

基金项目:国家自然科学基金(51308497);河南省教育厅科技攻关项目(14A560015)

作者简介:任连伟(1980-),男,博士,副教授,主要从事地基与基础相关的教学与科研工作,(E-mail)renhpu@163.com。

Received:2016-05-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51308497); Technology Research Project of Education Department in Henan (No. 14A560015)

Author brief: Ren Lianwei (1980-), PhD, associate professor, main research interests: ground improvement and pile foundation, (E-mail)renhpu@163.com.

of the five star shaped pile F_1 , the maximum of the circumference of the five star shaped pile F_2 , round pile C_1 with the same section of F_2 , round pile C_2 with the same cross-sectional area of F_2 . The test results show that: 1) the horizontal bearing capacity of F_2 , C_1 and F_1 are near, but the section area of F_2 is the minimum, and it is only 0.44 times of C_1 ; 2) the horizontal bearing capacity of F_2 is 1.63 times of C_2 , so it is concluded that the reasonable section form can improve the horizontal bearing capacity; 3) the moment distribution of four single piles is largely consistent, and the moment reach the maximum at 0.4 m; but the section of five-star-shaped pile is small, and the bending stiffness is not enough and it is easy to break; so the whole horizontal bearing capacity is less than that of C_1 but better than that of C_2 .

Keywords: five-star-shaped pile; model test; horizontal bearing; sand pouring; moment

基于提高或改善桩的承载性能,近期异形桩得到了较大发展,但水平承载性能的研究还不够深入。贺杰^[1]对截面形式如 Y 形桩的水平承载性能进行了试验研究,得出不同加载方向水平承载力不同。袁信等^[2]、周航等^[3-4]对截面形式如 X 形桩的承载机理及力学特性进行了研究,得出不同于圆形桩的承载特性。郑浩等^[5]、任连伟等^[6]对具有不同组合形式的高喷插芯组合桩进行了水平承载性能研究,组合后的水平承载力明显高于预制芯桩。王俊林等^[7]对大直径扩底桩的水平承载性能进行了试验及数值模拟研究,扩大头的深度和广度对承载力有影响。刘汉龙等^[8]对大直径现浇薄壁管桩 PCC 进行了水平承载性能足尺试验研究,其水平承载力优势明显。孔纲强等^[9]对扩底楔形桩的水平承载性能进行了透明土模型试验研究,重点研究了桩周及桩端土体的变形规律,扩大头的存在可以提高水平承载力。Choi 等^[10]、Basu 等^[11]对矩形截面桩的水平承载特性进行了研究。

五星形桩是也是一种截面异形桩,为探索五星形桩的水平承载性能,在河南理工大学自主研发的多功能模型槽内进行了周长最大化五星形桩 F_1 、周长面积比最大化五星形桩 F_2 、与 F_2 横截面周长相同的圆桩 C_1 、与 F_2 横截面面积相同的圆桩 C_2 水平承载性能对比模型试验研究,研究成果对五星形桩的进一步应用提供一定参考。

1 模型试验

1.1 实验设备

1)模型槽 模型试验在河南理工大学自主研发设计的多功能模型槽内进行,模型槽如图 1 所示。模型槽尺寸长宽高为 2 m×2 m×2.5 m,槽壁三面为钢板组合而成,一面由透明钢化玻璃构成,用以观察试验中模型槽内土的变化。

2)加载系统 试验中水平荷载通过水平向拉桩

头的方式提供,主要方法为通过钢绳一端固定桩头,钢绳另一端与竖向吊篮相连,钢绳方向通过固定在模型槽外伸横梁引导,通过在吊篮里堆放砝码,对桩头逐级提供水平荷载,直至达到规范中所规定的试验终止条件出现^[12-13]。现场试验照片如图 2 所示。



图 1 模型槽全景图
Fig. 1 Full view of model test system



图 2 水平载荷试验
Fig. 2 The horizontal loading test

1.2 模型试验

1)砂雨法施工 用土为砂性土,为河砂经晒干后过筛去除杂质而成。其筛分试验结果如图 3 所示,属于级配不良砂,其基本参数为:密度 $\rho = 1.65 \text{ g/cm}^3$,内摩擦角 $\varphi = 42^\circ$,压缩模量 $E_s = 15.31 \text{ MPa}$ 。

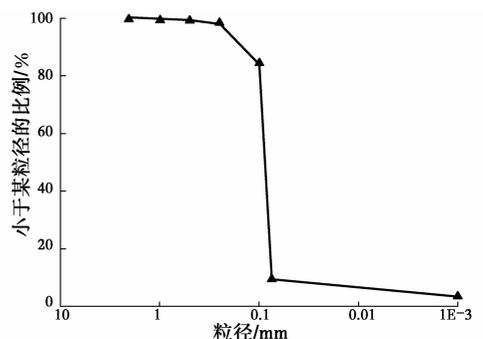


图 3 砂土筛分试验结果曲线

Fig. 3 Grain size distribution of the test sand

采用砂雨法^[14-15]成桩,砂雨法落距为 0.5 m,如

图4所示。人工在模型槽内撒砂,漏斗口径为1 m,高0.5 m,下连2 m长口径为15 cm的软管,软管与漏斗之间为阀门相连,阀门控制撒砂速度,漏斗下出口处连接出管滤网,网眼尺寸为2 mm,滤网与模型槽内平铺砂土落距为0.5 m,滤网上栓0.5 m长线吊坠,在撒砂过程中对落距进行实时控制。逐层埋设桩体,直至全部桩身埋设在砂土内。



图4 砂雨法施工

Fig. 4 Site construction of sand pour

通过室内试验测得砂土的最大孔隙比为0.855,砂雨法后的最小孔隙比为0.522,天然孔隙

比为0.653,从而得到密实度为60.8%。可见,与一般填砂相比,砂雨法可以使砂土密实度更高,均匀性进一步得到保证,使模型试验结果更可靠。

2)模型桩 试验模型桩采用钢筋混凝土预制模型桩,两类五星形桩为定制钢模浇筑而成。桩身为细石钢筋混凝土材料,其抗压强度为C25,主筋尺寸为 $3\phi 6$ mm、主筋间距3 cm、空间布局为三角形。箍筋采用 $\phi 2$ mm@200 mm构成钢筋笼。预制好的模型桩如图5所示,五星形模型桩属性如表1所示。



图5 模型试验桩

Fig. 5 Model test piles

表1 模型试验桩参数

Table 1 Model pile parameters

桩型	凹弧 $x/(\circ)$	桩外包圆半径 r/mm	截面周长/ mm	截面面积/ mm^2	与 F_2 周长比	与 F_2 面积比	抗弯刚度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$
F_1	20.9	50	362	5 869	1.02	1.33	840
F_2	29	50	356.4	4 397	1	1	513
C_1		56.7	356.4	10 107	1	2.3	2 273
C_2		37.2	233.6	4 397	0.66	1	421

3)桩体平面布置 水平载荷试验为2根五星形桩、2根圆桩的对比试验,4根桩的平面布置如图6所示。桩间距设置为8倍的桩径左右,桩到槽壁的距离在6倍的桩径左右,留有较大的空间尽量降低桩与桩相互影响以及槽壁对水平载荷试验的影响。

4)桩体测试元件布置 在水平力加载方向上沿着桩身前后两侧布置土压力盒,土压力盒水平方向距离桩身5 cm,桩身方向上桩顶处土压力盒距离桩顶10 cm,然后每隔30 cm布置土压力盒;沿着水平力加载方向桩身前后粘贴应变片,桩顶处应变片距离桩顶10 cm,然后每隔30 cm布置应变片,用以测量桩身弯矩,土压力盒、应变片粘贴位置如图7所示。

根据模型槽的结构特点及五星形桩水平向受力具有方向性,尖角方向水平力小于凹弧方向水平力,

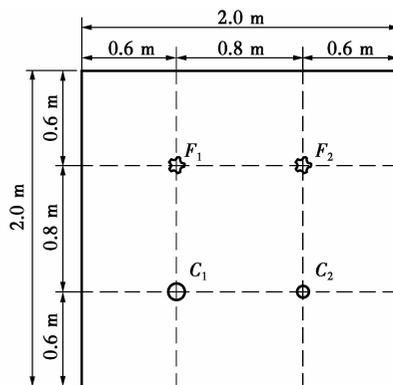


图6 4根单桩桩布置平面图

Fig. 6 The plan of four piles in tank

单桩水平载荷试验布局如图8所示。O点为五星形桩形心,桩身弹性模量为 E_p ,桩身受力方向惯性矩

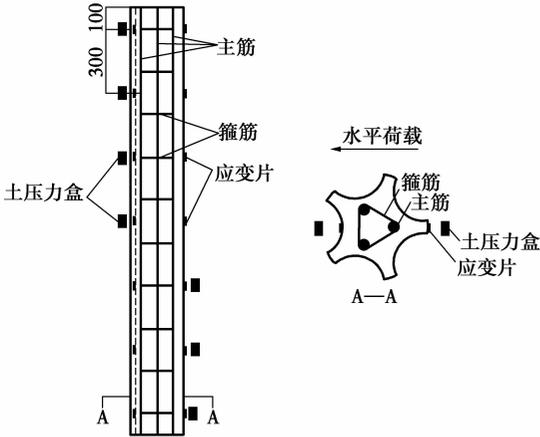


图 7 检测仪器布置图

Fig. 7 The arrangement of testing instruments

为 I_p , 在图 8 受力方向的水平荷载下 A、B 两点应变分别为 ϵ_A, ϵ_B 。可知在受力方向上距离形心为 y 点处弯矩, 可知 A、B 两点弯矩分别为与, 用线性内插法得出 O 点弯矩。

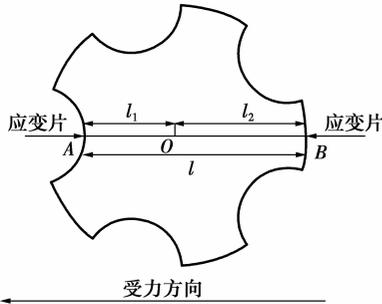


图 8 弯矩计算示意图

Fig. 8 Moment calculation view

2 试验结果

2.1 临界荷载与极限荷载

根据单桩水平试验得出了 4 根单桩水平力位移曲线如图 9 所示。

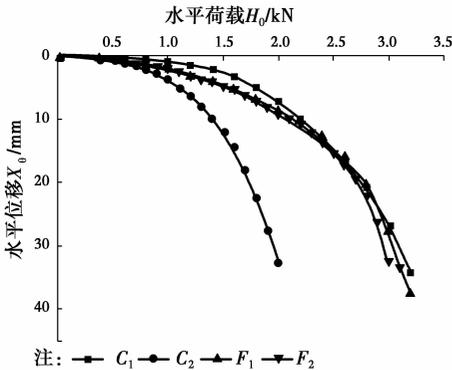


图 9 4 根单桩水平荷载-位移曲线

Fig. 9 Horizontal load-horizontal displacement curves of four different piles

由图 9 可以看出, 4 根单桩里 C_2 桩水平承载力较小, C_1, F_1, F_2 3 个曲线相近, 做出 4 根单桩水平位移梯度曲线如图 10~13 所示

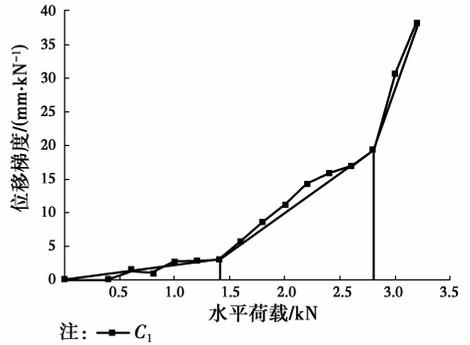


图 10 C_1 桩位移梯度曲线

Fig. 10 Horizontal force-displacement gradient of C_1

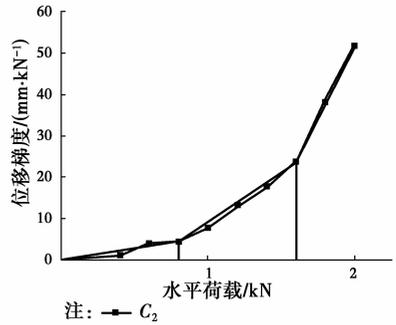


图 11 C_2 桩位移梯度曲线

Fig. 11 Horizontal force-displacement gradient of C_2

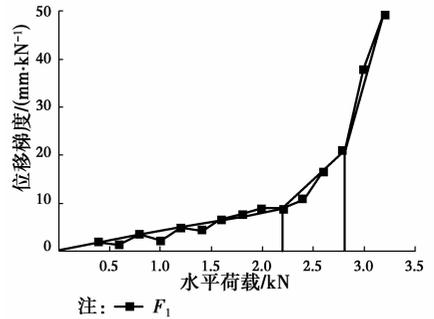


图 12 F_1 桩位移梯度曲线

Fig. 12 Horizontal force-displacement gradient of F_1

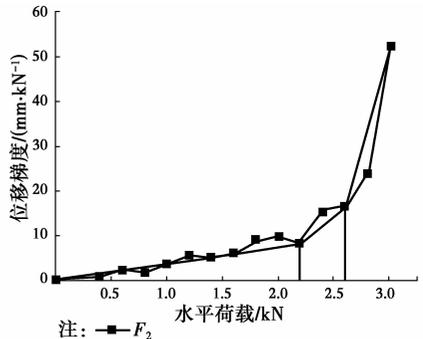


图 13 F_2 桩位移梯度曲线

Fig. 13 Horizontal force-displacement gradient of F_2

由图 10~13, 根据现行规范^[12-13], 得出水平临界荷载 H_{cr} 和水平极限荷载 H_u , 以及相对应的水平位移, 4 根单桩的临界荷载与极限荷载如表 2 所示。

表 2 四根单桩水平荷载及对应位移

Table 2 Horizontal load and the corresponding displacement

桩型	临界荷载 H_{cr}/kN	水平位 移/mm	极限荷载 H_u/kN	水平位 移/mm
C_1	1.4	2.21	2.8	20.56
C_2	0.8	2.13	1.6	14.61
F_1	2.2	10.52	2.8	20.28
F_2	2.2	10.75	2.6	17.19

由图 10~13 和表 1~2 可以得出如下结论。

1) 五星形桩 F_1 是 F_2 的水平极限承载力的 1.08 倍, 但截面面积是 F_2 的 1.33 倍; 圆桩 C_1 的水平极限承载力是 F_2 的 1.08 倍, 但其截面面积是 F_2 的 2.3 倍, 可见五星形 F_2 桩单位混凝土贡献水平承载力更高, F_2 截面形式最优。

2) 与 F_2 桩相比, 圆桩 C_2 的水平极限承载力是 F_2 的 0.62 倍, 但两根桩截面面积相同, 可见 F_2 桩在特定的加载方向上表现出较高的水平承载能力。同时, 从表 2 可以看出, F_2 桩抗弯刚度是 C_2 的水 1.22 倍, 可见, 与 C_2 相比, 五星形桩 F_2 抗弯刚度有所提高, 水平承载力得到较大提高(特定方向上)。

3) 与五星形桩 F_2 截面面积相同的小圆桩 C_2 的临界荷载与极限荷载均最小, 这是因为相同截面面积下, 圆桩 C_2 桩侧表面积较小, 使得 C_2 与桩周土接触有限, 参与提供水平承载力的土体范围和广度有限, 故在相同水平荷载下桩头显示出更大的水平位移, 即更小的临界荷载与极限荷载。

4) 与五星形桩 F_2 截面周长相同的大圆桩 C_1 , 其临界荷载较小, 极限荷载较五星形桩略大。 C_1 的抗弯刚度是 F_2 的 4.43 倍, 抵抗更大的水平变形, 调动更广更深的土体参与水平荷载的承担, 所以水平极限承载力大。

5) 2 根五星形桩 F_1 与 F_2 临界荷载相同, 比圆桩大, 这说明在加载初期, 五星形异形截面的存在增加了抵抗水平变形的能力, 异形扩大效应明显; 但加载后期, 由于五星形桩截面面积小, 抗弯刚度不足, 易产生桩身折断, 极限承载力不足。

2.2 桩身弯矩分布

4 根单桩桩身弯矩在各级水平荷载作用下随深

度变化曲线如图 14~17 所示, 可以得出:

1) 大圆桩 C_1 桩身弯矩沿着桩头向下逐渐增大, 在 0.45 m(4 倍桩径) 左右处达到最大, 然后又逐渐减小, 这与 C_1 的桩型有很大关系, 由于试验中 C_1 截面面积最大, 抗弯刚度最大, 在受到水平荷载时, 桩身弯矩分布的整体性更强, 更多的区域能分担由于桩头受力而产生的弯矩。

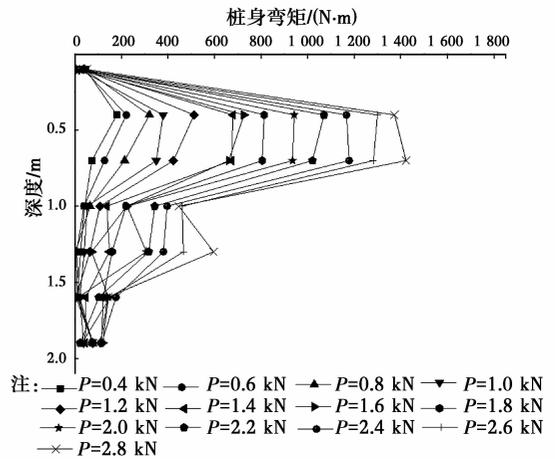


图 14 C_1 桩身弯矩

Fig. 14 The moment distribution of C_1 pile

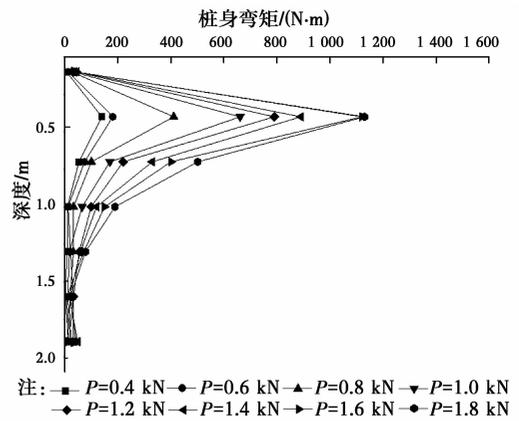


图 15 C_2 桩身弯矩

Fig. 15 The moment distribution of C_2 pile

2) 五星形桩 F_1 桩身弯矩在 0.4 m 处由于桩身弯矩太大导致应变片破坏, 在桩头以下 0.4 m 处出现很大桩身弯矩外, 其他部分并没有产生更大的桩身弯矩, 这说明由于五星形桩截面形状的原因主要在桩头以下 0.4 m 处产生了较大的桩身弯矩。

3) 五星形桩 F_2 弯矩在 0.4 m(4 倍外接圆直径) 处弯矩最大, 加载到后期产生了折断(0.5 m 处, 5 倍外接圆直径), 如图 17 所示; 小圆桩 C_2 桩身弯矩分布与 F_2 相似, 在 0.45 m 处(6 倍桩径) 处产生了裂纹。

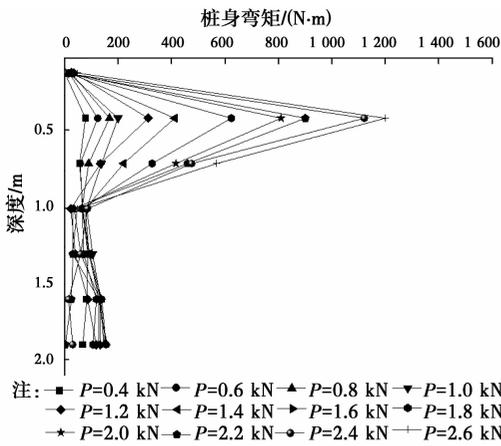


图 16 F_1 桩身弯矩

Fig. 16 The moment distribution of F_1 pile

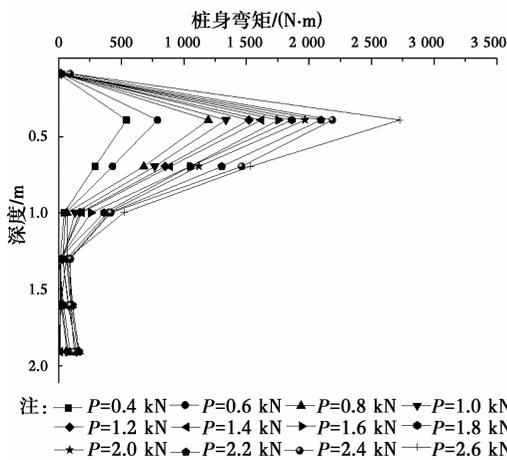


图 17 F_2 桩身弯矩及折断图

Fig. 17 The moment distribution of F_2 pile and pile break

可见,4 根桩弯矩在 4 倍桩径(五星形桩是外接圆直径)左右达到最大,抗弯刚度与截面面积成正比,所以截面面积较小的五星形桩虽能调动更多的土体参与水平荷载的承担,水平承载力较高,但趋于达到混凝土的抗拉强度,易于折断。所以,从总的承载性能来说,圆形桩工程安全度比五星形桩高。

2.3 桩侧土压力分布

图 18~21 为 4 根单桩桩侧土压力在逐级水平荷载下沿桩深分布图,可以得出:

1)4 根单桩桩侧土压力在桩头附近较小,然后沿着桩头向下逐渐增大后又逐渐减小,桩侧土压力主要集中在桩身上部 1 m 范围内。桩顶处土压力较小可能是由于桩顶处砂土比较松软导致。

2)大圆桩 C_1 在荷载较小时桩侧土压力沿着桩身呈递减趋势,这符合试验中的一般规律。在较大水平荷载时呈现出桩头处桩侧土压力变化不大,距离桩身 0.4 m(3~4 倍直径)处桩侧土压力增大,桩

身 1 m 以下桩侧土压力已经很小,基本可以忽略,也就是说大圆桩 C_1 在水平荷载作用下桩侧土压力主要在桩身上半段。

3)小圆桩 C_2 在荷载较小时桩侧土压力沿着桩身逐渐递减,在受到较大荷载时桩顶处桩侧土压力基本无变化,距离桩身 0.4 m(5~6 倍直径)处桩侧土压力达到最大,桩身 1 m 以下侧土压力较小。在距离桩头 1.4 m 处桩侧土压力有小范围增大,这可能是由于小圆桩的刚性扭转,对桩侧土压力产生了土压力。

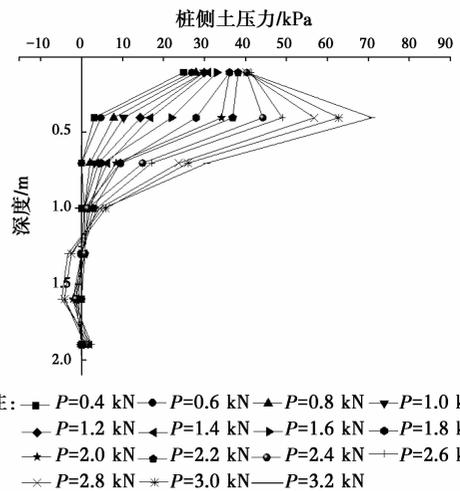


图 18 C_1 桩侧土压力

Fig. 18 Lateral earth pressure of C_1

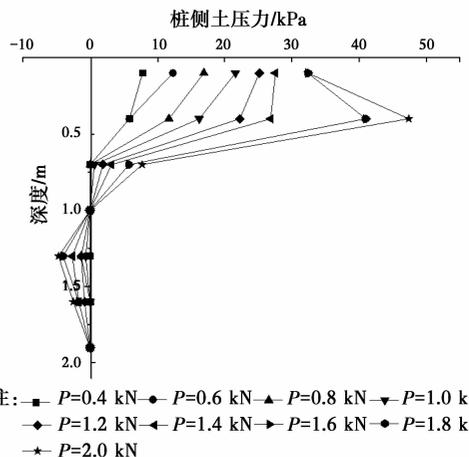
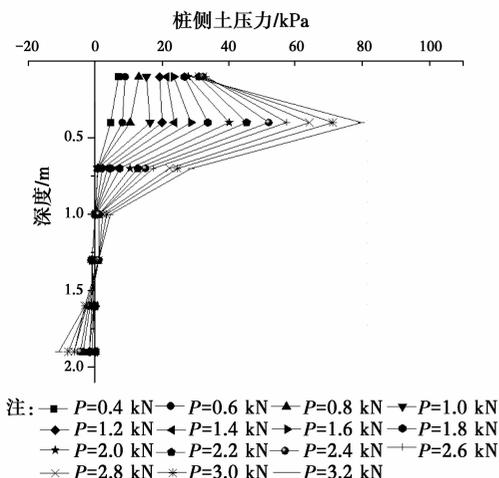
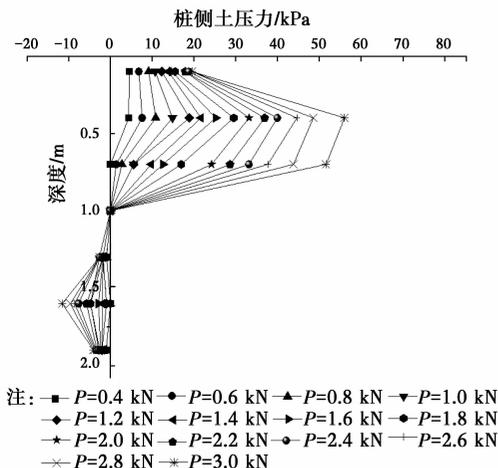


图 19 C_2 桩侧土压力

Fig. 19 Lateral earth pressure of C_2

4)五星形桩 F_1 桩侧土压力沿桩身分布趋势与圆桩接近,在 4 倍的外接圆直径处土压力达到最大;不同之处是在距离桩身 0.4 m 到 0.7 m 范围桩侧土压力减小较慢,五星形异形截面的存在带动了更广泛范围的土体参与水平荷载的承担。

图 20 F_1 桩侧土压力Fig. 20 Lateral earth pressure of F_1 图 21 F_2 桩侧土压力Fig. 21 Lateral earth pressure of F_2

3 结论

五星形桩是一种截面异形桩,为掌握其水平承载性能,进行了周长最大化五星形桩 F_1 、周长面积比最大化五星形桩 F_2 、与五星形桩 F_2 截面周长相同的圆桩 C_1 以及与五星形桩 F_2 截面面积相同的圆桩 C_2 4 根单桩对比模型试验研究,主要结论如下:

1) 五星形桩 F_1 是 F_2 的水平极限承载力的 1.08 倍,但截面面积是 F_2 的 1.33 倍,可见五星形桩 F_2 的“性价比”更高。

2) 与 F_2 桩相比,圆桩 C_1 的水平极限承载力是 F_2 的 1.08 倍,但其截面面积是 F_2 的 2.3 倍,可见五星形 F_2 桩单位混凝土贡献水平承载力更高。

3) 与 F_2 桩相比,圆桩 C_2 的水平极限承载力是 F_2 的 0.62 倍,但两根桩截面面积相同,可见 F_2 桩

在特定的加载方向上表现出较高的水平承载能力。

4) 4 根桩的桩身弯矩分布规律大体相同,在 4 倍桩径(五星形桩为外接圆半径)左右达到最大;五星形桩虽能调动更多的土体参与水平荷载的承担,但趋于达到混凝土的抗拉强度,易于折断,工程安全度不高。

5) 桩侧土压力主要分布在 10 倍桩径(五星形桩为外接圆直径)范围内,其下到桩底土压力偏小,可见水平承载力主要由上部土体提供,桩侧面积越大、抗弯刚度越大,土抗力发挥程度更高、范围更广。

6) 需要指出的是,五星形桩在指定加载方向上表现出比圆桩更强的水平承载性能,但实际工程中桩承受的水平承载力方向是不确定的,因此,圆桩的适应性更强。另外,五星形桩截面面积小,抗弯刚度不足,容易折断。所以,五星形桩虽在某些方向上水平承载力高于圆桩,但总体承载性能方面不一定优于圆桩。

参考文献:

- [1] 贺杰. Y 形桩水平承载性能试验研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
HE J. Research on the behavior of Y-shaped sinking pipe pile under lateral loads by field testing [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)
- [2] 袁伟. X 形钢筋混凝土桩水平承载性能足尺模型试验研究[D]. 南京:河海大学, 2009.
YUAN J. Research on the behavior of X-shaped sinking pipe pile under lateral loads [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)
- [3] 周航, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 任意角度水平向荷载下现浇 X 形桩力学特性研究(I): 惯性矩[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2754-2758.
ZHOU H, KONG G Q, LIU H L, et al. Study of mechanical properties of X-section cast-in-place concrete pile under arbitrary direction lateral load (I): moment of inertia [J]. Rock and Soil Mechanism, 2012, 33(9): 2754-2758. (in Chinese)
- [4] 周航, 孔纲强. 水平荷载作用下现浇 X 形桩桩周土体响应理论分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3377-3383.
ZHOU H, KONG G Q. Theoretical analysis of the reaction mechanism of the surrounding soil of X-section cast-in-place pile under lateral load [J]. Rock and Soil Mechanism, 2013, 34(12): 3377-3383. (in Chinese)
- [5] 郑浩, 刘汉龙, 雷玉华, 等. 高喷插芯组合桩水平承载特性大尺寸模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32

- (1): 217-223.
- ZHENG H, LIU H L, LEI Y H, et al. Large-scale model test analysis of behaviors of jet grouting (JG) soil-cement-pile strengthened pile under lateral load [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 217-223. (in Chinese)
- [6] 任连伟, 顿志林, 李果, 等. JPP 桩不同组合水平承载性能模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2014(Sup2): 101-106, 113.
- REN L W, DUN Z L, LI G, et al. Model test research on horizontal bearing behavior of JPP pile under different combinations [J]. *Rock and mechanics*, 2014 (Sup2): 101-106, 113. (in Chinese)
- [7] 王俊林, 王复明, 任连伟, 等. 大直径扩底桩单桩水平静载试验与数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(9): 1406-1411.
- WANG J L, WANG F M, REN L W, et al. Horizontal static load test and numerical simulation of single large diameter under-reamed pile [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(9): 1406-1411. (in Chinese)
- [8] 刘汉龙, 张建伟, 彭劼. PCC 桩水平承载特性足尺模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(2): 161-165.
- LIU H L, ZHANG J W, PENG J. Full-scale model test for the behavior of cast-in-place concrete large diameter pipe pile under lateral load [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(2): 161-165. (in Chinese)
- [9] 孔纲强, 曹兆虎, 周航, 等. 水平荷载下扩底楔形桩承载力特性透明土模型试验[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(5): 83-89.
- KONG G Q, CAO Z H, ZHOU H, et al. Experimental study on lateral bearing capacity of enlarged wedge-shaped pile using transparent soil [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(5): 83-89. (in Chinese)
- [10] CHOI Y S, BASU D, SALGADO R, et al. Response of laterally loaded rectangular and circular piles in soils with properties varying with depth [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2014, 140(4): 04013049.
- [11] BASU D, SALGADO R. Analysis of laterally loaded piles with rectangular cross sections embedded in layered soil [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2008, 32: 721-744.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- The People's Republic of China Ministry of Construction. Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [14] 李浩, 罗强, 张正, 等. 砂雨法制备砂土地基模型控制要素试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(10): 1872-1878.
- LI H, LUO Q, ZHANG Z, et al. Experimental study on control element of sand pourer preparation of sand foundation model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 36(10): 1872-1878. (in Chinese)
- [15] 马险峰, 孔令刚, 方薇, 等. 砂雨法试样制备平行试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(10): 1791-1801.
- MA X F, KONG L G, FANG W, et al. Parallel tests on preparation of samples with sand pourer [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(10): 1791-1801. (in Chinese)