

对称双斜桩基础水平承载力模型试验研究

吕凡任, 邵红才, 金耀华

(扬州职业大学 土木工程系, 江苏 扬州 225009)

摘要: 对称双斜桩基础是斜桩基础用于建筑物(构筑物)基础的基本形式。通过桩身对竖向的倾角分别为 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 的模型试验, 研究水平荷载作用下对称双斜桩基础的承载力特点, 并采用比例系数的方法分析了双斜桩基础承载力与双直桩基础承载力之间的比例关系。研究发现: 随着桩身倾角的增加, 对称双斜桩基础的水平承载力逐渐增加, 但其增加幅度逐渐减小; 该试验条件下, 斜桩与直桩水平荷载承载能力的比例系数从 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 分别为1, 2.2, 2.3, 3.0, 3.5。

关键词: 斜桩; 群桩; 模型试验; 水平承载力

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5485(2013)02-0067-04

1 斜桩基础及应用

斜桩基础主要用于水平荷载较大的建筑物(构筑物)基础, 如桥梁、港口码头、大型广场式建筑、输电线路等高耸建筑物(构筑物)的基础。研究发现, 桩顶自由时的“正斜”斜桩的水平承载力小于“负斜”斜桩^[1], 桩顶只能水平移动的“正斜”斜桩的水平承载力大于“负斜”斜桩^[2]。研究还发现, 竖向荷载作用下的斜桩, 其承载力不一定比直桩基础的小^[3-4]。

工程中斜桩通常对称设置。一般认为斜桩承担水平荷载的原理是把水平荷载转化为轴向荷载和径向荷载, 而桩的轴向承载能力远大于径向承载能力, 所以采用斜桩基础可以充分发挥其轴向荷载的承载能力, 这样设计出来承担水平荷载的桩是“正斜”斜桩。郑震^[5]基于此, 把承担水平荷载的群桩基础设计成2个“正斜”斜桩和一个“负斜”斜桩的群桩基础, 而承载力计算则采用结构力学的方法。通常认为斜桩群桩有利于承担倾斜荷载和交变荷载。原型试验^[6-7]及数值分析^[8-10]表明, 水平荷载作用下斜桩群桩基础的承载力比直桩群桩基础大。斜桩群桩用于抗震时, 其水平承载力比直桩群桩基础大^[11-13]。

对称布置的斜桩基础, 大多用于承担水平荷载以及水平交替荷载。但斜桩基础的水平承载力特点

仍需要研究, 本文通过模型试验, 比较不同倾角对称双斜桩基础的水平承载力特点。

2 试验装置及方法

桩基模型试验装置包括装砂装置、筛砂装置、模型槽以及整个装置的支架等^[2-3]。首先把砂土装入装砂装置, 提到一定高度后倒入筛砂装置, 筛砂装置周期性地振动, 把砂土筛入模型槽, 模型槽中放入模型桩、模拟桩基础。

模型桩采用铝合金管模拟, 铝合金管长度1 m、外径28 mm、壁厚1 mm。双桩模型的桩顶承台采用一块钢板制作(图1)。作为承台的桩顶钢板两端的中间开出矩形槽, 以便在槽中安装插销; 该插销的一端插入桩头的矩形槽, 另一端插入作为模型桩的铝合金管内, 模型桩桩顶外用环形薄铁片箍紧、加固。两端的矩形槽上下部各开2个孔。插销上部开1—5号共5个孔, 中部开1个孔。插销上部的5个孔分别与桩顶钢板上的孔对正, 用销钉连接。插销中部的1个孔同作为承台的钢板下部的1个孔对正, 插入销钉, 桩身可以绕该销钉转动。承台上部的钻孔依次对正插销上部的1—5号孔, 插入销钉, 对应的桩身对竖向的倾角分别为 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 。

该试验用砂土的颗粒级配曲线如图2所示。从图2可以看出, 该砂土的不均匀系数为2.29, 曲率系数为1.01, 属于粉砂土。砂土的含水量0.32%, 黏聚

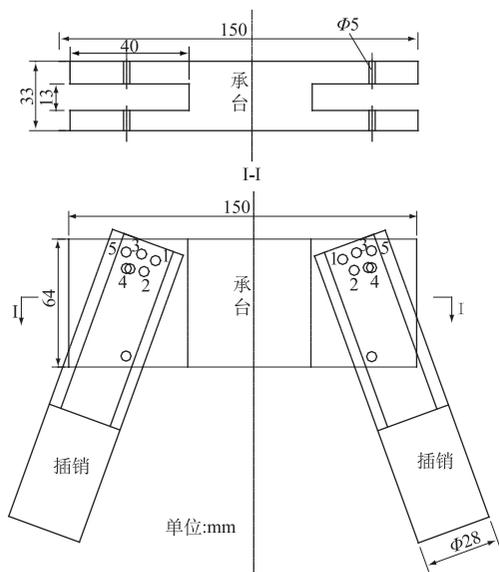


图1 对称双斜桩桩顶承台示意图

Fig.1 Schematic of model pile cap of symmetrically inclined double piles

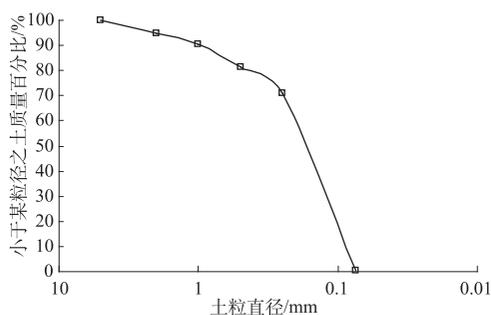


图2 砂土颗粒级配曲线

Fig.2 Grading curve of sand

力 0 kPa, 内摩擦角 12° , 最大干密度 1733.8 kg/m^3 , 最小干密度 1414.6 kg/m^3 。试验中装入模型槽的砂土的平均密度是 1632.6 kg/m^3 , 颗粒相对密度平均为 2.66, 孔隙比为 0.635, 相对密实度为 0.708, 处于密实状态。

本模型试验装置水平荷载采用定滑下施加砝码进行加载。桩顶位移采用百分表测量, 测量变形可以精确到 0.001 mm, 完全满足桩基模型试验的要求。

水平荷载试验(图3)时, 先把斜桩倾角 β 设置为 0° , 再装砂、预埋桩, 桩顶与模型槽顶面平齐; 接着装砂, 至砂土与桩顶面相平时停止装砂; 然后在桩顶施加水平荷载, 用 2 个百分表在两侧分别测量桩顶水平位移, 至该试验结束。把砂土卸除, 再把斜桩倾角 β 设置为 5° , 预

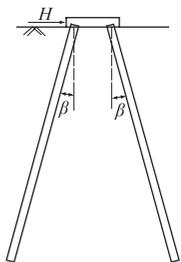


图3 对称双斜桩模型试验示意图

Fig.3 Schematic of symmetrically inclined double-pile model

埋桩, 重复上次的工作, 直至该次试验结束。如此循环, 至水平荷载试验结束。把斜桩倾角分别设置为 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 共 5 种不同倾角, 即 5 个水平荷载试验。每个试验, 第一天上午 11:00 左右装砂完成, 第二天上午 8:30 左右开始试验。

根据以往单桩试验结果^[2-3], 估计双桩的极限承载能力, 按照 15 个加载级别设置加载, 其中第 1 级加载级别为其他加载级别的 2 倍。每级加载后即读取桩顶水平位移, 然后间隔 10 min 读 1 次, 至位移增加趋势降低时再读取 2 次, 水平位移增加趋势继续降低时即施加下一级荷载。每级荷载持续时间至少为 30 min。

3 试验结果及分析

水平荷载 H 作用下对称双桩模型试验(图3)共做了 5 组, 桩身对竖向的倾角 β 分别为 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 。桩顶水平荷载 - 水平位移试验曲线如图 4 所示。

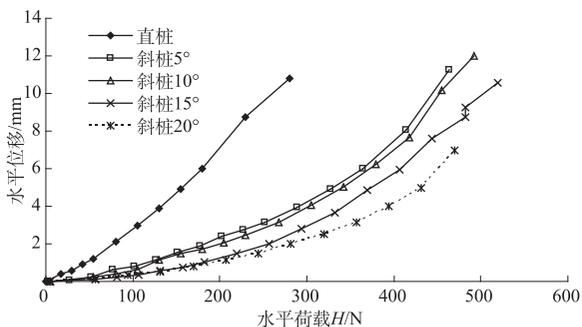


图4 对称双桩水平荷载模型试验曲线

Fig.4 Test curves of horizontal load vs. horizontal displacement of symmetrically inclined double-pile model

从图4可以看出: 同样的水平荷载作用下, 双直桩基础的水平位移最大, 随着斜桩对竖向倾角的增加, 其水平位移逐渐减小。表明: 水平荷载作用下随着倾角增加, 其水平承载力逐渐增加, 这同文献[6-10]的研究成果相一致。从图4还可以看出, 对于双斜桩基础, 当斜桩对竖向的倾角在 $5^\circ \sim 20^\circ$ 范围内变化时, 其水平承载力随桩身倾角增加而增加的幅度较小。

以双直桩基础的水平荷载 - 水平位移曲线为标准, 把斜桩基础水平荷载分别除以一个系数 k_h , 得到新的水平荷载 - 水平位移曲线(图5), 即

$$k_h = H/H' \quad (1)$$

式中: H 表示双斜桩的水平荷载; H' 表示直桩的水平荷载; k_h 表示斜桩与直桩水平荷载承载能力的比例系数。本试验的数据处理中以双直桩基础开始阶段

的线性段曲线为标准,分析其他双斜桩的水平荷载-水平位移曲线,使得处理后的双斜桩曲线开始段与双直桩曲线的开始段基本一致。对于倾角为 5° 的对称双斜桩基础,把水平荷载除以系数 2.2,得到的比例曲线在开始阶段同对称双直桩基础曲线开始阶段较接近,见图 5(a),即可得倾角为 5° 时, $k_h = 2.2$ 。采用类似的办法,分别得到 10°, 15° 和 20° 的对称双斜桩基础的比例关系曲线,分别如图 5(b)、(c) 和 (d) 所示。即对应竖向的倾角分别为 5°, 10°, 15° 和 20° 的对称双斜桩基础,其水平荷载的比例系数 k_h 分别为 2.2, 2.3, 3.0, 3.5。

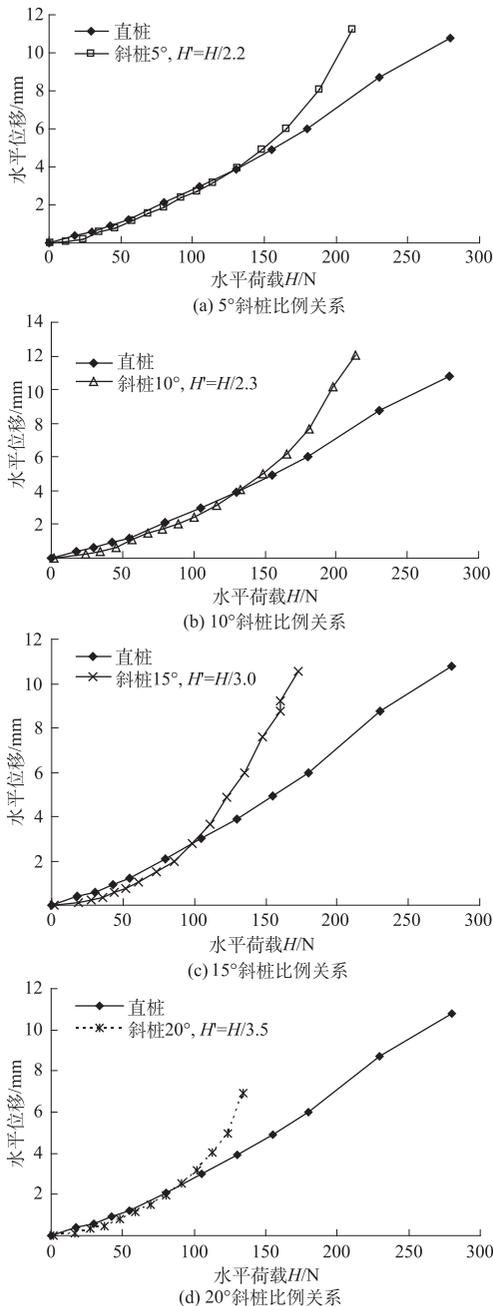


图 5 对称双桩水平荷载模型试验曲线比例关系

Fig. 5 Proportional relationship of the test curves of symmetrically inclined double piles subjected to horizontal load

把对称双桩水平荷载试验曲线的比例系数 k_h 随倾角的变化关系表示在图 6 中,其中双直桩基础的比例系数为 1。对该曲线采用二次曲线拟合,得到

$$k_h = 1.1257 + 0.1617\beta - 0.0023\beta^2, \quad (2)$$

拟合相关系数 $R^2 = 0.9524$ 。

从图 6 可以看出,对称双斜桩基础随着斜桩对竖向的倾角从 0° 增加到 20°, 其水平承载力呈现出逐渐增加的趋势,从拟合曲线看,随着倾角的增加其增加的幅度逐渐降低。

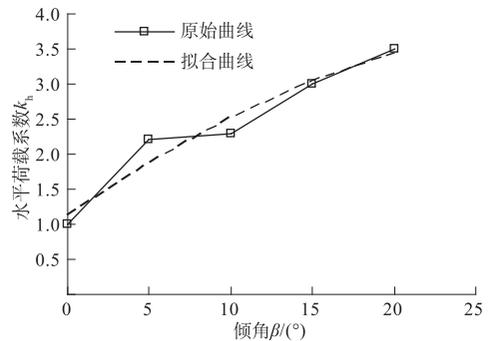


图 6 对称双斜桩基础水平荷载试验比例系数变化曲线
Fig. 6 Original and fitted curves of proportionality factor vs. inclination of symmetrically inclined double piles subjected to horizontal load

4 结论与建议

对称双斜桩基础是斜桩基础用于工程实际的基本形式。本文通过对称双斜桩基础在水平荷载作用下的模型试验,分析桩身对竖向的倾角从 0° 增加至 5°, 10°, 15°, 20° 条件下的水平承载力特点,采用比例系数的方法分析了双斜桩基础承载力同双直桩基础承载力之间的比例关系。

本模型试验研究得到以下一些主要结论:对称双斜桩基础随着桩身对竖向的倾角从 0° 增加至 5°, 10°, 15°, 20°, 其水平承载力逐渐增加,但增加的幅度逐渐减小;在该试验条件下,斜桩与直桩水平荷载承载能力的比例系数,从 0°, 5°, 10°, 15°, 20° 分别为 1, 2.2, 2.3, 3.0, 3.5。

致谢:该试验是在土木系老师的协助以及学生蒋其甫、何龙、丁超、秦国俭等的辛勤劳动下完成的,在此表示感谢!

参考文献:

[1] ZHANG L M, MCVAY M C, LAI P. Centrifuge Modelling of Laterally Loaded Single Battered Piles in Sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36 (6): 1074 - 1084.
[2] LV Fan-ren, YIN Ji-ming, JIN Yao-hua, et al. Study on

- Lateral Bearing Capacity of Batter Pile under Different Constraints at Pile Head by Model Experiments [C] // Key Technologies of Railway Engineering High-speed Railway-Heavy Haul and Urban Rail Transit. Beijing: China Railway Publishing House, 2010:533-536.
- [3] LV Fan-ren, YIN Ji-ming, JIN Yao-hua. Study on Load-Displacement of Batter Pile under Vertical Load by Model Experiments [C] // 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), Lushan, Jiangxi Province, April 22 - 24, 2011: 3506 - 3509.
- [4] 郑刚, 王丽. 竖向荷载作用下倾斜桩的荷载传递性状及承载力研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 323 - 330. (ZHENG Gang, WANG Li. Load Transfer and Bearing Capacity of Inclined Pile under Vertical Load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 323 - 330. (in Chinese))
- [5] 郑震. 大水平力作用下群桩基础计算 [J]. 工业建筑, 2007, 37(增刊): 810 - 812. (ZHENG Zhen. Calculation of Group-piled Foundation Under Large Horizontal Forces [J]. Industrial Construction, 2007, 37(Sup.): 810 - 812. (in Chinese))
- [6] 赵学勤, 李达祥, 王安玲, 等. 组合斜孔桩变形机理的试验研究 [C] // 中国土木工程学会. 第三届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. (ZHAO Xue-qin, LI Da-xiang, WANG An-ling, *et al.* Experimental Study on Combined Battle Piles about Deformation Mechanism [C] // China Civil Engineering Society. Proceedings of the 3rd Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference. Beijing: China Building Industry Press, 1981. (in Chinese))
- [7] 靳彩, 赵瑜, 李凤兰, 等. 送电线路铁塔复合式斜桩基础试验研究 [J]. 工业建筑, 2001, 31(9): 45 - 47, 60. (JIN Cai, ZHAO Yu, LI Feng-lan, *et al.* Experimental Research on Complex Inclined Pile Foundation for Power Line Tower [J]. Industrial Construction, 2001, 31(9): 45 - 47, 60. (in Chinese))
- [8] 姜春林, 高永涛. 倾角对复合锚固桩水平承载力影响浅析 [J]. 交通科技, 2007, (6): 37 - 40. (JIANG Chun-lin, GAO Yong-tao. Study on Effect of Inclination to Horizontal Bearing Capacity of Anchor-piles [J]. Transportation Science & Technology, 2007, (6): 37 - 40. (in Chinese))
- [9] KITAYODOM P, MATSUMOTO T. A Simplified Analysis Method for Piled Raft and Pile Group Foundations with Batter Piles [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26: 1349 - 1369.
- [10] 刘杰伟, 王兴斌, 潘健, 等. 桩群中设置斜桩对其工作性质影响的研究 [J]. 昆明理工大学学报 (理工版), 2008, 33(1): 56 - 59. (LIU Jie-wei, WANG Xing-bin, PAN Jian, *et al.* Study on Effects of Construction of Raked Piles in a Pile Group [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2008, 33(1): 56 - 59. (in Chinese))
- [11] SON Q T, HASSEN G, DE BUHAN P. A Three-phase Model for Evaluating the Seismic Resistance of Soils Reinforced by a Network of Symmetrically Inclined Piles [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(4): 545 - 554.
- [12] ESCOFFIER S, CHAZELAS J L, GARNIER J. Centrifuge Modeling of Raked Piles [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(4): 689 - 704.
- [13] GEROLYMOS N, GIANNAKOU A, ANASTASOPOULOS L, *et al.* Evidence of Beneficial Role of Inclined Piles: Observations and Summary of Numerical Analyses [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(4): 705 - 722.

(编辑: 周晓雁)

Model Test on Bearing Capacity of Symmetrically Inclined Double Piles under Horizontal Load

LV Fan-ren, SHAO Hong-cai, JIN Yao-hua

(Department of Civil Engineering, Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Symmetrically inclined double-pile is a main type of inclined piles in structure's foundation. Model tests were carried out on symmetrically inclined double piles with the pile inclinations of 0° , 5° , 10° , 15° and 20° respectively to investigate the bearing capacity characteristics. The factor of proportionality was employed to analyze the proportional relation between the bearing capacity of inclined double piles and that of vertical double piles. The study indicates that as the pile inclination increases, the horizontal bearing capacity of inclined double piles increases, whereas the increasing rate slowed down gradually. Under the test conditions, when the inclination angle of inclined pile was 0° , 15° , 10° , 15° and 20° , the horizontal bearing capacity ratio of inclined pile to vertical pile was 1, 2.2, 2.3, 3.0, 3.5, respectively.

Key words: inclined pile; group piles; model test; horizontal bearing capacity